

水利水电工程

理论探索与工程

实践文集

董毓新 著

SHUILI SHUIDIAN GONGCHENG
LILUN TANSUO YU GONGCHENG
SHIJIAN WENJI



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

水利水电工程

理论探索与工程

实践文集

董毓新
著

SHUILI SHUIDIAN GONGCHENG
LILUN TANSUO YU GONGCHENG
SHIJIAN WENJI



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本文集收录的论文,包括水库调节和调度,结构静、动力学基本理论与分析方法探讨,水电站压力管道结构分析,水电站机组钢筋混凝土支承结构、蜗壳及厂房结构动静力分析,水轮发电机组振动和混凝土大坝可靠度分析等,主要内容集中在水利水电工程学科领域的水电站建筑物和机组振动方面,是作者多年研究成果中有特色的代表性工作的概括。论文既有理论上和分析方法上的探索与创新,又紧密结合我国大型水电工程的建设实践,注重研究解决其中的关键技术问题。

本书可供规划、设计、科研、工程管理人员阅读,也可作为高等学校教学的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

水利水电工程理论探索与工程实践文集/董毓新著.

北京:中国水利水电出版社,2005

ISBN 7-5084-3360-2

I. 水... II. 董... III. ①水利工程—文集②水力发电工程—文集 IV. TV-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第125216号

书 名	水利水电工程理论探索与工程实践文集
作 者	董毓新 著
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
印 刷	北京兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16开本 25.5印张 611千字 4插页
版 次	2006年1月第1版 2006年1月第1次印刷
印 数	0000—2600册
定 价	68.00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

1996年在阅览室



1994年在日本参加国际学术会议



1957年与夫人在北京



2003年5月与夫人在大连



2002年8月与夫人和儿子摄于旅顺



2003年8月与夫人和长子全家摄于大连



1998年1月与夫人和次子全家摄于美国



1992年10月出席大连理工大学博士后联谊会成立大会（前排左四为董毓新教授）



1991年11月参加国际水力机械研究协调中心第二届理事会（前排右三为董毓新教授）



参加大连理工大学老科技工作者联合会会员代表大会
(董毓新教授为主席，前排右七)



1963年4月越南河内水电学院党委书记和院长欢送董毓新教授等二人回国



1996年1月董毓新教授70岁生日庆祝会上校党委书记林安西讲话



1996年1月董毓新教授70岁生日时
与博士生和博士后合影

2001年6月赵德海博士论文答辩会
会后合影



1998年5月给研究生授课

1994年4月与博士生一起讨论论文





1994年4月与博士生、博士后在校主楼前合影



1995年1月参加三峡工程主厂房技术设计审查专家会（左数第三为董毓新教授）



1999年11月参加三峡水电站压力管道取消伸缩节技术审查会



2001年4月参加红石电站厂房结构抗震加固研究成果评审会（前排左数第四为董毓新教授）



董毓新教授简介

董毓新，1926年2月出生于辽宁省铁岭市。1951年毕业于东北工学院，1951~1954年于哈尔滨工业大学及大连工学院研究生班学习，1955~1958年于前苏联莫斯科动力学院学习，获副博士学位。现为大连理工大学土木水利学院教授，博士生导师。兼任中国水力发电工程学会理事，东北水力发电工程学会副理事长，国际水力机械研究协调理事会理事，《中国水利百科全书·水力发电卷》主编。长期从事水利水电工程专业的教学和科学研究工作，主要研究方向为水轮发电机组振动和水电站建筑物结构分析。曾获光华奖等奖项，享受政府特殊津贴，是辽宁省优秀专家，多项研究成果获得部委级科技进步奖，发表学术论文百余篇。

序

2005年是董毓新教授从教五十五周年和八十华诞，为表示纪念和庆贺，他的学生和同事们自发组织，为其出版《水利水电工程理论探索与工程实践文集》，索序于我，遂得以先睹文稿，感慨良深，为书数语。

