

溪洛渡电站工程水文

辛忠礼 吕振前

(成都勘测设计研究院,成都,610072)

提 要 本文简要介绍溪洛渡水电站工程水文的分析计算方法和主要设计成果。其中设计洪水的分析计算内容涉及到工程水文的各方面,将作为重点内容予以介绍。

关键词 溪洛渡电站 工程水文 计算方法 设计成果

1 前 言

溪洛渡电站位于金沙江下段川、滇两省交界的干流峡谷上。是一个具有季调节性能的巨型水电工程。挡水建筑物为混凝土拱坝,坝高283m,总库容为115.7亿 m^3 ,调洪库容42亿 m^3 ,装机容量1200万kW。建成后除供本地区用电外,还将担负“西电东送”的任务。成都勘测设计研究院已完成选坝阶段的设计工作,现将水文计算的主要方法及设计成果加以介绍。

2 流域概况

金沙江是长江的上游河段,其上源沱沱河发源于青藏高原唐古拉山脉的格拉丹东雪山西南侧。沱沱河与当曲汇合后称通天河,通天河流至直门达附近汇合巴塘河后称金沙江。金沙江流经青、藏、川、滇四省(区),至四川宜宾与岷江汇合后称长江。

金沙江干流长3481km(包括通天河),约占长江全长的55%;岷江汇口以上流域面积47.32万 km^2 ,约占长江总面积的26%;河道总落差5140m,占长江干流总落差的95%以上;水能蕴藏量约1.13亿kW,约占长江流域水能总蕴藏量的42%,占全国的1/6。

本流域位于东经 $90^{\circ}\sim 105^{\circ}$,北纬 $24^{\circ}\sim 36^{\circ}$ 之间,东西跨15个经度,南北跨12个纬

度。北以巴颜喀拉山与黄河上游分界,东以大雪山与大渡河为邻,南以乌蒙山与珠江接壤,西以宁静山与澜沧江分水。流域呈由西北向东南倾斜的狭长形。

本流域地势西北高东南低,降雨和气温由西北向东南递增。从地形、地貌和气候看,本流域大体分为青藏高原区、横断山纵谷区和云贵高原区。各区由于纬度和海拔高程的差异,自然景观和气候迥然不同。

2.1 青藏高原区

本流域巴塘、雅江一线以北地区为青藏高原东南部,海拔高程5000m左右,地势由西北向东南倾斜,地貌呈高原景观。金沙江河源地区现代冰川发育,分水岭高程多在6000m左右,格拉丹东雪山主峰高达6621m。本区除高大雪峰外,地势较为平坦,水系发育,河谷宽浅,流速缓慢。流向大体由西北向东南流。

由于本区地势高,又远离水汽源地,气候寒冷干燥。多年平均气温 $-4.9\sim 7.8^{\circ}C$;多年平均年降水量为387.0~657mm,多年平均年降水日数为100.3~169.8d,雨季为5~10月,其降水量占全年的90%以上,降雪则为本区的主要降水形式,绝大部分地区日降水量在50mm以下;多年平均蒸发量1160~1720mm(20cm蒸发器,下同);多年平均相对湿度53%~67%。

2.2 横断山纵谷区

金沙江自青藏高原流出后,进入横断山纵谷区。本区大致在金江街~攀枝花~屏山以北,巴塘~雅江一线以南的地区,海拔高程一般为2 000~5 000m。横断山褶皱带呈南北走向,谷岭相间,山高谷深,相对高差可达3 000m以上。河道狭窄,河谷多呈“V”形,水流湍急,下切强烈。至石鼓,河流转向东北,绕玉龙雪山形成金沙江河曲,其间有举世闻名的虎跳峡,长约16km,河宽仅60~80m。流至攀枝花市下游有左岸最大支流雅砻江汇入。金沙江在本区内大体由北向南流。

由于地形影响,使区内气候在水平和垂直方向上差异很大,立体气候明显。同一座山的山谷至山顶可具有亚热带、温带直至寒带的气候变化。本区是金沙江流域的主要降雨区,多年平均年降水量320~1 560mm,多年平均年降水日数74.2~166.0d,雨季为5~10月,其降水量占全年的90%以上。一日最大暴雨量约50~230mm,河曲以东至雅砻江下游一带为本流域的最大暴雨区;多年平均气温3~19.8℃;多年平均年蒸发量960~

