

本文引用格式：刘轩,杨海霞,贾亚琳,等.抽水蓄能发电机组转子自动化动平衡试验方法[J].自动化与信息工程,2024,45(5):62-66.

LIU Xuan, YANG Haixia, JIA Yalin, et al. Automated dynamic balancing test method for rotor of pumped storage power generation units[J]. Automation & Information Engineering, 2024,45(5):62-66.

抽水蓄能发电机组转子自动化动平衡试验方法*

刘轩 杨海霞 贾亚琳 陈源斐 吴昊

(南方电网调峰调频发电有限公司检修试验分公司, 广东 广州 511400)

摘要: 针对抽水蓄能发电机组转子动平衡试验依赖人工经验反复进行试验, 过程繁冗且周期较长的问题, 提出一种抽水蓄能发电机组转子自动化动平衡试验方法。该方法主要包括转子动平衡数据处理算法、转子动平衡试验算法、转子动平衡影响系数计算算法, 辅助技术人员实施配重。转子动平衡试验测试结果表明, 该方法仅需两次配置, 便实现了抽水蓄能发电机组转子动平衡参数的调整, 相较于传统的人工调整方式, 不仅减少了试验次数, 还提高了试验效率。

关键词: 抽水蓄能发电机组; 转子; 动平衡试验; 配重

中图分类号: TH185

文献标志码: A

文章编号: 1674-2605(2024)05-0009-05

DOI: 10.3969/j.issn.1674-2605.2024.05.009

开放获取

Automated Dynamic Balancing Test Method for Rotor of Pumped Storage Power Generation Units

LIU Xuan YANG Haixia JIA Yalin CHEN Yuanfei WU Hao

(Maintenance and Test Branch, China Southern Power Grid Power Generation Co., Ltd., Guangzhou 511400, China)

Abstract: An automated dynamic balancing test method for rotor of pumped storage power generation units is proposed to address the problem of relying on manual experience for repeated testing, which is cumbersome and time-consuming. This method mainly includes rotor dynamic balance data processing algorithm, rotor dynamic balance test algorithm, rotor dynamic balance influence coefficient calculation algorithm, and assists technical personnel in implementing balancing. The results of the rotor dynamic balance test show that this method only requires two configurations to adjust the rotor dynamic balance parameters of pumped storage power generation units. Compared with traditional manual adjustment methods, it not only reduces the number of tests, but also improves the test efficiency.

Keywords: pumped storage power generation units; rotor; dynamic balance test; weight distribution

0 引言

转子作为抽水蓄能发电机组的关键部件, 其平衡状态直接影响机组的运行稳定性。然而, 在转子制造和安装的过程中, 难以做到其质量的绝对平衡^[1]。转子质量不平衡会导致机组振动, 甚至引发设备故障, 降低生产效率, 增加维修成本。抽水蓄能发电机组转子动平衡试验可以测量并校正转子在高速旋转时的

不平衡量, 从而减小机组的振动和轴摆度, 使机组运行更加平稳, 不仅提高了机组的运行效率, 还延长了机组的使用寿命。目前, 转子动平衡试验大都依赖于人工经验, 通过增加或减少转子的质量来修正不平衡, 过程繁冗且周期较长^[2-4]。

抽水蓄能发电机组转子动平衡试验方法主要有影响系数法或振型法等。这些方法通过测量转子在不

同加重条件下的振动响应, 计算影响系数或振型参数, 进而确定转子不平衡量的位置和程度。文献[5]针对岩滩水电站机组的转子动平衡试验, 采用渐进式动平衡分析的方法, 改善了轴摆度和振动的超限问题。文献[6]为改善水轮发电机组的机械损伤, 提出了基于四圆图法的水轮发电机组现场动平衡试验工艺方案, 纠正了转子偏角安装的工艺问题。文献[7]针对 600 MW 汽轮机转子动平衡试验, 建立了多轮盘静力识别模型和转子试验台, 分析了基于应变的多轮盘转子系统动平衡试验方法。文献[8]针对 300 MW 混流式水轮机研究了基于时域-频谱分析的动平衡方法, 解决了机架水平振动过大的问题。

本文针对抽水蓄能发电机组转子动平衡试验准确性和效率较低的问题, 提出一种抽水蓄能发电机组转子自动化动平衡试验方法, 减少了试验过程中人工参与的数据采集、整理、计算和分析等工作, 提升了机组转子的动平衡性能和试验效率。

