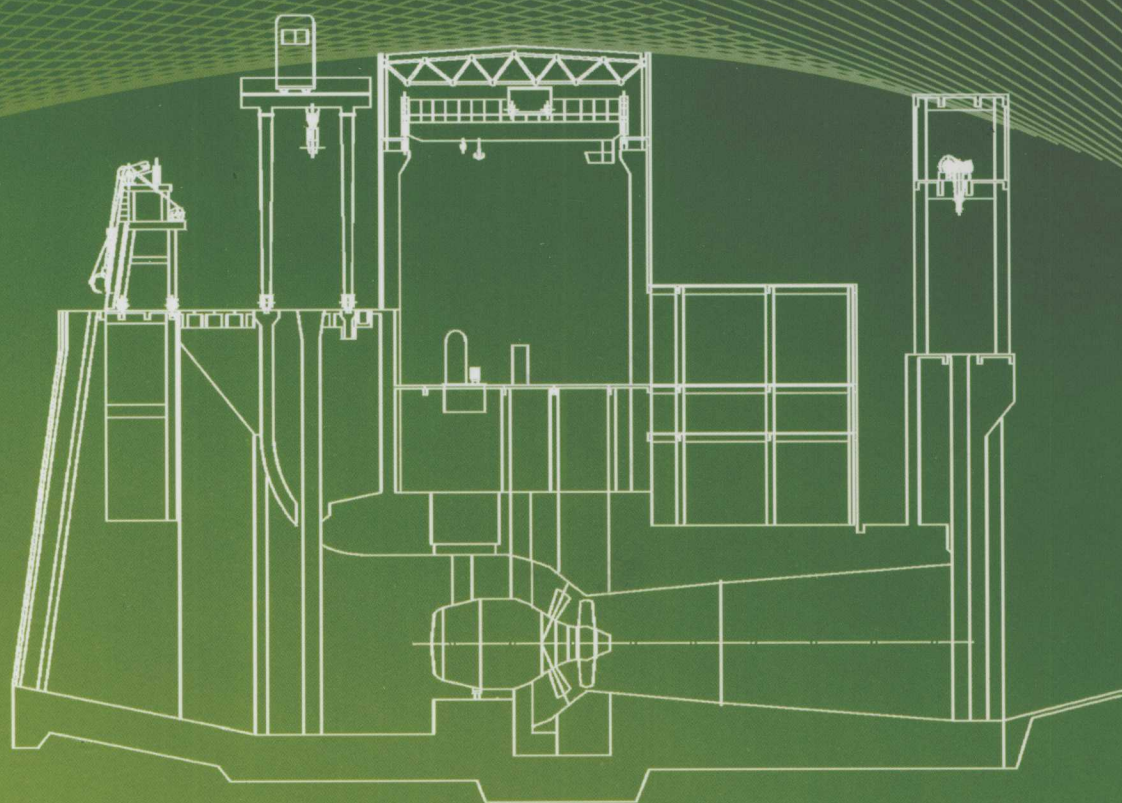


DENGAO GUANLIUSHI SHUIDIANZHAN

灯泡贯流式水电站

中水珠江规划勘测设计有限公司 编著



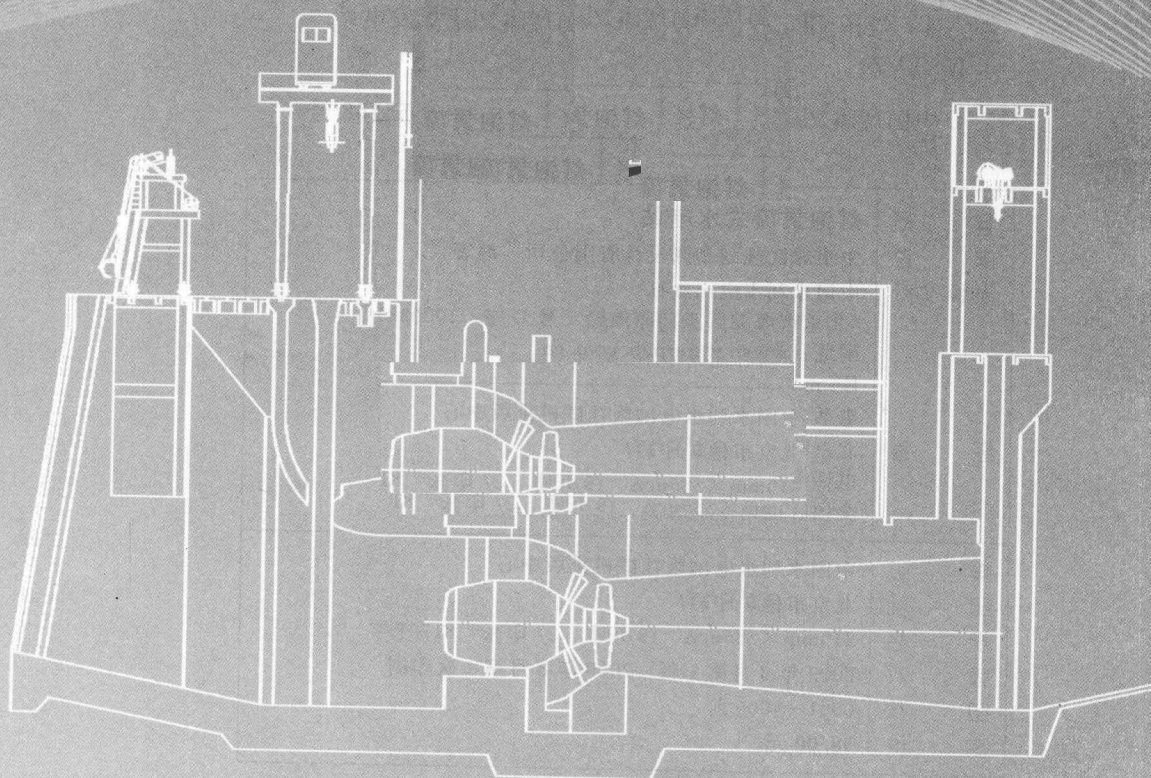
中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

灯泡贯流式水电站

中水珠江规划勘测设计有限公司 编 著

主 编 游赞培

副主编 杨类琪



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是作者根据自己多年的工作实践并在广泛收集国内外有关资料的基础上,系统总结了我国多年来灯泡贯流式水电站的规划、设计、科研和灯泡贯流式水轮发电机组的研制、安装、运行、维护等方面的经验,全面论述了灯泡贯流式水电站的基本理论和基本知识,内容丰富、资料翔实。主要内容包括:灯泡贯流式水电站的动能设计、枢纽设计;灯泡贯流式水轮机选型设计、水力性能及水力计算;灯泡贯流式水轮发电机的选择;灯泡贯流式水电站过渡过程及其安装、运行、维护、管理;灯泡贯流式水电站的电气、辅助系统、金属结构、施工设计;灯泡贯流式水电站工程实例介绍等。

