

葛洲坝电站水轮发电机组 改造增容技术

主编◎张 诚



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

葛洲坝电站水轮发电机组 改造增容技术

主 编◎张 诚

副主编◎薛福文 王 宏 熊 浩 韩 波



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书从项目总体策划、方案比选、结构设计、安装工艺、试验及效果评价等方面,对葛洲坝电站机组改造增容进行全面总结。

全书共分五篇。第一篇概述项目确立的背景、可行性研究情况、机组技术特性;第二篇回顾机组改造增容方案研究比选的过程;第三篇介绍机组改造增容结构设计;第四篇叙述机组改造增容施工过程;第五篇介绍机组改造增容后试验及评价。

本书可为国内外水电站机组更新改造增容提供借鉴与参考,也可作为水轮发电机组设计制造、检修技改、安装施工等人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

葛洲坝电站水轮发电机组改造增容技术 / 张诚主编
— 北京: 中国水利水电出版社, 2017. 8
ISBN 978-7-5170-5944-8

I. ①葛… II. ①张… III. ①葛洲坝—水轮发电机—
发电机组—扩容改造 IV. ①TM312.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第248721号

书 名	葛洲坝电站水轮发电机组改造增容技术 GEZHOUBA DIANZHAN SHUILUN FADIAN JIZU GAIZAO ZENGRONG JISHU
作 者	主 编 张 诚 副主编 薛福文 王 宏 熊 浩 韩 波
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 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	北京印匠彩色印刷有限公司
规 格	170mm×230mm 16开本 20.75印张 396千字
版 次	2017年8月第1版 2017年8月第1次印刷
印 数	0001—1300册
定 价	198.00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

《葛洲坝电站水轮发电机组改造增容技术》

编 委 会

主 任 张 诚

副 主 任 薛福文 王 宏

委 员 熊 浩 韩 波 吴 炜 肖 荣 王金涛
宋晶辉 张 潮 黄 明 余 雷 董晓英
曾广栋 孙 昕

统 稿 韩 波

编写人员 刘 斌 吴 江 朱凤弟 褚建华 胡成学
李 冲 丁万钦 贾利涛 郭聪聪 黄 雄
杨小龙 覃 鹏 陈 涛 罗建厅 刘 扬
关 博 王京国 王 翔 王俊青 鲍 鹏
马 龙 张春辉 邱 涛 刘荣仁 杨 杰

审稿人员 吴 炜 徐 进 付海涛

前

言

FOREWORD

葛洲坝——万里长江第一坝，是中国水电建设史上的一座丰碑。奠基于 20 世纪 70 年代初，竣工于 80 年代末。葛洲坝水利枢纽位于长江西陵峡出口、南津关下游约 2.3km 处的湖北省宜昌市境内，具有发电、航运、防洪、灌溉等综合效益，工程主体由挡水建筑物、泄水闸、冲沙闸、水电站厂房、通航建筑物等组成。

葛洲坝电站是长江干流上修建的第一座大型水电站，是世界上最大的河床式低水头径流式水电站。葛洲坝电站分为二江电站和大江电站，共装设有轴流转桨式水轮发电机组 22 台。二江电站装机 8 台，其中 0 号机组容量为 20MW，1 号、2 号机组容量为 170MW，其他 5 台为 125MW 机组，装机容量为 985MW；大江电站装机 14 台，均为 125MW 机组，装机容量为 1750MW。机组总装机容量为 2735MW，多年平均发电量为 157 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

葛洲坝电站 1981 年首台机组并网发电，1988 年最后一台机组投入运行，单机年平均运行小时数在 6000h 以上，与一般同类电站年平均约 4000~4500 运行小时相比，可比拟的机组实际寿命已大大超过 30 年，存在运行安全隐患。为保障葛洲坝电站长期安全稳定运行，需对机组进行更新改造，以改善机组运行性能，增加设备使用寿命。同时，在不改变葛洲坝电站已有土建工程和水库运行条件的情况下，通过新技术、新材料、新工艺的应用，可适当增加葛洲坝电站的单机容量暨总装机规模，有利于发挥三峡—葛洲坝电站联合运行的整体效益。

