

可重构制造系统理论研究*

梁福军 宁汝新

(北京理工大学机械与车辆工程学院 北京 100081)

摘要: 在已有定义基础上给出了可重构制造系统(RMS)的定义, 分析了 RMS 与刚性制造系统(DMS)、柔性制造系统(FMS)的区别。建立了 RMS 的结构和组成、类别及理论体系, 将 RMS 基础理论概括为系统随机建模、布局规划与优化、构件集成整合、构形原理、可诊断性测度和经济可承受性评估 6 个方面, 并提出了 RMS 使能技术。

关键词: 可重构制造系统 基础理论 构形原理 系统特性 系统设计 斜升时间 研制周期

中图分类号: TH162 TH165

0 前言

制造企业为了降低生产成本和获取更多经济利益, 曾把具有生产批量大、产品功能固定、产品成本和价格较低等特点的大批量生产(Mass production)作为主导生产模式。随着科学技术的不断进步、产品供应市场的日益国际化和消费需求的日趋个性化、多样化, 一种由客户订单驱动, 以小批量、多品种、多功能、快速交货和短的产品市场寿命等为特征的顾客化大生产(Mass customized manufacturing, 也称大批量定制生产)模式便应运而生, 制造企业需要由面向产品的生产转向面向客户的生产, 由卖方市场转向买方市场。传统制造系统显然不能适应这一形势的发展要求, 需要发展一种能够通过产品结构调整和制造系统快速重构, 将定制产品的生产问题全部或部分地转化为批量生产的新型制造系统, 可重构制造系统(Reconfigurable manufacturing system, 简称 RMS, 也称可重组制造系统)或快速重构制造系统(Rapidly RMS, 简称 RRMS, 也称快速重组制造系统)就是在这样的背景下产生的。

RMS 产生的直接原因是当今快速多变和难以预测的市场环境, 表现在由激烈的全球化竞争、逐步提高的客户素质和创新的工艺技术直接驱动的新产品上市速度、产品零部件、客户需求、工艺技术和政策法规等多个方面的变化, 反映了经济、技术和社会之间的平衡。企业只有具有快速、有效和低成本地适应各种变化的能力才能在新的环境中生存。

20 世纪 90 年代左右, 计算机辅助设计(CAD)

的应用大大缩短了产品设计和开发时间, 加快了新产品上市速度, 然而现有制造系统设计方法仍以手工为主, 系统研制周期(Lead time, 指从决定生产至实际投产间设计、建造或重构制造系统的时间)长已成为制造系统发展的瓶颈, 缩短系统斜升时间(Ramp-up time, 指新建或重构后的制造系统运行开始后达到规划或设计规定的质量、运转时间和成本的过渡时间)是系统重构成功的关键。系统研制周期的缩短可通过对其模块化的构件进行快速设计和对已有制造系统进行重构来实现^[1]。

发达国家从 20 世纪 90 年代中期开展了相关研究。1996 年, 美国密执安(Michigan)大学工程研究中心(ERC)在美国国家科学基金会(NSF)和 25 家公司资助下开展了有关 RMS 的研究。1997 年, Y. Koren 教授等首次正式提出 RMS 的概念。美国国家研究委员会(NRC)于 1998 年在《2020 年制造挑战的设想》的报告中明确地将 RMS 列入 6 大挑战与 10 大关键技术中, 而且 RMS 名列 10 大关键技术之首^[2]。我国对敏捷和网络制造模式下的快速重构以及支持可重构性的制造执行系统(MES)的研究较多, 而对底层加工系统的可重构问题的研究并不多。从 1997 年起, 我国在国家自然科学基金和“十五”863 计划基金资助下, 对 RMS 的理论及方法进行了研究, 取得了一定研究成果^[3~7]。一些学者将合弄(Holon)的概念应用于 RMS 中, 理论研究已取得一定进展。总之, 目前对 RMS 还没有形成完整清晰的理论体系。

1 概念及特性

1.1 重构、重组及相关概念

任何系统(自然系统和人造系统)都具有人们用于将其从客观世界中辨别和分离出来的确定物理形

* 国防科工委基础研究资助项目。20030312 收到初稿, 20030415 收到修改稿

态或抽象概念模式,这种形态或模式在时间上的“定格”称为系统的构形,在不同条件或时刻下会呈现不同的构形。构形是一个动态的概念,一个构形就是在某一确定条件下呈现的一个临时性固定状态,可被认为是系统进化轨迹上的临界离散(突变)点。具有多种构形的能力是系统适应多种变化的手段,赋予系统一定的进化能力。构形包括由其所有构件组成的整体集合、构件的属性和构件间的关系(如空间、时间、功能和逻辑关系)等方面的内容^[8]。

重构(Reconfiguration, 也称重组或重配置)指系统从一种构形向另一种构形的转换^[9],是系统生存和发展的基本手段。可重构指系统具有重构的能力。可重构系统指具有可重构性的系统,当条件发生变化时能够动态地改变其当前构形。

制造系统重构是一种对现有制造资源进行不同利用和配置以满足不同目标的转变。在快速多变的 market 环境中,制造系统只有通过动态重构才能快速平稳地转换到新的状态,可重构性成为其对变化做出反应而得以继续生存的根本手段。

