

DOI: 10.3901/JME.2018.08.210

# 云计算在智能机床控制体系中的应用探析\*

黄 莹<sup>1,2</sup> 卢秉恒<sup>1</sup> 赵万华<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学制造系统工程国家重点实验室 西安 710049;  
2. 武警工程大学信息工程学院 西安 710086)

**摘要:**以智能机床的控制体系为着眼点,通过分析机床控制系统的发展及所存在问题,提出将云计算的概念与数控机床智能控制相结合是解决问题的有效途径。针对国内外云计算在制造业的应用现状,分析得出以云计算为基础设计和调整机床控制体系这一研究思路,具有一定的创新性,可以依靠云计算的本质特点,构建一种新颖的、具备云计算基本特点的开放式控制结构,根据计算的压力来对计算能力进行配置,符合机床智能化的总体趋势。研究提出智能机床云控制体系的概念,剖析其内涵,并结合云计算架构,给出控制体系设计可采取分层级、任务化、数据流控制的思路。最后,设计智能机床云控制体系的总体结构,并研究将智能机床云控制体系的进行分解而后依据总体框架汇总的具体实施方法。研究结果为进一步分析在这种控制架构下,数控系统的计算能力、存储能力、数控机床的加工精度等内容,用以验证设计方案的可行性及特点提供了总体构想。因此,研究结果可以为解决智能机床的系统集成、大数据处理、计算速度和精度以及开放性问题提供一定的方法论。

**关键词:**云计算;智能机床;控制体系;云控制体系

**中图分类号:** V464

## Application of Cloud Computing in Intelligent Machine Tool Control System

HUANG Ying<sup>1,2</sup> LU Bingheng<sup>1</sup> ZHAO Wanhua<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiao Tong University, Xi'an 710049;  
2. Department of Information Engineering, Armed Police Engineering University, Xi'an 710086)

**Abstract:** Based on the analysis of the development and the existing problems of the machine tool control system, the combination between the concept of cloud computing and CNC machine tools intelligent control is an effective way to solve the problem. In view of the application situation of cloud computing in the manufacturing industry in domestic and foreign, it is concluded that the idea of designing and adjusting the machine tool control system based on cloud computing is innovative, which can be relied on the essential characteristics of cloud computing to build a novel open control structure with the basic characteristics of cloud computing, therefore the computing power can be configured according to the calculation pressure, that can be met the overall trend of intelligent machine. The concept of intelligent machine tool cloud control system is proposed, and its connotation is analyzed. Combined with the cloud computing architecture, the idea of hierarchical, task and data flow control is proposed. Finally, the overall structure of the intelligent machine tool cloud control system is designed, and the detailed implementation method of the intelligent machine tool cloud control system is analyzed and decomposed according to the overall framework. A general idea for further analysis of the computational power is provided, such as storage capacity, machining accuracy of NC machine tools in this control architecture, that can be verified the feasibility and characteristics of the designed scheme. Therefore, the research results can provide a certain methodology to solve the problems of system integration, large data processing, calculation speed and accuracy, and the openness of intelligent machine tools.

**Key words:** cloud computing; intelligent machine tool; control system; cloud control system

## 0 前言

控制系统是智能机床实现未来智能制造的核心

决定因素,它通过对影响加工精度和效率的物理量进行检测、建模、提取特征,自动感知加工系统的内部状态及外部环境,快速做出实现最佳目标的智能决策,对机床的工艺参数进行实时控制,使机床的加工过程处于最佳状态。尽管目前的机床控制系统正从特殊的闭环控制转变到通用、实时、动态的

\* 国家自然科学基金重点资助项目(51235009)。20170520 收到初稿,20171010 收到修改稿。

闭环控制，具备了高精度、高效率、柔性自动化等特征，能够完成自动修正、调节补偿和在线故障诊断。但是由于采用了中心式封闭体系结构，计算能力僵化，系统内部没有实现信息回路，信息到决策再到控制系统的反馈无法实时和自动完成，加工过程中产生的大数据所蕴含的信息和价值也没有被充分挖掘。而在这种大数据环境下，控制系统对机床实时的状态估计、精确决策和稳定控制主要取决于控制系统能否具有一个能够提供所需计算能力、开放的控制结构。

