

文章编号: 2095-2163(2021)04-0098-06

中图分类号: TP368.1

文献标志码: A

# 基于 CAN 总线的步进电机驱动器设计与实现

王志成<sup>1</sup>, 丁学明<sup>1</sup>, 李振华<sup>2</sup>

(1 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093; 2 上海钛擎机器人有限公司, 上海 200093)

**摘要:** 电机矩阵作为一种新兴的展览形式, 常用在商业展览等场所。目前电机矩阵常采用伺服电机实现, 成本高昂。而步进电机相对成本低廉, 且定位精度高, 是替代伺服电机组成电机矩阵的更优选择。但传统的中小型步进电机驱动器常采用脉冲信号对电机进行控制, 属于点对点的控制, 无法满足步进电机在电机矩阵中的应用和推广。针对以上问题, 本文采用 CAN 总线通信网络方案, 针对 57 mm 两相混合式步进电机, 设计了适用于电机矩阵的步进电机驱动器。该驱动器通过 CAN 总线收发控制信息, 采用位置反馈和细分控制技术, 保证了电机的稳定运行。实验结果表明, 通过 CAN 总线通信, 该驱动器能够准确控制步进电机的转速和位置。

**关键词:** CAN 总线; 步进电机; 细分控制; 位置控制; 速度控制

## Design and Implementation of Stepper Motor Driver Based on CAN Bus

WANG Zhicheng<sup>1</sup>, DING Xueming<sup>1</sup>, LI Zhenhua<sup>2</sup>

(1 School of Optical Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2 Shanghai Touch Robot Ltd., Shanghai 200093, China)

**[Abstract]** As an emerging exhibition form, motor matrix is commonly used in commercial exhibitions and other places. At present, motor matrix is commonly realized by servo motor, which is costly. The stepper motor has low relative cost and high positioning accuracy, it is a better choice to replace servo motor to form motor matrix. However, the traditional small and medium-sized stepper motor controller usually adopts pulse signal to control the motor, which belongs to point-to-point control, and cannot satisfy the application and promotion of stepper motor in the motor matrix. To solve these problems above, with the CAN bus communication network scheme, a new driver for 57mm two-phase hybrid stepping motor which is suitable for motor matrix, was designed in this paper. Control information were exchanged through CAN bus, and position loop feedback and subdivision control technology were adopted by this driver, thus ensuring the stable operation of the motor. The experimental results show that using CAN bus communication the driver can accurately control the speed and position of stepping motor.

**[Key words]** CAN bus, Stepping motor, Subdivision control; Position control; Speed control

## 0 引言

电机矩阵由众多电机按照一定的排列规则安装在一定范围内, 电机的协同运行结合视频或光影技术等, 往往能给人带来震撼的效果。因此, 近年来电机矩阵被广泛应用在各大商业展示、科技展览等场所。目前市面上常见的电机矩阵多采用交流伺服电机实现, 虽然响应速度块、控制精度高, 但硬件成本过高。而步进电机具有结构简单, 成本低廉, 定位精度高等优点<sup>[1]</sup>。若在电机矩阵中采用步进电机代替伺服电机, 将具有巨大的成本优势。

传统的步进电机驱动器往往不具备运动控制功能, 需要有额外的控制器通过脉冲信号向驱动器发

送电机控制信息。其存在体积大、系统结构复杂、缺乏统一的外部通信接口、点对点的控制等问题, 无法满足电机矩阵分布式控制的需求。文献[2]设计了四相五线步进电机的细分控制系统, 但其采用的单片机运算速度低, 且没有充分考虑分布式控制的需求, 沿用了传统点对点控制方式。文献[3]设计了车载步进电机控制系统, 应用范围广, 控制部分采用 ARM 和 CPLD 组合的方式, 结构较为复杂且一定程度上增加了硬件成本。本文针对传统步进电机驱动器应用在电机矩阵上的不足, 针对 57mm 两相混合式步进电机, 设计了基于 CAN 总线的步进电机驱动器。驱动器设计了位置反馈和电流硬件控制电路, 采用细分技术驱动电机, 具有结构简单, 成本低廉等

**基金项目:** 国家自然科学基金(61673277)。

**作者简介:** 王志成(1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 电机控制和嵌入式系统; 丁学明(1984-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 嵌入式系统、电机控制器、智能控制。