目前,学术界将“重构”与“重组”及相关词汇混用,如“可重构制造系统”与“可重组制造系统”,“可重构机床”与“可重组机床”等名称不尽统一。从字面上看,重构指重新构造系统的结构及重新组合系统的功能,可能需从系统外引入新的构件,或从系统中移出已有构件,或用一个构件替换另一个构件(物理重构),或保持已有系统构件不变而改变生产作业计划(逻辑重构)^[10];重组指重新组合,一般仅在系统原有构件的基础上进行,不必从系统外引入新的构件。从严格意义上说,“重构”的内涵比“重组”宽泛一些。笔者认为,在制造系统中侧重于企业和生产管理时,用“重组”比用“重构”更恰当一些,相应地应将相关概念如“构形”、“构件”分别称为“组态”、“组元”;侧重于加工系统和设备时,用“重构”比用“重组”更恰当一些。

1.2 制造系统的可重构性

制造系统的可重构性指一种可以按照规划和设计规定的变化,利用子系统、模块或构件的重排、更替、剪裁和革新等手段对系统进行重新构形、更新过程、变换功能或改变系统的输出量以快速响应市场变化的能力。若将成组技术、零件族成组分类、组合机床、成组工艺以及以成组技术为基础发展起来的基于物理、几何相似性的 FMS、CIMS 和制造单元中的共性称为组合性(或成组性),可重构性则是组合性的扩展,但又与组合性有本质的区别:可重构性不仅考虑了物理、几何相似性,而且考虑了生物学相似性。按照仿生制造的观点,制造系统的

可重构与自然界中生物的进化有共同特征:内部均具有层次状的实体结构,当环境发生变化原有功能不能适应需求时,通过“遗传与变异”的“自组织”方式,从自身或自身以外集成合适的基本单元,重新构成新的功能,而且引入“接口整合”这一重要系统特征,以实现系统的“相乘效果”^[4,11]。

制造系统具有层次性,相应地它的可重构性也具有层次性,如图 1 所示。

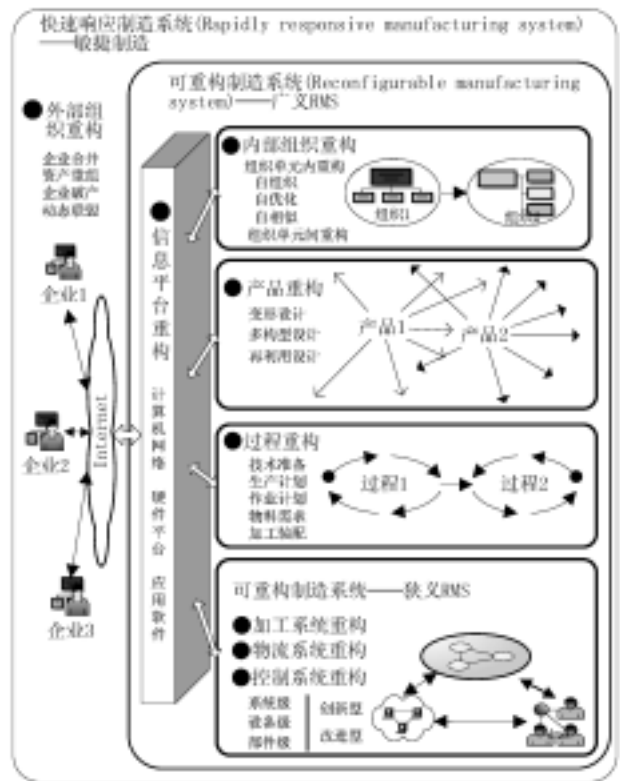


图 1 制造系统的可重构性

(1) 外部组织重构 指不同企业间的组织重构。可分为静态重构和动态重构两种形式,前者指宏观经济意义上的企业合并、资产重组或在经营状况极端恶化时的企业破产,具有静态性和永久性,常由宏观经济标准进行评价;后者指企业为及时响应市场机遇而与其他在地理上分布的企业以动态联盟(敏捷制造)的形式进行动态和临时性的组合^[8]。

(2) 内部组织重构 指企业内部不同组织单元间以及同一组织单元内部的重构。重构时每个组织单元根据内外部要求通过自组织(指自治的组织单元自行修改其属性以适应环境的变化)、自优化和自相似对结构进行重构,内部过程的不断演化逐渐形成相对稳定的单元结构,不同单元间进行协作,以最优方式支持企业组织整体重构目标。主要任务是把企业的复杂递阶组织结构化成扁平结构,对组织进行彻底改革,消除管理和组织中的冗余^[9,12]。

(3) 产品重构 指在设计阶段由用户需求变化、

材料节约和环境保护等因素驱使而进行的涉及产品全生命周期的重构^[8]。主要内容是: ①进行产品变形设计(指在零部件结构形状已确定的条件下, 通过系统地改变其尺寸而进行产品设计)^[13], 更好地使用和重用工程知识, 对新零部件的要求通过已有零部件的变形设计来实现, 最终实现通过重构少量基本零件设计获得多样的零件和组件。②按多构型设计、开发和管理产品, 常用的方法是, 在备选方案和功能冗余的基础上, 通过调整产品重量、尺寸和功能参数等获得具有动态可重构性的多种产品构型。③按模块化的思想进行具有可重构性的产品模块化结构设计^[14]。④考虑产品再利用和环境保护等产品功能要求以外的因素进行产品重构设计。

