

猴子岩水电站料场高边坡施工期 稳定性监测及分析

李鹏, 程保根, 宋寅

(中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072)

摘要:大型水电工程石料场边坡开挖稳定问题突出,采用单一的数值计算方法——安全度度量,难以准确确定边坡稳定性,而结合监测方法可真实反映边坡内部力学效应、检验设计的可靠度及加固处理效果。为揭示猴子岩水电站色龙沟料场高边坡施工期开挖稳定性,对边坡表面变形、多点位移、锚杆应力及锚索荷载等进行了有效的监测。结果表明,色龙沟料场边坡施工期稳定性良好,其监测分析成果可供类似工程借鉴和参考。

关键词:猴子岩水电站;石料场边坡;抗滑稳定性;监测数据分析

中图分类号:[TM622];U417.5;U213.1+3;{S152.4+7} **文献标识码:** B **文章编号:**1001-2184(2022)01-0134-05

Monitoring and Analysis on Stability of High Slope in Houziyan Hydropower Station During Construction

LI Peng, CHENG Baogen, SONG Yin

(PowerChina Chengdu Engineering Co., LTD, Chengdu, Sichuan, 610072)

Abstract: Slope stability of quarries in large-scale hydropower projects is a prominent problem. It is difficult to accurately determine the slope stability by using a single numerical calculation method (safety measurement). But combined with the monitoring method, it can truly reflect the internal mechanical effects of the slope, test the reliability of the design and the effect of reinforcement treatment. In order to reveal the excavation stability of the high slope of Selonggou Quarry in Houziyan Hydropower Station during construction, slope surface deformation, multi-point displacement, anchor rod stress and anchor cable load are monitored. The research results show that the slope of Selonggou Quarry is with high stability during construction, and its monitoring and analysis results can be used as reference for similar projects.

Key words: Houziyan Hydropower Station; quarry slope; anti-sliding stability; analysis on monitoring data

0 引言

地处深山峡谷地区的水电工程岩质高边坡往往具有坡高面广、结构面发育、地质条件复杂、开挖稳定问题突出等特点。一直以来,岩质高边坡稳定与变形问题都是岩石力学界和地质工作者研究的重大课题之一,但至今仍难找到准确合理的评价方法^[1-2]。岩质高边坡地质条件的复杂程度决定了准确界定其稳定性的复杂程度,一般而言,限于边坡内部复杂的力学作用,边坡岩体、结构面的力学参数及稳定性不仅难以确定,而且受降雨、开挖等影响还在时时变化,因此,采用数值计算方法并不能准确确定边坡的稳定性。边坡安全监测可真实反映边坡内部力学效应、检验设计的可靠

度及加固处理效果,大型工程一般都需要建立完善的监测系统来监测边坡的变形稳定情况,如锦屏大奔沟料场边坡、小湾电站工程边坡、瀑布沟水电站料场边坡等。基于猴子岩水电站色龙沟料场高边坡施工期监测成果,拟对该岩质料场边坡的监测数据及稳定性进行分析,以为类似工程提供一定借鉴和参考。

1 工程概况

猴子岩水电站位于四川省甘孜藏族自治州康定市境内,工程采用混凝土面板堆石坝,坝顶高程1 848.5 m,最大坝高223.5 m,电站库容7.06亿m³,电站装机容量1 700 MW。

色龙沟料场位于坝址上游侧,料场两面临空,距坝址约1 km,开采范围1 750~1 960 m高程,

收稿日期:2021-12-06

地形坡度 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$,主要供应大坝混凝土骨料、反滤料及垫层料。料场岩性为泥盆系薄—中薄层状变质灰岩、白云质灰岩夹绢云钙质石英片岩,岩层产状为 $N45^{\circ}E/NW\angle 55^{\circ}$ 。地表基岩大多裸露,局部覆盖残积堆积物,推测厚度 $3\sim 5$ m,局部可达 $8\sim 10$ m,为剥离层。基岩主要发育有4组构造裂隙,L1: $N20^{\circ}E/NW\angle 65^{\circ}$;L2: $EW/N\angle 70^{\circ}\sim 75^{\circ}$;L3: $N30W/NE\angle 65^{\circ}\sim 75^{\circ}$;L4: $N15^{\circ}W/SW$

