

铜街子电站 11F 机组振动处理

何 睿

(龚嘴水力发电总厂, 四川 乐山 614900)

摘 要:铜街子电站 11F 机组自 1992 年 9 月下旬启动运行以来, 机组在给励磁及带负荷后各部位(主要是发电机)的摆度、振动值产生跃变, 机组摆度严重超标。经 3 次“运行稳定性”试验, 确定主要问题如下: ①上导轴瓦抱不住轴; ②发电机磁力不平衡。1999 年初, 铜街子电站 11F 机组吊出发电机转子, 对发电机、联轴螺栓和推力轴承进行了试验、处理, 发现: 转子磁极松动产生的“二次间隙”是造成发电机动态气隙不均的主要原因。处理后机组各部振动合格。

关键词:振动, 运行稳定性; 上导轴承; 主轴联结螺栓; 轴线; 不平衡磁力; 二次间隙; 处理。

中图分类号:TV737; TV734.2

文献标识码: B

文章编号:1001-2184(1999)04-0023-05

1 简介

龚嘴水力发电总厂所属的铜街子电站(总装机 4×15 万 kW)位于龚嘴电站下游约 30 km 处、乐山市沙湾境内的大渡河上。电站中的 11F 机组于 1992 年 9 月上旬充水、下旬并网发电, 同年 11 月 5 日正式移交给龚嘴水力发电总厂。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	ZZ440-LH-853	型 号	SF150-68/12800(半伞式)
最大水头/m	40	额定容量/kVA·kW ⁻¹	176 470/150 000
设计水头/m	31	额定电压/V	13 800
最小水头/m	28	额定功率因数	0.85
额定流量/m ³ ·s ⁻¹	575	额定频率/Hz	50
额定出力/kW	154 000	相 数	3
额定转速/r·min ⁻¹	88.2	励磁方式	静止可控硅自并励
飞逸转速/r·min ⁻¹	182	额定励磁电压/V	390
		额定励磁电流/A	1 480

电站 11F 机组在给励磁及带负荷运行后各部位(主要是发电机)的摆度、振动值产生了跃变。机组摆度严重超标情况见表 2。

表 2 机组摆度超标情况表

时间	工况 /MW	发 导 /mm	上 机 架 /mm	说 明
1992-09		1.2		上机架 12 个弹性支臂的剪断销均先后被剪断, 由空心销更换为实心销。
1993-07	120	2	0.35	受油器浮动瓦损坏, 上导瓦松动。
1994-01	150	2	0.4	机组轴线处理。
1994-08	120	2.5	0.35	受油器大量漏油, 上导瓦均松动。
1995-09	130	4	0.5	受油器大量漏油, 3 号、5 号、7 号、4 号上导瓦斜楔垫板固定螺栓断裂。
1996-06	120	0.4	0.5	上导瓦斜楔增设防松装置。
1997-06	110	3	0.45	受油器大量漏油, 上导轴承四块斜楔垫块固定螺栓断裂。
1997-07	130	1	0.56	上导瓦均松动。
1998-09	130	0.8	0.2	上导轴承及上机架弹性支柱均于年初经过彻底处理。

2 “稳定性”试验、处理情况

1992 年 12 月进行第一次“运行稳定性”试验。试验后认为发电机转子下部动态气隙不均, 产生径向不平衡磁力, 其根源在于发电机转子中心体上下联结法兰偏心 0.37 mm 所造成的。

1994 年初大修期间, 对机组进行轴线处理方法如下: 上端轴进行两次位移, 第一次在转子中心体上端 φ1 660 mm 凸止口偏磨削去 6 号方向 0.40 mm, 使上端轴轴线反方向移位; 第二次由轴号 1~2 方向向 6~5 方向移 0.20 mm。经机组轴线处理后振动有所改善, 但仍未消除不平衡磁力。

1995 年底进行第二次“稳定性”试验。试验后认为存在较强的径向不平衡磁力、发电机以下各部位摆度相位在轴号 2+ 与轴号 5+ 间反复变化。

1996 年初机组进行大修期间, 对发导瓦楔进行了改造, 楔子板垫块增设防松装置。改造后, 机组运行状况较好, 发导摆度基本控制在 0.4 mm 瓦隙内, 但发电机不平衡磁力仍未消除, 上机架摆动仍超标。

