

## 巨型水电站建设简评(二)

15  
54-58

邓念元

(电力工业部成都勘测设计研究院,成都,610072)

TV41

## 4 施工组织

巨型水电站的工程量是罕见的,往往要浇筑上千万立方米的混凝土,开挖或填筑数千万甚至上亿立方米的土石方,需要使用几百万吨的各种外来材料以及安装数十万吨的金属结构和机电设备(表4)。为了完成这些工程,需要建设庞大的施工设施,生产及服务系统,工期接近十年甚至十多年。由于施工工期长,受到洪水、不利气候条件等影响的风险也大,虽然巨型水电站投产后能带来丰厚的利润,但施工期的资金积压或施工期的贷款利息也绝非一般的公司或企业能够承受。由于巨型水电站工程量大、工序多、工种杂、工时紧、场地窄、投资大,受地质、地形、水文、气象和社会经济条件等的制约性强;因此,巨型水电站施工组织,必须采用并合理配置现代化的大型高效施工设备,严密的施工计划和完善的现场管理,最有效地使用劳动力、材料、设备和资金,按照系统工程学组织施工,以缩短工期,减少资金积压,极早地发挥经济效益。

表4 几座巨型水电站的主要工程量表

名称	坝型	最大坝高/m	土石方开挖/万m <sup>3</sup>	土石方填筑/万m <sup>3</sup>	混凝土/万m <sup>3</sup>	投产年限
伊泰普	空心重力坝/土石坝	196/70	6 150	3 200	1 229	9
古里	重力坝/土石坝	162/102	2 780	8 750	833	6
大古力	重力坝	168	3 490		918	7
图库鲁依	重力坝/土石坝	85/98	4 450	7 140	600	9
萨彦-舒申斯克	重力拱坝	242			960	16
拉格朗德二级	土石坝	160	840	4 800		6

注:1. 投产年限为施工导流开始到第一台机组发电的时间;2. 古里的投产年限为扩建工期,而大古力为初期工期;3. 图库鲁依水电站的工程量不包括二期的4 000 MW的电厂及过坝船闸;4. 拉格朗德二级土石方洞挖为366万m<sup>3</sup>。

## 4.1 施工过程中的水流控制

巨型水电站的施工时间长,遭受洪水威胁的风险大,需要采用比常规水电站更高的施工导流标准、更完善的洪水控制措施和更庞大的导流建筑物。如伊泰普水电站设计导流量为30 000 m<sup>3</sup>/s,导流明渠长2 000 m,底宽100 m(进口处加大到150 m)。明渠的最大开挖深度达100 m,开挖土石方

2 200万m<sup>3</sup>,坝轴线的明渠内设有带12个宽6.7 m、高22 m底孔的重力坝,采用5 000 kN的液压启闭机在坝顶操作重3 000 kN的钢闸门封堵。导流明渠的开挖以及高162 m,长170 m的导流底孔坝段的土建及设备安装于1975年9月开工,1978年10月完成并在流量为8 000 m<sup>3</sup>/s,上、下游落差3 m的情况下,采用上、下游钹堤同时进占的四钹立堵方式,使用120辆35~75 t的自卸汽车和46台大型推土机,昼夜抛投强度达11万m<sup>3</sup>,历时10 d完成了河道截流。上下游围堰最大堰高90 m和75 m,总工程量1 020万m<sup>3</sup>。1982年上下游围堰拆除,导流明渠底孔下闸,水库蓄水和溢洪道过水后,后期采用风险决策的方法确定厂房施工的洪水控制措施,并根据厂房施工的形象面貌,确定各时段的厂房施工防洪标准。位于叶尼塞河上游峡谷地区的萨彦-舒申斯克水电站,导流设计流量11 500 m<sup>3</sup>/s。根据坝址处的春汛小、夏汛高及无秋汛的特点,采用了分期导流方案。充分利用永久结构挡水和泄水,仅修筑分期低水围堰结合采用随坝体升高的多层临时孔口排泄洪水等措施,导流工程大大简化,省去了两条15 m×16 m长约850 m的导流隧洞和高达50 m和30 m的上、下游围堰,在不影响工期的前提下节约了近1亿卢布的建设资金。托坎廷斯河下游宽谷地区的图库鲁依水电站,施工设计导流量达51 000 m<sup>3</sup>/s。施工导流充分利用河道宽阔的有利条件,采用四段分期与永久建筑物平行穿插施工,使导流工程与主体工程的施工同时进行,基本上不占直线工期,与分两期导流的方案相比,缩短工期近2年。古里水电站采用分期加高大坝建成。在第二期工程扩建时,经过周密计划和精心施工,分八次将三条泄槽逐条分期错开加高,在施工某一条泄槽时,其它两条泄槽用来泄洪水。对于进行加高施工的泄槽的3个泄洪孔用三扇36 m×20 m重8 000 kN的平板闸门封闭,在一期工程安全正常运行的条件下顺利完成了九孔溢洪道的加高工程。

