

自适应模糊控制的模拟双针气压表驱动系统研究

王俊哲, 朱琴跃, 陆晔祺

(同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804)

摘要: 针对目前应用于列车驾驶仿真平台中的模拟双针气压表控制系统的硬件结构及其控制策略进行了研究; 以 C8051F410 单片机和双电机驱动控制模块 BA6239 为核心设计开发了表针电机驱动系统, 提出了基于 PWM 控制技术的转速闭环控制策略; 系统能够自动计算电机控制模型参数从而得到转速与 PWM 控制电压的关系, 并通过引入自适应模糊 PI 转速调节器, 减小系统及计算误差, 提高动态响应精度; 测试结果表明, 基于自适应模糊控制的模拟双针气压表能够达到真车气压表的动作要求, 为构建列车驾驶仿真平台提供了可靠的硬件支持。

关键词: 模拟双针气压表; 直流电机驱动; 脉冲宽度调制; 自适应模糊控制; 模糊 PI 调节

Research on Simulated Double—pointer Barometer Drive System Based on Adaptive Fuzzy Control

Wang Junzhe, Zhu Qinyue, Lu Yeqi

(School of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Research on hardware structure and control methods of simulated double—pointer barometer drive control system presently used in train driving simulation platform has been carried out. Pointer motor drive system has been designed using C8051F410 MCU and dual motor drive module BA6239 as system core, taking methods of PWM control technology, a close—loop motor speed control strategy has been proposed. System can automatically calculate motor control model parameters to obtain relationship between speed and PWM control voltage, and via bringing in adaptive fuzzy PI ASR, system and calculation errors have been minimized, and its dynamic response accuracy increases. Test results show that simulated double—pointer barometer based on adaptive fuzzy control can match with actual train barometer's motion requirements, and it can provide reliable hardware support for building up train driving simulation platform.

Key words: simulated double—pointer barometer; DC motor drive; pulse width modulation; adaptive fuzzy control; fuzzy PI control

0 引言

随着计算机技术的高速发展, 列车上的数据检测及显示设备逐渐实现电子化, 但传统的机械式仪表凭借其可靠性高、易于维修更换、干扰小等优点仍被广泛使用。双针气压表用于列车上实时显示制动空气压力数据, 需要风缸、压缩机、管道和空气弹簧等机械设备驱动表针转动, 而对于室内实验环境下的列车驾驶仿真平台很难构建上述成套机械装置。因此本设计开发了模拟气压表, 其表针控制方式由机械驱动改为单片机控制的直流电机驱动^[1], 针对所采用的 3~7 V 小功率电机存在误差大、易受自身参数变化影响等问题^[2], 提出了基于 PWM 控制技术的电机参数自获取和自适应模糊 PI 调节相结合的控制策略, 并完成了驱动系统软硬件设计。

1 模拟双针气压表驱动控制系统硬件设计

模拟双针气压表及其驱动控制系统总体结构如图 1 所示。由图可知, 受控对象模拟双针气压表主要包括带双针指示的表头、直流电机、环形变阻器以及齿轮组。驱动控制电路首先接收来自上位机的给定值, 再与表头当前表针位置所对应的实际

值比较, 根据偏差输出可调的 PWM 电压信号来控制表头内两台直流电机的起停、转速和旋转方向, 进而驱动表针动作。

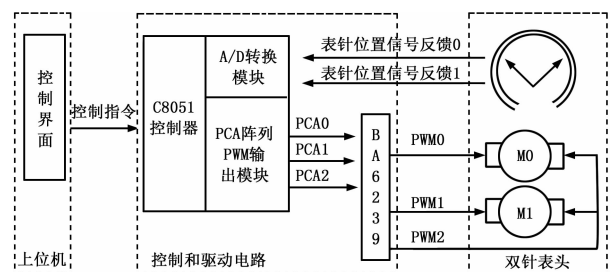


图1 模拟双针气压表及其驱动控制系统总体结构

系统中驱动控制电路通过带光电隔离的 RS-485 通信接口与上位机间进行信息传输, 获取目标气压给定值; 同时, 还通过 DB9 型接插件和模拟双针气压表头相连, 实时检测两根表针当前位置对应的电信号。表头内两根表针转轴分别连接两个环形滑动变阻器的滑块, 变阻器上的位置电压信号经调理后送入单片机的 A/D 转换模块, 再经换算得到当前表针位置刻度 (即气压值)。

