

ICS 93. 160

P 55

**SL**

中华人民共和国水利行业标准

**SL 74—2013**

替代 SL 74—95

---

# 水利水电工程钢闸门设计规范

Design code for steel gate in water resources  
and hydropower projects

2013-08-26 发布

2013-11-26 实施

---

中华人民共和国水利部 发布

中华人民共和国水利部  
关于批准发布水利行业标准的公告  
(水利水电工程钢闸门设计规范)

2013 年第 41 号

中华人民共和国水利部批准《水利水电工程钢闸门设计规范》  
(SL 74—2013)为水利行业标准，现予以公布。

序号	标准名称	标准编号	替代标准号	发布日期	实施日期
1	水利水电工程 钢闸门设计规范	SL 74—2013	SL 74—95	2013. 8. 26	2013. 11. 26

水利部  
2013 年 8 月 26 日

## 前 言

根据水利部水利行业标准制修订计划，按照《水利技术标准编写规定》（SL 1—2002）的要求，对《水利水电工程钢闸门设计规范》（SL 74—95）进行修订。

本标准共 9 章和 14 个附录，主要技术内容有：

- 总体布置；
- 荷载、材料及容许应力；
- 结构设计、零部件设计、埋件设计；
- 启闭力和启闭机。

本次修订的主要内容有：

- 修改了荷载的划分及组合；
- 增加了 Q390 钢等材料品种；
- 调整了材料的允许应力；
- 扩大了螺栓的应用；
- 增加了船闸的内容；
- 增加了施工导流的内容；
- 扩大了抽水蓄能电站的内容；
- 丰富了附录的内容。

本标准中的强制性条文有：3.1.4 条、3.1.9 条。以黑体字标识，必须严格执行。

本标准所替代标准的历次版本为：

- SL 74—95

本标准批准部门：中华人民共和国水利部

本标准主持机构：水利部水利水电规划设计总院

本标准解释单位：水利部水利水电规划设计总院

本标准主编单位：中水东北勘测设计研究有限责任公司

本标准出版、发行单位：中国水利水电出版社

本标准主要起草人：崔元山 马 军 李大伟 陆 阳

马会全 胡艳玲 田连治 何运林

本标准审查会议技术负责人：温续余 姚宇坚

本标准体例格式审查人：曹 阳

## 目 次

1	总则	1
2	术语	4
3	总体布置	6
3.1	一般规定	6
3.2	泄水系统	8
3.3	引水发电系统	10
3.4	水闸、泵站系统	11
3.5	施工导流系统	12
3.6	船闸系统	12
4	荷载	14
5	材料及容许应力	16
5.1	材料	16
5.2	容许应力	18
6	结构设计	24
6.1	结构布置	24
6.2	结构计算	28
6.3	拦污栅	30
7	零部件设计	32
7.1	一般规定	32
7.2	行走支承	32
7.3	吊耳、吊杆、锁定	33
7.4	止水装置	34
7.5	焊接和螺栓连接	35
8	埋件设计	37
9	启闭力和启闭机	39
9.1	启闭力计算	39

9.2 启闭机选择	42
9.3 自动挂脱梁	43
附录 A 闸门孔口尺寸和设计水头系列标准	44
附录 B 通气孔面积的计算	48
附录 C 平面闸门门槽型式的选择	50
附录 D 闸门荷载计算的主要公式	53
附录 E 闸门橡胶水封定型尺寸及性能	58
附录 F 几种支承材料性能表	61
附录 G 受弯构件的局部稳定计算	63
附录 H 面板验算公式及图表	67
附录 I 栅条稳定临界荷载计算	73
附录 J 栅条振动计算	74
附录 K 滚轮接触应力计算	76
附录 L 吊耳与吊杆的计算	78
附录 M 轨道的计算	80
附录 N 摩擦系数	83
标准用词说明	84
条文说明	85

# 1 总 则

**1.0.1** 为贯彻执行国家的技术经济政策，规范水利水电工程钢闸门设计，做到安全可靠、技术先进、经济合理，制定本标准。

**1.0.2** 本标准适用于大中型水利水电工程钢闸门及拦污栅的设计。小型水利水电工程可参照执行。

**1.0.3** 水利水电工程的钢闸门，按其工作性质可分为工作闸门、事故闸门和检修闸门。

1 工作闸门是承担主要工作并能在动水中启闭的闸门。

2 事故闸门是闸门的下游（或上游）发生事故时，能在动水中关闭的闸门。当需要快速关闭时，也称为快速闸门。这种闸门，在静水中开启。

3 检修闸门是水工建筑物及设备检修时用以挡水的闸门。这种闸门，在静水中启闭。

**1.0.4** 设计闸门时，应根据具体情况分别具备下列有关资料：

- 水利枢纽的任务和水工建筑物的布置；
- 闸门的孔口尺寸和运用条件；
- 水文、泥沙、水质、冰情、漂浮物和气象方面的情况；
- 闸门的材料、制造、运输和安装方面的条件；
- 地震及其他特殊要求等。

**1.0.5** 闸门孔口尺寸和设计水头的选定，应符合附录 A 的规定。

**1.0.6** 应采用容许应力方法进行结构验算。

**1.0.7** 本标准的引用标准主要有以下标准：

- 《优质碳素结构钢》（GB/T 699）
- 《碳素结构钢》（GB/T 700）
- 《锅炉和压力容器用钢板》（GB 713）

- 《桥梁用结构钢》(GB/T 714)
- 《不锈钢焊条》(GB/T 983)
- 《铸造铜合金技术条件》(GB/T 1176)
- 《钢结构用高强度大六角头螺栓》(GB/T 1228)
- 《钢结构用高强度大六角螺母》(GB/T 1229)
- 《钢结构用高强度垫圈》(GB/T 1230)
- 《钢结构用高强度大六角头螺栓、大六角螺母、垫圈技术条件》(GB/T 1231)
- 《低合金高强度结构钢》(GB/T 1591)
- 《塑料和硬橡胶使用硬度计测定压痕硬度（邵氏硬度）》(GB/T 2411)
- 《合金结构钢》(GB/T 3077)
- 《不锈钢冷轧钢板和钢带》(GB/T 3280)
- 《塑料 硬度测定》(GB/T 3398)
- 《钢结构用扭剪型高强度螺栓连接副》(GB/T 3632)
- 《不锈钢热轧钢板》(GB/T 4237)
- 《碳钢焊条》(GB/T 5117)
- 《低合金钢焊条》(GB/T 5118)
- 《灰铸铁件》(GB/T 9439)
- 《一般工程用铸造碳钢件》(GB/T 11352)
- 《水利水电工程钢闸门制造、安装及验收规范》(GB/T 14173)
- 《滑动轴承 铜合金镶嵌固体润滑轴承》(GB/T 23894)
- 《钢结构设计规范》(GB 50017)
- 《水工金属结构防腐蚀规范》(SL 105)
- 《水工混凝土结构设计规范》(SL 191)
- 《水工建筑物抗震设计规范》(SL 203)
- 《水工建筑物荷载设计规范》(DL 5077)
- 《抽水蓄能电站设计导则》(DL/T 5208)
- 《船闸闸阀门设计规范》(JTJ 308)
- 《船闸启闭机设计规范》(JTJ 309)

《大型低合金钢铸件》(JB/T 6402)

**1.0.8** 水利水电工程钢闸门设计除应符合本标准的规定外，尚应符合国家现行标准的规定。

## 2 术 语

### 2.0.1 平面闸门 plain gate

一般能沿直线升降启闭、具有平面挡水面板的闸门。

### 2.0.2 弧形闸门 radial gate

启闭时绕水平支铰轴转动、具有弧形挡水面板的闸门。

### 2.0.3 定轮闸门 fixed roller gate

闸门边梁上装设定轮作为支承行走部件的平面闸门。

### 2.0.4 滑动闸门 sliding gate

闸门边梁上装有滑道或滑块作为支承行走部件的平面闸门。

### 2.0.5 人字闸门 mitre gate

由两扇能绕其端部的竖轴转动的门叶组成的、门叶开启后分别隐入闸首的门龕内、关闭后其平面呈人字形的船闸闸门。

### 2.0.6 门叶 gate leaf

闸门上用于直接挡水的结构部件。

### 2.0.6 止水装置 water seal

闸门关闭后阻止门叶周边间隙漏水的装置。

### 2.0.7 充水阀 filling valve

附设在闸门门叶上、用于向门后充水使闸门前后水压力平衡的阀门。

### 2.0.8 拦污栅 trash rack

用于拦阻水流中的飘浮物进入引水道的过水栅条结构物。

### 2.0.9 门槽 gate slot

在过流孔口的两侧、用于约束闸门门叶运动位置的凹槽。

### 2.0.10 门楣 lintel

闸门孔口顶部的埋件。

### 2.0.11 底槛 embedded sill

闸门孔口门槽底部的埋件。

**2.0.12 主轨 main track**

门槽中承受闸门滑块或主轮等传来的力，并将其传递给坝体或闸墩的轨道。

**2.0.13 副轨 auxiliary track**

门槽中主轨以上部分的轨道。

**2.0.14 反轨 opposed track**

门槽中承受闸门反向支承传来的力，并将其传递给坝体或闸墩的轨道。

**2.0.15 侧轨 side track**

门槽中承受闸门侧向支承传来的力，并将其传递给闸墩的轨道。

**2.0.16 启闭机 hoist**

用于启闭闸门或阀门的机械。

**2.0.17 自动挂脱梁 automatic hooking and hoisting beam**

一种能自动连接闸门和启闭机的梁式起重部件。

**2.0.18 锁定装置 dog device**

将闸门门叶固定于闸孔某一位置的装置。

## 3 总体布置

### 3.1 一般规定

**3.1.1** 闸门应布置在水流较平顺的部位，并应避免出现以下情况：

- 门前横向流和漩涡；
- 门后淹没出流和回流；
- 闸门底部和闸门顶部同时过水；
- 闸门井与孔口同时过水。

**3.1.2** 闸门型式的选择应根据下列因素综合考虑确定：

- 水利枢纽对闸门运行的要求；
- 闸门在水工建筑物中的位置、孔口尺寸、上下游水位、操作水头和门后水流流态；
- 泥沙和漂浮物的情况；
- 启闭机的型式、启闭力和挂脱钩方式；
- 制造、运输、安装、维修和材料供应等条件；
- 技术经济指标。

**3.1.3** 泄水和水闸系统中的多孔口工作闸门，当需短时间内全部开启或均匀泄水时，应选用固定式启闭机。

**3.1.4** 具有防洪功能的泄水和水闸系统工作闸门的启闭机应设置备用电源。

**3.1.5** 两道闸门之间或闸门与拦污栅之间的最小净距应满足门槽混凝土强度与抗渗、启闭机布置与运行、闸门安装与维修和水力学条件等因素的要求，且不宜少于 1.50m。

**3.1.6** 检修闸门或事故闸门的设置数量应根据孔口数量、工程和设备的重要性、施工安装条件和工作闸门的使用状况、维修条件等因素综合考虑。

对泄水和水闸系统的检修闸门，10 孔以内的宜设置 1~2

扇；10孔以上的每增加10孔宜增设1扇。

对引水发电系统，3~6台机组宜设置尾水检修闸门2套，进口检修闸门1套；6台机组以上，每增加4~6台宜各增设1套。

特殊情况，经论证可予增减。

**3.1.7** 露顶式闸门顶部应在可能出现的最高挡水位以上有0.3~0.5m的超高。

**3.1.8** 闸门不得承受冰的静压力。防止冰静压力的方法，应根据气温及库水位变化等条件，因地制宜地选用。可采用冰盖开槽法、冰盖保温板法、压力水射流法、压力空气吹泡法和门叶电热法或其他方法，使闸门与冰层隔开。

需要在冰冻期间操作的闸门，除其止水宜严密外，尚应采取保温或加热等措施，使闸门与门槽不致冻结。

**3.1.9** 当潜孔式闸门门后不能充分通气时，则应在紧靠闸门下游的孔口顶部设置通气孔，其上端应与启闭机室分开，并应有防护设施。

**3.1.10** 通气孔面积应按附录B计算。

**3.1.11** 闸门的平压设施宜采用设置于门体上的充水阀，也可采用节间充水、小开度充水或其他有效设施。平压设施的尺寸应根据充水容积、漏水量和要求充满时间等确定。平压设施应使充水时流态平稳。充水阀体应有足够重量，其导向机构应灵活可靠。节间充水所需的启门力不宜大于整扇闸门的静水启门力。

平压设施的操作应和闸门启闭联动，并应在启闭机上设置小开度的行程开关。

对机组尾水闸门的平压设施宜利用机组排水系统从下游充水。

**3.1.12** 为便于制造、运输和安装，设计时应注意以下因素：

1 考虑制造、安装的具体条件。

2 运输单元应具有必要的刚度，外形尺寸和重量应满足运输的要求。

3 零部件、构件的品种规格应合理地减少，并应采用标准化、定型化的零部件。

4 结构构件的连接宜采用焊接，但应尽量减少现场焊接工作量。为减少拼装变形，闸门节间也可采用销轴或螺栓连接。

**3.1.13** 为便于闸门、拦污栅和启闭机的运行、维修，设计时应符合以下要求：

1 根据当地情况，启闭机可设机罩、机房或机室。位于坝内或地下洞室内的机室，应考虑通风防潮设施。

2 启闭机设置高程和机房尺寸应分别满足闸门和启闭机安装、维修的要求。

3 露顶式闸门，当不能提升到闸墩墩面时，宜在适当高程处设置检修孔或检修台。潜孔式弧形闸门，宜在其胸墙和侧止水导板的适当高程处，设置不小于 800mm 宽的检修台阶。在支铰处宜设检修平台。

4 启闭机室、闸门检修室和检修平台宜有足够的面积和高度。启闭机与机房墙面净距不少于 800mm，各台启闭机之间净距宜大于 600mm，闸门检修室或检修平台在闸门检修时四边净距均不少于 800mm。此外，尚应设置栏杆或盖板，以满足运行、维修及安全的要求。

5 在检修室和启闭机室内，宜埋设必要的吊环和锚钩。

6 检修闸门、备用拦污栅和其他附属设备宜设有存放场所，有条件者可设门库，门库底部应有排水设施。

7 启闭机室和闸门检修室的上、下交通宜设置走梯。

**3.1.14** 根据水质情况、运行条件、设置部位和闸门型式，应对闸门及附属设备采取有效的防腐蚀措施。

## 3.2 泄水系统

**3.2.1** 在溢洪道工作闸门的上游侧宜设置检修闸门；对于重要工程，必要时也可设置事故闸门。当水库水位有足够的连续时间低于闸门底槛，并能满足检修要求时，可不设检修闸门。

**3.2.2** 在泄水孔（洞）工作闸门的上游侧应设置事故闸门。对高水头和长泄水孔（洞）的闸门还应研究在事故闸门前设置检修闸门的必要性。

**3.2.3** 泄水系统工作闸门宜选用弧形闸门，水头较低时也可选用平面闸门。高水头小孔口也可采用其他型式的门（阀）。

**3.2.4** 泄水孔的工作闸门门后宜保持明流，门前的压力段宜保持有一定的收缩率。当泄水隧洞有弯道时，工作闸门宜布置在弯道下游水流平稳的直段上。

**3.2.5** 对于工作闸门在其运行过程中可能产生的空蚀、振动、磨蚀和启闭力等问题应作专门研究。可从通气孔、底缘型式、门槽型式、止水型式和操作方法等方面采取有效措施，以避免或减轻不利影响。必要时，应专门进行模型试验研究。

**3.2.6** 排沙孔（洞）宜用进口闸门挡沙，且宜采用上游面板和上游止水。门槽和水道边界应光滑平整，并选用合适的抗磨材料加以防护。根据排沙闸的具体条件，必要时可设高压水枪，以便冲沙启门。

**3.2.7** 对于潜孔式弧形闸门，门楣上应设置防射水封。当水头超过 85m 时，宜选用设有突扩门槽的压紧式或充压式止水的弧形闸门，并设置辅助止水。经常作变幅局部开启操作的高水头弧形闸门，宜选用压紧式止水。其突扩突跌门槽体型及尺寸应通过水力学模型试验确定。

**3.2.8** 当选用平面闸门时应采用合理的门槽型式。门槽型式应符合附录 C 的规定。对高水头平面闸门，可采取以下门槽减蚀措施：

- 1 力求减少门槽段初生空化数、增大水流空化数。
- 2 设置补气孔使水流掺气。
- 3 采用高抗空蚀性能护面，如钢板衬砌或高强混凝土衬砌等。

**3.2.9** 泄水建筑物出口处采用锥形阀时，应考虑喷射水雾对附近建筑物的影响和阀的检修条件。

### 3.3 引水发电系统

**3.3.1** 当机组或钢管要求闸门作事故保护时，对坝后式电站，其进水口应设置快速闸门和检修闸门；对引水式电站，除在明管及水轮机前不设进水阀的地下埋管首端设置快速闸门外，宜在长引水道进口处设置事故闸门。

河床式水电站，当机组有可靠防飞逸装置，其进水口宜设置事故闸门和检修闸门。经过论证，事故闸门具备检修条件，也可不设置检修闸门。

**3.3.2** 对设于调压井中的事故闸门，应考虑涌浪对闸门停放和下降的影响。必要时，应进行专门研究。

**3.3.3** 快速闸门关闭时间应满足对机组和钢管的保护要求，在接近底槛时其下降速度不宜大于 5m/min。

快速闸门启闭机应能就地操作和远方闭门，并应配有可靠电源和准确的开度指示控制器。

**3.3.4** 电站进水口拦污栅应设有可靠的水位差检测装置，事故闸门、检修闸门也可设水位差检测装置。

**3.3.5** 拦污设施的布置型式应根据河流中污物的种类、数量及对清污的要求等来确定。

在污物较少的地区，可设置一道拦污栅。

在污物较多的河流，应设置有效的清污设施及卸污设施，必要时可设两道拦污栅槽，并设置适当的备用栅或采用连通式布置。

拦污栅均宜设置可靠的清污平台。

在寒冷地区，必要时应采取有效措施，以防止栅条结冰或冰屑堵塞。

**3.3.6** 抽水蓄能电站的拦污栅、闸门和启闭机布置，应符合 DL /T 5208 要求。

**3.3.7** 对贯流式机组电站，进水口应设置拦污栅、检修闸门（或事故闸门），尾水出口应设置事故闸门（或检修闸门）。拦污

栅设计应采取减少水头损失的措施，污物较多时应设清污机，必要时可设置拦污排。

### 3.4 水闸、泵站系统

**3.4.1** 水闸、泵站系统的工作闸门型式应根据工程特点因地制宜地灵活选用。可采用平面闸门、弧形闸门、拱形闸门、翻板式闸门、升卧式闸门、双扉闸门及其他型式的闸（阀）门等。

**3.4.2** 各类水闸工作闸门的上游侧，宜设置检修闸门，对特别重要的进洪闸或泄洪闸等可设置事故闸门。当下游水位经常淹没底槛时，应研究设置下游检修闸门的必要性。检修闸门的型式，可选用平面闸门、叠梁、浮式叠梁和浮箱闸门等。

**3.4.3** 闸门的选型和布置应根据闸门的受力条件、控制运用要求和闸室结构布置等因素选定。

需用闸门控制泄水的水闸宜采用弧形闸门。

有排冰、过木等要求的水闸，宜采用舌瓣闸门、下沉式闸门等。

当采用分离式底板时，宜采用平面闸门。如采用弧形闸门，应考虑闸墩间可能的不均匀沉陷对闸门的影响。

有通航或抗震要求的水闸，宜采用升卧式或双扉式闸门。

**3.4.4** 水位变化频率较快且泥沙淤积轻微，或有专门要求的河流上，可采用水力操作闸门，但应考虑闸门的水力学问题和闸门检修时的排水放空设施。对于防洪排涝及有控泄要求的工程，不宜采用水力操作闸门。

**3.4.5** 挡潮工作闸门，宜启闭迅速，闸门的面板应布置于迎海水侧，宜采用双向止水。

**3.4.6** 排灌闸工作闸门的支承、止水及底缘型式应考虑双向水压力作用。

**3.4.7** 在有较大涌潮或风浪的枢纽工程中，当采用潜孔弧形闸门且上游水位有时低于门楣时，应在进口胸墙段上设排气孔。

**3.4.8** 泵站进口应设拦污栅、检修闸门。出口断流方式，可选

用拍门或平面快速闸门，在出口应设置事故闸门或经论证设置检修闸门。根据当地污物特点，必要时，进口亦可设两道拦污栅和清污机。

### 3.5 施工导流系统

**3.5.1** 施工导流孔（洞）封堵闸门应布置在进水口处，并结合工程施工期和初期发电的各种运行工况和水位确定安装平台的高程，有条件时宜回收闸门或启闭机并考虑与永久性设备共用的可能性。

**3.5.2** 封堵闸门的设计应考虑下闸过程中，在一定水头下动水启门的情况。

### 3.6 船闸系统

**3.6.1** 闸门和阀门型式，应根据通过能力、通航净空、孔口尺寸、水位组合、水力学条件和水工建筑物型式等因素，通过技术经济比较选定。

**3.6.2** 船闸上、下闸首应设置工作闸门和检修闸门。当工作闸门失事可能引起严重后果时，上闸首应设置事故闸门。闸门的设置不应影响船闸的有效尺寸。

**3.6.3** 船闸输水廊道应设置工作闸（阀）门，其上、下游宜设置检修闸门，根据需要可设置拦污栅。

**3.6.4** 船闸承受单向水头，静水启闭的工作闸门、中高水头的工作闸门宜选用人字闸门；承受双向水头动水启闭或局部开启输水的工作闸门宜选用三角闸门；承受双向水头静水启闭的工作闸门宜选用横拉闸门；有帷墙的上闸首、井式船闸或动水启闭的工作闸门宜选用升降式平面闸门。

**3.6.5** 船闸输水系统工作闸（阀）门，当船闸水头小于10m时宜选用升降式平面闸（阀）门；当船闸水头为10~20m时宜选用升降式平面闸（阀）门或反向弧形闸（阀）门；当船闸水头大于20m时宜选用反向弧形闸（阀）门。

**3.6.6** 船闸检修闸门可根据闸首的布置及检修闸门的存放、启吊和运转等条件选用叠梁闸门、升降式闸门或浮式闸门等。

**3.6.7** 船闸启闭机宜布置在设计最高通航水位以上，并应考虑检修方便。启闭机布置不应影响船闸的通航净空尺寸。

**3.6.8** 船闸启闭机的选用应根据闸门的型式与使用工况确定。对上、下闸首人字闸门可选用液压或机械式启闭机，对输水廊道工作闸（阀）门可选用液压或固定卷扬式启闭机，并应考虑环保和景观要求。

**3.6.9** 船闸闸（阀）门及启闭机设计应符合 JTJ 308、JTJ 309 的相关规定。

## 4 荷 载

**4.0.1** 作用在闸门上的荷载可分为基本荷载和特殊荷载两类。

**1** 基本荷载主要有下列各项：

- 闸门自重（包括加重）；
- 设计水头下的静水压力；
- 设计水头下的动水压力；
- 设计水头下的波浪压力；
- 设计水头下的水锤压力；
- 淤沙压力；
- 风压力；
- 启闭力；
- 地震荷载；
- 其他出现机会较多的荷载。

**2** 特殊荷载主要有下列各项：

- 校核水头下的静水压力；
- 校核水头下的动水压力；
- 校核水头下的波浪压力；
- 校核水头下的水锤压力；
- 风压力；
- 冰、漂浮物和推移物的撞击力；
- 启闭力；
- 地震荷载；
- 其他出现机会很少的荷载。

**4.0.2** 闸门有特殊要求时（如水下爆破等），应专门研究作用在闸门上的荷载。

**4.0.3** 高水头下经常动水操作的工作闸门或经常局部开启的工作闸门，设计时应考虑闸门各部件承受不同程度的动力荷载，可

按闸门不同型式及其水流条件，并将作用在闸门不同部件上的静荷载分别乘以不同的动力系数来考虑。动力系数值宜取 1.0~1.2。对露顶式弧门主梁与支臂宜取 1.1~1.2。

大型工程中水流条件复杂的重要工作闸门，其动力系数应作专门研究。

当进行闸门刚度验算时，不应考虑动力系数。

**4.0.4 设计闸门时，应将可能同时作用的各种荷载进行组合。荷载组合分为基本组合和特殊组合两类。基本组合由基本荷载组成，特殊组合由基本荷载和一种或几种特殊荷载组成，荷载组合应按表 4.0.4 采用。**

**表 4.0.4 荷载组合表**

荷载组合	计算情况	荷 载										说明		
		自重	静水压力	动水压力	波浪压力	水锤压力	淤沙压力	风压力	启闭力	地震荷载	撞击力		其他出现机会较多荷载	其他出现机会很少荷载
基本组合	设计水头情况	√	√	√	√	√	√	√	√			√		按设计水头组合计算
	地震情况	√	√	√	√	√	√	√		√				按设计水头组合计算
特殊组合	校核水头情况	√	√	√	√	√	√	√	√	√			√	按校核水头组合计算
	地震情况	√	√	√	√		√	√		√				按校核水头组合计算

注：√表示采用。

**4.0.5 作用在闸门上的荷载，按附录 D 和 9.1 节的规定计算。**

## 5 材料及容许应力

### 5.1 材 料

**5.1.1** 闸门承载结构的钢材应根据闸门的性质、操作条件、连接方式、工作温度等不同情况选择其钢号和材质，其质量标准应分别符合 GB/T 700、GB/T 1591、GB 713、GB/T 714 规定的要求，并根据不同情况按表 5.1.1 选用。

表 5.1.1 闸门及埋件常用钢号

项次	使用条件		工作温度 $t$ (°C)	钢号
1	闸门部分	大型工程的工作闸门、大型工程的重要事故闸门、局部开启的工作闸门	$t > 0$ $-20 < t \leq 0$ $t \leq -20$	Q235B、Q345B、Q390B Q235C、Q345C、Q390D Q235D、Q345D、Q390E
2		中、小型工程不作局部开启的工作闸门，其他事故闸门	$t > 0$ $-20 < t \leq 0$ $t \leq -20$	Q235B、Q345B Q235C、Q345C Q235D、Q345D
3		各类检修闸门，拦污栅	$t \geq -30$	Q235B、Q345B
4	埋件部分	主要受力埋件	—	Q235B、Q345A、Q345B
5		按构造要求选择的埋件	—	Q235A、Q235B
注 1：当有可靠根据时，可采用其他钢号。对无证明书的钢材，经试验证明其化学成分和力学性能符合相应标准所列钢号的要求时，可酌情使用。 注 2：非焊接结构的钢号，可参照本表选用。 注 3：大型工程指 I 等、II 等工程；中型工程指 III 等工程；小型工程指 IV 等、V 等工程。				

**5.1.2** 闸门承载结构的钢材应保证其抗拉强度、屈服强度、伸长率和硫、磷的含量符合要求，对焊接结构尚应保证碳的含量符合要求。

主要受力结构和弯曲成形部分钢材应具有冷弯试验的合格

保证。

承受动载的焊接结构钢材应具有相应计算温度冲击试验的合格保证。

承受动载的非焊接结构，必要时，其钢材也应具有冲击试验的合格保证。

**5.1.3** 闸门支承结构（包括主轨）的铸钢件可采用 GB/T 11352 规定的 ZG 230—450、ZG 270—500、ZG 310—570、ZG 340—640 等铸钢，也可采用 JB/T 6402 规定的 ZG50Mn2、ZG35Cr1Mo、ZG34Cr2Ni2Mo 等合金铸钢。

**5.1.4** 闸门所采用的铸铁件应符合 GB/T 9439 规定的各项要求。

**5.1.5** 闸门的吊杆轴、连接轴、主轮轴、支铰轴和其他轴可采用 GB/T 699 规定的 35 号、45 号钢，也可采用 GB/T 3077 规定的 40Cr、42CrMo 合金结构钢。

**5.1.6** 闸门止水板及支承滑道所采用的不锈钢宜采用 GB/T 4237 规定的 12Cr18Ni9 或 12Cr18Ni9Si3 不锈钢。闸门结构及泄水孔道钢衬，如选用不锈钢或不锈钢复合板时，宜选用 GB/T 3280 规定的 06Cr19Ni10、022Cr19Ni10、022Cr19Ni5Mo3Si2N、022Cr22Ni5Mo3N 不锈钢。

**5.1.7** 闸门的止水材料可根据运行条件采用橡胶水封、橡塑复合水封或金属水封。橡胶水封或橡塑复合水封，其性能指标应符合附录 E 的规定。

**5.1.8** 闸门支承和零件所采用的铜合金，其性能应符合 GB/T 1176 规定的各项要求。支承滑道及轴承宜采用增强聚四氟乙烯材料、钢基铜塑复合材料、铜合金镶嵌固体润滑材料、工程塑料合金材料等时，其性能应符合附录 F 的规定。

**5.1.9** 焊条电弧焊用的焊条应符合 GB/T 5117、GB/T 5118、GB/T 983 规定的要求。

**5.1.10** 自动焊和气体保护焊应采用与母材金属强度相适应的焊丝和焊剂。

**5.1.11** 锚筋（锚杆）或锚板的材料可采用 GB/T 700 规定的 Q235 钢、GB/T 1591 规定的 Q345 钢。

**5.1.12** 高强度螺栓连接副应符合 GB/T 1228～GB/T 1231、GB/T 3632 规定的要求。

**5.1.13** 埋设件二期混凝土的强度等级可采用 SL 191 规定的 C20～C40，同时应根据运行条件与地区温度提出抗渗和抗冻等级的要求。

**5.1.14** 闸门防腐涂装材料应根据工作环境、环保要求、工作年限、使用工况选用，并符合 SL 105 规定的要求。

## 5.2 容许应力

**5.2.1** 钢材的容许应力应根据表 5.2.1-1 的尺寸分组，应按表 5.2.1-2 采用。连接材料的容许应力应按表 5.2.1-3、表 5.2.1-4 采用。

**表 5.2.1-1 钢材的尺寸分组**

单位：mm

组别	钢材厚度或直径	
	Q235	Q345、Q390
第 1 组	≤16	≤16
第 2 组	>16~40	>16~40
第 3 组	>40~60	>40~63
第 4 组	>60~100	>63~80
第 5 组	>100~150	>80~100
第 6 组	>150~200	>100~150

对下列情况，表 5.2.1-2～表 5.2.1-4 的数值应乘以调整系数：

——大、中型工程的工作闸门及重要的事故闸门调整系数为 0.90～0.95；

——在较高水头下经常局部开启的大型闸门调整系数为 0.85～0.90；

——规模巨大且在高水头下操作而工作条件又特别复杂的工作闸门调整系数为 0.80~0.85。

上述系数不应连乘，特殊情况应另行考虑。

表 5.2.1-2 钢材的容许应力 单位：N/mm<sup>2</sup>

应力种类	符号	碳素结构钢						低合金结构钢											
		Q235						Q345			Q390								
		第1组	第2组	第3组	第4组	第5组	第6组	第1组	第2组	第3组	第4组	第5组	第6组						
抗拉、抗压和抗弯	$[\sigma]$	160	150	145	145	130	125	225	225	220	210	205	190	245	240	235	220	220	210
抗剪	$[\tau]$	95	90	85	85	75	75	135	135	130	125	120	115	145	145	140	130	130	125
局部承压	$[\sigma_{cd}]$	240	225	215	215	195	185	335	335	330	315	305	285	365	360	350	330	330	315
局部紧接承压	$[\sigma_{cj}]$	120	110	110	110	95	95	170	170	165	155	155	140	185	180	175	165	165	155

注 1：局部承压应力不乘调整系数。  
 注 2：局部承压是指构件腹板的小部分表面受局部荷载的挤压或端面承压（磨平顶紧）等情况。  
 注 3：局部紧接承压是指可动性小的铰在接触面的投影平面上的压应力。

表 5.2.1-3 焊缝的容许应力 单位：N/mm<sup>2</sup>

焊缝分类	应力种类	符号	Q235				Q345					Q390				
			第1组	第2组	第3组	第4组	第1组	第2组	第3组	第4组	第5组	第1组	第2组	第3组	第4组	第5组
对接焊缝	抗压	$[\sigma_c^h]$	160	150	145	145	225	225	220	210	205	245	240	235	220	220
	抗拉，一类、二类焊缝	$[\sigma_t^h]$	160	150	145	145	225	225	220	210	205	245	240	235	220	220

表 5.2.1-3 (续)

焊缝分类	应力种类	符号	Q235				Q345					Q390				
			第1组	第2组	第3组	第4组	第1组	第2组	第3组	第4组	第5组	第1组	第2组	第3组	第4组	第5组
对接焊缝	抗拉，三类焊缝	$[\sigma^b]$	135	125	120	120	190	190	185	180	175	205	205	200	185	185
	抗剪	$[\tau^b]$	95	90	85	85	135	135	130	125	120	145	145	140	130	130
角焊缝	抗拉、抗压和抗剪	$[\tau^b]$	110	105	100	100	155	155	155	145	145	170	165	165	155	155

注 1：焊缝分类应符合 GB/T 14173 规定。  
 注 2：仰焊焊缝的容许应力按本表降低 20%。  
 注 3：安装焊缝的容许应力按本表降低 10%。

表 5.2.1-4 普通螺栓连接的容许应力 单位：N/mm<sup>2</sup>

螺栓的性能等级、锚栓和构件	应力种类	符号	螺栓和锚栓的性能等级或钢号					构件的钢号		
			Q235	Q345	4.6级、4.8级	5.6级	8.8级	Q235	Q345	Q390
A级、B级螺栓	抗拉	$[\sigma']$				150	310			
	抗剪	$[\tau']$				115	230			
C级螺栓	抗拉	$[\sigma']$	125	180	125					
	抗剪	$[\tau']$	95	135	95					
锚栓	抗拉	$[\sigma']$	105	145						
构件	承压	$[\sigma_c]$						240	335	365

注 1：A级螺栓用于  $d \leq 24\text{mm}$  和  $l \leq 10d$  或  $l \leq 150\text{mm}$ （按较小值）的螺栓；B级螺栓用于  $d > 24\text{mm}$  或  $l > 10d$  或  $l > 150\text{mm}$ （按较小值）的螺栓。 $d$  为公称直径， $l$  为螺杆公称长度。  
 注 2：螺孔制备应符合 GB/T 14173 规定。  
 注 3：当 Q235 钢或 Q345 钢制作的螺栓直径大于 40mm 时，螺栓容许应力应予降低，对 Q235 钢降低 4%，对 Q345 钢降低 6%。

5.2.2 机械零件的容许应力应按表 5.2.2 采用。

单位: N/mm<sup>2</sup>

表 5.2.2 机械零件的容许应力

应力种类	符号	碳素结构钢		低合金钢		优质碳素结构钢		铸造碳钢				合金铸钢			合金结构钢	
		Q235	Q345	Q390	35	45	ZG230—450	ZG270—500	ZG310—570	ZG340—640	ZG50 Mn2	ZG35 Cr1Mo	ZG34 Cr2Ni2Mo	ZG34 CrMo	42 CrMo	40Cr
抗拉、抗压和抗弯	$[\sigma]$	100	145	160	135	155	100	115	135	145	195	170	(215)	(295)	(365)	(320)
抗剪	$[\tau]$	60	85	95	80	90	60	70	80	85	115	100	(130)	(175)	(220)	(190)
局部承压	$[\sigma_{cd}]$	150	215	240	200	230	150	170	200	215	290	255	(320)	(440)	(545)	(480)
局部紧接承压	$[\sigma_{ej}]$	80	115	125	105	125	80	90	105	115	155	135	(170)	(235)	(290)	(255)
孔壁抗拉	$[\sigma_k]$	115	165	185	155	175	115	130	155	165	225	195	(245)	(340)	(420)	(365)

注 1: 括号内为调质处理后的数值。

注 2: 孔壁抗拉容许应力系指固定连接的情况, 若系活动结合, 则应按表值降低 20%。

注 3: 合金结构钢的容许应力, 适用于截面尺寸为 25mm。由于厚度影响, 屈服强度有减少时, 各类容许应力可按屈服强度减少比例予以减少。

注 4: 表列铸造碳钢的容许应力, 适用于厚度不大于 100mm 的铸钢件。

5.2.3 灰铸铁件的容许应力应按表 5.2.3 采用。

表 5.2.3 灰铸铁的容许应力 单位：N/mm<sup>2</sup>

应力种类	符号	灰铸铁牌号		
		HT150	HT200	HT250
轴心抗压和弯曲抗压	$[\sigma_a]$	120	150	200
弯曲抗拉	$[\sigma_w]$	35	45	60
抗剪	$[\tau]$	25	35	45
局部承压	$[\sigma_{cd}]$	170	210	260
局部紧接承压	$[\sigma_{cj}]$	60	75	90

