

水轮发电机电磁振动原因分析及诊断方法研究

瞿万军 崔 琴

国能长源恩施水电开发有限公司 湖北恩施 445000

摘要：电磁振动是水轮发电机运行中的常见故障之一，其产生机理复杂，常与发电机气隙不均匀、转子结构不对称、磁极松动、线圈中心不一致以及励磁系统异常等因素密切相关。本文以龙桥#2F机组振动测试数据为基础，结合电磁学理论与现场电气测试结果，系统分析了该机组在空转、空载、不同负载工况以及零起升压、转速上升过程中的振动特征。通过综合气隙测量、励磁曲线测试、交流阻抗分析、可控硅直流电阻测试及振动频谱数据，从多维度诊断了电磁振动的成因，并提出相应的处理建议与预防措施，为类似机组的振动治理与状态评估提供系统性参考。
关键词：水轮发电机；电磁振动；气隙测量；振动诊断；交流阻抗

引言

龙桥水电站#2F机组运行中出现振动异常，特征为空载振动显著大于带负荷工况且随励磁电流增加而增大。本文基于实测数据，分析气隙不均匀、磁极松动、励磁系统异常等因素的影响，建立多参量综合诊断方法。水轮发电机作为水力发电系统的核心设备，其运行稳定性直接关系到电站的安全性与经济性。振动是评价机组运行状态的重要指标，过大的振动不仅会加速机组部件的疲劳损伤，导致轴承磨损、连接件松动，还可能引发定子扫膛、绝缘损坏等严重故障，甚至造成非计划停机，影响电网供电可靠性^[1]。

根据激励源的不同，水轮发电机振动可分为机械振动、水力振动和电磁振动三大类。其中，电磁振动是由发电机内部电磁场相互作用产生的不平衡力所激发，其特性与电气参数、磁场分布、定转子结构对称性、励磁系统稳定性等密切相关，具有激励频率与转速或电源频率成倍数关系、随励磁电流和负荷变化明显等特点^[2]。由于电磁振动涉及电磁、机械、热、控制等多物理场耦合，诊断难度较大，通常需要结合电气试验、振动测试、气隙测量与励磁系统检查进行综合判断。

一、电磁振动机理分析

(一) 气隙不均匀产生的电磁力

在理想对称条件下，水轮发电机的定、转子之间的气隙均匀，产生的旋转磁场对称，径向电磁力平衡。当气隙出现不均匀时，气隙磁导在空间上呈周期性变化，导致气隙磁通密度分布畸变，从而产生不平衡的径向电

磁拉力^[3]。

$$B(\theta, t) = \lambda(\theta) \cdot F(\theta, t)$$

根据麦克斯韦应力张量理论，作用在定子铁芯内表面的径向电磁力密度 $f_r(\theta, t)$ 为：

其中， μ_0 为真空磁导率。将畸变的气隙磁密代入，该力密度函数中不仅包含与电源频率相关的基波力，还会产生频率为 $2f$ 、 $4f$ 等偶数倍频的谐波力分量（ f 为系统频率）。这些谐波电磁力是激发定子机座和铁芯产生倍频振动（如100 Hz）的主要来源^[4]。气隙偏心可分为静态偏心和动态偏心，前者产生固定的不平衡磁拉力方向，后者则导致拉力方向随转子旋转，其振动特征有所不同。

(二) 转子结构不对称与电气不平衡的影响

转子结构的不对称性，如磁极安装紧度不均、励磁线圈中心与转子几何中心不重合、磁轭叠片松动等，会从两个方面加剧电磁振动：一是导致转子质量分布不均，在旋转时产生机械不平衡力；二是破坏磁场的对称性，使各磁极下的磁动势不等，从而产生附加的、随转子旋转的不平衡磁拉力（Unbalanced Magnetic Pull, UMP）^[5]。

此外，电气方面的不平衡，如转子匝间短路、励磁电源谐波含量高、可控硅触发脉冲不一致等，也会引起磁场分布畸变。特别是励磁电压波形中的谐波成分，会调制气隙磁场，产生频率丰富的电磁力波，可能激发宽频带振动。

