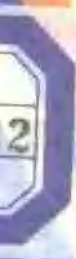


能源部水利部水利水电规划设计总院  
能源部水利部水工金属结构质检中心

筹策

# 提高水工建筑物机械设备 和钢结构的可靠性

[苏] A·P·弗赖希斯特 等著



地震出版社



能源部水利部水利水电规划设计总院  
能源部水利部水工金属结构质检中心

筹策

006493 水利部信息所

~~18486~~

T. 42

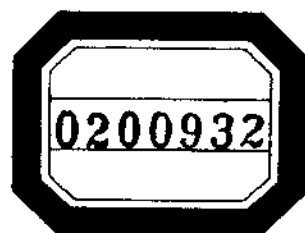
# 提高水工建筑物机械设备和 钢结构的可靠性

[苏] A. P. 弗赖希斯特 等著

俞铭正 等译 高又生 校

赠水利电力部研究所

高又生  
1991.



地震出版社

1991

2468/37

## 内 容 提 要

本书收集了大量苏联国内及部分国外的水工金属结构事故实例,不仅详细地描述了事故发生前后的情况,而且对事故发生的原因进行了深入的分析。

书中第一章叙述了可靠性的基本概念;第二章论述了设备可靠性的评价及其保障体系,并提出了检测的工具和方法;第三章至第十章分别叙述了闸门、拦污栅、压力钢管、启闭机等水工金属结构的事故实例,分析了事故发生的原因;第十一章论述了提高水工金属结构可靠性的途径。

本书对我国从事水利水电工作的科研、设计、制造、安装以及运行管理人员都具有重要的参考价值,对大专院校师生也是很好的教学参考用书。

### 提高水工建筑物机械设备和 钢结构的可靠性

[苏] A. P. 弗赖希斯特 等著  
俞铭正 等译 高又生 校

\*

地震出版社出版 发行

北京民族学院南路9号

国防大学第一印刷厂印刷

\*

850×1168 1/32 8.25印张 221千字

1991年8月第一版 1991年8月第一次印刷

印数: 0001—1800

ISBN 7-5028-0476-5/T·17

(864) 定价: 6.00元

## 序

本世纪以来，世界各国都大力开发廉价、清洁的再生能源——水电，其建设规模日益扩大。相应的水工机械设备和钢结构的设计、制造水平也达到新的高度。

水工机械设备和钢结构在整个水电建设中的地位和重要性往往被人低估。其实，一根高压钢管的爆破可以毁掉整个水电站，而在洪水侵袭下如果控制闸门的操作失效，甚至可以毁掉大坝，并给下游造成灾难性的后果。这种事例已经发生过了，这是值得我们高度警惕和重视的。

苏联在开发利用水力资源方面的成就是举世公认的。他们在取得大量成功经验的同时，也有一些失败的教训。对于从事水电建设的广大工程技术人员来说，成功的经验固然可贵，失败的教训更应认真吸取。苏联的同行们并不隐讳这些反面的经验，而予以坦率报导分析，并印成专著，这是难能可贵的。

在水利水电规划设计总院和水工金属结构质检中心的共同努力下，这本《提高水工机械设备和钢结构的可靠性》一书翻译出版了。本书中汇集了大量的苏联水工钢结构和机械设备事故实例，也包括少数苏联境外的例子。这无疑是一份极可珍贵的资料，必将得到我国同行们的欢迎。我深信这本书能够起到“它山之石，可以为错”和“前事不忘，后事之师”的双重目的。

在欢迎本书问世的同时，我还想多说几句话。我们建国以来，水电资源也得到大力开发利用，有许多工程的规模和建筑物都达到世界水平，这是值得庆贺的，但目前水能利用率还很低，还有百分之九十几的丰富水电资源有待开发，其中许多是大型甚至是远超国际水平的巨型工程，我国水电建设者们今后面临的形

势是任重道远、前程似锦。更重要的一点是，和苏联一样，我们在取得举世瞩目的成功经验的同时，也发生过失误和事故教训。应不应该及时分析总结这些失误和教训呢？我认为是一百个应该。因此我盼望我国的同行们也应该认真总结过去正反两方面的经验，以便提高水平，迎接挑战，尽快编写出自己的书来，这比常规的教科书更为有益。不要怕揭短，可怕的是护短。任何科学，任何事业，不通过深刻的总结反面的经验是不会有进步的。听说水利水电规划设计总院和水工金属结构质检中心正在筹做这一工作，我十分赞成他们的远见和科学态度，并希望我们自己的专著能早日与大家见面。是为序。

