

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.04.013

电特性检测在电机预防性检修和故障诊断中的应用研究

李 霏, 顾 含, 董庆丰

(中国卫星海上测控部, 江苏 江阴 214431)

摘要:针对异步电动机目前在预防性检修中存在的电气故障无法运用无损方式进行快速定位的问题,对电机电气参数在故障时的微弱变化进行了研究,提出了电特性检测手段,引入了潘罗斯判据配合电机静态三相平衡的评判准则,采用模糊诊断的方法对电机存在的电气故障进行了判断,实现了对电机可能存在的三相不平衡以及定子、转子绕组短路故障快速诊断;其中,采用 Simulink 软件仿真,模拟了电机故障,对该方法进行了计算验证,并在实物实验中再次验证了方法的可行性。研究结果和实验结果表明:该方法在不拆解电机的情况下实现了对电机的电气故障检测,能够显著提高故障隐患预估的质量。

关键词:电机;电特性检测;预防性维修;故障诊断

中图分类号:TM3;U665.11

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)04-0402-06

Application of electrical static characteristics testing for ship electromotor prevention service and fault diagnosis

LI Fei, GU Han, DONG Qing-feng

(China Satellite Maritime Tracking and Control Department, Jiangyin 214431, China)

Abstract: Aiming at the electrical faults existing in the preventive maintenance of asynchronous motors, the problem of rapid positioning can't be solved without any damage, the electrical parameters of motor were studied in this paper. This means to detect the electrical characteristics, introduced with the static balance three-phase motor Penrose criterion of judgment criteria, using method of fuzzy diagnosis to judge the electrical motor fault exists, cloud be achieved on the possible existence of unbalanced three-phase motor stator, and rotor winding short circuit fault diagnosis. The simulink software simulation was used to simulate the motor fault, and the method was verified by calculation, and the feasibility of the method was proved again in the physical experiment. The results indicate that this method realizes electrical fault detection of the motor without dismantling the motor case, can significantly improve the prediction quality hidden trouble.

Key words: motor; static characteristics testing; prevention service; fault diagnosis

0 引 言

目前,因电机有着,原理成熟、结构可靠、维护简便等优点^[1]。在测量船上得到广泛应用,它的性能和技术状态直接影响了船舶整体保障和技战术水平。

根据统计,电机故障中有近一半为电气故障。在长久的电机使用和管理过程中发现,电机发生转子或

定子故障时,容易导致绕组过热而被烧毁,甚至发生接地故障以及相间故障。

在当前电机电气故障的判断中,实际管理和可操作层面主要是对电流、电压、绝缘情况进行判断,预判性和精确定位性不佳。

本文将提出电机电特性检测方法,采用模糊诊断规则,运用电机模型对电机故障精确判断方法进行必要的优化。

收稿日期:2017-08-08

作者简介:李 霏(1990-),男,四川成都人,主要从事船舶机电管理方面的研究。E-mail:lf1930@qq.com

1 电机故障概率情况分析

IEEE在《IEEE Std C493-2007 (Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems)》《IEEE Std C37.96-2012 (IEEE Guide for AC Motor Protection)》中,统计与分析了1 000余台电机的技术状态,其中故障部位和故障发生的概率如表1所示^[2-3]。

表1 电机出现故障部位及概率

故障部位	异步电机/台	同步电机/台	绕组电机/台	直流电机/台	总计/台	百分比/ (%)
轴承	152	2	10	2	166	43.7
绕组	75	16	6	-	97	26.6
转子	8	1	4	-	13	3.4
轴和联轴器	19	-	-	-	19	5
电刷与滑环	-	6	8	2	16	4.2
外部设备	10	7	1	-	18	4.7
其他	40	9	-	2	51	13.4
合计	304	41	29	6	380	100

注:部分电机不止一处故障。

美国电力研究学会(EPRI)对于电机的报告中,电气故障原因占47%,机械故障原因占53%。电气故障主要为匝间、层间和相间短路绝缘问题、电机内部或外部接线盒线缆损坏,电机故障统计分布图如图1所示。