$\angle 45^{\circ}$ 。岩石弱风化状态:低高程($1\ 700\sim 1\ 710$ m)弱风化上段水平深度一般为 $2\sim 5$ m,中高程($1\ 800$ m)弱风化上段水平深度一般为 $15\sim 20$ m,高高程($1\ 830\sim 1\ 850$ m)弱风化上段水平深度一般为 $25\sim 35$ m,下游侧紧临色龙沟沟边山体,三面临空,岩体破碎,风化卸荷强烈。边坡岩体力学参数及结构面力学参数分别见表1、2。色龙沟料场施工时段为2013年3月~2016年5月。

表1 边坡岩体力学参数

类别	密度 / $g\cdot cm^{-3}$	变形模量 /GPa	μ	f'	c' /MPa	坡比
III ₂	2.75	5~8	0.30	0.7~0.8	0.6~0.8	1:0.5
IV	2.70	3~4	0.35	0.5~0.7	0.2~0.5	1:0.75
V	2.50	0.5~2	>0.35	0.3~0.55	0.05~0.2	1:1

表2 岩体结构面力学参数

结构面类型		抗剪(断)强度		抗剪强度	
		f'	c' /MPa	f	c /MPa
刚性结构面	硬接触	0.5~0.7	0.10~0.15	0.45~0.6	0
	岩块岩屑型	0.45~0.5	0.08~0.10	0.40~0.45	0
软弱结构面	岩屑型	0.40~0.45	0.05~0.08	0.35~0.40	0
	岩屑夹泥型	0.35~0.40	0.03~0.05	0.30~0.35	0

3 边坡监测及成果分析

3.1 监测布置

色龙沟料场边坡最大开挖高度达220 m,且地质条件复杂,为有效掌握边坡开挖、爆破过程中潜在滑动体变形发展的趋势,了解锚索、锚杆等支护措施的有效性,在施工过程中采取多种监测手段对边坡变形稳定性进行监测,主要布置的监测项目有:

(1)采取表面变形测点监测边坡表面变形情况,以此反映边坡整体宏观变形。从2014年3月19日开始至2015年5月9日,随着料场边坡的开挖,分别在1 920 m、1 840 m高程各布置3个外观观测墩,构成3个纵向观测断面。表面测点位置基本覆盖了料场整体开采边界,反映了不同高程的表面变形情况。

(2)采用多点位移计监测边坡深层变形情况,以此反映边坡深层滑动趋势。从2014年3月10日至2015年1月4日共埋设了4套多点位移计,量程为100 mm。在K0+095剖面1 901.5 m、1 841.5 m高程布置两套多点位移计,分别是 M_{SL}^4-1 、 M_{SL}^4-2 ;在K0+230剖面1 901.5 m、1 841.5 m高程布置两套多点位移计,分别是

M_{SL}^4-4 、 M_{SL}^4-5 。

(3)采用锚杆应力计监测锚杆应力情况,以此反映浅层支护效果。从2014年3月29日至2015年1月4日共埋设了4套锚杆应力计。在K0+095剖面1 901.5 m、1 841.5 m高程布置两套锚杆应力计,分别是 R_{SL}^4-1 、 R_{SL}^4-2 ;在K0+230剖面1 901.5 m、1 841.5 m高程布置两套锚杆应力计,分别是 R_{SL}^4-4 、 R_{SL}^4-5 。

(4)采用锚索测力计监测锚索受力情况,以此评价深层支护效果。至2014年5月24日全部安装完成了3套锚索测力计,在1 901.5 m高程K0+095、K0+230剖面分别布设了 $PR_{SL}-1$ 、 $PR_{SL}-3$;在1 961 m高程K0+255剖面布设了 $PR_{SLXZ}-3$ 。

3.2 监测成果分析

3.2.1 边坡表面变形成果分析

各实测点石料场边坡表面变形水平合位移过程线和石料场边坡表面变形、垂直位移过程线分别见图1、2。变形监测结果表明水平合位移以朝向临空面变形为主,垂直位移以下沉为主,变形趋势表现为增长和负增长(或稳定)相间,后期逐渐趋于稳定的特点。具体体现如下:

(1)水平位移累计量在 12.50~36.38 mm 之间,类比同类工程处于可控状态;边坡变形总体趋势趋于平缓,日平均变形速率在 0.086 mm/d 以内(2015 年 7 月 6 日~2015 年 10 月 17 日),位移增长率很小;受现场开挖爆破影响,1 840 m 高程马道测点较 1 920 m 马道测点变形更加显著。

(2)垂直位移累计量在 -7.90~13.90 mm 之间,类比同类工程处于可控状态;边坡变形总体

趋势趋于平缓,日平均变形速率在 0.067 mm/d 以内(2015 年 7 月 6 日~2015 年 10 月 17 日),位移增长率很小;垂直变形在 2015 年 6~8 月变化比较平稳,9 月出现整体上抬,最大上抬量为 6.80 mm,普遍上抬量在 4.60~5.00 mm 之间,期间水平变形很小,这是由于在开挖爆破过程中,岩体应力释放导致表面松散岩体出现一定挤压引起。

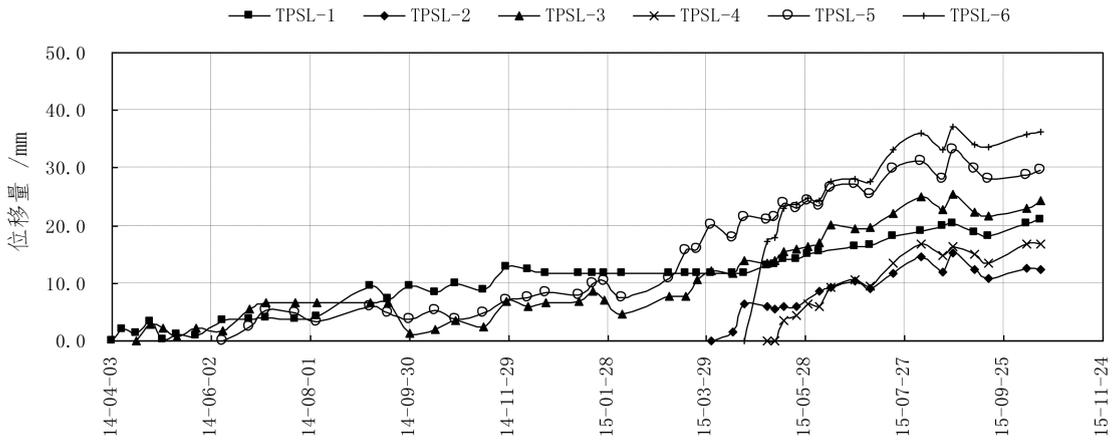


图 1 石料场边坡表面变形水平位移过程线

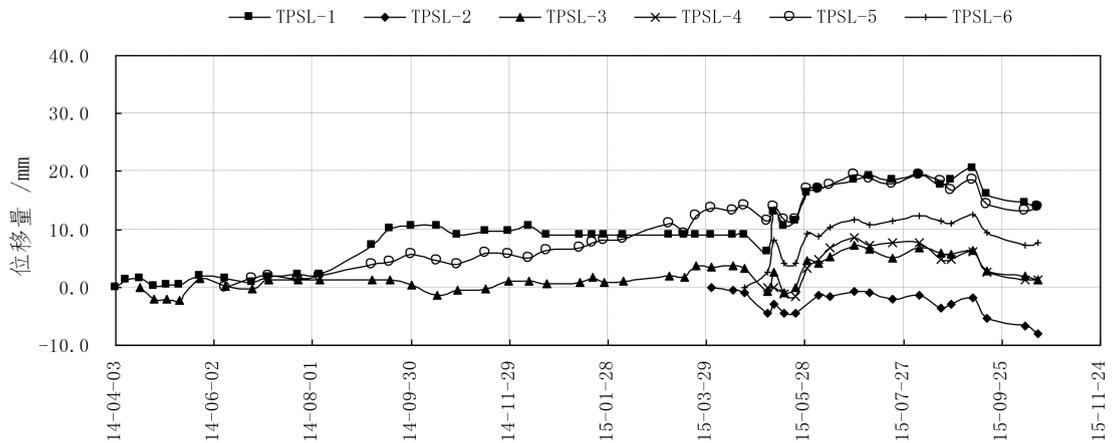


图 2 石料场边坡表面变形垂直位移过程线(上抬为负,下沉为正)

