

高压电动机磁性槽楔整治措施的应用

文/中国石油四川石化有限责任公司 敬 果

炼化生产装置数起6 kV高压电动机出现定子绕组槽楔脱落事故，排查后发现多数采用磁性槽楔的高压电动机存在类似问题，进行故障原因分析后，结合现场实际生产运行情况，制订了隐患全面排查整治计划。同时进一步提出预防措施并持续加强关注度，以保障设备的正常运行。

磁性槽楔作为节能降耗技术应用在电动机上有很多优点，可以提高电动机的效率，降低温升，减小电动机振动和降低电磁噪声等。然而，工矿、炼化等企业里的电动机在实际运行中，由于磁性槽楔材质脆、固定性能差，容易出现松动脱落，降低了电动机的运行可靠性，同时增加了检修维护的难度和成本，6 kV高压电动机尤为突出。四川石化以近期连续发生的高压电动机故障实例分析磁性槽楔存在的问题，为彻底消除电动机存在的类似风险隐患，开展全面整治计划，并根据电动机的实际运行状况落实相应措施。

磁性槽楔存在的问题

1. 问题概况

自2018年9月中旬开始，四川石化公司芳烃、乙烯等生产装置数台6 kV高压电动机在运行中因定子绕组槽楔脱落、损坏等短路接地而击穿绝缘，零序电流保护动作，导致转机故障停运。将电动机解体后发现，普遍存在定子绕组局部有放电灼烧痕迹、槽楔压条多处磨损脱落，部分槽楔松动、上翘和中空等，转子表面有明显的刚蹭痕迹，部分定转子端部及定、转子气隙中有金属性粉末等。

经核实统计，这些高压电动机运行至今5年左

右，功率均在1 000 kW以上，为YB、YA和TAW型号等，生产日期是2011年，制造商是南阳防爆集团股份有限公司，定子槽楔均为磁性材料。在后续组织对全公司南阳高压电动机磁性槽楔全面排查过程中，多数槽楔也存在上述或多或少的问題。

2. 原因分析

根据收集的技术资料和多家企业的相关事故报告显示，使用磁性槽楔的高压电动机，都曾先后出现磁性槽楔局部甚至大面积磨损、松动脱落等现象，造成事故停机，给安全生产带来了极大的威胁。磁性槽楔主要是由玻璃纤维布、环氧树脂、铁磁材料、固化剂和其他添加剂采用压制方法制作而成，强度本身偏低。从实际脱落的槽楔裂面看出，纵向纤维长且密、无横向纤维，说明槽楔纵向强度高，横向强度低，分布不均匀。

结合本公司目前的实际情况分析故障原因，主要有以下几个方面：

1) 磁性槽楔磨损、脱落的根本原因是生产质量不良或装配工艺不当。部分电动机铁心表面槽楔翘角、侧偏、缺损、粗糙及毛刺等，槽楔与绕组、铁心槽壁之间局部没有绝缘漆的粘附痕迹，有的槽楔与铁心之间不紧密、空鼓等，这些现象表明槽楔在制造和安装过程中，工艺或质量可能控制不

到位。

2) 机械外力腐蚀磨损。电动机在运行时,槽楔在交变主磁通和漏磁通的作用下,受到双倍工频的电磁拉力。拉力的大小取决于槽楔材质的磁导率,如果某根槽楔在槽内松动,在交变的磁拉力及力矩的作用下以双倍工频频率振动,定子铁心硅钢片和槽楔面不断互相磨损,振动加大产生的磨损加速了固有绝缘缺陷的劣化,长期将导致槽楔局部松动脱落,与转子外表面相互摩擦刚蹭,磨损槽楔,严重的甚至磨成粉末。

3) 高温导致槽楔老化。因定子绕组上的交变磁场,槽楔和铁心产生磁滞和涡流损耗,包括定转子的铜损、铁损和杂散损耗都会引起电动机发热、温度升高,槽楔所含的绝缘漆和固化剂逐渐老化,强度降低,性能劣化,引起槽楔凸起不平或缺损。如果电动机经常运行在满载或超载状况,电动机发热更为严重。