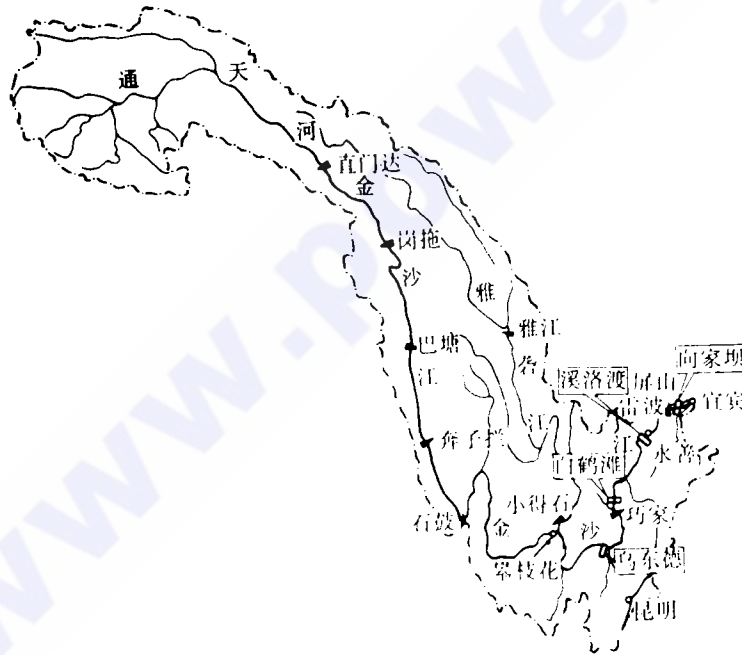
2 900mm;多年平均相对湿度45%~83%。

2.3 云贵高原区

金沙江自北向南流出横断山纵谷区后,在金江街折向东北,进入云贵高原区。本区大致为金江街~攀枝花~屏山一线以南地区,海拔高程一般为1 000~2 000m,部份河谷降至1 000m以下。高原面多呈壮年后期圆顶丘陵。本区内金沙江北岸支流短小,南岸支流发育,龙川江、普渡河、牛栏江、横江等较大支流均由南岸汇入。

本区属亚热带气候区,降雨充沛。由于纬度低,海拔较高,阳光充足,气温年内温差较小,故有“四季如春”之称。区内多年平均年降雨量610~1 130mm,多年平均降水日数90~220d,雨季为5~10月,其降雨量占年降雨的85%以上。一日最大暴雨65.0~200mm;多年平均气温11.6~21.9℃,受地形影响,元谋、巧家一带气候炎热,“长夏无冬”,极端气温最高可达42.7℃;多年平均年蒸发量为1 500~3 800mm;多年平均相对湿度为53%~83%。

金沙江流域自然地理分区见附图。



附图 金沙江流域示意图

3 径 流

3.1 径流特性

本流域径流主要来自降雨,上游有部份融雪补给。径流年内分配特性与降雨基本对应。流域降水一般于11月份后明显减少,径流主要靠流域退水和地下水补给。至翌年春季气温逐步回升,降水量增加,北部地区融雪补给也随之增多,径流量逐渐增大。6~11月为丰水期,这一时期干流各站的水量约占全年水量的80%以上,屏山站约占全年水量的81.1%,其中7~9月占全年的54%,枯水期(12~5月)仅占全年径流量的18.9%。年最小流量多发生在3~4月,屏山站历年实测最小流量为 $1\ 060\text{m}^3/\text{s}$ (1960年4月3日及1982年3月22日)。

金沙江径流丰沛,据屏山站资料统计:多年平均流量为 $4\ 580\text{m}^3/\text{s}$,折合年径流量 $1\ 440\text{亿}\text{m}^3$,约为黄河水量的3.3倍,多年平均径流模数为 $3141/\text{s}\cdot\text{km}^2$,约为黄河流域的5.5倍。

干流各站径流年际变化比较稳定。屏山站实测系列中,最大年平均流量为 $6\ 390\text{m}^3/\text{s}$ (1954年6月~1955年5月),最小年平均流量为 $3\ 380\text{m}^3/\text{s}$ (1942年6月~1943年5月),二者之比仅为1.89,与多年平均流量之比分别为1.40和0.74。

径流的地区组成与降水的地区分布规律基本一致。据实测同步资料统计,干流石鼓以上、支流雅砻江小得石以上及石鼓~小得石~屏山区间多年平均径流量分别占屏山站多年平均径流量的29.3%、36.8%、33.9%,而控制流域面积分别占屏山站控制面积的46.7%、25.5%、27.8%。可见,干流石鼓以上由于大部份地区地处青藏高原,年降水量小,控制流域面积虽大,但其径流量占屏山的比例小;而石鼓以下由于年降水量大,径流量占屏山站径流量的70%以上。其间又以支流雅砻江单位面积产

