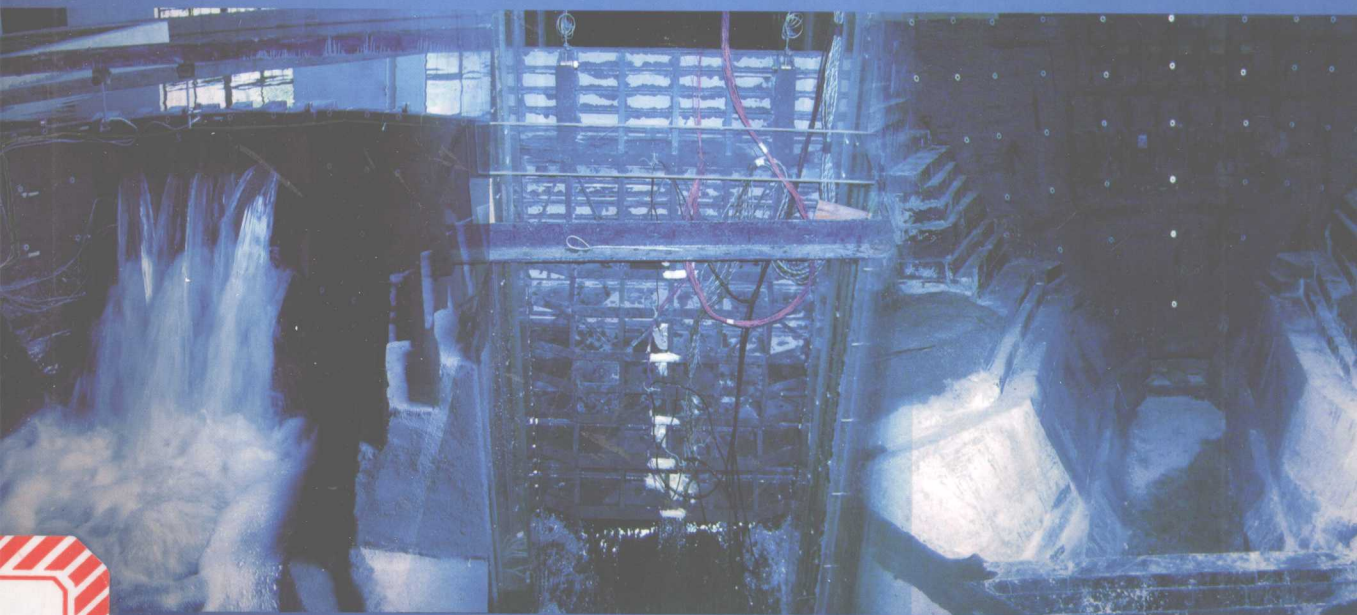


水工结构流激振动水弹性 模型研究及应用实例

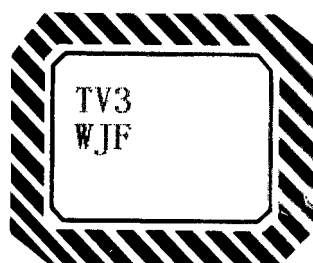
吴杰芳 张林让 编著



长江出版社

水工结构流激振动水弹性 模型研究及应用实例

吴杰芳 张林让 编著



长江出版社

图书在版编目(CIP)数据

水工结构流激振动水弹性模型研究及应用实例/吴杰芳,张林让编著. —武汉:长江出版社,2008.4

ISBN 978-7-80708-267-5

I. 水… II. ①吴…②张… III. 水工结构—弹性振动—水工模型—研究 IV. TV3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 043316 号

水工结构流激振动水弹性模型研究及应用实例

吴杰芳 张林让 编著

责任编辑:贾茜

装帧设计:刘斯佳

出版发行:长江出版社

地 址:武汉市解放大道 1863 号

邮 编:430010

E-mail:cjpub@vip.sina.com

电 话:(027)82927763(总编室)

(027)82926806(市场营销部)

经 销:各地新华书店

印 刷:武汉中远印务有限公司

规 格:787mm×1092mm

1/16

9 印张

180 千字

版 次:2008 年 4 月第 1 版

2008 年 4 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-80708-267-5/TV · 85

定 价:22.00 元

(版权所有 翻版必究 印装有误 负责调换)