我与董教授是同辈人，从事同一专业，都是“中国水力发电工程学会”的发起人，但接触不是很多，只能说是神交和心仪吧。董毓新教授毕业于东北工学院，选派到哈工大研究生班学习，1954年转人大连理工大学执教。不久，国家公派赴莫斯科动力学院读研究生，获副博士学位。回国后，长期从事专业教学和科研工作，并作为技术负责人之一，参与大连英那河和碧流河工程设计；作为水电专家，赴越南支援其水利院技的建设。董教授承担过多项国家级和省部级的科研课题，参加过龙羊峡、刘家峡、安康、白山、二滩和三峡等重大工程的一些技术研究论证工作，特别是在承担三峡压力钢管结构分析方法及伸缩节技术研究、三峡水电站取消厂坝间伸缩节问题论证，以及三峡水电站主厂房动力分析与设计优化等研究课题中做出的努力，给我留下较深印象。我感到他是一位治学严谨、教导有方的导师，也是一位理论结合实践的研究人员，他为水电事业培养了大量人才，桃李满天下，也取得了丰富的科研成果，成就卓著。董毓新教授不愧是我国德高望重的水电前辈之一。

纵观收入该文集的论文，可以概要反映出作者的研究特色和学术成就。我认为可以指出以下几点：

首先，董教授能根据国家和事业发展需要，在广泛的领域中进行探索，并选准目标，敢于向不熟悉的方向进军，迎难而上，开辟了多个新的研究领域，有一种无畏的精神。作者在研究生期间主攻方向是水资源，以后他认为我国水电技术在结构和机组的动力特性分析方面是个弱项，就毅然转向这方面的研究。特别是，随着水轮发电机组向高水头、大容量发展，尤其是如研制和运行三峡这样巨型机组，机组运行的稳定性成为最关键的课题之一。而机组振动问题十分复杂，涉及到机械、电气、水力和结构等多个领域，解决难度很大，作者于20世纪70年代末即在国内率先开展机组振动的系统研究，从机组轴系统的振动、定子振动、水轮机振动到推力轴承和导轴承的动力润滑分析、机组及其支承结构（厂房）的耦联振动，进行了全面研究，取得了

卓越成就，令人钦佩。

其次，创新是科技进步的灵魂，作者的论文体现着创新的精神。例如在结构分析中较早地开展非线性分析的探索，对钢衬钢筋混凝土压力管道、蜗壳和伸缩节问题上都开展了不落窠臼的工作。在上述机组振动研究中更取得了许多创新性的成果。撰写的专著《水轮发电机组探动》是国内第一本系统论述机组振动的学术著作，至今仍然是该领域研究和技术人员的重要参考书。

创新道路是十分坎坷的，要取得成果必须有锲而不舍、求真务实的精神。例如，非线性结构分析的难度就很大，压力管道、蜗壳和伸缩节的非线性结构分析，不仅要考虑联合承载机理，还必须考虑混凝土开裂和开裂后的静动力特性、坝体与管道的相互作用以及坝体与厂房的相互作用等。作者能够探人分析，坚持不懈，进行了分布裂缝的动弹模研究，建立了协调元法，结合取消伸缩节和厂坝连接形式优选等实际工程问题，长时期开展技术攻关，其研究成果在李家峡和三峡等工程实践中得到成功应用。

另外，作者在科技攻关和技术论证中，态度严谨，既不迎合权威观点也不以权威自居，坚持科学态度。三峡工程在主厂房的设计、压力管道布置形式和伸缩节的技术论证中，存在较大争议，作者能够坚持以研究成果为依据，以工程优化为目标来独立表态，这种治学与为人的态度，是可贵的。

坚持理论与实践相结合，数模与物模并重，是作者研究工作中的又一特色。作者善于从工程中提出问题，又能应用理代科学方法探讨和解决问题，并反馈给工程。他涉猎的所有方面均具有鲜明的工程背景，工程界非常需要和欢迎这样的学者和研究人员。