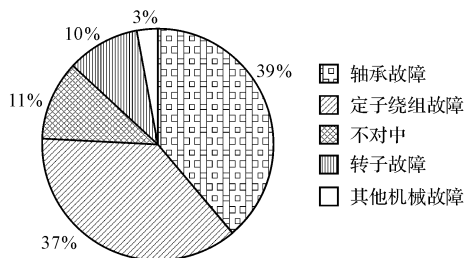


图1 电机故障统计分布图

测量船长期在远海工作,其电机工作情况相对恶劣。

通过对近8年某测量船电机故障发生情况进行统计:全船电机发生各类故障84起,其中机械故障53起,电气故障31起,如图2所示。

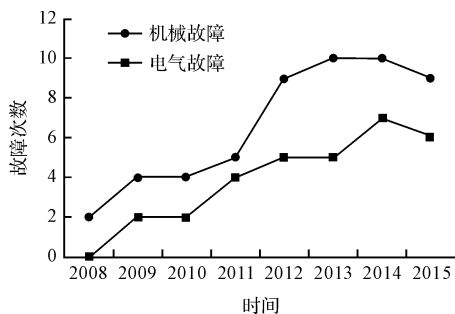


图2 某测量船2008年—2015年电机故障统计

因此,在测量船进入服役年限的中后期,预先发现故障隐患、预先进行保养检修对于提升船舶安全性、延长装备使用寿命显得尤为重要。电特性检测为解决电气故障提供了有效途径。

2 电机状态检测技术

“以可靠性为中心的维修模式(RCM)”的理念在20世纪末由欧美发达国家率先提出。该模式核心理念是装备主动维修,核心目标是提升装备可靠性^[4]。检测技术作为其中开展维修技术支撑的关键环节,逐渐演变成为应用研究方向。

预防性检修的装备管理和保障模式已经在测量船广泛运用,但缺乏相应的技术支持,导致预防性检修在实际运用中存在一定的盲目性,电机状态检测技术能够提出相应支持。

按照电机检测时所处的状态不同,主要分为静态和动态检测,更详细地划分为:电气动态检测、电气静态检测和机械动态检测3大技术^[5]。

电气静态检测和动态电气检测均是对电机的电气参数进行测量。机械动态检测则是对电机进行机械部件的检测,现在主要采用信号分析和处理方法进行,能够从机械角度判断电机的性能状态。例如,利用谱峭度特征提取进行轴承故障检测^[6]等。

3 电机电特性综合检测

电机的电特性源于美国海军电机检测、监测实际应用过程中的习惯称法,现在并没有成体系的标准定义。本文将交流电机电气静态状态下,绕组每两相之间的电阻、电感、阻抗、相角、倍频和绝缘情况等的电机技术数据组合统称为电机静态电特性。

3.1 电特性检测与常规方法的比较

测量船常用的电机检测方法主要通过电机绕组绝缘、绕组阻值、效率,运行电压和电流是否平衡等进行技术状态判断。该类方法的缺点是无法判断故障和隐患的严重程度,无法精确判定故障部位。

电机的电特性的检测方法借助电特性参数分析、计算,针对常用方法中无法判定的阻值微弱变化,早期的相间、层间、匝间短路故障进行可靠判别,并能通过相应判据精确区分故障源自于电机定子或是转子。相较其他方法,电特性检测并不需要使用额外的数据传感器^[7]。

桑美(BJM)公司现已推出的 ALL-TEST 31、ALL-TEST 4、ALL-TEST 4 PRO2000 等电机全参数检测仪器

与设备能够对电特性检测所需要的相关参数进行检测。

3.2 电特性检测原理

本研究根据电机原理和电特性检测原理,对电机建立等效电气原理电路,如图 3 所示。

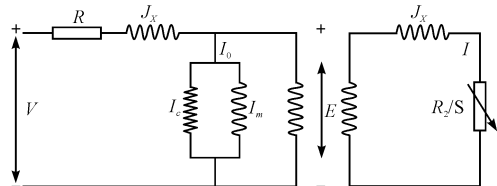


图 3 电机等效电路

在实际的检测运用中,通过相关仪器与检测设备将所需要的电机电特性参数检出,并通过进一步计算,获取电阻、电感、阻抗、相角、倍频等参数。其中,阻抗和倍频两个参数是电特性检测中的关键参量^[8]。

对电机等效电路进行分析,在对电机输入一个高频电流时,其电感对于电路的影响远大于电阻,此时可以电路近似为一个纯电感电路。而在电机发生短路故障时,在这里以匝间短路为例进行分析,此时电机绕组不再表现为感性电路,失去电感作用,电阻对于电路的影响就远大于电感,在模型中即表现为一个阻值较大的电阻电路。按照等效电路进行计算,其表现为纯电感和纯电容时,电路当中的电流分别为纯电阻状态的 1/2 和 2 倍^[9-10]。

因此,根据电机原理电路,匝间故障将导致其电路状态发生改变,即根据故障严重程度,等效电路将向纯电阻电路逐渐过度变化,而其倍频值则表现为由 -50% 逐渐衰减至 0 的过程。因此,可根据倍频变化判断电机绕组质量。