驱动控制电路的核心为 C8051F410 高性能单片机。该处理器集成 51 内核, 时钟频率可达 24.5 MHz, 自带 12 位精度 A/D 转换模块、5 个高速可编程计数器阵列 (PCA) 和 4 个 16 位定时/计数器, 可独立配置多种工作模式^[3]。电路中还采用了

收稿日期: 2013-12-09; 修回日期: 2014-02-10。

作者简介: 王俊哲 (1988-), 男, 黑龙江人, 硕士研究生, 主要从事电气设备检测和故障诊断技术方向的研究。

BA6239 双通道电机驱动控制芯片，具有 3 个输入控制端 (Pin4、Pin5、Pin6) 和 3 个输出驱动端 (Pin2、Pin3、Pin10)，通过控制输入端信号的不同逻辑组合，可改变输出端驱动电压信号的大小和方向。表 1 为 BA6239 的驱动逻辑真值表^[4]。

表 1 BA6239 驱动逻辑真值表

控制端			驱动端			输出电流流向
Pin4	Pin5	Pin6	Pin10	Pin2	Pin3	
低	低	X	低	低	低	无输出
高	低	低	高	低	开路	Pin10 流向 Pin2
高	低	高	低	高	开路	Pin2 流向 Pin10
低	高	低	高	开路	低	Pin10 流向 Pin3
低	高	高	低	开路	高	Pin3 流向 Pin10
高	高	X	低	低	低	无输出

如图 2 所示，本系统中 BA6239 模块的 Pin2、3 分别接至两个直流电机的一端，而 Pin10 作为公共端则接至电机的另一端；当其输入端 Pin4、Pin5 分别为高、低电平时，可对电机 0 进行驱动控制，根据 Pin6 的输入信号可以控制驱动端输出电流方向从而控制电机 0 转向。当 Pin4、Pin5 分别为低、高电平时，便可对电机 1 进行驱动控制；同时结合 Pin6 的输入信号对电机 1 的转向进行控制。

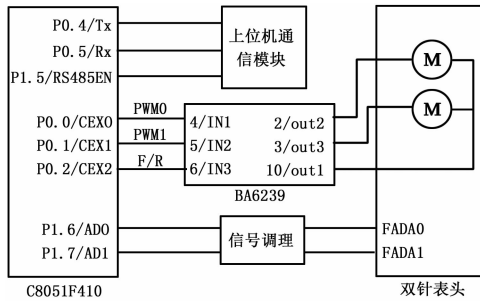


图 2 系统硬件接口配置示意图

2 驱动控制系统软件设计

2.1 PWM 控制原理

脉冲宽度调制 PWM (Pulse Width Modulation) 简称脉宽调制，是基于功率等效原理产生等幅不等宽的脉冲序列，并通过改变占空比来调节输出信号的等效幅值^[5-6]。本文中利用 C8051F410 单片机集成的 PCA 阵列输出 PWM 信号控制电机驱动模块。

PWM 技术的核心是通过改变脉冲序列的占空比来改变加在电机电枢两端的平均电压大小，从而调节电机转速^[7-8]，其电压平均值为：

$$U_{av} = \frac{U_s \times T_{ON}}{T}, \quad \eta = \frac{T_{ON}}{T} \quad (1)$$

