

基于直流注入的三相感应电动机 等效负载热试验研究

王传军¹, 刘 祺², 童陟嵩², 李永奇¹

(1. 上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司, 上海 200063;

2. 上海电科电机科技有限公司, 上海 200063)

摘 要: 基于直流注入的等效负载试验是确定三相感应电动机温升的一种间接方法, 具有无需在电机轴端耦合机械负载、能耗低等优势。根据这一原理设计了一套具有交、直流供电回路的 24 工位热试验装置。装置在供给电机交流电的同时, 注入连续且电流可调的直流电流, 增加在电机绕组上的电流有效值, 实现等效负载, 从而完成电机的热试验。试验表明: 直流注入等效负载法标准偏差稍大于直接负载法试验标准偏差, 不确定度在可接受范围内。该装置可用于电机加速热老化试验, 分析其绝缘性能, 获得电机的预期寿命。

关键词: 感应电动机; 等效负载; 直流注入; 热试验

中图分类号: TM 306 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)07-0084-05

doi: 10.12177/emca.2021.043

Research on Equivalent Load Thermal Test of Three-Phase Induction Motor Based on DC Injection

WANG Chuanjun¹, LIU Qi², TONG Zhisong², LI Yongqi¹

(1. Shanghai Engineering Research Center of Motor System Energy Saving Co., Ltd.,

Shanghai 200063, China;

2. SEARI Motor Science and Technology Co., Ltd., Shanghai 200063, China)

Abstract: An equivalent load test based on DC injection is designed to allow the temperature rise of the induction motor at rated load to be determined experimentally from a single test at conditions other than rated load. This method is often used in the cases of special machines with inaccessible free shaft ends, high-speed machines or vertical machines. According to this principle, a set of 24-position thermal test device with AC and DC power supply circuit is designed. The device injects continuous and adjustable DC current while supplying AC power to the motor, increases the effective value of current in the motor winding, realizes equivalent load, and completes the thermal test of the motor. The test shows that the standard deviation of the DC injection equivalent load method is slightly larger than that of the direct load method, and the uncertainty is within an acceptable range. This device can be used in the accelerated thermal aging test of the motor to analyze its insulation performance and obtain the expected life of the motor.

Key words: induction motor; equivalent load; DC injection; thermal test

0 引 言

电机产品的热试验有直接负载热试验和等效

负载热试验 2 类^[1]。直接负载热试验通过轴联结对电机输出轴施加一定的负载进行试验。与直接负载热试验相比, 等效负载热试验具有如下优点:

收稿日期: 2021-04-13; 收到修改稿日期: 2021-05-18

作者简介: 王传军(1973—), 男, 教授级高级工程师, 研究方向为电机试验技术及电机检测设备。

不需要在轴端耦合机械负载;对电源容量要求大大降低;试验设备简单、经济,应用方便。

基于等效负载方法的上述优点,国内外科研究院所和电机生产厂家很早就开展了一些研究和探索。20 世纪 90 年代,欧美国家对定子叠频法进行大量的试验研究,21 世纪初,欧美学者又将定子叠频法进一步扩展至效率估算领域^[2]。综合国外的标准及国内经验,我国于 2007 年制定了 GB/T 21211—2007《等效负载和叠加试验技术 间接法确定旋转电机温升》标准^[3],并于 2017 年重新界定了各试验方法的不确定度。虽然各类间接试验法已成为了推荐标准,但国内仍鲜有针对此类方法和类似装置开展研究、研制的报道,在标准制修订过程中也缺少相关试验数据的对比。

本文对 GB/T 21211—2017 标准“等效负载热试验直流注入法”进行了研究,并基于该方法开发了三相感应电动机等效负载热试验装置。详细介绍了装置研制的关键因素和要点。通过应用该装置积累了一定的试验数据,为相关研究提供帮助。

1 直流注入法理论

电机产品的等效负载热试验是在非额定负载条件下,通过单一试验近似地确定电机部件在额定负载时的温升,对于电机定子绕组来说,即意味着在绕组中产生有效的满载电流^[4]。

直流注入法被试电机由交流电源供电并在额定电压下空载运行,此时利用可调电压的直流电源在电机三相定子绕组上各叠加一直流电流,调节直流电源输出电压,使得交流空载电流的有效值叠加上注入的直流电流等于电动机的满载电流,即实现等效负载。直流注入的等效负载试验线路原理图如图 1 所示。被试电机和交流电源发电机均是星形接法,且两者的中性点是可用的,直流电源接在 2 个中性点中间。调节直流发电机输出电流,即可增加被试电机定子绕组内的电流有效值,交流电源发电机提供额定电压并能承受额定电流。