阻抗平衡测试相较电机检测中常用的三相电压平衡测试、三相电流平衡测试更为准确和精确。

3.3 电特性检测的评判

3.3.1 电静态三相平衡的评判

IEEE 对于电机性能状态的评判标准。该标准是根据国际电气组织近 20 年来的测量情况所得如表 2 所示。

表 2 IEEE 电机三相平衡标准

检测项目	良好	缺陷	故障
电感 L 偏移量	5%	10%	15%
阻抗 Z 偏移量	2%	3%	5%
倍频差 I/F	0	2	>3
相角差 $F_i/(\circ)$	0	1	2

表中的数据为电机静态特性中,三相电中每两相所测数据的偏移值比对。电感和阻抗的判断标准为其波动值所占其均值的百分比,而倍频、相角检测则为三相中任取两相测量值之差的最大数值。

其中,偏移量为对三相平均值的偏移量最大值。倍频为定义的测试量,即电流在频率加倍后的变化量。当频率加倍后,电路为纯电感电路时,电流变为原来 1/2;纯电阻电路时,电流不变;纯电容电路时,电流增加一倍。因此,电机出现匝间短路的发展趋势即是 I/F 值从 -50% 向 0% 的发展趋势。

3.3.2 潘罗斯判据

潘罗斯判据是由美国现任德雷思科勒电机公司副总裁霍华德·W·潘罗斯博士提出的。该方法得到了国际电机组织的认可^[11]。

潘罗斯判据适用于所有三相电机。在电特性检测中,采用潘罗斯判据作为评判准则进行建模,利用模糊诊断方法对电机故障进行仿真。

3.3.3 评判准则的模糊诊断优化和仿真

综合三相平衡和潘罗斯的评判方法,已能够对电机三相平衡和三相不平衡来源进行判别,并根据表 2 能够对电机健康状态进行初步判别,但仍无法精确判断电机绕组故障程度。现要通过 Simulink 软件的 fuzzy 工具和 Matlab 软件建立电机模型,进行对应的仿真计算和分析,并用模糊诊断的方法对评判准则进行优化。

本研究根据电机模型和电路理论,参照模糊诊断的假设条件^[12],建立相轴模型方程,电机绕组运行情况表示为:

$$\begin{cases} D\psi_2 = R_2 M_2^{-1} M_{21} F I_1 - \\ [R_2 M_2^{-1} + (1-s)\omega_N K] \psi_2, \\ DI_1 = T^{-1} [U_1 - F(R_1 + M_{12} M_2^{-1} R_2 M_2^{-1} M_{12} F) I_1] + \\ T^{-1} \{ F M_{12} M_2^{-1} [R_2 M_2^{-1} + (1-s)\omega_N K] \} \psi_2 \end{cases} \quad (1)$$

$$T = F(M_1 - M_{12} M_2^{-1} M_{12}) F \quad (2)$$

式中:下标 1—定子绕组;下标 2—转子绕组; ψ —磁通; R —电阻; M —电感; I —电流; U —电压; K —常数矩阵; s —为转差率; ω_N —额定角速度; F —定子绕组的对称系数矩阵; F —绕组短路的严重程度用矩阵函数, $F = \text{diag}(f_a, f_b, f_c)$ 。

其中, $f_{i(i=a,b,c)} = (\text{总匝数} - \text{故障匝数}) / \text{总匝数}$ 。绕组在正常情况下,保持三相对称,即 $f_a = f_b = f_c = 1$;而当绕组的某相发生短路故障时,则三相平衡被破坏,即 $f_a = f_b = f_c < 1$ 。

$$\psi_2 = \text{diag}(\psi_{2a}, \psi_{2b}, \psi_{2c}) \quad (3)$$

$$P_1 = \text{diag}(r_1, r_2, r_3) \quad (4)$$

$$R_2 = \text{diag}(r_2, r_2, r_2) \quad (5)$$

$$M_1 = \text{diag}(l_{1\sigma}, l_{1\sigma}, l_{1\sigma}) + \begin{bmatrix} m_1 & -\frac{1}{2}m_1 & -\frac{1}{2}m_1 \\ -\frac{1}{2}m_1 & m_1 & -\frac{1}{2}m_1 \\ -\frac{1}{2}m_1 & -\frac{1}{2}m_1 & m_1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$M_2 = \text{diag}(l_{2\sigma}, l_{2\sigma}, l_{2\sigma}) + \begin{bmatrix} m_2 & -\frac{1}{2}m_2 & -\frac{1}{2}m_2 \\ -\frac{1}{2}m_2 & m_2 & -\frac{1}{2}m_2 \\ -\frac{1}{2}m_2 & -\frac{1}{2}m_2 & m_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$M_{12} = M_{21} = \begin{bmatrix} m_{12} & -\frac{1}{2}m_{12} & -\frac{1}{2}m_{12} \\ -\frac{1}{2}m_{12} & m_{12} & -\frac{1}{2}m_{12} \\ -\frac{1}{2}m_{12} & -\frac{1}{2}m_{12} & m_{12} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$K = \frac{\sqrt{3}}{3} \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

