

用于核电无损检测的小型直流电机控制器设计

朱传雨, 吴健荣, 韩长宇, 李术鸿
(中广核检测技术有限公司, 江苏 苏州 215004)

摘要: 为了满足核电无损检测(NDT)自动化检查装备研制的需求,开发了一种以 STM32 为主控制器的通用型低成本小型直流电机运动控制器。该控制器主要由单片机最小系统、电机驱动电路、编码器信号处理电路和通信电路组成。通过 STM32 内部的增量 PID 算法和积分分离位置式 PID 算法来调节脉宽调制(PWM)输出,达到了快速、稳定、静态误差小的理想控制效果。基于此控制器,设计开发了一套双轴运动控制系统,实现对管道外壁面焊缝区域自动化栅格扫查的应用。

关键词: 直流电机; STM32; 无损检测; PID 算法

中图分类号: TM 33 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)06-0095-05

doi: 10.12177/emca.2021.031

Design of Small DC Motor Controller for Non-Destructive Testing in Nuclear Power Plants

ZHU Chuanyu, WU Jianrong, HAN Changyu, LI Shuhong
(CGN Inspection Technology Co., Ltd., Suzhou 215004, China)

Abstract: In order to meet the requirements of automatic inspection equipment in non-destructive testing (NDT) of nuclear power plant, a universal, low-cost, small DC motor motion controller based on STM32 is developed. The controller is mainly composed of micro control unit (MCU) minimum system, motor driving circuit, signal processing circuit of encoder and communication circuit. The duty cycle of pulse width modulation (PWM) is adjusted by incremental PID algorithm and integral separation position PID algorithm in STM32, achieving the ideal effect of rapidity, stability and small steady-state error. Based on this controller, a two-axis motion control system is developed to realize the application of automatic raster scan for the weld joint region of the pipeline outer wall.

Key words: DC motor; STM32; non-destructive testing (NDT); PID algorithm

0 引言

在核电无损检测(NDT)中,为了实现对被检工件(板材、棒材、管道和容器等)母材及焊缝两侧区域的全覆盖检查,常需要对不同被检工件开发专用的自动化检查装备^[1]。为了能进一步降低因电机运动对 NDT 用超声、涡流信号的干扰,此类装备的研制中大量使用小型直流电机。为此,亟需开发一种通用型、低成本的小型直流电机运动控制模块,以满足诸多不同工件自动化检查的现实需求。

对直流电机的控制,应用最广泛的是脉宽调制(PWM)控制,其优点是响应快、效率高、抗干扰能力强^[2-3]。本文在研究经典 PID 算法和一系列改进型 PID 算法的基础上,对速度控制采用增量式 PID 算法,对位置控制采用积分分离 PID 算法,设计了一种以 STM32 为主控制器的低成本、小型直流电机运动控制器^[4-6]。同时,为了增强该控制器的通用性和实用性,利用 STM32 外设丰富的特点,设计预留了 CAN 总线接口,以便进一步实现多轴组合运动。

收稿日期: 2021-02-03; 收到修改稿日期: 2021-04-16

作者简介: 朱传雨(1983—),男,硕士,高级工程师,研究方向为核电无损检测自动化装备。

1 控制器总体设计

图 1 为控制器硬件框图,控制器由 STM32 主控制单元、电机驱动、编码器信号处理、电流检测以及通信电路等组成。

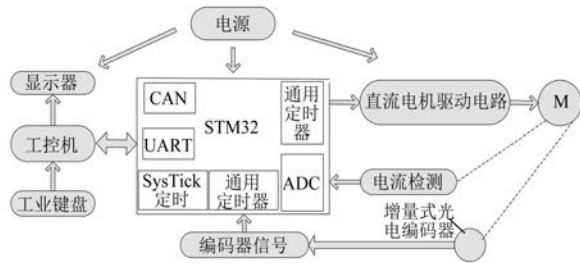


图 1 控制器硬件框图

STM32 是基于 Cortex-M3 内核的 32 位 ARM 处理器,具有价格便宜、功耗低、性能优越等优点。用 STM32 产生 PWM 信号控制驱动电路中场效应功率管的导通/关断,实现对电机正反转、起停的控制^[7]。编码器电路将信号处理后送入 STM32 通用定时器中,该定时器接口被配置成编码器模式,由硬件完成位置的捕获,进而可解算出速度。

