

便携式电机能效测试系统研发^{*}

苏文胜^{1,2}, 薛志钢^{1,2}, 王欣仁^{1,2}

(1. 江苏省特种设备安全监督检验研究院无锡分院, 江苏 无锡 214174;

2. 国家桥门式起重机械产品质量监督检验中心, 江苏 无锡 214174)

摘要: 利用单片机开发了电流、电压同步高速采集设备。在不采用转速转矩传感器的情况下, 提出了一种基于频谱分析的电机转速识别算法和基于气隙转矩法的电机转矩识别算法。开发了便携式电机能效测试设备, 可在现场不拆卸电机的情况下完成电机能效测试, 方便快捷。使用该设备进行电机能效测试, 并与电机综合性能测试系统测试结果进行对比, 吻合度较高。该便携式电机能效测试设备可满足工程测试实际需求。

关键词: 电机能效测试; 便携式测试仪; 无传感器

中图分类号: TM 93 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)05-0105-06

doi: 10.12177/emca.2020.020

Development of Portable Motor Energy Efficiency Testing System^{*}

SU Wensheng^{1,2}, XUE Zhigang^{1,2}, WANG Xinren^{1,2}

(1. Wuxi Branch of Special Equipment Safety Supervision Inspection Institute of Jiangsu Province, Wuxi 214174, China;

2. National Center of Supervision and Inspection on Product Quality of Overhead Gantry Crane Machinery, Wuxi 214174, China)

Abstract: A high-speed current and voltage synchronous acquisition device is developed based on single-chip computer. Without the use of speed and torque sensor, a motor speed identification algorithm based on frequency spectrum analysis and a motor torque identification algorithm based on air gap torque method are proposed. The portable motor energy efficiency test equipment is developed, which can complete the motor energy efficiency test without dismantling the motor on site. This tester can realize convenient and fast test. It is used to test a motor and the test results are compared with those obtained from an integrated motor performance testing system. The good agreement between the results verifies the applicability of the portable tester. It can meet the practical engineering test requirements.

Key words: motor energy efficiency test; portable tester; sensorless

0 引言

在国家大力提倡“节能减排”的今天, 随着政策的宣传落实和执行, 节能产品必将受到更多消

费者的青睐。随着国家节能工作的深入, 各企事业单位都已经开展各类能源产品的监察工作, 确定是否需要用更节能的产品来替代或者改造现有的设备^[1]。

收稿日期: 2020-01-18; 收到修改稿日期: 2020-04-01

^{*} 基金项目: 江苏省特种设备安全监督检验研究院科研项目(KJ(Y)2014027); 江苏省市场监督管理局能力提升项目(JG20174105)

作者简介: 苏文胜(1980—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为特种设备检测新技术。

薛志钢(1988—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为特种设备检测方法。

王欣仁(1985—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电机检测。

电动机广泛应用于生产和生活的各个领域,用于电力拖动、旋转机械、水泵和压缩机等各种设备中。根据统计,2019 年底中国各类电动机系统总装机容量约为 16 亿千瓦,约占全国总装机容量的 60%,但运行效率比国外先进水平约低 3% ~ 5%^[2]。由此可见,电动机是“用电大户”,也是“耗能大户”,具有相当大的节能潜力,对于节能环保有重要意义。

大功率电动机在出厂时,往往在内部安装了电机在线监测系统,可以在线监测电动机的电压、电流和效率值。对于中小功率的电动机,考虑到设备成本问题,一般不配备监测系统^[3]。目前,电动机能效测试都在实验室环境下进行,通过转矩转速传感器和功率计等高精度仪器进行采集计算得到。然而,在现场环境下无法在设备间安装转矩转速传感器,也无法进行空载试验、定子电阻测试等检测项目。因此,实验室检测方法不适用于现场检测。现场电动机系统的能效评估需要研究开发现场电动机能效测试设备,并且希望设备体积小、重量轻、便于携带、操作简单^[4]。

针对上述需求,本文在不采用转速转矩传感器的情况下,提出了基于频谱分析的电机转速识别算法和基于气隙转矩法的电机转矩识别算法,并在此基础上开发了便携式电机能效测试设备,可在现场不拆卸电机的情况下完成电机能效测试。

