

基于 STM32 的单相电机调速控制器的设计*

王卓然, 曾敏, 袁松, 胡子鑫

(华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510641)

摘要: 针对模拟调速方法控制精度和柔性差的缺点, 提出了一种数字化的单相电机调速方案。介绍了单相交流调压调速原理, 设计了控制器主电路和过零检测电路, 对电路进行了仿真和参数优化, 在此基础上搭建了基于 STM32 的单相电机调压调速控制系统并进行实验验证。仿真与实验结果表明, 过零信号检测判断准确, 实验波形与理论分析一致, 实现了数字化调压调速。

关键词: 调压调速; 单相异步电动机; STM32; 双向晶闸管; 数字控制

中图分类号: TM343

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.201188

中文引用格式: 王卓然, 曾敏, 袁松, 等. 基于 STM32 的单相电机调速控制器的设计[J]. 电子技术应用, 2021, 47(8): 116-119.

英文引用格式: Wang Zhuoran, Zeng Min, Yuan Song, et al. Design of single-phase motor speed controller based on STM32[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(8): 116-119.

Design of single-phase motor speed controller based on STM32

Wang Zhuoran, Zeng Min, Yuan Song, Hu Zixin

(School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: Aiming poor precision and flexibility of the analog speed control method, a digital speed control scheme for the single-phase motor is proposed. Firstly, the principle of single-phase AC variable voltage speed control is introduced, the main circuit of the controller and the zero-crossing detection circuit are designed, and then the circuit simulation and parameter optimization are carried out. On that basis, an STM32-based variable voltage speed controller for the single-phase motor is built. The zero-crossing detection of supply voltage is accurate. The simulated and experimental results are shown to be in good agreement, verifying the reliability of the digital speed control method.

Key words: variable voltage speed control; single-phase asynchronous motor; STM32; TRIAC; digital control

0 引言

单相异步电动机具有结构简单、价格低、性能良好、操作方便等特点, 被广泛地应用于工业、农业和日常生活中^[1-2]。目前异步电机的调速方法主要采用变频调速和调压调速两种^[3], 其中调压调速线路简单、成本低廉、没有谐波干扰现象, 在异步电动机调速控制方面已逐步体现出优势。另外, 为了实现电动机的调速控制, 与常规模拟调速方法相比较, 数字控制具有控制精度高、柔性化和模块化程度高等特点, 对外部环境复杂、对产品性能要求高的场景(如风机的通风、排尘和冷却)适用性更好^[4-5]。

本文提出了一种基于 STM32F103 控制的单相异步电动机的调压调速方法, 通过控制双向晶闸管(TRIAC)导通时间实现调压调速。设计了相应的主电路和控制电

路, 通过仿真和实验分析优化电路参数, 从而实现风机系统调压调速目的。

1 单相调压调速原理

单相交流调压电路波形如图 1 所示。图中 α 为触发角, φ 为阻抗角, θ 为导通角, 则有^[6-7]:

$$\theta = \pi - \alpha + \varphi \quad (1)$$

当 φ 一定时, 输出电压 u_o 分为两种情况^[8]:

(1) $0 < \alpha < \pi$ 时, 随着 α 的增大, 交流调压调速电路的输出电压有效值逐步减小, 可表示为:

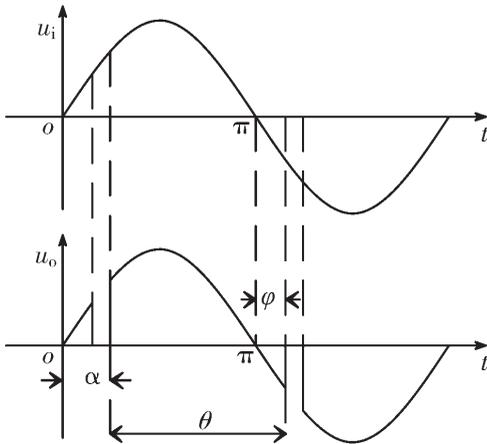
$$U_o = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\theta} (\sqrt{2} U_i \sin \omega t)^2 d(\omega t)}$$

$$= U_i \sqrt{\frac{\theta}{\pi} + \frac{1}{2\pi} [\sin 2\alpha - \sin(2\alpha + 2\theta)]} \quad (2)$$

