

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.09.015

永磁同步电机的热路分析及热阻参数测试*

汪文博, 陈阳生*

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对永磁同步电机设计、参数优化和热分析等问题,对永磁同步电机的热路法温度计算进行了研究,建立了考虑安装和冷却方式的热路模型,提出了一种热路关键参数的测试方法,测试了机壳与空气间的等效热阻、端盖与空气间的等效热阻、安装板与空气间等效热阻,绕组与定子铁芯之间的等效热传导系数,机壳与定子铁芯之间的等效空气隙厚度、端盖与机壳间的等效空气隙厚度、安装板与端盖之间的等效空气隙厚度等热路参数。同时对热路模型进行了热阻敏感性分析,得到了影响电机温升的主要热路参数。实验结果表明,该热路模型和实验测试数据,可以较准确地计算电机温升,误差在 5% 以内。该热路模型和实验测试热路参数可为同类型电机的电机设计以及热分析提供很好的参考。

关键词:永磁同步电机;等效热路模型;热阻参数测试;敏感性分析

中图分类号:TH39;TM302;TP341

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2014)09-1168-05

Lumped-parameter thermal model analysis and thermal parameters test for PMSM

WANG Wen-bo, CHEN Yang-sheng

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at calculate the temperature of permanent magnet synchronous motors(PMSM) rapidly, lumped-parameter thermal model of PMSM is analyzed. A lumped-parameter thermal model including the mounting plate was established to predict the temperature rise for PMSM. With dc test method proposed in this paper, these thermal parameters were tested: the equivalent thermal resistance between housing and ambient, the equivalent thermal resistance between end caps and ambient, the equivalent thermal resistance between mounting plate and ambient; the equivalent thermal conductivity between winding and lamination; the interface gap between housing and lamination, the interface gap between end caps and housing, and the interface gap between mounting plate and end caps. The sensitivity of thermal parameters was studied to identify the key part which will influence the thermal performance. The steady performance of the thermal model was validated by experiments on a test motor. The results indicate that the thermal model and tested parameters can calculate the temperature of motors accurately, with only 5% error.

Key words: permanent magnet synchronous motors(PMSM), lumped-parameter thermal model; thermal parameter determination; sensitivity analysis

0 引 言

永磁同步电机广泛应用于航空航天、工农业生产和日常生活等各个领域,电机热分析对永磁同步电机的安全运行、效率提升和成本控制有重要的意义,近年

来受到越来越多的关注。电机热分析的方法主要有两种:等效热路法和有限元分析法。有限元法的优点在于可以对任意形状电机进行建模,获得任意一点的温度值;缺点是模型复杂,计算量大,同时由于一些热阻参数还是需要经验公式或者算得到,因为这些热

收稿日期:2014-04-29

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“973”计划)资助项目(2013CB035604);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20130101110112)

作者简介:汪文博(1990-),女,山东临清人,主要从事电机热路法温度计算方面的研究. E-mail:qtian555@zju.edu.cn

通信联系人:陈阳生,男,教授,博士生导师. E-mail:yschen@zju.edu.cn

路参数与生产工艺、安装方式紧密相关,导致实际的计算精度有限。与有限元法相比,热路法模型计算量小,在热阻参数已知时,能够达到与有限元法类似的精度。因此,热路法得到了广泛的研究与应用。

热路法电机热分析主要包括两方面的工作:热路模型搭建和热阻参数测试。

热路模型是根据电机结构建立的。文献[1-4]分别提出了感应电机、表贴式永磁同步电机和内嵌式永磁同步电机的热路模型。上述文献均未考虑电机安装和冷却方式,这对一些电机影响不大,但是,对于特定安装形式的电机温升影响较大。大多数中小型永磁同步电机采用 B35 端面安装型式,安装面增加了电机散热面积,对电机温升影响较大。因此,本研究建立了考虑安装板散热的热路模型。

