

# 南水北调中干线工程施工测量控制系统

汪易森<sup>1</sup> 杨爱明<sup>2</sup> 姚楚光<sup>2</sup> 严建国<sup>2</sup>

(1. 国务院南水北调工程建设委员会专家委员会, 北京 100053; 2. 长江勘测设计规划研究院, 湖北 武汉 430010)

**摘要** 详细介绍南水北调中线干线一期工程施工测量控制范围、建立施工测量控制网的技术思路和控制网组成。论述了施工测量控制网的精度选择方法。介绍建立工程施工测量控制网过程中所解决的主要技术问题: 超长输水线路施工控制网总体建立方案的研究; 国家三角测量控制成果不兼容问题及处理方案的研究; 高精度 GPS 短边混合网平差模型研究及平差软件的开发; 大地水准面精化和网络 RTK 技术在南水北调工程中的应用研究; 工程测量数据管理系统的研究与开发; 施工测量主要技术指标的论证。

**关键词** 南水北调中线工程 施工测量控制网 精度指标选择 GPS 骨干网

中图分类号: TV68 文献标识码: A 文章编号: 1006-7647(2007)02-0001-05

**Construction surveying control system for middle route of South-to-North Water Diversion Project**//WANG Yi-sen<sup>1</sup>, YANG Ai-ming<sup>2</sup>, YAO Chu-guang<sup>2</sup>, YAN Jian-guo<sup>2</sup>(1. Expert's committee of the South-to-North Water Diversion Construction Commission of the State Council, Beijing 100053, China; 2. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China)

**Abstract**: An introduction was given to the area of surveying control, the constitution of the surveying control net and the method for its establishment for the first stage of the middle route construction of the South-to-North Water Diversion Project. The method for accuracy determination of the control net was discussed, and some related main technical problems were presented, including the general scheme of the control net for the project with overlength water transfer route, the incompatibility of result of the national triangulation and measures for its treatment, high-accuracy GPS short-side hybrid net adjustment model and corresponding software compilation, refining of geoidal surface and the application of RTK technique to the South-to-North Water Diversion Project, development of data management system for engineering survey, and the verification of main technical indexes for engineering survey.

**Key words**: middle route of South-to-North Water Diversion Project; construction surveying control net; determination of accuracy index; GPS key net

## 1 南水北调中干线工程测量控制范围

南水北调中干线输水路线总长 1 427 km, 纵向坡比一般为 1/25 000, 部分地区达 1/30 000, 输水线路除总干渠外还设置河渠交叉、渠渠交叉、路渠交叉建筑物等共 1 750 座。设计利用南高北低的优越地形条件实现自流输水, 但自流输水水头不足百米, 为此必须沿总干渠全线布设高精度施工测量控制系统, 还必须根据建筑物的施工要求建立渠首枢纽施工控制网 1 处、穿黄工程施工控制网 1 处和其他建筑物施工控制网 177 处。

## 2 建立施工测量控制网的技术思路

根据南水北调中线一期工程的特点, 必须在全

面控制、统一设计、整体实施的原则下选择可靠、经济、高精度的最优布网方案, 为渠段和建筑物的施工控制提供统一的测量保障<sup>[1]</sup>。主要技术思路如下:

a. 在全面控制、统一设计、整体实施的原则下, 按高精度、可靠性、经济性等目标优选最佳布网方案。

b. 在煤矿采空区、膨胀土地区、超采地下水地区等复杂地质条件地区选埋总干渠首级施工控制网控制点时, 考虑建筑物施工控制网点与建筑物安全监测网相结合。

c. 平面施工控制网点尽可能利用高程施工控制网点, 做到平、高结合, 方便使用, 节约经费。建筑物的施工控制网挂靠在总干渠首级施工控制网节点上, 所布设的施工控制网点要方便施工单位进行加密控制点的布设。

