

# 基于 STM32 的负压隔离舱控制系统

李国洪<sup>1</sup> 赵志超<sup>1</sup> 胡名玺<sup>2</sup>

(1. 天津理工大学 天津市复杂系统控制理论及应用重点实验室 天津 300384;

2. 军事医学科学院装备卫生研究所 天津 300161)

**摘要:**设计一种由 STM32F103RB 作为主控芯片的直流无刷电机控制系统,通过输出 PWM 波到 MC33035 芯片来调节电机转速,再通过对舱体内外压差的实时反馈调节,达到稳定负压隔离舱内外压差的目的。采用 STM32 内部定时器和硬件乘法器完成 PWM 信号的产生以及气压差、电流双闭环增量式 PI 控制;且对该控制系统进行了阐述。试验结果表明,空中转运过程中舱内负压最大值为 -60 Pa,最小值为 -120 Pa。远低于安全压力 -15 Pa。飞行过程舱内负压与高度成正比。此控制系统有较好的动态性能,控制精度与当前国内主流负压隔离舱精度相当。

**关键词:**STM32;直流无刷电机;PI 控制;负压隔离舱

**中图分类号:** TP273 TN05      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 51010 41310

## Control system of negative-pressure isolation capsule based on STM32

Li Guohong<sup>1</sup> Zhao Zhichao<sup>1</sup> Hu Mingxi<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of the Control Theory for Complex Systems and Application in Tianjin, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China; 2. Institute of Medical Equipment, Academy of Military Medical Sciences, Tianjin 300161, China)

**Abstract:** Design a brushless direct current motor control system basing on STM32F103RB as the main control chip. Through output PWM to the MC33035 chip and the pressure differential feedback, so as to achieve the purpose of stable inside and outside differential pressure of negative pressure compartment. Use STM32 internal timer and hardware multiplier to complete the generation of PWM signal. Realize double closed-loop incremental PI control by pressure difference and current. At the same time control system is described in detail. It can be seen from the test results, The maximum in capsule pressure is -60 Pa and the minimum is -120 Pa during entire air transport process. The security numerical is -15 Pa. The negative pressure is proportional to the height in the flight. This control system has a good dynamic performance, and the control precision reaches advanced level in China.

**Keywords:** STM32; brushless direct current motor; PI control; negative-pressure isolation capsule

## 1 引言

随着控制技术和微电子技术等专业的快速发展,无刷直流电机作为一种新型交流电机得到了广泛的应用。无刷直流电机具有效率高、寿命长、可靠性高、维护方便等特点,而且其具有十分优良的转速-转矩特性<sup>[1]</sup>。基于无刷直流电机的这些特点,将之应用于负压隔离舱中,以达到在发生重大传染病疫情时,转运传染病人,及时控制传染源隔离传染途径的目的,且在转运病人过程中,能够为医护人员提供绝对安全的环境,保证医护人员不被传染<sup>[2]</sup>。因此对其动态性能和控制精度都有着较高的要求。目前

国内较为先进的负压隔离舱,能达到开机后 30 s 进入稳压状态,且舱体内外压差大于 30 Pa(绝对值),控制精度在 -2~2 Pa 之间。

本文基于 STM32F103RB<sup>[3]</sup> 单片机的基础上,设计了一套无刷直流电机控制系统,并且把该系统应用于负压隔离转运舱中,实现负压舱稳压调节的功能。

## 2 系统硬件结构

控制系统中,采用 STM32F103RB 芯片作为电路的主控制器,STM32F103RB 芯片通过输出 PWM 波到如图 1 所示的 MC33035 芯片来调节电机转速<sup>[4]</sup>。

