三峡工程建设创新的几点体会

樊启祥

（中国华能集团有限公司，100031，北京）

摘　要：三峡工程作为迄今为止世界上规模最大和综合效益最广泛的水利枢纽工程，自2003年蓄水发电以来，持续发挥关键性骨干作用。在三峡工程正式开工建设30年之际，回顾三峡三期上游碾压混凝土围堰示范工程决策实施，以及坚持三峡工程建设“双零”质量安全管理目标中的工作历程。梳理三峡三期上游碾压混凝土围堰建设通过工程布置设计和建造技术创新，实现围堰挡水发电，提前发挥水电工程效益；岩滩水电站上下游围堰作为三峡三期上游碾压混凝土围堰生产性试验的示范工程，其建设为三峡三期碾压混凝土围堰建设方案的决策提供了支撑，也形成了碾压混凝土坝全断面、大仓面、薄层连续施工的中国方案；岩滩碾压混凝土围堰上游防渗层建设中发明的加浆改性复合混凝土施工工法成为我国首创技术，进一步认识到三峡工程是发挥新型举国体制、走高水平科技自立自强之路的工程，是坚持技术与管理融合创新的工程。传承和发展三峡蕴含的文化和精神对中国水电事业高质量发展具有重要推动作用，也对高海拔地区水电开发和水电新质生产力的创新发展具有借鉴作用。

关键词：三峡工程；关键技术；管理创新；智能建设；碾压混凝土筑坝技术；新型举国体制

Practical experiences of innovation in Three Gorges Project construction//Fan Qixiang

Abstract: Being the largest multi-purpose dam project in the world to date which offers wide-range of benefits, the Three Gorges Project has played a dominant role since impoundment and power generation in 2003. The decision and implementation of Phase III pilot project of upstream roller compacted concrete cofferdam are reviewed, including working process of targeting at “double zero” quality and safety management goals. Through engineering layout design and construction technology innovation, the RCC cofferdam construction in the upper reaches of the third phase of the Three Gorges Project can achieve water retaining power generation and bring into play the benefits of hydropower projects in advance; the upstream and downstream cofferdams of the Yantan Hydropower Station, as a demonstration project for the production test of RCC cofferdams in the upper reaches of Three Gorges Phase III, provide support for the decision of the construction plan of RCC cofferdams in Three Gorges Phase III, and also form a Chinese plan for continuous construction of the whole section, big storage surface and thin layer of RCC dams; the construction method of grouting modified composite concrete invented in the construction of seepage prevention layer upstream of RCC cofferdam of the Yantan Hydropower Station has become the first technology and practical experience in China. It helps to realize that the Three Gorges Project is the one that had followed the path of high-level technological self-reliance and self-improvement. It is a project that integrates technical and managerial innovation. Inheriting and developing the culture and spirit contained in the Three Gorges plays an key role in promoting high-quality development of hydropower industry in China. The project is also valuable for innovative development of hydropower and new quality productivity in high-altitude areas.

Keywords: the Three Gorges Project; key technologies; management innovation; intelligent construction; roller compacted concrete dam construction technology; new system for mobilizing resources nationwide

中图分类号：TV6+C93　　**文献标识码：**B　　**文章编号：**1000-1123(2024)22-0089-05

收稿日期：2024-11-14

作者简介：樊启祥，正高级工程师，主要从事大型水电、电源工程建设与管理方面的研究工作。

一、引 言

从孙中山先生提出三峡建闸构想以来，三峡工程以其巨大作用承载了中华民族自立自强的重托。回想自己在三峡工程建设以及金沙江下游河段溪洛渡、向家坝、乌东德、白鹤滩梯级水电工程建设中亲历的一些事情，深刻体会到三峡工程是自立自强、自主创新、改革开放的创新工程，是中国特色社会主义市场经济体制下新型举国创新体制的结晶和卓越实践，为推进中国水电可持续高质量发展提供了强劲动力。