1998 年初进行第三次“稳定性”试验, 确定的主要问题有: ①上导轴瓦抱不住轴; ②发电机磁力不平衡。试验结果如下:

2.1 轴系轨迹测量

根据轴系轴心轨迹平均位置测量数据, 绘出轴系轴心轨迹平均位置图见图 1。从该图分析, 机组启动后上导轴心偏移到第三象限, 远大于水导处轴心的偏移量。机组轴线在水力和不平衡磁力的综合作用下, 向一、三象限倾斜, 且上导瓦已松, 瓦隙过大, 加剧了机组转动中心的倾斜和漂移。

2.2 振动频谱分析

由试验数据作机组振动摆度与运行工况的关系曲线如图 2 和图 3 所示:

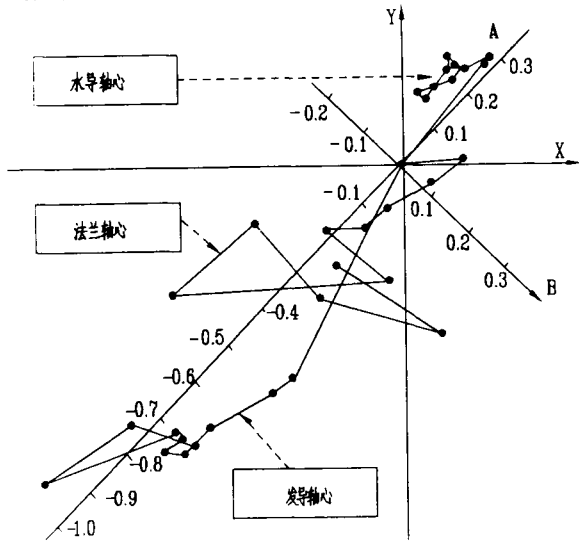


图 1 机组轴系轴心平均轨迹图

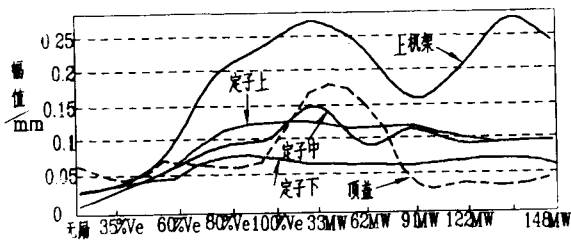


图 2 上机架定子等振动通频幅值与运行工况的关系图

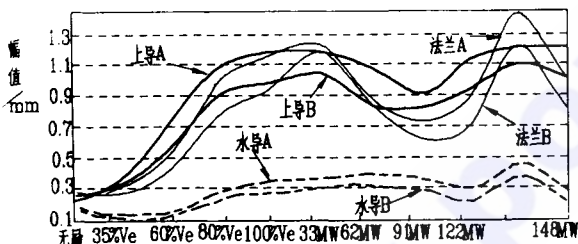


图 3 上导、水导等振动通频幅值与运行工况关系图

由试验数据及上面的曲线分析,振动的优势频率为机组的转频,机组从“无励→递升加压→递升加负荷”的过程中,各部位特别是发电机的振动迅速加剧,且随负荷的变化机组振动相位角也相应改变,说明振动与发电机电磁不平衡有直接关系,即由动态气隙不均产生的偏心电磁力引起机组异常振动。

上机架的振动超标,说明各弹性支臂剪断销间隙或碟簧压缩量可能超标。法兰的振动摆度超标严重,说明该段轴线可能有缺陷。在 33 MW 负荷左右,定子基座水平振动特别是定子中部水平振动出现峰值,这与水轮机振动区域相联系有关,同时上机架振动也加剧了定子基座水平振动。

