

六自由度钢带并联机器人运动控制系统的研制^{*}

艾青林, 黄伟锋, 祖顺江, 舒 剑

(浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 浙江 杭州 310014)

摘要:运动控制系统对于钢带并联机器人至关重要。提出了钢带并联机器人运动控制系统的设计思路,介绍了该控制系统的工作原理与功能,阐述了 SPiPlus PCI-LT-6 运动控制卡的性能指标、硬件结构、用户程序结构等。针对钢带并联机器人位置逆解的运动控制问题,给出逆解的 ACSPL 求解框图和编程代码,分析了钢带并联机器人运动控制中的关键技术问题,并指出相应的解决方案。研究表明,该运动控制系统可满足钢带并联机器人精确快速运动的要求。

关键词:钢带并联机器人;控制系统;运动控制卡

中图分类号:TP242;TH112

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)02-0131-05

Development of motion control system of steel band parallel robot with six degree of freedom

AI Qing-lin, HUANG Wei-feng, ZU Shun-jiang, SHU Jian

(The Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing Technology
(Zhejiang University of Technology), Ministry of Education, Hangzhou 310014, China)

Abstract: It is very important to design motion control system for steel band driven parallel robot. The design idea to the motion control system of the steel band driven parallel robot was presented. The working principle and function of the motion control system was introduced. The performance, hardware structure and the user application component of the SPiPlus PCI-LT-6 motion control card were illustrated. Aiming at the kinematic control problem to inverse position solution for steel band driven parallel robot, the inverse solving diagram of ACSPL and program code were presented. The key technology problems of motion control of steel band driven parallel robot were analyzed and the corresponding solutions were pointed out. The research result shows that the motion control system can satisfy with condition of precise and rapid movement for steel band driven parallel robot.

Key words: steel band driven parallel robot; control system; motion control card

0 引 言

随着计算机和微电子技术的进步,机器人运动控制技术得到了飞速发展。机器人运动控制技术是将运动控制器、伺服电机及其驱动器、传感器、传动机构组合在一起,通过软件编程的方法实现电机位移、速度、加速度和力矩控制,使机器人按照预期轨迹和规定的运动参数完成相应动作的一门技术^[1]。运动控制技术经历了从开环到闭环,从模拟到数字,再到基于 PC 与网络伺服控制技术的发展过程。目前,机械工业自

动化中的运动控制技术主要包括:全闭环交流伺服驱动技术、直线电机驱动技术、网际开放式结构高性能 DSP 多轴运动控制技术^[2-3]、基于可编程控制器的运动控制技术^[4]、基于现场总线的运动控制技术^[5]、基于运动控制卡的控制技术等。其中,基于运动控制卡的控制技术是一种将工业 PC 机与运动控制卡集成于一体并为上位控制单元、对各种复杂运动进行控制的技术(包括位移、速度、加速度控制等)^[6]。运动控制卡的驱动程序中包括功能强大的运动控制软件,C 语言运动控制函数库,Windows DLL 动态链接库等。它的

收稿日期:2010-09-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50805129);浙江省自然科学基金资助项目(Y106028)

作者简介:艾青林(1976-),男,江西新余人,副教授,博士,硕士生导师,主要从事钢带并联机器人、电液伺服控制技术方面的研究. E-mail: aiql@zjut.edu.cn

出现主要是为了满足新型数控系统的标准化、柔性、开放性要求。值得注意的是,通用运动控制卡作为一个独立的工业自动化产品,已经被越来越多的工业生产领域所接受^[7-8]。

本研究提出钢带并联机器人运动控制系统的设计思路。

1 钢带并联机器人运动控制系统方案设计

1.1 钢带并联机器人简介

六自由度钢带并联机器人的工作原理是通过 6 套伺服电机和皮带轮的转动带动卷筒,卷筒再带动 6 根钢带运动并使得钢带长度发生变化,从而实现动平台的多自由度运动,如图 1 所示。

