

核电厂低压电机可靠性提升方案研究及应用

成华安

大亚湾核电运营管理有限责任公司 广东省深圳市 518124

摘要: 本文以一台压水堆核电厂使用的 380V 低压电动机典型轴承故障为例, 通过对轴承质量、润滑、安装、负载影响等因素进行全面深入研究分析, 确定了轴承故障原因, 针对性地制定了轴承与轴和轴承室的公差配合标准优化方案, 并对类似结构的低压电机制定了可靠性提升方案, 在实践应用中证明了方案的可行性和有效性。

关键词: 电机; 轴承; 游隙; 公差配合

1. 引言

压水堆核电厂核岛、常规岛等厂房各工艺系统应用了大量的 380V 低压电动机, 其功能主要是为风机、水泵、油泵、压缩机、齿轮箱等设备提供旋转动力, 如果出现电机故障不可用将使系统失去冗余配置, 或直接影响系统可用性。因此研究低压电机故障的机理并针对性地制定相应的方案以提升电机可靠性对系统乃至电厂的正常运行具有重要意义。本文以一台离心风机的电机轴承卡涩导致跳闸作为典型故障, 对故障原因进行深入分析并研究制定可靠性提升方案。

2. 故障原因分析

一台离心风机在现场运行过程中, 上游配电开关发生过载保护跳闸, 电机额定参数为: 电压 380V, 功率 7.5Kw, 电流 14.9A, 转速 2900rpm。

电机跳闸后在现场检查风机内部无冷凝水, 风机叶轮无动静碰磨, 盘动叶轮转动不太顺畅且惰转时间较短, 重新启动风机发现电机运行存在明显异音, 测量电流超过电机额定电流。对故障电机解体发现电机轴承卡涩。通过以上现象分析故障的直接原因为电机非驱动端轴承卡涩, 导致电机过载, 运行电流增大, 上游电源开关热偶保护跳闸。

该电机轴承为免维护深沟球轴承, 两端轴承型号相同, 为 SKF 生产的 6308-2Z/C3, 轴承两侧有密封盖, 在轴承生产时已经预先在内部填充好油脂, 这种轴承一般使用寿命在三万小时以上。轴承发生卡涩故障的可能原因有:

- 1) 轴承存在润滑不良、材料不合格等质量问题
- 2) 轴承安装不到位
- 3) 风机振动大导致轴承疲劳损伤
- 4) 轴承安装配合过紧、工作游隙过小

对于原因 1), 检查轴承故障后, 轴承及轴承室内仍有润滑油, 可以排除润滑不良的原因; 将轴承外送国家轴承质量监督检验中心对轴承的化学成分、硬度、淬回火马氏体组织及碳化物网状进行检验, 轴承材质符合 SKF 轴承标准, 因此原因 1) 可排除。

对于原因 2), 此类小型免维护轴承安装, 使用专用工具对轴承进行冷装, 将轴承套在轴上, 通过内圈受力把轴承装到轴颈部位, 直到轴承与轴肩贴合不能继续移动则安装到位了。检查故障轴承与轴肩之间紧密贴合、没有间隙, 说明轴承已安装到位, 此原因可以排除。

对于原因 3), 第一次换料大修风机振动不合格进行过振动优化调整, 重新对叶轮动平衡进行校验。第二次换料大修风机振动也不合格, 更换了新叶轮, 之后没有再发生风机振动不合格的情况。本台电机在第四次大修中进行解体更换了轴承, 再鉴定振动合格, 本次故障后更换新电机, 但仍使用原来的叶轮, 再鉴定时振动也合格, 说明叶轮没有发生动平衡偏移。查询第二次及后续大修再鉴定风机振动报告, 本台风机振动一直较好, 远低于振动报警值。风机振动大导致轴承疲劳损伤的可能性较小。

对于原因 4), 首先看故障的非驱动端轴承存在严重过热现象, 轴承内圈与转子轴颈部位已粘连, 均有明显的过热变色现象。将轴承从轴颈部位压出, 产生“拉毛”现象(见图 1)。轴承内圈滚道面发橘黄色, 滚珠发深褐色(见图 2)。轴承外圈未见变色现象^[1]。

