

面向敏捷制造的动态工艺规划技术*

Agile Manufacturing-Oriented Dynamic Process Planning

沈阳理工大学机械工程学院 舒启林 苏 锋 赵 静

[摘要] 基于敏捷制造模式下企业必须能够快速响应客户的需求为背景,提出了基于加工特征的零件通用工艺模型。在此基础上,利用遗传算法,根据车间实时资源状况,以产品的加工时间最短作为优化目标,实现整个产品工艺方案的动态规划,以适应现代柔性生产的要求。

关键词: 敏捷制造 工艺模型 遗传算法 工艺规划

[ABSTRACT] Enterprises based on the agile manufacturing mode must rapidly respond the requirements of their customers. A general process planning model based on manufacturing features of parts is proposed. Furthermore, a system is implemented to minimize the whole process time of product by using genetic algorithm and according to the real-time resources status of the shop floor and to realize dynamic process planning of product to meet the requirement of modern flexible manufacturing.

Keywords: Agile manufacturing Process planning model Genetic algorithm Process planning

市场的全球化,使企业面临的竞争对手日益增多,而且产品生命周期变短。更新换代快,品种增加,批量减少,这些都使得企业之间的竞争更加激烈。在这种情况下,如何敏捷地重组资源、组织生产以便快速地响应市场就成为企业赢得竞争、不断发展的关键。产品工艺规划是对将原材料或毛坯经济地转化为符合设计要求的产品所需要的加工步骤、加工设备和工装信息等进行系统决策活动,是连接产品设计和制造的桥梁。在传统的生产组织中,由于工艺是在不考虑车间动态信息的情况下生成的,工艺文件要在投入生产之前制定,没有考虑到当前的制造资源约束和车间的实际工况,并且认为现有的车间资源(如原材料、

机床、刀具、夹具和操作人员等)可无限使用,这样产生的工艺是静态和刚性的。在实际生产过程中往往由于材料短缺、设备故障或其他任务占用等原因使要求的制造资源无法保证,这时工件只能排队等待,不能按照车间的实际情况实时调整工艺路线^[1]。这种静态工艺规划方法最突出的缺点是不能对生产现场的突发情况做出响应,也不能根据生产现场设备的使用情况灵活调整工艺方案,使得工艺计划难以执行或不可执行。

为了提高工艺方案的柔性,国内外学者结合CAPP和生产规划与控制的集成,分别提出了非线性工艺规划^[2]、闭环工艺规划^[3]和分布式工艺规划^[4]。非线性工艺规划仍然基于静态的车间工艺资源,但将产品的所有工艺方案按照预定的规则进行优先级别排序,在生产过程中根据车间的资源状况进行选择。闭环工艺规划方法则根据车间生产状况的动态反馈制定产品的工艺方案,即基于车间目前的可用资源以保证产品工艺的可行性。分布式工艺规划方法将工艺制定和生产调度结合起来,强调利用生产调度灵活选用工艺方案。

然而,上述方法均针对零件本身的工艺方案进行动态规划,并未对整个产品的工艺方案进行优化。本课题提出基于加工特征建立涵盖所有可能的加工方案的零件工艺模型——零件通用工艺模型,在此基础上利用遗传算法,根据车间实时资源状况优化选择零件的工艺方案,以产品的加工时间最短作为优化目标,产生整个产品的优化工艺方案,从而达到提高产品工艺柔性,适应敏捷生产的要求。

1 基于加工特征的零件通用工艺模型

1.1 零件特征信息模型

任何零件都是由一系列的基本信息组成的,这些信息包括管理信息、加工特征信息和形状几何信息3部分。由于零件的工艺推理和表达依赖于这些信息,因此建立基于零件特征的信息模型非常必要^[5]。为了便于利用面向对象的实现方法,我们采用统一建模语言(Unified Modeling Language, UML)表达零件、组成

