

文章编号: 1672-3031(2020)04-0257-06

## 基于量热法的水电机组发电机效率试验研究

周叶<sup>1</sup>, 李科<sup>2</sup>, 潘罗平<sup>1</sup>, 曹登峰<sup>1</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 中国水利水电第五工程局有限公司, 四川 成都 410004)

**摘要:** 在水电工程现场, 发电机效率试验受到现场安装条件的限制和测试时间的要求, 很难有效和及时的开展, 针对这种现状, 本文简要介绍了基于量热法的发电机效率测试原理, 再结合发电机效率试验中关键技术难点, 如冷却管路的改造如何满足流量测量的要求、分项损耗的计算与总体损耗的校核与验证, 以及试验过程和时间的组织计划等问题, 提出了优化和解决方案, 最后通过在西非科特迪瓦苏布雷电站的测试实施, 证明优化设计方法具有良好的操作性和有效性, 可为其他海外水电工程的发电机效率测试提供实施参考和技术依据。

**关键词:** 水电机组; 发电机效率; 量热法; 总体损耗法; 分项损耗法

**中图分类号:** TV148

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13244/j.cnki.jiwhr.20190029

### 1 研究背景

近年来我国水电企业参与了大量海外水电工程的设计和建设, 部分工程已经到了移交验收和试运行阶段, 而在验收前的最后一个环节——开展机组性能试验, 以验证发电机组是否满足发电效率要求, 是否需要巨额罚款和赔付, 经常成为建设方的难题。该试验不仅需要中立的性能测试机构和专业的测试技能, 还需要严格的现场测试和安装条件, 另外量热法对不同负荷工况下热稳定测试时间的要求过长, 也给试验增加了难度。

本文针对这些难点, 首先简要介绍了基于量热法的发电机效率测试原理, 结合发电机效率试验中遇到的关键技术问题, 如冷却管路的改造是否满足流量测量要求、分项损耗的计算与总体热损耗的校核与验证, 以及试验过程和时间的计划组织等难点, 提出了优化和解决方案。最后, 通过我国承建的西非科特迪瓦苏布雷电站的一次测试实施实例, 证明优化设计方法具有良好的操作性和有效性, 可为其他海外水电工程的发电机效率测试提供实施参考和技术依据。

### 2 量热法测量原理

在发电机内部产生的各种损耗, 最终都将变成热量, 传递给冷却介质, 使冷却介质温度上升, 因此可用测量电机所产生的热量来推算电机的损耗, 从而计算电机的效率, 这种方法称为量热法<sup>[1]</sup>。为了对总损耗进行分类, 我们给电机规定了一个基准表面, 这是一个将电机全部包在里面的基准表面, 这个表面内产生的所有损耗, 都通过该表面散发出去。图1给出了标准的立式和卧式发电机的基准表面示意图。通过基准表面的划分, 把热量产生的损耗分为基准面内部的损耗 $P_i$ 和外部损耗 $P_e$ 。

内部损耗 $P_i$ 主要包括两部分, 一部分是通过冷却回路带出参考表面的能量损耗, 这部分在损耗中占主要比例, 通常有空冷器冷却水带走的热量、上导轴承冷却器带走的热量、推导轴承冷却器带走的热量等; 另一部分是未传递给冷却介质, 而是通过基准表面以对流、辐射等方式散发的能量损耗, 如发电机上盖板、四周外围墙、下盖板与空气的散热等。

收稿日期: 2019-03-04; 网络首发时间: 2020-07-30

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5020.TV.20200729.1030.001.html>

基金项目: 中国水科院科研专项(HM0145B182017)

