

加工系统的加工能力形式化建模方法

朱琦琦, 江平宇

(西安交通大学制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对加工系统服务化、虚拟化过程中的加工能力建模问题, 结合加工系统的功能、性能以及性能质量, 对加工能力及其相关概念进行了定义. 采用关系代数和集合论, 对加工系统、加工特征、加工操作进行了描述, 继而以关系选择与自然连接运算对加工能力进行了形式化表达, 并采用关系投影运算对加工能力模型进行了视图分析, 揭示了加工能力产生的机理. 结合实例对建模方法进行验证, 其结果表明, 所采用的方法能够实现加工能力的形式化建模, 可以为加工系统的加工能力分析 & 评价提供支持.

关键词: 加工系统; 加工能力; 关系; 建模

中图分类号: TH164 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)11-0063-05

Formal Model of Machining Capacity for a Machining System

ZHU Qiqi, JIANG Pingyu

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Modeling of machining capacity is of great importance in servitization and virtualization of machining system. The machining capacity and related concepts are clarified, then formal models of function, performance and performance quality of machining system are constructed, and the machining capacity model is established in terms of the description of the operation of relation selection and natural-join, and analyzed by the relation projection operation. Finally, a case verifies the proposed models.

Keywords: machining system; chining capacity; relation; modeling

目前, 服务型制造、云制造、工业产品服务系统已成为制造领域研究的热点问题之一^[1-5], 国家十二五规划提出促进生产性服务与先进制造的融合突显了制造服务的重要性. 制造资源(特别是数控加工系统)的能力建模是执行服务型制造、云制造的基础, 通过加工系统的加工能力建模, 可以在服务型制造、云制造等模式下, 为加工系统的服务化、虚拟化接入, 以及加工能力的搜索、匹配与管理等提供基础^[6]支持.

早期制造资源能力建模的方法主要是采用面向对象技术, 如 Molina、Zhao 等人^[7-8]构建了面向对象的企业制造资源能力模型, 为并行工程以及虚拟化的生产规划与设计提供了支持. 近年来, 本体(On-

tology)和语义(Semantics)正逐步应用于制造资源建模, 为网络化环境下制造资源的封装、搜索、匹配与管理^[9]提供了支持, 如英国拉夫堡大学 Harding 等人在语义 Web 的基础上建立了制造资源能力的 Ontology 表达. 当前文献中建立的制造资源能力模型是一种静态的信息模型, 主要描述制造资源是什么类型的资源, 具有什么功能, 而没有将加工能力与底层加工操作动态关联起来. 本文首先从功能和性能角度对数控机床的加工能力进行了定义, 在此基础上, 采用关系代数、集合论等对加工能力进行形式化描述, 实现了加工能力与底层加工操作的动态关联, 从而为加工系统的服务化、虚拟化接入提供了支持.

收稿日期: 2011-03-31. 作者简介: 朱琦琦(1982—), 男, 博士生; 江平宇(联系人), 男, 教授, 博士生导师. 基金项目: 国家“863 主题”资助项目(云制造服务平台关键技术); 国家自然科学基金资助项目(71071125).

网络出版时间: 2011-10-08

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20111008.0833.010.html>

1 加工能力定义

为了更好地定义加工能力,首先对一些基本概念进行约定.

定义 1 功能是加工系统(包含数控机床及其刀夹量具)的固有属性,功能发挥需要加工操作,功能与加工特征关联.例如,一个由铣床和立铣刀组成的加工系统具有铣平面的功能,其功能的发挥需要进行铣削加工操作.

定义 2 性能是对功能发挥的约束,如机床主轴最大转速、最大加工尺寸、额定功率等.

定义 3 性能质量是对功能发挥结果的度量,通常包括加工时间、尺寸精度、形位精度、加工表面粗糙度、加工表面物理性能等.

根据定义 1~3,将加工系统的加工能力定义为:加工能力是可操作活动作用于加工系统和零件的特征,可使加工系统在性能约束范围内发挥某项功能以完成该特征的加工,并达到一定性能质量的过程和结果.如图 1 所示,显然一个加工操作对应一个加工能力节点,而对应一个加工操作链(序列),则对应一个加工能力链.

