

# 宝珠寺水力发电厂 11F 水轮发电机组摆度过大分析与处理

方仲超

(宝珠寺水力发电厂,四川广元 628003)

**摘要:**宝珠寺电厂 11F 机组自 2012 年 A 修运行以来,机组在运行过程中推力与水导轴承的摆度不断增大,在低水头运行过程中,机组的摆度超标。经过对机组中心、转子圆度、及水导瓦改造等数次检查处理,有效的解决机组摆度超标问题。在实际处理过程中,发电机组部分摆度在空载后略有下降,是因为轴向水推力增加、推力轴承摩擦力加大,转子不容易偏离中心所致,同时负荷增加,有功、无功电流增加,磁场强度亦增大,使转子的径向不平衡力相对减小,使转子偏离中心也愈加困难。

**关键词:**水轮发电机组;磁拉力不平衡;分析;处理

**中图分类号:**FV7;TM312

**文献标识码:**B

**文章编号:**1001-2184(2015)05-0157-05

## 1 概述

宝珠寺发电厂位于四川省广元市三堆镇境内,是白龙江干流域开发的第二座水电站,电站安装 4 台由东方电机厂设计、制造的半伞式轮发电机组。机组主要技术参数见表 1。

表 1 水轮机和发电机参数表

水轮机		发电机	
型号	HLD89-LJ-500	型号	SF175-44/10350
额定出力	178.6 MW	额定功率	175 MW
最大水头	103 m	额定电压	13.8 kV
设计水头	84.4 m	额定电流	8 367 A
最小水头	68.5 m	功率因数	0.875
额定流量	239 m <sup>3</sup> /s	项数	3
额定转速	136.4 r/min	额定转速	136.4 r/min
飞逸转速	275 r/min	飞逸转速	275 r/min

11F 机组自投产以来,机组运行中,除推力摆度较大外,其余各部位的摆度均正常。由于过流部件气蚀严重,2012 年对 11F 机组进行 A 级检修,修后机组在空转情况下各部位摆度均较小;加励磁至 80% U<sub>e</sub> 时推力摆度明显加大,在满负荷情况下推力摆度幅值由 0.68 mm 增至 0.98 mm,水导摆度幅值由 0.23 mm 增至 0.59 mm。由于宝珠寺电站未设计下导轴承,在 DL/T507-2002《水轮发电机组启动试验规程》并未对推力摆度允许值作相关要求,按照对导轴承要求,水导摆度

幅值已超过设计双面间隙 75% (调整双面间隙 0.60 mm)。对此情况,作业人员对机组多次检查、分析与处理。

## 2 机组问题处理

2012 年 7 月检修完毕后,进行 11F 机组稳定性试验,试验后认为转子存在明显磁拉力不平衡,且机组运行状态不稳定;由于当时正值白龙江流域主汛期,同时需排查引起不稳定诸多因素,当时未做处理,只能加强运行过程中摆度与振动的收集。8 月份停机检查,水导瓦实际双面间隙最大值已达到 0.65 mm。对转子转动部分各连接螺栓预紧力进行检查,排除转动部分在受不平衡力的作用下自身刚度不足的可能;检查定转子空气间隙在合格范围内;同时对水导瓦双面间隙按照 0.56 mm 进行调整。处理后机组推力摆度大的问题有所改善,但仍然存在磁拉力不平衡问题,满负荷运行情况下,推力摆度幅值仍然有 0.76 mm,且随着运行时间增长,推力摆度逐步增长趋势,机组运行状态仍然不稳定。

2014 年大修中,为全面分析原因,对机组的固定部分与转动部分进行检查。检查底环、顶盖与定子的同心度,检查发现底环与定子存在一定的偏心;检查转子中心体法兰上下止口的同心度,同心度偏心在合格范围内;对转子圆度进行测量,发现转子圆度超标,对超标的 28 个磁极背面通过加垫调整转子圆度;对水导瓦结构进行改造等措

