

不同负载施加方法在带实际负载电动机热试验中的对比研究

何吉波*, 陈 禁, 潘政良

(台州利恒检验检测技术有限公司, 温岭 317500)

摘要: 目的 探究新的电动机热试验负载施加方法, 以更准确地评估小功率电动机在实际负载下的温升。

方法 本研究以电泵为例, 先进行电泵的热试验, 然后以该电泵配套的电动机作为试验样品, 分别采用额定功率加载法和热稳功率加载法来开展电动机热试验, 收集并分析试验数据, 再通过对比两种方法下电动机热试验的绕组温升与电泵热试验的绕组温升之差来确定更为贴近电泵热试验绕组温升的负载施加方法。**结果** 额定功率加载法下, 电动机主绕组与电泵热试验时主绕组温升偏差为 9.6 K, 副绕组偏差为 7.6 K; 热稳功率加载法下, 主绕组温升偏差为 0.3 K, 副绕组偏差为 1.2 K。**结论** 采用热稳功率加载法来开展电动机热试验, 能够更准确评估带实际负载电动机的温升, 也更契合电动机在实际情况中的工作状态。

关键词: 热试验; 额定功率; 热稳功率; 实际负载; 对比

0 引言

小功率电动机广泛应用于家用电器领域, 是洗衣机、电风扇、洗碗机等设备正常运转的关键动力源。在实际运行时, 电动机负载情况复杂多变。以洗衣机为例, 不同洗涤模式和衣物量会使电动机负载显著不同。传统热试验多在额定负载下进行, 但电动机实际工作并非总处于额定状态, 过载与轻载现象频繁^[1-3]。若仍以额定负载开展热试验, 则无法模拟电动机真实负载情况, 所获温升数据也不能准确体现实际情况, 这对电动机性能评估与优化造成阻碍。

众多研究表明, 过载或轻载运行会给电动机带来诸多不良影响。从电磁原理角度来看, 电动机实际负载的变化会引起电动机电流的改变, 而电磁损耗(包括铜耗、铁耗等)与电流密切相关^[4]。当负载变动时, 电磁损耗随之改变, 在散热条件不变的情况下, 电动机正常的散热平衡被打破, 进而影响电动机的温升情况。温升过高会破坏绕组绝缘, 导致电动机出现短路等不可逆的故障。同时, 电动机金属部件的硬度和强度也会因为温度升高而下降, 严重影响电动机的可靠性和使用寿命^[5]。此外, 电动机热试验过程受到诸如环境控制、测量方法、安装稳定性、仪器设备、测试人员经验等多种因素影响^[6], 这些因素进一步增大了准确获取电动机温升数据的难度。

对于带实际负载的电动机, 实际负载对温升的影响显著^[7], 以电泵为例, 其运行工况复杂多样, 电动机输出功率会根据流量需求的变化而变化, 不同负载下电动机内部的电磁损耗差异明显, 直接导致温升变化。鉴于此, 深入研究带实际负载电动机热试验的科学负载施加方法, 对于优化电动机温升特性、提升家用电器性能、保障安全可靠运行及推动行业发展具有重要现实意义。

本研究旨在确定带实际负载的电动机在热试验中的准确负载施加方法, 使其更符合电动机实际工况。本研究以电泵电动机为范例展开实验研究, 对比探究不同负载施加方式对电动机温升的影响, 形成准确、全面的数据支持; 以实际数据为依据, 提出更加合理的负载施加方法, 切实提高电动机温升评估的准确性, 为电动机的优化设计提供关键数据参考。

1 材料与方法

1.1 试验样品与设备

1.1.1 试验样品

花园喷射泵 XKJ-1104S(利欧集团浙江泵业有限公司), 额定电压 220 V, 额定频率 50 Hz, 最大输入功率 1100 W, 配套电动机额定功率 750 W。