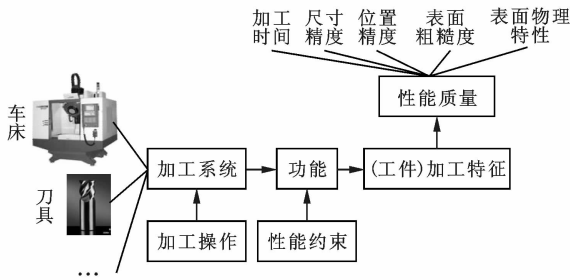


图 1 描述加工能力定义的框图

2 加工能力建模

加工能力模型包含 4 个方面的内容,分别是加工系统、加工特征、加工操作和性能质量.

2.1 加工系统

加工系统由机床及其附件(刀具、夹具、量具等)组成,并主要考虑机床和刀具.

2.1.1 机床的描述 机床的属性包括基本属性(编号和名称等)、功能属性和性能属性等,其中功能属性和性能属性是机床的核心.因此,可以将机床形式化地描述为

$$M = (B_M, F_M, P_M) \tag{1}$$

式中: B_M 、 F_M 、 P_M 分别表示机床的基本属性、功能属性和性能属性描述.根据定义 1、2,可将式(1)进一步写为

$$M = (i_M, N_M, F, E, n_M, C_M, G_M, A_M, O_M) \tag{2}$$

$$B_M = (i_M, N_M)$$

$$P_M = (n_M, C_M, G_M, A_M, O_M); \quad F_M = (F, E)$$

式中: i_M 、 N_M 分别表示机床的编号和名称; n_M 、 C_M 、 G_M 、 A_M 和 O_M 分别表示机床的最大转速、最大加工尺寸、额定功率、加工精度等级和其他扩展属性; F 、 E 分别表示功能名称和可加工特征名称.

对于一台机床,其功能与加工特征可分别用集合描述为

$$\begin{aligned} F &= \{f_1, f_2, \dots, f_n\} \\ E &= \{e_1, e_2, \dots, e_m\} \end{aligned} \tag{3}$$

式中: $f_i (i=1, 2, \dots, n)$ 和 $e_j (j=1, 2, \dots, m)$ 分别表示一个具体的功能和加工特征,则有 $F_M \subset F \times E$. 设 F_M^i 为 F_M 的元组,即 $F_M^i \in F_M$,则 F_M^i 表示机床的一个具体的功能.例如,一台机床具有铣削 G_1 和镗削 G_2 的功能,即 $F = \{G_1, G_2\}$,可加工的特征包括平面 P_1 、曲面 P_2 、槽 P_3 和孔 P_4 ,即 $E = \{P_1, P_2, P_3, P_4\}$,则该机床的一个具体功能镗孔可表示为 $F_M^i = (G_2, P_4)$,显然 $F_M^i \in F \times E$.

2.1.2 刀具的描述 采用与机床描述相同的方法,可以将刀具描述为

$$T = (i_T, N_T, F, E, D, l, z, r, H_T, O_T) \tag{4}$$

式中: i_T 和 N_T 表示刀具编号和刀具名称; D 、 l 、 z 、 r 、 H_T 和 O_T 分别表示刀具的直径、刃长、刃数、刀尖半径、刀具硬度和其他扩展属性.

2.1.3 加工系统的描述 加工系统由机床和刀具组成,构建的加工系统为

$$J = M \bowtie T \tag{5}$$

式中: $\bowtie$ 为关系自然连接运算.根据自然连接运算规则,加工系统的功能为机床功能与刀具功能的交集.

由于机床上常带刀库,因此一个由机床和带 k 把刀具($T_1, T_2, \dots, T_k$)的加工系统可表示为

$$J = M \bowtie (T_1 \cup T_2 \cup \dots \cup T_k) \tag{6}$$

2.2 加工特征

从加工特征的几何特性、物理特性以及加工要求等方面将加工特征描述如下

$$K = (i_E, E, Z_E, H_E, t_E, C_E, L_E, R_E, W_E, O_E) \tag{7}$$

式中: i_E 为加工特征的编号; Z_E 为加工特征的几何特性(尺寸、形位等); H_E 为加工特征的表面物理特性(材料、硬度等); t_E 、 C_E 、 L_E 、 R_E 、 W_E 分别为加工特征的加工时间、尺寸精度、位置精度、表面粗糙度和加工表面物理性能; O_E 为其他扩展属性.