收稿日期:2015-08-18

施。通过上述处理后,机组进行稳定性试验,机组运行状态良好,无明显的电磁拉力不平衡现象,但有轻微水力不平衡现象。

### 3 水轮发电机组处理过程分析

#### 3.1 启动试验分析

2012 年 7 月对 11 机组作修后稳定性试验,采集机组在不同转速下、不同额定空载电压下、不同负荷情况下的相关部位的摆度和振动,分别见图 1 与图 2。

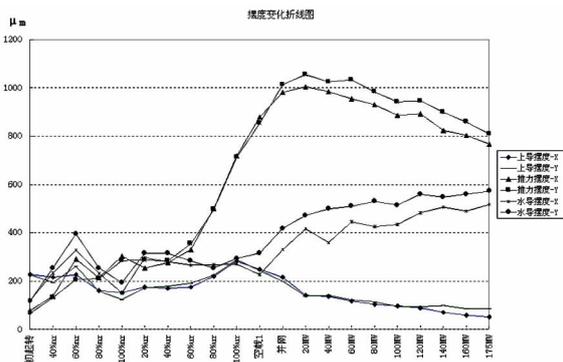


图 1 11F 机组稳定性试验各部位摆度趋势

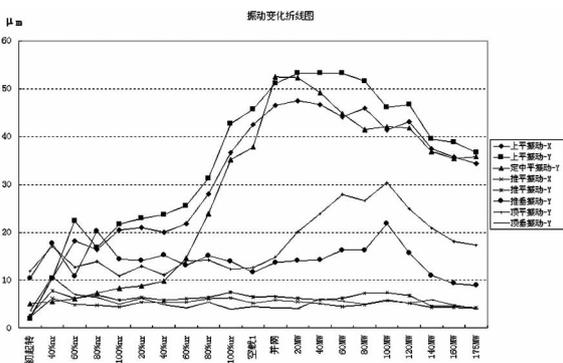


图 2 11F 机组稳定性试验各部位振动趋势

由试验数据及各部位摆度趋势图分析,在机组无励磁的情况下,上机架水平振动与推力摆度幅值随着转速的升高有所增大,机组存在轻微的动不平衡现象,在空转工况下各部件的振动、摆度幅值均满足规程要求,故而转子机械不平衡并不是引起摆度增大的主要原因。

在升压试验过程中,随着机组励磁电压的升高,上机架水平振动、定子中平振动、上导瓦与推力瓦摆度幅值明显上升,推力瓦摆度幅值增长至 0.60 mm,且随着机端电压增长,机组振动的相位角也发生变换,机组存在明显的电磁力不平衡现象。

机组并网后,在机组带 20 MW - 60 MW 区间

内,推力瓦摆度幅值达到 1.01 mm,随着负荷的增加,上机架水平振动、上导瓦摆度和推力瓦摆度有所减小;但水导瓦摆度摆度幅值有所增加,水导瓦摆度在满负荷下以达到 0.57 mm。对该过程波形进行频谱分析,机组在空载到 40 MW 负荷区域内,运行较稳定,水力低频振动不明显,机组在 60 MW 附近时,顶盖水平振动异常,其波形表现为 0.86 倍转频频率,在 80 MW - 120 MW 负荷区域内,受尾水压力脉动的影响,上导摆度、水导摆度、顶盖水平振动和顶盖垂直振动存在较为明显的 0.11 - 0.32 倍转频的低频波。鉴于水力因素引起的振动的复杂性,且该区域运行为水轮机的不稳定区域,加之顶盖振动均在合格范围,故而水力因素不是引起推力摆度超标的主要因素。

上述分析可见,推力瓦摆度超标的主要原因为电磁力不平衡,需重点对定、转子空气间隙或转子绕组匝间短路情况进行排查。

#### 3.2 机械部分检查

2012 年 8 月,停机对各转动部分连接螺栓、上导轴承、水导轴承进行检查。对上端轴、转子中心体、水发连轴螺栓的预紧力进行检查,发现转子中心体有 4 颗螺栓在设计压力下略有轻微移动,最大旋转角度为  $10^\circ$ ,其他部位螺栓均未发现松动状况;对定转子空气间隙进行检查分析,发电机定子、转子空气间隙基本合格,其中平均气隙为 22.8 mm,最大值为 24.1 mm,最小值为 20.9 mm,符合规范要求。对水导瓦进行检查,发现部分水导瓦间隙变大,其最大双面间隙为 0.65 mm,分析其根本原因是水导瓦在制造时,在支柱螺栓配合处留有  $\varphi 60 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$  的“凹槽”——作为对水导瓦的定位及间隙配合,由于水导瓦运行时间较长,水导瓦背后凹槽磨损严重,凹槽与支柱螺栓的贴合面积小于 80%,对水导瓦不能进行限位,调整后支柱螺栓与水导瓦顶头在圆周方向有 2 mm 的余量,致使调整后的水导瓦间隙在运行过程中发生变化。鉴于水导瓦温度不高,协商讨论将水导瓦双面间隙调整至 0.56 mm。

