

方波无刷直流风机无传感器控制器设计*

黄 其^{1,2}, 王 迪², 曹纪超², 胡 斌²

(1. 西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710072;

2. 贵州航天林泉电机有限公司, 贵州 贵阳 550081)

摘 要: 无刷直流风机大量应用在电子设备的散热系统中, 通常要求风机体积小、风量大、调速方便。针对一款 12 V 无刷直流风机设计控制器, 为了降低风机控制器的成本、缩小体积, 所有电子元器件均采用表贴式国产化产品, 控制器采用无位置传感器方波控制算法, 风机通过反电动势(EMF)过零点判断换相位置, 采用“三段式”起动。最后制作风机样机并搭建试验平台, 对风机的起动性能、风压和流量进行测试, 试验结果验证了控制器方案的合理性。

关键词: 无刷直流风机; 散热系统; 无位置传感器; 方波控制器

中图分类号: TM 33 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2020)02-0066-06

doi: 10.12177/emca.2019.131

Square Wave Sensorless Controller for Brushless DC Fan*

HUANG Qi^{1,2}, WANG Di², CAO Jichao², HU Bin²

(1. School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Guizhou Aerospace Linquan Motor Co., Ltd., Guiyang 550081, China)

Abstract: Brushless DC fan is widely used in the heat dissipation system of electronic equipment. The fan is usually required to be small in size and have large air volume and integrated speed regulation. A controller is designed for a 12 V brushless DC fan. In order to reduce the cost and volume of the controller, several measures are taken: all electronic components are domestic surface mounted devices, the controller adopts the square wave control algorithm without position sensor, the commutation position of the fan is determined by back electromotive force (EMF) zero-crossing point detection, and three-stage starting is adopted. The prototype fan is manufactured and the experimental platform is built. The starting performance, wind pressure and flow rate of the fan are tested. Experimental results verify the rationality of the controller scheme.

Key words: brushless DC fan; cooling system; position sensorless; square wave controller

0 引 言

电子设备在工作时会产生热量, 尤其是电路中含有功率元器件, 如能耗电阻、功率开关管、变压器、DC 电源变换器、高速处理芯片等^[1]。元器件持续发热会带来电子设备的局部温升高, 进而引起电路板变形, 甚至出现断裂。温升高会减短元器件寿命, 严重情况下会烧坏元

器件。因此, 电子设备在设计时要考虑散热, 大部分电路板采用自然通风散热, 为了增大散热面积会加装散热器; 对环境温度要求较高的电子设备会采用强制通风或通过液体进行冷却^[2]。

随着移动互联网技术的日益发展, 处理网络数据的服务器基站越来越多。服务器通常采用刀片式主机, 由电源、散热风扇、CPU、内存、硬盘

收稿日期: 2019-10-18; 收到修改稿日期: 2019-11-20

* 基金项目: 贵阳市高新技术产业设计项目(GXCX-2017-012)

作者简介: 黄 其(1986—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为汽车特种电机设计、驱动控制和测试。

和扩展槽组成,机箱内部结构非常紧凑。服务器设备常年连续运行,内部功率元器件不断产生热量,需要通过风机进行散热。风机按照气体流动方向不同可以分为4类:离心风机、轴流风机、贯流风机、混流风机。其中,轴流风机体积小、风量大,适合服务器机箱高度集成的结构^[3]。风机根据电源不同可分为直流风机和交流异步风机。交流异步风机主要用于工业设备通风散热;直流风机由永磁无刷直流电机(BLDCM)驱动扇叶旋转,具有率密度高、结构简单、调速性能优良等特点,广泛应用在各类电子设备中^[4]。

本文设计一款方波无刷风机控制器,采用无位置传感器方波控制方式。首先确定控制器的硬件结构,再对各个功能模块进行设计,然后研究无位置传感器控制算法,最后制作风机样机并进行试验。

1 风机控制器硬件设计

针对服务器散热问题,本文设计了一款12 V外转子无刷直流风机控制器,服务器散热风机如图1所示。其技术指标如下:额定电压DC 12 V,额定电流3.5 A,额定功率42 W,额定转速