STM32 获得电机位置、速度反馈后,通过算法生成控制指令,触发定时器改变 PWM 占空比,进而调节输出,达到闭环控制的目的。电流检测电路采集电机运动的电流信号,送入 STM32 的模数转换器(ADC),实现对电机的过流、过载保护。通信电路由 UART 串口和 CAN 总线接口电路组成。UART 串口用于与上位工控机的通信;CAN 总线接口电路用于控制器间的级联。此外,控制器还包括电源以及电平转换电路。

2 硬件电路设计

2.1 电机驱动电路

驱动部分选用电机驱动专用芯片 BTS7960,属于 NovalithIC 家族的高功率、半桥驱动芯片,通态电阻为 16 mΩ(7 mΩ+9 mΩ),驱动电流高达 43 A。为了实现电机的正反转,采用 2 片该芯片构成 H 全桥驱动电路,如图 2 所示。对应的电机驱动真值表如表 1 所示。为了有效保护单片机管脚免受损坏,电路设计时增加了必要的外围电路,用隔离缓冲器芯片 74HCD244 进行功率电路和逻辑控制电路的隔离。

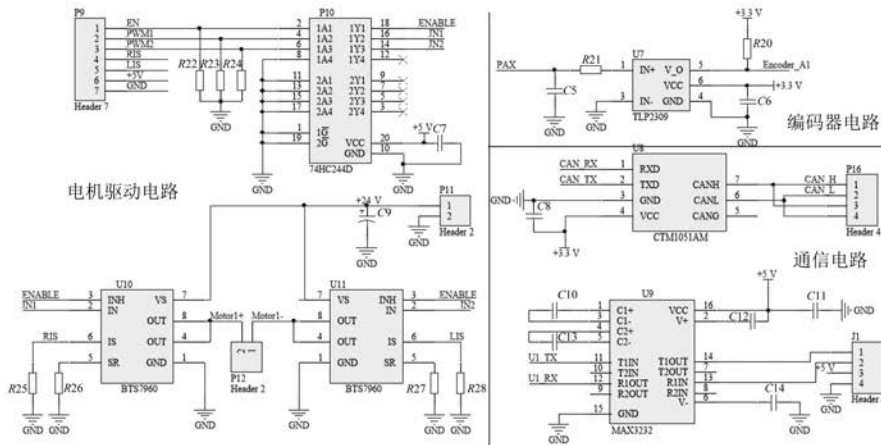


图 2 硬件电路设计

表 1 电机驱动真值表

EN	IN1	IN2	M+	M-	状态
H	PWM	L	H	L	正转
H	L	PWM	L	H	反转
H	L	L	L	L	制动刹车
L	X	X	X	X	自由停车

注: H—高电平;L—低电平;X—任意

2.2 编码器信号电路

编码器选用光电增量式编码器,分辨率 512 线,输出为相位差 90°的正交脉冲信号 A、B。设计的接口电路见图 2。其中 A、B 相信号 PAX、PAB 经电容滤波、高速光耦 TLP2309 隔离后,送入 STM32 定时器对应接口中,由硬件完成脉冲信号识别、计数统计,构成位置和速度的反馈。

2.3 通信电路

串口 UART 通信电路设计选用经典 TTL 转 RS232 的串口芯片 MAX3232, 设计电路见图 2。用于模块间级联的 CAN 总线电路, 选用带有隔离功能的 CAN 收发器芯片 CTM1051AM。作为 CAN 控制器的 STM32 引出 CAN_TX 和 CAN_RX 2 个引脚与收发器相连, 收发器使用 CAN_H 及 CAN_L 引脚连接到 CAN 总线网络中。

3 PID 控制算法

直流电机选用 Maxon RE35 系列, 额定电压 24 V, 额定功率 60 W。基于上述硬件, 通过改变 PWM 占空比对电机进行开环性能测试。PWM 占空比小于 5% (PWM 值范围 0~1 800。PWM 值小于 88 时占空比小于 5%) 时处于电机死区; 占空比位于 5%~100% 范围内, 占空比增大转速加快, 占空比减小转速降低。同时, 为了避免电机的低频噪声, PWM 工作频率选为 20 kHz。