2.3 “旋转法”测量发电机静态气隙

每次水力盘车 120°测量三次机组轴线。从三次

测量的数据分析,发电机定子、转子空气间隙基本合格,但上端气隙普遍偏小,平均气隙为 17.61 mm (设计为 18 mm),下端平均气隙为 18.24 mm。

根据气隙测量数据所作的气隙相位图分析得出,气隙相位差基本存在 120°的变化规律,定子及转子圆度特别是转子圆度均存在以下问题:定子局部变形处有:定子下端在 135°左右的部位存在凹点;定子上端 130°左右、260°左右的部位存在凹点;定子下端 135°左右的部位和定子上端 220°左右的部位存在凸点。转子局部不圆处有:转子上端在 37 号磁极左右、21 号磁极左右的部位存在凹点,转子下端在 13 号磁极左右的部位存在凹点;转子下端在 37 号磁极左右的部位存在凸点。

发电机转子磁极交流阻抗测量结果最大值为 1.497 Ω,最小值为 1.397 Ω。匝间短路按 20% 偏差计算,最大偏差值为 1.2 Ω,最小偏差值为 1.12 Ω,各阻抗测值均没有超标,且很均匀,因此各磁极没有匝间短路的现象。

2.4 试验结论

轴线倾斜的主要原因是上导瓦松动,瓦隙变大。其根本原因是发导轴承座在制造时留下一道约 90 mm×10 mm 的“空刀槽”——该槽导致瓦楔垫块下部悬空,且导瓦顶头正好顶在悬空部位上边缘,仅靠垫块上部的两根固定螺栓(φ16 mm)压紧瓦楔垫块所造成。机组转动轴线倾斜的另一原因是发电机定子、转子间动态气隙不均,反过来又加剧了轴线倾斜,在水力综合作用下,导致机组振动恶性循环。

从机组水力盘车 120°测得的发电机静态空气间隙值分析,转子圆度上存在的缺陷是引起发电机定、转子间动态气隙不均的主要原因。至于上机架摆度超标,一方面上机架弹性支臂剪断销与销孔的配合间隙超标,同时碟簧的压缩可能不均;但其根本原因在于发电机不平衡磁拉力的作用结果。上导瓦隙变大后更加剧了对上机架的撞击,上机架在由发导轴承传递来的偏心力的作用下,就必然会产生异常振动。上机架的摆动又反过来加剧了上导瓦的松动和发电机动态气隙的不均,形成了恶性循环。

2.5 缺陷处理

①试验完毕后,对上导轴承抱不住轴的问题进行了彻底处理。

分解上导轴承进行检查,发现斜楔垫块基本上都有不同程度的弯曲变形,斜楔与垫块的贴合面积小于 80%(有局部烧伤),顶头限位槽侧面也有烧伤,对瓦楔及垫块进行了更换、处理。在上导轴承座“空刀槽”内,瓦楔垫板部位加焊垫块补偿,使瓦楔垫

板顶头“顶实”。并在发导瓦座上加垫环氧板,将导瓦高程提高 20 mm,使导瓦顶头避开“空刀槽”位置。

将上机架弹性支柱剪断销改成双销。销孔配合间隙为 0.009~0.05 mm。剪断销剪口直径为 $\phi 30.5/\phi 20$ mm,工作剪断力为 143 kN。蝶簧全部更换,蝶簧压缩量按 6.9 mm 进行调整。

②采用电气盘车方式来测量、复查机组轴线的摆动情况、轴线的水平垂直度和弯折度。

从盘车数据分析,上导处轴线基本上偏靠 1 号、2 号、3 号轴位,大轴联结法兰和水导轴承处轴线基本上都偏靠于 5 号、6 号、7 号轴位,说明机组轴线基本呈直线倾斜,机组轴线没有明显的弯折现象。整个盘车过程中机组轴线最大倾斜度为 0.022 mm/m。水发轴段最大弯折度为 0.019 mm/m,按“GB8564-88”规范要求,推力以下轴段直线度及与镜板的垂直度均为合格。机组轴线在上端轴段略有弯折或错位,方位在“1 号~5 号”轴位,并偏向于 1 号、2 号轴位间,上端轴段最大弯折度为 0.031 mm/m,按“GB8564-88”要求合格,因此机组轴线符合要求。

2.6 处理后运行情况

1998 年 5 月,铜街子电站 11 F 机组检修结束后,分别按各工况测量了机组的摆度如表 3,其中上导瓦隙按双面 0.4 mm 间隙调整;水导瓦隙按双面 0.6 mm 间隙调整。

