

大型水轮发电机定子安装技术难点与解决方案

刘约杯

河南轩尚人力资源服务有限公司 河南 郑州 200030

【摘要】：大型水轮发电机定子是水轮发电机组的核心部件之一，其安装质量直接影响机组的运行安全性、稳定性与发电效率。随着机组单机容量的持续攀升，定子结构尺寸不断增大，分瓣定子现场组合安装成为主流方案，由此带来的安装技术挑战也日益突出。本文系统梳理了大型水轮发电机定子安装的关键工艺流程，深入分析了定子机座组圆与焊接变形控制、定位筋安装与铁心叠压精度保障、定子绕组下线与绝缘处理、定子整体吊装及定转子同心度调整等环节存在的技术难点，并结合国内外工程实践与最新专利技术，提出了相应的解决方案。研究认为，采用模拟叠片法调整定位筋、应用分体式弹性定位筋结构、实施微正温微正压环境控制、采用有限元预分析指导吊装工艺等措施，可有效克服当前大型水轮发电机定子安装面临的核心技术问题，为同类工程提供参考。

【关键词】：大型水轮发电机；定子安装；定位筋；铁心叠压；气隙调整；变形控制

DOI:10.12417/2811-0528.26.17.010

1 引言

水轮发电机组是水力发电工程的核心设备，定子作为发电机中实现机电能量转换的关键部件，由定子机座、铁心、绕组三大部分组成。随着我国水电事业的快速发展，三峡、溪洛渡、乌东德、白鹤滩等巨型水电站相继建成投产，水轮发电机组单机容量已从早期的数百兆瓦提升至1000 MW级。例如，白鹤滩水电站安装的16台1000 MW水轮发电机组，是目前全球单机容量最大的机组，其安装标准要求极高。

定子尺寸随容量同步增大，部分电站定子铁心外径接近18 m。受到运输条件和厂房空间的制约，大容量水轮发电机的定子通常采用分瓣结构，在制造厂完成部分叠片或下线工作后分瓣运输至现场，再进行组合安装。这就使得定子现场安装面临工序繁多、精度要求高、环境条件复杂等多重挑战。定子圆度偏差过大将导致电磁气隙不均匀，引发机组低频振动问题；定位筋安装精度不足会影响铁心叠压质量和绕组嵌装；绝缘处理不当则直接威胁机组的安全可靠性。

目前，我国已颁布实施GB/T 8564《水轮发电机组安装技术规范》等系列标准，对定子安装的技术要求作出了明确规定。然而，面对新建超大容量机组的技术需求，传统安装工艺难以全面满足更高精度、更高质量的要求，亟需在技术层面进行系统创新。本文围绕大型水轮发电机定子安装的主要技术难点，从变形控制、定位筋安装、铁心叠压、绕组下线、整体吊装及气隙调整等维度展开分析，提出针对性的解决方案。

2 定子机座组圆与焊接变形控制

2.1 技术难点分析

大型水轮发电机定子机座通常分为多瓣运抵现场，需在安

装间进行组圆焊接。定子机座外形尺寸大、壁板较薄且焊缝较长，焊接过程中的热输入不均匀会导致机座产生较大的焊接变形，主要表现为局部圆度超差、合缝处错边以及高度方向的不平度。以三峡地下电站首台定子机座为例，其装焊精度需控制高度公差在+2~+3 mm、圆度在±10 mm以内，这对焊接工艺提出了极高的要求。

焊接变形的产生机理包括：焊缝金属冷却收缩引起的纵向和横向收缩、焊接热影响区不均匀加热导致的角变形以及残余应力释放引起的整体扭曲变形。对于大型薄壁结构而言，上述变形相互耦合，控制难度极大。若机座圆度不能满足设计要求，将直接影响后续定位筋安装和铁心叠压的质量，进而影响定子内圆的最终精度。

2.2 解决方案

为有效控制定子机座焊接变形，工程实践中逐步形成了以下技术措施。

第一，优化装配顺序与焊接工艺。采用中心柱定位法建立精确的安装基准，确保各分瓣机座在组圆时的空间位置准确。焊接顺序遵循“对称施焊、分层多道”的原则，避免热输入集中导致的不均匀变形。对于环缝和纵缝，应分段跳焊，每段长度与焊接参数经工艺试验确定。

第二，施加反变形措施。在焊接前预制适当的反变形余量，使焊接后的变形与预制变形相互抵消。具体反变形量需根据有限元数值模拟或经验数据确定，并随材料厚度及焊缝形式调整。