吴杰芳 男，1939年2月生，河南省孟州市人，教授级高级工程师，中共党员。1964年毕业于原武汉水利电力学院数学力学专业。曾任长江科学院爆破与振动所副所长，兼湖北省振动工程学会常务理事和长江科学院院报编委。1985—1986年在美国进修大坝抗震技术，回国后，一直从事工程结构振动和抗震研究工作，完成多项国家“七五”、“八五”、“九五”重点科技攻关研究项目。曾主持完成葛洲坝二江泄水闸闸墩、隔河岩重力拱坝、丹江口土坝与混凝土坝联结段、三峡船闸高边坡、三峡垂直升船机塔柱结构、南水北调穿黄渡槽和穿黄隧洞等重大工程结构的抗震计算和模型试验研究。曾引进变态水弹性模型技术研究闸门的流激振动问题，为提高水弹性振动模拟试验技术，主持研制成功适合于钢结构流激振动模型试验的水弹性模型材料，获得国家发明专利，使水工钢闸门的流激振动试验模型达到全水弹性相似，并在主持完成的国家“九五”重点科技攻关项目如三峡大坝导流底孔弧形闸门流激振动、三峡大坝深孔弧形闸门流激振动、三峡电站排沙底孔闸门流激振动及三峡船闸末级泄水阀门流激振动，以及其他工程多个钢闸门的水弹性模型试验研究中得到应用，取得良好效果。开展过高拱坝坝身集中泄洪流激振动水弹性模型试验研究；从事过各种大型水工闸门和大坝流激振动的原型观测，撰写数十篇科研报告。在国内外刊物和国际会议上发表论文20余篇，主编《水工结构流激振动译文集》，并参与撰写《三峡工程科学试验与研究》丛书。



张林让 男，1962年生，陕西省宝鸡市人，高级工程师，1987年陕西机械学院（现西安理工大学）水工建筑专业毕业。大学毕业后一直在长江科学院工作，主要从事工程结构振动问题的研究工作，现任振动研究室主任。多年来，作为主要技术骨干参与完成了多项自然科学基金、部技术开发基金资助项目和四项国家“九五”科技攻关研究项目；负责完成多项重大工程的闸门流激振动和高拱坝泄洪流激振动科研项目及大型渡槽抗振模型试验，以及多个工程振动原型观测项目，并获得一项国家发明专利和一项技术新型专利。编写科研报告数十篇，发表论文十余篇。

前 言

水利水电工程中,水工结构(如水工闸门、导墙、拦污栅等)在水流的激励下常常发生振动,有的甚至发生振动失事,造成严重后果。因此,水工结构的流激振动问题备受关注,国内外一直在进行相关研究,并不断取得进步。早期的研究分别从水力学和结构动力学模型试验着手,改善水力学条件,预测作用于结构上的水动力特性,从结构动力试验中预测结构的动力特性,进而进行共振校核,设法避免共振发生,并对结构的振动响应进行估算。水流引起的结构振动是水弹性振动,不仅会发生共振,还可能产生自激振动、参数共振等危害性振动。为了使模型试验能直接展现结构的流激振动特性,20世纪60年代前后,国际上出现了水弹性振动模型研究,纷纷建立集水动力学相似与结构动力学相似于一体的水弹性模型,研究结构的流激振动问题。初期采用单自由度模型,仅模拟闸门吊绳的弹性,满足重力相似,进而发展成连续体的弹性相似。由于当时市场上没有满足水弹性相似要求的材料,于是在研究水工闸门的流激振动中创造出一种变态水弹性模型技术,利用铝、有机玻璃、硬的PVC等低弹模材料,通过增加模型构件的板厚近似满足刚度相似,同时在闸门模型上附加小铅珠近似满足质量分布相似并不影响刚度。这是水工闸门流激振动模型试验技术的重大进步,这种模型技术一度得到比较广泛的应用。但是,这种模型在相似性方面存在的缺陷,对试验成果的精度有一定影响。在三峡工程多个水工闸门流激振动问题的攻关研究中,长江科学院与武汉理工大学合作,发明了一种新材料,其物理力学性能能满足水工钢结构水弹性振动相似律的要求,用这种材料可以制作各种几何比尺的完全水弹性相似模型,摆脱了模型变态的困扰。这种完全水弹性模型能满意地预报闸门结构的动力特性和水弹性振动特性。三峡大坝导流底孔闸门振动的原型观测成果验证了该闸门的水弹性模型的试验成果。水工钢闸门流激振动的水弹性模型研究包括对模型进行实验模态分析,确定闸门的动力特性(频率、振型和阻尼比);按照其运用条件,进行流激振动试验,根据试验成果分析判断闸门是否存在共振、自激振动和参数共振等严重危害性振动,并对闸门振动的安全性做出评估,必要时可研究减振措施。

水工结构按材料分为钢结构和混凝土结构。混凝土结构流激振动的水弹性模型材料与钢结构完全不同,一般采用橡胶充填重晶石粉等材料,并经硫化工艺而成。混凝土结构流激振动的水弹性模型应模拟基础的一定范围,才能达到其动力特性和振动响应相似,研究的技术路线与水工闸门相似。两种模型试验都包含必要的数值计算,如结构动力特性和结构强迫振动响应计算,对试验成果起着验证和补充作用。由于水流

脉动与结构振动相互作用机理的复杂性，数值计算难以对其准确模拟，仅能对强迫振动进行计算预报，对自激振动问题是无能为力的，完全水弹性模型试验则是预报结构流激振动特性的有效方法。