作者简介: 汪易森(1944—), 男, 江苏东台人, 教授级高级工程师, 国务院南水北调建设委员会专家委员会秘书长(兼专家委员会工程技术组组长), 从事坝工、地下工程及引水工程研究。E-mail: yswang@mwr.gov.cn

d. 考虑到南水北调工程前期工作的连续性要求,总干渠平面施工控制系统仍采用 1954 年北京坐标系(在投影差大于 5 cm/km 时,应进行相应的处理)。总干渠高程施工控制系统采用 1985 国家高程系统。

### 3 测量保障系统的精度选择

#### 3.1 高程控制网精度等级选择

渠线测量高程误差的估算:设  $i$  为渠段的渠道纵坡, $h$  为渠段两端的高差, $L$  为渠段长度,则

$$i = \frac{h}{L} \tag{1}$$

用对数形式表示为

$$\ln i = \ln h - \ln L \tag{2}$$

将式(2)微分,即

$$\frac{di}{i} = \frac{dh}{h} - \frac{dL}{L} \tag{3}$$

根据误差传播规律,将式(3)转为中误差:

$$\left(\frac{m_i}{i}\right)^2 = \left(\frac{m_h}{h}\right)^2 + \left(\frac{m_L}{L}\right)^2 \tag{4}$$

式(4)表示渠线纵坡、高差、长度相对误差的关系。

一般情况下,假设测量误差影响渠线纵坡误差不超过纵坡的 1/10,即

$$\frac{m_i}{i} \leq \frac{1}{10} \text{ 或 } \sqrt{\left(\frac{m_h}{h}\right)^2 + \left(\frac{m_L}{L}\right)^2} \leq \frac{1}{10} \tag{5}$$

众所周知,长度测量采用测距仪或全站仪,测量相对误差一般可达 1/100 000,即  $m_L/L = 1/100\,000$ ,所以式(4)中影响渠域纵坡误差的主要因素是高差测量误差  $m_h$ 。因此式(5)可表示为

$$\frac{m_L}{h} \leq \frac{1}{10} \tag{6}$$

将式(1)代入式(6)得出高差测量所允许的误差:

$$m_h \leq \frac{1}{10} iL \tag{7}$$

渠段高差测量误差由基本高程控制测量误差  $m_1$ 、测站高程控制误差  $m_2$ 、高程放样误差  $m_3$  组成,即

$$m_h = \sqrt{m_1^2 + m_2^2 + m_3^2} \tag{8}$$

高程放样误差一般可达  $\pm 5\text{mm}$ ,设精度梯度  $\frac{m_1}{m_2} = \frac{1}{3}$ ,由式(7)和式(8)可得

$$m_1 \leq \sqrt{\frac{(iL)^2}{1000} - 25} \tag{9}$$

公式(9)反映了首级高程控制网对渠段高差的测量误差与渠段纵坡和渠段长之间的数学关系,所考虑的渠段越长,允许的测量误差就越大,那么究竟选择多长的渠段进行误差分析合适?由于每隔 4 km

埋设 1 座水准标石,也即首级高程控制网每隔 4 km 对渠线高程和纵坡进行有效控制,故可将分析的渠段长暂定为 4 km,再由式(9)计算测量误差  $m_1$ 。据此选用水准测量的等级,如果既符合工程建设需求,又方便实施,则说明所考虑的渠段长合适;否则需调整渠段长,重新计算、分析,直至选出合理的渠段长。

水准测量测段高差的中误差表达式如下:

$$m = \sqrt{L}m_w \tag{10}$$

式中: $m_w$  为每千米水准测量的全中误差,一等为  $\pm 1.0\text{ mm}$ ,二等为  $\pm 2.0\text{ mm}$ ,三等为  $\pm 6.0\text{ mm}$ ,四等为  $\pm 10.0\text{ mm}$ 。将  $L = 4\text{ km}$ , $i = 1/30\,000$ , $1/25\,000$ , $1/20\,000$ ,以及  $m_w = 1.0, 2.0, 6.0, 10.0$  分别代入式(9)和(10)进行计算,所得结果见表 1。

