

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.06.005

基于STM32的步进电机管道直径测量系统的设计

王明亮¹, 鲍晓华¹, 周虎², 郭帅³

(1. 合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 乐山职业技术学院 智能制造学院, 四川 乐山 614013; 3. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:针对市政工程应用中地下管道直径测量难以及测量不够精准的问题,文章设计一种步进电机驱动下的管道直径测量系统,以STM32F108C8T6作为主控制器,数字式HPD322作为步进电机驱动器,并采用蓝牙通信。系统上位机发出开始命令,单片机接收到信号后发出脉冲让驱动器工作,驱动步进电机运动;当两侧触发开关同时触发时,单片机接收到信号后发出反转信号,步进电机反向旋转,将测量装置收回。该测量系统工作时前进与后退的步数一致,确保装置总能回到初始位置,从而保证下一次可以直接使用。

关键词:步进电机;驱动器;蓝牙通信;管道直径测量

中图分类号:TP23 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2025)06-0744-06

Design of pipe diameter measurement system driven by stepper motor based on STM32

WANG Mingliang¹, BAO Xiaohua¹, ZHOU Hu², GUO Shuai³

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Intelligent Manufacturing Academy, Leshan Vocational and Technical College, Leshan 614013, China; 3. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In municipal engineering applications, underground pipe diameter measurement is difficult and inaccurate. To address this problem, this paper designs a pipe diameter measurement system driven by stepper motor, which is based on STM32F108C8T6 as the main controller and digital HPD322 as the driver of the stepper motor, using Bluetooth for communication. The upper computer issues a start command, and the single-chip microcomputer receives the signal and sends a pulse to let the driver work, so as to drive the stepper motor to move. When the trigger switches on both sides are triggered at the same time, the single-chip microcomputer receives the signal and sends a reversal signal, the stepper motor rotates in reverse and retracts the measuring device. The number of steps forward and backward is the same, so as to ensure that the device can always return to the initial position, enabling the immediate reuse.

Key words: stepper motor; driver; Bluetooth communication; pipe diameter measurement

在市政工程中,地下管道通常埋设较深,且长时间排放污水,导致管道内部情况复杂。因为需要准确测量管道直径数据,而依靠人工直接下管道测量不仅操作麻烦,还存在安全隐患,所以需要

开发一种设备实现管道直径的测量。

步进电机作为一种数字信号驱动的电机,具有良好的开环控制能力,在负载和脉冲均达到合理要求的情况下,能够较为准确地按照要求工作。

收稿日期:2023-07-24;修回日期:2023-08-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51977055);安徽省重点研究与开发计划资助项目(202104i07020012)

作者简介:王明亮(1999—),男,安徽亳州人,合肥工业大学硕士生;

鲍晓华(1972—),男,安徽合肥人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者, E-mail: baioxh@hfut.edu.cn.

利用勾股定理可得:

$$L_1^2 + (R - M)^2 = R^2 \quad (1)$$

将式(1)化简可得:

$$R = \frac{L_1^2 + M^2}{2M} \quad (2)$$

由式(2)可以得出管道的半径 R , 将计算出的数据上传给上位机, 即可得到所需的管道直径数据。

2.2 驱动电路原理分析

步进电机驱动器引脚功能见表 1 所列。

表 1 步进电机引脚及其功能

| 引脚 | 功能 |
|---------|-------------------------------------|
| PUL | 启停信号: 下降沿有效, 1 个脉冲周期走 1 个步距角 |
| DIR | 方向信号: DIR 低电平或悬空顺时针旋转, 高电平逆时针旋转 |
| ENA | 使能信号: 使能或者禁止驱动器输出, 接低电平禁止工作 |
| V+ | 电源正极 |
| V- | 电源负极 |
| SW1~SW4 | 拨码开关电流设置: 可调范围 0.2~2.2 A, 步长为 0.2 A |
| SW5~SW8 | 拨码开关细分设置: 最高细分倍数 128, 16 档可调 |
| A+ | 电机 A 相+ |
| A- | 电机 A 相- |
| B+ | 电机 B 相+ |
| B- | 电机 B 相- |

由于单片机的 I/O 输出电压电流能力有限, 一般电压为 3.3 V, 电流最大不超过 20 mA, 不能直接驱动步进电机运行, 因此需要另外加装驱动器对信号放大后才能驱动步进电机。