通过上述处理后机组推力摆度大的问题有所改善,但仍然存在电磁拉力不平衡问题,满负荷运行情况下,推力摆度仍然有 0.76 mm,且随着运行时间增长,推力摆度逐步增长趋势,机组运行状态仍然不稳定。

## 4 发电机磁拉力不平衡检查处理

2014年大修中,对定子、转子、导轴承进行检查分析,全面分析引起发电机磁拉力不平衡的因素,其中对定子圆度、转子圆度进行调整,对水导瓦进行改造,详细过程如下。

### 4.1 定子圆度及同心度检查

吊出转子后,对定子各部焊缝开裂、螺栓松动、零部件变形损伤情况进行全面检查,均未发现异常状况;定子三组绕组的直流电阻、定子绝缘及交流耐压试验均合格;对定子圆度进行测量,在定子上中下三处测量定子圆度,利用正交分解法,对定子圆度测量数据进行分析,结果如图3所示。

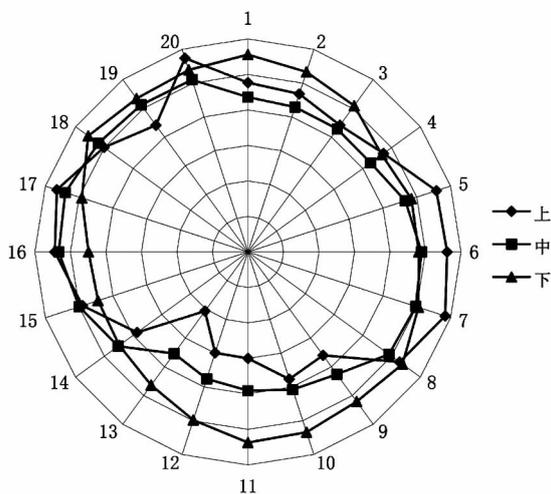


图3 定子圆度数据分析图

由图示可见,定子上部平均直径  $\varphi 4775.57$  mm,设计空气间隙为 22 mm,相对误差  $4.9\% < 5\%$ ,定子中部平均直径  $\varphi 4776.02$  mm,相对误差  $4\% < 5\%$ ,定子下部平均直径  $\varphi 4776.10$  mm,相对误差  $2.3\% < 5\%$ 。定子的垂直度方面,定子上环中心与下环中心同心度偏差达到 0.79 mm,偏差角度与 +Y 夹角 =  $88.7^\circ$ ,定子呈现“圆台型”一下大上小,且上下偏心。综合分析上中下环数据,计算出上中下环理论中心,对定子进行整体平移调整。

由于定子基础板已经浇筑在基坑混凝土内,通过平移定子进行调整工作量大且需大吨位螺旋千斤顶,考虑到在推动定子过程中,有可能造成定子绝缘损坏等对定子造成重大损伤的可能,且需重新调整上架中心,故不采用直接推动定子来调整机组安装中心;通过现场检查发现底环与顶

盖均有调整余量,故通过调整底环、顶盖与定子的同心度,将水轮机固定部分中心调整至定子的理论中心处。

以定子理论中心为基准,经过计算对底环为向 +Y 方向调整 0.38 mm,向 -X 方向调整 0.15 mm,调整完毕对中心进行校核,底环偏差 0.03 mm,中心调整优良;以调整好的底环中心为基准,对顶盖向 +Y 方向调整 0.10 mm。顶盖中心偏差为 0.03 mm。调整完毕后对中心进行校核,中心调整合格。对顶盖与底环分别钻取  $\varphi 30$  的锥销进行定位,具体流程如图4。

