

基于 STM32 智能温控自调速风扇 PID 控制研究

徐宇宝¹, 林华¹, 王子权²

(1. 皖西学院 电气与光电工程学院, 安徽 六安 237012; 2. 合肥工业大学 机械工程学院, 合肥 230009)

摘要: 智能温控自调速风扇以 STM32 单片机为 MCU, 通过对环境温度、PWM 占空比和被控制电机的工作电压之间的映射关系建立了三者彼此之间的数学模型。建立三点加权平均数据处理模型对采集的温度数据和电机两端的电压数据进行处理。在增量式 PID 算法中加入 STM32 对 PWM 占空比的实时控制, 从而实现了电机的实时恒压控制, 以 6V 小型风扇为实验对象, 实验结果表明电机从启动经过 2s 左右的时间就能达到控制电压, 通过温度阶跃响应实验, 表明了电机对温度阶跃响应具有较快的响应速度和较高的控制精度。

关键词: STM32; PWM; 数据处理; 电机调速; 增量式 PID

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 1007-984X(2018)05-0007-05

家居中常用的风扇一般通过调速电位器实现手动调速, 风扇的电机无法实现无极调速。家居中的环境温度是时刻都在变化的, 人体对环境的适应也是在时刻变化中, 所以有级的调速风扇无法满足对环境温度变化的适应。STM32 系列单片机是较为高端的单片机^[1], 其工作频率较高, 内部集成有 AD 转换、PWM 波输出等功能。增量式 PID 控制算法无需建立复杂的数学模型, 且能够达到较好的控制效果, 已经广泛地应用在了电机调速^[2,3]、数据测量等领域^[4,5]。设计一种智能调速风扇, 使其具有对环境温度变化的适应性, 对电机调速的精确性, 将为人们的日常生活带来极大的方便。

1 控制原理

1.1 STM32 的 PWM 波输出

PWM 既脉冲宽度调制, 是一种高低电平以一定周期变化的占空比可调的方波信号。实验测得 PWM 的低电平电压值 U_L 约为 0 V, 故可将 PWM 调制的输入电压与负载的平均电压之间的关系^[6-8]表示为

$$U_a = \alpha U_H \quad (1)$$

式中: U_a 为负载两端的电压平均值; α 为 PWM 波的占空比; U_H 为 PWM 高电平电压值。

在 STM32 单片机中, 用来产生 PWM 输出周期的是定时器, 在 STM32 固件库的库函数中, TIM_Period 为 TIM_TimeBaseInitTypeDef 的结构体成员, 表示定时器的自动重装寄存器值, 其关系式为式 (2)。

$$f_{\text{PWM}} = \frac{f_{\text{STM32}}}{m} \quad (2)$$

TIM_SetCompare 是用于选定使用哪个定时器和设置 PWM 占空比的函数, 根据图 1 和式 (1) 可推算出 STM32 的 PWM 的输出电压变化关系如式 (3)。

$$U_a = \alpha U_H = \frac{T_s}{T_p} U_H \quad (3)$$

式 (2) 中: f_{PWM} 为 PWM 波的频率; f_{STM32} 为配置后的 STM32 系统时钟 (一般配置为 72 MHz); m 为 PWM

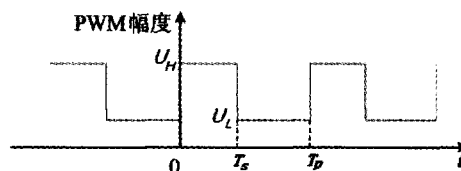


图 1 PWM 方波信号图

收稿日期: 2018-03-20

基金项目: 皖西学院校级重点研究项目 (KJ103762015B05); 皖西学院校级质量工程项目 (wxy2017081, wxy2017096)

作者简介: 徐宇宝 (1980-), 男, 安徽霍邱人, 高级实验师, 硕士, 主要从事电工电子和 EDA 技术等方面的教学和研究, xuyubao@wxc.edu.cn。