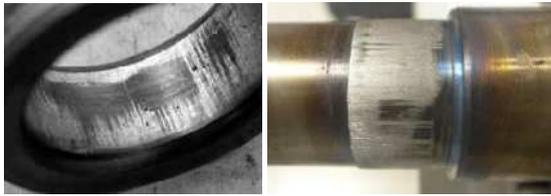


图 1. 轴承内圈、轴颈粘连部位



图 2. 轴承内圈滚道面、滚珠过热现象

过热现象从轴承内圈到滚珠、外圈逐渐减轻，说明发热源在轴承内圈。具体的故障发展模式待后文综述，以下对轴承的公差配合进行分析。

深沟球轴承内部游隙（这里指径向游隙）是指轴承内圈相对于外圈在径向方向上可移动的总距离，为使轴承良好运行，运行时轴承内有足够的内部游隙极为重要。通常，球轴承的工作游隙应接近于零的正值^[2]。轴承运行时，轴承内圈套在轴颈上随轴一起旋转，外圈位于轴承室（端盖孔）中，不随轴转动，因此轴承涉及到内圈与轴的尺寸配合、外圈与端盖孔的尺寸配合，这个配合会影响轴承的内部游隙，如果配合不合理会对轴承正常运行产生影响。

下面分析故障电机轴承实际的配合情况：

前两次大修电机解体测量数据以及故障后测量数据见表 1 所示。

表 1 故障电机轴承配合数据

时间	驱动端 /mm		非驱动端 /mm	
	轴颈	端盖	轴颈	端盖
第一次大修	40+0.012	90-0.011	40+0.013	90-0.020
第四次大修	40+0.012	90-0.009	40+0.013	90-0.013
故障后	40+0.012	90-0.009	40+0.030	90-0.012

注：故障后非驱动端轴承内圈因过热与轴已焊死，在强行压出轴承后，轴颈部位产生“拉毛”现象，因此测量的轴颈尺寸偏差大，不能反映真实值。

根据 SKF 轴承手册，轴承工作游隙计算如下：

$$r_{op} = r - \Delta r_{fit} - \Delta r_{temp}$$

式中

r_{op} = 轴承工作游隙

r = 轴承初始游隙（6308-2Z/C3 的轴承初始游隙为 15~33 μm ）

Δr_{fit} = 由配合引起的游隙减量

Δr_{temp} = 温差产生的游隙减量

又有： $\Delta r_{fit} = \Delta 1 \cdot f_1 + \Delta 2 \cdot f_2$

式中

f_1 = 内圈的减少系数（根据手册选择 0.76）

f_2 = 外圈的减少系数（根据手册选择 0.86）

$\Delta 1$ = 内圈和轴之间的有效过盈量（最大和最小可能过盈量的平均值）

$\Delta 2$ = 外圈和轴承座之间的有效过盈量（最大和最小可能过盈量的平均值）

$$\Delta r_{temp} = \alpha \cdot d_m \cdot \Delta T$$

式中

α = 热膨胀系数（钢， $\alpha = 12 \cdot 10^{-6}$ ）

d_m = 轴承平均直径： $0.5(d+D)$

ΔT = 轴和轴承座之间的温差（预估温度为 10℃）

以第四次大修测量的非驱动端数据为例，6308-2Z/C3 轴承初始游隙范围为（15~33） μm ，内圈内径偏差范围为（-12~0） μm ，外圈外径偏差范围为（-15~0） μm ，通过计算，由配合引起的游隙减量 $\Delta r_{fit} = 19.2 \mu\text{m}$ ，温差产生的游隙减量 $\Delta r_{temp} = 7.8 \mu\text{m}$ ，计算非驱动端轴承的工作游隙 r_{op} 在（-12~+6） μm 之间，可以说该轴承工作游隙很有可能为负值，对轴承寿命很不利。

