

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.09.021

基于故障树的核电站循环水泵电机 烧瓦问题研究

李 力, 郭 猛, 韩垂煌, 王爱彬, 贾思林
(中广核工程有限公司 调试中心, 广东 深圳 518124)

摘要:针对阳江核电站二号机组循环水泵电机轴承烧瓦的问题,从设备制造质量、安装精度、运行环境及人员操作等方面对事件原因进行了研究。应用故障树分析方法,画出了该事件故障树并对一系列基本事件的后果进行简要分析;从定性角度求解故障树的结构重要度,找出引起故障的重要环节,并结合实际调查结果得出该事件发生的主要原因是恶化的工作环境未得到有效检测与监视。以此分析为指导,重点对故障环节进行处理,最终顺利解决该烧瓦事件并从中总结经验来从事预防工作。分析与处理结果表明,基于故障树的原因分析正确,处理措施具有针对性,适用于解决此类事件。

关键词:循环水泵;电机;烧瓦;故障树

中图分类号:TM343;TH313

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)09-1246-05

Bush-burning study on circulating pump motor of nuclear power station based on fault tree

LI Li, GUO Meng, HAN Chui-huang, WANG Ai-bin, JIA Si-lin
(China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Shenzhen 518124, China)

Abstract: Aiming at the circulating water pump motor's guide bearing bush-burning incident of Yangjiang Nuclear Power Station Unit 2, study on the cause of the incident was carried out from the perspective of equipment manufacturing quality, installation accuracy, working condition and personal operation. Based on fault tree analysis method, a fault tree of the incident was drawn and a series of basic events could be established and analyzed. By calculating the structure important degree from a qualitative perspective, the major events leading to the incident were found out. Combining with the investigation result, the cause of the incident was clear: no effective detection or monitoring was done to the bad working condition. Afterwards, this analysis was used as a guide for subsequent solution, and the major events were handled emphatically. At last, the incident was successfully resolved. On the other hand, there was some experience for the prevention of incident like this. The results of analysis and resolving indicate that fault tree is appropriate for this kind of incidents because of its correct analysis and emphatic measures.

Key words: circulating water pump; motor; bush-burning; fault tree

0 引 言

核电站循环水系统的功能是向汽轮发电机组的凝汽器和辅助冷却水系统提供冷却水(海水),其关键设备为循环水泵及其驱动电机;若一台循环水泵跳泵,则会使汽轮机甩负荷至 50% 额定负荷运行,此时凝汽器真空变坏^[1]。循环水泵驱动电机轴承烧瓦是其常见故障之一,具体原因包括轴瓦的制造、安装与运行环境

等因素,将导致反应堆降功率运行。文献[2-5]研究了引起这类轴承烧瓦事件的直接原因,如轴瓦制造与安装精度不合格、润滑油不合格、运行操作不规范等,但缺少对这些原因的重要性分析以及如何针对一起具体的烧瓦事件制定防范侧重点。

本研究采用故障树分析方法,从系统的角度对循环水泵电机烧瓦事件进行分析并找出导致事件发生的重要因素,针对这些因素进行后续处理以及采取相应的预防措施。

1 事件概述

1.1 循环水泵电机烧瓦事件

阳江核电站二号机组热试期间,B列循环水泵在启动并稳定运行 30 min 后,驱动电机上部径向轴承温度探测器示值在很短时间内从 54 ℃ 升至 80 ℃ 触发高一报警,主控随后停运循泵;在停泵期间,该温度探测器示值继续上升,最高达 120 ℃,上导轴承温升曲线如图 1 所示。