式中 U_i 和 U_o 分别为电源电压 u_i 和输出电压 u_o 的有效值, $u_i = \sqrt{2} U_i \sin \omega t$ 。

(2) $0 < \alpha \leq \varphi$ 时, 触发脉冲信号不能使用窄脉冲, 使用宽脉冲或脉冲列触发方式可以输出全压。

* 基金项目: 国家重点研发计划(2018YFD0400903); 广东省基础与应用基础研究(2021A1515011773)

图1 单相交流调压电路波形^[8]

综上所述,当触发角的取值范围为 $\varphi < \alpha < \pi$ 时,控制器能够实现单相交流电路的调压调速。

2 电路设计与仿真

2.1 主电路及触发电路设计

控制器主电路采用 TRIAC 和电感 L 串联。触发电路通过光耦与控制电路隔离,如图 2 所示。STM32F103 发出的触发信号将 OUT1 点的电平拉低, u_i 通过 R_1 、 R_2 、光

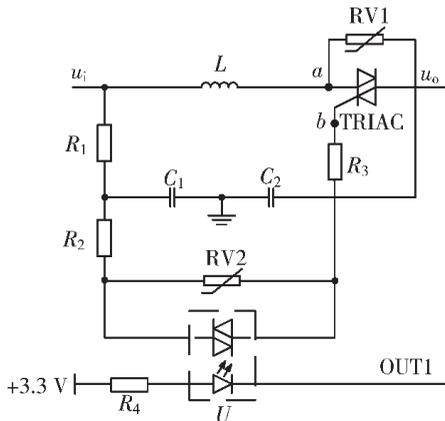


图2 主电路及 TRIAC 触发电路

耦 U 和 R_3 接到触发端 b 点, TRIAC 导通;当 OUT1 为高电平时, U 不通, TRIAC 没有触发信号^[9-10]。

图 2 中双向晶闸管是最关键器件,单相最大输入电压为 $U_{\max} = \sqrt{2} \times 220 \text{ V} \approx 311.1 \text{ V}$,在本方案中双向晶闸管选择 TPDV1225,其 $U_{\text{DRM}} = 1\ 200 \text{ V}$, $I_T = 25 \text{ A}$ 满足设计要求。

主电路串联电感 L 用于抑制 TRIAC 开通时的过电流以及 di/dt 。为了尽量减小 di/dt ,理论上 L 应越大越好。设电动机等效电感为 L_m ,内阻为 R_m ,则有:

$$u_i = L \frac{di}{dt} + L_m \frac{di}{dt} + R_m i \quad (3)$$

$$u_i = L \frac{di}{dt} \quad (4)$$

对式(3)、式(4)进行拉普拉斯变换,得到传递函数:

$$H(s) = \frac{L_s}{L_s + L_m s + R} \quad (5)$$

令 $s = j\omega$,求得幅频特性函数:

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(1 + \frac{L_m}{L})^2 + (\frac{R}{L\omega})^2}} \quad (6)$$

当 $L_m/L > 100$ 时,此时 $A(\omega) < 0.01$,能够保证电路的正常工作。对于 $L_m = 50 \text{ mH}$,可以得出 $L < 500 \mu\text{H}$,在本方案中取 $L = 200 \mu\text{H}$ 。