作者简介: 周叶(1980-), 博士, 高级工程师, 主要从事水电工程现场测试及监测诊断研究。E-mail: zhouye@iwhr.com

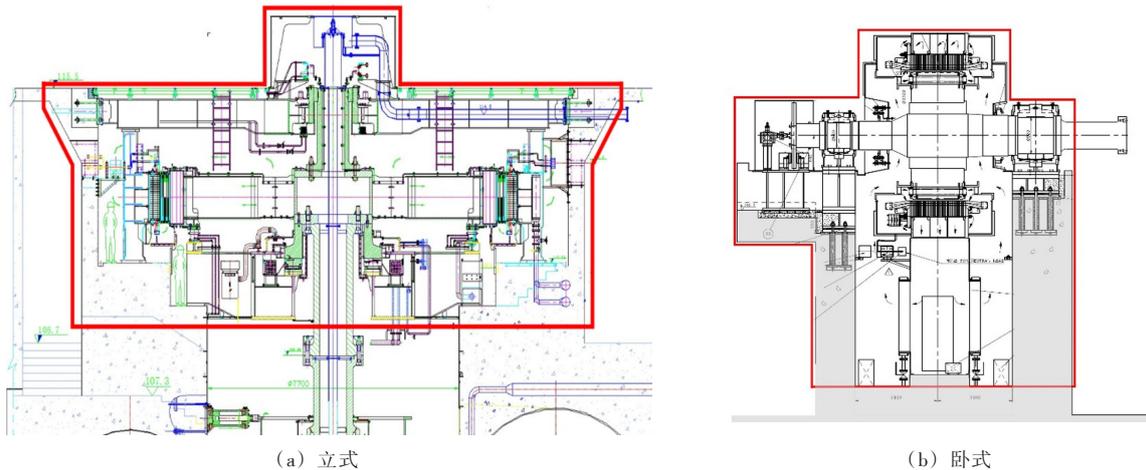


图1 立式和卧式机组发电机基准表面示意(粗框线为基准表面)

对冷却介质带走的损耗，可由下式计算：

$$P_1 = C_p Q \rho \Delta t \quad (1)$$

式中： $P_1$ 为被冷却介质带走的损耗； $C_p$ 为冷却介质比热； $\rho$ 为冷却介质密度； $\Delta t$ 为冷却介质温升； $Q$ 为冷却介质流量。由于水的物理特性相对比较稳定，冷却介质大多选择循环冷却水。以空冷器为例，要计算其冷却水带走的损耗，只需要测量其冷却管路的水流量和进出口管路温差即可。

而基准表面与空气的热交换损耗，可采用下式计算得到：

$$P_2 = hA\Delta t \times 10^{-3} \quad (2)$$

式中： $P_2$ 为外表面散出的损耗； $h$ 为表面散热系数； $A$ 为该基准面的散热面积； $\Delta t$ 为外表面温度与外部环境温度之差。以发电机上盖板为例，其辐射和对流产生的热量，只需要测量盖板表面温度和环境温度以及盖板面积尺寸即可。

外部损耗 $P_o$ 指在参考表面之外，但参与了机组运行发电的设备产生的损耗，主要为励磁变损耗，通常采用设计值或由厂家提供的资料计算得出。

得到发电机所有散热损耗后，发电机效率 $\eta_{gen}$ 可由下式得出：

$$\eta_{gen} = \left( 1 - \frac{\sum P}{P_o + \sum P} \right) \times 100\% \quad (3)$$

式中： $\sum P$ 为发电机的总损耗； $P_o$ 为发电机的输出功率。

### 3 试验关键技术

**3.1 损耗测量与设备安装** 根据冷却介质的不同，流量测量需要选择不同类型的流量计。要得到冷却水流量，可在空冷器及导轴承冷却器的冷却水进口管路上安装电磁流量计。根据规程要求，以水为冷却介质时，流量测量相对误差需小于1%，因此，试验通常选用精度等级0.5%的电磁流量计。

流量计的安装有两个必要条件，一个是对前后管径直管段的要求，按照IEC附录说明<sup>[1-3]</sup>，需要前10倍管径、后5倍管径的直管段，以保证水流的稳定性；另一个条件是水流必须从低往高流动，保证流量计内水流满管，从而得到正确的流量。而水电站现场通常很难具备这两个必要条件，因此很难得到准确的流量测量结果，甚至可能出现因水流未满管错误计算流量，导致发电机效率大幅下降的错误结果。