($15\,000 \pm 1\,500$) r/min, PCB 环型结构,外径43 mm,内径18 mm。风机运行指标:最大压力大于1 200 Pa,最大流量大于3.5 L/min,工作点1(400 Pa,3 L/min),工作点2(700 Pa,1.5 L/min)。



(a) 服务器主机

(b) 轴流式风扇

图1 服务器散热风机

图2所示为无刷风机控制器的原理图。主要由单片机、驱动电路、逆变器电路、电源变换电路、防反接电路以及控制器母线电压/电流检测电路等模块组成。三相逆变器的上桥臂由3个P沟道MOSFET组成,下桥臂由3个N沟道MOSFET组成,在母线正极串联二极管构成防反接电路。三相逆变器连接无刷风机的三相绕组,通过相绕组反电动势过零点确定来换相位置;检测精密电阻上的压降来测量母线电流,以实现电流闭环和过流保护功能。

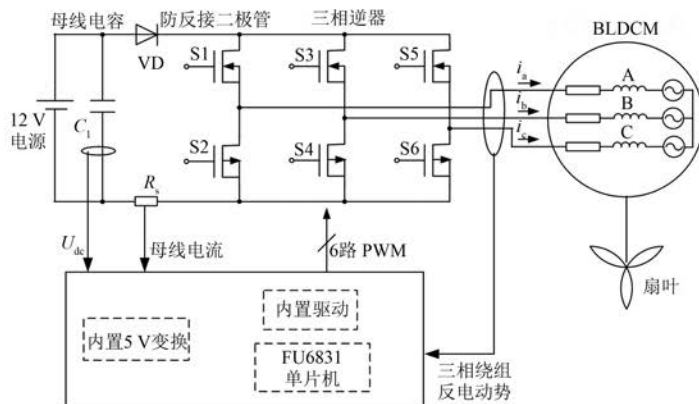


图2 无刷风机控制系统原理图

风机逆变器结构为三相桥式,BLDCM以“两相六状态”的换向方式转动,即每一个状态中有两相绕组通电,电机转动一个电磁周期有6种磁状态,这6种磁状态相差 60° 电角度,形成跳跃式的旋转磁场^[5]。当BLDCM转动时,这6个功率晶体管的导通顺序为S1S6、S1S4、S5S4、S5S2、S3S2、S3S6。

1.1 控制芯片

控制芯片采用国产FU6831单片机,是一款集成高速8051内核和电机控制的专用芯片,具有单周期 16×16 位乘法器和32/32位除法器,8通道12位ADC,多种TIMER和脉宽调制(PWM)模块,内置高压LDO和VREF参考电压,实现1/2