3.2.2 边坡深部变形成果分析

石料场边坡 1 901.50 m 高程位移计 M_{SL}^4-1 位移过程线和石料场边坡 1 841.50 m 高程位移计 $M^4_{SL}-5$ 位移过程线见图 3、4,限于篇幅仅列出有代表性的位移计 M_{SL}^4-1 与 M_{SL}^4-5 的位移过程线;石料场边坡四点式位移计孔口位移成果见表 3。由此可见,色龙沟石料场边坡四点式位移计孔口变形都朝向临空面,具体表现如下:

(1)孔口累计位移在 8.27~26.18 mm 之间,日平均变形率在 0.065 mm/d 以内(2015 年 7 月 2 日~10 月 21 日),变形基本趋于稳定。在预裂爆破期间,低高程相对高高程位移增加更加显著。

(2)从位移过程线可知,料场边坡深部变形主要集中在 20 m 深度范围内,随着料场的开挖和爆破,边坡变形仍在持续缓慢增长,与表面变形规律较一致,变形主要表现为浅层变形。

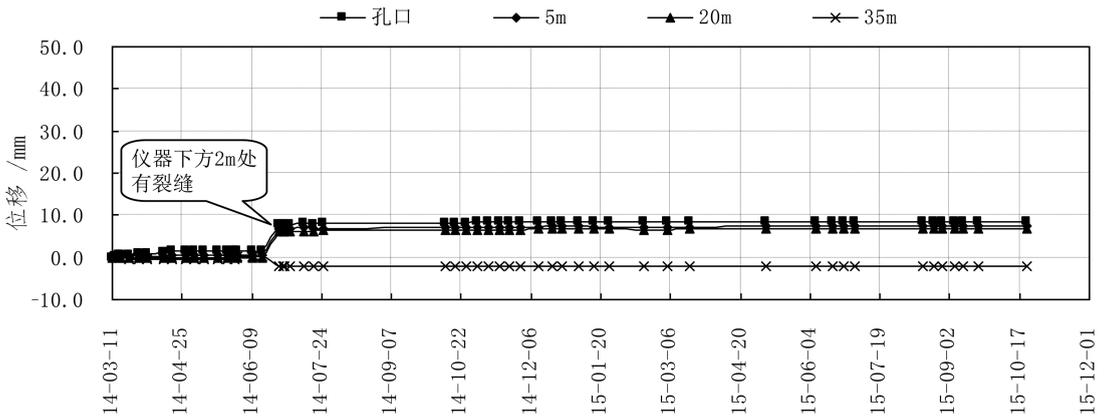
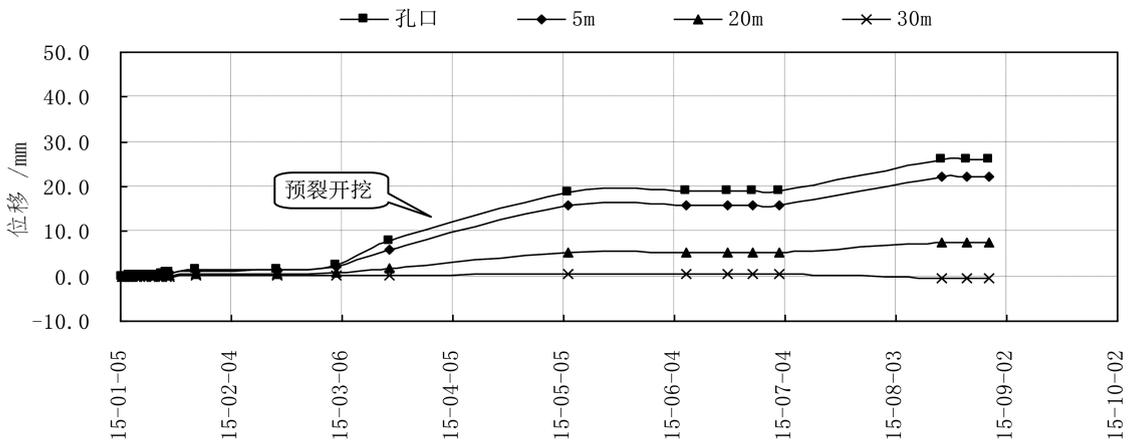
图3 石料场边坡1901.50 m高程位移计 M_{SL}^1-1 位移过程线图4 石料场边坡1841.50 m高程位移计 M_{SL}^1-5 位移过程线

