

# 基于 DSP 的 Stewart 平台控制系统研制

邓 哲, 尹 涛, 王家乐, 张 静, 侯京锋

(北京环境强度研究所, 北京 100076)

**摘要:** 六自由度 Stewart 平台具有多通道、实时性高、运算量大等特点, 为提高平台的控制精度, 对六自由度平台位姿参数正解法进行改进, 将平台定为动平面三点空间坐标, 并将二次方程转化为线性方程, 对产生的奇异解进行方程补偿, 降低了运算次数并提高了效率; 设计了基于 DSP 的控制系统; 系统由 DSP 控制板、直流电机、Stewart 平台和上位机软件构成; 上位机软件由 LabView 开发, 通过串口进行上下位机的通信; 介绍了平台控制系统的原理、硬件和软件的设计与实现; 实验表明, 该控制系统具有良好的稳定性和较高精度的定位控制能力。

**关键词:** 6 自由度平台; 数字信号处理; 直流电机; 脉冲宽度调制

## Control System of the Stewart Platform Based On DSP

Deng Zhe, Yin Tao, Wang Jiale, Zhang Jing, Hou Jingfeng

(Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076, China)

**Abstract:** The six-DOF Stewart platform has the characteristics of multichannel, high real-time performance and large computational complexity. In order to improve the control accuracy of the platform, the pose parameter calculation is improved. The platform is set as the three-point space coordinates, the quadratic equation is transformed into a linear equation, and the equation is compensated for the singular solution generated, which reduces the number of operations and improves the efficiency. Design a DSP-based control system. The system consists of DSP control board, DC motor, Stewart platform and PC software. PC software developed by the LabView, use the serial port to transmit data. This article elaborates the principle of Stewart platform, the design and implementation of the controller hardware and software. The experimental results demonstrate that the good stability and the high precision positioning control ability of the control system.

**Keywords:** stewart platform; DSP; DC motor; PWM

## 0 引言

六自由度 Stewart 平台是一种几何外形为八面体结构的六自由度并联系统, 平台具有负载能力强、响应速度快、灵活等优势, 可应用于飞机、轮船、汽车等可靠性测试实验中<sup>[1]</sup>。六自由度 Stewart 并联机构常采用气动、液压和电动三种驱动方式, 驱动方式的选择, 对平台的造价、体积、承载能力等方面具有较大的影响<sup>[2]</sup>。其中, 气动驱动方式具有实现简单, 质量较轻、成本较低的特点, 但由于空气的可压缩性, 使得平台难以实现高精度控制; 液压驱动方式具有较大的输出功率、具有较大的调速范围和响应速度快的特点, 可实现高精度定位控制, 但液压系统的油源较难获取, 价格昂贵, 液压系统的体积通常较大, 且实现具有较大的难度, 出故障较难排查, 维护成本高。电动驱动方式的电源获取比较简单、成本较低、实现较容易, 不仅如此, 电动六自由度运动平台体积较小, 运输和后期的维护成本都较低。在 Stewart 平台中, 已知驱动推杆的杆长, 求解运动平台相对于静平台的位置和姿态, 是并联机构的研究的热点和难点。在求解位置正解分析中, 主要采用的方法有解析法、数值分析法、冗余传感器法和智能算法等<sup>[2]</sup>。解析法注重得到全部正解, 计算量大、运算时间长, 求解过程比较复杂, 不适合实际应用; 冗余传感器法通过在铰接处增加传感器, 通过传感器测量旋转角方式求出动平台的位置<sup>[3]</sup>。智能算