在 fuzzy 工具的诊断器中,输入定子绕组三相电流

i_a, i_b, i_c 的标么值 I_a, I_b, I_c , 三相电流的方差 V , 输出为电机的定子状态 SC。将电机绕组的 4 个电特性参数电感、阻抗、倍频和相角分别对应模糊集: VS, S, M, L, 将绕组的匝间、层间、相间状态分别对应 3 个模糊集: N, D, SD。

Simulink 仿真模型图如图 4 所示。

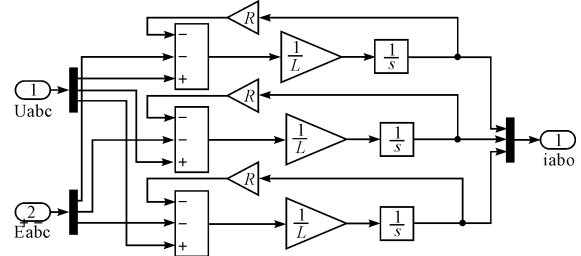


图 4 Simulink 仿真模型故障环设定

在模型中,代入电机基本输入参数,如表 3 所示。

表 3 模拟电机输入参数

参数	参数值	参数	参数值
额定电压/V	380	定子绕组电阻 r_1/Ω	9.63
极对数 p	4	定子绕组自感 m_1/H	0.013 6
额定转速 $n/(r \cdot \text{min}^{-1})$	1 450	定子绕组漏感/H	0.11
额定频率/Hz	50	转子绕组电阻/ Ω	5.699
定子绕组匝数	36	转子绕组自感/H	0.083
定子绕组互感/H	0.447	转子绕组漏感/H	0.031 4

Simulink 的仿真结果经过 Matlab 软件输出电机绕组模拟状态后,得到电机绕组状态的仿真结果,如图 5 所示。

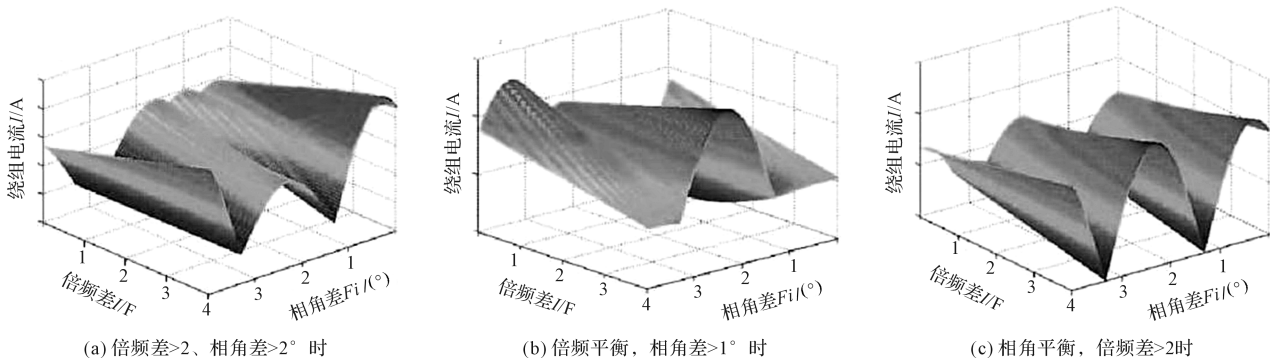


图 5 电机仿真图

图 5 中,倍频、相角和绕组电流分别对应 x, y, z 轴。图中能够表示绕组电流状态,其中波谷为电机气隙部分,波峰为绕组位置,浅色为其在正常温度范围运行,深色为绕组出现过电流的状况,可以判断为存在短路。图 5(a-c),分别对应与 $I/F > 2$ 且 $Fi > 2^\circ, Fi > 1$ 且 I/F 平衡、 Fi 平衡且 $I/F > 2$ 时的绕组状态,3 个波峰对应电机绕组线圈的匝间、层间和相间状态。