近年来，工业发达国家的产品设计和制造由传统的基于网络的分布式协同设计和制造转变为基于云的设计和制造<sup>[1-3]</sup>。众多学者对云计算在制造领域的应用进行了前瞻性的研究，特别是 SCHLECHTENDAHL 研究控制系统作为一种服务的可能性<sup>[4]</sup>。但是由于采用的是现有的互联网络技术，实时性不能保证。沈阳机床集团建立 i5 云制造平台，开拓了制造模式转变为互联网+制造模式的先河。华中 8 型智能数控系统依托云计算技术平台，实现高速、高精、高效的加工<sup>[5]</sup>。

虽然云计算技术已经在机床控制系统领域取得了成绩，但是，到目前为止，国内外尚未开展以云计算为基础对机床控制系统体系结构进行设计和调整的研究。

因此，论文研究以智能机床的控制体系为着眼点，将云的思想引入到机床控制体系中，形成新的机床云控制体系。设计的核心就是将机床各种参数汇聚到参数池中，而参数池则将数据作为服务提供给所需的控制系统。这种设计为机床智能化发展提供了新的思路，实现机床由机械运动的自动化向信息控制的智能化方向发展，既与国家战略性新兴产业发展政策相契合，也符合数控机床发展的趋势。

### 1 机床控制系统发展及所存在的问题

自 20 世纪初，美国福特公司引入生产线开始，到目前基于云思想的制造系统拓展，发展历程如图 1<sup>[6]</sup>所示。以市场为导向、用户为中心的发展理念使得机床控制系统的功能性越来越强、随需调整能力越来越强。

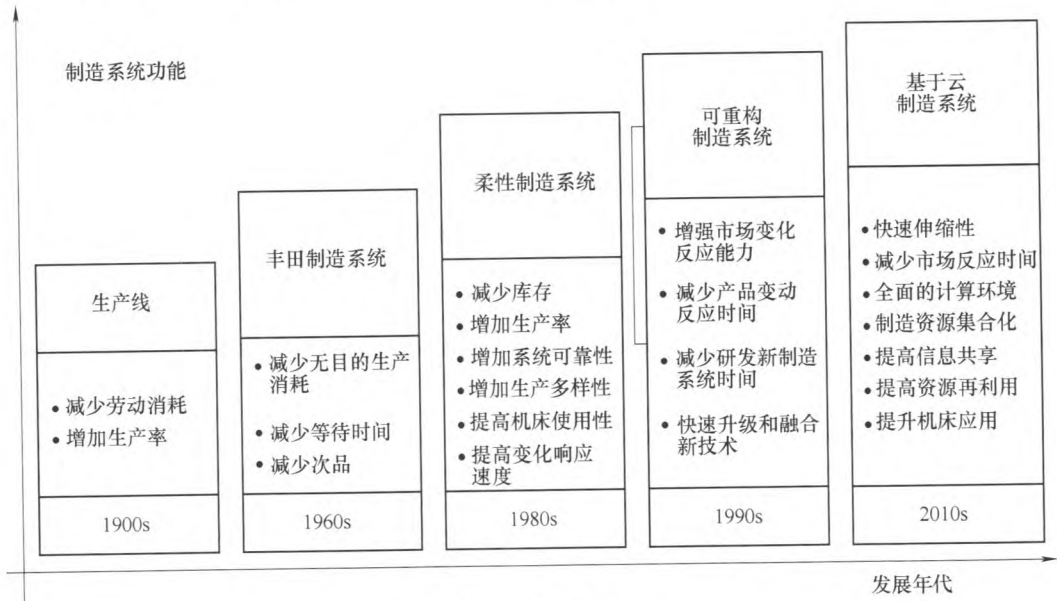


图 1 制造系统功能变化历程

作为制造系统的主干，机床在不断引入新技术以提升对生产过程的控制。而从机床控制系统功能变化过程中看，除了满足基本控制目标外，机床控制系统实质上体现几个方面。工作效能越来越高，资源共享、信息共享，生产整体的目标性增强；对各种变化的适应能力越来越强，特别是对市场、产品、设计等变化的响应时间变短、过渡的较平稳；与外界的联系越来越紧密，设计与工厂、车间、机床之间的联系已经开始形成网络。近几年，以上这些广义上的性能提升构成了机床控制系统发展的主