热阻参数正确与否直接决定了热路法温度计算的精度。热路模型中,部分热阻可以通过理论公式计算获得,比如空心圆柱体的径向传导热阻和定转子与气隙间的对流热阻计算公式等。部分热阻计算则主要基于实验测试结果和经验公式。文献[5-6]分别给出了一系列感应电机的热阻参数实验数据,文献[7]给出了适用于大中型电机的热阻经验公式,由于不同种类电机结构不同,热阻参数的实验结果和经验公式并不通用。

本研究针对一系列中小型永磁同步电机,设计一种输入直流电模拟热源的实验,测试得到了关键的热阻参数数据,这可以为该类电机设计以及电机热分析提供参考。

1 电机热路模型

本研究根据永磁同步电机的结构特点,建立了热路模型如图 1 所示。热路模型中的热阻含义详如表 1 所示。热路模型考虑了安装板与电机端盖间接触热阻,以及安装板到大气对流散热和辐射热阻。

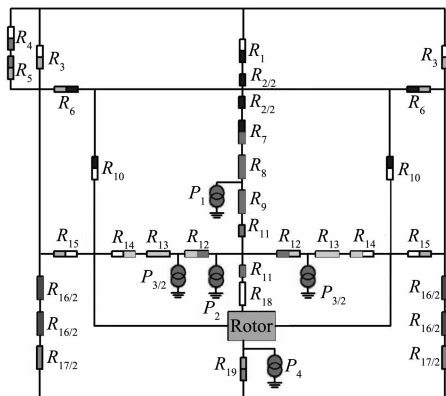


图 1 热路模型

表 1 热路模型参数含义

R_1	机壳与空气间的等效热阻
R_2	机壳的传导热阻
R_3	端盖与空气间的等效热阻
R_4	安装板与空气间的等效热阻
R_5	安装板与端盖间的接触热阻
R_6	机壳与端盖间的接触热阻
R_7	机壳与铁心间的接触热阻
R_8	定子铁心轭部外圈的传导热阻
R_9	定子铁心轭部内圈的传导热阻
R_{10}	机壳与内部空气间对流热阻
R_{11}	定子铁心齿部的传导热阻
R_{12}	绕组与铁心间的传导热阻
R_{13}	槽内绕组与端部绕组间传导热阻
R_{14}	端部绕组与内部空气间对流热阻
R_{15}	端盖与内部空气间对流热阻
R_{16}	轴承的传导热阻
R_{17}	转轴的传导热阻
R_{18}	气隙的对流热阻
R_{19}	转子铁心与转轴间接触热阻
P_1	定子铁心轭部损耗
P_2	定子铁心齿部损耗
P_3	铜耗
P_4	转子铁心损耗

2 热阻参数实验测试

实验测试中,热阻的计算公式为:

$$R = \Delta T / P \quad (1)$$

式中: R —两点间热阻, ΔT —两点间温差, P —两点间的热量流动。

为了得到精确的热阻,需要准确计算电机中的能量流动。然而,在正常工况下,电机中损耗包括铜耗、铁耗、永磁体损耗和摩擦损耗等,其中,铜耗可由焦耳定律精确计算,而其他损耗计算复杂而且测试困难。在直流电模拟热源实验中,向电机定子绕组中通入直流电,电机中只存在铜耗,可精确计算。同时,可以通过 PT100 温度传感器测试得到电机各部件温度。根据热阻定义式即可计算得到电机中各部分的热阻。

实验中,对一系列的永磁同步电机进行测试(如图 2 所示),得到了关键热阻参数的实验结果。

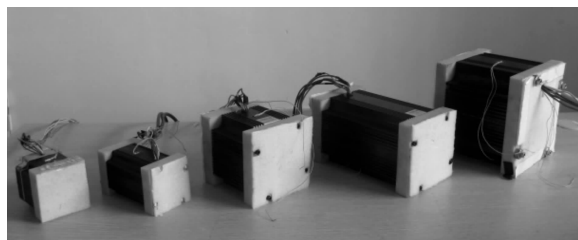


图 2 一系列测试电机

2.1 机壳到空气的等效热阻

在自然冷却方式下,机壳与空气间存在自然对流热阻和辐射热阻。

自然对流热阻和辐射热阻基本计算公式为:

$$R = 1/(hA) \quad (2)$$

式中: h —自然对流散热系数或辐射散热系数; A —散热表面与气体的接触面积。

当机壳为表面光滑的圆柱形或方形时,机壳到空气的自然对流散热系数可以通过传热学公式计算得到,即基于雷诺数、格拉晓夫数、普朗特数和努特尔数的无量纲公式^[8]。当机壳带有散热筋时,计算公式非常复杂^[9],尤其对于本研究中讨论的永磁同步电机,机壳散热筋不规则,无法通过公式计算得到。辐射散热系数与物体发射率和机壳结构有关,对于散热筋不规则的机壳,计算亦非常复杂。所以,有必要对该热阻进行实验测试。

实验中,由于无法分别测试对流热阻和辐射热阻,故将机壳到大气间自然对流热阻和辐射热阻等效为一个合成热阻,得到了等效热阻的测试结果。电机通入直流电,两侧安装具有绝热能力的尼龙端盖(如图3所示),这样可以保证,从机壳散发到空气的热量即为定子绕组的铜耗。机壳到空气的等效热阻为电机铜耗与机壳到空气温差的比值。

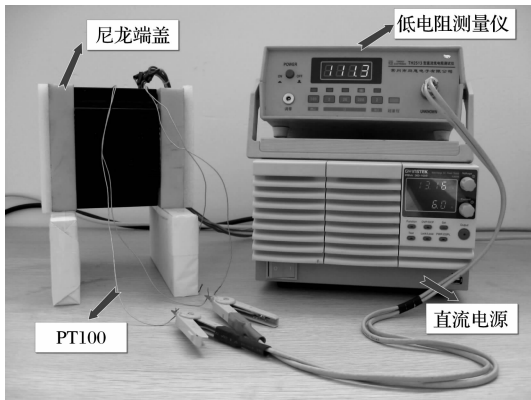


图3 安装尼龙端盖的电机

机壳到空气的等效热阻大小与机壳尺寸有关,机壳表面积与机壳到大气间等效热阻的实验数据如表2所示。电机型号由机座安装尺寸和电机额定功率表示,例如:130—1 KW表示机壳端面边长为130 mm,额定功率为1 KW的永磁同步电机。通过曲线拟合,机壳到空气的等效热阻与机壳表面积函数关系如图4所示,得到该热阻与机壳表面积的关系式:

表2 机壳到空气的等效热阻与机壳表面积实验数据

电机型号	$A(m_2)$	$R(K/W)$
80—400 W	0.030	2.14
80—750 W	0.038	1.83
130—1 KW	0.099	1.12
130—3 KW	0.201	0.61
190—7.5 KW	0.170	0.54
190—15 KW	0.270	0.44

$$R_{house_amb_nat} = 1/14.38 \cdot A_{house_amb} \quad (3)$$

式中: A_{house_amb} —机壳外表面积。

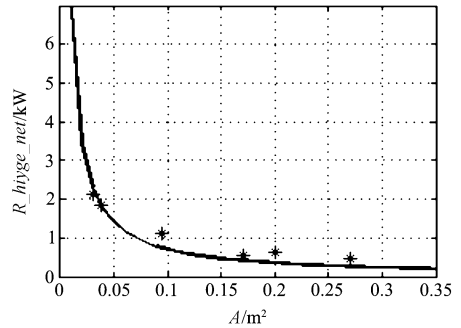


图4 机壳到空气的等效热阻与机壳表面积函数关系

在实际应用中,当机壳结构与实验电机类似时,在机壳表面积已知的情况下,可通过公式(4)计算得到电机机壳到空气的等效热阻。

2.2 机壳与定子铁芯之间的接触热阻

接触热阻是由于接触面间存在接触间隙引起的,与接触面材料硬度、接触压力、接触面粗糙度和大气压力均有关系,通常用等效空气隙厚度来表示。文献[10]给出了不同材料接触面间等效空气隙厚度的经验值。但是电机中情况比较复杂,比如,定子铁芯由硅钢片叠压而成,外表面粗糙;同时,由于生产工艺的不同,定子铁芯在机壳中的固定和装配工艺不同,也由于机壳材料的不同,使得各个厂家电机的等效间隙不同,经验值并不适用。为了得到准确的接触热阻,有必要对电机进行实验测试。