式中， T_{ON} 为 PWM 脉冲序列宽度， T 为脉冲序列周期， η 为占空比。

C8051F410 芯片的 3 个 PCA (P0.0—P0.2 管脚) 阵列分别输出 PWM0—PWM2 信号到 BA6239 模块的 3 个输入控制端。由表 1 可知，同一时刻只能有一路输出被选通，因此在一个基本周期内两台电机实际交替工作半个周期，高频输出下可实现两台电机同时运行^[9]。在每个基本周期内 PWM 控制信号与电机工作状态的对应关系如表 2 所示。

表 2 每个基本周期内 PWM 驱动控制逻辑

上半周期 PWM				下半周期 PWM			
0	1	2	电机 0	0	1	2	电机 1
H	L	L	全速正转	L	H	L	全速正转
H	L	H	全速反转	L	H	H	全速反转
D	L	L	减速正转	L	D	L	减速正转
D	L	H	减速反转	L	D	H	减速反转
L	L	—	停止转动	L	L	—	停止转动

其中，H 表示 PWM 信号的占空比为 1，L 表示占空比为 0，D 则表示占空比可调。

2.2 基于模糊控制的电机调速控制建模

2.2.1 电机调速控制的建模及其参数获取

由于表头内电机参数未知，而转速闭环模型及转速调节器的 PI 参数整定又依赖于此，故电机参数获取成为系统初始化的第一步^[10]。直流电机数学模型中电枢电压 U_d 和转速 n 之间的传递函数及微分方程分别如式 (2) 和式 (3) 所示。

$$G(s) = \frac{1}{T_m T_d S^2 + T_m S + 1} \quad (2)$$

$$T_d T_m \frac{d^2 n}{dt^2} + T_m \frac{dn}{dt} + n = \frac{1}{C_e} U_d \quad (3)$$

式中， $T_d = \frac{L_d}{R_d}$ 为电枢回路电磁时间常数， $T_m = \frac{J R_d}{C_e C_m} =$

$\frac{GD^2 R_d}{375 C_e C_m}$ 为机电时间常数， C_e 为电势常数。

由式 (3) 可知，若已知电机参数 T_d 、 C_e 和 T_m ，则可通过控制电枢电压大小来调节转速^[11]。为了获取上述参数，必须知道在某时刻电枢电压 U_d 引起转速 n 变化时转速的一阶和二阶导数。为此，本设计中通过记录单位采样间隔内的表针刻度数据，计算出采样时间 Δt 内的平均转速，再由相邻采样时间段各端点处的平均转速近似求出转速一、二阶导数，代入式 (3) 中解方程即可得到电机参数。电机参数获取软件流程图如图 3 所示。

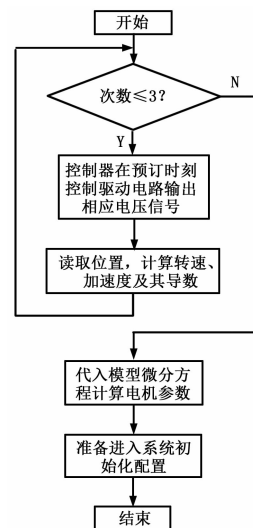


图 3 电机参数获取模块软件流程图

本系统中随机选取了同一批次使用的三台直流电机接入控制及驱动系统后计算得到的电机参数如表 3 所示，基本能够满

足系统响应误差要求。

表 3 电机参数计算

C_e	T_m	T_d
$2.36e-4$	0.076	0.017
$1.95e-4$	0.082	0.013
$2.14e-4$	0.079	0.015

2.2.2 模糊 PI 控制器设计

由于上述控制模型在理想情况下所建, 且计算过程中存在误差, 这将直接影响转速的控制效果。若采用传统的 PI 调节器对转速进行闭环控制, 其调速性能和精确度受参数变化影响很大^[12]。而本设计中采用的模糊 PI 控制器具有参数自整定、控制灵活、动态响应快等优点, 在系统运行过程中能弥补电机模型及参数计算产生的误差, 从而提高控制精度和动态性能^[13]。