的一个周期内的震荡次数。式 (3) 中: T_p 为 PWM 的周期值; T_s 为 PWM 高电平时间。

PWM 的 T_s 和 T_p 是通过设置非负整数值来完成的, 假设 T_{STM32} 为单片机 PWM 计数脉冲的基本周期, n 为 TIM_SetCompare 装载值, n 为非负整数, 则有:

$$T_p = mT_{STM32}; T_s = nT_{STM32}; U_a = \frac{T_s U_H}{T_p} = \frac{nU_H}{m} \quad (4)$$

由式 (4) 可得负载两端的电压平均值 U_a 与 n 和 m 有关, 在 STM32 的 PWM 程序设计中, m 的值可预先设置好, 值 n 可根据环境温度而定, 并随着增量式 PID 算法逐渐变化到环境温度所对应的值。

1.2 三点加权平均

三点加权平均模型利用 AD 转换的当前采集值与过去两次的采集值为处理数据, 其数学模型为

$$x(k) = \beta t^T = (\beta_1 \ \beta_2 \ \beta_3) \begin{pmatrix} t(k) \\ t(k+1) \\ t(k+2) \end{pmatrix}, k=1, 2, \dots \quad (5)$$

式中: $x(k)$ 为经过三点加权平均后的值; β 为权值向量; t 为采集点数据向量; k 为采集点值。

三点加权平均模型的一阶向后差分和二阶向后差分作为权值向量的判断依据, 分别为

$$\nabla t_1 = t(k+1) - t(k); \nabla t_2 = t(k+2) - t(k+1); \nabla^2 t = \nabla t_2 - \nabla t_1 \quad (6)$$

实验采用的权值向量取值如表 1 所示。

表 1 权值向量取值与期望效果

判断依据	权值向量	期望获得的效果
$\nabla t_1 \geq 0 \wedge \nabla t_2 \geq 0 \wedge \nabla^2 t \geq 0$	(0.4 0.4 0.2)	增长快时减缓增长
$\nabla t_1 \geq 0 \wedge \nabla t_2 \geq 0 \wedge \nabla^2 t < 0$	(0.2 0.4 0.4)	增长慢时加快增长
$\nabla t_1 \geq 0 \wedge \nabla t_2 < 0$	(0.4 0.2 0.4)	减弱高异常值影响
$\nabla t_1 < 0 \wedge \nabla t_2 \geq 0$	(0.4 0.2 0.4)	减弱低异常值影响
$\nabla t_1 < 0 \wedge \nabla t_2 < 0 \wedge \nabla^2 t \geq 0$	(0.2 0.4 0.4)	下降慢时加快下降
$\nabla t_1 < 0 \wedge \nabla t_2 < 0 \wedge \nabla^2 t < 0$	(0.4 0.4 0.2)	下降快时减缓下降

1.3 增量式 PID 算法

PID 控制器主要有比例部分、积分部分和微分部分^[9], PID 控制规律数学模型可表示为

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (7)$$

式中: $u(t)$ 为控制输出量; $e(t)$ 为控制输入量, 即设定值与反馈值之差; K_p 为比例系数; T_i 为积分时间常数; T_d 为微分时间常数。

将增量式 PID 模型离散化, 得:

$$\begin{cases} \nabla u(k) = u(k) - u(k-1) = K_1 e(k) + K_2 e(k-1) + K_3 e(k-2) \\ e(k) = r(k) - y(k), K_1 = K_p \left(1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_d}{T} \right), K_2 = -K_p \left(1 + 2 \frac{T_d}{T} \right), K_3 = K_p \frac{T_d}{T} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\nabla u(k)$ 为控制输出量的一阶向后差分; $u(k)$ 为当前采样点得到的控制输出量; $u(k-1)$ 为过去一次采样点得到的控制输出量; $e(k)$ 为当前设定值与反馈值之差; $r(k)$ 为当前设定值; $y(k)$ 为反馈值; $e(k-1)$, $e(k-2)$ 为过去一次和过去两次设定值与反馈值之差; K_1 , K_2 , K_3 为 $e(k)$, $e(k-1)$, $e(k-2)$ 的比例系数。