1.1.2 仪器设备

水泵综合测试系统(DYXN-1型, 无锡市德亿高科技有限

* 通信作者: 何吉波, 工程师, 研究方向为电泵检测。E-mail: hejibo@leopump.com

公司);交流数字电参数测量仪(8902F型,青岛青智仪器有限公司),用于实时测量电泵电压、电流、功率等电参数,电压测量范围10~500 V、测量精度为 $\pm 0.5\%$,电流测量范围为0~40 A、测量精度为 $\pm 0.5\%$,功率测量范围为0~4500 W、测量精度为 $\pm 1.0\%$;智能流量转速测量仪(SFT-B型,杭州茗浪电气有限公司),用于测量电泵的流量和转速,转速测量范围为60~3000 r/min,精度为 $\pm 0.1\%$;安捷伦数据采集器(34972A型,Agilent Technologies Inc.),用于实时测量绕组温度,单模块可达20个通道,最高采样速率可达100 kS/s;交流电源供应器(ANFC020S型,山东艾诺仪器有限公司),为实验提供稳定的电源,其输出电压范围为1~300 V,频率范围45~65 Hz;交流数字电参数测量仪(DMA201型,上海戴默自动化科技有限公司),用于实时测量电动机电压、电流、功率等电参数,电压测量范围0~300 V、测量精度为 $\pm 0.5\%$,电流测量范围为0~40 A、测量精度为 $\pm 0.5\%$,功率测量范围为0~4500 W、测量精度为 $\pm 1.0\%$;磁滞测功机(ZCL75KB/W型,上海戴默自动化科技有限公司),用于模拟负载,转矩测量范围为0~7.5 N·m,测量精度为 $\pm 0.5\%$;JN338型网络化智能数字式转矩转速传感器(10A型,北京新宇航世纪科技有限公司),测量范围为0~10 N·m,0~6000 r/min,精度为 $\pm 0.2\%$,配合获取转矩和转速;热电偶(K型),温度测量元件,测量精度为 $\pm 1.5^\circ\text{C}$ 。

1.2 方法

1.2.1 负载施加方法简述

(1)额定功率加载法:以电动机额定功率作为热试验时的负载施加标准。在试验中,调节测功机加载器使电动机负载等于其额定功率。

(2)热稳功率加载法:将电泵热稳定后的输入功率,作为电动机热试验的负载施加依据。先进行电泵热试验,获取其热稳定状态下的输入功率,之后在电动机热试验时,调节测功机加载器使电动机输入功率等于电泵热试验热稳定状态下的输入功率。

1.2.2 电泵热试验步骤

(1)前处理

为确保采集到的绕组温度具有代表性,将热电偶布置在电动机主副绕组端部。将电泵在温度为 $(23\pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度为45%~75%的环境条件下放置24 h,使电泵内外温度达到平衡状态,确保测试环境的一致性^[8]。

(2)安装与工况调节

将电泵安装在测试台上,连接好进水管和出水管,确保管道连接紧密无泄漏,并向泵腔内灌满水。将热电偶与安捷伦数据采集器连接,采集频率设置为每次10 s,启动仪器采集温度。电泵以220 V电压和50 Hz频率供电,待其稳定出水后,通过调节出口管路阀门来改变电泵的流量,从而改变其负载,

确定电泵最大输入功率。断开电源,电泵停止运行。

(3)运行参数监测

待电泵电动机绕组温度降至 $(23\pm 2)^\circ\text{C}$,重新启动电泵,记录电泵初始状态的电压、电流、输入功率、转速,安捷伦数据采集器持续监测记录电动机主、副绕组温度和环境温度。

(4)达到热稳定状态

电泵在运行过程中,其温度会逐渐升高。待电泵运行至电动机绕组温度稳定后(热稳定判定依据为绕组温度在30 min内变化不超过 1°C ,一般热稳定时间为1.5~2 h),记录电泵热稳定状态的电压、电流、输入功率、转速,安捷伦数据采集器停止记录。断开电源,停止测试。

1.2.3 电动机热试验步骤

(1)前处理

以电泵配套电动机作为电动机热试验的样品,热电偶布置位置不变。将电动机在温度为 $(23\pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度为45%~75%的环境条件下放置24 h,使电动机内外温度达到平衡状态,确保测试环境的一致性^[8]。

(2)安装与负载调节

将电动机与测功机连接,热电偶与安捷伦数据采集器连接,采集频率设置为每次10 s,启动仪器采集温度。电动机以220 V电压和50 Hz频率供电,启动电动机。当采用额定功率加载法时,调节测功机加载器使得负载等于电动机额定功率。当采用热稳功率加载法时,调节测功机加载器使得电动机输入功率稳定在电泵热稳定后输入功率。

(3)运行参数监测

记录电动机初始状态的电压、电流、输入功率、输出功率、转矩、转速、效率,安捷伦数据采集器持续记录电动机主、副绕组温度和环境温度。

(4)达到热稳定状态

电动机在运行过程中,其温度会逐渐升高。待电动机运行至绕组温度稳定后(热稳定判定依据为绕组温度在30 min内变化不超过 1°C ,一般热稳定时间为1.5~2 h),记录电动机热稳定状态的电压、电流、输入功率、转速,安捷伦数据采集器停止记录。断开电源,停止测试。

1.2.4 数据处理

(1)数据收集整理

收集电泵和电动机热试验期间记录的数据,分别建立电泵、电动机电参数和绕组温度的详细表格。对每种试验条件下的电压、电流、功率、转速、转矩、效率及温度等数据进行系统整理,确保数据的准确性和完整性。

