

中国工程院院士文集

朱伯芳院士文集

上册

朱伯芳◎著



一代宗师



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

中国工程院院士文集

朱伯芳院士文集

上册

朱伯芳◎著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

图书在版编目 (CIP) 数据

朱伯芳院士文集：全 2 册/朱伯芳著. —北京：中国电力出版社，2016.2

(中国工程院院士文集)

ISBN 978-7-5123-5956-7

I. ①朱… II. ①朱… III. ①水利工程—文集 IV. ①TV-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 108577 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 2 月第一版 2016 年 2 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 114.75 印张 2788 千字 4 插页

定价 480.00 元 (上、下册)

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

一代宗師

祝賀

朱伯崑院士文集出版

錢正英

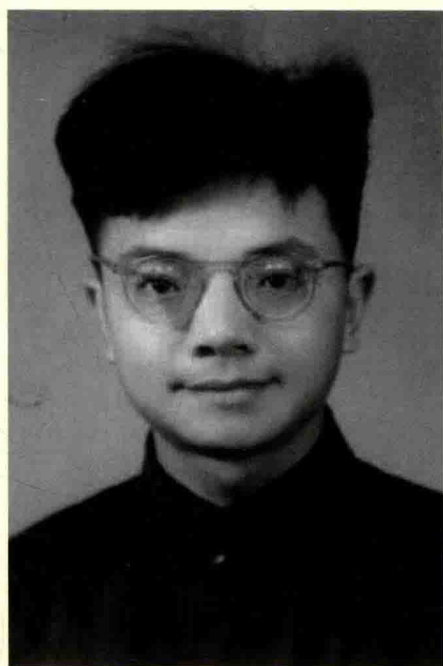
2009年五月



作者近影



1944年，在余江中学。



1950年，在上海交通大学。



1954年，在佛子岭水库工地。



1956 年结婚周年纪念时，在蚌埠淮委设计院。



1978 年两个小孩上大学时，在三门峡水电部十一工程局。



1985年6月，与张泽祯院长在瑞士洛桑出席15届国际大坝会议。



1987年4月，出席在葡萄牙召开的国际拱坝学术讨论会。



1988年，拱坝优化荣获国家科技二等奖，出席全国科学技术大会。



1989年9月，在苏联全苏水电科学研究院讲学。



1991年7月31日，在第4届国际土木工程计算机应用会议闭幕大会上致词（日本东京，时任中国代表团团长）。



1996年，参加全国政协八届四次大会。

1997年11月8日，在江泽民、李鹏主持的三峡大江截流仪式主席台上。



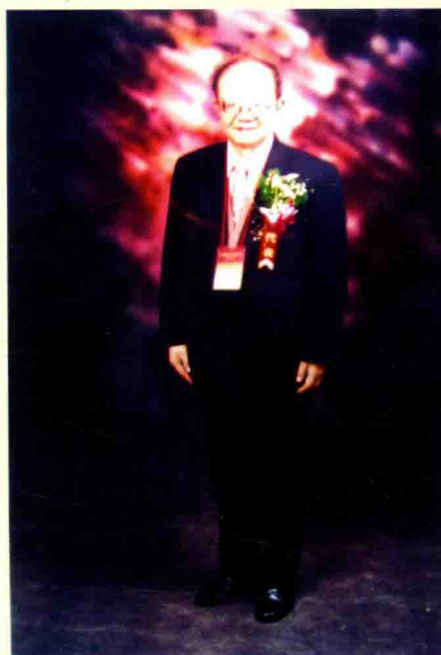
1999年10月1日50周年国庆，应邀在天安门城楼观礼台上观看国庆游行。

2000年7月，全家合影（女儿、儿子、儿媳）。





1993 ~ 2002 年，作为全国政协委员每年应邀参加党中央、国务院举办的春节团拜会。



2001 年，混凝土仿真与温度应力研究荣获国家科技进步奖，参加全国奖励大会。



2006 年 5 月，与三峡总工程师张超然院士在三峡大坝坝顶。

自序