旋律。

当前的控制系统设计中采用了多种先进的技术，如神经网络、数据融合、贝耶斯估计、H $\infty$ 控制、滑模控制等等，但无论我们在设计中应用了何种技术，最终都要遵循控制体系结构的要求。通过近一个世纪的应用和反复调整，简单目标控制系统的结构已经变得非常简捷和稳定，而复杂控制系统的体系结构形式变成了现代控制系统研究的重点，管理经验、专家知识、智能技术、规划技巧等在这里才能大显身手。但是智能机床控制系统发展依然面临

一些系统性的问题。

### 1.1 中心式控制负担较大

目前数控机床智能化的现状可以归结为底层控制的智能技术的应用,整体协调依然依靠控制中心。

(1) 参数处理要求能力非常大,复杂系统的模型计算、参数估计、预测、状态判断等都依靠于此中心,由于采用的时序的程序,节点处理数据的能力令人堪忧,必为控制的瓶颈。

(2) 控制中心依然需要参与到数据处理中,由它确认加工状态。

(3) 控制中心必须同时承担大量计算工作,否则延时严重。

(4) 需要引入参数处理计算来完成大量的测量信息的处理,将处理后数据传递给控制中心,控制中心顺序来对规划进行动态调整。

### 1.2 相对落后的系统架构

当前控制系统架构以应用为主线,以实现控制功能为目标,可能在某一独立功能控制时采用了较为合理的层级式架构,但在整个复杂控制系统中,从设计的初始就没有全面考虑各系统间的联系,结果造成功能间和数据间的分离(竖井结构),加大了系统的控制复杂性,导致了相对僵化的系统架构。

智能机床需要一个稳妥、可靠、有效的控制系统架构,使之将准确全面的感知能力、简单顺畅的传输能力、高速精确的计算能力、稳定快捷的执行能力、全面协调的管理能力,等诸多功能,充分的展现出来,营造出一个行之有效地操作空间。

因此,将信息科学中云计算的思想引入到智能机床控制体系构建中,将成为解决问题的有效途径。

## 2 机床控制系统中的云计算应用现状

在信息技术领域中,云计算的应用已被证明是一种颠覆性的技术<sup>[7]</sup>。其实质是网络计算、分布式计算、并行计算、效用计算和网络存储、虚拟化、负载均衡等传统计算机技术和网络技术发展融合的产物。它旨在通过网络把多个成本相对较低的计算实体整合成一个具有强大计算能力的完美系统,核心理念就是通过不断提高“云”的处理能力,并将强大的计算能力分布到终端用户手中,进而减少用户终端的处理负担,最终使用户终端简化成一个单纯的输入输出设备,并能按需享受“云”的强大计算处理能力。自云计算技术在 2009 年获得长足的发展以来,人们的态度也逐渐由疑虑向更加接受的方向转变,云计算也逐步融入了更多领域。随着云计算应用的多方尝试,它已经能够成为关键性业务应用的

平台。

云计算技术在机床控制上的应用还处于探索阶段,主要体现为通过应用云计算技术的控制系统,以有偿的形式向机床提供技术服务;在营销服务体系上,与物联网相结合,对产品的流动进行全面掌控,增强商品信息的存储和库存的管理;从产品的原材料到产品出厂,进行企业级的云管理控制,注重不同设备和不同部件的无缝连接,减少部件转运过程中的时间。

近五年,工业发达国家的产品设计和制造产业正在经历着一场模式转变,核心制造功能被迁移,由传统的基于网络的分布式协同设计和制造转变为基于云的设计和制造 CBDM(Cloud-Based Design and Manufacturing)<sup>[1-3]</sup>。WU 等<sup>[7-8]</sup>对云计算在制造领域的应用进行了前瞻性的研究,2013 年对 CBDM 系统进行了定义,并于 2015 年以来提出了未来云计算应用的愿景规划,如图 2 所示。