葛洲坝电站水轮发电机组改造增容的研究工作自 1998 年开始立项，经过多年的论证和研究，2006 年，中国长江电力股份有限公司成功完成了第一阶段 2 台机组的试验性改造增容。2007 年，在首批试验机组改造的经验基础上，为进一步提高三峡电站投运后的葛洲坝电站的汛期水能

利用率，启动了第二阶段改造增容研究。2012年，新研发的水轮机转轮模型通过了专家评审，改造后机组的额定功率达到150MW。目前，葛洲坝电站19台125MW机组水轮机部分的改造工作已全部完成，发电机部分的改造工作已完成8台，根据陆续投产的机组运行情况验证，改造增容达到了预期目标。

中国长江电力股份有限公司在葛洲坝电站水轮发电机组改造增容的可行性研究、结构设计、设备制造、安装工艺、试验与效果评价各阶段都做了大量细致、全面的工作。在认真总结葛洲坝电站机组改造增容经验的基础上，精心组织编写《葛洲坝电站水轮发电机组改造增容技术》，为水电站工作人员开展机组改造增容技术交流、推动机组安装检修技术的不断进步提供借鉴与参考。

《葛洲坝电站水轮发电机组改造增容技术》凝聚着长江电力检修厂广大生产技术及管理人員的智慧和心血，本书编写历时两年。书中详细介绍了葛洲坝电站水轮发电机组改造增容的原因、背景、结构设计、改造范围、实施过程、改造效果，并介绍了机组相关配套设施的改造。为了帮助读者更好地理解书中内容，本书还辅以大量的图表和图片，力求内容丰富、直观易懂。

本书由曾担任中国长江电力股份有限公司总经理、现任中国长江三峡集团公司副总经理张诚确定写作框架并审核定稿，中国长江电力股份有限公司副总经理薛福文、总工程师王宏、检修厂厂长熊浩拟定编写大纲，检修厂总工程师韩波负责统稿，吴炜、徐进、付海涛负责审稿。本书第一篇与第二篇由刘斌、朱凤弟、杨小龙、覃鹏、关博、王京国、王翔、邱涛等执笔；第三篇由吴江、褚建华、贾利涛、郭聪聪、罗建厅、刘扬等执笔；第四篇由胡成学、李冲、黄雄、王俊青、鲍鹏、刘荣仁、杨杰等执笔；第五篇由丁万钦、陈涛、马龙、张春辉等执笔。

本书是葛洲坝电站检修技术及管理人員工作经验的积累与总结，可为国内外水电站机组改造增容提供借鉴与参考，也可作为水轮发电机组设计、检修维护、安装施工等人员的参考用书。由于水电站安装检修技术创新日新月异，加之编者水平有限，书中难免有不妥之处，恳请广大读者提出宝贵意见。

作 者

2017年5月



目 录

CONTENTS

前言

第一篇 概 述

第一章 水轮发电机组改造增容简介	3
第一节 项目概况	3
第二节 机组改造增容可行性研究与决策	6
第二章 水轮发电机组主要技术特性	12
第一节 机组主要技术参数	12
第二节 机组结构	15

第二篇 水轮发电机组改造增容方案研究及选择

第一章 水轮发电机组改造增容总体方案确定	25
第一节 目标及基本条件	25
第二节 总体方案比选	26
第二章 153MW 水轮机改造增容方案	31
第一节 水轮机 CFD 分析	31
第二节 水轮机模型试验	33
第三节 水轮机部件及附属系统复核	39
第四节 水轮机主要改造范围	45
第三章 150MW 发电机改造增容方案	47
第一节 发电机电磁参数选择	47
第二节 发电机部件校核	50
第三节 发电机相关电气设备选择及复核	53

第四节	发电机主要改造范围	59
第四章	主变压器改造增容方案	61
第一节	主变压器参数选择及复核	61
第二节	主变压器改造范围	65
第三节	开关站容量复核	66

第三篇 水轮发电机组改造增容结构设计

第一章	水轮机改造增容结构设计	71
第一节	转轮	71
第二节	主轴密封	79
第三节	水导轴承	82
第四节	支持盖	84
第二章	发电机改造增容结构设计	87
第一节	定子	87
第二节	转子	95
第三节	发电机配套设备	99

