

数字制造与数字装备

Digital Manufacturing & Digital Equipment

华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室 熊有伦 王瑜辉 杨文玉 尹周平



熊有伦

机械工程专家,中国科学院院士,华中科技大学教授,机械制造系统工程国家重点实验室学术委员会主任,机器人学国家重点实验室学术委员会主任,“智能制造”专业委员会主任委员,湖北省计量测试学会理事长。主持或承担国家自然科学基金“九五”重大项目“支持产品创新的先进制造技术中的若干基础研究”、自然科学基金重点项目“网络环境下的数字制造理论与关键技术研究”。长期从事先进制造技术、机器人和精密测量等方面的教学和科研工作。

数字制造作为新的制造技术和制造模式,已成为推动 21 世纪制造业向前发展的强大动力,其重要特征表现在:产品数字表达的无二义性、

随着我国制造业信息化的推广和深入,数字车间、数字企业和数字化服务等数字技术已成为企业技术进步的重要标志,也是提高企业核心竞争力的重要手段。

可重用性(形式化描述与表示);产品开发和产品性能的可预测性(可制造性分析与产品性能预估);制造活动对于距离、时间和位置的独立性(网络环境)。数字装备是数字制造的基础,也是推动 21 世纪制造装备发展和创新的强大动力,不仅具有强大而灵活的加工能力,而且具有强大的信息加工和处理能力。

目前,数字制造和数字装备需研究并解决的问题主要包括:多物理场的数字建模、加工和成形过程的数字仿真、快速产品开发、高速高精数字加工设备和数字测量设备等。

本文分析数字制造和数字装备的研究范围、研究现状和发展趋势,探讨其科学内涵及结构体系,展望其研究前景,为提高我国制造业数字化、信息化、智能化水平,提高企业的产品创新能力和核心竞争力,促进经济可持续发展,从源头寻求理论和技术支持,探索数字制造和数字装备领域的关键科学技术问题。

国内外研究现状和发展趋势

自 1998 年美国副总统戈尔提出“数字地球”的概念以来,诸如数字流域、数字城市、数字化生存、数字人体和数字战争等以数字为前缀的新概念大量涌现。数字制造即为全球数字化浪潮的重要一环,其内涵包括数字设计、数字制造装备和数字制造技术等研究领域,在产品设计与协同开发、制造过程和制造模式等方面带来一系列变革。近年来,随着我国制造业信息化的推广和深入,数字车间、数字企业和数字化服务等数字技术已成为企业技术进步的重要标志,也是提高企业核心竞争力的重要手段。

数字制造和数字装备是一个开放的研究领域,也是一个快速发展的研究领域。亟待研究的关键科学技术问题有:

- (1) 物体形位空间和旋量空间的数字表示、几何计算和几何推理;
- (2) 多物理场的交互作用规律

及其数字表示；

(3)几何约束、物理约束和产品性能约束的相容性及混合约束问题求解；

(4)制造过程和制造系统中的模糊信息、不确定信息、不完整信息以及经验与技能的形式化和数字化表示；

(5)异构制造环境下的信息融合、信息集成和信息共享。

数字制造与数字装备这一研究课题旨在解决数字产品开发全生命周期中的数字表示、建模、推理；分析制造系统的行为复杂性、产品可制造性、可装配性、可维护性等共性问题；提出产品开发过程中的数字建模理论与方法；研究产品开发的多领域多尺度仿真，建立多目标与整体综合模型。研究数字化协同产品开发过程，建立功能、时间、成本、质量等压力下的产品开发过程动态模型，研究网络化控制系统理论与方法、智能数控系统理论及关键技术，突破我国急需的大型装备和复杂电子机械产品的数字化建模的难点，为重大工程的关键零部件和复杂电子机械产品的自主研发提供理论基础和技术支持。对提高企业的产品创新能力和核心竞争力，促进经济可持续发展具有重大理论意义。

实现数字制造的前提是建立产品的数字模型，用计算机可识别的方式给出产品生命周期全过程的数字化定义。目前研究最多的产品模型有几何模型、物理模型、知识模型和样机模型，其中几何模型和知识模型多是静态描述性模型，主要用于产品的设计与制造，而物理模型、样机模型是动态仿真模型，面向产品的性能分析。数字制造的一个主要特点是不但要处理大量的常规工程数据和图形信息，还有大量经验、知识等非几何信息需要处理。如何将制造过程中的物理量(力、热、声、振动、速度、误差等)数字化并表示为计算