5.2.4 轴套的容许应力应按表 5.2.4 采用。

表 5.2.4 轴套的容许应力 单位：N/mm<sup>2</sup>

材 料	符号	径向承压
钢对 10-3 铝青铜	$[\sigma_{cg}]$	50
钢对 10-1 锡青铜		40
钢对钢基铜塑复合材料		40
注：水下重要的轴衬、轴套的容许应力降低 20%。		

5.2.5 埋设件一期、二期混凝土的承压容许应力应按表 5.2.5 采用。

表 5.2.5 混凝土的承压容许应力 单位：N/mm<sup>2</sup>

应力种类	符号	混凝土强度等级				
		C15	C20	C25	C30	C40
承压	$[\sigma_h]$	5	7	9	11	14

5.2.6 表 5.2.1-2、表 5.2.1-3、表 5.2.1-4、表 5.2.2 的容许应力值，在特殊荷载组合下提高 15%，在特殊情况下，除局部应力外，不超过  $0.85\sigma_s$ 。

5.2.7 钢材和铸钢件的物理性能可按表 5.2.7 采用。

表 5.2.7 钢材和铸钢件的物理性能

材料名称	弹性模量 $E$ (N/mm <sup>2</sup> )	剪切模量 $G$ (N/mm <sup>2</sup> )	线胀系数 $\alpha$ (K <sup>-1</sup> )	质量密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
钢材、铸钢件	$2.06 \times 10^5$	$0.79 \times 10^5$	$1.2 \times 10^{-5}$	7850 (7800)
注：括号内为铸钢件的密度。				

## 6 结构设计

### 6.1 结构布置

6.1.1 闸门的梁系宜采用同一层的布置方式，并应考虑制造、运输、安装、检修维护和防腐蚀施工等方面的要求。

6.1.2 平面闸门可按孔口型式及宽高比布置成双主梁或多主梁型式。主梁布置应符合以下要求：

- 1 主梁宜按等荷载要求布置。
- 2 主梁间距应适应制造、运输和安装的条件。
- 3 主梁间距应满足行走支承布置的要求。

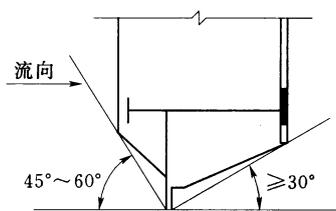


图 6.1.2 闸门底缘上下游倾角

4 底主梁到底止水距离应符合底缘布置的要求。工作闸门和事故闸门下游倾角应不小于  $30^\circ$ ；当闸门支承在非水平底槛上时，其夹角可适当增减。当不能满足  $30^\circ$  的要求时，应采用适当补气措施；对于部分利用水柱的平面闸门，其上游倾角不应小

于  $45^\circ$ ，宜采用  $60^\circ$ ，见图 6.1.2。

5 贯流式机组事故闸门和流速较低、淹没出流的闸门，上下游夹角可适当减小。

6.1.3 露顶式的双主梁平面闸门，主梁宜布置在静水压力线上下等距离的位置上，如图 6.1.3 所示。同时应符合以下要求：

- 1 两主梁间的距离  $a$  值宜大些。
- 2 上主梁到闸门顶缘的距离  $a_0$  宜小于  $0.45H$ ，且不宜大于 3.6m。

6.1.4 主梁可按跨度和荷载采用实腹式或桁架式梁。

实腹式主梁高度的初选应接近经济梁高的要求。

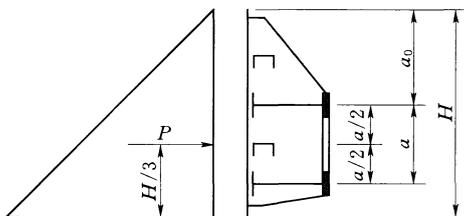


图 6.1.3 闸门主梁布置

对大跨度的闸门，可采用变截面的主梁，其端部梁高为跨中梁高的 0.4~0.6 倍。梁高改变的位置宜距离支座  $1/6 \sim 1/4$  跨度处，同时应满足强度的要求。

**6.1.5** 平面闸门的边梁应采用实腹梁型式，滑动支承宜采用单腹板式边梁，简支轮支承宜采用双腹板式边梁。

**6.1.6** 可设置门背连接系（平行于面板）及竖向连接系（垂直于面板）。门背连接系宜采用桁架式结构或框架式结构。竖向连接系宜采用实腹式结构，也可采用桁架式结构。

**6.1.7** 弧形闸门支铰布置应考虑符合以下要求：

1 面板曲率半径与闸门高度的比值，对露顶式可取 1.0~1.5，对潜孔式可取 1.1~2.2。

2 弧形闸门支铰宜布置在过流时支铰不受水流及漂浮物冲击的高程上。

3 溢流坝上的露顶式弧形闸门，支铰位置可布置在闸门底槛以上  $(1/3 \sim 3/4)H$  ( $H$  为门高) 处。

4 水闸的露顶式弧形闸门，支铰位置可布置在闸门底槛以上  $(2/3 \sim 1)H$  处。

5 深孔式弧形闸门，支铰位置可布置在底槛以上大于  $1.1H$  处。

**6.1.8** 弧形闸门主梁的布置可根据孔口宽高比布置成主横梁式或主纵梁式结构。

宽高比较大的弧形闸门宜采用主横梁式结构，宽高比较小的

弧形闸门，可采用主纵梁式结构。

**6.1.9** 主横梁式弧形闸门的主框架型式如图 6.1.9 所示 a)、b)、c) 三种型式：

当支承条件许可时，宜采用 a) 型；当支承在侧墙上时，应采用 b) 型， $l_1$  宜取  $0.2L$  左右；当孔口净空不适应采用 a) 型或 b) 型时，可采用 c) 型。

主纵梁式弧形闸门的主框架型式可采用 d) 型。

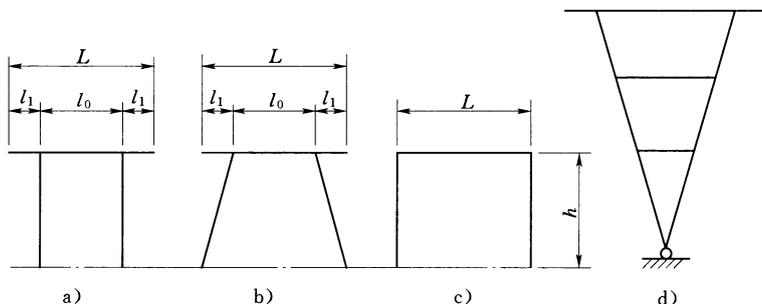


图 6.1.9 弧形闸门的主框架型式

**6.1.10** 弧形闸门的实腹式主横梁与支臂单位刚度比  $K_0$  值，可按下列两种情况分别进行选取：

——直支臂弧形闸门， $K_0 = 4 \sim 11$ ；

——斜支臂弧形闸门， $K_0 = 3 \sim 7$ 。

$K_0$  值应按式 (6.1.10) 计算：

$$K_0 = \frac{I_{10}h}{I_h l_0} \quad (6.1.10)$$

式中  $I_{10}$ 、 $l_0$ ——主横梁的截面惯性矩及计算跨度；

$I_h$ 、 $h$ ——支臂的截面惯性矩及长度。

**6.1.11** 斜支臂弧形闸门，当支臂与主横梁水平连接时，在支铰处两支臂夹角平分线的垂直剖面上形成扭角  $2\phi$  (见图 6.1.11)。 $\phi$  应按式 (6.1.11) 计算：

$$\phi = \arctan \frac{\tan\theta \sin\alpha}{\sqrt{\cos^2\theta - \sin^2\alpha}} \quad (6.1.11)$$

式中  $\alpha$ ——斜支臂水平偏斜角度；  
 $\theta$ ——上下两支臂夹角的一半。

**6.1.12** 弧形闸门的支臂与主横梁应保证刚性连接。斜支臂与主横梁如采用螺栓连接，宜设抗剪板。抗剪板与连接板两端面应保证接触良好（见图 6.1.12）。

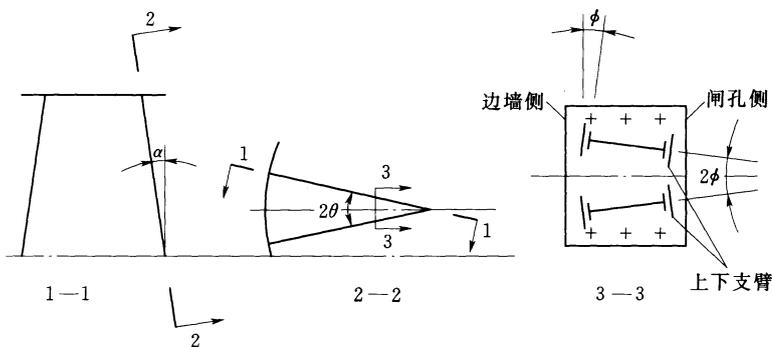


图 6.1.11 扭角计算简图

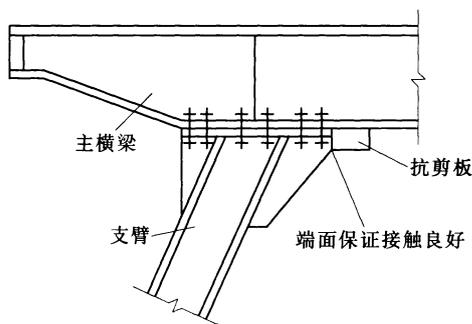


图 6.1.12 支臂抗剪板

**6.1.13** 低水头弧形闸门的支臂应根据具体工作条件，使结构符合以下要求：

- 1 应充分注意主框架平面外的稳定性，并从构造上予以保证。
- 2 应考虑支铰摩阻力对支臂所引起的附加弯矩。

3 露顶式弧形闸门的上支臂应适当加强。

6.1.14 选用浮式叠梁或浮箱闸门时，应使结构布置对称，保证闸门操作平稳，并宜减少漏水量。浮式叠梁应考虑互换性，单根浮力应选择适当，以保证按要求沉浮。

6.1.15 拱形闸门拱的圆心角宜采用  $90^\circ$ ，闸门的水平剖面及竖直剖面应设置连接系。

## 6.2 结构计算

6.2.1 闸门的结构计算，应按 1.0.6 条规定的计算原则及 4.0.1~4.0.5 条规定的荷载，根据实际可能发生的最不利的荷载组合情况，按基本荷载组合和特殊荷载组合条件进行强度、刚度和稳定性验算。

6.2.2 对于闸门的承载构件和连接件，应验算正应力和剪应力。在同时承受较大正应力和剪应力的作用处，还应验算折算应力。

计算的最大应力值不应超过容许应力的 5%。

弧形闸门的纵向梁系和面板，可忽略其曲率影响，近似按直梁和平板进行验算。

6.2.3 受弯构件的最大挠度与计算跨度之比，不应超过下列数值：

- 潜孔式工作闸门和事故闸门的主梁， $1/750$ ；
- 露顶式工作闸门和事故闸门的主梁， $1/600$ ；
- 检修闸门和拦污栅的主梁， $1/500$ ；
- 次梁， $1/250$ 。

6.2.4 受弯、受压和偏心受压构件，应验算整体稳定和局部稳定性。验算应按附录 G 及 GB 50017 进行。

6.2.5 闸门构件的长细比应符合以下要求：

- 1 受压构件的容许长细比不应超过下列数值：
  - 主要构件，120；
  - 次要构件，150；
  - 联系构件，200。

2 受拉构件的容许长细比不应超过下列数值：

——主要构件，200；

——次要构件，250；

——联系构件，350。

6.2.6 面板及其参与梁系有效宽度的计算应符合以下要求：

1 为充分利用面板的强度，梁格布置时宜使面板的长短边比  $b/a > 1.5$ ，并将长边布置在沿主梁轴线方向。

2 面板的局部弯曲应力，可视支承边界情况，按四边固定（或三边固定一边简支，或两相邻边固定、另两相邻边简支）的弹性薄板承受均布荷载（对于露顶式闸门的顶区格按三角形荷载）计算。初选面板厚度  $\delta$ ，应按式（6.2.6-1）计算：

$$\delta = a \sqrt{\frac{K_y q}{\alpha [\sigma]}} \quad (6.2.6-1)$$

式中  $\delta$ ——初选面板厚度，mm；

$K_y$ ——弹塑性薄板支承长边中点弯应力系数，按附录 H 表 H.0.1-1~表 H.0.1-4 采用；

$\alpha$ ——弹塑性调整系数， $b/a > 3$  时， $\alpha = 1.4$ ， $b/a \leq 3$  时， $\alpha = 1.5$ ；

$q$ ——面板计算区格中心的水压力强度，MPa；

$a$ 、 $b$ ——面板计算区格的短边和长边长度，mm，从面板与主（次）梁的连接焊缝算起；

$[\sigma]$ ——钢材的抗弯容许应力，按表 5.2.1-2 采用。

3 当面板与主（次）梁相连接时应考虑面板参与主（次）梁翼缘工作，其有效宽度按附录 H 确定。

4 验算面板强度时，应考虑面板的局部弯应力与面板兼作主（次）梁翼缘的整体弯应力相叠加。叠加后的折算应力  $\sigma_{zh}$  应按附录 H 式（H.0.1-1）或式（H.0.1-4）计算。 $\sigma_{zh}$  应满足式（6.2.6-2）要求：

$$\sigma_{zh} \leq 1.1\alpha[\sigma] \quad (6.2.6-2)$$

5 计算所得面板厚度  $\delta$  还应根据工作环境、防腐条件等因素，增加 1~2mm 腐蚀裕度。

6.2.7 当验算支臂在框架平面内的稳定时，弧形闸门支臂的计算长度应按式 (6.2.7) 计算：

$$h_0 = \mu h \quad (6.2.7)$$

式中  $h_0$ ——支臂的计算长度；

$h$ ——支臂的长度（由框架的形心线算起）；

$\mu$ ——支臂的计算长度系数，对主横梁式的矩形框架或梯形框架的支臂， $\mu$  可取 1.2~1.5；对主纵梁式多层三角形框架的支臂， $\mu$  可取 1.0。

6.2.8 闸门承载构件的钢板厚度或型钢截面不应小于以下规格：

——6mm 的钢板；

——L 50mm×6mm 的等边角钢；

——L 63mm×40mm×6mm 的不等边角钢；

——I 12.6 的工字钢；

——C 8 的槽钢。

小型工程的闸门，可不受此限。

## 6.3 拦污栅

6.3.1 拦污栅的设计荷载，应根据河流污物性质、数量及清污措施决定。引水发电系统的拦污栅，宜采用水位差 2~4m 设计，抽水蓄能电站的拦污栅可采用水位差 5~7m 设计，特殊情况应具体分析确定。

对污物较多的、清污条件差的河流，应适当提高设计水头。

6.3.2 在满足保护机组的前提下，栅条的净距应适当加大。

6.3.3 拦污栅宜做成活动式。

6.3.4 栅条截面高度不宜大于 12 倍厚度，也不宜小于 50mm。栅条的侧向支承间距，不宜大于 70 倍栅条厚度。

6.3.5 栅条应进行强度及稳定性验算，其稳定安全系数  $K$  不应

小于 2。栅条临界荷载计算应按附录 I 计算。

**6.3.6** 拦污栅的承载结构应根据布置及构造情况进行内力分析，并按 6.2 节进行各项验算。

**6.3.7** 抽水蓄能电站拦污栅设计应考虑双向水流作用下的水动力影响。栅条振动应按附录 J 计算。

## 7 零部件设计

### 7.1 一般规定

**7.1.1** 主轮、支铰和吊耳的轴，其表面宜镀铬，也可根据具体工作条件采用其他镀层等防腐蚀措施。

腐蚀情况严重的重要连接件，宜采用不锈钢材料。水下工作的其他轴、螺栓和螺母等，或需经常拆卸的连接件应做防腐蚀处理。

**7.1.2** 滚轮、支铰的轴和轴套间应有良好的润滑，宜优先使用自润滑轴承。滚动轴承或在多泥沙水中工作的滑动轴承，除应保持润滑外，应设密封装置。润滑设施应便于加油。

### 7.2 行走支承

**7.2.1** 平面闸门行走支承的型式，应根据工作条件、荷载和跨度选定。工作闸门和事故闸门宜采用滚轮或滑道支承。检修闸门宜采用滑道支承。

**7.2.2** 轮式支承宜采用简支轮；当荷载不大时，可采用悬臂轮；当支承跨度较大时，可采用台车或其他型式支承。

滚轮硬度应略低于轨道硬度。

当轮压较大时，应对滚轮、轨道的材料及其硬度和制造工艺进行专门研究。

**7.2.3** 闸门上布置多滚轮时，为调整滚轮踏面在同一平面上，宜采用偏心轴（套）。

**7.2.4** 作用在滚轮上的最大设计荷载，应按计算最大轮压考虑一定的不均匀系数，对于简支轮和设有偏心轴（套）的多滚轮，不均匀系数可取 1.1。

**7.2.5** 采用滑块支承时，应根据其构造、形状和接触特性，验算接触应力和连接螺栓的强度。

**7.2.6** 工作闸门和事故闸门的支承滑道应根据工作条件和地区特点，选用高比压、低摩阻材料。

**7.2.7** 弧形闸门的支铰型式，应根据闸门的荷载、跨度和支臂型式选定。宜采用圆柱铰、球形铰，也可采用锥形铰。

**7.2.8** 滚轮、支铰的支承轴承可选用平面或球面滑动轴承，滚轮也可选用滚动轴承。

**7.2.9** 各类行走支承的计算，可根据其结构特点进行，主滚轮接触应力应按附录 K 计算。

### 7.3 吊耳、吊杆、锁定

**7.3.1** 闸门采用单吊点或双吊点应根据孔口大小、宽高比、启闭力、闸门及启闭机布置型式等因素综合考虑确定。当宽高比大于 1.0 时，宜采用双吊点。

**7.3.2** 直升式平面闸门的吊耳应设置在闸门隔板或边梁的顶部，并应布置在闸门重心线上，水电站尾水检修闸门的吊耳可稍偏向止水侧，以提高止水效果。

露顶式弧形闸门的吊耳，采用液压启闭机时，宜布置在面板后面下主梁两端；采用卷扬式弧门启闭机时，可布置在闸门下主梁与支臂交点的面板前面。

潜孔式弧形闸门的吊耳宜布置在门顶。

**7.3.3** 作用在吊耳、吊杆、连接轴、连接板和连接螺栓上的荷载，应按所选启闭机的启闭力（对操作多种类型闸门的移动式启闭机，应取各门相应的计算启闭力）乘以 1.1~1.2 的超载系数计算，以考虑闸门启闭时的超载或不均匀影响。潜孔闸门上的吊耳，因工作条件复杂，除考虑上述系数外，尚应予以适当增强。

**7.3.4** 闸门（拦污栅）的启闭操作，应仅在下列情况采用吊杆：

- 用自动挂脱梁有困难时；
- 当启闭机滑轮组长期浸在水中时；
- 当采用螺杆或液压启闭机扬程不够时；
- 经综合比较造价低时。

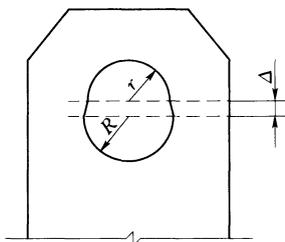


图 7.3.7 吊耳梨形孔

**7.3.5** 吊杆的分段长度应按孔口高度、启闭机的扬程和对吊杆装拆、换向等要求确定。

**7.3.6** 吊耳的宽度、厚度与孔径的关系尺寸及吊杆、吊耳的计算，应符合附录 L 的规定。

**7.3.7** 为保证吊杆轴孔和轴的接触紧密，又便于装卸连接轴，宜将轴孔

做成梨形孔（小圆宜接近  $180^\circ$ ，见图 7.3.7）。

对荷载不大的吊杆，可将轴孔加大 1mm。

**7.3.8** 锁定装置宜选用自动、半自动锁定器。锁定操作应在锁定平台或检修平台上进行。

锁定的结构型式应按不同用途进行设计。

**7.3.9** 作用在锁定装置上的荷载应按其不同用途而定。

供闸门检修或存放用的锁定装置应考虑闸门自重、加重、风荷载、地震荷载以及操作时可能引起的荷载。

对于供闸门局部开启用的锁定装置，尚应考虑闸门在动水中可能产生的吸力和脉动荷载。

**7.3.10** 锁定装置的活动和埋设部分，应按其受力及构造情况验算其强度及稳定性。

## 7.4 止水装置

**7.4.1** 闸门止水装置宜设在门叶上，如需将水封设置在埋件上，则应提供其维修更换的条件。

各部位的止水装置应具有连续性和严密性。

**7.4.2** 对于大跨度上游止水的潜孔闸门，其顶止水装置应考虑顶梁弯曲变形的影响。

应注意防止潜孔闸门顶水封在启闭过程中的翻卷现象，顶止水板靠水封头的边缘宜做成翘头形式。

**7.4.3** 闸门水封应预留压缩量。顶、侧水封的预留压缩量宜取

2~4mm。

**7.4.4** 闸门的顶、侧水封，可用圆头 P 形或  $\Omega$  形断面型式；潜孔和露顶式弧形闸门的侧水封，可分别采用方头 P 形和 L 形断面型式；底止水宜采用刀型水封。对于高水头弧形闸门止水型式，可根据运用条件进行研究和试验确定。

止水压板的厚度不宜小于 10mm，小型闸门可适当减薄。

固定水封的螺栓间距宜小于 150mm。

**7.4.5** 中高水头弧形闸门的顶止水宜设置两道，即门叶上和门楣上各一道。

门楣上的水封和面板弧度的配合精度，应满足闸门启闭过程中的止水要求。

**7.4.6** 采用不锈钢板制造顶、侧止水板时，其加工后的厚度应不小于 4mm。

止水板应与所在的埋件做成一个整体，其构造型式应满足止水板焊接、加工等要求。

采用刚性止水兼作支承的平面闸门，其刚性止水与止水板的配合间隙应满足止水要求，其配合面的平面度不低于 5 级精度。采用铜合金的底槛应与闸门底水封保持平行。

## 7.5 焊接和螺栓连接

**7.5.1** 在设计中不应任意加大焊缝，避免焊接立体交叉和在一处集中多条焊缝，同时焊缝的布置宜对称于构件形心轴。

焊件厚度大于 20mm 的角接接头焊缝，应采用收缩时不易引起层状撕裂的构造。

对接焊缝出现 T 形交叉时，交叉点的间距不应小于 200mm。

搭接连接中，搭接长度不应小于较小厚度的 5 倍，且不应小于 25mm。

闸门及埋件结构，不应采用间断焊缝。

**7.5.2** 在闸门的结构及焊接件设计中应考虑施焊的方便、焊条角度要求及烟雾顺利逸出。

**7.5.3** 对承受动荷载或在低温（低于 $0^{\circ}\text{C}$ ）下工作的闸门，其主梁翼缘与腹板间，主梁腹板与边梁腹板间，支臂与两端支承板及承受弯矩段腹板与翼缘间的 T 形焊缝，应予焊透。腹板边缘尚应根据板厚和施焊条件进行加工。对于低温工作的一类、二类焊缝，焊接接头尚应进行冲击试验。

**7.5.4** 承受主要荷载的结构不应采用塞焊连接。

**7.5.5** 普通螺栓连接宜用 A 级、B 级螺栓。承受动荷载的剪力时，宜采用铰制孔螺栓。

**7.5.6** 当计算和构造要求不宜采用普通螺栓连接时，宜采用高强度螺栓。

**7.5.7** 焊接、螺栓连接的构造要求可按 GB 50017 的有关规定进行。

## 8 埋件设计

**8.0.1** 闸门埋件应能将闸门所承受的荷载安全地传递到混凝土（或其他材料）中去。

门槽一期混凝土面与门叶间应有不小于 100mm 的距离。门槽高度小于 10m 的可适当减小。

**8.0.2** 闸门埋件应采用二期混凝土安装。二期混凝土宜有足够尺寸。

**8.0.3** 用于安装埋件和锚固二期混凝土的锚筋，其直径不宜小于 16mm，伸出一期混凝土面的长度不宜小于 150mm。

低水头小孔口闸门埋件所用的锚筋，其直径及外伸长度可适当减小。

为适应钢滑模板施工，一期锚筋也可采用锚板型式。但在构造上应加强锚板与二期混凝土的锚固措施。

**8.0.4** 多泥沙河流上的排沙泄水孔（洞）闸门的门槽埋件及其附近的衬护，应结合抗磨蚀和抗空蚀的要求进行设计。当水流中有大量推移质过闸时，闸孔底部应采取相应的衬护措施。

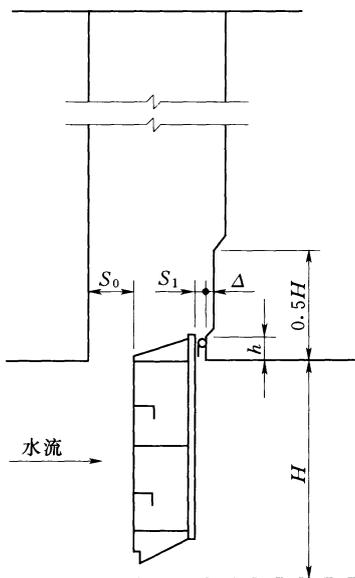
**8.0.5** 埋件分段时应考虑制造、运输和安装对其长度的限制及其本身刚度的要求。

**8.0.6** 闸门底槛埋件宜采用工字形断面。当水头较高时，为增加底槛埋件与混凝土的接触面并使其嵌固良好，底槛埋件的断面尺寸应适当增大。低水头小孔口闸门的底槛埋件可适当简化。

**8.0.7** 水电站进水口利用水柱下降的事故闸门，胸墙和门楣的相关尺寸可按图 8.0.7 所示尺寸采用。对于大型水电站的事故闸门，宜通过模型试验确定胸墙和门楣的相关尺寸。

**8.0.8** 滑道轨道的轨头尺寸应根据材料性能和设计条件及产品样本确定。

**8.0.9** 潜孔式平面工作闸门和事故闸门门槽主轨的高度应根据



注 1:  $S_0 \geq 5S_1$ 。

注 2:  $\Delta = 100\text{mm}$  或  $\Delta \approx S_1$ 。

注 3:  $h = (0.05 \sim 0.1) H$ ,

但不小于 300mm。

注 4:  $S_1$  尽量小。

图 8.0.7 胸墙和门楣相关尺寸

使用条件确定，可按 1.5~2.0 倍的孔口高度选用。

**8.0.10** 为便于闸门的入槽，轨道顶部应设导向坡度。

**8.0.11** 平面闸门主轨应按附录 M 计算。反轨、侧轨可按构造要求选择。

**8.0.12** 露顶式弧形闸门的支铰宜支承在钢筋混凝土牛腿上，潜孔弧形闸门的支铰可支承在钢梁上。

**8.0.13** 平面闸门门槽的上、下游两侧宜设置金属护角。护角设置高度应根据其工作条件确定。

**8.0.14** 拦污栅槽埋件设计可按照平面闸门埋件的有关要求适当简化。

**8.0.15** 大、中型工程施工导流孔闸门底槛及其附近的衬护，应根据导流期过闸水流流态、过流

时间长短及推移质过闸情况等因素确定其截面尺寸及衬护范围。

## 9 启闭力和启闭机

### 9.1 启闭力计算

9.1.1 平面闸门启闭力应按以下方法计算：

1 动水中启闭的闸门启闭力计算应包括闭门力、持住力、启门力的计算。

1) 闭门力应按式 (9.1.1-1) 计算。计算结果为正值时，需要加重（加重方式有加重块、水柱或机械下压力等）；为负值时，依靠自重可以关闭。

$$F_w = n_T (T_{zd} + T_{zs}) - n_G G + P_t \quad (9.1.1-1)$$

2) 持住力应按式 (9.1.1-2) 计算：

$$F_T = n'_G G + G_j + W_s + P_x - P_t - (T_{zd} + T_{zs}) \quad (9.1.1-2)$$

3) 启门力应按式 (9.1.1-3) 计算：

$$F_Q = n_T (T_{zd} + T_{zs}) + P_x + n'_G G + G_j + W_s \quad (9.1.1-3)$$

4) 滑动轴承的滚轮摩阻力应按式 (9.1.1-4) 计算：

$$T_{zd} = \frac{P}{R} (f_1 r + f) \quad (9.1.1-4)$$

5) 滚动轴承的滚轮摩阻力应按式 (9.1.1-5) 计算：

$$T_{zd} = \frac{P f}{R} \left( \frac{R_1}{d} + 1 \right) \quad (9.1.1-5)$$

6) 滑动支承摩阻力应按式 (9.1.1-6) 计算：

$$T_{zd} = f_2 P \quad (9.1.1-6)$$

7) 止水摩阻力应按式 (9.1.1-7) 计算：

$$T_{zs} = f_3 P_{zs} \quad (9.1.1-7)$$

式中  $F_w$ 、 $F_T$ 、 $F_Q$ ——闭门力、持住力和启门力，kN；

$n_T$ ——摩擦阻力安全系数，可采用 1.2；

$n_G$ ——计算闭门力用的闸门自重修正系数，可采用 0.9~1.0；

$n'_G$ ——计算持住力和启门力用的闸门自重修正系数，可采用 1.0~1.1；

$G$ ——闸门自重，kN，当有吊杆时应计入吊杆重量；计算闭门力时可不计吊杆的重量，门重可采用浮重；

$W_s$ ——作用在闸门上的水柱压力，kN；

$G_j$ ——加重块重量，kN；

$P_t$ ——上托力，kN，包括底缘上托力及止水上托力，底缘上托力按附录 D 计算；

$P_x$ ——下吸力，kN，按附录 D 计算；

$T_{zd}$ ——支承摩阻力，kN；

$P$ ——作用在闸门上的总水压力，kN；

$r$ ——滚轮轴半径，mm；

$R_1$ ——滚动轴承的平均半径，mm；

$R$ ——滚轮半径，mm；

$d$ ——滚动轴承滚柱或滚珠的直径，mm；

$f$ ——滚动摩擦力臂，mm，按附录 N 确定；

$T_{zs}$ ——止水摩阻力，kN；

$P_{zs}$ ——作用在止水上的压力，kN；

$f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$ ——滑动摩擦系数，计算持住力应取小值，计算启门力、闭门力应取大值，按附录 N 确定。

2 静水中开启的闸门，其启闭力计算除计入闸门自重和加重外，尚应考虑一定的水位差引起的摩阻力。露顶式闸门和电站尾水闸门可采用不大于 1m 的水位差；潜孔式闸门可采用 1~5m 的水位差。对有可能发生淤泥、污物堆积等情况时，尚应酌情增加。

9.1.2 弧形闸门启闭力应按以下方法计算：

1 闭门力按式 (9.1.2-1) 计算。计算结果为正值时，需要加重；为负值时，依靠自重可以关闭。

$$F_w = \frac{1}{R_1} [n_T (T_{zd} r_0 + T_{zs} r_1) + P_1 r_3 - n_G Gr_2] \quad (9.1.2-1)$$

2 启门力按式 (9.1.2-2) 计算：

$$F_Q = \frac{1}{R_2} [n_T (T_{zd} r_0 + T_{zs} r_1) + n'_G Gr_2 + G_j R_1 + P_x r_4] \quad (9.1.2-2)$$

式中  $r_0$ 、 $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$ 、 $r_4$ ——转动铰摩阻力、止水摩阻力、闸门自重、上托力和下吸力对弧形闸门转动中心的力臂，m；

$R_1$ 、 $R_2$ ——加重（或下压力）和启门力对弧形闸门转动中心的力臂，m；

$T_{zs}$ ——止水摩阻力，按式 (9.1.1-7) 计算；

其他符号意义同前。

3 弧形闸门在启闭运动过程中，力的作用点、方向和力臂随运动而变化，因此，必要时可绘制启闭力过程线，以决定最大值。

9.1.3 拦污栅启吊力应按以下方法计算：

1 在静水中启吊时其启吊力应按式 (9.1.3) 计算：

$$F_Q \geq n'_G G + n_m m \quad (9.1.3)$$

式中  $F_Q$ ——拦污栅启吊力，kN；

$n_m$ ——污物的超重系数，可采用 1.2；

$m$ ——污物的重量，kN，按栅条间部分堵塞考虑，堵塞面积可根据污物情况决定；

$G$ ——拦污栅自重，kN；

$n'_G$ ——自重修正系数，采用 1.0~1.1。

2 在动水中启吊时，其启吊力除按式 (9.1.3) 计算外，还

应考虑拦污栅部分堵塞后形成水位差的影响，选用水位差不应大于 2m。

**9.1.4** 闸门底部防渗漏应按式 (9.1.4) 进行验算：

$$\sigma_y \geq 0.0012\gamma H_s \quad (9.1.4)$$

式中  $\sigma_y$ ——闸门底止水在底槛上的压应力，N/mm<sup>2</sup>；

$\gamma$ ——水的容重，kN/m<sup>3</sup>；

$H_s$ ——由底槛算起的水头，m。

**9.1.5** 在多泥沙水流中工作的闸门，计算启闭力时应做专门研究。除考虑水压力外，还应考虑泥沙影响，包括泥沙引起的支承、止水摩阻力，泥沙与闸门间的黏着力和摩擦力，门上淤积泥沙的重量等。黏着系数和摩擦系数可通过试验确定。此外，还应适当加大安全系数，以克服泥沙局部阻塞增加的阻力。淤沙压力按附录 D 计算。

**9.1.6** 计算小型闸门的启闭力时，安全系数应适当加大。

## 9.2 启闭机选择

**9.2.1** 启闭机型式，可根据闸门型式、尺寸、孔口数量及运行条件等因素，按以下要求选用：

1 靠自重或加重关闭和要求在短时间内全部开启的闸门宜选用固定卷扬式启闭机或液压启闭机。

2 需要短时间内全部开启或有下压力要求的闸门宜选用液压启闭机。

3 孔数多且不需要同时局部均匀开启的平面闸门宜选用移动式启闭机。启闭机台数应根据开启闸门的时间要求确定，并考虑有适当的备用量。布置门式启闭机应兼顾坝面金属结构设备及大坝的检修需要。

4 需要下压力的小型闸门宜选用螺杆式启闭机。

**9.2.2** 选用启闭机的启闭力不应小于计算启闭力。

**9.2.3** 启闭机扬程可根据运行条件决定，并应满足以下要求：

1 溢流闸门可提出水面以上 1~2m。

- 2 快速闸门可提到孔口以上 0.5~1.0m。
- 3 闸门检修更换可提到检修平台以上 0.5~1.0m。

### 9.3 自动挂脱梁

**9.3.1** 当采用移动式启闭机操作多孔口闸门或闸门在操作过程中，吊杆装卸频繁时，宜采用自动挂脱梁。

其型式可根据工作条件选用机械式或液压式等。

**9.3.2** 闸门设置自动挂脱梁时，应注意以下情况：

1 闸门宜设置上游止水。如闸门设置下游止水时，应注意自动挂脱梁水下工作的可靠性。

2 自动挂脱梁入水工作时，应注意水流扰动对其稳定性的影响。

3 应注意门槽施工安装精度，以适应自动挂脱梁能在多孔口槽内使用。

4 自动挂脱梁应设导向、定位、安全装置和排气（水）孔。

5 自动挂脱梁应作静平衡试验，以便操作平稳，入槽前不应有倾斜、阻卡等现象。

6 当工作温度低于 0℃ 时，还应有防止操作时或入水后挂脱部件结冰的措施。

## 附录 A 闸门孔口尺寸和设计水头系列标准

**A.0.1** 露顶式溢洪道闸门的孔口尺寸应按表 A.0.1-1 采用；潜孔式泄水孔闸门的孔口尺寸应按表 A.0.1-2 采用；其他闸门（尾水闸门除外）的孔口尺寸应按表 A.0.1-3 采用。

闸门孔口尺寸标准，表 A.0.1-1~表 A.0.1-3 中标有“○”者为推荐的孔口尺寸。应结合闸门和启闭机制造、安装和运行的具体条件，选用表列的孔口尺寸。

**A.0.2** 设计水头为 10~20m 时，按 0.5m 递增；设计水头为 20~50m 时，按 1.0m 递增；设计水头大于 50m 时，按 2.0m 递增。

表 A.0.1-1 露顶式闸门的孔口尺寸

孔口高度 (m)	孔口宽度 (m)																							
	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0	22.0	24.0	26.0		
1.0	○	○	○																					
1.5	○	○	○	○																				
2.0		○	○	○	○	○	○																	
2.5			○	○	○	○	○	○	○															
3.0				○	○	○	○	○	○	○														
3.5					○	○	○	○	○	○	○													
4.0							○	○	○	○	○	○	○	○										
4.5								○	○	○	○	○	○	○										
5.0									○	○	○	○	○	○	○	○								
6.0										○	○	○	○	○	○	○	○							
7.0											○	○	○	○	○	○	○							
8.0												○	○	○	○	○	○	○	○					