流量最丰。

3.2 径流计算

溪洛渡电站坝址处无流量观测资料,其下游124km有屏山水文站,控制面积 $45.86\text{万}\text{km}^2$,坝址与屏山区间面积仅占屏山站控制面积的0.9%,故可直接引用屏山水文站的资料作为本电站的设计依据。

屏山站具有1939年6月~1985年5月共46个水文年实测径流系列,经论证具有较好的代表性,以此进行频率分析计算,其多年平均流量为 $4\ 580\text{m}^3/\text{s}$,枯水期(12~5月)平均流量为 $1\ 710\text{m}^3/\text{s}$ 。

4 洪 水

4.1 暴雨洪水特性

金沙江洪水除上游有部分融雪补给外,主要由降雨形成。每年5月开始受西南季风控制和东南季风影响,暖湿气流源源不断输入本流域,降雨逐渐增多且雨区自上游向下游推移。据实测资料统计,年最大洪水雅砻江上游多出现在6、7两月,其频率为70%以上;金沙江上游多出现在7、8两月,其频率为92%;金沙江中下游多出现在8、9两月,其频率为80%以上。

进入汛期后,大面积长历时低强度的连绵不断的降雨使洪水连续多峰,后一次洪水在前次洪水的基础上叠加,使汛期内底水逐步抬高,当底水达到 $4\ 000\text{m}^3/\text{s}$ 以上,如再发生全流域的较大降雨,或中、下游发生大面积暴雨,则可形成屏山站的年最大洪水。

最大洪水多由两次以上的大面积降雨形成,一次降雨过程3~6d。一般对应着两个雨区,即高原雨区和中下游雨区。高原雨区的降雨特点是强度小、历时长、面积大,多呈纬向带状分布,对屏山洪水起垫底作用。中下游雨区的特点是量级大、历时相对较短、呈多中心分布。(暴雨中心多发生在石鼓~金江街之间的河曲地区、雅砻江下游和牛栏江一带),

对屏山洪水起造峰的作用。由于流域面积大,雨区分散,场次降雨又连续发生,加之流域形状狭长,汇流历时长,因此洪水多连续发生呈多峰复式峰型。一次洪水过程单峰平均 22d,复峰平均 30~50d。

根据屏山站 47 年实测资料统计,实测年最大洪峰的最大值为 29 000m³/s(1966 年 9 月 2 日),最小值为 10 500m³/s(1967 年 8 月 8 日),两者相差仅 2.76 倍,可见年最大洪峰的年际变化不大。

据干流石鼓、屏山站和支流雅砻江小得石站的同步资料统计,洪水地区组成见表 1。

表 1 屏山以上洪水地区组成统计表

项 目	石 鼓	小得石	石~小~屏 区 间	屏 山
面积占屏山(%)	46.7	25.5	27.8	100
1d 洪量占屏山(%)	23.6	36.9	39.5	100
15d 洪量占屏山(%)	27.8	36.5	35.7	100
30d 洪量占屏山(%)	28.9	36.5	34.6	100

由表 1 可看出,干流石鼓以上控制面积虽大,但来洪量小;干流石鼓以下和支流雅砻江是屏山洪水的主要来源。

4.2 历史洪水

自 1956 年以来,长办、昆明院等单位多次对金沙江下段进行过历史洪水调查,我院在作金沙江下段规划时曾 4 次对屏山河段进行调查和水文考古,本次工作中曾三次到现场复查。在调查和复查中,查阅了大量历史文献,调查到多处刻字和确切洪痕,基本上查清了屏山河段的 1560 年、1813 年、1860 年、1892 年、1905 年、1924 年、1928 年、1966 年(在实测系列中)等年特大洪水的情况。除 1560 年洪水只有文献记载而无确切洪痕外,其它年份洪水都调查到了较可靠的最高洪水位,特别是首大 1924 年、次大 1860 年两年的最高洪水位,在屏山县城禹王宫内都有清晰的刻字。