1991 年在国家“七五”科技攻关项目中，我们曾引进变态水弹性模型技术对三峡船闸充水反弧形闸门可行性设计方案的流激振动问题开展研究。在国家“九五”科技攻关项目中，我们采用完全水弹性模型完成了四项有关三峡工程闸门流激振动问题的试验研究，之后，又完成了十余项其他工程的闸门振动水弹性模型研究，还先后完成了构皮滩高拱坝泄洪振动及三峡厂坝导墙流激振动水弹性模型研究，这些创新性的试验研究成果解决了有关工程设计中备受关注的流激振动问题。为了从理论和实践上总结这一新技术成果，特编著《水工结构流激振动水弹性模型研究及工程实践》一书，以飨读者。

本书出版得到长江科学院出版基金资助和长江出版社的大力支持，在此一并致谢！本书引用了不少参考文献用以支持本书的观点，特向原作者表示谢意。在本书编写过程中，余岭教授和徐德毅教授对书稿提出了修改意见，还得到李声平、朱军华等同志的热情帮助，在此一并表示感谢。由于作者水平有限，书中错误之处在所难免，希望读者批评指正。

作者

2008 年 4 月于长江科学院

目 录

1	绪论	1
1.1	水工结构的流激振动	1
1.2	水工泄水结构流激振动工程实例	4
1.2.1	水工闸门的流激振动	4
1.2.2	水电站拦污栅的流激振动	7
1.2.3	消力池分水隔墙的流激振动	8
1.2.4	水电站厂房的流激振动	9
1.2.5	薄拱坝坝身泄洪的流激振动	10
1.3	水工结构流激振动水弹性模型的发展	11
2	水弹性振动相似准则	13
2.1	相似原理	13
2.2	水工结构上的作用力及其比例尺	14
2.2.1	作用力及其比例尺	14
2.2.2	动力相似准则	17
2.3	几个重要物理量的比例尺	21
2.4	重力不起控制作用的流动系统中水弹性振动相似准则	22
2.5	闸门启闭杆和吊绳的水弹性模拟	23
2.6	关于变态水弹性模型	25
2.6.1	根据弹性应变律导出构件纵向振动变态模拟方法	26
2.6.2	根据弹性梁的微分方程导出弯曲振动变态模拟方法	26
2.6.3	关于扭转振动的变态模拟方法	27
2.6.4	关于质量的变态模拟方法	28

3	水弹性相似模型材料	29
3.1	钢结构水弹性相似模型材料	29
3.2	混凝土结构水弹性相似模型材料	30
3.3	材料动力特性测试	30
3.3.1	材料动弹模测试	30
3.3.2	材料密度测试	31
3.3.3	模型材料阻尼比测试	31
4	流激振动模型设计与制作	34
4.1	水工钢闸门水弹性模型	34
4.2	水工建筑物水弹性模型	35
4.3	水工水力学模型	35
5	实验模态分析	36
5.1	实验模态分析的理论基础	36
5.2	实验模态分析方法	39
5.2.1	脉冲激振法原理	40
5.2.2	脉冲宽度的控制	41
5.2.3	采样时间间隔 Δt 的选取	41
5.2.4	变时基传递函数细化新方法	41
5.2.5	窗函数在脉冲激振试验中的使用	42
5.2.6	锤击法模态分析应注意的几个问题	43
5.3	模态分析仪器及设备	43
6	流激振动试验	44
6.1	试验条件	44
6.1.1	水力学条件模拟	44
6.1.2	止水条件模拟	45
6.1.3	减振措施试验研究	45
6.1.4	通气条件模拟	46
6.2	测量参数与测点布置	47
6.2.1	振动加速度测量	47

6.2.2	振动位移测量	47
6.2.3	脉动压力测量	47
6.2.4	动静应力测量	47
6.3	测量仪器设备	48
6.3.1	传感器	48
6.3.2	二次仪表	49
6.3.3	数据采集与分析仪	49
6.4	测量数据分析	49
6.4.1	采样与采样定理	50
6.4.2	细化 FFT	51
6.4.3	振动信号基本特征量分析	51
7	闸门结构的动力稳定性	55
7.1	轻型弧形钢闸门破坏原因分析	55
7.2	弧形钢闸门的动力稳定性问题	57
7.3	弧形闸门动力稳定性问题理论研究	58
7.3.1	闸门支臂杆动力稳定性研究	58
7.3.2	弧形闸门三维动力稳定性计算研究	60
7.3.3	弧形闸门动力稳定性问题试验研究	62
7.4	平面闸门整体振动稳定性研究	63
8	水工结构振动原型观测	65
8.1	动力特性原型观测	65
8.1.1	起振机法	65
8.1.2	爆破激励法	66
8.1.3	环境激励法	66
8.1.4	锤击法(亦称瞬态激励法)	67
8.2	流激振动原型观测	69
8.2.1	流激振动原型观测的必要性	69
8.2.2	流激振动观测主要内容及仪器	69
8.2.3	流激振动观测资料的分析处理	70