表 A.0.1-1 (续)

孔口高度 (m)	孔口宽度 (m)																						
	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0	22.0	24.0	26.0	
9.0												○	○	○	○	○	○	○	○				
10.0												○	○	○	○	○	○	○	○	○			
11.0													○	○	○	○	○	○	○	○			
12.0														○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
13.0														○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
14.0															○	○	○	○	○	○	○	○	○
15.0															○	○	○	○	○	○	○	○	○
16.0															○	○	○	○	○	○	○	○	○
17.0																○	○	○		○	○	○	
18.0																○	○	○		○			
19.0																	○						
20.0																	○						
21.0																	○						
22.0																	○						

注：孔口高度为闸门高度。

表 A.0.1-2 潜孔式泄水闸孔口尺寸

孔口高度 (m)	孔口宽度 (m)																	
	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	6.0	7.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0
1.0	○	○	○	○														
1.5	○	○	○	○														
2.0	○	○	○	○	○	○												
2.5		○	○	○	○	○												
3.0			○	○	○	○	○	○	○									
3.5			○	○	○	○	○	○	○									

表 A.0.1-2 (续)

孔口高度 (m)	孔口宽度 (m)																			
	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	6.0	7.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0		
4.0				○	○	○	○	○	○	○	○	○								
4.5					○	○	○	○	○	○	○	○								
5.0					○	○	○	○	○	○	○	○	○							
6.0					○	○	○	○	○	○	○	○	○	○						
7.0						○	○	○	○	○	○	○	○	○	○					
8.0							○	○	○	○	○	○	○	○	○	○				
9.0								○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
10.0									○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
11.0										○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
12.0											○	○	○	○	○	○	○	○	○	
13.0												○	○	○	○	○	○	○	○	
14.0													○	○	○	○	○	○	○	
15.0														○	○	○	○	○	○	
16.0															○	○	○	○	○	
18.0																○	○	○	○	

表 A.0.1-3 其他闸门（尾水闸门除外）的孔口尺寸

孔口高度 (m)	孔口宽度 (m)																							
	0.6	0.8	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0	
0.6	○																							
0.8	○	○																						
1.0	○	○	○																					
1.2	○	○	○																					
1.5		○	○	○																				
2.0			○	○	○																			
2.5				○	○	○																		

表 A.0.1-3 (续)

孔口 高度 (m)	孔 口 宽 度 (m)																						
	0.6	0.8	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0
3.0				○	○	○	○	○															
3.5					○	○	○	○															
4.0					○	○	○	○	○														
4.5					○	○	○	○	○	○													
5.0						○	○	○	○	○	○												
5.5							○	○	○	○	○	○											
6.0							○	○	○	○	○	○	○										
6.5							○	○	○	○	○	○	○	○									
7.0							○	○	○	○	○	○	○	○	○								
7.5								○	○	○	○	○	○	○	○	○							
8.0							○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○					
9.0								○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○				
10.0							○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
11.0												○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
12.0													○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
13.0																○	○	○	○	○	○	○	○
14.0																	○	○	○	○	○	○	○
15.0																		○	○	○	○	○	○
16.0																			○	○	○	○	○
18.0																				○	○	○	○

## 附录 B 通气孔面积的计算

**B. 0. 1** 设于泄水管道中的工作闸门或事故闸门，其门后通气孔面积可按经验公式 (B. 0. 1 - 1)、式 (B. 0. 1 - 2) 计算，也可按半理论半经验公式 (B. 0. 1 - 3)、式 (B. 0. 1 - 4) 及式 (B. 0. 1 - 1) 计算：

$$A_a \geq \frac{Q_a}{[v_a]} \quad (\text{B. 0. 1 - 1})$$

$$Q_a = 0.09v_w A \quad (\text{B. 0. 1 - 2})$$

$$\beta = \frac{Q_a}{Q_w} = K(Fr - 1)^{[a \ln(Fr - 1) + b]} - 1 \quad (\text{B. 0. 1 - 3})$$

$$Fr = v/\sqrt{9.81e} \quad (\text{B. 0. 1 - 4})$$

式中  $A_a$ ——通气孔的断面面积， $\text{m}^2$ ；  
 $Q_a$ ——通气孔的充分通气量， $\text{m}^3/\text{s}$ ；  
 $[v_a]$ ——通气孔的允许风速， $\text{m/s}$ ，采用  $40\text{m/s}$ ，对小型闸门可采用  $50\text{m/s}$ ；  
 $v_w$ ——闸门孔口的水流速度， $\text{m/s}$ ；  
 $A$ ——闸门后管道面积， $\text{m}^2$ ；  
 $\beta$ ——气水比，通气流量与泄水流量之比；  
 $Q_w$ ——闸门一定开启高度下的流量， $\text{m}^3/\text{s}$ ；  
 $Fr$ ——闸门孔口断面的弗劳德数；  
 $v$ ——闸门孔口断面平均流速， $\text{m/s}$ ；  
 $e$ ——闸门开启高度， $\text{m}$ ；

$K$ 、 $a$ 、 $b$ ——各区间的系数，见表 B. 0. 1。

**B. 0. 2** 引水发电管道快速闸门门后通气孔面积可按发电管道面积的  $4\% \sim 7\%$  选用，事故闸门的通气孔面积可酌情减少。

**B. 0. 3** 检修闸门门后通气孔面积，可根据具体情况选定，宜不小于充水管面积。

表 B.0.1 半理论半经验公式系数表

管道类型	区间号	门后管道长度 管道净高度	Fr 的范围	$\beta = K(Fr - 1)^{[a \ln(Fr - 1) + b]} - 1$		
				K	a	b
设平面闸门的压力管道	I	6.10~10.66	3.96~20.30	1.158	0.112	-0.242
			3.87~3.960	1.0154	0	0
	II	10.66~27.40	1.94~6.290	1.0150	0.035	0.004
			1.61~1.940	1.0152	0	0
	III	27.40~35.78	1.91~17.190	1.042	0.039	0.008
			1.38~1.910	1.0413	0	0
	IV	35.78~77.00	1.08~15.670	1.1300	0.028	0.144
	设弧形闸门的无压管道	V	6.10~10.66	4.57~32.590	1.342	0.173
3.49~4.570				1.0153	0	0
VI		10.66~27.40	1.70~18.06	1.0540	0.019	0.013
			1.56~1.70	1.0515	0	0
VII		27.40~35.78	2.45~10.81	1.073	0.053	0.070
VIII		35.78~77.00	2.33~8.310	1.170	0.182	-0.019

## 附录 C 平面闸门门槽型式的选择

C.0.1 泄水系统平面闸门的门槽型式，可选用 I 型及 II 型门槽，其适用范围和体形参数见表 C.0.1。

表 C.0.1 平面闸门的门槽型式、体形参数和适用范围

槽型	图 形	门槽几何形状的参数	适用范围
I		<p>①较优宽深比 <math>W/D=1.6\sim 1.8</math>;</p> <p>②合宜宽深比 <math>W/D=1.4\sim 2.5</math>;</p> <p>③门槽初生空化数的经验公式为：<math>K_i = 0.38(W/D)</math> (公式适用于 <math>W/D=1.4\sim 3.5</math>)</p>	<p>①泄水孔事故闸门门槽和检修闸门门槽；</p> <p>②水头低于 12m 的溢流坝堰顶工作门门槽；</p> <p>③电站进水口事故闸门、快速闸门门槽；</p> <p>④泄水孔工作闸门门槽，当水流空化数 <math>K&gt;1.0</math> (约相当于水头低于 30m 或流速小于 20m/s) 时</p>
II		<p>①合宜宽深比 <math>W/D=1.5\sim 2.0</math>;</p> <p>②较优错距比 <math>\Delta/W=0.05\sim 0.08</math>;</p> <p>③较优斜坡 <math>\Delta/X=1/10\sim 1/12</math>;</p> <p>④较优圆角半径 <math>R=30\sim 50\text{mm}</math> 或圆角比 <math>R/D</math> 为 0.10;</p> <p>⑤门槽初生空化数 <math>K_i = 0.4\sim 0.6</math> (可根据已有科研成果及工程实例类比选用)</p>	<p>①泄水孔工作闸门门槽，其水流空化数 <math>K&gt;0.6</math> (约相当水头为 30~50m，或流速为 20~25m/s) 时；</p> <p>②高水头、短管道事故闸门门槽，其水流空化数 <math>K&gt;0.4</math> 且小于 1.0 时；</p> <p>③要求经常部分开启，其水流空化数 <math>K&gt;0.8</math> 的工作闸门门槽；</p> <p>④水头高于 12m，其水流空化数 <math>K&gt;0.8</math> 的溢流坝堰顶工作闸门门槽</p>

C.0.2 当门槽上游边齐冲形特殊，流态复杂或要求经前部力开启的工作闸门门槽，上述两种槽型无法适应时，可参照已建工程的运行经验并通过水工模型试验选择合适的门槽型式，以谋求增加门槽段水流空化数  $K$  值的合理措施或其他方法。

C.0.3 当水流空化数  $K < 0.6$  (约相当于水头高于 60m，或流速大于 30m/s) 时，除选用 II 型门槽或其他特殊槽型外，根据工程具体情况，在门槽上、下游一定范围内，宜采用钢板、低水灰比的高强度等级混凝土或其他抗蚀护面材料衬护；施工时应体形准确，表面平整。

C.0.4 水流空化数  $K$  可用式 (C.0.4) 计算：

$$K = \frac{(P_1 + P_a - P_v)/\gamma}{v^2/2g} \quad (\text{C.0.4})$$

式中  $P_1$ ——紧靠门槽上游附近的断面平均压力，kPa；

$P_a$ ——大气压力，kPa，见图 C.0.4-1；

$P_v$ ——水的饱和蒸汽压，kPa，见图 C.0.4-2；

$\gamma$ ——水的容重，kN/m<sup>3</sup>；

$v$ ——紧靠门槽上游附近断面的平均流速，m/s；

$g$ ——重力加速度，m/s<sup>2</sup>。

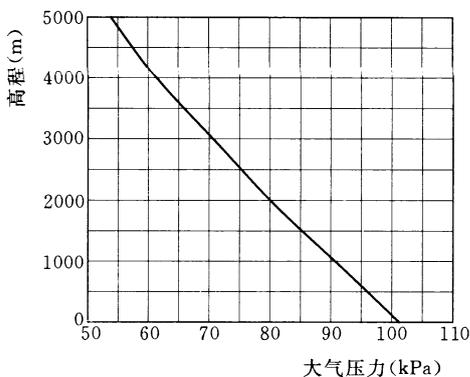


图 C.0.4-1 大气压力与高程的关系曲线

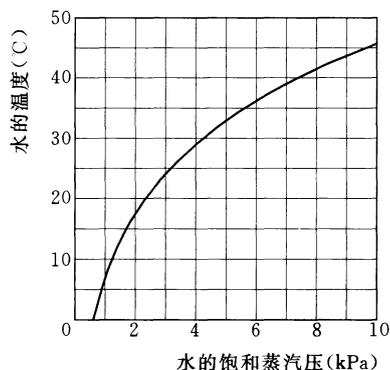


图 C. 0. 4 - 2 水的饱和蒸汽压与温度的关系曲线

如门槽形状不变，而水流空化数降低到某一数值时，则门槽段边界将发生空化现象。这一数值称为该门槽体形的初生空化数，通常以  $K_i$  表示。不同体形的门槽具有不同的初生空化数。

根据实际工程中门槽附近的水流空化数  $K$ ，可选用合适的门槽型式。若  $K_i < K$ ，则这种型式的门槽一般不致于发生空化。 $K > K_i$  的安全裕度，可根据闸门的重要性及工作条件选取安全系数  $n=1.2\sim 1.5$ ，使  $K \geq nK_i$ 。

## 附录 D 闸门荷载计算的主要公式

D.0.1 作用在闸门上的静水压力可按表 D.0.1 中的公式计算。

表 D.0.1 静水压力计算

序号	水压力图形	计算公式
1		总水压力: $P = \frac{1}{2} \gamma H_s^2 B_{zs}$ P 力作用点位置: $H_c = \frac{2}{3} H_s$
2		总水压力: $P = \frac{1}{2} \gamma (H_s^2 - H_x^2) B_{zs}$ P 力作用点位置: $H_c = \frac{1}{3} \left( 2H_s - \frac{H_x^2}{H_s + H_x} \right)$
3		总水压力: $P = \frac{1}{2} \gamma (2H_s - h) h B_{zs}$ P 力作用点位置: $H_c = H_s - \frac{h}{3} \frac{3H_s - 2h}{2H_s - h}$
4		总水压力: $P = \gamma (H_s - H_x) h B_{zs}$ P 力作用点位置: $H_c = H_s - \frac{1}{2} h$
5		总水压力: $P = \frac{1}{2} \gamma [ (2H_s - h) h - H_x^2 ] B_{zs}$ P 力作用点位置: $H_c = \frac{3H_s H_x^2 - H_x^3 - 6H_x^2 h + 6H_s h^2 - 2h^3}{3H_x^2 - 6H_s h + 3h^2}$

表 D.0.1 (续)

序号	水压力图形	计算公式
6		$P_s = \frac{1}{2} \gamma H_s^2 B$ $V_s = \frac{1}{2} \gamma R^2 \left[ \frac{\pi \phi}{180} + 2 \sin \phi_1 \cos \phi_2 - \frac{1}{2} (\sin 2\phi_1 + \sin 2\phi_2) \right] B$ $P_x = \frac{1}{2} \gamma H_x^2 B$ $V_x = \frac{1}{2} \gamma R^2 \left[ \frac{\pi \beta}{180} + 2 \sin \beta_1 \cos \phi_2 - \frac{1}{2} (\sin 2\beta_1 + \sin 2\phi_2) \right] B$ <p>总水压力:</p> $P = \sqrt{(P_s - P_x)^2 + (V_s - V_x)^2}$
7		$\phi_1 < \phi_2$ $P_s = \frac{1}{2} \gamma H_s^2 B$ $V_s = \frac{1}{2} \gamma R^2 \left[ \frac{\pi \phi}{180} - 2 \sin \phi_1 \cos \phi_2 - \frac{1}{2} (\sin 2\phi_2 - \sin 2\phi_1) \right] B$ $P_x = \frac{1}{2} \gamma H_x^2 B$ $V_x = \frac{1}{2} \gamma R^2 \left[ \frac{\pi \beta}{180} + 2 \sin \beta_1 \cos \phi_2 - \frac{1}{2} (\sin 2\beta_1 + \sin 2\phi_2) \right] B$ <p>总水压力:</p> $P = \sqrt{(P_s - P_x)^2 + (V_s - V_x)^2}$
8		$\phi_1 > \phi_2$ $P_s = \frac{1}{2} \gamma H_s^2 B$ $V_s = \frac{1}{2} \gamma R^2 \left[ \frac{\pi \phi}{180} - \sin 2\phi_2 - \sin (\phi_1 - \phi_2) - 2 \sin \phi \sin^2 \left( \frac{\phi_1 - \phi_2}{2} \right) \right] B$ $P_x = \frac{1}{2} \gamma H_x^2 B$ $V_x = \frac{1}{2} \gamma R^2 \left[ \frac{\pi \beta}{180} + 2 \sin \beta_1 \cos \phi_2 - \frac{1}{2} (\sin 2\beta_1 + \sin 2\phi_2) \right] B$ <p>总水压力:</p> $P = \sqrt{(P_s - P_x)^2 + (V_s - V_x)^2}$

表 D.0.1 (续)

序号	水压力图形	计算公式
9		$P_s = \frac{1}{2} \gamma (H_s + H'_s) h B$ $V_s = \frac{1}{2} \gamma R^2 \left[ \frac{\pi \phi}{180} + 2 \sin \phi_1 \cos \phi_2 - \frac{1}{2} (\sin 2\phi_1 + \sin 2\phi_2) + \frac{2H'_s}{R} (\cos \phi_1 - \cos \phi_2) \right] B$ $P_x, V_x, P \text{ 计算公式同序号 6}$
<p>注：<math>P_s</math>——上游水平分力，kN；<math>V_s</math>——上游垂直分力，kN；<math>P_x</math>——下游水平分力，kN；<math>V_x</math>——下游垂直分力，kN；<math>H_s</math>——上游水头，m；<math>H_x</math>——下游水头，m；<math>R</math>——弧门面板曲率半径，m；<math>\gamma</math>——水的容重，对淡水可取 <math>10 \text{ kN/m}^3</math>；对海水可取 <math>10.4 \text{ kN/m}^3</math>，含沙水按试验确定；<math>B_{zs}</math>——两侧止水间距，m；<math>B</math>——孔口宽度，m；<math>h</math>——闸门高度（计算到顶止水），m。</p>		

**D.0.2 作用在闸门上的动水压力，可按下列规定计算：**

**1** 闸门在动水中工作时，作用在闸门上的动水压力包括时均值及脉动值两个部分。当符合 4.0.5 条的规定时，脉动值的作用和影响应按动力系数予以考虑。垂直作用于闸门面板的时均动水压力可按静水压力分布计算。

**2** 当采用如图 D.0.2 所示之底缘形式时，上托力可按式 (D.0.2 - 1) 计算：

$$P_t = \gamma \beta_t H_s D_1 B_{zs} \quad (\text{D.0.2 - 1})$$

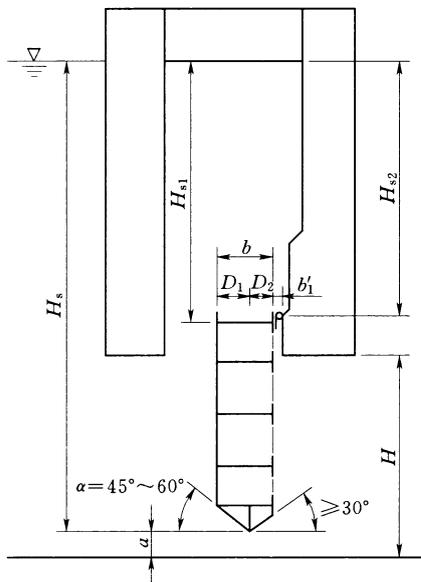


图 D.0.2 闸门底缘示意图

式中  $P_t$ ——上托力，kN；

$H_s$ 、 $D_1$ ——见图 D.0.2，m；

$B_{zs}$ ——两侧止水距离，m；

$\gamma$ ——水的容重，kN/m<sup>3</sup>；

$\beta_t$ ——上托力系数，当验算闭门力时，按闸门接近完全关闭时的条件考虑，取  $\beta_t = 1.0$ ，当计算持住力时，按闸门的开度考虑， $\beta_t$  可参照表 D.0.2 取用，特殊情况应通过水工模型试验论证；表 D.0.2 中  $\beta_t$  值适用于闸后明流流态，且对泄水道闸门， $0 < a < 0.5H$ （ $H$  为引水道的孔高）；对电站快速闸门， $0 < a < a_k$ （ $a_k$  为电站快速闸门关闭时闸后明满流转换临界开度；关于临界开度的确定问题，可根据已成工程类比或参考有关试验研究报告计算，必要时可通过水工模型试验确定；亦可暂按  $a_k = 0.5H$  估算）。

表 D.0.2 上托力系数  $\beta_t$

$\alpha$ (°)	$a/D_1$				
	2	4	8	12	16
60	0.8	0.7	0.5	0.4	0.25
52.5	0.7	0.5	0.3	0.15	—
45	0.6	0.4	0.1	0.05	—
注： $a$ ——闸门开启高度，m； $D_1$ ——闸门底止水至上游面板的距离，m； $\alpha$ ——闸门底缘的上游倾角（见图 D.0.2）。					

3 下吸力可按式 (D.0.2-2) 计算，溢流坝闸门、水闸闸门和坝内明流底孔闸门当符合 6.1.2 条 4 款要求及下游流态良好、通气充分时，可不计下吸力：

$$P_s = p_s D_2 B_{zs} \quad (\text{D.0.2-2})$$

式中  $P_s$ ——下吸力，kN；

$D_2$ ——闸门底缘止水至主梁下翼缘的距离，m；

$p_s$ ——闸门底缘  $D_2$  部分的平均下吸强度，可按  $20\text{kN/m}^2$  计算，当流态良好、通气充分并符合 6.1.2 条 4 款要求时，可适当减少。

**D.0.3** 波浪压力可按 DL 5077 规定计算。

**D.0.4** 作用在闸门上的水平淤沙压力可按式 (D.0.4-1)、式 (D.0.4-2) 计算：

$$P_n = \frac{1}{2}\gamma_n h_n^2 \tan^2(45^\circ - \phi/2)B \quad (\text{D.0.4-1})$$

$$\gamma_n = \gamma_0 - (1-n)\gamma_w \quad (\text{D.0.4-2})$$

式中  $P_n$ ——淤沙压力，kN；

$\gamma_n$ ——淤沙的浮容重， $\text{kN/m}^3$ ；

$\gamma_0$ ——淤沙的干容重， $\text{kN/m}^3$ ；

$\gamma_w$ ——水的容重， $\text{kN/m}^3$ ；

$n$ ——淤沙的孔隙率；

$h_n$ ——闸门前泥沙淤积厚度，m；

$B$ ——闸门前泥沙淤积宽度，m；

$\phi$ ——淤沙的内摩擦角， $(^\circ)$ 。

当闸门挡水面倾斜时，应计及竖向淤沙压力。

**D.0.5** 漂浮物撞击力可按式 (D.0.5) 计算：

$$P_z = \frac{W_p v}{gt} \quad (\text{D.0.5})$$

式中  $P_z$ ——漂浮物撞击力，kN；

$W_p$ ——漂浮物重量，kN，根据河流中漂浮物情况，按实际调查确定；

$v$ ——水流速度，m/s；

$g$ ——重力加速度；

$t$ ——撞击时间，s，应根据实际资料估算。

**D.0.6** 流冰撞击力可按 DL 5077 规定计算。

**D.0.7** 地震荷载可按 SL 203 规定计算。

**D.0.8** 风荷载可按 DL 5077 规定计算。

## 附录 E 闸门橡胶水封定型尺寸及性能

E.0.1 橡胶水封的定型尺寸应按图 E.0.1 及表 E.0.1 执行。

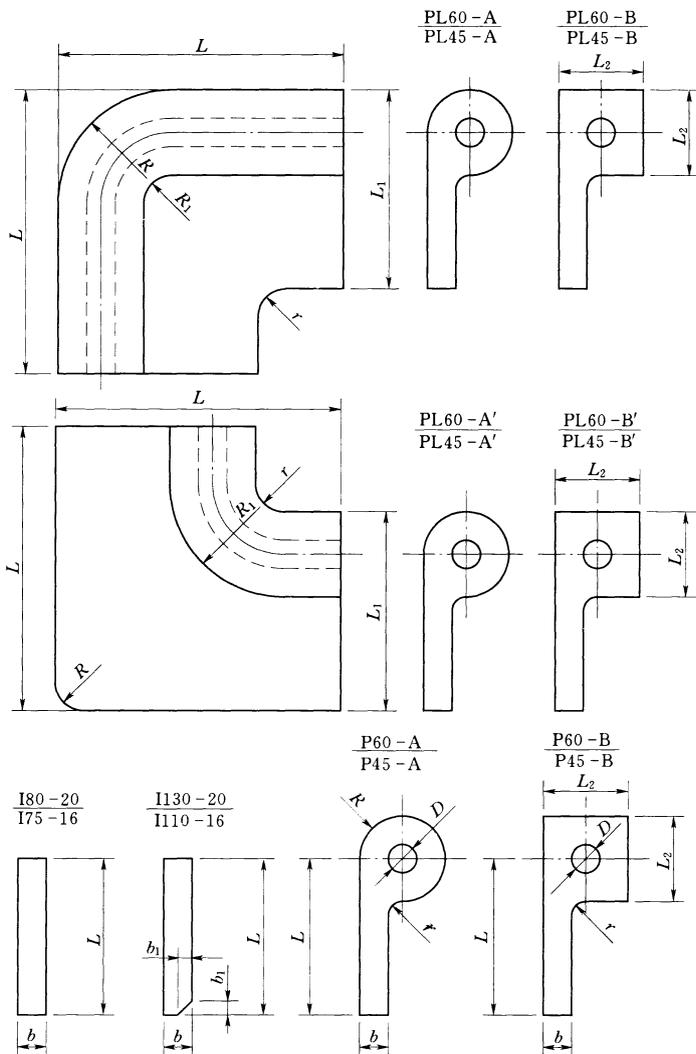


图 E.0.1 闸门橡皮水封定型尺寸

表 E.0.1 橡胶水封尺寸

闸门类别	止水部位	型号	各部位尺寸 (mm)									应用范围
			L	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	b	b <sub>1</sub>	R	R <sub>1</sub>	r	D	
平面闸门和潜孔弧形闸门	顶侧止水	P60-A	110	—	—	20	—	30	—	10	20	① P60-A 适用于孔口大的闸门； ② P45-A 适用于孔口中、小的闸门； ③ P60-B 和 P45-B 适用于潜孔弧形闸门
		P60-B	110	—	60	20	—	—	—	10	20	
		P45-A	100	—	—	16	—	22.5	—	8	20	
		P45-B	100	—	45	16	—	—	—	8	20	
	转角止水	PL60-A	350	140	—	—	—	80	20	20	—	① PL60-A、PL45-A、PL60-B 和 PL45-B 适用于下游止水的转角； ② PL60-A'、PL45-A'、PL60-B' 和 PL45-B' 适用于上游止水的转角
		PL60-A'	350	140	—	—	—	20	80	20	—	
		PL60-B	350	140	60	—	—	80	20	20	—	
		PL60-B'	350	140	60	—	—	20	80	20	—	
		PL45-A	350	122.5	—	—	—	55	10	10	—	
		PL45-A'	350	122.5	—	—	—	10	55	10	—	
		PL45-B	350	122.5	45	—	—	55	10	10	—	
	PL45-B'	350	122.5	45	—	—	10	55	10	—		
	底止水	I130-20	130	—	—	20	10	—	—	—	—	
		I110-16	110	—	—	16	8	—	—	—	—	
橡皮垫	180-20	80	—	—	20	—	—	—	—	—	① I80-20 适用于 P60-A； ② I75-16 适用于 P45-A	
	175-16	75	—	—	16	—	—	—	—	—		

注：橡塑复合水封的型号尺寸同此表。

E.0.2 橡胶水封的物理力学性能应不低于表 E.0.2 的规定。

表 E.0.2 橡胶水封的物理力学性能

序号	性能	指标			
		I类			II类
		7774	6674	6474	6574
1	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.2~1.5	1.2~1.5	1.2~1.5	1.2~1.5

表 E.0.2 (续)

序号	性能		指标			
			I类			II类
			7774	6674	6474	6574
2	硬度 (邵氏 A)		70±5	60±5	60±5	60±5
3	拉伸强度 (MPa)		≥22	≥18	≥13	≥14
4	拉断伸长率 (%)		≥400	≥450	≥450	≥400
5	压缩永久变形 (B型试样, 70℃×22h, %)		≤40	≤40	≤40	≤40
6	粘合强度 (试样宽度 25mm, kN/m)		≥10	≥10	≥10	≥10
7	压缩模量 (MPa)	20%	5.6~8.0	5.5~6.0	5.5~6.0	5.5~6.0
		30%	5.8~8.0	5.6~6.0	5.6~6.0	5.6~6.0
		40%	6.0~9.0	6.2~6.8	6.2~6.8	6.2~6.8
8	在-40~+40℃温度下工作		不发生冻裂或硬化			
注 1: I类是以天然橡胶为基的材料, II类是以合成橡胶为基的材料。 注 2: 第 6 项性能仅限于橡塑复合水封。 注 3: 高水头橡胶水封采用指标 7774。						

**E.0.3** 橡塑复合水封聚四氟乙烯薄膜厚度应大于 1.0mm, 磨损厚度(预压缩 3mm, 运行 3000m)应不大于 0.2mm。

## 附录 F 几种支承材料性能表

**F.0.1** 增强聚四氟乙烯材料性能应不低于下列规定：

1 增强聚四氟乙烯材料的物理力学性能应符合 F.0.1 的规定。

**表 F.0.1** 增强聚四氟乙烯材料的物理力学性能

序号	性能	指标	备注
1	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.20~1.50	
2	抗压强度 (MPa)	120~180	
3	缺口冲击强度 (kJ/m <sup>2</sup> )	>0.7	
4	球压痕硬度 (MPa)	≥100	GB/T 3398
5	容许线压强 (kN/cm)	≤80	
6	线胀系数 (K <sup>-1</sup> )	≤7.0×10 <sup>-5</sup>	
7	吸水率 (%)	≤0.6	
8	热变形温度 (°C)	185	

2 增强聚四氟乙烯材料滑块的宽度尺寸宜大于夹槽宽度 1%。

3 滑块表面粗糙度  $R_a$  应不大于 3.2 $\mu$ m。

**F.0.2** 钢基铜塑复合材料性能应不低于下列规定：

1 钢基铜塑复合材料的物理力学性能应符合表 F.0.2 的规定。

**表 F.0.2** 钢基铜塑复合材料的物理力学性能

序号	性能	复合材料		备注
		铜球/聚甲醛	铜螺旋/聚甲醛	
1	复合层厚度 (mm)	1.2~1.5	≥3.0	
2	抗压强度 (MPa)	≥250	≥160	
3	容许线压强 (kN/cm)	60	80	滑块
4	线胀系数 (K <sup>-1</sup> )	2.3×10 <sup>-5</sup>	2.3×10 <sup>-5</sup>	
5	工作温度 (°C)	-40~+100	-40~+100	

2 钢基铜塑复合材料的表层应均匀一致，无未溶化的塑料、无裂纹等缺陷。

**F.0.3 铜合金镶嵌固体润滑材料性能应不低于下列规定：**

1 铜合金镶嵌固体润滑材料的铜合金应符合 GB/T 23894 规定的要求，其力学性能见表 F.0.3。

**表 F.0.3 铜合金材料的力学性能**

序号	性能	指标	备注
1	抗拉强度 (MPa)	≥740	
2	断后伸长率 (%)	≥10	
3	布氏硬度	≥210	HB

2 固体润滑剂的化学成分应符合图样规定，表面颜色一致，无缺陷、无剥落、无裂纹，镶嵌牢固，不应松动。

**F.0.4 工程塑料合金材料性能应不低于下列规定：**

1 工程塑料合金材料的物理力学性能应符合表 F.0.4 的规定。

**表 F.0.4 工程塑料合金材料的物理力学性能**

序号	性能	指标	备注
1	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.1~1.3	
2	抗压强度 (MPa)	90~160	
3	D 型邵氏硬度	>66	GB/T 2411
4	容许线压强 (kN/cm)	<83	滑块
5	吸水率 (%)	≤0.6	
6	热变形温度 (°C)	186	

2 工程塑料合金材料滑块的宽度尺寸宜大于夹槽宽度 1%。

3 滑块表面粗糙度  $R_a$  应不大于  $3.2\mu\text{m}$ 。

## 附录 G 受弯构件的局部稳定计算

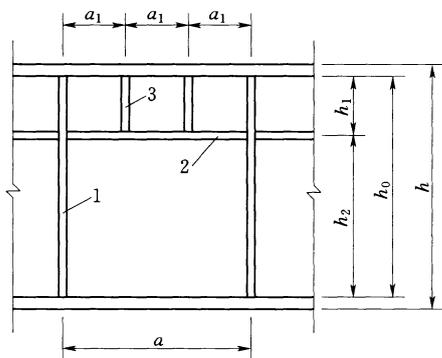
**G.0.1** 组合梁腹板配置加劲肋（图 G.0.1）应符合下列规定：

1 当  $h_0/t_w \leq 80 \sqrt{235/\sigma_s}$  时，可不配置加劲肋。其中  $h_0$  为腹板的计算高度， $t_w$  为腹板的厚度。

2 当  $80 \sqrt{235/\sigma_s} < h_0/t_w \leq 160 \sqrt{235/\sigma_s}$  时，应配置横向加劲肋，并按 G.0.2~G.0.4 条的规定计算。

3 当  $h_0/t_w > 160 \sqrt{235/\sigma_s}$  时，应在弯曲应力较大区格的受压区增加配置纵向加劲肋，并按 G.0.2~G.0.4 条的规定进行计算。

4 梁的支座处和上翼缘受有较大固定集中荷载处，应设置支撑加劲肋。



1—横向加劲肋；2—纵向加劲肋；3—短加劲肋

**图 G.0.1 加劲肋布置**

**G.0.2** 梁腹板仅用横向加劲肋加强时，加劲肋间距  $a$  应按式 (G.0.2) 计算：

$$a \leq \frac{615h_0}{\frac{h_0}{t_w} \sqrt{\eta\tau} - 765} \quad (\text{G.0.2-1})$$

$$\tau = V/(h_w t_w) \quad (\text{G.0.2-2})$$

式中  $a$ ——加劲肋间距，mm，式 (G.0.2-1) 右端算得的值大于  $2h_0$  或分母为负值时，取  $a=2h_0$ ；

$h_0$ ——腹板的计算高度，mm；

$t_w$ ——腹板的厚度，mm；

$\eta$ ——考虑  $\sigma$  影响的增大系数，按表 G.0.2 采用；

$\tau$ ——所考虑梁段内最大剪力产生的腹板平均剪应力，N/mm<sup>2</sup>，按式 (G.0.2-2) 计算；

$V$ ——剪力，N；

$h_w$ ——腹板的高度，mm。

表 G.0.2 系 数  $\eta$

$\sigma \left( \frac{h_0}{100t_w} \right)^2$	100	120	140	160	180	200
$\eta$	1.02	1.03	1.05	1.06	1.08	1.10
$\sigma \left( \frac{h_0}{100t_w} \right)^2$	220	240	260	280	300	320
$\eta$	1.13	1.16	1.19	1.24	1.29	1.35
$\sigma \left( \frac{h_0}{100t_w} \right)^2$	340	360	380	400	420	440
$\eta$	1.43	1.53	1.67	1.85	2.14	2.65
注 1: $\sigma$ —— $\tau$ 同一截面的腹板计算高度边缘的弯曲压应力 (N/mm <sup>2</sup> )，按 $\sigma = M_{y1}/I$ 计算。其中 $I$ ——梁毛截面惯性矩， $y_1$ ——腹板计算高度受压边缘至中性轴的距离。 注 2: 表中的系数 $\eta$ 按下式算得：						
$\eta = \frac{1}{\sqrt{1 - \left[ \frac{\sigma}{475} \left( \frac{h_0}{100t_w} \right)^2 \right]^2}}$						

G.0.3 梁的腹板同时用横向加劲肋和纵向加劲肋加强时，横向

加劲肋间距  $a$  仍按式 (G. 0. 2 - 1) 确定，但应以  $h_2$  代替  $h_0$ ，并取  $\eta=1.0$ 。

**G. 0. 4** 加劲肋宜在腹板两侧成对配置，也可单侧配置，但支承加劲肋，不应单侧配置。

横向加劲肋的最小间距应为  $0.5h_0$ ，最大间距应为  $2h_0$ 。纵向加劲肋至腹板计算高度受压边缘的距离  $h_1$  应在  $h_0/5 \sim h_0/4$  范围内。

腹板两侧成对配置的横向加劲肋，其外伸宽度  $b_s$  应符合式 (G. 0. 4 - 1) 规定：

$$b_s \geq h_0/30 + 40 \quad (\text{G. 0. 4 - 1})$$

腹板两侧成对配置的横向加劲肋，其厚度  $t_s$  应符合式 (G. 0. 4 - 2) 规定：

$$t_s \geq b_s/15 \quad (\text{G. 0. 4 - 2})$$

腹板一侧配置的横向加劲肋，其外伸宽度应大于按式 (G. 0. 4 - 1) 算得的 1.2 倍，厚度不应小于其外伸宽度的 1/15。

在同时用横向加劲肋和纵向加劲肋加强的腹板中，横向加劲肋的截面尺寸除应符合上述规定外，其截面惯性矩  $I_z$  还应符合式 (G. 0. 4 - 3) 规定：

$$I_z \geq 3h_0 t_w^3 \quad (\text{G. 0. 4 - 3})$$

纵向加劲肋的截面惯性矩  $I_y$  应符合式 (G. 0. 4 - 4) 和式 (G. 0. 4 - 5) 规定。

当  $a/h_0 \leq 0.85$  时：

$$I_y \geq 1.5h_0 t_w^3 \quad (\text{G. 0. 4 - 4})$$

当  $a/h_0 > 0.85$  时：

$$I_y \geq (2.5 - 0.45a/h_0)(a/h_0)^2 h_0 t_w^3 \quad (\text{G. 0. 4 - 5})$$

短加劲肋的最小间距为  $0.75h_1$ 。短加劲肋外伸宽度应取横向加劲肋外伸宽度的  $0.7 \sim 1.0$  倍，厚度不应小于短加劲肋外伸宽度的 1/15。