由式 (8) 可得增量式 PID 算法的增量 $\nabla u(k)$ 的简化描述为:

$$\nabla u(k) = K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_d [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (9)$$

式中: K_i 为积分常数; K_d 为微分常数。

由式 (8) 和式 (9) 可知: 增量式 PID 算法只需要对当前控制输出量和过去两次的控制输出量进行处

理即可，故可节约单片机的存储空间，减少累积误差，大量的实践证明，增量式 PID 算法可减小超调量和加快系统的阶跃响应。

1.4 采集量与被控量的映射关系

采集量包括环境温度和风扇电机两端的电压值，被控量是 STM32 的 PWM 波占空比。值 m 在程序设计中就已经给定，用于确定 PWM 波的频率，所以对占空比的控制就是控制值 n 。 n 值与环境温度有关，建立占空比与环境温度和风扇电机两端的电压之间的映射关系为（忽略内阻的影响）：

$$\alpha = \frac{T - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} + \frac{T_{\max} - T}{T_{\max} - T_{\min}} \left(\frac{U_s}{U_{\max}} \right)$$

(10)

式中： T 为传感器测量的环境温度（摄氏度）； T_{\min} 为环境温度的最小值； T_{\max} 为环境温度的最大值； U_s 为风扇电机的启动电压； U_{\max} 为风扇电机两端的最大电压（一般取额定电压）。

根据式（4）和式（10）可得 n 与环境温度和风扇电机两端的电压之间的映射关系为

$$n = \frac{m \left[T - T_{\min} + (T_{\max} - T) \left(\frac{U_s}{U_{\max}} \right) \right]}{T_{\max} - T_{\min}}$$

(11)

式（11）中 T_{\min} 、 T_{\max} 可人为设定， U_s 、 U_{\max} 根据风扇电机的性能参数即可确定，所以式（11）中的未知量只有环境温度 T ，而环境温度可从温度传感器获得，所以 PWM 波的 n 值是可以通过式（11）确定的。

2 软件设计

软件设计主要包括主程序设计、PWM 波子程序、DS18B20 温度传感器子程序^[10,11]、ADC 子程序、增量式 PID 算法程序、三点加权平均数据处理程序、LCD 驱动与显示程序。

2.1 系统主程序

主程序框图如图 2 所示。装置上电后，初始化相关变量，完成打印输出初始化、STM32 的 ADC 初始化、LCD 彩屏初始化与清屏操作、DS18B20 初始化、增量式 PID 算法初始化、将不需要实时更新的字符在 LCD 显示器上显示。主程序循环过程中首先读取环境温度数据，将环境温度数据传递给增量式 PID 算法程序，在每一次迭代过程中加入延时程序，使增量式 PID 算法在可控的时间范围内完成迭代过程。由图 2 所示，实验设置增量式 PID 算法程序的迭代次数 N 为 200，设置每次迭代的延时时间为 1 ms，这样 PID 算法程序每完成 200 次迭代的时间约为 200 ms，根据 PID 算法程序的运行时间可大致确定风扇电机两端电压到达稳态值的时间。

2.2 三点加权平均数据处理程序

运用三点加权平均处理算法，首先建立三点加权平均的结构体，结构体成员中包括：第一次采集值 t_1 、第二次采集值 t_2 、第三次采集值 t_3 、当前偏差 Dt_2 、上一次偏差 Dt_1 、当前偏差与上一次偏差之差 DDt 。使用 if 语句处理如表 1 所示的判断依据，算法程序如图 3。

