

制造业自动化

直流电机双闭环数字调速系统设计与实现

Design and realization of DC motor speed control system by digital double closed loop

莫慧芳

MO Hui-fang

(广州科技贸易职业学院 机电工程学院, 广州 511442)

摘要: 介绍了一种基于成本较低的AT89S52单片机实现的数字式双闭环PWM直流电机调速系统硬件实现电路和软件实现方法。给出由光电编码器检测直流电机转速的具体方法，并构成速度环；由霍尔电流传感器检测电枢电流构成电流环。软件编程实现改进的转速、电流双闭环PI控制器，利用单片机的定时器生成占空比可调的PWM信号，光耦隔离后经功率驱动放大，通过控制H桥驱动电路对直流电机进行无级平滑调速。实验表明该系统控制精度高，可靠性和稳定性加强。

关键词: 直流电机；数字调速；PWM；双闭环PI控制

中图分类号: TM307.1

文献标识码: B

文章编号: 1009-0134(2015)02(下)-0153-03

Doi: 10.3969/j.issn.1009-0134.2015.02(下).49

0 引言

长期以来，直流电动机具有良好的起动、制动性能，在对电动机的起动和调速性能要求较高的生产机械或位置伺服控制系统中得到了广泛的应用。早期直流电动机的控制均为模拟电路实现，控制系统调试困难，触发脉冲不对称，运放及一些非线性集成电路因电压和温度变化会产生运算误差^[1]。随着高速处理器和电力电子开关器件的发展，数字控制直流电机调速系统得以实现，为直流电动机的控制提供了更大的灵活性，并提高其速度控制的精确性^[2]。现有大多数文献只是对直流电机转速做检测及开环控制，本文实现的数字直流电机调速系统，是在比较了直流电机调速方法的基础上，分析优化了PI调节器的控制原理，并用软件编程实现改进的数字PI双闭环调速；并基于工程实践的应用成果，给出了系统的硬件电路实现。

1 系统方案选择

直流电机调速方法主要有三种，调压调速、调阻调速和弱磁调速，改变电阻调速缺点很多，电阻网络只能实现有级调速，而数字电阻的元器件价格比较昂贵，目前很少采用，仅在有些起重机、卷扬机及电车等调速性能要求不高或低速运转时间不长的传动系统中采用^[3]；弱磁调速不仅调速范围不大，低速时受到磁极饱和的限制，高速时还会受到换向火花和换向器结构强度的限制，而且由于励磁线圈电感较大，动态响应较差^[4]。因此选择改变电枢电压进行调速。随着电力电子技术的进步，可由PWM斩波器进行斩波调压。调脉宽的方式有三种：

定频调宽、定宽调频和调宽调频，定频调宽法（即周期不变宽度改变）采用单片机产生PWM脉冲的软件实现上比较方便，电动机在运转时也比较稳定，因此我们采用了定频调宽方式。在工程应用中，我们采用由IGBT管组成的H型PWM电路，用单片机I/O口控制IGBT管饱和和截止状态，调节PWM脉冲宽度即占空比，从而调整电机转速。

2 系统方案设计

该直流电机调速系统将AT89S52单片机作为主控部件，由键盘、显示器、电机驱动模块、光耦隔离模块等构成系统外围硬件电路。利用单片机的定时器资源产生PWM信号，该信号通过光耦隔离，驱动放大控制电机电压的占空比，调节电机转速；利用光电编码器检测电机速度，反馈给速度闭环，对偏差信号进行PI调节，得到电流闭环的输入信号，再与反馈的电流值比较得到控制电流，电流环的PI运算结果改变PWM信号占空比D的大小，调节电机转速直至和给定相同；另外，系统的键盘控制模块可以控制电机启动、停止、高速、中速、低速、定时、转向等动作，通过LCD显示模块可以显示电机当前转速。系统总体框图如图1所示。

