

三维工序模型切削载荷动态变化的工艺优化策略

赵 倩, 焦 黎, 谭方浩, 罗智文, 王西彬, 王 昭

(北京理工大学先进加工技术国防重点学科实验室, 北京 100081)

摘 要: 综合零件的加工特征及约束条件并引入布尔差运算, 可以分解出零件典型面组并生成对应的工艺路线谱系, 达到零件加工工艺快速优化设计的目的。通过分析三维工序模型典型面组加工时的动态特性, 采用 B 样条曲线插值参数化的方法构建刀具-工件接触区域动态边界的统一数学模型, 预测切削载荷动态变化状况, 并进行切削参数优化达到有效控制切削载荷的目的。最后以某零件的车削加工为例进行分析, 验证该工艺优化策略的可行性。

关 键 词: 三维工序模型; 布尔差运算; 工艺路线谱系; 切削力预测模型; 工艺优化

中图分类号: TP 391

DOI: 10.11996/JGJ.2095-302X.2016010049

文献标识码: A

文 章 编 号: 2095-302X(2016)01-0049-07

The Process Optimization Strategy Based on Three-Dimensional Process Model Cut Load Dynamic Change

Zhao Qian, Jiao Li, Tan Fanghao, Luo Zhiwen, Wang Xibin, Wang Zhao

(Key Laboratory of Fundamental Science for Advanced Machining, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Integrating parts machining feature as well as constraints of various aspects, the right classification of typical surface groups is obtained by using of Boolean difference calculation. The surface groups is needed to generate typical process line spectrum for the sake of speeding up process design and optimization. According to the analysis of dynamic characteristics on the cut-part contact from the machining of difference three-dimensional process model typical surface groups, the dynamic cutting force prediction model of complex surface machining based on B-spline curves is used to analyze the changes of dynamic load, and effective control of cutting load is achieved through the optimization of cutting parameters. Finally, the turning of a part is carried out as a verification of the feasibility of the process optimization strategy.

Keywords: three-dimensional process model; Boolean difference calculation; process spectrum line; cutting forces prediction model; process optimization

工艺设计是产品设计和产品制造的桥梁, 制造类企业在产品的工艺设计过程中积累了大量的工艺数据, 能否对其进行充分的应用成为目前待解决难题之一。机加工零件快速工艺规划的实现取决于对零件工序间模型与零件模型密切关系的正确提取^[1]。对机加工而言, 部分零件间往往具有整体结构相似, 局部结构差异的特点, 只需对工

序间模型及工艺路线规划进行少量修改, 对缩短设计周期具有深刻的意义。

Marchetta 和 Forradellas^[2]指出特征是制造过程中至关重要的概念, 并提出一种基于人工智能规划的混合过程/知识的特征识别方法。Tost 等^[3]描述了一种用于表示加工工具边界的计算方法, 该方法执行动态布尔操作, 实现了数控加工钻并

工具的模拟。Hoque 等^[4]基于与 CAD/CAM 软件包紧密相连的制造特征库提供了产品设计及制造阶段相关数据之间的智能接口设计,建立了集成于 CAD/CAM 的制造特征智能系统。Liu 等^[5]提出了应用聚类分析法获取典型工艺路线的设想,解决了计算机辅助工艺设计系统从工艺数据中提取工艺知识的问题。Xu 等^[6]依靠工艺知识与加工资源的集成,提出将工艺知识映射到加工资源并创建工序间模型,指导零件加工生产。邹定国和朱心雄^[7]提出一种基于特征设计和参数设计的零件模型,并将特征通过几何信息与工程信息分开表达。蔡立刚等^[8]利用基于实例的推理方法、专家系统方法和特征技术,构造了一套完整实用的基于实例的工艺路线决策方法,较好解决了工艺设计知识和相似工艺实例重用的问题。金涛等^[9]指出机械零件产品是按照具有确定的几何约束关系特征设计制造的,在产品的模型重建过程中,一个重要的目标即是还原其特征以及相互之间的约束,并基于特征约束建立了优化数学模型。凌卫青等^[10-11]指出产品设计中知识模型获取是关键技术,采用设计实例的形式对已有设计进行封装和组织,定义了性能特征类型,讨论了由性能需求到产品结构特征和制造特征的映射研究。肖海燕等^[12]提出基于 STEP 应用协议中零件特征库的新的零件库实现方法,通过对零件库开发工具的原理、实现方式的研究,丰富和发展了零件库标准的理论。张禹等^[13]针对快速设计符合用户需求产品的模块组合方法,提出基于实例推理的数控车床智能模块组合方法。胡淑慧等^[14]根据工序模型的演变过程将工艺规程进行分类,提出以工序模型的变化作为工艺知识划分的依据,实现更精确的工艺知