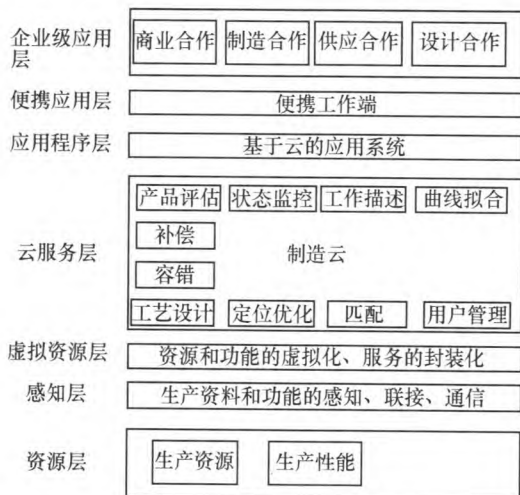


图 2 CBDM 基本架构

基于云的设计和制造指的是一种能促进知识资源共享和产品快速开发的产品实现模型,通过社会化网络和服务提供者和消费者之间的协商平台减小费用。CBDM 包括按需自助服务,无处不在的网络接入、快速的可扩展性、资源池和虚拟化。CBDM 指的是一种面向服务的网络化产品开发模式,启用服务消费者配置选择,并利用定制产品实现资源和服务的范围从计算机辅助工程软件到可重构制造系统<sup>[2,9]</sup>。但是,没有一个现有的系统满足所有定义的要求。

2013 年德国学者 VERL 等提出:从技术的角度来看,目前机床控制是有限的,如可扩展性、启动和重新配置的时间、计算的复杂度、访问的安全性,这些都需要机床控制有一个全新的概念,将机床控制从机床本体中分离出来,移动到云中,从而可以



将机床控制作为一种服务<sup>[10]</sup>，如图 3 所示。

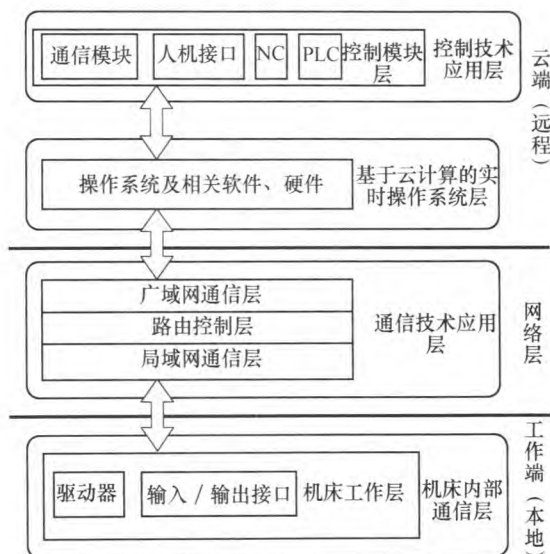


图 3 基于云的机床控制

2015 年，SCHLECHTENDAHL 将上述方法应用到双铣床中，建立模型并对控制系统和机器之间的数据传输进行了分析，研究控制系统作为一种服务(Control System as a Service, CSaaS)的可能性<sup>[4]</sup>。但是由于采用的是现有的互联网络技术，实时性不能保证，需要进一步研究其可行性。

我国的机床控制系统也基本按图 1 的趋势发展，但是由于政策支撑僵化、结构封闭不开放、制造工艺和流程未充分体现等原因，制约了我国数控行业的发展<sup>[11]</sup>，使得我国数控领域进步的脚步要略慢于世界先进水平。为了加快发展步伐，2015 年国家制定了《中国制造 2025》，部署了全面推进制造强国战略，强调智能制造是产业发展的必然选择，强调了利用云计算技术进行设计升级改造的迫切性。

沈阳机床集团 i5 系列代表机床将 intelligent、industry、information、internet、integrate 集成在一起，并建立 i5 云制造平台，开拓了制造模式转变为互联网+制造模式的先河。华中 8 型智能数控系统依托开放式数控系统软硬件技术平台；大数据采集、传输与储存技术平台；云计算、云服务技术平台，实现高速、高精、高效的加工<sup>[5]</sup>。