表 1 渠段高差测量误差 mm

| $i$      | $m_1$ | $m_2$ | $m_{\text{II}}$ | $m_{\text{III}}$ | $m_{\text{IV}}$ |
|----------|-------|-------|-----------------|------------------|-----------------|
| 1/30 000 | 3.9   | 11.7  | 4               | 12               | 20              |
| 1/25 000 | 4.8   | 14.4  | 4               | 12               | 20              |
| 1/20 000 | 6.1   | 18.4  | 4               | 12               | 20              |

注: $m_{\text{II}}$ 、 $m_{\text{III}}$ 、 $m_{\text{IV}}$  分别为采用二等、三等、四等水准测量施测渠段高差的中误差。

从表 1 数据可以看出,对于 4 km 长的渠段,当渠段纵坡为 1/30 000 时,首级高程控制网选择二等水准测量精度可以满足总干渠建设的要求。此外,采用二等水准测量作为首级高程控制,为监理测量、竣工测量和安全监测提供高程基准也是适宜的。因此,选用二等水准网作为首级高程控制网。

#### 3.2 平面控制网精度等级选择

南水北调中线工程属国家一等工程,根据 SL 52—93《水利水电施工测量规范》中第 2.1.2 条规定,首级平面控制网应选用二等控制网或 C 级 GPS 网。

### 4 测量控制系统构成

#### 4.1 总干渠高程施工控制网布设

总干渠高程施工控制网沿渠线布设二等水准,平均 4 km 设 1 座二等普通水准点,平均 40 km 设 1 座二等基本水准点。该高程施工控制网联测国家一等水准点 10 点,布设为 9 条二等附合水准路线,二等跨河水准测量 10 处。根据一等水准点的分布情况,沿线布设 9 条二等附合水准路线。

沿线跨越大江大河的水准测量按照 GB 12898—1991《国家一、二等水准测量规范》的要求进行。跨河水准测量有 10 处,湍河、沙河(河南)、黄河、漳河、洛河、沙河(河北)、滹沱河、大沙河、唐河、永定河,跨河宽度均在 500~2 000 m 范围内。

#### 4.2 总干渠平面施工控制网布设

南水北调中线一期工程需建立骨干网,控制各

分段施工控制网的精度<sup>[2]</sup>。根据工程需要和国家一等平面控制网点的分布情况,骨干网由 18 点组成,其中新埋标石点共 12 点,联测国家一、二等控制点 6 点,另外再利用北京、武汉、西安、泰安 4 个 GPS 永久性跟踪站进行联合数据处理。

在干渠 GPS 骨干网的基础上,利用 C 级 GPS 网布设全线的平面施工控制网,在已有高程控制网的基础上,平均每隔 8 km 选取 1 座水准点作为 GPS 点,在该点附近再选取 1 个 GPS 方位点,二者间距为 1000 m。全线 C 级网计划联测国家等级控制点 19 点。

骨干网按 GB/T 18314—2001《全球定位系统(GPS)测量规范》中的 B 级网要求执行。C 级网点分别附合于骨干网点及国家一、二等平面控制点上。C 级网中最短独立闭合环或附合路线边数应满足少于 6 条的规定。

南水北调中线工程总干渠 GPS 骨干网布置如图 1 所示。

4.3 建筑物施工控制网

各建筑物施工控制网平面坐标系统采用挂靠于 1954 年北京坐标系的独立坐标系,观测边长不进行高斯正形投影改正,但须投影到测区所选定的高程面上(与设计所用地形图的坐标系统保持一致)。高程系统采用 1985 国家高程基准。

建筑物施工控制网平面控制应满足 SL 52—1991《水利水电施工测量规范》二等精度的技术指标,即网中相邻点边长相对中误差应小于 1/150 000,点位中误差不大于 ± 5 mm。高程控制应满足 GB 12898—1991《国家一、二等水准测量规范》二等精度的技术指标。

