文章编号: 1672-8785(2011)09-0015-04

用红外热像仪测量电机表面温度 和估计电机运行电流

张晓怀 闫光辉 郭学学 杨 立

(海军工程大学船舶与动力学院动力工程系,湖北武汉 430033)

摘 要:用红外热像仪检测电机的表面温度分布,对于研究电机表面温度分布与电机 定子工作电流之间的关系并及时、有效地发现电机运行时存在的事故隐患和故障先兆 具有重要意义。利用有限体积法建立了三相异步电机的稳态传热数学模型。通过将传 热反问题中的函数规范法用于 Y100-L2 型电机定子电流的估计,分析了电机表面温度 的测量误差对估计电流误差的影响。结果表明,用红外热像仪测量电机表面温度和估 计电机运行电流是可行的,而且热像仪的测温精度能够满足使用要求。

关键词: 电机; 定子; 反问题; 温度场; 电流

中图分类号: TN219 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2011.09.004

Use of Infrared Thermography to Measure Motor Surface Temperature and Estimate Motor Working Current

ZHANG Xiao-huai, YAN Guang-hui, GUO Xue-xue, YANG Li

(Department of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Using infrared thermography to detect the surface temperature distribution of a motor is of great significance to the study of the relation between the surface temperature distribution of the motor and the working current of the motor stator. It is helpful to the quick and effective finding of the potential accident and fault of the motor in operation. A steady heat transfer mathematic model is established for a three-phase asynchronous motor by using a finite volume method. The function specification method in the inverse heat transfer problem is used to estimate the current of the stator in a Y100-L2 motor and the influence of the measurement error of the motor surface temperature on the current estimation error is analyzed. The result shows that it is feasible to use infrared thermography to measure motor surface temperature and estimate the working current of a motor. The measurement accuracy of the infrared thermography can meet the practical requirement.

Key words: motor; stator; inverse problem; thermal field; current

0 引言

在现代工农业生产、交通运输、国防事务以 及日常生活中,人们几乎离不开各式各样的电 机。它们已是当今工农业生产和日常生活中最 主要的驱动装置。电机在使用过程中一旦发生 故障,温升过高,不仅会损坏电机本身,而且会影响整个作战系统,甚至危及人身安全,造成严重的影响和巨大的损失。为了及早发现电机的故障,防范于未然,对电机进行在线状态检测和早期诊断是非常必要的。红外检测与诊断技术是一种非接触式无损检测技术。人们通过该技

收稿日期: 2011-08-05

作者简介:张晓怀(1963-),男,湖北鄂州人,副教授,主要从事红外无损检测研究。

E-mail: 19861125ygh@163.com

术能够及时发现电机的局部过热隐患和缺陷, 这对于电机的安全运行有着积极的作用。用红 外热像仪检测电机外部温度场的分布情况,可 以及时、有效地发现电机在运行中存在的事故 隐患和故障先兆,以便采取合理、可靠的处理措 施,从而减少或避免事故的发生。

海军工程大学刘开慧、王艳武等人分别在 2006年和2008年基于红外测温,利用有限元法 计算了异步电机定子的三维温度场,并利用导热 反问题中的 L-M 方法建立了一种新的测试计算 方法。他们通过对异步电机内部各部分的温升 和负荷进行定量估计判断了电机的运行状况, 为电机的运行和维护提供了帮助^[1-3]。文献[4] 对电机定子绕组发生槽内匝间短路早期故障时 的表面温升进行了研究。文献[5,6] 对通过已知 电机表面温度反推电机定子温度进行了研究。 而根据测得的电机表面温度通过传热反问题方 法估计电机定子电流尚未见报道。

本文利用有限体积法建立三相异步电机的 稳态传热数学模型,将传热反问题中的函数规 范法用于Y100-L2型电机定子电流的估计,分析 了电机表面温度的测量误差对估计电流误差的 影响。结果表明,用红外热像仪测量电机表面温 度和估计电机运行电流是可行的,而且热像仪 的测温精度能够满足使用要求。

1 正问题二维稳态传热模型

电机稳态的传热方程可表示为

$$\begin{cases} \lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} + q_v = 0\\ -\lambda_n \frac{\partial T}{\partial n}\Big|_{\partial\Omega} = \alpha \Big(T\Big|_{\partial\Omega} - T_f\Big) \end{cases}$$
(1)