这里以西非科特迪瓦苏布雷电站为例，现场管道连接状态如图2所示，可看到原可拆除管段占用的长度很短，且水流为从上往下流动方向，在此管路上直接安装流量计，无法满足流量测量的基本要求。因此，经过设计优化，这里提出了一种通用性强的管路改造方案，即通过变径的方式解决流量计前后直管段要求，同时引入垂直方向的回折管段，使流量计安装于水流上升方向，以保证流量



图2 原冷却水管路安装条件

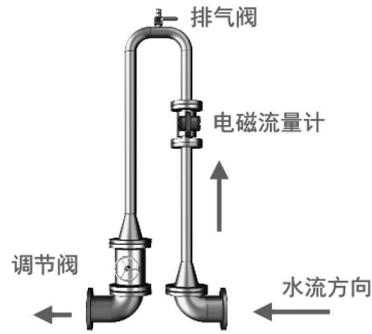


图3 管路改造示意图

计满足水流满管要求。改造方案设计如图3所示。

通过对空冷器和推导轴承冷却水管路进行改造，使其严格满足规程对测流的要求，且无需改动或切割原有管路结构，现场实施照片见图4所示。

冷却介质进出口温差，在冷却管路的进出口管道上打孔安装高精度测温电阻(RTD)得出，现场通常采用1/3 B级精度(0.1K)的传感器进行测量，安装图片见图5。



图4 改造后管路照片



图5 测温电阻安装图

参考表面的辐射和对流散热损耗，可根据机型几何特征，在不同表面均布沿表面温度和环境温度传感器，并通过式(2)计算得出。以图1中立式机组的参考表面为例，可得到总共需要布置的表面传感器和环境温度传感器数量，如表1所示。表面温度和环境温度传感器的布置示意图如图6所示。

**3.2 分项损耗测定** 《IEC60034-2-2》中提出，采用量热法确定发电效率可采用两种方式开展<sup>[1]</sup>，一种为带负荷的总体损耗法，一种是分项损耗法。总体损耗法即直接在不同负荷工况下，通过温差、流量等参数确定基准面内部的损耗和外部损耗，其效率测量的原理基于机组运行损耗被带走的方式。

而分项损耗法则基于机组运行时损耗产生的来源<sup>[4-6]</sup>，将机组的损耗分为风磨损耗 $P_w$ 、轴承损耗 $P_{gb}$ 、碳刷损耗 $P_b$ 、转子铜损 $P_r$ 、定子铜损 $P_s$ 、定子铁损 $P_{Fe}$ 、杂散损耗 $P_{LL}$ 和励磁变损耗 $P_{ex}$ 。

风磨损耗为不变损耗，可在机组空转时测得。轴承损耗采用总体损耗法测量导轴承的冷却介质散热和表面散热得到，由于其近似为常量，在测量不便时也可采用设计值代替；碳刷损耗分为碳刷电损耗和碳刷机械损耗，可由转速、碳刷压降和励磁电流等参数计算得出。

表1 表面温度和环境温度传感器的布置数目(共30个)

| 部位       | 数量 |           |
|----------|----|-----------|
|          | 表面 | 环境        |
| 碳刷滑环室上盖板 | 1  | 1         |
| 碳刷滑环室侧板  | 4  | 与发电机上盖板共用 |
| 发电机上盖板   | 4  | 4         |
| 发电机外围墙   | 4  | 4         |
| 发电机下盖板   | 4  | 4         |
| 总数量      | 17 | 13        |

