

基于分支定界法的机加工工艺自动生成研究及应用

刘强

(陕西法士特汽车传动集团有限责任公司 陕西省西安市 710000)

摘要: 现有工艺决策和优化方法存在思维过程自动化程度不够、结果不稳定等问题。针对机加工工艺优化问题, 提出了一种基于分支定界法的决策方法。这种方法考虑了成本和加工效率等评估指标, 还通过“分支”、“松弛”和“界定”等操作将解空间控制在适当的范围, 从而提高了推理和计算的效率。通过实例分析证明算法的有效性、可行性和实用价值, 特别是在机加工过程中, 以证明和确定具有广泛应用前景的最优加工方案。

关键词: 加工工艺; 分支界定法

通过将数字技术与制造技术相结合, 机加工过程的设计和规划朝着数字化和智能化的方向发展。基于计算机辅助工艺规划的机加工工艺规划和优化的基本技术路线是: 在工艺知识库的支持下, 决策和优化算法被用于计算机过程规划。决策和过程优化涉及知识和过程规则的集成, 从传统的起源和生成到人工智能决策和过程最优化。

派生式、生成式工艺决策以及融合工艺知识与规则的工艺决策, 仅是重用工艺知识和规则, 几乎没有优化的空间。真正的工艺决策仍然摆脱不了人员参与。随着人工智能技术的发展, 遗传算法、神经网络、蚁群算法、模糊聚类算法已被应用于决策过程。工艺决策模型的分析 and 建立确定了工艺优化的目标函数, 优化了决策结果, 提高了 CAPP 系统的智能化水平。然而, 在过程决策和优化中使用适当的启发式人工智能算法会导致过程优化结果的随机性和分散性, 以及过程规划结果的不稳定性, 从而阻碍过程规划的最优解。

针对目前工艺优化方法存在的问题, 以及设备数量和工具数量必须是整数的事实, 提出了基于分支定界法(branch and bound method, BBM) 的工艺优化方法。通过创建工艺优化目标函数模型和计算机辅助工艺规划, 不断迭代优化结果, 以获得最佳工艺优化计划。

1. 分支定界法的发展

学者理查德·卡普于 20 世纪 60 年代提出了分支界定法。他设法解决了旅行商问题。Kolen 等人用这种方法解决了车辆路径受时间窗限制的问题, 取得了很好的效果。其对于时间计算也显示出强大的优势。分支定界法在工业生产中开始广泛应用, 该方法能够有效解决生产材料消耗的最优化组合问题的能力。李秋阳使用了分支定界法研究电能表计量电路容差的设计方法; 李波等人使用了这个方法进行手术计划的调度, 用以在择期病人的安排最大化和预留应急手术室, 以最大限度地安排患者, 并为急诊患者保留手术室, 充分利用手术时间; 王建辉利用分支界定法进行气候预测, 并分析晴天和雨天。可以看出, 分支定界法在规划和优化连接问题方面发挥着关键作用^[1]。

1.1 分支定界法的基本思想

分支定界法的基本思想在于找到规划问题的可行解空间, 并通过将解空间划分为小分支的方式, 计算每个分支解的分支, 以找到最终的最优解。分支定界方法也有三个阶段: 分支、松弛和定界。

1.2 分支

设 $F(M)$ 为问题 M 的允许解集, 对于问题 M_1, M_2, \dots, M_n , 如有

$$\bigcup_{i=1}^n F(M_i) = F(M)$$

$$F(M_i) \cap F(M_j) \neq \emptyset$$

则称 M 可以分解成 M_1, M_2, \dots, M_n 的和。

1.3 松弛

在离开某个条件 M 之后, 将会出现 M 的松弛问题。而 M 的松弛问题的约束弱于 M 。所以, M 的松弛问题具有以下特征: (1) 原始问题的最优解并不优于松弛问题的最优解法; (2) 如果松弛问题的最优解是原始问题的可接受解, 则代表该解也是原始问题的最优解法; (3) 如果松弛问题无解, 则原始问题也无解。通常在求解时, 给出最常见的条件是变量的整数性要求。