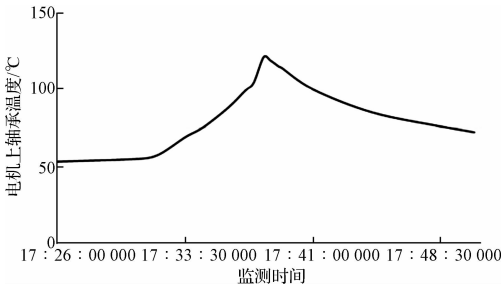


图1 上导轴承温升曲线

后笔者经过对上轴承导瓦翻瓦检查,确认导瓦烧伤,实物图如图 2 所示。该事件导致 B 列循泵在二号机热试期间不能正常投运。

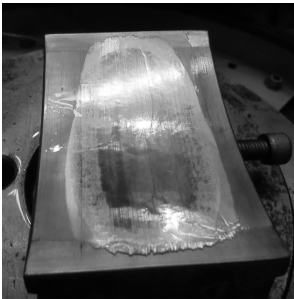


图2 上导瓦烧瓦

1.2 设备相关结构

本次发生烧瓦事件的循泵电机额定电压 6.6 kV,额定功率 6 200 kW,额定转速 743 r/min,驱动端与非驱动端轴承均采用油浴自润滑、水冷却,润滑油为长城 46#汽轮机油。

上轴承(非驱动端)腔室润滑油循环路径如图 3 所示。

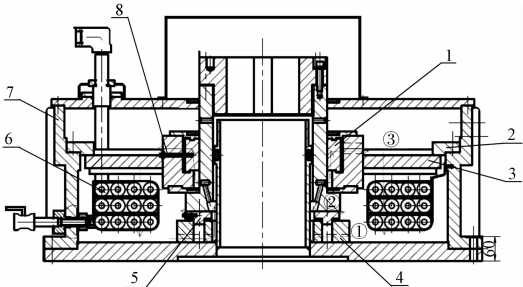


图3 上轴承腔室润滑油循环路径

1—导瓦;2—导座;3—挡油板;4—承板;5—推力瓦;
6—冷却水盘管;7—壳体;8—调节螺栓;

电机运行时润滑油在压差作用下从承板下方进油槽进入油孔(路径①),并沿油路向上对所经轴承进行润滑(路径②),最后经冷却水盘管排入腔室下部(路径③)。

非驱动端包含推力轴承与径向导轴承,发生烧瓦事件的径向可倾瓦导轴承位于图 3 上部位置,共有 6 块导瓦,由调节螺栓控制其与轴的间隙在 0.10 mm ~ 0.15 mm 之间,材料为巴氏合金^[6]。

2 基于 FTA 的事件分析

故障树分析(FTA,Fault Tree Analysis)技术由美国贝尔实验室开发,采用逻辑的方法来分析系统的安全性、可靠性、维修性和保障性,具有直观、逻辑性强的特点,既能作定性分析又能用于定量分析,目前广泛应用于核工业、航空、航天、机械、电子、兵器、船舶、化工等领域^[7]。

