

孙 占 胜

水内冷 汽轮发电机 试验方法

水利电力出版社

前 言

上海电机厂在有关大专院校、科研单位和协作厂的大力协同下,于1958年10月试制成功了世界上第一台 12000kW, 3000r/min, 2 极, 定子、转子绕组都采用水直接内冷却的汽轮发电机。生产制造水内冷汽轮发电机, 至今已有近30年的历史。目前我国水内冷汽轮发电机已形成了 50MW、125MW、200MW、300MW 的系列产品。

水内冷汽轮发电机自1958年在我国问世以来, 世界上一些工业发达国家, 也先后采用了这一冷却技术, 单机容量不断提高。我国各制造厂家, 对于这一新的结构和冷却方式, 坚持不断改进和完善, 逐步消除隐患, 产品质量不断提高。仅上海电机厂生产的水内冷汽轮发电机, 大小机组就已达 250 多台, 总容量已达 20000MW, 约占全国火电机组的 50%, 为我国电力建设起了一定的作用。最近, 300MW 水内冷汽轮发电机又被确定为一个机型, 将扩大批量生产。为进一步提高制造质量, 健全检修预防性试验, 确保安全运行, 我们汇同许多单位作了不少试验验证工作, 积累了一定的资料, 并参考了许多兄弟单位的宝贵经验, 编写成这本书。

本书共分六章, 比较详细、系统地介绍了水内冷汽轮发电机的半成品试验、成品试验、参数的测量、绝缘试验、特殊项目的试验方法、分析和判断, 以及拖动电机规格、容量的选择, 并对水内冷汽轮发电机与空冷汽轮发电机不同的试验项目和试验方法作了比较详细的叙述。参照本试验方法和线路, 即可进行试验。

在编写过程中，得到了机械委第八设计院、哈尔滨大电机研究所、哈尔滨电机厂、武汉汽轮发电机厂、华东电力试验研究所和有关电厂等单位和我厂许多领导、同事的支持和帮助，并自始至终得到电机博士、汽轮发电机专家、原我厂总工程师孟庆元同志的指导和关怀。在编写、修改过程中，试验工程师何予冰同志进行了校核，给予很大的帮助，在此一并表示感谢。

由于工作繁忙，时间仓促和编者水平有限，在编写过程中，错误和遗漏之处在所难免，诚恳希望读者提出宝贵意见。

编 者

1987年6月22日

目 录

前 言	
概 述	1
第一章 半成品试验	3
第一节 定子铁耗试验	3
一、目的	3
二、试验线路	3
三、仪器仪表	4
四、试验前各数据的计算	4
五、励磁线圈和测量线圈的安放	6
六、试验步骤	6
七、注意事项	7
八、试验结果整理分析	7
九、判断标准	8
第二节 定、转子绕组分支流量的测量	9
一、定子绕组	9
二、转子绕组	10
第三节 定、转子绕组水压与流量关系的测量	10
一、定子绕组	10
二、转子绕组的流量、转速与进水压力关系的测量	10
第四节 定、转子绕组的耐水压试验	12
一、目的	12
二、试验状态	12
三、试验设备	12
四、试验方法	12
五、泵漏时间和要求	12

第五节 卤素检漏	14
一、卤素检漏法（以水内冷转子为例）	14
二、卤素检漏操作步骤	15
第六节 定子绕组散发试验	16
一、目的	16
二、试验线路	16
三、试验方法	17
四、试验标准及允许误差	17
五、注意事项	17
六、定子绕组散发试验设备容量的选择	17
七、定子绕组散发试验时水质的要求	18
第七节 转子高速动平衡及超速试验	18
一、平衡方法的分类	19
二、刚性转子的低转速动平衡	20
三、刚性转子的高转速动平衡	21
四、柔性转子的动平衡	23
五、振型平衡法	25
六、转子超速试验	32
七、水内冷电机转子超速用拖动电机容量范围	34
第八节 转子交流阻抗测量	35
一、目的	35
二、试验线路	35
三、试验方法	35
四、试验结果判断	36
第二章 成品试验	37
第一节 定、转子绕组及测温元件绝缘电阻的测量	37
一、目的	37
二、测量时电机的状态	37
三、绕组在干燥热态工况下，绝缘电阻的数值	37

