

长江水利委员会  
大中型水利水电工程技术丛书

# 水工金属结构

主 编 杨逢尧

副主编 魏文炜



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

长江水利委员会  
大中型水利水电工程技术丛书

# 水工金属结构

主 编 杨逢尧  
副主编 魏文炜



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

## 内 容 简 介

本书系“大中型水利水电工程技术丛书”的《水工金属结构》卷。主要内容是水电工程钢闸门、启闭设备、压力钢管、钢结构防腐蚀等在科研、设计、制造、安装及运行中遇到的技术问题的分析总结。书中列举的实例主要是长江委勘测设计研究院 50 多年来在各项工程建设中所累积的具有代表性的经验。此外，本书还对国内外本专业有代表性的工程实践作了一些介绍。

本书可供从事水利水电工程金属结构专业的科技人员及有关高等院校师生参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

水工金属结构 / 杨逢尧, 魏文炜编. —北京: 中国水利水电出版社, 2005

(长江水利委员会大中型水利水电工程技术丛书)

ISBN 7-5084-3037-9

I. 水... II. ①杨... ②魏... III. 水工结构: 金属结构 IV. TV34

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 063777 号

书 名	长江水利委员会大中型水利水电工程技术丛书 水工金属结构
作 者	主编 杨逢尧 副主编 魏文炜
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 17 印张 403 千字 1 插页
版 次	2005 年 9 月第 1 版 2005 年 9 月第 1 次印刷
印 数	0001—4000 册
定 价	48.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

# 大中型水利水电工程技术丛书

## 编辑委员会

主 任 文伏波

副 主 任 郑守仁 傅秀堂 洪庆余

委 员 潘天达 王忠法 陈雪英 成昆煌 刘一是

季昌化 郑允中 张继良 马建华 杨 淳

夏仲平 李常发 赵纯厚 钮新强 岳中明

郭熙灵 郭 玉 翁立达 袁达夫 徐麟祥

宋维邦 程卫民 董学晟 季学武 陈德基

周少林 杨甫生 魏山忠 胡甲均 史光前

秘 书 长 赵纯厚

秘 书 廖志丹 刘国利 龚国文

## 本书编著者名单

主 编    杨逢尧  
副主编    魏文炜

章 次	作 者
第 1 章	杨逢尧
第 2 章	李锦云 (2.1、2.3、2.4、2.5)    陈美娟 (2.2)    莫青松、 石运深 (2.3、2.5)    叶士林 (2.4)    徐永蔚 (2.4、2.5) 史兵 (2.6)    杨清朗、李亚非、洛文 (2.7)
第 3 章	李锦云 (3.1、3.3、3.6、3.7)    徐元发、卜建欣、陈美娟 (3.2)    田连治 (3.4、3.5)    熊绍钧 (3.8)
第 4 章	杨清朗、陈美娟 (4.1)    王鹏飞 (4.2)    汪鲁明 (4.3) 王永权 (4.4)    杨天清 (4.5)
第 5 章	杨逢尧 (5.1)    郭晓石 (5.2)    董国威、汤长书、闫如义 (5.3)    魏文炜 (5.4)    胡亚安、吴小宁、伍友富 (5.5) 伍友富、曾晓辉 (5.6)    彭翰新 (5.7、5.9)    刘小敏 (5.8) 宁源 (5.9)    彭定中、刘小敏 (5.10)
第 6 章	曾德龙    田连治
插 图	王可
全书统稿	杨逢尧    李锦云

# 序

水工金属结构是水利水电工程中不可缺少的组成部分，对保证工程安全正常运行和充分发挥防洪、发电、通航、灌溉和供水等效益具有重要作用。一般而言，水工金属结构主要包括用于泄水、引水、发电和通航等建筑物的各类钢闸门和相应的启闭设备。根据长江流域水利水电工程建设的需要和专业分工，长江水利委员会（简称长江委）金属结构专业的范围还包括升船机设备、发送电铁塔、引水压力钢管以及工程专用钢桥等内容。