式中, λ_x 、 λ_y 和 λ_n 分别为传热媒质在x、y和边界法线方向上的导热系数; q_v 为媒质的发 热率; α 为对流换热系数; Ω 为计算区域; $\partial\Omega$ 为计算区域的边界;T为定子温度; T_f 为冷却 介质的温度。 2 传热反问题诊断模型

在一定的电机负荷(即一定的定子电流) 下,电机达到稳定状态后,电机机壳的表面温 度稳定。此时,通过检测电机表面温度可以反推 电机的负荷大小,即工作电流的大小,这就是电 机负荷反问题诊断的基本原理。

测得的电机表面温度为 Y,再假设此时的 工作电流为 I,因此通过正问题模型可以估计 出此时的电机表面温度为 T(I)。

$$J = [Y - T(I)]^2 \le \varepsilon^2 \tag{2}$$

式中, ε为测量温度的绝对误差。

满足式 (2) 的估计电流 *I*,即为电机的工作 电流。将电机的工作电流按泰勒级数展开,得到 [7]

$$T(I) = T(I^{*}) + \frac{\partial T(I^{*})}{\partial I^{*}}(I - I^{*})$$
(3)

式中, *I** 为已知的工作电流。我们假设其初始 值为0。

将敏感系数定义为

$$Z = \frac{\partial T(I)}{\partial I} \tag{4}$$

然后用正问题的二维稳态模型分别对 *I* 求偏导数,得到

$$\lambda \frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 Z}{\partial y^2} + \frac{\partial q_v}{\partial I} = 0 \tag{5}$$

$$-\lambda \frac{\partial Z}{\partial n}\Big|_{\Omega} = \alpha Z \tag{6}$$

当内热源 $q_v = I^2 R$ 时,

$$\frac{\partial q_v}{\partial I} = 2IR \tag{7}$$

将式(3)变形后可以得到

$$T(I) = T(I^*) + Z(I - I^*)$$
(8)

利用最小二乘法,将监测到的电机表面温 度 *Y* 与预测温度 *T*(*I*)的误差减至最小。将式(8) 代入式(2),可以得到

$$J = [Y - T(I^*) - Z(I - I^*)]^2$$
(9)

对式 (9) 求极限值,可以得到

$$I = I^* + \frac{[Y - T(I^*)]Z}{Z^2}$$
(10)

http://journal.sitp.ac.cn/hw

INFRARED (MONTHLY)/VOL.32, NO.9, SEP 2011

式中,敏感系数 Z 由式 (5) 和式 (6) 联立求得; T(I*) 由式 (1) 求得; Y 为测得的电机表面温度。 将估计出的电流值 I 代入式 (1),求出新的电机 表面温度。然后将其代入式 (2),检查该温度是 否满足收敛条件。

3 分析与讨论

下面以 Y100-L2 型电机为例。在电机运行 时,环境温度为 40 ℃,电机转速为 2996 rad/min, 机壳表面的对流换热系数为 49.667 W/(m² · ℃), 线电压为 403 V。取运行电流为 5 A,当利用反 问题程序得到不同温度绝对误差时,估计电流的误差随温度绝对误差的变化关系(结果见表1)。

从表1中可以看出,表面测量温度的绝对误 差对电机工作电流估计值的影响比较小。当测量 误差为0.5℃时,估计值只比准确值偏离1%。 当测量误差为5℃时,估计值也只比准确值偏 离了7.4%。而用红外测量仪或红外热像仪测得 的电机表面温度的误差一般在1~3℃左右,所 以将红外测温技术与反问题分析方法相结合, 可以较为准确地估计出电机工作电流的大小。 其结果准确可信,具有实际应用价值。

表1 计算结果*

温度绝对误差 / ℃	迭代次数	估计电流 A	定子温度 / ℃	$(td-td_s)/td$	$(I - I^*)/I$
0.5	16	5.0546	76.0996	0.0028	0.0108
1.0	13	5.0890	76.1006	0.0028	0.0175
1.5	12	5.1724	76.6274	0.0097	0.0333
2.0	11	5.2360	76.9478	0.0138	0.0451
2.5	10	5.2739	76.9890	0.0143	0.0519
3.0	9	5.2775	76.6555	0.0100	0.0526
3.5	9	5.4148	77.7999	0.0246	0.0766
4.0	8	5.3712	76.9341	0.0136	0.0691
4.5	8	5.5044	78.0463	0.0277	0.0916
5.0	7	5.3964	76.4603	0.0075	0.0735