2.3 驱动器细分的设定及转速设置

本文采用两相混合式步进电机, 固有步距角为 1.8° , 若不设置细分, 则通常 200 个脉冲转 1 周。

为了使步进电机在运行过程中振动较小, 需要设计驱动器的细分倍数, 而 HPD322 驱动器的最高细分倍数为 128。

本文设计采用 16 细分倍数, 即需要 3 200 个脉冲电机运转 1 圈^[4], 即当单片机发送给驱动器 1 个脉冲时, 步进电机转 0.1125° 。此时步进电机的转速与脉冲频率、电机固有步距角以及细分倍数的关系为:

$$n = \frac{f\theta_s}{1200m} \quad (3)$$

其中: n 为电机的转速; f 为脉冲频率; θ_s 为步进

电机的步距角; m 为细分倍数。

2.4 驱动器脉冲的产生

步进电机驱动器脉冲由 STM32F108C8T6 单片机定时器 3 的中断处理函数提供, 并不断记录给步进电机前进脉冲的个数^[5]。脉冲个数是在定时器中断函数中通过取反获得的, 因此有效脉冲的频率是进入定时器中断频率的 1/2, 只需判断步进电机的前进步数或者计算单片机发送给驱动器的脉冲个数, 即可知道电机转动的圈数。当滑块返回时只需按照前进的步数就能让步进电机回到初始位置。

脉冲产生程序如下。

```

脉冲产生程序
void TIM3_IRQHandler(void)
{
    if(TIM_GetITStatus(TIM3, TIM_IT_Update) == SET)
    {TIM_ClearITPendingBit(TIM3, TIM_IT_Update); //清空
    中断标志, 每接收到 1 次数据进入 1 次中断
    {motor_pul = ! motor_pul;}
    if(flagtime == 1)
    {count1++;}
    if(jin_flag == 0)
    {chu++;}
    if(jin_flag == 1)
    {chu--;}
    if(chu == 0)
    {chu = 1;
    TIM_Cmd(TIM3, DISABLE);
    flag0 = 0;
    }}}

```

3 系统软硬件设计

3.1 硬件电路设计

3.1.1 蓝牙模块

蓝牙通信的应用场合十分广泛, 如运动手环、遥控汽车、飞行器等, 而人机界面种类也十分丰富, 如遥控器、手机软件等。蓝牙作为一个通信模块, 必须将主从模块配对才能使用, 进而实现数据交换^[6]。

本文设计使用的产品型号为 HY-40R204 I, 属于小模块的蓝牙传输。该模块有 10 个引脚, 天线形式为 IPEX RF 外接天线连接端子; 用户接口使用串口设计, 全双工双向通讯, 同时支持桥接模块或直接驱动模式。

本文设计的蓝牙模块与单片机的连接方式如图 4 所示。

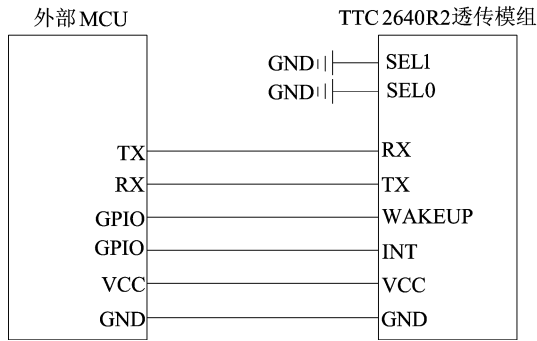


图 4 蓝牙模块与单片机连接方式

3.1.2 驱动器模块

步进电机必须配备专用驱动器才能正常工作。驱动器起信号放大的作用,使步进电机能够正常运行。步进电机的驱动电路采用高速光耦隔离^[7],既可防止外部电流倒灌损坏驱动器,又能增强驱动能力。驱动器负责步进电机运行方向、脉冲以及使能作用,进而控制步进电机的转向和转速。

驱动器采用数字式 HPD322 智能步进电机驱动器,内部采用 PI 控制算法,且配备了静音技术,使得驱动器工作时噪音较小,振动幅度低,发热量小;侧边有 8 个拨码开关,分别控制电流的大小和细分的倍数,内置默认最高细分倍数为 128,16 档可调,电流也有 16 档可调,根据自己的实际负载需求去选择^[8-10];同时内部还设置有过电压过电流的保护和欠压报警以及马达相位开路检测等功能;输入输出控制信号均采用光电隔离,输入最大脉冲频率为 300 kHz,具有较强的抗干扰能力,可以适用比较恶劣的工作环境;方向、脉冲和