用型钢 (H 型钢、工字钢、槽钢、肢尖焊于腹板的角钢) 做成的加劲肋，其截面惯性矩不应小于相应钢板加劲肋的惯

性矩。

在腹板两侧成对配置的加劲肋，其截面惯性矩应按梁腹板中心线为轴线进行计算。

在腹板一侧配置的加劲肋，其截面惯性矩应按与加劲肋相连的腹板边缘为轴线进行计算。

**G. 0.5** 梁的支承加劲肋，应按承受梁支座反力或固定集中荷载的轴心受压构件计算其在腹板平面外的稳定性。此受压构件的截面应包括加劲肋和加劲肋每侧  $15t_w \sqrt{235/\sigma_s}$  范围内的腹板面积，计算长度取  $h_0$ 。

当梁支承加劲肋的端部为刨平顶紧时，应按其所承受的支座反力或固定集中荷载计算其端面承压应力。当端部为焊接时，应按传力情况计算其焊缝应力。

支承加劲肋与腹板的连接焊缝，应按传力需要进行计算。

**G. 0.6** 梁受压翼缘自由外伸宽度  $b$  与其厚度  $t$  之比应符合式 (G. 0.6-1) 规定：

$$b/t \leq 15 \sqrt{235/\sigma_s} \quad (\text{G. 0.6-1})$$

箱形截面梁受压翼缘板在两腹板之间的无支承宽度  $b_0$  与其厚度  $t$  之比应符合式 (G. 0.6-2) 规定：

$$b_0/t \leq 40 \sqrt{235/\sigma_s} \quad (\text{G. 0.6-2})$$

当箱形截面梁受压翼缘板设有纵向加劲肋时，式 (G. 0.6-2) 中的  $b_0$  取腹板与纵向加劲肋之间的翼缘板无支承宽度。

翼缘板自由外伸宽度  $b$  的取值应为：对焊接构件，取腹板边至翼缘板（肢）边缘的距离；对轧制构件，取内圆弧起点至翼缘板（肢）边缘的距离。

## 附录 H 面板验算公式及图表

H. 0. 1 面板的折算应力应按下列情况分别验算：

1 当面板的边长比  $b/a > 1.5$ ，且布置在沿主梁轴线方向时（见图 H. 0. 1-1），按式（H. 0. 1-1）～式（H. 0. 1-3）验算面板 A 点的折算应力：

$$\sigma_{zh} = \sqrt{\sigma_{my}^2 + (\sigma_{mx} - \sigma_{ox})^2} - \sigma_{my}(\sigma_{mx} - \sigma_{ox}) \leq 1.1\alpha[\sigma] \quad (\text{H. 0. 1-1})$$

$$\sigma_{my} = K_y q a^2 / \delta^2 \quad (\text{H. 0. 1-2})$$

$$\sigma_{mx} = \mu \sigma_{my} \quad (\text{H. 0. 1-3})$$

式中  $\sigma_{zh}$ ——面板的折算应力；

$\sigma_{my}$ ——垂直于主（次）梁轴线方向面板支承长边中点的局部弯曲应力，取绝对值；

$\sigma_{mx}$ ——面板沿主（次）梁轴线方向的局部弯曲应力，取绝对值；

$\sigma_{ox}$ ——对应于面板验算点的主（次）梁上翼缘的整体弯曲应力，取绝对值；

$[\sigma]$ ——钢材的抗弯容许应力，按表 5. 2. 1-2 采用；

$\alpha$ ——弹塑性调整系数，当  $b/a > 3$  时，取  $\alpha = 1.4$ ；当  $b/a \leq 3$  时，取  $\alpha = 1.5$ ；

$K_y$ ——支承长边中点弯应力系数，按表 H. 0. 1-1～表 H. 0. 1-4 采用；

$q$ ——面板计算区格中心的水压强度，MPa；

$\mu$ ——泊松比，取 0.3。

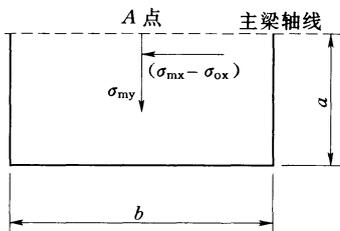
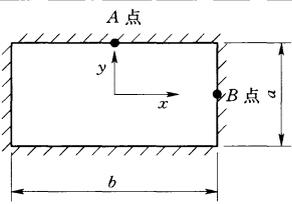


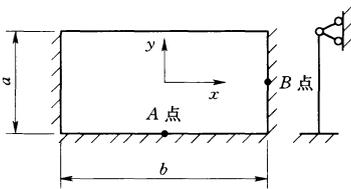
图 H. 0. 1-1 面板布置图 1

表 H. 0. 1 - 1 四边固定矩形弹性薄板受均载的  
弯应力系数  $K(\mu=0.3)$



$b/a$	支承长边中点 (A 点) $K_y$	支承短边中点 (B 点) $K_x$
1.0	0.308	0.308
1.1	0.349	0.323
1.2	0.383	0.332
1.3	0.412	0.338
1.4	0.436	0.341
1.5	0.454	0.342
1.6	0.468	0.343
1.7	0.479	0.343
1.8	0.487	0.343
1.9	0.493	0.343
2.0	0.497	0.343
2.5	0.500	0.343
$\infty$	0.500	0.343

表 H. 0. 1 - 2 三边固定一长边简支矩形弹性薄板  
受均载的弯应力系数  $K(\mu=0.3)$



$b/a$	支承长边中点 (A 点) $K_y$	支承短边中点 (B 点) $K_x$
1.0	0.328	0.360

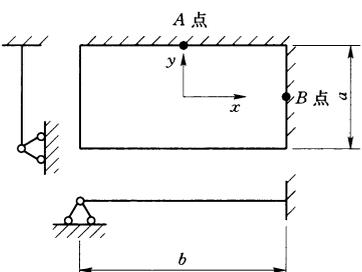
表 H.0.1-2 (续)

$b/a$	支承长边中点 (A 点) $K_y$	支承短边中点 (B 点) $K_x$
1.25	0.472	0.425
1.5	0.565	0.455
1.75	0.632	0.465
2.0	0.683	0.470
2.5	0.732	0.470
3.0	0.740	0.471
$\infty$	0.750	0.472

表 H.0.1-3 三边固定一短边简支矩形弹性薄板  
受均载的弯应力系数  $K(\mu=0.3)$

$b/a$	支承长边中点 (A 点) $K_y$	支承短边中点 (B 点) $K_x$
1.0	0.360	0.328
1.25	0.448	0.341
1.5	0.473	0.341
1.75	0.489	0.341
2.0	0.500	0.342
2.5	0.500	0.342
3.0	0.500	0.342
$\infty$	0.500	0.342

表 H. 0. 1 - 4 两相邻边简支另两相邻边固定矩形弹性薄板受均载的弯应力系数  $K(\mu=0.3)$



$b/a$	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
支承长边中点 (A 点) $K_y$	0.407	0.459	0.506	0.549	0.585	0.616	0.640	0.662	0.680	0.695	0.708
支承短边中点 (B 点) $K_x$	0.407	0.425	0.441	0.452	0.459	0.463	0.467	0.468	0.470	0.471	0.472

2 当面板的边长比  $b/a \leq 1.5$  或面板长边方向与主梁轴线垂直时 (见图 H. 0. 1 - 2), 还应按式 (H. 0. 1 - 4) ~ 式 (H. 0. 1 - 7) 验算面板 B 点的折算应力:

$$\sigma_{zh} = \sqrt{\sigma_{my}^2 + (\sigma_{mx} + \sigma_{ox})^2} - \sigma_{my}(\sigma_{mx} + \sigma_{ox}) \leq 1.1\alpha[\sigma] \quad (\text{H. 0. 1 - 4})$$

$$\sigma_{mx} = Kqa^2/\delta^2 \quad (\text{H. 0. 1 - 5})$$

$$\sigma_{my} = \mu\sigma_{mx} \quad (\text{H. 0. 1 - 6})$$

$$\sigma_{ox} = (1.5\xi_1 - 0.5)M/W \quad (\text{H. 0. 1 - 7})$$

式中  $\sigma_{mx}$  —— 面板沿主梁轴线方向的局部弯曲应力, 取绝对值,  $K$  值对图 H. 0. 1 - 2 a) 取  $K_x$ , 对图 H. 0. 1 - 2 b) 取  $K_y$ ;

$\sigma_{my}$  —— 垂直于主梁轴线方向面板的局部弯曲应力, 取绝

对值；

$\sigma_{ox}$ ——对应于面板验算点主梁上翼缘的整体弯应力，取绝对值；

$\xi_1$ ——面板兼作主（次）梁上翼缘的有效宽度系数（见表 H. 0. 2）；

$M$ ——对应于面板验算点主梁的弯矩；

$W$ ——对应于面板验算点主梁的截面抵抗矩；

$\mu$ ——泊松比，取 0. 3；

其余符号意义同前。

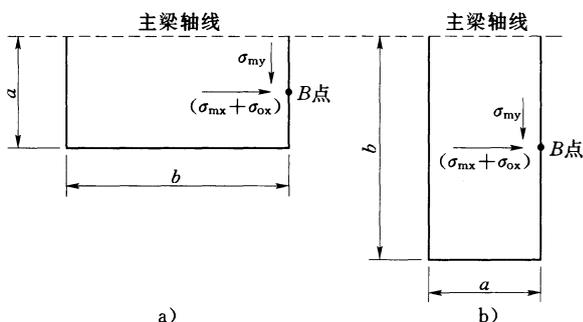


图 H. 0. 1 - 2 面板布置图 2

**H. 0. 2** 面板参与梁系有效宽度应按以下方法计算：

1 面板兼作主（次）梁翼缘的有效宽度  $B$ ，对于简支梁或连续梁中正弯矩段，可按式（H. 0. 2 - 1）～式（H. 0. 2 - 3）计算（见图 H. 0. 2），取其中较小值。

$$B = \xi_1 b \quad (\text{H. 0. 2 - 1})$$

$$\left. \begin{aligned} B &\leq 60\delta + b_1 (\text{Q235 钢}) \\ B &\leq 50\delta + b_1 (\text{Q345、Q390 钢}) \end{aligned} \right\} \quad (\text{H. 0. 2 - 2})$$

$$b = (b_1 + b_2) / 2 \quad (\text{H. 0. 2 - 3})$$

式中  $b$ ——主、次梁的间距，按式（H. 0. 2 - 3）计算（ $b_1$ 、 $b_2$  见图 H. 0. 2）；

$\xi_1$ ——有效宽度系数，按表 H. 0. 2 采用；

$\delta$ ——面板厚度；

$b_1$ ——梁肋宽度，当梁另有上翼缘时，为上翼缘宽度。

表 H. 0.2 面板的有效宽度系数  $\xi_1$ 、 $\xi_2$

$l_0/b$	0.5	1	1.5	2.0	2.5	3	4	5	6	8	10	20
$\xi_1$	0.2	0.40	0.58	0.70	0.78	0.84	0.90	0.94	0.95	0.97	0.98	1.00
$\xi_2$	0.16	0.30	0.42	0.51	0.58	0.64	0.71	0.77	0.79	0.83	0.86	0.92

注 1:  $l_0$  为主(次)梁弯矩零点之间的距离。对于简支梁  $l_0=l$ ；对于连续梁的正弯矩段可近似地取  $l_0=0.6l\sim 0.8l$ ；对于其负弯矩段可近似地取  $l_0=0.4l$ ，其中  $l$  为主(次)梁的跨度(见图 H. 0.2)。

注 2:  $\xi_1$  适用于梁的正弯矩图为抛物线图形； $\xi_2$  适用于梁的负弯矩图近似地取为三角形。

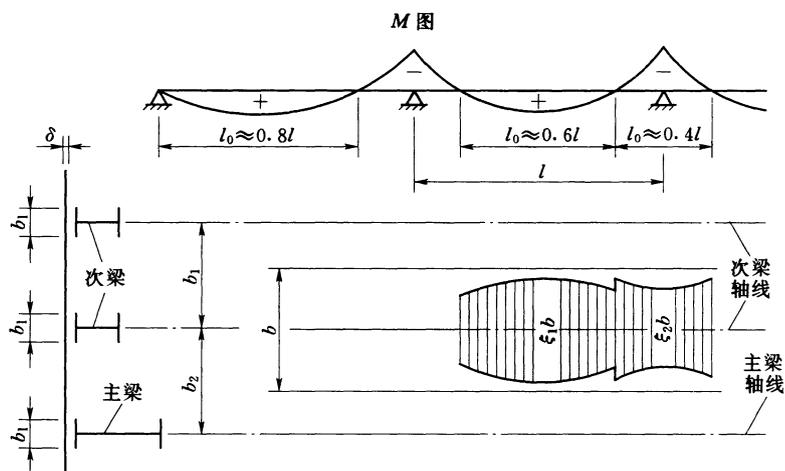


图 H. 0.2 面板有效宽度系数示意图

2 对于连续梁中负弯矩段或悬臂段，面板的有效宽度按式(H. 0.2-4)计算：

$$B = \xi_2 b \quad (\text{H. 0.2-4})$$

式中  $\xi_2$ ——有效宽度系数，按表 H. 0.2 采用。

## 附录 I 栅条稳定临界荷载计算

**I. 0. 1** 受均布荷载的悬臂梁，长方形断面的栅条临界荷载应按式 (I. 0. 1) 计算：

$$P_L = \frac{12.85}{l^2} \sqrt{EI_y GI_d} \quad (\text{I. 0. 1})$$

式中  $P_L$ ——栅条整体稳定的临界荷载，N；

$l$ ——栅条的跨度，mm；

$E$ ——钢材的弹性模量，N/mm<sup>2</sup>；

$G$ ——钢材的剪切模量，N/mm<sup>2</sup>；

$I_y$ ——栅条对  $y$  轴惯性矩， $I_y = h\delta^3/12$ ，mm<sup>4</sup>；

$I_d$ ——栅条断面的抗扭惯性矩， $I_d = h\delta^3/3$ ，mm<sup>4</sup>；

$h$ ——栅条断面高度，mm；

$\delta$ ——栅条断面厚度，mm。

**I. 0. 2** 受均布荷载的简支梁，长方形断面的栅条临界荷载应按式 (I. 0. 2) 计算：

$$P_L = \frac{28.3}{l^2} \sqrt{EI_y GI_d} \quad (\text{I. 0. 2})$$

式中符号意义同式 (I. 0. 1)。

**I. 0. 3** 栅条临界荷载  $P_L$  应大于栅条荷载  $P$ ，并应符合式 (I. 0. 3) 规定：

$$P_L \geq kP \quad (\text{I. 0. 3})$$

式中  $P$ ——栅条荷载，N；

$k$ ——整体稳定安全系数， $k=2$ 。

## 附录 J 栅条振动计算

**J. 0. 1** 当过栅流速增大到某一范围时，栅条尾部将出现交替的涡流脱落。涡流脱落产生的干扰频率按式 (J. 0. 1) 计算：

$$f = S_r \frac{v}{\delta} \quad (\text{J. 0. 1})$$

式中  $f$ ——涡流脱落产生的干扰频率，Hz；

$v$ ——过栅流速，mm/s，有试验时为实测最大过栅净流速，否则采用 2. 25 倍平均过栅净流速；

$\delta$ ——栅条断面厚度，mm；

$S_r$ ——斯特劳哈尔数，无量纲系数，当迎水面为矩形时，宜采用 0. 19~0. 23，流速大、高厚比大者取大值。

**J. 0. 2** 单根栅条的固有振动频率按式 (J. 0. 2) 计算：

$$f_n = \frac{\alpha}{2\pi} \sqrt{\frac{EI_y g}{Wl^3}} \quad (\text{J. 0. 2})$$

式中  $f_n$ ——单根栅条固有频率，Hz；

$\alpha$ ——固端系数，两端简支条件下等于  $\pi^2$  (=9. 87)，两端固定条件下等于  $4\pi^2/\sqrt{3}$  (=22. 79)，当栅条两端焊接在支撑梁上，宜采用 17~18；

$E$ ——栅条材料的弹性模量，N/mm<sup>2</sup>；

$I_y$ ——栅条对  $y$  轴惯性矩，mm<sup>4</sup>；

$g$ ——重力加速度，mm/s<sup>2</sup>；

$W$ ——栅条在水中的有效重量，N，按式 (J. 0. 3) 计算；

$l$ ——栅条的跨度，mm。

**J. 0. 3** 栅条在水中的有效重量按式 (J. 0. 3) 计算：

$$W = V \left( W_s + \frac{b}{\delta} W_0 \right) \quad (\text{J. 0. 3})$$

其中

$$V = lh\delta$$

式中  $W$ ——栅条在水中的有效重量，N；

$V$ ——栅条支点间体积， $\text{mm}^3$ ；

$W_s$ ——栅条材料的容重， $\text{N}/\text{mm}^3$ ；

$b$ ——栅条净距，mm；

$W_0$ ——水的容重， $\text{N}/\text{mm}^3$ ；

$h$ ——栅条断面高度，mm。

**J. 0. 4** 拦污栅栅条固有频率  $f_n$  应大于涡流脱落干扰频率  $f$ ，并应符合式 (J. 0. 4) 规定 (相应于  $S_r=0.2$ )：

$$\frac{f_n}{f} \geq 2.5 \quad (\text{J. 0. 4})$$

## 附录 K 滚轮接触应力计算

**K. 0. 1** 圆柱形滚轮与平面轨道，接触情况是线接触，其接触应力可按式 (K. 0. 1) 验算：

$$\sigma_{\max} = 0.418 \sqrt{PE/bR} \leq 3.0\sigma_s \quad (\text{K. 0. 1})$$

式中  $P$ ——作用在滚轮上的荷载，N；

$b$ ——轮缘宽度，mm；

$R$ ——滚轮的半径，mm。

**K. 0. 2** 圆柱形或圆锥形滚轮与弧形轨头的轨道，双曲率的滚轮与平面轨头的轨道，接触情况是点接触，其接触应力可按式 (K. 0. 2-1) 验算：

$$\sigma = \xi \sqrt[3]{PE^2/R_2^2} \leq 1.15\sigma_s \quad (\text{K. 0. 2-1})$$

当  $R_1$  与  $R_2$  之比在 0.3~0.8 之间，也可按下列近似公式 (K. 0. 2-2) 验算：

$$\sigma_{\max} = 0.24 \sqrt[3]{PE^2(1/R_1 + 1/R_2)^2} \leq 4.5\sigma_s \quad (\text{K. 0. 2-2})$$

$$E' = \frac{2E_1E_2}{E_1 + E_2} \quad (\text{K. 0. 2-3})$$

式中  $R_1$ 、 $R_2$ ——两接触面的半径，mm， $R_1$  为小值， $R_2$  为大值；

$E$ ——材料的弹性模量，N/mm<sup>2</sup>，若两种弹性模量不同的材料接触时，应按式 (K. 0. 2-3) 采用合成弹性模量  $E'$  进行计算；

$\sigma_s$ ——两种接触材料中较小的屈服强度，N/mm<sup>2</sup>，选用  $\sigma_s$  时，应注意与材料表面的热处理硬度有关；

$\xi$ ——由  $R_1/R_2$  比值确定，按表 K. 0. 2 采用。

表 K.0.2  $\xi$  系数值

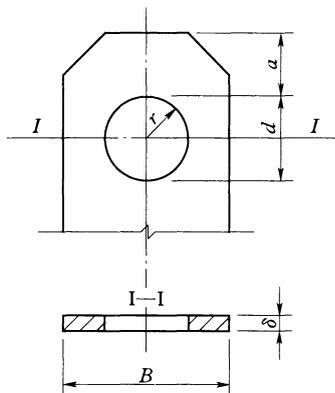
$R_1/R_2$	1.00	0.90	0.80	0.70	0.60	0.50	0.40	0.30	0.20	0.15	0.10
$\xi_1$	0.078	0.084	0.092	0.101	0.112	0.122	0.139	0.162	0.215	0.256	0.330
$\xi_2$	0.089	0.096	0.101	0.110	0.117	0.122	0.128	0.144	0.164	0.184	0.194
注： $\xi_1$ ——接触面中心处的应力系数； $\xi_2$ ——接触面的椭圆长径末端处的应力系数。											

## 附录 L 吊耳与吊杆的计算

**L.0.1** 吊耳的宽度、厚度与吊耳孔直径的关系见图 L.0.1，并按式 (L.0.1) 选用：

$$\left. \begin{aligned} B &= (2.4 \sim 2.6)d \\ \delta &\geq B/20 \\ a &= (0.9 \sim 1.05)d \end{aligned} \right\}$$

(L.0.1)



**L.0.2** 吊耳孔壁承压应力应按式 (L.0.2-1) 进行验算，吊耳孔拉应力应按式 (L.0.2-2) 验算：

$$\sigma_{cj} = \frac{P}{\delta d} \leq [\sigma_{cj}] \quad (\text{L.0.2-1})$$

图 L.0.1 吊耳计算简图

$$\sigma_k = \sigma_{cj} \frac{R^2 + r^2}{R^2 - r^2} \leq [\sigma_k] \quad (\text{L.0.2-2})$$

式中  $P$ ——一个吊耳孔所承受的荷载，N；

$\delta$ ——吊耳板的厚度，mm；

$r$ 、 $R$ ——见图 L.0.1， $R$  取  $B/2$  与  $(r+a)$  两者中之小者；

$[\sigma_{cj}]$ 、 $[\sigma_k]$  ——容许局部紧接承压应力和孔壁抗拉应力，按表 5.2.2 采用。

为调整吊耳孔位置而采用轴承板时，两块轴承板的总厚度应不小于  $1.2\delta$ 。

**L.0.3** 吊杆最弱断面拉应力应按式 (L.0.3) 验算：

$$\sigma = \frac{P}{A} \leq 0.9[\sigma] \quad (\text{L.0.3})$$

式中  $P$ ——闸门吊杆所承受的拉力，N；

$A$ ——吊杆最弱断面面积， $\text{mm}^2$ ；

$[\sigma]$ ——容许拉应力， $\text{N}/\text{mm}^2$ ，按表 5.2.1-2 采用。

## 附录 M 轨道的计算

**M.0.1** 轨道与滚轮的接触应力应按附录 K 验算。

**M.0.2** 平面闸门主轨强度可按 M.0.3 条的方法进行验算，也可将轨道作为弹性地基梁进行验算。

**M.0.3** 滚轮作用下轨道验算应符合下列规定（见图 M.0.3）：

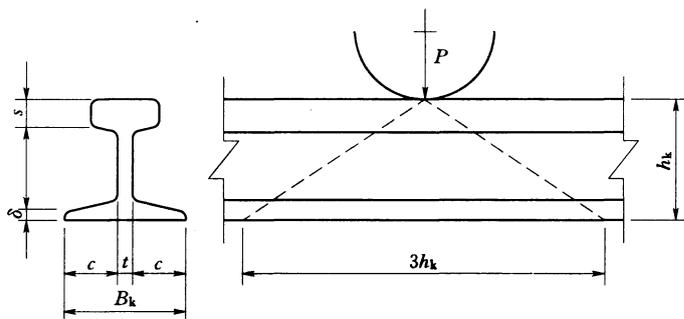


图 M.0.3 滚轮作用轨道计算简图

1 滚轮作用下轨道底板混凝土承压应力应按式 (M.0.3 - 1) 验算，当相邻两滚轮中心距小于  $3h_k$  时，可按式 (M.0.3 - 2) 验算：

$$\sigma_h = \frac{P}{3h_k B_k} \leq [\sigma_h] \quad (\text{M.0.3-1})$$

$$\sigma_h = \frac{P}{B_k L} \leq [\sigma_h] \quad (\text{M.0.3-2})$$

式中  $P$ ——滚轮的荷载，N；

$h_k$ ——轨道高度，mm；

$B_k$ ——轨道底板宽度，mm；

$L$ ——相邻两滚轮的中心距，mm；

$[\sigma_h]$ ——混凝土的容许承压应力， $\text{N}/\text{mm}^2$ ，按表 5.2.5 采用。

2 滚轮作用下轨道横断面弯曲应力应按式 (M. 0. 3 - 3) 验算:

$$\sigma = \frac{3Ph_k}{8W_k} \leq [\sigma] \quad (\text{M. 0. 3 - 3})$$

式中  $W_k$ ——轨道截面抵抗矩,  $\text{mm}^3$ ;

$[\sigma]$ ——抗弯容许应力,  $\text{N}/\text{mm}^2$ , 对铸锻件按表 5. 2. 2 采用。

3 滚轮作用下轨道颈部的局部承压应力应按式 (M. 0. 3 - 4) 验算:

$$\sigma_{cd} = \frac{P}{3st} \leq [\sigma_{cd}] \quad (\text{M. 0. 3 - 4})$$

式中  $s$ ——颈部至轨面的距离,  $\text{mm}$ ;

$t$ ——颈部厚度,  $\text{mm}$ ;

$[\sigma_{cd}]$ ——局部承压容许应力,  $\text{N}/\text{mm}^2$ , 对铸锻件按表 5. 2. 2 采用。

4 滚轮作用下轨道底板弯曲应力应按式 (M. 0. 3 - 5) 验算:

$$\sigma = 3\sigma_h \frac{c^2}{\delta^2} \leq [\sigma] \quad (\text{M. 0. 3 - 5})$$

式中  $c$ ——底板悬臂段长度,  $\text{mm}$ ;

$\delta$ ——底板厚度,  $\text{mm}$ ;

$[\sigma]$ ——抗弯容许应力,  $\text{N}/\text{mm}^2$ , 对铸锻件按表 5. 2. 2 采用。

**M. 0. 4** 滑块作用下轨道验算应符合下列规定 (见图 M. 0. 4):

1 轨道底板的混凝土承压应力应按式 (M. 0. 4 - 1) 验算:

$$\sigma_h = q/B_k \leq [\sigma_h] \quad (\text{M. 0. 4 - 1})$$

式中  $q$ ——滑块单位长度荷载,  $\text{N}/\text{mm}$ 。

2 轨道底板弯曲应力应按式 (M. 0. 4 - 2) 验算:

$$\sigma = 3\sigma_h \frac{c^2}{\delta^2} \leq [\sigma] \quad (\text{M. 0. 4 - 2})$$

式中  $[\sigma]$ ——容许弯应力,  $\text{N}/\text{mm}^2$ , 按表 5. 2. 1 - 2 采用。

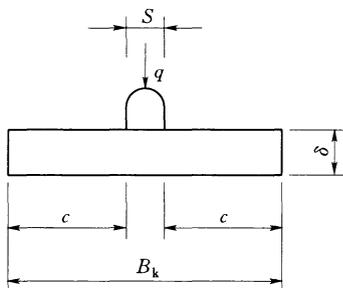


图 M. 0. 4 滑块作用轨道计算简图

## 附录 N 摩擦系数

表 N 摩擦系数表

种类	材料及工作条件		系数值	
			最大	最小
滑动摩擦系数	钢对钢（干摩擦）		0.5~0.6	0.15
	钢对铸铁（干摩擦）		0.35	0.16
	钢对木材（有水时）		0.65	0.3
	钢基铜塑复合材料滑道及增强聚四氟乙烯板滑道对不锈钢，在清水中的压强 $q$	$q > 2.5 \text{ kN/mm}$	0.09	0.04
		$q = 2.5 \sim 2.0 \text{ kN/mm}$	0.09~0.11	0.05
		$q = 2.0 \sim 1.5 \text{ kN/mm}$	0.11~0.13	0.05
$q = 1.5 \sim 1.0 \text{ kN/mm}$		0.13~0.15	0.06	
	$q < 1.0$	0.15	0.06	
滑动轴承摩擦系数	钢对青铜（干摩擦）		0.30	0.16
	钢对青铜（有润滑）		0.25	0.12
	钢基铜塑复合材料对镀铬钢（不锈钢）		0.12~0.14	0.05
止水摩擦系数	橡胶对钢		0.70	0.35
	橡胶对不锈钢		0.50	0.20
	橡塑复合水封对不锈钢		0.20	0.05
滚动摩擦力臂	钢对钢		1mm	
	钢对铸铁		1mm	
注：轨道工作面粗糙度应达到 $Ra = 1.6 \mu\text{m}$ ，滑道工作面粗糙度应达到 $Ra = 3.2 \mu\text{m}$ 。				

## 标准用词说明

标准用词	在特殊情况下的等效表述	要求严格程度
应	有必要、要求、要、只有……才允许	要 求
不应	不允许、不许可、不要	
宜	推荐、建议	推 荐
不宜	不推荐、不建议	
可	允许、许可、准许	允 许
不必	不需要、不要求	

中华人民共和国水利行业标准

水利水电工程钢闸门设计规范

SL 74—2013

条 文 说 明

## 目 次

1 总则	87
3 总体布置	89
4 荷载	104
5 材料及容许应力	109
6 结构设计	115
7 零部件设计	129
8 埋件设计	133
9 启闭力和启闭机	136
附录 A 闸门孔口尺寸和设计水头系列标准	139
附录 B 通气孔面积的计算	140
附录 C 平面闸门门槽型式的选择	143
附录 D 闸门荷载计算的主要公式	144
附录 E 闸门橡胶水封定型尺寸及性能	148
附录 F 几种支承材料性能表	149
附录 G 受弯构件的局部稳定计算	150
附录 H 面板验算公式及图表	156
附录 J 栅条振动计算	161
附录 K 滚轮接触应力计算	162
附录 M 轨道的计算	163
附录 N 摩擦系数	168

# 1 总 则

**1.0.3** 闸门的分类，可以从不同角度进行划分。本标准沿用按工作性质分类，体现了闸门的工作特点，对布置和结构设计都是必须的。

关于按照操作水头划分为低、中、高、特高水头闸门，按目前我国发展水平和认识水平，大致可规定为：25m 水头以下为低水头闸门，25~50m 水头为中水头闸门，50~80m 水头为高水头闸门，80m 以上水头为特高水头闸门。

关于按照孔口面积划分为小型、中型、大型闸门，日本《水门铁管技术基准》(2000 年版)“第 1 章 闸门”第 51 条的说明中规定，孔口面积小于  $10\text{m}^2$  为小型闸门，孔口面积大于  $10\text{m}^2$ 、小于  $50\text{m}^2$  为中型闸门，孔口面积  $50\text{m}^2$  以上为大型闸门。

这些数值界限，随时间、建设规模和技术水平的发展还会有新的变化，所以在标准正文中，不作硬性规定。

**1.0.4** 北方冬季寒冷地区常常需要考虑闸门及埋件的冰害问题，因此本条中增加了“冰情”作为特殊要求。

**1.0.5** 标准化是我国的重要技术政策之一。对闸门孔口尺寸和设计水头系列标准的使用，用词采用“应符合”。水工标准《泵站设计规范》(GB/T 50265)、《水闸设计规范》(SL 265) 等均采用了闸门孔口尺寸和设计水头系列标准，从标准角度向前推进了一步。

**1.0.6** 关于结构的验算，目前仍然采用容许应力方法。

今后采用以概率理论为基础的极限状态设计方法，首先要对现行水工钢闸门设计规范采用可靠度分析方法进行反演分析，以确定现行规范隐含的可靠度水准，并结合《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》(GB/T 50199) 和《水工建筑物荷载设计规范》(DL 5077) 的要求确定结构的安全等级、荷载的标准值、

荷载的分项系数、荷载的组合系数、动力荷载的动力系数。上述两个规范中关于闸门结构的条文规定甚少，一些数据需要调查和统计。

关于闸门计算体系，除了水工闸门专用的（如面板、定轮等）作出规定外，其他一律不作硬性规定。这样有利于调动各方面的积极性，有利于新技术、新算法的推广应用。

## 3 总体布置

### 3.1 一般规定

**3.1.1** 闸门应布置在水流较平顺的部位，这是一条基本原则。凡有条件的地方，都应这样做。这样可避免在运行中许多复杂的问题。据调查，由于水流条件不好，对闸门运行带来许多不利影响，使闸门不能正常工作，有的甚至导致失事。如进口横向流问题，据初步分析，湖北富水电站溢洪道  $12\text{m} \times 9\text{m}$  弧门在部分开启运行时，由于横向流的作用而产生的振动是导致该门支臂失稳破坏的原因之一。进口漩涡带进大量空气也易引起闸门振动和门槽空蚀。出口回流和淹没出流同样也易引起闸门振动，如河南三义寨闸  $12\text{m} \times 7\text{m}$  弧门和江苏樟山闸  $10\text{m} \times 7.5\text{m}$  弧门的剧烈振动，就是因为淹没出流流态、门后强紊动水流和水跃冲击闸门等原因造成的。此外，由于地形关系也能产生折冲水流，如广东鹤地水库溢洪道  $10\text{m} \times 4.5\text{m}$  弧门，由于折冲水流和其他因素导致闸门失事。首先在布置上应避免这些流态对闸门运行中的不利影响。当不能避免时，要采取各种具体措施，以减免其有害影响，如进口漩涡只在某一水位时才出现，是否考虑在此水位不作局部开启运行；当有横向流时，闸门不作局部开启运行或避免某些开度；再如淹没出流要加强通气等。

门槽底部和闸门顶部同时过水，会形成复杂的紊流，也是一种不利的流态，它易使闸门产生振动和门槽空蚀。如岳城水库、皎口水库和磨子潭水库等，由于双层同时过水引起门槽空蚀，就是明显的例证。所以要避免闸门双层过水。

**3.1.2** 关于闸门选型问题，条文中提出的六项要求要综合考虑。

(1) 运行要求决定闸门工作性质，如静水和动水启闭，是否需要局部开启或快速关闭等，对门型选择都有很大关系，是选型的主要因素，所选门型都必须满足运行要求。

(2) 闸门设置位置可在出口、中部或进口。在出口设弧门有利，在中部或进口选弧门要设较大闸室是不利因素，用平面闸门则可简化布置，当操作水头较大时，考虑到水流条件，以选弧门为宜。若尾水位较高，设弧门则可能由于支铰长期浸水，可能选平面闸门有利，孔口尺寸大小、操作水头高低和门后水流流态都明显影响门型选择。

(3) 对排沙过推移质以选用弧门有利，对排飘浮物则可考虑选用下沉式或舌瓣式闸门。近年来，由于环境保护的要求，拦截的漂浮物应创造条件采用就地处理的办法。沉浮物包括沉木、半沉木及飘浮物，对林区尤应注意沉木、半沉木的影响。湖南岑天河电站上平下弧的双层闸门由于卡住半沉木使启门超载，下弧门吊点拉脱，造成闸门失事。

(4) 为避免启闭力过大，不采用平面闸门而选用弧门。弧门多用液压式启闭机。自动挂脱梁一般多用于平面闸门。

(5) 所提几项，要结合各地具体条件考虑。

(6) 技术经济指标为选型的一般要求。

**3.1.3** 在实际应用中，考虑到泄洪时间的紧迫，需同时提升多孔口闸门；为了防止下游冲刷，需同时小开度提升多孔口闸门。固定式启闭机能满足这种要求。

**3.1.4** 对平原水闸，泄水系统的工作闸门启闭机除保证主电源可靠外，应设置独立的备用电源（一般采用柴油发电机组），这是确保泄洪安全的重要措施。有一些水库由于暴风袭击，将主电源切断，又没有备用电源曾发生过事故，如广西龙山水库溢洪道 $10\text{m}\times 7\text{m}$ 弧门失事，即为一例。对于一些小型工程，设置手摇装置作为备用电源是可以的（有些只有手动），但是闸门开启时间应满足洪水调度要求。

**3.1.5** 条文中的“净距”一般指闸门与闸门或闸门与拦污栅外形轮廓之间的距离。

**3.1.6** 条文中规定要考虑施工安装条件主要是尾水闸门、贯流式机组进出口闸门等，当机组较多时，初期发电后仍有相当数量机

组没有安装，关系到进水口或尾水闸门设置数量的问题。一般从经济、合理原则考虑，按条文规定设置为宜，特殊情况可专门研究。

**3.1.7** 《水闸设计规范》(SL 265)认为，在以往水闸工程设计中，对于露顶式闸门顶高的确定，一般有三种意见：第一种意见是在设计或校核洪水位以上加波浪计算高度，但不加安全超高，即闸门顶高与波浪计算标高相平；第二种意见是在设计或校核洪水位以上加安全超高，但不加波浪计算高度，即允许在大风浪条件下波浪部分溅过闸门顶部；第三种意见是在可能出现的最高挡水位以上适当加一些安全超高，同样也允许波浪部分溅过闸门顶部。按照第一、第二种意见，闸门顶部均比闸顶高程低得有限；而按照第三种意见，闸门顶高有可能比闸顶高程低得较多，特别是在最高挡水位比设计或校核洪水位低得较多的情况下如此。但对于某些水闸，当可能出现的最高挡水位即为设计或校核洪水位时，闸门顶高也可按照在设计或校核洪水位以上适当加一点安全超高确定。本标准采纳了第三种意见，即规定闸门顶高应在可能出现的最高挡水位以上至少 0.3m。