机能够处理的形式，尚有大量工作要做。

数字化产品开发过程一般指计算机辅助设计、产品和过程建模、产品开发管理等方面。

目前，协同产品开发已经发展为一个新的研究领域，其关键是把任务分解为各个模块中独立实现的子任务。任务分解的明显益处是能适用于分布式工作，各子任务在选择任务执行的方法和工具时具有自治权，子任务的协作执行过程适合于网络环境。因此，需要在现有工程设计理论的基础上建立系统化的协同产品开发方法。

数字仿真包括关键元器件、产品系统和制造过程仿真3个方面。设计者可以基于元件对象模型生成零件的虚拟原型，通过仿真对产品功能进行评价。数字样机实现产品系统的建模和仿真。数字样机具有真实产品中有关设计和功能分析的主要特征，为设计过程和设计目标的系统化评价提供一个数字化评价判断依据和工具。产品制造过程数字建模与仿真借助建筑在数学、物理学基础上的计算模型、计算机预演等手段，揭示制造工艺过程的本质，获得知识及进行产品自主设计，实现对产品制造、装配乃至产品整个生命周期的预测和优化控制。

数字制造装备(数字装备)，包括数控机床、焊接机、工业机器人和坐标测量机，已从单纯的制造执行实体逐步发展为综合信息处理装置，其数字信息处理能力是数字制造系统的重要特征。这些设备具备运动规划、性能建模、状态检测、自控制、自维护和自重组的功能，以满足快速产品开发和快速响应市场的需要，适应产品创新和市场竞争的环境。数字装备的特征集中体现在运动数字化，包括驱动过程的数字建模、多约束条件下的运动规划、基于传感信息的参数识别以及对工况变化的自适应控制等

方面。

将网络集成到控制系统中以取代传统的计算机控制系统中的点对点连线，具有很多优点，便于实现系统的诊断和维护，同时也可提高系统的柔性。但是，控制网络的引入也增加了控制系统分析和设计的复杂性。网络化控制系统必须解决的关键问题之一，就是在网络带宽有限的情况下如何保证控制系统的实时性、安全性与稳定性。要解决这一问题，需要进行跨学科的研究。美国国防部已经通过多学科大学研究创新计划(MURI)对这一领域投入大量资金，欧盟也在其框架计划中对网络化实时控制和嵌入式系统提供了较多资助。国内近年来在国家自然科学基金和863项目等的资助下，在工业控制网络和网络化控制的理论和应用研究领域均取得了许多成果。

数控技术正在从专用结构向开放体系架构发展；从被动控制向主动智能方向发展；从简单的几何加工仿真向实时工况集成监控和物理建模仿真优化方向发展；从传统G代码加工数据流控制模式向产品数据模型直接驱动模式转化；从单向人机交互模式向智能化系统重构模式转化。

国内高校和研究院所在国家自然科学基金资助下开展了一系列研究。华中科技大学和武汉理工大学共同承担了国家自然科学基金重点项目“网络环境下的数字制造理论与关键技术”，对几何推理、反求工程、海量测量数据的数字建模、数控加工装备和网络环境等方面进行系统深入研究。西北工业大学、浙江大学、北京航空航天大学、上海交通大学等高校和科研院所在复杂产品协同开发支撑环境、分布式协同产品开发及支撑技术、产品开发过程理论和建模方法、虚拟企业产品开发过程信息管理等关键技术方面开展了一系列研究。

目前,有关数字制造的基础理论研究还很不系统,远远没有形成科学的数字制造理论体系,甚至数字制造概念的内涵和外延也有待于进一步定义和明确,这一问题随着数字制造技术的继续发展而日益突出;在关键技术方面,海量制造信息的系统化建模、复杂电子机械产品的开发方法、高精度智能化数控装备、复合技术产品的设计工具等一系列关键支撑技术有待解决。