本书可供从事低水头水力资源规划设计、开发、应用和灯泡贯流式水电站运行管理等工程技术人员使用,也可供大中专院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

灯泡贯流式水电站/中水珠江规划勘测设计有限公司
编著. —北京:中国水利水电出版社, 2009
ISBN 978-7-5084-6788-7

I. 灯… II. 中… III. 贯流式水轮机-水力发电站
IV. TV74

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第155158号

书 名	灯泡贯流式水电站
作 者	中水珠江规划勘测设计有限公司 编著
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 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	北京市地矿印刷厂
规 格	210mm×285mm 16开本 27印张 817千字
版 次	2009年8月第1版 2009年8月第1次印刷
印 数	0001—4000册
定 价	98.00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



前言

灯泡贯流式水电站是指采用灯泡贯流式水轮发电机组、开发低水头水力资源而建造的水电站。这种水电站的枢纽布置、厂房结构设计、动能设计、装机规模与机组参数选择计算等与常规水电站相比，有不同的要求和特点。灯泡贯流式水电站一般位于具有丰富径流河流的中下游平原或丘陵开阔地区，这种地区往往经济相对发达、交通便利、能源紧缺，同时这类水电站也具有土建工程量少、建设周期短、见效快、上网电价相对较高、便于资金筹集和回收等特点，而且对于此类地区来说还具本土能源可靠性较高的优点。因此，这类电站得到了开发商、地区用户的青睐，发展很快，从20世纪60年代开始，水头在25m以下的大中型水电站，国际上普遍采用灯泡贯流式机组，灯泡贯流式水轮发电机组的单机容量也越来越大。1989年日本投运的只见水电站，贯流式机组的单机容量已达65MW，水轮机转轮直径6.7m；1985年美国投运的悉尼墨累贯流式水电站(SIDNEYA MURRAY)水轮机转轮直径达8.2m，单机容量24MW，共8台。我国目前单机容量最大的为广西桥巩水电站达57MW，水轮机转轮直径最大为广西长洲水电站达7.5m，应用水头最高为湖南洪江水电站达27.3m。

我国可采用灯泡贯流式水电站的资源丰富。据不完全统计，我国水头在25m以下的水力资源约占全部资源量的12%，总计约48000MW，到2006年底已开发约25000MW(含立式机组)。从20世纪90年代初到2006年底的15年间，随着我国经济的高速增长，灯泡贯流式水电站的开发也迅速发展，15年间已建了一大批大中型灯泡贯流式水电站。据不完全统计，单机容量20MW以上的大型机组已超过200台，总装机容量超过5000MW。这些电站都具有建设条件好、淹没损失小、施工工期短等特点。一座50~300MW的电站从开工到第一台机组发电一般用2~4年时间即可完成，大大降低了工程投资，如广东飞来峡水利枢纽电站装机容量140MW，使用灯泡贯流式机组比立式机组节约投资达4800余万元；又如广西红花水电站装机容量228MW，施工工期仅3年，比设计工期提前了一年半，仅这一项就节省投资约近亿元；广西马骝滩灯泡贯流式水电站节约总投资24%。由于灯泡贯流式机组比立式轴流转桨式水轮发电机组效率高，电站还可多发电量3%~5%。

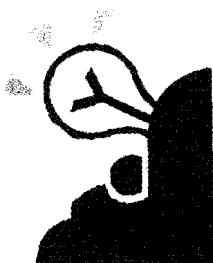
本书总结了我国多年来建设灯泡贯流式水电站和研制灯泡贯流式水轮发电机组的经验，广泛收集国内外有关资料，全面论述灯泡贯流式水电站的基本理论和基本知识。本书由游赞培任主编，杨类琪任副主编，并负责全书的统稿工作。全书由河海大学陈新方

教授、郑源教授负责审稿。各章节参加编写人员有：前言，游赞培；第一章概论，游赞培、杨类琪；第二章灯泡贯流式水电站的动能设计，戴力群、陈俊贤；第三章灯泡贯流式水电站枢纽设计，凌春海、刘元勋、李静、谢希莲；第四章灯泡贯流式水轮机选型设计，游赞培、翁映标；第五章灯泡贯流式水轮机水力性能及水力计算，周大庆、游赞培；第六章灯泡贯流式水轮发电机的选择，吴金水、翁映标、杜长泉；第七章灯泡贯流式水电站的过渡过程，匡和碧、肖毅雄；第八章灯泡贯流式机组结构，陈梁年、吴金水；第九章灯泡贯流式水电站的电气设计，符夏碧、刘颖、智勇鸣、胡盛禄；第十章灯泡贯流式水电站的辅助系统设计，翁映标、杨类琪、张如汉、高琳；第十一章灯泡贯流式水电站的金属结构设计，陆伟、卜建欣、钟启汕；第十二章灯泡贯流式水电站施工导截流及施工期通航，朱春生、谢江松；第十三章灯泡贯流式机组安装调试，金世国；第十四章灯泡贯流式水电站的运行维护管理，邓丽影、黄蔚、蒋光兵、阴新华；第十五章扩容增效，杨类琪、游赞培；第十六章工程实例，翁映标。在编写过程中还得到河海大学、广东省飞来峡水利枢纽管理局、东芝水电设备（杭州）有限公司、广东省源天工程公司等有关部门和同志的协助。在此谨向以上各部门及关心、帮助本书出版的同志一并致谢。

由于我们水平和经验所限，错误与不足之处，希望读者批评指正。

编者

2009年5月



目 录

前言

第一章 概论	1
第一节 灯泡贯流式水电站的形式	1
第二节 灯泡贯流式水轮机的发展概况	2
第三节 灯泡贯流式机组的应用范围	3
第二章 灯泡贯流式水电站的动能设计	4
第一节 动能设计的特点	4
第二节 装机容量的确定	14
第三节 调峰下游非恒定流计算	24
第三章 灯泡贯流式水电站枢纽设计	28
第一节 枢纽建筑物的布置特点	28
第二节 泄水闸设计	31
第三节 厂房设计	36
第四节 船闸设计	43
第四章 灯泡贯流式水轮机选型设计	46
第一节 灯泡贯流式水轮机选型设计的任务、原则和步骤	46
第二节 灯泡贯流式电站的主要特点	47
第三节 灯泡贯流式水轮发电机组的主要特点	50
第四节 灯泡贯流式水轮机主要参数的选择	52
第五节 几种常用的水轮机参数优选方法	62
第六节 特殊工况的利用	72
第五章 灯泡贯流式水轮机水力性能及水力计算	76
第一节 贯流式水轮机的水流运动	76
第二节 贯流式水轮机过流部件水力损失	77
第三节 贯流式水轮机的能量与空化特性	87
第四节 贯流式水轮机的可逆特性	90
第五节 贯流式水轮机转轮的水力计算	92
第六节 水轮机流道尺寸计算	100
第七节 灯泡贯流式水轮机的数值模拟	102
第六章 灯泡贯流式水轮发电机的选择	118
第一节 主要电气参数的选择	118