新中国成立 50 多年来，随着长江水利水电建设事业的蓬勃发展和长江委综合技术力量的不断壮大，水工金属结构专业从小到大，经过工程实践的锻炼，已形成了一支人员齐备、经验丰富、专业特色鲜明和具有高水平的设计队伍。所完成的江汉平原防洪工程和陆水蒲圻、汉江丹江口、王甫洲，赣江万安，清江隔河岩、高坝洲，以及长江干流葛洲坝等大中型水利枢纽的各种类型的金属结构设计成果，经受了运行实践的考验，在枢纽运用上发挥了重要作用。其中，丹江口升船机获国家科学大会金奖，葛洲坝二江泄水闸“上平下弧”双扉闸门获国家级科学技术进步奖，大江 1 号船闸人字门获国家计划经济委员会产品银质奖，援外工程斯里兰卡高压闸阀获国家计划经济委员会产品金质奖，清江隔河岩压力钢管等

多个设计项目也获得了有关部门的奖励。

葛洲坝船闸的设计与制造，凝聚了我国许多水电、机械、交通工程专家和技术人员的智慧，长江委的工程技术人员与大家一起，在科研论证的基础上，承担了世界上规模最大的船闸闸门和启闭机设计，使我国在大型船闸设计建造技术方面跃居世界前列。另外，二江泄水闸闸门大胆而新颖的设计以及填补我国水工建筑空白的垂直提升式公路铁路两用桥设计，代表了我国水电工程金属结构设计的新水平。

三峡工程规模宏大，用于泄洪、发电及通航等建筑物的金属结构和机械设备不仅种类繁多、数量巨大，而且设计制造技术复杂，可资借鉴的成熟经验缺乏。三峡工程水工金属结构的关键技术问题有：船闸大淹没水深的人字门启闭机技术；超大型人字闸门的结构以及顶、底枢等关键部件的设计及选型；永久船闸输水廊道反向弧形工作阀门的水力学问题与结构设计；泄洪深孔弧形工作闸门非突扩止水型式；电站进水口低底坎、大孔口快速事故闸门结构及支承型式以及大型压力管道伸缩节技术等，这些都是国际水平的技术问题。从20世纪80年代中期开始，国家有关部门已将三峡工程重大装备问题列入国家重点科技攻关项目，组织设计部门和科研部门、高等院校及大型企业的专家和科技人员共同攻关研究，经历“八五”、“九五”两个阶段的不懈努力，已提出了大量具有先进水平的、可供工程应用的研究成果，为三峡工程的金属结构与机械设备设计和制造提供了坚实的技术基础。目前除右岸三期工程外，大量的金属结构设备已于2003年投入运用，经受了工程实践的考验。

长江委在中国水利水电出版社的积极支持下，组织编写了“大中型水电工程技术丛书”，其中《水工金属结构》分册旨在通过总结以往的设计与科研成果，促进金属结构专业的科技交流。目前，水利水电工程水工金属与机电设备的设计与制造技术，逐步朝着集成控制化方向发展，特别是新型的金属材料与焊接、止水、闸门支承材料、金属结构防腐蚀的应用，以及设计制造工艺的不断创新，提高了水利水电枢纽工程安全的可靠性和整体的先进性。我们期待着与国内外同行交流，共同将水工金属结构专业水平和科研水平提高到一个新的台阶，以促进我国水利水电工程建设技术的不断进步和发展。

中国工程院院士 文 伏 波

2005年5月于武汉

# 总序

长江水利委员会（简称长江委）是长江流域水资源和水行政主管部门，也是我国水利水电方面一个有影响的科研设计部门。50年来，它编制和定期修订长江流域综合利用规划和长江防洪规划等专业规划，设计了三峡、丹江口、葛洲坝、乌江渡、万安、隔河岩和南水北调等大中型水利水电工程，并参与了工程施工、工程监测和调度运行管理。通过这些工程实践，长江委科技人员不仅理论联系实际地解决了许多复杂的技术难题，还积累了丰富的经验，造就了一批专家。有感于这些经验目前处于分散无系统的状态，为了使专家们的经验和智慧能集中起来，并使之系统化，力求升华为理论，使这笔知识财富长久保存持续利用，我们在长江委领导和中国水利水电出版社的积极支持下，组织编写了这套“大中型水利水电工程技术丛书”。