当前，随着西南地区高海拔水电工程的开发实施，随着水风光清洁能源基地在新型能源体系和新型电力系统中重要作用的发挥，随着数字化、智能化、绿色化技术和存量水电工程升级改造及增量水电工程高质量建设需求的深度融合，水电科技创新和管理创新更加重要和突出，尤其是面对高海拔地区新环境、生态文明建设新要求、世界科技竞争新态势、“无人区”新技术以及新装备的挑战，更需要坚持创新在化解重大风险、解决重大问题、迎接重大挑战中的作用，以新质生产力推进经济社会高质量发展。

二、三峡三期上游碾压混凝土围堰建设体现了举国体制的优势

三峡工程是目标导向与倒逼机制相结合、充分发挥举国创新体制的典范，其中三峡工程三期上游碾压混凝土围堰建设就是其中一个生动案例。

1.三峡三期上游碾压混凝土围堰建设技术创新是三峡早日发挥效益的关键

水电工程因其建设周期长、投资大、技术复杂、效益显著，在统筹移民工作和生态环境保护的基础上，推动安全优质高效经济建设和早日发挥工程效益一直是工程规划设计和建设的努力方向。在大江大河上修建水电工程，需要实施导截流工程。宽敞河谷一般利用河床进行分期导流，工程效益的发挥一般都是以年来体现。科学安全经济的水电工程枢纽建筑物布置方案和导流截流方案将为提前发电打下基础。利用分期围堰挡水发电，提前发挥水电工程效益是工程建设中的一个创新，为此需要在一个枯水期内修建较高的挡水围堰，以满足已建成的水轮发电机组以及泄洪建筑物等发挥功能效益的基本技术要求。对于分期导流工程，实现围堰挡水发电，提前发挥工程效益，是工程布置设计和建造技术的重大创新成果。葛洲坝水电站采用二期导流方式，右岸大江上游围堰挡水使左岸17台水轮发电机组提前发挥发电效益，船舶由长江天然航道改由人工船闸通行，通航安全得到保证。

三峡工程建设方案是“一级开发、一次建成、分期蓄水、连续移民”。三峡工程所在的三斗坪坝址是宽敞河谷，采用三期导流方案，分期蓄水中首先要实现的里程碑目标就是水库蓄水到135 m。为实现2003年135 m水位初期蓄水发电通航目标，在2002年11月右岸导流明渠截流成功后，需要在次年汛前一个枯水期约5个月时间内修建90 m高的碾压混凝土重力坝型挡水围堰。因此，三峡三期上游碾压混凝土围堰快速安全优质高效建设是三峡工程早日发挥效益的关键，也是三期导流、分期蓄水、早日发电等重要目标实现的关键，在三峡工程初步设计论证中处于紧要位置。

2.岩滩水电站提前开展碾压混凝土围堰生产性试验体现了举国创新体制优势

1985年三峡工程开始重新论证时，碾压混凝土重力坝技术处于发展成熟期。三峡三期碾压混凝土围堰的快速安全优质建设目标，对我国碾压混凝土大坝建设技术从设计到施工再到管理都提出了更高更严更快的要求，通过国内外工程调研、碾压混凝土材料及性能研究试验、碾压工艺及设备配套研究试验、规模化全流程生产性试验、代表性示范工程验证等工作，为三峡三期碾压混凝土围堰建设方案决策打下了坚实基础，也开创了全断面薄层大仓面连续施工的中国特色碾压混凝土筑坝技术。其中，广西红水河岩滩水电站上下游围堰采用碾压混凝土围堰的设计方案，并作为三峡三期上游碾压混凝土围堰生产性试验的示范工程，是体现举国创新体制优势的一个范例。

1988年岩滩碾压混凝土围堰按度汛要求如期建成，三峡三期上游碾压混凝土围堰施工日最大上升速度、月浇筑强度和月上升速度等各项建设指标和技术要求得到了体现，对大坝上游面防渗体系、碾压混凝土层间结合技术、一条龙施工设备配置、全过程质量控制和施工组织体系也都进行了全面实战检验，为三峡三期碾压混凝土围堰建设方案的决策提供了支撑，也形成了碾压混凝土坝全断面、大仓面、薄层连续施工的中国方案。随后湖北清江隔河岩水电工程上游碾压混凝土围堰也实现了这些建设指标。

