

数控机床智能监控CPS构建 技术研究

Research on Constructing Technology of Intelligent Monitoring CPS of CNC Machine

中航工业成都飞机工业(集团)有限责任公司
黎小华 曾国平 燕继明
李春雷 谢刚 李汶一



黎小华

中航工业成都飞机工业(集团)有限责任公司高级工程师,主要研究方向为制造执行系统、作业现场综合数据采集技术及数字化车间整体解决方案等。先后参与多项国防基础科研课题、科技部重点课题及国家科技重大专项课题的研发及工程化应用实施工作,先后负责或参与了军工行业MES系统、离散制造车间智能化排程及数字化车间整体解决方案的设计、关键技术攻关及实施工作。

限于当前计算技术、控制技术和计算机信息技术的局限性,赛博空间(cyber space)与物理世界(physical world)是完全分离的。但在社会需求和技术进步的推动下,赛博空间

提出了一种基于服务的数控机床智能监控CPS体系结构框架。在此基础上,对感控层、网络层、资源服务层及决策应用层进行结构划分,对各层功能及涉及的主要技术进行了探讨,最后以一个建设中的数控机床智能监控CPS系统为例,对数控加工智能监控CPS 4层体系结构及关键技术解决途径进行了研究。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.08.053

与物理世界的界限逐步模糊,并将最终实现融合。在此背景下,Cyber-Physical System(CPS)的概念应运而生。在资助CPS研究方面扮演重要角色的美国国家科学基金会(NSF)认为,CPS将让整个世界互联起来。“如同互联网改变了人与人的互动一样,CPS将会改变我们与物理世界的互动。”NSF计算机与信息科学和工程总监Branicky表示。

Rajkumar等^[1]指出:从现在开始将是CPS的时代,通过在物理系统中深度嵌入计算智能、通信和控制的能力以及借助新型传感器、执行器,通过主动和可重构功能组件增强物理系统的自适应功能,将极大地提高CPS小到智能家庭网络,大到工业控制系统,乃至智能交通等国家级甚至世界级应用的自适应能力、自动

化程度、效率、可靠性、安全性和可用性等。NSF研究报告^[2]指出:当前,CPS的发展已经开始显著地改变人们的生活,CPS在智能医疗,智能电网、智能汽车、智能交通等领域的应用,可使人们得到更灵敏,更精确,更高效的服务,同时,在一些具有危险性、不适合人类参与的工作环境,CPS技术支撑的智能装置已在地震搜救、消防和探险等领域得到应用。

CPS 定义和特点

1 CPS 定义

Baheti等^[3]指出:“CPS系统是各种计算元素和物理元素紧密结合并在动态不确定事件作用下相互协调的高可靠系统”。Lee^[4]认为:“CPS是计算进程与物理进程的集成和相互影响,即通过嵌入式计算机和网络

实现对物理进程的监测和控制,并通过反馈循环实现物理进程对计算进程的影响”。Rajkumar等^[1]认为:“CPS是通过计算和通信内核实现了监测、协调、控制和集成的物理和工程系统。”

中科院何积丰院士认为^[5]:“CPS是一个在环境感知的基础上,深度融合了计算、通信和控制能力的可控、可信、可扩展的网络化物理设备系统。”同济大学王中杰教授^[6]认为:“CPS强调‘Cyber-physical’的交互,涉及未来网络环境下海量异构数据的融合、不确定信息信号的实时可靠处理与通讯、动态资源与能力的有机协调和自适应控制,是具有高度自主感知、自主判断、自主调节和自治能力,能够实现虚拟世界和实际物理世界互联与协同的下一代智能系统。”

2 CPS 特点

CPS由计算设备、网络设备、物理设备融合而成,所有设备相互协作,共同决定其独特的功能和特征。许少伦等^[7]对信息物理融合系统的特征进行了总结,认为CPS的主要特点如下。

(1)复杂性及异构性: CPS由多种异构的通信网络、计算系统、控制系统和异质的物理设备构成,通过相互融合,使物理设备具有计算、通信、精确控制、远程协调和自治5大功能,是一个多维度的开放式系统,具有高度的复杂性,其异构性也非常明显。

(2)融合性: CPS通过计算进程

和物理进程相互影响的反馈循环实现深度融合,通过实时交互来扩展新的功能,每个物理设备均深度嵌入了计算和通信功能。这导致计算对象从数字的变为模拟的,从离散的变为连续的,从静态的变为动态的,是一个多种类型计算对象并存的系统。