显然,对于一个加工特征 $e \in K$ (e 为 K 的一个元组),它可在加工系统 J 上加工的必要条件是: e

的特征名称能在 J 的 E 属性列中找到,即总存在一个元组 $u(u \in J)$,使得 $e[E]=u[E]$.

2.3 加工操作活动及操作者

约定一个操作活动对应一个加工特征和性能质量,将操作活动用关系描述为

$$S = (i_S, i_E, i_R, d, x, O_S) \tag{8}$$

式中: i_S 、 i_R 分别为加工操作活动编号、操作者编号; i_E 为活动对应的加工特征编号; d 为操作内容, 主要包含切削三要素配置; x 为当前操作活动的下一个活动的编号, 主要用于构建加工操作活动链; O_S 为其他扩展属性; i_Q 为性能质量的编号.

同理,可以描述操作者为

$$R = (i_R, N_R, Y, X, Y_R, O_R) \tag{9}$$

式中: i_R 、 N_R 、 Y 、 X 、 Y_R 、 Q_R 分别为操作者编号、名称、年龄、性别、工作年限以及其他扩展属性. 由此可构建一个加工操作

$$S_M = R \bowtie S$$

进一步可描述加工操作链,即

$$S_{M_F} = S_{M_1} \cup S_{M_2} \cup \dots \cup S_{M_n} \tag{10}$$

对于任意 S_{M_i} 和 $S_{M(i+1)}$, 则

$$S_{M_i}[x] = S_{M(i+1)}[i_S]$$

2.4 性能质量

性能质量是对加工操作结果的描述,以及对功能发挥结果的度量,它与加工特征中的加工要求相对应,可以表示为

$$Q = (i_Q, i_S, t_Q, C_Q, L_Q, R_Q, W_Q, O_Q) \tag{11}$$

式中: t_Q 、 C_Q 、 L_Q 、 R_Q 和 W_Q 分别表示加工时间、尺寸精度、形位精度、加工表面粗糙度、加工表面物理性能; O_Q 为性能质量的其他扩展属性.

2.5 加工能力节点和链建模

根据加工能力的定义,一个加工操作 i 作用于一个加工系统(其机床编号和刀具编号分别为 j 和 k)所形成的加工能力节点可描述为

$$M_{C_i} = (\sigma_{i_S=i} S_M \times \sigma_{i_M=j, i_T=k} J) \bowtie K \bowtie Q \tag{12}$$

式中: M_{C_i} 为一个加工能力节点; $\sigma_{i_S=i}$ 表示从 S_M 中选择 $i_S=i$ 的元组; $\sigma_{i_M=j, i_T=k}$ 表示从 J 中选择 $i_M=j$ 且 $i_T=k$ 的元组. 加工系统与加工特征中有相同的属性 E , 根据自然连接的计算规则, 只有当它们能够相互匹配时, M_{C_i} 才存在. 值得注意的是, 对于一个批次的加工特征(设含 q 个相同的加工特征), 则对应应有 q 个连续的加工操作. 在实际加工过程中, 通常是抽检而并非每个特征都检测, 因此有 $v(1 \leq v \leq q)$ 个加工特征和加工操作共用一个性能质量, 但这与 3.3 节所描述的一个操作活动对应一个加工特征和性能

质量并不矛盾, 因此式(12)适用于批次加工的情况.

在加工能力节点建模的基础上, 进一步建立加工能力链的模型

$$M_F = M_{C_1} \cup \dots \cup M_{C_i} \cup M_{C(i+1)} \cup \dots M_{C_N} \tag{13}$$

3 加工能力模型的视图分析

根据构建的加工能力模型, 采用关系运算可以构建出不同的视图, 如加工要求-结果比较视图、人机视图等, 本文构建的 3 个重要视图如下所述.

