

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.01.017

可快速配置的多轴装配系统控制软件设计

黄 灿, 卜林森*, 王 珉, 陈文亮

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要:针对飞机装配系统控制软件重用性低、开发难度高等问题,对装配系统控制软件的架构、系统的组织方式、数据的存储和处理等方面进行了研究。提出了一种基于组件和配置文件技术的装配系统控制软件开发方法,设计了开放式的软件架构、基于组件化和配置文件的功能模块,以及基于 XML 配置技术的系统配置方法。研究表明:该软件平台具有很强的伸缩性和可复用性,利用系统配置文件更替部分组件,可以快速配置出面向不同装配系统的控制软件,后续开发者只需要遵循组件接口的标准,所开发的组件就能为系统所加载。

关键词:装配系统;组件;配置文件;控制软件

中图分类号:TP273;V262.4

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)01-0084-06

Control software of quickly configurable multi-axis assembly system

HUANG Can, BU Lin-sen, WANG Min, CHEN Wen-liang

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

Abstract: Aiming at the problems of low reusability and high difficulty in the development of control software for aircraft assembly systems, the architecture and organization of the control software and the storage and processing of data were studied. A method of developing control software for multi-axis assembly system based on component and configuration file was proposed. An open software architecture, functional modules based on componentization and configuration files, and a system configuration method based on XML configuration technology were designed. The results indicate that the software platform is highly scalable and reusable. Utilizing the system configuration file to replace some components can quickly configure the control software for different assembly systems. Subsequent developers only need to follow the standard of component interfaces, then the components can be loaded by the system.

Key words: assembly system; component; configuration file; control system

0 引 言

随着我国“中国制造 2025”战略^[1]推进和我国飞机制造的需求不断扩大,越来越多的自动化装配设备被运用到飞机装配中^[2]。为了适用于不同的工况和加工对象,当前飞机多轴装配系统也产生了较多的分支。主要的发展方向有轻型柔性化机器人、柔性工装、全自动钻铆机等^[3]。国外的系统有意大利 BC 公司为空客和波音开发的龙门式机器人自钻铆加工系统^[4],用于波音 737 的机器人制孔系统^[5],德国宝捷开发的

多壁板装配单元自动钻铆机 MPAC^[6],EI 和空客开发的 GRAWDE 自制孔系统^[7]等。我国在自钻铆设备的开发上也取得了不错的成果,如机器人自制孔系统^[8]、爬行机器人钻铆系统^[9]及龙门式自动钻铆机^[10]等。

在控制软件的开发方面也有技术进展。门昌华等^[11]以 PC + Pmac 的结构搭建了六自由度机器人的开放式控制系统^[12],并通过模块化^[13]的软件开发方法,开发了上位机控制软件,使得软件具有模块化的诸多优点;谢峰等^[14]利用了可重构的软件设计思想

收稿日期:2018-05-04

作者简介:黄 灿(1993-),男,江苏兴化人,硕士研究生,主要从事飞机数字化装配等方面的研究。E-mail:907469104@qq.com

通信联系人:卜林森,男,副教授,硕士生导师。E-mail:bls803@sina.com

设计了移动机器人控制软件^[15-17]。以上的研究过程促进了软件的柔性化^[18],利用了软件模块化和可重构的思想,为软件带来了更优的性能。但这些软件的开发仍是针对特定的系统的。随着加工对象的多样化和工况的复杂化,研究人员需要使用和管理越来越多类型的装配系统。这些装配系统往往结构不一,即使是全自动钻铆机这一个门类,就包括了 C 型、D 型、龙门型等多种不同的结构。飞机装配系统是一个复杂的机电系统,如果仍用以往的经验来开发控制软件,会导致大量的时间消耗,也不利于工作人员后期对多系统的操作和管理。

随着新型飞机装配系统的出现,可以发现这些系统除了机械结构本体上存在差异,其系统的搭建、实现的目标功能都非常相近。因此,本研究从简化飞机装配系统控制软件开发的流程和降低开发难度的角度出发,提出一种基于组件和配置文件的飞机装配系统控制软件开发方法。

1 控制软件总体设计

本文提出的基于组件和配置文件的飞机装配系统控制软件开发方法需要在不同装配系统中寻找共性和差异,总体呈现以下特点:(1)控制软件结构上进行组件式的划分,并呈现通用和专用两部分;(2)组件接口标准化;(3)组件数据参数化并由配置文件赋值;(4)由软件的系统配置文件配置系统。