收稿日期:2016-10

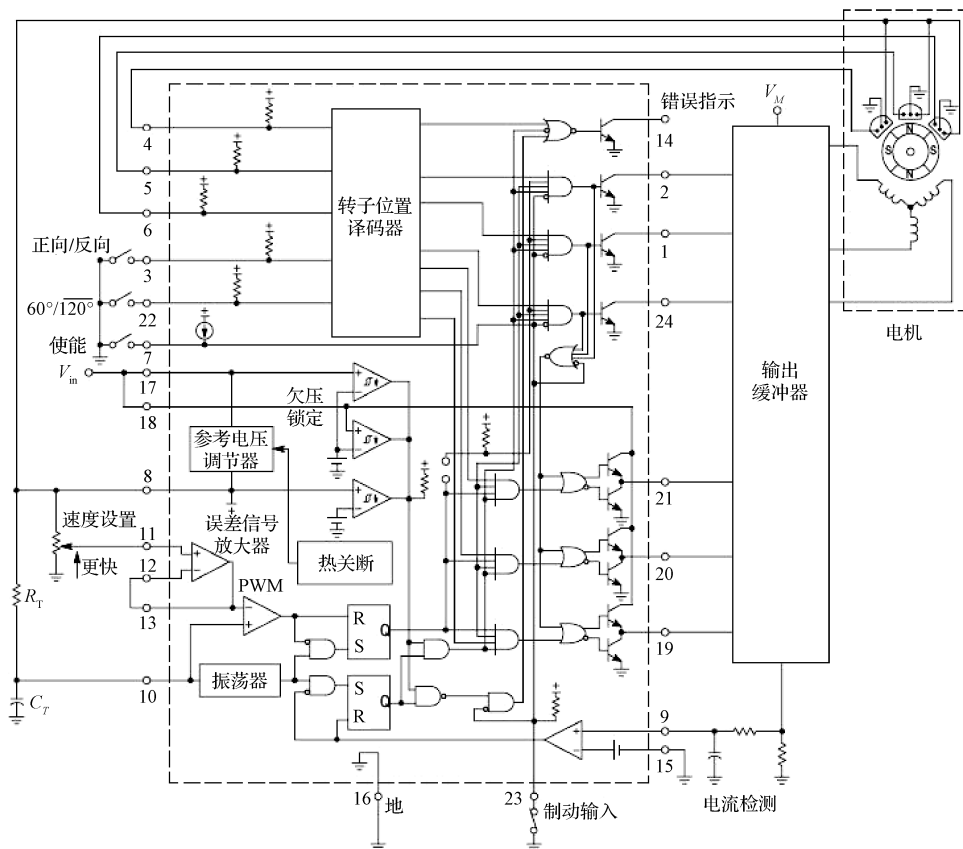


图1 MC33035 控制电路(虚线框内为 MC33035 内部电路)

舱体内外压差通过压差传感器实时采集,该压差传感器具有 24 V 直流供电,输出为 4~20 mA 的电流环,精度为 0.5 Pa 等特点,传感器内部信号处理电路图如图 2 所示,传感器采集来的压差信号,经 A/D 电路放大、滤波后传送到主控芯片,然后由芯片内置 ADC 进行转换和采集<sup>[5]</sup>。反馈压差与设定压差比较后,再调节电机转速来稳定当前的压差值,实现对负压舱内外压差的闭环控制,使负压舱始终处在一个动态平衡状态。

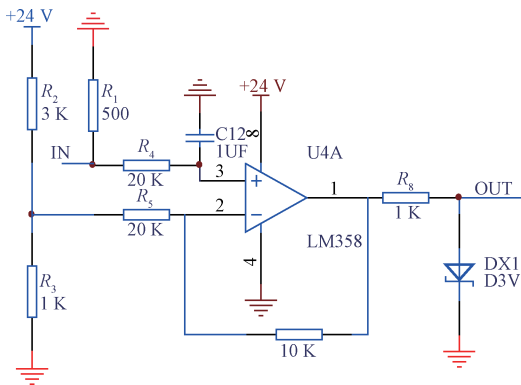


图2 传感器信号处理电路

以 STM32F103RB 芯片为控制器核心,主频 72 MHz,芯片自身集成 USART 控制器,有多功能定时器 5 个,

12 位 A/D 电路 2 个,能够满足单片机定时与采样的要求。

主芯片 STM32 能够完成产生 PWM 波<sup>[6]</sup>、压差反馈信号和电流采集信号接收转换和计算处理,系统结构如图 3 所示<sup>[7]</sup>、三相电桥的原理如图 4 所示<sup>[8]</sup>。

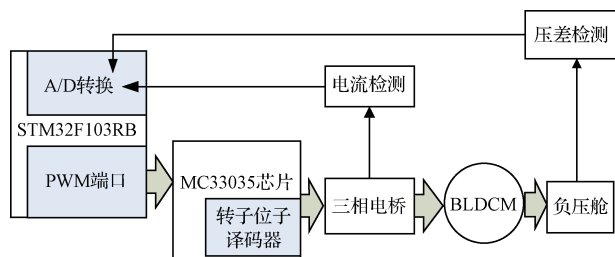


图3 系统结构

### 2.1 驱动电路

驱动电路中使用 MOSFET 组成三相电桥,来满足电机所需求的三相逆变驱动电路。电路中之所以用 MOSFET 作为三相电桥的开关管,是因为 MOSFET 在中小功率应用上具有十分优良的高频特性,且成本较低,比较适宜用做无刷电机得驱动。驱动电路主要由 MC33035 芯片控制;三相电桥与 MC33035 电机控制芯片之间的电气连接能够被 MOSFET 很好的隔离,该电路有着很好的动态特性。