1.4 定界

假设问题 M 分解为 M_1, M_2, \dots, M_n 的和, 每个子问题均具有一个相应的松弛问题。所以, 松弛问题通过没有解, 则松弛问题的相应子问题也没允许的解, 子问题将会从 M 分布表中删除。如果已经可以求得 M 的某一个允许解 X , 若某松弛问题的最优解不优于该允许解, 表示其对应的子问题中并没有比 X 更好的允许解。因此, 可以从 M 分布表中删除相关子问题; 松弛问题的最优解如果是相应子问题的可接受解, 那么可以掌握子问题的最优解, 无需考虑它, 因此可以将其从分布表中删除。如果局部问题的最优解此时比 X 好, 则使用 X 而不是 X 。如果解表中松弛问题的最优解不比原始可接受解好, 则原始可接受的响应是最佳 M 。从算法的角度来看, 分支定界法形为在一棵树深度为 n 的树上进行寻找, 通过对树上每个节点进行线性规划求解, 寻找每个节点的下界, 确定最小下界节点, 并将其作为其他分支的节点, 最终找到可行的解决方案^[2]。通过将目前找到的最佳可行解与另一个可行解进行比较, 得到了一个更好的解。通过逐层选择和比较, 最终找到了最佳解决方案。分支和关联方法大大降低了与分支计算相关的计算复杂性。在编程多变量问题时, 强调了简化运算的好处。

2. 加工工艺生成的数学模型

2.1 机加工工艺规划和优化描述

机加工工艺规划是工艺规划师了解有关产品产能规划、产品设计和加工特性的信息等条件下, 根据机加工工艺学原则和优化指标(成本和加工效率等), 建立约束条件, 结合机加工过程的决策逻辑和演示算法, 合理组织产品的加工阶段和过程。在每台机器的工作时间和每个过程的节奏之间, 满足了技术标准、成本控制和维护要求^[3]。如下图 1 所示为机加工工艺设计流程图。

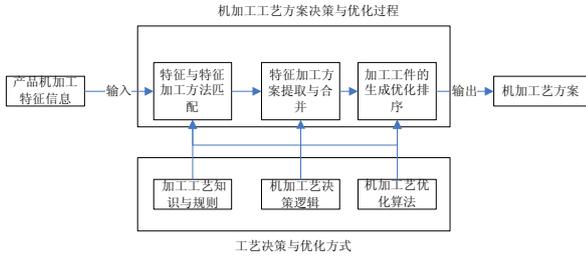


图1 工艺决策与优化流程

2.2 机加工工艺方案生成的数据源与推理方法

为了可以实现机加工工艺方案推理过程的计算机，基于此来构建工艺方案推理逻辑和算法。逻辑和推理算法主要分为两个阶段：加工特征与特征典型加工方案匹配阶段和分支定界法演绎推理阶段。为了方便计算机识别零件加特征信息，对零件加工特征进行特征编码，在机加工工艺方案推理决策期间，将零件加工特征编码作为初始数据输入，通过特征编码搜索匹配对应的特征典型加工方案，从而形成特征典型加工方案集合。在此基础上，考虑进行推理与运算，并尝试找到所有符合加工约束条件的目标加工方案，并目标典型特征加工方案集合。将加工特征与典型特征加工方案匹配的推理步骤为：

第一步：读取特征处理信息（特征码），找到包含特征码信息的典型特征处理模式；第二步：遍历特征典型加工方案备选集，来确定它们是否满足给定特征处理过程的限制。如果满足，请转到第三步，否则转到第四步。第三步：将典型的处理方案标记为目标函数。第四步：验证是否遍历完特征典型加工方案备选集。否则，回到第二步。完成后，执行分支定界算法^[4]。

