文章编号：1006-1355(2020)06-0140-04+152

某核电厂辅助冷却水泵电机振动故障诊断

靳晓乐，郑广新，刘 伟

（中广核工程有限公司，广东 深圳 518124）

摘 要：国内某核电厂辅助冷却水泵电机空载试验时振动超标，根据所测量电机振动频谱和电机振动系统固有频率进行故障诊断。依据测量结果和振动理论，排查发现电机支架和底座间存在间隙，底座平面凹凸不平。在不拆除土建结构的条件下，使用特殊工具对底座平面进行机加工后，消除故障原因，有效解决该电机的振动超标问题。电机支架与底座接触面的多处间隙导致电机振动系统刚度不足，引起电机振幅升高；而刚度不足又影响系统固有频率，导致一阶固有频率与电机2倍转动频耦合，产生共振，导致电机振动超标。该电机振动故障的诊断、排查与治理方法对工程中振动问题的处理具有一定的借鉴意义。

关键词：故障诊断；泵电机；振动超标；共振；刚度

中图分类号：TK05 **文献标志码：A** **DOI编码：**10.3969/j.issn.1006-1355.2020.06.023

Vibration Fault Diagnosis of an Auxiliary Cooling Pump Motor in a Nuclear Plant

JIN Xiaole , ZHENG Guangxin , LIU Wei

(China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Shenzhen 518124, Guangdong, China)

Abstract : The vibration of the auxiliary cooling pump motor in a domestic nuclear power plant exceeds the standard in load-free test. The vibration spectrum of the motor and the natural frequency of the motor vibration system were measured, and the fault diagnosis was made. According to the measurement results and the guidance of vibration theory, the clearance between the motor bracket and the base was found, and the base plane was found to be uneven. After processing the base plane with special tools without dismantling the civil structure, the cause of failure has been eliminated, and the problem of excessive vibration of the motor has been effectively solved. The gap between the motor bracket and the base leads to the insufficient stiffness of the motor vibration system and the increase of the motor amplitude. While the insufficient stiffness affects the natural frequency of the system, resulting in the coupling between the first natural frequency and the motor's doubled rotation frequency. It results in resonance and causes the motor's vibration to exceed the standard. The diagnosis, troubleshooting and treatment of vibration fault of the motor have some reference significance for the treatment of vibration problem in engineering.

Keywords : fault diagnosis; pump motor; excessive vibration; resonance; stiffness

在进行某核电厂辅助冷却水泵电机首次空载试验时，发现其非驱动端轴承水平方向和垂直方向振动均超标。最高达到4.5 mm/s RMS，而验收标准为2.8 mm/s RMS，该数据远超验收标准。测量电机振动频谱和固有频率后发现电机振动二倍转频与固有频率十分接近，分析结果是电机产生了共振效应。根据测量和分析结果以及振动理论，初步判断产生振动超标的原因可能包括电机自身故障、电机轴系不对中以及电机振动系统刚度不足。通过对电机支架平面度进行现场检查，排除了电机轴系不对中的可能性；对两台功能相同、型号相同的电机互换位置并启动测试，排除了电机自身故障的可能性。通过对电机安装结构的详细排查，基本确定系统刚度不足是电机振动超标的根本原因。通过治理，电机振动系统刚度得到提高，固有频率发生改变，消除了电机共振效应，电机振动得到明显抑制，满足验收标准。本文对该电机振动超标治理措施的理论依据和实际效果进行分析和论述。

收稿日期：2020-05-18

作者简介：靳晓乐（1988–），男，河南省焦作市人，工程师，现从事核电厂热力系统调试工作。

E-mail: jin_xiaole@126.com

1 设备概况与故障现象

1.1 设备概况

辅助冷却水泵是辅助冷却水系统的主要设备，

该系统由4台完全相同的辅助冷却水泵组成。辅助冷却水泵直接从海水库取水，海水经过辅助冷却水泵及过滤器后进入闭冷水换热器和真空系统换热器，将用户排出的热量带走，最终排入大海。

辅助冷却水泵为单级、单吸立式离心泵，吸入口方向竖直向下，排出口方向为水平方向，电机与泵安装在同一个底座上，电机和泵的轴承采用滚动轴承，油脂润滑。电机额定电压为10 kV，额定功率为375 kW，额定转速为742 r/min，泵组的侧视图见图1。

