

大型船用直流电机故障模式 现场分析与对策

胡国葆

(中国船舶重工集团公司七院第七一二研究所 武汉 430064)

摘要: 针对设计和制造两个环节,对大型船用直流电机故障模式作了比较系统的分析,着重介绍了针对不同故障模式所采取的措施,具有很强的可操作性,为今后开展该电机的可靠性设计和分析工作具有直接参考价值和促进作用。

关键词: 直流电机 可靠性 故障模式 对策

1 引言

开展大型船用直流电机的可靠性设计与分析工作,取得了很大进展,但要进一步深入下去还需要课题组的设计人员付出艰辛的努力。在设计、制造、使用、后勤保障的整个寿命期里,一些故障在不同程度不同地点时有发生。为了减少故障发生的次数,满足本设备的寿命要求,需要进一步分析本电机的故障模式,仔细查找原因,将原因查到每张图纸、每个尺寸和每条技术要求,可采取控制尺寸公差、技术要求和工艺程序等多项措施来预防故障的发生。反过来,作为设计人员,要深刻掌握每项措施所要预防的故障点,从而预测预防故障的能力,也不失为一种可取的分析方法。

为此,本人结合该电机的设计特点,把最有可能的故障模式和发生的可能原因列表汇总,并着重介绍了针对每种故障模式所采取的对策,这些对策都是有效的,即都是能够做到的。这无疑对今后的可靠性工作具有一定的促进作用。

2 定子

定子的故障模式主要是由于绝缘问题和机械变形引起的,主极和换向极极身绝缘材料是电机的主要绝缘材料,不可随意更改。一旦发现绝缘电阻很低,将导致返工重制,会造成经济损失和时间的浪费,不可能经过某种处理而进行回用。定子的机械变形是指机座、端盖、轴承、刷架的丝米级变形,它们中的任一部分变形,将直接影响整个定子的尺寸链。设计时,要充分考虑受力情况,受力面加工精度和裕度。在下列情况下均应考虑加工裕度:

(1) 焊接;(2) 整圆中的并合面加工;(3) 密封;(4) 定位配合面;(5) 工艺过程中使用。

定子故障模式分析见表 1。

收稿日期: 2000-08-09

表 1 定子故障模式分析

异常现象	可能原因	对 策
- 励磁电流偏大或偏小或不稳定 - 局部过热	- 主极气隙偏大或偏小 - 励磁绕组匝间短路 - 励磁绕组引出线接头和连接到出线盒接头电接触不良 - 励磁绕组对地绝缘损伤	1、用塞尺检测主极气隙，误差应不大于$\pm 0.2\text{mm}$； 2、合理设计主极调整垫片，一般三种，使垫片的组合值符合需要； 3、用双臂电桥测量励磁绕组直流电阻值，若各绕组的总电阻值比理论值超差 10%，再比较各绕组之间的电阻值，分析处理电阻值差异较大的绕组； 4、用规定电压等级的摇表检测励磁绕组对地绝缘电阻值，一般应不小于 $50\text{M}\Omega$； 5、电接触面搪锡； 6、检查母线、电缆接头处螺栓是否松动，止动垫片的作用是否到位，电接触面是否有异物。
- 母线“放炮” - 母线“电火”	- 母线间绝缘损伤 - 母线间电气间隙不足	7、母线间垫块数量不足，母线易变形，绑扎垫块用$\Phi 3$玻璃丝绳绑扎到填平该零件凹槽为止； 8、严格检查电气间隙，均应保证 10mm 以上； 9、母线应用 0.14×25 桐马粉云母带 570 半叠包二次；再用 0.1×25 无碱带 ET100 平包一次，浸漆烘干； 10、除机座并合面处的过渡母线用螺栓连接外，其余母线接头采用氩弧焊焊接，再用 45% 银基焊料 HL303 补焊； 11、母线采用螺栓连接时，防止螺栓过长而损伤母线绝缘； 12、磁路系统接线完毕后应按标准要求做耐压试验。
换向极绕组尺寸超差，影响极窗尺寸	- 线规大，弯制工艺性差 - 首尾匝受力挤出	13、合理选择线规，见 GB5584.1~4，尽量避免扁绕； 14、整形、采用工装夹具，浸漆烘干牢固后再松开； 15、采用几根规格小线合并； 16、首尾匝引出头采用一根母线，便于加工，所有连接处均采用银铜焊，焊缝磨平。
主极绕组尺寸超差，影响极窗尺寸	- 绕组工艺系数控制较松 - 极窗布置不合理	17、合理选择线规，GB7672.1~6； 18、控制绕线拉紧力； 19、计算分析极窗布置的合理方案； 20、热压成型，VPI 烘干；
主极对地绝缘和匝间绝缘电阻低	极身绝缘和匝间绝缘损伤	21、首尾 6 匝用 0.14×25 桐马粉云母带 570 半叠包二次，提高电机起动和超载时首尾几匝因电压梯度高而受冲击力过大，破坏绝缘； 22、分析爬电距离有隐患处； 23、极身绝缘材料用 0.2 复合箔 (NMN) 6640 绕包并翻边，重点注意极身上下四角处，用适形毡填充严密或用特制立体垫角安装，垫角要坚固或质软适形而不破裂； 24、绕线圈时，换拉处垫 0.2 复合箔 (NMN) 6640；