本丛书是以系统总结长江委治理开发长江水资源的工作为主，随着治江事业的持续发展，将不定期分阶段出版。作为丛书第一批共有16本，其内容是：长江流域综合利用规划研究、工程水文与水资源评价、长江河道演变与治理、长江水利枢纽工程泥沙研究、水利水电枢纽施工技术、导截流及围堰工程、水工混凝土温控与防裂、水工岩石力学、水库移民工程、通航建筑物、水工



金属结构、水利枢纽工程质量标准及监控、水文气候预测基础理论与应用技术、长江流域水利水电工程地质、高坝缓倾角软弱夹层地质、三峡工程与可持续发展等。这些方面是长江委多年反复研究实践的重点，且最富成果和创见的领域。本丛书将分册陆续出版，各册合在一起是一套系统的技术丛书，分开来又各自独立成书，以便从事水利水电工程技术的人士参考使用。

长江委在科研设计工作中一贯重视学习他人的经验，积极收集和研究国内外科技信息。借本丛书出版之机，特将世界江河与大坝的有关资料整理出版，作为一本综合性的工具书以飨读者。

本丛书为应用技术类图书，它是实践经验的系统总结，是理论与实践结合的结晶。它既不同于教科书，也不同于论文集。我们希望这套丛书有助于促进我国大中型水利水电工程技术的发展。本丛书可作为从事水利水电工程的科技工作者的工具书，也可作为年轻的水利水电工作者和学生的学习参考书，以帮助新一代水利水电科技专家的成长。

在我们几十年的实践中，不断学习和融合了国内许多专家的智慧和经验。在成书之际，谨向他们致以敬意和谢意！

**长江水利委员会技术委员会**

二〇〇三年十月

# 前言

《水工金属结构》是长江委主编的“大中型水利水电工程技术丛书”中的一个分册。水工金属结构设备，是水利枢纽的重要组成部分，是水利水电工程实现水库调度、电站发电、枢纽通航及供水等控制功能的重要设施。故此其设计、制造与安装质量，不仅关系到枢纽工程的正常运行和经济效益的充分发挥，而且直接影响到工程的安全。同时，在水利水电工程建设中，这些金属结构设备的设计、制造、安装、监造、调试等涉及诸多部门，专业性强，技术复杂，管理、协调和调度都很细密，因此，它也是整个水利水电设计工作中的重要专业。

新中国成立 50 多年来，在长江水利水电建设事业的蓬勃发展过程中，长江委的水工金属专业队伍从无到有，不断壮大，在经历了荆江分洪、鸭河口、陆水、丹江口、葛洲坝、隔河岩、高坝洲、万安、王甫洲到举世瞩目的三峡工程以及长江堤防隐蔽工程等大中型水利水电工程设计和施工建设工作的实践，不断借鉴国内外的科技新成果和吸收有益的经验，在完成大量的设计和科研工作中，解决了诸多技术问题，取得了重大的成就，积累了丰富的经验。在此基础上编写《水工金属结构》一书，借此与国内同行互相交流，共同促进我国水工金属结构专业技术的发展，进一步提高专业设计和科研水平，以

造福于人民。

本书主要以长江委所设计的长江流域工程为主，并对国内外有代表性的工程实践有所涉及。针对一些工程在科研、设计、制造、安装及运行中遇到的重要技术问题进行分析总结，进一步探索解决一些关键技术问题的相关措施和理论认识。

本书共分6章。第一章为绪论。叙述金属结构设备在水利水电工程的应用和发展。

第二章为泄洪建筑物金属结构。着重介绍陆水、丹江口、葛洲坝、万安、隔河岩、高坝洲以及三峡等水利枢纽泄洪建筑物的闸门及启闭机械的选型和布置。并就平板闸门底缘及门槽水力学、滑动支承、定轮支承的试验和设计、无门槽反钩式闸门、弧形闸门止水型式与布置等闸门设计中比较重要的技术问题作了说明。此外，对弧形闸门启闭机的设计经验也作了介绍。