进入 21 世纪后,随着国际产业结构调整 and 转移,中国将成为世界最重要的制造和供应基地之一。但是,与国际先进水平相比,我国的制造业和制造技术还存在着相当大的差距,目前迫切需要解决以下 2 个突出问题:(1) 产品创新能力较差,开发周期较长。(2) 制造工艺装备落后,成套能力弱。不解决上述问题,我国的制造业很难在激烈的国际竞争中生存和发展,很难从一个制造大国转变为一个制造强国。数字制造是先进制造技术的核心,对于提高我国制造业的技术创新能力和国际竞争力,促进制造业产业结构的优化和升级,以及实现我国制造业的跨越式发展等均具有积极的推动作用。

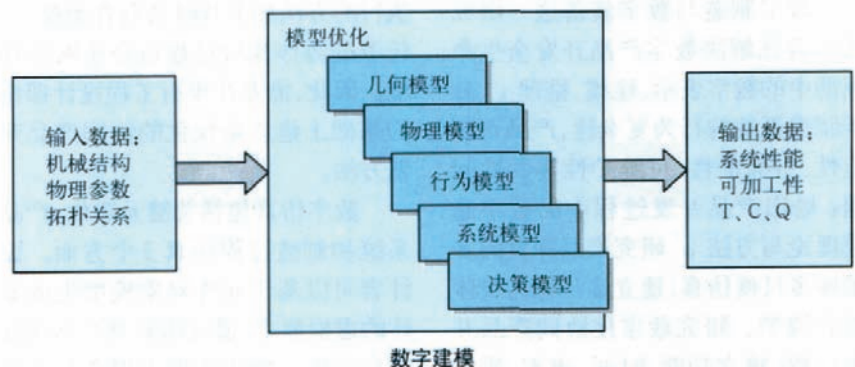
总之,制造系统正在由原来的能量驱动型转变为信息驱动型,数字制造与数字装备已成为先进制造技术的核心。数字制造革新了传统制造的科学基础,使产品设计制造从部分定量、部分经验、定性化逐步转向全面数字化和定量化,产生了一系列的基础理论和关键技术问题,如产品信息的数字化表示、制造过程的数字建模与仿真、数字样机技术、开放式数字控制技术等。产品制造工艺和制造过程的系统水平建模、数字制造机理和网络环境等都已成为数字制造的重要研究课题。

数字建模与仿真

数字制造涵盖设计开发、加工过

程和制造系统等多个方面,复杂产品的可制造性分析面临 2 个基本问题:

(1) 多维、多源、异构制造信息的形式化描述与数字化表示。包括:制造经验和知识的形式化和数字化;产品加工、装配、测量等制造过程中的空间描述与形式化表示;面向数字化加工的过程建模;分布式网络环境下产品数字共享模型,数据的一致性维护和冲突解决机制。



(2) 混合制造约束分析和约束问题求解。研究物理约束的几何表示和几何推理方法;提出多约束融合的分析模型、计算模型和数字求解方法;建立现实空间、旋量空间和形位空间的可达性、可接近性和可视性分析理论,探讨多物理空间相互作用机理和混合约束问题求解方法。

现代制造系统的信息组织呈现出多层次性、动态性和多维性的特点。企业组织之间的紧密协作和敏捷响应依赖于信息搜集、交换、数字化和智能化处理能力。有效处理不同抽象层次的多源、多维、异构信息,实现数据的一致性转换和共享,以便实现协同设计、分布式规划、供应链管理、过程监控等目标,使企业具备快速的反应与决策能力。

制造过程的约束分析与混合约束问题求解的目的是:在满足功能、几何、物理、工艺等混合约束的前提下,实现时间、成本、质量等产品开发指标的多目标全局优化。仿真就是建立制造系统、工艺过程的虚拟环境,代替其物理原型,实现数学模拟

和可视化,解决可制造性分析与产品性能预估,提供一种可以调整和控制制造系统行为的有效方法和实现手段。

在数字制造中,数字信息(包括数字化的几何信息、物理信息和经验知识等)不仅成为主宰制造产业的决定性因素,而且还是最活跃的驱动因素。研究制造过程的几何量(位移、多坐标联动位移、产品形状等)、物理