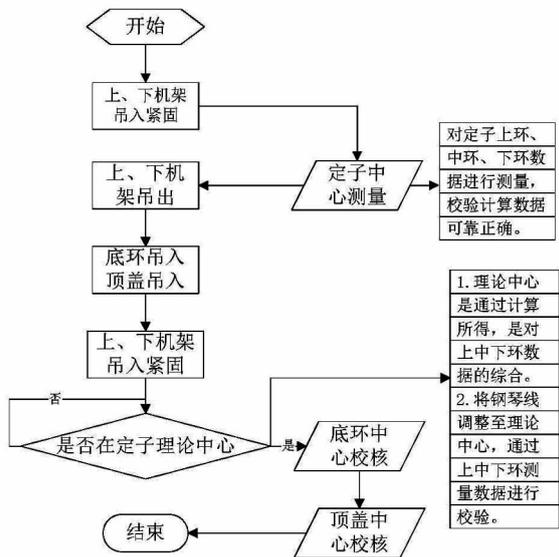


图4 水轮发电机组中心调整流程图

### 4.2 转子检查处理

(1) 转子中心体止口检查。以下止口为基准测量上止口的同心度,经测量,上、下止口的同心度合格,偏差小于 0.05 mm,

(2) 转子吊出后,对转子机械部分检查,磁极键点焊无开裂,阻尼环连接良好,对转子单个磁极作交流阻抗测量,其最小值 1.14  $\Omega$ ,最大值 1.17  $\Omega$ ,平均值 1.15  $\Omega$ ,偏差未超过 2%,对转子作直流电阻测量,测试值为 0.206  $\Omega$ ,均在合格范围内。

转子圆度及磁极检查处理。(3) 转子吊出后,对转子圆度进行检查,在磁极上中下侧架设百分表采取数据,利用正交分解法,对测量数据进行分析,圆度趋势如图5所示。

由数据分析可见,转子上部圆度相对误差  $3.5\% < 5\%$ ;转子中部圆度相对误差  $6.3\% > 5\%$ ;

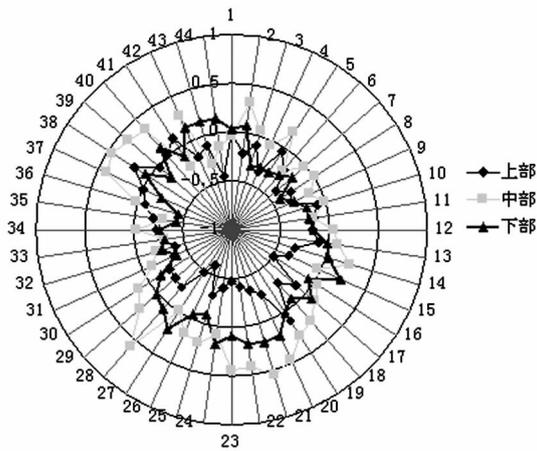


图 5 转子圆度数据分析图(调整前)

转子下部圆度相对误差  $5.4\% > 5\%$ 。由图 5 所示,转子的垂直度方面,上部与下部的偏心可达  $0.4\text{ mm}$ 。发现问题后电厂组织有关技术人员讨论并咨询东电厂家,决定在测量数据偏大的磁极背面通过加垫来调整转子圆度。具体加垫磁极数据如下。

表 2 磁极圆度调整加垫参数表

磁极 编号	加垫尺寸/mm		磁极 编号	加垫尺寸/mm	
	上部	下部		上部	下部
1#	0.5	0.5	2#	0	1
3#	0.3	0.6	4#	0	0.5
5#	0.3	0.6	6#	0.3	0.3
7#	0	0.5	8#	0	0.3
9#	0	0.3	10#	0	0.3
11#	0	0.3	28#	0.3	0.3
29#	0.3	0.3	30#	0.3	0.3
31#	0	0.3	32#	0	0.5
33#	0.3	0.3	34#	0.3	0.6
35#	0	0.5	36#	0.5	0.5
37#	0.3	0.8	38#	0.5	1
39#	0.5	1	40#	0.5	1
41#	0.5	1	42#	0.5	1
43#	1	1	44#	0.5	0.8