识分类与重用。朱文博等^[15]提出了基于形状拆分的机械零件三维模型检索方法,可实现零件三维模型之间快速准确地匹配。

学者们针对加工特征、工序模型和工艺优化开展了大量探索研究,但却忽略了在工艺优化中不同工序模型加工时切削力变化对加工质量的影响。本文通过布尔差运算对零件毛坯进行加工特征的识别,得到零件加工工序间模型,进行典型面组的工序规划,即得加工工艺路线,针对三维工序模型通过切削力预测模型进行动态载荷预测,最后进行切削参数优化得到最优工艺路线并存入工艺数据库。

1 面向三维工序模型的布尔差运算

1.1 加工特征定义

工艺路线谱系指对零件的加工类型及加工特征进行相似分类,并针对加工特征所对应的工序信息编码进行整合而成的加工方案。

在零件由毛坯向最终状态的演变过程中,需经过不同的加工工序模型,并通过逐步切除自身多余的材料而最终完成零件的加工。从上一道工序模型中去除部分材料就生成了下一道工序模型,而期间去除的材料即构成加工特征。机加工零件模型由具有相互依赖关系的加工特征叠加而成,通过分析基本加工特征,将其归纳为凸、凹和修饰 3 类特征。由图 1 可以看出,凸特征主要包括凸台及肋板,其中凸台为主要特征;凹特征主要包括环、阶梯、孔系和槽系;修饰特征主要包括倒边、倒角及倒圆特征。特定曲面的形成即为加工特征与工序模型布尔操作的结果表达。

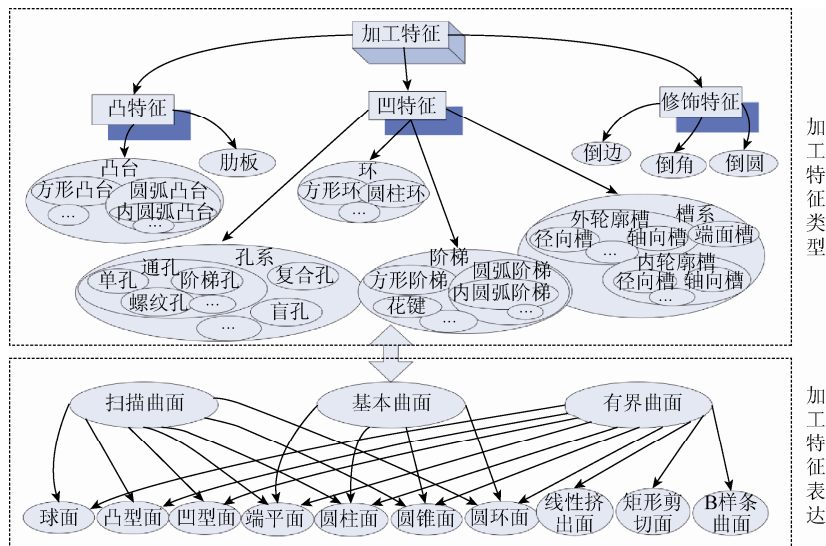


图 1 加工特征定义

1.2 三维工序模型获取步骤

零件完整的机加工工艺一般由多道工序组成, 相应地就会产生多个工序模型及加工特征。获取机加工零件毛坯模型的过程可以看作是完成一个工序模型和加工特征装配的过程, 其中, 可将零件设计模型看作装配的母体, 所有的加工特征可以看作装配零部件, 由此装配过程中形成的模型就组成了加工工序模型, 最终形成的毛坯模型即为总装配体。图 2 详细描述了某零件机加工的工艺路线和工序模型、加工特征三者之间的关系, 通过典型加工特征的识别与毛坯模型进行布尔差运算, 得到工件加工工序间模型, 工艺路线的形成即为工序路线的正确叠加重组。