清华大学叶佩青教授提出建立“制造工艺大数据”收集激励机制和甄别平台，收集提炼全面细致的制造工艺数据和控制方法，积淀支撑高端数控的数控大数据，建立工艺数据和控制方法不断完善的开放式数控，补足我国数控行业制造工艺不全面细致的短板，并提出了基于组件技术数控 APP 概念，展现了全民数控创新的通途<sup>[11]</sup>。

虽然云计算技术已经在机床控制系统领域取得了成绩，但是，到目前为止，国内外尚未开展以云

计算为基础对机床控制系统体系结构进行设计和调整的研究。

### 3 云计算应用于机床控制体系设计的可行性分析

机床控制问题隶属于复杂的大系统工程研究范畴，需要解决机床多任务协同，多维模型的建立和计算，加工工艺流程控制和参数处理，多源信号融合等诸多问题。传统的控制系统设计时，功能性目标要显著优先于架构的合理性，组成部分或以紧密耦合、或以完全隔离的方式固定构建，以实现特定的业务功能。机床智能化就是需要控制中心能够全面了解机床，能够快速调整软件。

云计算是目前最先进或者是经实际检验过的最先进的信息处理方式，它赋予软件更大的空间，更动态的思维。云计算也是一种基础的架构管理方法论，由大量资源组成资源池，用于动态地创造高度虚拟化的数据流提供给用户使用。在这种方法中，你根本就不用关注是哪个计算机算出的结果被系统所使用，完全可以通过使用软件设计中“封装”的概念，将资源池进行封装处理，这样，数据就成为了个整个系统联系的中心，系统必然能够实现的模块化、组合化。这种方式已经改变了以功能或任务为重心的控制系统设计方向，使得系统的模块变的更通用化，结构更加自由化，更加创新的将软件的功能扩大化。完全遵循了硬件的架构体现了技术的先进，软件的应用表现了思想的创新。

将云计算的思想引入到机床控制系统的设计中，是通过改变信息流通方式来增强处理能力，通过信息的应用来拓展自身的性能，可以使得信息流动的控制成为可能，用简单的索取和服务，屏蔽复杂的过程，使信息的流动更加多样化，同时也使控制系统结构具备了弹性，易于将功能与信号分离，增加了统一管理的可能性，依靠控制系统体系结构上的变化，来解决系统计算能力不强、模块之间耦合等问题。依托开放式的云数据池结构使得引入需要的实时数据成为可能，从而使控制系统中信息与信息流动过程的协作更加高效。

因此，对于数控机床控制系统而言，采用云控制体系给出了一种开放的机制，根据计算的压力来对计算能力进行配置。若加工任务非常复杂，则通过开放的组织机制进一步扩展计算资源、合理分配计算任务。另外，作为一个整体智能化的要求，通过联合其他计算能力云，形成一个大的计算能力云，

就可以完成一系列的产品的生产，而且也打开了不同产品间配合制造的大门。

4 基于云计算的智能机床控制体系设计思路

4.1 云控制体系的概念

结合以上分析，得出云控制体系是指能够及时提出给各分支控制系统足够的控制所需计算值。各分支控制系统本质都可以归结于一种硬件上相互独立的控制回路，对这些分支系统而言，控制结构固定不变，变化的主要是控制参数。这些参数是经过比较复杂的计算获得，假若将获取参数的能力交付给这些分支系统，则这些分支系统可能会由于计算时间问题，无法保证系统的反应速度。而云控制体系就是设想将这些参数汇聚到参数池中，参数池将数据作为服务提供给所需的分支系统。这样计算也就作为服务提供给了各分系统，所以必将减少子系统的计算负担。

4.2 云控制体系的内涵

云控制体系的内涵是着眼于数据处理和管理。从服务类型上讲是属于数据服务，提供和维护系统所需的数据池。云控制体系只是一种信息传导的方式，与云计算的概念是大相径庭的，云控制体系只是从云计算的工作模式中发现了适合于自己的一类数据处理和管理的手段。