 $* td_s$ 为定子温度的准确值, td为定子温度的估计值, I为工作电流的估计值, I^* 为工作电流的准确值。

在进行反问题分析的过程中,运算程序是 通过以正问题的计算值作为准确值来判断估计 值的准确性的。正问题计算的结果与电机表面真 实温度之间的差距会影响反问题的估计精度, 所以应该尽量提高正问题程序的准确性,从而 为增强反问题的精确估计打下基础。

图 1 所示为机壳表面测量温度的绝对误差 对定子温度估计值和电流估计值的准确性的影 响。由图 1 可知,机壳测量温度的绝对误差越 大,电机定子温度和工作电流的估计值与准确 值的偏差越大。

当测量误差为 0.5 ℃时, 定子温度的估计值 与真实值的偏差不到 0.3 %。当测量误差较大 时,偏差也小于3%。这说明用反问题估计定子 温度是比较准确的。

机壳表面测量温度的误差越大,电机定子 温度的估计值越偏离准确值。通过反问题的分 析,我们还可以推断出电机温度的分布情况(如 图 2 所示)。根据红外热像仪的测量误差,我们 将绝对误差为 2 ℃时估计的电机温度分布与准 确的温度分布进行比较,发现它们之间的差距 较小:定子温度相差 1.8 ℃,机壳表面温度相差 0.4 ℃。这说明在一定的表面测量温度误差范围 内,反问题的估计结果较为准确,可在实际中得 到运用。



图 1 机壳表面测量温度的绝对误差对定子电流估计值和温度估计值的准确性的影响



图 2 电机内部的估计温度场与准确温度场的对比

4 结论

18

定子和机壳的温差会随电流的增加而不断 增加。我们可以根据不同的工作电流,由红外测 量仪测得机壳的表面温度,并估计电机定子的 工作电流和温度,从而及时控制定子的电流,防 止定子因温度过高而烧毁。

此外,电机表面测量温度的绝对误差越大, 工作电流的估计值越偏离准确值。随着测量绝 对误差的增大,电机电流的估计值与真实值的 差值增加率变大,所以在用红外热像仪测量电 机表面温度时应该尽可能地减小测量误差。在 测量温度为5℃的误差范围内,用传热反问题分 析中的函数规范法来估计电机的工作电流和定 子的温度是可行的。其估计结果比较准确,具有 实际应用价值。

参考文献

- [1] 刘慧开,杨立,孙丰瑞.基于红外测温的导热反问题 在异步电机定子热分析中的应用研究 [D].武汉: 海军工程大学,2006.
- [2] 刘慧开,杨立,王艳武,等.基于传热反问题的异步电机定子温升分析 [J]. 电子器件,2006,29(4):490-494.
- [3] 王艳武,杨立,孙丰瑞.导热反问题在电机温度场 分析中的应用研究 [J]. 激光与红外, 2008, 38(6): 558-561.
- [4] 刘慧开,杨立,孙丰瑞.异步电动机定子绕组槽内 匝间短路早期故障的表面温升 [J]. 电工技术学报, 2007, 22(3): 49-54.
- [5] 刘慧开,杨立,孙丰瑞.基于红外测温的异步电机内部温升的计算方法研究 [J].哈尔滨工程学报,2006, 27(4):496-500.
- [6] 刘慧开,杨立,孙丰瑞.基于红外测温的异步电机 内部温升传热反计算 [J]. 工程热物理学报,2006, 27(S2):77-80.
- [7] James W T, Jorge H T, Bahman A. Methodology for Estimation of Time-dependent Surface Heat Flux Due to Cryogen Spray [J]. Ann Biomed Eng, 2002, 30(1): 19–33.
- [8] Ozisik M N. Inverse Heat Transfer. Fundamentals and Applications [M]. NewYork: Taylor & Francis, 2000.