1 基本理论与测试方法

电动机主要是由静止的定子、转动的转子以及机壳、端盖和主轴等附件组成。定子、转子之间存在气隙。

三相异步电动机功率传递情况如图 1 所示^[5]。

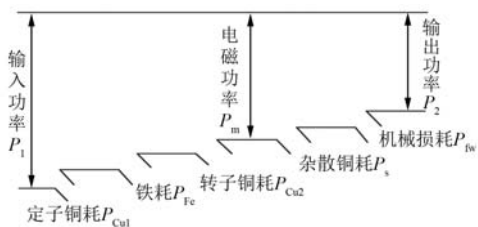


图 1 三相异步电动机功率传递情况

由图 1 可知,电动机损耗主要包括:定子铜

耗、转子铜耗、转子铁耗、机械损耗(风摩耗)和杂散损耗。三相异步电动机的总损耗 P_T 和电动机的输出功率 P_2 为

$$P_T = P_{fw} + P_{Fe} + P_s + P_{Cu1} + P_{Cu2} \quad (1)$$

$$P_2 = P_1 - P_T \quad (2)$$

式中: P_{fw} 为机械损耗(风摩耗); P_{Fe} 为铁耗; P_s 为杂散损耗; P_{Cu1} 为定子铜耗; P_{Cu2} 为转子铜耗; P_1 为电机输入功率。

由电机学理论可知,三相异步电动机输出功率等于作用于转轴上的转矩和对应的机械角速度的乘积,即:

$$P_2 = T \cdot \omega_r \quad (3)$$

$$P_m = T_e \cdot \omega_r \quad (4)$$

$$\omega_r = \frac{2\pi n}{60} \quad (5)$$

式中: T 为电机输出转矩; ω_r 为电机的机械角速度; P_m 为电机电磁功率; T_e 为电机电磁转矩(即气隙转矩); n 为电机转速。

由图 1 可知:

$$P_2 = P_m - P_s - P_{fw} \quad (6)$$

综合式(1)~式(6),可得电机能效的表达式:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{T_e \cdot \omega_r - P_{fw} - P_s}{P_1} \quad (7)$$

式(7)中,机械损耗 P_{fw} 需要经过空载试验才能得到,现场无法进行试验。通过大量的空载试验数据进行分析,将机械损耗按电机额定输出功率 P_{2N} 的 1.2% 进行估算,即 $P_{fw} = P_{2N} \times 1.2\%$ 。电机杂散损耗 P_s 根据 GB/T 1032—2012^[6] 中的方法计算:

$$P_s = P_1 \times (0.025 - 0.005 \lg P_N) \quad (8)$$

由以上式子可知,便携式电机能效测试仪的难点在于无传感器条件下的转速和气隙转矩的测试。为了对这 2 个量进行测试,本文制订了如图 2 所示的测试方案。

1.1 转速辨识原理

采用基于定子电流频谱分析的无传感器辨识算法来获取电机的转速。根据三相异步电动机工作原理可知,定子通电后产生旋转的磁场与转子绕组产生相对运动,转子绕组切割磁感应线产生感应电动势,从而使转子绕组中产生感应电流。转子绕组中的感应电流与磁场作用,产生电磁转

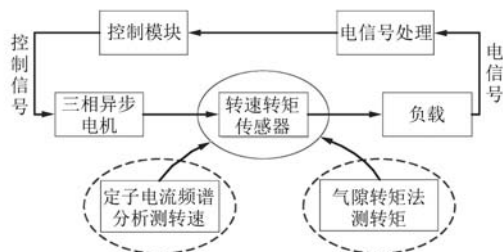


图2 便携式电机能效测试方案图

矩,使转子进行旋转。

首先,通过电流传感器对一相电流进行数据采集,采样频率不低于 20 kHz,采样周期大于 10。然后,对采集到的电流信号进行解调,分解为不同频率成分的正弦信号,对该信号进行低通滤波,将滤波后的信号进行快速傅里叶变换(FFT),得到包含所需转子频率的定子电流频谱图。最后,在频谱图中划分出转子频率的搜索区域,区域中最大幅值所对应的频率即为转子频率。通过计算可以得到电机转速值^[7]。