使能端子都有恒流输入功能,可以直接与输入信号相连接,无需外加串联电阻降压限流保护。驱动器与步进电机接线图如图 5 所示。

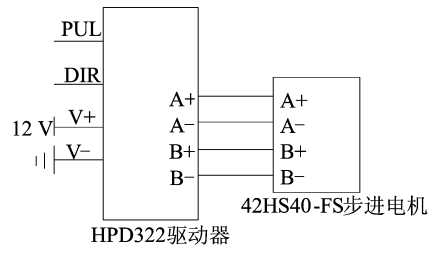


图 5 驱动器与步进电机接线图

3.1.3 硬件电路主模块

STM32 是 ARM Cortex M3 处理器,由于其优越的性能,正在被越来越多的公司使用。

本文嵌入式控制系统的总体结构包括步进电机、步进电机驱动器、STM32F108C8T6 处理器、蓝牙模块。处理器是整个系统的核心,由它和驱动器、电源共同控制步进电机的正转、反转、停止以及数据的计算。

处理器硬件电路主模块实物图和电路图如图 6、图 7 所示。

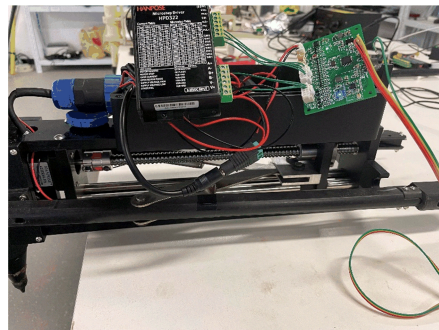


图 6 硬件电路主模块实物图

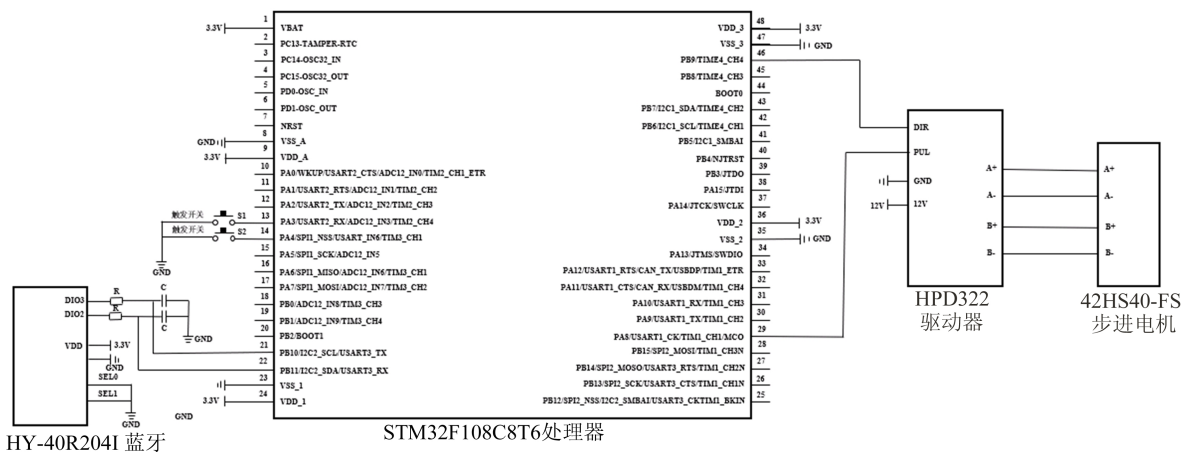


图 7 硬件电路主模块电路图

3.2 软件电路设计

步进电机控制流程主要是接收到蓝牙发出的开始命令后开始运动,由单片机提供步进电机运动脉冲及方向控制信号;待探杆两侧的开关触发后,信号传递给单片机,单片机发出反转信号,同时将前进的步数作为反转的步数,使步进电机回到初始位置。