直流电源建立的是空间静止磁场,其极数是定子极数的 3 倍。转子旋转产生磁通和电流,因而在转子中有额外的损耗,即在转子上产生制动转矩,在定子绕组中也产生反作用电流分量。交流电源则提供补偿电流,平衡制动转矩反应产生

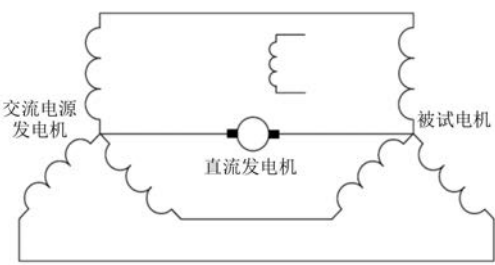


图 1 直流注入的等效负载试验线路原理图

的去磁作用。
注入的直流电流越大,转子产生的制动转矩越大,因此调节直流电源的输出电流即可达到调节负载的目的。

2 装置电气系统设计

2.1 试验能力

装置主要用来完成 550 W 及以下三相感应电动机的热试验。试验能力要求如表 1 所示。

表 1 试验能力要求

参数名称	参数值
功率范围/W	≤550
额定电压/V	380
额定频率/Hz	50
电流/A	≤2.2
极数	2、4、6
试验工位	24

2.2 系统设计

基于试验能力需求,采用直流注入法设计三相感应电动机等效负载热试验装置。系统原理图如图 2 所示。该系统由交/直流供电单元、控制单元、测量单元等部分组成。交流电源由电网直接供电,A1/B1/C1/N 为 380 V/50 Hz 三相四线供电电网电源;VD1/VD2/VD3 为可编程直流输出电源,其主要技术参数如表 2 所示。控制单元由断路器 QF1~QF24、接触器 KM1~KM24、接触器 ZKM1~ZKM24 等组成。电流测量传感器 ZH1~ZH24 和电参数测量仪 P1~P24 构成本装置测量单元。FR1~FR24 为热保护。

2.3 设计要点

为了将直流叠加到交流系统中,在上述基本构成的基础上设计了交直流耦合回路,以确保交

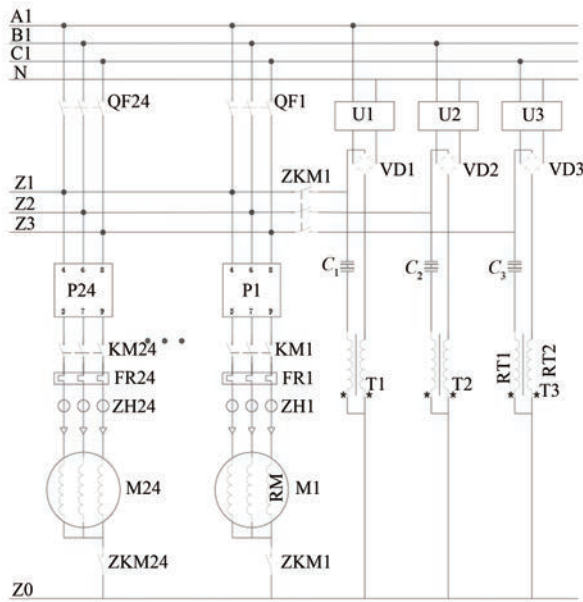


图2 系统原理图

表2 可控直流输出电源主要技术参数

参数名称	参数值
额定电压/V	0~50
额定电流/A	0~60
电压解析度/V	0.001
电流解析度/A	0.01
电压精度	≤0.2%+2LSB
电流精度	≤0.3%+2LSB
纹波/mV	≤100

流和直流电流仅作用在电机绕组上,同时防止交流和直流回路之间产生相互干扰。装置设计主要采取了如下措施:

(1) 为防止交流进入直流电源,增加耦合变压器 T1、T2、T3,其一次绕组和二次绕组产生对称的交流电压并相互抵消,即满足在直流电源上产生的交流电压接近零。

(2) 为使直流仅在电机回路上循环(使电机绕组发热),不能进入交流电源系统而使变压器绕组发热,在耦合变压器的一次回路增加隔直电容器 C₁、C₂、C₃。

参考图 2,设电机的某相绕组为 RM,流经该绕组的电流为 I_{RM},绕组电压为 U_{RM};耦合变压器的一次绕组为 RT1,电感量为 L₁,二次绕组为 RT2,一次绕组上的电压为 U_{RT1},二次绕组上的电压为 U_{RT2},为满足在直流电源上产生的交流电压