2.1 故障树的建立

根据此次循泵电机导轴承烧瓦的实际情况并参考一般滑动轴承烧瓦原因,采用 FTA 的分析方法画出故障树,示意图如图 4 所示。

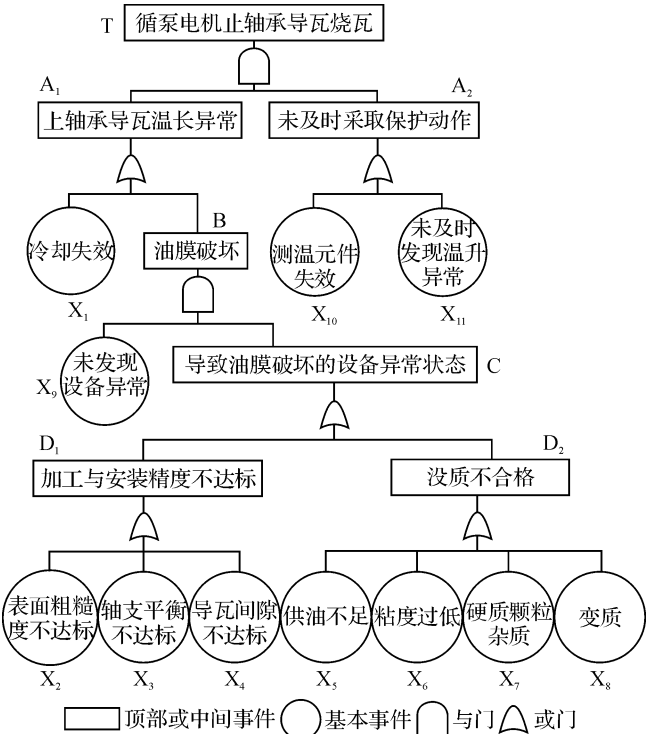


图4 烧瓦事件的故障树

T(循泵电机上轴承导瓦烧瓦)——顶部事件; A_1, A_2, B, C, D_1, D_2 ——中间事件; $X_1 \sim X_{11}$ ——基本事件

对于该故障树中的各基本事件,分析其单独发生故障时可能产生的后果如下:

X_1 (冷却失效)——电机轴承冷却水失效可能导致润滑油温升过高,从而其粘度降低,承载能力减小,最终引起烧瓦;

X₂(表面粗糙度不达标)——电机转轴或导瓦承压面表面粗糙度不达标会影响运行时导瓦与轴的间隙,并且可能导致工作面的疲劳损坏而产生金属碎屑,破坏油膜;

X₃(轴动平衡不达标)——转轴动不平衡会影响运动精度,当轴线偏移较大时,轴可能与导瓦接触而引起烧瓦;

X₄(导瓦间隙不达标)——导瓦与轴的间隙过大时会影响油膜的建立,而间隙过小容易使轴与导瓦直接接触而引起烧瓦;

X₅(供油不足)——设备得不到有效润滑,油膜难以建立,导致烧瓦;

X₆(粘度过低)——润滑油粘度过低时油膜承载力不足,可能引起烧瓦;

X₇(硬质颗粒杂质)——硬质颗粒杂质会破坏油膜(最小厚度 0.02 mm~0.05 mm,张口 0.04 mm~0.08 mm)、刮坏瓦面,导致烧瓦;

X₈(变质)——润滑油变质,可能降低本身承载能力,也可能产生杂质而影响油膜的建立;

X₉(未发现设备异常)——若上述导致油膜破坏的设备异常情况未被发现,则电机在恶性环境下运行,最终发生烧瓦事件;

X₁₀(测温元件失效)——测温元件失效时不能正确显示轴承当前温度,尤其在轴承温升已经出现异常而不能及时反馈的情况下会导致严重后果;

X₁₁(未及时发现温升异常)——若轴承温升异常而不能及时发现并制止,则最终会导致烧瓦事件。

2.2 故障树的分析

对于该故障树,由布尔代数法求其最小割集,有

$$T = A_1 \cdot A_2 =$$
$$(X_1 + B) \cdot (X_{10} + X_{11}) =$$
$$(X_1 + X_9 \cdot C) \cdot (X_{10} + X_{11}) =$$

$$X_1 X_{10} + X_1 X_{11} + X_2 X_9 X_{10} + X_3 X_9 X_{10} + X_4 X_9 X_{10} +$$
$$X_5 X_9 X_{10} + X_6 X_9 X_{10} + X_7 X_9 X_{10} + X_8 X_9 X_{10} + X_2 X_9 X_{11} +$$
$$X_3 X_9 X_{11} + X_4 X_9 X_{11} + X_5 X_9 X_{11} + X_6 X_9 X_{11} + X_7 X_9 X_{11} +$$
$$X_8 X_9 X_{11} \tag{1}$$

可得到式(1)中的 16 个最小割集。

该故障树是一个单调关联系统,从定性的角度出发,可用下式计算各基本事件的结构重要度系数 I:

$$I_i^{\Phi} = \frac{1}{2^{n-1}} n_i^{\Phi} \tag{2}$$
$$n_i^{\Phi} = \sum_{2^{n-1}} [\Phi(1_i, X) - \Phi(0_i, X)]$$