(三) 励磁系统异常对振动的影响

励磁系统为发电机转子提供直流励磁电流，其输出波形质量、调节稳定性直接关系到转子磁场的均匀性与稳定性。若可控硅触发角不一致、脉冲不干净或存在偶

发丢失，会导致励磁电流中含有较多谐波，进而使气隙磁场中出现附加的谐波分量，这些谐波磁场相互作用可能产生频率为 $f \pm fr$ 、 $2f \pm fr$ 等的力波（ fr 为转频），激发复杂的振动响应^[6]。

二、龙桥#2F机组测试数据综合分析与诊断

（一）气隙测量结果与分析

表1 气隙测量数据 (cm)

位置	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
上端	4.1	4.1	4.0	4.1	3.9	4.1	4.0	4.0	4.0	3.7	4.1	4.0	4.1	4.2
下端	4.1	3.7	4.1	3.6	4.1	4.1	4.1	4.15	4.2	4.1	3.8	4.3	4.1	3.4

对转子14个磁极测量气隙，设计值4.0cm，允许偏差 $\pm 10\%$ 。结果显示：上端极差0.5cm，下端达0.9cm；14号磁极下端仅3.4cm，超出下限15%。下端气隙严重不均匀是引发电磁振动的关键因素。

（二）励磁系统测试结果分析

1. 空载励磁曲线测试

在V/F限制下，机端电压最高升至110%额定值。分别测试A套与B套励磁调节器及对应可控硅的励磁特性：

A套励磁调节器A套可控硅：励磁曲线较平滑，无异常拐点或畸变。

B套励磁调节器B套可控硅：励磁曲线较平滑，无异常拐点或畸变。

测试限制：无交接试验数据作为基准，无法直接依据曲线形状判断转子绕组是否存在匝间短路。

2. 励磁电压波形分析

测试发现：励磁电压波形显示“脉冲不是很干净”，存在明显的谐波与毛刺。

可能原因：可控硅触发脉冲不一致、同步信号干扰或整流桥臂工作不对称。

影响分析：不纯净的励磁电压会导致励磁电流中含有较多谐波分量，进而引起气隙磁场谐波增加，可能激发频率丰富的电磁振动。

3. 可控硅直流电阻测试

A套可控硅直流电阻测试 (单位: Ω)					
A21	A24	A23	A26	A25	A22
17.1	16.7	16.3	16.4	17.5	21.5
B套可控硅直流电阻测试 (单位: Ω)					
A31	A34	A33	A36	A35	A32
16.7	16.2	21.1	19.5	15.5	22.0

测试结论：所有可控硅直流电阻值均在15 ~ 30 Ω 允许范围内，表明可控硅本体静态导通特性无显著异常。

测试局限：直流电阻测试无法反映动态触发与导通一致性，需结合波形分析综合判断。

4. 交流阻抗测试

交流阻抗测试结果显示，转子绕组在各电压下的阻抗值未见明显异常变化，未发现典型的匝间短路特征（如阻抗显著下降）。

测试局限：交流阻抗对早期、轻微的匝间短路不敏感，不能完全排除局部轻微短路的可能性。

（三）振动测试结果及分析

振动测试在空转、空载、15MW、30MW工况下进行。空转最大振动48 μm ，空载达83 μm ，增幅约2倍；带负荷后回落，30MW降至77 μm 。振动随励磁电流增加而增大、随负荷增加而减小的特征，符合气隙偏心型电磁振动规律。

表2 上机架振动测量数据 (μm)

工况	励磁电流 (A)	+X	-X	+Y	-Y	最大
空转	/	36	30	16	19	36
空载	323	76	83	42	38	83
15MW	379	78	82	39	35	82
30MW	462	75	77	28	30	77

三、电磁振动原因综合诊断

（一）气隙严重不均匀是根本原因

下端气隙0.9 cm的极差远超允许范围，造成了严重的磁场不对称。根据2.1节理论，这将产生强大的二倍频旋转径向电磁力，直接导致上机架和水导轴承处100 Hz振动分量增大。

（二）转子磁极存在局部松动或变形

第4、14号磁极下端气隙异常偏小，极有可能是该磁极的紧固螺栓松动、绝缘垫片压缩不均或磁极铁芯本身发生变形，导致磁极向内凸出。这种局部缺陷不仅加剧气隙不均，还会引起该极下磁拉力剧增，在旋转中产生周期性的冲击激励，可能激起工频及倍频振动。