南水北调中线工程总干渠(京石段)施工控制网布置如图 2 所示。

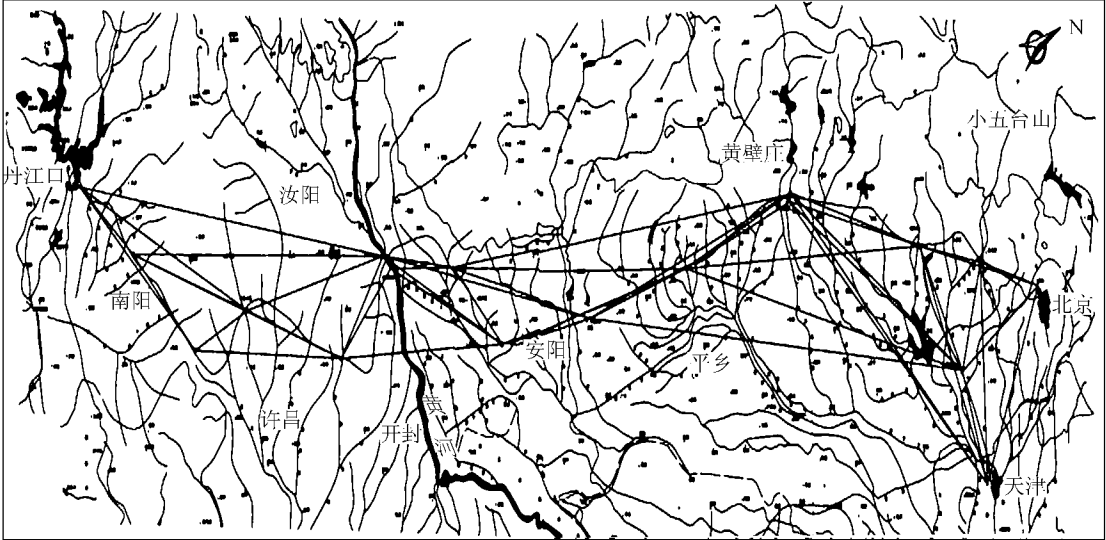


图 1 南水北调中线工程总干渠 GPS 骨干网布置示意图

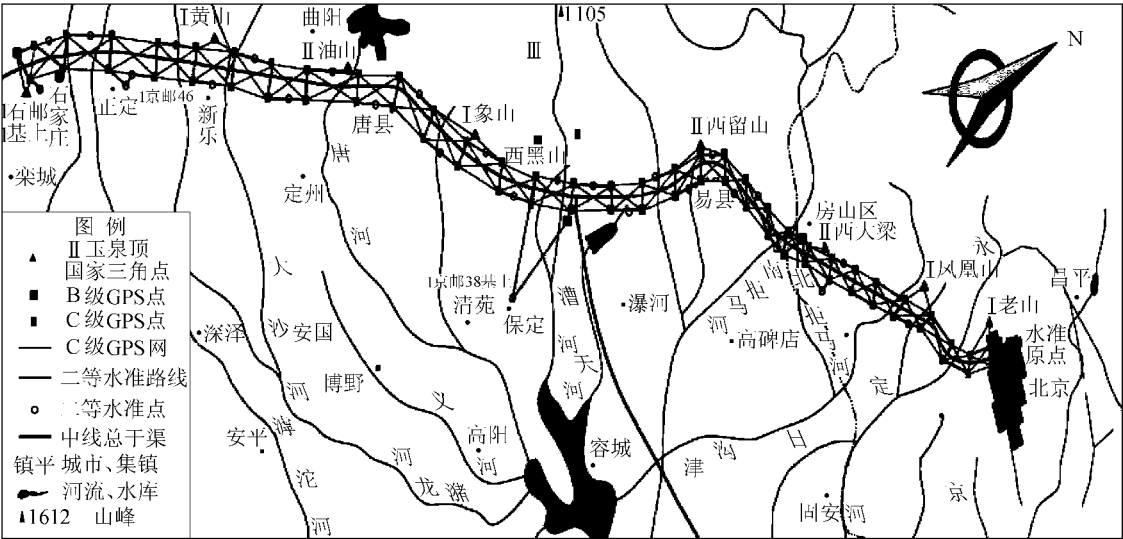


图 2 南水北调中线工程总干渠(京石段)施工控制网布置示意图

## 5 主要技术问题的研究

### 5.1 超长输水线路施工控制网总体建立方案的研究

研究了国家大地控制网与工程控制网的关系。国家大地控制网是工程控制网的测绘基准依据,工程控制网是国家大地控制网与工程测绘的联系纽带,也是工程测绘的基础。国家大地控制网的设计和布设目的主要为满足国家基本比例尺地形图测图和地球科学研究的需要,同时也考虑从国家整体控制的角度为国家各项工程建设提供基础的控制依据,但不可能为服务于某一具体工程而进行国家大地控制网的设计。因此,各项工程还需要根据自身的特点选择某种工程控制网建立与国家控制网的联系,才能使国家控制网服务于具体工程。南水北调中线一期工程通过布设首级施工控制网来建立国家控制网与工程测绘的联系,同时也为全线施工提供统一的控制基准。首级施工控制网是在国家控制网的基础上建立的。国家控制网为首级施工控制网提供起算数据,建立与国家统一的坐标系,并限制测量误差的积累,保证施工控制网的精度。首级施工控制网则为工程施工测量、竣工测量、施工期变形监测等提供测量控制基准,同时完成国家坐标系向工程坐标系的转换<sup>[3]</sup>。