(3)自治性与智能性: CPS在融合计算、控制和物理过程的同时,具备强大的自治机能和智能决策能力,使计算组件和物理环境之间实现更灵活的交互、更智能的协作,主要体现在可以实现自组织、自适应与自我管理。

(4)实时性和海量性: CPS需要及时了解物理设备的现状,通过网络化控制手段对物理设备进行必要的控制和干预,但由于移动设备的接入会造成设备状态随机变化,所以需要时会对物理设备进行实时动态重组,这对计算过程的时间确定性和并行性,对网络实时性要求都非常高。同时,CPS进行实时数据采集和信息交互时会产生巨大的数据量,因而海量数据处理的需求会变得非常迫切。

3 CPS与嵌入式系统

当前,嵌入式系统已成为工业控制和自动化控制系统的核心。嵌入

式系统作为更大系统的组成部分,主要用来增强产品的功能或提高产品的性能,更注重计算。由于内存、能量等资源有限,传统嵌入式系统面临的关键问题是如何实现资源利用的最优化^[8]。何积丰院士认为“传统嵌入式系统中解决物理系统相关问题所采用的单点解决方案不再适应新一代物理设备信息化和网络化的需求”,“现有各种网络技术不能满足新一代物理设备网络可控、可信和可扩展的新需求”等原因促进了CPS这一新理论的提出。CPS以计算进程与物理进程间的紧密集成和协调为主要特点,强调将物理设备通过各种网络手段实现互联互通,从而使物理设备具有了计算、通信、精确控制、远程协调和自治等5大功能^[5]。CPS与嵌入式系统的主要区别见表1。

由此可知,相较传统的嵌入式系统,CPS具有计算更实时、过程更动态、控制更精确、运行更智能、系统组成异质性更加明显等特点。

CPS 体系结构

通常,CPS的基本物理组件包括感知单元、执行单元和决策控制单元。感知单元是一种能够实时监测

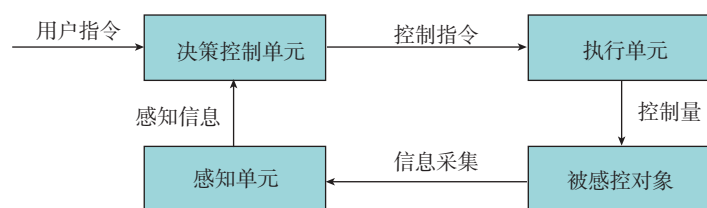


图1 CPS基本物理组成

表1 CPS与嵌入式系统的比较

比较对象	概念	开放性	计算对象	关键问题	实时性
嵌入式系统	专用的;严格的可靠性、成本、尺寸和能源消耗需求;主要用作功能增强或性能提升	相对独立和封闭,甚至网络嵌入式系统也强调调节节点的分布式特性和节点之间介质共享过程的通信	数字、静态、离散,与时间无关的对象	资源利用的最大化;能源消耗的最小化;小型化	实时性为非功能属性;过程执行只需在规定的结束时间之前结束即可
CPS	强调赛博空间和物理空间的协作与交互;物理系统具备了计算、通信、精确控制、远程协作和自治的能力	基于各种类型的网络技术;强调不同系统、数据管理和融合过程的协作,以提供智能化的服务	模拟、动态、连续,与时间相关的对象	强调系统行为的可重复性、可预测性	实时性是一项功能属性;过程执行需要在特定的时间点完成

被感控对象物理条件或化学组成的嵌入式设备；执行单元是一种能够接收控制指令并对受控对象施加控制作用的嵌入式设备；决策控制单元是一种能够根据用户定义的语义规则生成控制逻辑的逻辑控制设备^[9]。基本物理组件结合反馈循环控制原理，构成了执行 CPS 最基本的监测与控制功能的逻辑单元，如图 1 所示。

要实现 CPS 的信息系统和物理系统的深度融合，首先需要将各种物理实体抽象到信息系统中。国内外的研究者也纷纷提出不同的信息抽象策略，比如 La 等^[10]从解决嵌入式设备计算资源有限的角度出发，将 CPS 抽象为包括环境层、服务层、控制层的 3 层结构。综合来看，CPS 的核心是计算、通信、控制 3 者的有效协同，图 2 是基于系统视图的 CPS 体系结构^[11]。