8.2.4	三峡大坝导流底孔闸门流激振动原型观测	70
9	闸门流激振动全水弹性模型试验的原型验证	73
9.1	闸门动力特性的验证	73
9.2	闸门振动加速度的验证	74
9.3	闸门支臂应力的验证	75
10	关于闸门流激振动的安全评价标准	77
10.1	危害性振动的预防	77
10.1.1	预防共振	77
10.1.2	预防自激振动	78
10.1.3	预防支臂动力失稳	78
10.2	闸门振动安全评估标准	79
11	水工结构流激振动水弹性模型研究实例	80
11.1	概述	80
11.2	三峡大坝导流底孔弧形闸门流激振动水弹性模型研究	80
11.2.1	综述	80
11.2.2	闸门振动的水弹性模型	81
11.2.3	模态分析	82
11.2.4	流激振动试验	85
11.3	构皮滩拱坝坝身泄洪振动水弹性模型研究	95
11.3.1	概况	95
11.3.2	水弹性模型建制	96
11.3.3	大坝动力特性试验	97
11.3.4	拱坝坝身泄洪振动试验研究	99
11.4	三峡电站排沙底孔平面闸门流激振动水弹性模型试验研究	105
11.4.1	概况	105
11.4.2	闸门流激振动试验模型	106
11.4.3	闸门动力特性研究	106
11.4.4	流激振动试验	108
附录:	水工闸门与高拱坝流激振动完全水弹性模型照片集锦	120
参考文献		131

1 绪论

1.1 水工结构的流激振动

泄水结构是水利水电工程的主要组成部分,如泄水闸及其闸门、泄洪洞及其闸门、大坝的泄水表孔、深孔、底孔及其闸门、船闸的充水泄水廊道及其闸门,等等。泄水结构担负着宣泄洪水的重任,泄水时承受着洪水脉动压力的激励,往往诱发结构振动,称为“流激振动”。流激振动产生的原因十分复杂,Naudascher 教授曾按流激振动的激励机理把激励源分为三类:①外部激励(EIE),即激励源来自振动系统的外部,由流速脉动和压力脉动引起,有随机激励,也有周期性激励。如果结构的频率落入激励的高能频带中,结构就会产生较大的振动。②不稳定激励(IIIE),即激励源来自流动的不稳定性,不稳定性是流动系统的内在本质,如闸门底缘自由剪切层的不稳定分离和重附着现象产生的激励。在大多数情况下,流动的不稳定现象不因结构的振动而改变,结构的振动并不改变流动的特征,振动情况取决于流动的不稳定激励与结构的动力特性的关系。如果水流脉动的优势频率与结构的某阶频率接近,便会引起结构强烈振动,甚至有发生共振的可能。但在某些情况下,结构的振动会改变流动的不稳定特性,构成受结构振动控制的激励系统,如拦污栅栅条的振动与栅后尾流的关系,栅条的振动会将流速在一定范围产生的漩涡脱体频率锁定在其自振频率上,形成共振。③运动激励(MIE),它是由物体的运动诱发出流体的激励力,从而导致结构的振动,结构振动又从流体吸收能量,使流体与结构振动的耦合作用得到加强形成自激励振动。在一个复杂的流激振动系统中,上述三种激励源常常同时存在。实质上,流激振动是流动的流体与结构的耦合振动。一般情况下,水流脉动对结构的作用比较强,结构的振动对水流的反作用比较弱,这时的耦合振动表现为结构的强迫振动。当水流脉动的优势频率与结构某阶自振频率接近时,就会发生强烈的振动甚至共振。在某种条件下,结构振动与水流的耦合作用会形成自激振动系统,使结构产生自激振动。

一直以来,人们对共振现象比较重视,在设计中力求避免共振的发生,这是十分必要的。但对水工结构中发生自激振动却未引起足够重视,因为自激振动的现象类似共振,都表现为简谐振动而且振动频率也是结构的固有频率,因此,常将自激振动误认为共振。共振是强迫振动的一种特殊现象,是外部荷载的频率与结构的自振频率一致时产生的大振动现象。强迫振动是由外力推动的,维系结构振动的周期力不是由振动体控制的,即使振动停止时周期力仍然存在。强迫振动是具有正阻尼的振动,单自

由度系统强迫振动的微分方程为：

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + kx = F(t) \quad (1-1)$$

式中： $F(t)$ 为外部干扰力。

当干扰力是周期作用力时，结构产生周期振动；当干扰力是随机过程时，结构产生随机振动；当干扰力为零时，结构产生自由振动。

而在自激振动中，维系物体振动的周期力是由振动体本身诱发和控制的，自激振动为具有负阻尼的自由振动，其微分方程为：

$$m \ddot{x} - c \dot{x} + kx = 0 \quad (1-2)$$

显然，式(1-2)中右边没有干扰力。

一般正粘性阻尼力是与振动速度成正比、与振动方向相反的力。因此，正阻尼力使振动幅值逐渐减少，往往把具有正阻尼的系统称为“动力稳定系统”。而负阻尼力同样是与振动速度成正比的，但是与振动方向相同。因此，负阻尼将使自由振动的幅值逐渐增大而不是减少，通常把负阻尼系统称为“动力不稳定系统”。