2002年11月6日三峡三期导流明渠截流成功后，12月28日三峡三期上游碾压混凝土围堰开始导流明渠高程50 m低渠部位的施工，2003年4月16日顺利到达堰顶高程140 m，在3个月20天时间内大坝碾压混

凝土上升了90 m，为三峡工程2003年6月实现初期蓄水135 m目标奠定了坚实基础。

3.碾压混凝土大坝防渗设计创新等首创技术形成了中国大坝建设方案

目前我国碾压混凝土大坝设计施工中上下游防渗层采用改性变态复合混凝土的方案，可以说也起步于岩滩碾压混凝土围堰的施工过程中。当时上下游防渗层部位用小型手动振动碾压机施工，结合福建坑口大坝实践，岩滩大坝上游也考虑沥青防渗层加强设计方案。岩滩上游碾压混凝土围堰施工中，施工方提出直接在上游防渗层部位加水泥浆液后用混凝土振捣棒进行人工振捣密实方案并进行了现场试验。施工过程中，对上游围堰右岸部位已浇筑的上游防渗层进行了无损爆破试验，取得的早龄期混凝土样件在防渗和抗压等方面都具有良好性能。岩滩碾压混凝土围堰上游防渗层加浆改性复合混凝土施工工法成为我国首创技术，形成与全断面薄层大仓面连续施工的中国碾压混凝土大坝设计施工成套技术方案相融合协同的防渗体系。

4.三峡三期上游碾压混凝土围堰建设经验启示

三峡三期上游碾压混凝土围堰建设成果是一个目标导向、问题导向和倒逼机制相结合，依靠科技创新的成功范例。当时潘家铮院士从三峡工程的大局和全局出发，为实现135 m初期蓄水通航发电目标，提前在全国范围内在建工程中选择三峡三期碾压混凝土围堰的生产性试验工程，发挥了全国水电工程建设单位技术优势，水电系统各单位服从国家大局，从战略全局出发抓实抓好各项科技示范工程，体现了求真务实、精益求精、开拓创新的科学精神。

建设西南高海拔地区大型水电工程及开发雅鲁藏布江下游水电工程，在深厚覆盖层复杂地质条件和强烈地震运行环境下的大坝安全技术、复杂水沙条件下有限水域大流量集中取水口防沙减沙排沙技术、高水头大容量冲击式水轮发电机组研制技术、长大深埋高地应力高地温环境下大直径引水隧洞安全掘进技术、高海拔地区水生陆生生态环境保护技术、冰崩雪崩远程泥石流灾害防范技术、大规模多工程集中集约绿色智能建设技术、大型复杂工程建设智慧管理与联合运行智慧调度技术等方面，都要发挥全国一盘棋、集中力量协同攻坚、专业化市场化契约化目标管理、产学研用协同的创新体制优势，把技术工作走在前面、抓在实处，并通过技术与管理的融合，为大型水电工程规范、有序、协调、健康地顺利建设提供基础支撑，助力实现安全优质绿色高效经济智能的建设目标。为提升深厚覆盖层坝基振冲碎石桩加固方法的施工质量和效率，大渡河硬梁包水电站闸坝坝基成功开展了智能振冲技术研究、智能设备研制和示范工程建设，取得的成果为类似工程更大规模的振冲碎石桩的智能化施工打下了基础。

5.三峡工程采用的新技术、新装备、新工艺、新材料均经过了一定的科学实验和生产性试验检验

三峡二期大坝混凝土采用的“塔带机为主+缆机+门塔机”联合浇筑方案，也是经过充分的科学技术论证、工程实践检验、生产性试验确定的。中国长江三峡集团有限公司（以下简称三峡集团）在对塔带机浇筑方案进行国内外调研基础上，首先引进一台塔带机在三峡一期工程纵向混凝土围堰坝身段施工中进行生产性试验，这些工作为大坝主体工程混凝土浇筑方案的决策以及三期碾压混凝土围堰施工都打下了基础。

