



# 基于 EtherCAT 的六自由度自平衡平台设计

## 摘要

为解决传统自平衡平台响应速度慢、控制精度低的问题,本文提出了基于 EtherCAT 总线的六自由度自平衡平台设计方法,由 6 台支持 EtherCAT 通信的伺服驱动器带动 6 条电动缸做伸缩运动,平台的倾角数据由陀螺仪读取并通过 EtherCAT 传输到主站,并利用自抗扰控制算法对平台进行精确控制.实验结果表明,所设计平台具有低延时和较高的抗干扰能力等优点.

## 关键词

EtherCAT 通信; Stewart 平台; 自抗扰控制

中图分类号 TP273; TP242

文献标志码 A

收稿日期 2019-11-21

资助项目 国家自然科学基金(51675259); 江苏省研究生创新基金(SJCX18\_0581)

## 作者简介

贺顺,男,硕士生,研究领域为机器人控制技术.1162883527@qq.com

温秀兰(通信作者),女,博士,教授,主要研究方向为精密计量理论与方法、机器人控制标定技术、智能计算及其应用等.zdhwxl@njit.edu.cn

## 0 引言

自平衡平台在海运、灾区救援等领域广泛应用,其响应速度快慢及控制精度高低将直接影响财产和生命安全,因此多年来已有众多学者开展了相关研究.其中六自由度自平衡平台因具有自由度多、刚度高、精度高、承载能力强以及可模块化生产等优点被广泛使用.在六个自由度运动中,对船舶的行驶过程干扰最严重的是垂荡、横摇以及纵摇三种情况,其中又以横纵两个方向的影响最为严重<sup>[1]</sup>.

文献[2]从平台的构思设计到理论分析、从机械建模到动力学分析、从控制系统回路仿真到最终控制算法的软件编程实现与验证,形成了一套完整的开发设计方案,但在控制系统仿真与后期设计实现过程中,未能进行位姿大闭环,整个系统仍是以开环控制为主,因而最终姿态误差较大.文献[3]分析了 PID 控制对系统的跟踪特性、响应性能等动态性能参数的影响.文献[4]为各单个通道分别设计了模糊 PID 控制器,其优点就是能够根据误差和误差的变化率实时地调节比例系数  $k_p$ 、积分系数  $k_i$  和微分系数  $k_d$  三个参数,使稳定平台的稳定精度得到进一步提高.现有的自平衡平台大多是基于脉冲控制或 CAN 总线实现通信,控制算法采用 PID 实现,存在响应速度慢、控制精度低等问题,难以满足目前对海运质量提出高要求的需要. EtherCAT 以其数据传送能力强、技术成熟度高、开发成本低等优点,受到工业控制现场总线领域的广泛关注,已成为全球公认的标准,应用日趋广泛<sup>[5-6]</sup>.

本文在搭建 Stewart 结构的六自由度自平衡平台基础上,采用 EtherCAT 总线将上平台安装的陀螺仪数据实时读入 TwinCAT 主站,采用自抗扰控制策略平台进行精确控制,并对实验平台进行实验验证,实验结果证明了 Stewart 平台控制的有效性.

## 1 系统总体方案设计

考虑到 EtherCAT 具备灵活的网络拓扑结构,系统配置简单,实施的成本低廉等特点,搭建的自平衡平台总体结构如图 1 所示.以倍福主站作为核心单元,运行 TwinCAT3.1 软件,作为实时工业以太网, EtherCAT 充分利用以太网全双工特性,采用主从站通信方式,主站通过 EtherCAT 网络连接 6 台伺服驱动器从站和 1 个陀螺仪传感器从站.驱动器通过带动电缸实现直线伸缩运动,进而改变平台的位姿,陀