		25、接线片放入绕组时, 应可靠绝缘, 接线片焊接时, 应留有空间尺寸, 防止烧坏绝缘; 26、绕组对地、绕组匝间应分别按标准做耐压试验; 27、喷防腐漆 H31—32。
• 接线错误	• 接线无线号 • 接线图有错误 • 出线盒中无标记	28、电缆线头应有标号; 29、按有关标准正确绘制原理图, 反应实际接线情况; 30、出线盒中每个填料函, 每个接头均应有接线标号, 清晰明朗, 且与原理图相符。
• 机座振动超差 • 机座变形	• 减振器选型不当 • 机座固有振动频率与转子齿频振动相近 • 机座强度、刚度设计不当, 应力安全系数选择偏小。	31、减振器的安装条件、隔振效果、适用范围是选型的关键; 32、通过各种途径模拟计算固有振动频率和振幅, 避免出现共振现象; 33、按工程力学和材料力学的原理进行机座的受力分析, 并进行强度、刚度的验算; 34、根据应力—强度干涉理论, 收集同类电机有关信息, 用概率统计法合理选取应力安全系数, 这是非电子设备可靠性预计技术的发展趋势; 35、合理设计筋板, 避免开断影响应力分布; 36、考虑消应力处理方式: 高频振动台消振。
• 机座电磁屏蔽性能差	• 屏蔽材料的选取和安装方法不正确 • 机座不合理开孔 • 机座开孔数量多 • 出线盒里旁路电容失效 • 接地与搭接方式不妥	37、选择屏蔽效能高、清晰度高、强度合适的屏蔽玻璃作为视察窗, 配以导电橡胶安装, 安装面应达到一定的清洁、光洁度要求; 38、尽量少开孔、近间距开孔和大尺寸开孔, 遵循 EMC 设计要求; 39、出线盒里的旁路电容主要消除电机内部由于各种耦合路径所产生的共模信号, 必须对地安装, 而且对防止轴电流传导到机座有好处, 安装前, 严格检查耐压等级、绝缘电阻、电容值和安装尺寸; 40、不良接地与搭接会导致机座屏蔽设计不正确的错误结论。采用低阻抗连接, 由于机座尺寸大, 接地点一般采用多点对称接地。
• 端盖密封环漏气	• 密封刀口损伤	41、设计定位销安装; 42、严格控制并合面尺寸和半环垂直度、同轴度。并合面处应留有 2mm 加工余量; 43、选用黄铜 H62 作为刀口材料, 在并合面处留 6mm 余量, 便于加工成整圆。
• 端盖变形	• 机械强度、刚度不足 • 安装定位不牢	44、采用合适的安全系数计算强度、刚度; 45、采用定位销进行水平、垂直两方面同时定位; 46、沿圆平面加筋板, 成对称扇形分布; 47、控制端盖与机座配合面要求, 不得有异物, 存放时在加工表面涂防锈油 (脂); 48、时间不充裕时, 高频振动台消应力。