根据国内已建露顶式闸门 427 例统计闸门超高情况见表 1。

**表 1 闸门超高统计**

安全超高 (m)	个数	比例 (%)
0	201	47.07
0~0.3	118	27.63
0.3~0.5	61	14.29
>0.5	47	11.01
合计	427	100

**3.1.8** 据调查为防止冰静压力，在门前形成不冻带是比较有效的。措施为压力水射流法、压力空气吹泡法，可用压缩空气机或用潜水泵（如官厅、参窝、上马岭、红山、红石、大顶子山、小山等），也有用机械或人工开凿的（如莲花水电站）。对于冰冻浅的，还有一些土办法。因此，要因地制宜。

闸门与门槽的冻结，往往由于漏水引起，因此，条文中提出止水尽可能地严密，闸门操作前必须使有相对运动的部分不冻或解冻。一般采用保温室使之不冻或采用埋件内热油循环、蒸汽、电热等办法解冻。例如：丰满永庆反调节水库弧门采用了埋件内热油循环的方法解决冬季启闭运行的问题，效果良好。

**3.1.9** 对潜孔式闸门包括工作闸门、事故闸门和检修闸门，如门后闸门槽、竖井或出口等不能充分通气时，应在紧靠闸门下游处顶部设置通气孔。对通气孔的要求是：面积足够，位置适宜，通气均匀，安全可靠等。

通气孔上端应设在远离行人处，与启闭机房分开，以保证安全运行。有些工程（如岗南、大伙房、镜泊湖等）由于通气孔与机房联在一起，以致发生事故，影响安全运行。其下口，有条件者，最好做到均匀通气，这种布置效果更好（如云峰中孔）。

**3.1.10** 通气孔面积计算方法，根据 1988 年 4 月 8 日中国水力发电工程学会水工水力学专业委员会对陈肇和教授的专题研究“泄洪管道需气量的原型规律”的评审意见将其列入附录 B，并参考《水电站压力钢管设计规范》（DL/T 5141—2001）做了适当修改，供计算选用。

**3.1.11** 根据国内 10 余座利用节间充水平压闸门的调查，对于小于 30m 水头的闸门，采用节间充水对增大充水流量，减少充水时间，降低水位差，具有明显效果。其中，黑龙江莲花水电站进水口 6m×14m—62m 检修闸门投入运行 10 多年来，经常运用水头为 58~59m，实际节间充水处水头为 48~49m，是高水头下实现节间充水比较成功的例子。由于检修闸门节间充水不能中途停止充水、节间充水量大且难以控制等缺点，对一些有特殊要求的工程要慎用。如抽水蓄能电站的上库进/出水口事故闸门、下库进/出水口检修闸门等仍建议采用充水阀充水。

## 3.2 泄水系统

**3.2.1** 溢洪道上游是否设置检修闸门，根据国内运行实践经验，

原则上应设检修闸门。如江苏三河闸，湖南双牌，原来都没有设检修闸门，给以后维修带来很大不便。三河闸已增设浮式叠梁门解决。至于是否设事故闸门，原则上可不必。从调查看，低水头闸门绝大多数没有设事故闸门，但对重要工程，必要时仍要设事故闸门。

当水库水位每年有足够的连续时间低于底槛并能满足检修要求时，也可不设检修闸门。有些工程每年有一定的时间水位低于底槛，但由于该时段气候寒冷等不适宜检修维护工作顺利进行时，也可考虑设检修闸门。

**3.2.2** 当水头较高，事故门前孔（洞）又较长，以设3道门为宜，但也要根据洞身地质、检修等具体条件研究论证设置检修闸门的必要性，一般常见于长泄水洞的情况。

**3.2.4** 工作闸门设置于出口，流态好，工作可靠。采用泄洪洞方案时，若放在出口受地质条件所限，则可以布置在中部或进口处，但要强调门后为明流，这很重要。否则，在闸门开启过程中。必然形成明满流过渡的不良流态（如河北岗南泄洪洞）。在工作闸门以前泄水孔压力段应保持一定的压力。即保持一定的收缩率，这对减免空蚀，改进运用条件是很重要的，一般可选用压缩比1.5:1。据国内调查，大体合乎此比值。流态好些的，如梅山、佛子岭、龚嘴、丹江口和云峰等；反之，如磨子潭则较差。因压缩比太大不经济，太小则不安全，所以具体收缩率宜通过水工模型试验来确定。

另据调查，对于有弯道的泄水洞，除要满足上述要求外，工作闸门尚应布置在弯道的下游水流稳定的直段上。因水流在弯道转弯处极易产生环流流态，将影响闸门及门槽段的运行安全。

**3.2.5** 高水头工作闸门的水力设计是一项重要的课题，对闸门安全运行关系重大。根据理论和实践经验，要从下列几点予以注意：

- (1) 选用合宜的门型。
- (2) 选择适当的通气孔布置和尺寸。

(3) 选用合理的底缘形式和门槽型式。一般讲，闸门底缘上游倾角不宜小于  $45^\circ$ ，下游倾角不宜小于  $30^\circ$ ；门槽用  $K > K_i$  ( $K$  为水流空化数， $K_i$  为初生空化数)。

(4) 对弧形闸门，要特别注意顶止水型式；对平面闸门，要特别注意门槽型式。

(5) 操作规程要仔细拟定。

此外，在结构设计上，要予以适当加强。

有的问题，单靠理论分析较难解决，所以对水流条件比较复杂的或重要工程的闸门，要借助于水工模型试验加以研究来解决。

这次修订将“大型工程中重要的工作闸门”修改为“工作闸门”，并不局限于大型工程重要的工作闸门，只要可能产生空蚀、振动、磨蚀和启闭力等问题，均应作专门研究。

**3.2.6** 排沙冲沙孔在进口处有必要设检修闸门或事故闸门以便挡沙。否则在洞中积沙难以处理，面板及止水应设置于上游面以防止闸门梁格中淤沙，必要时，作为开门时的后备措施，可设置排沙阀和高压水枪，以防止泥沙淤积过高。据调查，泥沙对边墙磨损很厉害，特别对边界有突变的地方，如三门峡水电站。抗磨材料目前处于试验研究中，一般用铸石、环氧砂浆等均可。比如，小浪底水利枢纽排沙洞进口段流道上均设有环氧砂浆保护。

**3.2.7** 高压弧形闸门止水有两种基本型式：一种是采用偏心铰的压紧式止水；另一种是充压式止水。它们大都采用出口段侧墙突扩，底板突跃并通气布置，同时解决水流掺气与顶侧止水不在同一曲面的问题。

压紧式止水从 20 世纪 50 年代在日本得到应用，后来苏联、巴基斯坦也开始应用。我国从 20 世纪 80 年代开始在龙羊峡、东江二级等工程应用。近年来，小浪底排沙洞和 1~3 号孔板洞弧门也采用了压紧式止水。其中，1 号孔板洞弧门设计水头达到了 140m。

充压式止水从 20 世纪 50 年代在美国应用，后来苏联也开始

应用。我国从 20 世纪 80 年代开始在漫湾、天生桥一级、东风、宝珠寺等工程应用。

压紧式止水具有安全可靠性好、便于布置突扩和突跌等优点，缺点是造价高。充压式止水则具有操作简单方便、造价低廉的优点。可根据具体工程特点，进行比选。

故县水库底孔  $3.5\text{m} \times 4.5\text{m} - 80\text{m}$  弧门、小浪底水利枢纽明流洞  $8\text{m} \times 10\text{m} - 80\text{m}$  弧门，设计水头达到了  $80\text{m}$ ，三峡水利枢纽泄洪深孔  $7\text{m} \times 9\text{m} - 85\text{m}$  弧门，设计水头达到了  $85\text{m}$ ，采用的都是转铰式止水。特别是根据三峡的实践，可以认为，当水头不超过  $85\text{m}$  时，转角式顶止水是完全可以胜任的。因此，这次修订将水头超过  $85\text{m}$  的特高水头弧形闸门列为压紧式及充压式止水的应用范围。

因为更多涉及水力设计的问题，所以突扩门槽的体型的选用一般通过模型试验研究是必要的。

**3.2.8** 门槽水力设计的基本要求之一，就是确定门槽的初生空化数和不同工况下的水流空化数。当后者大于前者时，门槽将不会产生空化。为此，共列出了 3 条门槽减蚀措施。

恶滩电站溢流坝闸门门槽减压模型试验研究表明，闸门局部开启时，门槽空化现象比较严重。后来在门槽斜坡段易发生空化的范围内布置了通气孔以后抑制了闸门局部开启时的门槽空化现象。

三峡水利枢纽排沙孔闸门区水力特性研究表明，当闸门部分开启时门槽区水流空化数为  $0.02 \sim 0.94$ ，小于这种情况下的临界空化数  $1.2 \sim 1.6$ ，闸门区有可能发生剪切空化空蚀，而当闸门全部开启时，门槽水流空化数高达  $1.73 \sim 2.56$ ，均大于该种门槽的初生空化数  $0.6$ ，安全系数较大。因此，对有局部开启要求的门槽应采取严格的减蚀措施。

**3.2.9** 锥形阀的特点是泄流能力高，阀体受力均匀，启闭力较小，泄流后的消能防冲设施可以大大简化，能节省不少投资。

据调查，阀的检修条件和泄水水雾对附近建筑物的影响在工程运行过程中是不能忽视的因素。

### 3.3 引水发电系统

**3.3.1** 关于检修闸门、事故闸门、快速闸门等设置与否，在什么条件下，如何设置，主要着眼于总结实践经验。根据电站开发方式和总体布置，大致可分为3类：

(1) 坝后式电站。大多数都设有检修闸门和快速闸门（也有用蝴蝶阀代替）两道，运行较好。但也有一些电站不设检修闸门（如湖南拓溪电站、双牌电站等）。据调查，不设检修闸门对运行检修甚感不便，因在正常发电时，快速闸门吊在孔口，处于戒备状态，不能维修，当机组检修时，又要用它挡水，也不能检修，因此要检修它，只有停机。所以在条文中作了比较肯定的规定，认为设检修闸门仍属必要。

(2) 河床式电站。大多数为低水头大流量、转桨式机组，一般只设检修闸门和事故闸门，如浙江的富春江水电站、广西西津水电站、湖北葛洲坝水利枢纽都是如此。据调查，当设有可靠的防飞逸装置时，可不必设快速闸门。

(3) 引水式电站。布置形式很多，除了设快速闸门（或蝴蝶阀门、球形阀门）以外，在进水口处设事故闸门或检修闸门的实例都有。从分析看，当引水洞较长时，设事故闸门较为有利，比较灵活可靠，当引水洞出现事故时，有事故闸门作为安全备用闸门。

一般采用快速闸门比较普遍（用于代替蝴蝶阀门、球形阀门作为机组保护之用），其优点为造价低廉，保护可靠。所以在条文中推荐选用。某些特殊情况下（例如：一管分叉安装数台机布置、抽水蓄能电站等），不便于布置快速闸门时可采用蝴蝶阀门、球形阀门。

关于明管保护的规定，参见《水电站压力钢管设计规范》（SL 281—2003）。

**3.3.2** 对经常停放在调压井门槽内的闸门，由于水位的经常波动和导叶关闭时产生较大的涌浪，所以要注意闸门停放和下降的

平稳性。

据国内调查，有些水电站进水口快速闸门设在调压井内，曾发生过停放和快速下降过程中不稳定现象。例如，福建龙亭水电站曾发生闸门浮起情况，以致影响正常运行；安砂水电站在模型试验中，也发生有相当大的上托力。分析其原因，系由于机组甩负荷、调压井中产生较强烈的涌浪等，影响了闸门的稳定。因此在条文中提出这个问题，引起注意，必要时可进行专门研究，以保证安全运行，达到保护机组的目的。

**3.3.3** 启闭机应具备現地操作和远方闭门的功能，从安全考虑不提倡远方启门。

**3.3.4** 拦污栅设置水位差检测装置是必要的。事故闸门和检修闸门由于获取平压信息的途径比较多，所以不作硬性规定。

**3.3.5** 据调查，有不少水电站采用连通式布置（刘家峡、碧口、大源渡、岩滩等），前后两道栅槽，由于从机组的各取水口都从同一个连通仓内取水，相对加大了过栅面积，部分堵塞对机组出力也不会有大影响。因此，连通式布置有可行性和必要性。尤其在污物较多的低水头水电站中，更是一个值得推荐的布置形式。

根据环保的要求，库区污物可分为植物类和垃圾类，或进一步细化。虽然目前还没有关于库区污物的分类标准，但是合理的分类对今后制定拦污清污设计标准有一定意义。

**3.3.7** 根据国内外贯流式机组水电站的调查，其金属结构系统的布置大致为：

(1) 进水口布置拦污栅、检修闸门或事故闸门，污物较多时设清污机。当漂浮物较多时，可设浮式拦污排，以减轻拦污栅和清污机拦污和清污的压力。拦污栅一般采用倾斜式布置，不仅可以减小过栅流速，改善水流条件，清污机清污效果也较好。拦污栅后面以设检修闸门为宜，亦可设事故闸门。如苏联卡涅夫水电站、谢克斯宁水电站、萨拉托夫水电站均采用了进口事故闸门布置型式。

(2) 尾水管出口布置尾水事故闸门或检修闸门。但以设事故

闸门为好（用以代替进口处的事故闸门，其优点是孔口尺寸小，较经济；事故下门过程中，对机组的水力作用较为稳定等）。

贯流式机组一般不可能出现全部活动导叶被卡死，完全无法关闭的情况。因此，可以考虑 1~2 片导叶不能关闭的情况，按部分水压差关门，如马迹塘、近尾洲、大源渡等工程。其中大源渡采用了叠梁门，顶节按动水验算闭门力，其高度以保证其余各节可静水下门的条件来确定，可减小启闭容量。

在国外，灯泡机组有时采用机组和尾水联合运行方式，以满足航运和辅助泄洪的要求。此时，尾水闸门都按事故闸门或快速闸门设计，对闸门控制系统和局部开启运行要求都很高。

贯流式机组水电站水头十分宝贵，所以对栅条型式、清污问题都要仔细研究。

根据国内外贯流式机组水电站的布置情况，这次修订，将标准用词“宜”修改为“应”，使标准用词要求的严格程度，从“推荐”提高到“要求”。将“拦污栅设计应采取减少水头损失的措施，同时尚应考虑水动力影响，必要时，可设清污机”修改为“拦污栅设计应采取减少水头损失的措施，污物较多时应设清污机，必要时可设置拦污排”，水动力影响问题在结构设计中统一考虑。

### 3.4 水闸、泵站系统

**3.4.1 平原水闸、灌溉系统**，大多数由地方兴建，门型及其布置多种多样。闸门常用弧形闸门、平面闸门、拱形闸门、翻板式闸门、升卧式闸门和双扉式闸门。此外尚有壳体闸门及水力操作闸门等，都各有其特点。所以在条文中提出“应根据工程特点因地制宜地灵活选用”的原则，利于发挥地方的积极性和发展新门型。

近年来，翻板式闸门得到了很大发展，不仅在城市生态工程、市政工程上大量应用，而且在一些中、大型工程上也有应用。目前，翻板式闸门的跨度可以从几十米到百米以上，而运用

水头一般不超过 10m。

翻板式闸门启闭的动力有水动、气动、机械等多种形式。采用水力自动操作时，由于只能在少数一两种水位组合下动作，不能任意调节水位或流量，并且刚开门时，下游流量骤增，对河床有较严重的冲刷作用，特别是孔数较多时，容易在各孔开启不一致的情况下，形成集中泄流而加重冲刷。另外，泄水时门叶处于流水之中，容易发生磨损、撞击和振动等不良现象。

**3.4.2** 条文中“对特别重要的进洪闸或泄洪闸等可设置事故闸门”，主要指在挡水时期发生事故，危害性极大的闸门。如进洪闸、泄洪闸当没有达到运行和泄洪水位时，一旦闸门出事故无法抢救，检修闸门又无法动水下门，因此有必要设置事故闸门。

**3.4.3** 有通航要求或抗震要求的水闸，为了降低启闭机排架高度，宜采用升卧式或双扉式闸门。或单纯为了降低排架高度，也可以采用升卧式或双扉式闸门。在一些平原水闸采用升卧式闸门较为普遍，比如江苏江都水利枢纽邵仙套水闸上下闸首均采用了升卧式闸门，1999年12月工程建成通航以来，运行情况良好。主要优点是对以降低启闭机排架高度，提高建筑物抗震性能，有条件地方可以选用。升卧式闸门设计要注意选用合适的起弧高度和弧轨半径及中心角，以保持闸门启闭自如。此外还需有可靠的锁定装置，以便固定闸门。

升卧式闸门也存在着一些不足，如在开启过程中底缘流态不太好、止水磨损过大、需采用悬臂式滚轮结构等。

**3.4.4** 目前一些地方采用水力操作闸门较多，如浮体闸、翻板式闸门等。翻板式闸门由于可以适应河水暴涨暴落的运行特点，特别适合用在水位变化频率比较快的山区河道上。但在河流中泥沙淤积较严重时，容易被泥沙卡阻，或对于防洪排涝工程，容易被上游冲下来的污物缠绕、卡阻，造成操作不灵。因此对防洪排涝及有控泄要求的工程不宜采用水力操作闸门。

**3.4.5** 我国沿海地区，如浙江、广东、福建、山东、河北等省均兴建了若干挡潮闸。经调查认为：挡潮闸的闸门门型大都是平

面闸门，少数是弧形闸门。一般均要求在潮水涌现时若干孔闸门能同时迅速关闭。

挡潮闸工作闸门的特点是闸门面板均布置于迎海水面，闸门止水采用双向止水即双音符号特制止水，并且要求止水严密，以防止海水和泥沙灌入。海水盐碱重，对农作物有害，平时应防止淡水大量流失，故闸门止水设计极为重要。

另外挡潮闸工作闸门，长期处于水下工作，应注意采取闸门的防腐和防寄生物附着的措施。

排灌闸工作闸门也有类似挡潮闸的某些特点，如双向止水和较长期处于水下工作等。故排灌闸的工作闸门亦应考虑双向支承等问题，且要求止水严密，以防止海水和泥沙倒灌。本标准仅就原则提示，请设计中予以注意。

**3.4.6** 更加明确了功能要求，取消了解释性文字。

**3.4.7** 根据国内调查，广东鹤地水库溢洪道弧门、浙江马山闸弧门、河南白龟山水库弧门、江苏三河闸弧门，都处于沿库、沿海、沿湖有较大风浪和涌潮地区，由于布置上的缺陷，前两者在上游水位略低于前胸墙时，胸墙底部和弧门露出水面以上部分形成一个封闭的空腔，在较大风浪和涌潮作用下，空气被压缩，形成巨大的气囊冲击压力，以致造成闸门支臂失稳破坏。鹤地水库弧门的布置，如图 1 所示。鹤地水库弧门为  $10\text{m} \times 4.5\text{m} - 6.5\text{m}$ ，在风浪作用下形成封顶，造成气囊冲击力，致使上支臂失事，破坏时水位 39.54m。而后两个工程在布置上进行了改进，如在胸墙中开洞，拆除弧门顶止水等，未形成较大的气浪冲击压力，闸门基本完好。根据正反两方面的教训和经验，所以在条文中提请设计时注意，从布置上加以避免。

针对气囊冲击压力，采取的措施有：

- (1) 胸墙中开洞，以消除气浪冲击压力的形成。
- (2) 预留少许调压沟。
- (3) 设防冲木，也可以减少闸门冲击力。

**3.4.8** 20 世纪 80 年代以来，我国兴建了相当数量的抽水泵站。

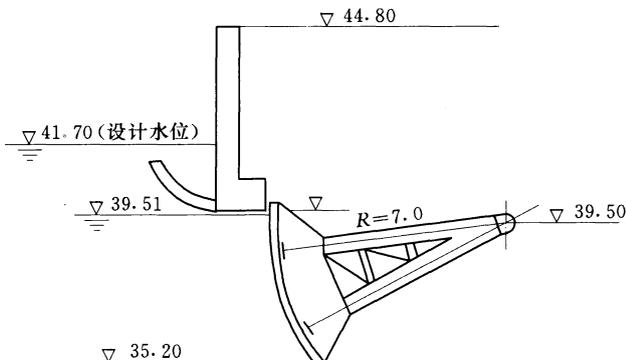


图 1 鹤地水库弧形闸门的布置简图

其金属结构设计的主要关键在于选择合理的断流装置。当要求在极短时间内断流时（几秒到十几秒）常选用拍门，安装于泵站出口；当要求在 2min 内断流时，也可采用平面快速闸门，以保证水泵运用安全。

在出口末端，尚要设一道事故闸门或检修闸门以便拍门或快速闸门的拆修和保养。拍门一般用油压启闭机操作，并要求有缓冲装置。进口布置和常规相似，设拦污栅和检修闸门。具体布置设计者根据《泵站设计规范》（GB/T 50265）有关规定执行。

### 3.5 施工导流系统

**3.5.1 施工导流孔（洞）封堵闸门**应布置在进水口处，以便后期封堵。确定闸门及启闭机的安装平台需要根据施工期和初期发电的各种运行工况和水位、对外交通、安装条件以及闸门和启闭机回收的可能性等各种因素综合考虑之后确定。

导流闸门门槽段，需经历施工期多个汛期，孔口高程又低，常年通过泥沙及推移质。因此，对门槽的要求比较高。确保导流孔门槽段要有良好的水力学条件，避免可能产生的磨蚀破坏，是这类闸门至关重要的设计课题。下闸后发现底槛及门槽下游遭磨蚀或局部破坏甚至发生事故的事例有不少，如碧口水电站、刘家

峡水电站右导、东江水电站等。因此，设计导流闸门及其门槽时不能因一次性使用而掉以轻心。

下闸截流必须安全可靠。根据工程进度、截流流量、门槽结构的完整可靠性等情况，综合考虑保证安全下闸、截流闭气的可靠措施。必要时，除采取正常措施外，根据工程具体情况，准备其他后备措施。

施工导流系统属临时性工程，从经济角度应考虑闸门、启闭机回收的可能性。

施工导流孔（洞）承担封堵期向下游供水，并具有库水位调节功能要求时，可根据不同的情况采用不同的解决办法。一般可以通过埋设管路，通过阀门控制的办法来解决。马鹿塘水电站二期工程，施工期向下游供水最小流量为  $23.6\text{m}^3/\text{s}$ ，导流洞下闸后，由导流洞施工支洞改造后通过 3 个蝶阀经导流洞后段向下游供水。如果供水量较大，水头不高时，可以将导流闸门设计成工作闸门。尼尔基水利枢纽工程导流闸门，可以在施工期动水启闭，满足向下游供水的任务。当水头较高时，一般在出口处设置一道工作闸门来满足向下游供水或库水位调节的任务。

**3.5.2** 下闸蓄水后，应在短时间内对工程各系统是否达到设计要求进行及时评估，一旦出现异常情况应停止蓄水。因此，导流闸门应具备在一定水头下动水启门的能力。导流闸门动水启门水位一般不低于下闸后 24h 的水位，以便能够有足够的时间来确定是否需要重新下闸。导流闸门启闭机平台高程，应满足动水启门、启闭机拆除（必要时）、临时交通等要求。

## 3.6 船 闸 系 统

**3.6.1** 本条规定了门型选择的基本原则。《船闸闸阀门设计规范》(JTJ 308) 中列出了人字闸门、三角闸门、横拉闸门、平面闸门和平面阀门、反向弧形阀门等多种门型，可以根据具体情况选用。比如，平面闸门中双扉式或升卧式平面闸门在一些有通航要求的水闸中经常采用。

**3.6.2** 在单级船闸的上、下闸首和连续多级船闸的首末级闸首均需设置检修闸门，以便进行工作闸门、闸室结构和输水系统的检修。上闸首是否一定要设置事故闸门，国内大中型闸的做法有所不同。万安船闸、葛洲坝 1~3 号船闸以及三峡水利枢纽五级船闸的第一闸首均设置了事故闸门。而富春江水利枢纽船闸和水口水利枢纽连续三级船闸的第一闸首只设置了检修闸门。因此，船闸的上闸首是否设置事故闸门，可根据船闸的规模和重要性，事故的危害程度等因素论证确定。

**3.6.3** 在输水廊道的进口处是否设置拦污栅，主要根据河流中污物的数量及船闸的规模等因素确定，而在输水廊道出口处一般都不设置拦污栅。因此，条文规定拦污栅可根据需要设置。

**3.6.4** 本条是根据《船闸闸阀门设计规范》(JTJ 308)中第 2.3.2 条内容，给出了船闸工作闸门各种门型的适用条件。

**3.6.5** 本条是根据《船闸闸阀门设计规范》(JTJ 308)中第 2.3.3 条内容，给出了使用最广泛的平面阀门和反向弧形阀门，主要取决于设计水头。

**3.6.6** 检修闸门的门型选择可根据闸首的布置、存放、启吊、运转等条件确定。当通航水位变化很大，采用固定式启闭机已不合理时，可采用上层事故闸门（检修闸门）加下部挡水叠梁门的组合门型，效果比较好。例如：三峡、葛洲坝、万安等船闸。

**3.6.7** 不得影响船闸的通航净空尺寸，是启闭机布置的最基本要求。另外，启闭机布置在设计最高通航水位以上，主要是为了保证启闭机的主要电气设备不至于淹没在水中。

**3.6.8** 目前，上、下闸首人字闸门选用液压式要多一些，但是在均匀运行方式下，机械四连杆启闭机的运行特性明显优于液压直联式启闭机，而液压直联式启闭机要通过变速方式才能改善其运行特性。提出了环保和景观要求，是与《船闸启闭机设计规范》(JTJ 309)中的要求是一致的。

## 4 荷 载

**4.0.1** 基本荷载是在结构正常使用过程中，一定出现且持续时间很长的一系列荷载作用（如正常运用时的状况）；特殊荷载是在结构使用过程中，规定的出现概率很小、持续时间很短的一系列荷载作用（如出现校核洪水、设防地震等）。

**4.0.5** 工程实践证明，闸门在动水操作中由于水流的作用，都有不同程度的振动。在特定条件下，某些闸门曾产生较强烈的振动，少数闸门甚至有产生共振或动力失稳的现象（如河南三义寨人民跃进渠  $12\text{m} \times 8\text{m} - 7\text{m}$  弧形闸门、江苏樟山闸  $10\text{m} \times 7.5\text{m} - 9.6\text{m}$  弧形闸门、甘肃刘家峡泄水道  $3\text{m} \times 8\text{m} - 70\text{m}$  平面工作闸门等）。

由于闸门的结构复杂，水流动力作用的性质及流体与闸门结构的相互作用还没有完全搞清楚。目前对闸门振动问题的研究水平，还不能给出完整的动力计算方法，提供各种闸门的动力系数。因此，标准中对各种闸门的动力系数规定相同的数值范围，但可根据水流条件、闸门型式，对不同部件有一变动范围来选取。

多年来对闸门振动问题进行的大量原型观测资料以及模型试验和理论研究成果表明，主要有两种闸门振动类型：一类属于自激振动现象（如止水漏水引起的振动，低水头弧形闸门小开度的振动等）；另一类属于强迫振动。自激振动只在某些特定条件下产生，不应包括在动力系数所考虑的范围以内。如三峡工程导流底孔弧形闸门流激振动试验中当没有模拟侧止水或侧止水漏水的试验中发现，一旦闸门被下游水位局部淹没，闸门就产生强烈的自激振动，闸门撞击侧墙发出响声，支臂根部的最大动应力达到  $155.2\text{MPa}$ ，总应力达到  $291.3\text{MPa}$ 。当闸门脱离下游水面后，振动显著减小。在减振措施试验中，模拟闸门侧止水不漏水试验

结果表明，即使闸门被下游水位局部淹没也不发生自激振动。原型观测的不同开度下支臂各测点的动应力不大于 3MPa，与模型试验值基本相同，与支臂 130MPa 左右的应力水平相比，动应力都较小。但是在非正常情况下，最大动应力增加了几十倍，产生了对闸门造成危害的振动。

条文中的动力系数指闸门可能承受的某些直接作用于门体并且作用时间较长的动力荷载，如水流及波浪对闸门的冲击，水跃、漩滚对闸门的脉动作用，以及在动水操作中闸门槽的漩涡、止水漏水等其他不可预计的动水脉动作用的影响，这些荷载对闸门的动力影响，其性质均属于强迫振动。因此，条文具体指明只对经常进行动水操作的高水头工作闸门以及经常进行局部开启的工作闸门才有必要在设计中采用动力系数。

密云水库潮河输水洞出口 3m×3.5m—30m 弧形闸门动力系数原型观测资料表明，除个别部件外，闸门的构件的动力系数一般不超过 1.2，见表 2。

表 2 密云水库潮河输水洞出口弧形闸门动力系数原型观测资料

部件	闸门相对开度	最大动力系数 ( $K = \frac{\text{实测动应力}}{\text{实测静应力}}$ )
拉杆	0.5	1.268
支臂 (径向)	0.5	1.133
支臂 (侧向)	0.5	1.069
面板 (径向)	0.5	1.074
面板 (侧向)	0.5	1.094

应该指出，上述观测的动力系数是某一闸门相对开度下的动应力与其静应力之比，亦即等价于在该相对开度下的脉动压力（激振荷载）和时均动水压力（静荷载）之比，在某一开度下的静荷载加上动荷载甚至小于设计条件下（闸门全关）的静荷载，而本标准中对动力系数的取值，并不特定指明动水操作的相对开度，而是将动力系数乘以设计条件下的静水压力，因而对动力系

数不宜规定过大。

对强紊动水流（如水跃区）的动水压力脉动的研究表明，固体边界上的动水压力脉动的强度计算公式见式（1）。压力脉动的空间尺度  $A_R$  在水跃区约为水下固体边界面积的 1/2。因此作用于固体边界的总动水压力脉动的强度按式（2）计算。

$$\sqrt{\overline{P^2}}/\gamma_w \approx K' \frac{V_0^2}{2g} \quad (1)$$

式中  $\sqrt{\overline{P^2}}$ ——动力压力脉动值的均方差，即其强度；

$V_0^2/2g$ ——泄流条件下的流速水头；

$K'$ ——压力脉动系数，一般为 0.2~0.3；

$\gamma_w$ ——水的容重。

$$p'/\gamma_w \approx (0.1 \sim 0.15)A_w \frac{V_0^2}{2g} \quad (2)$$

式中  $A_w$ ——闸门在动水中的面积。

设  $H_0$  为泄水条件下的闸门工作水头，则由于  $\frac{V_0^2}{2g}$  与  $H_0$  成正比，所以有式（3）和式（4）：

$$p'/\gamma_w \approx (0.1 \sim 0.15)A_w H_0 \quad (3)$$

$$P' \approx (0.1 \sim 0.15)\gamma_w A_w H_0 \quad (4)$$

由此可见，动力系数的上限一般不超过 1.2。至于其他如紊流边界层、局部扰动等产生的动水压力脉动，均远小于强紊流区的脉动。

正常情况下，一般的水流随机脉动力激励产生的闸门振动不会对闸门造成危害，这时考虑 1.0~1.2 的动力系数是合适的。

根据大量原型观测资料表明，闸门在振动时各构件的动应力分布是不一样的。因此在标准条文中增加了对动力系数取值的原则规定。在设计中，可根据各种具体条件考虑取值，如深孔弧门门体刚度大、振动小、动力系数  $K$  可取较小值，露顶式弧形门门体刚度小、振动力大，动力系数  $K$  可取较大值。不同构件亦可选用不同的系数，如拉杆、弧门支臂可选用大些，面板部分可

选用 1.0 等。

非正常情况下，当水动力荷载和结构动力特性出现不利组合时，可能对结构产生强烈振动，可能对闸门造成危害。此时需要考虑的是防振措施问题，而不是动力系数取值大小问题。

从国内外工程实例的调查和国内外失事工程实例来看，严重影响闸门安全的振动，经常和不利的水力条件相关联。比如：止水漏水引起的振动、底缘型式不良引起的振动、闸后流态引起的振动等，要从设计上避免出现这种情况。对于高水头经常操作的工作闸门，应使闸后保持明流状态且保持通气，特别是不宜在局部开启下运用。必要时，应通过模型试验研究加以论证。

当不利的水力条件所形成的振源得到消除或控制以后，闸门的有害振动也将消失。因此，闸门流激振动最重要的防振措施是消除振源。某些情况下，振源不可能得到消除，就需要一个判断振动危害程度的判别标准。美国阿肯色河通航枢纽中心以振动构件的平均位移来划分闸门振动强弱的判断标准，见表 3。另外，金属构件的局部振动应力要求不大于允许应力的 20%。当超过允许值以后，应进行动力分析，并采取相应措施。

表 3 水工钢闸门允许振幅

单位：mm

平均振动位移	振动危害程度
0~0.0508	忽略不计
0.0508~0.2540	微小
0.2540~0.5080	中等
>0.5080	严重

对于闸门滚轮、吊耳等部件，因考虑了不均匀或超载系数，一般可不再考虑动力系数。

**4.0.6** 作用在闸门上的各种荷载的大小及分布情况是随机变化的，应根据闸门的的不同工作条件和荷载出现的几率情况进行组合。荷载组合的原则是：考虑各种荷载出现的几率，将实际上又能同时出现的各种荷载进行最不利的组合，并将水位作为组合条

件。本标准规定，荷载组合可分为基本组合和特殊组合两类。考虑到一些特殊荷载，又会同时出现（比如：校核水头下泄水，闸门上同时作用基本荷载—闸门自重、特殊荷载—校核水头下的静水压力和动水压力）。条件规定，特殊组合由基本荷载和一种或几种特殊荷载组成。

## 5 材料及容许应力

### 5.1 材 料

**5.1.1** 结构钢钢材牌号增列了 Q390 钢，并根据现行标准钢材牌号取代原旧标准中的相应钢材牌号。Q390 钢相当于《钢结构设计规范》(GBJ 17—88) 中列出的 15MnV 钢。但是 Q390 钢与 15MnV 钢相比，由于增加了 Cr、Ni 等合金元素，发挥了微合金沉淀强化作用，提高了强度和韧性，是综合性能比较好的钢。

沸腾钢因脱氧不充分、含氧量高、内部组织不够致密、硫磷的偏析大、氮以固溶氮的形式存在，故冲击韧性较低，冷脆性和时效倾向亦大。比如，在低温时和动力荷载作用下容易发生脆断，从而在使用上常常受到一些限制。经过研究，取消推荐沸腾钢。

本次修订统一了结构钢牌号，在碳素结构钢中只列 Q235 钢，在低合金高强度结构钢中，只列 Q345 钢和 Q390 钢，结构钢中其余钢号不再列出。

由于对 A 级钢，不做冲击韧性试验，所以在使用上作了一些限制。对于低合金高强度结构钢，只列了 Q345A 一种，用在表 5.1.1 第 4 项“主要受力埋件”中。表 5.1.1 第 3 项“各类检修闸门、拦污栅”中没有列 Q345A，主要考虑可能存在闸门节间充水、拦污栅振动等动荷载的问题。实际应用中，可以根据具体情况，检修闸门和拦污栅也可以采用 Q345A。对于碳素结构钢，Q235A 除了不做冲击韧性试验以外，碳含量不作为交货条件、不做冷弯试验。由于碳含量可能离散性较大，焊接质量稳定性得不到保证，冷弯性能（通过冷弯试验，检验钢材颗粒组织、结晶情况和非金属夹杂物分布等缺陷，在一定程度上也是检验焊接性能的一个指标）也得不到保证，所以在主要焊接结构中不能使用 Q235A。因此，Q235A 只用在表 5.1.1 第 5 项“按构造要

求选择的埋件”中。

闸门冬季运行环境比较复杂，有些闸门在相对温度较高的闸门井内运行、有些闸门有冬季启门要求，运行时间段不一定是最冷月等。可以根据闸门冬季运行的实际工况，采用《采暖通风与空气调节设计规范》（GB 50019）中所列“累年最冷月平均温度”，确定工作温度。