随后，执行分支定界算法，基于该方法的加工工艺方案效率依赖于进行生成工艺方案的特征数量。分支定界法的思想最初来源于枚举法。在极端情况下，分支定界法需要计算N次。为了减少算法的搜索空间，首先为所有目标元素寻找处理方案，并找到和保存所有可能的过程。将搜索分支划分为可能空间的方法提高了搜索效率。为了求得可行加工工序集合P，搜索目标特征的所有加工方案。可行的加工过程需要满足工艺规划节奏、维护要求、定位和固定要求以及尺寸链限制的过程。根据工艺规划的要求，所有加工设备必须保证在规定的时间内完成，并保持预定的速度。预计速度需要从完成加工到完成零件的额外加工。采用深度优先搜索算法得到加工工序集合P，搜索时记录、存储可能进程的所有可行加工工序的可行节拍T_i。

3. 算例分析

3.1 参数设定

假设，某一公司的发动机气缸加工线年产能将达到35万台，每道工序计划持续55秒。定位基准为D-E-F，具有162个待加工特征和420个特征加工方案。由于空间限制，仅显示功能处理计划集的一部分，如表1所示。加工设备是一个加工中心和专机，加工设备台数不大于35台，即N≤35，Q=所有特征加工程序的加工时间之和。应用深度优先算法来寻找可行加工工序，构成了可行加工工序集合P。经过考虑，获得每个过程的T_i处理时间，并确定目标函数CJ=TJ-Q/N。限制条件包括加工规则、机器配置和数量、机器配置与数量限制、机器维护要求等。

表1 部分特征加工方案

序号	定位基准	刀具类型及刀柄型号	加工工艺信息	加工节拍/s
1	D-E-F	Mill5, HSK-A100	进给速度: 5 371 mm/min ; 转速: 5 968 r/min	0.5
2	D-E-F	Drill3, HSK-A100/A63	进给速度: 2 000 mm/min ; 转速: 1 000 r/min	1.5
3	D-E-F	Drill1, HSK-A100/A63	进给速度: 2 000 mm/min ; 转速: 10 000 r/min	18.5
4	D-E-F	Tap1, HSK-A100/A63	进给速度: 2 486 mm/min ; 转速: 1 989 r/min	2.0

3.2 加工工序推理结果分析

本文利用I-Log软件中集成的分支定界法来解决技术问题。在限制最低目标成本的同时，通过不停的迭代结果，每一个工序的加工节拍趋于平衡，大约需要26分钟，结果见表2。从表中可以看出，只要满足加工工艺约束，每道工序加工的加工节奏差异不超过1s。根据经验分析，认为加工工艺至少需要三天的时间。通过分支定界法来求解最优加工工艺，仅需26分钟左右，这大大提高了加工工艺编排的效率。

表2 最优加工工序排序结果

序号	定位方式	工序设备用/(万元)	单台设备费用/(万元)	加工时间/s	计算迭代耗时/min
1	DEF	2 240	560	69.4	26
2	DEF	3 360	560	196.5	
3	DEF	2 240	560	93	
4	DEF	3 360	560	184.9	

4. 结论

通过“分支”、“松弛”和“定界”等操作，首选三种决策方法：（1）如果无可行解，则优先考虑分支中最小的节点；（2）如果多个候选节点需要分支，则必须优先考虑分支透镜函数系数中的变量；（3）在解决函数处理过程时，需要对数据进行预处理，并收集典型的目标元素处理方案，以计算和搜索可能空间中的分支划分操作。将解空间控制在合适范围内，相应地提高了推理和计算的效率。本文对于分支定界法进行了建模和求解，而且结合实际案例对该行业及其相关方法进行了实际建模和求解。证明了该行业及其相关思维方法的可行性、效率和实用价值，以及加工决策方法的优化，大大提高了机加工工艺设计质量与编排效率，前景广阔。

参考文献：

[1] 马国普,徐俊韬. 基于分支定界算法的应急疏散选址方法[J]. 火力与指挥控制,2022,47(7):38-42,50.
 [2] 吕昆仑,李显君. 基于分支定界法的机加工工艺自动生成研究及应用[J]. 制造技术与机床,2021(8):161-164,169.
 [3] 段毅,谭贤四,曲智国,等. 基于分支定界法的相控阵雷达事件调度算法[J]. 电子学报,2019,47(6):1309-1315.
 [4] 周隽,王天淇. 基于分支定界法的机场终端区单一进场程序设计优化[J]. 计算机科学,2020,47(z1):552-555,571.