2.3 增量式 PID 算法

增量式 PID 算法程序使 PWM 的 n 值逐渐变化到环境温度对应的 n 值，该算法程序已经十分成熟，实验程序定义其结构体成员包括：

```
struct {
    float set_value; //设定值
    float actual_value; //实际值
    float error; //偏差
```

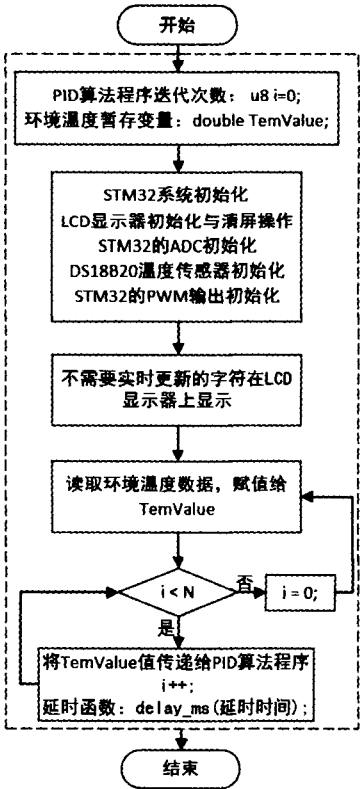


图 2 主程序流程图

```
float error_next; //上一个偏差
float error_last; //上上一个偏差
float kp,ki,kd; //定义比例,积分,微分参数pid;
```

实验时,初始化设置比例常数为 0.05,积分系数为 0.005,微分常数为 0.05,其它结构体成员的初始值均为 0。

3 实验结果与分析

根据式 (11),设置风扇电机的启动电压为 0 V,电机的最大电压为 6 V,PWM 的 m 值为 900,PWM 的频率为 8 kHz,环境温度的最大值和最小值分别为 40℃和 20℃。

3.1 平均温度为 26.356 摄氏度的实验

通过平均温度 26.356℃的实验观察 PWM 的 n 值变化情况,风扇电机两端的电压变化情况,估计 n 值从 0 变化到 26.356℃所对应的 n 值的时间以及 n 值稳定性等情况。根据图 4 所示的结果,由式 (11) 计算得出环境温度为 26.356℃所对应的 PWM 的 n 值为 286,根据进入平衡态时的 n 值变化可得稳态时 PWM 的 n 值变化较小,在采集点为 2000 左右时 n 值已进入稳态,根据主程序的设计,PID 算法程序每完成 200 次迭代的时间约为 200ms,所以在启动后 2s 左右风扇电机两端的电压达到稳态值。

3.2 阶跃输入响应

通过阶跃输入实验分析系统的温度适应性与对电机控制的精确性,阶跃输入变化曲线如图 5。根据图 5 可知,PWM 的 n 值均能够在不同的温度下趋于稳定且稳态时的变化范围较小,所以随着环境温度的变化,系统能够达到对风扇电机准确控制的目的。由于环境温度的变化缓慢且跳变较小,所以实际 PWM 的 n 值变化要比阶跃输入时更快,在更短的时间内就能趋于当前环境温度所对应的 n 值,具有较好的环境温度适应性。