1.1 组件的划分

首先,从飞机装配系统结构和功能的角度出发,抽象出共有的模块体系。

飞机装配系统控制软件结构如图 1 所示。

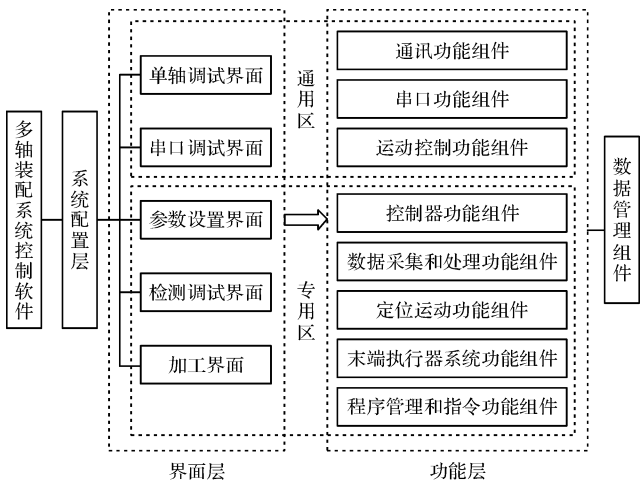


图 1 飞机装配系统控制软件结构

从图 1 可见,软件在结构上忽略了机械结构上的差异,将组件分为通用和专用两个部分;通用组件的功能不依赖系统特征,而专用组件则恰恰相反,它主要体现装配系统功能上的差异性。

具体来看,组件主要包括了进行系统配置的系统配置组件、用于人机交互的各界面组件和实现目标功能的各功能组件。它们组织上既相互独立,又相互关联。独立体现在每一个组件内部实现指定的功能,可以在有特殊需要时拆卸更换部分组件而不影响系统的使用;关联则一方面体现在界面组件是功能组件使用的载体,界面组件仅实现交互,具体功能的实现需要调用对应功能组件的服务;另一方面由于通用和专用的异化,为了保证通用组件的通用性,通用组件是不能够调用专用组件的服务的。最终,不论是界面组件、功能组件或是数据管理组件,都由系统配置组件依据读取的配置文件完成对应的装载配置。

1.2 组件接口的定义

接口在定义时要从两个方面考虑:(1)界面组件和功能组件接口的不同;(2)专用组件和通用组件的不同。

由于界面层提供服务时依托了交互窗口,仅需要将组件的窗口指针提供给客户,实现窗口的显示或关闭。对于界面层而言,不论通用专用,它们对外的接口形式是一致的。

功能组件在开发时,先定义虚基类的接口类声明,通过组件内一个导出函数导出接口指针,就可以使客户通过接口指针调用组件的功能。

通用的功能组件对不同装配系统都输出相同的功能,一般它们是被复用,所以接口定义完成后一般不发生变化。而对于专用的功能组件而言,它们输出的功能取决于各自装配系统。因此,它们提供的服务不论数量和类型都不会一成不变,这就导致了在开发新的功能组件时,需要修改原有的接口文件。

显然,依靠组件接口的标准化定义,界面组件和专用功能组件在系统配置过程中可以快速进行组件插拔,不过由于专用功能组件接口的特殊性,它需要配合对应的专用界面组件一起进行配置。

1.3 组件参数化定义和参数配置文件

组件参数化使得组件在参数层面上不依赖系统特征。其中通用组件参数化使其适用于所有装配系统;专用组件参数化使其适用于结构相同但参数不同的装配系统。参数化的方法是将组件中所需的外部参数定义到同一个结构体中,例如:在单轴调试组件中,需要

用到所有运动轴的参数,本研究将运动轴的参数都定义到名为 Axis 的结构体中,又由于不能事先确定轴的数目,采用 vector 容器来存放多个轴的 Axis 参数。

与参数化相对应的是组件的数据管理,这部分都由数据管理组件完成。数据管理组件是负责存储和管理多轴装配系统中各种参数的组件。它通过读取各种按规律分类存放的配置文件,并存储起来,构成强大的软件配置功能。各项参数如表 1 所示。

表 1 各组件配置文件列表

配置文件	文件参数内容
设备参数	包含了设备机械本体的基本尺寸
运动轴参数	运动轴号、正负限位、标定误差、比例因子等运动参数
传感器参数	传感器的位置参数、性能参数和存储位置等
通信参数	串口:端口号、波特率、数据位、校验位、停止位等网络:IP 地址、端口号等
外围参数	PLC 与 IO 设备的功能参数
加工参数	定位运动速度、主轴转速、主轴转向、钻孔、插钉铆接工艺参数等
配置参数	各组件的装载与否、装载顺序和接口参数