Morrils 等^[12]从应用的角度把能源 CPS 抽象为包括物理层、传感器和执行器层、本地控制层、低等级监控层、高等级监控层、信息层的 6 层结构；景博等^[13]考虑实际系统中感知组件与执行组件之间存在数据交换，提出了包含感控层、网络层和决策层的 CPS 的 3 层体系架构。基于系统功能的视角，出现了一种 CPS 层次结构模型。该模型中，物理层是最底层，其功能主要包括物理过程的执行、感知和监控；通信层则负责设备与不同层之间的数据传递，并包含数据包路由和控制系统拓扑等特征；控制层主要包含一些控制设备及融合应用组件，这些设备和组件配有健壮、可靠、安全、容错的控制算法。何明等^[14]结合对 CPS 工作原理及各项功能的理解，在前人研究基础上对基于功能视图的 CPS 体系结构进行了进一步细化，形成如图 3 所示的 3 层 CPS 体系结构。

王小乐等^[15]从面向服务的角度出发，将 CPS 按照实体到抽象划分为 4 层，充分体现了 CPS 的结构特

性和以服务为资源存在方式的核心思想。CPS 抽象结构如图 4 所示。

CPS 节点与物理世界实时交互，通过传感器单元实时感知物理世界

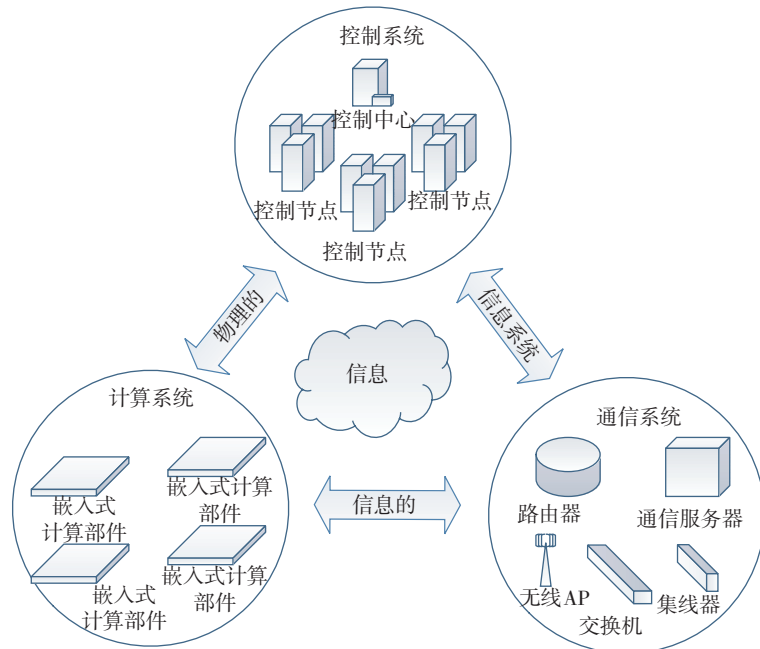


图2 基于系统视图的CPS体系结构

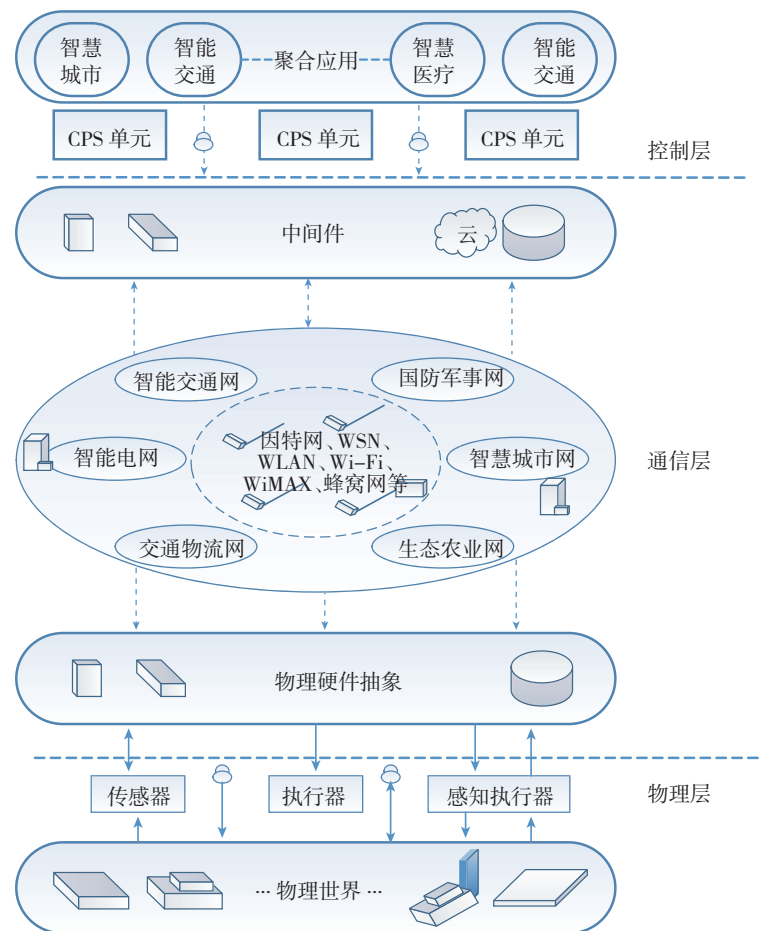


图3 基于功能视图的CPS体系结构

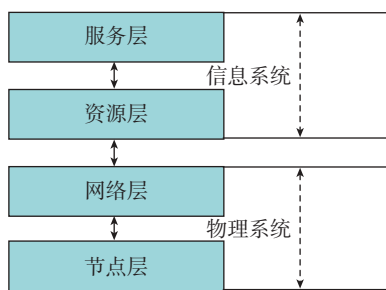


图4 基于服务视角的CPS 4层抽象结构

的变化,将感知的信息交给信息处理单元或者通过通信单元传输给其他节点,同时通信单元接收传输进来的数据并交给信息处理单元,信息处理单元将获取的信息进行融合,根据内建的嵌入式算法作出决策,并将结果传递给执行器单元,或者通过通信单元发送给其他节点,以实现物理过程的影响和控制。该方法对研究CPS与面向服务架构(SOA)的结合及CPS系统设计开发具有较强的指导作用^[15]。

数控机床监控技术发展