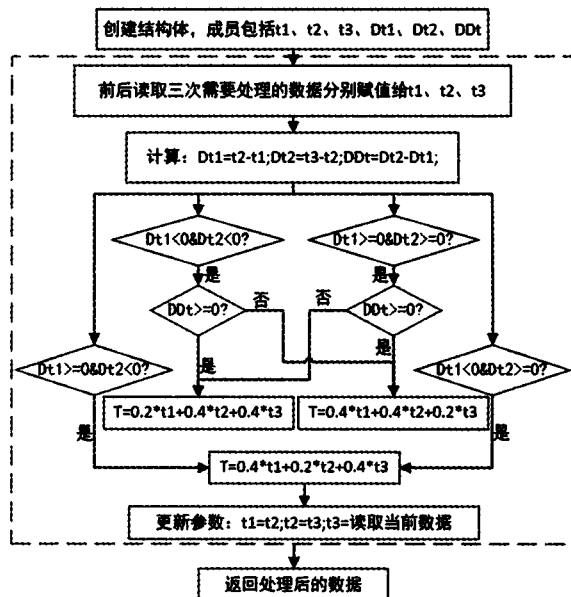


图 3 三点加权平均处理算法

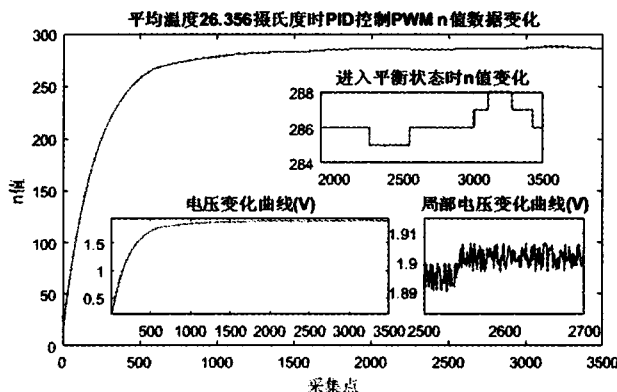


图 4 平均温度为 26.356℃的实验

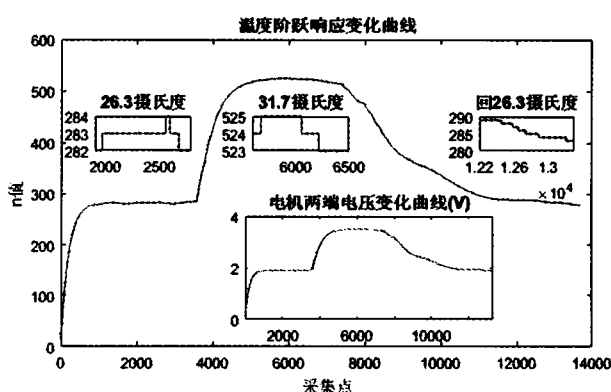


图 5 温度阶跃输入响应变化曲线

3.3 不同环境温度下的 n 值

在不同的温度下分析系统能否达到准确控制的目的,在 25 ~ 40℃下进行实验,实验测得数据如表 2 所示。

由表 2 可知,在不同的环境温度下,系统达到稳态时实际 PWM 的 n 值与由式 (11) 计算得出的理论 n 值之差较小 (± 4),风扇电机两端的电压也能随着 n 值的变化而相应地变化,且误差较小,所以系统能够根据环境温度准确地控制 PWM 的 n 值,从而准确地控制占空比,实现对电机的精确控制。

表 2 不同环境温度下的 n 值

环境温度/℃	理论 n 值	实际 n 值	理论电机电压 U_d/V	测得平均电机电压/ V
25	225	222~227	1.500	1.492
26	270	268~273	1.800	1.821
27	315	314~317	2.100	2.103
28	360	358~362	2.400	2.399
29	405	402~407	2.700	2.698
30	450	448~453	3.000	3.013
31	495	494~498	3.300	3.302
32	540	537~543	3.600	3.611
33	585	582~587	3.900	3.898
34	630	628~632	4.200	4.205
35	675	673~677	4.500	4.514
36	720	718~723	4.800	4.813
37	765	762~766	5.100	5.089
38	810	818~812	5.400	5.406
39	855	853~858	5.700	5.713
40	900	897~900	6.000	5.986

4 结论

- (1) PWM 波的 T_s 和 T_p 通过设置非负整数值 n 和 m 来确定, m 是在程序设计中可预先设定好, n 值由环境温度通过式 (11) 来确定。
- (2) 经过三点加权平均值处理后的数据变化更加光滑, 在一定程度上降低了异常值的影响, 使数据更加靠近平均值, 该算法便于利用单片机实现, 适用于对采集频率较低的传感器进行数据处理。
- (3) 增量式 PID 控制算法能够达到较高的控制精度, 且阶跃响应速度较快, 是进行电机控制的简洁方便的算法。
- (4) 实验结果表明系统在平均温度为 26.356℃ 的响应时间约为 2s, 系统达到稳态时 PWM 的 n 值变化范围较小, 在不同的环境温度下都能进行精确控制, 具有较好的环境适应性和控制准确性。