步进电机控制流程如图 8 所示。

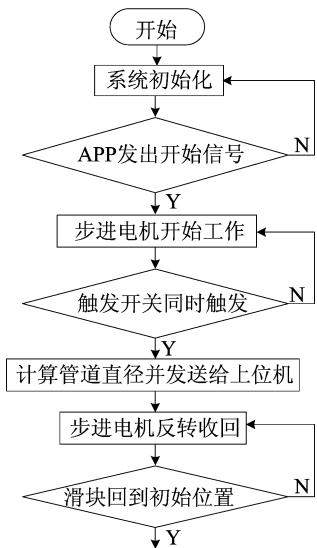


图 8 步进电机控制流程

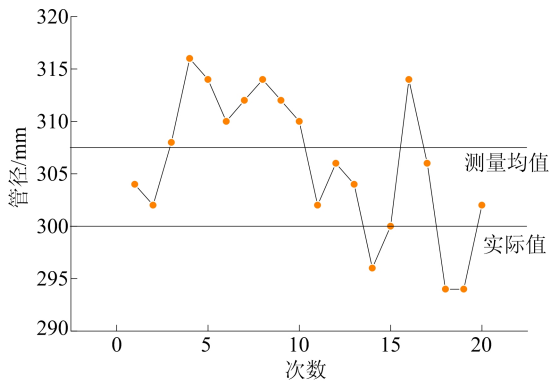
4 实验结果

将设计的测量装置对实际的管道进行测量,并将数据传递给上位机,其工作环境及测量结果如图 9 所示。

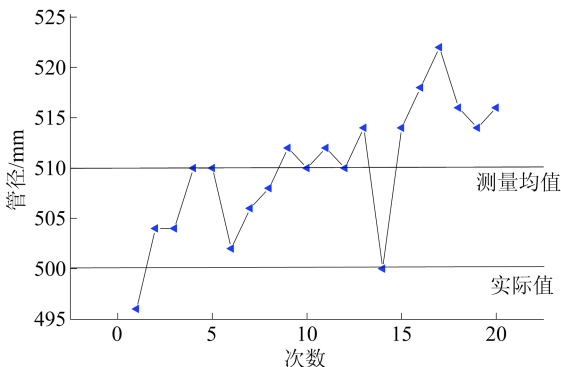


图 9 工作环境及测量结果

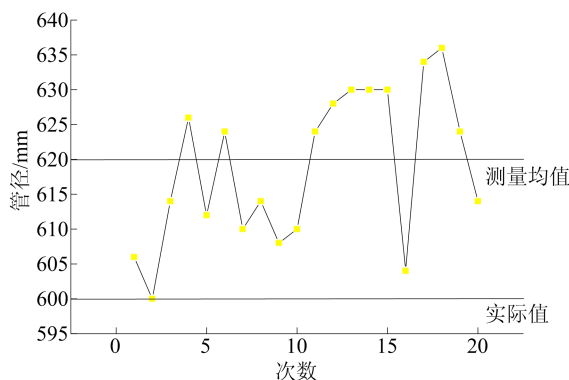
多次测量结果的散点图如图 10 所示。从图 10 可以发现,测量结果基本在实际值附近,且大部分比实际值偏大,这可能是由于实际测量过程中测量带来的误差或者系统的机械误差所造成的。



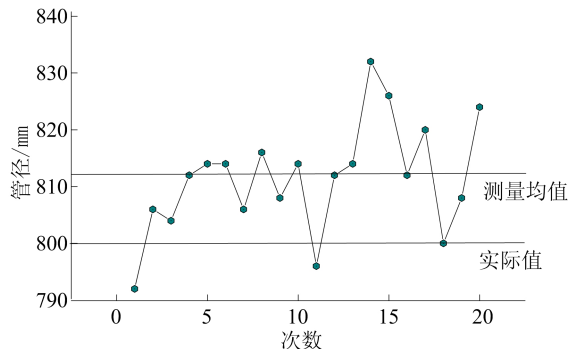
(a) 300 mm



(b) 500 mm



(c) 600 mm



(d) 800 mm

图 10 测量结果分布图

5 结论

本文设计了一种步进电机驱动的管道直径测量系统。步进电机以单片机和驱动器为基础,通

过开环控制对步进电机的步数进行控制,根据提前设置的细分倍数和单片机提供给驱动器的脉冲个数,可知步进电机旋转的圈数,再由圈数和对应螺杆的每圈推进距离将角位移转换为线位移,从而得出滑块推动的距离,通过几何运算可以求得探杆张开的长度。由于上端到螺杆的距离是固定的,因此可以利用三点求圆的直径原理,利用几何关系求出圆的直径。实验结果表明:300 mm的管径误差基本控制在2.0%之内;500 mm的管径误差在2.1%之内;600 mm的管径误差基本在3.3%之内;800 mm的管径误差基本在1.6%之内。该测量系统能够较准确地测出管道的直径,基本满足设计要求。

[参 考 文 献]