第四篇 水轮发电机组改造增容施工

第一章	水轮发电机组改造工期控制及流程	107
第一节	机组改造工期控制	107
第二节	机组拆卸及回装流程	109
第三节	机组改造中心及高程确定	111
第四节	机组改造设备监造	115
第二章	水轮发电机组拆卸	118
第一节	机组拆卸阶段检查及测量	118
第二节	机组拆卸	119
第三章	水轮机主要部件改造	129
第一节	转轮改造	129
第二节	主轴与缸盖同铰	142
第三节	主轴密封改造	143
第四节	水导轴承及导流锥改造	147
第五节	活动导叶立面密封改造	150
第六节	真空破坏阀改造	152

第七节	蜗壳门和尾水门改造	154
第四章	发电机定子改造	158
第一节	定子拆卸	158
第二节	定子铁芯安装	159
第三节	定子铁芯磁化试验	172
第四节	定子绕组安装	176
第五节	相关电气试验	189
第五章	发电机转子改造	196
第一节	转子磁极拆卸	196
第二节	转子磁极改造	198
第三节	转子高程及圆度调整	216
第四节	滑环及碳粉吸收装置改造	217
第五节	相关试验	221
第六章	发电机相关设备改造	225
第一节	发电机配电设备改造	225
第二节	发电机励磁变改造	231
第三节	推力轴承油雾吸收装置改造	233
第四节	制动器及粉尘吸收装置改造	235
第五节	机坑除湿装置改造	238
第六节	上导轴承改造	241
第七章	水轮发电机组回装	245
第一节	机组回装阶段检查及测量	245
第二节	机组回装	249

第五篇 水轮发电机组改造增容试验及评价

第一章	水轮发电机组启动试验	265
第一节	机组空转阶段试验	266
第二节	机组空载阶段试验	268
第三节	机组并列及负荷阶段试验	278
第二章	水轮发电机组性能试验	284
第一节	发电机参数测量试验	284
第二节	发电机温升试验	297
第三节	发电机效率试验	299
第四节	发电机进相运行试验	304

第五节 主轴应力及扭矩特性试验.....	306
第六节 机组全水头稳定性及相对效率试验.....	308
第三章 水轮发电机组改造增容评价.....	312
第一节 改造效果评价.....	312
第二节 改造效益评价.....	317
第三节 总结.....	318
参考文献	321

第一篇

概述



第一章 水轮发电机组改造增容简介

第一节 项目概况

葛洲坝水利枢纽是长江干流上修建的第一座大型水利水电工程，工程位于长江三峡出口南津关下游约 2.3km 处，距三峡坝址约 38km，距宜昌市中心约 6km。枢纽为 I 等大（1）型工程，正常蓄水位 66.0m，校核洪水位 67.0m，最低库水位 63.0m，设计洪水流量 $86000\text{m}^3/\text{s}$ ，校核洪水流量 $110000\text{m}^3/\text{s}$ 。工程沿坝轴线全长 2606.5m，由船闸 3 座、泄水闸 1 座、电站 2 座、冲沙闸 2 座及混凝土和土挡水坝等建筑物组成。

葛洲坝电站为厂坝结合的河床式低水头径流式电站，是华中电网的骨干电站之一，分为二江电站和大江电站，共装设有轴流转桨式水轮发电机组 22 台，总装机容量为 2735MW，电站多年平均发电量为 157 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。二江电站装机 8 台，其中 0 号机组容量为 20MW，1 号、2 号机组容量为 170MW，其他 5 台为 125MW 机组，装机容量为 985MW；大江电站装机 14 台，均为 125MW 机组，装机容量为 1750MW。二江电站发变组采用单元接线，升压至 220kV 与系统连接。大江电站发变组采用扩大单元接线，再联合后共 4 回架空进线接入 500kV 开关站。葛洲坝水利枢纽鸟瞰见图 1.1-1。