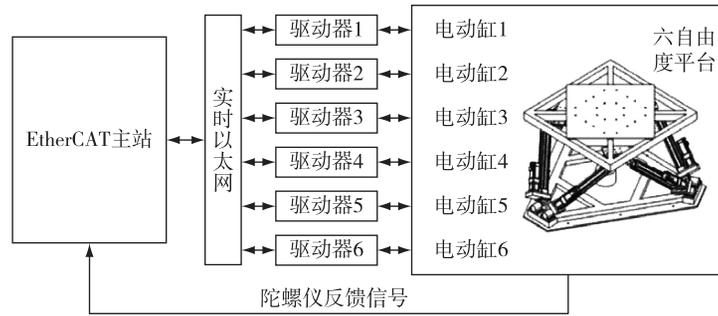


图1 自平衡平台总体结构

Fig. 1 Overall structure of the self-balancing platform

螺仪将采集到的姿态数据实时反馈给主站。

## 2 EtherCAT 通信设计

### 2.1 陀螺仪从站设计

姿态闭环控制需要得到实时的反馈数据,所以需要设计一套支持 EtherCAT 协议的陀螺仪从站.陀螺仪从站由带串行接口的 9 轴传感器模块和 LAN9252 从站模块组成.陀螺仪采用广州阿路比电子科技有限公司生产的 LPMS-UTTL2 9 轴陀螺仪,该陀螺仪通过采集 9 轴传感器数据并对其进行融合滤波,TTL 串口输出所需的欧拉角,串口波特率为 921.6 kbit/s,数据采样率 400 Hz.陀螺仪将处理好的数据输出给 STM32.

STM32 和陀螺仪模块之间采用串口 DMA 通信,通信协议采用 LPBUS 协议.LPBUS 协议是基于工业标准的 Modbus 协议所设计的通信协议.这是 LPMS 设备默认的通信方式.LPMS 设备具有数据流模式(Streaming Mode)和命令模式(Command Mode)两种.LPMS 姿态传感器上电后,等初始化设备内部初始化完成后,就会直接进入数据流模式且默认频率为 100 Hz.陀螺仪参数设置流程如图 2 所示.

由于陀螺仪只传输串口数据,所以本文利用

LAN9252 实现 EtherCAT 三层协议中的物理层和部分数据链路层,利用 STM32 实现 EtherCAT 的应用层协议和陀螺仪数据的读写,两者之间基于 STM32 的 FSMC 外设与 LAN9252 的 HBI 接口进行通信,采用 16 位变址寻址方式,实现串口转 EtherCAT 从站控制器电路.

LAN9252 集成高性能 100 Mbit/s 以太网收发器,作为 EtherCAT 从控制器,它支持 3 个 FMMU,支持 4 个 SyncManager,支持 64 位分布式时钟,有 4KBDPRAM.它有 8/16 位主机总线接口,支持变址寄存器或复用总线,支持 SPI/QSPI,其数字 I/O 模式可以优化系统成本,第 3 个端口可实现灵活的网络配置<sup>[7]</sup>.STM32F407VET6 是意法半导体公司基于 ARM CortexM4 内核的 32 位微控制器,有着 1 MB 片内 Flash 和 192 kB 片内 RAM,并包含 UART、ADC 和 FSMC 等多种外设.

EtherCAT 从站板应用层采用 CANopen over EtherCAT 协议,不需要支持 DC 同步,可以将信号统一交给 TwinCAT 主站,由主站对 EtherCAT 报文进行分析与后续操作<sup>[8]</sup>.EtherCAT 从站的硬件连接如图 3 所示,其实物如图 4 所示.

