# 弧形钢闸门空间框架体系可靠度分析

王正中 李宗利 李亚林

(西北农业大学水利与建筑工程学院,陕西杨凌 712100)

摘 要 根据《水利水电工程钢闸门设计规范》结构可靠度理论及弧形钢闸门空间框架 的失效模式,提出其空间框架体系可靠度计算的串联模型及计算方法;在对钢闸门基本构件 可靠度研究的基础上,应用该串联模型及计算方法,分析了弧形钢闸门空间框架体系的可靠 度。结果表明:按现行规范设计的双支臂弧形钢闸门空间框架体系的可靠度指标最低为 3.4 (16M n 钢)或 3.2(3号钢),比基本构件的可靠度指标小 0.85,与建筑《设计标准》的可靠度指 标一致。

关键词 弧形钢闸门,空间框架,可靠度,串联体系

分类号 TV 663. 2, TV 663. 4

广泛应用于水利水电工程的水工钢闸门,其最新设计规范<sup>[1]</sup>的设计准则仍是许用应 力法,这种设计方法不能定量准确地评价结构的安全性,明显落后于采用概率法设计水工 建筑物的总体设计水平。随着《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》、《钢结构设计规 范》等的制订,水工钢闸门设计规范采用可靠度理论已成为可能 特别是周建方<sup>[2]</sup>对荷载 效应及《闸门规范》基本构件<sup>[1]</sup>可靠度的校核研究,范崇仁<sup>[3]</sup>及朱大林等<sup>[4]</sup>对平门可靠度 的研究,为《闸门规范》采用可靠度理论奠定了基础,也为闸门结构体系的可靠度分析创造 了条件。但这些研究仅限于对基本构件可靠度的计算,无法精确评价弧门空间结构体系的 可靠度。为此本文根据弧门的可能失效模式和现行规范,提出了弧门空间框架体系可靠度 计算的串联模型及计算方法,对弧门空间框架体系进行初步分析,以期精确评价弧门整体 结构的安全性。

1 空间框架体系可靠度分析模型

弧形钢闸门的主要承载体系就是其空间主 框架,以工程中最常用的双支臂式为例,它是由 2根纵梁、4根主横梁、4根支臂组成的空间框架 结构,如图 1所示。尽管它属于延性材料的高次 超静定结构,但是由于弧形钢闸门的主要承载 构件不允许产生塑性铰,允许变形很小,工作环 境恶劣,因此根据弧形钢闸门的这种工作状态、 传力过程及现行闸门规范,只要其空间框架结 构的每一组成构件达到极限状态时结构整体必



图 1 弧门空间框架简图 1,2.纵梁;3,4.主横梁:①②③④为支臂

收稿日期 1997-09-10

课题来源 陕西省自然科学基金,97C19;校青年专项基金资助项目

作者简介。王正中,男, 1963年生,教授 ?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://w 对于弧门空间框架的承载力极限状态,其纵梁及主横梁的失效模式有弯曲破坏和剪 切破坏两种;其支臂由于受轴压和弯曲组合作用,失效模式有平面内失稳和平面外失稳两 种;实际上4根支臂在抗力及荷载效应方面必然存在着变异性,但对同一闸门来说由于生 产及设计水平一致,其差异并不很大,可以予以忽略;同理,4根主梁的差异性可以忽略 因此,可以把弧形钢闸门空间框架体系的失效模式,简化为该空间框架每一个构件的各种 破坏方式所组成的串联体系模型,其可靠度计算框图如图2所示