1 数控机床监控技术发展现状

随着数字控制技术、高性能驱动技术、传感器技术等的发展,数控机床功能越来越强大,在制造业得到越来越广泛的应用。网络化、自动化、高精度、高效化是当前数控机床发展的主要方向。随着数控机床功能、性能的提升,在实际生产应用过程中,数控机床的远程数据采集和状态监控需求十分迫切。在此背景下,各种类型的数控机床监控技术蓬勃发展。

基于数控机床监控技术构建的数控机床监控网络可以实现联网数控机床加工过程的自动化数据采集和状态监测。设备运转工况可以通过监控界面直观了解,设备故障可以在第一时间被发现,并自动通知给相关的技术人员。同时,数控机床状态信息、故障信息可以为生产人员、工艺人员及设备保障人员提供数控机床运行过程第一手的状态信息,远程故障诊断、远程作业调度及资源调

配、数控加工过程工艺状态评估成为可能。通过对数控机床网络化监控和诊断,实现了“移动的是数据而不是人”,从而改变设备发生故障时诊断人员疲于奔命的被动局面。全球化计算机网络的发展、传感器技术的大量应用都为数控加工过程网络化监控提供了坚实的技术基础^[16]。

2 当前数控机床监控技术存在问题

(1) 传输实时性低,可靠性差:限于当前的技术手段,数控机床数据采集过程受数据采集器性能,传输网络可靠性、带宽及延迟影响,传输延迟大,采集频率低(信号采集间隔通常高于1s),很难达到较高的实时性。同时,数据采集过程易受实际生产过程环境影响(如异常断电、网络失效等),可靠性较低。

(2) 数据采集器功能单一,采集参数少:目前行业内适用于数控机床的数据采集解决方案通常基于硬件板卡的方式,由于需要兼顾行业各类不同的数控系统的数据采集需求,通常在信号采集功能规划和实现上高度抽象和集约化,采集器功能比较单一,采集参数也比较有限,通常只包括机床开关机信号、故障报警信号、NC程序加载、开始运行和结束运行时间等,而对于表征数控加工过程有效状态的一些重要信号,如主轴电流、功率、温度等,以及NC程序运行过程的一些关键运行参数(如坐标位置、进给倍率、转速等信息),采集能力较弱,一定程度上限制了数控机床监控技术的应用范围。