在图3的实验平台上,电机通入直流电,则由定子铁芯流经到机壳的热量即为电机铜耗。机壳与定子铁芯间接触热阻为铜耗与机壳到定子铁芯温差的比值,等效空气隙厚度计算公式为:

$$t_{house_lam_inf} = R_{house_lam_inf} \lambda_{air} A_{inf} \quad (4)$$

式中: $R_{house_lam_inf}$ —机壳到定子铁芯之间的接触热阻, λ_{air} —空气的热传导系数, A_{inf} —机壳与定子铁芯之间的接触面积。

对一系列测试电机的实验结果数据进行平均处理,得到铝制机壳与铁芯间等效气隙厚度平均值为0.051 mm,该值可为电机热分析提供参考。

2.3 绕组与定子铁芯间传导热阻

定子槽中除绕组外,还存在多种绝缘材料,如槽楔、云母带、绝缘漆、空气隙等,无法建立精确的热模型。目前主要有3种热模型:多层绕组模型、复合热传导系数模型和T型等效热路模型^[11]。本研究中采用复合热传导系数模型,即将槽内绕组等效为铜导热体,槽内的绝缘材料等效为均匀分布在铜导热体周围的绝缘导热体,

绕组到定子铁芯的传导热阻可通过等效热传导系数表示。在图3的实验平台上,电机通入直流电,由绕组流经定子铁芯的热量即为电机铜耗。则定子铁芯与绕组间传导热阻为铜耗与绕组到定子铁芯间温差的比值。绕组到定子铁芯的等效热传导系数计算公式为:

$$\lambda_{coil_lam} = t_{insu} / R_{coil_lam} / A_{slot} \quad (5)$$

$$t_{insu} = S_{slot} (1 - k_{slot_fill}) / l_{slot} \quad (6)$$

式中: R_{coil_lam} 一定子铁芯与绕组间传导热阻, t_{insu} 一定子槽内绝缘体等效厚度, A_{slot} 一定子槽内表面面积, S_{slot} 一定子槽横截面积, k_{slot_fill} 一定子槽槽满率, l_{slot} 一定子槽横截面周长。

实验结果如表3所示,表格中的平均值可作为电机热分析的参考值。

表3 绕组与定子铁芯间等效热传导系数

电机型号	λ_{coil_lam} (w/(k·m))
80—400 W	0.422 2
80—750 W	0.494 1
130—1 KW	0.390 0
130—3 KW	0.490 3
190—7.5 KW	0.872 3
190—15 KW	0.680 7
平均值	0.558 2

2.4 端盖到空气的等效热阻

端盖到空气的等效热阻与机壳到空气的等效热阻类似,包括自然对流热阻和辐射热阻。测试时,将图3中测试平台中的尼龙端盖替换为铝制端盖。

可以根据2.1节中测试得到机壳到空气的等效热阻,计算机壳到大气的散热量,在总铜耗已知情况下,可计算得到经由端盖散失到大气的热量。端盖到大气的等效热阻即为经由端盖散失到大气的热量与端盖到空气温差的比值。