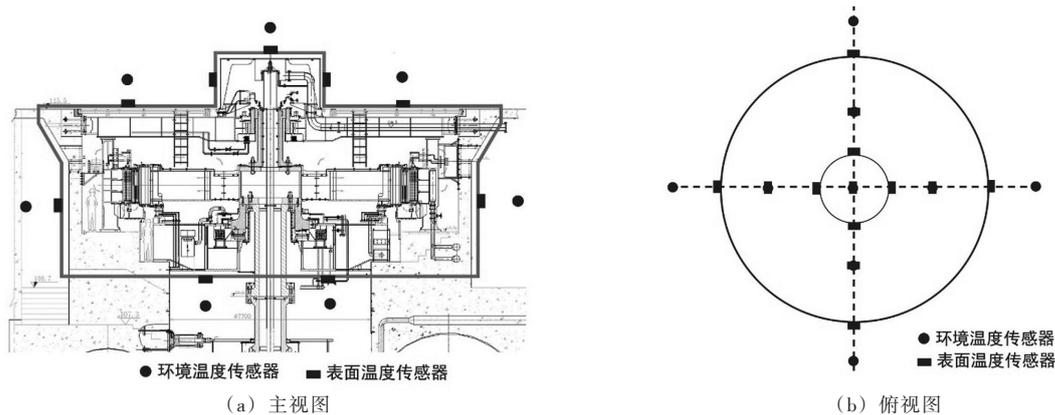


图6 表面环境测温传感器布置(主视图和俯视图)

定子铁损主要由磁滞损耗和涡流损耗产生，其与机端电压的平方成正比，可在机组空载工况下测得定子铁损后，其他工况按机端电压比例得出。

定子铜损 $P_s$ 与发电机机端电流有关，可在发电机三相稳态短路工况下，用下式计算：

$$P_s = 3 \times I_a^2 \times R_a \quad (4)$$

式中： $I_a$ 为短路工况下的定子电流测量值； $R_a$ 为短路工况下的单相定子绕组换算到基准温度下的电阻值。

转子铜损 $P_r$ 通过测量发电机运行时的转子绕组电流得到：

$$P_r = I_f^2 \times R_f \quad (5)$$

式中： $I_f$ 为运行工况下的励磁电流； $R_f$ 为转换到基准温度下的转子绕组电阻。

杂散损耗<sup>[7-8]</sup>与机组机端电流的平方近似成正比，可通过短路工况测得其他分项损耗得到对应机端电流的杂散损耗，进而得到所有工况下的杂散损耗值。

**3.3 试验过程校核** 按照量热法开展发电机效率测试，其本质是机组运行的热稳定测试，即机组在不同运行工况下，机组各部件达到热稳定状态后，测量其总体损耗或分项损耗算出其效率<sup>[9]</sup>。按照量热法的发电机效率计算和测量方法不同，试验也可采用如下两种过程。

(1)如果机组考核指标不需要提供分项损耗，则可以根据量热法的第一种计算方法—总体损耗法<sup>[10]</sup>，直接在需要考核的机组负载工况下，测量冷却介质和表面辐射对流带走的热量计算总体损耗，再结合有功输出，得到该工况下的发电效率，即任何工况下机组总损耗为：

$$\sum P = P_1 + P_2 + P_{ex} \quad (6)$$

(2)如果试验需要提供分项损耗，则必须通过空转、空载和短路三个额外工况，来分别得到机组的风磨损耗、定子铁损和杂散损耗。其他任何工况下分项损耗，可通过该工况下机组的功率输出、机端电压、机端电流、励磁电压和励磁电流换算得出。此时机组损耗采用下式计算：

$$\sum P = P_w + P_b + P_{gb} + P_r + P_s + P_{Fe} + P_{LL} + P_{ex} \quad (7)$$

每个工况的热稳定时间较长，通常需要4~8 h甚至更久<sup>[11]</sup>，如在不同功率因数下测量多个负荷工况的发电机效率，以运转4 h机组达到热稳定为例，一台机组的试验过程将长达44 h(0.85和1.0两种功率因数下各4个负荷工况，包括空转、空载、短路共11个工况)。因此，本文提出一种结合了总体损耗法和分项损耗法优点的机组效率试验过程，其能满足任何工况下都能得到其分项损耗，且能大大减少总体损耗法所需的漫长热稳定时长。