1 人工操作的转子动平衡试验

人工操作的抽水蓄能发电机组转子动平衡试验通过测量机组在不同工况下的振动数据, 诊断分析机组振动过大的原因, 从而采取相应的动平衡处理措施。该试验通常包括试配重前机组运行、配重策略分析、配重、执行配重、配重后运行、计算影响系数、生成试验报告等步骤。人工操作的转子动平衡试验流程图 1 所示。

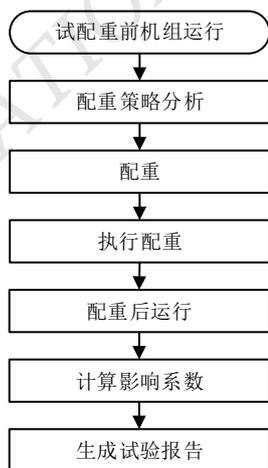


图 1 人工操作的转子动平衡试验流程

人工操作的转子动平衡试验具体流程如下:

1) 试配重前机组运行, 对机组的各部件、接线端子、保护设备、电气元件等进行检查, 确保机组设备无腐蚀、松动、缺陷等问题; 技术人员选取机组试配重前的最后一次运行参数作为试配重数据;

2) 配重策略分析, 人工测量转子的振动和相位等数据, 并对试配重数据进行预处理和分析; 根据转子不平衡的位置和程度, 确定配重的具体位置, 根据转子的质量、转速和振动情况, 计算转子所需的配重块重量, 根据配重位置和重量, 制定详细的试配重策略;

3) 配重, 根据试配重策略, 分析磁极配重块配置策略, 并计算残余振动值;

4) 执行配重, 根据磁极配重块配置策略, 人工新增或减少配重块;

5) 配重后运行, 人工启动机组, 并观察配重后机组的运行效果, 实时监测转子的振动和相位变化; 根据监测结果, 评估配重效果, 确保转子达到预期的平衡状态;

6) 计算影响系数, 计算配重前、后机组振摆的相位特征值和幅值特征值, 得到机组的影响系数, 作为下一次转子动平衡试验的参数;

7) 生成试验报告, 记录试验的环境、步骤和过程, 以及转子的配重幅值、相位、配重块质量、平衡效果等。

人工操作的转子动平衡试验易受人为的主观性、测量与修正过程的波动、设备与环境等因素影响, 导致动平衡修正的准确性和效率较低。为了提高动平衡修正的准确性和效率, 亟需采用自动化方法代替人工操作。为此, 本文提出了转子自动化动平衡试验方法。

2 转子自动化动平衡试验方法

转子自动化动平衡试验方法可以自动计算转子的不平衡状态, 优化转子的平衡状态, 使机组在最佳的平衡状态下运行。该方法主要利用转子动平衡数据处理算法、转子动平衡试验算法、转子动平衡影响系

数计算算法分别替换人工操作的转子动平衡试验过程中的试配重前机组运行、配重策略分析、计算影响系数等步骤，从而实现转子动平衡参数的自动化计算。

2.1 转子动平衡数据处理算法

转子动平衡数据处理算法通过在线计算、数据导入、离线数据分析、检修策略输入和数据存储等步骤，完成试配重前机组运行，其流程如图2所示。

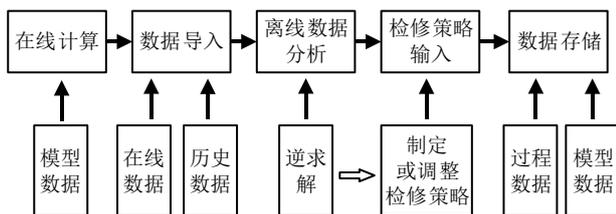


图2 转子动平衡数据处理算法流程

1) 在线计算：导入抽水蓄能发电机组转子的型号、制造厂家、使用年限、尺寸、材质、质量分布等模型数据，并进行在线设备技术参数计算，作为试配重数据。

2) 数据导入：机组在不同转速和负载条件下的振动、轴摆度、配重质量和配重相位等数据主要包括在线数据和历史数据。其中，在线数据分为设备技术参数和动平衡试验数据两类，根据程序预设的配置检索数据模型，并将设备技术参数导入操作台；根据程序预设的数据模型与试验任务时间检索数据模型，并将动平衡试验数据导入操作台；历史数据主要包括历史试验数据和历史试验操作数据，根据程序预设的配置动平衡参数（配重幅值、配重相位和配重块质量等），将历史数据导入操作台。