对 28 个磁极需进行加垫并更换磁轭键。加垫处理后对转子圆度进行检查,转子上部圆度相对误差  $3.2\% < 5\%$ ; 转子下部圆度相对误差  $1.6\% < 5\%$ 。转子圆度合格。将磁轭键按照要求打紧后,对转子作绝缘及交流耐压试验,均符合要求。

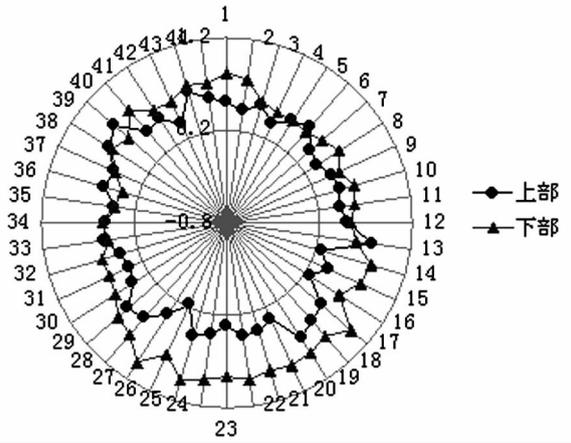


图 6 转子圆度数据分析图(调整后)

### 4.3 水导瓦改造

对水导瓦结构进行改造,更换水导瓦顶头,更换为强度更高的烙刚垫,并使烙刚垫高瓦背  $2\text{ mm}$ ,更换部分磨损严重的支柱螺栓,检查支柱螺栓与烙刚垫的配合尺寸,使支柱螺栓与烙刚垫贴合面积大于  $85\%$ 。

通过上述处理后,对机组进行回装,按设计紧固力紧固转动部分连轴螺栓;轴线调整至  $0.02\text{ mm/m}$ ;检查调整镜板水平与推力轴承受力,均在合格范围内,将机组调整至中心,止漏环偏心不超过平均间隙  $5\%$ ;对上导轴承按  $0.60\text{ mm}$  的双面间隙调整,水导轴承按照  $0.60\text{ mm}$  双面间隙进行调整,机组回装完毕后对机组进行启动试验。

### 4.4 机组检修后运行状况

机组检修后,进行了稳定性试验,测量各工况下机组摆度值及振动值,通过前后机组运行过程中摆度与振动趋势对比,各部位摆度与振动均没有超标,机组加励磁后,推力摆度没有阶跃性变大,机组运行状态良好,无明显的电磁拉力不平衡现象,有轻微水力不平衡现象,机组运行 1 小时后,发现水导摆度由  $0.24\text{ mm}$  增大至  $0.38\text{ mm}$ ,且仍有增大的趋势。停机检查水导间隙,发现水导双面间隙由原来的  $0.56\text{ mm}$  增至  $0.80\text{ mm}$ ,经分析确认是由于新更换的水导瓦顶头未压紧所致,将水导瓦双面间隙调整为  $0.56\text{ mm}$ ,机组重新运行,水导摆度正常,机组运行状态稳定。