## 4.2 土石方工程施工

巨型水电站的土石方开挖及填筑的总量达数千万立方米,有的甚至超过1亿立方米(见表1),年平均强度达1 500万~2 000万m<sup>3</sup>,月平均强度在120万~150万m<sup>3</sup>以上,高峰月达300万~500万m<sup>3</sup>。为了达到进度要求的施工强度,大型高效、成龙配套的开挖和装载设备,性能优越的大吨位运输设备,完善的施工组织和管理(如合理的施工道路的布局、高质量的路面和及时的养护以及各种施工设备的维护和完好)是必不可少的。如伊泰普水电站的导流明渠土石方开挖达2 200万m<sup>3</sup>。施工过程中投入了近50台ATLAS钻机,120辆35~75 t的自卸汽车。开挖的土石方按质量等级分别

作为人工骨料、左岸堆石坝和土坝以及河床围堰的填充料。仅用3年时间就完成,平均月开挖强度77万 $\text{m}^3$ ,高峰月强度125.5万 $\text{m}^3$ 。然后仅用5个月时间完成了河床截流及高90m和75m,总方量达1020万 $\text{m}^3$ 的上下游主围堰的填筑。左岸土石坝的填筑日强度也达10万 $\text{m}^3$ ,月强度200万 $\text{m}^3$ 。地处热带雨林地区的图库鲁依水电站,土石方的填筑受暴雨的严重影响,每年的填筑时间仅9个月,在工地上采用了1000 $\text{m}^3/\text{h}$ 的连续式装载机,100t的底开式运料车,22~55t的自卸卡车,283kW的推土机,23 $\text{m}^3$ 的大型铲运机及其它配套设施等大型土石方机械,最大月填筑强度超过200万 $\text{m}^3$ 。而地处严寒地区的拉格朗德二级土石坝,其防渗体和过渡料都就地取材,采用当地分布广泛、贮量丰富的冰碛土和冰积砂砾石;为了控制填充料的级配及含水量,在工地上建成2个产量为500t/h的烘干炉,可降低含水量3%,使上坝土料的含水量低于最优填筑含水量的1%。所有的防渗料、反滤料和过渡料都要经过筛分,心墙冰渍土料要求15%~60%通过200号筛,反滤料的最大直径76mm,过渡料的最大直径229mm。所有这些材料都经过筛分分级后,按设计的颗粒级配曲线进行均匀混合后上坝。虽然拉格朗德二级工程的土石方填筑工程和其它巨型水电站相比不算很大,但仍达4800万 $\text{m}^3$ 。这种在高寒地区采用不利的天然建筑材料,进行严格的筛分、烘干及控制是世界所有工程中绝无仅有的。

#### 4.3 混凝土施工

混凝土的生产和浇筑是所有水电工程施工都不可缺少的最重要的施工活动。对于巨型水电站,由于混凝土方量大,施工工期长,要求的浇筑强度高,在许多情况下都会成为影响工期的关键因素。因而,巨型水电站混凝土生产的工厂设施和浇筑系统的完善、高效运行,是保证巨型水电站按期投产发电的关键。所有的巨型水电站,从原材料的开采,骨料的加工、运输、冷却,到水泥的运输、混凝土生产、运输及仓面作业,都有一套庞大而完善的系统,以保证混凝土在高强度下连接生产和浇筑。

早在30年代中期,美国在修建混凝土方量达809万 $\text{m}^3$ 的大古力水电站时,就对混凝土的分块、温控及浇筑方法和手段进行了系统的研究,在实际施工中获得成功并在后期所有的混凝土坝中得到了广泛的应用。顶长1272m,最大坝高168m的混凝土重力坝分为84个15.2m长的坝段,最宽的坝段采用6条纵缝分为7个15~20m宽的柱状块浇筑。在工地设置了8座4×2.5 $\text{m}^3$ 的拌和楼,24座台双悬臂门机,每台每小时生产混凝土64 $\text{m}^3$ 。大坝从1935年12月开始浇筑,至1941年10月完成,历时61个月。混凝土浇筑的最高日强度达17000 $\text{m}^3$ ,月强度达41万 $\text{m}^3$ ,最高年强度270万 $\text{m}^3$ ,创造了大坝混凝土浇筑的世界记录,该记录一直保持到伊泰普水电站施工时才被打破。