第二节 灯泡贯流式水轮发电机的通风冷却方式	134
第七章 灯泡贯流式水电站的过渡过程	140
第一节 概述	140
第二节 大波动过渡过程特征和分类	142
第三节 灯泡贯流式机组水轮机特性曲线的特点	146
第四节 灯泡贯流式水轮发电机组大波动过渡过程的计算机解法	151
第五节 关闭规律的优化	162
第六节 灯泡贯流式水轮机调节系统小波动稳动性分析	162
第八章 灯泡贯流式机组结构	167
第一节 整体结构	167
第二节 埋设部件	170
第三节 转轮与转轮室	171
第四节 导水机构	174
第五节 主轴与主轴密封	177
第六节 水导轴承	178
第七节 组合轴承	178
第八节 定子	180
第九节 转子	181
第十节 进入竖井	183
第十一节 灯泡头	183
第九章 灯泡贯流式水电站的电气设计	184
第一节 电气主接线	184
第二节 主要电气设备的选择	198
第三节 厂用电系统	207
第四节 计算机监控系统	218
第十章 灯泡贯流式水电站的辅助系统设计	232
第一节 灯泡贯流式水轮机调节设备的选择	232
第二节 压缩空气系统设计	238
第三节 技术供水与排水设计	242
第四节 油系统设计	255
第五节 电站通风空调采暖系统设计	259
第十一章 灯泡贯流式水电站的金属结构设计	264
第一节 金属结构设备概述	264
第二节 泄水建筑物金属结构设备	265
第三节 电站厂房金属结构设备	276
第四节 船闸金属结构设备	295
第五节 金属结构设备防腐蚀	302
第十二章 灯泡贯流式水电站施工导截流及施工期通航	305
第一节 施工导流	305
第二节 施工截流	318
第三节 施工期通航	326

第十三章	灯泡贯流式机组安装调试	334
第一节	概述	334
第二节	埋设部件的安装	335
第三节	水轮机的安装	338
第四节	发电机的安装	343
第五节	机组调试	353
第十四章	灯泡贯流式水电站的运行维护管理	358
第一节	机组运行概况	358
第二节	机组的检修管理	363
第三节	机组典型故障处理	372
第十五章	扩容增效	397
第一节	我国可再生能源的开发状况	397
第二节	扩容潜力	398
第三节	工程实例	399
第十六章	工程实例	404
实例 1	飞来峡水利枢纽简介	404
实例 2	丙村水电站	408
实例 3	红花水电站简介	412
实例 4	石虎塘航电枢纽工程简介（初设）	416
参考文献		420

第一章 概 论

我国低水头水力资源十分丰富，该资源一般均处于江河中下游的经济发达地区。尤其是 20 世纪 90 年代以后，这些地区经济发展迅速，用电需求增速飞快。该地区一般都是能源紧缺地区，可开发的中、高水头水力资源早在 20 世纪 90 年代以前就已开发的差不多了。为满足该地区经济迅速发展的需要，人们又转而开发低水头水力资源。灯泡贯流式水电站是开发低水头水力资源最好的方式，一般应用于 25m 水头以下。它与中、高水头水电站、低水头立轴的轴流式水电站相比，具有如下显著的特点。

(1) 电站从进水到出水方向基本上是轴向贯通，如灯泡贯流式水电站的进水管和出水管都不拐弯，形状简单，过流通道的水力损失减少，施工方便。

(2) 灯泡贯流式水轮机具有较高的过流能力和较高的比转速，所以在水头和功率相同的条件下，灯泡贯流式水轮机直径要比轴流式小 10% 左右，机组转速较轴流式机组高两档以上。

(3) 灯泡贯流式水电站的机组结构紧凑，与同一规格的转桨式机组相比其尺寸较小，没有复杂的引水系统，可减少厂房的建筑面积，亦可减少电站的开挖量和混凝土量，根据有关资料分析，土建费用可以节省 20%~30%。

(4) 灯泡贯流式水电站一般比立轴的轴流式水电站建设周期短，投资小，收效快，淹没移民少，电站靠近城镇，有利于发挥地区兴建电站的积极性。

第一节 灯泡贯流式水电站的形式

灯泡贯流式水电站的形式一般采用河床式布置，电站厂房是挡水建筑物的一部分，厂房顶也可布置成泄洪建筑。由于水头较低，除泄水闸外大部分采用当地材料坝，以土石坝为主。有的电站由于河流地形、地质条件的特点，也采用引水式布置，如我国四川安居、湖南南津渡水电站则采用明渠引水式的布置。灯泡贯流式水电站也常有航运的要求，枢纽中通常设有船闸等建筑。

灯泡贯流式水电站一般处于地形比较平坦、离城镇比较近、水量比较丰富的地点，枢纽的总体布局应认真研究与当地的地区经济发展规划相结合（例如除发电以外的防洪、航运、供水、灌溉、水产、环境改善与保护、旅游资源的综合利用），以有利于水力资源的深度开发，增加灯泡贯流式水电站的经济效益。

灯泡贯流式水电站的动能计算、枢纽布置等与一般水电站一样，与当地地形、人文条件有密切的关系，需要在具体设计中经过勘测设计、科学研究和技术经济方案的比较来确定。

灯泡贯流式机组的发电机密封安装在水轮机上游侧一个灯泡形的金属壳体中，发电机主轴与水轮机转轮水平连接。水流基本上轴向通过流道，与轴对称流过转轮叶片，流出直锥形尾水管，如图 1-1 所示。机组的轴系支承结构、导轴承、推力轴承都布置在灯泡体内。由于灯泡贯流式水轮机进出口水流畅直，水力效率比较高，有较大的单位流量和较高的单位转速，在同一水头、同一出力下，发电机与水轮机尺寸都较小，从而缩小了厂房尺寸，减少了土建工程量。但是发电机装在水下密闭的灯泡体内，给电机的通风冷却、密封、轴承的布置和运行检修带来一定的困难，对发电机设计制造提出了特殊的要求，但与立式轴流式机组相比仍具有明显的优点。对灯泡贯流式机组的研究，20 多年来人们已积累了许多成功的经验，并逐渐向较高水头、大容量发展，在国内外得到广泛应用。