为提高系统的可靠性,本文设计了必要的晶闸管保护电路。如图 2 所示在 TRIAC 两端并联 RC 电路,其中电阻 R_1 和电容 C_1 、 C_2 用于吸收晶闸管关断产生的电压尖峰^[11],同时限制对 TRIAC 两端施加的电压上升率 dv/dt 。压敏电阻 RV_1 、 RV_2 分别与 TRIAC、 U 并联起到过压保护的作用。当 TRIAC 截断时, C_1 、 C_2 的容抗远大于异步电动机的电抗,假设 $C_1 = C_2 = C$,则有: $2 \times 1/2\pi fC \gg \sqrt{(2\pi f L_m)^2 + R_m^2}$,根据所选风机型号,这里取 $C = 224 \text{ nF}$ 。

2.2 过零检测电路设计

过零检测电路的精准度将直接影响电路调速效果。本文设计的过零检测电路如图 3 所示,当电源电压 $u_i < 0$ 时,电压比较器 LM339 的 5 脚电压小于 0 V ,此时 c 点电压为低电平,三极管 Q_1 截止,STM32F103 的外部中断

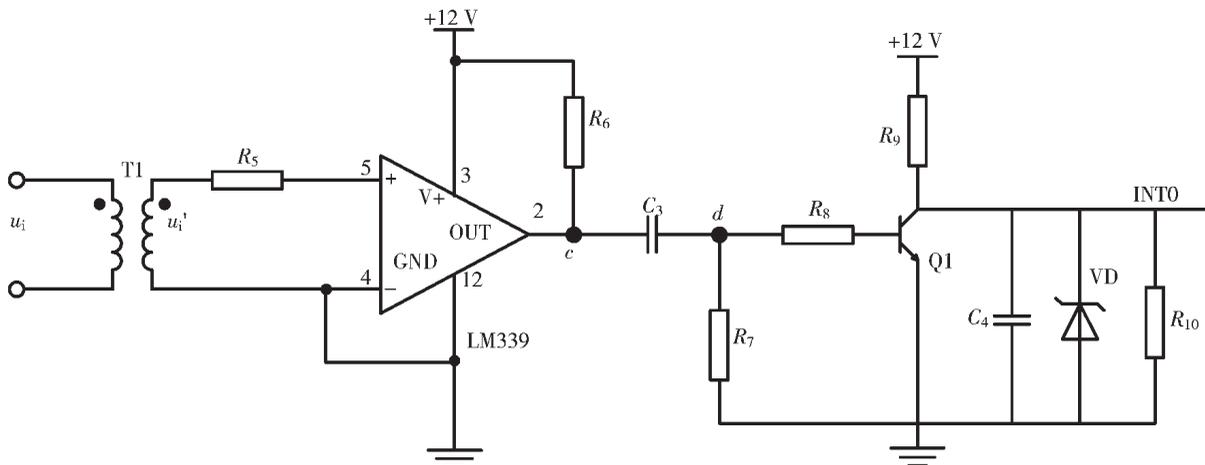


图3 过零检测电路

INTO 处于高电平。当 u_i 经过零点后, $u_i' > 0$, 5 脚电压大于 0 V, c 点电压跳变到高电平, 经过 C_3 、 R_7 组成的微分电路, 在 d 点产生正尖脉冲使 Q_1 导通, INTO 下拉至低电平形成下降沿。STM32 对瞬间产生的下降沿进行捕捉, 完成对电源电压正半波过零点的快速、精准检测。

如图所示, C_3 、 R_7 构成一个一阶 RC 电路, 假设在 $t > 0$ 时 c 点电压从低电位跳转到高电位为阶跃信号, 即 $u_c = V_c \times 1(t)$, 则有:

$$u_d = V_c \times e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (7)$$

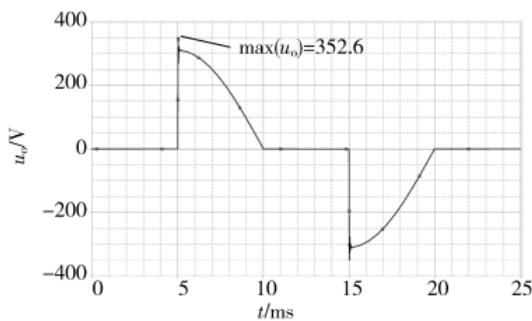
$$\tau = C_3 \times R_7 \quad (8)$$

当 τ 取值远小于 c 点高电平脉宽时, 在 d 点形成正尖脉冲^[12], 又三极管 Q_1 偏置电压 $V_{on} \approx 0.7 \text{ V}$, 可以估算 Q_1 的导通时间为: $\tau \times \ln(V_c/V_{on})$ 。为避免 τ 太小导致过零脉冲的脉宽过窄而不利于 STM32 捕捉, 实际取 $C_3 = 100 \text{ nF}$, $R_7 = 12 \text{ k}\Omega$ 。

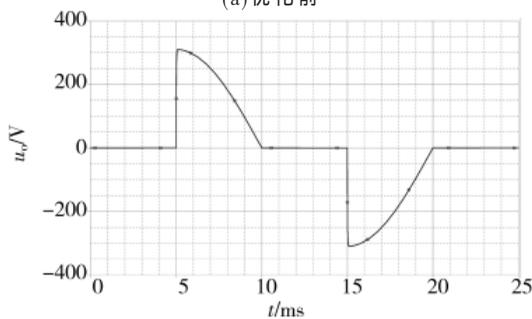
2.3 仿真与优化

通过 PSpice 对上述主电路及触发电路进行仿真^[13], 结果如图 4(a)所示, 调压调速电路工作正常, 但是输出电压 u_o 在 TRIAC 开通时仍存在尖峰。选择函数 $\text{Max}(u_o)$ 作为电路性能量度, 将元件及负载的容差设置为 5%, 通过灵敏度分析^[14]发现 C_1 、 C_2 对主电路性能影响最大, 将两者参数进行优化分析得到修正后的元件值 $C_1^* = 270 \text{ nF}$ 、 $C_2^* = 39 \text{ nF}$ 。优化后的输出电压波形尖峰消除、过渡平滑, 如图 4(b)所示。

为了在 INTO 处得到脉宽合适的过零脉冲, 选择过零脉冲的 3 dB 带宽作为量度对电路性能进行优化。将优化结果 $R_7^* = 4 \text{ k}\Omega$ 代入原电路中, 电源电压 u_i 、d 点电



(a) 优化前



(b) 优化后

图 4 u_o 的仿真波形($\alpha = 90^\circ$)

压 u_d 以及过零脉冲的仿真波形如图 5 所示, 过零脉冲的脉宽在 2 ms 左右, 频率为 50 Hz, 过零点检测准确, 下降沿近乎 90° , 有利于 STM32 进行捕捉。

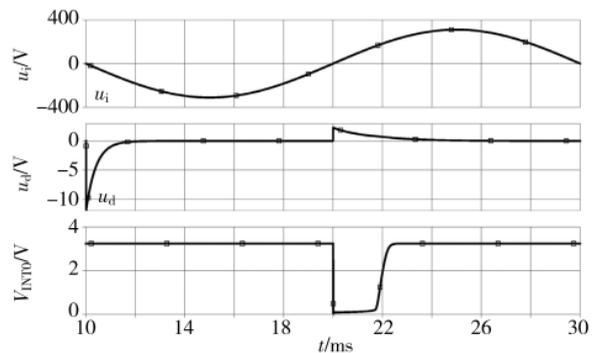


图 5 过零检测电路仿真波形

3 控制系统设计与实验验证

基于上述分析和仿真, 设计了以 STM32 为核心的单相异步电动机的调压调速控制系统, 结构图如图 6 所示, 控制器分为主电路和控制电路两部分, 通过对接不同的外部信号, 适用于各领域的通风、排尘和冷却等风机调速应用场景。