经过数十年的探索和发展,大体积混凝土的生产和浇筑工艺进行了多次变革。随着人类社会进入工业化,大型自动化拌和楼、大吨位起重设备以及混凝土的冷却和温度控制措施的不断完善,大坝混凝土的生产和浇筑进入了一个崭新的

时代。1975年开工的伊泰普水电站,在工地的左右岸各安装了一套混凝土生产系统,每套系统各由生产能力为1200t/h的骨料加工系统,三座4×3 $\text{m}^3$ ,产量为180 $\text{m}^3/\text{h}$ 的自动化拌和楼和27台单产0.9t/h的制冰机,以及相应的骨料预冷、脱水和后筛系统组成。混凝土拌和后的温度为7℃,浇筑温度为10℃。采用轨道式自控罐车运输3 $\text{m}^3$ 和6 $\text{m}^3$ 的吊罐,通过7台跨度为1360m,无线电遥控的20t固定式缆机覆盖主坝及厂房,缆机小时生产能力150 $\text{m}^3$ ,另配8台高架门机辅助浇筑厂房、翼坝及岸边溢洪道,高架门机高73m,臂长62m,在62m的回转半径时起重为9t,可吊3 $\text{m}^3$ 罐浇筑混凝土,在42.5m时为15.7t,26.5m时为22.5t,起重力矩达600t·m。伊泰普水电站混凝土浇筑高峰强度达每日14896 $\text{m}^3$ ,每月339441 $\text{m}^3$ ,每年303万 $\text{m}^3$ 。1200余万 $\text{m}^3$ 的混凝土仅用50个月即全部浇筑完成。而同期开工的图库鲁依水电站,混凝土方量为600万 $\text{m}^3$ ,在工地上配备有2050t/h的破碎系统,860t/h的混凝土骨料生产系统,容量为2840万kJ/h的制冷系统,24台总生产能力为18t/h的片冰机以及4座生产能力为240 $\text{m}^3/\text{h}$ 的拌和楼,混凝土浇筑的最高月强度达22.5万 $\text{m}^3$ 。但1963年开工的萨彦-舒申斯克水电站,顶长1083m,最大坝高242m的重力拱坝由66条收缩缝分成67个15.8m宽的坝段,每个坝段由纵缝分成4个25~27m长的柱状块进行浇筑,工地上只安装了施工总进度计划要求的两座连续式拌和楼的一座,小时产量仅达450 $\text{m}^3/\text{h}$ ,年产量180万 $\text{m}^3$ ,而且由于拌和楼及其辅助系统设备不完善,故障频出,以及建设资金投入不足等因素,工期长达19年,混凝土浇筑历时15年(180个月),最高年强度仅120万 $\text{m}^3$ ,平均月强度仅5万 $\text{m}^3$ ,远未达到年高峰强度240万 $\text{m}^3$ 和月平均强度12万 $\text{m}^3$ 的水平。与合理工期相比,拖延工期8年(近100个月),少发电2000亿kW·h,造成了大量的资金积压和无可挽回的巨大经济损失。

作为混凝土生产和浇筑这一系统工程,骨料加工是龙头,几乎所有的巨型水电站的混凝土都采用就地开采石料轧制人工骨料,而且相当大部分利用永久工程中合格开挖料。如伊泰普水电站的人工骨料主要取自于导流明渠和厂房基础开挖的新鲜玄武岩轧制。为了弥补细砂的不足,从坝址下游10km范围内的河滩上挖取了322万t的细砂作为补充,以降低机械制砂的成本。在工地上修建了生产能力各为1200t/h的骨料破碎及筛分系统。古里水电站二期扩建工程共浇筑混凝土671万 $\text{m}^3$ ,需要骨料1500万t,所有骨料全部采用厂房和尾水渠中开挖的新鲜花岗岩机械加工而成。图库鲁依水电站的人工骨料主要来自溢泄坝及消力池开挖的石碴,而拉格朗德二级水电站的混凝土骨料则完全采用导流洞和地下厂房开挖的石碴,只有萨彦-舒申斯克水电站由于可利用的合格开挖量小,全部骨料从开辟的石灰岩料场取料加工获得。