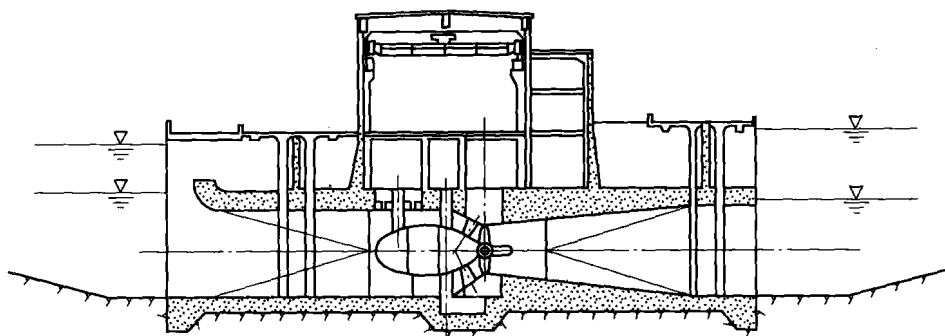


图 1-1 灯泡贯流式机组布置剖面图

第二节 灯泡贯流式水轮机的发展概况

20 世纪 30 年代末,第一台灯泡贯流式机组投入运行,由于其优越的水力性能和经济性,从而得到了经济发达的欧洲各国的重视和认可,对其进行了很多深入的研究,到 50~60 年代,对其研究日趋完善,此后在设计、制造等方面,取得了较大的发展,相继诞生了一批具有代表性的大型灯泡贯流式水轮发电机组。如 1966 年由法国奈尔皮克公司制造的转轮直径 6.25m、单机容量 20MW 的 4 台机组安装于法国罗纳河的皮埃尔—贝尼特电站,标志着灯泡贯流式机组技术已较为成熟。随后的 20 年相继诞生了闻名于世的至今还保持转轮直径最大 7.7m、单机容量 24.6MW 的美国雷辛电站机组(1977 年);转轮直径 7.4m、单机容量 54MW 的美国石岛电站机组(1977 年);转轮直径 6.7m、至今还保持单机容量最大 65MW 的日本只见电站机组(1989 年)。直到此时,先进国家对大型灯泡贯流式水轮发电机组在研究、设计、制造、运行等方面,都达到了很高的水平。

我国研制大、中型灯泡贯流式水轮发电机组的起步较晚,但发展很快,从 20 世纪 80 年代初到现在,可以分为 5 个发展阶段。

第一阶段为摸索、试制阶段。这个阶段的代表作为 1984 年投产的我国自行研制的广东白坭电站的机组(转轮直径 5.5m、单机容量 10MW),它是我国自行研制大、中型灯泡贯流式机组的始祖。由于是试验机组,机组投产后生产厂家及科研院所进行了各方面的测试,取得了很多非常宝贵的第一手资料。

第二个阶段为仿制阶段。20 世纪 80 年代初我国湖南马迹塘引进灯泡贯流式机组以后,开始了较大规模的仿制、消化吸收和研制工作,这个阶段的代表作就是 80 年代后期生产的多台转轮直径 5.5m、单机容量 15MW 级的灯泡贯流式机组(广东都平电站机组、广西马溜滩电站机组、四川安居电站机组),使我国的仿制工作产生了一个新的飞跃,为研制更大型的机组打下了基础,这个阶段是我国在大、中型灯泡贯流式机组的设计制造发展史上的第一级台阶。这批机组在结构上基本仿照马迹塘机组结构。

第三个阶段为消化、吸收阶段。20 世纪 90 年代初,通过仿制、消化吸收后,生产了转轮直径 5.8m、单机容量 18MW 的广东英德白石窑机组,它是我国在大、中型灯泡贯流式机组的设计制造发展史上的第二级台阶。

第四个阶段为引进技术、合作生产制造阶段。20 世纪 90 年代后期,单机容量从 20MW、30MW 到 40MW 的大型机组的需求不断出现,使我国加紧了对灯泡贯流式机组的研制工作,特别是通过合资和引进技术的方式,使灯泡贯流式机组的开发设计能力大大增强。我国最大的水轮发电机组制造和研究单位哈尔滨电机厂、东方电机厂也加入了研究和制造的行列,世界著名厂商如富士电机、阿尔斯通等国际跨国公司介入国内水轮发电机组制造业的市场竞争和技术合作。通过引进、消化、吸收国外

的先进技术,大量先进的、独具特色的灯泡贯流机设计、制造技术被引进。合作生产了广西百龙滩电站机组 ($6 \times 32\text{MW}$ 、 $D_1 = 6.4\text{m}$ 、富士—富春江、1996 年投产) 和广西贵港电站机组 ($4 \times 30\text{MW}$ 、 $D_1 = 6.9\text{m}$ 、ABB—东电、1999 年投产), 引进了湖南大源渡机组 ($4 \times 30\text{MW}$ 、 $D_1 = 7.5\text{m}$ 、维奥、1998 年投产) 和广东飞来峡机组 ($4 \times 35\text{MW}$ 、 $D_1 = 7.0\text{m}$ 、维奥、1999 年投产)。激发了灯泡贯流式机组巨大的市场需求以及业主对灯泡贯流机技术的信任, 弥补了国内灯泡机组设计制造技术的空白, 使国内灯泡贯流机组的技术进步和发展建立在高起点上。

2000 年以来, 灯泡贯流式机组的生产制造进入了第五个发展阶段, 进入了一个掌握国外先进技术、技术得到全面提升, 可自行设计、制造大型灯泡贯流式机组的阶段。2001 年四川红岩子电站机组 ($3 \times 30\text{MW}$ 、 $D_1 = 6.4\text{m}$ 、东电) 投产、2003 年四川桐子壕电站机组 ($3 \times 36\text{MW}$ 、 $D_1 = 6.8\text{m}$ 、东电)、青海尼那电站 ($4 \times 40\text{MW} = 160\text{MW}$ 、 $D_1 = 6.0\text{m}$ 、天津阿尔斯通) 和湖南洪江电站 ($5 \times 45\text{MW} = 225\text{MW}$ 、 $D_1 = 5.46\text{m}$ 、前 2 台由日立—ABB 联合设计制造、后 3 台由哈电制造) 投产, 这标志着我国已能生产单机容量 $30 \sim 45\text{MW}$ 等级的机组, 并已具备生产更大容量灯泡机组的能力。