该方法的核心为验证总体损耗法与分项损耗法的计算结果一致性，再通过分项损耗法的推算，直接得到所有工况的效率结果，其基本步骤如下：

(1)开展空转、空载和短路试验，得到分项损耗的基础数据，分别为风磨损耗、定子铁损和杂散损耗。

(2)开展额定负荷工况下机组热稳定试验，采用总体损耗法和分项损耗法分别计算，将得到的效率结果进行比较和校核，如果数据结果相同，则验证了量热法两种计算方法的一致性和可靠性。

(3)如只需对额定负载下的效率值进行考核,则无需试验,直接采用分项损耗法推导发电机效率,因为在第(2)步中已经验证了分项损耗法与总体损耗法的一致性,因此,可用分项损耗的推导方式得到发电机效率。

(4)如需要不同负载下的发电机效率,那么让机组做一个升负荷过程,记录不同负荷下机组机端电流、机端电压、励磁电流、励磁电压和功率输出的数据曲线,最后采用分项损耗推导法得到不同负载下的发电机效率。

#### 4 现场测试与计算案例

这里以作者在科特迪瓦苏布雷水电站开展的一次法方监理、非洲业主参与并认可的发电机效率试验为例,通过总体损耗法,共开展4个工况的效率测试,计算得到发电机的效率结果见表2。根据记录的机组电压和电流等电气参数,采用分项损耗法得到发电机的效率结果见表3。

表2 总体损耗法计算结果

| 计算项    | 单位 | 空转工况   | 空载工况   | 短路工况    | 额定负荷    |
|--------|----|--------|--------|---------|---------|
| 冷却介质损耗 | kW | 378.64 | 740.43 | 1019.85 | 1541.05 |
| 表面散热损耗 | kW | 4.63   | 11.83  | 16.91   | 22.69   |
| 总损耗    | kW | 383.28 | 752.26 | 1036.76 | 1563.74 |
| 发电机输出  | MW |        |        |         | 89.29   |
| 发电机效率  | %  |        |        |         | 98.279  |

表3 分项损耗法计算结果

| 计算项    | 单位 | 空转工况   | 空载工况   | 短路工况    | 额定负荷    |
|--------|----|--------|--------|---------|---------|
| 风损     | kW | 332.73 | 332.73 | 332.73  | 332.73  |
| 轴承损耗   | kW | 50.55  | 59.75  | 66.98   | 67.55   |
| 转子铜损   | kW |        | 77.71  | 80.90   | 323.86  |
| 定子铁损   | kW |        | 265.67 |         | 293.34  |
| 定子铜损   | kW |        |        | 446.95  | 419.62  |
| 杂散损耗   | kW |        |        | 92.59   | 83.73   |
| 碳刷损耗   | kW |        | 3.25   | 3.27    | 5.27    |
| 励磁系统损耗 | kW |        | 13.16  | 13.34   | 27.64   |
| 总损耗    | kW | 383.28 | 752.26 | 1036.76 | 1553.74 |
| 发电机输出  | MW |        |        |         | 89.29   |
| 发电机效率  | %  |        |        |         | 98.290  |

4个试验工况下两种计算方法得到的发电机效率结果分别为98.279%和98.290%,相差0.011%,可认为两种计算方法具有良好的一致性。

因此,结合表3的分项损耗计算结果,根据设计额定负荷下机组的电气参数,推算设计额定负荷下的机组分项和总体损耗,得到发电机效率为98.211%,满足合同保证值98%的要求。

对其他负荷工况,发电机损耗的组成中,风磨损耗、轴承损耗为定值,定子铜损和转子铜损均可通过绕组电流与绕组电阻计算得出,定子铁损与定子电压的平方成正比,杂散损耗与定子电流的平方成正比,均可采用升负荷过程的电气参数换算得到,经计算验证,与总体损耗法的计算误差均在0.05%以内,满足试验测量的精度要求。