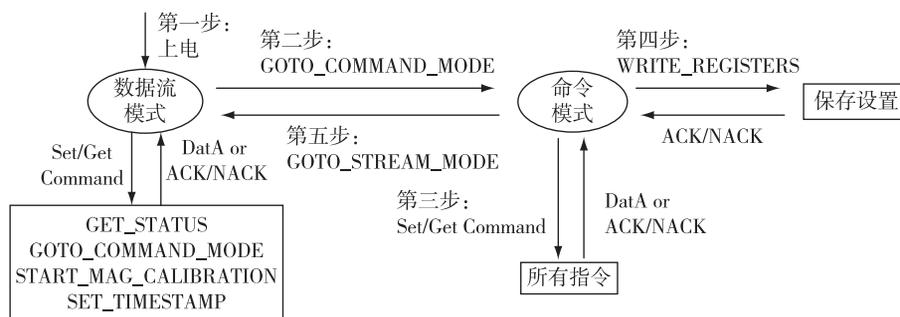


图2 陀螺仪参数设置流程

Fig. 2 Gyroscope parameter setting process

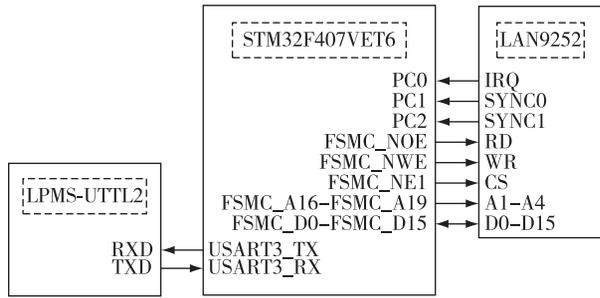


图 3 EtherCAT 从站硬件连接示意图

Fig. 3 Schematic of EtherCAT slave station hardware connection

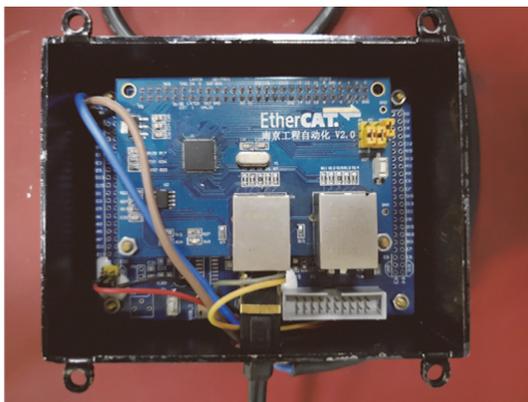


图 4 EtherCAT 从站实物图

Fig. 4 EtherCAT slave station picture

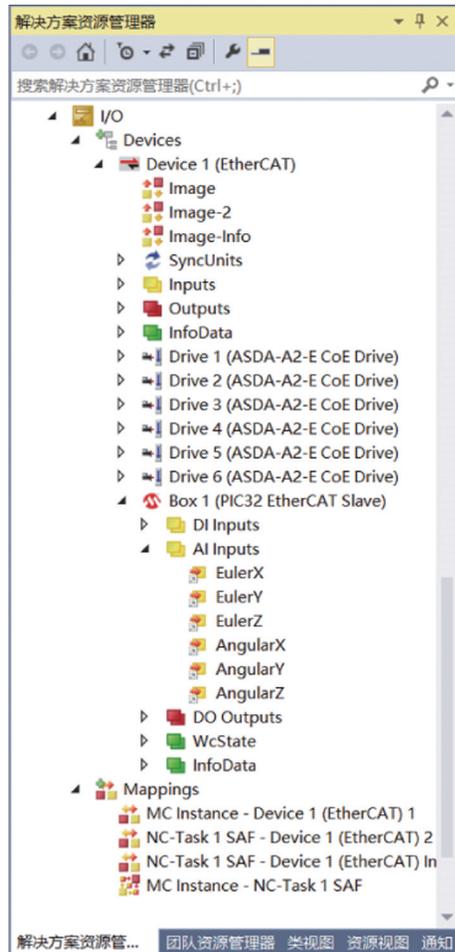


图 5 TwinCAT I/O 变量

Fig. 5 TwinCAT I/O variables

### 2.2 TwinCAT 主站程序设计

TwinCAT 主站作为整个系统的控制核心,负责接收反馈并发送控制信号.首先,TwinCAT 扫描台达伺服从站,新建 NC 轴,修改电机轴的速度、加速度和编码器参数,修改 DC 同步周期为 2 ms.利用 NC 轴可以对生成轮廓时具有加速度限制以及对速度和加速度的预控制,将跟随误差降到最小<sup>[9]</sup>.激活主站后即可点动测试伺服,伺服测试完毕后新建 PLC 工程,将 Stewart 平台运动学算法使用 ST 结构化语言写入程序块,使用外部位置给定函数即可对平台位姿进行精确控制.TwinCAT 扫描的 I/O 如图 5 所示.