关于轴承的工作游隙，一般通过轴承的配合来保证，使其不至于游隙过小。对于 380V 小型电动机来说，轴承外圈承受的负荷可以认为是固定的外圈负荷，在轴向移动方面，必须要有一端可以移动，以提供热膨胀的轴向位移。轴向的定位一般是靠电机端盖、轴的设计和轴承的选型来实现的，不应通过卡死轴承外圈来达到目的。参考 GB/T 275-2015 配合原则“当以不可分离轴承作游动支承时，应以相对于载荷方向固定的套圈作为游动套圈，选择间隙或过渡配合”^[3]。因此对于小型电机，选择国标推荐表中的轻、正常负荷，轴向能移动或易移动的配合更合适（即 J7 或 H7）。

SKF 轴承手册中也有相关推荐表，对于小型电机，端盖推荐 J6 的配合，也可用 H6 来代替 J6 以便于轴承座孔的轴向位移（注：K7-J6-J7-H6-H7 配合由紧至松）。

关于低压电机轴承配合问题，调研电厂内使用的主要电机厂家和以及外部研究单位，配合公差基本相同，轴的配合 k5，孔的配合为 H6 或 H7（间隙配合）。

目前电厂检修程序中电机两端孔的配合分别为 K7 和 J7，比 J6、H6、H7 等配合过盈量大，配合紧。该故障电机轴承与轴和轴承室均为过盈配合，轴承的工作游隙将减小甚至为负值，且电机轴在运行中存在热膨胀，配合过紧的轴承无法轴向移动而承受异常轴向力，导致轴承运行中异常发热，严重影响轴承寿命。

分析故障发展模式为：轴承内部游隙过小，内圈在高速旋转（2900r/min），其发热量最大，发热又会进一步减小游隙，因此存在恶性循环，最终轴承卡死，轴承内圈热膨胀后，与轴颈的配合也会变松，轴承卡死不转而转子受电磁力仍继续旋转，就导致转子轴颈部位滑动摩擦，温度急剧上升，电机运行电流增大，最后上游开关保护动作跳闸，轴颈与轴承内圈因高温粘连在一起。

小结：本台电机发生轴承卡涩故障原因为轴承安装配合过紧、工作游隙过小。

3. 可靠性提升方案及其应用

3.1 可靠性提升方案

通过上述分析，对于轴承故障的预防，一方面是厂家需加强制造时电机轴承室尺寸控制，另一方面是制定合适的检修标准，及时修正轴承室尺寸偏差。为此，制定了两项可靠性提升方案：

1) 对检修程序中轴承的配合公差进行优化，避免轴承配合过紧；

2) 为了防止同类故障发生，对历史上检修过的重要电机的轴承工作游隙进行计算，梳理其解体检修记录并评估轴承配合状况，对于故障风险较高的制定检修计划。

3.2 应用

将检修程序中配合公差进行优化，按照优化标准执行后未再发生因轴承公差配合问题导致的轴承故障。

通过梳理重要电机的历史检修记录，发现存在两端端盖均为负偏差的电机。对轴承工作游隙平均值进行计算，发现有两台电机的非驱动端工作游隙平均值为负值，其中一台电机非驱动端工作游隙平均值偏离 0 位较大，说明该电机轴承故障的风险较高，对该电机解体检查，发现轴承外圈锈蚀，有卡涩现象，一端轴承内部油脂发黑，验证了计算的准确性，并在检修窗口及时对轴承进行了更换，防止进一步恶化导致故障。

4. 结语

提高设备可靠性对电厂的正常运行具有重要意义，本文以一台低压电机典型轴承故障为例，通过对设备的故障模式进行逐一排查，横向对比同类设备并对比国标、行标，将故障原因分析透彻，制定了相应的可靠性提升方案，并通过实际应用，成功预防了同类设备故障，证明设备可靠性提升方案是行之有效的。电机轴承故障有多种原因，对于其它原因导致设备故障的分析及对策制定，本文也存在一定的借鉴意义。

参考文献：

[1]GB/T 24611-2020 滚动轴承 损伤和失效术语、特征及原因 [S]

[2]王勇，赵明. 电机轴承故障诊断与分析 [M]. 北京：机械工业出版社，2021

[3]GB/T 275-2015 滚动轴承 配合 [S]

作者简介：成华安（1987年2月），男，汉，湖南省永州市，工程师，大学本科，低压电气设备运维及可靠性管理