(4) 过程重构 指针对制造过程的可变性, 对制造系统业务过程的功能性活动及由相关活动组成的有机序列进行分析、分类、整理和重构, 动态改变由系统设备布局、作业计划等确定的人、加工设备等的操作时序及物流路径, 构造定义明确的具有针对性的业务过程^[12]。主要目的是将制造系统中的串式业务过程转变为并式, 因为针对某一生产任务或某一订单而形成的业务过程, 对另一生产任务或另一订单可能不再适用。这里所指的过程重构不同于一般意义上的企业过程重组(Business process reengineering, 简称 BPR), 前者侧重于制造加工业务过程, 后者侧重于企业内部整个工作和业务流程。

(5) 加工系统重构 指按照业务过程重构动态地改变加工系统(如制造单元、生产线和加工中心)中的构件及其之间的联系, 从而改变系统的生产功能和生产能力。主要内容是: ①在变化的环境中较为平稳地在系统级上添加、更换和减少设备, 进行系统物理重构。②在变化的环境中动态地完成软件、控制系统的重构, 进行系统逻辑重构。③根据变化动态改变设备的功能和结构, 灵活性地完成多种任务。

(6) 信息平台重构 指为实现制造系统多方面的可重构性, 构建具有可重构性的由计算机网络、硬件平台和应用软件等构成的信息集成平台(即信息集成框架), 实现各种模块的“即插即用”。

1.3 RMS 的定义

由制造系统及其可重构性的层次性, 可给出在不同层次上具有不同内涵的 RMS 的定义。在加工作业层, RMS 是一种由可重构设备及调度控制软件等构成的可重构加工系统(Reconfigurable machining system)^[15], 可重构加工系统与相应的物流及控制系统构成狭义 RMS; 在企业层, RMS 是一种包含企业组织、产品、过程和加工系统、物流系统、控制

系统重构等多个方面的广义可变制造系统, 其构件不只局限在机床和调度控制软件上, 种类、结构和性质更加庞大和复杂化; 在企业以外层, RMS 是一种基于计算机广域网络和敏捷制造快速响应制造系统(Rapidly responsive manufacturing system)。以上不同层次上的 RMS 具有相同的英文缩写, 但其内容、内涵及范围是不同的。特别指出, 这里研究的 RMS 是指狭义 RMS。

目前还没有准确和确定的 RMS 的定义, 具有代表性的两种定义如下所述。

(1) 定义 1 RMS 是一种为快速调整在一个零件族内的生产能力和生产功能以响应市场或客户需求的突然变化, 而在初始就设计成的可快速改变结构、硬件与软件构件的制造系统^[1]。该定义是由 Y. Koren 教授等于 1999 年在国际生产工程研究学会(CIRP)年会上提出的。其特点是: ①将加工对象限定在按成分分类的一个零件族内。②强调重构是由生产能力和生产功能的变化驱动的。③要求在可重构机床(Reconfigurable machine tool, 简称 RMT)的基础上进行重构。

(2) 定义 2 RMS 是一种能够按市场需求变化和系统规划与设计的规定, 以重排(重新组态)、重复利用和更新系统组态或子系统的方式, 实现低的重构成本、短的系统研制周期和斜升时间、高的质量和投资效益, 快速调整制造过程、生产功能和生产能力的可变制造系统^[2]。该定义是由罗振壁等于 2000 年对定义 1 进行修订的基础上提出的。其特点是: ①将加工对象定义在系统规划与设计的范围内。②强调重构是由生产过程(工艺)、生产功能和生产能力的变化驱动的。③将重构层次由设备级扩展到系统级。

笔者在上述定义基础上, 对 RMS 定义为: RMS 是一种对市场需求变化具有快速响应能力的可重新构形的可变制造系统, 该系统能够基于现有自身系统在系统规划与设计规定的范围内, 通过系统构件自身变化和数量增减以及构件间联系变化等方式动态地改变其构形, 从而达到根据发生的变化调整生产过程、生产功能和生产能力, 实现短的系统研制周期和斜升时间、低的重构成本、高的加工质量和经济效益; 能够对多个零件族提供定制柔性, 同时提供开放性结构。

1.4 RMS 的特性

RMS 具有以下主要特性^[1, 3, 15]。

(1) 可重构性(Reconfigurability) 指 RMS 由一个生产需求期转向下一生产需求期而使所要加工的产品集发生变化时, 按照变化了的生产要求准确、经济性地由一种构形向另一种构形转换的能力。

(2) 模块化(Modularity) 指 RMS 的主要构件(如结构化元件、主轴、控制器、软件和组合夹具、刀具等)是模块化的。

(3) 可集成性(Integrability) 指 RMS 中的设备和控制模块等构件具有与其他构件进行集成的接口以及易于新技术引入的性能。

(4) 可定制性(Customization) 指 RMS 具有柔性定制和控制定制的性能。柔性定制指基于制造加工的零件族及具体零件加工所需的柔性来选择加工设备和构建系统;控制定制者指基于开放性结构技术,通过与控制模块进行集成而提供所需的附加控制功能。