- [1] 陈茂添,王文华,吴伟娜. 步进电机智能控制系统的设计与实现[J]. 机电工程技术, 2020, 49(8): 112-114.
- [2] 赵鹏,李帅波,钱美,等. 步进电机控制系统设计与实现[J]. 自动化仪表, 2022, 43(11): 87-90, 94.
- [3] 陈祖霖,沈英,吴靖. 结合STM32和FPGA的步进电机运动控制系统设计[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 27-33.
- [4] 郑洁,张朝晖,李栋,等. 高精度步距角细分自动测试影响因素分析及其测试[J]. 微电机, 2022, 55(12): 85-88.
- [5] XIN B, YUN B Z, JI F W, et al. Stepper motor driver based on FPGA with USB interface[C]//Proceedings of the Fifth International Symposium on Test Automation & Instrumentation II. [S. l.]: World Publishing Corporation, 2014: 6.
- [6] 郑文强,宋单阳,王培恩,等. 基于蓝牙通信的液压支架电液控制器无线遥控系统开发[J]. 煤炭技术, 2023, 42(4): 194-198.
- [7] 鲁文杰. 基于软件细分的两相步进电机驱动器设计[J]. 桂林航天工业学院学报, 2022, 27(3): 349-353.
- [8] 谢长君,杜康,刘力. 两相步进电机细分驱动器研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2013, 35(6): 851-855.
- [9] 伍艳雄,黄勇,高林,等. 步进电机细分驱动控制系统设计与实现[J]. 湖北民族学院学报(自然科学版), 2019, 37(4): 458-462.
- [10] 金博丕,王宏,李坦,等. 智能调节续流模式的步进电机细分控制[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2022, 43(3): 390-396, 403.
- [11] 陈祖霖,沈英,吴靖. 结合STM32和FPGA的步进电机运动控制系统设计[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 27-33.
- [12] 郑洁,张朝晖,李栋,等. 高精度步距角细分自动测试影响因素分析及其测试[J]. 微电机, 2022, 55(12): 85-88.
- [13] XIN B, YUN B Z, JI F W, et al. Stepper motor driver based on FPGA with USB interface[C]//Proceedings of the Fifth International Symposium on Test Automation & Instrumentation II. [S. l.]: World Publishing Corporation, 2014: 6.
- [14] 郑文强,宋单阳,王培恩,等. 基于蓝牙通信的液压支架电液控制器无线遥控系统开发[J]. 煤炭技术, 2023, 42(4): 194-198.
- [15] 鲁文杰. 基于软件细分的两相步进电机驱动器设计[J]. 桂林航天工业学院学报, 2022, 27(3): 349-353.
- [16] 谢长君,杜康,刘力. 两相步进电机细分驱动器研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2013, 35(6): 851-855.
- [17] 伍艳雄,黄勇,高林,等. 步进电机细分驱动控制系统设计与实现[J]. 湖北民族学院学报(自然科学版), 2019, 37(4): 458-462.
- [18] 金博丕,王宏,李坦,等. 智能调节续流模式的步进电机细分控制[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2022, 43(3): 390-396, 403.
- [19] 陈祖霖,沈英,吴靖. 结合STM32和FPGA的步进电机运动控制系统设计[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 27-33.
- [20] 郑洁,张朝晖,李栋,等. 高精度步距角细分自动测试影响因素分析及其测试[J]. 微电机, 2022, 55(12): 85-88.
- [21] XIN B, YUN B Z, JI F W, et al. Stepper motor driver based on FPGA with USB interface[C]//Proceedings of the Fifth International Symposium on Test Automation & Instrumentation II. [S. l.]: World Publishing Corporation, 2014: 6.
- [22] 郑文强,宋单阳,王培恩,等. 基于蓝牙通信的液压支架电液控制器无线遥控系统开发[J]. 煤炭技术, 2023, 42(4): 194-198.
- [23] 鲁文杰. 基于软件细分的两相步进电机驱动器设计[J]. 桂林航天工业学院学报, 2022, 27(3): 349-353.
- [24] 谢长君,杜康,刘力. 两相步进电机细分驱动器研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2013, 35(6): 851-855.
- [25] 伍艳雄,黄勇,高林,等. 步进电机细分驱动控制系统设计与实现[J]. 湖北民族学院学报(自然科学版), 2019, 37(4): 458-462.
- [26] 金博丕,王宏,李坦,等. 智能调节续流模式的步进电机细分控制[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2022, 43(3): 390-396, 403.
- [27] 陈祖霖,沈英,吴靖. 结合STM32和FPGA的步进电机运动控制系统设计[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 27-33.
- [28] 郑洁,张朝晖,李栋,等. 高精度步距角细分自动测试影响因素分析及其测试[J]. 微电机, 2022, 55(12): 85-88.
- [29] XIN B, YUN B Z, JI F W, et al. Stepper motor driver based on FPGA with USB interface[C]//Proceedings of the Fifth International Symposium on Test Automation & Instrumentation II. [S. l.]: World Publishing Corporation, 2014: 6.
- [30] 郑文强,宋单阳,王培恩,等. 基于蓝牙通信的液压支架电液控制器无线遥控系统开发[J]. 煤炭技术, 2023, 42(4): 194-198.
- [31] 鲁文杰. 基于软件细分的两相步进电机驱动器设计[J]. 桂林航天工业学院学报, 2022, 27(3): 349-353.
- [32] 谢长君,杜康,刘力. 两相步进电机细分驱动器研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2013, 35(6): 851-855.
- [33] 伍艳雄,黄勇,高林,等. 步进电机细分驱动控制系统设计与实现[J]. 湖北民族学院学报(自然科学版), 2019, 37(4): 458-462.
- [34] 金博丕,王宏,李坦,等. 智能调节续流模式的步进电机细分控制[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2022, 43(3): 390-396, 403.