1.2 转矩辨识原理

采用基于气隙转矩的方法在线辨识电机转矩。电动机电枢绕组中有电流流过时,通电的电枢绕组在磁场中会受到电磁力的作用,该电磁力与电机电枢铁心半径乘积即为电磁转矩。在现场环境下无法获得电机的结构参数,也无法通过现场检测得到所需的电磁力和电磁转矩值。由三相异步电动机的结构可知,在定子和转子之间有一层很薄的气隙。本文采用气隙转矩法计算得到电动机的电磁转矩值。

首先,通过电压和电流传感器对电动机的输入电压和电流进行采集。然后,对电压和电流信号进行 Clarke 坐标变换和 Park 坐标变换,将目标坐标系从定子转移到转子,由三相静止的坐标系转变为两相旋转的坐标系,得到定子磁链关于电压和电流的表达式。最后,由定子磁链和定子电流计算得到电机的气隙转矩值。气隙转矩法相比传统方法,更加简单且易于实现^[8]。

2 硬件开发

本文系统设计了一块基于 STM32F407VET 的高速采集板卡,采用六路差分放大电路对电流和电压进行采集,可以很好地抑制外界信号的干

扰和温度变化导致的信号偏差。采用最先进的 20 位模数(AD)采样芯片 AD7609 对电压和电流值进行采样和模数转换,将数字信号传给 STM32F407VET 芯片进行计算和数字信号处理,最后通过 USB 高速传输芯片 USB3300 将经过处理的数据传输给上位机进行计算分析。

2.1 信号采集模块

首先通过电压互感器将三相交流电压信号转换为毫伏级的电压信号,通过罗氏线圈将三相电流信号也转换为毫伏级的电压信号。六路信号通过差分放大芯片 AD623BR 将信号放大到 0~5 V 可供 AD 芯片采集的范围内。六路差分放大电路如图 3 所示。

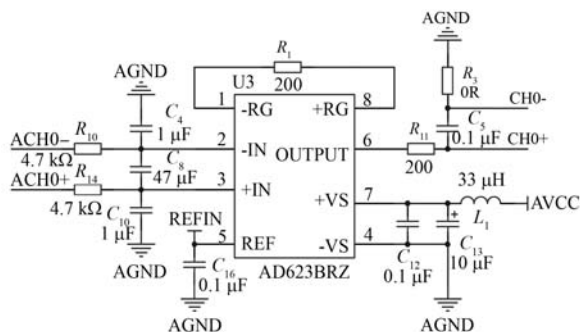


图3 六路差分放大电路

采用 AD7609 采样芯片对放大后的电压和电流信号进行采样,将采集到的模拟量转换成数字量传输给 STM32F407VET 进行计算和数字信号处理。该系统的采样频率设置为 10 kHz。模数转换电路如图 4 所示。

2.2 信号传输模块

因为 STM32F407VET 自带高速 USART 通信串口,所以直接采用高速 USB 转换芯片 USB3300 将串口通信信号转为 USB 通信信号。通过 USB 接口和上位机进行信号传输,将信号采集板卡采集到的电压和电流值传输给上位机进行分析计算。USB 信号转换电路如图 5 所示。

3 软件及系统集成

软件基于 LabVIEW 和 MATLAB 进行开发。LabVIEW 通过动态链接库的形式调用采集板的数据,如图 6 所示。转速和转矩辨识算法基于 MATLAB 实现。在转速的算法中,首先对采集的信号进行滤波和加窗处理,然后进行 FFT 和频谱