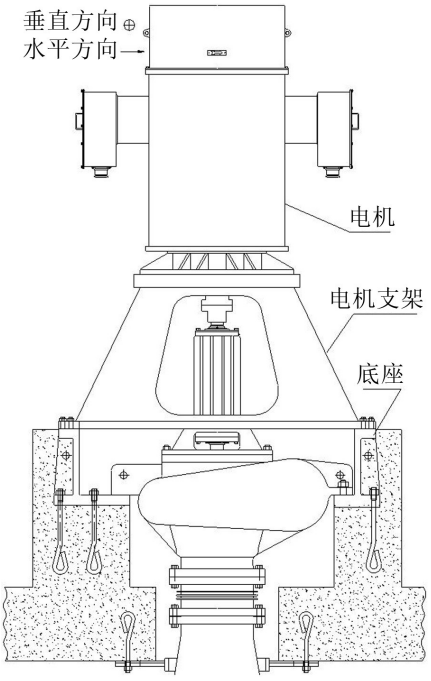


图1 辅助冷却水泵组侧视图

辅助冷却水泵泵体固定在同一圆周上的3段底座上，电机支架与泵安装在同一底座上，电机安装在电机支架上方。3块底座通过地脚螺栓约束并通过二次灌浆固定在土建基础支墩上，基础支墩由同一圆心的3段扇形组成，图2所示为泵组底座的俯视图。

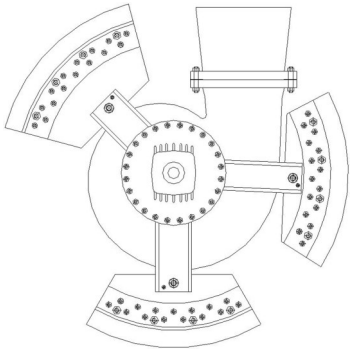


图2 辅助冷却水泵组底座俯视图

1.2 故障现象

进行首次电机空载试验时，电机启动电流及运行电流正常，各轴承温度无异常，轴承听音正常，电机驱动端轴承振动合格。但电机非驱动端轴承水平方向和垂直方向振动超标，电机振动的详细数据见表1。

表1 首次空载试验振动数据单位/(mm·s^{-1} RMS)

测量位置	振动强度	验收标准	空载转速
非驱动端水平	4.5 mm/s	≤2.8 mm/s	749 r/min
非驱动端垂直	3.6 mm/s		
非驱动端轴向	1.2 mm/s		
驱动端水平	0.8 mm/s		
驱动端垂直	0.9 mm/s		
驱动端轴向	1.5 mm/s		