根据排查情况,出现问题的电动机均为该制造商于2011年前后批次生产,按照电动机的设计使用年限应达到至少10年以上,在使用期间内出现的设备质量问题,不排除当年的制造规格、生产工艺和质量验收等标准不高的可能性。另外,这些电动机自2012年陆续投运至今,因运行工况和工作环境的差别,在机械外力腐蚀和高温老化同时存在、相互影响的作用下,电动机磁性槽楔的损坏程度也不完全相同。

方案选取

虽然磁性槽楔能起到一定的节能降耗、降噪减振等作用,也是以后电动机制造的趋势,但是从目前磁性槽楔电动机的运行情况看来,磁性材料强度偏低,存在脱落破损造成定子绕组局部对地放电、绝缘损坏的重大隐患。因此,为保证转机的安全可靠运行,应结合实际生产,利用检修时机检查槽楔,将其更换为高强度的磁性槽楔或非磁性槽楔。

高强度导磁板加工制造的磁性槽楔,如MJ-3342、MJ-3352具有较高的密度和机械强度,但是由于具有较好的导磁性能,会受到电磁拉力,长时间运行依然可能出现槽楔松动直至脱落的现象。如果采用非导磁性材料的槽楔,原设计交变磁场会改变,电动机铁损增加,功率因数降低,电动机运

行温度上升,同时振动增大,影响电动机的稳定运行。因此,经对以上两种方法的综合评估、权衡,考虑电动机的运行负载并非长期处于较高工况,且多数均有备用机组,最终采用将6 kV高压电动机磁性槽楔更换为非磁性槽楔的方案。

整改措施

1. 概况

全公司有300余台南阳高压电动机采用磁性槽楔,从2018年9月起开始组织相关部门对电动机进行抽查,截至2019年1月底累计排查完成53台,发现槽楔存在局部老化、松动、断裂和缺损等现象的有17台,比例高达32%,由此可见磁性槽楔缺陷普遍存在。为彻底消除磁性槽楔对电动机安全运行的潜在风险,有必要及时采取相应治理及整改措施。

2. 整改原则

1) 磁性槽楔排查工作和更换工作同步进行,在排查过程中发现有磁性槽楔缺陷的,直接安排更换;处于完好状态的磁性槽楔,需经厂家技术人员鉴定继续安全运行的年限,可暂不更换;前期抽查过程中发现磁性槽楔缺陷且已由检修人员进行了局部修补的,优先安排更换;工艺流程上关键、重要的电动机优先安排更换。

2) 磁性槽楔更换步骤主要包括:将槽楔用铲刀“从上到下”逐槽清理掉,每次剥离厚度不超过0.5 mm,将铁心燕尾槽中的绝缘漆等清理干净,并用同规格槽楔试插入。每去掉一根槽楔,用500~1 000 M Ω 兆欧表进行绝缘电阻测量一次,绝缘电阻大于1 M Ω 。更换的非磁性槽楔材质为3 240层压环氧玻璃布板,并在槽内涂刷F级快干树脂,在常温下固化。

3) 整台槽楔更换清理完成后,测量电动机绝缘电阻和直流电阻,并进行交流耐压试验,交流试验电压为1.5倍额定电压,保压1 min不击穿,如果有绝缘击穿的直接更换绕组,并重新进行浸漆、烘干等。试验合格后进行空载试验和带载试验,对电动机温度、声音和振动等进行测试。

4) 排查期间,对在运电动机采用ESA状态在线监测与故障诊断系统进行在线监测,利用高速采集及数据分析、电压和电流信号特征分析方法对旋转设备进行故障诊断。监测电动机的工作状态,反映