表 3 机组的摆度值表

工况	空载 无励	50%Ve	100%Ve	30MW	80MW	120MW	150MW
上机架/mm	0.04	0.09	0.12	0.12	0.11	0.1	0.1
上导/mm	0.15	0.38	0.4	0.4	0.38	0.35	0.32
水导/mm	0.18	0.2	0.2	0.2	0.2	0.18	0.18

从上导及上机架的摆度看,加励磁后上导摆度立刻顶满瓦隙,但未扩大,说明上导瓦抱不住轴的问题已得到解决;但发电机电磁不平衡仍存在,有待吊出转子后,对发电机定、转子“局部不圆度”及其它方面作进一步检查处理。

3 发电机磁力不平衡检查和处理

1999 年初将铜街子电站 11 F 机组吊出发电机转子后,对发电机、联轴螺栓和推力轴承进行了试验和处理。

3.1 定子检查、处理

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了全面检查。除第三象限有两根定位销位移、两颗定子基础螺栓点焊处开焊外、齿压板、拉紧螺栓搭块及定位筋与托板、机座等

处无开焊现象。对位移的径向销恢复原位并补焊牢固,将定子基础螺栓开焊处进行重焊。定子铁芯未发现松动和其他异常情况,穿心螺栓均紧固。检查定子绕组时,将松动的大部分槽楔全部打紧,打了 326 槽(共 648 槽)。定子三组绕组的直流电阻和定子绝缘及交流耐压试验均合格。对定子检查时,发现第三象限约 50°扇区域内有伤痕,定子表面绝缘漆的擦痕与转子上的痕迹相吻合,说明机组在投运前定、转子曾发生过相撞,但定、转子的该部位都没有明显的变形和其他缺陷。定子圆度测量结果如图 4 所示。

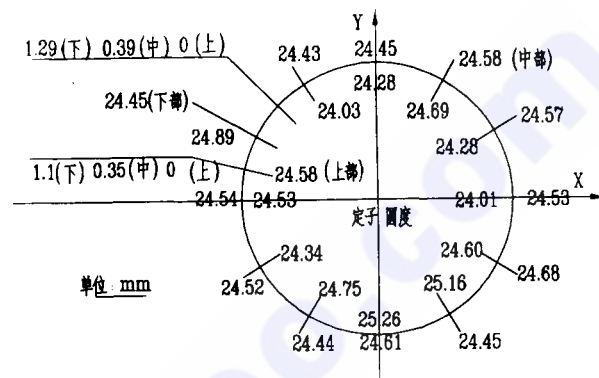


图 4 定子圆度测量结果图

因未吊出发电机主轴,难以测量定子上端圆度,只测量了定子上端和中部的圆度。由定子圆度测量结果可知,定子上部的平均直径 $\phi 49.09$ mm,相对误差 $5.6\% < 10\%$;中部平均直径 $\phi 49.12$ mm,相对误差 $6.9\% < 10\%$ 。因此定子上端和中部的圆度合格。

对定子的垂直度,选测了几点,从测量结果看,定子呈圆台型——这与前面测量的发电机上端平均气隙偏小的结论相吻合。

3.2 转子检查和处理

检查后发现转子磁轭键侧面楔定位块的周向焊缝有两处裂开,需重新焊牢。转子磁轭上的侧面楔未移位,磁轭无松动下沉现象。转子磁极交流阻抗测量结果为 1.14Ω 至 1.17Ω ,转子直流电阻测值为 $0.2067 \Omega (75^\circ\text{C})$,均合格。

(1) 转子中心体检查

以下止口为基准测量上止口同心度,同时复查上止口削磨情况。经测量,上、下止口同心度合格(偏差小于 0.05 mm)。上止口偏磨情况相对值测量如图 5(1 号磁极在四象限位置),因偏磨部位呈不光滑斜面,所测相对值为偏磨斜面根部最大值(顶端最小值为 0.6 mm)。从转子中心体上凸止口偏磨情况看,与前次上端轴推移量基本吻合。