**通讯作者:** 丁学明 Email: xuemingding@usst.edu.cn

收稿日期: 2020-12-17

优势。各个电机在矩阵中的动作由上位机通过CAN总线统一调度,驱动器符合分布式控制和电机矩阵的应用需求。实验结果表明驱动器能对电机的位置和速度实施准确控制。

## 1 基于STM32F107的系统硬件设计

驱动器主要由电源模块、通信模块、控制模块和电机驱动模块四大部分组成,驱动器结构如图1所示。

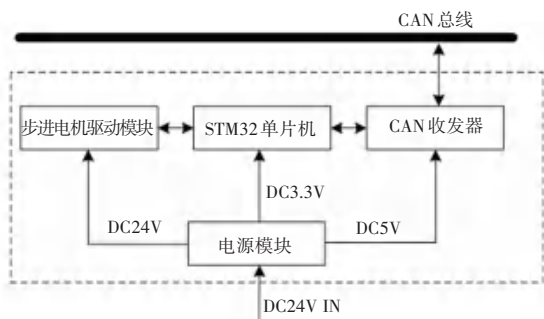


图1 控制器结构图

Fig. 1 Controller structure diagram

电源模块将外部输入的DC24V转换为DC5V和DC3.3V,分别作为CAN总线收发器和单片机等芯片的电源;CAN收发器将单片机可识别的TTL信号和外部CAN总线上差分信号进行相互转换,实现系统对CAN报文的收发;步进电机驱动模块将单片机的控制信号转换为电机相电流,从而驱动电机运行。

### 1.1 单片机选型

综合考虑成本、单片机性能以及功能的可扩展性,本文控制器采用意法半导体的TM32F107RCT6互联型单片机。该单片机基于Cortex-M3内核,最大支持72Mhz系统时钟,集成了bxCAN,支持CAN协议2.0A和2.0B<sup>[4]</sup>,同时支持IEEE802.3标准,集成了以太网媒体接入控制器(即MAC层)。只需在单片机外围电路中加入CAN总线收发器和以太网PHY芯片,即可实现CAN总线及以太网的通信。此外,STM32F107系列单片机支持双CAN口通信,在极端情况下,可以做双CAN冗余备份;在CAN总线通信无法满足的情况下,可以扩展为以太网通信。本文使用单CAN通信进行设计,节省了硬件成本和驱动器体积。该型号单片机引脚数和体积适中,能满足控制器功能和设备小型化等要求。

### 1.2 CAN总线接口硬件设计

CAN总线最早用于解决汽车通信问题,因其通信可靠、结构简单、易于拓展等优点,已被广泛应用

于各种工业现场<sup>[5]</sup>。本文CAN总线收发器采用恩智浦的TJA1050芯片,实现系统对CAN报文的收发。TJA1050是一款常用的CAN总线高速收发芯片,有高速模式和静默模式,通过芯片8号脚进行选择。本文将其接地,将芯片设置在高速模式下。芯片通过CAN\_TX和CAN\_RX两个引脚和单片机相连并进行信息交换。为防止CAN总线上的过流冲击对本系统运行造成影响,将两个22Ω的电阻串联在收发器与外部总线间,并使用两个瞬变二极管将CAN\_H和CAN\_L与地相连。当外部总线上电压出现瞬变干扰时,起到对本地系统的保护作用<sup>[6]</sup>。

在各个节点间,CAN总线采用网线和水晶头进行连接,构成总线式拓扑结构。本文采用了120Ω终端电阻和终端电阻的切换开关,串联在每个节点的CAN\_H和CAN\_L之间,可根据实际需要选择是否将终端电阻加入电路。CAN总线的接口电路如图2所示。