式中:I_i^Φ—第 i 个基本事件的结构重要度;n—系统所含基本事件的数量;Φ(1_i,X)与 Φ(0_i,X)的值只能为 0 或 1。

结合该故障树的最小割集对其求解^[8-9],结果如表 1 所示。

表 1 各基本事件结构重要度系数

基本事件	结构重要度系数 I
X ₁	(3×2 ⁷ +3)/2 ¹⁰
X ₂	3/2 ¹⁰
X ₃	3/2 ¹⁰
X ₄	3/2 ¹⁰
X ₅	3/2 ¹⁰
X ₆	3/2 ¹⁰
X ₇	3/2 ¹⁰
X ₈	3/2 ¹⁰
X ₉	(3×2 ⁷ -3)/2 ¹⁰
X ₁₀	(3×2 ⁷ -1)/2 ¹⁰
X ₁₁	(3×2 ⁷ -1)/2 ¹⁰

根据表 1,可知各基本事件的结构重要度为:

$$I_1 > I_{10} = I_{11} > I_9 > I_2 = I_3 = I_4 = I_5 = I_6 = I_7 = I_8$$

从结构重要度的角度来看,与人有关的基本事件(X₉,X₁₁)对于顶部事件的影响大于设备本身的许多异常状态。

结合对该事件的原因调查,得到各基本事件的发生情况如表 2 所示。

表 2 各基本事件调查情况

基本事件	调查情况	是否发生
冷却失效 X ₁	根据循泵试转期间的情况来看,电机冷却水流量维持在 70 m ³ /h~80 m ³ /h(要求大于 60 m ³ /h),上推力轴承、下轴承与定子绕组温度正常,故排除冷却失效的影响。	否
表面粗糙度不达标 X ₂	该电机已通过验收,表面粗糙度是达标的。	否
轴动平衡不达标 X ₃	该电机已通过验收,轴动平衡是达标的。	否
导瓦间隙不达标 X ₄	拆盖检查测得电机转子位置符合要求,轴的安装精度是达标的;但部分导瓦调节螺栓的锁紧螺钉未放置在锁紧孔内,调节螺栓失效,很可能导致运行时导瓦与轴的间隙不达标。	是
供油不足 X ₅	该循泵在试转期间能稳定运行 30 min,说明电机轴承供油回路通畅,不存在供油不足的情况。	否
粘度过低 X ₆	该事件后对上轴承室润滑油取样化验,40℃时运动粘度为 43.37 mm ² /s(控制标准 41.4 mm ² /s~50.6 mm ² /s),符合要求。	否
硬质颗粒杂质 X ₇	拆盖检查时在上轴承室发现大颗粒杂质,可能是清理不足所致;化验结果显示颗粒度达 NAS15 级(控制标准≤8 级)。	是
变质 X ₈	检查时发现上轴承室有大量油垢,经分析认为是气相防锈油放置过久(超过半年有效期)而变质形成,在电机运行时能悬浮在润滑油中,破坏油膜,引起烧瓦。	是

(续表)		
基本事件	调查情况	是否发生
未发现设备异常 X_9	调试人员在启动电机前的检查条件有限,未能开盖检查电机轴承室,故未发现这些导致油膜破坏的设备异常状态。	是
测温元件失效 X_{10}	经过事件后的现场检查,发现测温元件本身无异常,且安装无误。	否
未及时发现温升异常 X_{11}	从图1可见,在烧瓦之前的较短时间内,轴承温度曲线已经陡升,但温度并未达到报警值。主控操纵员关注系统较多,不可能一直关注循泵电机趋势;当温度过高而发出了报警,操纵员也是在一定时间后才注意到,此时早已错过制止时间,电机在停止过程中温度一直上升到120℃,最终上导轴承烧瓦。	是