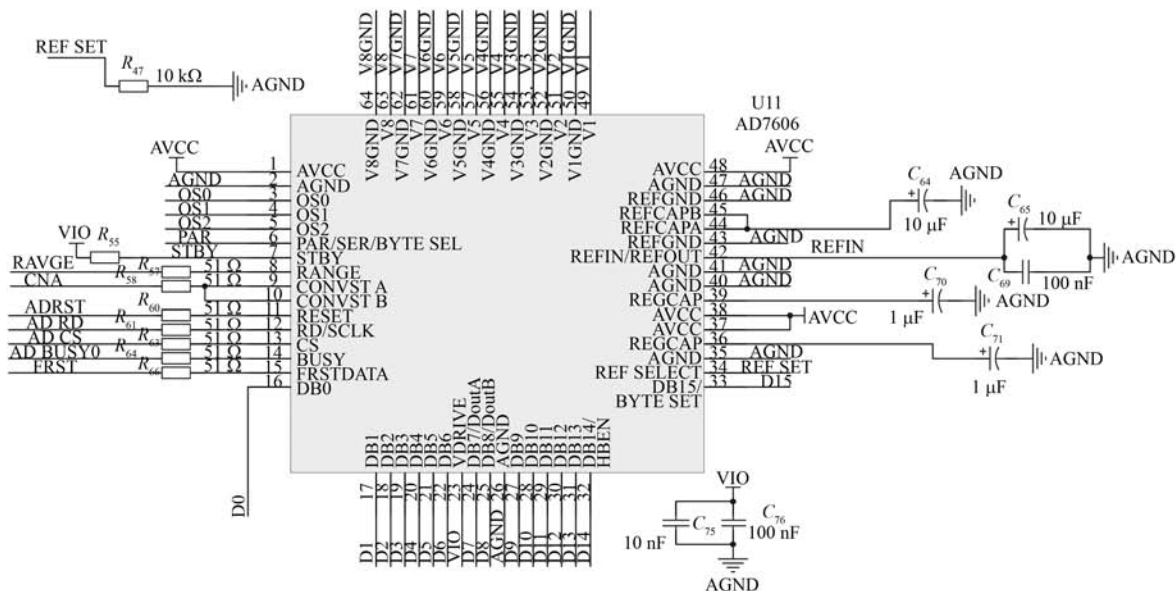


图 4 模数转换电路

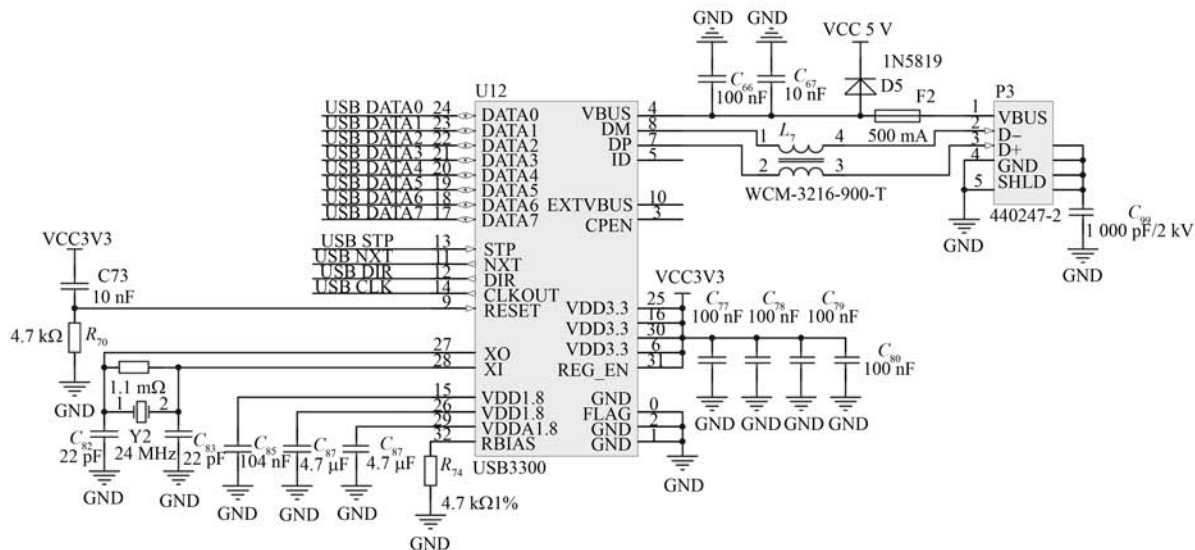


图 5 USB 信号转换电路

细化,其次对频谱进行校正和峰值搜索,最终确定电机的转速。在转矩的算法中,首先对采集的三相电压和三相电流进行 Clarke 和 Park 坐标变换,然后基于精细积分法计算得到磁链,最终基于磁链计算电机的气隙转矩^[9-11]。在上述算法后利用 LabVIEW 调用 MATLAB 的算法,基于采集的数据进行实时计算分析,得到电机的转速、转矩和能效。数据采集和分析结果如图 7 所示。