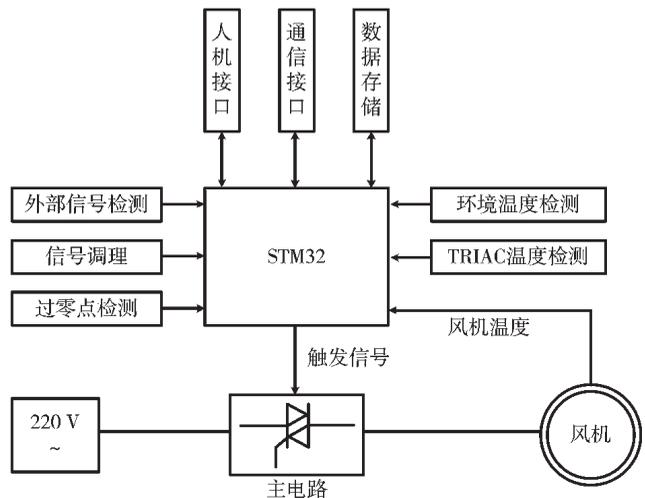


图 6 控制器结构示意图

主电路为单相交流 220 V 供电, TRIAC 与异步电动机定子绕组串联, 控制电路选用 STM32F103 实现对人机接口、通信接口、数据存储、外部看门狗等模块的控制, 以及对风机温度、TRIAC 温度、环境温度的实时监测, 通过软件实现异常检测, 检测结果通过数码管实时显示。STM32 通过采集外部检测信号、 u_i 过零点信号, 经软件计算后输出范围在 $\varphi < \alpha < \pi$ 的触发脉冲信号, 在每个半周期内通过改变 TRIAC 的触发角对电压作相位控制, 改变输出电压的有效值, 实现调压调速^[15-16]。

为了验证控制器的实际控制效果, 搭建了电动机调压调速实验平台。电机参数为: 额定功率为 940 W, 额定

电压 220 V, 额定转速 900 r/min。

图 7 为过零检测电路的实测波形, 过零脉冲脉宽约 2.4 ms, 下降沿陡直近乎 90°, 下降时间约 8 μs。

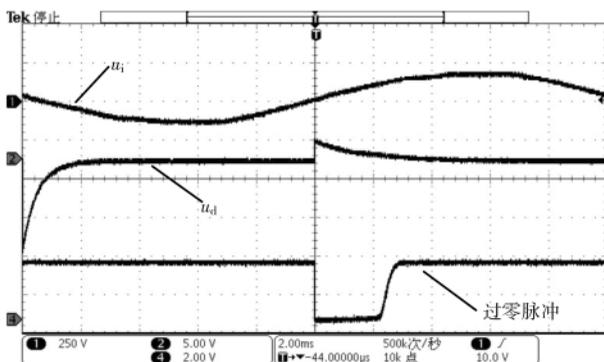
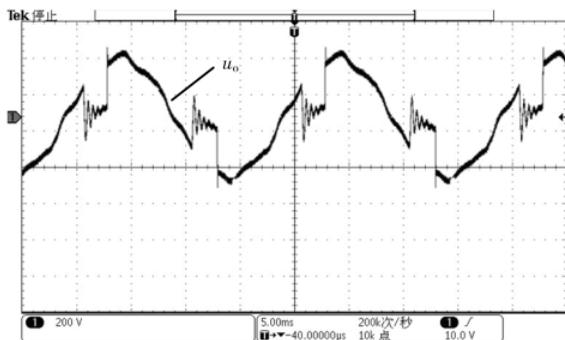
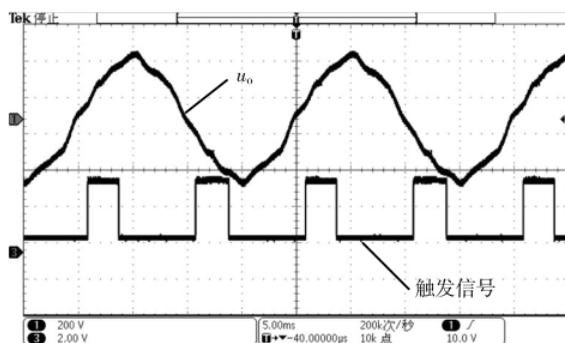