四、对摇表的要求	38
五、水内冷电机绝缘测试仪	38
第二节 定子、转子绕组及检温元件冷态直流电阻的 测量	39
一、目的	39
二、测量时电机的状态和要求	39
三、测量方法	40
第三节 空载特性及空载损耗的测量	43
一、目的	44
二、试验线路	44
三、试验设备及仪表	44
四、试验方法及步骤	45
五、试验结果整理与分析	45
六、标准及允许误差	46
第四节 电压波形畸变率的测量	47
一、目的	47
二、试验线路	48
三、试验方法	48
四、试验设备及仪器	48
五、注意事项	48
第五节 轴电压的测量	49
一、目的	49
二、轴电压产生的原因	49
三、试验线路	50
四、试验设备及仪表	50
五、轴电压的测量方法	50
六、试验步骤	51
七、数据整理分析	51
第六节 轴电流的测量	51

一、目的	51
二、轴电流产生的原因	51
三、轴电流的检查	52
第七节 三相稳态短路特性和损耗的测量	52
一、目的	53
二、试验线路	54
三、试验设备及仪表	54
四、试验方法及步骤	54
五、注意事项	55
六、试验结果整理分析	55
七、标准及允许误差	55
第八节 温升试验(发热试验)	56
一、发热原因	56
二、目的	57
三、水内冷发电机及其励磁机连续运行的正常条件	57
四、温度测量方法	58
五、温升试验时冷却介质温度的测量	60
六、温升试验方法	60
七、测量内容、方法、仪器和仪表	65
第九节 过电流与过电压试验	66
一、定子绕组过电流试验	66
二、定子绕组过电压试验	67
第十节 通风试验	67
一、试验内容	68
二、测量方法	69
第十一节 效率试验	70
一、间接法(损耗分析法)	71
二、量热法	74
第十二节 飞轮转矩 GD^2 的测量	80

一、试验方法	81
二、数据分析	81
第十三节 额定励磁电流和电压变化率的测量	82
一、额定励磁电流和电压变化率的测量方法	82
二、零功率因数(过励)试验	83
三、保梯电抗 X_d 和励磁电流分量 I_{fd} 的确定	84
四、用作图法求取额定励磁电流和电压变化率	86
第三章 发电机参数试验	87
第一节 参数测量	87
第二节 各参数选用的试验方法	87
第三节 发电机对称运行时的稳态参数测量	89
一、同步电抗的测量	89
二、短路比 K_c 的求取	91
三、由空载特性曲线和电感负载特性曲线求 X_d 的饱和值	91
四、低转差法测直轴同步电抗 X_d 和交轴同步电抗 X_q	93
五、定子漏抗 X_{d1} 的测量	97
第四节 汽轮发电机不对称运行时的参数测量	102
一、负序电抗 X_2 的测量	102
二、零序电抗 X_0 的测量	107
第五节 汽轮发电机瞬态参数测量	111
一、三相突然短路法	112
二、电压恢复法	121
三、特定转子位置静测法	122
四、任意转子位置静测法	124
第四章 绝缘耐压试验	126
第一节 水内冷发电机的绝缘试验	126
一、定子绕组绝缘电阻的测量	128
二、转子绕组绝缘电阻的测量	132
三、检温元件绝缘电阻的测量	132