(3) 缺乏直观、高效的加工状态复现技术:实现数控机床状态数据的采集仅仅是整个监控过程的第一步,如何建立高效、直观的虚拟监控可视化界面,是整个系统设计和实现的难点。目前,针对数控加工过程虚拟可视化监控的主要做法仍是在对实际车间生产布局调研的基础上,绘制虚拟车间二维布局图,对数控机床物理位置与二维布局图的逻辑位置

进行抽象描绘,在此基础上,开发C/S或B/S架构的数控机床监控可视化界面,融合数控机床数据采集器的实时状态数据,进行数控机床的三色灯状态显示。而针对具体数控机床的监控,则缺乏有效的状态复现手段,通常仍以定制开发的数据监控窗口为主,对实际加工过程三维运动轨迹、机床相关运动部件位置、状态等的显示仍缺乏有效手段。

(4) 仅单向的数据采集,缺乏双向控制能力:传统的数控机床数据采集系统主要面向制造过程数据的采集,而随着新一代制造装备技术的发展,数控机床越来越呈现自动化、自主化和智能化的特征。这些设备的装备和应用,对传统数控机床监控系统提出了新的“管控”需求,即不仅要实现数控机床状态信息的实时采集,同时,也要求能够在一定程度上对数控机床运行状态进行评估和响应,并能够在必要时发出控制指令,实现机床的行为控制,这对数控机床监控系统提出了新的挑战。

数控机床智能监控CPS的设计和实现

1 数控机床智能监控CPS参考体系结构

1.1 数控机床智能监控CPS定义

数控加工智能监控CPS定义:根据数控机床实际生产作业监控需求,以数控机床本体建模和运动特征抽象、数控加工过程的实时状态感知和实时数据处理技术为基础,融合数控加工过程三维实时复现、智能数据分析、实时状态评估、异常预警和自主化智能控制能力的,通过分布式网络融合形成的计算更实时、过程更动态、控制更精确、运行更智能,具备高度自治性的数控机床智能监控系统。

1.2 数控机床智能监控CPS体系结构

本文参照基于服务角度的CPS 4层抽象架构,结合数控机床智能监控

CPS的实际特点,提出了一个面向服务的数控机床智能监控CPS体系结构,如图5所示。

(1) 感控层。

数控加工智能监控CPS的感控节点层是CPS与数控机床实际物理过程的交互点,包含了CPS的物理元素,如数控机床实体,运动部件,传感器,各类物理的控制器、驱动器和数控加工物理对象及资源(如刀具、工装等)等,主要涉及控制技术、嵌入式系统、感知技术、通信技术等。

数控机床智能监控系统实现的核心是感知功能的构建和感知网络的融合。通过在数控机床物理实体加装相应传感器及相应的数据采集功能部件,并与数控加工物理对象(刀具、工装、毛坯等)交联耦合,形成具有感知、控制执行与自主决策功能的CPS感控节点,并以数控机床

数据采集器和控制网络的形式实现。本系统采用自主开发的数控机床数据采集器与传感器网络融合的方式,构建具有自主知识产权的数控机床数据采集系统,该系统由采集层、处理层、服务层和应用层4层组成,其体系结构如图6所示。

(2) 网络通信层。

在实际数控机床智能监控CPS中,网络通信层面临的最大挑战是如何保证虚拟空间与物理空间之间大容量、高实时性数据的高可靠性、低延迟传输;同时,随着智能设备和智能感知设备的大量普及,未来作业现场的网络接入需求将成几何级数增加。鉴于现有作业现场网络在传输可靠性和传输性能方面的实际情况,采用分布式数据采集体系的设计,在感知层和处理层优化数据采集和处理策略,采用“分步+冗余”的数据

采集、传输和处理机制,可有效降低实时数据采集和处理过程对网络传输可靠性、实时性和高带宽要求。

但随着后续数控机床智能监控CPS系统的大规模工程化应用,仍迫切需要采用新一代具有充足带宽、接入能力强、超低时延的下一代工业现场通信网络。同时,应充分关注具备较高可靠性、较低时延、较大接入容量的无线网络接入技术,以满足未来作业现场广泛的移动接入需求。