2003 年青海尼那电站和湖南洪江电站在一年内全部顺利投产, 标志着我国灯泡贯流式机组的制造能力达到了国际先进水平。湖南洪江电站是我国目前最大单机容量 (45MW) 和最高应用水头 (27.3m) 的大型灯泡贯流式电站, 而且使灯泡贯流式机组突破了过去最高应用水头不超过 25m 的界限。现在建设的广西梧州长洲水利枢纽电站 ($15 \times 42\text{MW}$ 、 $D_1 = 7.5\text{m}$) 是目前世界最大装机容量 (630MW) 及最多装机台数 (15 台) 的大型灯泡贯流式电站。即将投产的广西桥巩电站装机 8 台、单机容量达到 57MW , 又将是目前我国将投产的最大单机容量的机组。

第三节 灯泡贯流式机组的应用范围

通过我国近 20 多年来对灯泡贯流式电站的开发, 从发展趋势来看, 灯泡贯流式机组的应用范围较宽, 普遍认为灯泡贯流式机组的合理应用水头为 $5 \sim 25\text{m}$, 且容量越做越大, 从 $10 \sim 45\text{MW}$ 将达到 57MW , 直径也是越做越大, 从 $5.5 \sim 7.5\text{m}$, 但水头有可能向两头延伸。从现在的发展趋势看, 不仅在高水头段有突破, 湖南洪江电站最高应用水头已达 27.3m , 出现大容量、小转轮直径、高转速的灯泡贯流式机组; 在低水头段也有突破, 出现了众多应用水头只有 $3 \sim 5\text{m}$ 的电站, 出现了大转轮直径、小容量、低转速的灯泡贯流式机组。工程实践表明, 在超低水头段应用灯泡贯流式机组, 在经济上是不合算的。在超低水头 ($H_{\phi} \leq 3\text{m}$) 的电站, 可采用竖井贯流式机组代替灯泡贯流式机组。我国已生产单机容量 13MW 、转轮直径 6.5m 、转速 $75/750\text{r/min}$ 的竖井贯流式机组, 超低水头段机组采用竖井贯流式机组将是未来的发展趋势。

第二章 灯泡贯流式水电站的动能设计

灯泡贯流式水电站的动能设计应以河流梯级规划和电网电源规划为基础,根据电站开发目标的要求,在广泛收集和分析地区社会经济、自然资源、电力系统、生态与环境保护,以及综合利用基本资料和要求的基础上进行。设计应以《中华人民共和国水法》等法律法规为指导,遵循国家的现行产业政策,符合水利水电工程动能设计等相关规程规范,其精度应满足各设计阶段的技术要求。主要设计工作内容是进行正常蓄水位、装机容量等工程规模论证的水能参数指标分析计算,包括保证出力、多年平均年发电量、加权平均水头等指标,经综合分析和论证,选定工程规模及特征值。

第一节 动能设计的特点

在河流的中下游河段,随着坡降的逐渐变缓,地势逐渐开阔,两岸农田和居民点逐渐密集,城市化程度一般都高于中上游地区,基础设施也相应增多,在这些地区开发建设中,高水头蓄水式水电站已不现实。而河流中下游河段的水量资源比较丰富,为了充分加以利用,大都采用修筑闸坝壅水形成低水头电站进行水力资源开发。低水头水电站可选用的水轮发电机组包括贯流式机组和立式轴流机组,而在水量相对丰富且水头又相对较低的地区选用灯泡贯流式机组是开发利用低水头水力资源最好的形式。灯泡贯流式水电站属于低水头水电站,因此具有低水头水电站的一般特点。本文以后提到的灯泡贯流式水电站均指低水头水电站,包括径流式和日调节水电站。

灯泡贯流式水电站的动能设计与中、高水头蓄水式水电站有许多不同特点,比如泄洪规模及水库淹没补偿回水外包线的确定,径流调节计算,正常蓄水位的选择,电站运行方式,水库腾空库容计算,电站的预报预泄以及考虑航运综合利用要求的非恒定流计算等,以下将分别加以叙述。贯流式水电站由于坝低,调节库容小,一般不承担防洪任务,即使承担防洪任务,也往往采用空库迎洪的办法,与贯流式水电站的动能设计没有矛盾。

一、泄洪规模的确定

灯泡贯流式水电站一般位于河流的中下游地区,地势较为平坦,两岸居民点密集,耕地成片,基础设施较多,因此淹没往往成为这类水电站开发利用的一个制约性因素,尤其在以人为本的今天更是如此。为了尽量减少工程建设产生的水库淹没,这类水电站设计首先要考虑的就是选择足够大的泄洪规模,尽量在洪水来临时使水库基本恢复到天然河道行洪状态。因为现行的规范规定水库的淹没补偿洪水标准为:重要城市、重要工矿区采用50~100年一遇洪水;中等城市、中等工矿区采用20~50年一遇洪水;一般村镇及居民迁移采用10~20年一遇洪水;土地征用采用2~5年一遇洪水。贯流式水电站一般在遇到水库淹没补偿标准的设计洪水时,由于水头受阻,电站已不发电,泄洪闸可以敞开,如果泄洪规模足够大,可将由于工程建设而引起的水位壅高值(发生水库淹没补偿标准相应的洪水)控制在0.3m以内,即以增加工程投资的代价来换取水库淹没的大量减少,将水库淹没限制在正常蓄水发电引起的淹没范围内,从而促进工程的建设。反之,如果泄洪规模选择不够大,发生水库淹没补偿标准的设计洪水时,建库前后的水位差未能限制在0.3m以内,往往会因淹没过大,地方难以承受而导致工程的不可行。可见选择足够大的泄洪规模是灯泡贯流式水电站设计的一个关键点。

【例2-1】 某河流下游某水电站兼有发电、航运等综合利用效益。坝址以上集水面积46810km²,

多年平均流量 $1250\text{m}^3/\text{s}$ 。电站装机容量 230MW ，装有 6 台贯流式灯泡机组，该电站上游约 25km 处有一重要工业城市，电站上游约 17km 处有该市的一处重要工业设施。规划阶段设计时没考虑这一重要因素，枢纽泄洪规模定得比较小，造成淹没区 24 万人、耕地 1005.4km^2 的较大淹没损失，地方政府难以承受。后来的设计中充分重视了这一因素，为了尽量减小工程建设对城市的影响，电站采用较大的泄洪规模，按 50 年一遇洪峰流量，上游的重要工业设施处水位壅高以不超过 0.2m 为控制，确定电站的泄洪规模为 19 孔泄水闸，每孔宽 16m 。比前一阶段多设了 2 孔泄水闸，并配合电站合理的运行方式即限制电站的发电流量，使发电回水位在该市中心处限制在允许范围内，从而大大减小建库后的淹没影响，与规划阶段同一正常蓄水位方案相比，淹没人口仅 16 人，淹没耕地 680km^2 ，效果显著。