表3 石料场边坡四点式位移计孔口位移成果表

编号	高程/m	安装日期	测值/mm		变化量/mm	位移速率/mm/d
			2015-07-02	2015-10-21		
M_{SL}^1-1	1901.50	2014-03-10	8.52	8.57	0.05	0.000
M_{SL}^1-2	1841.50	2015-01-04	3.23	8.27	5.04	0.046
M_{SL}^1-4	1901.50	2014-03-29	10.50	13.84	3.34	0.031
M_{SL}^1-5	1841.50	2015-01-04	19.08	26.18	7.10	0.065

注:表中变化量为2015年10月21日测值相对2015年7月2日测值的变化量

3.2.3 边坡浅层支护监测成果分析

石料场边坡1901.50 m高程锚杆应力计 R_{SL}^1-1 应力过程线和石料场边坡1841.50 m高程锚杆应力计 R_{SL}^1-5 应力过程线见图5、6,限于篇幅仅列出有代表性的锚杆应力计 R_{SL}^1-1 与 R_{SL}^1-5 的位移过程线;石料场边坡锚杆应力计监测成果见表4。由此可见,色龙沟石料场边坡浅层支护应力基本表现为拉应力(拉应力为正值,压应力为负值),浅层支护应力变化特性

表现如下:

(1)孔口累计位移在8.27~26.18 mm之间,日平均变形率在0.065 mm/d以内(2015年7月2日~10月21日),变形基本趋于稳定。在预裂爆破期间,低高程相对高高程位移增加更加显著。

(2)从位移过程线可知,料场边坡深部变形主要集中在20 m深度范围内,随着料场的开挖和爆破,边坡变形仍在持续缓慢增长,与表面变形规律较一致,变形主要表现为浅层变形。