4.3 云控制体系的设计思路

为了更好的完成控制工作，结合云计算架构，对于机床控制体系设计可采取以下思路。

(1) 分层级设计。对于复杂问题深入抽象和简化，利用层次化过程，将具体的执行下放，抽象理论的上移，形成各司其职的氛围，简化设计。

(2) 任务化设计。在控制系统设计中，计算被视为控制环节放置在回路中，许多复杂的计算成为系统不稳定的原由。而只有将计算与控制相剥离，将计算作为一种控制任务进行处理，用能力解决计算问题，用控制来解决并行问题。

(3) 数据流控制设计。将数据作为系统的服务提供给所需者，以虚拟的数据池为中心，通过更新池内的数据来协调控制系统的工作，数据池使得数据和数据的流动都成为了服务。云池中的数据可以给出一个机床运行的全面数据，如温度、振动等等。而控制中心依靠这些数据的分析，来对控制策略、加工过程进行调整或者是重新设计，使决策更稳妥；而控制中心决策的变化，体现在数据上就是云池中某些数据的改变，而一发动全体，整个控制系统也

随之发生调整。智能化系统利用数据云池反向向计算要数据，功能并行，软件变化、集群能力变化、设备的增减等都与结构无关。

5 智能机床云控制体系的结构设计

5.1 云控制体系的结构

我们提出的云控制体系结构如图 4 所示。

(1) 分成远端云和本地云，既充分利用了外界资源，又将变化的重心倾向于本地，主要是用云的思想来进行本地控制系统改进，为解决我国机床控制系统落后进行有效探索。

(2) 组建虚拟数据池，将所有数据都放到池中，根据具体需要，将数据提供给软件和硬件，以数据作为服务。

(3) 区分内外数据，外数据集大，注重数据共享，为更深应用做基础。内数据针对性更强，与工作任务匹配，以减少数据传输的压力，保证实时性；

(4) 以工业总线进行数据传输，抗干扰、速度快，实时好，动态好。

(5) 内部程序从各种数据池中提取或推送得到所需数据，进行计算，将结果以数据形式再放入到数据池中，操作系统按照规则，将某些数据推送到机床驱动设备，进行加工。加工过程中传感器不断将检测数据采集，将检测数据再放入到数据池中，由内部程序进行相应的处理。

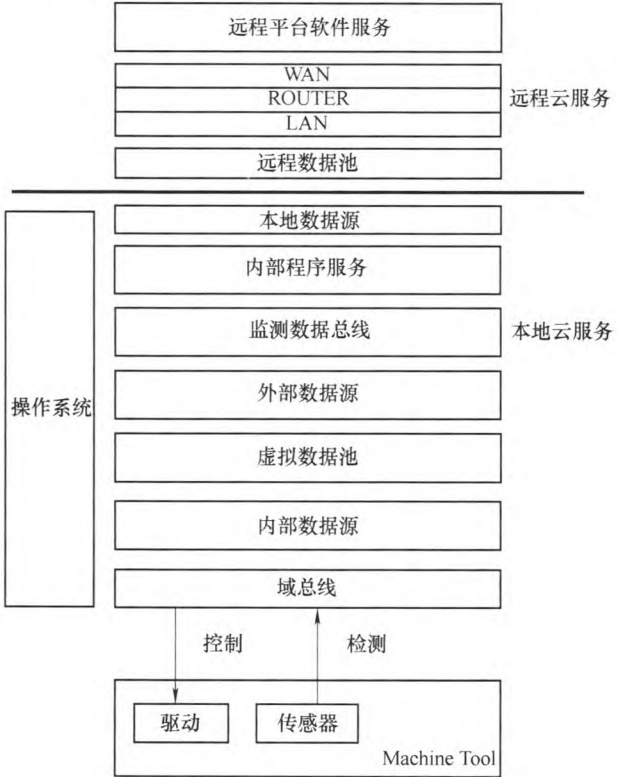


图 4 云控制体系的基本结构

(6) 数据传输分成两种,分别用于处理计算数据和驱动数据,主要是为了减少工作环境对控制系统的干扰。

(7) 这种结构基本上符合国内外对云计算应用在机床上的理解,只是拓展到了控制系统中。

## 5.2 云控制体系总体结构的具体实施

以智能机床的关键技术出发,将云控制体系的总体结构可分解成下列部分进行实施。

传感器网络系统方案设计。首先将检测同一机床状态参数的传感器形成系统,依托数据融合方法,提取出更高、更可靠的估计参数。其次,考虑机床加工的电磁环境影响,在充分调研和查阅文献的基础上,挑选出带宽、速率合理的数据传输总线形式。再者,采用时间序列分析的方法,将机床的各类检测参数有机的汇合,形成最终的传感器网络。