VDD 和 1/2 VDD VRE 参考输出,芯片内部集成有高速运算放大器、比较器、Pre-driver (驱动 3P

MOSFET+3N MOSFET 的接口),通信接口有 SPI、I²C、UART 等,如图 3 所示。

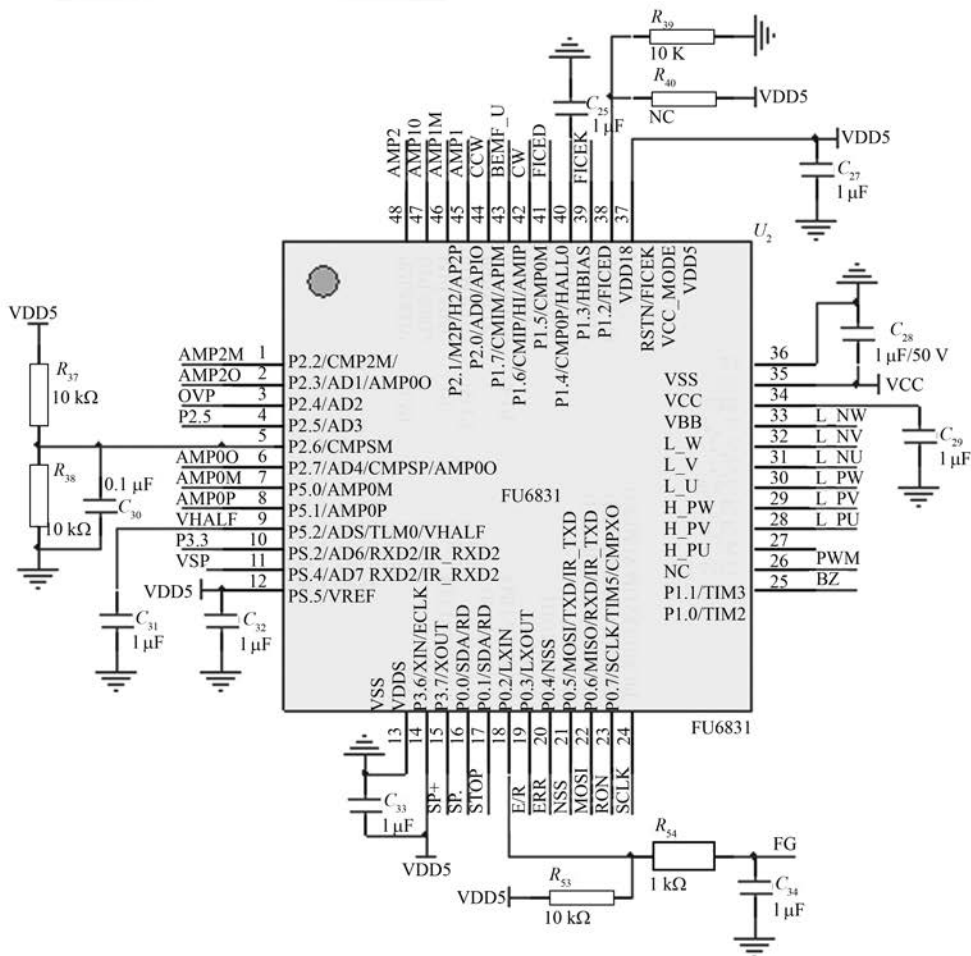


图 3 FU6831 单片机接口

1.2 电源防反接

风机要求具有正负极反接保护功能,在电源正负极反接时不会损坏风机。采用 3 个肖特基二极管 VD1~VD3 并联后串联到电源正极实现防反接功能^[6],如图 4 所示。二极管的耐压为 45 V,耐电流为 15 A,TO-277 封装,3 个二极管并联具有良好的散热效果。

1.3 功率器件和驱动电路

该风机额定电压为 12 V,额定电流为 3.5 A,属于低压小电流系统,可以采用 MOSFET 作为逆变器的功率开关器件。逆变器通常采用自举电路来驱动功率开关器件,往往需要自举芯片和外围电路,增加了 PCB 电路板的空间和成本。控制芯片 FU6831 内部集成了 Driver 电路,6 个 PWM 输

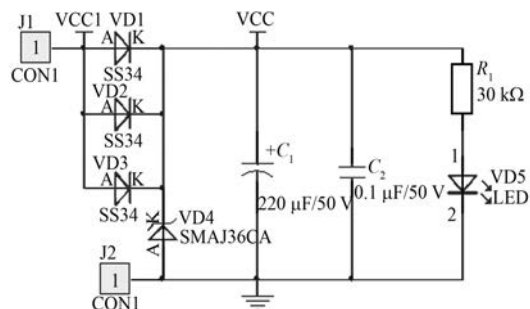


图 4 防反接电路

出引脚能直接驱动 3 个 P-MOSFET 和 3 个 N-MOSFET 功率管。为了保证逆变器具有安全余量,功率管采用国内某公司生产的耐压 30 V,耐电流 30 A,具有良好散热的 DFN-3x3_EP 封装