系统中转速调节器 ASR 采用模糊 PI 控制, 其传递函数为 $G(s) = K \cdot \frac{\tau S + 1}{\tau S}$, 比例和积分参数根据模糊控制规则进行自整定, 完整的控制系统结构如图 4~5 所示。

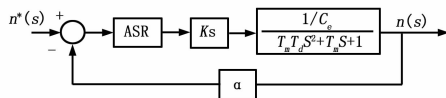


图 4 转速调节传递函数

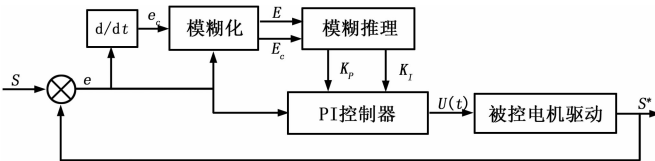


图 5 PI 参数自整定的控制系统结构

模糊 PI 控制是找出比例、积分参数 K_p 、 K_i 与 e 和 e_c 之间的模糊关系, 在运行中不断检测误差及误差变化率, 输出对应的修正量 ΔK_p 和 ΔK_i , 将参数整定为 $K_p = K_{p0} + \Delta K_p$ 、 $K_i = K_{i0} + \Delta K_i$ 。根据经验值, K_{p0} 设定为 3.5, K_{i0} 设定为 1.2, 模糊控制器变量论域取 $[-6, 6]$, 规定误差及误差变化率、输出修正量的模糊量化语言均为 7 个值 (NB, NM, NS, 0, PS, PM, PB), 偏差 e 、偏差变化率 e_c 、输出修正量 ΔK_p 和 ΔK_i 的基本论域、模糊子集论域及量化因子如表 4 所示, 受控系统为二阶惯性环节, 根据过程控制经验制定 K_p 、 K_i 的模糊规则表分别如表 5 和表 6 所示。

表 4 各变量论域、模糊子集论域及量化因子

变量	基本论域	模糊子集论域	量化因子
e	$[-240 \text{ kPa}, +240 \text{ kPa}]$	$[-6, 6]$	1/40
e_c	$[-0.36, +0.36]$	$[-6, 6]$	0.06
ΔK_p	$[-0.5, +0.5]$	$[-6, 6]$	1/12
ΔK_i	$[-0.02, +0.02]$	$[-6, 6]$	1/300

为验证本系统中模糊调节的动态性能, 0 时刻给定位置 1 000 kPa, 3 s 时给定位置 500 kPa, 引入模糊 PI 控制前后表针位置采样记录如图 6 所示, 采样点曲线拟合后发现模糊 PI 调节系统动态响应更快、控制精度更高, 减速区内转速平滑减小, 有利于消除给定位置附近表针的惯性抖动。

表 5 K_p 的模糊规则表

$e_c \backslash e$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表 6 K_i 的模糊规则表

$e_c \backslash \Delta K_i$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

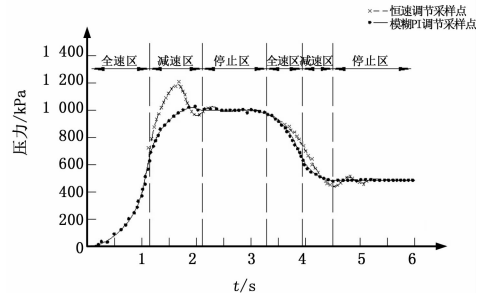


图 6 采用模糊 PI 调节前后指针位置变化

3.3 驱动控制系统软件设计

3.3.1 总体软件设计

驱动控制软件主要包括端口配置及初始化模块、电机参数自测模块、通信模块、电机驱动调速模块以及表针位置获取模块 5 个部分。其中端口配置及初始化模块完成控制器硬件端口设置和系统参数的初始设定, 电机参数自测模块自动完成电机模型相关参数的获取, 通信模块通过 UART 串口中断接收来自上位机的给定指令, 表针位置获取模块通过 T3 定时器中断周期性获取当前表针位置信号, 最终将比较结果输入电机驱动模块。