能源部水电总工程师

潘家铮

1990年8月于北京

## 中译本前言

闸门、启闭机、压力钢管等水工金属结构，在水电站中占有举足轻重的位置，它们的失事往往给国计民生造成极其严重的后果。多年来人们对于水电建设的成功经验已经总结了不少，几乎各国都有这方面的专著；但是对于工程中的事故总结，并写成系统的专著确实为鲜见。其实这些反面的教训对于从事水电工程的建设者来说尤为可贵。

苏联的水电建设取得了举世瞩目的成就，成功的经验总结，他们早已有了大量的专著问诸于世，现在他们又将多年来的事故教训进行了系统的总结，并且忠实地提供给了同行们。本书的翻译出版定会受到我国同行们的欢迎。

该书译稿经能源部、水利部水工金属结构质检中心朱国纲、凌毓德两位同志进行了全面校核；能源部、水利部水利水电规划设计总院欧阳金、沈德民同志对该书译稿进行了技术审阅。能源部潘象铮总工程师对该书的出版非常关心，给予了大力的支持和鼓励。并望我国的同行们能早日将自己的书写出来！

能源部、水利部水利水电规划设计总院

能源部、水利部水工金属结构质检中心

1991年2月

# 目 录

|                            |       |
|----------------------------|-------|
| 前 言 .....                  | (1)   |
| 第一章 机械设备可靠性的一般问题 .....     | (5)   |
| 1.1 概述 .....               | (5)   |
| 1.2 可靠性的基本概念和指标 .....      | (7)   |
| 1.3 故障及其原因和分类 .....        | (10)  |
| 1.4 关于建筑钢结构可靠性的综述 .....    | (14)  |
| 1.5 机械设备的特点及其对可靠性的影响 ..... | (17)  |
| 第二章 机械设备运行可靠性的评价 .....     | (25)  |
| 2.1 运行机械设备的可靠性保障体系 .....   | (25)  |
| 2.2 检测的手段和方法 .....         | (28)  |
| 2.3 关于机械设备状态的综述 .....      | (35)  |
| 2.4 电站机械设备故障的原因和后果 .....   | (38)  |
| 第三章 露顶式平面闸门 .....          | (41)  |
| 第四章 泄水道上的潜没式平面闸门 .....     | (63)  |
| 第五章 船闸输水廊道的潜没式平面闸门 .....   | (109) |
| 第六章 船闸航道闸门 .....           | (131) |
| 第七章 其它闸门 .....             | (157) |
| 第八章 拦污栅 .....              | (171) |

|                          |       |
|--------------------------|-------|
| 8.1 概述 .....             | (171) |
| 8.2 栅片的破坏 .....          | (175) |
| 8.3 框架部件的损坏 .....        | (183) |
| 结论 .....                 | (195) |
| 第九章 提升机械和悬吊装置 .....      | (199) |
| 第十章 压力管道 .....           | (211) |
| 10.1 概述 .....            | (211) |
| 10.2 明管 .....            | (211) |
| 10.3 暗管 .....            | (222) |
| 10.4 填土内管道 .....         | (225) |
| 10.5 堵头及其它部件 .....       | (226) |
| 结论 .....                 | (231) |
| 第十一章 提高水工建筑物机械设备的可靠性 ... | (233) |
| 11.1 故障的主要生产性原因 .....    | (233) |
| 11.2 完善设计方案 .....        | (238) |
| 11.3 制造和安装的改进 .....      | (242) |
| 11.4 提高金属结构的运行可靠性 .....  | (243) |
| 结 束 语 .....              | (247) |
| 附 录 .....                | (249) |
| 参考文献 .....               | (252) |

## 前 言

机械设备和专门的水工钢结构是动力、运输、土壤改良和其他工程中水工建筑物不可分割的组成部分。因此，对水工建筑物在任何荷载组合作用下的强度、不透水性、寿命和运行可靠性等项要求，亦适用于其机械设备。经验表明，整个水利枢纽无事故地运行常取决于其机械设备的可靠性。

近数十年来，随着苏联水利水电建设事业的发展，水工建筑物的机械设备和钢结构不断得到改善，所采用的参数不断提高。在高水头条件下，以及供极北地带和西伯利亚地区低温条件下运行的设备和结构的制造方面，取得了很大成就。安装和制造工艺，以及防腐方法均有所改进。

钢结构的构造不断有所改进：50年代先实现了铆接向焊接的过渡，随后在采用低碳钢的同时，开始广泛采用低合金钢、热处理强化钢和异型材，从而取得节省钢材，轻化设备和结构的效果。