在上述联合浇筑方案中，各类机械设备都有明确的工作定位和技术要求，如塔带机主要承担混凝土高强度的入仓作业，摆塔式缆机主要承担大坝仓面金属结构件的吊装运输，结合施工栈桥布置的门机和塔机主要负责局部混凝土浇筑和混凝土仓内施工设备转运及材料运输等辅助作业，发挥了各类施工设备的工作特性和协同效率，形成安全、有序、高强度的大坝混凝土浇筑体系，并带来大坝混凝土生产方式、作业方式、组织方式以及管理方法的革命性变革。三峡大坝混凝土塔带机浇筑技术创新成果在金沙江向家坝水电站重力坝建设中得到了推广应用。

三、“双零”质量安全管理目标确保了三峡工程质量和安全

1.“零质量事故、零安全事故”质量安全管理目标的确立

在2001年三峡二期工程施工高峰时期，三峡集团提出了“零质量事故、零安全事故”质量安全管理目标（以下简称“双零”管理目标）。围绕这一目标，通过全员质量和安全意识培训、制订相关管理办法和细则，聘请国内外专家担任混凝土、灌浆、焊接等专业的质量总监和工程安全总监，设立与实体工程紧密挂钩的质量安全专项奖励等制度，经过数年艰苦卓绝的努力，到2005年三期工程施工高峰阶段基本实现目标。

“双零”管理目标的管理理念是紧密结合产品质量和企业安全管理问题，在20世纪60年代开始形成并发展，在美国和日本等国的企业管理中得到了应用和推

广。工程建设“双零”质量安全管理目标是确保项目建设及合同执行绩效的内在要求，既是工程建设管理工作的最低要求，也是最高标准。实现“双零”管理目标，就要在工程建设管理过程中强调预防和持续改进，推动建立系统有效的监控和反馈机制，以确保工程建设各方面各环节潜在问题和错误尽早被识别并及时消除，激发建设团队在实现“双零”管理目标过程中不断进步，追求卓越。“双零”管理目标对全体三峡建设者是一次思想与品格的淬炼锻造，也是一次技术与管理能力的提升。

2.“双零”管理目标增强了风险意识，加强了应急能力建设

在三峡船闸建设过程中，“零质量事故”的意识深深烙在了建设者的心底，转变成不放过每一个缺陷的自觉行动，从中展示了以“五种意识”为特色的三峡质量文化。具体就是逆水行舟、不进则退的质量改进意识，如履薄冰、如临深渊的质量忧患意识，精心管理、精益求精的质量精品意识，科学探索、不断创新的质量创新意识，以人为本、和谐发展的质量人本意识。三峡水利枢纽工程凭借精益求精的质量管理以及优质卓越的技术水准，曾荣获2013年“全国质量奖卓越项目奖”。

在安全管理上，“双零”管理目标促使建设者进一步增强风险意识，加强应急响应能力建设。三峡船闸建设者以“双零”为奋斗目标，加强过程精细化管理，通过监测检测，用数据说话，严格按技术要求和流程作业，确保了2003年船闸通航目标如期实现。

2004年7月三峡二期工程船闸正式通航验收会议上，潘家铮院士说：“世界最大的船闸能一次建成、一次投产成功，并没有出现什么大的问题，这实在是一个奇迹，它充分证明了中国人民的智慧、毅力和才能。”

四、三峡工程蕴含的文化和精神持续推动国家发展和社会进步

三峡工程如同一所开放创新的大学，在三峡工程建设中形成了以三峡集团时任总经理陆佑楣提出的“为我中华、志建三峡”为核心内涵，以尊重科学、实事求是为工作主线，以公平竞争、团结协作为时代特征，以坚持创新、争创一流为价值取向，以甘于奉献、清正廉洁为三峡建设者人格品质等为主要内容的文化内涵和精神，凝聚了全体三峡建设者攻坚克难、勇攀高峰、不懈奋进的智慧和力量。