MOSFET, 逆变器的上桥臂采用 P 管, 下桥臂采用 N 管, 如图 5 所示。

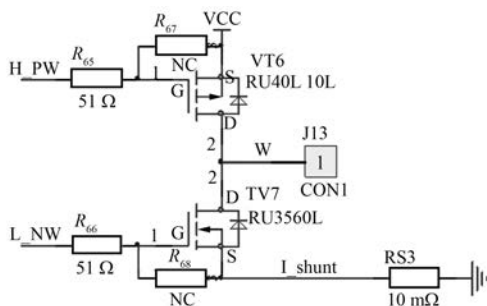


图 5 W 相驱动电路

1.4 母线电流检测

控制器通过检测母线电流来实现电流闭环和过流保护功能, 电阻 R_{s3} 为电流采样电阻 (采用康铜丝线绕电阻 $0.05 \Omega/2 \text{ W}$, 额定电流为 3.5 A 时, 压降为 0.165 V , 根据欧姆定理可以算出电流值^[7]), 检测采样电阻对地的电压信号, 经过放大、滤波电路后送到单片机的 AD 模块中。

1.5 反电动势检测电路

由于控制芯片的 AD 采样电压范围在 $0 \sim 5 \text{ V}$, 而风机的相绕组反电动势范围约在 $-1/2 \sim 1/2 \text{ VDD}$, 采用电阻分压法来检测母线电压或风机相绕组反电动势。通过 2 个电阻串联到母线/相绕组和地线之间, 电容用来消除高频波纹的影响。在三相绕组反电动势的输出端并联一组星型连接电阻, 得到一个虚拟中性点, 各相绕组的反电动势值与中性点电压值相比较得到过零点信号^[8], 如图 6 所示。FU6831 单片机内置比较器, 只需将反电动势输出点和中性点连接到单片机引脚。

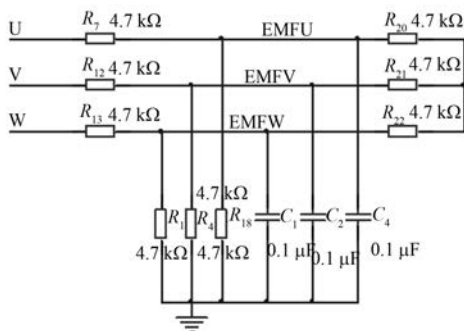


图 6 反电动势检测电路

1.6 PCB 布局

由于风机的轴向尺寸短、圆环形 PCB 布板面

积小 (外径 43 mm , 内径 18 mm), 因此控制器的所有元器件采用表贴式结构。由于散热风机安装在服务器内, 附近有高速 CPU 和数据硬盘, 所以风机控制器必须满足电磁兼容要求。主要从布线和元器件布局来考虑: 尽量缩短信号连线, 将功率电流信号和控制信号分开, 大面积铺地线, 增加去耦电容等。风机控制器 PCB 板正反面布局如图 7 所示。

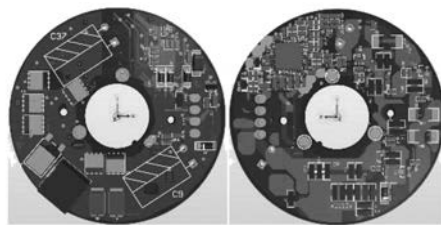


图 7 风机控制器 PCB 板正反面布局

2 风机控制器软件设计

因为散热风机在工作时需要保证转速恒定, 同时要检测相电流实现过流保护, 所以风机控制器系统采用速度环和电流环串联的双闭环控制结构, 过流保护比调速实时性要求较高。系统采用电流内环、速度外环结构^[9], 如图 8 所示。电流环保证风机以允许的最大电流值起动, 实现以最大加速度起动, 同时在风机过载时限制最大电流, 起到保护作用。速度环使风机转速跟上给定转速, 速度调节器输出值限幅在最大允许电流值。

2.1 无位置传感器换相原理

本文风机通过相绕组反电动势过零点来判断换相时刻, 反电动势过零点再延迟 30° 电角度就是该相绕组的换相时刻^[11]。过零点与换相时刻如图 9 所示。图 9 中, 6 个黑色实点为过零时刻, 每一个波形周期内出现 2 次, e_A 、 e_B 、 e_C 分别是各相位之间互差 120° 的三相梯形反电动势。阴影部分为绕组通电区间, VT1 ~ VT6 分别是一个周期中的 6 个换相时刻点。通过计算可以得出 2 次换相信号的时间间隔, 来计算风机的转速。