各年特大洪水的洪痕多分布在屏山县城附近,距水文站约 3km。根据实测和调查洪水水面线,按水面比降将各年洪痕水位推算到屏山水文站基本水尺断面,以 1966 年的水

位流量关系曲线推出各年历史洪水的洪峰流量,见表 2。

表 2 屏山站历史洪水洪峰流量及重现期成果表

洪水年份	1924	1860	1892	1813
最高水位(m)	307.30	306.29	305.38	304.30
洪峰流量(m ³ /s)	36900	35000	33200	31100
洪水年份	1905	1928	1966	
最高水位(m)	303.96	303.30	303.14	
洪峰流量(m ³ /s)	30700	29400	29000	

为了估算历史洪水的考证期,曾查阅了本流域的大量文献资料,发现 19 世纪以来水旱灾害记载比较详细,具有较好的连续性。19 世纪以前,由于年代久远,文献资料少且不连续,有些年份的洪水记载不详细,难以确定其量级。所以不宜将考证期定的太远,从 1813 年以来的考证是合适的。

经分析 1813 年以来的文献资料和调查成果,可将各年历史洪水按 1813 年以来连续排位。1928 年调查洪水和 1966 年实测洪水的水位和流量相差甚微,可作同级洪水处理。

4.3 频率计算

根据溪洛渡电站的防洪要求及洪水特性,按年最大值独立取样的原则,统计屏山站 47 年实测洪水系列的年最大洪峰流量、3d、7d、15d、30d 洪量。

通过屏山站年最大洪峰流量与各时段洪量相关,插补出各历史洪水的时段洪量。

以屏山站 47 年实测系列加上各年历史洪水组成不连续系列进行频率计算,年最大洪峰、7d、15d、30d 洪量的万年一遇设计值分别为 5 2300m³/s、279 亿 m³、544 亿 m³、932 亿 m³。

4.4 设计洪水过程线的拟定

根据溪洛渡电站的防洪要求,分析了屏山站年最大洪水过程线的特性。曾选择了实测首大的 1966 年和实测二大的 1954 年洪水过程线作为典型推求设计洪水过程线,经调洪演算后选定 1966 年洪水过程线作为典型。1966 年 8 月 25 日~9 月 24 日洪水过程的洪峰流量、1d、3d、15d 洪量均为实测首大,30d 洪量主要集中在 15d 内,峰型集中,是一个对

工程较为不利的典型。以此为典型,按峰、量同频率分时段控制放大,求得设计洪水过程线。

4.5 入库设计洪水

溪洛渡电站正常蓄水位 600m(黄海基面),水库回水长度 204km,与上游白鹤滩梯级衔接。水库平均宽度 650m,水面面积 133.6 km²,总库容 115.7 亿 m³(正常蓄水位以下),为山区河道型水库。回水末端以上约 40km 处有华弹水文站(原巧家水文站)。有 1939~1985 年实测流量资料,可作为水库入库站。

在计算入库洪水时可将屏山~华弹之间 3.26 万 km² 的区间入流看成溪洛渡水库的区间入流。区间左岸有主要支流黑水河,设有宁南水文站,有 1959~1985 年实测洪水资料;右岸主要支流有牛栏江,设有小河水文站,有 1959~1985 年实测洪水资料。两站控制面积占区间面积的 48%。此二站可作为区间入流的代表站。由于水库水面面积占区间面积的比例很小,故库面直接降雨所产生的洪水不必单独计算。

入库设计洪水采用坝址设计洪水,以示储流量法推求。入库断面定在华弹水文站。

选择区间来水较小的过程,用试错法和最小二乘法确定汇流参数 x 和 k 为检验汇流参数能否应用于设计条件,选用了屏山站 5 次大洪水过程(其中包括头三大洪水)进行验算,其误差均在 2% 以内,故认为汇流参数可用于设计条件。

将坝址 $P=0.01\%$ 的设计洪水过程线,利用上述所确定的汇流参数反演算到入库断面,求得入库洪水。

将入库设计洪水与坝址设计洪水比较,除洪峰流量相差 1.9% 以外,各时段洪量相差均在 0.5% 以下,可认为本工程采用坝址设计洪水能满足设计要求。

4.6 可能最大暴雨(PMP)、可能最大洪水(PMF)估算

根据暴雨洪水特性,将金沙江屏山以上

流域分成干流石鼓和支流雅砻江的雅江以上(简称石雅以上)、雅江~石鼓~屏山区间(简称雅石屏区间)两个区域,分析了屏山站 11 个大洪水年份 1d、3d、7d、15d 降雨的面雨深。平均而言,雅石屏区间各时段面雨深分别为上游的 1.69、1.77、1.69、1.68 倍,其 30d 洪量约占屏山的 59%。该区是本流域的主要暴雨区,也是屏山站年最大洪水的主要来源。因此在估算 PMF 时,着重分析雅石屏区间的暴雨洪水并进行极大化,然后再与石雅以上的较大洪水合理组合,估算屏山站的 PMF。