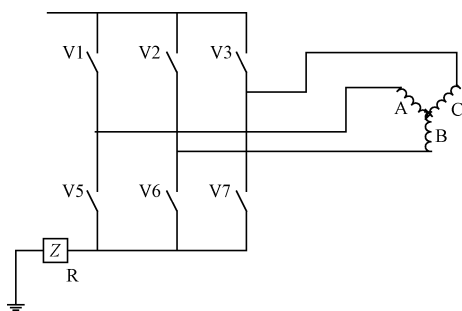


图4 三相电桥

## 2.2 电流检测电路

由于电机转矩和电机的加速度成正比,而转矩同时又与电机的电流成正比,因此如果要想实现设备良好的动态性能和高精度等特性,仅对舱体气压差进行检测反馈是不够的,同时还要对电机的电流进行检测以及控制。检流电阻 $R_s$ 被用于电流的检测,把 $R_s$ 上的电压信号实时传入信号调理电路中。信号调理电路总体分为两部分:1)把信号传送进入比较器,来用于故障电流报警;2)把电压信号传入到差分放大电路,从差分放大器输出后传入STM32的A/D端口,将模拟量转变成数字量用于过流判断,并且参与电流环的运算。

## 3 控制策略及软件实现

由图5可以看出负压隔离舱采用双闭环控制,该系统可使负压隔离舱具有良好的动态性能。设定气压差与舱内反馈压差量形成偏差,通过主控芯片内置算法来调节电机转速,转速改变反馈电流也随之改变,反馈电流与变速后的额定电流形成偏差,经电流调节成为PWM占空比得控制量,实现负压隔离舱电动风机的速度控制。

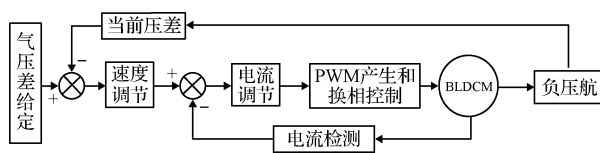


图5 负压隔离舱调压控制策略

### 3.1 PWM及换相控制

无刷直流电机具有无机械换相机构的特点,其只能通过自身内置霍尔传感器达到电子换相的目的,普通直流无刷电机,当定子转动 $60^\circ$ ,霍尔传感器立即发出换相的信号送入主控芯片中,从而能够产生硬件中断,其中断子程序可以通过其换相表找到(不同型号电机换相表不同,因此换相此处不再列出),由此来实现PWM输出端口寄存器配置更改。

### 3.2 电流环的实现

系统的反应特性主要由电流环决定,通过抑制电流环自身干扰,系统最大电流得到了限制,从而保障了系统的安全运行。

本系统中电流环采用了变速积分PI调节器<sup>[9]</sup>,变速积分分别通过积分作用、比例作用,来消除控制系统中的小偏差和大偏差,多数情况下积分饱和现象能够消除,且超调量被减小,系统得到稳定,调节品质得到改善。系统的子程序流程如图6所示<sup>[10]</sup>。

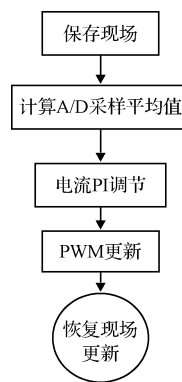


图6 电流环子程序流程

## 4 试验结果和结论分析

### 4.1 地面静态实验

在普通大气压下启动负压隔离舱,舱内随机选取6个压差采集点。记录负压舱内外压差稳定后,各采集点的最大值、最小值、平均值、以及最大差值。从而进一步分析舱内的气压分布情况,为后续实验提供保障。舱内气压稳定后,各点气压情况如表1所示。

表1 一次试验中各采集点压差的最值和平均值

舱内压力值	最大值/Pa	最小值/Pa	平均值/Pa	最大差值/Pa
1号采集点	47.80	47.00	47.50	-0.5
2号采集点	47.80	47.00	47.30	0.5
3号采集点	47.60	47.00	47.30	0.3
4号采集点	47.90	47.10	47.60	-0.5
5号采集点	47.80	47.20	47.50	0.3
6号采集点	47.70	47.10	47.40	0.3

1)由表1数据分析可得,当负压舱稳压运行后,6个采集点压差变化函数曲线基本拟合,表明舱体内部空间自身不存在较大的压差梯度。保证了负压隔离舱的安全性。

2)稳定后舱内压差基本稳定在 $45\text{ Pa}(\pm 2\text{ Pa})$ 。说明设备具有良好的动态特性由于加入了电流反馈作用,大大增加了设备的反应速度,使得设备在出现外部干扰的情况下能够及时调整。同样保证了设备的可靠性。

### 4.2 空中系统动态性能实验

如图7所示,图7(a)是负压隔离舱整个空中转运传染员过程中,舱体内外的压差变化情况,包括起飞、上升、水平飞行、下降、降落<sup>[11]</sup>5个飞行阶段。图7(a)中可以看出,