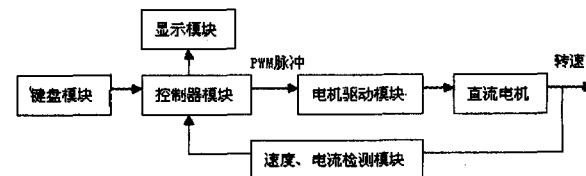


图1 数字双闭环直流调速系统框图

收稿日期：2014-08-26

基金项目：粤港澳关键领域重点突破项目：高效变频家用空调器关键技术的研究及其应用（2010Z5104）

作者简介：莫慧芳（1980-），女，讲师，硕士，研究方向为电机智能控制。

制造业自动化

2.1 电机功率驱动电路

单片机输出的PWM信号的电压值很小，因此需要利用驱动芯片将信号进行放大，采用的功率放大模块由芯片L298以及一些逻辑器件构成。L298是双H桥直流电机驱动芯片，内部包含4通道逻辑驱动电路，是一种二相和四相电机的专用驱动器，可利用单片机的I/O口作为控制信号进行电机转速和转向的调节，硬件电路简单。L298芯片逻辑功能如表1所示。

表1 L298逻辑功能

IN1	IN2	ENA	电机状态
X	X	0	自由停止
X	X	1	快速停止
1	0	1	正转
0	1	1	反转

可见，当L298的使能端为高电平时，可驱动电机调速运行。系统利用光电耦合器TLP620隔离单片机系统电源与电机系统的电源，利用芯片L298控制双H桥中IGBT的通断，L298的OUT1和OUT2分别接直流电机的两个接头，为直流电机提供驱动电压。直流电机的功率驱动电路如图2所示。

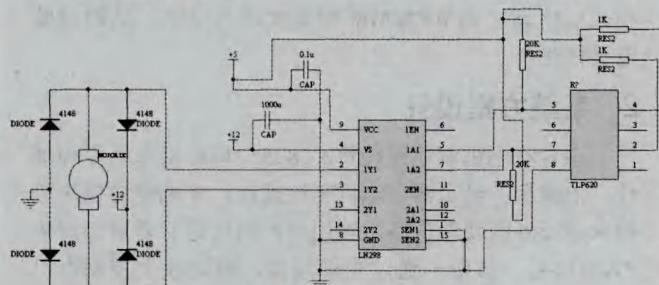


图2 电机功率驱动电路图

当ENA输入端为高电平时，将单片机引脚P2.6经过光耦与IN1相连，引脚P2.7与IN2相连，为防止开关管误导通，必须设置“死区”时间（本设计“死区”时间为15us）。当输入端IN2为低电平，IN1为延时产生的PWM信号，电机正转，改变占空比可调速；输入端IN1为低电平信号，IN2为延时产生的PWM信号时，电机反转改变占空比可调速；IN1与IN2相同时，电机快速停止。

2.2 PWM信号发生电路

在实际生产中，控制设备都采用闭环控制，本系统采用电压环(ASR)和电流环(ACR)双闭环控制，保证电机的精确控制。转速、电流双闭环控制原理如图3所示。

图3中， U_n^* 是给定转速， U_n 为转速反馈值，经过比较得到误差信号 Δu 送入转速环(ASR)，转速环输出作为电流环(ACR)的给定信号，与反馈电流值 U_i 的差值送入电流环，输出生成PWM波，经功率放大后控制



图3 双闭环调速系统控制原理图

电机转速。

转速检测信号采用型号为DG338H-1000BZ-5-24C光电编码器测速得到，该光电编码器为增量式编码器，码盘提供相位相差90°的两路A、B脉冲信号以及用于复位计数的z相脉冲，输出转速 $n=N/mT$ ，其中N为在给定时间T中采样的脉冲数，m为每转输出脉冲数（本文m=1000p/r），编码器得到的脉冲序列送入计数器计数，再送入单片机T1进行信号采集。电流采样选用霍尔电流传感器，通过A/D芯片转换后送入单片机PO口进行信号采集。