第三章为水电站厂房金属结构。介绍了一些水电站进口拦污栅及导漂排设计和运行情况，其中包括三峡水电站进口管型结构拦污栅，万安、葛洲坝、王甫洲等中、低水头电站拦污栅受损和失稳破坏的情况；葛洲坝二江电站导漂排失败的教训。此外还介绍了确定快速闸门胸墙高度，电站进口闸门分节安装等方面的经验以及电站排沙孔高压阀门式工作闸门与衬砌设计和快速闸门液压启闭机设计情况。

第四章为水电站压力钢管。除介绍部分水电站的几种布置和有关参数外，重点介绍了在隔河岩、丹江口和三峡水电站等工程的压力钢管采用爆破法消除焊接残余应力的技术经验和隔河岩水电站双向伸缩节和三峡水电站河床坝段压力钢管附加内波纹的套筒式伸缩节的设计方案。

第五章为水利枢纽大型船闸金属结构。较详细地总结了万安、葛洲坝船闸的设计运行经验，并着重对葛洲坝船闸大型人字闸门部分焊缝出现裂纹的现象进行了理论探索，并据此在三峡五级船闸人字闸门设计中针对导致焊缝出现裂纹的低周高应疲劳作用采取了相应的技术对策。人字闸门启闭力的确定是人字闸门启闭机设计中最主要问题，书中阐述了长江委协同有关科研单位对机械四连杆式和液压直推式两种启闭机相应的动水阻力长期研究成果，特别是无级调速技术试验研究成果作了详细介绍。并在此基础上对人字闸门启闭机的选型和关键的设计技术问题作了介绍。此外，还以三峡船闸反向弧形阀门为主要对象对船闸输水廊道工作阀门及其启闭机技术问题进行了论述

和讨论。本章对应用于船闸上闸首的两种不同型式的活动桥的设计也作了介绍。

第六章为水工金属结构防腐蚀设计。水工金属结构防腐蚀问题从工程安全、维护费用消耗和环境保护等各个方面日益引起各方面的重视。本章总结了丹江口、葛洲坝等工程防腐蚀工作的经验教训，并重点介绍了三峡工程水工金属结构防腐蚀技术室内、外科学试验，专家论证等方面的成果和防腐蚀设计方案和实施工艺。实践证明三峡工程金属结构的防腐工程技术水平较以往水利水电工程有了较大的提高。这将会对工程的安全运行、降低维护成本、提高综合经济效益带来明显效果。

本书承中国工程院院士文伏波、郑守仁，国家设计大师洪庆余以及刘一是、成昆煌、郑允中、徐一心、赵纯厚等专家审查，提出了许多宝贵的修改补充意见，在此特向他们表示衷心感谢和致以崇高的敬意。已故的原长江委技术委员会委员、长江委金属结构专业学术带头人王既民教授，为创建长江委金属结构专业和对本书的编写等付出艰辛的劳动，倾注了大量的心血，在此深表怀念。

本书中引用了国内其他工程一些可贵的资料和其他有关单位的经验总结，在此深表谢意。所引用的资料数据中，如有不足或不确之处，由编者负责。由于编著者水平和经验有限，疏漏之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

**编著者**

2005年5月

于武汉

# 目 录

序

总序

前言

<b>1 绪论</b> .....	1
1.1 水利水电工程中金属结构设备的作用 .....	1
1.2 长江委金属结构专业的发展 .....	1
1.2.1 新中国成立初期平原建闸的金属结构设计 .....	1
1.2.2 综合性工程的金属结构设计研究 .....	2
1.2.3 葛洲坝工程的金属结构设计 .....	3
1.2.4 三峡工程论证及万安、隔河岩工程的金属结构设计 .....	4
1.2.5 三峡工程的金属结构设计 .....	5
1.3 本书主要内容 .....	6
1.4 结语 .....	7
<b>2 泄洪建筑物金属结构</b> .....	9
2.1 概述 .....	9
2.1.1 陆水蒲圻水利枢纽 .....	10
2.1.2 丹江口水利枢纽 .....	10
2.1.3 葛洲坝水利枢纽 .....	12
2.1.4 万安水利枢纽 .....	13
2.1.5 隔河岩水利枢纽 .....	14
2.1.6 高坝洲水利枢纽 .....	15
2.1.7 三峡水利枢纽 .....	17
2.1.8 五强溪水利枢纽 .....	17
2.1.9 龙羊峡水利枢纽 .....	19
2.1.10 小浪底水利枢纽 .....	19
2.2 无门槽反钩闸门在深式泄水孔的设计与运用 .....	19
2.2.1 无门槽反钩闸门的特点 .....	19
2.2.2 反钩闸门在深式泄水孔中的运用与发展 .....	20
2.2.3 国外类似反钩闸门的运用 .....	21
2.3 闸门水力学有关问题的试验研究与设计运用 .....	21
2.3.1 闸门门槽水力学 .....	21