转子水平测量(转子中心体上止口面)发现在约 310° 方位高有 0.11 mm/m,而转子中心体上下止口

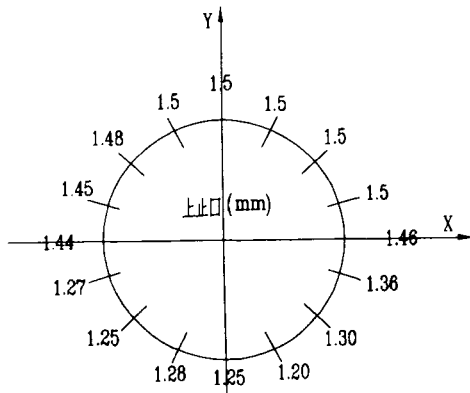


图5 上止口偏磨后相对测量值图

圆心轴线同方向倾斜 0.12 mm/m, 综合机组轴线盘车情况, 说明转子中心体上、下止口面的平行度及垂直度均满足要求。由于所测转子中心体上、下止口同心度及平行度合格, 因此, 上端轴推移的原因应来自上端轴的加工。

(2) 转子圆度及磁极检查和处理

检查转子磁极键, 发现磁极键全部松动, 重新打紧磁极键, 并折算出磁极与磁轭的间隙值见图 6:

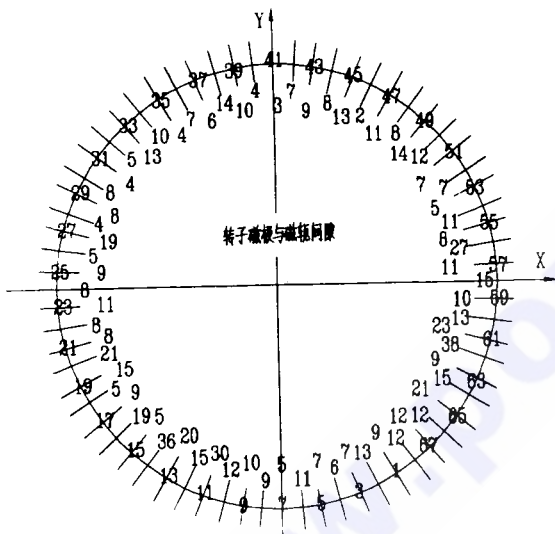


图6 转子磁极与磁轭间隙图

转子磁极与磁轭间的平均间隙为 0.11 mm, 最大为 0.38 mm, 最小为 0.02 mm。转子磁极松动产生的“二次间隙”是造成发电机动态气隙不均的主要原因。将磁极键打紧后, 测量了转子圆度, 根据转子圆度测量结果, 换算出转子不圆度如图 7 所示(最外圈为转子下部, 最内圈为转子上部)。

从转子的不圆度看, 与前面旋转法施测发电机气隙的结论是一致的。对超标的 9 号、10 号、11 号、12 号、13 号等 5 个磁极加了 1 mm 厚铁皮, 6 号、7 号、8 号、14 号等 4 个磁极加 0.5 mm 厚铁皮。磁极加垫处理后, 复测转子圆度, 测量结果如图 8 所示(最外圈为转子下部, 最内圈为转子上部)。