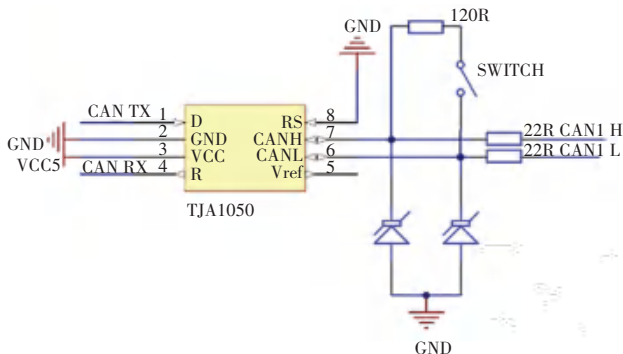


图2 CAN总线接口电路

Fig. 2 CAN bus interface circuit

### 1.3 步进电机驱动电路设计

本文选用的57mm两相混合式步进电机,每一相有两根引出线,分别对应该相绕组的正负极。在电机控制过程中,需要按照指定的顺序在两相绕组上施加一定幅值和极性的电压,即能使电机平稳运行。步进电机的驱动电路采用两个A4950芯片,该芯片是一种小型直流电机正反转控制芯片,内部集成了一个完整的H桥及电荷泵,相对传统桥驱芯片和MOSFET组合的方案,所需器件少,应用方便灵活。芯片输入端IN1和IN2兼容TTL电平,可直接与单片机相连,单片机通过控制输入端电平的高低,控制芯片两个输出端之间的电压极性。芯片输出的电流大小,可通过芯片电流限制功能进行调节。该功能要求芯片LSS引脚经过采样电阻后接地,并通过单片机对芯片Vref引脚上的电压进行控制,从而实现芯片输出电流限制功能。本文在Vref引脚上

连接了 RC 滤波电路,通过单片机向该滤波电路发送 PWM 波的方式,对引脚上电压进行控制。芯片的输出电流限制值可通过式(1)计算:

$$I_{limit} = \frac{V_{REF}}{10 \times R_s} \quad (1)$$

其中,  $I_{limit}$  为输出电流限制值(芯片输出电流上限为 3.5A);  $V_{REF}$  为芯片 Vref 引脚上电压值;  $R_s$  为采样电阻。电机单相驱动电路如图 3 所示。

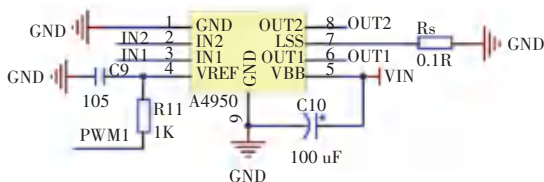


图 3 电机单相驱动电路

Fig. 3 Single phase drive circuit

#### 1.4 位置反馈电路设计

步进电机虽然有较高的定位精度,但在开环运行时,易出现丢步等现象,不利于转子位置的精准控制<sup>[7]</sup>。对此,本文设计了电机位置检测电路,通过位置反馈,使系统能够对电机转速及位置进行精确控制。

转子的位置检测,主要通过 TLE5012B 磁编码芯片实现,可提供 15 位分辨率的角度信息。该芯片采用巨磁阻(GMR)原理进行角度检测,内部有 X 和 Y 两个 GMR 感应单元,每个感应单元又由 4 个 GMR 电阻连接到惠斯通桥电路。X 和 Y 两个感应单元在旋转磁场作用下,分别产生余弦和正弦信号,并经过 A/D 转换和正切计算,得到当前磁场方向与 X 轴之间的角度值<sup>[8]</sup>。与传统的光电编码器相比,TLE5012B 具有抗震动、抗干扰和耐腐蚀等优点。作为一款多圈式绝对值编码器,该芯片的安装和调试难度低,应用更广泛。

TLE5012B 的硬件电路结构简单,其应用电路如图 4 所示。该芯片兼容单片机 SPI 通信接口,采用单数据线通信,最少仅需两根线即可进行数据读写操作。

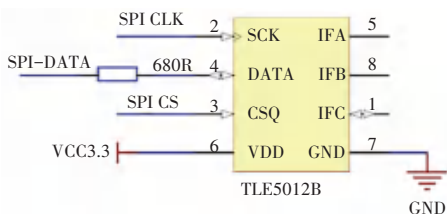


图 4 磁编应用电路

Fig. 4 Magnetic coding application circuit

由于本文采用的编码器芯片是通过检测磁场方向来取得位置信息,因此需要在电机转子轴上安装一片径向充磁的钕磁铁,并将位于驱动器电路板上的磁编码芯片与钕磁铁中心对齐安装,二者之间保留 2~3 mm 间隙。

## 2 步进电机细分控制原理

步进电机的细分驱动技术,将整步的步距角等分成多步,通过控制各项绕组中电流的阶梯变化,拟合出近似正弦的相电流曲线,从而减少电机运行中的震动,保证电机平稳运行。两相混合式步进电机的电磁转矩  $T_e$  可表示为<sup>[9]</sup>:

$$T_e = Z_r [L_2 \sin 2\theta_e (i_A^2 - i_B^2) - 2i_A i_B L_2 \cos 2\theta_e] + Z_r I_m M_{sr} (-i_A \sin \theta_e + i_B \cos \theta_e) \quad (2)$$