研究了高斯正形投影对工程测量的影响,提出采用高斯正形投影 1°带平面直角坐标系作为超长输水工程施工的工程坐标系,这样就能保证边长投影长度变形不大于 2.5 cm/km,可满足工程施工放样测量精度不低于 1/20 000 的要求。同时,通过换带计算就可以方便地完成国家坐标系向工程坐标系的转换。

从保证施工放样精度、控制误差积累和顾及施工期各种测量工作对控制的需求出发,应用测量误差理论,论证了施工控制网的必要精度和适合的等级,即:平面控制采用 GPS 布网,先用 GPS B 级网作为骨干网,与 GPS 永久跟踪站联测,然后在骨干网的控制下布设 GPS C 级网作为总干渠全线首级平面施工测量控制网,并且均匀地联测国家一、二等平面控制点和规划阶段的测图控制网点。这种布网方式有效地控制了测量误差的累积,能获取高精度的 WGS-84 坐标系和 1954 年北京坐标系坐标,也方便国家坐标系向工程坐标系的转换,同时还可以检查施工坐标与设计坐标的一致性。高程控制采用二等水准精度布网,经论证能满足因总干渠纵坡比小对测量提出的特殊要求。实践证明这是一种科学、先进、实用的布网方案。

分析了渠线周围国家水准点的稳定性,根据国家一等水准 3 期观测动态平差成果,选择变化速率

小的一等水准点作为已知点,运用数理统计理论对其不同期的高程成果进行垂直位移显著性检验,以确保所采用已知点的点位稳定及已知数据可靠。

### 5.2 国家三角测量控制成果不兼容问题及处理方案的研究

研究了总干渠沿线国家一、二等三角点成果与 GPS 网点成果不兼容的程度,提出了不兼容问题的处理方案。

GPS 骨干网和渠线 GPS C 级网在 WGS-84 坐标下进行平差,并使 C 级网置于总干渠全线 B 级骨干网的控制之下,以保证首级平面控制网网点之间的相对精度和绝对精度<sup>[4]</sup>。