#### 5 结语

为了解决在国际水电工程中开展发电机效率试验遇到的困难,本文结合IEC国际规程,描述了

水电机组发电机效率试验的基本原理和试验要求,给出了优化的管路改造方案,避免了冷却循环管路的切割或焊接工作;为了优化试验过程,在单个负荷工况下采用总体损耗法和分项损耗法分别计算,验证两种方法效率计算结果的一致性,进而直接采用分项损耗法得到各个工况的发电机效率,大大缩短了试验时间,为机组的验收通过和尽早移交提供支持。

#### 参 考 文 献:

- [ 1 ] IEC 60034-2-2 . Rotating electrical machines-Part 2-2: Specific methods for determining losses and efficiency of rotating electrical machinery from tests- Supplement to IEC60034-2-1[S] . 2010 .
- [ 2 ] IEC 60034-2-1 . Rotating electrical machines-Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency of rotating electrical machinery from tests (Excluding machines for traction vehicles)[S] . 2007 .
- [ 3 ] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会 . 量热法测定电机的损耗和效率: GB/T 5321-2005[S] . 北京: 中国标准出版社, 2005 .
- [ 4 ] 闫迎,郝剑波 . 基于量热法的大型水轮发电机损耗测量和效率计算[J] . 湖南电力, 2014, 34(3): 8-11 .
- [ 5 ] MCLEOD P, BRADLEY K J, FERRAH, et al . High precision calorimetry for the measurement of efficiency of induction motors[C]//The 1998 IEEE Industry Applications Conference . Thirty-Third IAS Annual Meeting . USA, 1998 .
- [ 6 ] SZABADOS B, MIHALCEA A . Design and implementation of a calorimetric measurement facility for determining losses in electrical machines[J] . IEEE Trans . Instrum . Meas . , 2002, 51(5): 902-907 .
- [ 7 ] BRADLEY K J, CAO W, ARELLANO-PADILLA J . Evaluation of stray load loss in induction motors with a comparison of input-output and calorimetric methods[J] . IEEE Trans . Energy Convers . , 2006, 21(3): 682-689 .
- [ 8 ] 梁朝晖 . 贵港水电站灯泡贯流式水轮发电机效率试验论证[J] . 广西电力工程, 2001(2): 38-42 .
- [ 9 ] RITCHIE E, PEDERSEN J K, BLAABJERG F, et al . Calorimetric measuring systems[J] . IEEE Ind . Appl . Mag . , 2004, 10(3):70-78 .
- [ 10 ] 刘孝甫 . 广蓄二期300MW电动发电机效率试验[J] . 水力发电, 2001(11): 57-60 .
- [ 11 ] TURNER D R, BINNS K J, Shamsadeen B N, et al . Accurate measurement of induction motor losses using balance calorimeter[J] . IEEE Proc . B, 1991, 138(5): 233-242 .

### Research of generator efficiency test in hydropower project based on calorimetric method

ZHOU Ye<sup>1</sup>, LI Ke<sup>2</sup>, PAN Luoping<sup>1</sup>, CAO Dengfeng<sup>1</sup>

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. Sinohydro Bureau 5 Co., Ltd., Chengdu 410004, China)

**Abstract:** In recent years, a large number of overseas hydropower projects have been designed and constructed by domestic hydro enterprises, some of which have been in commissioning and acceptance period, and the test and verification of generator efficiency has become a key part during the period. However, the generator test has been limited by field installation condition and test time arrangement, and it is difficult to carry out. The paper introduces the generator efficiency test principle based on calorimetric method, then discusses and gives optimized solutions for some key technologies and difficulties, including modification of cooling pipes, segregated losses calculation, and test procedure arrangement. With a test example carried out in Soubre hydropower plant of Coast Ivory, it proves that the solution and test scheme can meet the requirement of IEC regulation strictly, and have good consistency and validity, which can provide technical support for other similar tests or needs of hydropower projects.

**Keywords:** hydropower unit; generator efficiency; calorimetric method; total loss; segregated losses

(责任编辑: 王学风)