根据图 5(a),绕组在倍频差大于 2,相角差大于

2° 的波峰出产生过电流,说明存在同相、同绕组的匝间短路;图 5(b) 在相角大于 1° 的区域两个波峰出现了过电流,说明绕组存在层间短路;图 5(c) 中倍频差大于 2 的区域内,3 个波峰出现过电流,说明绕组存在层间短路。

因此,基于 Simulink 软件的电机绕组模型能够很好地反映绕组故障中的短路情况,能够精准判别相间、匝间和层间短路 3 种状态。

4 实验及结果分析

由于其可在线进行检测的便利性,电特性检测能够作为一项电机的日常检测项目结合电机预防性保养等进行实施。采样数据可通过桑美公司的检测仪器检出,在电机配电或接线位置选择三相线即可进行检测。

4.1 海水冷却泵电特性检测实例

某测量船辅机海水冷却系统某台海海水冷却泵电机,铭牌标注性能指标为额定电压 380 V,额定功率 45 kW,额定转速 2 960 r/min。

在 2008 年装船后使用 8 年,分别在 2015 年 2 月和 2016 年 3 月对其进行 2 次的电特性采样,2 次数据如表(4,5)所示。

表 4 2015 年电特性数据采样

测试参数/单位	UV	UW	VW	偏移量
电阻 R/Ω	0.096	0.096	0.096	0
电感 L/mH	216	212	208	3%
阻抗 Z/Ω	320	322	327	1%
倍频差 I/F	-50	-49	-50	1
相角差 $Fi/(\circ)$	81	81	81	0

表 5 2016 年电特性数据采样

测试参数	UV	UW	VW	偏移量
电阻 R/Ω	0.096	0.096	0.096	0
电感 L/mH	220	208	203	5%
阻抗 Z/Ω	340	309	306	7%
倍频差 I/F	-49	-46	-7	42
相角差 $Fi/(\circ)$	10	12	51	41

根据 2015 年的数据采样结果分析,该电机各项参数正常,而在正常使用中也未表现出故障征兆,性能良好。

而在 2016 年后,该电机的带负载性能下降,运行电流显著增大,遂再次进行电特性采样。通过评判准则,其三相绕组状态存在不均衡的现象,电机的电感与阻抗为非比例线性关系,推断其三相绕组不平衡是由于电机定子问题导致。再根据评判准则的优化结论,相角差和倍频差数值均大于 2,判断其绕组存在匝间

短路。之后对该电机进行拆检,发现实际情况与推断一致。后调取该电机的运行登记簿,发现其使用频率高、强度大,而预防性保养的次数较少,导致其在正常运行 8 年时间后,在短短 1 年时间内即出现了故障急速恶化的情况。

4.2 海水增压泵检测实例

某测量船板式蒸馏造水机的海水增压泵电机,铭牌标注性能指标为额定电压 380 V,功率 13.5 kW,转速 2 970 r/min。该电机在使用 3 年时间后,运转中常伴有异常噪声,且振动剧烈。

观察其运转时电流情况,在负载稳定的情况下,存在电流较大的波动,故对其进行电特性采样,采样数据如表 6 所示。

表 6 2014 年电特性数据采样

测试参数	UV	UW	VW	偏移量
电阻 R/Ω	1.711	1.710	1.699	0%
电感 L/mH	150	275	265	35%
阻抗 Z/Ω	76	45	51	35%
倍频差 I/F	-54	-54	-54	0
相角差 $Fi/(\circ)$	61	60	61	1

其中,UV,UW,VW 分别为三相电机 U、V、W 三相的相间参数。

根据数据判断,该电机电感和阻抗偏移值均达到了 35%,存在较为严重的三相不平衡情况;而其电感和阻抗并非等比例线性关系,根据其实际运行情况,推断其转子绕组存在故障。在之后进行的拆检中,其转子断条。电特性检测的实际效果得到验证。

5 结束语

针对目前采用常用方法无法对阻值变化微弱的早期相间、层间、匝间短路故障进行可靠判别的问题,本研究采用了潘罗斯判据,运用了模糊诊断的方法精确地区分了源自于电机定子还是转子的故障,并判别相间、匝间和层间短路 3 种状态,借助 2 个实验对该方法的可行性进行了验证。

(下转第 413 页)

本文引用格式:

李 霏,顾 含,董庆丰. 电特性检测在电机预防性检修和故障诊断中的应用研究[J]. 机电工程,2018,35(4):402-406,413.

LI Fei, GU Han, DONG Qing-feng. Application of electrical static characteristics testing for ship electromotor prevention service and fault diagnosis[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2018, 35(4):402-406,413.

《机电工程》杂志;http://www.meem.com.cn