岁月易逝，时光荏苒，老一辈水电专家均已届耄耋之年。把他们横跨半个世纪的研究成果作一总结，给后人留下一点参考和借鉴资料，是件很有意义的事情。收入文集的60余篇论文，代表了作者半生科研的成就，是其勤勉工作的硕果。这些论文中，没有浮躁之气，有的是不懈探索、勇于实践的科学精神和创新思想。我对作者的学术成就深表敬佩，也对其从教五十五周年和八十华诞表示由衷的机贺，机愿作者健康长寿，学术生命常青，是为序。

潘家铮

2005年9月

前 言

随着我国社会经济的发展,水力发电作为一种可再生资源日益得到重视和开发;水电建筑物规模逐渐扩大,新型结构发展迅速,水轮发电机组容量和水轮机水头日益提高。这些均为水电理论研究和工程技术进步创造了巨大机遇,同时也提出了更高的要求。中国水电资源蕴藏量占世界第一位,已开发的水电装机容量位居世界之首位,但占我国水电可开发的比例还比较低,水电建设仍然任重而道远。20世纪90年代之后,随着三峡等一批大型工程的规划和开工建设,中国水电开发进入了又一个量变时期,我国水利水电工程学科更为学术更破和技术造步最为引人瞩目、最有希望追赶世界先进水平的工程学科之一。

求论文集收最了作者从20世纪50年代开始发表的、涉及水电学科领域多个研究方向的代表性论文,可以从滴水之光反映求学科的发展历史和最新进展。论文集从作者发表的150篇论文中遴选出60篇,其中水库调节和调度7篇;结构动力学方面7篇;水电站压力管道结构14篇;水电站机组钢筋混凝土支承结构、蜗壳及厂房结构动静力会析12篇;混凝土大坝可靠发分板4篇;水轮发电机组振动16篇。

在水电站压力管道结构的动静力分析方面,提出了地面压力管道径向自振特性的计算公式,与已有的公式相比,提高了计算精度,与原型观测结果符合很好,并能适应各种边界条件;针对横截面的回特半径与管段长(如加劲环间)之比较大的梁结构,提出要考虑剪切效应对横向自振特性的影响;探讨了压力管道内部水体自激振动机理和压力管道中的自激振动水击;推导给出了加劲环和密加劲环压力钢管结构分析的理论公式,可做为对现行压力钢管规范的补充和参考。

大坝下游坝面管的结构分析,主要针对三峡工程和李家峡水电站的科技攻关而展开。对拱坝和重力坝下游坝面管道横截面在均匀内水压力作用下的力学特性,进行了模型试验和有限元分析。随内水压力增加,钢管外包混凝土结构经过弹性、塑性、开裂、展后等各种应力状态,钢析和钢筋则经过弹性、塑性和屈服提限过程。在先许外包混凝土开展,但限制展缝宽发的理念指导下,经优化设计,使外包混凝土减薄,可使钢种和钢筋更好地发挥作用。

当管道外包混凝土开裂后,采用三维动力法计算管坝相互作用,提出了空间分布裂缝的动弹模及空间正交各向异性块体夹膜单元,并结合工程进行了实例计算。对拱坝及下游坝面管组合结构进行了空、满库模型试验,分析了管坝相互作用及下游坝面施工期大坝对管道温度应力的不容忽视的影响。在静力和温度荷载作用下,计算模型包括厂房、大坝、管道和基岩,在厂坝间取一段明管模拟伸缩节,经计算这种伸缩节的替代方案是完全可行的。

水电站机组钢筋混凝土支承结构分析结合若干大型工程,经对不同分析模型的动力试验和有限元计算,结果表明,对于大型机组支承结构试验和计算模型的选取,应考虑机墩、风罩、蜗壳和发电机层以下楼板梁整体结构,并合理考虑边界条件。为减少有限元计算工作量,建议表用一种精度高的动态子结构法。支承结构振动是由于机组水力、机械和电气振源,以及强震区的地震引起的。对于狭窄河床,机组采用双列式布置是可行方案之一。对双列式机组支承结构的计算和试验模型,应取发电机层以下整个机组段,在强地震作用下,地震应力显得很突出。在各种静动荷载作用下,受载机架地脚螺栓附近及其他孔洞周边应加强配筋。