### 3 运动学分析

对 Stewart 平台做自平衡控制,其运动学逆解也是其关键一步,图 6 是其结构简图.

如图 6 所示,在下平台建立静止坐标系  $O-XYZ$ ,其中  $X$  轴平行于铰点  $A_4, A_5$  所在直线.在上平台建立动坐标系  $o-xyz$ ,上平台的运动可分解为  $X, Y, Z$  方向的平移,以及绕其坐标轴  $X, Y, Z$  的旋转.下平台各铰点  $A_i$  的坐标为  $(X_{A_i}, Y_{A_i}, Z_{A_i})$ ,上平台各铰点  $a_i$  的动

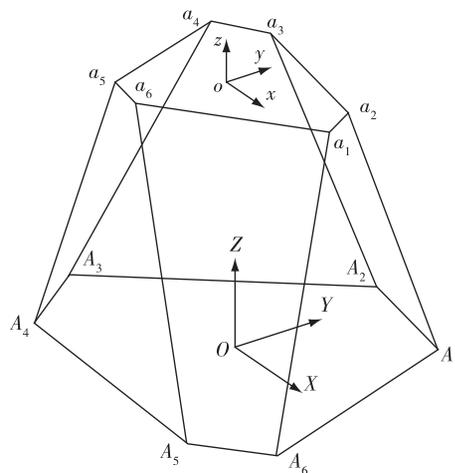


图 6 Stewart 结构简图

Fig. 6 Stewart structural diagram

坐标为  $(x_{a_i}, y_{a_i}, z_{a_i})$ ,静坐标为  $(X_{a_i}, Y_{a_i}, Z_{a_i})$ ,与其对应相连的电动缸长度为  $l_i (i = 1, \dots, 6)$ .

动坐标系相对于静坐标系的位置用矢量  $\mathbf{P}$

描述:

$$P = [x \quad y \quad z]^T. \quad (1)$$

设下平台定坐标系为  $\{A\}$ , 上平台动坐标系为  $\{a\}$ , 经过推算后动平台的各点坐标相对于静平台的各点坐标的方向转换矩阵表示如下

$$R = R_\alpha \cdot R_\beta \cdot R_\gamma = \begin{bmatrix} c\alpha & -s\alpha & 0 \\ s\alpha & c\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\beta & 0 & s\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\beta & 0 & c\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\gamma & -s\gamma \\ 0 & s\gamma & c\gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\alpha \cdot c\beta & c\alpha \cdot s\beta - s\alpha \cdot c\gamma & c\alpha \cdot s\beta \cdot c\gamma + s\alpha \cdot s\gamma \\ s\alpha \cdot c\beta & s\alpha \cdot s\beta \cdot s\gamma + c\alpha \cdot c\gamma & s\alpha \cdot s\beta \cdot c\gamma - c\alpha \cdot s\gamma \\ -s\beta & c\beta \cdot s\gamma & c\beta \cdot c\gamma \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中  $s$  和  $c$  分别表示  $\sin$  和  $\cos$ ,  $x, y$  和  $z$  分别对应动平台沿  $X$  轴、 $Y$  轴和  $Z$  轴方向的位移,  $\alpha, \beta$  和  $\gamma$  分别对应动平台绕  $X$  轴、 $Y$  轴和  $Z$  轴旋转的角度.