3.3.2 电机驱动调速模块软件设计

该模块根据给定位置和当前表针实际位置间的偏差来判断表针工作区, 控制电路输出对应工作区的电机驱动信号, 其软件流程如图 7 所示。

控制软件的核心包括位置反馈 PWM 分段调速控制和减速区模糊 PI 控制两部分, 两部分结合在保证快速响应的同时提高了定位精度。

1) 位置反馈 PWM 分段调速模块:

C8051F410 的 PCA 阵列输出 PWM 信号占空比可以通过写入寄存器 PCA0CPLn 来改变, 占空比的计算公式为:

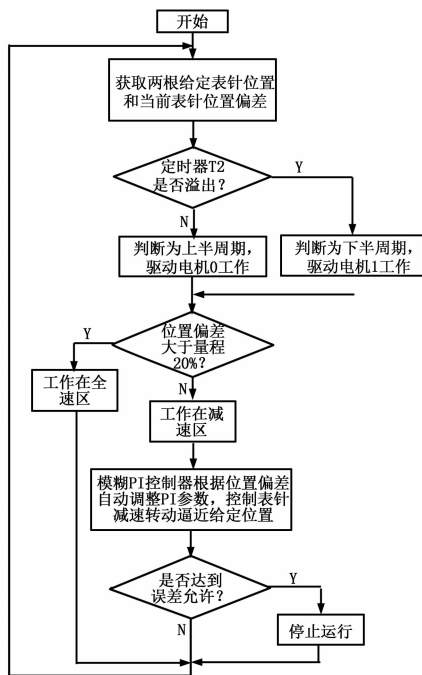


图 7 电机驱动调速模块软件流程图

$$\text{占空比} = \frac{(256 - PCA0CPHn)}{256} \quad (4)$$

其中 $PCA0CPHn$ 的值可以在程序中实时改变, $PCA0CPHn$ 值在 $PCA0L$ 计数溢出时自动重载入 $PCA0CPLn$, $CEXn$ 输出自动复位, 不受系统初始化影响。由式 (4) 可知 8 位 PWM 占空比最大为 100%, 最小为 0.39% ($PCA0CPHn = 0xFF$), 要获得 0% 的占空比可以复位 $ECOMn$ 。驱动电机工作在不同的状态下, PWM 分段调速的设置方式如下:

(1) 全速区: $PCA0CPH = 0x00$, 输出 100% 占空比 PWM 波, 电机全速运行;

(2) 减速区: $PCA0CPH$ 的值根据模糊 PI 控制子程序进行设置, 输出占空比逐渐减小的 PWM 波, 其大小由表针刻度偏差及阻尼共同决定;

(3) 停止区: $PCA0CPH = 0xFF$ 且 $ECOMn = 0$ 。

若表针位置判断在减速区, 系统调用模糊 PI 调节子程序, 驱动电路开始输出占空比可变的 PWM 控制信号。

2) 减速区模糊 PI 调节模块:

当表针处于减速区时, 电机驱动改为转速闭环的模糊 PI 控制。比例和积分因子的初始值通过试凑得到, 作为参数自适应调整的实际值范围参考, 确定误差及输出的论域后, 采用三角形分布隶属度函数模型, 根据模糊规则表分别求取 e 和 e_c 、 ΔK_P 和 ΔK_I 的隶属度, 最终采用重心法解模糊得到 ΔK_P 和 ΔK_I 的输出值, 加到之前得到的比例和积分因子上得到 K_P 、 K_I 。随着刻度偏差减小, PI 控制器调节电机转速平滑减小, 避免惯性导致的过摆, 引起显示刻度不准确或表针震荡。