在 1949 年以前,我国未自行设计和建造过一座混凝土坝。新中国成立后,我国水利水电事业蓬勃发展,从无到有、白手起家,自行建造了大量混凝土坝。截至 2013 年年底,我国已建和在建混凝土坝的数量居世界首位,已建和在建混凝土坝的高度也居世界首位,如锦屏一级拱坝(高 305m)、小湾拱坝(高 292m)、溪洛渡拱坝(高 278m)的高度均超过了之前世界最高的英古里拱坝(高 272m),龙滩碾压混凝土重力坝的高度(216m)在 RCC 坝中也居世界第一。一个国家同时兴建世界上最高的 4 座混凝土坝是史无前例的,而且除了这 4 座世界最高的坝以外,我国同时还已建和在建了一大批高度不等的混凝土坝,如拉西瓦拱坝(高 250m)等。我国混凝土坝的设计、施工、科研工作都是依靠本国科技人员自行完成的,在完成混凝土坝建设的同时,也造就了一支高水平的科技队伍,积累了丰富的设计、施工和科研经验。笔者有幸参加了这一伟大建坝事业的全过程。1951~1957 年,笔者参加了淮河佛子岭连拱坝、梅山连拱坝和响洪甸拱坝的设计,1957 年调至中国水利水电科学研究院以后,一直从事混凝土坝的研究和咨询工作,屈指算来,至今已 64 年。本书共收集笔者亲自撰写并公开发表的论文 205 篇。笔者在坝工技术方面做了以下一些工作:

1. 参与设计了我国第一批三座混凝土坝,掌握了现代高坝设计技术

从 1952 年开始,在汪胡桢先生领导下,我国自行设计建造了第一批三座混凝土坝:佛子岭连拱坝是我国第一座混凝土坝;梅山连拱坝是当时世界最高连拱坝;响洪甸拱坝是我国第一座拱坝。当时除了汪胡桢先生留学美国时见过混凝土坝外,曹楚生、盛正方、薛兆炜和我们这些具体承担设计工作的人,没有一个人见过真实的水坝。我们都是土木系的,没有学过水工结构,但对于能亲自参加新中国的伟大水利建设感到万分荣幸,工作热情非常高,日以继夜地边学习边工作,在短短数年内顺利完成了佛子岭、梅山、响洪甸等大坝的设计和建造工作,不但掌握了现代高坝设计技术,而且提出了许多计算方法,并有重要创新。

2. 首次提出大坝混凝土标号分区,节省大量水泥

在 1952 年以前,全世界的混凝土坝都是全坝采用同一种混凝土标号,其数值取决于坝体的最大应力,但坝体应力是不均匀的,坝体的大部分混凝土标号实际是偏高的。1952 年笔者首次提出大坝混凝土标号分区的新理念,并应用于佛子岭连拱坝,全坝分区采用高、中、低三种不同标号的混凝土,节省了大量水泥。这一新理念迅速在全国推广,沿用至今,目前已为全世界混凝土坝所采用。由于这一重要创新,1954 年笔者被评为“治淮功臣”并被授予“安徽省治淮优秀青年团员”称号。

3. 首次建立了混凝土坝温度应力理论体系,解决了混凝土坝裂缝问题

混凝土坝裂缝是长期困扰人们的一个老问题,虽然过去提出了改善混凝土抗裂性能、分缝分块、水管冷却、预冷骨料等温度控制措施,但实际上国内外仍然是“无坝不裂”,主要是由于缺乏温度应力理论的指导。过去国内外关于混凝土坝温度应力的研究成果极少,缺少精细计算方法,经过多年努力,笔者已建成了比较完整的混凝土温度应力理论体系,首次提出