二、淹没补偿回水外包线的确定

水库淹没范围系由水库淹没补偿回水外包线确定，而淹没补偿回水外包线一般是根据水库洪水调节计算成果，由淹没补偿标准下的设计洪水与相应坝前水位、坝前最高水位与相应的坝址流量分别推算水库回水后取外包线所构成。

对于有调节能力的蓄水式水电站，当洪水起调水位为正常蓄水位时，水库的淹没补偿回水外包线一般是由正常蓄水位与淹没补偿设计流量组成的单一线，如图 2-1 (b) 所示。有调节水电站由于坝高库大，建库水位壅高大，而且上游农田、居民点相对稀疏，采用淹没补偿标准下的设计流量所推算的水库回水一般高于发电流量与相应水库水位计算的回水线，因此采用设计流量计算的水库回水线作为淹没补偿外包线所引起的淹没误差一般不大，对于有调节能力的蓄水式水电站来说这种处理是可行的。

对于灯泡贯流式水电站，由于所处的地理位置较平坦，两岸的淹没比较敏感，如果也采用与高坝大库同样的处理方式，则淹没范围会出现包不住（泄洪规模足够大时淹没设计流量相应的坝前水位低于正常蓄水位）的情形，处理不当，不仅给两岸人民的生、生活带来较大影响，也给水电站建成后的运行带来不必要的麻烦。鉴于贯流式水电站的回水具有如下特点：当流量大时，回水终点距坝址近，但末端水位高；当流量小时，回水终点距坝址远，但末端水位低；当闸门全开敞泄洪水时回水终点尖灭在坝前 [图 2-1 (a)]。图中 A 点为发电停机流量计算的的回水线，AB 段为发电停机流量以下各级流量回水终点的连线，由于 AB 段所引起的淹没往往不是少量，且又是因为正常发电运行所造成，必须考虑。因此对于灯泡贯流式水电站，如果泄洪规模足够大，当发生淹没补偿标准的设计洪水时，水电站已不发电，闸门敞开，河道基本恢复天然状态，上下游水位差控制在 0.3m 以内，因此枢纽的淹没补偿回水外包线实际上是由正常蓄水位与电站正常发电时各级流量的回水外包线组成，如图 2-1 (a) 所示。

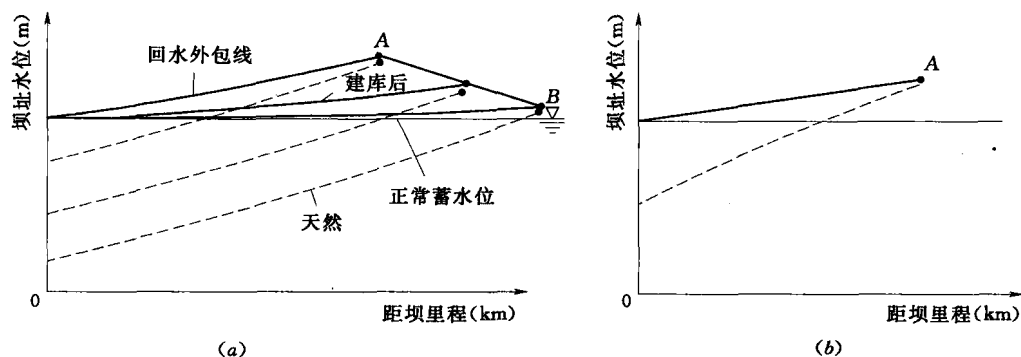


图 2-1 径流式电站与有调节电站回水外包线示意图

(a) 径流式电站；(b) 有调节电站

需要说明的是，以上处理方式在 2004 年以前的工程建设中得到广泛应用，2003 年 12 月和 2007

年 12 月水利水电工程设计分别颁布了新的 SL 290—2003《水利水电工程建设征地移民设计规范》及 DL/T 5064—2007《水电工程建设征地移民安置规划设计规范》，新规范规定了洪水回水末端断面采用设计洪水回水水面线与天然同频率水面线差值等于 0.3m 的计算断面，按该断面水库回水位水平延伸至与天然河道多年平均流量水面线相交处，作为水库淹没补偿的范围，范围较之图 2-1 尾部有所增加。

三、调节计算

1. 径流调节

对灯泡贯流式水电站并没有很严格的定义，一般是指在流量比较丰富的大江大河中下游，在行洪河槽上修建闸坝壅水发电，发电水头在 20m 特别是 15m 以下的水电站，且大多具有航运等综合利用功能。此类水电站，在枯水季节，由于流量相对较小，发电水头成为影响发电能力的重要因素，通常为了尽可能多获得电能，上游保持正常蓄水位运行，对天然径流不作调节；洪水季节，由于流量大，发电水头锐减，电站发电因水头不足而受阻，水头低于电站机组最小水头时电站停机不发电，一般水电站每年汛期有一段时间不发电，因此电站对流量的利用率较低。

由于灯泡贯流式水电站的上游水位相对比较固定，电站的水头则与下游水位流量关系曲线密切相关。当天然来量增大时，下游水位随之抬高，而水头则减少；流量减少时，下游水位随之降低，而水头却增高。其水流能量主要分布在平均水头以下的低水头部分，出力加权平均水头小于算术平均水头。欲利用水量提高水能利用率，在机组参数选择时只能采用降低设计水头，增大装机容量的方法，这是与蓄水式电站不同点之一。而蓄水式水电站水能利用率的大小取决于调节库容的大小。

贯流式电站无调节库容或调节库容很小，电站水头变化幅度大，其发电出力取决于天然流量。在枯水期，水头高，但流量小，机组因流量不足而发不足额定出力；在洪水期，涨水的初始阶段流量逐渐增大，水头则降低，但出力逐渐增大，即当流量增大的速度大于水头减小的比例时，出力随之增加；当水头和流量组合到某种情况——称临界弃水点时，出力达到最大值；流量继续增大时，电站开始产生弃水，在电站临界弃水点与设计水头之间，电站弃水满负荷运行；此后，流量虽继续增加，但由于水头降低速度快，出力逐渐减小，发不足额定出力，致使出力再次受阻，直至水头低于电站运行最小水头时，电站停止运行。可见贯流式水电站的发电出力过程随流量影响而变化较大，甚至出现电站停止发电现象，同时贯流式电站季节性出力变化显著，这也是与蓄水式电站的又一不同点。