- [35] 陈祖霖,沈英,吴靖. 结合STM32和FPGA的步进电机运动控制系统设计[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 27-33.
- [36] 郑洁,张朝晖,李栋,等. 高精度步距角细分自动测试影响因素分析及其测试[J]. 微电机, 2022, 55(12): 85-88.
- [37] XIN B, YUN B Z, JI F W, et al. Stepper motor driver based on FPGA with USB interface[C]//Proceedings of the Fifth International Symposium on Test Automation & Instrumentation II. [S. l.]: World Publishing Corporation, 2014: 6.
- [38] 郑文强,宋单阳,王培恩,等. 基于蓝牙通信的液压支架电液控制器无线遥控系统开发[J]. 煤炭技术, 2023, 42(4): 194-198.
- [39] 鲁文杰. 基于软件细分的两相步进电机驱动器设计[J]. 桂林航天工业学院学报, 2022, 27(3): 349-353.
- [40] 谢长君,杜康,刘力. 两相步进电机细分驱动器研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2013, 35(6): 851-855.
- [41] 伍艳雄,黄勇,高林,等. 步进电机细分驱动控制系统设计与实现[J]. 湖北民族学院学报(自然科学版), 2019, 37(4): 458-462.
- [42] 金博丕,王宏,李坦,等. 智能调节续流模式的步进电机细分控制[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2022, 43(3): 390-396, 403.
- [43] 陈祖霖,沈英,吴靖. 结合STM32和FPGA的步进电机运动控制系统设计[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 27-33.
- [44] 郑洁,张朝晖,李栋,等. 高精度步距角细分自动测试影响因素分析及其测试[J]. 微电机, 2022, 55(12): 85-88.
- [45] XIN B, YUN B Z, JI F W, et al. Stepper motor driver based on FPGA with USB interface[C]//Proceedings of the Fifth International Symposium on Test Automation & Instrumentation II. [S. l.]: World Publishing Corporation, 2014: 6.
- [46] 郑文强,宋单阳,王培恩,等. 基于蓝牙通信的液压支架电液控制器无线遥控系统开发[J]. 煤炭技术, 2023, 42(4): 194-198.
- [47] 鲁文杰. 基于软件细分的两相步进电机驱动器设计[J]. 桂林航天工业学院学报, 2022, 27(3): 349-353.
- [48] 谢长君,杜康,刘力. 两相步进电机细分驱动器研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2013, 35(6): 851-855.
- [49] 伍艳雄,黄勇,高林,等. 步进电机细分驱动控制系统设计与实现[J]. 湖北民族学院学报(自然科学版), 2019, 37(4): 458-462.
- [50] 金博丕,王宏,李坦,等. 智能调节续流模式的步进电机细分控制[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2022, 43(3): 390-396, 403.
- [51] 陈祖霖,沈英,吴靖. 结合STM32和FPGA的步进电机运动控制系统设计[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 27-33.
- [52] 郑洁,张朝晖,李栋,等. 高精度步距角细分自动测试影响因素分析及其测试[J]. 微电机, 2022, 55(12): 85-88.
- [53] XIN B, YUN B Z, JI F W, et al. Stepper motor driver based on FPGA with USB interface[C]//Proceedings of the Fifth International Symposium on Test Automation & Instrumentation II. [S. l.]: World Publishing Corporation, 2014: 6.
- [54] 郑文强,宋单阳,王培恩,等. 基于蓝牙通信的液压支架电液控制器无线遥控系统开发[J]. 煤炭技术, 2023, 42(4): 194-198.
- [55] 鲁文杰. 基于软件细分的两相步进电机驱动器设计[J]. 桂林航天工业学院学报, 2022, 27(3): 349-353.
- [56] 谢长君,杜康,刘力. 两相步进电机细分驱动器研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2013, 35(6): 851-855.
- [57] 伍艳雄,黄勇,高林,等. 步进电机细分驱动控制系统设计与实现[J]. 湖北民族学院学报(自然科学版), 2019, 37(4): 458-462.
- [58] 金博丕,王宏,李坦,等. 智能调节续流模式的步进电机细分控制[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2022, 43(3): 390-396, 403.
- [59] 陈祖霖,沈英,吴靖. 结合STM32和FPGA的步进电机运动控制系统设计[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 27-33.
- [60] 郑洁,张朝晖,李栋,等. 高精度步距角细分自动测试影响因素分析及其测试[J]. 微电机, 2022, 55(12): 85-88.
- [61] XIN B, YUN B Z, JI F W, et al. Stepper motor driver based on FPGA with USB interface[C]//Proceedings of the Fifth International Symposium on Test Automation & Instrumentation II. [S. l.]: World Publishing Corporation, 2014: 6.
- [62] 郑文强,宋单阳,王培恩,等. 基于蓝牙通信的液压支架电液控制器无线遥控系统开发[J]. 煤炭技术, 2023, 42(4): 194-198.
- [63] 鲁文杰. 基于软件细分的两相步进电机驱动器设计[J]. 桂林航天工业学院学报, 2022, 27(3): 349-353.
- [64] 谢长君,杜康,刘力. 两相步进电机细分驱动器研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2013, 35(6): 851-855.
- [65] 伍艳雄,黄勇,高林,等. 步进电机细分驱动控制系统设计与实现[J]. 湖北民族学院学报(自然科学版), 2019, 37(4): 458-462.
- [66] 金博丕,王宏,李坦,等. 智能调节续流模式的步进电机细分控制[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2022, 43(3): 390-396, 403.
- [67] 陈祖霖,沈英,吴靖. 结合STM32和FPGA的步进电机运动控制系统设计[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 27-33.