3.1 增量式 PID 控制速度

对于电机速度的控制, 采用广泛应用的增量式 PID 算法^[8-10]。用控制器 STM32 实时测量的转速与设定的转速求差, 差值作为 PID 算法的输入变量, 通过对差值进行比例系数 K_p 、积分系数 K_i 和微分系数 K_d 的运算, 计算出输出变量的增量。在电机空载启动、设定转速 500 r/min 条件下, 经初步估算和试凑法相结合进行 PID 参数整定。 $K_p=1.5, K_i=0.08, K_d=0$ 时, 响应曲线如图 3

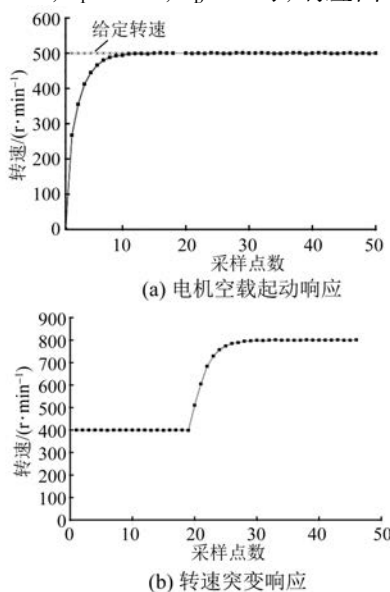


图 3 速度环 PID 响应过程

(a) 所示 (横轴代表采样点数, 采样点时间间隔为 400 ms)。经测定, 约经过 4 s (10 个采样点) 电机转速达到目标设定值, 控制无超调、稳态无静差。图 3 (b) 为转速突变的响应过程, 给定转速由 400 r/min 突变到 800 r/min 时, 在控制算法的作用下, 控制器也能较快地到达给定转速且能稳定运行。

除了上述启动、转速突变情况外, 抗负载扰动能力也是衡量调速性能的重要指标。在转速稳定在 630 r/min 的条件下, 施加负载扰动后的响应情况如图 4 所示。受负载扰动后系统转速下降, 在控制算法作用下, 系统快速恢复至给定转速, 有效地抵抗了负载的扰动。

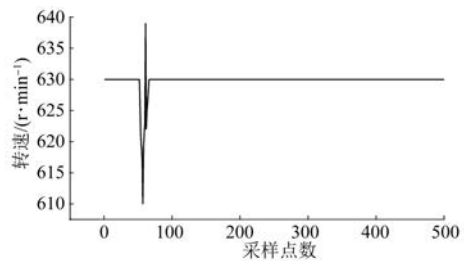


图 4 增量 PID 算法抗扰动响应过程

3.2 位置式 PID 和积分分离 PID 控制位置

对于电机位置的控制, 采用位置式 PID 算法。设定目标位置为 401.92 rad (对应编码器脉冲数为 $401.92 \times 512 \text{ 线} \times 4 \text{ 倍频} / 2\pi = 131\,072$ 个) 条件下, 经 PID 参数整定, $K_p=1.5, K_i=0.1, K_d=0.000\,5$ 时, 响应曲线如图 5 虚线所示。由图 5 可知, 最终位置稳定在 401.80 rad (对应脉冲数为 131 034 个, 静态误差为 -38 个脉冲)。为消除误差, 提高控制精度, 引入积分分离 PID 算法^[11-13]。当被控量与设定目标位置偏差较大时, 取消积分作用, 避免由于积分作用使系统稳定性降低、超调量增大; 当被控量接近给定值时, 再引入积分控制, 以消除静差、提高控制精度。对应的响应曲线

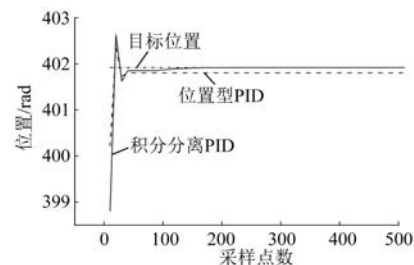


图 5 位置式 PID 和积分分离 PID 位置控制

如图 5 实线所示。最终位置稳定约在 401.92 rad (对应脉冲数为 131 071 个,静态误差 -1 个脉冲),控制误差有了较大的改善。同时对 PWM 进行输出限幅,避免引起较大的超调、振荡。

4 在核电 NDT 装备中的应用

为了实现对管道外壁面焊缝区域的自动化检查,设计开发的检查装备如图 6 所示,主要包括机械扫查装置和电气控制箱 2 部分。图 6(a)为机械扫查装置,其主体结构由圆周运动的 2 个半圆形齿条和轴向运动的丝杆 2 部分组成。结合具体控制任务,图 6(b)是为其设计的电气控制箱,包括由上述控制器构建的双轴(周向、轴向)运动控制系统。