在苏联许多水工建筑物上的机械设备和钢结构，就某些指标而言，胜过了国外的样品。比如，早在60—70年代，就曾修建了参数  $HD^2 = (13—15) \cdot 10^3 \text{m}^3$  的水电站高水头钢管，建造了用于关闭跨度大于100m过船孔的举世无双的大型设备；采用了能在40MN荷载作用下运行的高水头调节闸门；广泛采用了作用力达到11MN双向作用的液压油缸，采用了作用力达到20MN的首批高参数液压油缸。

由于机械设备参数的增大，其造价和重要性随之提高，相应地对其可靠性的要求亦趋严格。

为了提高工程项目的可靠性，研究运行经验，包括研究事故和损坏，并分析其原因，从中吸取相应的教训，具有很大意义。

藉此可以获得非常难得的资料，在这些实际资料的基础上修改设计标准，修改制造和安装规程，改进设计方法，改进工艺流程，改进运行管理，并为防止将来发生类似问题而采取预防措施。

近年来，对于工程中出现事故和损坏的分析及其预防措施，已发表了许多著作。在这些著作中，对楼房和建筑物的钢、石和钢筋混凝土结构以及许多专门的钢结构，如运输廊道、起重机结构、储气罐和锅炉等等进行了研究分析。尽管大家知道在国内外实践中，机械设备的运行，尤其是在运行初期，即施工期，发生小毛病，破坏、损坏甚至事故的情况并不罕见，但对于水工建筑物的金属结构和机械设备的损坏情况，仅仅在一些科技文献中有零星介绍，而没有系统的反映。

本书试图填补这一空白。书中对水工机械设备和钢结构可靠性的—般问题，对运行中的设备如何组织，对检测技术手段、检修方法以及结构加强的方法均进行了分析研究。书中也对国内外许多水电站、船闸及其它水利工程上水工钢结构和机械设备，其中包括各种类型的闸门、衬护、管道、拦污栅、传动机械等等，对发生过必须吸取教训的事故和损坏的情况作了阐述和分析。在研究每一次事故时，通常都从事故的责任角度去分析研究设计决策以及制造、安装和运行的原因。根据调研所得资料，本书对各种类型的机械设备和钢结构的运行经验进行了总结归纳。在对有关设备与结构损坏的运行资料进行分析和分类的基础上提出了旨在提高设备和结构可靠性的建议。

“闸门”的概念，广义地讲包括活动部分（闸门本身）、固定部分（闸门框、埋设部分）和启闭设备，后者包括传动机构、吊具和传动机械。因此，本书没有把埋设部分、门槽和闸门室相邻段衬护的事故情况作为单独的一章来编写，而是作为各种类型闸门总体中的一部分来编写，即露顶式平面闸门、潜没式平面闸门、船闸航道闸门（人字门）、弧形闸门及其它闸门。编写过程中对事故实例的分析，证实了这种编写方法的合理性。分析表

明、埋设部分和衬护的工作情况，不仅与闸门本身的结构特点有关，也与整个闸门室的水力学条件有关。牵引机构和悬吊设备的损坏具有自身的特点，在许多情况下不仅与闸门类型有关，而且与传动机构的工作有关，故将其损坏问题放在机械一章中叙述。

本书的作者们曾参加过许多水利枢纽机械设备的原型试验和调研，他们是书中所叙述的许多事故的审查和评判者，对事故情况熟悉，为编书及精选资料提供了方便。

选入书中的某些实例，以前曾在国内外定期出版物中刊载过。1971年以前的机械设备损坏和事故方面的大部分资料系由工程师涅费道维，E.E.负责搜集，他是水电建设安装托拉斯钢结构强度方面的主要专家之一。

对伏尔加河上及其它水利枢纽上机械设备运行资料的挑选及图书目录的编制，工程师苏德季洛夫斯基，A.O.提供了很大的帮助，作者在此表示深切的谢意。

作者对在本书编写过程中协助搜集资料的同事——水电建设安装托拉斯专业设计处的工作人员保高莫洛夫，Б.В.，别界夫，B.Д.，格尔曼，B.A.，雷申柯，П.Е.，马廖莱夫斯基，O.B.，席德涅夫，B.H.，斯捷潘诺夫，Д.М.，费多罗夫，M.H.，莎勃卡，B.Л.及其他同事表示谢意。

作者对本书手稿的评审人工程师柯马罗夫，B.K.表示谢意，他对本书作了认真的审核，并提出了不少有益的意见。科学技术副博士库皮尔曼，B.Л.对本书提出了许多有益的建议，科学技术副博士萨拉，A.M.对手稿的修定给予了很大的帮助，作者在此一一表示感谢。