贯流式电站的径流调节计算，比一般中、高水头有调节蓄水式水电站要简单。计算时段取“日”，宜以长系列逐日平均流量水文资料为基础进行能量指标计算。在无长系列资料的地区，也可采用丰、平、枯 3~5 个典型年的逐日平均流量资料进行计算，亦可采用简化办法以旬（或月）平均流量系列资料代替逐日平均流量系列资料进行计算，但应对计算成果进行修正。逐日出力计算公式为：

$$N_i = 9.81 \eta_i Q_i H_i \quad (2-1)$$

式中 N_i ——水电站实际出力，kW；

H_i ——贯流式水电站的净水头，m；

η_i ——机组总效率；

Q_i ——坝址上游的入库流量。

在计算入库流量时，应考虑上游来水情况，如果坝址上游无有调节能力的水利工程， Q_i 为天然流量；如果坝址上游有已建、正建或拟建的有调节能力的水利工程，则 Q_i 为上游水利工程调节后的入库流量，此时应注意径流系列的前后一致性问题。此外，当水库有综合利用要求时，入库流量应扣除其库上游引出的水量，如城镇供水、灌溉用水等。日电量计算公式为：

$$E_i = N_i t \quad (2-2)$$

式中 E_i ——日电量，kW·h；

t ——机组运行时间，h。

径流调节计算的主要指标为多年平均年发电量和加权平均水头等。贯流式水电站径流调节计算，

一般采用时历法,也可采用简化方法,即将历年逐日流量资料,先排频,得出日平均流量保证率曲线(即 $Q-P$ 曲线),转换为发电水头、出力,统计出年电能的基本方法,这种方法在计算机十分普及的今天已很少采用。在计算过程中,应注意针对每个电站的具体情况,从各个有关的影响因素中,择要作深入分析。例如在枯水期,综合利用部门如航运、灌溉等部门用水可能对发电量有较大影响;在汛期,除了分析发电水头降低对发电出力和电量的影响外,还应分析回水淹没的影响等。某些有特殊要求的运用方式,如开闸排淤,库区某地有水位控制要求,坝前水位需根据来水量的大小采用变动水位进行发电调度等。计算方法需按照实际情况考虑这些约束条件,计算中需进行相应的修改和调整。

2. 洪水调节

由于贯流式水电站的调节库容小,对洪水一般无调节作用(承担防洪任务的电站除外)。当入库流量小于电站的机组满发流量时,水库按正常蓄水位发电运行,水量除满足航运等综合利用要求以及水库蒸发与渗漏损失水量外,全部通过机组用于发电。当入库流量介于电站满发与停机流量(因水头受阻机组无法发电或因受上游淹没所限不发电的流量)之间时,部分闸门开启,宣泄发电弃水,水库一般仍维持正常运用水位或流量分级控制水位。当入库流量大于电站停机流量时,电站停止发电运行,水库闸门逐渐开启,库水位逐渐下降,直至闸门敞开泄洪。洪水过后水库再回蓄至正常蓄水位。

四、正常蓄水位选择

1. 一般概念

正常蓄水位是指水库在正常运用的情况下,为满足设计兴利要求,在供水期开始时应蓄到的最高水位。对于灯泡贯流式水电站而言,正常蓄水位为正常发电运用的水库最高蓄水位。

正常蓄水位直接影响整个工程的规模以及有效库容、调节流量、装机容量、综合利用效益、建筑物尺寸等特征指标,它直接关系到工程投资、水库淹没损失、移民安置规划以及地区经济发展等重大问题,在水能设计中,对正常蓄水位的选择必须慎重对待。

选择正常蓄水位,除应比较各方案的动能经济指标、建设征地与移民安置外,还应综合分析坝址地形地质、水工布置、施工条件、梯级水位衔接与对上游电站电量的影响、环境影响、水资源利用程度、机电设备、主要工程量与工程投资等因素,有航运等综合利用要求的还要考虑航运的保障程度。一般按费用最小原则选择,当两个方案的费用相差不大时,优先选用水库淹没损失较小的方案。

正常蓄水位比较方案拟订,一般先对水库的建设条件与制约因素进行全面分析后拟3~5个比较方案,按装机利用小时一致(相近)的原则初拟各正常蓄水位方案相应的装机容量等特征值,估算工程量、工程投资。当最终选择的装机容量、详算的工程量和投资或查清的淹没实物指标等数据与正常蓄水位比较时的初选值有重大改变时,应再核选正常蓄水位。

灯泡贯流式水电站正常蓄水位选择的步骤与其他中、高水头以及有调节水电站相同。

2. 正常蓄水位选择的特点

(1) 灯泡贯流式水电站正常蓄水位选择重点是考虑能量指标和淹没损失,在淹没损失能被地方所接受的范围内,选择尽量高的正常蓄水位,以获得较好的能量指标和综合利用效益。

(2) 灯泡贯流式水电站往往兼有航运、灌溉、供水、环境保护等综合利用效益,在淹没容许的条件下,通航河流上兴建的低水头水电站应尽量考虑梯级通航水位衔接问题。所谓的通航水位衔接,系指本梯级正常发电运行最低水位应与上一梯级的坝下最低通航水位衔接,最好水头稍有重叠,但需进行技术经济比较,确定合理的重叠程度,这样虽对上一梯级电站能量有所损失,但利于通航,且梯级总能量亦较大。这是正常蓄水位选择中应注意的问题。

(3) 如果水库上游有城镇时,既要考虑美化城镇的要求,又要考虑对城镇给排水及排涝的影响,选择水位对环境的不利影响尽量小的方案。

(4) 灯泡贯流式水电站水库无防洪任务时坝高往往由设计洪水位和校核洪水位决定,而发生设计、校核洪水时一般枢纽的泄水设施均已经全部打开,电站上下游水位差很小,河道基本恢复天然状态,而此时水位往往高于正常蓄水位,因此枢纽投资(不包括水库淹没)的大小对正常蓄水位的选择

影响不大。又由于灯泡贯流式水电站的坝不高,工程对地质条件的要求较低,所以地质条件也不是正常蓄水位选择的主要因素。

正常蓄水位的选择应从国民经济宏观的角度,统筹考虑各方面的利益,进行综合分析论证。量化指标主要采用国民经济评价方法,即计算经济内部收益率、费用现(年)值、效益费用比等来评价各方案,内部收益率高、费用现(年)值小、效益费用比大的方案是经济指标优的方案。由于正常蓄水位选择是方案之间的比较,也可采用简化方法进行,如单位千瓦、单位电量投资,补充单位千瓦、补充单位电量投资,差额投资经济内部收益率指标和抵偿年限法等。