量(力、热、声、振动、速度等)等制造信息的数字化表示与处理,建立制造装备、制造过程和制造系统的数字化模型是实现数字制造的前提条件;如何综合考虑制造系统、产品特征和制造过程,对它们进行形式化表示,建立有效的工程模型,进行高效、精确计算和推理,实现混合约束问题求解,从而制定相应的控制策略和优化决策,都是数字制造必须研究解决的基础理论问题。

由于信息科学的发展和带动,制造技术的研究与开发正在酝酿着重大突破,由传统的经验方法向基于知识的建模仿真和试验相结合的方向发展,建模与仿真正在成为复杂制造装备研究与开发过程不可缺少的环节。建模与仿真可实现制造过程和制造系统的优化,将大量节约资源与能源,显著减少研制费用,缩短研制周期,大大加快复杂制造装备的研究开发速度。制造过程和制造系统的数字模拟仿真具有多尺度、多学科、多功能、高精度及高效率等特征,主要研究内容包括:

(1) 制造过程多物理信息和拓朴几何信息的数字表示与融合;

(2) 多维、多源、海量测量数据的实时处理、特征抽取和保真映射;

(3) 测量、装夹、加工、装配、拆卸等操作中几何推理与物理推理;

(4) 产品全生命周期的数字建模, 多学科多尺度数字仿真、性能预测和综合优化;

(5) 产品结构与混合约束的数字表示, 产品的可制造性分析、可装配性分析和可维护性分析。

精微化数字化制造装备

精微化数字化制造装备用于多约束条件下的复杂电子机械(CEM)产品零件的精密加工和装配, 具有精密视觉测量和控制功能。数码相机、微硬盘、导弹定位器、汽车驾驶机构、精密电子产品、航行器系统和微型移动机器人等为代表的高新技术产品正向着精微化、多功能、高性价比、高知识附加值、集成度高和便携式的方向发展。CEM产品的知识附加值在某种程度上由其制造的复杂程度所决定, 这类产品的可制造性分析和可维护性预测尤其重要, 其制造的复杂性取决于该产品的集成度、精微化和维数。

作为现代制造装备“灵魂”的数控系统已由NC、CNC时代进入了PC-NC和NET-NC时代, 其目标是开发具有智能化和柔性化的新一代数控系统, 将各种新工艺、新技术、新方法集成于控制系统的基础平台和相应的支撑环境。数控技术发展的另一个趋势是提升各种装备性能、丰富功能, 使其更新换代, 演变为应用广泛的“数字装备”, 如电子制造装备、科学仪器、生物医疗装备以及印刷、纺织等轻工机械。

数字装备的一个重要特征是对海量信息处理能力的提高。在数字仿形技术的基础上, 利用激光扫描、CT、核磁共振等数字测量设备实现

零件形状特征等几何量的数字化, 然后通过数据预处理、表面建模、实体建模、后置处理等过程生成STL文件(或数控代码)驱动快速成形机(或数控机床)加工出新零件。伽马刀、电镜、视觉引导的机器人等数字医疗设备扩展了基于视觉的数字测量仪的应用范围, 实现了人体内腔器官的数字化操作手术。

数字装备的另一个重要发展趋势是加工对象的尺度变化, 由毫米(mm)、微米(μm)到纳米(nm), 陆续出现了显微数字图像处理设备、电子制造装备(包括光刻机、键合机、粘接机、倒装芯片封装机等)等精密数字制造装备。主要研究内容包括:

(1) 多自由度柔性、灵活的执行机构综合与分析。

很多执行机构一般具备6个自由度, 并且要求对执行机构的作用力精确控制; 芯片尺寸的变化、各环节间的动作衔接、以及高速的运动状态等都对各执行机构的柔性和灵活性提出了较高的要求。

(2) 视觉信息引导、反馈与精确定位。

视觉图像已经是数字装备中的重要信息源, 芯片的微小尺寸对视觉信息处理的精度和速度有更高的要求, 同时, 需要实时的视觉信息反馈。采用飞行视觉方式可避免过程中的停顿, 提高电子装备中视觉定位的速度, 实现视觉引导下的实时控制。因此, 视觉机构、光路设计, 视觉信息采集、光照控制、聚焦以及与运动控制的配合都是需要研究解决的问题。