方程(1-2)的通解为：

$$x = e^{\frac{ct}{2m}} (A \cos \omega t + B \sin \omega t) \quad (1-3)$$

式中： e 的指数 $\frac{ct}{2m}$ 为正值；

随振动时间 t 的增长，振幅 x 越来越大。

振动体具有正阻尼时，阻尼力与振动方向相反，对系统做负功，即消耗振动体系的能量，使振幅越来越小；而振动体系具有负阻尼时，阻尼力与振动方向相同，对系统做正功，即向系统供给能量。很显然，如果没有这种能量供给，自激励振动就不可能存在。维持自激励振动需要一个能源，而能源本身不必具有交变的特征，而是由振动诱发并控制其交变特征的。从理论上讲，一个线性自激励系统，其振幅最终将变为无穷大，因为有能量不断输入。但实际上，自激励振动系统中都有正阻尼存在，要消耗能量，还有非线性影响，因此，自激振动的振幅不可能无限度增大，而常常是保持在有限范围内，正阻尼越大，自激振动的振幅就越小。

在流激振动中，还有一种参数激励振动(或称参数共振)。它是由于振动体系的一个或多个参数随时间改变(通常是周期性改变)激起的大幅度振动，其数学表达式为：

$$M(t) \ddot{x} + C(t) \dot{x} + K(t)x = 0 \quad (1-4)$$

它与强迫振动不同，方程的右边没有作用力。引起结构系统振动的动荷载是其自身参数的改变。受轴向动力作用的压杆不计阻尼的横向振动问题就可化为著名的马修(E. Mathieu)方程，即参数激励振动方程：

$$\ddot{\Phi}_k(t) + \Omega_k^2(1 - 2\mu_k \cos \omega t) \Phi_k = 0 \quad (1-5)$$

式中： Φ_k 是振型坐标；

Ω_k 是杆件在轴向压力 P_0 作用下的横向振动的固有频率；

ω 是参数激励频率。

分析结果表明, 当 $\omega = \frac{2\Omega}{k}$ 时, 压杆就会发生参数共振而动力失稳。 Ω 是 Ω_k 系列中的任意一个, $\omega = 2\Omega_1$ 时最危险。

泄水结构的振动是水流引起的, 结构的振动状况与水流流态及其对结构的脉动压力有密切关系, 水流流态和脉动压力又受结构自身体形的影响; 另一方面, 结构的振动状况又取决于结构自身的动力特征, 即固有频率、振型和阻尼比。因此, 研究结构的流激振动必须从改善水流条件和改善结构的动力特性两方面入手。结构的流激振动是水流与结构的耦合振动, 只有按耦合振动来研究, 才能得出符合实际的研究结果, 解决流激振动问题。分别从水动力学方面研究以改善水流条件, 从结构动力学方面研究以修改结构的动力特性, 可以减小振动, 避免共振发生。由于流体运动与结构振动的耦合机理的复杂性, 只有采用完全水弹性模型进行流激振动试验, 才能展现自激振动现象, 进而采取措施, 防止自激振动发生。其他研究手段对展现流激振动的自激振动是无能为力的, 工程中一旦自激振动发生, 其后果是严重的。

泄水结构在泄水过程中一般都会发生振动, 当振动限制在结构允许的范围内时通常是无害的, 但在某些条件下, 结构会产生强烈振动, 影响结构的正常运行, 甚至造成失事, 造成严重后果。虽然这种现象并不多见, 但国内外也时有发生, 因此, 受到水利水电界的高度重视。特别由于水利水电建设规模越来越大, 高水头、大流量轻型结构的泄水建筑物的相继建造, 泄水结构的流激振动问题日益受到人们的重视, 并开展了广泛和深入的研究。

如前所述, 泄水结构的流激振动是流固耦合振动, 它既与水力学条件有密切的关系, 又与结构的动力特性有密切的关系, 需要运用流固耦合的物理模型来研究其振动状态和减振措施。由于流固耦合振动的机理十分复杂, 研究流固耦合振动的数学模型虽然取得了一定的进展, 但尚不能解决自激振动等问题。目前, 解决水工结构流激振动的有效手段是“水弹性模型试验”。水弹性模型(hydroelastcal model)是水力学模型的发展, 它既满足水力学相似, 同时也满足结构的动力相似, 因此, 能再现流固耦合的振动现象, 不仅能预演强迫振动现象, 解决强迫振动问题, 还能预演自激振动的现象, 解决自激振动问题。对水弹性模型不能顾名思义, 理解为研究水的弹性的模型, 它是研究水动力与结构弹性力、惯性力、阻尼力的耦合作用, 而不考虑水的弹性的影响。

