

## 雅砻江某水电站坝基抗滑稳定性初析

①  
22-26

张绍成

(电力工业部成都勘测设计研究院,成都,610072)

TV223.31

**摘要** 通过对雅砻江某水电站坝区结构面分布规律的认识,论证了坝基抗滑稳定性。在坝基滑移块体边界条件分析中采用了平面投影图解,该方法具有绘制简易,使用方便及立体投影直观等优越性,建议在今后工作中推广应用。

**关键词** 构造错动带 缓倾错动带 平面投影 抗滑稳定

岩基、坝基

该水电站是雅砻江水能资源最富集的中下游河段五级水电开发规划中的第三级。其上游有锦屏一级、二级电站;下游有二滩、桐子林电站。工程枢纽位于四川省凉山彝族自治州西昌市与盐源县接壤地带。电站初拟坝高164 m,正常蓄水位1326 m时,坝前最大壅水高123 m,总库容6.94亿 $m^3$ 。装机容量为180万kW,相应年发电量88.4亿 $kW \cdot h$ 。

## 1 地质概况

电站位于雅砻江中游锦屏大河湾东南侧,沿河两岸山势巍峨,高差悬殊,呈典型的中高山峡谷地貌景观。大地构造部位处在盐源~丽江台缘褶皱带东部边缘与康滇地轴邻近部位。区域断裂比较发育,从西北到东南依次有马头山~周家坪断裂、小高山断裂、金河~箐河断裂等。坝址位于金河~箐河断裂与小高山断裂所夹持的条形断块上。该断块上没有其他区域性断裂分布,历史上也未发生过 $M \geq 4.7$ 级以上的中强地震,因此,坝址区区域地质构造是稳定的。地震基本烈度经国家地震局鉴定为VI度。

坝区处于雅砻江虎山滩至打罗向西凸的河湾段。该河湾弧长4.75 km,上下游左岸河间弦长1.88 km。两岸临江坡高700~1000 m。纵观河谷形态呈宽窄不同且较为对称的“V”型谷,左岸坡度 $40^\circ \sim 45^\circ$ ;右岸稍缓为 $35^\circ \sim 40^\circ$ 。枯水期(水位1202~1205 m),水面宽90~105 m,水深8 m。

坝区出露地层主要为二迭系峨嵋山玄武岩( $P_2\beta$ ),属多期间歇性喷溢(发)的海陆交替相超基性火山岩流,据其岩流层厚度、岩性特征及喷发形式分为下中上三个岩性段九层。上段以致密状玄武岩占优势为其特征;中段以杏仁状玄武岩、紫红色凝灰岩构成多次喷发旋回为特征;下段以含较多的玄武质火山角砾岩及斑状玄武岩为特征。

坝区地层产状为SNW $\angle 80^\circ$ 以上。区内具有一定规模的Ⅱ级结构面有4条,均分布于河湾上段,除 $F_1$ 断层破碎带较宽,延伸较长外,其余3条规模不大。除此之外,通过地表调查及平硐勘探,还揭露有155条破碎带,宽小于0.5 m的构造错动带(Ⅳ级结构面)。

坝区两岸岩体风化卸荷较为强烈。特别是左坝肩上部弱风化、弱卸荷局部深达近100 m。坝区玄武岩中赋存的地下水主要是基岩裂隙水,其富水性受构造及风化卸荷控制。

## 2 坝区结构面的分布规律

### 2.1 断层

坝区Ⅱ级结构面的断层仅发现4条,全部为陡倾角且远离坝轴线,对坝基抗滑稳定影响不大。

### 2.2 构造错动带

坝区Ⅲ级结构面的断层虽不发育,但破碎带宽度小于0.5 m,延伸长度30~40 m的小断层及挤压带(统称为构造错动带)却比较发育。据地表调查及平硐勘探,共揭露有155条(其中上坝址65条,下坝址90条)。初步分析有如下规律:

(1)坝区构造错动带方向分布杂乱,相对以 $N10^\circ \sim 20^\circ W SW \angle 70^\circ \sim 80^\circ$ ;  $N70^\circ \sim 80^\circ E SE(NW) \angle 70^\circ \sim 80^\circ$ ;  $N15^\circ \sim 30^\circ W NE \angle 70^\circ \sim 90^\circ$ ;  $N10^\circ \sim 30^\circ E NW \angle 60^\circ \sim 80^\circ$ ;  $N30^\circ \sim 50^\circ W NE(SW) \angle 30^\circ \sim 50^\circ$ ;  $N10^\circ \sim 50^\circ W NE \angle 5^\circ \sim 30^\circ$ 等六组较为发育。其中NNW向即顺层错动带优势较为明显。从倾角情况看,陡倾角错动带最为发育,占总数的66%,中倾角错动带占20%,缓倾角错动带占14%(见表1,图1,图2)。