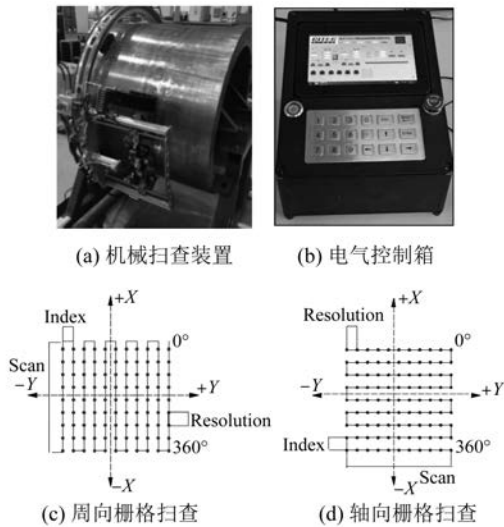


图 6 管道自动化检查装备

为了检出管道内部周向和轴向缺陷,在实际检查中,设计需达到 2 种运动扫查方式。

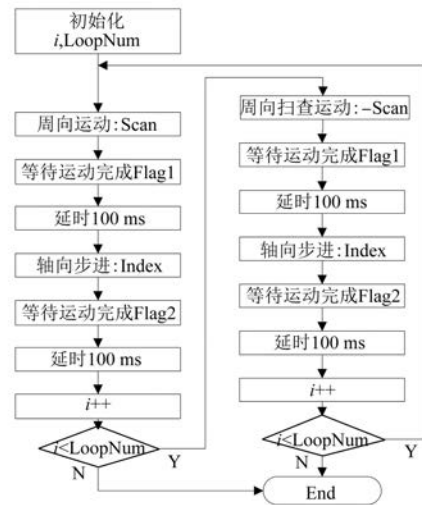
(1) 周向栅格扫查。探头沿着圆周方向运动,轴向方向步进。此时单步扫查行程 Scan 为待检焊缝长度。该方式便于发现垂直于焊缝方向的缺陷,其运动轨迹如图 6(c)所示(X 为圆周运动方向,Y 为轴向运动方向)。

(2) 轴向栅格扫查。探头沿着轴向运动,圆周方向步进。此时单步扫查行程 Scan 为待检焊缝宽度。该方式便于发现平行于焊缝方向的缺陷,其运动轨迹如图 6(d)所示。

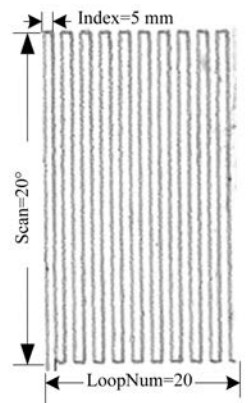
结合试件扫查的工艺要求,在合适分辨率 Resolution(超声仪扫查分辨率)采样条件下,探头移动的步进值 Index 不得超过探头晶片尺寸

50%,以防止漏检。通常扫查方向的分辨率 Resolution 不大于 1 mm,步进值 Index 不大于 5 mm。同时,为了方便缺陷的精准定位,检测信号(超声、涡流)的采集触发一般由编码器信号驱动。

以周向扫查为例,程序的主要流程图如图 7(a)所示,图中 Scan 为周向运动的单步扫查行程值,Index 为轴向运动的步进值,LoopNum 为循环次数(焊缝宽度与 Index 之比)。通过计算并设置合适的扫查行程值、步进值和循环次数,由 2 个轴的交替往复运动,完成对被检试块待检查区域的覆盖检查。图 7(b)为 Scan = 20°、Index = 5 mm 和 LoopNum = 20 所对应的栅格扫查轨迹的实际运行效果。



(a) 程序流程图



(b) 控制平台实际运行效果

图 7 周向扫查方式

为了便于向控制器发送控制命令和实时显示电机运行速度、位置等信息,基于 C#开发了上位控制软件,其界面如图 8 所示。该软件除了可实

现开环、速度闭环、位置(相对/绝对)闭环的单轴运动控制以及双轴的组合扫查运动控制外,还具有限位停、急停以及对应状态的显示等功能。



图8 上位控制软件

5 结 语

本文从硬件电路和软件算法设计方面详述了一种小型直流电机运动控制器的设计和实现方法。该控制器的速度控制精准、平稳、抗外部扰动能力较强,位置控制精度高、稳态误差小,可以达到较理想的控制效果。基于此控制器,设计开发了一套双轴运动控制系统,实现对管道外壁面焊缝区域自动化栅格扫查的应用,具有较强的实用性和参考价值。结合实际需求,未来可应用在更多工业控制和需求相近的领域。