续表 1

• 机座渗水	• 机座表面筋板积水 • 开孔处未密封	49、机座底部和表面各筋板形成死角均应开漏水孔; 50、采用合适的机座防护形式,开孔处均采取密封措施;
• 电刷破裂	• 碳刷质量不良 • 电刷与异物碰撞 • 电刷压力过大	51、选择碳刷时,要注意电阻系数、洛氏硬度、接触电压降、摩擦系数、磨损值、额定电流密度、允许圆周速度、使用时单位压力和电刷类别,突出问题,综合考虑; 52、安装电刷时,检查是否与其它部件碰撞,换向器表面应符合要求; 53、弹簧压力应适宜,从材质、工作圈数、低温回火处理要求、虎克系数等检查弹簧,各电刷相互之间压力差应小于 $\pm 1.5\text{N}$; 54、碳刷在刷盒中活动应灵活。
• 电机火花偏大	• 电刷装配错误 • 电刷偏离电刷中心线 • 电刷牌号不对 • 换向器表面氧化膜未形成 • 换向极磁场强弱不适当 • 旋转电势不能抵消电抗电势	55、各极下电刷在换向器圆周上应分布均匀,刷距容许偏差不大于 $\pm 1\text{mm}$; 56、调整并检测电刷是否在电刷中心线上,并刻作记号; 57、在保证电刷牌号正确的情况下,空载研磨碳刷接触表面,同时换向器表面氧化膜逐渐形成; 58、碳刷接触表面设计时,应注意斜倾方向与电机旋转方向的关系; 59、作无火花区试验,根据结果计算并调整换向极气隙。 60、换向器表面换向片处应倒圆角,减少尖端电弧; 61、核算电磁计算结果,调整有关参数。
• 刷架导电性能不良	• 电接触面处理工艺未到位	62、各导电板 $E_p \cdot S_{n8} \sim 10 \cdot F_m$; 63、导电环并合面处酸洗、搪锡; 64、导电片由若干片铜带 $T_{2M} - 0.2$ 制成,锡焊处用锡铅焊料 $HL\text{SnPb}39$ 焊牢; 65、刷辫与碳刷的铆钉不得开裂。
• 轴承噪声大 • 轴承温升高 • 轴承渗漏油	• 装配间隙不适当 • 轴瓦研刮不到位 • 供油温度、压力不合要求 • 轴承盖、刀口不密封	66、轴瓦先与电枢轴颈装配密合,再使轴瓦与轴承外壳密合; 67、选择润滑油牌号应考虑起动最低温度、油粘度、供油量、进油温度、压力和供油方案(高置油箱恒压强迫润滑、油泵恒压强迫润滑、油盘带油自润滑); 68、轴瓦浇铸锡基轴承合金工艺应一次到位,不应有气孔、裂纹、夹杂物、合金层薄厚不匀等缺陷; 69、轴承盖、轴承座、进出油管等焊缝处均用煤油试验其紧密性; 70、设置油温、油压传感器检测; 71、密封环刀口损伤,应更换。

3 转子

转子中令人担忧的故障模式主要也是绝缘问题所致,其中有电枢绕组匝间和对地绝缘、换向器中换向片片间和对地绝缘问题。对电枢来说,主要祸根就是毛刺,即电枢铁心嵌线槽毛刺和电枢绕组导线毛刺,另外还有均压线线组中导线毛刺。对换向器来说,主要取决于云母环压制、换向器真空灌胶密封的工艺技术。

转子故障模式分析见表 2。

表 2 转子故障模式分析

异常现象	可能原因	对 策
• 转子振动大 • 转轴挠度大	• 转子的不平衡力矩大 • 转轴材质、结构、刚度不合要求 • 轴受力不合理	1、转子精加工后做动平衡,许用不平衡力矩应根据重量、转速、转子半径、精度等级计算得出; 2、转轴为关键件,其材质、结构、刚度严格按程序文件作好入厂前把关、入厂后按工艺文件加工,加工完毕后三检、军检; 3、电机总装时,电枢轴中心线对准机座磁路系统轴中心线,防止轴偏心而产生偏心磁拉力; 4、转轴设计时应进行挠度、刚度计算,根据经验合理选取安全系数; 5、合理计算转轴与铁心支架之间的冷热套过盈配合量,套装后必须用高压酒精消除二者间的轴向应力;
• 电机火花大	• 换向器表面有缺陷 • 换向器未校静平衡、未做动态成型 • 换向器设计参数不合理 • 均压线焊接不良	6、换向器表面应精加工,云母片下刻后换向片倒圆角。 7、校静平衡,做动成型,按要求超速一定时间,停车后测量径向圆跳动,其值与回转前冷态时相比不应超过 0.05mm; 8、换向器的长度、宽度、直径、换向片数、云母片厚度等参数应合理设计; 9、均压线引出头与焊接时应保证足够长度的焊缝。
• 换向器湿热试验不合格	• 绝缘工艺未到位 • 设计缺陷	10、云母环的 3° 面、30° 面、工作面、厚度应合理设计; 11、抽真空灌环氧浇注胶,加温固化成型,灌胶口用螺塞旋紧密封,并点焊防松; 12、用 F 级环氧胶涂封换向片组的两侧及压圈与套筒接合处; 13、云母环外露部分用绝缘绑扎带绑扎,半叠包二次; 14、换向器两端按要求粘经活化处理的 0.5 聚四氟乙烯薄膜; 15、换向器装配时,应根据拉紧螺杆的轴向拉力估算,规定拧紧每个螺杆的力矩值; 16、在规定部位刷环氧防霉覆盖漆二次; 17、做耐压试验,并用 5V 工频电压检查片间绝缘。
• 压圈变形 • 套筒变形	• 工艺缺陷 • 材质不当	18、锻件不得有影响性能的裂纹气孔等缺陷; 19、锻件应做调质处理,达到规定硬度;