* 国家“863”高科技项目(2002AA414420)、辽宁省博士启动基金项目(20061010)资助。

该零件的特征及其关系、零件的管理信息、形状几何信息等,如图1所示。零件作为一个对象,用零件ID、零件名、材料、热处理、批量等管理信息进行管理。每个零件都拥有一个或多个几何信息,如零件的三维实体模型、工程图纸等,这些几何信息通常由相关的CAD系统产生,它们必须和零件对象关联。每个零件又由多个特征组成,这些特征可分为3类:基本特征,如平面、圆柱面、倒角等;复合特征,如孔类、槽类、复合面类等;阵列特征,包括均布阵列、非均布阵列等。特征信息反映了零件的加工要求,是选择加工方法和加工设备的基础,因此必须完整地描述每个特征的相关信息,包括形状特征参数、特征表面的粗糙度、尺寸以及形位公差等。对于零件的工艺规划而言,特征关系信息直接影响到定位装夹方案的确定和工步排序等内容。这些组成零件的特征之间的关系主要包括尺寸关系和公差关系,尺寸关系主要指特征间的位置尺寸,包括线性尺寸和角度尺寸;公差关系主要指特征间的形位公差,包括平行度、垂直度、倾斜度、位置度、同轴度、对称度、圆跳动和全跳动等。零件的特征信息模型是零件工艺规划的基础,为零件的通用工艺模型的建立奠定了基础。

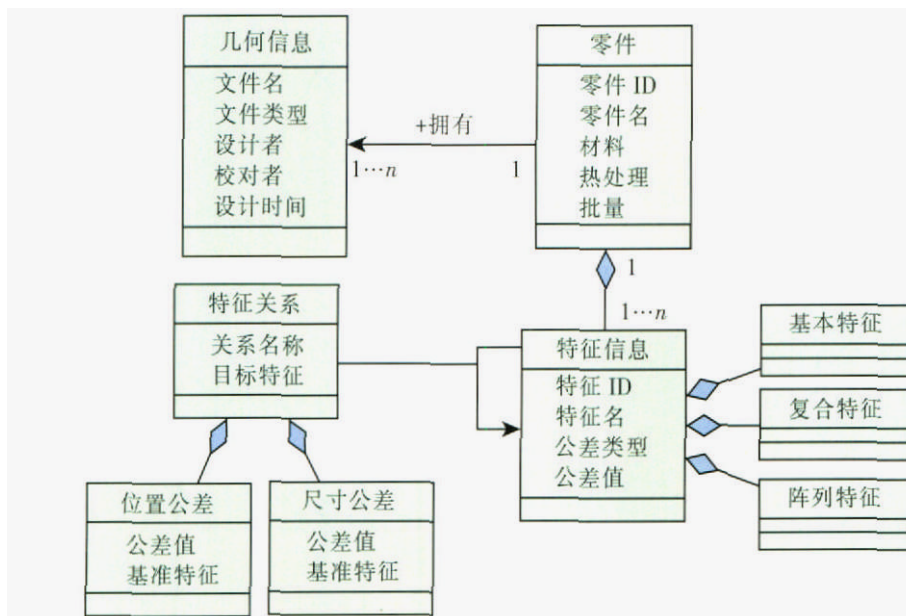


图1 零件特征信息模型

Fig.1 Information model of part features

1.2 零件通用工艺模型

由零件的特征信息模型可知,一个零件被若干具有加工意义的加工特征所描述,例如孔、槽、倒角等。

对于每一个加工特征,定义所有能够得到加工特征属性(形状、尺寸、公差和表面粗糙度)的加工方法,然后对加工方法进行排序;把加工方法和制造资源模型进行关联,基于此选择机床和刀具,最终得到零件的工艺路线。在加工方法的排序过程中,还必须满足加工约束,在这里主要指对排序具有重要影响的加工方法之间的优先关系约束。工艺路线排序过程实际上就是将约束逐个作用到加工特征单元集合上,使得加工方法排序合理。这些约束主要包括:定位约束,定位特征必须优先于其他相关特征进行加工;基准约束,当2个加工特征之间存在形位公差关系时,包含基准的加工特征应当被首先加工;装夹约束,当一个特征的加工影响到另一个特征的装夹时,二者之间存在着优先关系;非破坏性约束,保证后面的加工不能够破坏前面加工过程中产生的属性;先后次序约束,工作表面和装配表面的主要加工表面应当安排在其他特征之前加工^[6]。