(5) 可重用性(Reusability) 指在满足相同生产需求的前提下,使用 RMS 比使用传统制造系统更节约成本的性能,即用对已有系统进行重构的方式构建制造系统的成本要低于用首次构建的方式构建制造系统的成本的性能。

(6) 可转换性(Convertibility) 指 RMS 在优化作业模式下和一定作业时间(通常为一天)内,一批作业完成、下批作业开始之间快速平稳过渡转换的性能,在转换过程中应尽快完成必要的操作,如更换工艺装备和 CNC 程序及进行其他必要的手工操作。

(7) 可诊断性(Diagnosability) 指对 RMS 重构后的产品加工质量和可靠性(故障产生的原因)等进行辨识和探测的能力。

1.5 RMS 的柔性

RMS 的柔性指 RMS 整体通过其构件间的重新构形而实现的对加工任务(工件)的适应性。RMS 应具有以下几种柔性^[16]。

(1) 设备柔性 指 RMS 中加工设备对加工对象变化的适应性。衡量指标是加工对象变化时 RMS 所需的工具准备、调整和更换时间;软硬件设置、调整和交换时间;加工程序准备、安装和调试时间。产品柔性 指 RMS 经济快速地在不同产品族间转换的适应性。衡量指标是 RMS 从一族工件加工转向另一族工件加工时所需的转换时间。

(3) 加工柔性(也称工艺柔性或混流柔性) 指 RMS 对加工同一族工件的多种加工方式变换的适应性。衡量指标是 RMS 不采用批量生产方式加工时可同时加工的工件品种数。

(4) 工序柔性 指 RMS 对改变工件加工工序先后顺序的适应性。衡量指标是 RMS 实时运行中进行工艺决策和现场调度的水平。

(5) 运行柔性 指 RMS 处理内部局部故障、维持原状的适应性。衡量指标是 RMS 发生故障时故

障处理所需的时间或 RMS 生产率的降低程度。

(6) 批量柔性 指 RMS 对生产批量变化的适应性。衡量指标是 RMS 保持经济效益的最小运行批量。

(7) 重构柔性 指 RMS 根据生产变化和需要,从一种构形转向另一种构形以进行重构的适应性。衡量指标是 RMS 斜升时间等。

(8) 综合柔性(也称生产柔性) 指 RMS 对各种变化的综合适应性。衡量指标是上述几项柔性相互作用的总体结果。

2 RMS 与其他制造系统的比较

RMS 既具有刚性制造系统(Dedicated manufacturing system, 简称 DMS, 也称专用制造系统)的特性,又具有柔性制造系统(FMS)的特性,其经济性优势可以通过减少 FMS 的多余生产能力和(或)生产功能得到实现,一个构形的运行像一个 DMS 在运行。以下对这三种制造系统进行比较^[1, 15, 17-20]。

2.1 基本构架比较

当加工由 m 个零件族和每个零件族中有 n 种不同零件构成的一批零件时,若用 DMS 加工,则需设计 $m \times n$ 条生产线,加工每一种零件需设计 1 条与该种零件对应的固定式专用生产线;若用 FMS 加工,则需设计 m 条生产线,加工每一族零件需设计 1 条与该族零件对应的固定式通用生产线;若用 RMS 加工,则可设计 1 条生产线,即加工多族零件只需设计 1 条可重构生产线。可见 RMS 在提高制造资源利用率、节省空间和实施混流生产方面具有不可比拟的优越性。

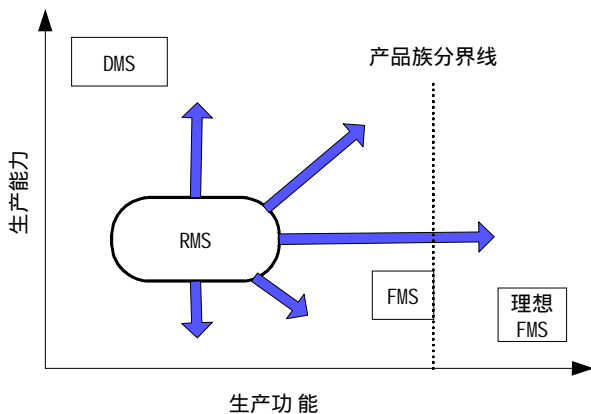
2.2 设计及建造原理比较

DMS 是专门针对某一种零件而不是基于变化的生命周期设计的,不具有缩放性和变化性,无法适应市场需求发生的变化。从理论上讲,设计为由多轴 CNC 机床且以并行作业方式组成的 FMS 可以适应这种变化,然而据一项调查显示^[1],FMS 并没有得到广泛使用,很多购买了 FMS 的企业制造商对 FMS 并不满意,主要原因是 FMS 的高成本、高投入和高价格。组成 FMS 的 CNC 机床并不是针对某一种零件而设计的,而且在企业制造商选择机床以及制定适应机床和零件的工艺计划之前,CNC 机床就被设计和建造好了,机床制造商并不知道具体的生产应用,设计和建造的机床和 FMS 嵌入了各种可能的生产功能,这样就造成冗余生产功能的浪费、购买价格和投入成本的增高。FMS 基于以下假设能达到最高的柔性:①能够加工任何零件。②能够