数控机床执行系统封装方案设计。从软件模块设计的角度出发,将机床操作的各个执行单元数据化,形成各类机床加工操作模块,以控制参数和检测参数作为执行单元模块的输入和输出,简化数控机床系统。

数控机床控制网络方案设计。与传感器网络分别设计的优势在于管理和数据分离,符合智能化控制的层级结构,与智能化发展匹配。同样既需要考虑机床加工的电磁环境影响,挑选出带宽、速率合理的数据传输总线形式,又需要采用时间序列分析的方法,充分利用传输信道,保障控制参数高速、有序的转递。

数据机床控制中心方案设计。控制中心完成管理、计算、传输等功能,云控制体系赋予控制中心更多的管理权限。从软件工程的角度讲,控制中心的方案应该属于软件设计方案,将其粗略分成显示层、网络层、计算层,而数据池设计被单独出来,所有的数据都汇合在数据池中,管理层就是对数据池中的数据以及流向进行控制。

最终在完成各部分设计的基础上,依照总体结构设计,形成统一的云控制系统架构。

## 6 结论

云计算技术是本世纪计算机科学最重要的发展,是新一代的科学技术革命,随着技术的演进,云计算也发展到了新的阶段。作为战略性新兴产业的云计算在可以预计的未来将迸发更大的能量。

(1) 将云计算技术引入到机床控制领域,本身就是对于云计算技术应用的开拓和探索。国内外的研究大量集中于云计算在智能工厂中的应用,而鲜

有研究考虑到将其应用于机床本身控制系统中。

(2) 以机床智能控制为牵引,深入将云计算思想和方法应用其体系架构设计研究中,已经抓住了云计算技术在机床智能控制领域中发展的方向,为机床智能化提供一种可行的思路和方法。

(3) 提出建立云数据池的概念,将数据及数据的流动引入到控制系统设计中,真正实现了以数据为中心的控制体系架构。

(4) 关于云计算在机床控制中研究已经构建了理论基础,研究方向具有前瞻性。为机床智能化提供了新的研究思路。

## 参 考 文 献

- [1] WU Dazhong, LANE T J, ROSEN W D, et al. Enhancing the product realization process with cloud-based design and manufacturing systems[J]. Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2013, 13 : 041004-1-14.
- [2] WANG X V, XU W X. An interoperable solution for cloud manufacturing [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2013, 29: 232-247.
- [3] WU Dazhong, GREER J M, ROSEN D W, et al. Cloud manufacturing: strategic vision and state-of-the-art [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2013, 32: 564-579.
- [4] SCHLECHTENDAHL JAN, KRETSCHMER FELIX, SANG Zhiqian, et al. Extended study of network capability for cloud based control systems [J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2017, 43: 89-95.
- [5] 陈长年, 李雷. 浅析智能机床发展[J]. 制造技术与机床, 2015(12): 45-49.  
CHEN Changnian, LI Lei. Brief analysis on the development of intelligent machine tools [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool December 2015(12): 45-49.
- [6] WU Dazhong, ROSEN W D, WANG Lihui, et al. Cloud-based manufacturing: Old wine in new bottles? [J]. Procedia CIRP, 2014, 17: 94-99.
- [7] WU Dazhong, TERPENNY JANIS, GENTZSCH WOLFGANG. Cloud-based design, engineering analysis, and manufacturing: A cost-benefit analysis[C]/43rd Proceedings of the North American Manufacturing Research Institution of SME, Charlotte: Procedia Manufacturing, 2015: 64-76.
- [8] WU Dazhong, ROSEN W D, WANG Lihui, et al. Cloud-based design and manufacturing: A new paradigm in digital manufacturing and design innovation[J]. Computer-Aided Design, 2015, 59: 1-14.
- [9] XU Xun. From cloud computing to cloud manufacturing