设备运转状况，同时监测电源的输出情况，对电动机进行全面系统监视诊断。

5) 更换槽楔后，由厂家对在运电动机进行在线监测。通过测量电动机电压谱、电流谱、振动频谱和轴承频谱等，进行电动机转子故障分析、转子气隙与磁偏心分析、交流电动机定子分析、谐波与功率分析及定子绕组匝间短路、三相不平衡、绝缘老化受潮、气隙不均、转子断条、松动及振动等原因分析，综合评估电动机的运行状况。

检测措施

1. 更换槽楔前的检测

以第一循环水场2[#]、6[#]、9[#]和10[#]冷却风机为例，电动机额定电压6 kV，额定功率200 kW，位于25 m高冷却水塔顶平台，负载风机为循环水冷却、散热，工作环境较为潮湿。这些电动机自4月夏季开始，一直处于运行状态，对其进行ESA状态在线监测，结果及问题描述如下。

1) 4台电动机均出现定子绕组松动问题的特征，对应的问题频点及信号强度见表1，四台冷却

风机的信号强度相似，超过了故障判定的基准值-65 dB，推测可能与该批次的电动机制造工艺有关。电动机在定子绕组松动情况下长期运行，导致绕组碰摩、并绕断线和绝缘损坏等问题。冷却风机的不平衡问题的特征频点如图1所示。

表1 冷却风机的定子绕组松动问题频点

名称	定子绕组松动问题频点及信号强度		定子槽数
2 [#] 冷却风机	845.642 Hz	-51.855 dB	36
	945.740 Hz	-45.223 dB	
6 [#] 冷却风机	845.337 Hz	-49.853 dB	36
	945.129 Hz	-50.495 dB	
9 [#] 冷却风机	844.421 Hz	-50.924 dB	36
	944.519 Hz	-50.520 dB	
10 [#] 冷却风机	846.558 Hz	-49.881 dB	36
	946.655 Hz	-47.969 dB	

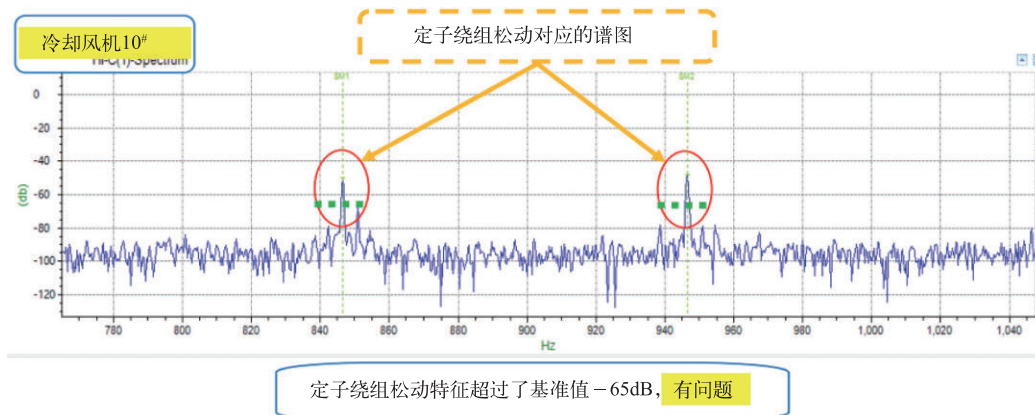


图1 冷却风机的定子绕组松动问题的频谱图（以10[#]冷却风机为例）

2) 10[#]冷却风机出现了较明显的转频特征，另外3台冷却风机可观测到一定的转频特征，对应的问题频点及信号强度见表2，其中10[#]冷却风机的1x转频超过了故障判定的基准值-65 dB，推测存在不平衡问题，其他3台冷却风机的转频特征均低于故障判定的基准值-65 dB，目前处于正常运行状态。设备长期在不平衡下运行易导致轴承损伤、轴承跑套等问题。冷却风机的不平衡问题的频谱图如图2所示。