其中,  $Z_r$  为转子齿数;  $L_2$  为定子线圈自感的谐波分量;  $\theta_e$  为电角度;  $i_A$ 、 $i_B$  分别为两相绕组中的电流;  $I_m$  为永磁体等效转子电流;  $M_{sr}$  为两相绕组与永磁体等效电流互感。

为了简化计算,在不影响结果的前提下,定子线圈自感的谐波分量  $L_2$  可近似为零。故  $T_e$  可近似表示为:

$$T_e = Z_r I_m M_{sr} (-i_A \sin \theta_e + i_B \cos \theta_e) \quad (3)$$

从式(3)中可以看出,两相混合式步进电机的矩角特性为正弦曲线,这也是步进电机细分控制的理论基础<sup>[10]</sup>。

在两相绕组中通入如下关系的电流:

$$\begin{cases} i_A = I_\Sigma \cos \rho \\ i_B = I_\Sigma \sin \rho \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $I_\Sigma$  为电流矢量的幅值,  $\rho$  为电机轴预置位置的电角度。将式(4)代入式(3),则  $T_e$  可进一步表示为:

$$T_e = Z_r I_m M_{sr} I_\Sigma \sin(\rho - \theta_e) \quad (5)$$

由式(5)可见,两相混合式步进电机的电磁转矩,类似于有  $Z_r$  对极的两相同步电机。在定子两相绕组中分别通入由硬件模拟的、相位相差  $\pi/2$  的正弦电流,即可实现电机旋转。且硬件模拟出的电流越接近正弦曲线,电机旋转越平稳<sup>[11]</sup>。

图 5 是  $\rho$  取步长为  $\pi/16$ , 即 8 细分时,步进电机中电流矢量图。此时,每个象限中增加了 7 个电流矢量。以第一象限为例,  $I_1 \sim I_7$  将  $0 \sim \pi/2$  的电角度八等分,分别表示不同细分位置的电流矢量  $I_\Sigma$ 。若此时电机电流矢量以  $\rho$  为单位匀速旋转,则在  $0 \sim 2\pi$  范围内,某一相绕组的实际电流和理想电流曲线如图 6 所示。



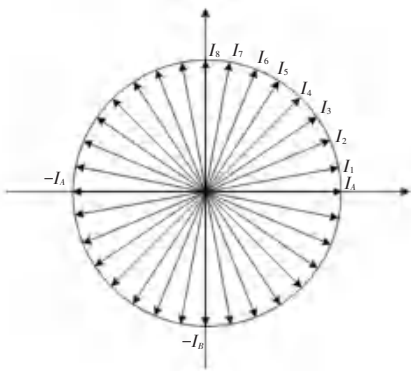


图 5 八细分时步进电机电流矢量图

Fig. 5 Stepper motor current vector diagram at eight-subdivision

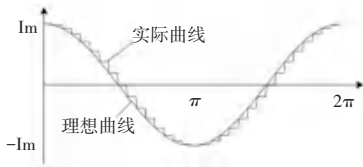


图 6 八细分时 A 相电流变化情况

Fig. 6 Current change of phase A at eight subdivisions

在硬件条件允许的情况下, 细分数越大, 电流曲线越接近正弦曲线, 电机实际步距角  $\theta_s$  越小, 电机运行越平稳。  $\theta_s$  可由以下公式计算:

$$\theta_s = \frac{360^\circ}{N Z_r} \quad (6)$$

其中,  $N$  为运行拍数;  $N = 4\lambda$ ;  $\lambda$  为细分数。

### 3 软件设计

#### 3.1 CAN 总线通信程序设计

节点对 CAN 外设的配置, 主要在程序的初始化过程中进行。其中包括单片机相应的引脚设置、优先级标识符和滤波器的设置、节点 CAN 总线的工作模式和中断设置等。本文设计的驱动器节点 CAN 工作在正常模式, 波特率为 500 k, 使用标准帧格式进行通信。