四、吸收比测量的意义	132
五、发电机绕组在通水与不通水时绝缘电阻及吸收 比较	134
第二节 定子绕组的直流泄漏和直流耐压试验	134
一、定子绕组的直流泄漏和直流耐压试验	137
二、实例	144
第三节 电机绕组绝缘交流介电强度试验	147
一、耐电压试验	147
二、试验变压器容量的选择	149
三、高压侧电容电流的计算	150
四、试验线路和参数的选择	152
五、试验方法和步骤	155
六、试验中几种现象的判断	156
七、交流介电强度试验时,防止可能产生的电压和电流谐振	156
八、电压测量	159
九、注意事项	159
十、定子、转子绕组出厂耐压标准	160
十一、实例	160
十二、结论	166
第四节 发电机定、转子线圈嵌线前后工频耐压试验 标准	166
一、对定、转子线圈绝缘及其有关组件绝缘试验时的要求	166
二、定子成型线圈绝缘耐压试验标准	167
三、转子线圈绝缘耐压试验标准	167
四、局部更换定子线圈时交流耐压标准	168
第五节 介质损失角的测量	169
一、介质损失角试验的意义	169
二、影响介质损耗的因素	170
三、介质损失角试验与绝缘内部缺陷的关系	170

四、介质损失角 $\tan\delta$ 的测量方法	172
第五章 特殊项目试验	176
第一节 断水试验	176
一、目的	176
二、试验线路	176
三、设备与仪表	176
四、试验步骤	177
五、结果分析	178
六、注意事项	179
第二节 机械断水法测量水泵作用损耗	180
一、测量时电机状态	180
二、试验方法	180
三、数据整理	181
四、注意事项	181
第三节 二相短路法转子表面发热试验	181
一、目的	181
二、试验线路	181
三、试验设备及仪表	181
四、试验准备	182
五、试验步骤	182
六、标准及允许误差	183
七、注意事项	183
第四节 水内冷汽轮发电机负序能力试验	183
一、目的	184
二、负序长期允许的最高温度	185
三、发电机负序能力的标准	185
四、试验方法	188
第五节 定子端部发热和漏磁场	188
一、目的	189

二、测磁线圈的结构、埋设、磁感应强度换算	189
三、漏磁通的测量	190
四、端部温度的测量	191
五、热电偶测温线路	192
第六章 拖动电机的选择和容量的确定	195
第一节 拖动电机的选择	195
一、直流电动机	195
二、绕线型异步电动机	195
三、感应式同步电动机	196
四、同步电动机	197
第二节 拖动电机容量的确定	198
一、试验项目	198
二、起动转矩	198
三、拖动电机的容量应大于被试电机的总损耗	198
第三节 拖动电机容量计算	199
附录	201
参考文献	212

概 述

随着科学技术的发展，世界上一些技术先进的国家，对汽轮发电机的冷却方式进行了大量的科学研究和不断的革新，单机容量亦随之增大。目前汽轮发电机按其冷却方式的不同，大致可分为下列几种类型：

(1) 空气冷却。汽轮发电机定、转子绕组及铁芯用空气冷却，其单机容量一般可达70MVA。

(2) 定、转子绕组，定子铁芯氢外冷。由于氢气比空气具有较高的散热能力和较小的风摩耗，故汽轮发电机定子、转子、铁芯采用氢气表面冷却，称为氢外冷。较空冷在同样尺寸的情况下，容量可以更大，这种冷却方式，其极限容量可达200MVA。

(3) 氢内冷。汽轮发电机定、转子绕组内直接由氢气冷却，称为氢内冷。目前世界上已制成两极60Hz，最大容量为960MVA。

(4) 水内冷。由于水具有较空气、氢气更高的散热能力，故世界各国大型汽轮发电机广泛采用定子绕组水内冷、转子绕组采用氢内冷或定、转子绕组均采用水内冷的汽轮发电机。在这以前，定子绕组也有采用油内冷的，铁芯也可以采用水冷、油冷或氢冷却的。目前世界上已制成油氢氢冷却方式的最大容量为450MVA。水氢氢冷却方式最大容量为1333MVA。1980年瑞士BBC公司先后制成水水油冷却方式两极单机容量1200MW和四极单机容量1635MVA的汽轮发电机。西德KWU公司已制成水氢氢冷却方式四极单机