图 7 过零检测电路实验波形

输出电压为 80% 时, 电机运行时电机侧的电压波形如图 8(a) 所示。当电机全压运行时, 触发信号采用脉宽 60°、间隔相差 180° 的宽脉冲, 输出波形如图 8(b) 所示。从图中可见, 过零检测准确, 输出电压波形达到设计要求。



(a) 输出电压为 80%



(b) 输出电压为 100%

图 8 电机两侧的电压波形

4 结论

本文设计的单相电机调压调速控制器, 通过数字化控制方法, 与模拟控制相比灵活可控、易于调试并且精确度更高。仿真研究和样机调试实验表明, 实验波形与理论分析一致, 验证了控制系统的可行性。本数字化控制器通过对接不同的外部输入信号, 可以满足各领域对

风机通风、排尘或冷却等不同场景的调速需要, 具有广泛的应用前景。

参考文献

- [1] 贺虎成, 孙磊, 张玉峰, 等. 基于矢量控制的异步电机自抗扰控制[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(4): 120-125.
- [2] 陈浩, 吴定祥, 康志远, 等. 单相交流串励电机调速系统设计[J]. 机电工程, 2016, 33(12): 1483-1487.
- [3] 孙逊. 单相异步电动机常用调速方式浅析[J]. 微特电机, 2005(1): 38-40.
- [4] 赵雷廷, 刁利军, 张哲, 等. 低开关频率下异步电机电流环的数字控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(21): 3456-3466.
- [5] 杨明, 刘杰, 梁轩瑞, 等. 一种有源功率因数校正电流畸变抑制控制技术[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(3): 30-35.
- [6] 杭一帆, 方贺. 三相异步电动机软启动过程中振荡问题研究[J]. 电气传动, 2019, 49(10): 16-22.
- [7] 林健, 周延锁, 鲁文其, 等. 基于触发角定时控制的异步电机软启动控制器设计[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(3): 59-66.
- [8] 王兆安, 刘进军. 电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [9] 赵玉林, 李丽贞, 李海凤, 等. 无触点有载调压配电变压器光纤启动方案[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(2): 89-94.
- [10] 蒋峰, 吴雷, 惠晶, 等. 基于 DSP 的智能数字三相交流调压调功器的研制[J]. 电力电子技术, 2007(11): 58-60.
- [11] 王浩, 汪志成, 刘杨, 等. 可控硅感性负载交流调压设计与瞬态分析[J]. 电子测量技术, 2020, 43(2): 49-53.
- [12] 姚正武. 晶闸管变流设备电源精确过零检测技术[J]. 电子器件, 2014, 37(6): 1256-1260.
- [13] FITZPATRICK D. Analog design and simulation using OrCAD capture and PSpice[M]. Boston: Newnes, 2017.
- [14] ZHAI G, ZHOU Y, YE X. A tolerance design method for electronic circuits based on performance degradation[J]. Quality and Reliability Engineering International, 2015, 31(4): 635-643.
- [15] ISAKA S, YOSHIDA T. Improving the starting characteristics of single-phase induction motors with an auxiliary-winding current control[J]. IEEE Journal of Industry Applications, 2020, 9(1): 11-16.
- [16] 任仪, 唐娟, 孙佳. 电感性负载的非福斯特电路研究与设计[J]. 电子器件, 2017, 40(6): 1437-1440.

(收稿日期: 2020-12-09)

作者简介:

王卓然(1993-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 焊接过程的数值模拟及控制。

曾敏(1970-), 男, 通信作者, 工学博士, 副教授, 主要研究方向: 数字化电源及智能控制, E-mail: memzeng@scut.edu.cn。

袁松(1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 焊接逆变电源。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所