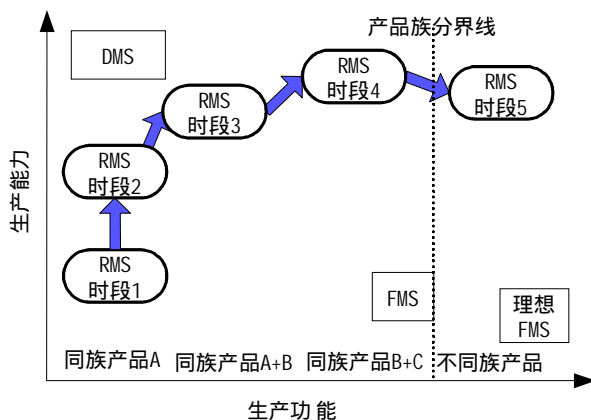
加工以任意混合比组成的一批不同零件。③能够以任意作业顺序进行加工。若要实现以上三个条件,则需要大大增加成本,因为只有投入足够成本才有可能实现 FMS 所需的并行系统结构,该结构利用高功率、通用多轴 CNC 机床,而且这种机床需配备有大容量刀具库和多套刀具。故因巨大投入成本所限,现有 FMS 的柔性均是有限的,进一步提高制造系统柔性的方法应是通过实施 RMS 而不是通过 FMS 来实现。RMS 基于多个零件族进行设计,对零件族中所有种类的零件提供定制柔性,而且构建了具有可调整性的结构,在系统层次上通过调整设备、改变作业计划和控制信息进行重构,在设备层次上通过调整设备构件(如改变机床的硬件和控制软件)进行重构。

2.3 生产能力—生产功能关系比较

制造系统生产能力—生产功能关系如图 2 所示。



(a) 制造系统生产能力和生产功能演化规律



(b) 制造系统生产能力和生产功能关系

图 2 制造系统生产能力—生产功能关系比较

DMS 具有很高的生产能力和有限的生产功能,而且其生产能力和生产功能均在系统设计阶段就被确定好了,是不可更改的。DMS 最为突出的优点是在生产单一或少数类型的零件和处于供不应求的市场环境时表现出高效能、低成本;但缺点是

随着饱和市场的形成和全球市场竞争的加剧,虽然在加工作业时其生产功能能够得到最大程度的利用,但生产能力只有一部分得到发挥,在很多时间中处于闲置不用状态,这样就会造成生产能力一定甚至很大程度的损失。

FMS 基于所有可用柔性和功能而构建,具有多功能、高效能和低成本的特点,但这些特点的充分发挥和实现基于有限生产能力的实现。FMS 往往是一种根据市场预测或针对一定用户,按照一族零件(产品)预先设计好的,适合限于一个零件族内多种零件类型且具有固定生产功能的制造系统,其显著特点是“先设计后使用”。然而在实际使用中,FMS 虽然能够在限定零件范围内进行一定程度的变化,但由于市场的多变性以及客户对产品要求的不确定性等,FMS 中大量可用生产能力得不到充分利用,即使在产品生命周期初期和末期之间的市场饱和期,其生产能力也不一定能够得到充分利用,而且预先设计好的一些甚至很多生产功能往往不能满足变化的要求。结果会造成系统生产能力和生产功能的浪费,产生资金闲置,最终导致大量投入资本的浪费。一项关于汽车组件生产企业的研究报告显示,这家企业的可用生产线的平均利用率仅为 53%^[1]。

RMS 可弥补 DMS 和 FMS 的不足,因为它的生产能力和生产功能可按需来增加、减少和调整。在一般情况下,RMS 的生产能力和生产功能介于 DMS 和 FMS 之间,在 DMS 和 FMS 间可产生多种类型的 RMS。RMS 产生的具体构形取决于其各个构件的“重构粒度”(指由各个构件的可重构性程度而决定的整个系统的可重构性程度),不同重构粒度产生的不同构形可看作是从 DMS(通过降低生产能力和增加生产功能进行调整)或 FMS(通过提高生产能力和减少生产功能进行调整)演化(进化)而来的。例如,在设计一个 RMS 时,可将 CNC 机床作为 RMS 的基本模块,这就需要现有 FMS 低成本、高效率地通过可进行模块化作业的 CNC 机床进行演化,该 CNC 机床应配置有保证统一产品加工质量的在线测量系统;也可将组成 CNC 机床的构件作为 RMS 的基本模块,这就需要从 DMS 向 RMS 演化,需要使用模块化的机床构件和拥有高带宽通信能力的分布式控制器。

RMS 还可以超出 FMS 限定的范围——产品族分界线(这里假设 FMS 的加工范围限于一族零件)在不同零件族内演化。在 RMS 的设计和构建阶段,没有将其设计、规定和物理地限定为具有确定的生产能力和生产功能;在使用前,可以按照生产能力和生产功能在规划与设计规定的范围内进行调整和