根据溪洛渡电站的防洪要求,考虑到屏山站一次大洪水过程一般是由 10~15d 连续降雨所形成,形成的大洪水过程一般为 30d 左右,故设计面雨量的时段取为 15d。

4.6.1 雅石屏区间 15dPMP 估算

雅石屏区间邻近地区缺乏时空分布较为恶劣的大面积暴雨典型,故只能采用当地暴雨法估算 PMP。

屏山站自 1939 年有实测资料以来,实测首位洪水为 1966 年 9 月洪水。其对应的雅石屏区间的降雨通过历时~面积~雨深计算,除 1d 外其余 3d、5d、7d、15d 面雨深均在雨深~历时外包线上。该典型降雨过程无论从时程分配上还是从空间分布上,都是对洪水形成最有利的。所以,15dPMP 估算是以本次降雨过程为基础进行的。

以 1966 年 8 月 18 日~9 月 1 日 15d 降雨过程为典型,依据相似过程替换原则,以 1957 年 7 月 18 日~20 日降雨过程替换 8 月 30 日~9 月 1 日,对 8 月 24~26 日主雨段进行水汽效率放大,并对主雨段前后 3d 分别进行水汽放大,得 15dPMP 为 355.1mm,经合理性分析和检验认为成果是合理的。

4.6.2 雅石屏区间 PMF 估算

产流计算:把一次降雨的损失过程概化成初损和后损两个阶段。初损 I_0 在降雨初期阶段扣除,后损按平均后损率 \bar{f} 扣除。

对雅石屏区间 19 次较大雨洪为例,按二水源斜线分割法,将洪水过程分成地表径流和地下径流,并计算各次洪水的初损 I_0 和平均后损率 \bar{f} 。经综合分析确定在设计条件下 $I_{0设}=20\text{mm}$, $\bar{f}_{设}=5\text{mm/d}$ 。并据此进行产流计算,求得雅石屏区间 PMP 的净雨深。

汇流计算:采用经验单位线。选取雅石屏区间净雨历时较短的 1973 年 9 月洪水过程,分析出时段长为 1 日的单位线、经 5 次大洪水校核计算并进行综合修正,求得设计条件下的单位线。

根据 15dPMP 净雨过程,以单位线作汇流计算,得出地表径流过程线,然后回加底水,求得雅石屏区间 PMF。

4.6.3 屏山以上流域 PMF 估算 以雅石屏区间 PMF 加上 1966 年石鼓、雅江以上来水过程,组成屏山以上流域的 PMF。与万年一遇成果相比:洪峰、7d、15d、30d、相差 18%、22.9%、10.8%及 -13.5%。

4.7 设计洪水的地区组成

为研究溪洛渡水库对宜宾的防洪效益,需研究宜宾以上流域的设计洪水地区组成。

宜宾位于溪洛渡电站下游 184km 的金沙江与岷江的汇口处,无实测流量资料。其下游 17km 处有李庄水文站,李庄~宜宾区间面积仅占宜宾控制面积的 0.6%,所以李庄可作为宜宾的设计依据站。李庄水文站 1960 年改为水位站观测至今。

李~屏区间面积为 15.38 万 km^2 ,主要有岷江和横江加入。岷江的高场水文站,具有 1939~1985 年 47 年实测流量资料。横江的横江水文站,具有 1940~1985 年不连续的 32 年实测流量资料。两站控制面积之和占李~屏区间面积的 97.3%,故两站合成流量可作为区间洪水的设计依据。

4.7.1 李庄站年最大流量及各时段洪量频率计算 李庄站仅有 1943~1959 年 16 年的实测洪水资料,对于缺测年份采用屏山、高

场、横江三站相应流量合成法插补,组成 1939~1985 年最大流量和各时段洪量系列。历史洪水直接采用长办调查整编成果。

以李庄经插补延长求得的 47 年最大流量及 3d、7d、15d、30d 洪量加上 1520、1905、1917 等年历史洪水组成不连续系列进行频率计算,求得李庄年最大流量和各时段洪量的设计值。

4.7.2 李~屏区间年最大洪峰及各时段洪量频率计算 横江站有实测资料的年份,以高场和横江相应合成流量求得区间各年最大流量和各时段洪量。横江缺测年份,建立高场与李~屏区间(即高+横)年最大流量及各时段洪量相关,求得区间的年最大流量及各时段洪量。这样就得到 1939~1985 年李~屏区间洪水系列。