接近零的要求,则:

$$\overline{U}_{\text{RM}}=\overline{U}_{\text{RT1}}+\overline{U}_{\text{C}}\approx\overline{U}_{\text{RT2}} \tag{1}$$

式中:

$$\overline{U}_{\text{RT1}}=(R_{\text{RT1}}+\text{j}2\pi fL_1)\overline{I}_{\text{RM}} \tag{2}$$

$$\overline{U}_{\text{C}}=-\text{j}\left(\frac{1}{2\pi fC}\right)\overline{I}_{\text{RM}} \tag{3}$$

欲满足式(1),则应达到:

$$|\overline{U}_{\text{RT1}}|\gg|\overline{U}_{\text{C}}| \tag{4}$$

由式(4)可见,回路设计中,应恰当选取变压器的电感 L₁ 和隔直电容 C,满足 |U_{RT1}| 足够大的条件。隔直电容设计为 12 000 μF。设计的耦合变压器主要参数如表 3 所示。

表3 耦合变压器主要参数

参数名称	参数值
功率/kVA	19.2
输入电压/V	240.0
输入电流/A	80.0
输出电压/V	240.0
输出电流/A	80.0
一次绕组匝数 N ₁ /匝	94.0
二次绕组匝数 N ₂ /匝	96.0
一次绕组直流电阻(75℃)/Ω	0.028 20
二次绕组直流电阻(75℃)/Ω	0.037 55
一次电感 L ₁ /mH	0.081
阻抗/%	3.6

3 试验验证

3.1 试验数据

基于上述设计,以某系列 550 W 三相感应电动机为研究对象进行了试验。试验电机主要技术参数如表 4 所示。为了准确对试验电机参数进行准确测量,通过 FLUKE 高精度电参数分析仪 NORMA4K 对试验对象进行数据采集,试验电机电流注入有效值为 1.36 A,24 台电机同时进行试验时,直流电源输出电压 20.3 V,输出电流 20.5 A,隔直电容电流为 22 A。

表 5 给出了某台电机 10 次试验结果,其中 Δθ_{N,equiv} 是由本装置通过直流注入法测试而确定的温升值,Δθ_N 是根据 GB/T 755—2019《旋转电机定额和性能》规定的直接负载法测试而确定的温

表 4 试验电机主要技术参数

参数名称	参数值
额定功率/W	550
额定电压/V	380
额定频率/Hz	50
额定电流/A	1.36
直流电阻(20 ℃)/Ω	38.2
极数	4
接法	Y

升值^[5]。

随后从 24 台试验电机中随机抽取了 8 台电

表 5 试验温升值

试验次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	均值
$\Delta\theta_{N, equiv}/K$	59.5	62.1	59.3	62.5	60.5	61.2	60.8	59.5	61.7	61.9	60.8
$\Delta\theta_N/K$	57.8	60.5	58.3	57.4	57.2	58.2	58.6	57.5	56.8	58.1	58.0
$\Delta\theta_{N, equiv}-\Delta\theta_N/K$	1.7	1.6	1.0	5.1	3.3	3.0	2.2	2.0	4.9	3.8	2.8

表 6 试验情况对照表

抽样编号	1	2	3	4	5	6	7	8
$\Delta\theta_{N, equiv}/K$	59.7	60.3	60.9	61.5	59.2	62.2	58.7	59.8
$\Delta\theta_N/K$	58.2	57.4	58.6	59.8	57.8	59.3	57.8	57.6
$(\Delta\theta_{N, equiv}-\Delta\theta_N)/K$	1.5	2.9	2.3	1.7	1.4	2.9	0.9	2.2