2.3.2	闸门底缘水力学 .....	28
2.3.3	三峡水利枢纽深孔泄洪弧形工作闸门水力特性与流激振动试验研究 .....	33
2.4	平板闸门支承结构研究与运行 .....	36
2.4.1	平面滑动支承 .....	36
2.4.2	轮式滚动支承 .....	39
2.5	高压闸门的止水设计布置与运行 .....	44
2.5.1	闸门止水设计布置 .....	45
2.5.2	闸门止水型式的比较 .....	46
2.5.3	前苏联深孔弧形闸门的水封型式 .....	48
2.5.4	英古里水电站的水封型式 .....	52
2.5.5	丹江口、葛洲坝、三峡等工程弧形闸门的水封布置 .....	52
2.6	弧形闸门启闭机 .....	54
2.6.1	启闭机的型式与布置 .....	55
2.6.2	弧形闸门启闭设备的发展 .....	58
2.6.3	固定卷扬式启闭机 .....	59
2.6.4	液压启闭机 .....	64
2.7	长江中下游水闸金属结构 .....	77
<b>3</b>	<b>水电站厂房金属结构</b> .....	<b>79</b>
3.1	概述 .....	79
3.2	拦污栅 .....	80
3.2.1	万安水电站拦污栅 .....	80
3.2.2	王甫洲水电站拦污栅 .....	80
3.2.3	葛洲坝二江水电站拦污栅 .....	81
3.2.4	三峡水电站拦污栅 .....	82
3.3	水电站进水口闸门胸墙设计的有关问题 .....	82
3.4	闸门结构分节、止水及平压设施等的有关问题 .....	85
3.4.1	闸门结构分节 .....	85
3.4.2	止水与平压设施 .....	87
3.5	水电站排沙孔金属结构 .....	88
3.5.1	布置 .....	89
3.5.2	选型 .....	89
3.5.3	钢衬设计 .....	91
3.6	闸门的预制安装门槽 .....	93
3.6.1	预制门槽的特点 .....	93
3.6.2	安装 .....	94
3.7	Γ型双扉门设计与运行 .....	96
3.8	进水口快速闸门启闭机 .....	98
3.8.1	快速闸门启闭机的选型 .....	99

3.8.2	快速闸门液压启闭机的设计	101
3.8.3	快速闸门启闭机的安装调试与试运行	107
3.9	水电站拦漂导漂设施	108
3.9.1	葛洲坝二江电站导漂排设计及运用情况	108
3.9.2	柘溪等水电站拦漂排运用情况	110
<b>4</b>	<b>水电站压力钢管</b>	<b>113</b>
4.1	概述	113
4.1.1	丹江口水利枢纽引水钢管	115
4.1.2	隔河岩水电站	116
4.1.3	五峰锁金山水电站引水钢管	118
4.1.4	三峡水利枢纽压力管道	120
4.2	用爆炸法消除焊接残余应力在水电站压力钢管中的应用	123
4.2.1	问题的提出	123
4.2.2	爆炸消除焊接残余应力的进展与动态	123
4.2.3	爆炸法消除焊接残余应力的简单机理	125
4.2.4	试验情况	125
4.2.5	三峡压力钢管采用爆炸法消除焊接残余应力	129
4.3	压力钢管伸缩节	129
4.3.1	伸缩节的作用	129
4.3.2	伸缩节的类型	130
4.3.3	丹江口水利枢纽压力钢管伸缩节	131
4.3.4	清江隔河岩水利枢纽引水钢管伸缩节	132
4.3.5	三峡水利枢纽压力钢管加设内波纹水封的套筒式伸缩节	133
4.4	钢材选择	139
4.4.1	我国压力钢管用材的发展过程及趋势	139
4.4.2	压力钢管选材的基本原则及应注意的问题	140
4.4.3	钢材的特性	141
4.4.4	国内外几个大型压力钢管的选材	142
4.5	水压试验	145
4.5.1	水压试验问题的提出	145
4.5.2	水压试验的目的及作用	146
4.5.3	水压试验的工程实例	146
4.5.4	水压试验必要性的讨论	146
<b>5</b>	<b>大型船闸金属结构</b>	<b>147</b>
5.1	概述	147
5.2	船闸的检修闸门和事故闸门	147
5.2.1	检修闸门和事故闸门的布置	147
5.2.2	葛洲坝船闸上闸首事故检修门的布置	148