法的求解过程较复杂、运算时间较长。在实际工作中, 平台对控制命令的响应速度, 对平台的控制精度和速度具有重要影响, 这就要求正解算法在可靠的同时, 简洁、运算速度快。本文将目标定为动平面三点的空间坐标, 共含 9 个变量, 并将二次方程转化为线性方程, 对于产生的奇异解作了方程补偿, 在保证计算准确性的同时, 减少了运算次数, 提高了效率。Stewart 平台控制系统采用直流电机作为平台的驱动装置, 支链采用的是电动推杆执行机构, 采用 DSP 作为控制系统实现对电动推杆的实时控制, 采用 3 个 LN298 双 H 桥路驱动模块来实现 6 路电动杆电机的正反转操作, 为方便对平台的运动位姿的控制, 在 PC 端通过 LabView 编写用户数据输入软件, 用户通过对平台空间坐标系数据的输入, 控制六自由度电动平台进行相应轨迹的运动。

## 1 Stewart 平台控制算法

六自由 Stewart 电动平台由以下 5 个部分组成: 上平台为动平台, 用于安装负载, 在电动推杆的驱动下完成位姿的运动; 下平台为静平台, 是六自由度平台的基座, 用于固定整个系统<sup>[4]</sup>。Stewart 电动平台采用电动推杆可伸缩支架, 通过驱动器对电动推杆的驱动, 驱动上平台做各种运动。

六自由度 Stewart 运动平台的核心算法为给定平台位姿后, 求电动推杆的目标长度, 并将这一长度作为指令通过控制器驱动电动推杆。对六自由度 Stewart 运动平台建立坐标系, 下平台为惯性坐标系  $O$ , 上平台为连体坐标系  $O'$ , 如图 1 所示。平台坐标系用  $(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$  表示, 动平台沿  $x$  轴进行纵摆运动, 沿  $y$  轴进行横摆运动, 沿  $z$  轴进行升降运动。绕  $x$  轴运动与上平台平面形成角  $\alpha$ , 绕  $y$  轴运动与上平台平面

收稿日期: 2018-01-11; 修回日期: 2018-02-06。

作者简介: 邓 哲(1986-), 女, 北京人, 工程师, 主要从事测控技术方向的研究。

形成角  $\beta$ ，绕  $z$  轴与上平台平面形成角  $\gamma$ <sup>[5]</sup>。

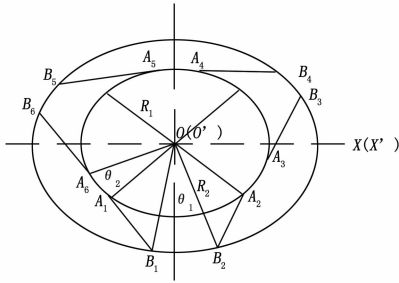


图 1 Stewart 运动平台坐标系

当上平台仅沿  $x, y, z$  三个轴方向进行平移运动时，得到连体坐标系与惯性坐标系之间的平移变换矩阵为：

$$T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

上平台分别绕  $x, y, z$  轴旋转得到旋转角  $\alpha, \beta, \gamma$  三个坐标转换矩阵的总旋转矩阵为：

$$T_2 = \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

则平台惯性坐标系和连体坐标系之间的变换矩阵  $T = T_1 \cdot T_2$ 。假设六自由度运动平台的上平台半径为  $R_1$ 、下平台半径为  $R_2$ 、上铰和中心的夹角为  $\theta_1$ 、下铰和中心的夹角为  $\theta_2$ 、初始支杆长  $L$ ，静平面铰接点为  $A_1, A_2, A_3$ ，动平面铰接点为  $B_1, B_2$  及  $B_3$ 。则上、下平台 6 个铰点的坐标分别为：