参考文献:

[1] 洪俊峰, 卜文强, 张裕鑫, 等. 基于 STM32 PWM 的正弦信号发生器设计[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2014, 37(2): 188-191, 224

[2] 朱嵘涛, 武洪涛. 基于增量式 PID 算法的直流电机调速系统[J]. 仪表技术与传感器, 2017(7): 121-126

[3] 周继裕, 张坤忠, 许雪威, 等. 基于 PID 算法和 STM32 的分拣搬运机器人的设计[J]. 仪表技术与传感器, 2017(4): 122-126

[4] 吴礼福, 陈浩, 华国环, 等. 基于 STM32 单片机的溶解氧测量仪[J]. 仪表技术与传感器, 2017(8): 28-31

[5] 黄琦, 韩广源, 吴瑞东, 等. 基于 STM32 的高精度恒温控制系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2017(5): 71-74

[6] 李素娟, 蒋维安. 直流电机 PWM 调速系统中控制电压非线性研究[J]. 现代电子技术, 2010(22): 196-198, 202

[7] 王琼, 吴惠, 夏光, 等. 基于 PWM 控制模式的高速开关阀开关特性析及优化[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2016(9): 1199-1204

[8] 何国荣, 纪娜. 基于 PWM 技术的 LED 补光灯 R/B 配比算法研究[J]. 信息技术, 2015(5): 147-150

[9] 温茹涵. 基于 STM32 的模糊 PID 温度控制系统[D]. 青岛: 青岛大学, 2015

[10] 潘银松, 覃海洋. 基于 FPGA 的防脉冲干扰温控调速直流风扇研究[J]. 微特电机, 2015(9): 97-99

[11] 戴圣伟, 李燕林. 智能温控调速电机在各散热型风扇中的应用[J]. 湖南工业大学学报, 2011(6): 97-99

(下转第 18 页)

Abstract: Application of modern remote sensing data handling technology, processing and integrating of existing data, in order to fully tap the potential of information and improve the comprehensive level of resources survey. Researching of remote sensing image processing method, highlighting the useful information, suppressing the interference information, drawing up the method of image making, in order to improve the image evaluation and the effect of interpretation. The project involves abundant survey field and a wide range of investigation, high requirement of remote sensing and geographical map. On the basis of fully analyzing the practicability and comprehensive, the national imagery and geographic base map production standards, diagram of the preparation of project based, so that the results of the project standardization and standardization.

Key words: remote sensing image; pretreatment; ETM

(上接第 11 页)

The PID Intelligent temperature-controlled self-paced fan based on STM32

XU Yu-bao¹, LIN Hua¹, WANG Zi-quan²

(1. School of Electrical and Photo Electronic Engineering, West Anhui University, Anhui Lu'an 237012, China;

2. Hefei University of Technology, School of Mechanical Engineering, Hefei 230009, China)

Abstract: Intelligent temperature-controlled self-paced fan takes the STM32 microcontroller as the MCU, according to the ambient temperature, PWM duty cycle and the controlled motor's voltage, established a mathematical relationship between them. The three-point weighted average data processing model is established to process the temperature data and the motor voltage data. According to the incremental PID algorithm, and the real-time control of PWM duty cycle based on STM32 is added to the algorithm to achieve real-time constant voltage control of the motor, took the 6 V small fan as the experimental object, and the experimental results show that the motor can reach the control voltage about 2 seconds after the startup, the temperature step response experiment shows that the motor response is fast and high-precision.

Key words: STM32; PWM; data processing; motor speed; incremental PID