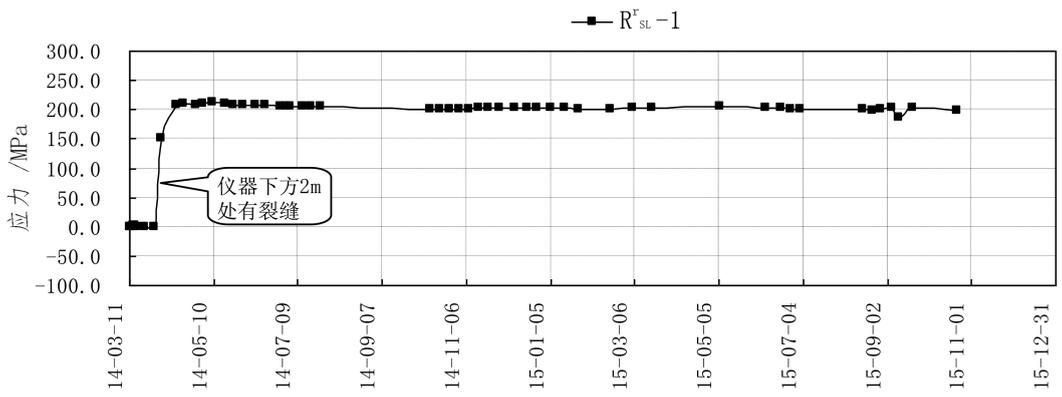


图 5 石料场边坡 1 901.50 m 高程锚杆应力计 R_{st}-1 应力过程线

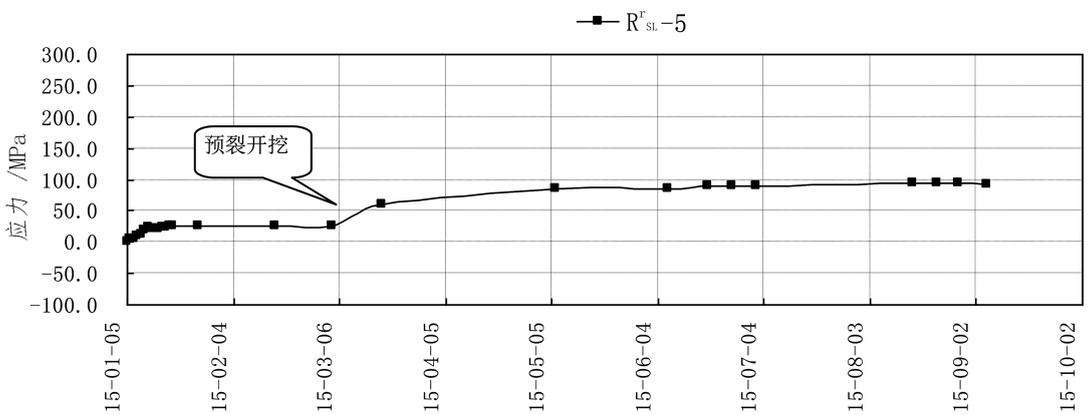


图 6 石料场边坡 1 841.50 m 高程锚杆应力计 R_{st}-5 应力过程线

表 4 石料场边坡锚杆应力计监测成果表

编号	高程 /m	安装日期	测值 /MPa		变化量 /MPa
			2015-07-02	2015-10-21	
R _{st} -1	1 901.50	2014-03-10	201.13	198.87	-2.26
R _{st} -2	1 841.50	2015-01-04	1.25	-0.95	-2.20
R _{st} -4	1 901.50	2014-03-29	14.85	15.02	0.17
R _{st} -5	1 841.50	2015-01-04	88.73	92.44	3.71

注:表中变化量为 2015 年 10 月 21 日测值相对 2015 年 7 月 2 日测值的变化量。

3.2.4 边坡深层支护监测成果分析

色龙沟石料场边坡锚索测力计设计吨位为 2 000 kN,以超张拉锁定,锚固力在 1 776.24~1 881.98 kN 之间(2015 年 7 月 2 日~10 月 21

日),变化量在 7.20~17.46 kN,主要是受料场下部开挖和爆破影响,锚索锚固力有较大幅度增加,岩体应力在小幅度调整中,但总体趋于稳定。石料场边坡锚索测力计监测成果见表 5。

表 5 石料场边坡锚索测力计监测成果表

编号	高程 /m	安装日期	测值 /kN		变化量 /MPa
			2015-07-02	2015-10-21	
PR _工 SL-1	1901.50	2014-05-24	1764.08	1776.24	12.16
PR _{SL} -3	1 901.50	2014-05-15	1 864.52	1 881.98	17.46
PR _{SLXZ} -3	1 961.00	2014-05-16	1 859.47	1 866.67	7.20

注:表中变化量为 2015 年 10 月 21 日测值相对 2015 年 7 月 2 日测值的变化量。

(下转第 142 页)

式在手动时,闭锁下位机自动控制功能,运行人员通过上位机强迫补气投入/退出按钮操作强迫补气功能。手动闭锁远方操作功能,提供现地操作功能;自动方式 PLC 控制,同时,可以远方手动投退强迫补气功能。

1号机组临时强迫补气装置于2020年6月投入使用,达到补气条件时尾水管强迫补气自动投入,有效消除机组异常振动,目前,机组已平稳度过两个汛期,效果显著。

6 结 语

紫坪铺电厂投入 AGC 运行后,出现机组特定工况下的异常振动现象,极易造成机组紧固件的松动、焊缝开裂等情况,严重影响机组安全稳定运行。在机组不能停机检修情况下,尾水管临时强迫补气装置的应用,成功的解决了这个问题,达到了预期目的,保证了机组的安全运行。随着更多电厂投入 AGC 运行,类似情况会逐渐暴露,紫坪铺电厂的尾水管临时强迫补气系统思路及方案