【参 考 文 献】

- [1] 沈功田,胡斌. 中国无损检测 2025 科技发展战略 [M]. 北京:中国质检出版社,2017: 219-224.
- [2] 刘松斌,王海星,李硕恒. 基于 STM32 的直流电机 PWM 调速系统[J]. 化工自动化及仪表,2016(8): 834.
- [3] 陈华峰,宋辉. 一种改进的无刷直流电机控制方法[J]. 电机与控制应用,2015,42(1): 28.
- [4] 陶永华,尹怡欣. 新型 PID 控制及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,2000: 84-86.
- [5] 黄平,王英,江先志. 基于 STM32 的直流电机模糊 PID 调速系统研究[J]. 机电工程,2017,34(4): 380.
- [6] 王晨. 增量式 PID 和位置 PID 算法的整定比较与研究[J]. 工业控制计算机,2018(5): 122.
- [7] 萩野弘司,井桁健一郎. 直流电机控制技术[M]. 茱宜之,陈希文,译. 北京:科学出版社,2019: 70-73.
- [8] 杨学存,杨战社,孔令红. 基于 ARM 的嵌入式直流电机 PWM 调速系统设计[J]. 煤矿机械,2012(4): 255.
- [9] 刘通,崔亚兵. 基于 STM32 和 ET1100 的无刷直流电机控制器设计[J]. 飞控与探测,2019(1): 61.
- [10] 朱峥嵘,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): 122.
- [11] 马晓阳,米柯,杜巍,等. 基于新型积分分离 PID 控制算法的无刷直流电机控制系统[J]. 电机与控制应用,2020,47(4): 30.
- [12] 赵坤,张伟. 积分分离 PID 算法在直流电机中的研究应用[J]. 智能处理与应用,2016(2): 65.
- [13] 胡玮,阮健,李胜,等. 基于 DSP 的直流伺服电机的双闭环控制系统[J]. 机电工程,2012,29(1): 70.
- [7] 张振海. 空空冷却电机损耗与温升的计算研究 [D]. 沈阳:沈阳工业大学,2014.
- [8] 丁树业,王海涛,郭保成,等. 50 kW 永磁同步电机内流体流动特性数值研究[J]. 电机与控制学报,2014,18(9): 30.
- [9] 董剑宁,黄允凯,金龙,等. 高速永磁电机设计与分析技术综述 [J]. 中国电机工程学报,2014,34(27): 4640.
- [10] 胡田. 空-空冷中型电机的流体场与温度场研究 [D]. 沈阳:沈阳工业大学,2015.
- [11] 魏静微,黄全全,谭勇,等. 2 MW 空冷风力发电机热性能分析及改善 [J]. 哈尔滨理工大学学报,2016,21(6): 79.
- [12] 王晓远,杜静娟. CFD 分析车用电机螺旋水路的散热特性[J]. 电工技术学报,2018,33(4): 955.
- [13] 上官璇峰,蒋思远,周敬乐,等. 双转子双鼠笼永磁感应电机三维全域温度场分析[J]. 电机与控制学报,2018,22(11): 58.
- [14] 丁树业,仵程程. 具有径向通风结构的 5 兆瓦双馈风力发电机内流热特性 [J]. 电机与控制学报,2019,23(10): 68.
- [15] 韩力,沈超凡,蔡瑞环,等. 兆瓦级实心转子高速感应电动机通风系统分析 [J]. 电机与控制学报,2019,23(7): 39.
- [16] 朱高嘉,刘晓明,李龙女,等. 永磁风力发电机风冷结构设计与分析 [J]. 电工技术学报,2019,34(5): 946.
- [17] 徐起连,陈秀平,李岩. 异步风力发电机流动与传热分析及优化设计 [J]. 电机与控制应用,2020,47(4): 81.
- [18] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 2 版. 西安:西安交通大学出版社,2001: 333-370.
- [19] 杨世铭,陶文铨. 传热学 [M]. 4 版. 北京:高等教育出版社,2006.

(上接第 88 页)