图 1.1-1 葛洲坝水利枢纽鸟瞰图

经毛泽东主席和中共中央政治局批准，葛洲坝工程于 1970 年 12 月开工，遵照“精心设计、精心施工”的精神进行工程建设。葛洲坝水利枢纽的胜利建成，解决了一系列水电工程遇到的关键性技术难题，把我国水利水电工程技术水平推上了一个新高度。1984 年，葛洲坝二江电站及开关站荣获水利电力部优秀设计奖；1985 年，葛洲坝二江工程获国家级优秀设计奖；同年，葛洲坝二江电站工程、三江电站工程及其水轮发电机组被评为国家科技进步特级奖；1987 年，葛洲坝电站 125MW 水轮发电机组荣获国家质量金质奖章，这是国家给予葛洲坝工程建设者的最高荣誉和奖励，葛洲坝工程及其水轮发电机组，能在较短时间内创造出优异的成绩，是在党中央和国务院的领导关怀下，各有关单位的领导、科技人员和广大工人辛勤劳动、团结奋斗的结果。

枢纽管理者在继承了该工程取得的成绩和荣耀的同时，也肩负着巨大的责任与压力。从长远看，工程的老化不可避免，枢纽各功能系统的主要设备和构件也会逐步出现各种问题。如何保证枢纽的长期安全稳定运行是枢纽管理者必须面对的一个课题和考验，这是一个艰巨而又复杂的问题。枢纽管理者一直高度重视这个问题，积极寻求解决问题的办法，密切关注水电及其他相关产业的最新动态，不断地将各种新技术、新材料、新工艺应用到葛洲坝电站日常的运行维护中，并逐步对电站的开关站、变压器、厂用变、技术供水系统、厂内排水系统、工业用气系统、电气控制盘柜等主辅设备及系统进行了改造升级，对拦污栅进行了更换。但是，作为水电站运行发电的核心，水轮发电机组随着累计运行小时数的增长，也同样面临着使用寿命问题。

葛洲坝电站的水轮发电机组，从 1970 年开始联合设计，经过 10 年研究、试验、设计、制造、安装，第一台机组于 1981 年投产发电。从技术上看，葛洲坝电站的水轮发电机组，居世界上特大型低水头水轮发电机组之前列。170MW 水轮机的转轮公称直径达 11.3m，是世界之冠。125MW 机组的尺寸重量虽较 170MW 机组略小，但以 10.2m 的转轮直径，在世界上是排名第三，是我国专为葛洲坝电站研制的新机型，其性能可与世界上同类型先进机组相媲美，标志着当代我国大型轴流转桨式机组的设计制造水平。国内外部分轴流式水轮机主要参数见表 1.1-1。

表 1.1-1 国内外部分轴流式水轮机主要参数

序号	电站名称（国家）	额定水头 /m	额定功率 /MW	额定转速 /(r·min ⁻¹)	转轮直径 /m	比转速 /(m·kW)	比速系数 K	单位流量 /(m ³ ·s ⁻¹)	投运年份
1	水口（中国）	47.0	204.0	107.0	8.0	393.0	2694	1.132	1993
2	舒里宾（哈萨克斯坦）	40.0	230.0	93.8	8.5	447.2	2828	1.440	1983
3	LAJEADO（巴西）	39.1	180.0	100.0	8.0	433.9	2713	1.316	2001