钢材的质量等级选用，根据《钢结构设计规范》（GB 50017）中有关规定，结合闸门工作特点所确定。总体上标准有所提高。

需要说明的是，Q390 钢目前只在大型工程中，以便总结经验，推广应用。

**5.1.3 重型机械的标准工作始于 1955 年**，当时由于三年恢复和“第一个五年计划”的需要，在有关重机厂积极支持和参与下，参照当时苏联 Y3TM 等重机厂的标准，制定了重型机械标准，并于 1958 年出版。后来原机械工业部重型矿山机械局利用上海宝钢引进 2050mm 热连轧板机的合作生产的机遇，决定采用联邦德国施罗曼—西马克公司（SMS）1986 年的全套标准，修订了重型机械标准，共有 1176 个标准，其中具有重机行业的特色，而其他行业又没有的标准，定为局批企标共 346 项，代号为 JB/ZQ。这是国内唯一的一套适用于重型技术标准行业的，技术内容较齐全的，水平高于原机械部制订的行业标准重型机械技术标准，达到了 20 世纪 80 年代初期的标准水平。

20 世纪 90 年代以后，制定了一批代号为 JB/T 的重型机械标准，其中一些 JB/ZQ 标准被 JB/T 标准代替，原规范引用的 JB/ZQ 4297 标准也被 JB/T 6402 标准所代替。由于采用了新的低合金钢铸件标准，因此对应的牌号名称也有变化。

这次根据 JB/T 6402 标准，共列出了 ZG50Mn2，ZG35Cr1Mo，ZG34Cr2Ni2Mo 等 3 种低合金钢铸件，其中 ZG35Cr1Mo 代替了原 ZG35CrMo、ZG34Cr2Ni2Mo 代替了原 ZG34CrNi3Mo（原牌号有误）。

根据《中华人民共和国标准化法》规定，我国标准分为强制

性标准和推荐性标准。原规范中引用的多数国家标准 GB 现已改为推荐性国家标准 GB/T，这次修订对这种标准代号的变化以及个别标准名称的变化都已经作了更新，如：GB 11352 改为 GB/T 11352 等，以后不再赘述。

**5.1.5** 本次修订，取消了 Q275、35Mn2 和 34CrNi3Mo 钢，增加了 42CrMo 钢。其中 Q275 钢已经不在本标准中列出，34CrNi3Mo 钢因为钢号有误也不再列出。合金结构钢中，42CrMo 比 35Mn2 更常用，而且在《大型合金结构钢锻件 技术条件》(JB/T 6396)中也有该牌号，便于执行不同标准。

**5.1.6** 本次修订，将不锈钢板和不锈钢复合钢板的应用范围扩大到了闸门结构及泄水孔道钢衬，并列出了 4 种不锈钢冷轧钢板。其中，06Cr19Ni10 (旧牌号 0Cr18Ni9) 和 022Cr19Ni10 (旧牌号 00Cr19Ni10) 是奥氏体型钢，022Cr19Ni5Mo3Si2N (旧牌号 00Cr18Ni5Mo3Si2) 和 022Cr22Ni5Mo3N (原瑞典牌号 00Cr22Ni5Mo3N) 是奥氏体·铁素体型钢。从三峡水利枢纽泄水道采用不锈钢复合钢板作钢衬的情况来看，使用效果是比较好的。

用于闸门止水板及支承滑道所采用的不锈钢热轧钢板，原则上沿用原规范所列出的旧牌号 1Cr18Ni9 和 1Cr18Ni9Ti。1Cr18Ni9 的新牌号为 12Cr18Ni9，而 1Cr18Ni9Ti 没有对应的新牌号，因此选用了抗氧化性比 12Cr18Ni9 好一些的 12Cr18Ni9Si3，代替老牌号 1Cr18Ni9Ti。

**5.1.13** 根据目前工程应用实际情况二期混凝土的强度等级由 C15~C30 调整为 C15~C40。

## 5.2 容许应力

**5.2.1** 本条文做了以下几方面的修订：

(1) 修改了钢材的尺寸分组，型钢等不再单独分组。根据现行标准，碳素结构钢板厚由 16~150mm 调整为 16~200mm，低合金高强度结构钢板厚由 16~50mm 调整为 16~150mm，并对

组距进行了相应的调整，以扩大其应用范围。

对型钢等进行单独分组，出现在《碳素结构钢》(GB 700—79)标准中，其后修订的标准中均已取消了这个限制，故不再单列。

(2) 调整了钢材牌号及容许应力。根据《钢结构设计规范》(GB 50017)对钢材牌号进行了调整，取消了 Q215 等不常用的钢号并增加了 Q390 钢。Q390 钢相当于旧牌号 15MnV 钢，在工程实践中使用已有 30 多年的经验，新牌号 Q390 钢同 15MnV 相比，硫、磷含量的控制更严格。根据安全系数  $K=1.48$  重新确定了钢材的抗拉、抗压和抗弯容许应力  $[\sigma]$ 。由于增加了 Q390 钢，屈强比不小于 0.7 (属高强度钢材) 的分组有所增加。对于屈强比  $\sigma_s/\sigma_b \geq 0.7$  的钢材适当降低容许应力，采用  $[\sigma] = (0.5\sigma_s + 0.35\sigma_b) / K$ ，对于屈强比  $\sigma_s/\sigma_b < 0.7$  的钢材，采用  $[\sigma] = \sigma_s / K$ ，其他分别按  $[\tau] = 0.6 [\sigma]$ 、 $[\sigma_{cd}] = 1.5 [\sigma]$ 、 $[\sigma_{cj}] = 0.75 [\sigma]$  计算。安全系数  $K=1.48$  总体上与原规范相当，从几十年来运行结果来看还是安全的。

容许应力最小变动单位为  $5\text{N}/\text{mm}^2$ ，舍入圆整计算，以下同。

(3) 调整了焊缝的容许应力。原规范中焊缝容许应力的规定，是从《钢结构设计规范》(TJ 17—74)引进的。之后《钢结构设计规范》(GBJ 17—88)用焊缝质量级别作判断条件，代替了原来的判断条件，直至现行的《钢结构设计规范》(GB 50017)。这次修订采用焊缝质量级别作判断条件，其他参数仍按 TJ 17—74 所给的换算公式进行计算：

对接焊缝，抗压： $[\sigma_c^h] = [\sigma]$ ；

对接焊缝，抗拉，一类、二类焊缝： $[\sigma_t^h] = [\sigma]$ ；

对接焊缝，抗拉，三类焊缝： $[\sigma_t^h] = 0.8 [\sigma]$ ；

对接焊缝，抗剪： $[\tau^h] = 0.6 [\sigma]$ ；

角焊缝，抗拉、抗压和抗剪： $[\tau_t^h] = 0.7 [\sigma]$ 。

(4) 调整了普通螺栓连接的容许应力，并给出 4.6 级、4.8

级、5.6级、8.8级标准螺栓的容许应力。构件钢号补充了Q390钢。根据《钢结构设计规范》(GB 50017)，除了5.6级和8.8级螺栓完全采用了苏联1981年规范以外，其余仍从TJ 17—74的容许应力进行转化换算而确定。

本次修订，对5.6级和8.8级螺栓也按TJ 17—74的容许应力进行转化换算而确定。计算中根据《紧固件机械性能 螺栓、螺钉和螺柱》(GB/T 3098.1—2000)规定，取5.6级螺栓的保证应力 $S_p = 280\text{N/mm}^2$ ，8.8级螺栓的保证应力 $S_p = 580\text{N/mm}^2$ ，取安全系数 $K = 1.48$ 。由于普通螺栓的强度以材料的抗拉强度为基准，容许应力均采用抗拉强度的表达式。具体计算方法如下：

Q235钢，C级螺栓：

$$[\sigma'] = 0.8[\sigma] = \frac{0.8[\sigma]}{\sigma_b} \sigma_b = \frac{0.8 \times 160}{370} \sigma_b = 0.34\sigma_b$$

$$[\tau'] = 0.6[\sigma] = \frac{0.6[\sigma]}{\sigma_b} \sigma_b = \frac{0.6 \times 160}{370} \sigma_b = 0.26\sigma_b$$

Q345钢，C级螺栓：

$$[\sigma'] = 0.8[\sigma] = \frac{0.8[\sigma]}{\sigma_b} \sigma_b = \frac{0.8 \times 225}{470} \sigma_b = 0.38\sigma_b$$

$$[\tau'] = 0.6[\sigma] = \frac{0.6[\sigma]}{\sigma_b} \sigma_b = \frac{0.6 \times 225}{470} \sigma_b = 0.29\sigma_b$$

Q235钢，锚栓：

$$[\sigma'] = 0.65[\sigma] = \frac{0.65[\sigma]}{\sigma_b} \sigma_b = \frac{0.65 \times 160}{370} \sigma_b = 0.28\sigma_b$$

Q345钢，锚栓：

$$[\sigma'] = 0.65[\sigma] = \frac{0.65[\sigma]}{\sigma_b} \sigma_b = \frac{0.65 \times 225}{470} \sigma_b = 0.31\sigma_b$$

4.6级和4.8级，C级螺栓：

因为4.6级、4.8级螺栓的抗拉强度 $\sigma_b^b = 400\text{N/mm}^2$ 与Q235钢的抗拉强度 $\sigma_b = 370\text{N/mm}^2$ 相差不大，所以采用与Q235钢，C级螺栓等价的公式。 $\sigma_b^b$ 是螺栓的抗拉强度。

$$[\sigma'_i] = 0.8[\sigma] = \frac{0.8[\sigma]}{\sigma_b^b} \sigma_b^b = \frac{0.8 \times 160}{400} \sigma_b^b = 0.32\sigma_b^b$$

$$[\tau'] = 0.6[\sigma] = \frac{0.6[\sigma]}{\sigma_b^b} \sigma_b^b = \frac{0.6 \times 160}{400} \sigma_b^b = 0.24\sigma_b^b$$

5.6 级，A 级、B 级螺栓：

$$[\sigma'_i] = 0.8[\sigma] = \frac{0.8[\sigma]}{\sigma_b^b} \sigma_b^b = \frac{0.8 \times 280}{1.48 \times 500} \sigma_b^b = 0.30\sigma_b^b$$

$$[\tau'] = 0.6[\sigma] = \frac{0.6[\sigma]}{\sigma_b^b} \sigma_b^b = \frac{0.6 \times 280}{1.48 \times 500} \sigma_b^b = 0.23\sigma_b^b$$

8.8 级，A 级、B 级螺栓：

$$[\sigma'_i] = 0.8[\sigma] = \frac{0.8[\sigma]}{\sigma_b^b} \sigma_b^b = \frac{0.8 \times 580}{1.48 \times 800} \sigma_b^b = 0.39\sigma_b^b$$

$$[\tau'] = 0.6[\sigma] = \frac{0.6[\sigma]}{\sigma_b^b} \sigma_b^b = \frac{0.6 \times 580}{1.48 \times 800} \sigma_b^b = 0.29\sigma_b^b$$

Q235 钢，构件：

$$[\sigma'_c] = 1.5[\sigma] = \frac{1.5[\sigma]}{\sigma_b} \sigma_b = \frac{1.5 \times 160}{370} \sigma_b = 0.65\sigma_b$$

Q345 钢，构件：

$$[\sigma'_c] = 1.5[\sigma] = \frac{1.5[\sigma]}{\sigma_b} \sigma_b = \frac{1.5 \times 225}{470} \sigma_b = 0.72\sigma_b$$

Q390 钢，构件：

$$[\sigma'_c] = 1.5[\sigma] = \frac{1.5[\sigma]}{\sigma_b} \sigma_b = \frac{1.5 \times 245}{490} \sigma_b = 0.75\sigma_b$$

**5.2.2** 根据调查和应用情况，取消碳素结构钢 Q275、合金结构钢 35Mn2，增加低合金钢 Q390、合金铸钢 ZG34Cr2Ni2Mo、合金结构钢 42CrMo。

机械零件的容许应力，取安全系数  $K=2.3$ ，考虑了材料屈强比的影响之后先确定  $[\sigma]$ ，其他分别按  $[\tau] = 0.6 [\sigma]$ ， $[\sigma_{cd}] = 1.5 [\sigma]$ ， $[\sigma_{cj}] = 0.8 [\sigma]$ ， $[\sigma_k] = 1.15 [\sigma]$  计算。总体上与原规范相当，但计算依据清楚，数据更趋合理。

## 6 结构设计

### 6.1 结构布置

**6.1.1** 闸门的梁系布置主要应考虑：闸门的整体刚度要大，外形尺寸要小，制造、运输、安装和防腐方便。

同一层的布置方式，就是指将主梁、水平次梁以及垂直次梁等，均直接与面板相连接，其优点是闸门的整体刚度大，面板可参与梁系工作，闸门的厚度较小等；其缺点是制造、安装及防腐方面比较麻烦。故建议在条件许可时，首先应采用同一层的布置方式，但明确指出要注意制造、安装和防腐方面的合理性。

**6.1.2** 经调查，平面闸门主梁的设置情况大概为：宽而矮的露顶闸门，用双主梁的居多，窄而高的潜孔式闸门，采用多主梁的较多。但也有例外，因此条文中仅提应考虑的因素，不做硬性规定。

主梁按等荷载设计优点较多，梁的规格少，便于设计和制造，因此仍应推荐。采用多主梁时，顶底梁的荷载往往不能与中部主梁一样（因要满足底缘角度等要求），故需特别设计。中部主梁按等荷载要求是完全可以的，其间距与安装分段、滚轮布置时的主轮尺寸关系很大，因此提出来作为布置的考虑因素。

闸门底缘上、下游的倾角，系根据原西北水利科学研究所（现已与西北农林科技大学水利水电工程学院合并）的试验资料修订的。如对部分利用水柱压力的平面闸门，其上游倾角应不小于 $45^\circ$ 。根据试验， $60^\circ$ 倾角绕流条件优于 $52.5^\circ$ 和 $45^\circ$ 的情况，故提出尽可能采用 $60^\circ$ ；针对不同具体情况，修订为 $45^\circ\sim 60^\circ$ 之间较为灵活。对下游倾角还增加了非水平底槛，其水平夹角可适当增减的内容，并增加当下游倾角不满足 $30^\circ$ 时，可考虑补气措施的内容。

贯流机组事故闸门多为淹没出流，且一般流速较低，根据调

查和分析闸门上、下游底缘夹角适当减小，对闸门操作无实质的影响。

**6.1.3**  $a_0 \leq 0.45H$  的规定，出自陈继祖等译的《水工建筑物的平面闸门》一书，该书译自苏联 1955 年出版的《水利土壤改良中的工程结构》一书的第一部分。1957 年苏联专家 H. B 谢维廖夫在我国长春讲学时，亦予肯定，从此在我国沿用至今。但此规定系根据当时已建平面钢闸门的尺寸作出的，统计的闸门高度为 4~8m，按 8m 计， $0.45H$  则为 3.6m，符合运输界限。

新中国成立后，所修建的平面露顶闸门，仅根据《水利水电工程闸门技术特性手册》（1985 年出版）中不完全的统计就有 245 扇，其中超过 7~8m 高度的闸门，都采用了分段式，这和当时苏联相类似，由于目前我国仍以铁路运输为主，因此，将双主梁露顶式平面闸门的上悬臂段  $a_0$  限制为 3.6m 以内是恰当的。

**6.1.7** 根据国内外有关设计资料的统计分析，弧形闸门的半径有缩小的趋势，这样将会改善支臂的稳定性，缩短闸墩。

**6.1.8** 弧形钢闸门在过去大都采用主横梁式结构。在调查中发现，对高而窄的潜孔式弧形闸门，采用主纵梁式结构的已有不少，如碧口  $8\text{m} \times 10\text{m} - 60\text{m}$ ，刘家峡  $8\text{m} \times 9.5\text{m} - 60\text{m}$ ，龚嘴  $5\text{m} \times 8\text{m} - 70\text{m}$  等弧形闸门，据设计单位介绍，对高而窄的弧形闸门采用这种结构型式，具有布置合理、整体刚度大等优点；其缺点是弧门主纵梁制造困难。因此，本标准作为一种较好的结构型式予以推荐。

**6.1.10** 本条文参考了西北农林科技大学何运林、李宗利、王正中等的统计分析研究成果，并根据多年的设计经验，考虑经济合理和便于选用等因素确定的。

**6.1.13** 20 世纪 60 年代以来，我国有约 20 座低水头弧形闸门发生程度不同的支臂失稳事故。经分析研究认为，主要是设计者对低水头弧门支臂受力的特点认识不足。支臂失稳的原因有多方面，应从设计、制造、安装、运行和维护管理各个方面加以重视，并采取有效的预防措施。

(1) 在总体布置上，闸门应布置在水流平顺的地方，避免在闸前产生横向流、淹没出流和回流对闸门冲击，避免胸墙底部空腔产生“水—气锤作用”的不利影响。

(2) 弧形闸门支臂是薄弱环节，而支臂的动力稳定性又是问题的关键，在目前破坏机理还不十分清楚的情况下，从构造上予以保证，不失为切实可行的办法。比如：框架平面外的加强、适当加强上支臂和支臂端部等。

(3) 设计计算，正确选取支臂计算长度（不是 $\mu=1.0$ ，而是 $\mu=1.2\sim 1.5$ ），并且考虑由于不均匀沉陷和安装误差等原因所产生的支铰摩阻力对支臂平面外产生的附加弯矩。

(4) 合理设计垂直次梁，尽量减小垂直框架平面的弯矩，使支臂更接近于单向偏心受压杆件的假定。

(5) 必要时，要对弧形闸门的主框架进行动力稳定分析。研究表明：由弧门门叶和主梁传来的动水压力对支臂激发的纵向激振干扰力的频率 $\theta$ 等于支臂横向自振频率 $\Omega$ 的2倍时，支臂有可能产生参数共振（将弧门支臂视为处于空气中的两端铰接压杆）。纵向激振干扰力的频率 $\theta$ 可以通过模型试验或原型观测得到。

(6) 遵守操作规程，不得违章操作。比如：避免门顶过水或门顶和门底同时过水，不得长期停留在振动开度等。当出现振动时，要及时调整开度，避开振动区。

(7) 注意设备维护保养。弧门支铰要保证转动灵活，冬季运行要有防冰冻措施，每年汛前对电源、闸门和启闭设备进行检查及试运行等。

**6.1.14** 据调查已有不少工程采用了浮式叠梁或浮箱闸门作为检修闸门，如江苏三河闸、浙江富春江水电站、广西西津水电站。从运行情况看，基本上是成功的，但运行管理单位反映，叠梁闸门应考虑相互间的互换性，并力求减少漏水量；浮箱闸门为使操作平稳，应使结构布置尽量对称。浮式叠梁主要为单根浮力选择问题，故在条文中提出，以引起注意。

**6.1.15** 据调查，刘家峡、龚嘴等水电站在泄洪洞或尾水洞出口

采用了拱形闸门。当支承条件允许时，采用承压钢拱门是一种良好的闸门型式。其优点是充分利用了拱的原理，拱圈承受轴向力，不产生弯矩，故结构轻巧，节约钢材（一般能节约 30% 左右），且结构简单，大部分可利用型钢制成。

拱轴线采用 1/4 圆拱轴线，对于承受径向水压力较为合理。1/4 圆拱轴线的圆心角为  $90^\circ$ ，即拱的矢高比接近 1/5 左右，这样可按拱的理论计算。若拱轴线的圆心角太大，即拱轴线太长多费钢材，圆心角太小又起不了拱的作用。

调查发现，有的拱形门由于刚度很小，在制造、拼装过程中闸门变形太大，增加了制造、调整工作量，且有不安全感，故应设联结系以保证闸门刚度。

## 6.2 结构计算

**6.2.3** 经研究，原规范条文中对闸门主（次）梁挠度的规定是合适的，故对其规定不进行修订。

国外钢闸门设计规范，对容许挠度的规定摘要如下：

(1) 日本《水门铁管技术基准》2000 年版“第 1 章 闸门”第 20 条规定，门叶受弯产生的挠度与跨度之比的容许值如下：

橡胶止水闸门：1/800；

金属止水低压闸门：1/1000；

金属止水高压闸门：1/2000；

检修闸门：1/600。

计算跨度，对定轮部门为轮距，对滑动闸门为支承跨度，对弧形闸门为主梁支承跨度。低压闸门指设计水头不超过 25m，高压闸门指设计水头大于 25m。

(2) 《钢结构设计规范》(GB 50017) 规定受弯构件容许挠度与计算跨度之比为：

手动吊车和单梁吊车：1/500；

轻级工作制桥式吊车：1/800；

中级工作制桥式吊车：1/1000；

重级工作制桥式吊车：1/1200；

手动或电动葫芦的轨道梁：1/400；

有重轨（重量不小于 38kg/m）轨道的工作平台梁：1/600；

有轻轨（重量不大于 24kg/m）轨道的工作平台梁：1/400。

以上这些规范对容许挠度的规定，主要根据构件的使用条件而定，要求过高则将使钢材用量剧增，要求过低则会造成运行中出现不少问题，影响结构的正常运用。

综上所述，认为闸门中受弯构件的容许挠度主要应根据闸门的工作条件和运转要求规定。

在水工闸门上，挠度过大带来的问题主要有：

(1) 支座转角大，影响闸门的运转和零件的磨损损坏（如平面闸门的滚动轮或滑道、弧形闸门的支铰等）。

(2) 止水不严密，引起闸门漏水，特别是当闸门采用上游止水时，影响更大。

(3) 挠度大意味着刚度小，在流水中工作的闸门可能产生较严重的振动。

由于影响容许变形值的因素很多，有些很难准确定量。当有实践经验或有特殊要求时可在不影响正常使用和观感的前提下，可对变形的容许值进行适当调整，这种调整有时可能是偏严的。

**6.2.6** 面板及其参与梁系有效宽度的计算问题，河海大学曾经为规范开展了专题研究工作，按该研究成果说明如下：

(1) 关于拟定面板应力计算公式及其强度验算的试验与理论依据。为了建立符合钢闸门面板实际工作情况的计算公式，进行了各种边长比值的十个单区格面板模型、四扇九区格的闸门模型和两扇实际工程钢闸门的整体模型的弹性和弹塑性工作阶段的室内试验。又对福建省闽东水电站进水口深孔多主梁钢闸门进行了原型实测。根据试验成果并与面板的局部弯应力按弹性薄板理论计算值和闸门按空间整体结构的电算值进行了分析对比，在此基础上提出面板的局部弯应力视其边界支承的具体情况，可按四边固定、三边固定一边简支或两边固定两边简支的弹性薄板计算。

而且认为面板除直接承受水压力产生局部弯曲外，还参加主梁的整体弯曲工作，故验算面板强度时，必须将面板的局部弯应力与主梁的整体弯应力相叠加，并验算其折算应力强度。此外，通过室内的弹塑性阶段试验，证实了面板具有很大的强度储备，验算其折算应力强度时，其容许值可提高到钢材的屈服点 $\sigma_s$ 。具体意见分述如下：

A. 从室内试验和原型实测结果表明，在弹性阶段中，局部弯应力分布规律与按四边固定支承薄板承受均载的理论计算的弯应力曲线很吻合，而且应力的实测值同理论值基本接近。板中点挠度的实测值与理论值（按四边固定板计算）的差值见表4。

表4 中部区格面板中点挠度的实测值和理论值的差值

挠度值 (mm)		九区格 1:2 闸门模型			闽东水电站钢闸原型实测		
		计算值	实测值	差值 (%)	计算值	实测值	差值 (%)
板中点	上模型	1.61	1.68	4.3	0.95	0.94	1
	下模型	1.61	1.58	1.9			

注：计算值系按四边固定支承薄板受均载的挠度计算值。

面板沿支承边的负弯矩为余弦曲线分布，在面板跨间剖面和对角线斜边上，弯矩从负值变化到正值，反弯点的位置约距支承为 $1/6 \sim 1/4$ 边长处，否定了巴赫公式认为沿斜边上各点弯应力均匀相等的假定，而且面板上应力的控制点为支承长边中点，其弯应力值远大于跨中点（巴赫公式的控制点）的应力。因此钢闸门中部区格面板的局部弯应力，按四边固定支承板计算符合面板的实际受力情况。

由试验结果分析可知，面板与边部梁格相连支承边的实际工作不是完全固定，而属于弹性固定。弹性固定程度视边部梁格截面弯曲刚度和抗扭刚度的强弱、作用荷载的对称性等因素而异。该支承边的实际作用负弯矩值减少，约为按固定边计算的负弯矩的 $50\% \sim 70\%$ ；而跨中正弯矩值略为增大，但其弯应力的绝对值

仍小于支承长边中点应力，不为控制条件。为了简化和统一计算起见仍可近似地按四边固定板计算局部弯应力，结果将偏于安全。

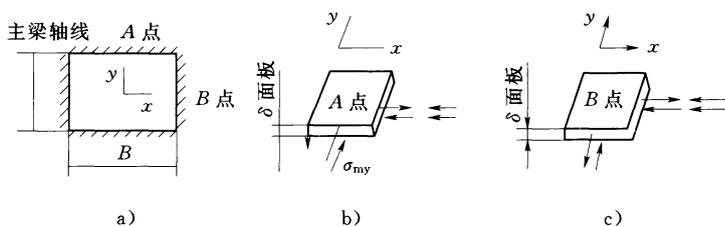
露顶式双主梁钢闸门的顶、底部区格的钢板，由于顶底梁的截面多为轧制的槽钢和角钢，弯曲刚度和抗扭刚度均很小，所承受的水压力呈三角形分布，荷载不对称。因而，面板与它们相连接支承边的弹性固定很弱，更接近于简支边情况。所以，面板的局部弯应力可按三边固定一边简支的弹性薄板计算。

如果闸门角区格的两相邻边均为截面刚度较弱的次梁相连时（如斜支臂弧形门的顶部和底部的角区格），则建议按两相邻边固定，另两相邻边简支的薄板计算其弯应力。

B. 从闸门模型试验所量测的面板局部应力  $\sigma_{mx}$  和整体弯曲应力  $\sigma_{ox}$  相叠加的应力  $\sigma_x$  和原型实测的成果都证实了当闸门受水压后，面板一方面直接承受传递水压力，本身发生挠曲变形产生局部弯应力  $\sigma_{mx}$ 、 $\sigma_{my}$ ；另一方面面板作为主梁的上翼缘参加主梁整体弯曲，产生与主梁轴线（ $x$  轴）一致的整体弯曲压应力  $\sigma_{ox}$ （即膜应力）。故面板上下游面的应力  $\sigma_x$  应为上述两部分应力的代数和。由于主梁整体弯曲对  $y$  轴应力影响很小，可忽略不计，故垂直主梁轴线方向的应力  $\sigma_y$  仅需考虑局部弯曲应力  $\sigma_{my}$ 。

面板的受力情况比较复杂，面板由于局部弯曲产生的应力沿板厚呈三角形分布，上、下游面的弯应力数值相等，符号相反。如沿支承边局部弯矩为负值，上游面为拉应力，下游面为压应力。跨中受正弯矩作用，应力符号则相反。而主梁整体弯曲压应力沿板厚变化很微小，可认为均匀分布。面板支承长边中点（A 点）和短边中点（B 点）上、下游面作用应力情况，如图 2 所示，（长边沿主梁轴线方向）。对于 A 点（图 2）上、下游面的弯应力数值相等，符号相反。如沿支承边局部弯矩为负值，上游面  $x$  轴应力  $\sigma_x = \sigma_{mx} - \sigma_{ox} = \mu\sigma_{my} - \sigma_{ox}$ （四边固定板，固定边  $\sigma_{mx} = \mu\sigma_{my}$ ），当  $\sigma_{ox} > \mu\sigma_{mx}$  时，上游面  $\sigma_x$  为压应力，则恰与  $\sigma_y$  符号相反，故为异号双向应力，而下游面  $\sigma_x = \sigma_{mx} + \sigma_{ox} = \mu\sigma_{my} + \sigma_{ox}$ ，此时  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  均为压应力，故为同号双向应力。根据理论分析与试

验结果，均说明面板在平面应力工作状态时，同号平面应力将提高达到塑性状态的应力值。面板支承长边和短边中点，上、下游面应力情况如图 2 所示。



a) 面板计算区格；b) 支承长边中点 (A 点) 应力情况；  
c) 支承短边中点 (B 点) 应力情况

图 2 面板上、下游面应力作用情况

为了充分利用面板强度，一般梁格布置均将长边沿主梁轴线方向布置，故面板应力的控制点为支承长边中点 (A 点) 的上游面， $\sigma_y$  比  $\sigma_x$  大得多。异号应力  $\sigma_x$  的作用会促使  $\sigma_y$  提早达到塑性状态，故应按第四强度理论验算面板的折算应力按式 (5) 计算：

$$\sigma_{zh} = \sqrt{\sigma_{my}^2 + (\sigma_{mx} - \sigma_{ox})^2 - \sigma_{my}(\sigma_{mx} - \sigma_{ox})} \leq 1.1\alpha[\sigma] \quad (5)$$

式中  $\sigma_{zh}$ ——面板的折算应力；

$\sigma_{mx}$ 、 $\sigma_{my}$ 、 $\sigma_{ox}$ ——均不带符号；

$\alpha$ ——弹塑性调整系数。

短边中点 (B 点) 的上、下游面作用的平面应力情况与 A 点相似 (图 2)。但其局部弯应力  $\sigma_{mx}$  为主要应力，数值远大于  $\sigma_{my}$  (因为 B 点  $\sigma_{my} = \mu\sigma_{mx}$ )。但其下游面压应力  $\sigma_x$  为两个主要应力  $\sigma_{mx}$ 、 $\sigma_{my}$  之和，虽然下游面为同号平面应力状态，但当  $b/a < 1.5$  时，短边中点 B 的下游面可能比长边中点 A 的上游面更早达到塑性状态。为了充分利用面板的强度，梁格布置时宜使面板的长短比  $b/a$  布置成大于 1.5，并且长边布置在沿主梁轴线方向。

当闸门面板为适应水压力分布规律，梁格布置成上疏下密时，致使闸门上部面板区格虽其长边沿主梁轴线布置，但  $b/a <$

1.5 或短边沿主梁轴线方向布置时（见图 3），B 点下游面可能为应力控制情况时，则还须按双向同号应力状态验算该点的折算应力按式（6）计算：

$$\sigma_{zh} = \sqrt{(\sigma_{my})^2 + (\sigma_{my} + \sigma_{ox})^2 - (\sigma_{my})(\sigma_{mx} + \sigma_{ox})} \leq 1.1\alpha[\sigma] \quad (6)$$

式中  $\sigma_{ox}$ ——B 点主梁上翼缘整体弯曲压应力，在主梁上翼缘宽度上按二次抛物线规律分布。

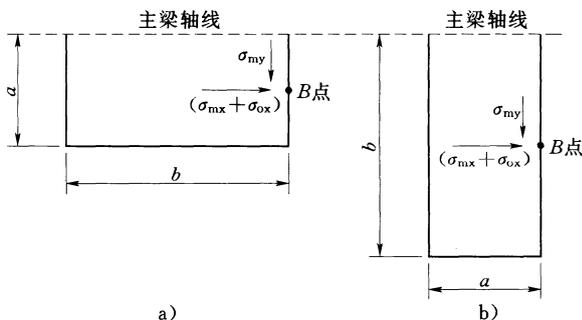


图 3 面板区格沿主梁轴线方向布置

B 点应力  $\sigma_{ox}$  最小，主梁翼缘与腹板相连处为最大，即为  $M/W$  两者比值按式（7）计算：

$$\frac{\sigma_{ox}^{\min}}{\sigma_{ox}^{\max}} = (1.5\xi_1 - 0.5) \quad (7)$$

即 
$$\sigma_{ox}^{\min} = (1.5\xi_1 - 0.5) \frac{M}{W} \quad (8)$$

式中  $\xi_1$ ——面板兼作主（次）梁翼缘的有效宽度系数。

C. 从室内模型的弹塑性阶段试验成果表明，钢面板具有很大的强度储备，而且面板的局部弯应力曲线沿支承边和跨间变化很大，故认为按折算应力验算面板强度时，可将其容许应力提高到钢材的屈服强度  $\sigma_s = 1.5[\sigma]$ ，如钢  $\sigma_s = 240\text{N/mm}^2$ ， $[\sigma] = 160\text{N/mm}^2$ 。试验证明，当加载到所建议的设计荷载的 2~2.5 倍时，面板支承边应力较大点才开始进入弹塑性阶段，残余变形

仍微小，远未达到钢面板的极限状态。随着荷载的继续增加，已进入弹塑性工作的各点应变值虽然继续增长，塑性变形向面板中部开展，但其边缘应力值仍稳定在一定的数值不再增加，趋向上述的数值。面板的塑性内力重分配的过程很长，当加载到设计荷载的 3.5~4.5 倍时，跨中点虽已进入弹塑性工作，但其残余变形仍不大。

与国外规范相比较，对面板强度的容许值联邦德国 1972 年在《水工钢结构物的计算基础》中规定为  $0.85\sigma_s$ 。（该规范对闸门其他构件的容许应力为  $140\text{N/mm}^2$ ）；苏联 1961 年在《水工建筑物机械设 计技术规范》中规定为  $1.3 \times 0.9\sigma_s = 1.17\sigma_s$ ，该规范系按极限状态法计算。其中 1.3 为工作条件系数，0.9 为匀质系数， $\sigma_s$  为钢材屈服强度。因此，我们认为将面板强度的容许值规定为屈服点  $\sigma_s$  还是适当的。

D. 由于计算面板厚度时，主梁的截面尚未确定，面板参加主梁的整体弯曲应力无法求得。故初选面板厚度时，可先按支承长边中点 A 点最大局部弯应力估算。

初估面板厚度  $\delta$  按式 (9) 计算：

$$\delta = a \sqrt{\frac{kq}{\alpha[\sigma]}} \quad (9)$$

式中  $k$ ——弹性薄板支承长边中点弯应力系数；

$\alpha$ ——弹塑性调整系数，( $b/a > 3$  时， $\alpha = 1.4$ ； $b/a \leq 3$  时， $\alpha = 1.5$ )；

$q$ ——面板计算区格中心的水压力强度；

$a$ ——面板短边长度。

主梁截面选定后应按图 2 及图 3 验算 A 点上游面和 B 点下游面的折算应力。对于 A 点的下游面和 B 点的上游面由于折算应力不起控制作用，故不进行验算。

(2) 综上所述，条文中关于面板验算公式是正确和合理的，其安全性和经济性亦可得到保证，同时，目前国际上先进国家大都采用这种计算公式，有利于国际交流。

对于面板折算应力验算，有时要求反复试算进行。但亦可用解联立方程式引进系数  $\eta$  方法解决（参见华东水利学院钢闸门面板试验研究小组的论文《钢闸门面板按（SDJ 13—78）规范计算方法的简化》，载 1984 年《水力发电杂志》）。

据调查，钢闸门面板锈蚀比较严重，为确保使用寿命，增加一定的锈蚀裕度是完全必要的。同时，在考虑锈蚀裕度时根据不同情况分别考虑也是必要的。比如日本《水门铁管技术基准》（2000 年版）第 1 章闸门第 21 条规定：板厚裕度包括锈蚀裕度和磨损裕度。闸门材料的计算板厚裕度不得小于表 5 所给的裕度值。

表 5 闸门防腐层计算厚度

单位：mm

水质条件	浸水条件			
	经常浸水		不经常浸水	
	单面浸水	双面浸水	单面浸水	双面浸水
淡水	1.0	2.0	0.5	1.0
海水	1.5	3.0	1.0	2.0

该规范还规定：①泄水洞内受力板件要考虑锈蚀及磨损，板厚裕度不得小于 1.5mm；②多泥砂河流要考虑泥砂磨损裕度；③耐磨性好的材料以及经特殊表面处理的情况可以适当减少板厚裕度。

我国《水电站压力钢管设计规范》（SL 281—2003）规定为 2mm，对泥沙磨损、磨蚀较严重的钢管，应专门研究。

6.2.7 西北农林科技大学（即原西北农学院）曾调查分析了弧形闸门主框架的各种型式，按常用的三种主框架，分别用弹性稳定理论及有限单元法进行了研究。详见何运林、黄振《弧形钢闸门柱的有效长度》（见《水力发电学报》1987 年 1 期）。