第三，刚性固定与适时释放。在机座合缝处设置足够的临时加固支撑和拉筋，增加结构整体刚度。焊接完成后，应力释

放和矫正工序应合理穿插,避免焊后集中矫正造成二次损伤。

第四,全过程监测。在焊接过程中设百分表等监测点,实时跟踪关键尺寸变化,依据监测数据动态调整焊接参数和顺序,实现“边焊边调”的闭环控制。

3 定位筋安装与铁心叠压精度控制

3.1 技术难点

定位筋是定子铁心叠片安装的基础构件,其半径、分度、垂直度以及弦长尺寸的精度直接决定了铁心的圆度。大型水轮发电机定子上的定位筋数量多、安装高程大,需同时满足半径偏差、周向分度均匀性和纵向垂直度三项指标,三者之间的调整相互制约,操作难度极大。温度变化引起的测量器具和定位筋本体的热胀冷缩也会引入测量偏差,进一步增大了安装精度控制的难度。

铁心叠压过程中,如果叠片不齐、压紧力不均匀,将会导致铁心波浪度超差或槽形扭曲。现场叠压工艺要求每段铁心高度公差控制在 $\pm 0.5\text{ mm}$ 以内,整体铁心长度向正公差靠近,铁心波浪度不大于 8 mm 。此外,穿心螺杆的弯曲、绝缘套管毛刺、通风槽片焊接不牢等问题也会造成铁心质量隐患。

3.2 解决方案

(1) 模拟叠片法精调定位筋。近年来,华能澜沧江水电股份有限公司公开的发明专利提出了一种新型定子定位筋安装方法:在定位筋上布设托板,将定位筋安放至定子机座上,选取基准定位筋进行精细调整;然后在定子机座环板上安装模拟叠片,通过调整模拟叠片的垂直度和同心度来确保定位筋的安装精度,最后焊接固定定位筋和托板。该方法能够有效解决半径、分度、垂直度及弦长不易同时调整以及温度影响测量偏差的问题。

(2) 采用分体式弹性定位筋结构。针对传统双鸽尾定位筋在长期运行中可能出现铁心松动的问题,工程中引入了新型分体式弹性定位筋技术。该技术在双鸽尾定位筋基础上增加分体式弹性元件,利用弹性元件的径向补偿作用吸收铁心热膨胀和运行振动,降低铁心松动风险,更有利于机组长期稳定运行。

(3) 铁心叠压全过程质量控制。叠片前应将冲片逐层擦拭干净,叠装时采用每层搭 $1/2$ 扇形片的方式,边叠片边整形,保持槽形整齐。叠至一定高度后进行预压,预压时4人对称使用风动扳手依次均匀拧紧螺杆,分多遍完成,不能一次压入过多。每叠完一段应使用槽样棒固定槽形,测量铁心内径和高度,注意各段高度偏差的相互补偿。全部叠装完成后进行整体冷压,压紧后用紧量刀片检查压紧度,要求单手用力推入深度小于 3 mm 。

4 定子绕组下线与绝缘处理

4.1 技术难点

定子绕组下线是将嵌线线棒嵌入定子铁心槽内并进行端部连接的关键工序,工序多、工艺复杂、工期较长。大型水轮发电机定子绕组容量大、额定电压高,定子绕组端部绝缘和防晕处理对机组安全运行至关重要。特别是对于乌东德、白鹤滩等 1000 MW 级机组,其主引出线电流达到 26000 A 、 28000 A 级,在机坑超强电磁环境下,金属构件感应发热成为极为突出的技术挑战。

此外,高压定子绕组对地电容较大,电容电流增大至 58 A ,对绝缘结构和中性点接地方式提出了全新的要求。

4.2 解决方案

(1) 微正温、微正压环境控制。传统定子下线主要依靠防尘棚减少外界环境的影响。为进一步提升施工环境条件,乌东德电站率先采用了微正温、微正压技术,通过向定子下线施工区域持续送入经过处理的洁净温控空气,使区内温度、湿度及粉尘浓度处于可控状态,显著提升了绕组的绝缘工艺水平,将绕组整体绝缘性能提升到新的高度。

(2) 端部固定填充材料优化。研究表明,绕组端部固定填充物在长期运行中可能出现电晕劣化问题。通过开展不同填充材料与结构的耐电晕性能对比试验,可以筛选出适应高电压、高海拔等特殊工况要求的端部固定方案,从而降低端部电晕故障的风险。

(3) 巨型机组引出线电磁屏蔽技术。针对 1000 MW 级巨型水轮发电机组,研究提出了基于对称电磁特性的双金属全电流屏蔽技术,配合磁力流和热力流多维耦合的热平衡分析,在 28000 A 级大电流、超强电磁环境下实现了 0.5 m 内超近距钢构最大温升低于 40° C 的工程目标,有效解决了机坑内紧凑布置的难题。

(4) 绝缘在线监测与定期试验。定子安装过程中及安装完成后,需按照 $\text{GB/T } 8564$ 和相关标准要求进行绝缘电阻测定、直流耐压试验、交流耐压试验等项目。 $\text{DL/T } 2575-2022$ 《灯泡贯流式水轮发电机定子绕组改造技术规范》也为绕组的绝缘改造提供了可参考的技术依据。对于运行中的定子绝缘状态,可采用局部放电在线监测与分析系统进行动态跟踪。