按照工程设计方法设计转速环时，要求转速环具有较好的抗扰性，电流环具有较好的跟随性，因此先按照典型I系统设计电流环，再将电流环作为内环，按照典型II型系统设计外环转速环，均采用PI调节器进行设计^[5]。我们采用增量式控制算法实现数字PI控制，离散增量式PI算法公式为：

$$u(k) = K_p e(k) + K_p \frac{T}{T_f} \sum_{i=1}^k e(i) \quad (1)$$

$u(k)$ 为PI调节器的第k次输出值， $u(k-1)$ 为PI调节器的第k-1次输出值， $e(k)$ 为给定量和反馈量之间的第k次采样偏差值； $e(k-1)$ 为第k-1次采样偏差值， K_p 为比例系数， T_f 为积分时间常数，则偏差信号 $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$ ，联立式(1)可得：

$$u(k) = u(k-1) + K_p \left(1 + \frac{T}{T_f}\right) e(k) - K_p e(k-1) \quad (2)$$

可见只需要知道当前和前一次的偏差值，就可以算出当前的控制增量^[6]。

先对PWM脉冲设定一个固定的周期值（在本设计中为50us）对电流进行一次采样和PI调节，每100个PWM周期（5ms）对转速进行一次反馈采样和PI调节，假设电机最高转速为100r/m即1.67r/s，光电编码器是1000线，则每转发出 $1.67 \times 1000 = 1670$ 个脉冲，在5ms内发生的最大脉冲数为 $1670 \times 5/10^3 = 8.35$ ，该值倒数即为编码器速度转换系数，脉冲累计值除以编码器速度转换系数即为PWM信号占空比D，转速值为 $V_{max} \times D/2^{16}$ 。

PWM软件实现流程如图4所示。

2.3 键盘及显示模块电路

系统的键盘控制模块可以控制电机启动、停止、高速、中速、低速等动作，按键分别连接到单片机的P3.0~P3.4引脚上，通过键盘扫描模式来判断按键是否被按下，按键被按下，进入处理程序。LCD显示选用

制造业自动化

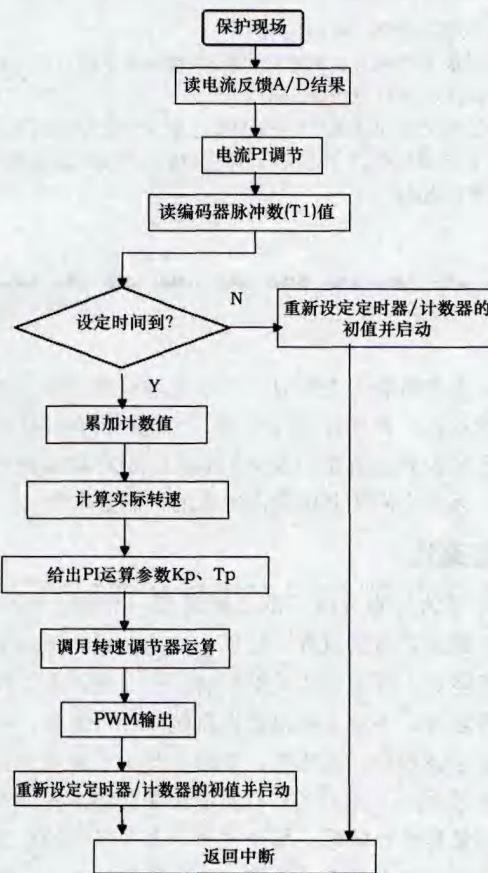


图4 PWM生成实现流程图

LM016L液晶模块，单片机的P1.0~P1.7引脚作为数据输出端，P2.2~P2.4引脚作为控制端，单片机控制显示转速及定时时间。

3 系统仿真

我们选用的直流电机额定电压110V，额定电流6A；

额定转速1000r/min，电枢内阻 2Ω ，过载倍数 $\lambda=2$ ，功率驱动电路放大倍数为11。按照双闭环设计原则，先按照典型I系统设计电流环，得到电流环比例放大系数 K_{pi} 为0.76，积分时间常数 T_{fi} 为0.007s；再按照典型II型系统设计转速环，得到速度环比例放大系数 K_{pv} 为35.92，积分时间常数 T_{in} 为0.0009s。我们用Proteus软件搭建直流电机速度控制系统仿真电路，如图5所示。模拟频率为20KHz的PWM发生信号送入T1口，电机可以通过高速、中速、低速按键进行速度设定，不同速度对应PWM占空比发生变化。以低速运转为例，系统设定低速速度为21r/min，仿真结果如图5所示；当中速速度为95r/min，高速速度为130r/min时，三种设定PWM占空比变化如图6所示。