### 6.3 拦污栅

6.3.1 拦污栅的设计荷载主要与污物数量及清污措施有关。据

调查，安徽、浙江等省某些水电站采用深式进水口，由于污物少，电站运行以来没有发生过拦污栅堵塞现象。

但调查中也了解到，有些电站发生过拦污栅压垮事故，如湖南柘溪、湖北富水及甘肃盐锅峡等水电站，因这些水电站的污物比较多，又没有设置有效的清污设备，从而发生事故。

据了解有部分水电站对拦污栅的实际水压差作过测量，如：广东长湖水电站在污物较多的情况下为 2.9m；湖南柘溪水电站在污物较多的情况下为 4.0m；浙江富春江水电站在栅片挂满水草的情况下为 5m；甘肃盐锅峡水电站在污物特多的情况下为 7m。从这些调查资料来看，如果设置有效的清污设备，则原规范规定的水位差 4m 对于常规水电站还是合适的。抽水蓄能水电站，在我国起步较晚。除了已建的广州抽水蓄能水电站拦污栅取 4m 水头差以外，已建的十三陵、天荒坪和在建的蒲石河、白山等抽水蓄能水电站拦污栅均取 5m 水头差。日本《水门铁管技术基准》(2000 年版) 第 1 章闸门第 147 条规定，抽水蓄能水电站拦污栅，取 3~7m 水头差。根据上述资料，对于抽水蓄能水电站的拦污栅取 5~7m 水头差，较日本规范偏严一些。

**6.3.3 拦污栅的形式**，目前有活动式和固定式两种。而以活动式使用最为广泛，其优点为便于更换和维修。

**6.3.4 栅条的侧向支承间距**，不宜大于 70 倍栅条厚度的规定由栅条稳定验算公式推导而得。现推导如下：

根据弹性稳定理论，钢梁整体稳定的临界荷载按式 (10) 计算：

$$P_L = \frac{K}{l^2} \sqrt{EI_y GI_n} \quad (10)$$

式中  $K$ ——与荷载、支承等诸因素有关的系数；

$P_L$ ——栅条整体稳定临界荷载，N；

$l$ ——栅条的跨度，m；

$EI_y$ ——栅条抗弯刚度；

$I_y$ ——栅条截面对  $y-y$  轴的惯性矩， $\text{mm}^4$ ；

$E$ ——弹性模量， $N/mm^2$ 。

$GI_n$ ——栅条的抗扭刚度；

$I_n$ ——栅条截面的抗扭惯性矩， $mm^4$ ；

$G$ ——剪切模量， $N/mm^2$ 。

受均布荷载的矩形截面的简支梁，可求得整体稳定的临界荷载按式 (11) 计算：

$$P_L = \frac{28.3}{l^2} \sqrt{EI_y GI_n} \quad (11)$$

当 Q235 钢时， $G = \frac{E}{2(1+0.3)}$  代入式 (11) 得式 (12)：

$$P_L = \frac{28.3}{l^2} \sqrt{EI_y \frac{EI_n}{2.6}} \quad (12)$$

因

$$\left. \begin{aligned} I_y &= hb^3/12 \\ I_n &= hb^3/3 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中  $h$ ——栅条截面的高度， $mm$ ；

$b$ ——栅条截面的厚度， $mm$ 。

将式 (13) 代入式 (12) 并整理得式 (14)：

$$P_L = 6.03 \times 10^5 hb^3/l^2 \quad (14)$$

栅条荷载  $P$  不大于栅条整体稳定的临界荷载  $P_L$ ，并应满足式 (15)：

$$P_L \geq kP \quad (15)$$

式中  $k$ ——安全系数，取  $k=2$ 。

均布荷载作用下，栅条最大弯矩为  $Pl/8$ ，截面抵抗矩为  $bh^2/6$ ，栅条荷载  $P$  与栅条截面最大弯曲应力  $\sigma$  之间的关系见式 (16)：

$$P = 4bh^2\sigma/(3l) \quad (16)$$

令  $\sigma = \sigma_s = 235$  代入式 (16) 得式 (17)：

$$P = 313.3bh^2/l \quad (17)$$

将式 (14) 和式 (17) 代入式 (15)，取不等号为等号后得

式 (18):

$$962.3 = hl/b^2 \quad (18)$$

令  $h=12b$  代入式 (18)，整理后即得式 (19):

$$l = 80b \quad (19)$$

## 7 零部件设计

### 7.1 一般规定

**7.1.1** 据调查，有的工程闸门的轴未经防腐处理，因而锈蚀严重，致使滚轮不能转动，拆装发生困难。过去闸门设计中，对轴表面镀铬厚度的要求相差悬殊，有的对镀层要求很薄，有的要求镀层很厚，达 0.5~0.8mm，而镀层厚度超过 0.1mm 后，电镀层的质量一般是逐步降低的。为使镀层质量好，节约电镀费用，通常镀铬层厚不建议超过 0.1mm。

### 7.2 行走支承

**7.2.1** 在静水中启闭的闸门和启闭力不大的动水中启闭的闸门，采用滑道支承比较简单。

**7.2.2** 考虑已投入运行的滚轮荷载情况，江口水电站 3086kN，小浪底水利枢纽 4130kN，三峡水利枢纽达到 4500kN。因此结合材料性能、制造工艺、运用情况等方面因素统一考虑，不规定具体数值，便于使用。当轮压较大时，应对材料、滚轮型式、制造工艺接触强度等有关问题作全面研究。

对轮子及轨道明确提出可以用热处理方法适当提高表面硬度。这样做的目的在于通过适当措施，提高轮子的承载能力。

由于轨道处于水下，检修不便，轮子可随闸门提出水面，与轨道相比，检修方便。又因闸门滚轮运用不甚频繁且速度较低，因此规定滚轮硬度应略低于轨道，如低于 50HB。

**7.2.3** 根据国内外的工程实践经验，使用偏心轴（套）调整诸滚轮平面度是简单可行的办法。不仅多滚轮，就是四个滚轮用偏心轴（套）调整平面度也是方便可行的。偏心距可采用 5~10mm。

**7.2.4** 轮压的不均匀系数，当闸门和埋件制造及安装精度符合

安装规范要求时，据调查，对于简支轮和设有偏心轴的多滚轮，采用 1.1 大体上是合适的。其他情况，如履带式滚轮、不设偏心轴的多滚轮，影响因素（设计、加工、安装等）较多，条件较好时，可望维持在 1.1~1.2；条件较差时，出入较大，要专门研究。

**7.2.7** 根据工程运用经验，并综合考虑了制造、安装条件，首先推荐采用圆柱铰、球形铰，对于大跨度斜支臂弧形闸门，根据工作条件，也可选用锥形铰。近年来球面轴承得到广泛应用。因此，将球形铰列入仅次于圆柱铰首先推荐的形式。

### 7.3 吊耳、吊杆、锁定

**7.3.2** 电站尾水闸门的吊耳可稍向止水侧偏离，其含意为计算闸门重心位置时，须将计算值化整为一整数时，应有意向止水侧偏。此一微小值不会影响多孔共用闸门的运行，对止水却会产生良好影响。

**7.3.3** 作用于吊耳等联结件上的荷载，对于单机单门的，要用该启闭机的启闭力，以策安全。

(1) 作用在吊耳孔上的荷载，不仅应考虑双吊点的不均匀影响，同时，还应考虑单吊点超载等影响，因此可按计算启闭力乘以 1.1~1.2 的超载系数计算。

(2) 对潜孔闸门上的吊耳荷载，考虑在深水下的沉积物易于卡阻，同时在深水下吊耳损坏后的检修条件较差，故应酌情提高其安全度。

**7.3.4** 原则上应优先推荐选用自动挂脱梁和高扬程启闭机，尽量避免选用吊杆。这样对运行、安装和维修都带来了很大方便。故明确规定“仅在下列情况采用吊杆”。

**7.3.6** 要注意吊杆作为压杆时还要进行稳定性的验算。由原型观测及模型试验可知，吊杆除端部小部分腹板作为传递外力的过渡段外，应全断面受力，故端部应设补强板。

东北院完成的吊杆模型试验（2 组为有机玻璃，1 组为钢）

结果表明，吊杆腹板的应力值一般要比翼缘小 10% 左右。吊杆两端应设补强板，其伸入腹板长度一般为腹板高度的 75% 左右。

**7.3.7** 将轴孔加大 1mm 的简单办法，通过实际运行没有发现问题。计算方法可按活动配合，即孔壁抗拉容许应力降 20%。

**7.3.8** 近 30 年来各地有用如意式、翻转式等各种自动、半自动锁定器，使用效果都很好。

**7.3.9** 按其不同用途确定锁定装置的作用荷载是必要和合适的。可根据相关抗震规范及目前工程建设实际情况增加地震荷载。

## 7.4 止水装置

**7.4.2** 对顶水封橡皮不仅有向上翻卷现象，而且有向下翻卷现象，即下游止水闸门在动水开启时，顶水封橡皮就会发生此现象。目前常用防止翻卷情况的措施为将顶水封压板做成翘头形式。

**7.4.3** 考虑闸门及埋件在制造、安装、施工过程中可能产生的累计误差，以及闸门承受水压后可能的变形，要求闸门水封橡皮采用预留压缩量，一般采用 2~4mm，具体根据闸门承受水头大小，施工安装质量等因素选用。目前设计中多数选用 3~4mm，但也有少数采用 5mm（如新安江电站）。据反映压缩量多了，橡皮磨损大，耐久性差，故未推荐。另外，为促进施工安装质量的提高，也不宜增大预压量。

**7.4.5** 对深孔弧门的顶止水目前常用两道，这里推荐在闸门和胸墙上各一道为好。同时提出目前还存在的普遍问题，即由于不注意胸墙止水部件的施工安装质量及面板弧度制造安装质量，而造成闸门启闭过程中的漏水问题，应引起设计制造安装等方面的注意。

**7.4.6** 对大、中型闸门的顶、侧止水座板推荐选用不锈钢板。本条文提出的止水板的构造形式，在过去制造安装过程中发现止水板处的刚度不够、构件焊缝不对称而产生较大的焊接变形，直接影响止水板的加工质量，故提出其构造形式应满足止水板的焊

接、加工等要求。

## 7.5 焊接和螺栓连接

**7.5.1** 本条参考了《钢结构设计规范》(GB 50017)中有关规定,据调查,采用间断焊缝易产生腐蚀、应力集中、焊缝开裂,所以不采用。

**7.5.5** 根据《紧固件的标记方法》(GB/T 1237—2000),螺栓的产品等级分为 A 级、B 级和 C 级, A 级最精确, C 级最不精确。

根据《螺栓、螺钉和螺柱的机构性能》(GB/T 3098.1—2000),螺栓的性能等级分为 3.6 级至 12.9 级不等。这次修订共列出性能等级为 4.6 级、4.8 级、5.6 级、8.8 级,共 4 种普通螺栓。

由于螺栓的产品等级与性能等级相关联(如性能等级为 8.8 级的螺栓,产品等级为 A 级),所以明确采用 A 级、B 级。

**7.5.6** 高强度螺栓具有施工简便,受力性能好,疲劳强度高,可以拆换,比较安全及容易掌握等优点。20 世纪 80 年代以来,首先在铁路桥梁上使用,随后在工业与民用建筑上都成功地应用了高强度螺栓。三峡工程泄洪深孔弧形工作闸门,门体结构纵缝结合面采用机械加工,用 10.9 级高强度螺栓连接,大大减小了门体变形,降低了成本,缩短了工期。实现现场安装基本无焊接作业,对制造安装都具有重大意义。

## 8 埋件设计

**8.0.1** 门槽混凝土面距离门体不小于 100mm 是根据调查而得的最少必要距离。

关于对埋件的强度、刚度及其尺寸大小的设计前提条件，应能满足将其所承受的荷载安全地传递到混凝土中去。

一些布置比较紧凑、孔口尺寸不大的闸门，可以根据实际情况适当减小门槽混凝土面距离门体的距离，以满足一些特殊要求。因此，条文中增加了“门槽高度小于 10m 的可适当减小”，但是应当避免由于安装质量及二期混凝土浇筑质量不良等原因，造成闸门在启闭过程出现阻卡等问题。

**8.0.2** 据调查，采用一期混凝土安装，存在问题较多，不易保证质量，故不予推荐。

根据调查统计，我国的闸门埋件绝大部分是采用二期混凝土安装的，并且安装质量也较一期混凝土安装的质量高。不少单位的安装人员认为，特别是孔口尺寸较大时，如采用二期混凝土安装，更能保证轨道的安装精度。

国外有些规范如苏联规范建议采用混凝土预制门槽安装，以加快施工进度。我国有些工程如陆水、龚嘴等工程的一些闸门埋件也采用了预制门槽安装的，并取得了较好的效果。但是由于门槽预制件重量大，施工现场受启吊设备所限等，加之目前尚未总结出一套比较成熟的经验，故没有推广使用。

根据我国的具体情况，我们还是首先推荐使用二期混凝土安装，在条件允许时也可以采用预制门槽安装。

**8.0.3** 一期锚筋（板）的埋设不仅用以安装、固定埋件，同时用以加强一、二期混凝土间锚固作用。为适应钢模施工，一期锚筋可采用锚板型式，但锚板数量不得减少，每块锚板上均应焊出锚栓或加固筋，在整体构造上应加强其与二期混凝土的锚固

措施。

**8.0.4** 多泥沙河流的埋件磨损问题是一项重要课题，过去曾发现三门峡底孔  $3\text{m} \times 8\text{m} - 64\text{m}$  平面闸门门槽过水时间不足一个月，悬移质对轨道磨损严重，据三门峡观测资料分析，当过闸流速  $v > 10\text{m/s}$  时，钢板衬护开始受到磨损，这对今后在多泥沙河道上设计闸门埋件，提供了一定的经验。

据调查了解，对于推移质较多的河流，如西南地区的河流由于推移质多且粒径大（直径达  $0.5\text{m}$ ），推移质过闸时对闸门埋件的磨损、冲击很严重。因此须采取措施以保护底板及门槽底部的侧墙。初步实践证明，辉绿岩铸石较脆，经不起移推质的冲击，钢板衬护是目前使用的衬护措施之一。钢板虽能抗冲击，但布氏硬度低，经不起长时间的磨损。近年，有在钢板表面涂抹环氧树脂或环氧混凝土等，效果尚可。但有待进一步累积资料总结经验；有些地方采用铸铁衬护，由于使用不多，有待进一步总结经验。

**8.0.7** 目前普遍采用的胸墙和门楣相关尺寸已经沿用几十年，实践证明是可行的。但对一些重要的事故闸门，仍推荐通过模型试验确定。

**8.0.12** 根据调查，目前国内露顶式弧形闸门，大多数都采用混凝土牛腿作为支铰支承。深孔弧门支铰都支承在钢梁上。根据运行情况，一般情况尚良好。目前在大推力弧形闸门支承结构中，已经开始采用高强度预应力锚索结构，比如水口、五强溪等。

**8.0.13** 据调查目前有些深孔闸门在门槽内设置侧向导轨，因而在整个门槽内就没有必要设置副轨与反轨，这样对深孔闸门就不应规定上下游两侧设置全门槽高的金属护角。因此，门槽的金属护角设置高度应视具体情况而定。

**8.0.14** 拦污栅埋件设计，原则上和平面闸门相同，故可以按平面闸门埋件验算其强度、刚度等。

**8.0.15** 根据对国内大、中型工程导流闸门调查其底槛结构和形式对导流闸门的安全下闸有很大影响。由于导流孔过流历时较

长，条件差，底槛是薄弱环节，极易冲刷破坏，按常规断面高200mm，底槛则偏小；根据实践经验选用200~300mm较合适。且根据具体运用条件——如过闸的推移质较多时，尚应在上、下游段设衬护板。

## 9 启闭力和启闭机

### 9.1 启闭力计算

**9.1.1 静水中启闭的闸门启闭力计算中水位差值的确定**，考虑了以下因素：露顶式闸门可以直观其平压状态、尾水闸门水位不高且闸门漏水有助平压，故水位差值可选用小一些，一般不大于1m。电站进水口闸门充水条件不利，水位差可选用大一些。可根据充水阀的大小、隧洞的长短、机组漏水量大小等来选取。

计算启闭力时，可先计算闭门力，确定闸门是否加重再计算启门力。故公式按此顺序排列。加重块重量较准确，可不乘自重修正系数。

计算滚动轴承的滚轮摩阻力时，需要计算滚动轴承的平均半径  $R_1$  与滚动轴承滚柱直径  $d$  的比值  $R_1/d$ 。机械设计手册中通常给出外圈的名义内径  $D_2$  和内圈的名义外径  $d_2$ ，可以近似地取  $R_1/d = 0.5 (D_2 + d_2) / (D_2 - d_2)$ 。

滚动轴承的滚轮阻力矩  $M$  由滚动轴承的滚动摩擦力臂  $f_0$  产生的阻力矩  $M_0$  和滚轮的滚动摩擦力臂  $f_1$  产生的阻力矩  $M_1$  所组成。除了荷载大小、润滑和密封、制造和安装精度因素以外， $f_0$  和  $f$  分别同轴承型号和滚轮和轨道表面情况有较大关系。

对于滚动轴承，通常采用滚动摩擦系数，滚动轴承的摩擦力矩  $M_0 = \mu P d_0 / 2$ 。其中： $\mu$  是滚动轴承摩擦系数； $P$  是轴承荷载，N； $d_0$  是滚动轴承内径，mm。

对于滚轮，通常采用滚动摩擦力臂，滚轮的滚动摩擦力矩  $M_1 = fP$ ，其中： $f$  是滚动摩擦力臂，mm；其余符号同前。

由  $M = T_{zd} R = M_0 + M_1$  可以得到滚动轴承的滚轮摩阻力计算公式： $T_{zd} = (\mu d_0 / 2 + f) P / R$ ，其中， $R$  为滚轮半径。滚动轴承的滚动摩擦系数  $\mu$  和滚动摩擦力臂  $f_0$  之间有关系式  $f_0 = \mu d_0 / 2$ ，上述公式还可以写成： $T_{zd} = (f_0 + f) P / R$ 。

目前日本和德国规范中滚动轴承的滚轮摩阻力计算公式均采用上述表达方式，优点是从轴承设计手册可以直接查到可供参考的滚动轴承摩擦系数，不必了解滚动轴承的平均半径、滚柱尺寸等内部参数，使用方便。

与日本规范不同，德国规范对滚轮也采用了滚动摩擦系数的表达方式，并且根据轨道表面硬度不同分别取不同的滚动摩擦系数  $\mu_R = f/R$ 。其中： $f=0.5\text{mm}$  用于布氏硬度不大于 150HBS 的钢； $f=0.2\text{mm}$  用于布氏硬度不小于 150HBS 的钢，体现了轨道表面硬度对滚动摩擦系数的影响。

由于国内规范公式通过轴承的平均半径、滚柱尺寸等内部参数建立力矩平衡方程并采用单一的滚动摩擦力臂，不仅计算精度低，有时难以查到相关的轴承参数，给计算带来了一定困难。定轮闸门采用滚动轴承以后，由于轴承本身及装配误差带来的影响、密封装置带来的影响、包括轴向荷载在内的荷载大小和方向不确定性、滚轮和轨道表面硬度的影响等诸多因素都将对滚轮的摩擦力矩产生不同程度的影响，情况比较复杂。因此，有必要开展相关的试验研究工作，确定有关参数之后合理改进计算公式。

**9.1.2 弧形闸门启闭力计算，持住力不是控制因素，仅列闭门力和启门力计算公式。**

由于深孔弧形闸门的侧止水橡皮均留有预压缩量，此值对启闭力有影响。因此计算启闭力应将此项摩阻力计算在内，并近似地取预压量为变形值。

**9.1.3 拦污栅在静水中启吊时，启吊力计算中仅考虑部分栅条堵塞污物。**这是因为，拦污栅产生水位差达设计水头以前即进行清理，故不存在污物全部堵塞拦污栅的情况。同时水电站运行规程对清污也有较明确规定。

部分堵塞面积可根据拦污栅设置高程、清污条件、河流污物数量及性质决定。

**9.1.4 本条最初来自 1964 年研究班定稿的《水工建筑物钢闸门设计规范》中第 25 条。**主要思路是闸门重量在底槛上产生的压

强大于水压力在底槛产生的压强，取安全系数 1.2。

**9.1.5** 在多泥沙河道上设置闸门，除考虑本条所列情况外，还要根据泥沙特点设置一些切实可行的清除泥沙设备，避免启闭机过度超载，引起意外事故。同时对泥沙引起的黏着系数和摩擦系数，也应做些试验和原型测定。

## 9.2 启闭机选择

**9.2.1** 根据国内调查和分析，近年来在工程建设中，特别是大中型工程，对需要短时间内全部开启或有下压力要求的闸门大量选用液压启闭机操作。

水电站或水库投入运行后，坝上所设门式启闭机，常需要综合使用，除操作闸门外，尚须满足坝上其他机械设备检修、大坝上游面检修、吊出漂浮物等要求。

近年来液压启闭机得到广泛应用，大型闸门基本上已不采用螺杆式启闭机，但考虑到工程规模、经济性、检修与维护等综合因素，小型闸门选用螺杆式启闭机也是合适的。

**9.2.3** 溢流闸门应提到水面以上，避免水面上漂浮物撞击闸门。考虑河流不同，漂浮物不同，为有选择余地，规定为 1~2m。

快速闸门开启高度规定为孔口以上 0.5~1.0m。当水流脉动影响较大时宜加大开启高度。

所有启闭机最大扬程，都应考虑将闸门提出闸槽的可能性以利闸门检修更换。

## 9.3 自动挂脱梁

**9.3.1** 根据国内 20 世纪 70 年代以来的经验，推荐机械式和液压式两种自动挂脱梁。

当采用移动式启闭机操作多孔闸门时，推荐采用自动挂脱梁，主要是因为它可节省时间和钢材，减免装卸吊杆的笨重劳动。

## 附录 A 闸门孔口尺寸和设计 水头系列标准

**A.0.1** 原规范统计了截至 1990 年，露顶式闸门 183 个（平面闸门 88 个，弧形闸门 95 个），其中根据孔口尺寸系数可以按 0.5m 化整晋级的 115 个，占 62.8%；潜孔式闸门 145 个（平面闸门 104 个，弧形闸门 41 个），其中根据孔口尺寸系列可以按 0.5m 化整晋级的 113 个，占 78%。

本次修订又补充统计了 1990~1997 年，露顶式闸门 293 个（平面闸门 161 个，弧形闸门 132 个），其中根据孔口尺寸系列可以按 0.5m 化整晋级的 237 个，占露顶式闸门的 80.9%；潜孔式闸门 717 个（平面闸门 641 个，弧形闸门 76 个），其中根据孔口尺寸系列可以按 0.5m 化整晋级的 637 个，占潜孔式闸门的 88.8%。

从补充统计的数据来看，闸门孔口尺寸更趋近于孔口尺寸系列。按截至 1997 年计算，露顶式闸门 476 个，根据孔口尺寸系列可以按 0.5m 化整晋级的 352 个，占 73.9%；潜孔式闸门 862 个，根据孔口尺寸系列可以按 0.5m 化整晋级的 750 个，占 87%。

其他的工作闸门和检修闸门。孔口尺寸范围，根据已建闸门加以统计并考虑到今后发展要求加以制定，形成表 A.0.1-3。

**A.0.2** 主要考虑晋级的增加率不大于 5%，这样比较经济合理。水头小于 10m 不作规定，由设计者自行掌握。

在闸门设计水头系列标准中，根据水头范围以 0.5m、1.0m、2.0m 为步长进行递增时遇到的舍入误差的处理，可以以 0.2m、0.4m、0.8m 作为跳挡的分界线。比如，设计水头为 10~20m 时，若设计水头小于 10.2m、11.2m 时舍去零头取 10m 和 11m 水头，否则水头取 10.5m 和 11.5m，依此类推。

## 附录 B 通气孔面积的计算

通气孔面积的计算，目前经验公式虽很多，但各有其适用条件，很难作硬性规定，而理论公式还不很成熟，亦难于推荐。

附录中两个经验公式为原规范所推荐，还可沿用。第二个半经验半理论公式系陈肇和教授 20 世纪 80 年代的科研成果，并于 1988 年通过水力发电学会水工水力学专业委员会鉴定。

根据泄水管道运行要求，闸门后应设置通气孔。其作用是管道充水时用以排气，管道泄水时用以补气。通气孔对于保证泄水道的流态稳定，避免空蚀，减轻闸门的动荷载等有相当大的作用。管道因不设通气孔或通气孔面积偏小或位置不适当，都会造成闸门操作故障，影响安全运行，加剧空蚀、振动等现象。如山东沐浴水库泄水管原先因未在闸门段设通气孔，门槽两侧空蚀严重，其后又用钢板衬砌保护，而钢板也被撕裂。盐锅峡两个导流底孔的工作闸门和事故闸门，均设于进口，由于进口曲线不妥，门槽进水，而又无通气孔，施工期间，在管道泄水和坝面溢流时，空气无法从出口处补入。因而，在工作门后产生相当严重空蚀，仅泄水三天左右时间，工作闸门下游约 12m 范围内的洞顶及边墩空蚀深度达 2.5~3m，中墩被击穿，两个孔空蚀混凝土共达 280.7m<sup>3</sup>。丹江口导流底孔，也由于同样原因，发生空蚀，边墩空蚀深度达 1.2m。在国外，也有不少类似的例子。

泄水孔通气孔尺寸的确定，主要根据泄水孔在正常泄流情况下，满足闸门后最大允许负压值条件所需要的最大充气量和最大限制风速来计算。由于影响最大通气量的因素比较复杂，国内外的许多工程研究人员作了大量的试验研究工作。美国的卡林斯基首先根据室内模型试验分析提出了封闭管流中求气水比的经验公

式，见式 (20)：

$$\beta = 0.0066(Fr - 1)^{1.4} \quad (20)$$

而康拜尔则对 5 个原型观测资料分析整理得出了求  $\beta$  的经验公式，见式 (21)：

$$\beta = 0.04(Fr - 1)^{0.85} \quad (21)$$

日本《水门铁管技术基准》(2000 年版) 第 1 章闸门第 139 条中即推荐采用上述康拜尔公式。

罗马尼亚、意大利、日本等国的工程师们又先后根据自己的模型实验、原型观测所获得的数据，提出了在各种流态下以弗劳德数为函数并与卡林斯基、康拜尔等人公式相仿而系数不同的求气水比经验公式。在同一弗氏数情况下，各家计算公式所得结果相差甚大，而且没有一个公式能在所有流态情况下均适用。鉴于以上情况，我国的科技人员，根据新中国成立 20 多年来大量的原型观测资料和各工程的特点，进行综合的分析验证对比，分别提出了各种经验公式和半经验半理论公式。对各种不同的估算公式进行了验证对比，认为半经验半理论的估算公式，力学概念比较清晰，推导过程比较严谨，从公式形式及变量而言，包括的变量比较全面，既有水流特性指标又有管道及通气孔道的特性指标，符合动力平衡原理，比较适用于明流长管道。

为了防止通气孔风速过大而造成噪音并恶化操作人员劳动条件，参照国内原型观测资料，建议工作门通气的风速不大于 40m/s，小型工程可以放大到 50m/s。

在原规范的基础上，研究国内几十个工程的实际情况，参考《水电站压力钢管设计规范》(DL/T 5141) 的有关要求，建议发电管道事故闸门门后的通气孔面积可按发电管道面积的 4%~7% 选用。发电管道通气孔特性统计见表 6。

表 6 发电管道气管特性统计表

序号	工程名称	电站型式	闸孔尺寸 (m×m)	引水管道		通气孔		比值 $a/A$ (%)
				尺寸 (m)	面积 $A$ ( $m^2$ )	尺寸 (m)	面积 $a$ ( $m^2$ )	
1	刘家峡	坝后式	7×8	φ7.0	38.5	2×φ1.2	2.26	5.87
2	乌江渡	坝后式	5.5×7.5	φ6.5	33.2	1.2×1.8	2.16	6.51
3	龚嘴	坝后式	7×8	φ8.0	50.2	2-1×2	4.00	7.79
4	新丰江	坝后式	4×6	φ5.2	21.2	φ1.5	1.77	8.35
5	丹江口	坝后式	6.5×10	φ7.5	44.2	2×φ1.1	1.90	4.30
6	柘溪	坝后式	5.5×7	φ6.5	33.2		2.29	6.90
7	陈村	坝后式	3.7×8.1	φ5.2	21.2	φ1.2	1.13	5.33
8	石泉	坝后式	5.5×7	φ5.5	23.8	φ1.2	1.13	4.75
9	潘家口	坝后式	7.5×9	φ7.5	44.2	2×φ1.2	2.26	5.11
10	长湖	坝后式	6×7	φ7.0	38.5	3×1	3.00	7.80
11	岗南	坝后式	5×6	φ6.0	28.3	1×1	1.00	3.55
12	六甲	坝后式	4×4.5	φ4.5	15.9		0.80	5.03
13	富水	坝后式	6×9	φ6.5	33.2	1×1	1.00	3.01
14	安康	坝后式	7.5×8.525	φ7.5	44.2	2×φ1400	3.08	6.97
15	陆水	坝后式	5.6×6	φ6.0	28.3		1.20	4.24

## 附录 C 平面闸门门槽型式的选择

平面闸门在高速水流作用下，由于门槽段边界突变，将产生局部压力降，形成空化现象，导致空蚀破坏。国内外工程实践中，门槽发生空蚀，影响安全运行，甚至破坏失事的实例屡见不鲜。我国科技工作人员通过调查研究，综合分析了国内 85 个工程的 158 座闸门的水力设计与运行情况，初步总结了正反两方面的经验，研究了门槽空化的发生条件和影响因素，结合国内外门槽型式的水力学试验研究的主要成果，提出防止门槽空蚀的一些措施。通过门槽型式与空化特性的试验研究，优选了门槽各项体形变量，阐释了一些水力学机理，并与工程实例进行了对比与试设计，其结果与实际情况符合。详细说明可参阅原水利电力部规划设计院 1978 年第 6 期《技术参考资料》等文献。

## 附录 D 闸门荷载计算的主要公式

**D.0.2** 动水压力计算分两部分，一部分为垂直作用于面板，按静水压力计算，当符合本标准 4.0.5 条的规定时，用动力系数考虑。另一部分作用于闸门底缘上的力，又可分为上托力和下吸力。

上托力计算可用上托力系数表示，采用西北水利科学研究所试验资料。

下吸力根据国内原型试验资料，可按  $20\text{kN/m}^2$  考虑，当流态良好、通气充分符合本标准 6.1.2 条 4 款要求时，可适当减少。

**D.0.3** 波浪压力按《水工建筑物荷载设计规范》(DL 5077—1997) 所列公式计算，其中波浪要素和爬高计算已经给出莆田、鹤地、官厅水库公式分别适用于平原、丘陵和峡谷 3 种情况。

**D.0.4** 淤沙压力按《水工建筑物荷载设计规范》(DL 5077—1997) 所列公式计算，并对闸门挡水面倾斜的情况，提出计及竖向淤沙压力。

**D.0.5** 流冰对闸门的撞击力、风荷载均按《水工建筑物荷载设计规范》(DL 5077—1997) 所列公式确定。

**D.0.6** 本次修订规定，地震作用按现行《水工建筑物抗震设计规范》(SL 203) 确定。

水工钢闸门在地震作用下主要承受作用在其迎水面的地震动水压力和闸门的地震惯性力，其中闸门的地震动水压力的影响更大一些。计算作用在闸门上的地震动水压力，不可避免地要用到关于大坝抗震计算方面的一些方法，比如动力法或者拟静力法等。

采用动力法时，一般先计算出地震动水压力，然后将其折算为单位地震加速度相应的坝面附加质量，并将其加入到坝体之后

按结构动力学的方法进行动力分析。目前许多国家的抗震规范中，采用动力法计算地震动水压力时仍采用 Westergaard 公式或者它的修改型。其中包括，我国《水工建筑物抗震设计规范》(SL 203) 和日本《水门铁管技术基准》(2000 年版) 等。

采用动力法计算地震动水压力，最初由美国 H. M. Westergaard 在 1933 年的胡佛大坝设计中，推导出作用于垂直的刚性坝面上无限长水库的动水压力按式 (22) 计算：

$$P_h = \frac{7}{8} a_g \rho_w \sqrt{Hh} \quad (22)$$

式中  $P_h$ ——水深  $h$  处的地震动水压力， $\text{kN}/\text{m}^2$ ；

$a_g$ ——地震加速度， $\text{m}/\text{s}^2$ ；

$\rho_w$ ——水的密度， $\text{t}/\text{m}^3$ ；

$H$ ——水面至库底深度， $\text{m}$ ；

$h$ ——计算水深， $\text{m}$ 。

显然公式 (22) 与《水工建筑物抗震设计规范》(SL 203) 中的公式是完全相同的。

Westergaard 公式用于上游面垂直时效果比较好，当迎水面有折坡时，若水面以下直立部分的高度大于或等于水深的一半时，可近似取作直立面。

对于倾斜的迎水面，其动水压力要比直立的要小。根据 C. N. Zanger 的实验以及分析计算结果表明，考虑迎水面倾斜度的折减系数可取为  $k = \theta/90$ ， $\theta$  为迎水面与水平面的夹角。而日本《水门铁管技术基准》(2000 年版) 则对倾斜的迎水面，采用 Zanger 的实验公式结合实验曲线进行计算。由于误差不大，对于迎水面倾斜的情况，我们仍可采取折减系数  $k$  的方法。

采用拟静力法时，将大坝沿坝高划分成若干个质点，并且计算出每个质点的动态分布系数  $\alpha_i$ ，进而计算出各质点  $i$  的地震作用效应。动态分布系数  $\alpha_i$  是在对地震区在建或已建的各类水工建筑物，略去水体的可压缩性及空满库振型差别，计入坝体振动的弹性变形，进行大量动力分析的基础上，按不同结构类型、高

度归纳出大体上能反映出结构动态特性的地震作用效应沿高度分布规律的参数，相当于地震加速度沿高度分布系数。

关于地震作用组合问题，说明如下：

《水利水电钢闸门设计规范》(SL 74—95)颁布实施时采用的是《水工建筑物抗震设计规范(试行)》(SDJ 10—78)，其中只给出用拟静力法计算地震动水压力的公式。由于该公式中要考虑地震作用的效应折减系数  $\xi=0.25$ ，其计算结果要偏小。根据该规范条文说明中给出的下游无水的浅孔式闸门，设计烈度 9 度时地震动水压力占静水压力的比值只有 13%，对深孔闸门该比值还应该更小一些。因此，即使地震动水压力与校核水头下的水压力组合其增幅也不会很大。

拟静力法中地震作用的效应折减系数  $\xi=0.25$  的引入，是为了弥合按设计地震加速度进行动力分析的结果与宏观震害现象的差异，适用于一般水工建筑物。但是，拟静力法带有经验性的静态计算模式和参数取值不可能正确反映水工建筑物设计安全裕度和结构的动态地震效应及其地震破坏机理。由于研究的局限性，系数  $\xi$  的取值是否对金属结构和机电设备同样适用，目前尚不清楚，尚待深入研究。

1997 年颁布实施的《水工建筑物抗震设计规范》(SL 203—97)，增加了动力法计算地震动水压力的 Westergaard 公式，此时闸门地震动水压力计算值要增加较多。根据对设计烈度超过 8 度的两个工程实例，对地震影响相对偏小一些的深孔闸门的计算表明，地震动水压力占静水压力的比值已经达到 21.2%~24.4%，而且其设计地震烈度还没有达到 9 度。

目前美国、日本等国的水工建筑物抗震设计中，仍采用 Westergaard 公式或者它的修改型和 Zanger 电模拟试验成果，分别计算直立和倾斜迎水面上的地震动水压力。国内也开始更多地采用 Westergaard 公式计算闸门地震动水压力。

地震作用和校核洪水时的静水压力均属偶然作用，正常情况下不应考虑二者组合。原规范考虑校核水头下的地震动水压力，

主要是因为采用拟静力法计算地震动水压力时，其结果往往偏小。为了不降低标准，本标准允许地震荷载和校核洪水位时的静水压力组合作为校核条件、地震荷载和正常蓄水位时的静水压力组合作为设计条件，以适应采用拟静力法计算地震动水压力的情况。当采用 Westergaard 公式计算地震动水压力时，上述情况不存在，只需考虑地震作用和正常蓄水位的组合。

需要注意的是，相对于数值设计，抗震概念设计注重结构的总体地震反应，按照结构的破坏机制和破坏过程，运用抗震设计基本要求，合理解决结构设计中的基本问题（如结构总体布置、结构体系、刚度分布、关键部位的细节、结构的延性等），尽量消除结构中的薄弱环节，保证结构的抗震性能。根据抗震概念设计原则，可以不通过计算确定结构和非结构构件的细部构造要求，也就是抗震构造措施，它是抗震措施中的重要内容。闸门抗震设计中，可以充分运用抗震概念设计，合理确定闸门的抗震构造措施。

## 附录 E 闸门橡胶水封定型尺寸及性能

闸门橡胶水封物理力学性能参考了《水闸橡胶密封件》(HG/T 3096)中的有关规定。

“多节型”由于氟塑料贴面端部对接困难，留下薄弱环节，高水头下水密性差。“无节型”橡塑复合止水止水性能好，可在闸门止水橡皮安装合格后，就地喷涂聚四氟乙烯层，工艺简便。