		20、根据受力情况选用优质钢材,如 35#钢、35#GrM ₀ 钢。
• 云母环疏松,不紧密	• 压制工艺缺陷 • 材质不当	21、压制表面应光滑、无皱纹、无裂缝和无机械损伤,壁厚均匀; 22、选择材质时,应考虑绝缘、耐压强度和压制工艺的可操作性。
• 升高片断裂	• 结构不合理 • 冲击、振动,疲劳损伤	23、升高片中部没有防止冷热缩胀的缓冲弧,也可抗冲击振动; 24、升高片与并头套焊接时保证焊缝长度。
• 电枢线圈匝间短路 • 线圈对地绝缘电阻值偏低	• 匝间绝缘、对地绝缘损伤	25、电枢铁心嵌线槽、绕组铜母线应严格去毛刺,防止毛刺损坏绝缘; 26、叠包、卷包、平包绝缘,应充分考虑耐压强度,绝缘应热压成型,紧贴平整; 27、绝缘材料选用环氧单面薄膜补强粉云母带,云母层应均匀、云母厚度满足要求; 28、转子 VPI,旋转烘焙; 29、做匝间、对地耐压试验。
• 电枢线圈断路 • 均压线断路	• 并头套焊缝开裂	30、并头套焊接时,控制焊缝长度、焊接质量; 31、加强检验。

4 通风冷却系统

通风冷却系统的故障模式主要是噪声、振动值超差,令人欣慰的是可以做样机试验,根据试验结果可以调整某些参数。

通风冷却系统故障模式分析见表 3。

表 3 通风冷却系统故障模式分析

异常现象	可能原因	对 策
• 噪声值超差 • 振动值超标	• 风机电动机或风机噪声超差 • 风路非正常开口 • 风路密闭不严	1、风机电动机、风机和机组整体出厂前均做噪声、振动测试; 2、叶轮尺寸、片数、叶片倾角、风路的结构设计均应根据风机冷却风量、转速、功率、全压来计算优化; 3、做样机试验,根据试验结果调整参数; 4、风路中设补气孔时,每个补气孔装有小型圆筒式消声器; 5、风路中必须开口处,用弹性垫圈密封; 6、风机电动机底脚装有四个减振器,减少机械结构噪声、振动通过底脚传导; 7、风机电动机转子、风机叶轮及装配后的整体均作动平衡校正,最后残余不平衡力矩不得大于

		10gf·cm; 8、风阻尽量小, 尽量分配合理、避免堵风、旋风、涡流。
•冷却器携出功率偏低	• 冷却水温度不在预定范围 • 冷却器进风温度不在预定范围 • 结构松漏 • 材料质量低劣	9、设置传感器检测温度; 10、散热片和通水管簇的选料和设计要考虑材质化学成分、散热、热胀、耐蚀等性能和工艺可实现性; 11、冷却器装配后进行水压试验, 检验紧密性和结构强度;
•过滤器过滤碳粉效果差	• 滤料问题 • 结构问题	12、滤料的选型要考虑阻燃、耐高温、碳粉颗粒大小; 13、滤料用压网固定在滤架上, 应牢固; 14、安装滤料时, 注意稀疏面和紧密面的方向。
•风机电动机输出功率和相应转速偏低	• 电磁计算有缺陷 • 制造工艺有缺陷	15、按表 1、2 查找相应问题, 结合小型直流机的特点分析处理。

5 结束语

此项工作需要大量的工作经验和掌握大量的可靠性信息, 否则难以开展。随着经验和信息的积累, 可靠性工作一定有所突破。由于本人的工作经验和掌握的信息都很有限, 文中肯定存在不全面之处, 恳请同行专家提出各种意见和批评, 本人均将作为可靠性信息材料妥善收集。

参 考 文 献

- [1] 程福秀、林金铭主编.现代电机设计.机械工业出版社.
- [2] 陈世坤主编.电机设计.机械工业出版社.
- [3] 《电机工程手册》编辑委员会编.电机工程手册.机械工业出版社.
- [4] GJB1391—92.故障模式、影响及危害性分析程序.国防科工委军标出版发行部.

The Scene Analysis And The Countermeasures Of

The Failure Mode For Large-Scale Marine DC Motor

(Hu Guobao 712 research institute of CSSC Wuhan 430064)

Abstract: this paper analyses the failure mode for large-scale marine DC motor in a relatively systematic and comprehensive way aiming at two links of design and manufacture. The countermeasures aiming at different failure modes are introduced emphatically. Therefore, it provides with practical method of operation, direct effect for reference and promoting in order to develop the design and analysis of reliability activity for the motor in the days to come.

Key words: DC motor; reliability; failure mode; countermeasures.