

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.12.011

PLCopen 轴组运动功能块的研究与实现*

王夫康,张得礼*,周 伟

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要:针对 PLCopen 单轴及主/从结构多轴功能块无法实现复杂多维运动控制的问题,对 PLCopen 轴组功能块的执行方式和参数保存及传递方法进行了研究,提出了结构体队列法,设计并实现了 PLCopen 轴组功能块,完成了多轴协调运动控制。首先采用基于信息队列的方法实现了 PLCopen 标准定义功能块中 BufferMode 功能,能够完成多种模式下的运动控制。然后采用建立结构体的方法实现了运动参数的保存及传递。最后,基于工控机 + PMAC 运动控制卡为架构的硬件平台,以调用轴组直线运动功能块为例,对轴组功能块功能进行了实验验证。实验结果表明,轴组功能块运行正确,能够完成多种模式的运动控制,实现多轴协调运动,满足对于复杂多维运动的实际需求。

关键词: PLCopen;轴组功能块;多轴协调运动;运动控制

中图分类号: TP273;TH39

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2016)12-1477-06

Research and implementaion of the group function block based on PLCopen

WANG Fu-kang, ZHANG De-li, ZHOU Wei

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing 210016, China)

Abstract: Aiming at the problems that PLCopen single-axis and master/slave multi-axes function blocks could not complete the complex multi-dimensional motion control, the execution mode and the preservation and transmission of motion parameters of the PLCopen group function block were studied. The structure queue method was proposed and the PLCopen group function block was designed and implemented to achieve the coordinated multi-axes motion control. First, the method of establishing the message queue was used to achieve the BufferMode function of the PLCopen, which was able to realize the motion control of several modes. Then, the preservation and transmission of motion parameters were realized by establishing the structure body. Finally, based on the hardware platform with IPC and the PMAC motion control card, taking group linear function block as an example, experimental verification of the group function block was carried out. The results indicate that the group function block which executes accurately is able to achieve the coordinated multi-axes motion control in several modes and meet the requirements in practical application.

Key words: PLCopen; group function block; coordinated multi-axes motion; motion control

0 引 言

随着全球一体化进程的不断深入,机械产品对控制系统可重用的要求越来越高,而传统的运动控制系

统大多是封闭式系统,由于运动控制编程语言并不统一,运动控制的软件系统太过依赖硬件平台,其中的大部分功能都只能运行在单一的硬件平台上,不能进行跨平台使用^[1]。如目前广泛使用的 PLC、DSP 以及 FPGA 控制器都有各自的编程语言,这极大地增加了

收稿日期:2016-05-04

基金项目:江苏省产学研联合创新资助项目(SBY2014020585)

作者简介:王夫康(1991-),男,山东青岛人,硕士研究生,主要从事数控系统方面的研究. E-mail: wangfukang01@163.com

通信联系人:张得礼,男,博士,副教授,硕士生导师. E-mail: nuaazdl@126.com

用户的学习以及开发成本^[2]。因此,市场迫切地需要一种统一的标准化编程语言来实现控制系统的可复用性。PLCopen 组织为推动工控领域编程语言的标准化推出了标准 PLCopen 运动功能模块^[3]。

PLCopen 标准包含了两个方面:定义运动功能块的功能、接口以及轴运行状态机^[4]。功能块包括单轴和多轴功能块,多轴功能块可以分为两类:①主/从结构功能块;②轴组功能块^[5]。

PLCopen 标准定义了功能块的功能,并未给出功能块的内部实现算法。为实现 PLCopen 标准在工业生产中的应用,学者们对 PLCopen 功能块的实现做了一些研究。文献[6-8]对 PLCopen 单轴功能块的实现框架以及运动控制接口扩展进行了研究,但并未涉及多轴功能块的内容。罗林丹等^[9]针对单轴运动功能块的参数传递进行了研究,提出了 IL 指令传参法和参数模板传参法两种方法实现了参数的传递,但均并未涉及多轴运动功能块的参数保存及传递。Sünder C 等^[10]和郑仲谦等^[11]对 PLCopen 多轴功能块进行了研究,实现了多轴功能块,但并未给出多轴功能块的参数保存及传递过程,也未涉及规范中的 BufferMode 功能。王瀚等^[12]设计了一套基于 PLCopen 标准的控制系统,并完成了部分单轴功能块以及 BufferMode 功能,但并未在多轴功能块中实现 BufferMode 功能。同时,目前对于多轴协调运动控制系统的研究主要是基于硬件运动控制器的算法研究^[13~16],运动控制软件的开发仍然依赖于硬件平台,无法实现控制软件的可复用性。

综上所述,目前对 PLCopen 标准研究主要是针对单轴运动功能块的实现以及参数的传递方法。但 PLCopen 单轴及主/从结构多轴运动功能块只能进行简单的运动控制,无法实现复杂运动。而且主/从结构多轴功能块是由一个主轴的定位生成多个从轴的定位命令,若某一轴在运动时出现错误,其他轴因无法进行判断仍会继续运动,会导致运行错误。随着智能制造进程的不断推进,对于运动控制器跨平台使用的要求越来越高,现有针对 PLCopen 标准和多轴协调运动的研究已经不能满足高端数控机床以及机器人等机械产品对于三维空间内复杂运动控制的需求。

针对以上问题,笔者在深入研究 PLCopen 标准第 4 部分多轴协调运动控制模块的基础上,提出结构体队列法,设计并实现 PLCopen 轴组运动功能块,完成多轴协调运动控制。

1 PLCopen 轴组功能块 BufferMode 功能的实现

PLCopen 标准通过定义运动功能块模型及其状态机来实现编程语言的标准化^[17]。PLCopen 功能块的执行建立在轴状态机之上,对于轴组功能块,PLCopen 标准根据多轴协调运动的控制方式,定义了一组相关协调运动的功能块,便于按运动控制的要求在各个状态之间转换,以此建立了轴组功能块的状态机^[18],如图 1 所示。

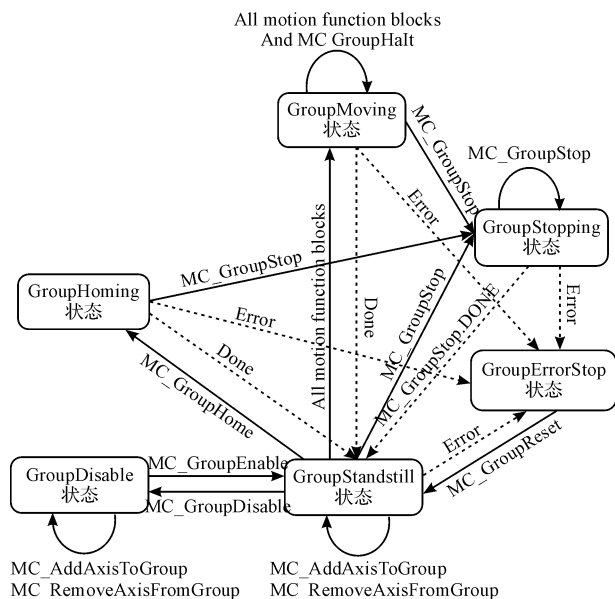


图 1 轴组功能块的运行状态机

PLCopen 标准在定义轴组运动功能块时加入 BufferMode 引脚,BufferMode 功能模式说明如表 1 所示。

表 1 PLCopen 标准定义下的 BufferMode 功能模式

模式	功能
Aborting	立即打断正在执行的运动并改变轴的状态机
Buffered	等待前一个运动完成,此模式为速度的缓和
BlendingLow	等待前一个运动完成,混成速度为前后功能块目标速度的小者
BlendingPrevious	等待前一个运动完成,混成速度为前后功能块目标速度的前者
BlendingNext	等待前一个运动完成,混成速度为前后功能块目标速度的后者
BlendingHigh	等待前一个运动完成,混成速度为前后功能块目标速度的大者

BufferMode 功能有两方面作用:一是可以根据 BufferMode 模式来实现不同的执行方式,包括 Buffered 模式和 Aborting 模式,其中 Buffered 模式包括 Buffered、BlendingLow、BlendingPrevious、BlendingNext 和

BlendingHigh 5 种速度控制模式;二是在缓存模式中,可以选择不同的速度控制模式,实现前后功能块间速度的混成和缓和。本研究采用建立信息队列的方法来实现 BufferMode 功能。当轴组功能块被使能准备开始运动时,会为其建立一个信息队列,使其成为队首功能块,利用信息队列先进先出的执行方式,每次扫描信息队列时只执行队首功能块,后续使能的功能块也将依次被放入队列中,后续使能的功能块根据所选的执行模式来决定是否清空队列,将其移至队首,以此来实现 BufferMode 功能。

功能图例说明如图 2 所示。

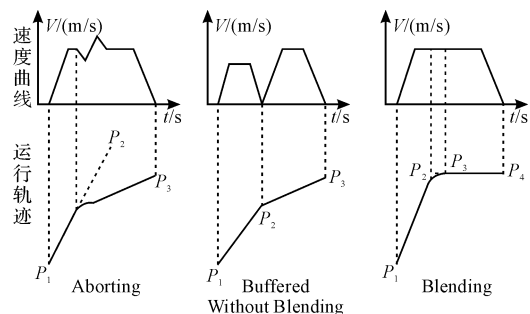


图 2 PLCopen 标准定义下的 BufferMode 功能图例说明

PLCopen 功能块虽然采用图形化编程语言,但不同于传统 PLC 程序只能选择顺序执行的运行方式,轴组功能块能够实现两种执行方式,执行方式如图 3 所示。

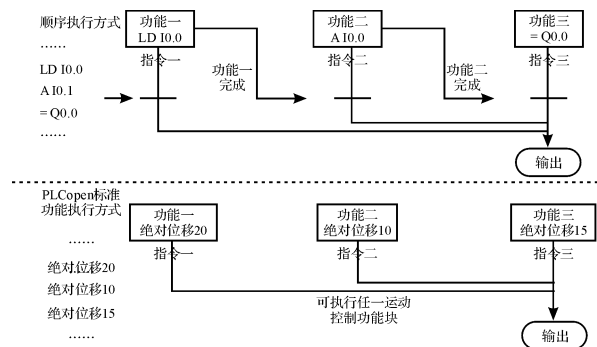


图 3 PLC 指令与 PLCopen 功能块的执行方式

当轴组功能块在执行时,会为功能块建立一个控制信息队列,并且只会运行在控制信息队列队首的功能块,在每个运行周期都会判断队列中的功能块是否已经完成,完成后会将功能块移除信息队列。

当待执行功能块在第一次被执行时,需要判断功能块的模式类型,若选择 Buffered 模式,将功能块存入到信息控制队列中去,等待前面的功能块执行完成(即完成标志位被置位),并被移除信息队列后,再执行该功能块;若选择 Aborting 模式,功能块一旦被使

能,就不再去判断是否有其它同类功能块正在执行,会立即清空信息队列,将该功能块移至队首,等待下一运行周期扫描后运行。但这时轴的速度并不会减速到零,待执行的功能块会将被打断时轴的速度作为初始速度开始运动。这样就通过建立轴组信息队列的方式实现了功能块不同执行方式的运动控制。

BufferMode 功能执行流程如图 4 所示。

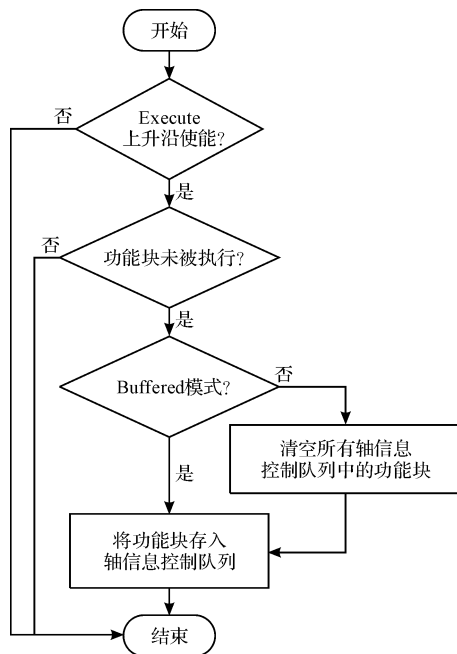


图 4 Buffered Mode 模式执行流程图

同时,在实际应用中,需要根据不同的工况要求选择不同的运动速度控制模式,如恒速涂抹和循环运动等。而且由于多轴协调运动采用插补式运动控制,能够完成复杂路径的运动控制,但在运动过程中并不需要到达或经过所有中间点,可以通过改变速度控制模式来改变速度的大小和方向,根据实际应用需求来修正路径,得到平滑而没有拐角的运行轨迹。

根据信息队列中待执行功能块的速度模式,笔者通过改变队首功能块运行的结束速度和待执行功能块的起始速度,实现了缓存模式中的 5 种速度控制模式。例如选择 BlendingLow 模式,它的混成速度为前后两功能块目标速度的较小值,本研究先比较两个功能块的速度,得出相对较小的目标速度值,然后将前一功能块结束速度设为得出的速度值,重新调用函数库函数进行运动参数的计算,并以新的运动参数重新对功能块进行控制,直到队首功能块执行完毕。而待执行功能块也将前一功能块的结束速度作为自己的起始速度开始运动。这样不仅避免了前一功能块减速到零,而后一功能块再从零开始加速所造成的时间浪费,大大

提高了运动功能块的执行效率,而且还能够根据当前的运行状态改变速度的大小和方向来进行轨迹控制,满足不同的应用要求。

2 PLCopen 轴组功能块运动参数保存及传递的实现

如何对运动参数进行快速高效地保存及传递,是实现轴组功能块功能最为核心的问题。本研究采用了建立结构体的方法来实现运动参数的保存及传递,共建立两个结构体,分别为功能块结构体和轴结构体,功能块结构体用来保存用户输入的运动参数,轴结构体则用来传递参数和保存轴的实时运动状态信息。运动参数保存及传递的解析图如图 5 所示。

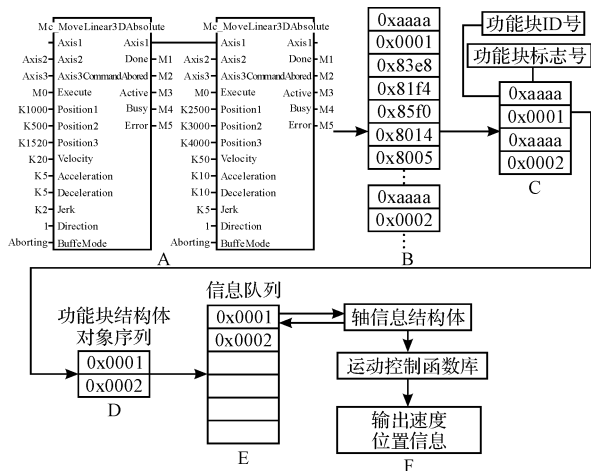


图 5 参数保存及传递解析图

首先如 A 部分,用户编写功能块程序,如果直接将程序进行编译,会因为输入参数过多,产生过多的指令,如 B 部分,所以要在对参数进行预处理简化,结果如 C 部分。再将简化后的参数保存到功能块结构体中,如 D 部分,完成了参数的保存。参数的传递包括 E、F 两部分。E 部分是将被使能的功能块压入到信息队列中。在功能块准备开始运行时,将运动参数从功能块结构体传递给轴结构体,轴结构体通过调用运动函数库进行运动控制,最后输出参数信息,如 F 部分。

在对参数进行保存时,由于轴组运动功能块的输入输出参数较多,如果在每个扫描周期都对所有参数进行读取,会因为过多的参数读取影响执行效率,因此进行循环扫描的阶段之前,需要对输入输出参数进行预处理简化,如图 5 中 C 部分。轴组运动功能块通过预处理把原先占据很多行的参数指令,保存到一个功能块结构体 Axes_Group_Ref 对象中去,保留原本的功

能块标示号,如轴组直线运动功能块的标示号为 0xaaaa,并加入运动功能块的 ID 号,如 0x0001 和 0x0002,它们保存功能块的所有参数信息。运动功能块 ID 号记为功能块全局唯一标识符,不仅不同功能块的标识符不同,而且同一种功能块在不同实例中标识符也是不相同的。在每次进行扫描执行的时候,通过功能块全局唯一的标识符,就能找到该功能块在此次调用时相应的功能块参数,这样预处理大大提高了运动功能块的执行效率,节省了解析执行的运行时间。同时,预处理还包括对用户输入参数的合法性进行判断,其中主要包括:轴是否被使能,轴号是否超过轴号上限,输入参数如目标位移、目标速度、加速度等运动参数结合当前运行速度是否能够达到功能块的控制要求,这样从软件层面保证运行参数的正确性,如果功能块输入参数不能满足控制要求,则功能块输出引脚的错误标志位置位。

相较于参数保存为静态地一次性保存过程,参数传递则是需要实时性地进行数据交互。在运行过程中解释执行参数指令时,将上升沿使能触发的功能块存入轴信息控制队列中,并对功能块的输出引脚忙碌标志位置位,此时功能块对其他上升沿信号不再进行反应,这样就避免了功能块被重复调用。每次解析执行的时候,每个周期内只执行轴控制信息队列中队首功能块,当队首功能块首次被执行时,根据轴当前的运行状况再一次判断运动参数的合法性,如果不能达到运动控制的要求,则切换轴运行状态机至错误状态,如果运动参数合法,则将队首功能块的信息参数传递给轴结构体对象,并根据功能块的类型改变轴的相应的运行状态,在这一过程中主要实现传递运动参数和根据运动参数改变轴运行状态机。之后每个扫描周期内,本研究根据轴的状态机调用相应的函数库中的函数计算速度、加速度及位置值来实现相应的控制要求,并将实时的运动参数传递到轴结构体中,保存在轴结构体的链表里。当轴组功能块运行到目标位置时,本研究就将队首功能块移除轴信息队列,并对功能块的完成标志位进行置位操作。

3 PLCopen 轴组功能块的实验验证

该实验采用工控机 + PMAC 运动控制卡的架构,以 PMAC 运动控制卡为主控单元构建控制系统的硬件平台。运动功能块控制结构图如图 6 所示。

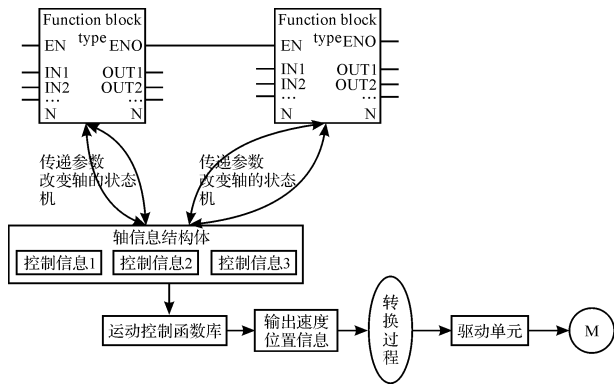


图 6 运动功能块控制结构图

本研究首先在工控机编写运行程序,再对功能块的参数进行保存及传递,通过调用运动函数库中的控制算法输出参数信息,并转换成对应的物理信号,最后利用 PMAC 的缓存模式将物理信号实时性地传输给驱动单元,驱动单元接收信号后驱动电机运动。以调用轴组绝对位置直线运动功能块(MC_MoveLinearAbsolute)为例,对轴组功能块和 BufferMode 功能进行实验验证,根据运行程序中轴结构体中保存的实时运动数据,绘出各轴的速度位移曲线。

实验中调用了 3 个轴组绝对位置直线运动功能块,采取人工使能的方式,功能块的参数值如表 2 所示,采用 S 形加减速算法。

表 2 轴组直线运动功能块输入参数

参数名称	功能块一	功能块二	功能块三
轴一目标位置/mm	1 600	2 200	4 500
轴二目标位置/mm	1 200	3 800	4 200
轴三目标位置/mm	800	5000	4 800
目标速度/(mm · s ⁻¹)	40	55	70
加速度/(mm · s ⁻²)	5	5	5
减速度/(mm · s ⁻²)	5	5	5
加加速度/(mm · s ⁻³)	2	2	2
BufferMode	Aborting	Blending-Low	Blending-High

实验具体流程如下:

(1) 在工控机输入运行程序,输入界面如图 7 所示。

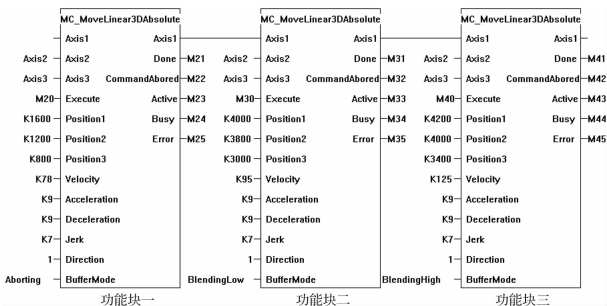


图 7 轴组直线运动功能块输入界面

(2) 对用户编写的程序编译转化,将功能块的运动参数经预处理后保存到功能块结构体中。

(3) 当输出寄存器检测有上升沿使能信号触发时,将功能块一存入到信息队列中,功能块一的执行模式为 Aborting 模式,这时将信息控制队列中的等待执行的功能块全部清空后再存入该功能块。

(4) 在每个扫描周期内,只执行信息队列中队首功能块。在队首的功能块一首次被执行时,会将检验合法后的运动参数传递给轴结构体,并根据功能块的类型改变轴状态机,若此时输入的参数不合法,则切换轴状态机至错误停止状态。

(5) 轴信息结构体调用运动函数库,计算输出轴每个周期中运动参数信息,并将实时的运动参数保存到轴结构体中。当队首的功能块完成控制时,将队首功能块移出轴信息队列并对功能块的完成标志位置位。

(6) 对于功能块二和功能块三,重复步骤(3)~步骤(5),由于它们的执行方式为 BlendingLow 模式和 BlendingHigh 模式,有两点区别:①在信息控制队列中等待前面的功能块执行完成后再执行该功能块;②在调用函数库时速度设置不同。

轴一、轴二和轴三的速度和位置曲线如图 8 所示。

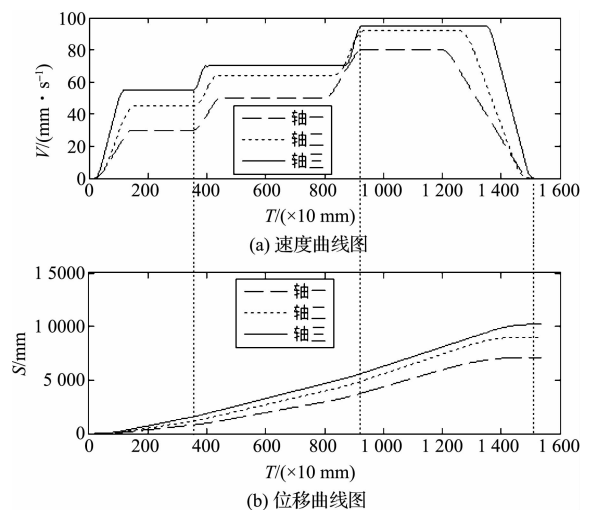


图 8 运动功能块的速度和位移曲线

在 A 点处,功能块一以前后两个功能块中较小的目标速度(即功能块一的目标速度)结束运动,在 B 点处,功能块二以前后两个功能块中较大的目标速度(即功能块三的目标速度)结束运动,在 C 点处,功能块三完成运动并停止。

实验结果表明,结构体队列法能够解决轴组功能块需要多种控制模式和运动参数保存及传递的问

题,功能块中的各轴能够实现多轴协调运动控制。同时,功能块一和功能块二之间的速度混成符合 BlendingLow 模式的要求,功能块二和功能块三之间的速度混成符合 BlendingHigh 模式的要求,证明了功能块能够完成速度的混成, BufferMode 功能实现正确。

4 结束语

(1)本研究采用建立信息队列的方法实现了 PLCopen 标准定义功能块中 BufferMode 功能,能够实现多种控制方式,包括缓存和立即打断两种执行模式,以及缓存模式下的 5 种速度控制模式,实现了功能块之间速度的混成与缓和。

(2)本研究采用建立结构体的方法实现了运动参数的保存及传递。这样的预处理显著地简化了程序,提高了运行效率。

(3)基于 PLCopen 标准的多轴协调运动功能的实现,使运动控制软件独立于硬件平台,增强了运动控制软件的可复用性。基于 PLCopen 标准搭建的工程软件平台可以直接应用于包括数控机床、机器人和通用运动控制器等,也可以应用于软、硬件一体的 ARM、PLC 等系列产品。

参考文献(References):

[1] 郗志刚,周宏甫.运动控制器的发展与现状[J].电气传动自动化,2005,32(3):5-10.

[2] SOLIMAN D, FREY G. Verification and validation of safety applications based on PLCopen safety function blocks[J]. **Control Engineering Practice**,2011,19(9):929-946.

[3] EELCO VAN DER WAL. PLCopen 运动控制库正在改变工业控制的发展方向[J].国内外机电一体化技术,2006,29(4):50-52.

[4] 刘艳强,宋永立.基于 PLCopen 的数控机械控制器研究与开发[J].制造业自动化,2013,35(2):63-67.

[5] 彭 瑜.支撑智能制造的 PLCopen 规范和技术[J].自动化仪表,2015,36(10):1-8.

[6] KIM I, KIM T, SUNG M, et al. An open-source development environment for industrial automation with EtherCAT and PLCopen motion control[C]// **IEEE 18th Conference on ETFA**. Cagliari: IEEE,2013:1-4.

[7] 金丽娟,严 义,刘 罡.基于 IEC 61131-3 的运动控制模块设计[J].机电工程.2013,30(6):759-763.

[8] 张丕鑫.基于 PLCopen 的运动控制功能块研究与实现[D].大连:大连理工大学机械工程学院,2011.

[9] 罗林丹,包 健.PLCopen 运动模块参数传递方法的研究[J].机电工程,2014,31(7):945-950.

[10] SÜNDER C, ZOITL A, MEHOFER F, et al. Advanced use of PLCopen motion control library for autonomous servo drives in IEC 61499 based automation and control systems [J]. **e & i Elektrotechnik und Informationstechnik**, 2006,123(5):191-196.

[11] 郑仲谦.基于 PLCopen 的开放式运动控制器研究与实现[D].广州:华南理工大学机械与汽车工程学院,2014.

[12] 王 翰,宋 宝,唐小琦.基于 PLCopen 标准的运动控制系统设计[J].华中科技大学学报,2014,42(1):10-13.

[13] 丛 爽,刘 宜.多轴协调运动中的交叉耦合控制[J].机械设计与制造,2006,41(10):166-168.

[14] 张建国.基于滑模变结构控制的多轴协调运动控制策略研究[D].济南:山东大学控制科学与工程学院,2007.

[15] 胡海涛.二维运动支架的研制及多轴协调运动控制方法的研究[D].西安:西安电子科技大学机械电子工程学院,2012.

[16] 杨鹏程,佃松宜.多轴协调运动控制在某连续式风洞应用研究[J].计算机测量与控制,2015,13(9):3029-3030.

[17] 战 明,肖秀珍.IEC 61131 标准以及 PLCopen 国际组织介绍[J].国内外机电一体化技术,2007,30(3):61-63.

[18] PLCopen. Function Blocks for motion control; part 4-Coordinated Motion[S]. Netherlands: PLCopen,2008.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

王夫康,张得礼,周 伟. PLCopen 轴组运动功能块的研究与实现[J].机电工程,2016,33(12):1477-1482.

WANG Fu-kang, ZHANG De-li, ZHOU Wei. Research and implementaion of the group function block based on PLCopen[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(12):1477-1482.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>