表2 冷却风机的不平衡问题的特征频点

名称	1x 转频及信号强度	
2 [#] 冷却风机	24.883 Hz	-68.736 dB
6 [#] 冷却风机	24.902 Hz	-77.352 dB
9 [#] 冷却风机	24.844 Hz	-73.104 dB
10 [#] 冷却风机	24.888 Hz	-64.433 dB

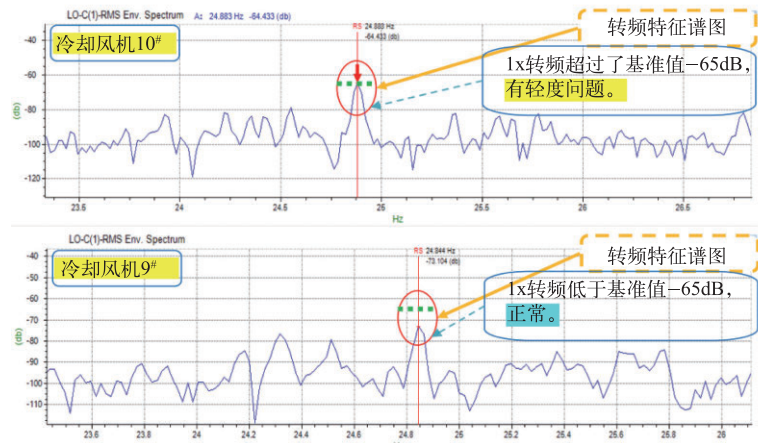


图2 冷却风机的不平衡问题的频谱图（以9[#]、10[#]冷却风机为例）

3) 4台冷却风机均出现了负载振荡疑似问题的特征，对应的问题频点及信号强度见表3，在2.051 Hz/7.930 Hz的特征频点相似、负载相同，推测该特征可能与管路工艺导致的流量或压力脉动、皮带或减速机的负载特征有关。电动机长期处于负载振荡状态，导致转子碰摩、绝缘劣化、偏心和轴承损坏等问题。负载振荡疑似问题对应的频谱如图3所示。

表3 负载振荡疑似问题频点

名称	疑似问题频点及信号强度		较大可能性的原因
2 [#] 冷却风机	2.051 Hz	-49.556 dB	管路工艺、负载特征
	7.930 Hz	-40.080 dB	管路工艺、负载特征
6 [#] 冷却风机	2.051 Hz	-48.521 dB	管路工艺、负载特征
	7.930 Hz	-42.570 dB	管路工艺、负载特征
9 [#] 冷却风机	2.051 Hz	-57.800 dB	管路工艺、负载特征
	7.930 Hz	-44.037 dB	管路工艺、负载特征
10 [#] 冷却风机	2.051 Hz	-49.556 dB	管路工艺、负载特征
	7.930 Hz	-40.080 dB	管路工艺、负载特征