用于电机控制的 CAN 总线常采用“主从式”总线结构, 上位机担任总线上的主机, 通过轮询方式访问每个节点, 负责调度整个网络的通信和协调各节点上电机的运动; 而从机只有在接收主机轮询时才向总线上发送数据。因此, 主从式能够有效避免因总线竞争而导致的低优先级节点发送的延迟现象<sup>[12]</sup>。CAN 标准帧格式的 11 位优先级标识符可用于表示节点的 ID 号, 主站通过 ID 号来唯一确定从节点。主站在总线上拥有最高优先级, 故规定主站的标识符为 0x000, 从站由标识符 0x001 开始逐个增加。

本文设计的 CAN 总线通信主要使用数据帧和遥

控帧。数据帧在结构上包含仲裁段、控制段、数据段、CRC 和 ACK 段。其中数据段在标准帧格式下包含 8 个字节, 是信息传递的主要部分; 遥控帧和数据帧的区别在于, 遥控帧没有数据段以及仲裁段中的 RTR 标识符被置位, 主要用于向相应节点请求信息。

根据实际需求, 设计总线的通信协议, 上位机下发的指令和节点回复的信息, 均采用数据帧的 8 字节数据段表示。上位机下发指令和节点回复信息的数据段格式见表 1 和表 2。

表 1 上位机下发指令数据段格式

Tab. 1 The data segment format of the instructions issued by the upper computer

字节 0	字节 1,2	字节 3,4	字节 5,6	字节 7
模式	速度	位置	加速度	保留

表 2 节点回复信息数据段格式

Tab. 2 The data segment format of the instruction that the node responds

字节 0	字节 1,2	字节 3,4	字节 5,6	字节 7
当前模式	当前速度	当前位置	故障报警	保留

#### 3.2 基于位置反馈的细分驱动方案

本文设计的基于位置反馈的细分驱动方案, 针对位置偏差, 实时调整定子绕组中通入的电流值。相对于传统的不同转子位置对应固定电流大小的细控制, 本方案电流实时可调, 电机运行中抖动更小, 电能利用率更高。

两相混合式步进电机位置控制如图 7 所示。系统根据 CAN 收发器接收的期望位置、最大速度以及加速度信息, 预先对速度曲线进行规划, 并按位置控制周期, 逐步输出期望位置  $\theta_{ref}$ 。每周期期望运行步数由位置偏差  $\theta_{err}$  表示。

考虑 PID 算法实现简单, 响应快, 且对静差有很好的抑制效果, 故本文采用 PID 算法进行控制器的设计。控制器中 PID 算法的实现形式为:

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \sum_{j=0}^t e(j) + K_d (e(t) - e(t-1)) \quad (7)$$

式中,  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  分别为 PID 参数;  $e(t)$  为当前周期的位置偏差;  $e(t-1)$  为上周期的位置偏差。电机 AB 两相的电流和极性由式(8)进行调整, 并分别以 PWM 和开关量信号传输给功率电路。功率电路根据电流大小和扇区号, 对电机进行驱动。

$$\begin{cases} i_A = \frac{U(t)}{10 \times R_s} \cos\varphi \\ i_B = \frac{U(t)}{10 \times R_s} \sin\varphi \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $U(t)$  为 PID 算法输出的控制量;10 为芯片内部增益;  $R_s$  为采样电阻值。

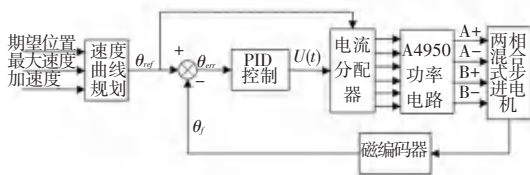


图 7 位置控制框图

Fig. 7 Position control block diagram

### 3.3 系统程序工作流程

系统启动后,单片机首先对各个外设进行初始化,包括相关 IO 口配置、CAN 总线初始化、用于产生 PWM 和控制周期的定时器初始化以及中断配置等。初始化完成后,系统等待来自 CAN 总线上的命令,当接收 CAN 信息后,系统进入 CAN 接收中断,如图 8(a)所示,进行相应报文处理或向上位机发送节点状态。当进入定时器的控制周期中断时,如图 8(b)所示。中断程序首先获取  $\theta_{ref}$  和  $\theta_f$ , 计算本周期电机运行的细分步数,通过 PID 控制器计算控制量,最后经绕组电流分配和功率电路,对电机进行驱动。