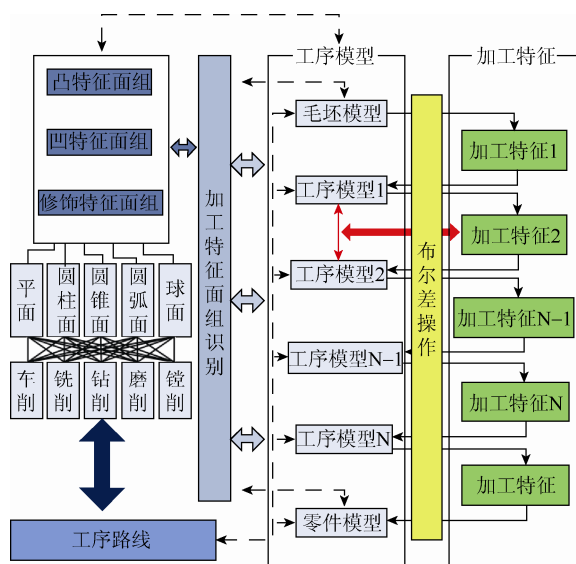


图 2 三维工序模型获取流程

由于零件加工工艺要求及加工条件的不同, 零件的加工顺序与零件从设计模型生成毛坯模型的顺序可能不同, 导致零件加工过程中获得的工序模型与搭建装配过程中的模型不同, 因此需要根据加工要求对各工序的加工特征进行调整重构, 运用布尔差操作生成最佳的工序模型。

1.3 三维工序模型获取方法

零件基本模型特征是毛坯, 零件加工过程可以认为是对毛坯进行材料删减工作。毛坯从加工的第一道工序起直到最后形成零件之前, 每道工序会形成一个中间模型, 该中间模型是通过前一道工序零件形状进行布尔差操作而得。加工特征则是通过前后两道工序模型之间几何特征的

改变而获得的, 因此需在工序间模型和加工特征之间建立关联关系。以车削加工为例, 图 3 建立了零件车削加工过程中的工序模型及加工特征, 通过布尔差运算完成了毛坯到零件的实现。

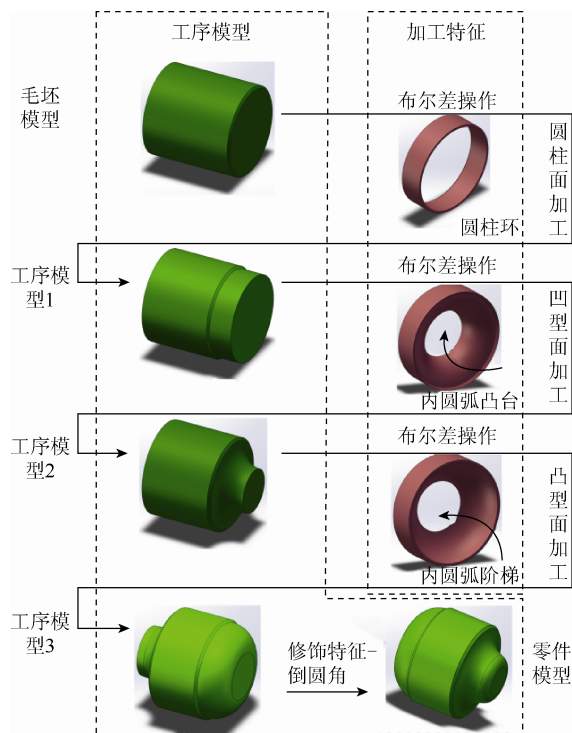


图 3 基于加工特征的三维工序模型获取

由以上关系可知, 后一道工序模型由前一道工序模型与该道工序相应的加工特征进行布尔操作完成。因此, 为实现机加工零件的快速工艺规划设计, 要求根据加工特征与工序模型的依赖关系快速识别零件模型中的加工特征类型, 迅速还原加工特征及工序模型, 在加工工艺要求的限制下, 得到最佳的工序模型组合, 通过布尔差操作得到相应加工特征。

2 基于三维工序模型工艺优化

2.1 基于三维工序模型的切削力预测模型

零件在加工过程中, 由于三维工序模型和加工面组的变化引起刀具-工件接触区域动态变化, 从而产生切削载荷不稳定、切削力急剧变化的现象, 因此建立复杂型面切削力预测模型。本文采用 B 样条曲线插值参数化的方法进行建模, 首先将切削刃和待加工表面轮廓线按一定的间隔取点, 运用均匀三次 B 样条曲线进行插值, 再运用 B