续表

序号	电站名称 (国家)	额定水头 /m	额定功率 /MW	额定转速 /($r \cdot \min^{-1}$)	转轮直径 /m	比转速 /($m \cdot kW$)	比速系数 K	单位流量 /($m^3 \cdot s^{-1}$)	投运年份
4	里加 III (瑞典)	39.0	181.7	107.1	7.5	468.0	2923	1.518	1981
5	Brisay (加拿大)	37.5	193.0	94.7	8.6	448.3	2745	1.300	1990
6	Caruachi (委内瑞拉)	35.6	180.0	94.7	7.8	462.0	2757	1.594	1993
7	平班 (中国)	34.0	135.0	107.4	7.2	480.6	2802	1.495	2002
8	高坝洲 (中国)	32.5	85.8	125.0	5.8	471.9	2690	1.575	1999
9	铜街子 (中国)	31.0	154.0	88.2	8.5	473.2	2635	1.413	1992
10	深溪沟 (中国)	30.0	168.4	90.9	8.5	531.3	2910	1.623	2010
11	拉福尔日 2 (加拿大)	27.4	153.3	85.7	8.5	535.3	2802	1.713	1996
12	银盘 (中国)	26.5	152.6	83.3	8.8	541.2	2786	1.653	2011
13	西津 (中国)	15.5	67.7	71.4	8.0	604.1	2378	1.983	2002
14	PEXI (巴西)	26.4	168.8	85.7	8.6	589.5	3026	1.930	2003
15	WANAPUM (美国)	24.4	111.9	85.7	7.7	528.5	2611	1.769	1995
16	万安 (中国)	22.0	103.0	76.9	8.5	518.0	2430	1.581	1990
17	大化 (中国)	21.5	103.0	76.9	8.5	533.1	2472	1.636	1985
18	YACYRETA (阿根廷)	21.3	154.0	71.4	9.5	612.0	2824	1.986	1994
19	草街 (中国)	20.0	128.2	68.2	9.5	577.2	2582	1.731	2008
20	乐滩 (中国)	19.5	153.1	62.5	10.4	597.0	2636	1.881	2005
21	Kelsey (加拿大)	18.9	96.2	78.3	8.1	616.0	2678	2.042	2002
22	葛洲坝 (中国)	18.6	175.5	54.6	11.3	592.0	2553	2.052	1981
23	葛洲坝 (中国)	18.6	129.0	62.5	10.2	581.0	2506	1.839	1981
24	葛洲坝 (中国)	18.6	153.0	62.5	10.2	632.9	2730	2.113	2014

随着三峡、向家坝、溪洛渡电站的陆续建成并投产发电，我国在机组的设计、制造水平方面基本与世界先进水平接轨，目前正在独立设计研发1000MW混流式机组，水轮机水力设计的手段、能力均有了长足的发展，积累了较为丰富的成功经验。当葛洲坝电站机组达到设计使用寿命后，是仅仅延用性能优异的原有设计对ZZ500转轮进行更换，还是利用目前最新的技术，通过科技创新开发新的转轮用于葛洲坝电站，需要枢纽管理者全面分析、深入研究、慎重决策。

经过大量的论证、研究、分析及试验，中国长江三峡集团公司决定为葛洲坝电站研发新的转轮用于替换将达到使用寿命的葛洲坝电站125MW机组转轮，并对发电机及其他相关部件进行升级改造，以重建机组机械性能，恢复并延长机组的运行寿命，并通过改造进一步提高机组的发电能力，为国家经济建

设做出更多贡献，使葛洲坝电站继续保持活力，创造新的辉煌。

葛洲坝电站机组改造增容的研究工作自 1998 年开始立项，经过多年的论证和研究，于 2006 年成功实施了首批两台机组的改造试验工作，验证表明通过叶片修型、发电机定转子局部改造，水轮发电机组功率可提高至 146MW。2007 年，中国长江电力股份有限公司（以下可简称“公司”）在首批试验机组改造的经验基础上，以尽可能提高三峡电站投运后的葛洲坝电站汛期水能利用率为目标，启动了 10.2m 及 11m 公称直径转轮的改造研究工作。通过中国三峡集团公司、长江勘测规划设计研究有限责任公司、哈尔滨电机厂有限责任公司、东方电机有限公司的不懈努力，2012 年，新研发的转轮模型通过了专家评审会，水轮机额定功率达到 153MW，最高效率 94.25%，额定单位流量 $2.113\text{m}^3/\text{s}$ ，且具有较好抗空化性能和稳定性指标。

在真机的结构设计和设备制造中，除了安排专业的人员负责驻厂监造外，公司还多次与制造厂家进行交流沟通，根据自身对原机组 30 多年的运行维护经验，对水轮机的结构及部件进行了优化，例如轮毂体外表面铺焊不锈钢层、新型叶片密封、自补偿式工作密封、斜楔式水导轴承间隙调整机构等，大大地提高了设备运行可靠性，减小了维护检修的工作量。

针对葛洲坝电站机组改造增发电量主要来自汛期的特点，根据电站流量、水头、出力关系的分析，葛洲坝电站机组改造增容计划并未按照传统的水轮机、发电机同时改造的模式进行安排，而是首先实施水轮机的改造工作，在改造初期每年安排 6 台水轮机的改造任务，发电机改造工作根据设备运行状态随后安排。