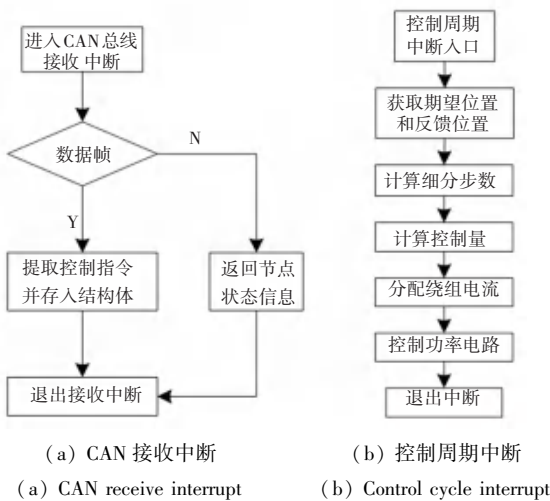


图 8 系统程序流程图

Fig. 8 System program flowchart

## 4 实验及结果分析

实验平台采用 57 mm 两相混合式步进电机及依据本文所述设计的驱动板,搭建一个 CAN 总线节点,并将 5 个节点用 CAN 总线连接,通过 CAN 转 USB 连接至电脑组成一个 CAN 网络。实验过程中,通过电脑向各个节点发送控制指令的方式,来模拟上位机对电机矩阵动作的控制。为简化控制,在不影响实验结果的前提下,本文实验均采用梯形加减速控制。

驱动器 and 测试实物如图 9(a)和(b)所示。



(a) 驱动器

(b) 测试实物

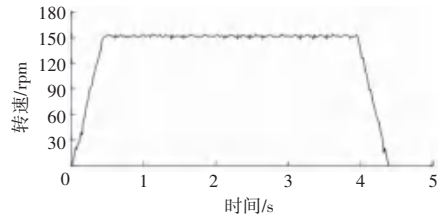
(a) Physical driver

(b) Physical prototype test

图 9 驱动器和测试实物图

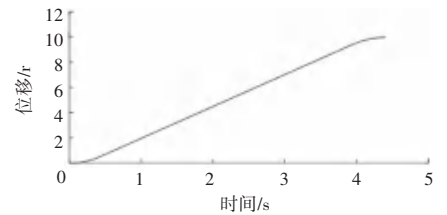
Fig. 9 The photo of driver and real objects

上位机向一号节点发送数据段为 0x01 0x00 0x96 0x0a 0x00 0x00 0x0a 0x00 的数据帧;向二号节点发送数据段为 0x03 0x01 0x31 0x00 0x00 0x00 0x1e 0x00 的数据帧。即命令一号节点电机工作在位置控制模式,方向为正转,最高转速为 150 rpm,运行 10 圈,加速时间为 450 ms;命令二号节点工作在速度模式,方向为正转,转速为 305 rpm,加速时间为 300 ms。一号节点的电机转速和位移曲线分别如图 10(a)和图 10(b)所示。二号节点电机的速度曲线如图 11 所示。



(a) 电机转速

(a) Motor speed



(b) 位移曲线

(b) Displacement curve

图 10 一号节点位置和速度曲线

Fig. 10 The position and velocity curve of node 1

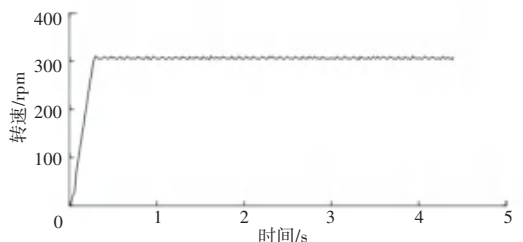


图 11 二号节点速度曲线

Fig. 11 The velocity curve of node 2

由图中可知,电机的转子转速和位置与设定值一致。速度曲线的波动较小,电机运行过程中震动小。由于实验中采用的是梯形加减速方式,在电机加减速起止点附近速度曲线有所波动,可通过采用S型加减速曲线来进行优化。

## 5 结束语

本文针对步进电机应用于电机矩阵,采用两相混合式步进电机,设计了基于CAN总线通信的驱动器,并对通信和驱动电路做了介绍。驱动器体积小,可直接安装在电机尾部,部署安装方便。采用CAN总线通信方式,通信可靠性高,且延时低,适应了电机矩阵中分布式控制的需求。为减小步进电机运行中的震动,采用基于位置反馈的细分控制方案,每周期的运行步数由程序逐步给出。控制器采用PID算法,根据位置偏差对相电流进行实时调整,并通过硬件进行电流控制。控制算法简单易行,硬件成本低廉。本驱动器没有设计电流反馈,在一定程度上对位置和速度控制精度有所影响。因此,本文所设计的驱动器尤其适合应用于对位置和速度控制精度无特殊要求的电机矩阵,以及其它多电机分布式控