#### 4.4 地下工程施工

拉格朗德二级水电站的地下主厂房长483m,宽26.5m,高47.3m,岩石地下开挖量320万 $\text{m}^3$ 。地下厂房开挖主要从永久交通洞、尾水隧洞和压力管道进水口三个工作面依

次推进,安装隧洞及竖井、母线廊道、主厂房和尾水调压室安装间高程以上的开挖都利用交通洞出碴,而压力管道、尾水隧洞、尾水管以及调压室和主厂房安装间高程以下的部分的出碴,均从尾水隧洞进行,部分上部台阶的开挖也利用交通洞出碴,在开挖过程中,进行系统地控制爆破(预裂爆破、光面爆破和缓冲爆破),以尽量减少超挖和减轻撬岩、修整和支护工作,爆破后的岩石表面光滑平整。厂房顶拱和调压室顶部采用长 6.1 m 直径 35 mm 的预应力锚杆支护,间距 2 m × 2 m,张拉力 200 kN,个别岩石较差的部位锚杆加密至 1.5 m × 1.5 m,并结合挂网喷混凝土,支护作业在开挖完成后立即进行。主厂房及各洞室混凝土浇筑,由保温的罐车从拌和厂运输,全部采用混凝土泵进行浇筑。在厂房的开挖支护及出碴作业中,使用了大量的专用设备,包括 ATLAS 7 臂、4 臂、3 臂和 2 臂钻车,直径 94 mm 履带钻机和 2 臂锚杆台车, CAT D8 推土机, CAT D9N 推土机, CAT988 装载机, HOUGH400、500 型装载机和 JD510 液压反铲以及隧洞专用 ULIC32 t 和 INTERNATIONAL 45 t 自卸卡车等,月平均开挖强度 6 万 m<sup>3</sup>,高峰强度 12 万 m<sup>3</sup>。整个地下厂房工程从 1974 年 5 月开始开挖,1979 年 10 月第一台机组发电,1982 年全部建成,仅用 65 个月。

邱吉尔瀑布地下厂房长 296 m,高 48.3 m,最大跨度 28 m,岩石总开挖量 280 万 m<sup>3</sup>,地下工程开挖工期 34 个月,月平均开挖强度 8.8 万 m<sup>3</sup>。施工中开挖和衬砌同步进行,预应力锚索及钢丝网喷混凝土联合支护。施工过程中采用覆盖面积达 90~150 m<sup>2</sup> 的 3~7 臂液压钻车,装有 24~34 把阶梯钻机的 3 平台钻车,2.7~4 m<sup>3</sup> 的液压装岩机及 20~35 t 的自卸汽车配合作业。衬砌采用 20 t 6 m<sup>3</sup> 的搅拌机运送混凝土,水平输送距离 360 m,垂直 70 m,小时产量 90 m<sup>3</sup>,能输送最大粒径为 50 mm 的混凝土泵等专用施工机械。

总而言之,巨型水电站的施工,除了必须进行精心的施工规划和周密的施工组织外,在施工作业过程中,根据巨型水电站本身的施工特点,采用大型高效、成龙配套、一专多能的施工设备,完善的维护及管理以最大限度地发挥设备的作用,因地制宜地选择流水控制以及各种作业的施工方法和作业设备,高效率,低消耗地按期甚至提前完成巨型水电站的建设,以获得最大的经济效益或投资效益。

## 5 机电设备

(1) 坝高、泄洪量大、安全要求高是所有巨型水电站的共同特点,闸门和启闭机的可靠性就成了决定性的因素。巨型水电站中采用的闸门和启闭机见表 5。从表中可以看出,露顶式表孔闸门的平面尺寸达 300~400 m<sup>2</sup>,挡水高度达 20 m 以上;中孔弧门的最高运行水头达 110 m,而用于导流底孔的封堵闸门面积达 150 m<sup>2</sup>,最高挡水水头达 160 m,承受的总水压力都在 40 000 kN 以上,有的甚至达 180 000 kN。每个工程几乎使用了 10 套以上的大尺寸闸门。为了保证建筑物的安全运行,长期挡水的中孔弧门采用了液压压紧式止水片代替了传统的偏心铰压紧式止水(萨彦-舒申斯克),使启