为此,我们定义一个零件的通用工艺模型为: $P=[F_p, C, T_h, T_a]$,其中 F_p 是组成该零件的加工特征工艺集,它由与每个加工特征对应的加工方法、加工设备和刀具构成; C 为加工约束集,决定组成该零件各特征的加工顺序; T_h 表示热处理工序, T_a 表示其他辅助工序。

同一加工特征可以利用不同的加工方法实现,例如,齿轮的加工可以采用插齿机或者滚齿机,轴外圆的精加工可以利用车床或者磨床;再者,在同一加工特征利用同种加工方法实现时,还可以选取不同的机床,例如,对于端面加工,可以利用普通铣床或CNC立式铣床等。这2种情况有一个相同的问题,即每一种加工方法可能对应多个机床。为了使所定义的加工特征的工艺涵盖较多的工艺信息,应当在特征工艺流程方向确定的基础上,对特征工艺流程中的每一道工序提供多种可替代的加工工序,以适应具体零件

的加工工艺流程的要求。我们将由这些工序集构成的工艺流程称为该特征的工艺模板。对于具体的零件

特征来说,所产生的工艺流程可以不含其所派生的工艺模板中的某些工序层,所以任何一个工序层都有一个缺省的空工序。为描述方便,在本文中,将工艺模板中的一道工序称为一层工序,工艺模板某一层工序中的所有工序称为本工序层可替代工序集。如图2中 $g(1,n)$ 为该特征工艺的第1层工序的第 n 个可替代工序, $g(2,m)$ 为该特征工艺的第2层工序的第 m 个可替代工序, $g(x,p)$ 为该特征工艺的第 x 层工序的第 p 个可替代工序。设一个特征工艺流程所代表的特征工艺共有 x 层工序,各层工序的可替代工序数分别为 n,m,\dots 和 p 个。因为每层工序都有一个隐含的空工序,由排列理论可知,此特征工艺涵盖的工艺方案数为 $\Pi(I,x)=(n+1)(m+1)\dots(p+1)$ 。所以在定义特征工

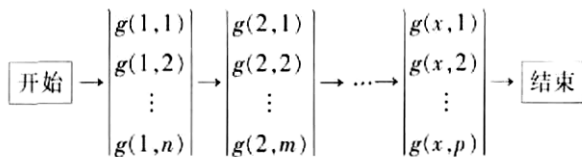


图2 特征的工艺模板

Fig.2 Process template based on features

艺时,每添加一个可替代工序,都将成倍地增加定义的特征工艺模板所涵盖的工艺方案数。

为实现在零件工艺参数化设计时对工序层可替代工序集的自动选择,需要提供一种工序选择规则定义器。规则的定义是建立在特征定义阶段所定义的特征参数上的,规则本身附着在相应的可替代工序上。系统采用“If-Then”式的产生式逻辑规则,以判断在一个具体的零件特征条件下本可替代工序是否可选。若设某一零件有3个特征参数,代号为 $A、B、C$,并假设 $A、B、C$ 的特征类型分别为基本尺寸型、粗糙度型和特征符号型,则对某一可替代工序可定义形如 $A>50 \& (1.6\leq B\leq 6.3) \& C=\text{“孔”}$ 的选择规则。这样,系统根据具体的特征输入数据,就可判断本替代工序是否为可选的加工工序^[7]。

由于组成零件的每个加工特征的加工方法可能不止一种,因而会形成多套工艺方案,我们将这些工艺方案称为该零件的工艺集,工艺集中的每个工艺方案都是候选方案。零件工艺集的产生过程如图3所示。很显然,上述零件的通用工艺模型未考虑车间资源(加工设备、工装等)状况,因而属于静态工艺规划,在实际生产过程中必须根据特定的条件(如当时的车