5.2.3	万安船闸	149
5.2.4	三峡船闸	149
5.3	大型人字闸门设计、运行中的问题与处理措施	151
5.3.1	人字闸门的组成	152
5.3.2	人字闸门的平面布置	152
5.3.3	人字闸门的门体结构设计	153
5.3.4	顶枢	160
5.3.5	底枢	163
5.3.6	支、枕垫	165
5.4	大型船闸人字闸门启闭机的设计研究	167
5.4.1	大型船闸人字门启闭力技术问题的提出与由来	168
5.4.2	人字闸门运行启闭力的研究	170
5.4.3	船闸人字闸门启闭机的设计	184
5.5	高水头船闸输水阀门的水力学问题	195
5.5.1	阀门段廊道及门体动水荷载特性	195
5.5.2	阀门段及阀门防空化措施	197
5.5.3	阀门启闭力	200
5.5.4	阀门支铰荷载特性分析	201
5.5.5	阀门结构优化与阀门流激振动特性	201
5.5.6	高水头船闸阀门流激振动特性原型观测结果	202
5.6	输水阀门及其启闭机设计与运行中的问题及处理措施	203
5.6.1	高水头船闸输水工作阀门的门型选择	205
5.6.2	阀门设计	206
5.6.3	输水阀门启闭机的设计	215
5.7	船闸工作闸门的防撞装置	217
5.7.1	葛洲坝2号船闸	217
5.7.2	前苏联船闸中的典型防撞装置	218
5.7.3	其他船闸的防撞装置	218
5.7.4	三峡船闸防撞警戒装置	218
5.8	通航建筑物大型叠梁门设计	220
5.8.1	叠梁门结构布置	220
5.8.2	三峡船闸上闸首叠梁门结构设计	221
5.8.3	吊耳设计	223
5.8.4	支承材料的选用	223
5.8.5	埋件设计	224
5.9	浮式检修门的设计与应用	226
5.9.1	门型方案的比选	226
5.9.2	浮门的主尺度与布置	226



5.9.3	设计的关键技术 .....	227
5.9.4	浮门的试验与运行 .....	229
5.10	通航建筑物中的活动桥 .....	229
5.10.1	葛洲坝水利枢纽的活动桥 .....	230
5.10.2	王甫洲水利枢纽的活动桥 .....	240
<b>6</b>	<b>水工金属结构防腐蚀 .....</b>	<b>245</b>
6.1	概述 .....	245
6.2	涂装设计 .....	247
6.2.1	环境条件和使用工况 .....	247
6.2.2	保护年限 .....	247
6.2.3	科学试验 .....	247
6.2.4	涂装配套体系 .....	249
6.3	涂装施工 .....	251
6.3.1	表面预处理 .....	251
6.3.2	涂料涂装 .....	252
6.3.3	热喷金属涂装 .....	252
6.4	质量检验 .....	252
6.4.1	表面预处理 .....	253
6.4.2	涂料涂装 .....	253
6.4.3	热喷金属涂装 .....	253
	<b>主要参考文献 .....</b>	<b>254</b>