$$\begin{aligned} B_1 &= [-R_2 * \sin(\theta_1/2/180 * \pi) \quad -R_2 * \cos(\theta_1/2/180 * \pi) \quad 0]; \\ B_2 &= [R_2 * \sin(\theta_1/2/180 * \pi) \quad -R_2 * \cos(\theta_1/2/180 * \pi) \quad 0]; \\ B_3 &= [R_2 * \cos((30 - \theta_1)/2)/180 * \pi \quad R_2 * \sin((30 - \theta_1)/2)/180 * \pi \quad 0]; \\ B_4 &= [R_2 * \cos((30 + \theta_1)/2)/180 * \pi \quad R_2 * \sin((30 + \theta_1)/2)/180 * \pi \quad 0]; \\ B_5 &= [-R_2 * \cos((30 + \theta_1)/2)/180 * \pi \quad R_2 * \sin((30 + \theta_1)/2)/180 * \pi \quad 0]; \\ B_6 &= [-R_2 * \cos((30 - \theta_1)/2)/180 * \pi \quad R_2 * \sin((30 - \theta_1)/2)/180 * \pi \quad 0]; \\ A_1 &= [-R_1 * \cos((30 + \theta_2)/2)/180 * \pi \quad -R_1 * \sin((30 + \theta_2)/2)/180 * \pi \quad 0 \quad 1]; \\ A_2 &= [R_1 * \cos((30 + \theta_2)/2)/180 * \pi \quad -R_1 * \sin((30 + \theta_2)/2)/180 * \pi \quad 0 \quad 1]; \\ A_3 &= [R_1 * \cos((30 - \theta_2)/2)/180 * \pi \quad -R_1 * \sin((30 - \theta_2)/2)/180 * \pi \quad 0 \quad 1]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_4 &= [R_1 * \sin(\theta_2/2/180 * \pi) \quad R_1 * \cos(\theta_2/2/180 * \pi) \quad 0 \quad 1]; \\ A_5 &= [-R_1 * \sin(\theta_2/2/180 * \pi) \quad R_1 * \cos(\theta_2/2/180 * \pi) \quad 0 \quad 1]; \\ A_6 &= [-R_1 * \cos((30 - \theta_2)/2)/180 * \pi \quad -R_1 * \sin((30 - \theta_2)/2)/180 * \pi \quad 0 \quad 1]; \end{aligned}$$

通过上平台 6 个铰点的坐标及旋转矩阵转换，可计算出六个推杆各自的位移。杆长的计算公式为  $Ln$ ，式中  $n$  为  $1 \sim 6$ ，分别对应  $L1 \sim L6$ ，则电动推杆的位移为  $Ln' = Ln - L$ 。

$$Ln = \sqrt{(T \times An'(1) - Bn(1))^2 + (T \times An'(2) - Bn(2))^2 + (T \times An'(3) - Bn(3))^2}$$

## 2 系统软硬件构成

系统由六自由度 Stewart 平台和控制软件两个部分组成。平台采用 6 个电动推杆作为执行机构，电动推杆选用 TGA-DW-150 mm 为直流电机驱动推杆，工作电压为 24 V，最大推力为 900 N，空载速率为 29 mm/s，最大行程为 150 mm，初始长度为 352 mm，重量仅有 1.1 kg。电动推杆输出端为 10 kΩ 电位器，电动推杆行程的变化，使得电位器中心与两端电阻值发生变化，在电位器两段施加 3.3 V 电压，从而将电动推杆杆长的变化，转换为电压值的变化。电动平台的上平台、下平台铰夹角为 20 度。上平台半径为 180 mm。下平台半径为 220 mm。平台最大翻转角可以达到  $\pm 20^\circ$ 。

系统采用 3 个 LN298 双 H 桥路驱动模块，来实现 6 路电动杆电机的正反转操作，每个 LN298 双 H 桥驱动模块可单独控制 2 台直流电机，芯片工作电压为 DC 5 V，电机驱动电源电压 DC 5~35 V，最大输出电流 2 A，最大输出功率为 25 W。