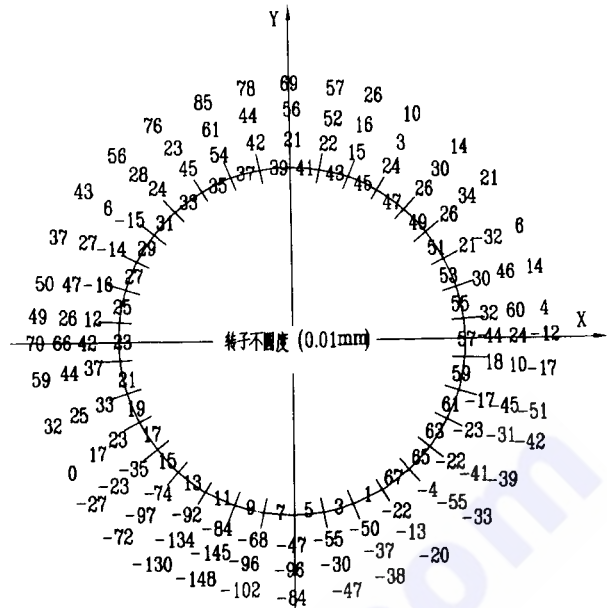


图7 转子不圆度测量结果图

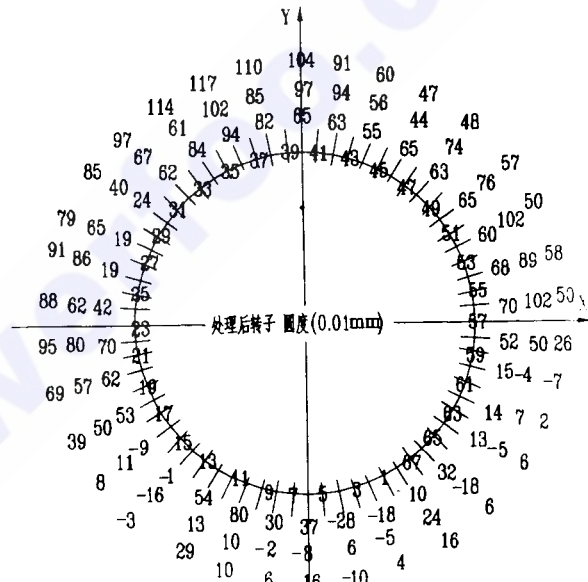


图8 处理后转子圆度测量图

由上面转子圆度测量结果可知, 磁极处理后最大不圆度为 0.79 mm, 最小不圆度为 -0.73 mm, 按“GB8564-88”(不圆度不超过平均气隙的 $\pm 5\%$) 要求, 转子圆度已经处理合格。

转子圆度处理合格后, 转子绝缘及交流耐压试验也符合要求。机组回装完毕后测量发电机定、转子空气间隙也合格。磁极平均打紧 0.11 mm(共 7.5 mm), 同时磁极加垫总厚 7 mm, 发电机定、转子平均空气间隙变化不大。

3.3 联轴螺栓检查

对上端轴与转子中心体、转子与发电机主轴的联结螺栓进行检查, 均达到设计要求(转子与发电机主轴的联结螺栓拉伸 0.23 mm)。回装时将转子与发电机主轴的联结螺栓拉伸值提高到 0.3 mm。上

端轴的回装按检修前测量的定位块间距复原。发电机主轴与水轮机主轴联结螺栓的拉伸值依次进行检测,拉伸值如表 4。

表 4 螺栓拉伸值表

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
拉伸值/mm	0.20	0.17	0.28	0.22	0.33	0.20	0.23	0.23	0.23	0.26
编号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
拉伸值/mm	0.17	0.43	0.16	0.18	0.21	0.29	0.30	0.32	0.20	0.42

20 颗联结螺栓拉伸值仅 12 号、20 号两颗合格(设计 0.42 mm)。20 颗联结螺栓平均拉伸值为 0.25 mm,螺栓伸长度为 650 mm,弹性模量为 2.06×10^5 MPa,螺栓半径 7 cm,螺栓每颗联结平均预紧力为 124 t(设计要求 208 t),20 颗螺栓预紧力共 2 480 t。而机组最大轴向推力约 3 000 t,故在该工况运行时,水发主轴联结法兰间将产生平均 0.05 mm 左右的间隙,机组轴线呈动态摆动,这就加剧了发电机电态气隙的不均、机组的振动和对轴承的撞击等。

按设计要求需将联结螺栓全部拉紧,平均拉伸为 0.45 mm,预紧力共 4 474 t。

3.4 推力轴承检查

推力瓦受力情况测量变形如图 9 所示,弹性油箱压缩较均匀,最大偏差 0.09 mm(GB8564-88 要求小于 0.2 mm),推力瓦受力合格。机组启动后,对推力轴承 18 个弹性油箱的半数按空载无励、有励、50 MW、90 MW、129 MW、150 MW 等工况进行动态受力测试,从测试结果看,各弹性油箱动态受力均匀,镜板跳动峰值为 0.03 mm 左右,因此,推力轴承不存在受力缺陷。