2.2 风机运行控制

无位置传感器风机在起动时刻, 速度为零, 此时反电动势为零, 无法判断换相时刻, 因此需要其他方法判断位置进行起动。常用的起动方法有: 三段式、预定位法、升压升频法。针对风机负载转

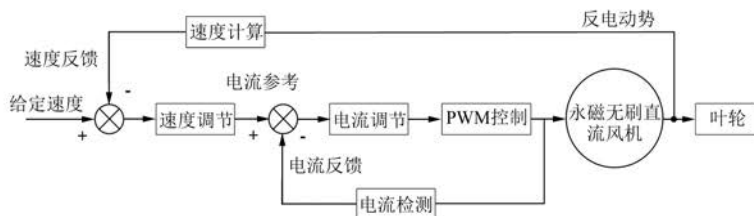


图8 风机控制系统结构框图

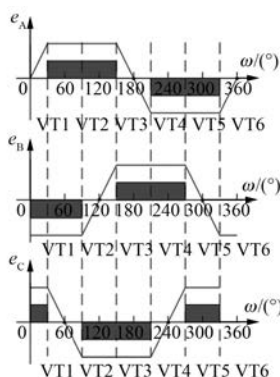


图9 反电动势过零点确定换相

矩与转速平方成正比、起动阶段负载转矩低的特点,该风机控制器采用三段式起动方法^[10],包括定位、加速、切换3个阶段。具体实施:先让两相绕组通电,产生电枢(绕组)磁场,拖动永磁体转子到某一确定位置,完成定位。然后逆变器的开关管按照 S1S6、S1S4、S5S4、S5S2、S3S2、S3S6 的顺序循环导通,电枢(绕组)磁场按 60°电角度跳跃旋转,永磁体转子也跟随转动,一个旋转周期 360°电角度,前后相邻2个旋转周期的导通时间按比例减少,则电枢(绕组)磁场的跳跃速度加快,使永磁体转子加速。当永磁体转子的转速足够大时,反电动势过零点比较信号能够持续正常检测到,此时就要切换到无位置传感器控制模式。起动阶段和正常运行状态均对母线电流实时检测,进行过流保护。

3 样机试验

散热风机组装过程:将电机定子绕组焊接到控制器输出端,再将定子铁心和控制器固定到外框支架里,最后安装外转子和扇叶。散热风机结构如图10所示。

散热风机测试系统如图11所示。直流稳压

12 V 电源给风机控制器供电,直流稳压电源实时显示输出电压和电流值,示波器通过电流钳采集风机相绕组电流,风机安装在风洞进口处。风洞能提供一种风速可调、流量可调的有风测试环境,风洞内部装有传感器,通过调节风道压力和风阻,上位机能实时检测风机的风压和流量,显示数据、生成波形曲线。

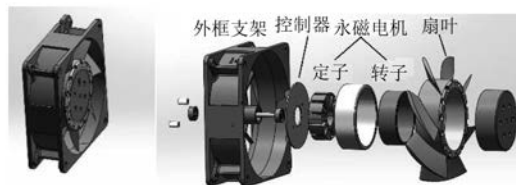


图10 散热风机结构

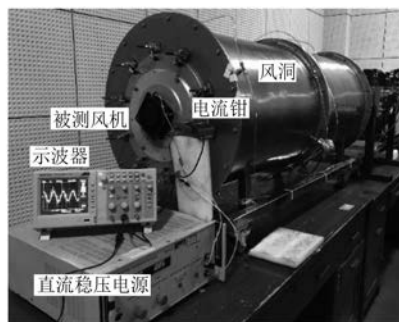


图11 散热风机测试系统

3.1 风机起动和稳定运行

在风洞全开、外部不加压力情况下,控制器通入 12 V 稳压电源,设置额定转速为 15 000 r/min,风机采用三段式起动,预定位和加速阶段控制相电流限定幅值,切换到无位置传感器控制模式后,随着转速增加、负载功率增大,电流幅值不断增大。由于风机转速存在超调,再稳定到 15 000 r/min,电流也将出现超调后逐渐稳定。图12所示为风机在起动时和在额定转速(负载)时