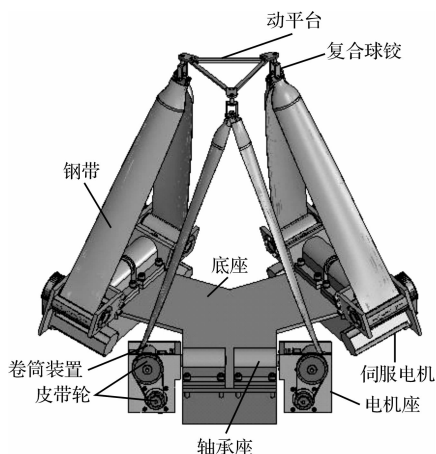


图 1 钢带并联机器人三维模型

图 1 中,每套电机座铰接在横杆上并可绕铰轴转动,钢带的一端可绕卷筒转动,这两个转动方向正交,其作用等价于虎克铰;钢带的另一端通过复合球铰与动平台连接。

1.2 运动控制系统工作原理与功能

六自由度钢带并联机器人的运动控制系统原理图如图 2 所示。该监测控制系统以工控机和运动控制卡作为信号监控中心及数据处理平台。工控机通过程序指令命令多轴运动控制卡同时发出 6 路脉冲到 6 套伺服放大器,控制 6 套交流伺服电机做步进运动,使得钢带并联机器人动平台运动。伺服放大器将脉冲计数信号传给多轴运动控制卡,使之完成闭环反馈控制。通过 LMS Test. Lab 系统测试钢带并联机器人运动过程中的振动特性,对钢带并联机器人进行实验模态分析,以研究钢带并联机器人的结构、几何尺寸及不同工况对其振动与失稳的影响规律。位移、速度、力传感器采集的信号由数据采集卡采集并输入到工控机中,用于

分析钢带并联机器人的动态特性,并可以实验验证钢带并联机器人的工作空间、奇异曲面的分布、刚度特性等。钢带并联机器人运动控制系统实物图如图 3 所示。

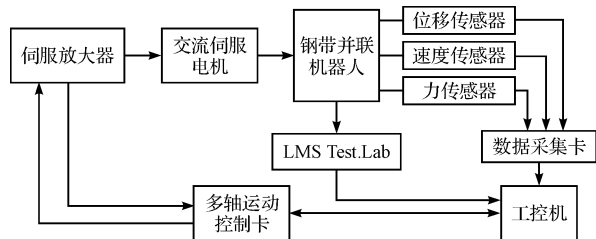


图 2 运动控制系统工作原理图



图 3 运动控制系统实物图

2 运动控制卡

2.1 性能指标

钢带并联机器人控制系统的核心部件是 ACS Motion Control 公司的 SPiPlus PCI-LT-6 运动控制卡,如图 4 所示。该运动控制卡通过高速 PCI 总线通信提供运动控制功能,或作为一个独立的控制器运行。该控制卡具有增量式和模拟量编码器反馈,最大输入频率为 20 MHz;内置正弦和余弦细分器(4 倍 ~ 65 536 倍);转矩或电流变换指令;最大 4 MHz 的脉冲输出指令;用户定义的 5 V ~ 24 V DC 数字量 I/O(源输入或漏输入);可编程标准轴 I/O、驱动器故障、驱动器使能和超行程使得 SPiPlus PCI-LT 经济型版本适用于正交编码器反馈和仅需少量 I/O 的应用;6 轴步进/伺服电机闭环控制^[9]。

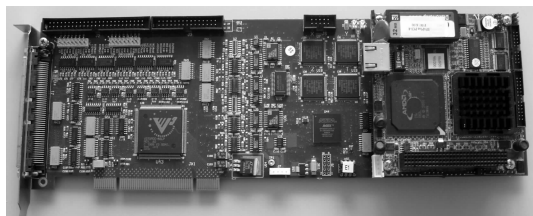


图 4 SPiPlus PCI-LT-6 运动控制卡实物图

2.2 板卡的硬件结构

SPiiPlus 控制器硬件结构如图 5 所示,图 5 中的核心部件为运动处理器单元 MPU,是功能强大的 586 或者奔腾处理器,可以执行大部分的控制器任务。SPii 是一个 ACS 运动控制器均采用的伺服电机处理器(简称 SP),可执行实时任务,如实时控制算法的实现等。每个 SPii 控制两个轴。SPii 包含了所有的用于高性能轴控制所必需的外围设备,如:编码计数器,数字/模拟转换接口,智能输入和输出。闪存可以在控制卡的电源断开后仍然保留所存储的数据。

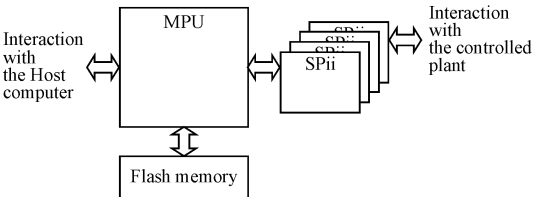


图 5 SPiiPlus 控制器硬件结构

SPii 伺服处理器结构原理图如图 6 所示,SPii 处理器可以提供独立的运算处理功能,如 65 536 倍正弦和余弦编码乘法器、位置存储、步进控制等。

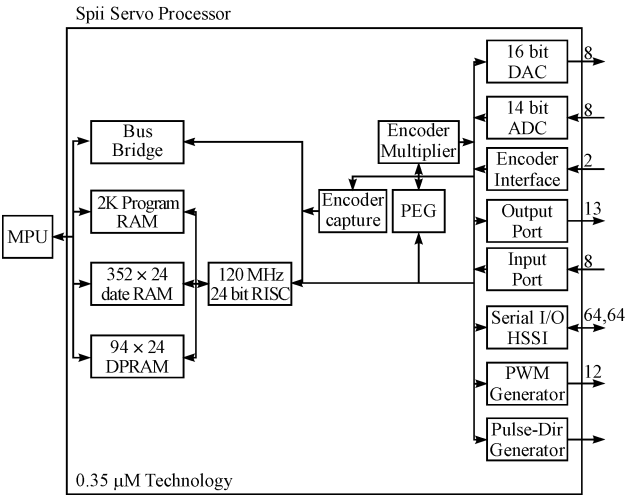


图 6 SPii 伺服处理器结构原理图

2.3 SPiiPlus 用户程序结构

2.3.1 固件、用户应用程序和工具

固件是保存于控制卡固定存储器中的程序,该程序定义了控制器的一些基本函数。其中这些函数用于存储、执行用户的应用程序。

用户的应用程序可使控制卡适应用户具体的控制设备。控制卡能够控制具有不同轴数、机械结构、实时性要求等各类设备。用户应用程序应明确规定在不同的条件下执行的具体控制和监测动作,包括精确的动作序列,输出激活,输入响应和人机交互等。

SpiiPlus 工具是基于 Windows 的程序,可为用户各种不同的应用程序平台提供支持,如初安装和调试、ACSPL + 应用程序开发、上位机应用程序与控制卡的交互、手动控制。

2.3.2 用户应用程序组件

在图 7 中,有阴影的方框为用户应用程序,白色的方框为固件部分。

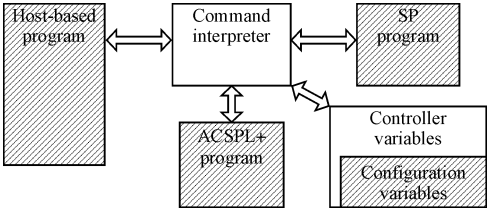


图 7 用户应用程序的方框图

(1) 主机程序(Host-based program)

由 C,C++ 或者其他程序语言编写,可用于主机和控制板卡之间的通信。主机程序可使用由控制卡提供的任何信号通道;串行连接,以太网,FIFO,双端口存储器。该程序可向控制卡发送指令以及从控制卡读取数据。该程序可以提供前端用户界面、动作顺序、高层决策和其他专用函数。如果该控制卡没有和主机连接,并且独立工作,那么主机程序可以不用。

(2) ACSPL + 程序

ACSPL + 是一种专为 SpiiPlus 运动控制卡开发的强大程序语言。一系列的 ACSPL + 命令可以作为 ACSPL + 程序下载到控制卡。控制卡上有 10 个缓冲区安装 ACSPL + 程序。一个 ACSPL + 程序在控制卡中执行时,按照严格的时序且没有通信延迟。

(3) 配置变量(Configuration variables)

固件中的预定义变量可以用于 ACSPL + 程序和即时通信命令。预定义变量包含了配置变量。配置变量的值是根据具体的任务和控制设备定义的。例如,ACC 定义加速度。SAFINI 变量定义了输入安全信号的极性。配置变量必须出现在用户应用程序中。

(4) SP 程序

固件中包含的 SP 实时控制程序是控制卡的一个标准部分。用户可以修改这些程序,使它成为应用程序的一部分。SP 实时控制程序很少存在于用户应用程序中,并且不支持手动操作^[10]。

3 运动学程序设计

并联机器人的运动学求解问题包括运动学正解和逆解两个问题。已知输入参数求解输出参数为运动学正解;反之,已知输出参数求解输入参数即为运动学逆

解。本研究以普通六自由度并联机构为例,如图 8 所示,推导结果可直接应用于钢带并联机构。输入参数为 6 个输入件的长度,即为: $(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6)$; 而所求输出为动平台的位姿,将动平台看做一个刚体,采用刚体的描述方法来表示动平台的位姿为: $(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$ 。其中, x, y, z 分别为动平台坐标系原点在固定坐标系中坐标, α, β, γ 分别为动坐标系各轴相对于固定坐标系对应轴的转动角度,如图 9 所示, $\alpha = \text{roll}$ (旋转), $\beta = \text{pitch}$ (俯仰), $\gamma = \text{yaw}$ (偏航)。

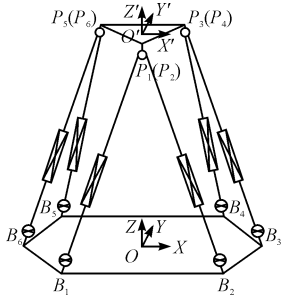


图 8 六自由度并联机构

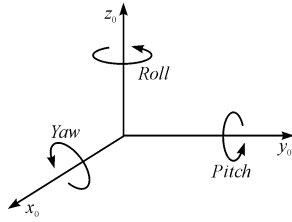


图 9 转动角度定义

根据上面所述,位置逆解即已知动平台的姿态,求解各输入件的长度。假设各输入件与动平台位姿参数的关系已知,用向量的形式可表示为:

$$(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6) = F(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma) \quad (1)$$

令

$$c\alpha = \cos \alpha, c\beta = \cos \beta, c\gamma = \cos \gamma$$

$$s\alpha = \sin \alpha, s\beta = \sin \beta, s\gamma = \sin \gamma$$

可知:

$$x_i = c\alpha c\beta p_{ix} + (c\alpha s\beta s\gamma - s\alpha c\gamma) p_{iy} +$$

$$(c\alpha s\beta c\gamma - s\alpha s\gamma) p_{iz} + x - b_{ix}$$

$$y_i = s\alpha c\beta p_{ix} + (s\alpha s\beta s\gamma - c\alpha c\gamma) p_{iy} +$$

$$(s\alpha s\beta c\gamma - c\alpha s\gamma) p_{iz} + y - b_{iy}$$

$$z_i = -s\beta p_{ix} + c\beta s\gamma p_{iy} + c\beta c\gamma p_{iz} + z - b_{iz}$$

则支撑件长度与动平台位姿之间的函数关系为:

$$l_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2} \quad (2)$$

通过上式即可求出关系式中的 F 。从而可以求出并联机构的位置逆解。在运动控制系统中,给出并联机构所要求达到的目标位姿 $(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$, 通过逆解方程可以求出各支撑件相应的长度 $(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6)$, 然后,控制器发出命令驱动各个支撑件达到相应的长度。到目前为止,这个过程看起来相当的简单,但控制器控制各支撑件动作的过程不是设定目标值然后瞬间跳跃到目标长度,而是需要一个平滑的运动过程。因此,首先应当计算出各个驱动件的运动轨迹,并且,整个运动过程为一个不断地计算、逼近过程。在运动控制卡中,这一步由 CONNECT 函数来实现,即使用者

计算出目标位姿后,输入 CONNECT 命令便可以使并联机构自动的运动到目标位置。运动学逆解的具体求解过程如图 10 所示,另外给出逆解求解过程的主要程序代码。

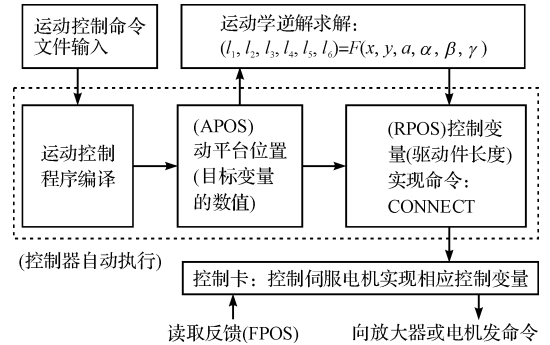


图 10 利用 ACSPL 进行运动学逆解求解

逆解求解主要程序代码:

! 建立驱动件长度的数学公式,以 connect 命令实现

```
connect RPOS(0) = sqrt( abs( D0X * D0X + D0Y * D0Y + D0Z * D0Z ) )
```

```
depends X,XYZABC
```

```
connect RPOS(1) = sqrt( abs( D1X * D1X + D1Y * D1Y + D1Z * D1Z ) )
```

```
depends Y,XYZABC
```

```
connect RPOS(2) = sqrt( abs( D2X * D2X + D2Y * D2Y + D2Z * D2Z ) )
```

```
depends Z,XYZABC
```

```
connect RPOS(4) = sqrt( abs( D4X * D4X + D4Y * D4Y + D4Z * D4Z ) )
```

```
depends A,XYZABC
```

```
connect RPOS(5) = sqrt( abs( D5X * D5X + D5Y * D5Y + D5Z * D5Z ) )
```

```
depends B,XYZABC
```

```
connect RPOS(6) = sqrt( abs( D6X * D6X + D6Y * D6Y + D6Z * D6Z ) )
```

```
depends C,XYZABC
```

! 用 block 命令将程序段压缩,在一个周期内完成程序运算

```
while 1;block
```

```
CA = cos( A_APOS * PI/180 ); SA = sin( A_APOS * PI/180 );
```

```
CB = cos( B_APOS * PI/180 ); SB = sin( B_APOS * PI/180 );
```

```
CC = cos( C_APOS * PI/180 ); SC = sin( C_APOS * PI/180 );
```

```
C00 = CA * CB;
```

```
C01 = CA * SB * SC - SA * CC;
```

```
! C02 = CA * SB * CC + SA * SC;
```

```
C10 = SA * CB;
```

```
C11 = SA * SB * SC + CA * CC;
```

```
! C12 = SA * SB * CC - CA * SC;
```

```
C20 = - SB;
```

```
C21 = CB * SC;
```

```
! C22 = CB * CC;
```

```
D0X = C00 * P0X + C01 * P0Y + X_APOS - B0X;
```

```
D0Y = C10 * P0X + C11 * P0Y + Y_APOS - B0Y;
```

```
D0Z = C20 * P0X + C21 * P0Y + Z_APOS;
```

```
D1X = C00 * P1X + C01 * P1Y + X_APOS - B1X;
```

```
D1Y = C10 * P1X + C11 * P1Y + Y_APOS - B1Y;
```

$$D1Z = C20 * P1X + C21 * P1Y + Z_APOS;$$

$$D2X = C00 * P2X + C01 * P2Y + X_APOS - B2X;$$

$$D2Y = C10 * P2X + C11 * P2Y + Y_APOS - B2Y;$$

$$D2Z = C20 * P2X + C21 * P2Y + Z_APOS;$$

$$D4X = C00 * P4X + C01 * P4Y + X_APOS - B4X;$$

$$D4Y = C10 * P4X + C11 * P4Y + Y_APOS - B4Y;$$

$$D4Z = C20 * P4X + C21 * P4Y + Z_APOS;$$

$$D5X = C00 * P5X + C01 * P5Y + X_APOS - B5X;$$

$$D5Y = C10 * P5X + C11 * P5Y + Y_APOS - B5Y;$$

$$D5Z = C20 * P5X + C21 * P5Y + Z_APOS;$$

$$D6X = C00 * P6X + C01 * P6Y + X_APOS - B6X;$$

$$D6Y = C10 * P6X + C11 * P6Y + Y_APOS - B6Y;$$

$$D6Z = C20 * P6X + C21 * P6Y + Z_APOS;$$

end; end

4 关键技术问题

由于钢带并联机器人的钢带质量轻、惯性小,当钢带并联机器人作快速响应动作时,机构中的动载荷发生变化,容易导致钢带并联机器人产生振动。为了消除高速运动中振动现象的发生,提高运行的平稳性,就应该对钢带并联机器人在运行中的振动特性进行研究。可以通过 LMS Test. Lab 系统测试钢带并联机器人运动过程中的加速度信号,对钢带并联机器人进行实验模态分析,得到钢带并联机器人的振动频率。分析运动中的动载荷与振动频率之间的关系,确定钢带并联机器人的运动加速度范围,以消除运动中的振动。在此过程中,加速度的范围很难确定,可以通过遗传算法等智能控制算法对加速度范围进行优化。

钢带并联机器人的运动精度要求很高,即运动误差要求很小,否则各钢带会因为位置干涉,产生干涉内力,导致整个钢带并联机器人失稳。这对钢带并联机器人的运动控制卡和伺服电机的位置闭环控制精度提出了很高的要求,当然也可通过一些软件算法进行位置误差补偿。

另外,钢带传动装置的特殊结构将会给机器人运动带来一定的误差。钢带在缠绕在卷筒上时,由于钢带具有一定厚度,且钢带不会完全贴合在卷筒上(在某些地方会发生翘起),因此卷筒直径将发生微小变化,会影响钢带运动副的长度计算,从而最终影响动平台的运动精度。因此如何使卷筒严格地贴合在卷筒上,对钢带运动副的结构设计提出了更高的要求。同时,在对钢带运动长度做理论计算时,可根据钢带实际的运动方向,作适当的长度误差补偿,以消除相应的位置误差。

5 结束语

本研究的主要意义总结如下:

(1) 以 SPiiPlus PCI-LT-6 运动控制卡为核心,研制了钢带并联机器人运动控制系统,该运动控制系统能对 6 路步进/伺服电机进行闭环反馈控制,可实现钢带并联机器人的六自由度运动。

(2) 对钢带并联机器人的运动学位置逆解进行了程序设计,给出了位置逆解的求解步骤、框图及逆解的主要程序代码。

(3) 分析了钢带并联机器人运动控制中存在的关键技术问题。并指出,可通过实验模态分析方法研究钢带并联机器人快速运动中的振动问题;通过提高钢带并联机器人运动精度与对钢带运动长度进行补偿的方式来解决钢带并联机器人运动中的位置干涉问题。

参考文献(References):

- [1] 郝志刚,周宏甫. 运动控制器的发展与现状[J]. 电气传动自动化,2005,27(3):10-14.
- [2] 郭磊,甘东明,廖启征,等. 一种新型 3 P-6 SS 并联机构的运动控制[J]. 中国机械工程,2008,19(9):1013-1015.
- [3] SHI Xiao-juan. The Design and Implementation of Motion Control Card based on DSP[C]//2010 Global Conference on Digital Design and Manufacturing Technology. Hangzhou: Digital Design and Manufacturing Technology, 2010, 102-104;427-431.
- [4] ZHANG Zhen, SHENG Li-yuan, CAO Can, et al. The design and implementation of programmable motion controller[J]. **Microcomputer Information**,2008,34(34):14-16.
- [5] SCHEWE F, JASPERNEITE J. Further Development of Fieldbus Technology to Support Multi-axis Motion[C]//Proceedings of 41st International Conference for Power Conversion and Intelligent Motion. Nurnberg: Official Proceedings of the Thirty-Fifth International Intelligent Motion Conference,1999:33-38.
- [6] LUAN Zong-tao, MEI Xue-song, MA Li. Research and design of high-speed high-precision open motion control card[J]. **International Journal of Internet Manufacturing and Services**,2008,1(4):380-392.
- [7] 吴琳,谭营,唐建. 运动控制技术发展与展望[J]. 机床与液压,2007,35(7):231-233,216.
- [8] 舒志兵,杜永红,黄益群,等. 最新运动控制技术进展[J]. 电气时代,2005,8:48-50.
- [9] ACS Motion Control Ltd. SPiiPlus PCI Advanced 2, 4, 6, 8 Axes Motion Controller[EB/OL]. [2006-08-01]. [http://www.acsmotioncontrol.com/Portals/8/downloads/SPiiPlus%20PCI%20\(ver%204-4\).pdf](http://www.acsmotioncontrol.com/Portals/8/downloads/SPiiPlus%20PCI%20(ver%204-4).pdf).
- [10] ACS Motion Control Ltd. SPiiPlus ACSPL + Programmer's Guide[EB/OL]. [2009-11-19]. <http://www.acsmotioncontrol.com/Downloads/SPiiPlusMC4UDownloads/tab-id/234/id/333/Default.aspx>.

[编辑:李辉]