重构；在使用时，其具体构形已被确定，并且对应一定的生产能力和生产功能；在使用后，可对其进行快速拆卸。

2.4 柔性比较

DMS 没有柔性或柔性极低。FMS 因系统本身、组织结构和人员素质等诸多因素，没有产生预期的效益和柔性，有的甚至还不如被替代的原有制造系统和设备^[21]。FMS 的柔性是有限的，高柔性的实现需付出巨大成本代价，理想的 FMS 是不存在的。RMS 的生产能力和生产功能可被快速调整，具有很高的柔性。

2.5 总体比较

三种制造系统总体比较如表所示^[1, 2]。

表 三类制造系统比较表

类型		DMS	FMS	RMS
基本制造特征	生产特征	单一或少品种 大批量生产	一族(组)零件 批量生产	多族(组)零件 变批量生产
	生产柔性	无或极低	中等	高(变化)
	过程可变性	无或极小	中等	大
	功能可变性	无	无或小	大
	可缩放性	无	中等	大
	成本效益	最高	中等	高或较高
系统特征	投资/回报率	较高或中	最高或低	中等或低或高
	可重构性	不可重构	不可重构	可重构
	设备结构	固定式(专用)	固定式(通用)	可重构
	部件结构	固定式	固定式	可重构
加工作业	多刀为主	单刀为主	可变	

3 RMS 结构、组成及类别

3.1 结构和组成

RMS 一般由可重构加工系统、可重构物流系统和可重构控制系统三个子系统组成，这些子系统有机结合，构成 RMS 的物料流、能量流和信息流。RMS 结构和组成如图 3 所示^[16, 22, 23]。

可重构加工系统是完成物性任务转换的具有可重构性的执行系统，其加工设备在工件、刀具和控制三个方面均具有与其他子系统相关联的接口——加工设备间通过控制系统作用下的物流系统相关联。在系统级重构中，加工设备为普通加工设备，当该类设备被认为是可移动的构件时，重构主要通过物理重构的方式来实现；当该类设备被认为是不可移动的构件时，重构主要通过逻辑重构的方式来实现。在设备级重构中，加工设备为可重构加工设备，该类设备由多个可分离、独立和模块化的不同硬件和软件构件构成，针对具体生产需求可对这些构件重新装配、设置、调整和运行。

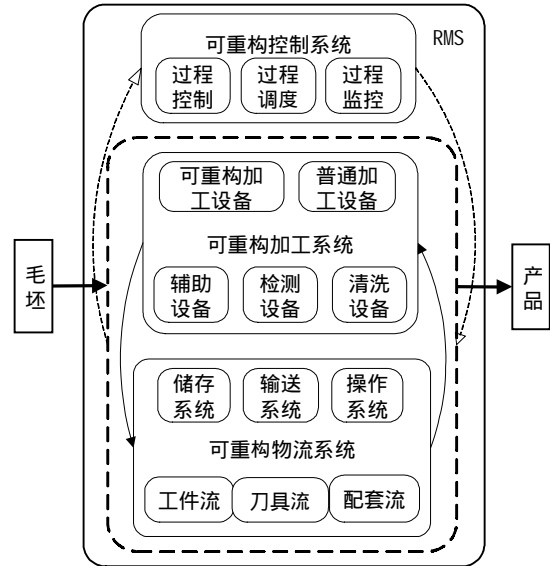


图 3 RMS 结构和组成

可重构物流系统与加工系统的构形、运行等直接相关，主要用于建立加工设备间的联系，在整个系统运行过程中一直处于可进行随机调度的工作状态，而且其工作状态可随时被调整。

可重构控制系统用于快速响应各种变化，及时调整系统运行状态，以保证加工系统中不同加工设备间、加工系统与物流系统间自动协调工作。它基于所规划的准确、正确的信息流而工作，使系统中各个子系统间的信息有效、合理地流动，从而保证 RMS 的计划、管理、控制、调度和监控等功能有条不紊地运行。

从图 3 可以看出，具有可重构性的子系统、构件是 RMS 的重要组成部分。

3.2 类别

按系统层次、重构方式、构件类别^[24]和进化原理对 RMS 进行分类，如图 4 所示。

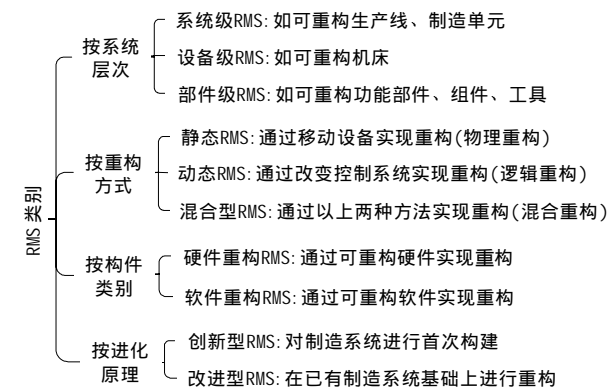


图 4 RMS 类别

4 RMS 理论体系

RMS 的实现需要研究一系列不同层次的关键

问题, 涉及系统规划设计、集成整合和运行决策中的一系列理论问题^[3]。RMS 理论体系如图 5 所示。

(1) 系统随机建模 指基于市场的不确定性、客户订单的多变化性、供应链受偶发因素的干扰性以及制造过程中各种不可预知因素出现的随机性等, 建立能够本质和精确地揭示和反映 RMS 内涵的动态随机模型, 如 RMS 布局规划与优化模型、物流系统优化设计模型和生产控制决策模型^[3, 6]。