本书将对水工专家、水工建筑物机械设备和专门的钢结构设计人员以及从事于制造、安装和运行的工程技术人员是有益的。

作 者



# 第一章 机械设备可靠性的一般问题

## 1.1 概 述

在水利枢纽的运行中，水工建筑物的机械设备要完成许多重要的功能：根据需要调节水库水位；调节通过泄水建筑物的流量，包括宣泄施工流量；清除电站进水口中悬浮物和漂浮的污物；排冰和排漂浮物；冲除建筑物附近沉积的底沙；在发生事故时截断水工建筑物输水道；为了检查和检修，排净水工建筑物水下部分；实施一切可能的提升和运输工序，等等。在通航建筑物（船闸、升船机）的闸室中，航道的水位也是由机械设备进行调节，从而实现过船的。管道和钢板衬护这样专门性的钢结构，则是保证往水轮机（水泵）流道内输水，以及保护泄水建筑物高流速区不受冲毁的设施。因此，在保证水电站、热电站、核电站、通航建筑物及其它水工建筑物正常运转和无事故运行中，机械设备和水工钢结构发挥着重要的作用。在大型水利枢纽中，水工建筑物的总体布局，尤其是深式泄水建筑物的层数，往往取决于闸门的参数指标。众所周知，世界上多次发生过由于闸门操作出故障而导致垮坝、死人及其他的严重后果（长时间中断供电、通航及其他事故）。

1975年，在美国的一座抽水蓄能电站上，由于机组前球形阀门运行上的疏忽，造成淹没地下厂房的事故。

1976年汛期，哥伦比亚德尔蒙特坝深式泄水道上的扇闸门被破坏，致使所在地区遭受很大损失，80人死亡。

1976年，巴基斯坦塔贝拉水利枢纽发生一次大事故，其原因之一是闸门被卡住了。

1977年，当大洪水通过巴西的里奥普雷图河时，仅仅由于操作人员晚开了闸门，该河上两座水利枢纽上的土坝便遭破坏。

1982年10月，西班牙图兹水利枢纽发生了水流溢过71米高的坝顶的事故，主要原因是由于供电中断，未能开启泄水道上的闸门，而电站上的两台防事故备用发电机，1台在检修中，另1台未能启动，试图手工开启闸门也未成功。尽管疏散了该市的居民，但此次事故还是造成40人死亡，经济损失达3.55亿美元。

由于机械设备失去工作能力而造成水工建筑物遭受破坏的事故，在苏联也屡有发生。奥卡河上的库兹明水利枢纽，1962年秋季由于未及时开启闸门，使土坝被冲决。国营苏尔古特地区发电站，1979年由于泄洪闸门开度不够，发生了类似的事故，又由于库水位降低到极限以下的高程，使电站全部甩荷。同一年，乌尔宾水电站的梯什水库，在泄放近于灾难性的春汛流量时，由于泄水隧洞中被淤塞的闸门不能开启，而使溢流坝受到破坏。

水工建筑物机械设备的高度重要性，从以上引证的例子，已足够令人信服。因此，提高机械设备可靠性问题具有特别重大的意义，要求所有从事于机械设备与水工钢结构的设计、制造、安装和运行的专家们对此给予关注。仔细地研究分析每一次损坏或事故的情况，从中汲取应有的教训，可避免今后再次出现类似事故。正如分析所表明，事故性质的破坏，一般是在产品“寿命周期”某一阶段上，即设计、制造、安装和运行中的严重失误所致，或者（较少）与极端的自然力作用和偶然情况的组合有关。因此，仅仅根据设备和结构的一些破坏情况来判断这种或那种类型产品的实际可靠性是困难的。为了研究运行质量，通过有计划的调研并进行仪器量测，积累设备和结构的损坏、在运行中出现困难以及磨损等方面的有代表性的资料是很有意义的。

考察的结果，不仅可以取得关于设备和结构实际状况的宝贵资料，借此也可以制定出提高运行可靠性的措施，考察的主要意

义就在于此。无论是当地的工作人员，或者是从事水工建筑物及其机械设备安全监督的有关机构都应该进行这种考察。其结果的可信度，在很大程度上取决于所采用的技术手段和探测方法。