图 2 弧形钢闸门空间框架体系失效的串联模型

### 2 空间框架体系可靠度计算

根据前面的分析及简化,已将弧门空间框架体系的可靠度计算模型简化为串联系统, 对于串联系统,其可靠度计算方法可根据结构可靠度理论<sup>[6]</sup>及南京水利科学研究院宣国 祥等<sup>[7]</sup>提出的计算公式进行计算,其公式为:

$$R_s = \prod_{i=1}^n R_i \tag{1}$$

其中, R. 为串联系统的可靠度; R. 为各个组成单元的可靠度; n 为组成单元的总数。

如前所述,为了精确评价现行规范设计的弧形钢闸门的安全性,在周建方<sup>12</sup>对闸门各 基本构件可靠度计算的基础上,进一步研究弧门空间框架体系的可靠度,其相应的极限状 态方程、荷载效应的统计值、抗力参数的统计值的选取与规范<sup>11</sup>相同。

2.1 极限状态方程

同样取两种荷载组合考虑:① 仅有水压力和自重,无启闭力作用;② 水压力加其他荷载 Q,则其相应的极限状态方程为:

$$Z = R - S_H = 0 \tag{2}$$

$$Z = R - S_H - S_Q = 0 \tag{3}$$

其中, $S_H$ 表示水压力引起的荷载效应; $S_Q$ 为 Q引起的荷载效应;抗力 R 取两种分布即正态和对数正态来考虑

2.2 荷载及抗力统计参数选取

文献 [2]研究表明:荷载与其效应的统计规律是一致的,而且它们之间存在线性关系。因而可以以荷载的统计特征表达效应的特性,故直接取基准期最大水头的均值与标准值之比 *K*<sub>HT</sub>= 0.8和 0.9两种情况,变异系数 *V*<sub>HT</sub>= 0.10,0.15,0.21三种情况,正态分布

2. 其他荷载的统计参数暂取 Kor= 0.6, 0.7, 0.8三种情况 变异系数 Vor= 0.29, 正态

36

分布。则根据可靠度理论得钢闸门各主要构件的抗力参数见表 1.

构件	破坏方式	材料	$K_R$	V <sub>R</sub>
	亚西内生钨	3号钢	1. 134	0. 123
伯広士辟	十面内大幅	16M n钢	1. 145	0.113
调压义月	亚西从生色	3号钢	1. 213	0.144
	千山外大梞	16M n钢	1. 213	0.147
	平本144	3号钢	1. 146	0.126
伯合沙	文弓吸环	16M n钢	1. 156	0.116
组口米	云前144	3号钢	1. 112	0.147
	文努吸坏	16M n钢	1. 123	0.139

表 1 构件不同破坏方式的抗力参数

#### 2.3 弧门空间框架体系可靠度计算

2.3.1 在水压力作用 此时对应于状态方程(2),为作比较对抗力 R 取正态分布和对数 正态分布两种情况,其可靠度指标见表 2和表 3.

物件		$K_{HT} = 0.8$				<b>₩</b>		
114) 1+	1版环力式	$V_{HT} = 0.10$	$V_{HT} = 0.15$	$V_{HT} = 0.21$	$V_{HT} = 0.10$	$V_{HT} = 0.15$	$V_{HT} = 0.21$	十均
	亚西由生钨	4. 02	3. 74	3. 36	3. 52	3. 22	2.84	3. 45
伯匡古壁	平面内天隐	4.37	4. 02	3. 57	3. 82	3.46	3. 02	3.71
调压又有	亚西从生钨	3. 65	3. 48	3. 23	3. 26	3. 07	2. 81	3. 25
	十面外大幅	3.72	3. 54	3. 28	3. 32	3. 12	2. 85	3. 31
	受弯破坏	3. 98	3. 71	3. 35	3. 49	3. 21	2. 85	3. 43
加合沙		4.31	3. 99	3. 56	3. 78	3. 44	3. 02	3. 68
组合采	受剪破坏	3. 37	3. 18	2. 92	2.94	2. 74	2. 48	2.94
		3. 57	3. 36	3. 07	3. 13	2.90	2. 61	3.11
1+ Z	中 판 변 파	2.84	2.60	2. 24	2. 31	2.03	1. 62	2.29
14 余	中联保型	3.05	2.80	2. 42	2. 52	2. 22	1. 80	2.49