3) 离线数据分析：主要用于确定转子的偏心质量。在转子上确定若干个平衡平面，根据转子的结构和不平衡量的分布情况，选择合适的平衡面进行动平衡修正。在这些平衡面上通过偏心质量来抑制转子的振动幅度，并设计循环迭代程序，通过逆求解得到转子全轴长的偏心质量。

4) 检修策略输入：通过分析历史数据、离线数据，制定定期检查、维修、更换设备程序等检修策略。

5) 数据存储：将试验数据存储至数据库，主要

包含过程数据存储和模型数据存储。

2.2 转子动平衡试验算法

转子动平衡试验算法旨在确定动平衡配置推荐位置。在机组上选择振动测量点，如机架、导轴承等位置，以全面反映机组的振动情况。首先，利用时间排序法过滤出机组最近一次平稳运行的特征时间，并在机组平稳运行的特征时间内，计算振动（上、下机架 X、Y 方向的水平振动）和摆度（上、下导轴承 X、Y 方向的摆度）数据；然后，计算 X、Y 方向的振动特征值 V_i 、摆度特征值 S_i 、振动特征值偏大系数 k_1 ；最后，比较得到上、下机架 X、Y 方向水平振动和上、下导轴承 X、Y 方向摆度的最大值（ $V_{上}$ 、 $V_{下}$ 、 $S_{上}$ 、 $S_{下}$ ），从而完成配重策略位置推荐， V_i 、 S_i 推荐位置逻辑表如表1所示。

表1 V_i 、 S_i 推荐位置逻辑表

序号	条件1	条件2	条件3	推荐位置
1	任意 $V_i \geq k_1$	$V_{上} \geq V_{下}(1+k_1)$	—	上部
2		$V_{下} \geq V_{上}(1+k_1)$	—	下部
3		$V_{上} < V_{下}(1+k_1)$	$S_{上} \geq S_{下}$	上部
4		$V_{下} < V_{上}(1+k_1)$	$S_{上} < S_{下}$	下部
5	所有 $V_i < k_1$	—	$S_{上} \geq S_{下}$	上部
6		—	$S_{上} < S_{下}$	下部

表1逻辑表中包括3组条件，根据3组条件的组合进行位置推荐，如抽水蓄能发电机组转子的上部或下部。

2.3 转子动平衡影响系数计算算法

转子动平衡影响系数计算算法通过测量转子在不同加重条件下的振动响应，计算出影响系数，进而确定转子不平衡量的位置和大小。该算法的核心是确定配重幅值和配重相位，从而得到转子的校正质量。影响系数主要包括配重前、后机组振摆的相位特征值 V_1 、 V_2 和幅值特征值 P_1 、 P_2 。

1) 计算 X、Y 量测方向的影响系数 V_{ii} 和相位 P_{ii} ：

$$V_{ii} = \frac{\sqrt{M^2 + N^2}}{V} \quad (1)$$

其中, $M = V_2 \cos(P_2) - V_1 \cos(P_1)$

$N = V_2 \sin(P_2) - V_1 \sin(P_1)$

$$P_{ii} = \arctan \frac{M}{N} \quad (2)$$

式中: V 为配重相位, 可由检修试验数据得到。

2) 计算综合影响系数幅值 $V_I = \sum_{i=1}^n V_{ii}$ 和相位

$P_I = \sum_{i=1}^n P_{ii}$, 进行初始化配重幅值 V_{0i} :

$$V_{0i} = \frac{V_i}{V_I} \quad (3)$$

3) 计算各量测方向的配重相位:

$$P_{0i} = P_i - P_I + 180^\circ \quad (4)$$

4) 根据配重幅值和配重相位, 采用梯度下降算法进行配重策略计算; 根据不平衡量的位置, 确定各磁极需要添加的配重块质量和位置; 在磁极位置添加配重块, 从而确保机组的稳定运行和振动控制。