了混凝土坝温度应力的精细计算方法，编制了计算软件。计算中可以考虑当地气候条件、施工过程、材料性能和各种温度控制措施的影响，只要在设计阶段进行详细的温度应力计算，并采取相应的温度控制措施，使施工期和运行期混凝土的最大拉应力都小于允许拉应力，同时在施工中严格执行，就可以防止混凝土裂缝。经验表明，这一理论体系是比较合理、切实可行并实际有效的，纠正了过去只重视早期表面保护而忽视了后期表面保护的错误，提出了“全面温控、长期保温”以结束“无坝不裂”的关键理念。目前我国已有多座混凝土坝竣工后未出现裂缝，在世界上最先结束了混凝土坝“无坝不裂”的历史。基础混凝土允许温差是混凝土坝最重要的温度控制指标，笔者提出了关于基础混凝土温差控制的两个原理并据此提出了一套新的基础混凝土允许温差。此外，还提出了船坞、船闸、水闸、弹性地基梁、隧洞、管道和孔口等各种水工结构温度应力的计算方法。

1956年我国部分专家提出了混凝土坝高块浇筑的方法，笔者当即在《水力发电》杂志上表示了不同意见，一座大坝通常分为几十个坝段，各坝段轮流浇筑，分层施工，可利用间歇时间从层面散热，高块浇筑对全坝进度没有实际意义，而且立模困难，施工不便，又不利于散热。但1958年被“拔白旗”之后又受水电总局的邀请被安排参与有关工作，在当时的形势下，处于弱势地位的笔者，未能再坚持自己的见解。但我们只为有关工程进行温度应力计算，提出温控措施，从未主动建议任何工程进行高块浇筑。当时全国兴起“大跃进”运动，各水电工程局要真正把工程施工进度大幅度提高是不容易的，但单独在一两个坝段浇筑高块是比较容易的，于是各水电工程局你追我赶纷纷进行高块浇筑的竞赛，直到1964年中央提出“巩固、充实、提高”的方针后，才冷静下来。

4. 建立了拱坝体形优化理论、方法与软件，节省坝体混凝土 10%~30%

传统的拱坝体形设计是采用方案比较的方法，从几个方案中选择一个满足设计要求而坝的体积又较小的方案。显然，这样得到的是一个可行方案，而不是最优方案。重力坝由于体形简单、设计变量少（通常只有两三个变量），通过方案比较而求得的方案与最优方案比较接近。拱坝体形复杂、设计变量多达四五十个，通过方案比较而求得的方案与最优方案相差较远。笔者及其团队建立了拱坝优化的数学模型，用最优化方法分别求出单心圆、多心圆、抛物线、椭圆、统一二次曲线、对数螺线等拱型的最优体形，然后从中选出最好的线型和体形。与传统设计方法相比，一般可节省 10%~15%，最多曾节省 30.6%坝体混凝土。

在用优化方法求解时，一般要进行上千次应力分析，因而需耗费大量机时，笔者提出内力展开法，使计算效率大幅度提高。拱坝优化已应用于小湾拱坝等 100 多个实际工程，既节省了投资，又大大提高了工效。

5. 提出混凝土坝数值监控新理念，建立混凝土坝安全监控新平台

仪器观测只能给出测点的应力，不可能给出全坝的应力状态和安全系数，目前混凝土坝安全评估还是采用传统的拱梁分载法（拱坝）和材料力学方法（重力坝），不能考虑从施工期到运行期所积累的宝贵的大量观测成果。笔者提出混凝土坝数值监控新理念，把仪器观测与数值分析结合起来，利用仪器观测成果校正计算参数，从基础开挖、浇筑第一方混凝土开始，与大坝施工同步进行混凝土坝仿真计算，得到从施工到运行不同时间段坝体温度状态、应力状态和安全系数。坝体施工过程中和各种实际因素在计算中都得到了考虑，计算结果充分反映了实际影响，如发现问题，可采取对策加以解决。在设计阶段，按照施工计划进行预先仿真计算，有利于发现问题并预先处理。