根据空间矢量关系, 电动缸的长度可表示为

$$l_i = \sqrt{(P + Ra_i - A_i)(P + Ra_i - A_i)^T}. \quad (3)$$

#### 4 控制算法设计

控制算法直接影响 Stewart 平台在自平衡闭环控制中的静态精度和动态跟踪的性能. PID 技术通过不断调整 PID 参数, 能够取得良好的控制效果, 但其仍存在易导致大的超调量和易受到干扰等问题<sup>[10]</sup>. 本文采用自抗扰控制器对平台进行位置控制. 自抗扰控制器(ADRC)由跟踪微分器、扩张状态观测器、非线性组合器三部分组成, 其控制系统框图如图 7 所示.

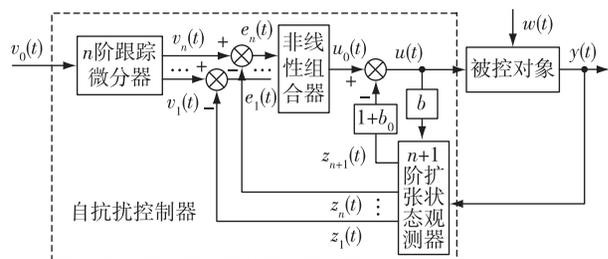


图 7 ADRC 控制系统框图

Fig. 7 Block diagram of ADRC control system

控制算法如下:

跟踪微分器:

$$\begin{aligned} v_1(k+1) &= v_1(k) + hv_2(k), \\ v_2(k+1) &= v_2(k) + h \{ -r_1^2 [v_1(k) - v(k)] - 2r_1 v_2(k) \}. \end{aligned} \quad (4)$$

扩张状态观测器:

$$e(k) = z_1(k) - y(k),$$

$$z_1(k+1) = z_1(k) + h[z_2(k) - \beta_1 e(k)],$$

$$z_2(k+1) = z_2(k) + h[z_3(k) - \beta_2 e(k) + bu(k)],$$

$$z_3(k+1) = z_3(k) + h[-\beta_3 e(k)]. \quad (5)$$

误差反馈及前馈补偿:

$$e_1(k) = v_1(k) - z_1(k),$$

$$e_2(k) = v_2(k) - z_2(k),$$

$$u_0(k) = k_p e_1(k) + k_d e_2(k),$$

$$u(k) = u_0(k) - z_3(k)/b, \quad (6)$$

式中:  $v(k)$  为位置指令,  $y(k)$  为位置反馈,  $v_1(k)$ ,  $v_2(k)$  分别为位置指令的跟踪信号及其微分,  $b$  为补偿系数,  $h$  为步长,  $r_1$  为线性跟踪微分器的速度因子,  $z_1(k)$ ,  $z_2(k)$  分别为位姿反馈的跟踪信号及其微分,  $z_3(k)$  为扰动的估计值,  $k_p, k_d$  分别为 PID 控制中的比例系数以及微分常数.

#### 5 实验测试结果

控制系统由模拟海浪的三自由度平台和控制自平衡的 Stewart 平台构成, 伺服驱动器和 TwinCAT 工控机置于三自由度平台内部, 陀螺仪固定在上平台, 陀螺仪的  $X$  轴与上平台的  $X$  轴对齐, 平台整体实物如图 8 所示, 电气连接实物如图 9 所示.



图 8 平台整体实物图

Fig. 8 Platform picture



图9 电气实物图  
Fig. 9 Electrical picture

当三自由度平台摇摆幅度设定为  $3.2^\circ$ , 周期为  $4\text{ s}$  时, 绕  $\alpha$  轴和  $\beta$  轴的摇摆曲线如图 10 所示. 不同  $k_p, k_d$  情况下  $\alpha$  轴和  $\beta$  轴的控制曲线分别如图 11 和图 12 所示. 由实验结果可见, 当  $k_p = 4\ 000, k_d = 28$  时, 控制效果最好. ADRC 与传统 PID 波形对比分别如图 13 和图 14 所示. 由实验结果可见, ADRC 控制的波形对于位置跟踪性能较传统 PID 性能好, 尤其是  $\alpha$  角控制曲线效果更好, 对负载扰动有更好的抑制作用.