- [68] 郑洁,张朝晖,李栋,等. 高精度步距角细分自动测试影响因素分析及其测试[J]. 微电机, 2022, 55(12): 85-88.
- [69] XIN B, YUN B Z, JI F W, et al. Stepper motor driver based on FPGA with USB interface[C]//Proceedings of the Fifth International Symposium on Test Automation & Instrumentation II. [S. l.]: World Publishing Corporation, 2014: 6.
- [70] 郑文强,宋单阳,王培恩,等. 基于蓝牙通信的液压支架电液控制器无线遥控系统开发[J]. 煤炭技术, 2023, 42(4): 194-198.
- [71] 鲁文杰. 基于软件细分的两相步进电机驱动器设计[J]. 桂林航天工业学院学报, 2022, 27(3): 349-353.
- [72] 谢长君,杜康,刘力. 两相步进电机细分驱动器研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2013, 35(6): 851-855.
- [73] 伍艳雄,黄勇,高林,等. 步进电机细分驱动控制系统设计与实现[J]. 湖北民族学院学报(自然科学版), 2019, 37(4): 458-462.
- [74] 金博丕,王宏,李坦,等. 智能调节续流模式的步进电机细分控制[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2022, 43(3): 390-396, 403.
- [75] 陈祖霖,沈英,吴靖. 结合STM32和FPGA的步进电机运动控制系统设计[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 27-33.
- [76] 郑洁,张朝晖,李栋,等. 高精度步距角细分自动测试影响因素分析及其测试[J]. 微电机, 2022, 55(12): 85-88.
- [77] XIN B, YUN B Z, JI F W, et al. Stepper motor driver based on FPGA with USB interface[C]//Proceedings of the Fifth International Symposium on Test Automation & Instrumentation II. [S. l.]: World Publishing Corporation, 2014: 6.
- [78] 郑文强,宋单阳,王培恩,等. 基于蓝牙通信的液压支架电液控制器无线遥控系统开发[J]. 煤炭技术, 2023, 42(4): 194-198.
- [79] 鲁文杰. 基于软件细分的两相步进电机驱动器设计[J]. 桂林航天工业学院学报, 2022, 27(3): 349-353.
- [80] 谢长君,杜康,刘力. 两相步进电机细分驱动器研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2013, 35(6): 851-855.
- [81] 伍艳雄,黄勇,高林,等. 步进电机细分驱动控制系统设计与实现[J]. 湖北民族学院学报(自然科学版), 2019, 37(4): 458-462.
- [82] 金博丕,王宏,李坦,等. 智能调节续流模式的步进电机细分控制[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2022, 43(3): 390-396, 403.
- [83] 陈祖霖,沈英,吴靖. 结合STM32和FPGA的步进电机运动控制系统设计[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 27-33.
- [84] 郑洁,张朝晖,李栋,等. 高精度步距角细分自动测试影响因素分析及其测试[J]. 微电机, 2022, 55(12): 85-88.
- [85] XIN B, YUN B Z, JI F W, et al. Stepper motor driver based on FPGA with USB interface[C]//Proceedings of the Fifth International Symposium on Test Automation & Instrumentation II. [S. l.]: World Publishing Corporation, 2014: 6.
- [86] 郑文强,宋单阳,王培恩,等. 基于蓝牙通信的液压支架电液控制器无线遥控系统开发[J]. 煤炭技术, 2023, 42(4): 194-198.
- [87] 鲁文杰. 基于软件细分的两相步进电机驱动器设计[J]. 桂林航天工业学院学报, 2022, 27(3): 349-353.
- [88] 谢长君,杜康,刘力. 两相步进电机细分驱动器研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2013, 35(6): 851-855.
- [89] 伍艳雄,黄勇,高林,等. 步进电机细分驱动控制系统设计与实现[J]. 湖北民族学院学报(自然科学版), 2019, 37(4): 458-462.
- [90] 金博丕,王宏,李坦,等. 智能调节续流模式的步进电机细分控制[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2022, 43(3): 390-396, 403.
- [91] 陈祖霖,沈英,吴靖. 结合STM32和FPGA的步进电机运动控制系统设计[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 27-33.
- [92] 郑洁,张朝晖,李栋,等. 高精度步距角细分自动测试影响因素分析及其测试[J]. 微电机, 2022, 55(12): 85-88.
- [93] XIN B, YUN B Z, JI F W, et al. Stepper motor driver based on FPGA with USB interface[C]//Proceedings of the Fifth International Symposium on Test Automation & Instrumentation II. [S. l.]: World Publishing Corporation, 2014: 6.
- [94] 郑文强,宋单阳,王培恩,等. 基于蓝牙通信的液压支架电液控制器无线遥控系统开发[J]. 煤炭技术, 2023, 42(4): 194-198.
- [95] 鲁文杰. 基于软件细分的两相步进电机驱动器设计[J]. 桂林航天工业学院学报, 2022, 27(3): 349-353.
- [96] 谢长君,杜康,刘力. 两相步进电机细分驱动器研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2013, 35(6): 851-855.
- [97] 伍艳雄,黄勇,高林,等. 步进电机细分驱动控制系统设计与实现[J]. 湖北民族学院学报(自然科学版), 2019, 37(4): 458-462.
- [98] 金博丕,王宏,李坦,等. 智能调节续流模式的步进电机细分控制[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2022, 43(3): 390-396, 403.
- [99] 陈祖霖,沈英,吴靖. 结合STM32和FPGA的步进电机运动控制系统设计[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 27-33.
- [100] 郑洁,张朝晖,李栋,等. 高精度步距角细分自动测试影响因素分析及其测试[J]. 微电机, 2022, 55(12): 85-88.