水弹性模型有混凝土结构的水弹性模型和钢结构的水弹性模型, 它们的相似原理相同, 只是模型的材料不同、研究的对象不同而已。混凝土结构的水弹性模型主要有拱坝泄洪模型、消力池分隔墩模型等。钢结构的水弹性模型主要是各种水工闸门的流激振动模型。钢结构的水弹性模型又分为变态水弹性模型和正态完全水弹性模型, 所谓“变态水弹性模型”是在水弹性模型材料未研发之前, 用有机玻璃或 PVC 材料等制作的模型, 通过增加材料的厚度近似满足其刚度相似, 通过在模型上设置附加质量近似满足结构质量分布相似。水弹性模型材料问世以后, 用水弹性材料制成的模型即正

态(完全)水弹性模型就逐步取代了变态水弹性模型。

1.2 水工泄水结构流激振动工程实例

1.2.1 水工闸门的流激振动

1.2.1.1 平面闸门的流激振动

平面闸门的流激振动按其产生振动的水力条件可分为:①止水漏水引起的振动;②底缘形式不良引起的振动;③下游流态恶劣引起的振动;④门槽形式不良引起的振动。

(1) 止水漏水引起的振动

刘家峡水电站左岸坝身泄水道设有两孔平面闸门,孔口尺寸为 $3\text{m} \times 8\text{m}$,设计工作水头 70m ,为定轮工作门。闸门采用上游止水,P形水封固定于门叶上,顶、侧止水把门板围成一个Π形。闸门操作时,Π形止水沿胸墙滑动,胸墙衬砌高度达孔口以上 8.6m ,闸门用油压起闭机动水操作。该闸门自投入运行时,就发现存在强烈振动,多次观测表明,闸门在尚未达到设计工作水头的情况下,振动的动应力超过设计的允许应力。工作水头 54.36m 时,动应力峰值达到 258.5MPa 。闸门振动主要表现为顺水流向的大幅度振动,而且一般在大开度时发生,振动时在胸墙与闸门之间的Π形间隙中观测到巨大的水锤压力和动水压力。分析闸门振动原因犹如管道的水锤振动。侧止水和胸墙与闸门面板之间的间隙,像管道一样,闸门顶的P形止水犹如阀门,当闸门入水时高速水流进入“管道”,“阀门”关闭时流速突降为0,在“管道”中产生巨大升压,此时闸门向下游产生振动变形,“阀门”便打开,水流射出,于是压力降低,闸门复原。阀门又关闭,水压又上升,如此循环往复就形成了水锤式自激振动。为了减振防振,在门叶上自顶止水以下增加数道横向止水带,将“管道”长度分隔为若干段,阻截“管道”中的水压震荡,起到了一定减振作用。石泉水电站泄洪排沙底孔工作闸门也发生类似振动,用同样方法得到抑制。这种振动属止水漏水引起的振动。在平面闸门运行中,止水漏水引起闸门强烈振动的实例还有双层闸门层间止水漏水引起的闸门振动。由于止水设计不良,当上闸门下降溢流时,层间止水脱开漏水,引起闸门强烈振动。

(2) 底缘形式不良引起的振动

平底底缘形式最容易引起平面闸门的自激振动。我国早期设计的四川狮子滩水电站($4\text{m} \times 4\text{m}$ — 49.2m)泄洪洞定轮工作门,其采用枋木平底止水,第一次下闸蓄水时,闸门就发生剧烈的竖直振动。国外也有不少这方面的工程实例,强烈振动都发生在小开度,因此,闸门不能在小开度作局部开启运行。研究表明,底缘平面的最小临界开度必须大于底缘厚度的65%才能防止出现大的振动,刀刃形底缘可防止闸门竖向振动。

近期我国平面闸门的底缘形式已经淘汰枋木止水平底底缘而采用刀刃形底缘。但是刀刃型底缘的倾角设计对闸门的防振设计也是至关重要的,倾角偏小往往引起闸门

振动。国外某电站进口的事故门,门高 8.55m,刀口在上游,下游 α 角仅为 10° 左右,当闸门下降到 2m 左右时发生强烈振动。当将上游面板延长使 α 角增加到 40° ,振动显著减小。根据以往的经验 and 研究成果,我国闸门设计规范中规定,平面工作闸门和事故闸门下游倾角应不小于 30° 。