## 附录 F 几种支承材料性能表

给出了目前国内应用较多的几种支承材料的性能，主要根据《滑动轴承 铜合金镶嵌固体润滑轴承》(GB/T 23894)等相关标准和工厂提供的最新资料整理而成。

## 附录 G 受弯构件的局部稳定计算

本附录为新增附录。新增本附录主要考虑了两方面的因素。一是过去一直沿用的《钢结构设计规范》(TJ 17—74)落后于现代钢结构设计理论和实践的发展,落后于现代炼钢技术和材料标准的发展,有些内容已经不再适用。二是从《钢结构设计规范》(GBJ 17—88)开始采用以概率理论为基础的极限状态设计方法,需要注意公式的正确引用,有些条文和规定不一定适用于水工钢结构,如利用腹板的屈曲后强度等。

现行的《钢结构设计规范》(GB 50017)在处理梁腹板局部稳定时采用了弹塑性修正的算法,计算过程比较繁琐。为此,结合水工钢闸门的工作特点给出了无限弹性假定下的简化算法,方法与《钢结构设计规范》(TJ 17—74)基本相同。

梁的局部稳定验算,考虑到梁腹板只承受截面弯矩的一小部分,只有边缘部分应力可能超过比例极限,从而忽略非弹性屈曲的过渡区时对计算的影响。因此,只要腹板临界应力不小于钢材的比例极限,则强度条件就能保证局部稳定。

梁腹板通常受有两种甚至三种应力(弯曲应力 $\sigma$ 、剪应力 $\tau$ 、局部压应力 $\sigma_c$ )的共同作用。一般的水工钢闸门不承受移动集中荷载,而固定集中荷载一般由支撑加劲肋承担,因此 $\sigma_c=0$ 。当梁受均布荷载时,由于均匀荷载对腹板上边缘产生的局部压应力较小,通常可不考虑,仍假设 $\sigma_c=0$ 。从而可以采用直接求出控制腹板局部稳定的加劲肋间距的实用简化方法。

弯曲应力单独作用时,弯曲临界应力 $\sigma_{cr}$ 按式(23)计算:

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} k \chi \left( \frac{t_w}{h_0} \right)^2 \quad (23)$$

纯弯曲时屈曲系数 $k=23.88$ ,取翼缘对腹板的嵌固系数 $\chi=1.39$ 后得 $\sigma_{cr}=618(100t_w/h_0)^2$ 。

腹板临界应力不小于钢材的屈服强度，则强度条件能保证局部稳定。因此要求  $618 (100t_w/h_0)^2 \geq \sigma_s$ ，由此得到  $h_0/t_w \leq 100 \sqrt{618/235} \sqrt{235/\sigma_s} = 162 \sqrt{235/\sigma_s}$ ，化整以后取  $h_0/t_w \leq 160 \sqrt{235/\sigma_s}$ 。

这就是原《钢结构设计规范》(TJ 17—74) 所采用的上限值 160。后来的《钢结构设计规范》(GBJ 17—88) 参考了国内外资料，认为：翼缘对腹板的嵌固系数  $\chi$  值可以提高 15% 取  $\chi = 1.61$ ，从而得出上限值 170。《钢结构设计规范》(GB 50017—2003) 认为： $\chi = 1.61$  对受压翼缘扭转受到约束的梁（如上面有刚性铺板的梁）是合适的，但对受压翼缘扭转没有受到约束的梁显得过高。因此根据受压翼缘扭转受到约束和未受到约束两种情况，分别取  $\chi = 1.66$  和  $\chi = 1.23$ ，相应的上限值分别为 170 和 150。

考虑到在实际应用中，还会出现梁受压翼缘扭转部分受到约束的情况，梁受压翼缘扭转是否受到约束的判据还有待于完善和改进。经过比较后，决定仍采用折衷的上限值 160。公式 (G.0.2-1) 推导如下。

当  $\sigma$  和  $\tau$  联合作用时，考虑安全系数  $K$  以后腹板的稳定条件见式 (24)：

$$\sqrt{(\sigma/\sigma_{cr})^2 + (\tau/\tau_{cr})^2} \leq 1/K \quad (24)$$

整理后可以写成式 (25)：

$$\eta \tau \leq \tau_{cr}/K \quad (25)$$

其中  $\eta = 1/\sqrt{1 - (\sigma K/\sigma_{cr})^2}$  是考虑  $\sigma$  影响的增大系数。

《钢结构设计规范》(TJ 17—74) 中，一般安全系数为 1.41，而腹板稳定的安全系数为 1.25，本标准中，一般安全系数为 1.47，取安全系数  $K = 1.47 \times 1.25 / 1.41 = 1.30$ 。

将  $\sigma_{cr} = 618 (100t_w/h_0)^2$  和  $K = 1.30$  代入  $\eta$  以后得到式 (26)：

$$\eta = \frac{1}{\sqrt{1 - \left[ \frac{\sigma}{475} \left( \frac{h_0}{100t_w} \right)^2 \right]^2}} \quad (26)$$

因此只要  $\tau$  乘以  $\eta$  即为考虑  $\sigma$  和  $\tau$  联合作用的情况。 $\eta$  值根据  $\sigma [h_0 / (100t_w)]^2$  制表，当  $\sigma [h_0 / (100t_w)]^2 < 100$  时，可不考虑  $\sigma$  的作用。 $\eta$  值见本标准表 G. 0. 2。

剪应力作用下，梁腹板的临界应力：

当  $a/h_0 \leq 1$  时，

$$\tau_{cr} = [123 + 93(a/h_0)^2](100t_w/a)^2 \quad (27)$$

当  $a/h_0 > 1$  时，

$$\tau_{cr} = [123(a/h_0)^2 + 93](100t_w/a)^2 \quad (28)$$

因此，式 (25) 可以写成式 (29)：

$$a \leq Ct_w / \sqrt{\eta\tau} \quad (29)$$

显然曲线  $C$  由两条变量为  $a/h_0$  的抛物线组成，分界点为  $a/h_0 = 1$ 。

从图 4 可以看出， $C$  曲线（曲线 1， $K=1.30$ ）可以近似地取为直线  $C = \beta_1 + \beta_2 a/h_0$ ，如图 4 中曲线 2 所示。将直线  $C$  的表达式代入 (29)，整理后得式 (30)：

$$a \leq \frac{\beta_1 h_0}{\frac{h_0}{t_w} \sqrt{\eta\tau} - \beta_2} \quad (30)$$

式中  $\beta_1$ ——直线 2 在  $C$  轴上的截距，取  $\beta_1 = 615$ ；

$\beta_2$ ——直线 2 的斜率，取  $\beta_2 = 765$ 。

将  $\beta_1$ 、 $\beta_2$  值代入式 (30) 即得式 (31)：

$$a \leq \frac{615h_0}{\frac{h_0}{t_w} \sqrt{\eta\tau} - 765} \quad (31)$$

$\beta_1$ 、 $\beta_2$  的取值适当考虑了腹板屈曲后强度，因此该直线比原曲线偏高。

对于经调整取直线后的情况，在  $a/h_0 = 0.5 \sim 2.0$  之间，取步长 0.1 共计算出 16 个点的安全系数，其平均值为 1.23 略高于

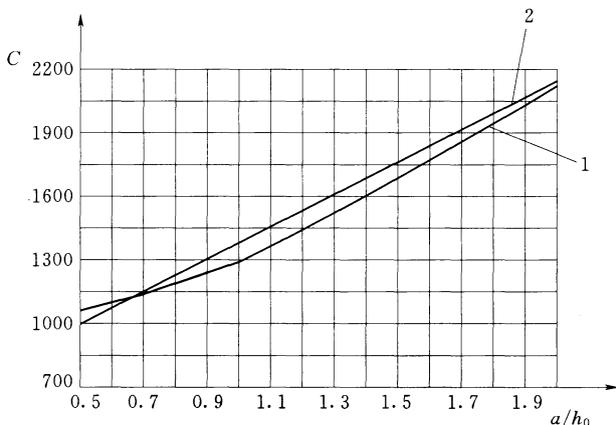


图 4 C 曲线

《钢结构设计规范》(TJ 17—74) 中相应的平均值 1.19。

当  $h_0/t_w > 160$  时，需要设纵向加劲肋。经分析纵向加劲肋至腹板计算高度受压边缘的距离应在  $h_0/5 \sim h_0/4$  范围内，此时上区格不必验算其局部稳定性，下区格仍可应用公式 (G. 0.2-1) 求横向加劲肋距离。推导如下：

不失一般性，设  $h_1 = h_0/4$ ，分别考虑上下区格腹板的稳定条件。

上区格属于狭长的窄条，按同时承受剪应力和单向均匀压力的板，考虑安全系数  $K$  以后上区格腹板的稳定条件见式 (32)：

$$\sigma/\sigma_{cr1} + K(\tau/\tau_{cr1})^2 \leq 1/K \quad (32)$$

上区格腹板在剪应力、弯曲应力作用下的临界应力分别为：

$$\begin{aligned} \tau_{cr} &= [123(a/h_1)^2 + 93](100t_w/a)^2 \\ &= [123 + 93/(a/h_1)^2](100t_w/h_1)^2 \end{aligned} \quad (33)$$

$$\sigma_{cr1} = 100(100t_w/h_1)^2 / (1 - h_1/h_0) \quad (34)$$

其中式 (34) 为均匀受压板，屈曲系数  $k=4$ ，嵌固系数  $\eta=1.39$  时的解。 $1-h_1/h_0$  为上区格平均弯应力的比例因子。当  $a/h_1 \rightarrow \infty$ ,  $h_1=h_0/4$  时：

$$\tau_{cr1} = 123[100t_w/(h_0/4)]^2 = 1968(100t_w/h_0)^2 \quad (35)$$

$$\sigma_{cr1} = 100(100t_w/h_0)^2/(1-h_1/h_0) = 2133(100t_w/h_0)^2 \quad (36)$$

将式(35)、式(36)代入式(32)中，按最不利情况取  $h_0/t_w=250$ 、 $\sigma=160\text{N/mm}^2$  及  $\tau=95\text{N/mm}^2$ ，得到：

$$\begin{aligned} \sigma/\sigma_{cr1} + K(\tau/\tau_{cr1})^2 &\leq 1/K \Rightarrow \frac{160}{2133(100/250)^2} \\ + 1.3 \left[ \frac{95}{1968(100/250)^2} \right]^2 &\leq \frac{1}{K} \Rightarrow 0.59 < \frac{1}{K} = 0.77 \end{aligned}$$

由于  $h_0/t_w$  很少超过 250，所以将纵向加劲肋布置在  $h_0/5 \sim h_0/4$  附近时，上区段可不进行稳定的验算。

纵向加劲肋下边的区格不属于窄条，相关公式与式(24)相同。下区段腹板的稳定条件按式(37)计算：

$$\sqrt{(\sigma_2/\sigma_{cr2})^2 + (\tau/\tau_{cr2})^2} \leq 1/K \quad (37)$$

其中，下区格上边缘处的弯曲应力  $\sigma_2 = (1-2h_1/h_0)\sigma = 0.5\sigma$ 。

下区格按单轴对称梁，腹板的计算高度  $h_0$  取腹板受压区高度  $(h_0/2-h_1)$  的 2 倍，翼缘对腹板的嵌固系数  $\chi=1.0$ ，纯弯曲时屈曲系数  $k=23.88$  代入式(23)中得：

$$\sigma_{cr2} = 445(100t_w/h_0)^2/(1-2h_1/h_0)^2 = 1780(100t_w/h_0)^2 \quad (38)$$

将式(38)代入式(37)中，仍取  $h_0/t_w=250$ 、 $\sigma=160\text{N/mm}^2$ ，得到：

$$\begin{aligned} \sqrt{(\sigma_2/\sigma_{cr2})^2 + (\tau/\tau_{cr2})^2} &\leq 1/K \Rightarrow \left[ \frac{0.5 \times 160}{1780(100/250)^2} \right]^2 \\ + \left( \frac{\tau}{\tau_{cr2}} \right)^2 &\leq \frac{1}{1.3^2} \Rightarrow \frac{\tau}{\tau_{cr2}} \leq 0.72 \end{aligned}$$

由此得到的  $\tau/\tau_{cr2}=0.72=1/1.39$  与  $1/K=1/1.3$  比较接近，所需要的安全系数 1.39 略大于  $K=1.3$ 。实际上在剪力最大处， $\sigma$  一般达不到  $160\text{N/mm}^2$ ，有时甚至小很多，故可不必考虑  $\sigma$  与  $\tau$  的联合作用，可直接利用公式 (G.0.2-1)，并设  $\eta=1$  求横向加劲肋的间距。

G.0.4~G.0.6条的内容引用了《钢结构设计规范》（GB 50017）中的相关内容，详见相应的条文说明。

本附录只列了受弯构件的局部稳定计算。其他如：受弯构件的整体稳定计算、压弯构件的稳定计算等可以参考现行《钢结构设计规范》（GB 50017）中所列的公式进行计算。需要强调的是，公式中出现的弯矩、轴心力、剪力、强度设计值等符号要与容许应力法中的相应符号建立对应关系。比如，钢材的抗拉、抗压和抗弯设计值  $f$  对应容许应力法中钢材的抗拉、抗弯、抗压容许应力  $[\sigma]$  等。有时难以建立简单对应关系，则需要一定的推导过程，使用时应注意。

## 附录 H 面板验算公式及图表

在钢闸门面板应力试验成果的整理分析过程中，根据试验成果对面板兼作主（次）梁翼缘的有效宽度问题，做了一些初步的理论分析，其结果同面板试验成果分析的结论是一致的。而且同计算机的计算值以及国外有关文献的数据也颇为接近，在此基础上，可用式（39）来计算面板的有效宽度：

$$B = \xi_1 b \quad (39)$$

$$\text{其中} \quad \xi = \frac{2}{3} \frac{(\sigma_x)_{\min}}{(\sigma_x)_{\max}} + \frac{1}{3} \quad (40)$$

式中  $b$ ——梁的间距；

$\xi$ ——有效宽度系数。

上列公式的推导前提为：①以简支的对称的肋形结构（梁肋不另设上翼缘）承受对称荷载作为分析对象，这与深孔多主梁平面闸门比较接近；②面板的局部弯应力，为了简化计算，不考虑横隔板的影响；③板厚比梁高小得多，因而在分析整体弯应力时，可忽视面板的弯曲变形，取面板中面的膜应力作为面板兼作梁翼的计算简图。

计算结果表明： $\sigma_x$  沿翼板宽度的分布符合二次抛物线规律。

在钢闸门按平面体系计算中，可假设面板在有效宽度  $B$  范围内的应力  $\sigma_x$  都等于面板  $(\sigma_x)_{\max}$ ，并令  $\sigma_x$  之和等于面板全部宽度  $b$  内的  $\sigma_x$  之和，这样就能用一般材料力学方法计算梁的弯应力。据此，同有效宽度上的矩形面积等于全部宽度上的抛物线面积，即得上述有效宽度系数  $\xi$  的计算公式，主梁翼缘应力分布见图 5 所示。

计算分析表明，有效宽度系数  $\xi$  的大小，决定于面板整体弯应力的最大值  $(\sigma_x)_{\max}$  和最小值  $(\sigma_x)_{\min}$  之差，而此差值主要决定于参数  $\theta(n, b/2)$  与  $\theta(n, 0)$  之差（见华东水利学院试验报告

附录)。

现将面板整体应力(膜应力)计算值、实测值及电算值如图6所示。从图中可见,  $\sigma_x$  的理论计算值同电算值颇为接近, 相差只有5%~15%, 而且同实测值的曲线一般都比较相似, 两者之差别主要是由于主梁弯矩实测值小于理论值之故。

将理论计算值同国外文献转载的关于有效宽度系数  $\xi$  的数据, 综合绘制成  $\xi$  与  $l_0/b$  关系曲线见图7所示。

从图7可见, 当梁的正弯矩图为抛物线时, 这几种数据都是很接近的。在此基础上, 建议面板的有效宽度系数  $\xi_1$ 、 $\xi_2$  可由表7查得。

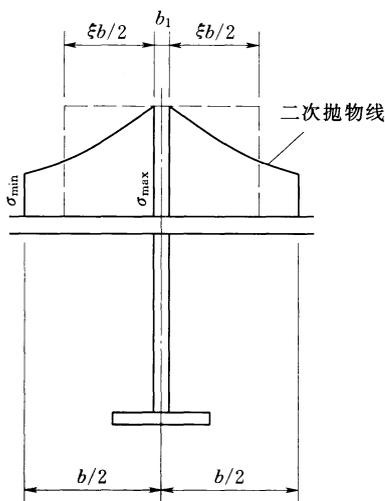
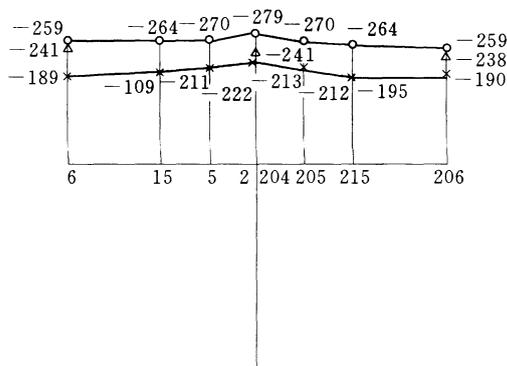


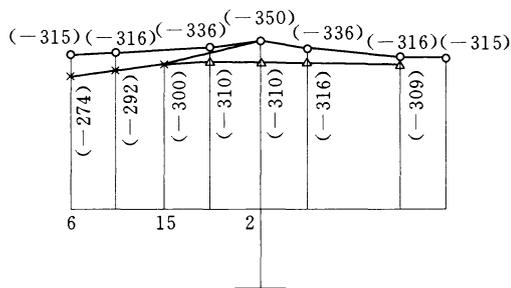
图5 主梁翼缘应力分布图



a) 原型实测闸门面板膜应力分布图

x——实测值; o——理论计算值; Δ——电算值

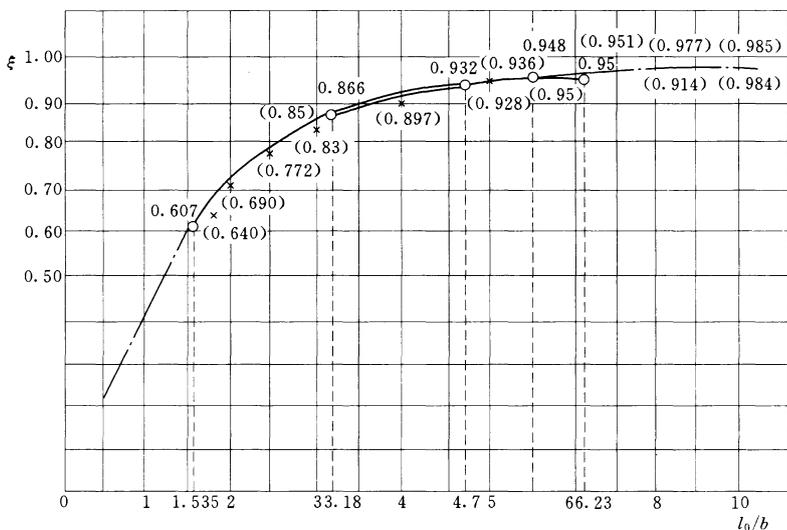
图6(一) 面板整体弯应力计算值, 实测值及电算值示意图



b) 1:1.5 九区格闸门模型面板膜应力分布图 (用括号表示)

×——实测值；○——理论计算值；△——电算值

图 6 (二) 面板整体弯应力计算值，实测值及电算值示意图



○——理论计算值；-----联邦德国《水工钢结构》(用括号表示)；

×——美国《应力应变公式》(用括号表示)

图 7  $\xi$  与  $l_0/b$  关系曲线图

表 7 面板的有效宽度系数  $\xi_1$ 、 $\xi_2$

$l_0/b$	0.5	1	1.5	2	2.5	3	4	5	6	8	10	20
$\xi_1$	0.2	0.4	0.58	0.70	0.78	0.84	0.90	0.94	0.95	0.97	0.98	1.0
$\xi_2$	0.16	0.3	0.42	0.51	0.58	0.64	0.71	0.77	0.79	0.83	0.86	0.92

注 1:  $l_0$  为主 (次) 梁弯矩零点之间的距离; 对于简支梁  $l_0=l$ , 对于连续梁的正弯矩段可以近似地取  $l_0=0.6l$ 。  
 注 2:  $\xi_1$  适用于梁的正弯矩图为抛物线形,  $\xi_2$  适用于梁的负弯矩图近似地取为三角形。

如图 8 所示, 面板的有效宽度  $B$  是沿着梁跨改变的。对于简支梁和在连续梁的正弯矩段, 有效宽度  $B$  自弯矩零点逐渐向跨中增大, 其最大值为  $B=\xi_1 b$ , 在连续梁的负弯矩段, 有效宽度  $B$  向支座逐渐减少, 其最小值  $B=\xi_2 b$  (由于将负弯矩图近似地简化成三角形, 虽然在弯矩零点的  $B$  值出现了不连续的情况, 但对支座处的最小值  $B$  仍有足够的精确度)。

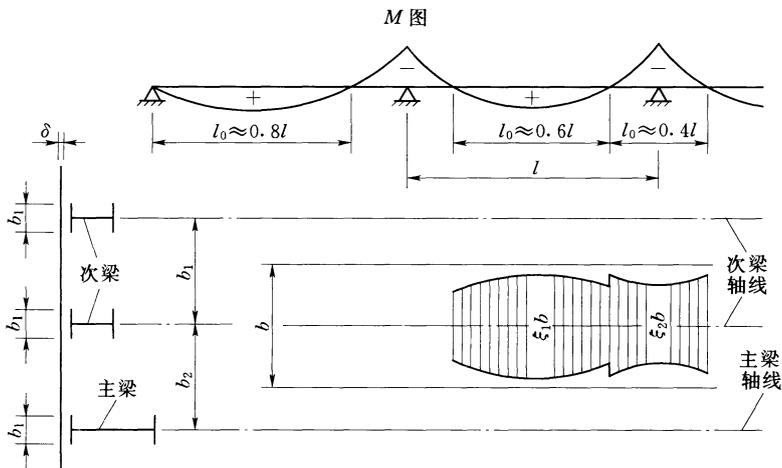


图 8 面板有效宽度系数示意图

当选择简支梁的截面和验算面板的强度, 需要计算梁在靠近跨中截面的最大弯应力时, 面板的有效宽度应采用  $B=\xi_1 b$ 。当

按支座负弯矩值来选择或具有悬臂段的梁（例如斜支臂弧形闸门的主梁）的截面时，应采用  $B = \xi_2 b$ 。

在理论推导过程中，面板的全部宽度  $b$  是指两梁肋之间的净宽，则面板的有效宽度  $B = \xi b + b_1$ ，（其中  $b_1$  为梁肋的上翼缘宽度）。在条文中，为了简化计算，采取有效宽度  $B = \xi b$ ，则其中的  $b$  应为两梁肋轴线的间距。

当主梁之间有水平次梁时，则在计算面板兼作主梁翼缘的有效宽度  $B = \xi_1 b$  时，在理论上， $b$  应为二主梁的间距。这样，主梁和次梁将重复利用面板，在验算面板和次梁强度时，就必须考虑三者的应力叠加，计算相当烦琐，在条文中，对于按平面体系计算，可以简化计算，令主、次梁不重复利用面板，则计算主梁时所采用的  $b$  应为主梁和相邻次梁之间距，当上下间距不相等时，采用其平均值，即： $b = (b_1 + b_2) / 2$ 。

## 附录 J 栅条振动计算

本附录直接引用了日本《水门铁管技术基准》（2000年版）中列出的拦污栅栅条振动计算公式，并参考《抽水蓄能电站设计导则》（DL/T 5208—2005）中所给建议参数作了调整。

国内外文献资料所介绍的拦污栅栅条振动计算公式基本相同，只是一些参数的取法有所区别。

关于过栅流速  $v$ ，采用了《抽水蓄能电站设计导则》（DL/T 5208—2005）中的建议值。

关于斯特劳哈尔数  $S_r$ ，日本《水门铁管技术基准》（2000年版）列了6种截面的斯特罗哈数，比较常用的矩形截面，只有当  $h/\delta=2.83$  时  $S_r=0.155$  的情况，不大适合国内情况。因此在这里也采用了《抽水蓄能电站设计导则》（DL/T 5208—2005）中所给建议参数  $S_r=0.19\sim 0.23$ 。

皮仙槎、丁力《抽水蓄能电站拦污栅设计的探讨》一文（《金属结构》1987年第2期）中取  $S_r=0.2$ ，并有详细算例。谢省宗、李世琴、林琴华《泄水建筑物振动破坏及其防治》（《泄水工程与高速水流》1995年第2期）一文中，当高厚比  $h/\delta=10$  时  $S_r=0.24$ 。

关于固端系数  $\alpha$ ，日本《水门铁管技术基准》2000年版中给出了两端简支和两端固定两种情况下的理论值。实际应用中，栅条两端焊接在支撑梁上，采用了《抽水蓄能电站设计导则》（DL/T 5208—2005）中建议参数  $\alpha=17\sim 18$ 。

## 附录 K 滚轮接触应力计算

从 20 世纪 70 年代以来，长江委受水电部、水电总局委托进行大规模系列轮压试验的前期准备工作，1983 年正式开始水工闸门滚轮承载能力试验工作。通过对  $\phi 400\text{mm}$ 、 $\phi 1000\text{mm}$  两种原型滚轮的静态、动态试验，有限元计算分析，三维光弹模型试验，确定了本附录采用的赫兹应力公式。

$\phi 400\text{mm}$  滚轮，材质为 45 号铸钢，按不同热处理工况分 3 组：自然状态、表面淬火深 3mm、调质处理。每对中有一种线接触、一种点接触。按原规范核算，其承载能力为 250~300kN，试验压力分 3 挡即 300kN、500kN、1000kN。同时进行 3000kN 的极限承载能力试验。通过静态压力试验，承载能力是高的，储备亦充分，即使到达 1500kN 也没有出现压裂、压坏和大的塑性变形。

对于动态试验，压力 1000kN，稳压 12h，整圆连续滚动 30~50 圈，均未产生裂纹、变异。

通过静、动态试验， $\phi 400\text{mm}$  滚轮承载能力达到 500kN 是安全可行的。

$\phi 1000\text{mm}$  滚轮，采用 35CrMo 和 40Cr 合金铸钢，点接触，用调质热处理。

按当时 SDJ 13—78 规范核算，其承载能力为 1500kN，试验压力分 3 挡即 1500kN、3500kN、7000kN 通过静态试验都安全正常。

动态试验压力为 4000kN，稳压 10~15h，转动 30~50 圈，滚轮亦属正常。

通过  $\phi 1000\text{mm}$  滚轮试验，承载能力达到 3000~3500kN 也是安全可行的（见长江水利委员会《水工平面闸门支承滚轮承载试验系列分析报告》1988 年 12 月）。

目前小浪底和三峡轮压分别达到 4130kN 和 4500kN，水布垭则达到了 5600kN。主轮轮压超过 3000kN 已经很普遍。

## 附录 M 轨道的计算

关于轨道计算方法，原规范除提供简支梁假定计算公式以外，允许将轨道作为弹性地基梁进行计算。日本、德国、美国等国的规范则采用或部分采用弹性地基梁的方法。日本《水门铁管技术基准》（2000年版），计算混凝土承压应力时按半无限体弹性地基梁计算并考虑了局部承压调整系数，计算轨道弯曲应力时采用调整后的混凝土反力分布按简支梁进行计算，方法类似于国内的公式。美国和德国则建议采用局部弹性地基梁（温克尔假设）公式进行计算。

半无限体弹性地基梁模型把地基看成一个均质、连续、弹性的半无限体（即它的表面是一个平面，并向四周和下方无限延伸的物体），克服了局部弹性地基梁模型（温克尔假设）没有反映地基连续性的缺点，比较适合闸门轨道计算。

为了进行对比，选择了《水电站机电设计手册 金属结构（一）》中表 10-2 中所列的 A 型至 D 型铸造轨道共 4 种、P24 至 QU120 标准钢轨共 8 种、组合截面轨道 2 种、工程实例 3 种，共选择 17 种断面，按平面应力状态下的半无限体弹性地基梁进行了验算。

在集中力作用下，长梁只在局部范围内引起较大的内力。影响范围的大小是以特征长度  $L$  为尺度来衡量的。平面应力问题中，特征长度

$$L = \sqrt[3]{2EI/(BE_0)}$$

式中  $I$ ——轨道截面惯性矩；

$B$ ——轨道底板宽度；

$E$ ——钢材的弹性模量；

$E_0$ ——混凝土的弹性模量。

对半无限体弹性地基梁，如果集中力与梁两端的距离都大于

2L 时，应按无限长梁计算，否则按半无限长梁计算。

一般情况下，当轮压增加时轨道的高度也要增加，从而特征长度  $L$  也增加。从 P24 轨道到轮压超过 3000kN 的重型轨道的计算结果表明，特征长度  $L$  多在 100~350mm 之间，当轨道长度等于 3~5m 时，荷载与梁两端的距离都大于  $2L$  条件比较容易满足。因此，绝大多数情况应按无限长梁计算。当轮压大于 3000kN 时， $L$  可能接近 350mm，此时闸门最底部的轮子中心线到底槛的距离可能小于  $2L=700\text{mm}$ ，需要按半无限长梁计算。研究表明，单个集中力作用下半无限长梁的最大弯矩要比无限长梁增加 2.6% 左右；当单个集中力作用点离开梁端部  $1.4L$  (140~490mm 之间) 时基础反力也比无限长梁增加 2.6% 左右，从构造要求与轮压与特征长度  $L$  之间的关系来看，这个条件很容易得到满足。因此，考虑 1.03 的应力调整系数后都可以按无限长梁来计算。

对于半无限体弹性地基梁， $x=1.4L$  处为弯矩零点，弯矩值开始改变符号。因此，当轮距大于  $1.4L$  时弯矩的叠加作用已经可以忽略不计。对于轮压大于 3000kN 的滚轮，特征长度  $L$  接近 350mm， $1.4L=1.4\times 350\text{mm}=490\text{mm}$ ，远小于滚轮直径。显然这一条件也很容易得到满足。因此，可以不考虑相邻滚轮的影响。

需要注意的是，对于半无限长梁的情况，由于集中力作用在梁端附近，基础反力在梁端取最大值并逐渐减小，其梁端基础反力要比无限长梁最大基础反力大很多（奇异点）。因此轨道接头具有较大的刚度对轮子经过轨道接头是有利的。

对半无限体弹性地基梁，按无限长梁承受单个集中力的情况，有以下轨道计算公式。

轨道截面弯曲应力按式 (41) 计算：

$$\sigma_1 = 0.38PL/W = 0.38P \sqrt[3]{2EI/(BE_0)}/W \quad (41)$$

式中  $\sigma_1$ ——轨道截面弯曲应力，N/mm<sup>2</sup>；

$P$ ——滚轮的荷载，N；

- $E$ ——钢材的弹性模量， $N/mm^2$ ；
- $E_0$ ——混凝土的弹性模量， $N/mm^2$ ；
- $I$ ——轨道截面惯性矩， $mm^4$ ；
- $B$ ——轨道底板宽度， $mm$ ；
- $W$ ——轨道截面抵抗矩， $mm^3$ 。

轨道底板混凝土承压应力按式 (42) 计算：

$$\sigma_{1h} = 0.38P/(LB) = 0.38P \sqrt[3]{E_0/(2EIB^2)} \quad (42)$$

式中  $\sigma_{1h}$ ——轨道底板混凝土承压应力， $N/mm^2$ ；

其余符号意义同前。

当滚轮中心线与轨道端部的距离小于  $2L$  时，上述  $\sigma_1$  和  $\sigma_{1h}$  应乘以 1.03 的调整系数。

表 8 和表 9 按半无限体弹性地基梁，取混凝土的弹性模量  $E_0 = 2.80 \times 10^4 N/mm^2$ （相当于强度等级为 C25 的混凝土），计算了 17 种轨道的混凝土底板承压应力  $\sigma_{1h}$  和轨道弯曲应力  $\sigma_1$  与按本标准公式计算的相应应力  $\sigma_h$  和  $\sigma$  之比  $k_1 = \sigma_{1h}/\sigma_h = 1.14h/L$  和  $k_2 = \sigma_1/\sigma = 1.01L/h$ 。

表 8 标准轨道计算实例

系数	轨道型号											
	P24	P38	P43	P50	QU70	QU80	QU100	QU120	A型	B型	C型	D型
$k_1$	1.33	1.31	1.28	1.31	1.24	1.23	1.22	1.19	1.30	1.28	1.27	1.27
$k_2$	0.87	0.88	0.90	0.88	0.93	0.94	0.95	0.97	0.89	0.90	0.91	0.91

表 9 组合截面轨道计算实例

工程实例	系数	
	$k_1$	$k_2$
某工程 $6m \times 8.2m - 68m$ 定轮门，轮压 $P = 3086kN$ $B = 400mm$ ， $h = 400mm$ ， $I = 9.4 \times 10^8 mm^4$	1.39	0.83
某工程 $4.5m \times 10.4m - 43m$ 定轮闸门，轮压 $P = 2618kN$ $B = 380mm$ ， $h = 320mm$ ， $I = 6.2 \times 10^8 mm^4$	1.27	0.91

表 9 (续)

工 程 实 例	系 数	
	$k_1$	$k_2$
某工程 8m×10m-29m 定轮闸门，轮压 $P=1850\text{kN}$ $B=300\text{mm}$ ， $h=300\text{mm}$ ， $I=3.37\times 10^8\text{mm}^4$	1.34	0.86
组合截面：对称工字型，上、下翼缘—10mm×150mm， 腹板—10mm×280mm	1.70	0.68
组合截面：T 型，上翼缘—10mm×150mm， 腹板—10mm×240mm	2.10	0.55

计算结果表明，按半无限体弹性地基梁计算的轨道弯曲应力要比本标准公式计算的结果略小一些，轨道底板混凝土承压应力则相反。

从  $k_1=1.14h/L$  和  $k_2=1.01L/h$  可以看出，比值  $k_1$  和  $k_2$  与轨道高度  $h$  和特征长度  $L$  有关系。因此，选择比较合适的轨道高度  $h$  和特征长度  $L$ ，可以有效地减小轨道弯曲应力，而此时轨道底板混凝土承压应力则提高很多。

关于混凝土承压应力问题，一方面，本标准公式经过多年使用还没有发现大的问题；另一方面，目前国内外多数规范对于局部承载力的计算，一般根据分析与试验结果，建立局部受压面积与计算受压面积之间对称的比例关系来实现的。比如《混凝土结构设计规范》(GB 50010) 中局部受压承载力计算和本标准中轨道底板混凝土承压应力计算公式等。因此，实际情况与计算还有一些不符，需要今后继续研究。

轨道实际上是嵌入混凝土内，在滚轮作用下，混凝土可承担一部分作用，因而不论轨道的弯曲应力还是轨道下混凝土承压应力均应有不同程度的降低。

考虑二期混凝土强度等级为 C25，混凝土的弹性模量  $E_0=2.80\times 10^4\text{N/mm}^2$ ，钢材的弹性模量  $E=2.06\times 10^5\text{N/mm}^2$ ，代入式 (41) 后即得式 (43)：

$$\sigma_1 = 0.93 \sqrt[3]{I/B/W} \quad (43)$$

此时，对于二期混凝土强度等级为 C20 和 C30 的情况，误差在 3% 以内。虽然两种计算方法都可以采用，但是本标准公式计算简单，可以优先采用。

## 附录 N 摩擦系数

增强聚四氟乙烯材料，其机理和钢基铜塑复合材料相同，但是，摩擦系数要比钢基铜塑复合材料要小。因此，为了留有余地，和钢基铜塑复合材料滑道取用了相同的摩擦系数。

经过 20 多年的工程运用经验，钢基铜塑复合材料滑道及增强聚四氟乙烯板滑道，压强从  $1.0\sim 2.5\text{kN/mm}$ ，最大摩擦系数取  $0.15\sim 0.09$  是合适的。同样，钢基铜塑复合材料轴承，最大摩擦系数取  $0.12\sim 0.14$  也是合适的。

橡胶水封和橡塑复合水封的摩擦系数，经过多年的工程运用，认为取值也是合适的。作为参考，日本《水门铁管技术基准》（2000 年版）规定：橡胶对不锈钢，湿摩擦时取  $0.5\sim 0.7$ ，干摩擦时取  $0.9\sim 1.2$ ，橡塑复合止水对不锈钢取  $0.1$ ，不考虑橡胶对钢的情况。摩擦系数的取值要比现行国内标准略大一些。