蜗壳结构埋设方式可分为三种基本类型:一是蜗壳不加内水压力的空壳埋入法,如日本对高水头水电机组,尤其高水头水采水轮机机组蜗壳均采用此法;二是美国不成文的标准,采用加内水压力埋入法(充水保压浇注混凝土);三是在钢蜗壳上半部范围铺设软垫层,以减少钢蜗壳向外围混凝土结构传递内水压力。

我国对高 PD 值的蜗壳主要采用钢衬与钢筋混凝土间加弹性垫层。在国内工程实践和研究计算的基础上,我们结合实际工程和科研项目对此问题进行了理论分析和三维有限元分析计算,研究结果表明:联合承载蜗壳在断面上半圆范围内加弹性垫层,根据 PD 值的大小优选合适的垫层材料弹模和库发,以确定钢衬和外围钢筋混凝土的承载比,从而确定钢衬厚度和配筋量。高 PD 值垫层蜗壳的薄弱环节是:钢衬与座环的联接部位,垫层水端钢衬及钢筋混凝土应力集中部位,固定导叶与座环焊接部位。为解决上述三个问题:一是在钢衬与座环碟边选接部位的一定范围内不设弹性垫层,并适当加固;二是将弹性垫层末端向水平轴线下延 $20^\circ \sim 30^\circ$,并使延长垫层段适当连减厚度;三是适当加大固定导叶固端厚度和提高端部的焊接质量,以避免其端部开裂。

超大型水电站厂房结构动力分析和优化。三峡水电站厂房的结构尺寸很大,由于机组在运行中可能发生扳动,从而诱发厂房振动,这在大型本电站

的运行实践中已屡见不鲜,因此,对大型厂房结构必须进行抗振强度校核。鉴于该厂房的重要性的和动力问题的复杂性,其结构刚度和抗振稳定性一直是设计和研究的关键问题之一。从结构和避免机组振源产生共振出发,从动力响应(结构位移和应力)控制角度研究抗振性能,对多种结构设计方案加以分析论证,并对若干重要影响因素进行敏感性分析,为三峡厂房设计的优化提供了重要的参考依据。

在结构动静力学基本分析方法研究方面,提出的论文在理论和方法上各有特点。例如,循环对称结构的振动分析,为寻求一种高效简捷的算法求解水轮机转轮的振动特性,利用群表示理论对其位移空间进行了数学描述,从而使结构的模态分析特化为若干子问题求解;对于复杂的周期对称结构,引入了群表示论与动态子结构相结合的方法。

水轮发电机组振动稳定性问题,随着容量和尺寸的急剧增大,已成为运行和设计中的一个重要问题。本电站往往由于机组振动而限制其运行工况,从而影响机组在电力系统中合理度发挥效益。由于机组的长期振动,可能寻致机组部件的材质疲劳甚至遭到破坏,妨碍机组的安全运行。研究机组振动,既要研究有关部件和部位的振动特性,也要将某些有关部件连接在一起,把机组轴系统和相关的支承结构作为耦联体系研究其振动特性,通过现场测试、数值计算和理论分析,逐步搞清振动的原因;在研究国内外已有水轮发电机组振动规程的基础上,对运行机组采取有效的消振或减振措施,对设计机组的振动加以控制和预防。

作者在1984~2001年参加了原东北电管局组织的东北地区大坝安全定期检查,所涉及的大坝均为各种类型的混凝土坝。研究方法以有限元法静动力分析为主,并对若干大坝做了模型试验及原型观测,以综合评价大坝的安全可靠性。

1956~1962年,我国正在研究论证有关江河的合理开度,以及梯级水库和综合利用水库调节及调度,作者在这方面做了早期的一定的开创性研究工作。

本论文集的大部分成果是与历届硕士生、博士生、博士后,以及课题组同事合作完成的。在指导和组织课题研究过程中,作者进行了大胆的探索与实践,研究方向不断开拓,学科交叉日益深入。尤其在与青年才俊们的合作中,作者始终保持和分享着创新的激情和乐趣。因此,首免要向每一位合作者表示由衷的谢意!

作者已离开教学与科研一线多年。出版本论文集是作者的学生及同事们