控制软件分为上位机数据输入软件和数控软件。上位机数据输入软件和下位机软件之间采用应答方式，并采用数据包方式进行交互。数据包大小为 13 B，用来承载用户在上位机软件中设置的电动推杆的目标位姿数据 ( $x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$ )。数据包由包头和位姿数据两部分组成，包头采用 255，位姿数据为  $x$  小数部分， $x$  整数部分， $y$  小数部分， $y$  整数部分，依此类推。系统结构如图 2 所示。用户通过上位机软件输入电动推杆的目标位姿坐标 ( $x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$ ) 并对串口参数进行配置。配置完成后，通过串口将数据包下发给 TMS320F28335 控制器，等待下位机的响应信号。若收到下位机的响应信号 0x55，说明数据下发成功，且完成该点的位姿控制。如果此时数控系统处于忙状态，需要等待其空闲时将数据包下发，这样可以保证位姿控制数据不丢失的同时，实现对电动推杆位姿的精准控制。下位机控制软件在空闲时通过串口向上位机发送应答信号，通知上位机发送数据，通过串口收到位姿数据后，对数据包进行解析得到坐标数据，并对坐标数据进行解算得到电动杆的目标位置杆长，将该杆长转换成电压值，与 ADC 采集到的电压值反馈信息进行实时对比，根据两个电压的差值对电动推杆进行 PWM 控制。系统选用的 TMS320F28335 型数字

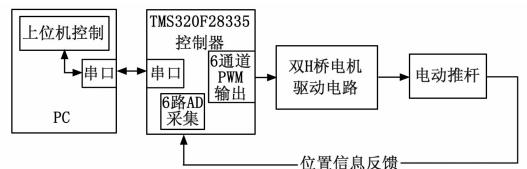


图 2 控制系统结构图

信号处理器是 TI 公司推出的 32 位 DSP 芯片。该 DSP 具有外部设备集成度高, 成本低、功耗小、性能和精度高的特点。该 DSP 主频高达 150 Mhz, 具有 32 位浮点处理单元, 多达 18 路 PWM 输出, 以及 16 通道 12 位 ADC<sup>[6]</sup>。

## 2.1 上位机软件设计

上位机软件通过 LabView 编写, 软件界面如图 3 所示, 用户通过上位机软件对六自由度平台进行位姿控制, 可通过上位机控制软件实现对 6 自由度电动杆的位姿坐标的定点输入, 即  $x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$  位姿坐标信息, 也可以通过选择按钮选择不同轴向的正弦信号, 来实现电动杆不同姿态的运动坐标信息的生成, 用户可在上位机软件中, 对正弦信号的幅值、频率、采样频率进行设置。上位机软件通过串口和下位机控制器进行通信。在进行位姿控制时, 用户首先对串口进行配置, 统一上、下位机的串口参数, 包括连接串口的识别, 串口的波特率、校验位、停止位的设置。串口参数配置完成后, 开启读取, 启动接收操作, 等待下位机的空闲状态控制字 0x55, 收到该控制字后, 状态指示灯亮, 表示下位机与上位机串口通信成功, 且此时下位机没有进行位姿控制操作, 若没收到, 则对串口进行循环读取检测, 直到收到下位机空闲状态控制字。随后需要对平台进行对中操作, 使得电动平台上平台位置位于中心位置, 此时  $x, y, z$  三轴偏移量为 0,  $\alpha, \beta, \gamma$  旋转角为 0 度。用户点击对中旋钮, 软件将平台中位坐标信息生成数据包, 并通过串口将参数下发给控制器, 收到控制器对中完成反馈后, 状态指示灯亮。在每次实验开始前都需要对平台进行对中操作, 在实验过程中, 也可以对平台进行对中操作。对中完成后, 用户可根据需要, 在上位机软件上对平台的目标位姿进行参数设置, 点击写入按钮, 将平台位姿参数生成数据包, 通过串口下发给下位机, 完成位姿参数的下发。