（三）励磁系统脉冲不纯净加剧了振动谐波含量

励磁电压波形存在明显谐波与毛刺，表明可控硅触发或同步环节存在异常。不纯净的励磁电流会调制气隙磁场，产生丰富的谐波力波，可能激发较宽频带的振动响应，使得振动能量分布更分散，加剧机组整体振动水平。

（四）转子动态偏心与机架刚度各向异性耦合

空转与空载状态下振动方向性特征的改变，提示转子可能存在动态偏心，且机架在X、Y方向的支撑刚度存

在差异。随着励磁建立，不平衡磁拉力的方向与大小发生变化，与机架各向异性刚度耦合，导致振动主导方向切换。

四、处理建议与综合预防措施

(一) 机械结构调整与修复

1. 精细化气隙调整与定子圆度修复：复测定子铁芯内圆和转子外圆的圆度，找出变形部位。对气隙过小的磁极（第4、14极）检查并调整其背部垫片。目标是将整圈气隙不均匀度控制在 $\pm 5\%$ 以内。

2. 全面检查并紧固转子磁极：使用液压拉伸器或定力矩扳手，对所有磁极螺栓进行力矩检查与重新紧固。检查磁极T尾与磁轭T槽的配合间隙，更换磨损过度的键或垫片。

3. 检查转子磁轭与支架连接：检查磁轭键的打紧量和接触面积，确保无松动。在机组盘车状态下，用百分表监测磁轭外圆径向跳动，判断其整体性。

(二) 电气系统检查与优化

1. 励磁系统脉冲整治：检查可控硅触发板的同步信号、脉冲放大与分配环节，消除干扰源。使用示波器监测各桥臂触发脉冲的一致性，调整至同步、干净。

2. 转子绕组状态深化检测：考虑进行转子绕组匝间短路在线监测或采用脉冲频率响应法（FRA）进行离线测试，以排查早期、轻微短路。

3. 励磁参数优化：在保证系统稳定的前提下，优化PID调节参数，减少机端电压波动，提升励磁稳定性。

(三) 状态监测与智能诊断系统建设

1. 加装多参量在线监测系统：安装在线振动、气隙、磁场强度、励磁谐波监测装置，实现数据实时采集与趋势分析。

2. 开发振动智能诊断模型：建立振动特征（幅值、频率、方向）与电气参数（励磁电流、电压、谐波）、运行工况（转速、负荷）的关联分析模型，实现电磁振动的早期预警与根源智能诊断。

3. 定期对比测试与档案建立：建立机组“电气-振动”指纹档案，定期进行空载励磁曲线、交流阻抗测试，与历史数据进行对比，捕捉早期劣化趋势。

结论

本文以龙桥水电站#2F机组为工程实例，通过对其气隙测量、多工况振动测试以及系列电气试验（励磁曲线、交流阻抗、励磁波形、可控硅电阻）数据的综合分析，从电磁学与电气工程角度出发，系统诊断了其电磁振动的主要原因。分析表明：

1. 气隙严重不均匀（极差达0.9 cm）是引发强烈倍频电磁力的根本机械原因。

2. 励磁系统脉冲不纯净是加剧振动谐波含量、恶化振动品质的重要电气因素。

3. 转子磁极局部松动（第4、14极）与机架刚度各向异性耦合，导致空转与空载工况下振动主导方向发生切换。

4. 现有电气试验未发现明确匝间短路，但综合振动特征提示需对电气平衡性保持持续关注。

参考文献

[1] 陈鹏, 李建国. 水轮发电机组状态监测与故障诊断[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.

[2] 张伟, 刘志宏. 大型水轮发电机振动分析与治理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2019.

[3] Timoshenko S, Young D H, Weaver W. Vibration Problems in Engineering[M]. 4th ed. New York: John Wiley & Sons, 1974.

[4] 赵斌, 马宏忠. 汽轮发电机气隙偏心故障的电磁振动特征分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(10): 2606-2613.

[5] Guo D, Chu F, Chen D. The Unbalanced Magnetic Pull and Its Effects on Vibration in a Three-Phase Generator with Eccentric Rotor[J]. Journal of Sound and Vibration, 2002, 254(2): 297-312.

[6] 王学斌, 刘晓锋, 贺国. 水轮发电机电磁振动与噪声研究综述[J]. 水力发电学报, 2020, 39(8): 100-110.

[7] 刘振亚, 陈强. 励磁系统谐波对发电机振动的影响分析及抑制[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(4): 120-126.