(3) 资源服务层。

由于数控机床智能监控CPS系统中针对物理环境的感知、监测和分析决策处理过程有大量的数据存储、计算、分析、控制决策处理需求,而感控层的数据存储、处理能力是有限的。因此,对获取的实时数据进行融合处理,从海量数据中分析、提取有用信息,是资源服务层的主要功能。

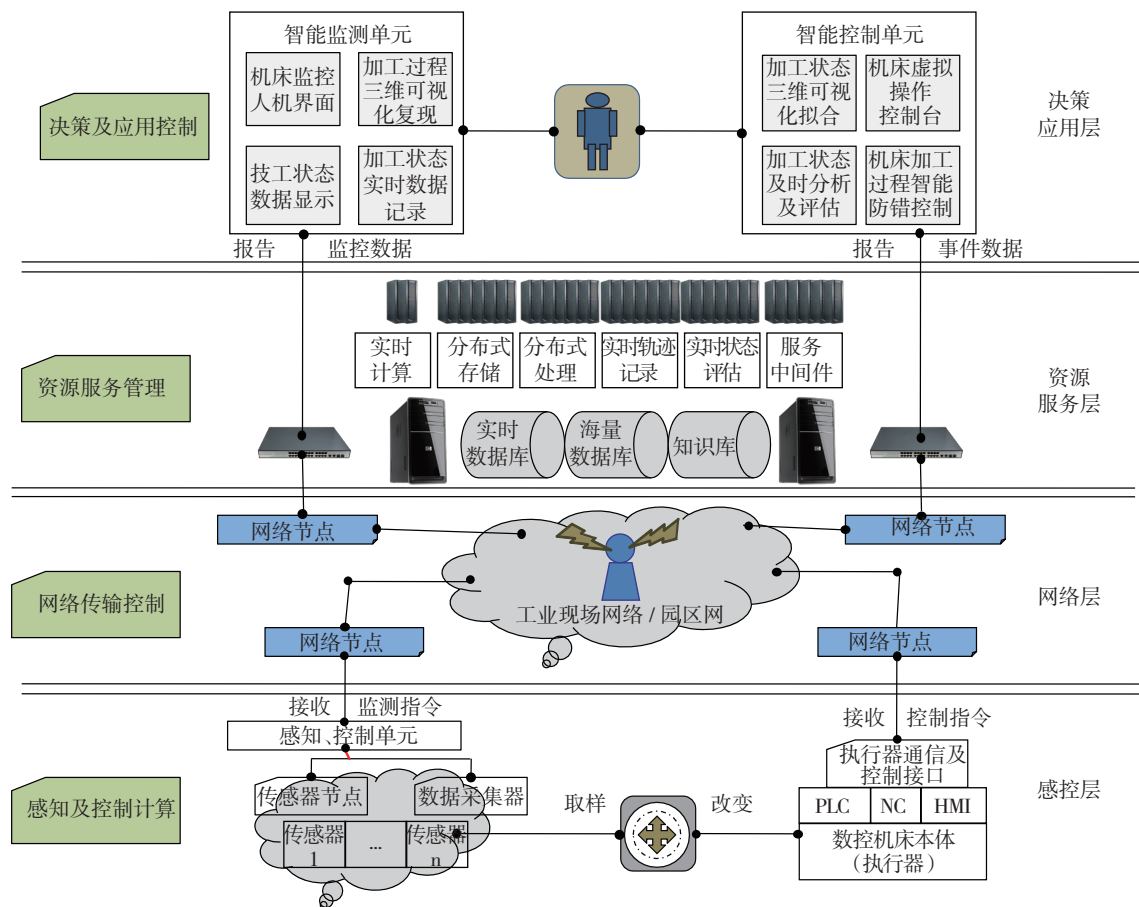


图5 数控机床智能监控CPS系统体系结构

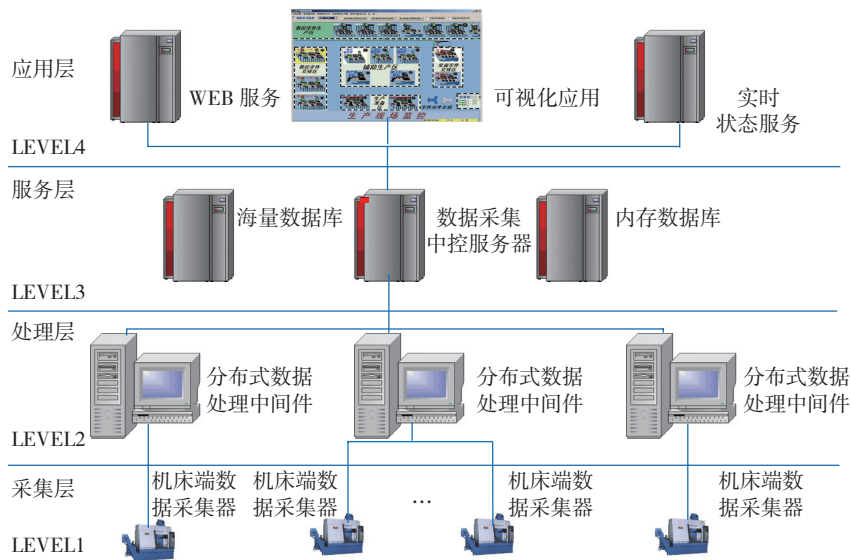


图6 数控机床数据采集系统体系结构

数控机床智能监控 CPS 系统的资源服务层作为系统运行的支撑平台,向上,为决策及应用层提供各类数据分析、图形运算、大数据处理能力支持;向下,为感控层提供海量数据存储、数据处理服务支持;同时,对感控层的感知组件及执行器进行抽象建模,形成虚拟空间与物理空间融合交互的服务中间件,实现状态报告、监控指令、机床操作控制指令的集成功能。

(4) 决策应用层。

决策应用层是面向应用和操作者的,其主要目标是实现数控机床运行过程的可视化监测和自主化、智能化控制。一方面,决策应用层作为操作者的功能增强装备,能够为操作者提供更实时、更全面、具备决策参考价值的数控加工过程工况信息和智能分析评价数据,以提高操作者对整个数控加工过程的感知、控制能力;另一方面,作为具备高度自主性的智能监控系统,决策应用层利用内嵌的大数据计算、智能数据分析能力,对实际加工过程进行实时状态评估,可实现智能化的加工过程预测、异常报警和智能防错控制,这使数控加工过程进一步向智能化、少人化甚至无人化方向演进成为可能。

2 系统实现