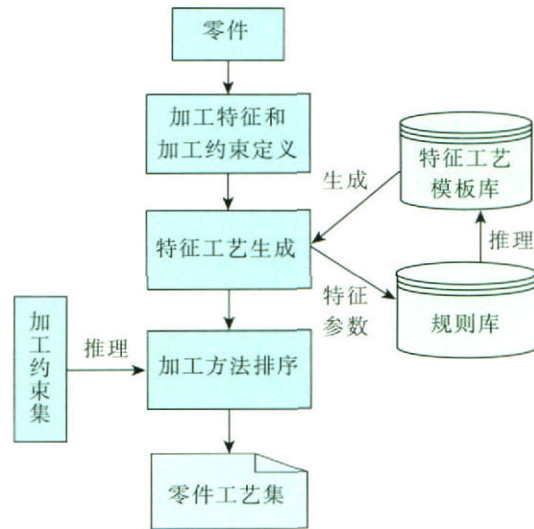


图3 零件工艺集的产生过程

Fig.3 Generating procedure of part's process

间资源状况、生产周期、交货日期等)在零件工艺集中择优选择。

2 现场动态工艺规划

在敏捷制造模式下,由于市场竞争,企业为了满足客户的需求,需要快速响应客户的订单,因此必须对整个产品的工艺按照最短加工时间进行优化。(本文未考虑加工成本,目前正在研究同时考虑成本和时间多目标优化。)

假设一个产品有 n 个待加工零件,其中零件 $P_k(k=1,\dots,n)$ 的工艺集中的单个工艺方案可表示为 $A_k(j)(j=1,\dots,T_k)$,则零件 P_k 的工艺集可表示为 $\{A_k(1), A_k(2), \dots, A_k(T_k)\}$ 。如果零件 P_k 的工艺方案数为 T_k ,由于产品的工艺方案本质上是所组成零件的工艺方案的组合,显然,一个由 n 个待加工零件构成的产品的工艺方案数为 $T_1 \times T_2, \dots, \times T_{n-1} \times T_n$ 。随着组成产品的零件数目和每个零件的工艺集中候选工艺方案的增加,产品的工艺方案将产生组合爆炸^[7]。如图4所示为产品的一个可能的工艺方案,即零件1选择工艺 $A_1(1)$,零件2选择工艺 $A_2(3), \dots$ 零件 n 选择工艺 $A_n(5)$,以 $(1,3,\dots,5)$ 表示该产品的工艺方案。

为了从众多的产品工艺方案中选择一个最优的或接近最优的方案,本课题采用遗传算法作为工艺优化算法进行动态工艺规划^[8]。首先根据零件通用工艺模型和车间的设备状况确定每个零件的有效工艺方案(即在此时能够实现的工艺方案)以形成该零件的

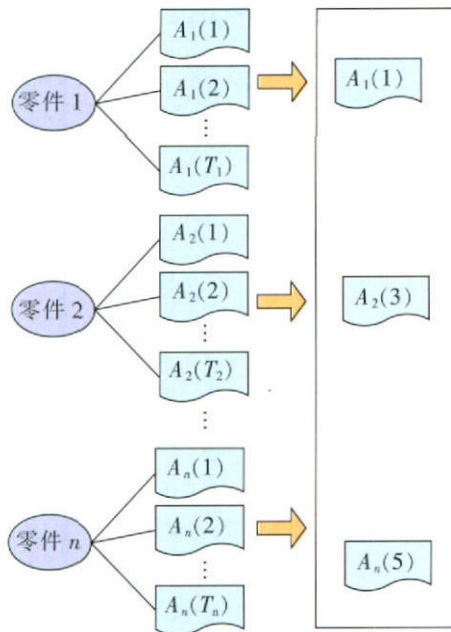


图4 一个可能的产品工艺方案

Fig.4 A possible process plan of a product

工艺集,即此时工艺集中任一个工艺方案都是该零件的候选工艺方案。然后随机从每个零件的有效工艺方案中抽取一个方案组成一个可能的产品工艺方案,即形成遗传算法中的一个染色体基因码。染色体基因码由字符串 v_i 表示,定义 $v_i=(s, t, \dots, r)$ 表示组成产品的待加工零件 1 到待加工零件 n 的工艺方案 $(A_1(s), A_2(t), \dots, A_n(r))$ 。具体的算法步骤是:

· 步骤 1: 定义初始种群规模 (pop_size)、变异概率 (P_m) 和交换概率 (P_c);

· 步骤 2: 根据零件通用工艺模型和车间的设备状况产生初始染色体群(即各零件的初始工艺方案),并提交到产品工艺仿真模块中以分别确定各零件的加工时间;

· 步骤 3: 计算个体及种群的适应度。根据产品工艺仿真模块确定的各零件的加工时间 $T(v_i)$ 并计算整个产品的加工时间 T :

$$T = \sum_{i=1}^{\text{pop_size}} T(v_i), \text{ 其中 } \text{pop_size} \text{ 为种群的大小, } T(v_i)$$

为零件 i 的加工时间;

· 步骤 4: 再生。本课题采用轮盘赌法,即首先计算选择概率 $P_i=T(v_i)/T$,然后计算累积概率 $Q_i=\sum_{j=1}^i P_j$;产生随机数 $r \in [0, 1]$,当 r 满足 $Q_{i-1} < r < Q_i$ 时选择染色

体基因码 v_j ;

· 步骤 5: 交换。产生随机数 $r \in [0, 1]$,当 $r < P_c$ 时实施基因交换;

· 步骤 6: 变异。产生随机数 $r \in [0, 1]$,当 $r < P_m$ 时实施基因变异;

· 步骤 7: 判断是否收敛。如收敛,输出结果;否则返回到步骤 3。

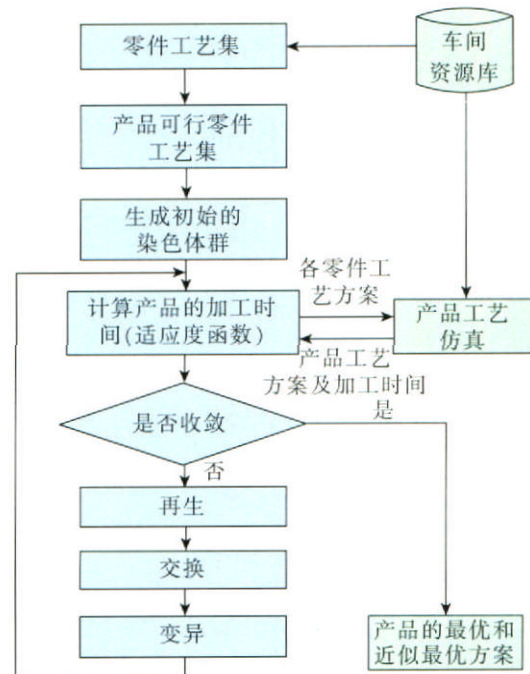


图5 基于遗传算法的产品动态工艺规划流程

Fig.5 Dynamic process planning based on genetic algorithm for products

基于遗传算法的动态工艺规划流程如图 5 所示。要特别指出的是,由各个零件的工艺方案确定产品的工艺方案非常复杂,针对一个产品工艺方案计算加工时间也很复杂。产品的加工时间由 3 部分组成:一是各零件的实际加工时间,二是由于加工设备忙而需等待的时间,三是零件从一个加工设备到另一个加工设备所需的运输时间。由于组成产品的待加工零件可能串行加工,也可能并行加工,所以需要根据车间的实际情况和所采用的调度方法来确定。在资源决策过程中,必须首先确定加工某类零件需要的机床加工能力,然后根据车间计划系统反馈的加工资源实际情况,确定车间中的满足加工能力的机床,最后根据机床实时状态(机床列表、排队时间、装夹时间和运输时间)计算车间每一个可用机床的优先指标。我们开发了一个

产品工艺仿真模块用于确定产品工艺方案和估算产品的加工时间,限于篇幅,本文不详细叙述。

3 结束语

本课题研究了在敏捷制造模式下企业如何利用和重组现有的制造资源,探索了产品工艺方案的动态规划方法,以实现产品的柔性生产。本课题完成了以下工作:

(1)建立了基于零件的特征信息模型,并以零件的加工特征为基础构建零件的通用工艺模型。该模型包含了所有可能的工艺方案。在实际生产中,以车间当前的资源状况动态确定零件的工艺方案集。