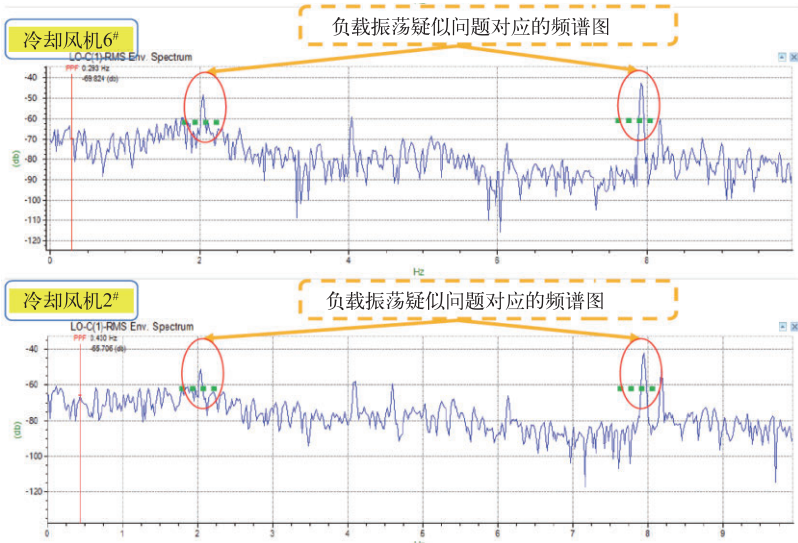


图3 负载振荡疑似问题对应的频谱图（以2[#]、6[#]冷却风机为例）

结合本次检测的第一循环水场4台高压电动机,以及之后陆续检测的重催、芳烃、乙烯、低密和乙二醇等装置23台高压电动机,说明电动机内部出现了定子绕组松动、不平衡和负载振荡等问题,很可能与磁性槽楔有关,为避免影响设备的正常运行,需尽快更换电动机磁性槽楔。

2. 更换槽楔后的检测

以乙烯装置锅炉给水泵P-1940B为例,电动机额定电压6 kV,额定功率1 800 kW,位于乙烯装置10区域,为锅炉汽包提供上水,工作环境较好。该电动机在2019年1月下旬运行期间因磁性槽楔脱落,零序保护动作,故障停机。更换电动机磁性槽楔试验合格后,投入正常运行,由厂家技术人员对其运行情况进行检测和评估。

1) 电动机在线综合诊断系统测试分析,采用测量仪器AT PRO2电动机动态故障诊断仪,分析出波形。

由波形得出,转子断条、低频分析和高频分析无故障波形。谐波分析中5次电流谐波为1.5%,5次谐波为负序谐波,易造成电动机温度升高,但是电

源谐波总体低于标准值,电动机可以正常运转。在日常巡检工作中,需持续关注电动机温度。

2) 振动、轴承包络值及轴承状态测试分析,采用SKF轴承检测仪,电动机振动测试见表4。

表4 电动机振动测试

	轴伸端			非轴伸端		
	水平	垂直	轴向	水平	垂直	轴向
振动值 (mm/s)	1.7	1.7	0.8	0.8	0.6	—
加速度 (mm/s ²)	11.7	9.0	9.6	11.5	12.6	—
加速度包络值	—	—	—	—	—	—

由图8~图11的波形得出,轴伸端水平方向最大振动幅值为1.7,没有超出标准,振动正常,0.5倍与1.5倍处有轻微润滑不良;垂直方向最大振动幅值为1.7,没有超出标准,振动正常。非轴伸端水平方向最大振动幅值为0.8,没有超出标准,振动正常,0.5倍与1.5倍处有轻微润滑不良;垂直方向最大振动幅值为0.6,没有超出标准,振动正常。

3) 有关温升高方面的检测情况,同型号P-1940B与P-1940S(未更换槽楔前)进行对比见表5。

表5 同型号电动机温度

(单位:℃)

名称	线圈 U 1相	线圈 V1相	线圈 W1相	轴承1	轴承2	轴承1 (DE侧)	轴承2 (DE侧)
P-1940B	125.2	125.5	132.9	61.4	81.6	59.6	75.7
P-1940S	103.8	96.7	101.8	57.1	75.1	55.8	64.4

即两台同型号电动机在相同环境和输出功率条件下最高相差30 kW,对P-1940B机壳外表面温度

测试情况见表6。

表6 P-1940B电动机外壳表面温度

(单位:℃)

	A	B	C	D	E	F	G	前端盖
左下通风	64	68	64	65	61	61	65	81
右下通风	64	68	66	68	65	73	72	83
左上通风	65	66	68	67	70	67	61	78
右上通风	68	66	70	67	64	63	59	85

由表5、表6可以得出,电动机内部温度最高达到133℃,但机壳外表面最高温度只有73℃,分析疑似散热不充分,结合此电动机在更换绕组时是带基座进行VPI真空压力浸漆工艺处理的,机壳内外表面均涂上一层比较厚的绝缘漆,判断温升高的原因是机壳内外表面的绝缘漆涂层影响了散热所致。