(3) 门后流态引起的振动

当平面闸门后为有压流时,通常在启闭过程中要发生明满流过渡。在明满流过渡区,闸门后产生有压水跃,当跃区贴近门叶下游面时,在门叶上作用着强烈的压力脉动,从而诱发闸门振动。水电站进口事故门、船闸泄水廊道工作门均有明满流过渡引起平面闸门的振动问题。西津电站船闸输水廊道上闸首平面定轮工作门($2\text{m} \times 2.5\text{m}$ — 13.8m)及中闸首的平面定轮工作门($2\text{m} \times 2.5\text{m}$ — 21.7m),由于门后为压力廊道,流态恶劣,因而闸门在长期运行后定轮止轴板由于振动而剪断导致轮子脱落,将止轴板改为焊接仍被剪断。1974 年 8 月 21 日,巴基斯坦塔贝拉坝导流洞进口($4.1\text{m} \times 13.7\text{m}$)平面定轮闸门,在局部开启时被卡住无法关闭,经过一个多月局部开启运行,该闸门连同相邻的一扇闸门和其间的闸墩一起遭到破坏,闸门被冲到 200m 长的隧洞下游。事后分析认为主要是因为闸门在局部开启下门后发生水跃引起闸门振动及空蚀而遭到破坏,致使蓄在水库中的数十亿立方米水必须放空,以便检修,损失巨大。据报道,1959 年正在施工的印度巴克拉坝导流隧洞 $3.3\text{m} \times 6.6\text{m}$ 平面闸门失事。失事起因于洪水使下游水位抬高封住了隧洞出口,造成门后十分恶劣的流态,闸门产生剧烈振动,造成门井混凝土破裂,发电厂房被淹。这些实例提醒人们,平面闸门设计要力求避免出现临门水跃的门后流态,特别对于高水头的经常动水操作的工作门应尽量使门后保持明流状态并充分通气,当无法避免出现明满流交替状态时应进行专门的闸门水弹性模型试验加以论证。

1.2.1.2 弧形闸门的流激振动

(1) 止水漏水引起的振动

浙江皎口水库泄洪(放空)底孔进口安装有一扇($3\text{m} \times 2.8\text{m}$ — 37m)弧形工作闸门,弧门顶部设有一道 P 形止水,上游有长 51cm 的短胸墙,在相对开度为 $0 \sim 0.18$ 时,止水在胸墙上滑动,无喷水现象。当开度增大,顶止水脱离胸墙后,门叶与胸墙的缝隙出现大量喷水,发现有空蚀和振动问题。1974 年 12 月 9 日水库放空对底孔的空蚀进行修补时,在胸墙末端加设一道橡皮止水,为了避免该止水与门叶侧止水发生干扰,将该止水在胸墙两侧各留 9cm 空隙。检修后闸门出现了两个强烈振动区,一个在小开度 $n = 0.075 \sim 0.085$,另一个在大开度 $n = 0.80 \sim 0.96$,振动时伴有阵发性的轰鸣,使人有恐怖感。闸门结构有一定的变形,支臂与铰连接螺栓松动,铰轴止轴板脱落,5 只 M20 螺钉剪断。通过对脉动压力和动应力进行测试与分析,认为闸门振动主要是由于顶止水和胸墙末端止水漏水,在两道止水之间的空腔中产生了水压振荡,产生了自激振动。采取三种措施解决闸门振动问题:其一是重新制作闸门并加大支腿截面;其二

是将胸墙末端橡皮止水改为正规 P 形止水；其三是底孔顶部加设 20cm 压坡段抑制空穴形成，处理后闸门在小开度振动消失，大开度振动也得到改善。

(2) 底缘形式不良引起的闸门振动

弧形闸门由于底缘形式不良引起闸门振动甚至严重振动的例子也不少，如阿肯色河通航系统有 17 座闸堰工程，其中有 16 个工程有溢洪道，用弧形闸门保持通航水位及调节流量。弧形闸门在正常运用情况下，底缘淹没在下游水位中。在开始运用的三个月中，许多闸门发生了严重振动，有些闸门振动的严重程度足以使钢结构构件和焊缝开裂，损害闸门结构的整体性。振动的主要原因在于底缘和底水封的设计不合理。

(3) 门后流态引起的闸门振动

高水头船闸输水廊道的充泄水阀门多采用反向弧形闸门，由于门后流态恶劣，常引起阀门振动。如美国某船闸在充水门开启过程中，在 0.3 ~ 0.7 开度之间，巨大的雷鸣声无规则地时有发生，伴随着这些声响，闸门产生强烈振动。在阀门开启 131s 后，廊道中开始产生冲击声，在 171s 时出现最大冲击声，203s 后冲击声消失，248s 阀门全开。廊道中水压脉动的频率达 1000Hz 以上，认为是廊道中空穴溃灭造成的。在一些工程中，对闸门下游充足通气明显消除了振动问题。而在该工程中，输水廊道顶部相对高的压力阻止了通气，起不到减振作用，曾采用间歇启门方式减小闸门振动。葛洲坝二号船闸充水系统采用双边反向弧形阀门控制，廊道截面尺寸为 5.5m × 5m，设计水头 27m。设计运行工况为阀门匀速开启，历时 5min 阀门全开。在阀门运行过程中，也曾出现了与上述阀门类似的振动现象。曾对阀门进行了五种工况的原型振动观测，分别为设计运行工况、快速启门工况、慢速启门工况、增大阀门后淹没度工况和间歇开启工况。观测发现，阀门的振动量级在整个启门过程中可分为五个阶段：① 阀门开启度 $n < 0.3$ 为微振动阶段；② $0.3 < n < 0.4$ 为递增过程阶段；③ $0.4 < n < 0.6$ 为强振阶段；④ $0.6 < n < 0.75$ 为递减过程阶段；⑤ $n > 0.75$ 为微振阶段。按各种工况对应开度的振动幅值来看，快速启门振幅最大，设计运行次之，慢速启门再次之，增加门后淹没度运行振动较小，间歇性开启运行振动最小。设计运行工况阀门径向最大振动加速度达到 2.13g，推算的振动位移幅值为 0.674mm，侧向最大加速度为 0.49g，动位移为 0.723mm。这种振动已成为严重振动。采用间歇开启方式，径向和侧向最大振动加速度分别降为 0.489g 和 0.219g，属微小振动。