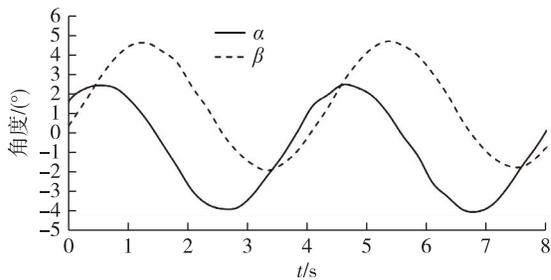


图10 摇摆台曲线  
Fig. 10 Swing table curve

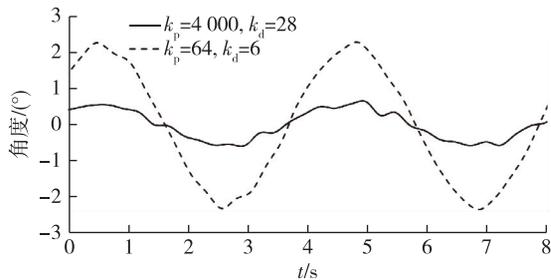


图11 不同  $k_p, k_d$  下  $\alpha$  角控制曲线  
Fig. 11  $\alpha$  control curves for different  $k_p, k_d$

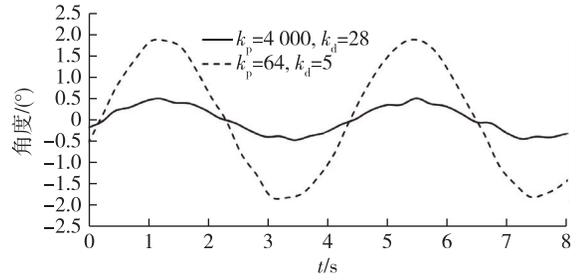


图12 不同  $k_p, k_d$  下  $\beta$  角控制曲线  
Fig. 12  $\beta$  control curves for different  $k_p, k_d$

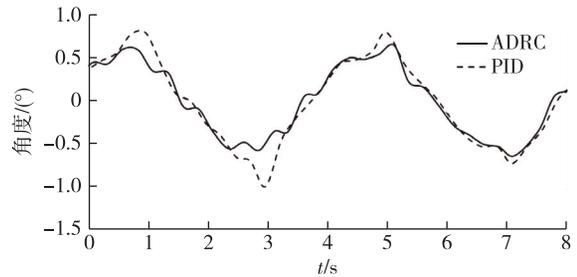


图13 ADRC 和 PID 对  $\alpha$  角控制曲线  
Fig. 13  $\alpha$  control curves by ADRC and PID

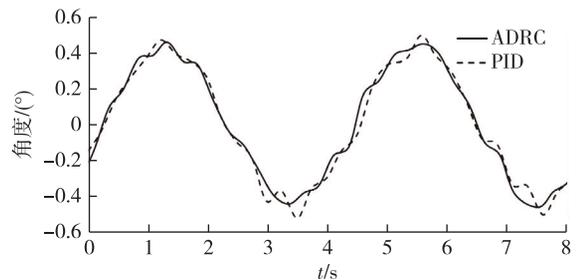


图14 ADRC 和 PID 对  $\beta$  角控制曲线  
Fig. 14  $\beta$  control curves by ADRC and PID

## 6 结语

本文将 Stewart 结构的并联机器人应用于自平衡平台, 分析了 Stewart 结构的运动学逆解, 设计了基于 LAN9252 的陀螺仪从站, 并基于 TwinCAT 主站编写了自抗扰控制算法, 对航运影响最大的横摇和纵摇方向进行自平衡控制, 最后对控制性能进行了分析. 实验结果表明搭建的基于 EtherCAT 的 Stewart 自平衡平台方法可行, 自抗扰控制的精度较高, 易于在海运、灾区救援等领域推广应用.