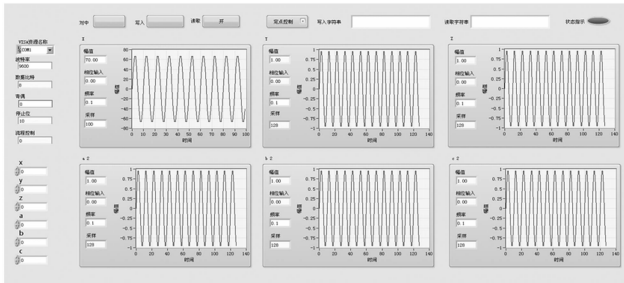


图 3 上位机软件界面

## 2.2 数控软件设计

数控软件在 Windows 环境下通过 CCS 软件编写完成, 采用模块化结构, 将软件分为 5 个模块进行实现, 分别为主程序模块, PWM 控制模块, ADC 模块, 串口通信模块以及位置解耦算法模块。其中, 主程序模块负责整个系统的程序调度, PWM 控制模块实现 PWM 初始化, PWM 脉宽信号的输出, 并可以根据电动杆和目标位置的距离进行 PWM 控制。ADC 模块负责控制 ADC 采集和采集数据的平滑计算。串口通信模块用来实现上下位机的数据通信以及数据包解析。解耦算法模块将平台位姿坐标信息进行解算, 得到此时电动推杆的杆长。

主程序模块负责对系统的各个模块进行调度, 系统上电后, 完成对系统的时钟工作在 150 Mhz、配置串口接收中断、进行 GPIO 的初始化和配置, 开启 ADC 采集模块、PWM 模块以及串口模块, 同时每隔 100 ns, 通过串口向上位机发送

0x55 空闲状态字, 直到收到上位机数据包信息。下位机串口收到上位机发送的平台位置信息后, 对数据包进行解析得到平台的目标位置坐标信息, 通过解耦算法模块对位置信息进行解算, 并将长度信息与 AD 模块采集的信息进行比较, 根据比较结果对 6 路 PWM 进行相应的控制, 直到电动推杆达到设定位置, 回到开始状态并向上位机发送 0x55 来表示下位机处于空闲状态。

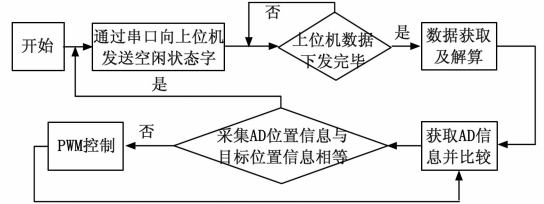


图 4 软件程序流程图

串口通信模块采用全双工通信模式, 通信过程采用 F28335 处理器提供 SCI 串行通信接口, 每个 SCI 串行通信接口的接收端和发送端都具有 16B 的 FIFO 缓冲, 为减小 CPU 开销, 在接收上位机数据包时, 采用中断方式。使能 SCI 串行通信接口接收端 FIFO 中断, 即当 FIFO 接收 13 字节数据后, 向 CPU 发出中断请求。系统监测查询 FIFO 接收中断, 判断中断是否为高, 当中断为高时, 读取 FIFO 中的数据。检测第一字节数据是否为 255, 当其值为 255 时, 表示收到了用户设定的运动平台位姿坐标信息。将该信息中相应轴的小数部分和整数部分合并, 解析出  $x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$  位姿坐标信息。

位置解耦算法模块将串口解析的位姿坐标数据, 通过解耦算法, 解算出电动推杆的目标长度  $Ln'$ , 并将目标长度  $Ln'$  转换成目标电压值  $V$ ,  $V = Ln' / L * (voh - vol) + vol$ , 其中  $L$  为电动推杆长度;  $voh$  为电动推杆达到最大行程时对应的电压值;  $vol$  为电动推杆位于初始位置时对应的电压值。由于 6 个电动推杆之间有一定的误差, 每一个电动推杆的  $voh$  和  $vol$  值均需要进行测量。