(上接第 138 页)

4 结 论

大型水电工程石料场边坡开挖稳定问题突出,采用单一的数值计算方法——安全度度量,难以准确确定边坡稳定性。为揭示猴子岩水电站色龙沟料场高边坡施工期开挖稳定性,对边坡表面变形、多点位移、锚杆应力及锚索荷载等方面,采用多种监测方法相结合的手段对猴子岩水电站色龙沟料场边坡稳定性进行监测,可初步得出以下结论:

(1)从监测结果看,色龙沟石料场边坡在施工期变形趋于收敛,变形量值均在安全容许范围内,变形主要体现在浅层变形上。截至2021年底,色龙沟料场经过长达约6年时间仍处于稳定状态,说明边坡满足抗滑稳定要求。

(2)从监测结果看,色龙沟料场边坡施工期预裂爆破对周边变形影响较大,底高程相对高高程

可供其他电厂借鉴参考,以保证设备安全运行。

参考文献:

- [1] 王玲花. 水轮发电机振动及分析[M]. 郑州:黄河水利出版社, 2011.
- [2] 吴玉林,吴晓晶,刘树红. 水轮机内部涡流与尾水管压力脉动相关性分析[J]. 水力发电学报, 2007, (5): 122-127.
- [3] 李启章. 混流式水轮机水力稳定性研究[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2014.
- [4] 万鹏,王海,陈喜阳等. 三峡左岸电站6号机组强迫补气试验研究[J]. 水电自动化与大坝检测, 2005, 29(6): 28-30.
- [5] 刘德民,刘树红. 补气措施研究的现状与展望[J]. 水电科学与工程, 2009, (1): 50-54.
- [6] 宋自灵,李朝辉. 岩滩电厂机组强迫补气自动控制系统应用研究[J]. 广西电力技术, 2001, (2): 4-6.

作者简介:

方戊强(1990-),男,河南开封人,本科,工程师,从事水电站机械设备检修、维护工作;
李泽江(1974-),男,四川广元人,本科学历,工程师,从事水电站机械设备检修、维护工作;
陈世程(1984-),男,四川成都人,大专学历,工程师,从事水电站机械设备检修、维护工作。 (责任编辑:卓政昌)

位移增加更为显著。

参考文献:

- [1] 赵明华,刘小平等. 小湾电站高边坡的稳定性监测及分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 2746-2750.
- [2] 张金龙,徐卫亚等. 大型复杂岩质高边坡安全监测与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1819-1827.
- [3] 赵建军,唐茂颖等. 高陡岩质料场边坡稳定性与支护设计研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(4): 507-515.
- [4] 朱继良,黄润秋等. 某大型水电站高位边坡开挖的变形响应研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(5): 784-791.
- [5] 吕建红,袁宝远等. 边坡监测与快速反馈分析[J]. 河海大学学报, 1999, 27(6): 98-102.

作者简介:

李 鹏(1990-),男,四川内江人,硕士,工程师,主要从事水利水电工程施工组织设计;
程保根(1982-),男,江西新建人,学士,高级工程师,主要从事水利水电工程施工组织设计;
宋 寅(1986-),男,陕西西安人,硕士,高级工程师,主要从事水利水电工程施工组织设计。 (责任编辑:卓政昌)

大渡河流域9座梯级水电站大坝安全运行

截至2022年2月17日,国家能源集团大渡河水电公司完成流域干流在运9座电站大坝安全检查,9座电站大坝运行情况良好、健康稳定,为水电站安全运行奠定了坚实的基础。国家能源集团大渡河公司总装机1175万千瓦,在大渡河上共投运9座电站大坝。针对电站大坝坝型不同、运行各异的特点,该公司细分坝型,按照投运年限、特殊坝型、一等大(1)型工程对大坝进行分类,制定差异化运检方案,按照不同技术标准进行检查,全力保障大坝安全运行。

(中国电力新闻网)