(2)温升差计算

计算并建立表格,对比额定功率加载法和热稳功率加载法

下的电动机热试验与电泵热试验的绕组温升之差。

(3) 绘制温升曲线

以时间为横坐标, 绕组温升为纵坐标, 绘制电泵热试验和电动机热试验的绕组温升随时间变化曲线。

2 结果与分析

2.1 热试验期间电泵及电动机数据的分析

电泵热试验热稳定后的输入功率相比于冷态下降 29.9 W, 输入功率下降率为 2.84%, 转速下降 70 r/min, 下降幅度达

2.53%。热稳定后电动机主绕组温升 71.1 K, 平均温升速率为 0.59 K/min, 副绕组温升 73.7 K, 平均温升速率为 0.61 K/min。电泵热试验数据记录如表 1。

额定功率加载法下的电动机热试验, 电动机热稳定后的输入功率相比于冷态下的输入功率增加 58 W, 增加率为 5.74%, 转速下降 101 r/min, 下降率为 3.66%, 效率下降 3.8%。热稳定后电动机主绕组温升 80.7 K, 平均温升速率为 0.67 K/min, 副绕组温升 81.3 K, 平均温升速率为 0.68 K/min。电动机热试验数据记录如表 2。

表 1 热试验期间电泵电参数和电动机绕组的温度

电泵状态	电压(V)	电流(A)	输入功率(W)	转速(r/min)	主绕组温度(°C)	副绕组温度(°C)	环境温度(°C)
冷态	220.2	4.92	1052.3	2766	23.7	23.6	23.2
热稳定	220.3	4.72	1022.4	2696	94.8	97.4	23.7

表 2 热试验期间额定功率加载法下的电动机电参数和电动机绕组的温度

电机状态	电压(V)	电流(A)	输入功率(W)	输出功率(W)	转速(r/min)	转矩(N·m)	效率(%)	主绕组温度(°C)	副绕组温度(°C)	环境温度(°C)
冷态	220.6	4.703	1011	747	2756	2.589	73.9	23.1	23.2	22.1
热稳定	220.6	4.94	1069	749	2655	2.7	70.1	104.5	105.1	23.8

热稳功率加载法下的电动机热试验, 电动机热稳定后的输出功率相比于冷态下的输出功率下降 28 W, 下降率为 3.70%, 转速下降 61 r/min, 下降率为 2.22%, 效率下降 2.7%。热稳定

后电动机主绕组温升 71.4 K, 平均温升速率为 0.60 K/min, 副绕组温升 74.9 K, 平均温升速率为 0.62 K/min。电动机热试验数据记录如表 3。

表 3 热试验期间热稳功率加载法下电动机电参数和电动机绕组的温度

电机状态	电压(V)	电流(A)	输入功率(W)	输出功率(W)	转速(r/min)	转矩(N·m)	效率(%)	主绕组温度(°C)	副绕组温度(°C)	环境温度(°C)
冷态	220.6	4.756	1023	757	2752	2.63	74.0	22.8	22.8	22.1
热稳定	220.6	4.74	1022	729	2691	2.589	71.3	95.6	99.1	24.2

2.2 绕组温升结果的分析

起始阶段, 电泵热试验的输入功率更高, 电流更大, 因此绕组温升上升更快。而在 30 min 后, 电泵的输入功率由于电动机电磁损耗增加而逐渐降低, 电流也有较大下降; 电动机施加额定负载时, 电磁损耗增加, 但为了维持稳定的输出功率, 增加输入功率, 电流也会随之变大, 因此 30 min 后绕组温升相比之下则上升更快一些。

从电动机温升整体趋势来看, 热稳功率加载法下的绕组温升曲线上升相对平缓, 并且在 60 min 后逐渐趋于稳定, 更接近

电泵热试验时绕组温升; 而额定功率加载法下的绕组温升曲线上升趋势较为明显, 也在 70 min 后逐渐趋于稳定。

表 4 中, 热稳功率加载法下的电动机热试验与电泵热试验的绕组温升之差很小, 且远小于额定功率加载法下的电动机热试验与电泵热试验的绕组温升之差。从图 1 也可以看出, 该方法下的电动机热试验温升变化曲线与实际工作中的温升变化趋势更为接近, 这表明热稳功率加载法下的电动机热试验充分考虑到实际工作中负载的不确定性和电泵的实际运行状态, 能够更好地模拟电动机在实际工作中的发热情况。