闭设备和支铰结构得以大大简化并能有效地防止启闭过程中周边射水或门楣空蚀,且以任何开度运行。巨型泄洪设施的表孔闸门也向大型化发展,以满足能下泄设计所需要的单宽流量,缩短泄洪建筑物的前缘宽度,弧形闸门的支承结构也由传统的闸墩锚块发展成由支承大梁传力给闸墩,一方面减少了闸墩的不平衡扭矩,缩小了闸墩的宽度,另一方面也使闸门门叶的主横梁由传统的简支梁转化为双悬臂梁,减小了主横梁跨中弯矩及截面尺寸,进而减轻了闸门自重以及启闭机的容量。巨型闸门的启闭机,也日益广泛采用液压启闭机代替传统的钢丝绳卷扬机,既有利于闸门的平稳操作,利用液压来吸收不稳定水流的振动能量,又减轻了启闭机本身的重量以及省去了不利于结构布置和建筑物抗震的卷扬机排架。为了导流建筑物的底孔能顺利封堵,水库能按期蓄水运行,巨型水电站导流底孔的封堵闸门,特别是要求在高水头下运行的导流底孔,也采用液压启闭机操作,同时将启闭机设在坝顶或较高的位置,使孔口的混凝土堵头完成后能提出闸门并拆除启闭机用于永久工程。如伊泰普、图库鲁依的导流底孔的启闭机直接采用电站进水口的启闭机,闸门提出后改装为进水口的工作闸门,萨彦-舒申斯克直接利用中孔的事故和检修闸门作为导流底孔的临时封堵闸门,见表 5。

表 5 巨型水电站所使用的大尺寸闸门参数

名称	型式	尺寸 /m	水头 /m	水压力 /kN	数量	启闭机 液压/kN
伊泰普	溢洪道表孔弧门	20×21.34	20	51 000	14	2×2500
图库鲁依	溢洪道表孔弧门	20×21.34	20	50 500	20	2×2500
古里	溢洪道表孔弧门	15.24×20.76	20	38 000	9	2×2600
萨彦-舒申斯克	中孔弧门	5×6	110	43 500	11	
伊泰普	导流底孔封堵	6.7×22	135	185 500	12	5000
图库鲁依	导流底孔封堵	6.5×13	100	104 500	40	
萨彦-舒申斯克	导流底孔封堵	5×8	160	80 000	8	

(2) 为了最大限度减小厂房总体尺寸以及与之相关的挡水、引水、输水建筑物及其配套的拦污栅、闸门和启闭设备的工程量,减小在峡谷地区水工建筑物总体布置的难度,减少与水轮发电机组配套的主变压器、断路器、母线等各种电器设备数量,简化电站接线和控制系统,巨型水电站在条件许可情况下,尽可能采用大容量的水轮发电机组,以减少机组数量,从根本上减少建筑物的工程量及机电设备费用。

巨型水轮发电机组不断地提高水轮机的比转速和运行效率,减少尺寸,降低造价。根据意大利塞尔沃的统计,在 60 年代以后,相同设计水头的混流式水轮机的比转速增大了 20%,而轴流式水轮机的比转速增加了 16%。从表 6 中可以看出,水轮机的比速系数都接近或超过 2 000,机组在 110~130 m 水头段的比转速超过 200,在 70~90 m 水头段约超过 250,在 180~220 m 的也达到 160,均比我国现行的水轮机型谱上的比转速普遍高出 1~2 个水头段。如大古力扩建中前 3 台机组与后 3 台机组尺寸基本相同,但后 3 台机组的比转速由 212 提高到 273,单机出力提高 100 MW,单位千瓦造价降低达 15%,取得了显著的经济效益。同时,巨型水电站水轮机都要求制造厂家保证水轮机的最高效率和按出力或

水头的加权平均效率,如伊泰普水电站其额定水头时的效率达 95.5%(投标文件规定额定出力时不低于 92.5%,额定水头时不低于 94.5%,加权平均时不低于 93.8%)。除早期投入的大古力水电站外,水轮机在设计水头下的效率都在 92%以上最高达 95.5%。为了保证水轮机的效率,用户通常对投标时推荐的水轮机模型转轮进行同台对比或者对中标的水轮机转轮在第三者的试验台上进行验证试验,用户或咨询公司往往都会到试验台上观察验收,以便对真机作出正确的估价,发现并找出存在的问题,提出改进措施,以保证真机能在高效范围内经济地运行。