(1) 加工要求-结果比较视图. 该视图描述的加工要求和加工结果如式(14)所示, 通过对二者进行比较, 可以判定加工能力提供的优劣. 在该视图中, 加工特征的尺寸精度、形位精度、表面粗糙度以及工件物理性能必须满足加工要求, 所用加工时间则应尽可能满足要求, 以利于生产调度, 其表达式为

$$\Pi_{t_R, C_R, L_R, R_R, W_R, t_Q, C_Q, L_Q, R_Q, W_Q} (M_{C_i}) \tag{14}$$

(2) 人机视图. 人机是加工工艺系统的重要内容, 这里人对应加工操作者, 机对应加工系统, 人机视图的表达式为

$$\Pi_{i_P, i_M, i_T, E, d} (M_{C_i}) \tag{15}$$

(3) 操作对象与要素视图. 加工操作对象为加工特征, 加工操作要素则主要包括切削三要素. 该视图为现场工程师-操作员的加工操作提供了指导, 可构建的操作对象与要素视图为

$$\Pi_{i_E, E, Z_E, H_E, d} (M_{C_i}) \tag{16}$$

在加工运作过程中, 还可以根据实际需要, 用关系投影运算构建其他视图, 且上述的视图计算可扩展到加工操作链的情况下.

4 实例运行与分析

开发的加工能力建模与分析原型系统包括相关信息输入、加工能力表达与图形化显示, 以及加工能力视图分析等功能, 下面以图2所示的一个曲面铣

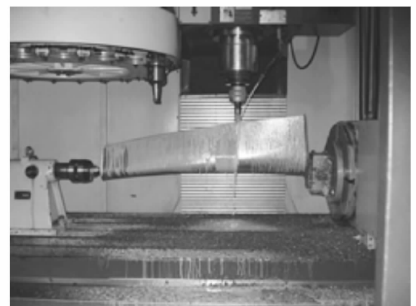


图 2 机床加工系统示意图

削加工为例来验证本文的模型和方法. 刀具的切削速度为 250 m/min,进给速度为 0.4 mm,加上其他的相关数据,如操作者数据、性能质量数据等,继而将式(12)所示的关系计算方法映射为关系数据库的相关操作,可以构建出曲面铣削的加工能力节点模型. 采用式(14)~式(16)所示的关系计算方法,对所构建的模型进行了视图计算,如图 3 所示.

在原型系统上进行实例运行实验,从而验证了本文提出的采用关系代数的加工能力模型,其结果表明:①关系模型可以很好地对机床、刀具、加工特征、加工操作等要素进行形式化表达,通过关系运算,可以关联这些要素,从而形成对加工系统、加工

操作等的描述,并最终实现了加工能力的建模;②关系模型具有良好的扩展性,可针对具体车间的特点对模型进行扩展,但关系运算遵循严格的数学推理过程,因此本文提出的建模方法和过程具有较好的通用性;③抽取机床、刀具等物化形态产品的功能和性能,并采用关系模型对其进行表达,为物化形态产品的虚拟化、服务化提供了可供借鉴的方法;④尽管原型系统能很好地演示加工能力建模分析的过程,但原型系统在尺寸(特别是曲面尺寸)与精度的可视化表达、关系图的自动生成等方面仍有欠缺,因此未来有必要进一步完善该系统.