2 故障诊断

2.1 固有频率和振动频谱

在电机首次启动中发现其振动超标后，使用锤击法对电机振动系统的固有频率进行测量，获得了电机振动系统的频谱响应，见图3所示。

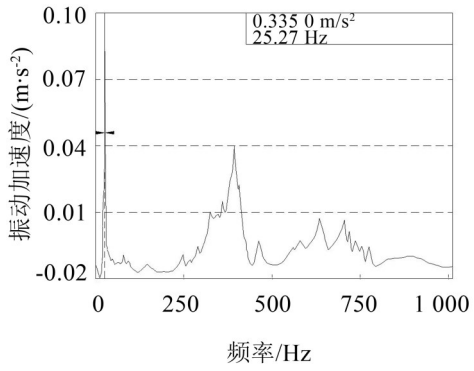


图3 电机振动系统固有频率

使用振动测试仪器对电机的振动频谱进行采集，获得电机非驱动端水平方向振动频谱见图4。电机非驱动端垂直方向的振动频谱见图5。

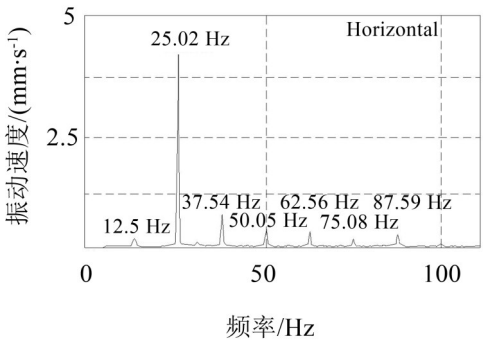


图4 电机非驱动端水平方向振动频谱

从图3至图5可以看出电机振动系统的1阶固有频率为25.27 Hz，电机振动的能量主要集中在25.02 Hz。

2.2 故障诊断

电机振动频谱显示振动主要集中在二次谐波，

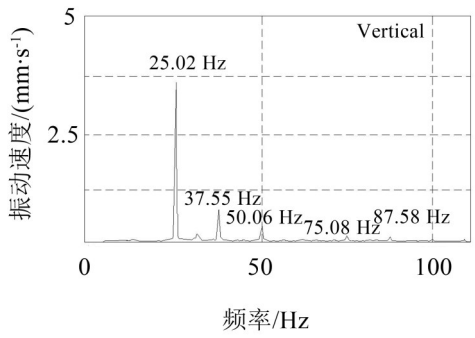


图 5 电机非驱动端垂直方向振动频谱

其他谐波幅值较小且无明显杂波，因此主要对二次谐波进行分析诊断。

电机转子的转动频率：

$$f_1 = \frac{749}{60} = 12.48\ \text{Hz} \tag{1}$$

二倍转动频率：

$$f_2 = 2f_1 = 24.97\ \text{Hz} \tag{2}$$

电机振动系统的1阶固有频率：

$$f_n = 25.27\ \text{Hz} \tag{3}$$

电机振动主要以二次谐波为主，其频率为25.02 Hz。对比表2中电机的特征频率，可以看出二倍转动频率与1阶固有频率十分接近，避开裕度不足1.2 %，落入共振区[1]，系统产生共振效应。

表 2 电机特征频率/Hz

2阶转频f_2	固有频率f_n	水平振动二次谐波	垂直振动二次谐波
24.97	25.27	25.02	25.02

在线性系统中，转动设备呈现的振幅与该部件的激振力成正比，与它的刚度成反比，即：

$$A = \frac{P}{K_d} \tag{4}$$

式中：A为振幅，P为激振力，K_d代表刚度[2]。由式(4)可以看出，要减小电机的振幅，就必须减小激振力或增加系统的刚度。

在弹性支撑系统中，支撑刚度越高，整体固有频率越高，当刚度达到固定支撑程度后，固有频率不再变化[3] [4]。

本案例中的电机振动系统可近似视为线性系统，其支撑结构为弹性支撑，因此可以从两个方面进行故障排查。一方面，从减小激振力入手，排查电机自身故障或电机轴系不对中引起的激振力过大的问题；另一方面，从增加振动系统的刚度、提高系统的固有频率入手，排查电机安装结构所造成的刚度不足问题。

2.3 故障排查

排查电机自身故障。辅助冷却水系统内4台电机型号一致，布置方式一致，且其他3台电机的振动全部合格，因此现场采用互换电机位置的方式进行排查。拆装电机期间，检查发现电机支架上表面水平度小于0.05 mm/m，满足安装手册的要求。电机互换后，分别启动两台电机，原振动超标电机振动合格，原振动合格的电机振动超标，因此可以排除电机自身故障。

排查电机振动系统刚度不足的问题。振动系统的刚度与各个结合面的连接强度和虚脚有关[5]，因此存在的原因可能有：

(1) 电机与电机支架间的固定螺栓或电机支架与底座间的固定螺栓松动或力矩不足；

(2) 电机与电机支架结合面间存在虚脚；

(3) 电机支架与底座结合面存在虚脚；

从以上3个方面进行排查：

(1) 排查发现电机与电机支架间的固定螺栓力矩合格，电机支架与底座间的固定螺栓力矩合格。

(2) 排查发现电机与电机支架间无虚脚。

(3) 排查发现电机支架与底座间存在多处虚脚。现场使用合像水平仪沿圆周对电机支架下表面检查，未发现明显偏差。使用合像水平仪沿圆周对底座上表面进行分段检查，发现底座上表面沿圆周方向水平度存在明显的上下起伏，详细数据见图6。检查结果表明底座上表面存在严重的凹凸不平。

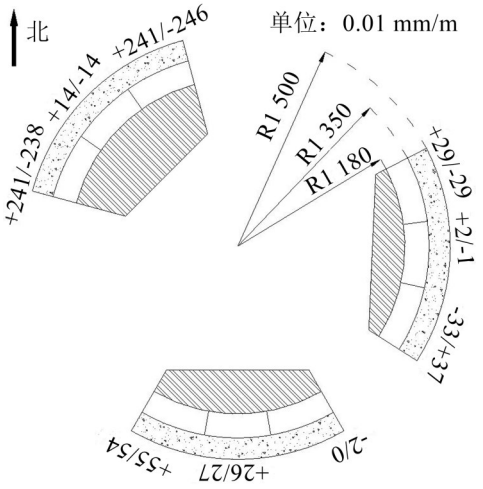


图 6 底座上表面的水平度

排查结果表明：底座表面凹凸不平，电机支架与底座间的连接存在多处虚脚，导致整个振动系统的刚度不足，进而导致系统的固有频率降低，刚度不足和共振效应共同对电机二次谐波的振动起到了放大的作用。

因此必须对底座表面进行找平处理，消除虚脚，提高系统的刚度和固有频率。

3　故障处理

底座是浇灌在混凝土基础上的，如果将底座拆除进行机加工，必将涉及拆除、重建混凝土基础，成本和工期代价太大。于是决定采用FURMANITE公司的AX41820平面加工设备进行机加工(见图7)，对底座3个平面进行车削。