高场站历史洪水采用四川省洪办调查整编成果,经实测资料分析,李~屏区间年最大流量和各时段洪量的发生时间都与高场相应,所以区间历史洪水的峰、量是通过高场与李~屏区间相关,以高场历史洪水的峰、量插补求得。

以李~屏区间插补的 47 年洪水系列,加上 1917、1931、1936 等历史洪水组成不连续系列进行频率计算。

4.7.3 设计洪水地区组成过程线的拟定

采用了典型年和同频率地区组成两种方法进行计算,发现同频率地区组成法使设计洪水过程线严重变形,最后采用典型年法。

通过对李庄以上流域 47 年洪水系列的地区组成统计分析,选用以屏山来水为主的 1966 年(李庄实测首大)和以李~屏区间来水为主的 1949 年(李庄实测第五大)两年洪水作为典型年。根据宜宾市的防洪特点,以李庄洪峰流量控制,按典型年屏山和李~屏区间来水比例,计算屏山和李~屏区间的设计洪水过程线。

(收稿日期:19940709)

(下转第 92 页)

程,并给出了一维及二维情况下的解析解;对三维非恒定流中石油的扩散进行了数值模拟;对油水的混合采用基于二相流理论的双流体模型进行了数值模拟;对石油向水下扩散的规律进行了实验研究,掌握了一些十分宝贵的实测资料。

5 热污染预报

大型热、核电厂常向天然水域排放大量温度高于天然水温的热水,使得热污染成为当今世界一大环境问题。热污染预报与水库水温预测有某些相似之处,但由于水体的热量收入主要来自排放的热水,使其求解具有特殊性。热水不同于一般污染物质,由于冷、热水温差的存在,两种水体密度不同,常形成温差异重流。

国内从 50 年代末期开始,结合电站冷却水排放问题进行过大量温差异重流的实验和理论分析研究。80 年代以后,由于热污染问题更加突出,对热污染的研究更加受到重视。在温差异重流的物理模型试验方面,已积累了较为丰富的经验,目前物理模型对于远区信息可以做出较为准确的预报结果。在数学模型方面,近年来已有较大的进展,采用高阶紊流模型进行热污染数值预报的成果报导屡见不鲜。目前数学模型已能较为精细地预报出排放口近区的流场与温度场。但遗憾的是,由于缺乏精细的模型实验资料的检验,数学

模型目前普遍存在缺乏实验验证的缺陷。

6 结束语

环境水力学作为一门独立的学科的历史虽然不长,但其在水环境问题中的应用可以说已是硕果累累。限于篇幅,不可能对其在每个方面的应用都在此予以介绍;对于文中涉及到的部分,也没有罗列繁复的公式,而是着眼于介绍解决问题的基本方法和已经取得的进展。

环境水力学目前正处于高速发展时期,在计算流体力学及相关学科的新的发展往往促进环境水力学发展上一个新台阶。水污染的治理与防治的任务还很重,很多实际问题还没有找到有效的解决途径,这就要求环境水力学工作者在今后的工作中密切注视工程中的实际问题,在解决实际问题的同时,推动环境水力学向更新、更高层次发展。(待续)

参 考 文 献

- 1 赵文谦. 环境水力学. 成都科技大学出版社, 1986 年
- 2 倪浩清等. 紊流数学模型在环境预测中的研究及其展望. 水利学报, 1986 年第 5 期
- 3 陈惠泉、吴江航. 我国电厂冷却水研究的回顾和展望. 水利水电科技进展, 1980 年第 2 期
- 4 沈晋等编著. 环境水文学. 安徽科技出版社, 1992 年
- 5 赵文谦、武周虎. 海面瞬时溢油油膜扩展范围的确定. 成都科技大学学报, 1988 年第 5 期

(收稿日期:19940609)

.....
(上接第 39 页)

Engineering Hydrology of Xiluodu Waterpower Station

Xin Zhongli Lu Zhenqian

(Chengdu Hydroelectric Investigation and Design Research Institute)

Abstract Analysis and Calculation method and main design achievements of engineering hydrology of Xiluodu Waterpower Station are briefly presented. Analysis and calculation of design flood involves various aspects of engineering hydrology, will be emphasized here.

Key Words Xiluodu Waterpower Station, engineering hydrology, calculation method, design achievements.