(2)错动带规模都比较小,延伸长度一般为30~40 m,宽度大多为0.05~0.1 m。从表2统计显

示,宽度小于0.1 m者占62%;宽度0.1~0.3 m者占26%;宽度大于0.3 m者占12%。见表2。

表1 坝区结构错动带产状分组表

倾向	NW			SE			NE			SW		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	条						数					
走												
N0°~30°E	0	1	13	1	0	3						
N31°~60°E	1	3	5	5	2	4						
N61°~90°E	0	1	8	2	0	11						
N0°~30°W							6	1	12	2	4	33
N31°~60°W							4	7	4	1	6	2
N61°~90°W							1	6	5	0	0	2

注:表中倾向角1为0°~30°;2为31°~60°;3为61°~90°。

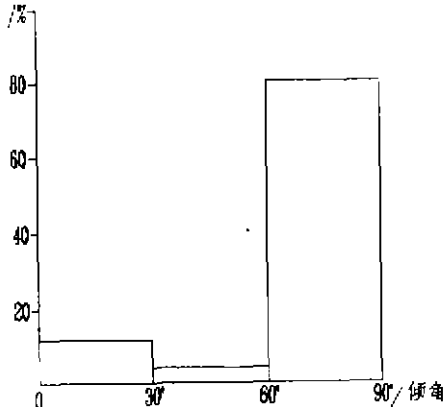


图1 坝区构造错动带倾向角直方图

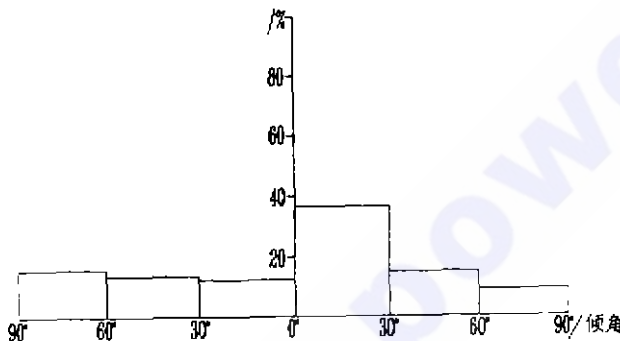


图2 坝区构造错动带走向直方图

表2 坝区构造错动带宽度分级表

宽度分级/m	条数/条	百分比/%
≤0.1	97	62.5
0.1~0.3	40	25.8
>0.3	18	11.6

(3)构造错动带以压扭性为主,主要由石英脉、断层碎裂岩及角砾岩组成。部分具糜棱岩及断层泥,在卸荷带内错动带或多或少充填次生泥,最厚可达0.1 m。在卸荷带以里一定深度的错动带局部也可见次生泥充填,错动带大部分湿润,少量渗水。

(4)玄武岩各岩流层中的错动带发育情况有所不同,发育数量上,相对以 $P_2\beta_2^2$ 及 $P_2\beta_1^2$ 较多,频率为10~12条/100 m; $P_2\beta_3^3$ 次之,7~8条/100 m; $P_2\beta_1^4$ 、 $P_2\beta_1^5$ 及 $P_2\beta_2^1$ 较少,6~7条/100 m。构造强度

上,在 $P_2\beta_1^3$ 和 $P_2\beta_2^2$ 中发育的部分错动带可见厚度较大(0.1 m左右)、具有分布稳定的糜棱岩及断层泥,构造强度相对较大。其它各层发育的错动带中糜棱岩主要以短条带状、透镜状及团块状的形式分布,构造强度较低。

### 2.3 节理裂隙

从地表调查和平硐揭露的情况看,坝区以中陡倾向角构造裂隙为主导优势,占裂隙总数80%以上,分布具普遍性。缓倾向角裂隙数量相对较少且地域性强,左岸明显比右岸发育,坝区构造裂隙分布方向与构造错动带的方向有相似之处,主要有以下5组:

(1) $N10^\circ\sim 20^\circ W$   $SW \angle 75^\circ\sim 85^\circ$ 。似层面节理,全坝区均有分布,延伸长度大于4.0 m,且具有断续延伸的特点,一般间距大于1.5 m,部分地段密集成带,面较平直、光滑、闭合,但在卸荷带内一般都强烈锈染、张开、充填次生泥。

(2) $N60^\circ\sim 80^\circ E$   $SE \angle 70^\circ\sim 85^\circ$ ,全坝区均有分布,延伸长度3.0~5.0 m,部分有断续延伸的特点,一般间距大于1.5 m,面平直、粗糙、闭合,无充填,卸荷带内其锈染严重,普遍充填次生泥。

(3) $N15^\circ\sim 30^\circ W$   $NE \angle 10^\circ\sim 20^\circ$ ,既有单条分布,又有呈密集带分布的情况,延伸长2~3 m,个别可达10.0 m,面平直、粗糙、闭合、轻微锈染,在卸荷带内及陡倾裂隙交汇处附近多充填次生泥。

(4) $N30^\circ\sim 50^\circ W$   $SW \angle 30^\circ\sim 40^\circ$ ,以单条分布为主,也有成带分布,部分地段控制斜坡的坡形,裂面多闭合,无充填,局部可见次生泥,延伸2~4.0 m,最大可达7.0 m。

(5) $N40^\circ\sim 50^\circ E$   $SE \angle 40^\circ\sim 50^\circ$ ,分布局限,部分地段影响边坡的稳定性,延伸长度一般3.0~5.0 m,局部以密集带形式出现,间距20~40 cm,面平直光滑,无充填,卸荷带内充填次生泥。

上述5组裂隙中以第1、2组最为发育,占绝对优势、分布普遍;第3、4、5组裂隙发育程度相对较弱,且区段性明显。

## 3 结构面抗剪(断)强度指标初步选择

### 3.1 结构面的分类

首先根据坝区结构面的接触情况,可将结构面区分为刚性结构面和软弱结构面两大类。然后再分别依据结构面的风化程度和错动带物质组成、颗粒大小及其性状细分为五个亚类,亦即刚性结构面中划分为微风化、新鲜结构面和弱风化结构面;软弱结构面中又划分为岩块岩屑型、岩屑夹泥型或夹泥型

三种结构面,见表3。

表3 岩体结构面分类和力学参数建议值表

力学类型	亚类	结构面类型	充填情况	结合程度	两侧岩体	抗剪断强度		抗剪强度			
						$f$	$c'/\text{MPa}$	$f$	$c/\text{MPa}$		
刚性	1	新鲜硬接触型	微风化至新鲜岩体内的陡倾裂隙	无充填,局部见钙膜,轻微锈染	好	完整,新鲜,强度高	0.70~0.80	0.40~0.50	0.65~0.70	0	
		2	风化晕硬接触型	弱风化岩体内的陡倾裂隙	无充填,面壁锈染,有钙膜,轻微风化	好~较好	完整~较完整弱风化岩体	0.65~0.70	0.20~0.40	0.60~0.65	0
软弱	3	岩块岩屑型	破碎岩、压碎岩和角砾岩为主,含一定岩屑的构造错动带、断层破碎带,裂隙密集带如: $f_{x203}$ 、 $f_{x204}$ 、 $f_{s318}$ 、 $f_{s319}$ 等。	无充填,局部面壁锈染	好~较好	较完整,新鲜至弱风化岩体	0.55~0.65	0.05~0.10	0.53~0.60	0	
		4	岩屑夹泥型	角砾岩、岩屑为主,局部见不连续断层泥的构造错动带,断层破碎带、夹不连续泥质裂隙如: $f_{x410}$ 、 $f_{s304}$ 、 $f_{s401}$ 、 $f_{x107}$ 等。	局部充填不连续	较好~一般	完整性较差,弱风化岩体	0.40~0.45	0.03~0.05	0.40~0.42	0
		5	夹泥型	角砾岩、糜棱岩和岩屑为主,夹连续断层泥的构造错动带,断层破碎带和较平直的夹泥裂隙如: $f_{x108}$ 、 $f_{x401}$ 、 $f_{x820}$ 、 $f_{x810}$ 等。	充填连续次生泥	差~很差	较破碎~破碎弱风化岩体			0.32~0.36	0