(2) 布局规划与优化 指对 RMS 的设备以最佳布局模式进行布局, 并能实现在可变目标下进行布局规划的优化算法^[3]。其主要任务可以描述如下:

给定条件: ①一种零件或一族零件或多族零件。②零件加工数量和混和比。③资源和能力库。④描述零件许可加工工艺顺序的约束。

求解: 构建所有满足上述条件的布局方案。

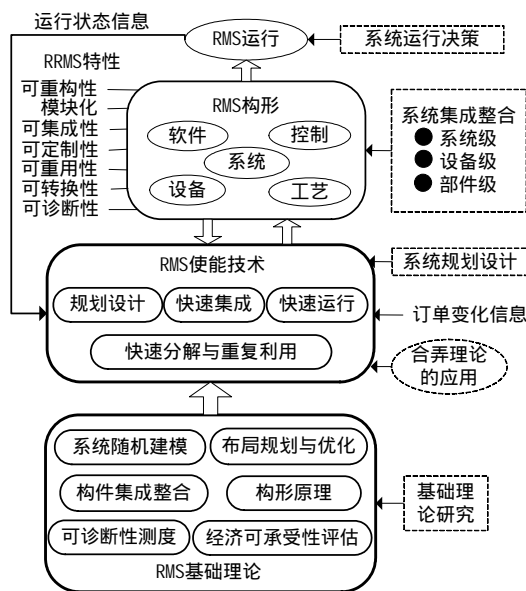


图 5 RMS 理论体系

以上任务求解方案的数量将是巨大的, 向系统中增加 1 台设备会引起系统重构的组合爆炸, 如 6 台机床就可能有 54 种重构方案。基于可重构制造单元(Configurational manufacturing cell, 简称 CMC, 也称组态式制造单元)的阵列式布局结构体系是一种近年提出的新型设备布局结构^[3, 9, 25]。

(3) 构件集成整合 主要指实现 RMS 中加工设备间以及可重构加工设备构件间的联接(关联、集成、整合)。联接可有多种不同形式, 既有逻辑联接又有物理联接。逻辑联接是一种无形联接, 在 RMS 中主要通过物流系统来实现; 物理联接是一种有形联接, 通过不同构件接口的联接来实现。接口可分为信息接口、动力接口和机械接口三大类。

(4) 构形原理(常称组态原理) 指一种根据面

向对象的不同而适时改变自身组织形态的原理, 其核心是按实际情况的变化, 依据一定原则和现实的可能性, 快速地重新组合出一种更合理的状态。包括软件重构和硬件重构: 通过软件重构可达到基于相同的硬件构成实现 RMS 的不同构成, 也可根据系统的基本构成和可能的选择快速重构控制系统; 硬件重构涉及硬件储备和空间位置等问题, 且需要通过系统随机建模来实现系统优化配置和运行决策(策略)重构问题, 需要根据适宜的零件族和工艺范围预留必要和适当的接口^[7, 24]。利用构形原理能够根据市场需求重构出可加工新工件品种和具有相应生产能力的改进型制造系统, 该制造系统还具有当加工过程中出现以下情况时能够提供优化运行策略的功能: ①某台加工设备出现故障。②有配对件需加工。③需以混流的方式进行加工。④有急件需插入加工。⑤由加工对象的变化引发工艺路线的变化。⑥有加工任务需延期。

(5) 可诊断性测度 指对 RMS 的产品加工质量及加工过程中各个阶段故障产生的原因进行辨识和探测(每个阶段均要有相应的方法和指标)。从 RMS 全生命周期出发研究其可诊断性测度方法, 可快速发现产品加工缺陷和设备运行故障, 可即时对系统加以控制, 可快速有效地提高产品质量和减少不必要的运作时间。

(6) 经济可承受性评估 指通过对 RMS 各相关领域的规划与协同, 对其投资与效益、功能与成本做全面系统的分析、规划、创新和改进, 形成一种能够提高 RMS 投资价值和投资效能且能够对投资进行有效控制的方法, 其指标是一个决定于多个变量如投资费用、加工能力和产品功能等的可变函数。

RMS 使能技术^[18]是其基础理论的应用, 包括规划设计、快速集成、快速运行、快速分解与重复利用多项技术^[3], 涉及系统整个生命周期。

5 结论

(1) RMS 从初始设计阶段就被设计为具有可重构性, 能够实现只在需要的时候根据需要的内容提供恰当的生产能力和生产功能。

(2) RMS 具有可重构性、模块化、可集成性、可定制性、可重用性和可转换性等特性, 研究内容包括系统、软件、控制、设备和工艺多个方面。

(3) RMS 可按照生产能力和生产功能在 DMS 与 FMS 间或超出 FMS 进行演化, 具有很高的柔性。

(4) 具有可重构性的子系统、构件是 RMS 的重

要组成部分。

(5) RMS 基础理论包括系统随机建模、布局规划与优化、构件集成整合、构形原理、可诊断性测度和经济可承受性评估,使能技术包括规划设计、快速集成、快速运行、快速分解与重复利用技术。