1500MVA, 1979年苏联电力工厂已制成水水水冷却方式四极, 单机800MW的发电机。

此外, 还有在汽轮发电机定、转子间隙中安装绝缘套筒, 转子区域抽成真空 ($0.294 \times 10^5 \text{Pa}$), 以减少表面风摩擦耗, 定子区域充以氮气以减少电晕。

汽轮发电机还可以利用汽化潜热的蒸发冷却方式或引用水管蒸发冷却来提高单机容量。

从目前来看, 对于50Hz, 两极发电机其极限容量约为1600MVA; 对于60Hz发电机其极限容量约为1250MVA。对于大容量的原子能电站一般为四极汽轮发电机。

由于汽轮发电机冷却方式的不同, 其试验方法、项目和所需要的试验设备及其附属设施也有所不同。以前汽轮发电机试验均参照JB-636-65汽轮发电机基本技术要求和GB-1029-80三相同步电机试验方法进行。还没有一个较系统的水内冷汽轮发电机试验方法。为此, 本书着重介绍水内冷汽轮发电机的试验方法。

水内冷汽轮发电机问世后, 根据其结构与空冷结构不完全相同的特点, 试验项目、方法和要求与空冷电机除相同的以外, 还有它特殊的试验项目、方法和要求。本书总结了我厂采用的试验方法, 并参照了有关电机厂、电厂及中试所等编制的试验大纲和试验方法编写而成。

第一章 半成品试验

第一节 定子铁耗试验

一、目的

发电机定子铁芯损耗试验，是检查定子铁芯单位损耗、定子铁芯绝缘情况比较有效的方法。在制造厂，对于高压大容量的发电机、新产品、改型结构的电机，定子在线前后都需要做定子铁耗试验。对于已定型的中、小型电机，如硅钢片材料不变，不需要每台都做试验，可进行抽查。定子铁耗试验也是检查铁芯各部位是否有局部松动、过热或单位铁耗超过允许值。若发现问题，采取措施及时解决，避免在线后成为隐患，机组投入运行时造成不必要的损失。

各电厂对定子铁芯损耗试验十分重视，在交接过程、发电机定子绕组发生故障，定子铁芯受损，运行中铁芯局部过热以及在大修检查中怀疑铁芯短路，都应进行此项试验，以防电机在运行时铁芯因局部涡流过大，引起铁芯局部过热，造成烧伤定子绕组绝缘或铁芯的事故。

定子铁芯试验时，一般采用50Hz电源，制造厂采用1.3T的磁通密度进行铁芯试验，而按国内运行单位的经验，采用1.4T的磁通密度进行铁芯试验，可有效地发现在1T下所不能发现的缺陷。水利电力部在1985年颁布的《电气设备预防性试验规程》中已作了明确规定，允许采用1.4T磁通密度进行历时45min的铁芯试验，测量其损耗值和观测铁芯各部位的发热情况。

二、试验线路

定子铁芯试验线路接线图如图1-1所示。

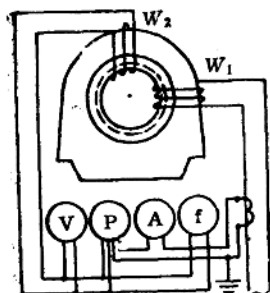


图 1-1 定子铁芯

试验接线图

W_1 —励磁线圈；

W_2 —测量线圈。

三、仪器仪表

1) 交流电压表：

2 只；

2) 交流电流表：

1 只；

3) 低功率因数瓦特表：

1 只；

4) 电流互感器：

1 只；

5) 酒精温度计：

0~100℃若干只；

6) 单臂电桥、热象仪：

各 1 只。

四、试验前各数据的计算

(1) 定子铁芯有效截面积

$$A_{j1} = L_{ef} \cdot h_{j1}$$

其中

$$L_{ef} = K_{Fe} (L_t - n_{r1} b_{r1})$$

上二式中

L_{ef} ——定子铁芯轴向净长，cm；

L_t ——定子铁芯长度，cm；

n_{r1} ——通风沟数；

b_{r1} ——通风沟宽度，cm；

K_{Fe} ——压装系数（又名填充系数），当硅钢片厚0.5mm时， K_{Fe} 取0.95~0.96；硅钢片厚0.35时， K_{Fe} 取0.94， $K_{Fe} = m_{Fe} / m'_{Fe}$ （实际重量）/（计算重量）。