可以看出,除了特定功能组件需求的参数,大部分参数是多轴装配系统通用的。事实上,上述表格每一栏都和一个功能组件相对应。对应组件的参数化和参数配置文件都根据表格中参数来定义。本研究主要通过 XML 文件格式来编写配置文件,XML 文件格式层次性的排布和“关键字-值”的组合使得研究人员能够快速地进行文件的编写和后续的更改。

1.4 系统的快速配置

完成所有组件的开发后,由系统配置组件配置系统,这一组件是系统进行快速配置的关键。将它作为一个单独的部分进行设计,是因为它将服务于整个软件系统。由它作为系统管理单元,首先需要加载 XML 格式的系统配置文件,然后根据配置文件的内容,按需加载其他组件,最终实现界面的快速更新和功能的快速配置。

系统配置文件与图 1 的软件结构一样,由界面层、功能层、数据管理组件和参数配置文件几个部分组成。其中的“关键字”是组件名,“值”则是所选择的对应组件的 dll 文件名。系统配置的过程如图 2 所示。

可以看到,配置的过程实际是配置文件解析过程。在开发过程中,本研究将各组件和文件按照分类放入不同的文件夹,系统配置文件解析时,通过获得配置文件中组件的文件名,搜索指定文件夹,抓取对应文件到运行文件夹,最终完成系统的快速配置。

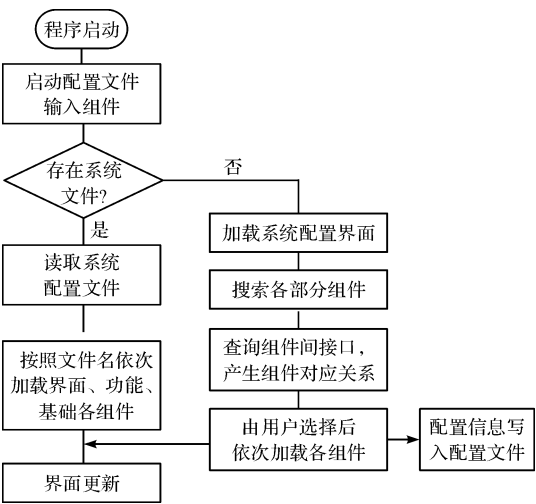


图 2 软件系统配置快速配置过程

2 主要组件的功能

2.1 界面组件

界面层的各组件实现的是软件对外展示的窗口。为了能够更清晰的展现整个系统的功能,将界面层分为 4 个主要的视图区:

(1) 通用界面组件

其中,调试区中的单轴调试和串口调试为通用组件。单轴调试的功能是完成单轴的进给运动,这一功能仅为调试设备而存在。针对单轴的运动控制是通用于装配系统的,本研究仅需要针对不同系统拥有不同数量运动轴的问题对该组件内数据进行参数化设计并编写配置文件即可。

用于构建 PC 与运动轴编码器之间通信的串口组件和实时显示各轴运动状态的状态显示区同样是通用组件。

(2) 专用界面组件

调试区中的检测调试界面、参数修改界面和加工界面显然都是专用的界面组件。由于这一部分往往包含设备的具体特征,且不同系统传感器种类和完成的功能不尽相同,本研究将检测调试设为专用组件。

参数区主要与数据管理组件相关联,在参数修改界面中会向用户呈现可修改或设置的参数,以方便用户快速管理加工过程。加工区集中体现了当前系统加工的工艺流程,辅助用户快速完成加工过程。

2.2 运动控制组件

单独设置控制器组件的意义在于使控制软件的使用不受制于某一种或一个类型的控制器。运动控制组件作为整个软件系统控制的基础,需要从功能的角度

出发,完成对运动控制卡提供的基本指令的高级封装,如轴的起停和 JOG 运动等。这样,当需要更换运动控制卡时,只需要修改该组件内部使用到的底层控制指令,而不影响上层功能的实现。

2.3 专用功能组件

专用功能组件是多轴装配系统的核心,它本身不对外开放,而是由专用的视图组件来调用其功能。从实现过程来看,它实际上从工艺的角度对底层指令进行了更高级的封装。这一部分,主要包括了数据采集和处理、末端的调姿运动控制、末端系统的控制等子组件。