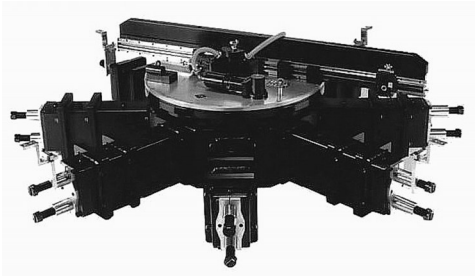


图7 平面加工工具

由于底座面由3个扇形断面组成，需在扇形底座之间焊接20#a工字钢形成闭合结构，作为支撑框架，支撑示意图见图8。工字钢安装焊接平面比电机底座水平面降低20 mm，以避免焊接、拆除时焊接及切割的高温使底座平面变形。

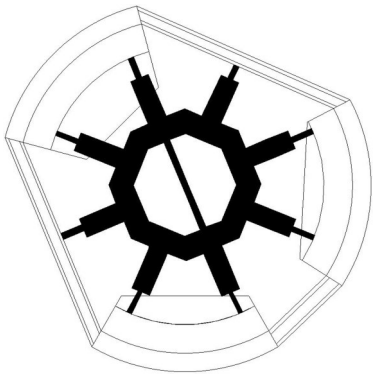


图8 临时支撑示意图

工具就位后，调整工具及刀臂水平，控制刀臂的水平面在0.02 mm/m以内。为了确保不影响联轴器的安装，初次进刀量控制在0.02 mm至0.03 mm之间，之后每次进刀量控制在0.05 mm，总进刀量控制在2 mm以内。

机加工后，底座平面凹凸不平的情况有了较大改善，沿圆周方向测量的水平度数据见图9。

复装电机后，进行电机空载试验，所采集振动数据见表3。电机振动合格。电机联轴后，进行负载试验，泵组振动合格。

后续对电机振动系统固有频率进行复测，获得处理后的电机振动系统的固有频率为27.38 Hz，如图10所示。电机振动系统的固有频率提高了约8.3 %，进一步印证了电机振动超标的根本原因是系统刚度不足。

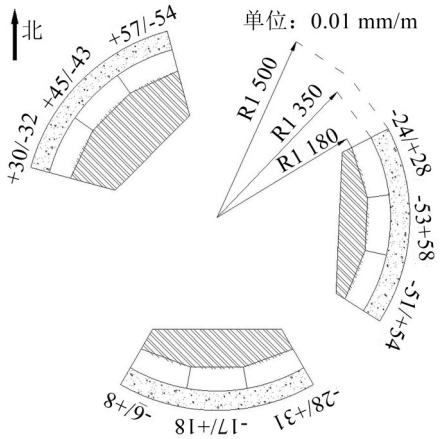


图9 底座上表面机加工后的水平度

表3 治理后电机空载试验振动数据

测量位置	振动强度	验收标准	空载转速
非驱动端水平	2.7 mm/s	≤2.8 mm/s	749 r/min
非驱动端垂直	1.0 mm/s		
非驱动端轴向	0.8 mm/s		
驱动端水平	0.8 mm/s		
驱动端垂直	0.8 mm/s		
驱动端轴向	0.7 mm/s		

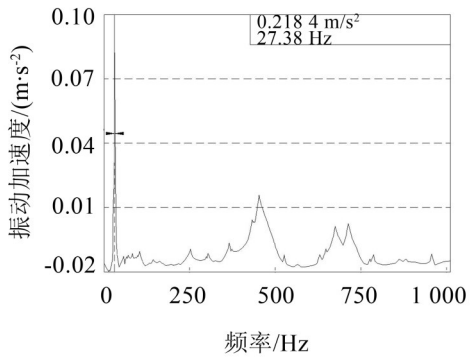


图10 治理后的电机振动系统固有频率

4　结 语

振动系统的刚度不仅影响系统的振幅，同时也影响系统的固有频率。本案例中电机支架与底座间存在虚脚，电机振动系统的刚度减小，振幅增加；刚度减小又导致系统的固有频率减小，而固有频率恰好与二次谐波十分接近，系统产生的共振效应又进一步放大了电机的振动。刚度不足和共振效应共同导致了电机振动超标。对于底座表面凹凸不平的问题，本案例中采用现场机加工的处理方式，大大缩减处理周期及处理工作量，需要注意的是应保证联轴器的安装空间。本案例电机振动故障的诊断、排查与治理方法，对工程中振动故障的诊断与处理具有一定的借鉴意义。

(下转第152页)