$$h_{j1} = \frac{D_s - D_t}{2} - h_{n1}$$

式中 h_{j1} ——定子铁芯轭部高度, cm;
 D_s ——定子铁芯外径, cm;
 D_i ——定子铁芯内径, cm;
 h_{s1} ——定子铁芯齿高度, cm。

(2) 励磁线圈匝数

$$W_1 = \frac{U_1}{4.44 f A_{j1} B_{j1}} \times 10^4 = \frac{45 U_1}{A_{j1} B_{j1}} \text{ (匝)}$$

式中 U_1 ——励磁线圈外加电压, V;
 B_{j1} ——磁通密度, T;
 W_1 ——匝数, 应取近似整数。

(3) 励磁电流

$$I = \frac{\pi D_{sr} IW}{W_1}$$

其中 $D_{sr} = D_s - h_{j1}$

式中 D_{sr} ——铁芯磁路平均直径, cm;

IW ——铁芯单位磁路长度需要的安匝数, 安匝/cm。

IW 根据铁芯材料选择:

对于 $P_{1/50} = 1.8 \text{ W/kg}$ 的合金钢铁芯, IW 约为 2.0~2.7 安匝/cm;

对于 $P_{1/50} = 3.3 \text{ W/kg}$ 的电机钢铁芯, IW 约为 5.0~6.5 安匝/cm;

对于 $P_{1/50} = 1.2 \text{ W/kg}$ 的电机钢铁芯, IW 约为 0.96 安匝/cm;

对于 $P_{1/50} = 0.64 \sim 0.95 \text{ W/kg}$ 的电机钢铁芯, IW 约为 0.43~0.67 安匝/cm。

其中 $P_{1/50}$ ——在 1T50Hz 时铁芯损耗。

(4) 测量线圈

匝数的选择应使得测量线圈中感应的电势在功率表电压线圈所允许的电压范围内。先用下式计算磁密为 B_{j1} 时测量线圈每匝的感应电势

$$e_z = 222 \times 10^{-4} A_{j1} B_{j1} \text{ (V)}$$

测量线圈其匝数为

$$W_z = W_1 \frac{U_z}{U_1}$$

式中 U_z ——测量线圈的电压，V；

U_1 ——励磁电压，V；

W_1 ——励磁圈数。

五、励磁线圈和测量线圈的安放

将发电机定子外壳（定子膛内无转子情况下）可靠接地，根据上述计算，将励磁线圈围绕在定子膛和外壳间的某一侧，为避免穿电缆时碰伤铁芯表面，定子膛内预先垫放一块绝缘纸板。测量线圈安置在与励磁线圈垂直处的定子铁芯上，以避免漏磁对试验结果产生影响（由于汽轮发电机定子直径较小，经多次试验证明，励磁线圈与测量线圈位置不互相垂直时，对测量数据影响并不大）。然后按图1-1线路接好所有仪表，并在铁芯齿部、轭部、背部各放一只酒精温度计，把事先埋置在铁芯里面的电阻元件引线头引出1个，测取铁芯的初始温度和环境温度。

六、试验步骤

（1）用额定频率可变低压电源供给励磁线圈，并调节至测量线圈的每匝电势为 e_z ，同时观察各仪表指示值与估算值无太大出入。

（2）15min后用手触摸铁芯有否局部过热，并采用半导体点温计、热象仪及事先预埋的电阻元件来检测定子铁芯