- [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2012, 28: 75-86.
- [10] VERL ALEXANDER, LECHLER ARMIN, WESNER STEFAN, et al. An approach for a cloud-based machine tool control[C]// Forty Sixth CIRP Conference on Manufacturing Systems, Setubal : Procedia CIRP, 2013: 682-687.
- [11] 叶佩青, 张勇, 张辉. 数控技术发展状况及策略综述[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(21): 113-120.  
YE Peiqing, ZHANG Yong, ZHANG Hui. Review on the development and strategies of CNC technology[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(21): 113-120.
- [12] MOURTZIS D, VLACHOU E, XANTHOPOULOS N, et al. Cloud-based adaptive process planning considering availability and capabilities of machine tools[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2016, 39: 1-8.
- [13] HELO P, SUORSA M, HAO Yuqiuge, et al. Toward a cloud-based manufacturing execution system for distributed manufacturing [J]. *Computers in Industry*, 2014, 65: 646-656.
- [14] TAPOLOU NIKOLAOS, MEHNEN JORN, DOUKAS MICHAEL, et al. Optimal machining parameter selection based on real-time machine monitoring using IEC 61499 function blocks for use in a cloud manufacturing environment: A case study for face milling [C]// Proceedings of the ASME 2014 International Manufacturing Science and Engineering Conference, Detroit: MSEC, 2014: 9-13.
- [15] MOURTZIS D, DOUKAS M, LALAS C, et al. Cloud-based integrated shop-floor planning and control of manufacturing operations for mass customization [J]. *Procedia CIRP*, 2015, 33: 9-16.
- [16] WANG Lihui, ROBERT G. An integrated cyber-physical system for cloud manufacturing[C]// Proceedings of the ASME 2014 International Manufacturing Science and Engineering Conference, MSEC, Detroit. 2014: 9-13.
- [17] VALILAI F O, HOUSHNAND M. A collaborative and integrated platform to support distributed manufacturing system using a service-oriented approach based on cloud computing paradigm [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2013, 29: 110-127.
- [18] HAO Yuqiuge, HELO P. The role of wearable devices in meeting the needs of cloud manufacturing: A case study [J]. *Robotics and Computer-Integrated anufacturing*, 2015, 45: 168-179.
- [19] LEITA P, COLOMBO W A, KAMOUSKOS S. Industrial automation based on cyber-physical systems technologies: Prototype implementations and challenges[J]. *Computers in Industry*, 2016, 81: 11-25.
- [20] TEDESCHIA S, MEHNENA J, TAPOGLOUA N, et al. Security aspects in cloud based condition monitoring of machine tools [J]. *Procedia CIRP*, 2015, 38: 47-52.
- [21] XIA Min, LI Teng, ZHANG Yunfei, et al. Closed-loop design evolution of engineering system using condition monitoring through internet of things and cloud computing [J]. *Computer Networks the International Journal of Computer & Telecommunications Networking*, 2016, 101 (C): 5-18.
- [22] HELU M, HEDBERG J T. Enabling smart manufacturing research and development using a product lifecycle test bed [J]. *Procedia Manufacturing*, 2015, 1: 86-97.
- [23] KANG H S, LEE J Y, SANGSU C, et al. Smart manufacturing: Past research, present findings and future directions [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2016, 3(1): 111-128.
- [24] 卢秉恒. 智能制造: 摆脱装备“形似神不似” [J]. *中国战略新兴产业*, 2015(Z2): 54-56.  
LU Bingheng. Smart manufacturing: To get rid of equipment, the shape does not seem like God [J]. *China Strategic Emerging Industry*, 2015(Z2): 54-56.
- [25] 李伯虎, 张霖, 王时龙, 等. 云制造——面向服务的网络化制造新模式[J]. *计算机集成制造系统*, 2010, 16(1): 1-7.  
LI Bohu, ZHANG Lin, WANG Shilong, et al. Cloud manufacturing : A new service-oriented networked manufacturing model[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2010, 16(1): 1-7.

作者简介: 黄莹(通信作者), 女, 1978 年出生, 副教授, 博士研究生。  
主要研究方向为智能制造。  
E-mail: zhuzhuxiao@stu.xjtu.edu.cn