1.注重多渠道为年轻工程师健康成长提供平台

三峡集团工程建设管理人员主要来自于国内重大工程设计、施工领域领军人才，是三峡工程建设管理的中坚力量。从1984年开始陆续分配来的年轻大学生是三峡工程建设的新鲜血液和后备力量。

三峡工程正式开工建设前，三峡集团将刚毕业的大学生们送到当时国内在建的大型水电工地培养，在设计、施工等不同岗位上进行学习和锻炼。如陕西汉江安康水电站、湖南东江水电站、湖北长江葛洲坝水电站等，也有的外派到巴基斯坦水利工程，旨在让年轻人直接参加工程设计和施工，在实践中学习提升工程技术和工程管理能力。我本人在1984年7月到当时的中国长江三峡工程开发总公司筹建处报到后，就直接到了陕西汉江安康水电站，在水电三局二处二队实习一年，1988年上半年到广西红水河岩滩水电站碾压混凝土围堰施工现场工作近半年，随后又参加了北京十三陵抽水蓄能电站引水系统的施工监理工作。这些在工程建设一线的工作岗位，对年轻技术人员来说是非常难得的学习与实践相结合、有效提升专业技术能力、工程管理能力和综合能力更快成长的机会。

在三峡工程建设过程中，三峡集团特别重视年轻科技人员的培养和使用，通过师带徒和传帮带以及通过工程实践岗位压担子，使年轻科技人员和工程师得到了较快成长。时任三峡总公司工程建设部主任彭启友跑遍了三峡工地每个角落，对工程各环节现场条件实时情况了如指掌；和设计、监理、施工一线人员打成一片，对重大建设方案和关键技术未雨绸缪、提前研究，及时形成共识，处理解决工程问题非常有效力。三峡船闸建设立体交叉协同联合的工程组织方法就得益于他的直接指导和示范。1999年三峡船闸开挖收尾向混凝土浇筑转换阶段，他持续1个多月每天早上6点钟就深入到国务院三峡工程质量检查专家组指出的三峡船闸输水隧洞北侧混凝土衬砌施工部位进行检查，也持续3个多月参加船闸建设周协调会，直到相关工作转入正轨。另外邓景龙、汪大彬、杨志帆、蒋养成、陈永岳、哈秋聆、张端伟、史振寰、唐希贤、陈福厚、庞永祥、李永仁、陈果清、郭汉慧等一大批从事工程设计、施工、管理的水电专家，通过技术方案论证和工程建设实践的言传身教，以课题研究、专题讨论和报告审改等形式，毫无保留地教给了年轻建设者，并千方百计给年轻一代工程师提供干事创业的平台和环境，在工作生活中给予精心指导、悉心教育、关心爱护，使得他们走得更稳、成长得更快。

2.在传承与发展中推动中国水电发展和进步

三峡年轻工程师们从老一辈水利水电人的传帮带

中感受到了他们对水利水电事业的执着、对三峡工程的热爱。陆佑楣、王家柱、彭启友、张超然、郑守仁等老一辈水利水电专家见证了新中国水电事业从起步发展到改革开放的艰苦卓绝、自力更生、奋发图强的伟大历程，把科学严谨、务实求真、创新敬业的工程师精神以及专业知识、工程经验和组织管理能力，把他们对三峡工程和中国水电的希望和期待寄托到了年轻一代的水电人身上，也使这些年轻大学生在工程建设的历练中更加坚定为国家水电事业奋斗的志向和决心。这些同志在三峡工程后的国家重点水电工程建设中都发挥了重要骨干作用。三峡工程建设留给我们很多经验启示，为国家后续大水电建设提供了有益借鉴。

以三峡工程建设形成的水电科技水平、管理能力以及人才队伍为支撑，我国在近20年的时间里，高质量地在西南地区金沙江、澜沧江、雅砻江、大渡河等主要河流进行了流域梯级水电工程的滚动开发，一批骨干水电工程相继投产运行，促进了“西电东送”和区域经济社会的协同发展，也使我国水电工程建设能力引领世界水电发展。