制系统中。

## 参考文献

- [1] 何昌俊,杨自栋,闫珍奇,等. 基于STM32的步进电机动态加减速控制[J]. 轻工机械, 2020, 38(2): 45-50.
- [2] 吴峥浩,沈世斌,王栈倚. 基于单片机的步进电机控制系统设计[J]. 电子测试, 2020, 8(11): 12-14.
- [3] 王福杰,于长勃. 一种基于ARM+CPLD的车载步进电机控制器设计[J]. 微电机, 2020, 53(4): 103-106.
- [4] 张河新,王晓辉,黄晓东. 基于STM32和CAN总线的智能数据采集节点设计[J]. 化工自动化及仪表, 2012, 39(1): 78-80.
- [5] 柴文峰,丁学明. 基于STM32单片机CAN通信控制网络设计[J]. 电子科技, 2017, 30(3): 142-145.
- [6] 陈国伟,丁学明. 基于CAN总线的无刷直流电机控制系统设计[J]. 电子科技, 2017, 30(3): 153-156.
- [7] 邵海龙. 基于DSP的混合式步进电机细分调速系统设计[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2019, 35(4): 92-94.
- [8] 陈如意,周翟和,王锋,等. 基于TLE5012B的高精度多圈绝对式磁编码器设计[J]. 测控技术, 2017, 36(7): 116-120.
- [9] 郝欣伟,袁皓,刘云秋,等. 两相混合式步进电机细分驱动器设计[J]. 电子世界, 2019(2): 113-115.
- [10] 李景忠. 步进电机细分驱动系统设计[ D]. 安徽:安徽理工大学, 2018.
- [11] 杨元凯. 基于DSP两相混合式步进电机控制驱动器研究与设计[J]. 电子设计工程, 2017, 25(23): 125-129.
- [12] 宋辉. 基于CAN总线分布式伺服系统研究[J]. 舰船科学技术, 2018, 40(11): 144-147.

(上接第97页)

## 4 结束语

本文以轨枕为研究对象,提出了一种基于DTW的轨道结构病害诊断的新方法,并得出了如下结论:

(1)利用DTW算法计算了轨枕振动响应的时时间弯曲距离,该算法对于长度不一的序列有很好的规整作用,规整结果也能很好的反应轨道结构的不同病害,构建了基于时间弯曲距离的特征向量,降低了数据的维度,减少了后续算法的运行时间;

(2)以基于时间弯曲距离的特征向量作为输入,利用支持向量机对轨道结构不同病害进行分类,取得了较好的诊断效果,且在有些列车速度下的分类准确率达到90%以上,最高的分类准确率甚至达到了95.8%,实现了对轨道结构不同病害的诊断。

## 参考文献

- [1] 詹璐,刘仍奎,王福田,等. 地铁轨道几何不平顺指标预测方法研究[J]. 铁道建筑, 2020, 60(7): 128-131.
- [2] 张力文,李再伟,何越磊,等. 胀板区段的高低不平顺时频特征及其评估方法[J]. 振动与冲击, 2020, 39(13): 110-115, 133.
- [3] 褚振忠. 便携式全自动轨道综合检测平台设计[D]. 西安:西安石油大学, 2020.
- [4] KRISHNA S M, CHELLASWAMY C, BALAJI L, et al. Optimized railway track health monitoring system based on dynamic differential evolution algorithm[J]. Measurement, 2019, 10(7): 152.
- [5] 史红梅. 基于车辆动态响应的轨道不平顺智能感知算法研究[D]. 北京:北京交通大学, 2013.
- [6] 张洋俐君,高翠芳,陈卫,等. 一种基于压缩感知和动态时间规整的信号特征提取新算法[J]. 数据采集与处理, 2019, 34(2): 303-311.
- [7] JIAO Jinyang, ZHAO Ming, LIN Jing. Unsupervised Adversarial Adaptation Network for Intelligent Fault Diagnosis[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(11): 9904-9913.