表 6 巨型水电站的水轮机主要参数

电站名称	额定出力 /MW	最大出力 /MW	转轮直径 /cm	设计水头 /m	比转速	比速系数	设计点效率 /%	最高效率 /%
伊泰普	715	740	865	118.4	211	2 296	95.5	95.5
大古力	715	715	990	86.9	273	2 545	90.0	94.0
大古力	612	612	978	86.9	212	1 976	88.0	93.0
古里	610	730	720	130.0	200	2 405	93.5	94.3
萨彦-舒申斯克	650	735	677	194.0	159	2 215	95.5	95.8
图库鲁依	330	316	810	60.8	277	2 160	92.1	93.5
克拉斯诺雅尔斯克	508	508	750	93.0	231	2 228	90.6	94.0
拉格朗德二级	338	338	610	137.1	175	2 050	93.2	94.1

为了降低电站厂房的高度,大型水轮发电机都采用半垂直或全伞式结构布置,而发电机主轴普遍采用无轴结构或钢板卷焊的结构,以缩短轴长,降低机组的无用空间。为了保证发电机的效率,巨型水轮发电机大多数采用定子水冷、转子强迫空冷的半水冷方式。如伊泰普、萨彦-舒申斯克以及大古力扩建的 700 MW 的机组,以降低冷却空气量和冷量损失,发电机的效率能高达 98.5% 以上,并且水轮发电机还有向转子和定子都采用水冷的双水内冷机组发展的趋势。在发电机结构布置上,其推力轴承结构也得到巨大的改进,大古力 600 MW 机组 41 000 kN 的推力轴承采用了巴氏合金水冷瓦新型抗重螺钉支承结构,在古里和萨彦-舒申斯克的发电机组上分别采用了双层推力轴瓦结构和刚性双排瓦结构,俄罗斯还试验成功了弹性金属塑料轴瓦推力轴承(瓦面材料为聚四氟乙烯),该轴承耐磨性好,摩擦系数小,启动和停机力强,开停机不需要高压油顶起装置,不需刮瓦,有利于运行和检修,已成功用于 240 MW 的布拉茨克机组的改造和 600 MW 的罗贡机组,将用于即将兴建的单机 1 000 MW 的图库汉斯克水电站水轮发电机组。见表 7。

(3)巨型水电站处于远离工业发达城市的偏远地区,需要架设长距离的输电线路将电力输送给用户。为了节约线路投资,增大线路的输运送容量以及降低输电损失,长距离的高压甚至超高压输电技术也得到了迅速的发展。交流输电电压从 330 kV 发展到 1 150 kV,而直流输电电压也从 ±100 kV 发展到 ±750 kV,输送容量和输送距离也越来越大,输送距离超过 1 000 km,最长的达 2 400 km(俄罗斯埃基巴斯图兹-坦包夫斯克,直流 ±750 kV),单回输送容量达 6 000 MW,与巨型水电站配套的超高压输电线路见表 8。

表 7 巨型水电站的水轮发电机的主要性能

电站名称	额定容量 /MVA	最大容量 /MVA	功率因数	转速 /r.min <sup>-1</sup>	推力负荷 /kN	结构型式	冷却方式
伊泰普	737.0	823.6	0.95	92.3	40 560	半伞式	定子水冷
伊泰普	823.6	823.6	0.85	90.9	40 560	半伞式	定子水冷
大古力	718.0	826.0	0.975	85.7	47 000	伞式	定子水冷
大古力	615.4	707.0	0.975	72.0	41 000	半伞式	空冷
古里	700.0	805.0	0.90	112.5	26 670	半伞式	空冷
萨彦-舒申斯克	717.0	736.0	0.90	142.8	32 500	半伞式	定子水冷
图库鲁依	350.0	350.0	0.95	83.7			空冷
邱吉尔瀑布	500.0	500.0	0.95	200.0	1 700	半伞式	空冷
克拉斯诺雅尔斯克	588.0	588.0	0.85	93.8		伞式	定子水冷
拉格朗德二级	370.0	370.0	0.90	133.3		半伞式	空冷

表 8 与巨型水电站相关的远距离超高压输电线路

国家	起始~目的地	距离 /km	电压 /kV	回数	输送容量 /MW
巴西	伊泰普~圣保罗	890	765	3	3×2100
巴西	伊泰普~圣保罗	800	±600	2	2×3150
加拿大	邱吉尔瀑布~蒙特利尔	1 300	735	3	3×1700
加拿大	拉格朗德河~蒙特利尔	1 100	735	5	5×2000
巴西	图库鲁依~贝伦	1 800	500	1	1100
俄罗斯	萨彦~新西伯利亚	1 000	500	2	2×1200
委内瑞拉	古里~加拉加斯	750	800	2	2×2500
美国	哥伦比亚河~洛杉矶	1 520	500	2	2×1200
美国	哥伦比亚河~洛杉矶	1 362	±400	1	1440