(2)提出了利用遗传算法,以加工时间最短作为优化目标的动态工艺规划方法。

(3)本课题提出的产品动态工艺规划方法基于企业车间实时资源状况,对整个产品的工艺方案进行了优化,并非仅仅针对单个零件。

目前我们已经完成了原型系统的开发,并进行了初步的应用验证,进一步完善后,便能投入实际应用。

参 考 文 献

- [1] 沈斌,陶荣华. 工艺计划与生产调度集成的动态CAPP系统的研究. 组合机床与自动化加工技术,2004(5):45-48.
- [2] Detand J, Leuben K U. The generation of non-linear process plans. The 22nd CIRP International Seminar on Manufacturing System, Section, 1990.
- [3] Kruth J P, Detand J. A CAPP system for nonlinear process planning. Annals CIRP, 1992, 42(1): 489-492.
- [4] Tiwari M K, Vidyarthi N K. An integrated approach to solving the process plan selection problem in an automated manufacturing system. International Journal of Production Research, 1998, 36(8): 2 167-2 184, 1998.
- [5] 刘敏,潘晓弘,张申生. 工艺知识推理使能模型及其实现技术. 高技术通讯,2000(9):77-80.
- [6] 王忠宾,王宁生,陈禹六. 基于遗传算法的工艺路线优化决策. 清华大学学报(自然科学版),2004,44(7):42-36.
- [7] 葛维进,陈卓宁,陈万颂. 专用CAPP定义工具的研究和实践. 机械工艺师,2001(4):14-16.
- [8] Lee H, Kim S S. Integration of process planning and scheduling using simulation based genetic algorithms. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2001, 18: 586-590.

(责编 侧卫)

(上接第 87 页)

级的知识模板,封装 3D 几何定义、相关参数及相关的知识。

4 结束语

通过对我国飞机制造企业快速工艺准备需求、技术和系统的研究,面向飞机工艺系统及相关部门基于 3D-PLM 管理和制造过程集成,解决面向 3D-PLM 基于 3D 模型的快速工艺准备业务协同模式、面向3D-PLM 基于 3D 模型的协同工艺规划与工艺过程仿真、基于 3D 几何模型检索的工艺成组与知识管理等关键技术,构建一套面向 3D-PLM 的快速工艺准备系统构件,是解决型号研制和生产中工艺业务和数据的协同和集成、3D 设计模型的使用等技术问题的基础。

在某飞机制造企业基于 CAPPFramework 和 DELMIA、CATIA、LCA 系统的开发和应用中,实现了面向 3D 产品生命周期全过程进行快速工艺准备技术体系,支持基于 3D 的产品从概念设计、产品设计、工艺规划、制造、质量控制整个过程的快速工艺准备工作,突破了单纯从工艺业务本身以及 2D-PLM 以结构化数据为核心的集成的局限性。在工艺准备中充分使用设计 3D 模型进行工艺与设计的协同,工艺的规划、工艺表示、验证与仿真,实现产品 3D-PLM 框架内设计 3D 模型的在快速工艺准备中的有效使用。通过在企业生产中的实际应用,为工艺系统的快速准备提供了有效的工具和平台,在初步应用中显示了很好的应用效果。

参 考 文 献

- [1] 范玉青. 现代飞机制造技术. 北京:北京航空航天大学出版社,2001.
- [2] 杨玺,范玉青. 飞机制造信息管理系统实现. 中国航空学会工艺专业委员会计算机辅助设计与辅助制造工程学术会议论文集,1999:74-80.
- [3] 崔德刚. 直升机研制与现代集成制造技术. 航空制造技术,2002(4):42-43.
- [4] 晓立. 航空企业信息化访谈录. 航空制造技术,2002(7):29-33.
- [5] Nong Ye. An information processing model for computer-supported assembly planning. International Conference on Advanced Manufacturing Technology, 1999:65-69.
- [6] 约瑟夫·萧塔纳. 制造企业的产品数据管理:原理、概念、策略. 北京:机械工业出版社,2000.

(责编 依然)