(1)数据采集和处理

飞机装配系统的主要用途即对飞机壁板等部位进行自动化钻孔和铆接,除了其所在的空间位置,还需要测定待加工点的法向,以满足加工所需的垂直度要求,而铆接则还要求保证上下铆头的对中性。这些都需要借助传感器来对目标进行测量和辅助定位。那么对应的数据采集和处理组件就应当对外提供激光器和相机的对应服务,即法向解算和孔位标定。

(2)末端的调姿运动控制

本研究将这些系统的运动分为定位器运动和执行器运动,定位器运动即设备的调姿运动,执行器运动包含末端系统执行部件的运动。

不同设备的定位器运动组件都需要考虑设备的运动学模型,根据设备本体的参数,推导其正逆运动学关系,并求得逆运动学的最优解,然后通过逆运动学将定

位器运动轨迹上任务点的位姿转换为对应各轴的运动量。最后,调用控制器组件完成定位运动。

(3)末端系统执行部件的运动控制

这一组件包含了对末端执行部件运动控制的功能实现。一方面,拥有对钻孔或铆接等运动轴控制;另一方面,拥有对压板压紧等 IO 量的控制。

3 自动钻铆机控制软件的开发

基于以上分析,本研究进行了龙门式自动钻铆机的控制软件设计,该设备如图 3 所示。



图 3 ADRS-G101 自动钻铆机

该自动钻铆机除电主轴外,共有 15 个运动轴,分布在托架系统、上末端和下末端系统中,另外,该设备拥有视觉传感器和由激光测距仪组成的四边形法向检测系统,其控制系统的框架如图 4 所示。

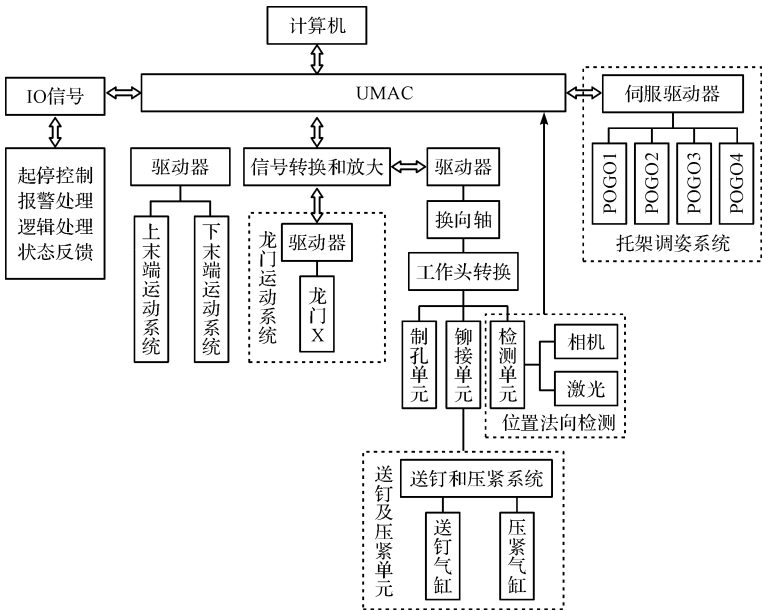


图 4 系统结构图

控制系统采用的是控制器 + PC 的开发式系统搭建方案,控制器选用 Delta Tau Data System 的 UMAC,

上位机通过 TCP/IP 协议与控制器通信,开发采用 Windows 系统下 VS2013 平台完成。

3.1 界面组件的开发

为了管理各界面组件的指针,本研究在软件框架中定义了保存窗口指针的 CShowWndList 类。

(1) 单轴调试组件

该组件的功能是驱动各运动轴,具有一般性,可以复用到任意系统。该组件在软件中实现了钻铆机各运动轴的单独运动进给,且运动形式包含连续运动和给定运动量运动两种。

(2) 检测调试组件

自动钻铆机检测系统由照相机和激光测距两部分组成。传感器如图 5 所示。

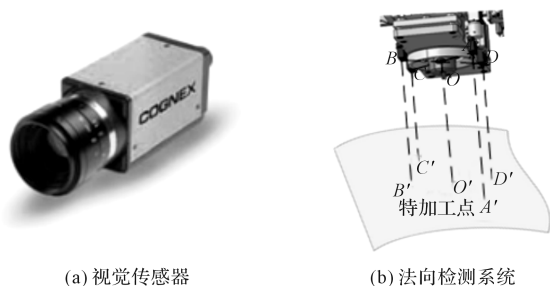


图 5 自动钻铆机检测系统

组件通过调用数据采集和处理功能组件提供的数据处理算法,对传感器的功能进行简单的调试,并将调试的结果输出到界面上。

(3) 串口调试组件

自动钻铆机控制系统采用 R485 串口通信。串口调试组件的作用是通过串口获得各运动轴绝对值编码器的数据,来调试运动轴的零位。

(4) 参数设置界面组件

操作人员对部分加工参数和补偿量进行手动快速设置和修改。该组件会根据设置的数据同步修改配置文件和已初始化的参数变量。

(5) 加工界面组件

其作用是辅助操作人员快速定义加工模式并完成加工工艺过程。主要的控制模式有手动控制和程序控制模式,加工模式有钻铆模式和钻孔模式。

3.2 功能组件的开发

专用功能组件集中反映了装配系统的特征,以下主要实现专用的功能组件组成:

3.2.1 数据采集和处理功能组件

该组件向其他组件提供算法服务,如检测调试界面组件和加工界面组件。根据系统的功能,该组件接口开放了法向检测 NormalDetect 和孔定位 Location 两个功能函数。

其中法向检测系统由 4 个激光测距仪构建而成,激光仪分布在主轴四周,形成一个矩形,且主轴中心线位于矩形的中心位置,如图 5(b) 所示。图中 A 、 B 、 C 和 D 代表 4 个激光发射器起点, A' 、 B' 、 C' 和 D' 为激光发射器在工件上的投影, O 点为待加工点, O 点与其它 4 个投影点可以分别构成 4 个平面 $OA'B'$ 、 $OB'C'$ 、 $OC'D'$ 和 $OD'A'$ 。法向检测功能的实现由两部分组成,首先采集到激光测距仪的数据,即 AA' 、 BB' 、 CC' 和 DD' 的距离,然后计算出各投影点坐标和 4 个平面的法矢,最终利用角度加权的方法,求得加工点的平均法矢。

孔的定位由 COGNEX 视觉传感器独立完成,该传感器拥有独立的数据处理模块,传感器启动和设置后,就可以根据当前镜头的位置分析出孔的位置信息。

3.2.2 位置反解组件

位置反解组件需要为末端的定位运动提供服务。组件接口仅对外开放位置反解 MotionReverse 功能函数。

位置反解组件的内部实现由 3 部分组成,分别为正解运算,反解运算和超程检测。

正解运算通过获取当前各运动轴的当前位置,计算出末端系统,特别是托架系统的位姿;反解运算部分由当前位姿和目标位姿计算出定位系统各运动轴的运动量;最后,将得到的运动量与各轴的限位信息进行比较,将判定为合理的运动量数据对外输出。

3.2.3 末端执行器系统功能组件

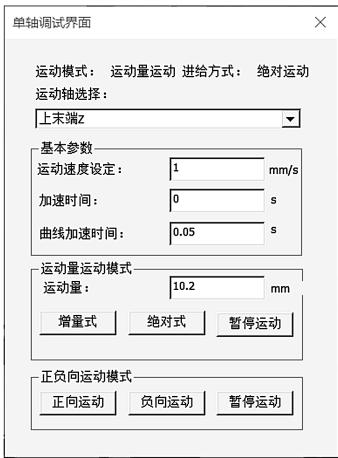
末端执行器系统功能组件由定位器运动组件和执行器运动组件两部分组成。定位器组件需要对外开放上、下末端和托架系统的定位运动功能;执行器运动组件开放的功能有压紧、钻孔、换向、吹钉、送钉、插钉和铆接。

这部分功能函数的实现都是依据输入运动量,定义运动坐标系,生成运动程序,执行运动程序的流程。略有不同之处在于,定位运动是多轴协同运动,而执行运动是单轴的定点运动。

4 具体实例

本研究以自动钻铆机单轴进给为例试验控制软件的控制进程,操作过程如图 6 所示。

这里,对上末端 Z 向运动轴进行进给运动控制,运动速度为 1 mm/s,采用运动量运动模式,进给方式为绝对式,运动量 10.2 mm。



(a) 单轴调试界面

轴号	运动轴	位置(mm)	速度(mm/s)	负限位(mm)	正限位(mm)
1	下末端执行器...	0	0	0.000000	1000.000000
2	上末端执行器Y	0	0	0.000000	1500.000000
3	换向Y2	0	0	0.000000	147.000000
4	钻孔Z5	0	0	0.000000	167.500000
5	插钉Z7	0	0	0.000000	167.500000
6	上末端旋转(r...	0	0	-0.530000	0.530000
7	龙门X	0	0	0.000000	3380.000000
8	下末端旋转(r...	0	0	-1.570000	1.570000
9	上末端Z	10.2	0	0.000000	513.000000
10	下末端铆接Z6	0	0	0.000000	167.500000
11	POGO柱Z1	0	0	0.000000	650.000000
12	POGO柱X1	0	0	0.000000	210.000000
13	POGO柱Z4	0	0	0.000000	650.000000
14	POGO柱Z3	0	0	0.000000	650.000000
15	POGO柱Z2	0	0	0.000000	650.000000

(b) 实时状态显示

图6 自动钻铆机单轴进给

5 结束语

本研究提出了基于组件化的思想和配置文件技术的多轴装配系统控制软件的快速开发方法,通过搭建通用的软件框架,标准化各组件的接口形式,然后由系统配置,快速插拔所需的组件,开发适用于不同硬件平台的控制软件,大大缩短了开发周期。系统具有很好的柔性和可复用性。最后,本研究利用该方法开发了适用于具体设备的功能组件,并通过配置,开发出开放式的自动钻铆机控制软件。

软件开发和测试的结果表明:软件开发效率更高,且拥有很好的扩展性。

参考文献(References):

[1] 周 济. 智能制造——“中国制造 2025”的主攻方向[J]. 中国机械工程, 2015, 26(17): 2273-2284.
[2] 许国康. 大型飞机自动化装配技术[J]. 航空学报, 2008,

29(3):13-13.

[3] 高明辉,张 杨,张少擎,等. 工业机器人自动钻铆集成控制技术[J]. 航空制造技术, 2013, 440(20): 74-76.
[4] 刘宇平,杨宏毅. 打造航空工业自动钻铆设备先锋[J]. 航空制造技术, 2006(12): 60-61.
[5] ATKINSON J, HARTMANN J, JONES S, et al. Robotic drilling system for 737 aileron[C]. SAE 2007 AeroTech Congress & Exhibition. Los Angeles: SAE, 2007.
[6] 邓 锋. MPAC 自动钻铆机[J]. 航空制造技术, 2010(6): 26-29.
[7] HOGAN S, HARTMANN J, THAYER B, et al. Automated wing drilling system for the A380-GRAWDE[C]. Proceedings of the Automated Fastening Conference and Exposition, Montreal: SAE, 2003.
[8] 沈建新,田 威. 基于工业机器人的飞机柔性装配技术[J]. 南京航空航天大学学报, 2014, 46(2): 181-189.
[9] 甘 露,姚艳彬,魏 超. 爬杆机器人制孔系统在飞机装配中的应用研究[J]. 航空制造技术, 2013, 440(20): 80-82.
[10] 赵 辉. 基于 UMAC 的自动钻铆机控制系统研究与开发[D]. 南京:南京航空航天大学机电工程学院, 2014.
[11] 门昌华,关学锋,胡 明,等. 基于 PMAC 的六自由度机器人开放式控制系统开发[J]. 机电产品开发与创新, 2008, 21(4): 4-5.
[12] 吴 琳,谭 营,唐 建. 运动控制技术发展展望[J]. 机床与液压, 2007, 35(7): 231-233.
[13] BALDWIN C Y, CLARK K B. Design rules, the power of modularity[M]. Cambridge: MIT Press, 2000.
[14] 谢 峰,肖晓明,蔡自兴. 移动机器人的可重构控制系统[J]. 控制工程, 2007, 14(5): 535-539.
[15] 柳建飞,张伟中. 新型二自由度移动并联机构设计[J]. 轻工机械, 2017, 35(2): 63-65.
[16] 阎思达,陈雁,陈文卓. 六自由度加油机器人运动特性分析[J]. 液压气动与密封, 2017(11): 26-29.
[17] STEWART D B, KHOSLA P K. The Chimera Methodology: designing dynamically reconfigurable and reusable real-time software using port-based object[J]. International Journal of Software Engineering & Knowledge Engineering, 1996, 6(2): 249-277.
[18] WILLS L, KANNAN S, SANDER S, et al. An open platform for reconfigurable control[J]. Control Systems IEEE, 2001, 21(3): 49-64.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

黄 灿,卜林森,王 珉,等. 可快速配置的多轴装配系统控制软件设计[J]. 机电工程, 2019, 36(1): 84-89.
HUANG Can, BU Lin-sen, WANG Min, et al. Control software of quickly configurable multi-axis assembly system[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019, 36(1): 84-89.
《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>