## 参考文献

### References

[ 1 ] 刘学功, 宋振海, 张宏凯. 船舶推进中两种动态平衡的

- 研究[J].舰船科学技术,2010,32(4):32-34,108  
LIU Xuegong, SONG Zhenhai, ZHANG Hongkai. Research on two kinds of dynamic balance in ship propulsion[J].Ship Science and Technology,2010,32(4):32-34,108
- [ 2 ] 高建峰.基于 Stewart 结构的六自由度并联稳定平台技术研究[D].济南:山东大学,2018  
GAO Jianfeng. Research on 6-DOF parallel stable platform technology based on Stewart structure [ D ]. Jinan: Shandong University, 2018
- [ 3 ] 隋毅.基于并联机构的海上稳定平台的机液联合仿真研究[D].青岛:中国海洋大学,2015  
SUI Yi. Research on machine-hydraulic joint simulation of offshore stable platform based on parallel mechanism [ D ]. Qingdao: Ocean University of China, 2015
- [ 4 ] 刘义德.基于并联机构的稳定平台建模与控制[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009  
LIU Yide. Modeling and control of stable platform based on parallel mechanisms [ D ]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009
- [ 5 ] 张颖,平雪良,王晨学,等.ROS 下基于 EtherCAT 的串联机器人控制系统[J].传感器与微系统,2018,37(3):106-109  
ZHANG Ying, PING Xueliang, WANG Chenxue, et al. EtherCAT-based serial robot control system under ROS [ J ]. Transducer and Microsystem Technologies, 2018, 37(3):106-109
- [ 6 ] 董海涛,朱国庆,黄丽宇.基于 LAN9252 的伺服驱动 EtherCAT 通信接口实现[J].组合机床与自动化加工技术,2019(4):95-98  
DONG Haitao, ZHU Guoqing, HUANG Liyu. Servo-driven EtherCAT communication interface implementation based on LAN9252 [ J ]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2019(4):95-98
- [ 7 ] Microchip Technology Inc. LAN9252 datasheet [ EB/OL ]. [ 2019-10-28 ]. <http://www.eeboard.com/wp-content/uploads/downloads/2017/12/LAN9252-Datasheet.pdf>
- [ 8 ] Kang C, Pang Y, Ma C, et al. Design of EtherCAT slave module [ C ] // IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2011: 1600-1604
- [ 9 ] 张伟岸,吴世林.基于 TwinCAT 的机器人虚拟控制系统设计[J].制造技术与机床,2019,683(5):63-66  
ZHANG Weian, WU Shilin. Design of TwinCAT-based robot virtual control system [ J ]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2019, 683(5):63-66
- [ 10 ] 王莉,郭伟.分数阶 PID 控制在网络控制系统中的应用[J].南京信息工程大学学报(自然科学版),2009,1(4):309-313  
WANG Li, GUO Wei. Application of fractional order PID control in networked control system [ J ]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology ( Natural Science Edition ), 2009, 1(4):309-313

## Six degree-of-freedom self-balancing platform design based on EtherCAT

HE Shun<sup>1</sup> WEN Xiulan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Automation, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167

**Abstract** In order to solve the problem of slow response and low control precision for the traditional self-balancing platform, a six degree-of-freedom self-balancing platform is designed based on EtherCAT bus. Six servo drivers that support EtherCAT communication drive six electric cylinders to stretch contraction. The inclination data of the platform is read by the gyroscope and transmitted to the main station through EtherCAT. And the platform is accurately controlled by using the active disturbance rejection control (ADRC) algorithm. Experimental results show that the designed platform has the advantages of low latency and high anti-interference ability.

**Key words** EtherCAT communication; Stewart platform; active disturbance rejection control (ADRC)