端盖面积与端盖到大气间等效热阻实验数据如表4所示。通过曲线拟合,端盖到空气间等效热阻与端盖表面积间函数关系如图5所示,得到了该热阻与端盖面积的函数表达式:

$$R_{endcaps_amb_nat} = 1/15.59 \cdot A_{endcaps_amb} \quad (7)$$

2.5 机壳与端盖间的等效空气隙厚度

经由端盖散失到大气的热量与机壳到端盖温差的比值,为机壳与端盖间接触热阻,进而计算得到等效气隙厚度。

表4 端盖到空气间等效热阻与端盖表面积实验数据

电机型号	$A(m_2)$	$R(K/W)$
80—400 W	0.012	5.631
86—750 W	0.014	3.543
130—1 KW	0.047	2.938
130—3 KW	0.047	3.482
190—7.5 KW	0.107	1.070

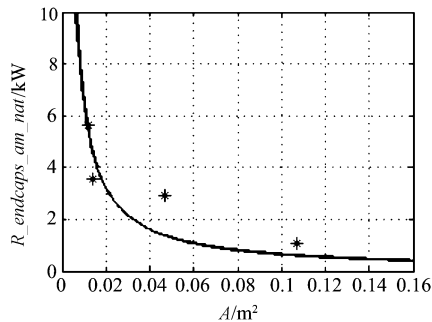


图5 端盖到空气间等效热阻与端盖表面积间函数关系

测试电机中机壳和端盖都是铝制材料,并且两者通过螺栓固定,测试结果平均值为0.0274 mm,该实验数据可用于同等情况下的接触热阻计算。

2.6 安装板与空气间的等效热阻

实验测试时,电机带安装板进行直流实验。根据2.1节与2.4节中的实验结果,可得到机壳与空气间等效热阻和端盖与空气间等效热阻,热阻与接触面积的乘积可以得到由机壳和端盖流经到大气的热量。在已知铜耗情况下,可以得到由安装板流经到大气的热量值。

安装板与空气间等效热阻即为由安装板散失到大气的热量与安装板到大气间温差的比值。实验对130电机用安装板进行实验测试,得到了安装板与大气间等效热阻为1.27 W/(m·K)。

2.7 安装板与端盖间的等效空气隙厚度

在已经由安装板散失到大气的热量情况下,可计算得到安装板与端盖间接触热阻,进而得到等效空气隙厚度。钢制安装板与铝制端盖之间是通过人工安装的螺丝固定,实验测试的结果为0.0547 mm。

3 热路模型验证

为了验证热路模型和实验数据的有效性,在如图6所示实验平台上对130—1 KW电机进行了实验验证。实验电机参数详如表5所示。

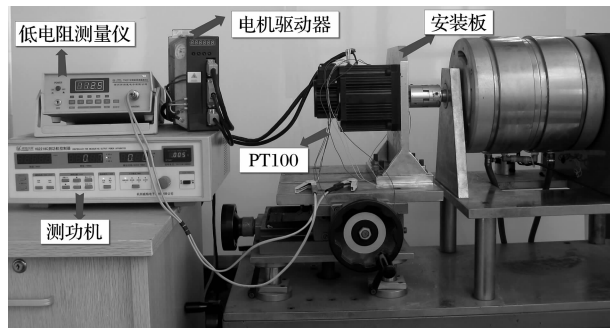


图6 实验测试平台

令电机稳定运行在额定状态,当电机达到热平衡状态时,测量电机机壳、定子铁芯齿部和绕组的温度值。

表 5 实验电机参数

参数	数值
额定功率/kW	1
额定电压/V	220
额定转速/r · min ⁻¹	2 000
额定电流(峰值)/A	4.5
定子相电阻(20℃)/Ω	1.45

根据理论公式和实验测试中 130—1 KW 电机的实验测试结果计算热路模型中的热阻,运用 Matlab/Simulink 平台搭建并计算热路模型。

计算结果和实验测试如表 6 所示,热路模型计算结果与实验测试温升相比,误差在 5% 内,证明了热路模型和实验测试数据的有效性。

表 6 热路法稳态计算结果与实测温升对比

	机壳	定子铁芯齿部	绕组
实验结果(℃)	75.4	83.1	90.3
计算结果(℃)	78.5	86.0	92
误差	4.1%	3.5%	1.9%

4 敏感性分析

为了确定对热路法温度计算精度影响较大的热阻参数,定量分析了绕组温度对各热阻误差的敏感性。以 130—1 KW 电机额定状态下的热路模型为基础,计算每个热阻参数增加 50% 后的绕组温度变化率。对绕组温度影响最大的 10 种热阻如表 7 所示。