根据式(5)求得直流注入法测量结果的标准偏差值为 1.2 K。不确定度公式如下：

$$s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} \tag{6}$$

求得测量结果的 A 类标准不确定度为 0.37 K, 自由度为 $u_1=n-1=9$ 。

同理求得, 直接负载法测量结果的标准偏差值为 1.0 K, 测量结果的 A 类标准不确定度为 0.33 K, 自由度为 9。

为更直观地比较 2 种试验方法的试验结果和趋势, 图 3 和图 4 对比了 2 种试验方法所得结果。

比较可见, 直流注入法试验标准偏差稍大于直接负载法试验标准偏差。

从图 3 和图 4 可见, 以等效负载试验方法确定的电机绕组温升与额定负载试验结果比较总是存在偏差, 相对于额定负载下的不确定度定义为

机, 按照 GB/T 1032—2012《三相异步电动机试验方法》进行了热试验^[6]。试验情况对照表如表 6 所示。

3.2 试验数据分析

利用贝塞尔公式：

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \tag{5}$$

式中: s 为标准偏差值; n 为测量次数; x_i 为各次测量值, $i=1\sim n$; $\bar{x}$ 为测量平均值。

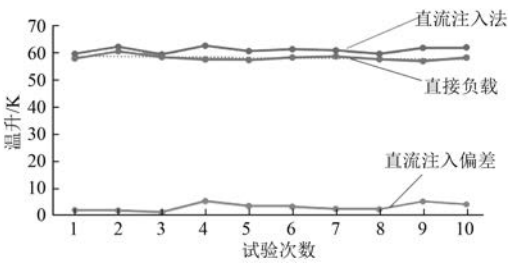


图 3 不同试验次数试验数据对照情况

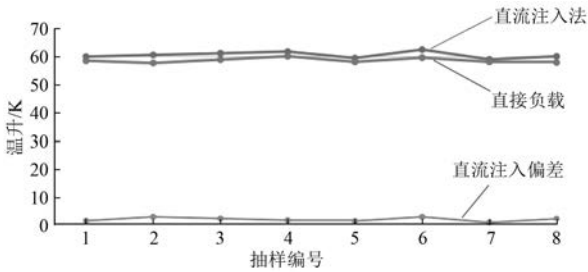


图 4 不同抽样编号试验数据对照情况

$$\gamma = \left(\frac{\Delta\theta_{N, \text{equiv}}}{\Delta\theta_N} - 1 \right) \times 100\% \quad (7)$$

根据表 5 数据,按照式(7)计算不确定度为 4.8%。

相关文献^[4]显示,等效负载法的不确定度在 $\pm 10\%$ 的范围内。

4 结 语

本文采用直流注入法设计了可同时对 24 台最大功率 550 W 的三相感应电动机进行等效负载热试验的装置,提高了试验效率,试验能耗低,测试过程简单易操作,不确定度在可接受范围内,具有良好的实用性。该装置实现了批量地在电机内产生可控的加热,因此适用于对电机进行加速热老化试验。这些测试常常用于分析和总结电机的绝缘设计,掌握其绝缘系统随时间变化的热性能。通过这种方式,可以获得电机的预期寿命^[7]。

电机生产厂家的电机试验站经常会受试验电源、试验设备、试验样品、试验工装、试验批量、安装方式等多因素限制^[8],无法对试验电机施加直接负载。此时使用感应电机等效负载直流注入法

进行热试验是一种非常理想可行的试验方法。

【参 考 文 献】

- [1] 仇志福. 变频器在异步电机叠频温升试验中的应用研究[J]. 工程技术(全文版), 2016(5): 216.
- [2] 王伟光, 陈卫杰, 李伟, 等. 异步电机定子叠频法温升试验及效率研究综述[J]. 电工电能新技术, 2016, 35(10): 49.
- [3] 张宏川. 异步电动机叠频法温升试验浅析[J]. 中国设备工程, 2018(8): 190.
- [4] 中国电器工业协会. GB/T 21211—2017. 等效负载和叠加试验技术 间接法确定旋转电机温升[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [5] 中国电器工业协会. GB/T 755—2019. 旋转电机 定额和性能[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [6] 中国电器工业协会. GB/T 1032—2012. 三相异步电动机试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [7] FARAHANI M. 电机绝缘系统的加速热老化试验[J]. 满宇光, 译. 国外大电机, 2012(2): 5.
- [8] 才家刚. 电机试验技术及设备手册[M]. 4 版. 北京: 机械工业出版社, 2021.

(上接第 76 页)

- [8] WU G N, CAO K J, LUO Y, et al. Partial discharge characteristics of interturn insulation used for inverter-fed traction motor under bipolar impulses[J]. Science China (Technological Sciences), 2012, 55 (8):

2346.

- [9] 丁再春, 朱孟华. 高压变频电机绝缘结构的研究[J]. 装备制造技术, 2013(4): 139.

扫码关注
《电机与控制应用》
微信公众号