6. 提出有限元等效力方法及控制标准, 使有限元方法可实际应用于拱坝设计

有限元法具有强大的计算功能, 但由于应力集中, 计算得到的坝踵拉应力太大, 远远超过混凝土抗拉强度, 限制了其应用。实际上由于基岩存在着裂隙等原因, 坝踵拉应力不像计算得到的那么大。笔者提出有限元等效力法及相应的应力控制标准, 为 SL 282—2003《混凝土拱坝设计规范》所采用, 为有限元法在拱坝中的应用扫清了障碍。

7. 提出拱坝温度荷载与库水温度计算方法

库水温度过去无法计算, 笔者提出一个计算公式, 已获广泛应用。拱坝温度荷载以前采用美国垦务局经验公式 $T_m = 57.57 / (L + 2.44)$ 计算, T_m 是坝体平均温度, L 是坝体厚度, 计算中只考虑了坝体厚度影响, 忽略了当地气候条件, 也没有考虑上下游温差。笔者与黎展眉合作, 提出了一套新的合理计算方法, 已为我国拱坝设计规范采用, 此外笔者提出了水位变化时拱坝温度荷载的计算方法。笔者对拱坝灌浆时间等问题进行了探讨, 并提出了拱坝应力水平系数与安全水平系数, 比柔度系数更为合理。

8. 提出渗流场分析夹层代孔列法

如何考虑排水孔作用是坝基渗流场分析的一个难点, 过去提过一些计算方法, 都不太理想, 笔者提出了夹层代孔列法, 分析了排水孔直径、间距及深度对排水效果的影响, 计算很方便, 效果也较好。笔者还提出了非均匀各向异性体温度场的有限元解法。由于混凝土的渗透系数很小, 正常情况下渗流对混凝土温度的影响很小, 可忽略不计, 但坝内有裂缝时, 缝内漏水对温度场的影响就比较大, 笔者提出了考虑裂缝漏水对混凝土温度场影响的计算方法。

9. 提出了混凝土坝仿真分析方法

由于体积庞大, 混凝土坝是分层施工的, 每个浇筑层的厚度为 1.5~3.0m, 间歇 5~10d。一个 150m 高的坝段, 可分为 50~100 层, 施工时间长达数年, 各层的龄期、弹性模量、水化热、徐变、初始温度、外部温度都不同, 而冷却水管的半径只有 0.01~0.02m, 用有限元方法考虑各种因素进行仿真计算是十分困难的。笔者提出了一系列新的计算方法, 包括并层算法、分区异步长算法、水管冷却等效热传导方程、温度场接缝单元、有限厚度带键槽接缝单元等, 使计算效率大大提高, 三维有限元混凝土坝仿真计算切实可行。

1972 年, 笔者与宋敬廷合作在国内外首次进行了混凝土坝的仿真计算, 在全国广泛应用至今。

10. 提出了混凝土坝反分析与反馈设计概念与方法

室内混凝土试件要筛除大骨料, 改变了混凝土成分, 增加了单位体积内水泥含量。室内试件是在 20℃ 左右恒温条件下养护的, 与坝体实际条件也有差别。大坝有接缝, 岩基条件较复杂, 事先的勘测有一定局限, 因此设计阶段对坝体的计算结果与坝体实际情况存在一定差距, 笔者提出坝体建设中和建成后应根据实测成果对坝体的性能进行反分析。如在施工过程中通过反分析发现坝体和坝基性能有较大变化, 必要时可对坝体和坝基设计与运行方案进行一定修改, 以保证坝体安全。

11. 提出了混凝土坝水管冷却的新方法与算法

笔者提出了水管冷却的新方式——小温差早冷却缓慢冷却, 在不影响施工进度的前提下, 可大幅度削减温度应力; 提出了水管冷却自生应力计算方法; 系统研究了冷却高度、水管间距及水温调控对温度应力的影响; 提出了利用塑料水管易于加密的特点, 克服钢管不易加密的缺点, 从而大大强化水管冷却的效果; 提出了水管冷却仿真计算的复合算法, 首次研究了