表 2 R正态分布时的 U值

注:表中同一破坏方式的上行数据为 3号钢的 U值,下行数据为 16锰钢的 U值,下同。

表 3 R对数正态分布时的 U值

	ᡘ᠇ᡈ᠋ᡰᡘ᠋ᠵ᠆᠊ᢪ	K <sub>HT</sub> = 0.8				<b>亚</b>		
114) 1+	1版环方式	$V_{HT} = 0.10$	$V_{HT} = 0.15$	$V_{HT} = 0.21$	$V_{HT} = 0.10$	$V_{HT} = 0.15$	$V_{HT} = 0.21$	十均
	平面内失稳	4.91	4. 27	3. 63	4.14	3. 55	2. 99	3. 92
伯古正壁		5.32	4. 55	3. 83	4. 45	3. 79	3. 16	4.18
<b>俩又</b> 止肖	平面外失稳	4.73	4. 20	3. 65	4. 03	3. 55	3. 07	3.87
		4.80	4. 25	3. 68	4. 09	3. 59	3. 10	3. 92
	受弯破坏	4.90	4. 28	3. 64	4. 14	3. 56	3. 02	3. 92
加合沙		5.30	4. 54	3. 84	4. 44	3. 79	3. 18	4.18
组合采	空前70+7	4.21	3. 71	3. 22	3. 51	3. 09	2.65	3.40
	文努吸坏	4.46	3. 90	3. 37	3. 71	3. 25	2. 78	3. 58
1 <del>4</del> 2	ch IIY 1월 프네	3.85	3. 27	2.64	3. 05	2.50	1.87	2.89
14 余	中状候型	4.10	3. 47	2. 74	3. 27	2. 70	2.05	3.10

从表 2 表 3可以看出:①无论对各个构件还是弧门空间体系,16 M n钢的 U值大于 3 号钢;②无论对各个构件还是弧门空间体系,抗力为正态分布时的 U值总比对数正态分 布时小 0.5~40.6③无论抗力是正态分布还是对数正态分布,无论是 3号钢还是 16 M n 钢,构件的可靠度指标 U总大于结构体系的可靠度指标。当 *R* 正态分布时,构件的可靠度 指标 U平均值 3号钢为 3.27,16 M<sub>n</sub>钢为 3.45;弧门空间体系的可靠度指标 U值 3号钢 为 2.29,16 M<sub>n</sub>钢为 2.49;即抗力正态分布时,体系可靠度指标 U要比构件可靠度指标平 均值约小 0.97.当 *R* 对数正态分布时,构件的可靠度指标 U平均值 3号钢为 3.76,16 M<sub>n</sub> 钢为 3.97;弧门空间体系的可靠指标 U值 3号钢 2.89,16 M<sub>n</sub>钢 3.10;即当抗力对数正 态分布时,体系可靠度指标 U要比构件可靠度指标平均值约小 0.88.

2.3.2 不同 d(水压力与 Q的比例)下的 U值 结构在几种荷载作用下,对应状态方程 (3),结构构件的可靠度指标必然随各种荷载的比值不同而变化,根据文献 [2]取其他荷载 Q与水压力的比例 d为 0.05~0.50,抗力按对数正态分布,计算出了构件及体系的 U随 d 的变化规律,如表 4列出了 *K*<sub>HT</sub>= 0.8时各 d值下的 U值