【例 2-2】 同例 2-1 电站,由于其上游有一重要工业城市,其直线距离约 25km,沿河道距离约 60km,市中心的最低地面高程为 81.5m,市政设施的大部分排水口高程均在 80m 以下,因此,发电所引起的回水位必须加以控制,以最低路面高程 81.5m 为基础,研究尽可能高的方案。根据市政部门的要求,发电回水位不得高于 78.5m,据此,拟定出城市发电控制水位为 78.5m、77.5m、76.5m 等三个方案,其相应的正常蓄水位分别为 77.5m、75.5m、75.5m,其装机容量暂按年利用小时 4000h 左右控制,分别为 210MW、180MW、180MW,相应的电站停机坝址流量为 5000m³/s、5900m³/s 和 3900m³/s。方案比较从能量效益、渠化河段长度、淹没指标、对市政给排水工程的影响、工程投资和经济指标等几个方面进行,见表 2-1。

表 2-1 正常蓄水位方案比较表

项 目 \ 方 案	一	二	三
1. 正常蓄水位 (m)	77.5	75.5	75.5
2. 城市发电控制回水位 (m)	78.5	77.5	76.5
3. 电站停发入库流量 (m ³ /s)	5000	5900	3900
4. 装机容量 (MW)	210	180	180
5. 机型	GZ—WP—600	GZ—WP—590	GZ—WP—590
6. 台数	7	6	6
7. 年均发电量 (亿 kW·h)	8.79	7.68	7.24
电量差 (亿 kW·h)	1.11		0.44
8. 装机利用小时 (h)	4186	4267	4022
9. 渠化航运里程 (km)	108.0	97.1	97.1
10. 淹没耕地 (hm ²)	400	220	171
11. 淹没其他农田 (hm ²)	352	279	275
12. 淹没人口 (人)			
13. 主要工程投资 (亿元)	9.67	8.35	8.22
其中: 淹没补偿投资 (亿元)	1.28	0.76	0.63
14. 方案间市政投资差 (亿元)	0.15		0.04
15. 方案间投资差 (亿元)	1.47		0.17
16. 补充千瓦投资 (元/kW)	4900		
17. 补充电能投资 [元/(kW·h)]	1.32		0.39

从表 2-1 可以看出,城市发电回水控制水位由 76.5m 增加到 77.5m,虽然电站的正常蓄水位同为 75.5m,装机容量同为 180MW,但由于电站停机流量增加,年均发电量可增加 0.44 亿 kW·h,淹没及市政建设改造费用略有增加,但数量不大,方案间的投资差仅为 0.17 亿元,补充电量投资仅为 0.39 元/(kW·h),因此,城市发电回水控制水位选择较高的方案显然是有利的。城市发电回水控制水位由 77.5m 提高到 78.5m,电站正常蓄水位可提高到 77.5m,装机容量可增加 30MW,年均

发电量可增加 1.11 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ，渠化航运里程可增加 10.9km，虽然淹没和市政补偿费用亦有所增加，方案间投资增加 1.47 亿元，补充千瓦投资为 4900 元/ kW ，补充电量投资为 1.32 元/ ($\text{kW} \cdot \text{h}$)，指标较好，因此，选择电站的正常蓄水位为 77.5m，相应的城市控制发电回水位为 78.5m。

五、死水位

死水位是指水库在正常运用情况下允许消落的最低水位。一般蓄水水库死水位的确定需综合考虑泥沙淤积高程、电站发电量与保证出力等因素予以确定，有灌溉、供水等综合利用要求时还需要考虑取水口高程以及供水的保障程度。而对于贯流式水电站，由于水库调节性能差，泄水闸底板低，泥沙不易在库中淤积，水库不承担集中式供水任务时，库上一些分散少量的取用水对死水位没有限制性要求，故泥沙的淤积和坝址下游用水一般不成为死水位选择的制约因素。

由于贯流式水电站常常都兼有航运任务，死水位定得低可能对上游航运不利，若无一定的调节库容，水库完全无调节性能，则削弱了设计电站的电力电量在电力系统中的作用，死水位的高低仅对航运和发电效益产生影响，故死水位的确定需研究发电与航运间的关系予以确定，重点研究电站进行日调节运用对航运的影响。

【例 2-3】 某航电枢纽所处河段的通航标准为内河Ⅲ级航道，通航 1000t 级船舶或船队，航道设计水深要求达到 2.0~2.4m，航槽宽度 60m，该枢纽处多年平均流量 $1050\text{m}^3/\text{s}$ ，正常蓄水位 56.5m，拟定水库死水位 56.0m、56.2m、56.5m 三个方案进行比较。从比较表 2-2 中可以看出，当上游梯级仅泄放航运基流 $135\text{m}^3/\text{s}$ 时，死水位 56.0m、56.2m、56.5m 相应上游梯级坝址处 60m 宽主槽的天然河道最小的水深分别为 1.96m、2.12m、2.39m；梯级渠化后，当上游梯级下泄流量时，56.0m、56.2m、56.5m 死水位方案在该枢纽的上一梯级坝址处 60m 宽主槽的天然河道最小的水深分别为 1.83m、2.03m、2.33m，可见在不采取其他整治措施的情况下，枢纽死水位 56.0m 方案在库尾段不能满足Ⅲ级航道水深下限值的要求，56.2m 以上方案则基本能达到Ⅲ级航道水深的要求，因此从航运角度来说死水位不宜低于 56.2m。

表 2-2 某航电枢纽各死水位方案主要指标比较表

项 目 \ 方 案	一	二	三
枢纽正常蓄水位 (m)	56.5		
枢纽死水位 (m)	56.0	56.2	56.5
枢纽电站调峰可消落深度 (m)	0.50	0.30	0.00
相应的日调节库容 (万 m^3)	1696	1017	0
上游梯级不放水时的坝址水位 (m)	56.0	56.2	56.5
相应天然河道航槽 60m 宽度对应水深 (m)	1.83	2.03	2.33
上游梯级泄放基流 $135\text{m}^3/\text{s}$ 时坝址水位 (m)	56.13	56.29	56.56
相应天然河道航槽 60m 宽度对应水深 (m)	1.96	2.12	2.39

从电站运用的角度来看，一方面死水位越低，电站日调节库容越大，电站运用更为灵活，同时还可以为下游航道提高通航保证率；另一方面，死水位定得太低，低于机组的高效运行水头区域时，对机组的运行不利，故在满足电站调峰需要的库容情况下，取相对高的死水位是合适的；从电站本身的调峰能力分析，死水位 56.5m 方案无调峰能力，死水位 56.2m 方案来水量在 $500\text{m}^3/\text{s}$ 以下时可调峰 2~3h，当死水位 56.0m 时，虽然调峰历时可以适当加大，但由此会带来库区通航保证程度的降低。综合考虑航运条件与发电效益，以死水位 56.2m 为优。

六、电站运行方式

电站运行方式一般分正常运行方式和非常运行方式。所谓正常运行方式指电站在正常发电时的运