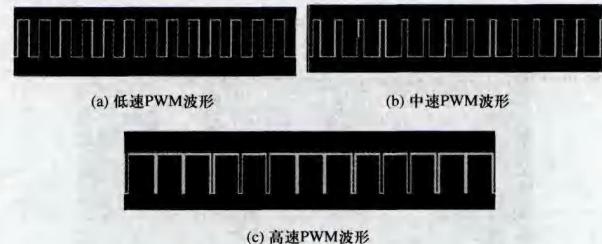


图6 不同速度PWM占空比

4 结束语

本文所述的直流电机调速系统是以成本较低的AT89S52单片机做为主控器件实现数字式的PWM直流电机调速系统，通过软件编程实现双闭环PI控制，相对于硬件实现的系统，所需外围器件少，调试方便，控制精度高，可靠性和稳定性加强。通过调试结果表明，该系统能精确控制电机在高速、中速和低速时的运转，系统实现方案对工程应用设计有一定的参考价值。

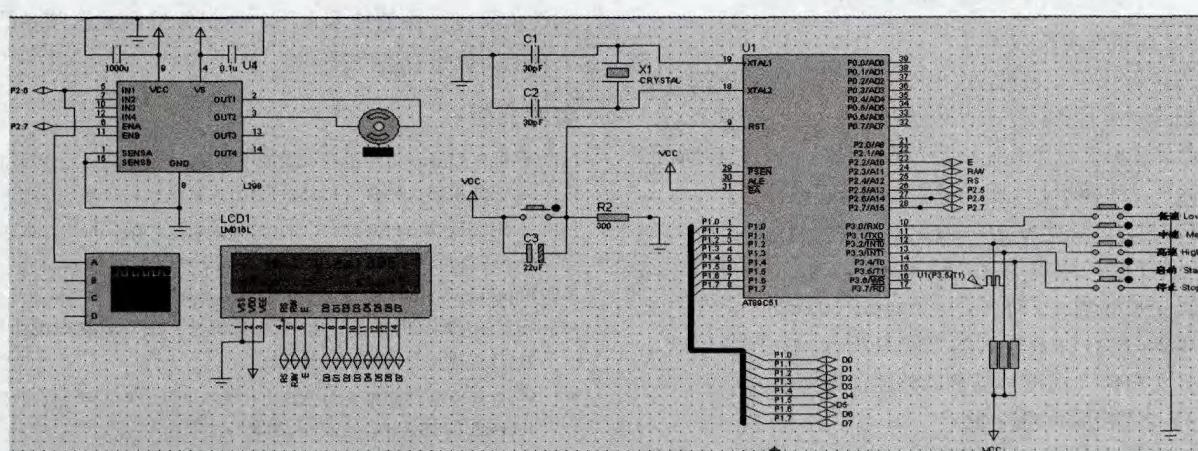


图5 低速系统仿真电路

参考文献:

- [1] 宋凤娟,廉文利,付云强.单片机89C51在直流调速控制系统中的应用[J].微计算机信息,2006(32):113-114.
- [2] 于贵,蒋辉熊.直流电机数字调速软件的实现[J].电测与仪表,2012,Vol.49(557):93-96.
- [3] 孟海钢.基于8051单片机控制的直流电机PWM调速系统设计

[J].伺服控制,2013(2):41-45.

- [4] 廖朝永.基于单片机的直流电机PWM调速系统设计与开发[J].煤炭技术,2011,30(6):62-63.
- [5] 刘松.电力拖动自动控制系统[M].北京:清华大学出版社,2006.
- [6] 朱玉玺,崔如春,邝小磊,等.计算机控制技术[M].北京:电子工业出版社,2005.