为了对已知点不兼容性进行有效的处理,将 C 级网分为 3 段:北京段,石家庄以北段,石家庄以南段。分别对每段进行 1954 年北京坐标系下的网平差。将一部分已知点作为未知点参加平差,根据平差坐标与已知坐标的差异来判断不兼容的程度,对兼容性特别差的已知点进行剔除,然后采纳剔除后剩余的已知点进行网平差。由于已知点之间仍然存在一定程度的不兼容性,平差结果可能使控制网发生局部扭曲,为克服控制网局部被扭曲,选用较远的 2 个网点(其中 1 点为非已知点)的平差坐标作为新的已知数据对该段的控制网进行第二次平差。第二次平差效果等价于将控制网进行了相似变换,使其附合在选取的两个作为新已知点的 2 个网点上,从而避免 GPS 网在原已知点附近的扭曲变形,保持了网点之间相对位置精度的均衡性。当原已知点的平差值与已知值之差小于 0.14M(M 为测图比例尺分母),认为第 2 次平差成果有效;否则,剔除超限的已知点,重复第 1 次平差和第 2 次平差,直至达到要求为止。实践证明这是一种简单易行的对已知点不兼容性的处理方式。

### 5.3 高精度 GPS 短边混合网平差模型研究及平差软件的开发

近几年,长江勘测规划设计研究院开发研制了“高精度大地测量控制网数据处理系统”软件(获国家科技进步三等奖)及其他一些测量软件,为 GPS 高精度短边混合网的平差软件研究奠定了很好的基础,积累了丰富的经验。

利用 GPS 数据处理模型及 GPS 数据的特点,进行了高精度超短边长的 GPS 混合网平差数学模型研究与软件开发,并通过已完成的类似工程数据进行实验,使之不断优化、完善,解决了南水北调中线工程中交叉建筑物施工控制网的平差计算问题。开发的“GPS 短边混合网平差软件”能对水准测量、三角高程测量、边长测量、角度测量及 GPS 观测进行

综合处理 ,并能对长距离水准测量进行日月引力改正计算。

5.4 大地水准面精化和网络 RTK 技术在南水北调工程中的应用研究

利用南水北调中线一期工程控制网的 GPS 成果和精密水准成果 ,以及已有的重力场模型等资料进行大地水准面精化研究 ,并对网络 RTK 技术在南水北调工程中的建立方案、管理、运用进行研究 ,方便施工单位利用 GPS 技术快速、准确地进行施工放样及为运行期安全监测和工程管理服务。

5.5 工程测量数据管理系统的研究与开发

在充分分析南水北调中线工程各种测量数据特点的基础上 ,借鉴已完成的其他工程的研究和开发经验 ,研究测量数据管理系统的模型并开发相应的管理系统软件 ,并通过实践检验后为南水北调中线工程建设和管理服务。

5.6 施工测量主要技术指标的论证

南水北调中线工程输水路线长、渠线纵坡小、工程规模浩大、施工单位多、施工周期长 ,有必要制订统一的南水北调中线工程施工测量技术要求。由于工程的特殊性 ,导致某些技术指标要超过现行测量规范的要求 ,因此在制定南水北调中线工程施工测量技术要求的过程中 ,有必要根据工程特点对施工测量的主要技术指标进行科学论证 ,使测量工作更好地满足南水北调中线工程建设的需要。

6 结 语

南水北调中线工程总干渠全线及建筑物需建立有统一控制标准、统一控制精度的平面和高程施工测

量控制系统 ,该系统在工程施工期间将为不同施工单位、不同施工区段提供施工放样依据 ,为各工程建设监管单位提供监管依据 ,并在分段施工完成后成为工程竣工验收的依据 ,以检查各分段施工是否按设计要求实现水头分配 ,是否满足设计水面坡降要求。

南水北调中干线工程施工测量控制设计方案周密 ,科学合理 ,具有创新性。控制网选点合理 ,标石埋设稳固 ,仪器设备检验项目齐全 ,技术状态良好 ;外业观测严谨 ,观测精度优良 ,各项技术指标满足规范要求 ,数据处理方法正确 ,资料齐全 ,成果满足规范和工程建设的要求 ,在建网过程中采用了高新技术、精密仪器、严密的数据处理理论和软件 ,该网于 2005 年正式投入使用 ,满足南水北调中线干线工程对测量的高精度要求。

参考文献 :

[ 1 ] 康引吉 ,姜本海 ,姚楚光 ,等 .南水北调中线一期工程施工控制网测量技术报告[ R ].武汉 :长江水利委员会长江勘测规划设计研究院 ,2003.