PWM 控制模块负责输出 12 路 PWM 信号, 通过 12 路 PWM 信号对 6 个电动推杆的行程进行分别控制, 每一个电动推杆由 PWMa、PWmb2 路信号进行控制; PWMa 输出高电平, PWmb 输出低点平时, 电动推杆伸长; PWMa 输出低电平, PWmb 输出高电平时, 电动推杆缩短; PWMa 和 PWmb 电平相同时, 电动推杆静止。同时, 可根据 PWM 高、低电平的占空比, 对电动推杆进行调速控制。由于 LN298 双 H 桥路驱动模块为门控桥路, 每一个 H 桥路根据 PWMa 和 PWmb 电平变化, 实现两路 24 V 电动杆驱动电平的输出。由于当 PWMa 和 PWmb 同时为高电平时 LN298 桥路出现死区, 因此在进行 PWM 信号输出时, 使得 2 路 PWM 电平在进行翻转时, 上升沿信号延迟大于下将沿信号延迟, 且在一路信号输出 PWM 波形时, 令另外一路信号输出为低电平信号。

ADC 模块负责采集 6 个电动推杆反馈端的输出电压值, 并将该电压值和目标电压值进行比较, 根据比较的差值对 PWM 进行控制。为提高采样值的精度, 对每个通道 ADC 数据进行 20 次采样并将采样值求和再求平均, 得到的数值为该点的电压值。将该点的电压值和电动推杆目标位置电压值进行比较, 差值在 0.01 V 之内, 认为电动推杆已经达到目标位置, 否则继续对电

动推杆进行 PWM 控制。进行 PWM 控制时，根据采集电压差值和电动推杆的电压差值的大小，对输出的 PWM 波形高、低电平占空比进行调整，调成范围为 100%~25%，以电动推杆进行伸长操作为例，即差值最大时，PWMa 输出为高电平，此时占空比为 100%，此时电动推杆的行进速度最快。在差值接近 0.01 V 时，减小 PWM 占空比，降低电动推杆的行进速度，以保证对位置的精确控制。通过对 PWM 的  $CMPA$ 、 $CMPB$  参数进行修改，即可实现对 PWM 占空比的实时设置， $CMPA = 12000 - P_{wmpos}C^2 / 200$ ， $CMPB = 12000$ ，其中， $P_{wmpos}C$  为 ADC 采集电压和推杆目标电压的差值。

### 3 试验结果分析

将 Stewart 平台控制系统应用到六自由度 Stewart 控制台中进行实验，处理器采用 150 MHz 时钟，ADC 采样速率选用 12.5 Mbps，上下位机通信速率最高为 38400 bps，PWM 输出控制信号为 1 kHz，当目标设置为 Z 轴正弦运动、幅值为 70，频率为 10 Hz 时得到的单轴电动杆反馈电压曲线如图 5 所示，可以看出电动杆具有很好的位置跟踪能力。Stewart 平台实物运动如图 6 所示。

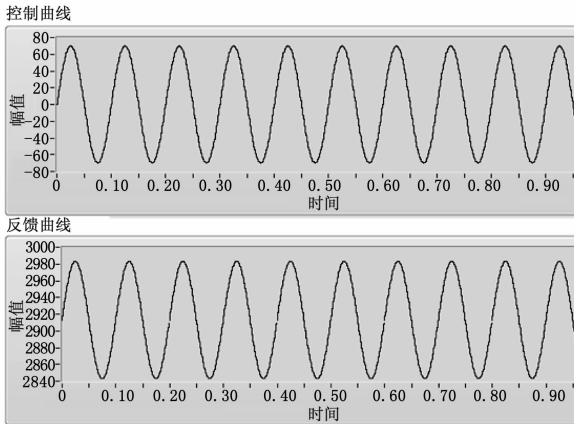


图 5 反馈曲线图

### 4 结束语

本文分析了 Stewart 六自由度运动台的运动特性，对平台正解算法进行改进，并建立了基于 DSP 的控制系统。该 Stewart 平台控制系统采用直流电机作为平台的驱动装置，支链采用的是电动推杆执行机构，采用 DSP 作为控制系统实现对电