通过以上三个方面的检测分析得出,乙烯锅炉给水泵P-1940B电动机振动、噪声等正常,运行状况较好,但是在与同型号未更换槽楔前的电动机相比,温度有所上升,况且温升的问题是在更换磁性槽楔后才出现的,因此需加强持续观察运行。

预防措施

在公司机动管理部门的总体协调组织下，各部门根据实际生产运行情况，制订属地范围内的南阳高压电动机磁性槽楔隐患排查整改计划和方案，组织维保单位和厂家对电动机进行更换磁性槽楔。截至目前，已完成95%以上高压电动机磁性槽楔整体更换工作。其余局部更换或状况比较好的，利用日后检修期间再进行整体更换。

1. 更换后存在的问题

根据目前的观察发现，更换磁性槽楔后，与同型号电动机或与本台之前的运行情况对比，部分电动机在温升、振动和噪声等方面有所增加。这主要是由于电动机定子绕组采用非磁性槽楔后，由于磁导率降低，引起齿槽下的气隙磁阻变化，加大了气隙磁场中的高次谐波分量，造成电动机表面损耗和脉振损耗增大，电动机温升增加，效率下降，振动和噪声加剧，导致电动机的整体电气性能降低。

2. 电动机预防措施

针对上述发现的问题，已更换磁性槽楔的6 kV高压电动机。在日后运行及维护工作中，要重点做好以下几个方面的防范和整改措施。

1) 按照公司电气设备巡检作业指导书和标准化工作手册等管理制度，严格落实设备巡回检查工作。发现电动机振动、温度及声音异常时，及时采取相应措施。

2) 工艺负载调整时，应避免高压电动机频繁起停。冷态、热态起动时间间隔和次数应严格按电气管理规定及运行规程执行。

3) 严格执行机泵定期切换制度，切换间隔周期为两个月，对进入备用状态的电动机要定期巡检、维护，确保设备完好备用。

4) 已更换磁性槽楔的高压电动机，应定期、阶段性地将更改前后电动机的实时运行参数进行对比

分析，尤其是重点关注夏季大负荷期间电动机的温度及温升变化等。

5) 对本次整治方案中未进行磁性槽楔整体更换的高压电动机，应择机或利用检修期间进行解体检查，如发现槽楔有损坏、脱落等前文描述的异常现象，应立即进行更换。

6) 利用ESA监测系统，定期且有针对性地对重要、关键电动机实施在线监测，通过频谱分析电动机的运行状况是否受负荷调整、运行时数和外网晃电等因素的影响，对其状况进行预判，及时开展预防性维护。

7) 充分利用公司设备管理一体化平台在线监测电动机状况，包括状态报警、轴承报警、机封报警、润滑报警、小修报警、大修报警和切换报警等，及时开展电动机定期维护工作。

8) 高压电动机应严格按照电气设备预试、检修等规程进行定期检查维护，定期进行小修、大修等检修工作。

结束语

炼化企业生产装置出现多起电动机磁性槽楔脱落、破损等问题，尤其是当发生在6 kV电压等级以上的高压电动机上时，对设备安全运行和工艺流程的影响较为严重。因此，公司在机动、生产、安全、检修及厂家等多个部门的统一协调配合下，对高压电动机采用磁性槽楔的风险隐患进行了一次大规模、大范围的整治，取得了良好的效果，值得在同行业中进一步推广和实际应用。建议如有采用磁性槽楔电动机的企业，应及时通过开展设备检查、在线检测及更换整治等措施，彻底消除电动机自身存在的质量缺陷，提高转动设备的可靠性，实现装置的安全生产、平稳和长周期运行。EA

声 明

《电气时代》杂志唯一投稿渠道

登录电气时代官网 www.eage.com.cn，点击“我要投稿”

咨询电话：010 - 68993981