## 6 前景展望

随着发达国家的水力资源开发殆尽和发展中国家经济的飞速发展对电力需求量的不断增长,以及中国向西部开发推进和俄罗斯向远东发展,世界水电建设的中心将转移到发展中国家来。根据各国的水电开发规划,从本世纪末到下世纪中叶的几十年中,世界上将有 12 座巨型水电站开工建设(见表 9),其总容量将达 150 000 MW,相当于世界上目前已建成的巨型水电站总容量的 2.5 倍。

中国是世界上水力资源最丰富的国家,水电总蕴藏量 680 000 MW,可能开发的装机容量近 400 000 MW,居世界首位,还拥有世界上第三大河—长江和可能建设的最大水电站—雅鲁藏布江墨脱水电站。新中国成立以来,水力发电工业从无到有,从小到大,60 年代建成最大坝高 105 m,装机容量 660 MW 的新安江水电站,70 年代建成坝高 147 m,装机容量 1 225 MW 的刘家峡。80 年代建成坝高 178 m,装机 1 280 MW 的龙羊峡水电站以及地质及水力条件极其复杂的万里长江第一坝—装机容量 2 715 MW 葛洲坝水力枢纽。90 年代开工建设由 240 m 高的双曲拱坝和庞大的地下厂房系统组成的装机容量 3 300 MW 的二滩水电站。同时,还在岩溶严重发育地区建成了坝高 165 m,630 MW 的乌江渡水电站。改革开放以来,我国的工作重点逐步转移到经济建设上

来,水电建设事业取得了突飞猛进的发展,百万千瓦以上的水电站从改革开放前的一座 1 225 MW 发展到 1995 年的 10 座 14 200 MW。制造和安装了 18 台 300 MW 以上的水轮发电机组以及世界上最大的五强溪水电站 19 m×23 m 的表孔弧门,工作水头 120 m 的龙羊峡水电站 5 m×7 m 和最大水压力达 57 500 kN 的东江水电站 6.4 m×7.5 m、水头 100 m 的深孔弧门和液压启闭机。水电装机总容量从 1949 年的 160 MW 发展到 1995 年的超过 40 000 MW,居世界第五位。同时还有李家峡(2 000 MW)、小浪底(1 800 MW)、大朝山(1 260 MW)、广州抽水蓄能二期工程(1 200 MW)、二滩(3 300 MW)、万家寨(1 080 MW)、天荒坪抽水蓄能(1 800 MW)等 7 座百万千瓦以上的水电站以及龙滩(5 400 MW,初期 420 MW)、三峡(22 400 MW,初期 18 200 MW)两座巨型水电站正在建设中,标志着我国的水电建设不论从技术上还是从规模上都达到了世界先进水平。目前,我们已经具有在各种不同地质条件下设计和建设各种类型高坝及其泄洪消能、制造大型水电站的大型机电设备等方面的经验和能力。随着我国经济的飞速发展,以及电力建设转移到水电上来,我国在下世纪初将大规模建设黄河中上游、金沙江、雅砻江、大渡河、澜沧江、湘西、长江上游、红水河、乌江、闽浙赣及东北等十二大水电基地并实现西电东送,21 世纪巨型水电站建设的主战场将转移到中国上来。

表 9 近期规划建设巨型水电站指标

电站名称	所在国家	所在河流	装机容量 /MW	建设进展情况
虎跳峡	中国	金沙江	6 000	规划
乌东德	中国	金沙江	5 500	规划
白鹤滩	中国	金沙江	12 000	规划
溪洛渡	中国	金沙江	15 000	预可行性研究
向家坝	中国	金沙江	6 000	预可行性研究
三峡	中国	长江	22 400	建设中
龙滩	中国	红水河	5 400	施工准备
中叶尼塞	俄罗斯	叶尼塞河	6 700	建设中
奥古诺夫	俄罗斯	叶尼塞河	6 500	设计中
伊加尔	俄罗斯	叶尼塞河	6 600	设计中
图鲁汉斯克	俄罗斯	通古卡河	12 000	设计中
大英加	扎伊尔	扎伊尔河	39 000	规划