4 系统测试分析比较

采用自主研发的便携式电机能效现场测试仪与国家桥门式起重机械产品质量监督检验中心的电机综合性能测试系统进行测试对比,以此来验证便携式电机能效现场测试仪测试数据的准确性和稳定性。被测电机铭牌参数如表 1 所示。

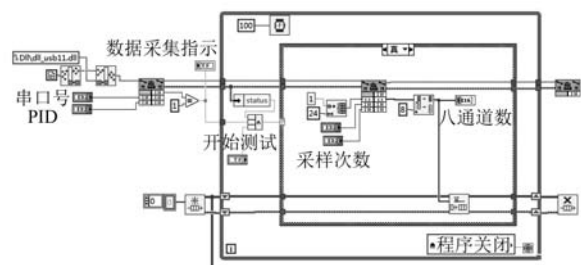


图6 LabVIEW 调用动态链接库

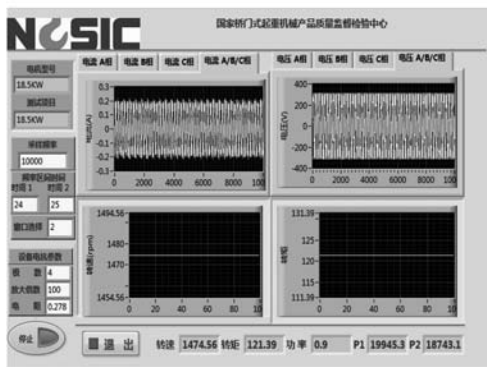


图7 集成系统界面显示数据采集和分析结果

测试时对电机的负载情况进行控制,将负载

表1 被测电机铭牌参数

参数名称	参数值
额定电压/V	380
额定电流/A	35.3
额定功率/kW	18.5
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 480
额定效率/%	92.6
电机接法	三角形

率依次设置为 125%、100%、75%、50% 和 25%,对 5 种工况下的电机转速、转矩和功率进行在线辨识。电机转速辨识算法结果分析如表 2 所示。电机气隙转矩辨识算法结果分析如表 3 所示。电机能效辨识算法结果分析如表 4 所示。

表2 电机转速辨识算法结果分析

负载/%	试验台实测	仪器实测	转速差/	误差/%
	转速/(r·min ⁻¹)	转速/(r·min ⁻¹)	转速差/(r·min ⁻¹)	
125	1 468.20	1 467.12	1.08	0.07
100	1 475.28	1 474.56	0.72	0.05
75	1 481.85	1 480.98	0.87	0.06
50	1 487.72	1 487.03	0.69	0.05
25	1 493.11	1 492.87	0.34	0.02

表3 电机气隙转矩辨识算法结果分析

负载/%	输入功率/W	试验台实测转矩/(N·m)	杂散损耗/W	气隙转矩/(N·m)	仪器实测转矩/(N·m)	误差/%
125	25 165	150.4	375.3	154.5	152.5	1.39
100	19 945	119.7	237.9	124.1	121.5	1.50
75	14 889	89.4	94.3	92.1	91.0	1.79
50	9 973	59.4	58.5	62.2	60.6	2.02
25	5 172	29.6	14.5	32.1	30.5	3.04

表4 电机能效辨识算法结果分析

负载/%	输入功率/W	试验台数据		仪器测试数据		误差/%
		输出功率/W	效率/%	输出功率/W	效率/%	
125	25 165	23 125	91.89	23 429	93.10	1.21
100	19 945	18 500	92.75	18 836	94.44	1.69
75	14 889	13 875	93.19	14 101	94.71	1.52
50	9 973	9 250	92.75	9 426	94.52	1.77
25	5 172	4 625	89.41	4 711	91.08	1.67