5) 在转子进行加重或去重操作后, 重新测量转子的振动情况, 以验证动平衡效果是否满足要求。

3 试验测试及结果分析

为验证本文提出的抽水蓄能发电机组转子自动化动平衡试验方法的有效性, 在某深蓄电站 2 号发电机组进行转子动平衡试验测试。利用 VT80 振动传感器采集转子的振动信号, 获得机组转子的过程数据。利用本文提出的抽水蓄能发电机组转子自动化动平衡试验方法进行第一次配置, 效果如图 3 所示。

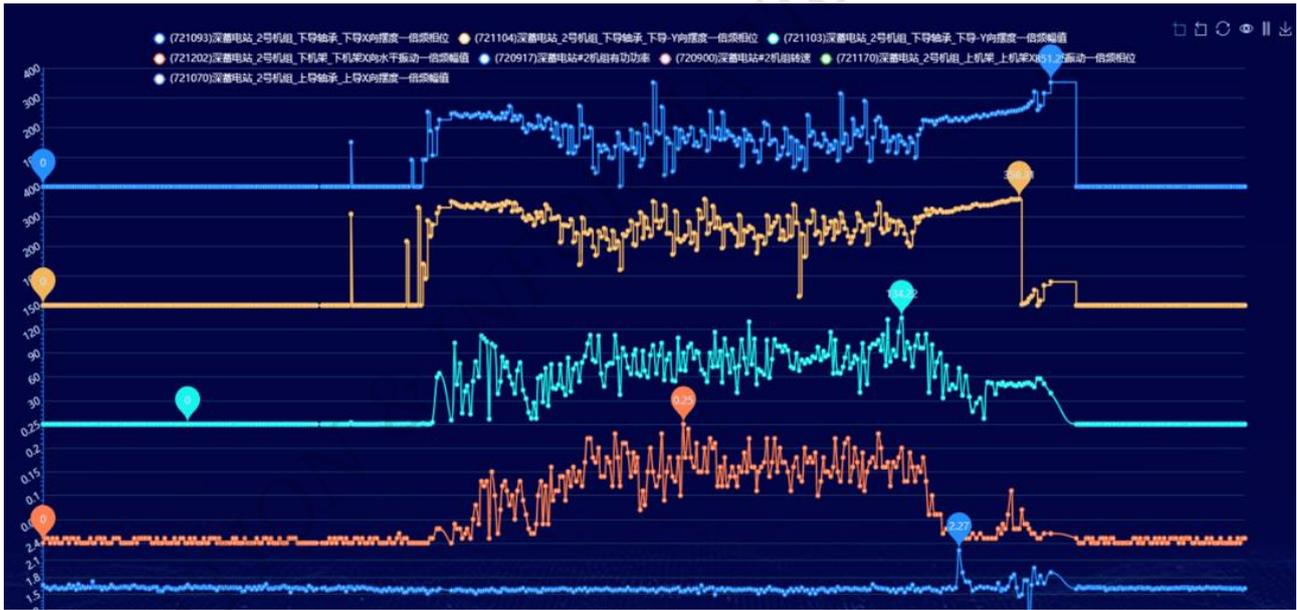


图 3 某深蓄电站 2 号发电机组第一次配置效果

由图 3 可以看出, 某深蓄电站 2 号发电机组 X、Y 方向的振动和轴摆度均有较大的波动, 需要进行转子动平衡调整。首先, 利用转子动平衡数据处理算法计算配重参数; 然后, 利用转子动平衡试验算法调整配重方案; 接着, 分析配重后负荷试验的振摆数据, 发现该机组 X、Y 方向的轴摆度有所改善; 最后, 采

用转子动平衡影响系数计算算法进行第二次动平衡测试, 利用 VT80 振动传感器采集配重后的转子空转振摆数据, 计算影响系数, 并采用梯度下降算法设计第二次配重方案, 第二次配重后调相工况的振摆数据如图 4 所示。