3.5 机组检修后的运行情况

机组检修后,进行了甩负荷试验,同时测量各工况机组摆度值见表 5。

表 5 中甩负荷时的摆度为甩时的最大值。做前

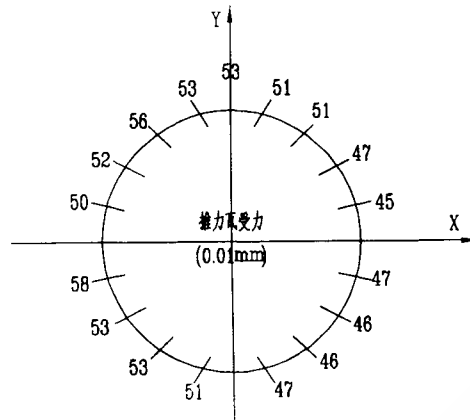


图 9 推力瓦受力变形值图

次检修后和本次检修后摆度曲线如图 10 所示。

表 5 各种工况下机组摆度最大值表

工况	空载无励	100% Ve	30 MW	90 MW	120 MW	150 MW	甩 75 MW	甩 90 MW	甩 150 MW
上机架/mm	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.03	0.06	0.06
上导/mm	0.10	0.10	0.10	0.15	0.15	0.15	0.10	0.10	0.25
水导/mm	0.15	0.15	0.18	0.2	0.2	0.2	0.2	0.16	0.2

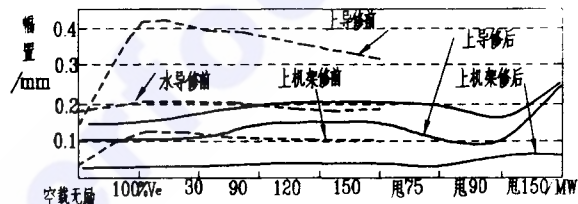


图 10 摆度曲线比较图

比较上面摆度曲线,机组振动情况明显好转,各部振动均没有超标。从上导及上机架的摆度看,加励磁及带负荷后摆度不再发生阶跃,说明发电机电磁不平衡现象已经消失。

作者简介:

何 睿(1967 年一),男,四川南部人,龚嘴水力发电总厂生技处专责工程师,从事生产技术工作。

川滇黔桂四省(区)水电学会二届二次期刊审读及秘书长工作研讨会在蓉召开

1999 年 10 月 15 日至 20 日,川滇黔桂四省(区)水电学会二届二次期刊审读及秘书长工作研讨会在蓉召开。在 10 月 16 日举行的大会上,四川省水电学会副理事长兼《四川水力发电》杂志主编郑文正主持会议,向出席会议的代表表示欢迎,并介绍了已召开过的几次会议后取得的成绩;接着,四川省水电学会理事长马怀新、副理事长兼秘书长樊天龙先后在大会上讲话,预祝会议圆满成功,并向与会代表介绍了四川省的水电发展形势,指出了学会期刊对学会工作的重要性,希望通过研讨会的召开进一步促进学报质量的提高。《四川水力发电》期刊挂靠单位——国家电力公司成都院副院长兼总工程师程志华代表此次会议的主办单位——《四川水力发电》编辑部在会上讲话,向远道而来的代表表示欢迎。接着,全体代表合影留念。大会上,云南省水电学会副秘书长、《云南水力发电》主编吕仕智、广西水电学会秘书长张大本、《贵州水力发电》主编丁贵林和贵州省水电

学会副秘书长崔燕先后介绍了各省学会的情况,并对学报作为学会窗口的重要作用进行了阐述,希望各省学会继续加强对学报支持的力度,切实解决办刊中的实际问题。

在会议的讨论中,代表们畅所欲言,各抒己见,对办刊中出现的的问题,以及期刊上网,期刊标准化等问题进行了研讨,取得了共识,增进了了解,取得了一定的实效。代表们一致认为,继续延续期刊审读会这一形式是十分必要的,并对明年会议的举办形式达成了共识。四省(区)学会秘书长也相聚一堂,交流了经验,对工作进行了研讨,相互加强了了解。

会议期间,代表们还对岷江上游已建和在建的电站进行了考察。

全体代表对此次会议的主办单位——《四川水力发电》编辑部为会议做出的努力表示感谢。在完成了预定的议程后会议圆满结束。

本刊记者 李燕辉