[ 2 ] 康引吉 ,姜本海 ,姚楚光 ,等 .南水北调中线工程施工控制网实施方案[ R ].武汉 :长江水利委员会长江勘测规划设计研究院 ,2003.

[ 3 ] 严建国 ,姜本海 ,周传松 ,等 .南水北调中线一期工程干线(除京石段)首级施工控制网测量工程技术总结报告[ R ].武汉 :长江水利委员会长江勘测规划设计研究院 ,2005.

[ 4 ] 周永渠 ,谢津平 ,伍志刚 ,等 .南水北调中线一期工程总干渠全线 GPS 骨干网与施工控制网技术方案设计[ R ].天津 :中水北方勘测设计研究有限责任公司 ,2004.

( 收稿日期 2006-06-30 编辑 :高建群 )

·小资料·

我国发电引水隧洞长度在 10 km 以上的水电站

| 序 号 | 电站名称   | 地 点        | 河 流  | 坝 型      | 坝高/m  | 引水隧洞<br>长度/km | 装机容量/<br>万 kW | 建设情况     |
|-----|--------|------------|------|----------|-------|---------------|---------------|----------|
| 1   | 福堂电站   | 四川汶川       | 岷 江  | 闸 坝      | 31    | 19.319        | 36            | 2004 年建成 |
| 2   | 沙湾电站   | 四川木里       | 木里河  |          |       | 18.715        | 24            | 在建中      |
| 3   | 狮子坪电站  | 四川理县       | 杂谷脑河 | 碎石土心墙堆石坝 | 135.5 | 18.710        | 19.5          | 在建中      |
| 4   | 碓磑电站   | 四川宝兴       | 宝兴河  | 碎石土心墙堆石坝 | 125.5 | 18.670        | 24            | 在建中      |
| 5   | 锦屏二级电站 | 四川木里、盐源、冕宁 | 雅砻江  | 闸 坝      |       | 17.250        | 480           | 即将开工     |
| 6   | 薛城电站   | 四川理县       | 杂谷脑河 | 闸 坝      |       | 15.174        | 13.8          | 在建中      |
| 7   | 吉沙电站   | 云南香格里拉     | 硕多岗河 | 闸 坝      | 34    | 14.470        | 12            | 在建中      |
| 8   | 姜射坝电站  | 四川茂县、汶川    | 岷 江  | 闸 坝      |       | 12.742        | 12.8          | 2005 年建成 |
| 9   | 周宁电站   | 福建周宁       | 穆阳溪  | 碾压混凝土重力坝 | 73.4  | 12.352        | 25            | 2005 年建成 |
| 10  | 金盖电站   | 四川康定       | 瓦斯河  | 闸 坝      | 16.5  | 11.732        | 8             | 近期开工     |
| 11  | 赶场电站   | 重庆万州       | 磨刀溪  | 重力坝      | 8.0   | 11.905        | 3.75          | 1997 年建成 |
| 12  | 色尔古电站  | 四川黑水       | 黑水河  | 闸 坝      | 34.5  | 11.000        | 15            | 在建中      |
| 13  | 柳坪电站   | 四川茂县       | 黑水河  |          |       | 11.000        | 12            | 在建中      |
| 14  | 太平驿电站  | 四川汶川       | 岷 江  | 闸 坝      | 23    | 30.609        | 26            | 1994 年建成 |
| 15  | 泗南江电站  | 云南墨江       | 泗南江  | 面板堆石坝    | 115   | 10.300        | 20.1          | 在建中      |
| 16  | 柳洪电站   | 四川美姑       | 美姑河  | 闸 坝      | 26.5  | 10.218        | 15            | 2006 年建成 |

( 吴 高供稿 )