高温季节进行坝体后期冷却存在的问题；提出了在高温季节进行后期冷却必须采用强力表面保温，否则靠近表面 3~5m 内的混凝土很难冷却到预定的灌缝温度；首次提出对于软基上的水闸、涵洞、船坞等建筑物，利用水管或表面加温也可达到防止裂缝目的，而加温比冷却在施工上要简单得多。

12. 提出了黏弹性与混凝土徐变与山岩压力计算方法

混凝土与岩基都是黏弹性材料，材料性质与混凝土龄期和加荷时间有关，笔者提出了两个定理，阐明徐变对结构变位和应力的影响，提出了黏滞介质内山岩压力形成的机制和算法，给出了徐变应力分析的隐式解法及钢筋混凝土徐变应力计算方法。

13. 提出了支墩坝计算方法与重力坝加高新方法与新算法

笔者首次提出了双向变厚度支墩应力的理论解和大头坝纵向弯曲稳定性计算方法。

重力坝加高时存在着两个问题：一是新混凝土的温度控制；二是新老混凝土结合面在竣工后大部分将被拉开，削弱了大坝的整体性。笔者提出了一整套解决上述问题的新思路和新技术，并已被丹江口大坝加高工程所采纳。

14. 混凝土坝抗地震

国内外每次大地震之后，大量房屋桥梁等结构被毁，但混凝土坝损害轻微，笔者首次从理论上阐明了混凝土坝耐强烈地震而不垮的机理。1999 年 9 月 21 日，在日月潭附近发生了一次百年来台湾省最大的地震，震中实测水平加速度达到 1.01g，附近有许多水利水电工程，笔者对此次地震引起的水利水电工程的灾害进行了详细介绍，对水工结构特别是混凝土坝的抗震有一定参考价值。在国内外拱坝抗震计算中，以前都未考虑接缝灌浆前坝体冷却对跨缝钢筋的影响，笔者提出了这个问题及计算方法，计算结果表明，其影响比较大。

15. 微膨胀混凝土筑坝技术

利用氧化镁混凝土的微膨胀变形简化温控措施，是我国首创的筑坝技术。目前国内关于氧化镁混凝土筑坝存在着两种指导思想：第一种指导思想是，氧化镁可以取代一切温控措施；第二种指导思想是，氧化镁可以适当地简化温控措施，但不能取代一切温控措施。笔者指出了第一种指导思想的错误所在，按第一种指导思想建设的沙老河拱坝竣工后产生 6 条严重的贯穿裂缝，缝宽达到罕见的 8mm。按第二种指导思想建设的三江河拱坝，竣工后未产生裂缝。笔者对氧化镁混凝土筑坝的基本规律进行了分析，指出存在着 6 大差别：室内外差别（室外实际膨胀变形只有室内试验值的一半左右），地区差别（南方应用难度小，北方应用难度大），时间差别（氧化镁膨胀与混凝土冷缩不同步），坝型差别（重力坝难度小，拱坝难度大），温差差别（只能补偿基础温差、不能补偿内外温差）及内含氧化镁与外掺氧化镁的差别。认识并掌握这些差别，才能做好氧化镁混凝土坝的设计和施工。笔者还提出了氧化镁混凝土膨胀变形的三参数计算模型。

16. 混凝土的半熟龄期

笔者提出了一个新理念：混凝土的半熟龄期，即混凝土强度、绝热温升等达到其最终值一半时的龄期，它代表绝热温升和强度增长的速度。研究表明，适当改变半熟龄期，可以显著提高混凝土的抗裂能力，为提高混凝土抗裂能力找到了一个新的途径。