5 定子整体吊装与就位

5.1 技术难点

随着定子尺寸和重量的持续增大,现场整体吊装成为定子安装中最具风险的关键环节之一。吊装过程中,定子作为一个

大尺寸薄壁构件,受力分布不均匀极易导致机座、铁心甚至嵌好绕组的局部变形,影响已经调校完成的精度指标。以往个别工程出现过吊装后定子圆度超标需要返工处理的案例,造成了工期和成本的重大损失。

定子吊入机坑后的就位精度同样十分重要。定子安装方位应与发电机主引出线和中性点引出线方位相符合。若就位偏差过大,不仅影响引出线的对接,还会给后续转子的安装调整带来巨大困难。

5.2 解决方案

(1) 有限元预分析与模拟校核。李家峡水电站 400 MW 蒸发冷却水轮发电机定子带绕组整体吊装的工程实践表明,通过有限元计算对吊装过程中定子的挠度和圆度变化进行模拟校核,能够预测薄弱部位,指导吊点位置的选择和加固措施的制定,有效保障定子吊装前后的安装质量。

(2) 专用吊具设计。为避免定子受力不均造成变形,中国长江电力股份有限公司研发了一种大型水轮发电机定子整体吊装工具,通过优化吊具结构、均衡分配吊点载荷,确保定子起吊和移运过程中保持稳定的受力状态。

(3) 就位精度控制。定子吊入机坑前,应由监理会同承包人和供货商代表对定子安装就位、机座混凝土基础及电气试验结果等进行检查。就位过程中,以机坑内预先设定的 X、Y 轴线为基准,使用钢琴线或激光准直仪调整定子中心与机组中心的重合度,确保定子安装高程和中心偏差在设计允许范围内。

6 定转子气隙调整与同心度保证

6.1 技术难点

定子与转子之间的气隙均匀性是评估机组安装质量的核心

技术指标。气隙不均匀将导致磁通密度沿圆周分布畸变,产生单边磁拉力,进而引发机组振动。研究表明,当气隙磁场呈椭圆分布时,可能诱发定子低频振动。离心力、磁力以及温度变化均会对偏心产生直接影响。

根据现行安装规范要求,水轮发电机的定子和转子组装后,定子内圆和转子外圆半径的最大或最小值分别与其半径之差不大于设计气隙值的 $\pm 4\%$ 。对于气隙仅为 20~30 mm 的大型机组而言,这一允差折算成绝对偏差往往只有 0.8~1.2 mm,精度控制挑战极大。

6.2 解决方案

(1) 高精度测圆与调整。转子装配完成后,使用转子测圆架配合百分表或激光测量装置,逐磁极测量转子外圆半径,校核圆度和同轴度。华能澜沧江水电股份有限公司开发的转子圆度测量装置,采用套筒、转轴、吊臂和多个探头配合感应贴,通过电信号传输实现高效精准测量,数据稳定可靠。

(2) 基于气隙监测的系统调整。在定转子安装完成后,可在定子内圆表面安装气隙传感器,建立气隙极坐标图,直观反映转子相对于定子的偏心度和各磁极与定子之间的间隙分布。通过该系统的在线监测数据,可以科学指导转子的中心位置微调,使气隙偏差降至最低。

(3) 子部件安装阶段的同心度预控。在定子就位调整环节,应同时兼顾后续转子安装的需要,确保定子中心与机组旋转中心的偏差量最小。在导水机构、底环等附属部件的安装过程中,同样需要保持与定子中心的一致性原则,形成同心度预控的系统性安排。最终在转子整体吊入后,通过测量和计算气隙均匀性,完成同心度的最终确认和微调。

参考文献:

- [1] 张世才,王申贵,肖刚.大型轴流式水轮发电机分瓣定子质量控制研究[J].水电站机电技术,2025,48(10):35-37+98.
- [2] 张启文,马代斌.水轮发电机定子分体式弹性定位筋技术浅析[J].水电站机电技术,2025,48(6):8-10+18+107.
- [3] 王新洪,周峰,杨年浩.白鹤滩右岸水轮发电机定子铁心装配新技术[J].机械工程师,2023,(1):95-96+100.
- [4] 杨博文,徐利兴,马家思,等.乌东德水电站定子下线微正温、微正压技术应用[J].人民黄河,2022,44(S1):273-274.
- [5] 钟卫华,满宇光,刘豫川,等.水轮发电机定子绕组端部固定填充物的耐电晕性能对比试验[J].上海大中型电机,2025,(4):39-42.
- [6] 蔺旭东,张振,徐腾蛟.400MW 蒸发冷却水轮发电机定子带绕组整体吊装技术应用[J].水电与抽水蓄能,2023,9(6):47-51.