表 7 敏感性分析结果

热阻	温度变化(%)
机壳与空气间等效热阻	13.6
绕组与铁心间传导热阻	4.5
安装板与空气间等效热阻	3.4
机壳与铁心间接接触热阻	2.5
机壳与端盖间接触热阻	1.6
后端盖与大气间等效热阻	1.0
安装板与端盖间接触热阻	0.9
铁心齿部传导热阻	0.6
前端盖与大气间等效热阻	0.5
端盖与内部空气间对流热阻	0.3

分析结果表明,机壳到空气的等效热阻对电机温度影响最大,其次为绕组到定子铁芯的传导热阻,第三位的安装板到空气的等效热阻对电机温度也有较大影响。本研究中测试的 3 个接触热阻均在表格范围内,电机各部件的传导热阻对电机温度影响最小。

5 结束语

本研究建立了永磁同步电机的热路模型,并且提出了一种热阻参数测试实验,对一系列永磁同步电机进行实验测试,得到了热路模型中关键的热阻参数实验数据。实验验证了该热路模型和热阻参数数据的有效性,可以为同类型电机的电机设计和热分析提供参考。

敏感性分析可以得到对电机热分析有较大影响的热阻,这些热阻在电机设计和电机热分析中应得到重视。

参考文献(References):

- [1] BOGLIETTI A, CAVAGNINO A, LAZZARI M, et al. A simplified thermal model for variable-speed self-cooled industrial induction motor[J]. **IEEE Transations on Industry. Ind.** 2002,39(4):945-952.
- [2] LIU Z J, HOWE D, MELLOR P H, et al. Thermal analysis of Permanent Magnet Machines[C]. in Proceading. 6th International Conference. Electrical Mach. Drives,1993:359-364.
- [3] D'ARCIER W F, SERILLON L, Thermal modeling of permanent magnet motor for traction[D]. Master thesis,2011.
- [4] EL-REFAIE A M, HARRIS N C, JAHNS T M. Thermal analysis of multibarrier interior PM synchronous machine using lumped parameter model[J]. **IEEE Transations, Energy Convers**,2004,19(2):303-309.
- [5] KYLANDER G. Thermal modelling of small cage induction motors[M]. Ph. D. dissertation, School Electr. Comput. Eng., Chalmers Univ. Technol., Göteborg, Sweden, Tech,1995.
- [6] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社(第四版). 2006.
- [7] STATON D, BOGLIETTI A, AVAGNINO A C. Solving the more difficult aspects of electric motor thermal analysis, in small and medium size industrial induction motors[J]. **IEEE Transations. Energy Convers**,2005,20(3):620-628.
- [8] MELLOR P H, ROBERTS D, TURNER D R. Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design[J]. **IEE Proceeding Electric Power Applications**, 1991,138(5):205-218.
- [9] BOGLIETTI A, CAVAGNINO A, STATON D. Determination of critical parameters in electrical machine thermal models [J]. **IEEE Transations on Industny Applications**,2008,44(4):1150-1159.
- [10] STATON D, CAVAGNINO A. Convection heat transfer and flow calculations suitable for electric machines thermal models[J]. **IEEE Transation Industry Electrical**,2008,55(10):3509-3516.
- [11] 魏永田,孟大伟. 电机内热交换[M]. 北京:机械工业出版社. 1998.

[编辑:洪炜娜]

本文引用格式:

汪文博,陈阳生. 永磁同步电机的热路分析及热阻参数测试[J]. 机电工程,2014,31(9):1168-1172.

WANG Wen-bo, CHEN Yang-sheng. Lumped-parameter thermal model analysis and thermal parameters test for PMSM[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014,31(9):1168-1172. 《机电工程》杂志:http://www.meem.com.cn