时光如梭，华章赓续。三峡工程已经成为时代的标志，在中华大地上持续发挥着重要作用。感恩这个伟大的时代，使我们这一代水电人经历见证了中国水电技术从跟跑到并跑再到领跑的历史进程，实现了中国水电高质量发展的伟大梦想。在新时代的伟大征程上，智慧水电蕴含着跟随技术进步和管理创新的时代音符，在存量水电提质增效和增量水电高质量开发、水风光储清洁能源基地一体化开发，以及新型能源体系和新能源电力系统中都将发挥重要作用，也需要中国水电人义不容辞地扛起肩上的责任，持续攀登科技新高峰，发挥水电清洁能源的价值创造作用，以中国式现代化水电篇章，为美丽中国、美好世界贡献中国水电人的智慧和力量。

参考文献：

[1] 强茂山.项目管理案例[M].北京：清华大学出版社，2011.
[2] 樊启祥，陆佑楣，李果，等.金沙江下游大型水电工程智能建造管理创新与实践[J].管理世界，2021，37(11)：206-226+13.
[3] 樊启祥，林鹏，魏鹏程，等.高海拔地区水电工程智能建造挑战与对策[J].水利学报，2021，52(12)：1404-1417.
[4] 强安丰，吴一平，李平，等.黄河上游青海水风光蓄一体化发电系统研究[J].西北水电，2024(1)：85-92.
[5] 李雨抒，李卫兵，邓友汉，等.流域水风光多能互补清洁能源基地发展情况浅谈[J].长江技术经济，2024，8(2)：1-5.
[6] 樊启祥，林鹏，魏鹏程，等.智能建造闭环控制理论[J].清华大学学报(自然科学版)，2021，61(7)：660-670.
[7] 樊启祥，廖望阶，李果.谈倒逼机制对水电工程科技创新作用的认识[J].水力发电，2021，47(9)：1-5+13.
[8] 郑守仁.三峡工程三期围堰及截流设计关键技术问题[J].人民长江，2002(1)：7-9+33-47.
[9] 蔡继勋，朱敏.岩滩大坝RCC性能与试验[J].广西科学，1994(3)：71-79.
[10] 樊启祥，曾国顺.岩滩碾压混凝土围堰河槽段施工系统分析[J].中国三峡建设，2003(3)：29-31+47.
[11] 樊启祥，曾国顺.岩滩水电站碾压混凝土围堰施工[J].中国三峡建设，2002(5)：19-21.
[12] 魏根成.三峡工程明渠截流与碾压混凝土围堰施工实践[J].西北水电，2005(2)：23-25.
[13] 时会良，李晶华.三峡三期RCC围堰施工关键技术[J].水力发电，2003(12)：40-43.
[14] 樊启祥，李果，马斌，等.深厚覆盖地基智能振冲方法与系统[J].水利学报，2023，54(12)：1393-1403.
[15] 樊启祥，陆佑楣，周绍武，等.金沙江水电工程智能建造技术体系研究与实践[J].水利学报，2019，50(3)：294-304.
[16] 郑守仁，孙志禹，朱红兵.三峡工程大体积混凝土施工技术[J].中国科学：技术科学，2017，47(8)：796-804.
[17] 梁仁强，丁福珍.三峡工程塔带机及供料线施工系统关键技术研究[J].水力发电学报，2009，28(6)：100-104.
[18] 宋志刚.推行安全稳定“双零”目标 实现企业又好又快发展[J].中国煤炭工业，2009(12)：38-39.
[19] 樊启祥，杨宗立，刘刚.三峡船闸项目管理实践[J].中国三峡建设，2003(11)：30-33+56.
[20] 全安华.中国科学院院士潘家铮：三峡船闸是一个奇迹[N/OL].中国新闻网，2004-07-09[2024-11-09].https://www.chinanews.com/news/2004year/2004-07-09/26/457737.shtml
[21] 王芳丽，孙钰芳.故事里的三峡 为我中华 志建三峡[J].中国三峡，2021(3)：66-79.
[22] 王卓甫，丁继勇，曾新华，等.重大水电工程项目治理40年：演进与展望[J].管理世界，2023，39(2)：224-244.

责任编辑 吕彩霞