## 5 体会

通过分析处理,11F 机组由水轮发电机组偏心及转子圆度超标引起的动态电磁拉力不平衡,结合作业现场实际处理过程,分享几点体会,希望

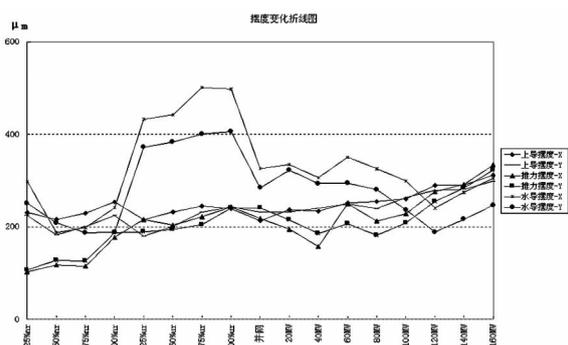


图 7 机组稳定性试验各部位摆度趋势

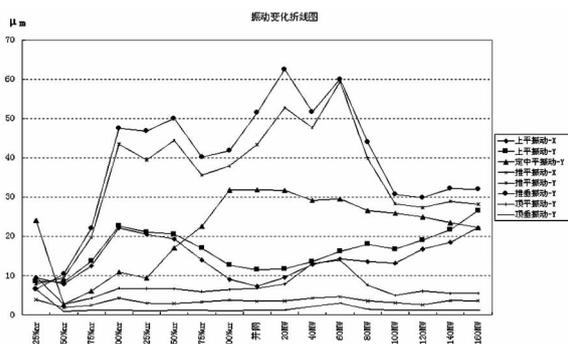


图 8 机组稳定性试验各部位振动趋势

对出现类似状况机组提供一定的借鉴经验。

(1)对于定子与底环偏心问题,理应在安装过程中应予以充分保证,但对运行多年机组,机组的销钉定位精度变差,更有甚者销钉定位失效,给机组运行带来很大安全隐患,故而机组扩修过程中,应校核其同心度。

(2)对于定转子等大直径圆形空间物体圆度检测与控制,是机组运行质量及安全运行的重要

(上接第 151 页)

业内产能过剩,竞争异常激烈,利润空间很小,仅一些存在着很大开发难度的流域还有待开发,如青藏高原等高海拔地区。由于高海拔地区气候条件相当恶劣,昼夜温差大、气温低、空气稀薄,从而对发电机组的结构型式、材料选取、通风冷却方式、绝缘电气性能等提出一系列新的课题。作为高海拔地区单机容量世界第一的已运行机组,西藏旁多电站发电机组的成功投运,标志着我公司完全掌握了高海拔地区发电机组设计、制造中的技术难点,为今后承接类似机组提供了大量的技术及经验储备,提升了公司市场竞争力。

截至 2011 年 11 月底,藏中电网装机容量仅 87.3 万 kW,电力供需矛盾严重。而旁多电站装

指标;对于定转子空气间隙值分析,不能仅仅局限与空气间隙偏差在合格范围内,应综合分析定子、转子磁极的空间圆度和垂直度,使其各部分空间圆度均合格范围内,从而保证空气间隙动态均匀。

(3)对于无下导轴承的半伞式机组,如转子稍有不平衡力,推力瓦摆度就显示较大,且在各规程并未对推力摆度允许值作相关要求,故而在机组调整中心,应力图将中心偏差控制在最小范围内,同时在运行过程中,应整体找一次重量不平衡,尽量减少转子自身的机械不平衡现象。

(4)在实际处理过程中,发电机机组部分摆度在空载后略有下降,是因为轴向水推力增加、推力轴承摩擦力加大,转子不容易偏离中心所致,同时负荷增加,有功、无功电流增加,磁场强度亦增大,使转子的径向不平衡力相对减小,使转子偏离中心也愈加困难。

参考文献:

[1] 王海. 水轮发电机组状态检修技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.  
 [2] 蔡燕生、李东、燕飞. 龚嘴水电站水轮发电机组振动分析及探究[J], 水力发电, 2014, 40(12)63-67.  
 [3] 何睿. 铜街子电站 11F 机组振动处理[J], 四川水力发电, 1999, 18(4)23-27.  
 [4] GB/T8564—2003 水轮发电机组安装技术规范[S].  
 [5] DL/T507-2002 水轮发电机组启动试验规程[S].

作者简介:

方仲超(1985-),男,陕西榆林人,西北农林科技大学热能与动力工程本科毕业,助理工程师,现于宝珠寺电厂从事电力设备检修及项目管理工作。(责任编辑:卓政昌)

机容量达 16 万 kW,年平均发电量约 5.99 亿 kW·h。电站成功并网运行后,大大缓减了西藏中部地区电力不足的情况。

作为央企,DEC 很好地将“中央关心西藏,全国支援西藏”落到了实处,为边疆地区社会稳定、经济发展乃至国家的长治久安作出了巨大的贡献。

作者简介:

付佩贤(1984-),男,汉族,云南昭通人,毕业于重庆大学电机专业,工程师,现为东方电气集团东风电机有限公司技术部设计员;  
 张 翀(1974-),男,汉族,湖南新邵人。毕业于重庆大学电机专业,高级工程师,现为东方电气集团东风电机有限公司电机设计室主任;  
 祁腊梅(1985-),女,汉族,内蒙古赤峰人。毕业于哈尔滨理工大学电机专业,工程师,现为东方电气集团东风电机有限公司电机设计员。

(责任编辑:卓政昌)