构	件	破坏方式	0. 05	0.10	0.15	0.20	0. 25	0. 30	0.35	0.40	0.45	0.50
	亚五古生物	4.38	4.47	4.55	4.60	4.64	4.68	4.70	4.71	4.71	4.71	
伯正	士辟	十面内大幅	4.67	4.77	4.85	4.91	4.96	4.99	5. 02	5.03	5.03	5.03
调压又育	亚茜从生钨	4. 28	4.36	4.41	4.46	4.49	4.52	4.54	4.55	4.55	4.56	
		平山外天梞	4.34	4.42	4.48	4.53	4.56	4. 59	4. 60	4.62	4.62	4.62
		受弯破坏	4.39	4.47	4.54	4.60	4.64	4.67	4. 69	4.70	4.71	4.71
<i>ис</i>	<b>&gt;</b> 辺		4.67	4.76	4.84	4.90	4.95	4.98	5.00	5.01	5.02	5.02
组合采	采	受剪破坏	3. 81	3.88	3.94	4.98	4.01	4.04	4.06	4.07	4.08	4.08
			4.00	4.08	4.14	4.19	4. 23	4.26	4. 27	4.29	4.29	4.30
体	¥.	다 파 + + 파 파 비	3. 38	3.46	3.53	3.58	3. 62	3. 65	3. 66	3.66	3.67	3.67
	糸	、 糸	中软候型	3. 59	3.68	3.75	3.80	3. 85	3. 88	3. 89	3.90	3.90

表 4 水压力和荷载 Q作用时各种 d值下的 U值

从表 4可以看出:①不论对什么材料,随着其他荷载与水压力比值 d的增大,构件及 体系的 U也增大,但增加的速度越来越小;② 各构件可靠度指标 U平均值比体系可靠度 指标 U值约大 0.83;③ 在水压力及 *Q*共同作用下的体系可靠度指标 U的均值,对 3号钢 为 3.59,对 16 M n钢为 3.84.

2.3.3 在水压力及荷载 Q作用下构件及结构体系的综合平均可靠度指标 根据文献 [2],取 de 0.05~0.5, *K*<sub>HT</sub>= 0.8和 0.9,应用以上方法计算出各种情况下构件及体系的 可靠度指标 (表 5) 从表 5可以看出,各构件的可靠度指标的平均值,对 3号钢为 4.12,16 Mn钢为 4.33;但弧门结构体系的可靠度指标 U平均值,对 3号钢为 3.27,16 Mn钢为 3.48,均比相应的构件的 U值减少 0.85.

若综合比较表 3 表 4和表 5可以看出:① 对 3号钢和 16 Mn钢,弧门空间框架体系 的可靠度指标在水压力及其他荷载作用下的 U值,大于仅有水压力作用时的 U值;抗力 按对数正态分布时 U值大于抗力按正态分布时 U值 ② 对 3号钢和 16 Mn钢,无论抗力 正态分布还是对数正态分布,无论有无其他荷载作用,弧门空间框架体系的可靠度指标 U 值总比构件的可靠度指标 U平均值约小 0.85.同理不论在那种情况下,弧门结构体系的 可靠度指标 U,16 Mn钢的总比 3号钢的大 0.2左右。③ 基于以上分析可见,现行规范设 计的双支臂弧形钢门空间框架体系的可靠度指标 U,3号钢为 3.2左右;16 Mn钢为 3.4 左右;这一结果与文献 [5 应用蒙特卡洛法所得结果基本接近

+6	/#	ᢧᡆᢩᠴᡔ᠊ᢩᢣ᠆ᢩᢣ	$V_{HT} = 0.10$				$V_{HT} = 0.15$			$V_{HT} = 0.21$		
14月 11十	1+	<b>饭</b> 坏力式。	$K_{QT} = 0.6$	$K_{QT} = 0.7$	$K_{QT} = 0.8$	$K_{QT} = 0.6$	$K_{QT} = 0.7$	$K_{QT} = 0.8$	$K_{QT} = 0.6$	$K_{QT} = 0.7$	$K_{QT} = 0.$	-平均 8
偏压支臂		平面内失稳	4. 99	4. 79	4. 59	4.47	4.31	4.15	3. 91	3. 79	3.66	4. 30
	- 8*		5. 37	5.16	4.95	4.77	4.60	4.43	4.14	4.01	3.88	4.59
	て育	「 平面外失稳	4. 76	4. 59	4.42	4.35	4.21	4.07	3. 89	3.78	3.66	4. 19
			4. 77	4.66	4.49	4.41	4.27	4.12	3.94	3. 82	3.71	4. 24
组合梁		受弯破坏	4. 97	4. 74	4.58	4.47	4.31	4.15	3. 92	3. 80	3.67	4. 29
	с <b>л</b> ь		5.34	5. 13	4.92	4.76	4.59	4.43	4.15	4.02	3.88	4. 58
	采	受剪破坏	4. 24	4.07	3.91	3.87	3.73	3. 59	3.44	3. 32	3. 21	3. 71
			4.49	4. 31	4.14	4.07	3. 90	3.78	3. 61	3. 49	3. 37	3. 91
体系	Ŧ	串联模型	3. 87	3. 69	3.51	3.46	3. 29	3.13	2.93	2.78	2.65	3. 27
	厼		4 12	3 82	3 75	3 66	3 48	3 34	3 12	2.97	2.88	3 48