1994 年 12 月 14 日,李鹏总理向全世界庄严宣布,举世瞩目的三峡水力枢纽全面开工,并出席了三峡工程的开工典礼,结束了中国作为水力资源大国和水电大国没有巨型水电站的历史,标志着几代人历经奋斗,经上万名科学家充分论证的具有防洪、发电、航运、调水等多方面综合利用效益的跨世纪的水电工程进入全面实施阶段。三峡水力枢纽工程由最大坝高 175 m、坝顶总长 2 310 m 的混凝土拦河重力坝,两岸坝后式厂房,河床 22 个 7 m×9 m 泄洪中孔、23 个净宽 8 m 的泄洪表孔以及左岸双线 5 级船闸和 30 000 kN 均衡垂直直升船机组成。同时,在右岸还将预留 6 台机组的进水口以便扩建地下厂房。电站近期装机容量 18 200 MW,年发电量 850 亿 kW·h,远景达 22 400 MW,其供电地区将南达粤港,北通郑洛,东抵沪杭,西至成渝以及遍布广大华中地区,以促进全国统一电网的形成。工程需要开挖土石方 10 280

万 m<sup>3</sup>,填筑土石方 3 200 万 m<sup>3</sup> 浇筑混凝土 2 800 万 m<sup>3</sup>,安装 26 万 t 闸门、启闭机设备和其它金属结构以及 26 台 700 MW 的水轮发电机组、数十台巨型变压器、两座开关站和两座直流换流站,架设 16 条 500 kV 超高压交直流输电线路。工程建设将大规模采用碾压混凝土筑坝技术。需要解决泄流量 113 000 m<sup>3</sup>/s、导流过水流量 35 000 m<sup>3</sup>/s 的溢流坝的多层孔口的体型设计、结构设计、高速含沙水流的空化和泥沙磨蚀,直径 12.4 m 的压力管道的结构设计,高水头梯级船闸的输水系统和充泄水阀门的水力学,引航道的布置和通航水流条件,垂直直升船机高达 150 m、承重 118 000 kN 的塔柱的结构和抗震稳定问题以及直径 9.85 m 水头变幅 61~113 m、出力 700 MW 的巨型水轮发电机组、船闸高达 38.75 m、工作水头 36.25 m、总水压力 136 400 kN 的人字门结构、支撑和止水等重大技术问题。整个工程将于 2003 年投产发电,2010 年全部竣工,竣工后将作为世界上最大的水力枢纽工程。三峡工程的建成,不仅是中国工程史上的一个里程碑,而且将是世界工程史上的一个新的起点。

三峡工程的建成,将成为西电东送的一个支承点,为西部巨大的水能资源的开发提供了重要的条件。西电东送战略的主力电源—金沙江水电基地的建设也将提到议事日程上来。1994 年 5 月,全国政协副主席钱正英率领多位著名专家及政府官员对金沙江进行了考察,使金沙江的开发迈出了第一步。金沙江水电基地条件优越,是三峡工程最理想的后续工程,必须立即着手进行前期工作,这一点得到了国家计委乃至国务院领导的一致赞同。所有专家一致推荐条件优越的溪洛渡、向家坝两座水电站作为第一期工程,其中又以溪洛渡水电站尤为重要。溪洛渡水电站近期装机容量 12 000 MW,保证出力 4 020 MW,年发电量 573 亿 kW·h,远景达到 15 000 MW、655 亿 kW·h。整个枢纽由 283 m 高的重力拱坝、左右岸泄洪洞、两岸地下厂房及过木机道等组成。该电站规模大,坝址地质条件好,淹没损失小。地处攀西—六盘水—川南资源开发区的负荷中心和金沙江水电外送的前哨阵地,距三峡 800 km,广州 1 120 km,武汉 1 060 km,长沙 910 km,上海 1 740 km。采用超高压输电技术,无论是直接外送还是通过三峡接力外送,都是经济合理的,溪洛渡水电站是三峡工程之后的又一个理想的巨型水电站。

纵观历史,展望未来,我国巨型水电站的建设将伴随着经济的飞速发展和四个现代化的逐步实现而日新月异。三峡水力枢纽的开工建设和龙滩水电站投入施工准备,将从此结束中国没有巨型水电站的过去,中国的水电建设将进入一个崭新的时代。到下世纪中叶,金沙江上的巨型水电站将得到全部开发,中国将成为具有世界上座数最多、规模最大的巨型水电站的真正大国。我们相信,在不远的将来,中国将向西藏边陲的雅鲁藏布江进军,建设装机 48 000 MW、水头达 2 200 m 的世界独一无二的压水水电站。 (全文完)

#### 作者简介

邓念元 男 电力部成都勘测设计研究院工程监理处 室主任 高级工程师

(收稿日期:1996-08-28)