(责任编辑 胡亚敏)

(责任编辑 吴亮)

(上接第726页)

- [25] FU B, JIN X, CONRAD R, et al. Competition between chemolithotrophic acetogenesis and hydrogenotrophic methanogenesis for exogenous H₂/CO₂ in anaerobically digested sludge: impact of temperature[J]. Front Microbiol, 2019, 10: 2418.
- [26] PAN X, ZHAO L, LI C, et al. Deep insights into the network of acetate metabolism in anaerobic digestion: focusing on syntrophic acetate oxidation and homoacetogenesis[J]. Water Research, 2021, 190: 116774.
- [27] ZHU L, WU B, LIU Y, et al. Strategy to enhance semi-continuous anaerobic digestion of food waste by combined use of calcium peroxide and magnetite[J]. Water Research, 2022, 221: 118801.
- [28] FAN Y, YIN M, CHEN H. Insights into the role of chitosan in hydrogen production by dark fermentation of waste activated sludge[J]. Science of the Total Environment, 2023, 859: 160401.
- [29] FAHRBACH M, KUEVER J, MEINKE R, et al. *Denitratissima oestradiolicum* gen. nov., sp. nov., a 17 β -oestradiol-degrading, denitrifying betaproteobacterium[J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2006, 56(7): 1547-1552.
- [30] XING W, WANG Y, HAO T, et al. pH control and microbial community analysis with HCl or CO₂ addition in H₂-based autotrophic denitrification[J]. Water Research, 2020, 168: 115200.
- [31] ZHANG Z, LU X, NIU C, et al. Clarifying catalytic behaviors and electron transfer routes of electroactive biofilm during bioelectroconversion of CO₂ to CH₄[J]. Fuel, 2022, 310: 122450.
- [32] KUCUKAGA Y, FACCHIN A, STEFANELLI V, et al. Innovative char-sparger for improving volatile fatty acids (VFA) production in homoacetogenic fermentation of H₂/CO₂ with microbial mixed cultures (MMC)[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 471: 144165.
- [33] TARRARAN L, AGOSTINO V, VASILE N S, et al. High-pressure fermentation of CO₂ and H₂ by a modified *Acetobacterium woodii*[J]. Journal of CO₂ Utilization, 2023, 76: 102583.
- [34] BIAN Y, LEININGER A, MAY H D, et al. H₂ mediated mixed culture microbial electrosynthesis for high titer acetate production from CO₂[J]. Environmental Science and Ecotechnology, 2024, 19: 100324.