指针位置及电机工作状态判断完成后, 微处理器调用 PWM 驱动子程序, 输出对应工作状态下的控制信号到 BA6239, 部分控制代码如下,

```
Init_Device();
while(1)
{delta_value1=abs(value_dis1-value_set1);
if((delta_value1<0x000B)|| (value_dis1==value_set1))
```

```
motor1_stop();
elseif((delta_value1>0x0100)&&(value_dis1<
value_set1))
motor1_forward_fullspeed();
elseif((delta_value1>0x0100)&&(value_dis1>
value_set1))
motor1_backward_fullspeed();
elseif((delta_value1<=0x0100)&&(value_dis1<value_set1))
motor1_forward_PWM();
elseif((delta_value1<=0x0100)&&(value_dis1>value_set1))
motor1_backward_PWM();
```

4 结论

本文采用高性能 C8051F410 单片机和电机驱动模块 BA6239 设计了双直流电机驱动系统, 为消除电机参数不易直接测量及系统误差对闭环控制效果的影响, 利用驱动电压和转速反馈信号的关系建模并获取电机参数, 然后采用分段速度控制策略, 在减速过程中引入模糊 PI 调节, 最大程度上减小计算及系统误差。经反复调试, 该系统的精度和响应速度能够达到真车仪表要求; 同时老化实验结果也表明该系统具有较高的可靠性, 能够模拟实际列车上气压仪表的工作状态, 为列车模拟驾驶仿真平台的搭建提供了可靠、低成本的硬件支持, 有着良好的应用和开发前景。但由于参数调整需要系统反复运行, 控制策略还有待进一步完善。

参考文献:

- [1] 谭喜堂. 双针气压表动作仿真研究 [J]. 上海铁道大学学报, 1998, 19 (5): 77-80.
- [2] 周云光, 朱琴跃, 王 瑛. 模拟双针气压表远端控制和测试平台设计 [J]. 机电一体化, 2012, 18 (12): 63-66.
- [3] C8051F410/1/2/3 Microprocessor User's manual [Z]. Rev 1. 0 2/07; Silicon Labs, 2007.
- [4] 2-channel reversible motor driver BA6239A/AN User's manual [Z]. Rev B. Motor driver ICs; ROHM, 2005.
- [5] 周文卫. 直流 PWM 调速系统的研究 [J]. 电气技术, 2009, (7): 37-39.
- [6] 李 俊, 薄翠梅, 史伟伟, 等. 一种直流 PWM 控制系统的设计 [J]. 自动化仪表, 2007, 28 (2): 13-15.
- [7] 徐 升, 赵 金. 基于 C8051F005 的全数字直流 PWM 调速系统 [J]. 微电机, 2006, 39 (5): 41-43.
- [8] 王 珣, 杜茂华, 卢培进. 基于单片机的 PWM 直流调速控制系统设计 [J]. 机械与电子, 2011, (3): 50-52.
- [9] 郭海英. 微机控制 PWM 直流调速系统的设计 [J]. 机电工程技术, 2006, 35 (5): 88-90.
- [10] 周儒勋, 张泽龙, 开迎川. 直流电机模型参数的直接辨识 [J]. 计算机仿真, 2006, 23 (6): 113-115.
- [11] 朱嵘嘉, 纪志成. 模糊多参考模型自适应控制及仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2005, 17 (12): 2997-3000.
- [12] 刘 明, 宋 弘. 自适应模糊 PID 智能控制器在无刷直流电机速度控制系统中的应用 [J]. 电机与控制应用, 2012, 39 (11): 22-25.
- [13] 陈运华, 高凤岐, 王广龙. 基于自适应模糊算法的无刷直流电机控制系统研究 [J]. 微电机, 2012, 45 (12): 31-35.
- [14] 何 登, 华秀洁. 直流电机驱动与控制系统设计 [J]. 电子世界, 2012, (21): 52-53.
- [15] 费新华. 基于 PWM 控制的直流电机驱动设计 [J]. 数字技术与应用, 2012, (11): 155-15.