注:抗剪强度为峰值强度。

### 3.2 试验指标

为了初步了解各类结构面的抗剪性能,进行两组现场原位强度试验:一组布置在下坝址XD<sub>01</sub>硐0+76~0+80m处,沿 $f_{x108}$ 构造错动带剪切。从剪切面的情况来看,有三个墩的剪切面代表岩块岩屑型,有两个墩代表夹泥型结构面。另一组也布置在XD<sub>01</sub>硐0+101~0+105m处,沿缓裂面剪切,缓裂面平直光滑,充填厚0.5cm次生夹泥,代表夹泥型结构面。试验成果见表4

表4 坝区结构面抗剪(断)强度试验成果汇总表

地质类型	代表结构面类型	最大试面应力/MPa	抗剪断强度		抗剪强度	
			$f$	$c'/\text{MPa}$	$f$	$c/\text{MPa}$
$f_{x108}$ 构造错动带(压碎岩、角砾岩带)	岩块岩屑型	2.04	0.68	0.50	0.68	0.18
$f_{x108}$ 构造错动带(次生夹泥层)	夹泥型	1.68	0.34	0.48	0.34	0.44
次生夹泥缓裂面	夹泥型	1.55	0.47	0.38	0.46	0.34

### 3.3 结构面抗剪(断)强度建议指标

由于阶段所限,试验组数比较少,代表的结构面类型不完全,不能全面反映坝区结构面的物理力学特性。所以,结构面抗剪(断)强度指标建议值,主要是在试验的基础上,以类比和经验数据确定。具体的建议值参见表3。

## 4 坝基抗滑稳定性分析

坝区分上、下两个坝址,据地质测绘和勘探揭露发现上、下坝址均有缓倾角结构面分布,都存在坝基

抗滑稳定问题。下面仅就选定坝线(下坝址I<sub>x</sub>线)的情况分析如下:

下坝址无大断层分布,控制坝基抗滑稳定的是构造错动带和节理裂隙。缓倾构造错动带一般延伸长度30~40m,空间分布不连续,破碎带宽5~10cm,由压碎岩、角砾岩、糜棱岩组成,性状较差,与坝基抗滑稳定关系密切。河床部分据钻孔揭露分布有两条,高程为1131.5~1145.92m和1099.7~1123.45m,左岸坝肩据XD<sub>01</sub>勘探平硐(高程1230m±)揭露,有 $f_{x108}$ 缓倾角错动带,桩号为0+68~0+80m;右岸未发现缓倾角错动带。

节理裂隙一般延伸长度4~5m,但具单条逐渐尖灭侧倾的特点,特别是缓倾角裂隙,多以裂隙密集带出现,带的延伸长度一般超过20m,是坝基抗滑稳定性的控制性因素。经统计分析,与大坝抗滑稳定有关的优势结构面方向有:

①N10°~20°W SW ∠75°~85°;

②N60°~80°E SE ∠70°~85°;

③N15°~25°W NE ∠15°~20° 主要分布在左岸;

④N30°~40°W SW ∠30°~40° 主要分布在左岸;

⑤EW N ∠30°~40° 主要分布在左岸;