17. 综合研究

2008 年是中国水利水电科学研究院结构材料研究所建所 50 周年，笔者对研究所在水

工混凝土温度应力和混凝土坝体形优化、数字监控等领域的研究成果进行了综述，仅笔者本人多年共发表论文 200 余篇，提出了大量研究成果，在实际工程中获广泛应用，先后获国家自然科学奖 1 项、国家科技进步奖 2 项、部级奖 8 项和国际大坝会议终身荣誉会员称号。

18. 用英文发表的论文

笔者多次应邀参加国际学术会议进行学术交流，也曾经在国外期刊上发表不少论文。本书收集了笔者在国际会议和国外期刊上用英文发表的 28 篇论文。

19. 回忆与自述

笔者曾应邀做过一些报告，介绍自己的学习、工作经历和经验，也介绍过访苏印象，还写了一篇怀念潘家铮院士的文章。

20. 同行人士的评述

潘家铮院士和水利界的一些人士和记者曾经写过一些文章对笔者进行鼓励和关怀，笔者十分感谢，这些文章也都收入本文集。

除了论文以外，笔者还撰写并出版了 9 本书籍，分别为《大体积混凝土温控应力与温控控制》（1999 年 1 版，2012 年 2 版）、《有限单元法原理与应用》（1979 年 1 版、1998 年 2 版、2009 年 3 版第 5 次印刷）、《Thermal Stresses and Temperature Control of Mass Concrete》（2014 年在美国纽约出版）、《水工混凝土结构的温度应力与温度控制》（1976 年）、《结构优化设计原理与应用》（1984 年）、《混凝土坝理论与技术新进展》（2009 年）、《拱坝设计与研究》（2002 年）、《水工结构与固体力学论文集》（1988 年）、《朱伯芳院士文选（1997 年）》，据中国科学院信息中心发布的统计资料，其中第 1、第 2 本书被列入我国建筑专业和水利专业被引用最多的 10 本书。

上海交通大学土木系培养目标是土木工程师，测量课程很重，有平面测量、大地测量、应用天文、测量平差、路线测量等 5 门课程，专业课程也很重，但数学力学课程很浅，数学只有微积分和常微分方程，力学只有结构力学、材料力学和水力学。笔者参加工作以后，从事水工结构的设计和研究，大学里学到的那点数学力学知识当然是远远不够的，只好利用业余时间不断学习现代数学力学，可以说，笔者在研究工作中所用到的数学力学工具，95%以上都是参加工作以后利用业余时间自学得到的。例如，笔者在 1956 年发表的第一、二篇论文中用到的积分变换、特殊函数、积分方程、差分方程等数学工具都是业余时间突击自学掌握的，1961 年左右曾托人找来了一份北京大学数学力学系课程表，想看看他们学些什么，结果发现，除了微分几何外，其他课程笔者都学习过了，笔者学得似乎更多一些。当然笔者学习是为了研究水工结构服务的，面宽而不精，工作中需要用到什么就学习什么，用完就丢了，但可以看出北大数学力学系的课程安排是符合现代工程技术研发需要的。笔者只读过三年大学，根基是很浅的，但参加工作以来一直坚持“白天好好工作，晚上好好学习”，因而一直能不断提出一些科研成果，不断提高自己的科研能力。根据中国科学院信息中心发布的统计资料，笔者在年过八旬之后，仍然是我国水利水电行业中每年提出新成果最多的一人。笔者毕生的信念就是勤于工作、勤于学习、勤于思考；做一个平凡的人，一个勤劳的人，一个有益于社会的人。

时间过得真快，从 1951 年参加工作，不知不觉之间，已经 60 多年了。本书收集的这些论文，完全是 60 多年来工作和学习的一些心得体会，内容浅薄，但是本书能够出版，笔者首

先要感谢祖国伟大的水利水电建设事业！

混凝土坝建设中许多问题十分复杂，限于本人的精力和水平，书中难免有许多不妥之处，欢迎读者批评指正。

朱伯芳

2015年8月

于中国水利水电科学研究院