通过测试数据可以发现,该测试仪的转速辨识算法辨识精度较高,在电机各工况下均适用,转速误差均在 1.5 r/min 以内。电机转矩辨识算法在电机处于较高负载状况时精度较高,辨识误差在 2% 以内;在低负载运行时,误差也不超过 4%。

正是由于该便携式电机能效现场测试仪对于转速和转矩均有很高的测试精度,因此电机能效值与实验室环境下的电机综合性能测试系统能效值相比误差也较小,达到了 2% 之内,完全能够满足电机能效现场测试环境的要求。

5 结 语

本文开发了一种无传感器的现场电机能效测试的设备。首先,基于采集的电压和电流,对电机的转速和转矩进行了无传感器辨识,并用 MATLAB 对其进行实现,为研制便携式电机能效测试仪奠定了基础。其次,研发了多通道同步高速采集卡,具备完成三相电压和三相电路同步采集的能力。最后,完成 LabVIEW 和采集板之间的通信,并通过 LabVIEW 调用 MATLAB 将采集的电压、电流数据进行实时分析,完成了便携式电机能效测试的集成。

与实验室环境下的测试系统进行对比,结果表明便携式电机能效测试仪的能效值误差在 2% 以内,能够满足电机能效现场测试的需求。

调研结果显示,此前国内尚没有在无传感器条件下进行异步电动机能效测试的系统。本文研发的便携式电机能效测试仪实现了电动机在现场环境下能效测试的突破。

【参 考 文 献】

- [1] 韦锋,孙逊,史伟伟.便携式电机能效检测仪的研制[J].机电信息,2013(3): 125.
- [2] 闫华光,范滢,段小华,等.现场电机效率测试方法及智能测试系统研究[J].电力需求侧管理,2008,10(1): 34.
- [3] 于连春.感应电机无速度传感器自适应控制策略研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- [4] PHUMIPHAK P, CHAT-UTHAI C. Induction motor speed measurement using motor current signature analysis technique[C]// 2009 International Conference on Electrical Machines and Systems, 2009.
- [5] 范滢,闫华光,于海波,等.电动机能效测试方法及智能测试系统的研究[J].电气技术,2008(9): 26.
- [6] 全国旋转电机标准化技术委员会.三相异步电动机试验方法:GB/T 1032—2012[S].2012.
- [7] 宋庆启.基于电磁力机理的电机能效现场检测方法研究[D].大连:大连理工大学,2017.
- [8] 何志明,廖勇,向大为.定子磁链观测器低通滤波器的改进[J].中国电机工程学报,2008,28(18): 61.
- [9] 江波,唐普英.基于复调制的 ZoomFFT 算法在局部频谱细化中的研究与实现[J].大众科技,2010(7): 48.
- [10] 丁康,潘成灏,李巍华.ZFFT 与 Chirp-Z 变换细化选带的频谱分析对比[J].振动与冲击,2006,25(6): 9.
- [11] 李天昀,葛临东.两种快速频域细化分析方法的对比[J].系统工程与电子技术,2004,26(9): 1192.
- [5] GUO L. Implementation of digital PID controllers for DC-DC converters using digital signal processors[C]// 2007 IEEE International Conference on Electro/Information Technology, 2007.
- [6] KAPAT S, KREIN P T. PID controller tuning in a DC-DC converter: a geometric approach for minimum transient recovery time [C] // 2010 IEEE 12th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), 2010.
- [7] 韩京清.从 PID 技术到“自抗扰控制”技术[J].控制工程,2002,9(3): 13.
- [8] 韩京清.自抗扰控制器及其应用[J].控制与决策,1998,13(1): 19.
- [9] 高志强.自抗扰控制思想探究[J].控制理论与应用,2013,30(12): 1498.
- [10] ENGELEN K, DE BREUCKER S, TANT P, et al. Gain scheduling control of a bidirectional DC-DC converter with large dead-time [J]. IET Power Electronics, 2014, 7(3): 480.
- [11] 梅杨,陈丽莎,黄伟超,等.级联式双向 DC-DC 变换器的优化控制方法[J].电工技术学报,2017,32(19): 153.

(上接第 99 页)