(3) 粘胶固化及滴胶过程的时间、温度和压力控制。

倒装芯片封装是一个复杂的工艺过程, 基板材料、凸点制备方式、粘胶材料等对设备有不同的要求; 满足工艺条件的变化、实现对滴胶过程、粘胶固化、预焊、终焊的精确控制需要解决对时间、温度、压力等物理量的传感、测量、多信息融合、混和约

束建模与求解等一系列科学与技术问题。

(4) 倒装工艺装备。

倒装工艺装备实现送料、滴胶、拾取、贴装、热压固化等5个主要工序, 各工序单元结构、操作、运行节拍各有差异, 又相互配合, 要满足高速、精密、稳定的要求, 集成异构单元的信息, 协调目标间的冲突, 以提高设备综合性能指标的优化算法也是开发倒装工艺设备样机中需要解决的问题。

数字化协同产品开发

全球化制造和无国界企业经营客观上要求以分布自治的方式构建数字企业, 简化系统中各数字单元间的耦合关系, 提高各单元的智能化水平和交互协调能力, 从而极大地提高数字企业的灵活性、可扩展性, 实现产品开发过程的动态重构。协同产品开发(CPD)是实现数字企业各单元分布自治的一种策略, 它不仅仅关注各个产品开发功能模块之间的协作, 而且重视产品开发不同阶段下数字信息的管理与控制。基于网络协作和分布式计算的协同产品开发可以解决由于数字单元的分布性、异构性带来的单元之间信息交互与协作的困难, 实现基于制造过程的信息集成。协同产品开发的研究主要有以下几个方面:

(1) 协同产品开发系统结构。

协同产品开发系统是以基于Web的分布式信息构架为基础, 由共享信息仓库、数据管理层以及分布式结构层等3个层次模型组成的。其中, 引入新的数据模式结构, 对设计参数、设计文件关联数据、产品开发知识以及三者之间的关系进行建模, 从而增强产品开发信息的可重用性和柔性; 通过对产品开发信息进行定义、分类, 构建分布式信息模型, 实现产品开发信息的分布式管理; 引入Agent技术对产品开发信息进

行主动维护和更新;作为整个体系结构的管理者,分布式结构层用以解决系统运行过程中出现的诸如信息安全、共享、冲突、奇异等问题。

(2) 协同产品开发信息的数字化表示与融合。

在协同产品开发过程中,设计者不仅面对几何数据的交互,更要对制造过程和制造系统的设计规范、设计标准、设计约束以及设计意图等广泛的产品开发信息(知识)进行处理。因此需要对知识及其衍生的开发信息构建一种通用的数字化表示构架,使其能够描述更全面的产品开发信息,而不仅仅局限于形态、功能、行为,以利于支持异构应用单元之间的信息交互;支持产品开发信息的重要性和产品开发过程的重构;支持产品开发信息的演化更新和协同产品开发的创新。构建先进数据管理系统和数据共享结构,实现实体表示与数据格式两阶段转换的信息融合。

(3) 基于决策的协同优化。

数字化协同产品开发过程本身是一个多学科优化过程,涉及多个应用单元、多种因素和多个阶段的交叉联合作用。因此,产品制造过程的设计实质上是一个决策过程,需要从多个规划方案中优选出最终方案,能够在满足用户需求和力求企业利润最大化之间保持平衡点。在基于决策的产品开发过程中,依据所涉及的领域和学科的不同,按照一定的规则(如带可信度的模糊聚类法或支持多目标的重要指标排序的层次分析法)将整个系统分解成多个子系统,以简化系统间的约束关系,降低系统设计的复杂性。据此,基于决策的协同优化可以分为系统级和子系统级两个阶段,系统级优化依据约束梯度对各个子系统分配优化目标。在协同优化过程中以多 Agent 系统为框架,引入人工智能技术,其中用到遗传算法、神经网络、免疫算法、混沌搜索等方法。

(4) 自重构策略及协作机制。

在产品协同开发过程中,充分利用主导型组织单元在系统组织方面的能力,结合设计目标分配产品开发信息,对一般型组织单元的行为进行协调,通过通信、协商与协作将原本分散的各数字应用单元有机集成在一起,实现基于协同产品开发过程的敏捷化重构。在实施过程中应当遵循功能与行为分离、功能与资源解耦两个原则。