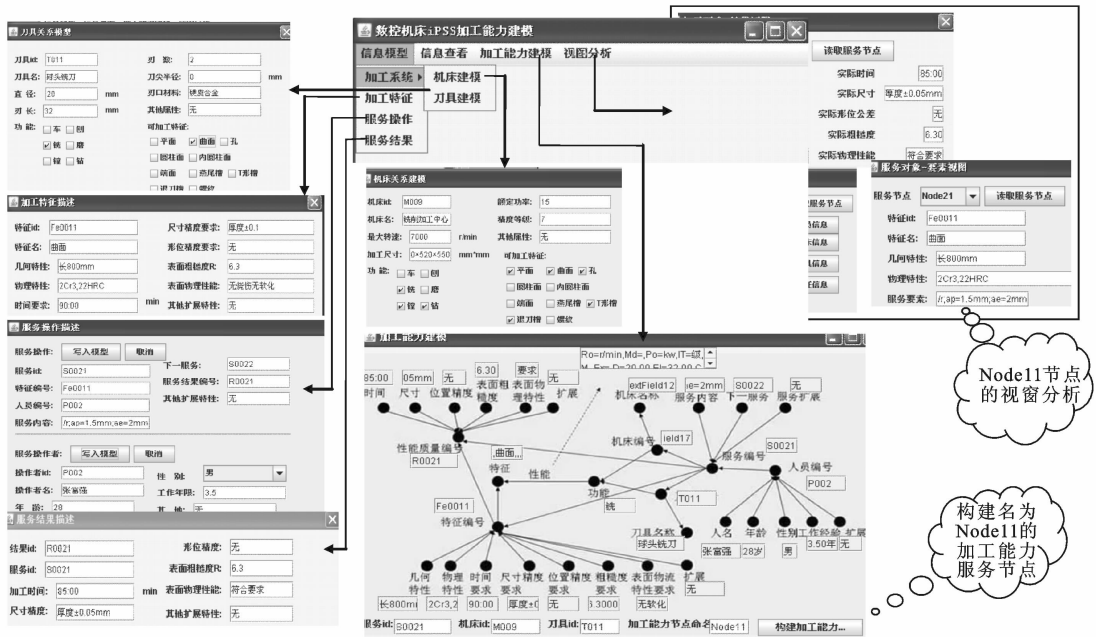


图3 加工能力的构建与视图分析实例

5 结 论

本文定义了加工能力的概念,建立了采用关系代数的加工能力模型,开发了加工能力建模与分析原型系统,通过运行实例,验证了本文提出的方法,并总结如下.

(1)定义了功能、加工性能、性能质量等基本概念,通过串联这些基本概念,对加工能力进行了界定和描述.

(2)采用关系代数,分别描述了加工系统、加工特征、加工操作、性能质量等,继而采用关系代数中的自然连接和笛卡尔积等计算方法,构建了加工能力节点和加工能力链模型. 关系模型具有较好的扩展性,且建模过程遵循严格的数学推理,因此建模方

法具有较好的通用性和适用性,可以为制造服务、云制造模式下设备的虚拟化接入提供方法支持.

(3)通过关系投影运算,构建了加工要求-结果比较视图、人机视图等,实现了对加工能力模型的分析. 利用投影运算,还可以根据需要构建其他的视图.

(4)开发了原型系统,通过演示一个案例验证了本文的理论和方法,分析了案例的运行过程和结果,讨论了本文所提出方法的优点以及原型系统存在的问题.

参考文献:

[1] 汪应洛. 推进服务型制造:优化我国产业结构调整的战略思考[J]. 西安交通大学学报:社会科学版, 2010, 30(2): 26-31.

- WANG Yingluo. Boosting service type manufacturing-a strategic consideration on optimizing the adjustment of China's industrial structure [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University; Social Sciences Edition, 2010, 30(2): 26-31.
- [2] 江平宇, 周光辉, 赵刚, 等. 面向扩展企业的网络化制造 ASP 平台研究 [J]. 中国机械工程, 2004, 15(19): 1739-1744.
- JIANG Pingyu, ZHOU Guanghui, ZHAO Gao, et al. Study on networked manufacturing ASP platform for extended enterprise [J]. China Mechanical Engineering, 2004, 15(19): 1739-1744.
- [3] 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 System, 2010, 16(1): 1-7.
- [4] UNEP. The role of product service systems in a sustainable society [R/OL]. [2009-12-01]. <http://www.unep.fr/scp/design/pdf/pss-brochure-final.pdf>.
- [5] MEIER H, ROY R, SELIGER G. Industrial product-service systems; IPS2 [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2010, 59(2): 607-627.
- [6] 张英杰, 曹岩. 基于网络化的制造资源智能管理系统的研究 [J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(3): 270-273.
- ZHANG Yinjie, CAO Yan. New intelligent management method for manufacturing resources in networked environment [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(3): 270-273.
- [7] MOLINA A, ELLIS T, YOUNG R, et al. Modelling manufacturing capability to support concurrent engineering [J]. Concurrent Engineering, 1995, 3(1): 29-42.
- [8] ZHAO J, CHEUNG W M, YOUNG R. A consistent manufacturing data model to support virtual enterprises [J]. International Journal of Agile Management Systems, 1999, 3(1): 150-158.
- [9] 王正成. 网络化制造资源集成平台若干关键技术研究与应用 [D]. 杭州: 浙江大学, 2009.

(编辑 管咏梅)