通过上述分析,可以得出引起此次烧瓦事件的原因:上轴承导瓦调节螺栓失效致使导瓦间隙不达标,且润滑油本身变质、混入硬质颗粒杂质,共同影响了油膜的建立、破坏了导瓦承压面,使电机工作环境恶化;而更为重要的因素是:这些异常状态事先没有得到完全检查,且出现烧瓦趋势时又不能及时被发现并制止,最终随其自由发展而导致上导轴承烧瓦。

3 针对分析结果的事件处理

由上述 FTA 可知,基本事件 X_4 、 X_7 、 X_8 、 X_9 、 X_{11} 的同时发生必然导致顶部事件的发生,因此在后续处理过程中,应特别注意对这些因素的预防:

(1)放空不合格的润滑油,对电机上轴承室进行吹扫、清理,去除所有油污、杂质;

(2)拆除烧毁的导瓦并安装新瓦,在复装的过程中,针对基本事件 X_4 (导瓦间隙不达标),确保轴的位置符合要求,同时由调节螺栓将导瓦游隙调到 0.14 mm~0.15 mm(复装要求高于 0.10 mm~0.15 mm 的设计值,整个过程用塞尺控制);

(3)针对基本事件 X_7 (硬质颗粒杂质)、 X_8 (变质),更换新的润滑油(事先化验,确保油质合格),先对上轴承室进行冲洗(上轴承室已经清理过,这次冲洗是为了将残余杂质的可能性将到最低),待冲洗完成后将润滑油加注至要求液位,整个过程加强异物防范;

(4)在以上拆卸、清理、回装的过程中,针对基本事件 X_9 (未发现设备异常),密切关注电机状态,控制导瓦间隙、润滑油油质,保证冷却水供应,检查相关测量元件,并在电机试转前再一次检查,确保电机状态正常,具备启动条件;

(5)该循泵电机再次启动过程中,针对基本事件 X_{11} (未及时发现温升异常),在主控计算机画面上严格监控上轴承温度趋势,并在现场频繁测量电机振动与就地温度,做好随时停止电机运行的准备。

通过以上措施,电机在数小时的试转过程中表现良好,轴承温度稳定,证明电机已回复正常状态,此次烧瓦事件圆满解决。

4 经验总结

以本次循泵电机烧瓦为例,对于该类事件,工作人员可根据如下步骤进行分析、处理与预防:

(1)对事件发生过程进行梳理调查,并检查相关设备(测量定转子气隙、导瓦间隙等数据和检查瓦面),确认故障情况;

(2)在事件调查的基础上,从 FTA 角度出发确立烧瓦的顶部事件、中间事件以及可能出现故障的一系列基本事件,包括设备本身的状态($X_1 \sim X_8$ 、 X_{10})与引起故障发生的其他因素(X_9 、 X_{11}),并建立这些事件间的逻辑关系,最终画出该事件的故障树;

(3)对该故障树进行分析,计算各基本事件的结构重要度并排序,结构重要度高的因素在后面的步骤中需重点关注;

(4)根据事件调查结果分析各基本事件发生与否,然后采取处理措施,针对已发生故障的基本事件重点处理(X_4 、 X_7 、 X_8 、 X_9 、 X_{11});

(5)对于暂未发生的其余基本事件(X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_5 、 X_6 、 X_{10}),由于有导致顶部事件发生的可能,工作人员在从事预防工作时仍需注意。

除了在末端治理,部分基本事件还可从上游进行保障。例如 X_{11} (未及时发现温升异常),从控制系统的角度来讲尚有改进空间:由于循环水泵跳泵对反应堆有影响,系统监测到上轴承温度过高时不直接令其跳泵,而是以报警的方式通知操纵员根据实际情况进行干预,但从这次烧瓦事件来看,轴承从温升异常到触发高一报警、再到操纵员注意到报警信号而采取干预,为时已晚;本研究建议,控制系统可以在温度值报警之

(下转第 1262 页)

本文引用格式: