

“十二五”国家重点图书出版规划项目
先进制造理论研究与工程技术系列

开放式智能数控系统

INTELLIGENT
NUMERICAL CONTROL
SYSTEM WITH OPEN
ARCHITECTURE

韩振宇 李茂月 著
富宏亚 审

哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

“十二五”国家重点图书出版规划项目
先进制造理论研究与工程技术系列

开放式智能数控系统

INTELLIGENT
NUMERICAL CONTROL
SYSTEM WITH OPEN
ARCHITECTURE

韩振宇 李茂月 著
富宏亚 审

哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书面向智能制造,以开放式、智能数控系统的开发与应用为主线,基于哈尔滨工业大学在该领域 10 余年来的研究成果,较全面地介绍开放式智能数控系统的软硬件需求、功能结构框架、开放性技术、STEP-NC 及智能化实现方法,并分析了开放式智能数控系统与工业 4.0、工业互联网、中国制造 2025 等规划的联系。具体内容包括:开放式智能数控系统的整体架构、开放式控制器的建模与实现、基于 STEP-NC 的全闭环加工、数控系统的智能化及相应的应用实例等。

本书可作为机械制造及其自动化、机械电子及其相关专业研究生教材,也可作为研究院所及相关企业从事数控技术、智能制造、机电一体化研究的科技人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

开放式智能数控系统/韩振宇,李茂月著. —哈尔滨:
哈尔滨工业大学出版社,2017.6

ISBN 978-7-5603-6203-8

I. ①开… II. ①韩… ②李… III. ①开放系统-智能控制-
数字控制系统-研究 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 254703 号

责任编辑 张秀华

封面设计 卞秉利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司

开 本 787mm×960mm 1/16 印张 17.75 字数 300 千字

版 次 2017 年 6 月第 1 版 2017 年 6 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-6203-8

定 价 38.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

机械制造业是国民经济的支柱产业,其发展规模和水平是反映国家经济实力和科学技术水平的重要标志之一。自从 20 世纪 50 年代第一台数控机床诞生以来,数控技术得到了日新月异的发展,成为现代制造系统中必不可少的组成部分,并促进了全球制造业的深刻变革。当前,随着人工智能、微传感器、计算机技术、信息物理系统等技术的迅速发展,现代制造系统正朝着集成化、数字化、柔性化、智能化等方向发展。

2015 年制定的《中国制造 2025》,旨在通过创新驱动、智能转型、强化基础、绿色发展,加快我国从制造大国向制造强国的转变。在这个转变过程中智能制造是主攻方向。为了适应智能制造的发展潮流,新型 CNC 系统无论是在体系结构上还是在功能上,将完全不同于传统的数控系统。另外,伴随着中国制造 2025、德国工业 4.0、美国工业互联网等工业计划的实施,新型 CNC 系统将成为智能制造大系统中的重要节点。无疑,开放式、智能化将是新型数控系统必须具备的特征。

本书对开放式智能数控系统的关键技术进行了深入研究,在分析智能数控系统实施需求的基础上,构建了开放式智能数控系统的总体构架;提出了实现开放式、智能化的软硬件平台;建立了基于 STEP-NC 的全闭环加工系统;将人工智能技术用于数控加工的过程控制、颤振抑制等,实现了智能技术与数控内核的深度融合。本书主要包括以下内容:

1. 开放式智能数控系统的总体构架

为实现开放性、智能化,对数控系统的功能需求进行了分析,确定了系统需满足开放性、实时性要求,需具有完备的数据接口及双向传递机制,需融合人工智能与加工知识等基本要求,明确了软硬件平台的总体方案,构建了由工业 PC 机、SoftSERCANS 通信卡、Windows、RTX 等组成的软件化开放式智能数控系统的开发平台。在比较分析国际上几种开放式体系模式优缺点的基础上,提出了开放式智能数控系统的总

体架构。该架构采用构件/框架结构、客户机/服务器通信模式,使用IDL语言定义接口,使用层级式有限状态机描述数控系统的行为。

2. 开放式控制器的建模与软件实现

利用层级式有限状态机模型(FSM)描述系统的动态行为模型,同时将其用于数据流的表达与控制。为了高效、简单的实施FSM机制,建立了FSM基础类库。依据可重用的软件单元模型,采用面向对象技术,以动态链接库的形式开发了数控系统的软件功能模块,包括:任务协调器、任务生成器、轴组模块、轴模块、自适应控制模块、软PLC及人机界面模块等。根据各模块所完成数控任务实时性要求的不同,采取了不同的开发方法,非实时功能模块以COM组件形式运行在Windows环境下;实时功能模块以实时动态链接库的形式运行在RTX环境中,它们之间通过共享内存进行信息交换。

3. 基于STEP-NC的全闭环加工系统

以STEP-NC标准的描述方法与实现方法为基础,对完整产品加工信息的集成与闭环数据流的建立方法进行了分析,建立了以开放式STEP-NC数控系统为核心的闭环加工系统架构,以消除数控系统与工艺规划系统之间的信息传输屏障,实现了产品设计、工艺规划、产品加工、加工过程控制和加工知识管理等环节之间的动态交互。采用结构化分析方法,建立了闭环加工系统的功能模型。利用面向对象、多线程和共享内存等技术实现了STEP-NC文件解析、高层信息提取和在线刀具轨迹生成等STEP-NC文件在线解释的核心功能。所建立的STEP-NC数控系统能够直接读取和解释STEP-NC文件,不需要后置处理过程,能够实现高层产品加工信息在闭环加工系统中的自由传输,保证加工系统数据流的信息完整与闭环。以平面特征的误差区域修补为对象,实现了闭环加工系统在线检测及加工过程控制;以铣削力的控制为对象,实现了实时加工过程控制。通过实例验证了所提出的STEP-NC数据模型、在线检测及加工过程控制实现方法和实时加工过程控制的可行性。

4. 基于智能化数控系统的过程自适应控制和颤振抑制

针对数控系统的智能化,分析了智能数控系统与智能加工的关系,研究了智能数控系统的传感集成与硬实时采集技术,提出了外部加工参数的在线实时采集及系统实现方案。该方案要求采集过程具有“硬

实时”特性,即不但要保证参数采集的准确、定时,还要保证模块间的任务协调、可控制。基于 SERCOS 通信模式,建立了驱动器技术参数在线实时反馈机制,技术参数主要包括机床的进给速度和主轴转速。进而,以提高铣削的加工效率为目标,研究且实现了基于铣削力约束的在线过程参数自适应智能控制的相关技术。针对在线铣削颤振抑制技术,分析了三向切削力和振动加速度传感器的各向分量在颤振监控过程中的时域和频域敏感信号特征,提出了快速傅里叶变换技术及在颤振过程中对信号有效信息的提取技术,建立了颤振频率与主轴转速间的关系模型,为实现颤振抑制提供了理论基础。最后,在智能数控系统平台上,分别开展了基于切削力约束的加工实验和针对连续变切深铝合金工件的在线颤振抑制加工实验,验证了所开发的开放式智能铣削数控系统的有效性和可行性。

本书第 1,2,4 章由哈尔滨工业大学韩振宇编写;第 3,5 章由哈尔滨理工大学李茂月编写。另外,哈尔滨工业大学付云忠参与了第 5 章部分内容的编写,哈尔滨工业大学邵忠喜参与了第 2 章部分内容的编写,石家庄铁道大学胡泊参与了第 4 章部分内容的编写,哈尔滨工业大学金鸿宇参与了第 3 章部分内容的编写。全书由韩振宇统稿定稿。

本书内容主要来源于哈尔滨工业大学数控技术研究室的科研成果,多届博士研究生在此领域取得博士学位,在此谨向梁宏斌、李霞、朱晓明、刘涛、马雄波、陈良骥、梁全等博士一并致谢。

哈尔滨工业大学富宏亚教授审阅了全书,并提出许多宝贵意见,在此表示衷心感谢。

本书的出版得到哈尔滨工业大学研究生教育教学改革研究项目(编号 JCYJ—2017014)的资助。

由于作者水平有限,书中难免有不足、不妥之处,恳请各位读者、同行批评指正。

作 者

2017 年 6 月

目 录

第1章 绪论

- 1.1 开放式数控系统 /1
 - 1.1.1 背景 /1
 - 1.1.2 研究进展 /3
 - 1.1.3 软件数控 /8
- 1.2 智能数控系统 /10
- 1.3 开放式智能数控与智能制造 /14
 - 1.3.1 工业4.0 /14
 - 1.3.2 工业互联网 /15
 - 1.3.3 中国制造2025 /16
 - 1.3.4 大数据与智能制造 /18
- 1.4 开放式智能数控系统的主要特征 /20

第2章 开放式智能数控系统的整体架构

- 2.1 智能数控系统实施需求分析 /22
 - 2.1.1 系统需具有开放性 /22
 - 2.1.2 系统需满足实时性要求 /23
 - 2.1.3 系统需具有完备的数据接口及双向信息传

递机制 /24

- 2.1.4 系统需融合人工智能与加工知识模型 /25
- 2.2 开放式智能数控系统软硬件平台 /27
 - 2.2.1 硬件平台 /27
 - 2.2.2 软件平台 /31
- 2.3 体系模式 /35
 - 2.3.1 欧盟的 OSACA 工程 /36
 - 2.3.2 日本的 OSEC 工程 /37
 - 2.3.3 美国的 OMAC 工程 /37
 - 2.3.4 三个工程项目的比较 /38
- 2.4 整体架构 /40
 - 2.4.1 采用构件/框架结构 /41
 - 2.4.2 使用客户机/服务器通信模式 /45
 - 2.4.3 使用 IDL 语言定义接口 /47
 - 2.4.4 有限状态机技术 /50
 - 2.4.5 系统架构 /51

第3章 开放式控制器的建模与软件实现

3.1 基于有限状态机的动态行为模型 /57

3.1.1 机床的行为建模 /57

3.1.2 行为建模方法 /58

3.1.3 有限状态机模型的软件化 /59

3.1.4 模块通用的行为模型 /62

3.1.5 数据流的控制与执行层 FSM /64

3.1.6 任务单元的嵌套与模块间的协作 /67

3.2 任务生成器和任务协调器 /69

3.3 轴组模块 /73

3.4 自适应控制模块 /74

3.5 软 PLC 技术 /77

3.5.1 开发系统 /78

3.5.2 运行系统 /85

3.6 人机界面 /90

第4章 STEP-NC 技术

4.1 STEP-NC 产生的背景 /92

4.1.1 ISO 6983 标准的发展瓶颈 /92

4.1.2 产品数据交换标准的发展 /94

4.1.3 STEP-NC 的出现 /97

4.2 STEP-NC 文件结构 /99

4.2.1 STEP-NC 描述语言 EXPRESS /100

4.2.2 STEP-NC 程序文件结构划分 /105

4.2.3 两种编程标准的对比 /109

4.2.4 STEP-NC 数控系统的类型 /112

4.3 STEP-NC 闭环加工系统构架 /114

4.3.1 闭环制造加工过程控制需求分析 /115

4.3.2 基于 STEP-NC 的闭环加工系统架构功能模型 /118

4.4 开放式 STEP-NC 数控系统软件内核设计与开发 /128

4.4.1 软件内核结构设计及信息交互实现 /129

4.4.2 软件内核功能模块设计 /131

4.4.3 软件内核运行与协调机制 /138

4.5 在线 STEP-NC 文件解释实现 /140

4.5.1 STEP-NC 数据模型到 C++ 的映射 /140

4.5.2 STEP-NC 解释应用程序接口设计与实现 /143

4.5.3 在线 STEP-NC 文件解析实现 /144	5.1.2 智能加工 /196
4.5.4 在线刀具轨迹生成实现 /148	5.1.3 智能加工技术研究现状 /199
4.5.5 STEP-NC 信息输出实现 /153	5.1.4 智能加工关键技术 /200
4.6 STEP-NC 闭环加工中过程控制的实现 /155	5.2 智能数控系统实现技术 /203
4.6.1 实现原理 /155	5.2.1 传感集成技术 /203
4.6.2 加工过程信息 STEP-NC 数据模型 /158	5.2.2 硬实时采集技术 /204
4.6.3 开放式 STEP-NC 数控系统加工过程控制功能集成 /165	5.2.3 智能策略高效算法实现 /209
4.7 STEP-NC 制造特征加工实验 /174	5.3 基于切削力约束的智能数控系统研究 /213
4.8 基于 STEP-NC 的在线检测及加工过程控制实验 /178	5.3.1 开放式智能数控系统控制器行为建模 /213
4.9 基于 STEP-NC 的实时加工过程控制实验 /182	5.3.2 切削力控制数据流的模块间传递技术 /216
4.9.1 模糊恒力铣削算法集成与验证 /183	5.3.3 进给倍率修调数据流的模块间传递技术 /218
4.9.2 基于 STEP-NC 标准的恒力铣削实验 /188	5.4 在线智能颤振抑制技术研究 /220
4.10 STEP-NC 发展的瓶颈及未来发展趋势 /194	5.4.1 铣削颤振的监控技术 /221
第 5 章 数控系统的智能化	5.4.2 颤振监控敏感信号实验研究 /221
5.1 智能数控系统与智能加工的关系 /196	5.4.3 颤振信号有效信息的提取 /233
5.1.1 智能数控系统 /196	5.4.4 变主轴转速抑制颤振

的算法研究 /240	5.5.3 智能控制加工实
5.4.5 在线颤振抑制数控实	验 /249
现技术 /243	5.5.4 非智能与智能实验结
5.5 智能数控系统加工实验研	果对比分析 /251
究 /246	5.5.5 在线颤振抑制实
5.5.1 基于切削力约束的加	验 /252
工实验 /246	参考文献 /257
5.5.2 非智能控制加工实	名词索引 /268
验 /247	

第 1 章 绪 论

1.1 开放式数控系统

1.1.1 背景

从控制器的发展历程可以看出,传统控制系统是一种专用的封闭的体系结构。这种结构的系统硬件是专用的,各厂家的主板、伺服电路板是专门设计的,厂家之间产品无互换性。系统软件结构也是专用的,很难移植和扩展。由于控制软件专用性较强,它的使用依赖于专用控制系统的硬件体系结构和软件设计思想,因此,机床制造商对控制器供应商的依赖性很大。这种数控系统很难或几乎不可能在原来基础上再加入新的控制方案、控制策略和扩展新功能。

随着技术、市场、生产组织结构等方面的快速变化,数控技术发展面临着许多新的挑战。包括不断出现新的加工需求,要求数控系统具有迅速、高效、经济地面向客户的模块化特性和软硬件重构能力;改变以往数控系统的封闭性设计模式,降低生产厂家对控制系统的高依赖性和对数控软件、硬件、控制策略的耦合性,适应未来车间面向任务和定单的生产模式^[1,2]。这就要求 CNC (Computer Numerical Control) 控制器必须能够被用户重新配置、修改、扩充和改装,并允许模块化地集成传感器、加工过程的监视与控制等系统,不必重新设计硬件和软件。要达到这一目的,最有效的途径就是实现开放式数控系统。数控系统的制造商、集成者和用户能够自由地选择数控装置、驱动装置、伺服电机、应用软件等数控系统的各个构成要素;用规范的、简便的方法将这些构成要素组合起来,完成某一控制任务。相关技术的飞速发展和市场的强烈需求,促进了数控系统由专用型封闭式控制向通用型开放式体系结构转变和发展,进而开放式数控系统应运而生^[3,4]。

目前,开放式数控系统还缺乏统一、明确的概念。IEEE 是这样定义开放系统的^[5]:“具有下列特性的系统可称为开放系统:符合系统规范的应用可运行在多个销售商的不同平台上,可与其他系统应用互操作,并且具有一致风格的用户交互界面。”

针对开放式数控系统的应用需求,普遍认为,开放式数控系统具有以下五个基本特征,这也是衡量数控系统开放程度的准则^[6,7]。

1. 可互换性(interchangeability)

系统高度模块化,并且这些功能模块具有完全开放的标准接口。不同厂商的功能模块可相互替代,具有互换性,在构成系统时可根据各部件的性能、价格等因素选择不同厂家的产品,无需受唯一供应商的控制。

2. 可移植性(portability)

可移植性是指系统的计算平台无关性,源代码要最大限度地兼容多种计算平台。

3. 可伸缩性(scalability)

可伸缩性包括两重含义:一方面是指一种系统可以运行在不同规模的计算平台上,另一方面是指其规模完全是可定制的,集成商可以根据控制对象(机床)的特性、加工条件或用户的要求,增减系统的功能模块或调节系统参数,实现控制目标。

4. 互操作性(interoperability)

互操作性主要包括系统内部标准部件之间的互操作性,不同系统之间的互操作性,系统和外部应用之间的互操作性。这不仅要求系统的各个功能部件具有开放的数据接口,而且要求系统的实现要完全遵循支持数据交换的软件规范,如面向网络、面向对象等。

5. 可扩展性(expandability)

可扩展性是用户或集成商扩展部分部件的功能,使系统具有增强的性能表现。例如,在一个可扩展的数控语言解释器中,可由用户按照自己的需求或爱好,扩充新的代码。

数控系统的开放性,根据不同的认识和所能达到的技术水平,可以分为图 1.1 所示的三个开放等级。

(1) 人机接口开放。

提供给用户自己制定适用于各自特殊要求的操作界面和操作步骤

的途径,但系统的内核被完全封装,用户不能改变系统内部程序和算法,属于非实时控制的开放,一般使用于基于 PC 作为图形化人机控制界面的系统中。目前的商业数控系统一般采用此开放模式。

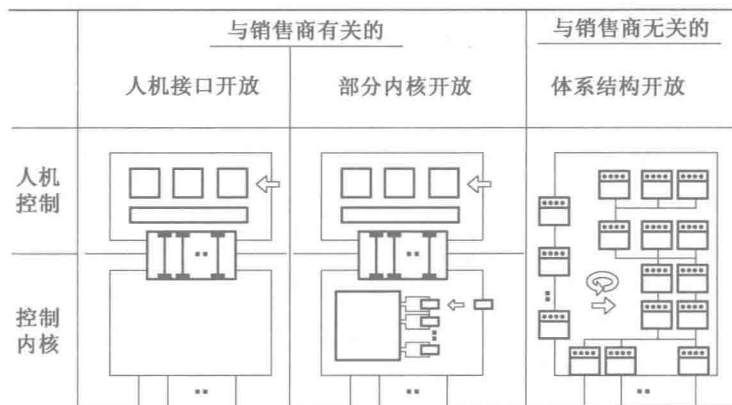


图 1.1 控制系统的开放级别

(2) 部分内核开放。

不仅可以定制操作界面,还提供 NC 内核的接口协议,用户可以根据接口协议集成用户专用模块,来完成一些实时性不强或非周期性的任务,但强实时性的控制任务仍需由 NC 来完成。

(3) 体系结构系统开放。

数控系统的体系结构是开放的,具备开放系统的所有基本特征。用户根据自身需要,可以选择系统制造商或第三方制造商的软硬件模块,甚至自行开发用户专用模块,按照开放体系结构的标准和规范,组成性能/价格比最高的 CNC 系统。

1.1.2 研究进展

自 1992 年以来,欧盟、美国、日本等制造业发达的国家相继开展了大规模的开放式数控系统的研究项目,主要如下:

1. 欧洲 OSACA 项目

OSACA (Open System Architecture for Control within Automation System) 项目是由欧洲共同体国家的 22 家控制器开发商、机床生产商、

控制系统集成商和科研机构联合发起的,始于1992年11月,先后经历了三个阶段,结束于1998年7月,历经66个月,投入96人/年,投入资金为1230万欧洲货币单位。其主要目标是建立一个开放性的、与厂商无关的控制器体系结构^[8]。

从图1.2所示的OSACA体系结构可以看出,OSACA控制系统分为两个部分:应用软件和系统平台。应用软件由一组被称为“体系结构对象 AO(Architecture Object)”的功能模块组成,这些AO具有很强的功能独立性,是OSACA体系结构的灵魂,应用软件可运行在多种OSACA兼容的平台上。系统平台由系统硬件和系统软件组成,系统硬件主要指控制系统的各种电子部件,如处理机、I/O(Input/Output)模块等;系统软件包括操作系统、通信系统及附加的各种设备的驱动程序。AO之间的通信是采用面向对象的信息模型(通信对象)来实现的,以客户/服务器模式为基础。通信对象包括变量对象、进程对象、事物对象^[9,10]。

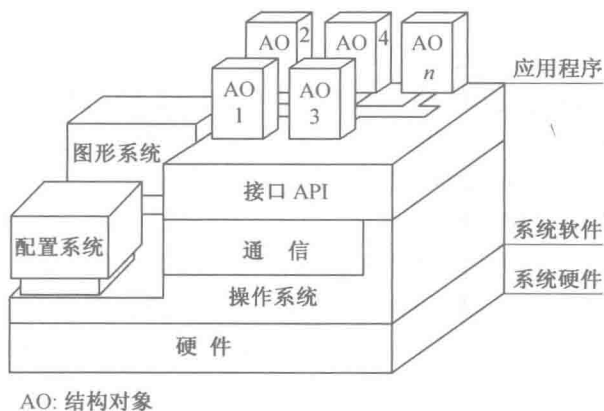


图 1.2 OSACA 体系结构

2. 日本 OSEC 项目

1994年12月日本三个机床制造商、两个信息系统公司和一个控制器制造商联合发起了OSEC(Open System Environment for Controller)项目。该项目共分三个阶段,结束于1999年3月。OSEC的目标是为下一代工厂自动化设备控制器,建立一个开放性的体系结构规范,并开

发相应的接口标准^[11]。

OSEC 采用功能组定义开放式数控系统的体系结构,如图 1.3 所示。OSEC 体系结构主要包含 4 个功能组:运动生成、资源管理、加工控制、设备控制。每个功能组由若干个功能模块组成,每个功能模块是一个对象形式的软件元件,并封装了 OSEC API (Application Program Interface)形式的对象消息作为接口协议。功能模块之间不形成层次关系,通过 OSEC API 形式的消息连接起来进行通信和协作。OSEC 体系结构只定义功能模块的服务内容和消息接口协议,由控制器厂商进行功能模块的个性化实现,符合接口协议的功能模块在 OSEC 控制器中可以“即插即用”。

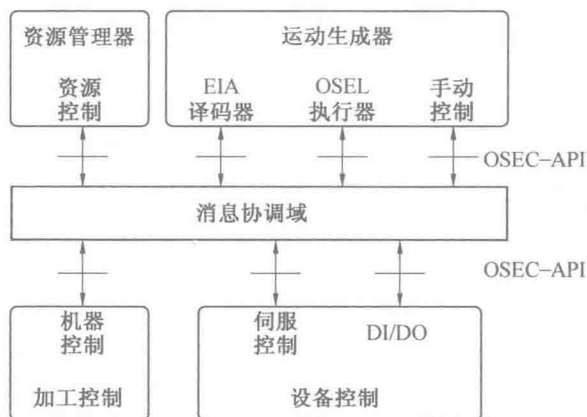


图 1.3 OSEC 体系结构

3. 美国 OMAC 项目

1994 年 8 月,美国通用、福特、克莱斯勒三大汽车公司联合出版了“Requirements of Open, Modular Architecture Controllers for Applications in the Automotive Industry”。在这份文件中体现了许多新颖的技术思想,切实反映了当时制造业的应用需求。事实上,这份文件成为 OMAC 项目的研究指南。1997 年 2 月,OMAC 用户组成立,对 OMAC 感兴趣的组织随时可以加入,参与相关的技术开发。

美国 OMAC 的主要目标是明确用户对于开放体系结构控制器的应用需求,开发一种满足这种需求的公共 API,为开放式控制器技术开

发、实现和商品化中的各种问题提供共同的解决方案^[12,13]。

OMAC 采用组件技术实现即插即用的模块化,采用接口类的形式定义 API。OMAC 定义了各种不同“尺寸”和“类型”的可重用即插即用“组件”,这是广义的组件,实际上包括 COM(Componet Object Model)组件、模块、任务,是应用程序的重要构成。每一个“组件”都具有各自的有限状态机实现其特定功能。模块是指包含组件的容器,任务是指封装可编程功能行为的组件,包括一系列待完成的步骤,如启动、停止、暂停、恢复。当控制器工作时,任务可以多次运行。在分布式通信情况下,基于组件的技术采用代理存根的方式处理跨进程的方法调用。OMAC 项目组给出了一个开放式控制器的结构参考范例,如图 1.4 所示。

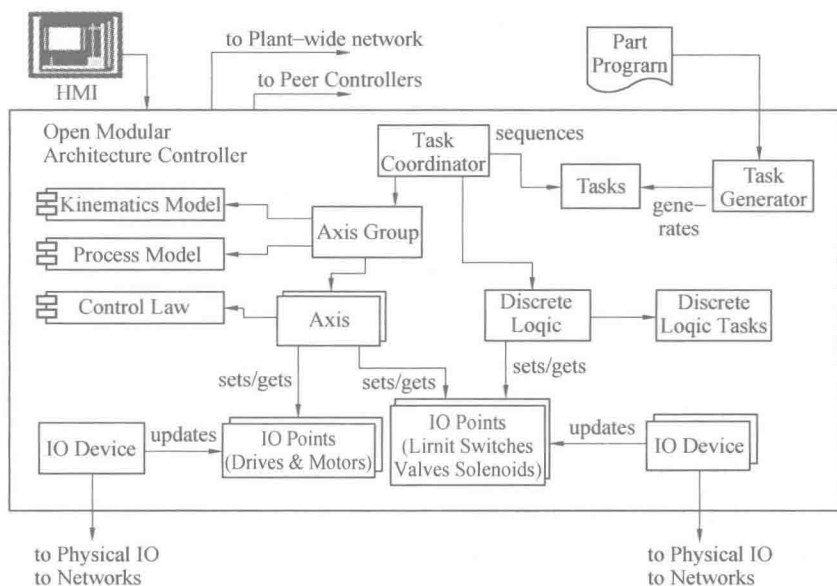


图 1.4 OMAC 控制器结构示意图

4. 国外其他机构的研究情况

此外,国际上还有许多其他的机构和大学在从事开放体系结构控制器的研究,并建立了一些开放式数控系统的实例^[14-18]。

根据文献[19]所述,世界上第一台开放式体系结构控制器就是基

于IMS计划的研究经验,由纽约大学于1988年研制成功,即MOSAIC (Machine tool Open System Architecture Intelligent Controller)机床开放式体系结构智能控制器。MOSAIC项目组采用如下标准进行子系统间的知识转换和传送:C编程语言、实时UNIX操作系统、标准的VME总线。之所以进行这种选择主要是因为当时许多实验室都开发了实时UNIX版本,在UNIX编程中添加实时特征,如多任务处理、任务间通信、硬件中断处理等。实时UNIX的流行使之成为当时计算机领域的事实标准,也成为MOSAIC项目的自然选择。随后California大学采用成熟的商用产品研制出第二代MOSAIC控制器。实际上它们都遵循了通用产品和标准系统的原则。

美国密歇根大学(University of Michigan)在开放体系结构控制器领域成果显著^[20,21],其主要目标是实现机床控制系统的开放性。研究内容包括:基于FSM(Finite-state Machine)的机床控制设计^[22,23],基于Windows的HMI(Human Machine Interface)的开发,可重构机床的控制结构设计^[24,25]。在加工力分析、颤动分析与监测、刀具和工件接触监控等方面也进行了大量的研究工作^[26-28]。

普渡大学(Purdue University)智能制造实验室开展了基于PC(Personal Computer)的开放式体系结构控制器,加工仿真建模和实现,加工过程的多自变量自适应控制,常规切削力自适应控制等研究^[29]。

加拿大不列颠哥伦比亚大学(University of British Columbia)制造自动化实验室也开展了大量的研究,开发了一个基于DSP(Digital Signal Processor)的智能加工模块IMM(Intelligent Machining Module)。它由一组用户可扩展的函数库组成,研究人员在IMM平台基础上可以快速实现智能加工工艺算法,可以将刀具磨损监测、热变形补偿等以传感器技术为基础的智能控制算法迅速集成到数控系统中,IMM实际上是一个以开放体系结构为基础的智能数控开发平台^[30,31]。

德国斯图加特大学(University of Stuttgart)具有长期从事开放模块化控制系统设计的历史^[32,33]。20世纪80年代MPST项目以并行总线连接硬件模块,建立了模块化的结构控制器。后来,他们开始进行基于软件的模块化控制器体系结构的研究,以OSACA准则为基础建立了开放式控制器,可应用于多轴车、铣、并联机构以及其他特殊用途的机床(如电火花、纺织机械等)。