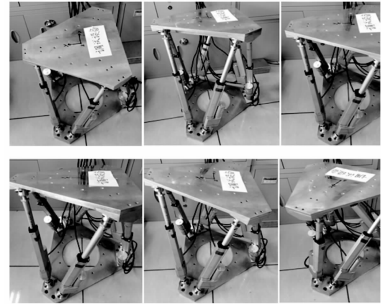


图 6 Stewart 平台实物运动图

动推杆的实时控制，采用 3 个 LN298 双 H 桥路驱动模块来实现 6 路电动杆电机的正反转操作，为方便对平台的运动位姿的控制，在 PC 端通过 LabView 编写了用户数据输入软件。将该系统应用到六自由 Stewart 运动台实验中，验证了该系统的稳定性和控制能力，试验表明该系统具有较高精度定位控制能力。

#### 参考文献：

[1] 弓 瑞, 汪首坤, 黄小天. 基于遗传一迭代算法的运动平台位置正解 [J]. 液压与气动, 2016, 8: 102-107.  
 [2] 曲 泉. 基于查分进化的六自由度并联机构运动学正解 [J]. 机床与液压, 2016, 44 (13): 83-88.  
 [3] 杨靖一, 黄山云, 丁祝顺, 等. 基于模糊 PID 算法的六自由度并联机构控制研究 [J]. 2017, 16 (5): 33-39.  
 [4] 郝 娟, 张建民, 肖定国, 等. 基于 Stewart 机构的变轴机床数控系统 [J]. 机电一体化, 2002 (1): 38-40.  
 [5] 钱 承, 鄂加强, 刘 明, 等. Stewart 六自由度并联平台动力学模型振动分析 [J]. 湖南大学学报, 2016, 43 (2): 36-42.  
 [6] 田 野. 基于 TMS320F28335 DSP 芯片的数字开关电源的研究和应用 [D]. 陕西: 西安电子科技大学, 2014.  
 [7] 霍 琦, 朱明超, 李 昂, 等. 基于 DSP 的 Stewart 平台直流无刷电机伺服控制系统 [J], 电子设计工程, 2016, 24 (14): 146-148.  
 [8] 汪汉生. 六自由度平台设计及控制方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨大学, 2008.  
 [9] 马 宁, 满增光. 基于 LabVIEW 的 Stewart 平台传感与控制系统建模与测试 [J]. 机床与液压, 2017.  
 [10] 张智涛. Stewart 类六自由度并联机构的研制 [D]. 天津: 天津大学, 2009.

(上接第 81 页)

### 5 结论

以步进电机差动驱动轮式机器人为研究对象，通过建立运动学模型，利用 Lyapunov 直接法设计了运动学控制器；通过建立动力学模型并结合步进电机工作特点，设计了对运动学控制器中线速度、角速度、线加速度、加速度的限制策略，最终实现了对机器人的运动控制；经过仿真和实验，证明所设计的控制器具有较高的跟踪精度和稳定性，机器人对初始位姿误差矫正时间短，在轨迹变化处能做出较快响应；结合 matlab 硬件支持包，采用基于模型的程序设计方法可以将理论分析计算结果应用于实践，缩短了开发周期。

#### 参考文献：

[1] 曹政才, 赵应涛, 吴启迪. 基于 Backstepping 和神经动力学的非完整移动机器人点镇定 [J]. 电子学报, 2011, 39 (3): 591-595.  
 [2] 马建伟, 石佳玉. 非完整约束移动机器人的轨迹跟踪控制 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (3): 77-80.  
 [3] 金 娟, 王耀南. 基于模糊 CMAC 的移动机器人轨迹跟踪控制 [J]. 计算机工程与应用, 2015, 51 (1): 54-58.  
 [4] 杨 敏. 轮式移动机器人控制算法研究及其伺服系统设计 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014  
 [5] 李 平, 王建锋, 李 娜, 等. 基于 Lyapunov 直接法的移动机器人运动控制研究 [J]. 中国科技论文, 2016, 11 (2): 160-163.