RMS 可被作为一种快速响应各种需求和内外变化的策略和模式。面向可重构的设计(Design for reconfigurability, 简称 DFR)是实现 RMS 的有效工具,它的开发具有重要的意义和灿烂的发展前景。

参考文献

- 1 Koren Y, Heisel U, Jovane F, et al. Reconfigurable manufacturing systems. *Annals of the CIRP*, 1999, 48(2): 527~540
- 2 罗振璧, 朱耀祥. 现代制造系统. 北京: 机械工业出版社, 2000
- 3 盛伯浩, 罗振璧, 赵宏林, 等. 快速重组制造系统(RRMS)——新一代制造系统的原理及应用. *制造技术与机床*, 2001(8): 37~44
- 4 罗振璧. 对未来工业工程的思考. *工业工程与管理*, 2001(1): 3~7
- 5 蒋任重, 盛伯浩, 罗振璧, 等. 快速重组制造系统分布式控制结构研究. *制造技术与机床*, 2002(8): 12~14
- 6 盛伯浩, 罗振璧, 俞圣梅, 等. 快速重组制造系统的构建原理及其应用. *工业工程与管理*, 2000(1): 16~21
- 7 赵宏林, 盛伯浩, 张文河, 等. 快速重组制造系统中的组态原理及其实现. *工业工程与管理*, 2001(2): 1~4
- 8 王成恩. 制造系统的可重构性. *计算机集成制造系统—CIMS*, 2000, 6(4): 1~5
- 9 李培根, 张洁. 敏捷化智能制造系统的重构与控制. 北京: 机械工业出版社, 2003
- 10 许虹, 唐任仲, 程耀东. 基于合弄制造原理的制造设备可重构技术. 见: 第4届国际设计与制造前沿会议(ICFDM 2000), 中国杭州, 2000-06-17~19
- 11 任守策, 张蕾, 刘祖照. 基于自组织的决策模式及决策支持系统. *计算机集成制造系统—CIMS*, 2000, 6(3): 60~66
- 12 江志斌, 胡宗武. 论制造系统模式的新进展. *工业工程与管理*, 2002(2): 1~7
- 13 檀润华, 张瑞红, 苑彩云, 等. 自底向上的适应性设计过程模型. *机械工程学报*, 2000, 36(1): 20~23
- 14 吴锡英, 吕文林. 制造业的敏捷化和全球化. *制造业自动化*, 1999, 21(4): 5~8
- 15 Son Sung-yong. Design principles and methodologies for reconfigurable machining systems: [PhD Dissertation]. Michigan: University of Michigan, 2000
- 16 孙大涌, 屈贤明, 张松滨. 先进制造技术. 北京: 机械工业出版社, 2000
- 17 Mehrabi M G, Ulsoy A G, Koren Y. Reconfigurable manufacturing systems: Key to future manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2000(11): 403~419
- 18 Mehrabi M G, Ulsoy A G, Koren Y. Reconfigurable manufacturing systems and their enabling technologies. *Int. J. Manufacturing Technology and Management*, 2000, 1(1): 113~130
- 19 Landers R G, Min B K, Koren Y. Reconfigurable machine tools. *Annals of the CIRP*, 2001, 50(1): 269~274
- 20 Kuo Chung-Hsien. Resource allocation and performance evaluation of the reconfigurable manufacturing systems. In: 2001 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC 2001), vol.4: e-Systems and e-man for Cybernetics in Cyberspace, October 7~10, 2001, Tucson, Arizona, USA, 2001, 4: 2 451~2 456
- 21 高利辉, 王润孝, 薛俊峰. 先进制造系统的发展与故障诊断系统设计. *制造技术与机床*, 2003(1): 32~33
- 22 徐杜, 蒋永平, 张宪民. 柔性制造系统原理与实践. 北京: 机械工业出版社, 2001
- 23 张根保. 自动化制造系统. 北京: 机械工业出版社, 2002
- 24 陈猛, 徐宗俊, 郭刚. 可重构制造系统及其关键支持技术. *制造业自动化*, 2002, 24(5): 38~40
- 25 孙连胜. 柔性生产线的规划设计与仿真评估: [博士学位论文]. 北京: 北京理工大学, 2003

THEORETICAL RESEARCH OF RECONFIGURABLE MANUFACTURING SYSTEM

Liang Fujun Ning Ruxin
(Beijing Institute of Technology)

Abstract: A definition of rapidly reconfigurable manufacturing system (RMS) is outlined and the comparative analysis among dedicated manufacturing system (DMS), flexible manufacturing system (FMS) and RMS is outlined. The basic structure and classification of RMS are created, and the theory system architecture, which includes random model, layout programming and optimizing, interface configuration, configuration principle, systematic diagnosable principle, economic feasibility evaluation, is established for RMS. The enabling technologies for RMS are also presented.

Key words: Reconfigurable manufacturing system Basic theory
Configuration principle System characteristics
System design Ramp-up time Lead time

作者简介: 梁福军, 男, 1968年出生, 高级工程师, 博士研究生。研究方向为制造系统重构和 CAD/CAM 集成等, 发表论文 10 篇。