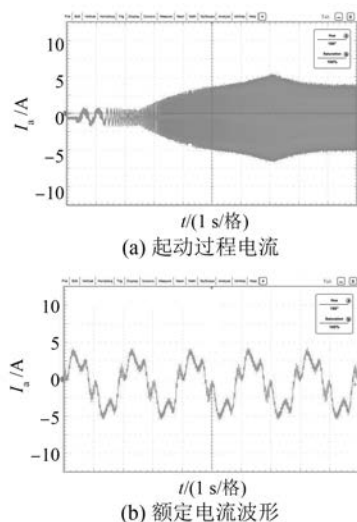
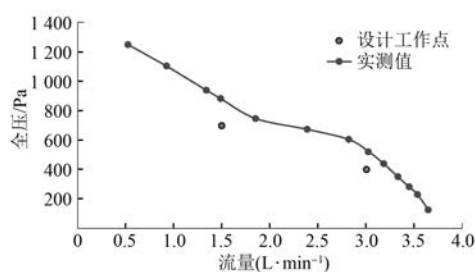


图 12 试验波形

的相电流波形,有效值为3.42 A。

3.2 风机 $P-Q$ 曲线

风机控制器采用速度闭环控制方式,设定风机转速为 15 000 r/min,调节风洞的全压为 200 Pa,传感器测得风机的流量为 3.6 L/min。增大压力到全压为 400 Pa,传感器测得风机的流量为 3.4 L/min,大于工作点流量 3.0 L/min;继续增大压力到全压为 700 Pa,传感器测得风机的流量为 3.4 L/min,大于工作点流量 1.9 L/min。风机的 $P-Q$ 曲线如图 13 所示。满足工作点设计要求。

图 13 风机的 $P-Q$ 曲线

4 结 语

本文设计了一款方波无刷直流风机控制器,考虑到 PCB 电路板的面积和元器件成本,主控芯片采用集成 MOS 管驱动电路和 LDO 电源变换的 FU6831 单片机,控制器采用三段式起动实现无位置传感器控制算法,具有防反接和过电流保护功能。样机试验验证了控制器方案的合理性。

【参考文献】

- [1] 高丽敏,高磊,祝启鹏.轴流/离心组合压气机一体化设计及数值模拟[J].风机技术,2016,58(1): 41.
- [2] 王永生,陈虎,刘建永.轴流风机研究现状及发展趋势[J].装备制造技术,2012(1): 120.
- [3] 孙少明,徐成宇,任露泉,等.轴流风机仿生叶片降噪试验研究及机理分析[J].吉林大学学报(工学版),2009,39(2): 382.
- [4] 谷慧芳,顾平道,张曦.基于 CFD 的空调用轴流风机内部流场研究[J].流体机械,2007(11): 29.
- [5] 黄其,陈翔,罗玲,等.电动汽车用永磁同步电机控制器设计[J].电机与控制应用,2019,46(10): 84.
- [6] 史婷娜,吴曙光,方攸同,等.无位置传感器永磁无刷直流电机的起动控制研究[J].中国电机工程学报,2009,29(6): 111.
- [7] 黄其,陈星宇,唐扬,等.电动汽车电机及控制器智能测试系统设计[J].自动化与仪表,2019,34(6): 63.
- [8] 毛义军,祁大同,刘秋洪.基于非定常流场的离心风机气动噪声分析[J].西安交通大学学报,2005,39(9): 989.
- [9] 黄其,罗玲,白娅梅,等.基于 MagNet 的深槽串励电动机设计[J].微特电机,2012,40(8): 31.
- [10] 赵熠,黄海波,卢军,等.无感无刷直流电机控制系统的设计[J].微电机,2018,51(12): 48.

【主要栏目】

- | | | |
|--------------|-----------|-------------|
| · 控制与应用技术 | · 研究与设计 | · 故障诊断与保护 |
| · 新能源发电与局域电网 | · 新能源汽车技术 | · 发电机组及其控制 |
| · 测试技术与测控系统 | · 材料与工艺 | · 电机生产及质量管理 |
| · 电力电子变流器技术 | · 智能制造 | · 节能应用 |