舱体内外的压差,随着飞行高度的变化而变化,且整个过程中舱体内外压差一直处于反馈调节状态,保证舱内压差一直处于安全气压范围(小于 $-30$  Pa)。

图7(b)所示,是飞机处于水平飞行阶段时,舱体内外压差变化情况。由图可知,飞机水平飞行时,舱体内外压差稳定在 $-100$  Pa左右( $\pm 10$  Pa)。时间持续 $15$  min,从图中可以观察到,舱体内外压差一直处于自我调节状态,基本实现了压差的稳定。

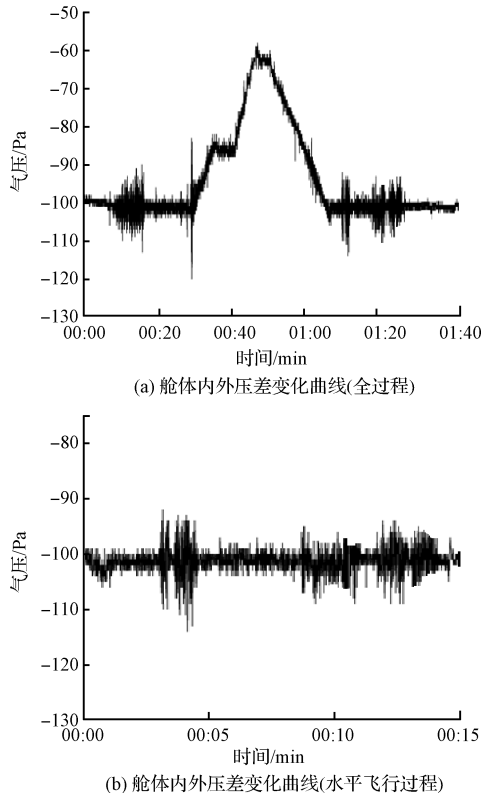


图7 空中转运过程中气压变化情况

## 5 结论

综上所述,采用STM32作为主控芯片来调节负压隔离舱内外压差,不仅有良好的动态特性且控制精度很高,完全能够保证设备的可靠性和安全性。地面静止的情况下,舱体内外压差控制精度可以达到 $\pm 2$  Pa,在运动过程中,舱体内外压差精度在 $\pm 10$  Pa。其中高度、颠簸、噪声、可能都会对控制系统的控制精度产生影响<sup>[12]</sup>。但整体来看,STM32控制系统无论处于静态还是动态,都能很好地

满足负压隔离舱的安全性和可靠性要求,达到了论文最初目的。此外本文详细介绍了整个系统的控制电路的硬件结构组成和双闭环控制的方法与策略,最终进行了试验验证。试验结果表明系统具有良好的动态特性和很高的控制精度,且通过舱内压差的反馈调节,使舱内保持在恒压状态,具有很高的安全性。

## 参考文献

- [1] 朱剑波. 无刷直流电机控制系统的仿真与分析[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(12): 25-30.
- [2] 解晓谜, 洪洁娜, 凌枫盛, 等. 负压隔离保护装置及其研究[J]. 现代预防医学, 2014, 41(5): 902-904.
- [3] 林智骅, 平雪良, 金登峰, 等. 基于STM32的全方位移动平台设计和控制[J]. 电子测量技术, 2016, 39(1): 19-21.
- [4] 胡名玺, 孙秋明, 刘圣罗, 等. 折叠式传染病员负压隔离转运舱研究[J]. 医疗卫生装备, 2014, 25(12): 97-100.
- [5] 孙秋明, 刘圣军, 田丰, 等. 传染病负压隔离床控制系统设计[J]. 中国医学装备, 2008, 5(3): 4-6.
- [6] 杨庆庆, 徐科军, 任深宏, 等. 变PWM占空比的压电式阀门定位器控制方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(4): 424-433.
- [7] 王晓明. 电动机的单片机控制[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.
- [8] 朱俊杰, 栗梅, 王湘中, 等. 无位置传感器无刷直流电机闭环三段式启动策略[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(1): 174-178.
- [9] 张晞, 曾迪晖, 王永立. 基于STM32的无刷直流电机控制系统[J]. 仪表技术与传感器, 2013, 9(2): 68-69.
- [10] 祁树胜. 应变片测量的误差分析[J]. 西安航空技术高等专科学校学报, 2003, 21(3): 6-7.
- [11] 刘育. 现在民用飞机环境控制系统研究[D]. 广州: 自动化科学与工程学院, 2012: 12.
- [12] 张玉琴, 王真. 飞行试验中应变测试误差的一种评估方法[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(6): 29-32.

## 作者简介

李国洪, 1968年出生, 工学博士, 副教授, 主要研究方向为电动汽车及电力传动。

E-mail: liguohong@126.com