在协同产品开发过程中,处于分布自治状态下的各个数字应用单元进行协同工作时,需要权衡多方的利益与目标,以求在获得总体最优的情况下满足各参与单元的利益。各数字应用单元之间的协调机制可分为显示协调和隐式协调两类。与显示协调相反,在隐式协调中各应用单元之间并不发送任何符号信息,不需进行复杂的信息处理。利用群集智能,例如蚁群算法等,构建基于信息素的隐式协调,能够使得协同产品开发系统具有更好的总体优化性能、更佳的动态适应性、稳定性和鲁棒性。

数字制造网络环境

建设数字制造网络环境的目标是利用网络技术将地理上位置不同的制造设施、计算与存储设备、控制与检测仪器仪表等集成在一起,建立面向网络制造服务的通用基础支撑环境,实现 Internet 上产品全生命周

期的制造资源、设计资源和服务资源的有效聚合和广泛共享,从而建立一个能够实现设计区域或全球合作或协作的虚拟制造环境,支持以区域网络制造和全球网络制造为特征的数字制造活动。

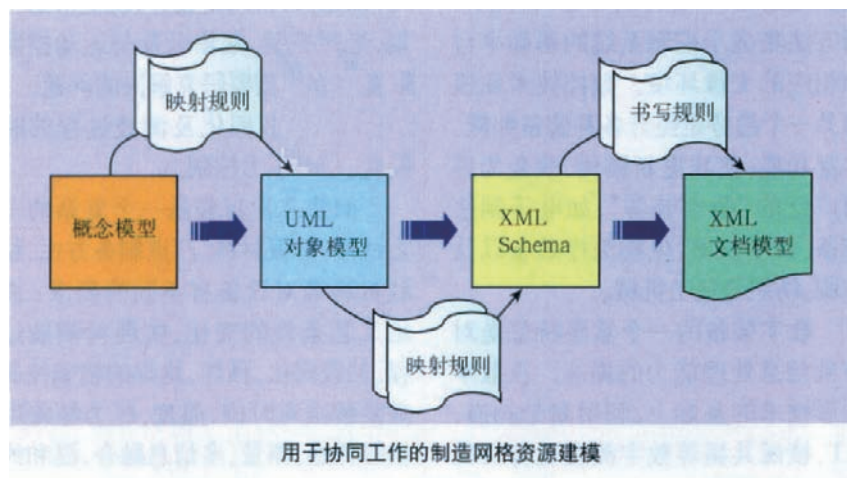
以网络为基础的数字制造环境和制造网格的研究对未来的数字制造模式和制造活动产生了深刻的影响,同时也提出了挑战,如:无序成长性与动态有序性的统一;自治条件下的协同性及安全保证;异构环境下的制造资源可用性和易用性;制造海量信息的结构化组织与管理等。因此,开展基于网络制造的基础科学理论研究,可促进网络制造技术的原始创新,为建立高性能的区域或全球协作的制造试验环境提供基础理论和方法,并可进一步争取形成国际标准。具体的研究内容包括:

(1) 网络环境下数字制造模型。

网络制造环境主要体现在虚拟组织、资源的异构、分布、动态、演化特性以及共享模式、协同方式的变化上。因此,需要研究和建立网络环境下数字制造的信息模型、制造海量信息系统模型、分布式制造信息模型、协议模型、经济模型、时空模型等。

(2) 网络制造环境下数字制造资源的协同工作理论与机制。

建立一套适应网络制造环境的协同工作的理论,提出适应协同工作的行为主体的构造方法,构建网络制



造的协同工作模型,包括资源共享的协同性模型、问题解决的协同性模型以及网络制造环境下的工作流模型等,研究行为主体通信语言和协议,实现跨平台资源的透明互操作,并实现互连、组合和协作。

(3)网络制造环境下的可信自治域制造模型与群组安全。

主要研究在网络制造环境下各自治域系统的可信接入、可信传输、可信管理等制造模型,促使各种制造资源、设计与数据资源、服务资源的整合与共享,对终端设备的安全可信接入、网络设备的安全可信管理、制造信息的安全可信传输等环节进行组织与管理。以制造数据和信息的机密性、完整性、身份认证和行为的不可抵赖为目的,为各类制造活动提供可信的互联、互通和互操作手段以及群组安全的保证机制。