表 5 水压力和荷载 Q作用下各构件及体系的 U值

### 3 结 语

水工钢闸门从设计、施工到运行始终充满着非确定性。为了科学地指导其设计、施工 及运行,为了定量准确地评价其安全可靠性,特别是为了赶上水工建筑物的总体设计水 平,应用结构可靠度理论制订《闸门规范》,不仅势在必行,而且迫在眉睫。根据以上分析计 算可得到以下几点结论,供设计及修订规范参考。

1)对于弧门空间体系和各个构件,材料为 16 Mn 钢时的可靠度指标比 3号钢的大 0.2;

2)对于弧门空间体系和各个构件,抗力为正态分布的可靠度指标比对数正态分布的 约小 0. 55;

3)对 16 Mn钢和 3号钢,无论抗力是正态分布还是对数正态分布,构件的可靠度指标比弧门空间体系的约大 0.85.

4)在水压力与其他荷载作用下,无论材料,无论荷载分布如何,随着其他荷载与水压 力比值的增大,构件及体系的可靠度指标减速增加

#### 参考文献

1 周建方.《水利水电工程钢闸门设计规范》可靠度初校.水利学报,1995(11):26~30

2 规范组编.水利水电工程钢闸门设计规范及编制说明.北京:水利电力出版社,1995

3 范崇仁,徐德新.水工钢闸门可靠度分析,水力发电,1992(8): 32~35

4 朱大林,游 敏,杜汉斌.平面钢闸门主梁可靠度分析及概率设计.水力发电,1997(3): 26~29

5 李宗利,王正中.弧门主框架体系可靠度分析模型与蒙特卡洛模拟.西北水电,1995(3):41~43

6 吴世伟编著.结构可靠度分析.北京:人民交通出版社,1990

7 宣国祥,张瑞凯,宗慕伟.船闸运行可靠度分析.水利学报,1996(1): 1~7

## Analysis of Reliability of the Steel Arch-Gate Space Frame System

### Wang Zhengzhong Li Zhongli Li Yalin

(College of Water Conservancy and Construction Engineering, Northwestern Agricultural University, Yangling, Shaanxi 712100)

**Abstract** In this paper, in-tandem mode and calculation procedure of the reliability calculation of the steel arch-gate space frame system are put forward according to "Steel Arch-Gate Design Criterion of Hydraulic and Hydroelectric Engineering", the Theory of Structural Reliability and Failure Mode of Steel Arch-Gate's Space frame; On the basis of the reliability research on Steel Arch-Gate's basic elements, reliability of steel arch-gate 's space frame is analysed by means of in-tandem model and it's caculation method. The result indicates that the reliability's minimum index of the double-butress steel arch-gate designed according to the regulatory specifications is 3. 4(16M n Steel) or 3. 2 (No. 3 steel), which is 0. 85 smaller than the reliability index of the basic elements. The minimum index is in agreement with the reliability index of the architectural "Design Creterion".

Key words steel Arch-Gate, space frame, reliability, series conection system