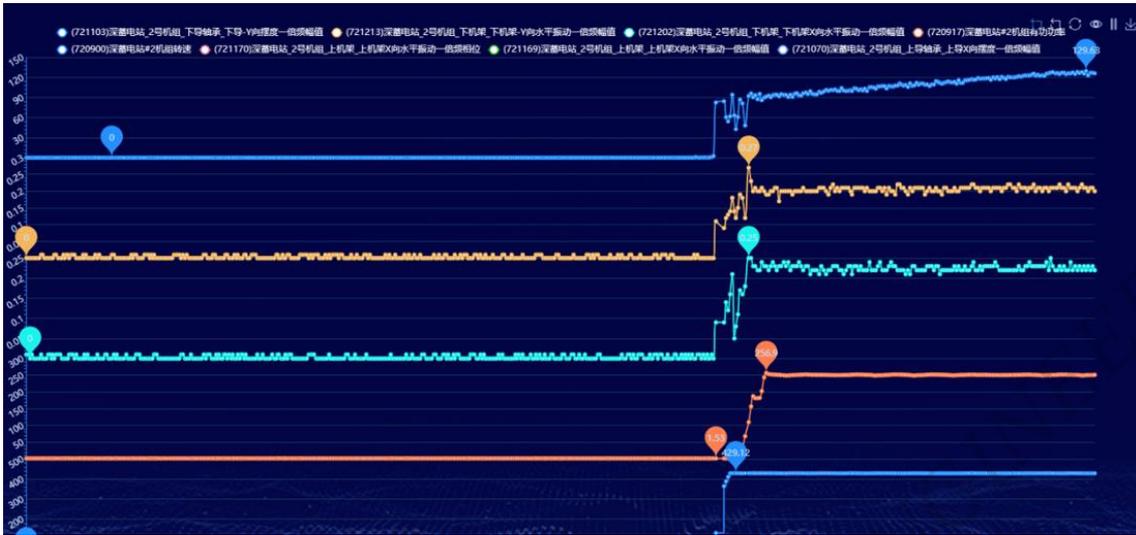


图 4 某深蓄电站 2 号发电机组第二次配置效果图

由图 4 可以看出,某深蓄电站 2 号发电机组 X、Y 方向的轴摆度得到了较大改善,满足抽水蓄能发电机组的摆动性能要求。

4 结论

本文针对人工操作的转子动平衡试验准确性和效率较低的问题,提出了抽水蓄能发电机组转子自动化平衡试验方法。该方法主要包括转子动平衡数据处理算法、转子动平衡试验算法、转子动平衡影响系数计算算法。在某深蓄电站 2 号发电机组进行转子动平衡试验测试,测试结果表明,抽水蓄能发电机组的转子仅需 2 次动平衡参数计算,便可实现转子动平衡参数的调整,相较于人工调整方式,减少了试验次数,提高了试验效率和准确性。本文方法对减小机组的振动和轴摆度,使机组运行更加平稳具有一定的指导意义。

©The author(s) 2024. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

作者简介:

- 刘轩,男,1994 年生,本科,助理工程师,主要研究方向:自动化。E-mail: 415139914@qq.com
 杨海霞,女,1990 年生,研究生,工程师,主要研究方向:动力工程及工程热物理。E-mail: yanghx13@163.com
 贾亚琳,男,1991 年生,本科,工程师,主要研究方向:抽蓄电站运维管理。E-mail: 403214199@qq.com
 陈源斐,男,2000 年生,本科,助理工程师,主要研究方向:自动化。E-mail: cyfamous@qq.com
 吴昊,男,1990 年生,硕士研究生,工程师,主要研究方向:自动化。E-mail: 13926169793@139.com

by-nc-nd/4.0/)

参考文献

- [1] 王灵,王波.抽水蓄能电站机组振动监测与分析[J].华北科技学院学报,2023,20(3):65-71.
- [2] 丁泉,徐伟,胡馨月,等.宜兴抽水蓄能电站综合厂用电率影响因素分析及控制措施研究[J].水电与抽水蓄能,2024,10(5):115-120.
- [3] 向明,杨恒,郑建兴,等.大型抽水蓄能电站机组与区域环境振动联合测试研究初探[J].水力发电,2021,47(8):73-77;98.
- [4] 赵志高.抽水蓄能机组调速系统建模、控制优化与工程应用[D].武汉:华中科技大学,2018.
- [5] 卢伟.岩滩水电站 4 号机组转子动平衡试验分析[J].云南水力发电,2021,37(1):160-165.
- [6] 张端潭.水轮发电机组现场动平衡试验工艺方案[J].机电信息,2020(11):74-75.
- [7] 周浩.多轮盘转子系统动平衡技术理论及试验研究[D].南京:东南大学,2021.
- [8] 何建宇,韩冬冬,董鸿魁,等.混流式水轮发电机组转子动平衡试验分析[J].云南水力发电,2022,38(8):233-236.