【上接第141页】

位偏高;厚度误差与曲率正相关,涂层厚度在颠倒的喷涂面偏低等。根据上述结论分析,对喷涂轨迹和参数做最后优化调整,可以得到满意的喷涂效果。对于特定装备,整个工艺优化过程可能持续数月之久。某型涂层厚度测量装置如图5所示,配套工艺优化模型如图6所示。

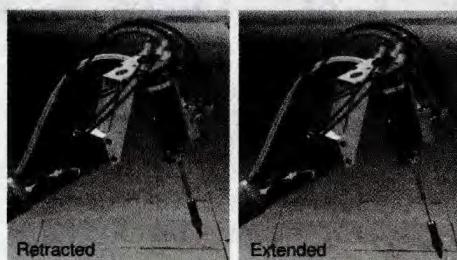


图5 涂层厚度测量装置



图6 在CAD模型中显示涂层厚度数据

2) 高精度定位技术

为降低飞机定位精度给喷涂带来的误差,F-22自动喷涂系统采用有线制导的自动导引车沿一预定位置移动,通过激光辅助定位系统使机器人瞄准飞机某些关键特征部位,并根据喷嘴相对飞机的位置,调节喷漆程序。

F-35喷涂单元平台(PCD)的设计地面定位精度(X向和Y向)达到了3.175mm(0.125in),垂直方向的重复定位精度(Z向)为0.254mm(0.01in)。与之相比,B-2、F-117A和F-22的喷涂系统都存在定位困难、需要针对每架飞机进行复杂调整的问题^[2,3]

3) 多轴运动控制集成

F-35机器人飞机精整系统RAFS的6轴机器人及附加的2轴或3轴导轨都由唯一的一个Fanuc R-J3iB控制器控

制,从而在喷涂大表面时,可以无缝化地协调导轨和机器人的动作。而在2003年之前,喷涂F-22的CASPER系统最主要的问题就是协调6轴机器人和SCARA操作臂的动作,因为它们都分别安在独立的控制器上^[6]。

3 结束语

随着伪装隐身技术的不断进步,精细、高效的作业装备越来越得到重视,已逐步成为关系新型伪装、隐身技术能否工程应用的关键掣肘。一方面,人工作业的随意性较大,不及工业机器人系统可控可重复。例如在进行雷达波隐身涂层喷涂、数码迷彩、小斑点迷彩伪装时,如采用人工施工工艺,质量往往良莠不齐,不能完全达到最佳设计效果;另一方面,人力资源的愈发宝贵使得利用复杂工艺人工伪装、隐身的代价高企,越来越制约新型伪装技术的应用。战时,利用宝贵的人力资源频繁对成建制装备开展有针对性的伪装行动更是难以实现的,必须有相应的新一代的作业手段和装备作为新型伪装、隐身技术的重要支撑。

随着工业机器人技术的快速发展,新型伪装隐身作业手段的发展平台已经具备。立足成熟工业机器人系统,针对装备特点和伪装隐身新技术的特性要求,开展专用关键技术开发与研究,通过综合集成,有望不断提高伪装隐身作业的技术水平,为最终提高武器装备战场生存能力提供有力支撑。

参考文献:

- [1] 石闻.F-22战斗机的机器人表面喷涂[J].航空制造工程,1997.(8).
- [2] 刘亚威.机器人喷涂在F-35的应用[J].航空科学技术,2011(5).
- [3] Neal A.Precision Robotic Coating Application and Thickness Control Optimization for F-35 Final Finishes[J].2009 SAE International.
- [4] http://news.xinhuanet.com/mil/2011-03/02/c_121138434.htm.
- [5] 初苗,田少辉,周宪,等.一种新型数码迷彩喷涂装置的设计与试验[J].机械设计与研究,2014(2).
- [6] O'keefe M.Robotic coatings automation[J].Technology Review Journal, Northrop Grumman,2004.
- [7] 毕道鹏,周志勇,等.工业机器人伪装隐身应用进展[A].中国兵工学会工程装备专业委员会伪装专业学组第十三届学术年会论文集[C]2014.