葛洲坝电站机组改造增容继续秉承“精心设计、精心施工”的精神，对工程的可行性研究、模型转轮研发、设备设计制造、安装与试运行各阶段都做了大量细致、全面的工作。目前，葛洲坝电站 19 台 125MW 机组水轮机部分的改造工作已全部完成，发电机部分的改造工作已完成 8 台，根据 4 年来陆续投产的机组运行情况验证，机组改造工程达到了预想目标。

第二节 机组改造增容可行性研究与决策

一、改造的必要性及目标

葛洲坝电站机组投入运行以来，平均年运行小时数在 6000h 以上，与一般同类电站年均运行小时相比，可比拟的机组实际寿命已大大超过 30 年，达到 45 年以上，机组存在水轮机叶片空蚀和磨损、发电机定子槽楔松动、线棒接头绝缘盒开裂、电晕腐蚀、部分定子铁芯压指松动等问题，影响机组安全稳定运行。

葛洲坝电站水轮发电机组生产于 20 世纪 70 年代末和 80 年代初,当年的材料、工艺水平以及性能指标与现在有一定的差异,按照 GB/T 15468—2006《水轮机基本技术条件》、IEC 62256 2008—01《水轮机、蓄能泵和水泵水轮机改造和性能改善》等相关规定及水轮发电机组运行状态,葛洲坝电站机组已经进入更新改造阶段。为保障葛洲坝电站机组长期安全稳定运行,有必要对电站机组实施改造以重新建立整机的机械性能,改善机组运行性能,消除长期运行带来的安全隐患,增加设备使用寿命。

葛洲坝电站机组数量较多,按照每年完成 3 台机组改造增容的速度进行测算,仅改造工程施工阶段就需要 7 年的时间,加上前期的可行性研究、水轮机转轮水力设计、改造部件结构设计、设备部件生产制造各环节,完成整个电站机组的改造任务需要 10 年以上时间,为此应在机组安全运行寿命范围内提前开展改造相关工作。

此外,葛洲坝电站 21 台机组改造前最大过流能力约为 $18000\text{m}^3/\text{s}$,三峡电站左右岸 26 台机组最大过流能力约为 $25000\text{m}^3/\text{s}$,加上三峡右岸地下电站 6 台机组后,三峡电站机组最大过流能力可达 $31000\text{m}^3/\text{s}$ 。为了充分发挥容量效益,三峡电站将尽可能承担电力系统尖峰负荷。尤其在汛期,即使径流总量并未超过葛洲坝电站满发流量(约 $18000\text{m}^3/\text{s}$),但由于三峡电站调峰运行,峰荷时下泄流量也将大大超过葛洲坝电站的满出力流量。虽然葛洲坝水库有一定的反调节库容,在三峡电站下泄的流量维持一段时间后,仍将不可避免地造成葛洲坝电站弃水,由于葛洲坝电站与三峡电站过流能力相差过大,影响三峡—葛洲坝电站联合运行的整体效益,有必要结合机组改造时机采用成熟工艺和新技术,尽可能增加机组的发电过机流量,提高水能资源利用率,这也符合我国能源发展战略。

根据葛洲坝电站机组的运行条件和自身特点,机组改造应实现两个主要的目标,一是通过改造恢复机组的运行稳定性能,延长机组的使用寿命;二是通过提高机组过机发电流量和效率最大程度上增加电站发电效益。

二、葛洲坝电站流量与发电关系特性

葛洲坝电站为厂坝结合的径流式水电站,三峡电站投运后,葛洲坝电站水文条件较 30 年前发生了一定的变化,作为三峡电站的反调节电站,其库水位在 $63.0\sim 66.0\text{m}$ 之间调节,有效库容很小,基本无调洪削峰作用。此外,为改善下游生态保障航运,三峡水库在枯水期向下游进行补水,葛洲坝电站最小下泄流量将维持在 $6000\text{m}^3/\text{s}$ 左右,不再出现 $3960\text{m}^3/\text{s}$ 的月平均流量。因此,机组的运行工况范围也发生了相应的变化。葛洲坝电站流量与水头、单机出力、电站总出力关系曲线见图 1.1—2。