⑥N30°~60°W NW ∠15°~20° 分布局限。

上述这些结构面在空间组合情况如何?哪些能够组合成滑移体,对坝基抗滑稳定不利?为了解决这个问题,采用正投影法编制平面投影图解(图3),从

图上可以得出构成坝基滑移的最不利的几种组合形式：

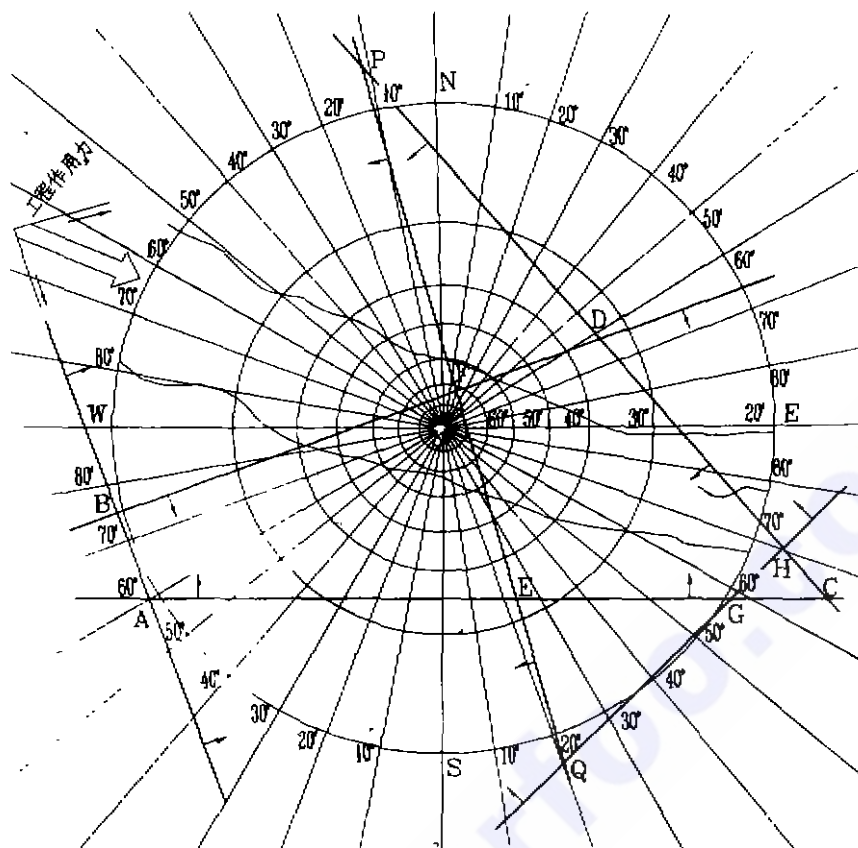


图3 下坝址结构面平面投影法图

(1) 结构面①、②与结构面⑤、④构成 ABCDO 和 EPCO 两个五面棱形块体,其尖棱指向上游,而且⑤、④两组中倾角结构面的交棱线倾向上游,倾角小于  $20^\circ$ ,与工程作用力方向近于平行,应为基础稳定性最不利的结构形式。但是,④、⑤两组中倾角结构面在坝区分布很局限,连通性差,故很难构成滑移。

(2) 结构面⑥作为滑移面;结构面④、⑤作为两侧切割面,构成 GEFDHO 棱形块体。但因这些结构面分布都比较少,构成滑移的可能性较小。

(3) 结构面③倾向 NE  $\angle 15^\circ \sim 20^\circ$  作为第一滑移面;结构面④倾向 SW  $\angle 30^\circ \sim 40^\circ$  作为第二滑移面;结构面②倾向 SE  $\angle 70^\circ \sim 85^\circ$  作为侧向切割面构成滑移块体。

从上述分析可知,第(1)、(2)两种情况都因结构面短小,分布局限产生滑移的可能性较小;第(3)种情况是坝区最危险的组合形式。下面仅就这种情况作稳定计算分析。

#### 4.2 稳定性计算分析

##### 4.2.1 河床坝基

据河床钻孔揭露的缓倾角结构面参见表 5:

表 5 下坝址 I, 线河床缓倾角结构面表

孔号	$X_{104}$	$X_{105}$	$X_{308}$	备注
岩面高程	1 186.58	1 170.55	1 201.22	
缓倾结构面分布高程	1 167.34~1 161.5			裂隙密集带
	1 155.55~1 155.35			裂隙密集带
	1 144.53~1 143.53	1 141.7~1 141.5	1 142.87~1 140.87	构造错动带
	1 128.50~1 125.50			裂隙密集带
	1 119.15~1 115.77			裂隙密集带
	1 112.60~1 105.55			裂隙密集带

从表 5 可以看出,坝基内缓倾结构面比较发育,必将存在抗滑稳定问题。为了验算坝基深层抗滑稳定,我们取单宽坝体,按刚体极限平衡理论计算。第一滑移面分别取最危险的两条结构面,高程为 1 161~1 162 m 和 1 141.5~1 144.5 m 左右。假定这些结构面沿整个坝底宽度贯通,构成滑移通道,产状与坝区最发育的缓倾角结构面一致,走向 N20W,倾向下游偏左岸,倾角  $10^\circ$ ,换算成与坝轴线垂直方向的视角为  $8^\circ 29' 20''$ ;第二滑移面考虑切断岩体。计算中采用的指标为:

裂隙密集带  $f' = 0.55$   $c' = 0.05$  MPa

构造错动带  $f' = 0.4$   $c' = 0.03$  MPa

岩体  $f' = 1.3$   $c' = 1.3$  MPa

计算成果见表 6

表 6 河床坝段深层抗滑稳定计算成果表

计算工况	上游水位 /m	下游水位 /m	安全系数 $K'$	
			1 162/m	1 144/m
正常蓄水位	1 326	1 206.9	3.18	3.52
设计洪水位	1 327.76	1 223.6	3.16	3.49
校核洪水位	1 329.7	1 226.2	3.46	3.95
地震情况	1 326	1 206.9	2.76	3.00

从表 6 可以看出,安全系数  $K' > 2.3$ ,坝体是稳定的。但是上述情况是考虑第二滑移面为切断岩体,抗剪指标偏高。为了进一步校核坝体稳定,作了一个反演计算,当满足  $K' = 2.3$  时,反求第二滑移面抗剪断指标,结果  $f' = 0.55$  时,即可满足要求。 $f' = 0.55$  已经是裂隙面的指标,所以即使存在第二滑移面,只要不存在断层或构造错动带(实际上也不存在),安全系数可达到要求。

#### 4.2.2 两岸挡水坝段

根据左岸探洞揭露,影响左坝段稳定最不利的为  $f_{x_{108}}$  构造错动带,属夹泥型,抗剪强度低, $f = 0.34, c = 0, f_{x_{108}}$  错动带出露高程为 1 235.0 m,对应

表 7 左岸挡水坝段深层抗滑稳定计算成果表

计算工况	上游水位 /m	下游水位 /m	安全系数 $K$	
			剪摩 $K'$	纯摩 $K$
正常蓄水位	1 326.0	无水	5.98	1.97
设计洪水位	1 327.76	无水	5.74	1.91
校核洪水位	1 329.7	无水	5.41	1.80
地震情况	1 326.0	无水	4.83	1.34

的建基面高程为 1 275.0 m。错动带产状为 N20W

(上接第 3 页)

等)的质量尚不尽人意,故障率较高,可靠性较差。在建设时,一般都十分注意节约初期投资,因而在采购设备时重点是考虑价格因素,买了些不大合适的设备。投产后再进行改造,大修,不但增加了费用,而且也影响了正常营运,经济上是不合算的,今后要特别注重质量问题。

对于今后新建中型水电站主机的选型应该采用

### Experiences and Lessons from Construction of Medium-sized Hydropower station in Sichuan

Zhang Denshi

(Chengdu Investigation, Design and Research Institute, Chengdu, 610072)

**Abstract** Medium-sized hydropower station is characterized by short construction period, small investment and quick returns. Since the late 1980s, medium-sized hydropower station in Sichuan is constructed rapidly. It plays a important role for supplying additional power to the Sichuan main network and promoting the development of local economics. After investigation and data collecting, the main experiences and lessons from construction of the medium-sized hydropower stations are summarized.

**Key Words** medium-sized hydropower station, construction, experience, lesson

NE/20°,换算成滑动方向的视倾角为 17°。第二滑移面按剪断坝后岩体考虑, $f'_2 = 1.3, c' = 1.3$  MPa。取单宽按抗剪断强度公式验算,计算成果见表 7。计算中未列入坝体下游建基面以上岩体重量。

按剪摩公式计算的  $K'$  值远远超过 2.4,这与第二滑移面抗剪指标取值较大有关,为了安全起见,进一步选用纯摩公式计算。

$$f_1 = 0.34 \quad c_1 = 0;$$

$$f_2 = 0.4 \quad c_2 = 0;$$

计算成果见表 7,安全系数  $K$  也能够满足规范要求。

右岸坝段据勘探揭露缓倾结构面不发育,没有必要再进行稳定性校核。

## 5 结 论

在复杂的地质条件下兴建高坝,能否妥善解决基础稳定问题,关系到工程的成败。从宏观看,该水电站大坝基础岩体缓倾角结构面比较发育,通过计算结果表明,河床坝基和左岸坝肩的深层抗滑稳定安全系数均能满足稳定要求。

作者简介

张绍成 男 电力工业部成都勘测设计研究院地勘总队 高级工程师

(收稿日期:1996-07-18)

国内产品,价格便宜,维修方便。进口机组,质量虽好,但一旦出问题,维护甚难,如马回电站,为了联系国外厂家来处理,电站连续停运达半年以上。损失太大。

作者简介

张登仕 男 电力工业部成都勘测设计研究院 教授级高工

(收稿日期:1997-10-21)