表 4 电动机热试验与电泵热试验的绕组温升差

负载施加方法	主绕组温升差(K)	副绕组温升差(K)
额定功率加载法	9.6	7.6
热稳功率加载法	0.3	1.2

然而在实际应用中, 电泵运行环境复杂, 电动机常偏离额定条件工作。本研究中电动机实际负载小于额定负载, 其绕组

温升会更小; 同理, 当实际负载大于额定负载时, 绕组温升则会更大。

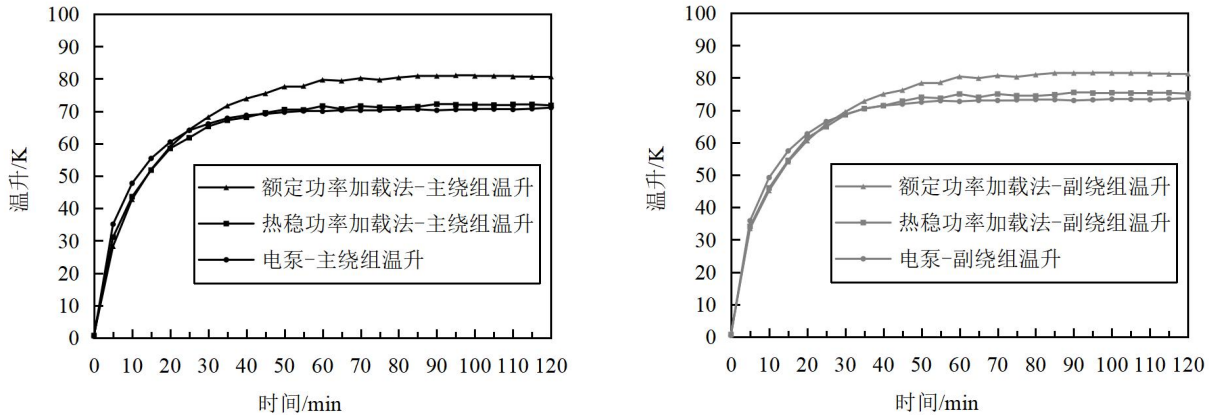


图1 电泵、电动机热试验时绕组温升随时间变化曲线

3 讨论与结论

本研究主要以电泵电动机为例进行试验, 提出了一种基于电泵热稳定后的输入功率作为电动机热试验负载施加依据, 相较于传统的额定功率加载法, 该方法充分考虑了实际工作中的负载不确定性和电泵的实际运行状态, 具有较高的准确性和实用性。然而对于其他类型和规格的电动机, 该负载施加方法的适用性还需进一步验证^[9-10]。

此外, 本研究采用高精度、合适量程的仪器设备来减小仪器引起的误差; 采用热电偶测量绕组的温度, 来避免人为测量电阻和推导 0 s 电阻带来的误差; 通过严格控制测试室环境温度在 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, 来减小环境对绕组温度的影响。然而, 电泵热试验和电动机热试验在不同的测试台测试, 且安装也并非完美, 因此仍然难免会存在设备和人员带来的误差, 对实验结果的准确性有一定影响。

未来的研究可以进一步扩大研究对象, 对不同类型和规格的电动机进行热试验, 验证本方法的通用性和可靠性。同时, 可以深入研究电动机在不同工况下(如不同频率、不同电压等)的热特性, 以及如何更好地控制和优化电动机的温升, 提高电动机的使用寿命和可靠性。此外, 还可以结合先进的测试技术和数学模型, 进一步提高热试验的精度和效率, 为电动机的设计、制造和应用提供更全面的技术支持。

参考文献

- [1] 姚磊, 张传甲, 程磊, 等. 带实际负载运行的电动机效率确定方法探讨[J]. 家用电器, 2019, (12): 27-30, 35.
- [2] 张新丽. 异步电动机负载率与温升关系的试验研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2015.
- [3] 李练兵, 刘慧敏, 朱凌云. 基于有限元法的异步电动机负载特性及温度场分析[J]. 电机与控制学报, 2013, 17(06): 56-61.
- [4] 刁立民, 郭星岚. 高电压大功率笼型感应电机不同负载下的温度场特性分析[J]. 防爆电机, 2020, 55(05): 16-20.
- [5] 吴尧辉, 方鑫. 不同负载下的电机温度场计算[J]. 微特电机, 2020, 48(12): 27-31.
- [6] 金瑾. 电动工具温升测试过程的分析[J]. 电动工具, 2008, (02): 13-20, 8.
- [7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 小功率电动机第 21 部分: 通用试验方法: GB/T 5171. 21—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [8] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 单相异步电动机试验方法: GB/T 9651—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [9] 谢晋雄. 不同替代负载对器具温升测试准确性影响的试验研究[J]. 检验检疫学刊, 2010, 20(05): 1-3.
- [10] 邓文慧, 桂卫华, 喻寿益. 大功率牵引电机随负载变化的热场分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(05): 1484-1490.