最后，排除故障的方法，对被磨损削弱了的或者损坏了的结构进行加强和修补的方法，对于提高机械设备的可靠性是十分重要的。

## 1.2 可靠性的基本概念和指标

根据国家标准 ГОСТ.002-83 规定，可靠性是工程设施（包括机械设备）在规定时间内保持其全部参数值的性能。这些参数反应了在给定的工作规范和使用、技术维护、修理、贮运等条件下所要求的性能。所要求的功能，以及表征其实现的参数的组成和极限值，既取决于机械设备及其部件的构造特点，也还取决于该机械设备在保证水利枢纽发挥工作效应中所起的作用。对此，既可以就设备整体作出规定，也可就设备的组成部分——闸门、传动机械等，甚至构成这些组成部分的部件作出规定。譬如泄水道的机械设备，要求其总体发挥的效应是能够按时地通过建筑物泄水并调节上下游水位，而参数项则是宣泄的流量，设备起始运转前（如冬季）所需的准备时间，提升（或下放）闸门的速度等。

可靠性包括无故障率、耐久性、可维修性和可保全性各项指标。

无故障率——设备在某一段时间内（譬如，洪水期，通航期）连续保持能工作状态的特性。

耐久性——在规定的技术维护和检修制度下，设备在极限状态到来前，保持能工作状态的特性。

可维修性——设备有预防和发现故障和损坏原因的适应特性，以及通过技术维护和检修来维持和恢复工作状态的适应特

性。

可保全性——设备在停运期（例如，对于主要设备在枯水期和非航运期；对于检修设备在非检修期；对于事故备用设备在水工建筑物和机械设备的正常运行期）保持无故障率、耐久性和可维修性各项指标值的特性。

依照国家标准 27.002-83，机械设备区分为 4 种状态：1) 完好的（能工作的）；2) 带病的（但能工作的）；3) 不能工作的（带病的）；4) 极限的。

完好的状态，是指机械设备处于符合技术规范和设计文件的一切要求的状态。

带病的状态，是指机械设备处于不符合技术规范和设计文件要求（哪怕一项）的状态（例如，设备的运动部分润滑不够，过热）。

能工作的状态，是指机械设备处于这样一种状态，反映其实现指定功能能力的各参数值均符合技术规范和设计文件的要求。与此同时，因其他不直接反映实现指定功能能力的参数值的不同，设备可能处于良好状态，也可能处于带病状态，即能工作的概念比完好的概念更广泛。

不能工作的状态，是指机械设备处于这样一种状态，即反映其实现指定功能能力的各参数值中，即使只有一项不符合技术规范和设计文件中的要求。相对于带病的状态而言，不能工作状态的概念要窄一些。

极限状态，是指机械设备所处的状态，按其担负的任务已不容许或不宜于继续使用，或者不可能或不宜于将其修复到完好或能工作的状态。由定义可知，倘若从安全运行的基本要求出发或者由于无必要让水利枢纽冒出事故的大风险，因而不允许继续使用机械设备，即使机械设备仍然是能工作的，但唯恐它处于极限状态。例如，闸门承载结构在运行中产生了严重的腐蚀，使其有遭破坏的危险。与此同时，处于不能工作状态的设备，即使经过

修复（从经济上是合理的）其工作能力也未必能达到可使用的极限状态。例如，闸门的个别构件（轮子、拉杆、吊耳）的破坏，使闸门进入不能工作状态，这种情况在检修过程中，可以比较简单地予以排除。因此，极限状态的概念与不能工作状态的概念常常是但不总是是一致的。

设备或其部件从完好状态向带病（但能工作）状态转换中的事件称为损坏。从完好或带病状态向不能工作状态转换中的事件称为故障。

尽管不久前存在一种意见，认为在计算中加大要采用的安全系数，就是以保证结构无故障地运行，然而工程结构和设备故障不断出现的情况表明，将其完全排除是不可能的。而这种方法却会导致设备（结构）的重量和金属耗用量增加，造价提高，运行指标和经济指标趋于恶化。产生故障和损坏的可能性不能完全排除的原因在于：

1. 任何工程结构都是许多部件的复杂组合，其工作能力既决定于部件间的相互作用，也决定于部件本身的质量和特性。在结构设计中，不可避免地要将其结构简化，然而即使是最完全的计算图式，也不可能完全反映出实际结构的所有特点。

2. 在运行过程中，作用于结构部件上的是大量互有联系的因素，这些因素在目前不是都能给予严格的定量评价的。最难以考虑的是与设备的制造、安装、检修和运行有关的因素的计算。甚至在利用电子计算机时，设计人员也不是考虑所有的，而仅仅考虑部分起作用的因素，其余的因素显然是不考虑的。

3. 结构及其部件的状态在运行中并不是常数，而是随时间变化的，部件的老化和磨损是不可避免的，因此结构和设备不可能是“永远不坏的”。

关于结构的工作和故障的概念，确定论的方法正在被概率论方法所取代。后者认为故障的可能性，是工程结构的“天然”性质，是根本不可能包罗万象地考虑到所有因素的结果，诸如外部