通过对数控机床运动部件精确建模及数控机床坐标联动控制机制、各组坐标轴耦合关系的动态解析,在自主开发的三维仿真平台中实现了数控机床静态模型、动态运动部件的动态加载和交互式控制。同时,结合对数控机床实际加工过程原点设置、刀具参数的采集及工装、毛坯状态的自动检查,自动构建数控机床虚拟仿真运行环境,通过数控机床实时数据采集器采集的高实时度(毫秒级)的机床实际运行数据,实现数控机床实际加工过程的超低延时、高仿真度的加工过程三维可视化复现,系统运行界面如图 7 所示。

系统基于“感知-分析-决策-控制-反馈-评估”的闭环控制机制,在准确评估数控加工过程运行状态的异常和例外信息,结合已经建立的数控加工过程异常状态响应和处理规则,研究并突破了加工时间智能预测、加工状态智能评估、异常状态自动预警等关键技术。目前,系统已实现基于状态评估规则和预定义操作流程的 NC 程序加载控制、原点校验、刀具参数及刀具补偿数据校验等,并可对数控加工过程主轴负载异常、功



图7 数控加工过程三维可视化复现程序运行界面

率突变等状态进行有效识别和报警,有效提高了数控加工过程的智能化监控水平。

结束语

当前,美国、德国等西方先进工业国家大力推进智能制造技术研究及应用,我国“两化”深度融合也在深入推进,CPS 作为智能制造领域的核心技术之一,已经成为当前学术界和产业界优先研究和发展的重点领域。为了更好地实现 CPS 在制造业各领域的应用,需要突破现有的计算模式、物理架构、控制方法和通信环境的束缚。当前制造业 CPS 的研究重点包括:CPS 相关共性技术研究(如大数据、云计算、实时计算、智能控制理论等),CPS 关键支撑技术研究(如面向 CPS 的下一代通信技术、智能传感器及网络融合技术、异构异质系统集成、新一代仿真技术及融合控制技术等)。推进 CPS 在制造业的有效落地和应用,需要学术界、产业界共同努力,以逐步开启制造业 CPS 研究及应用的新局面。

本文共有参考文献16篇,因篇幅有限,未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 谷雨)