(4) 振动引起支臂动力失稳

弧形闸门的受力特点是门叶的板梁系统承受着水压力，并将其传递到支臂系统，而支臂系统是偏心受压构件，在某种周期性轴向力和弯矩作用下，在一定条件下就会产生动力失稳，使闸门产生屈曲破坏。

调查资料显示，我国在 20 世纪 70 年代之前建造的水库溢洪道及各类水闸用的低水头弧形闸门，有十三余例失事都与闸门的振动有关，是支臂动力失稳造成的。如广西贵县某水库溢洪道 4 扇弧形闸门，宽 10m，高 7.3m，水头 7.3m，钢面板，两斜支臂，圆柱铰，1971 年在启闭过程中，闸门、闸墩及工作桥振动十分厉害，当开至 0.8 ~ 1.0m

开度时,支臂弯折,闸门被冲至下游,3扇闸门都相继破坏。湖北省某电站溢洪道7扇闸门,宽12m,高9m,水头9m,钢面板,三斜支臂,圆柱铰,1969年边孔局部开启运行时支臂失稳破坏。日本、美国也有类似事故发生。日本和知坝一个表孔弧形闸门高12m,宽11m,面板弧半径13m,面板由三支臂和空心桁架支撑,上下支臂之间有两排纵梁,门重 $3.7 \times 10^2 \text{ kN}$,闸门用卷扬机启闭,1967年闸门在试运行中,一扇闸门以30cm/min的速度下降,接近关闭时,突然剧烈振动而破坏,被冲到下游。其余三扇闸门处于关闭状态,在12m水头作用下没有破坏。闸门失事的直接原因是在小开度时闸门产生了自激振动导致下支臂屈曲失稳而破坏。设计方面的原因一方面是支臂抗弯刚度不够,在静水头作用下未破坏的支臂已产生了20~24mm的变位,另一方面是弧面圆心比弧门转动中心低,使闸门处于动力不稳定状态。这些由于闸门在小开度的振动而导致支臂失稳而失事的教训已引起人们重视。我国水工闸门设计规范中就要求对于低水头弧形闸门应特别注意支臂的动力稳定性,从支臂的结构和构造上予以保证。由于问题的复杂性,对闸门振动和动力失稳问题需要开展深入的理论和试验研究。完全水弹性模型试验是预测闸门流激振动状态的最好方法。

1.2.2 水电站拦污栅的流激振动

在水电站特别是抽水蓄能电站中,拦污栅是非常重要的金属结构,它起着拦阻漂浮污物避免污物过机、破坏机组运行的作用。然而,拦污栅流激振动破坏的现象仍是比较多的,特别是抽水蓄能电站的拦污栅破坏情况尤为突出。

据报道,在美国15座抽水蓄能电站中,有8座电站出现过拦污栅破坏的报道。表1-1中给出几个美国抽水蓄能电站拦污栅破坏的实例。

表 1-1 拦污栅破坏的实例表

工程名称	位置	破坏情况	破坏原因
A	尾水管拦污栅	栅条下落不明,破坏集中于底部	振动及材料不良
B	尾水管拦污栅	整个拦污栅被冲走	振动
C	尾水管拦污栅	机组拦污栅整扇一分为二,严重破坏	振动
D	尾水管拦污栅	地角螺栓松动,导桩下落不明	振动
E	尾水管拦污栅	机组拦污栅36根栅条下落不明	共振
F	上库拦污栅	整扇栅叶出现整体振动	共振
G	尾水管拦污栅	断裂,栅条丢失	振动
H	尾水管拦污栅	断裂,栅条丢失	振动

我国拦污栅破坏的实例也时有发生,如葛洲坝水利枢纽二江电站拦污栅曾发生过严重破坏,破坏量最大的是栅条和横向加劲板断裂甚至脱落,占拦污栅破坏量的80%。栅条断裂脱落后形成的空挡最大面积达 1 m^2 ,栅条和栅梁断裂部位都出现在支承点附近,而且断口没有塑性变形痕迹,呈现明显断裂迹象,导向槽内边柱槽钢磨损、折断,连接件松动、脱落,另外还出现大面积栅条严重扭曲变形。上述破坏现象都集中在拦污栅的下部,而上部却完好无损。上述拦污栅的破坏特征说明拦污栅的破坏主要是流