(4)网络制造环境下的程序模型及其理论。

为适应网络制造环境的分布、动态、自组织和自适应的特点,把握正确、高效的编程和网络制造环境下的程序模型是非常重要的。为此,需要研究网络制造的程序语言模型、程序验证模型、程序测试模型以及程序运行模型等。

(5)网络制造环境下数字制造资源的监测与控制。

提供对网络制造系统进行监测和控制的方法,获取资源(网络结点和网络)的使用、应用程序的运行等信息,提供对制造资源和应用进行监控管理的统一协议和接口标准,及时发现制造系统运行的异常以及影响制造系统功能和性能的瓶颈,并将获得的制造信息作为反馈,在一个统一监控调度框架下调整制造系统的行为,从而使整个制造系统的资源利用比较均衡,提高制造系统的整体效率。数字维护是数字制造的重要环节,无线传感网的出现是数字检测的一个里程碑,研究无线传感网的核心

理论与技术,构造出制造环境下的传感网络对网络制造资源的监测与控制具有十分重要的意义。

智能化、网络化控制系统

数字制造和网络制造的基础是底层制造设备的数字化和网络化,智能制造则以一种高度柔性集成的方式,取代或延伸制造环境中人的部分脑力劳动。智能化、网络化控制系统的发展适应了制造系统逐渐趋于分布式的发展趋势。工业控制网络的建模理论、性能评价方法,网络化控制系统分析理论和基于模型的网络化控制系统设计方法,基于动态监控和物理建模仿真的层次化开放结构智能数控系统,智能化、网络化控制系统的仿真与设计平台等都是重要研究内容。

(1)工业控制网络的性能评价。

工业控制网络作为实时通信网络,主要性能指标包括端到端传输延迟、延迟抖动、缓冲区需求、吞吐量等。性能评价的目的有3个:选择、改进和设计。在不同控制网络中选择一个最能满足系统需求的方案,达到较好的性能/价格比;对已有控制网络的性能缺陷和瓶颈进行改进,提高其运行效率;对网络控制系统进行性能分析,从而实现优化设计。

(2)网络化控制系统的调度。

可调度性是控制网络的重要性指标,在很多高安全性系统中,实时报文的不可调度性可能会导致非常严重的后果,因此,如何在系统设计阶段确保控制网络实时报文的可调度性,在理论上和实践上都具有重要的意义。在控制系统中存在着大量周期性传输的实时报文,良好的调度策略应在满足可调度性的前提下,使周期性报文传输具有最小的抖动,从而使控制性能达到最优。

(3)网络化控制系统分析与设计。

一个设计良好的网络化控制系

统应具备以下特点:控制与网络延迟的最小化、负载平衡、可靠性、模块化、低成本。应当建立基于模型的设计方法:进行控制系统的需求分析,以带实时扩展的形式化描述语言规范系统的功能需求和实时约束;把控制系统功能划分为不同的控制节点,然后建立系统的控制算法模型和控制网络模型;进行控制与调度的协同设计,对不同的控制策略和网络调度策略下的系统性能进行分析和评价,以选择优化方案。

(4)层次化开放结构智能数控系统。

建立多物理状态数据融合的信息快速响应分析平台,研究物理状态智能建模和信息数据库理论体系。构建切削过程中物理状态优化仿真模型和虚拟切削系统,能模拟现场切削状态,作为智能数控系统的技术核心。

策略措施及建议

综上所述,数字制造与数字装备代表制造学科新世纪的主要研究方向,也是提高企业核心竞争力的重要手段。因此建议:

(1)设立若干重大项目和重点项目,加大对数字制造和数字装备基础理论和关键技术的支持力度。

(2)选择以上5个优先资助领域为突破口,采取有效的协调组织措施,以点带面,提升数字制造和数字装备的技术水平,推动先进制造学科的发展与源头创新。

(3)鼓励科研单位与企业联合,以产学研合作的形式,进行数字制造和数字装备的研发,促进科技成果的转化与应用,提升相关产业的制造能力和核心竞争力。

志谢:

感谢自然科学基金委员会和武汉理工大学周祖德教授等的支持和帮助。
(责编 金卯)