样条曲线反算法得到圆弧车削起点及终点坐标, 建立一套准确的动态切削力预测模型。

切削力是由被切削材料的变形和刀具-工件的摩擦产生, 可分解为沿切削速度方向的切向力 F_t 和刀具基平面上的摩擦力 F_{fr} , 其中 F_{fr} 可进一步分解为基平面上相互垂直的轴向力 F_f 和径向力 F_r ; 摩擦力 F_{fr} 的方向角 β 即 F_{fr} 与 X 轴的夹角。由于刀尖圆弧半径 r 的存在, 以及切削时进给 f 方向和切削深度 a_p 的不断变化, 使得切削厚度沿切削刃的每一接触点分布均不相同, 因此切削力也非均匀分布, 如图 4 所示, 假设当前(第 j 次)进给的刀尖圆弧刃都是与上一次(第 $j-1$ 次)进给的刀尖圆弧刃相交。

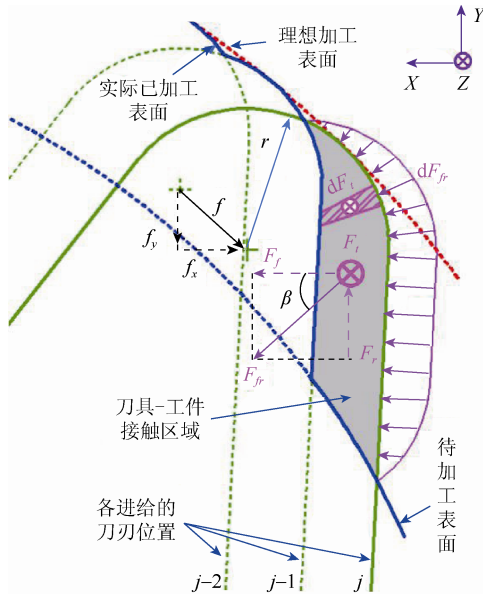


图 4 刀具-工件接触区域的切削力分布

针对刀具-工件接触区域, 引入切削刃和待加工表面轮廓线的插值 B 样条曲线方程式(1)和(2):

$$\begin{cases} T_x(u) = N(u)P_x \\ T_y(u) = N(u)P_y \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} W_x(t) = N(t)Q_x \\ W_y(t) = N(t)Q_y \end{cases} \quad (2)$$

其中, P 和 Q 分别为切削刃和待加工表面轮廓线的控制点矩阵。 $N(u)$ 和 $N(t)$ 为 B 样条曲线递推公式的方程表达式。

假设第 j 次进给在 X 轴和 Y 轴的分量分别为 f_x^j 和 f_y^j , 由此第 j 次进给的切削刃可表示为:

$$\begin{cases} T_x^j(u) = N(u) \left[P_x - \sum_{k=1}^j f_x^k \right] \\ T_y^j(u) = N(u) \left[P_y - \sum_{k=1}^j f_y^k \right] \end{cases} \quad (3)$$

结合均匀三次 B 样条曲线反算得出整个刀具-工件接触区域的面积 A_t 和接触刃长度 L_t , 计算公式如下:

$$A_t = \int_{u_b}^{u_k} T_y^j(u) \frac{dT_x^j(u)}{du} du - \int_{u_b}^{u_k} BEK_y^{j-1}(u) \frac{dBEK_x^{j-1}(u)}{du} du \quad (3-1)$$

$$L_t = \int_{u_b}^{u_k} \sqrt{\left[\frac{dT_x^j(u)}{du} \right]^2 + \left[\frac{dT_y^j(u)}{du} \right]^2} du \quad (3-2)$$

其中, BEK^{j-1} 为均匀三次 B 样条曲线。

沿切削刃将刀具-工件接触区域划分成许多微元, 切削力微元就可表示为所在微元的面积 dA 和局部切削刃接触长度 dL 的函数^[16]:

$$dF_t = dF_{tc} + dF_{te} = K_{tc} \cdot dA + K_{te} \cdot dL \quad (4)$$

$$dF_{fr} = dF_{frc} + dF_{fre} = K_{frc} \cdot dA + K_{fre} \cdot dL \quad (5)$$

其中, $K_e(K_{te}$ 和 $K_{fre})$ 和 $K_c(K_{tc}$ 、 K_{frc1} 和 $K_{frc2})$ 分别为刃口摩擦系数和切削力系数, 可以通过直线车削试验确定。对式(6)和(7)分别进行积分后可得到每一次进给瞬时的切削力计算公式, 从而构建复杂型面车削动态切削力预测模型。

$$F_t = F_{tc} + F_{te} = K_{tc} \cdot A_t + K_{te} \cdot L_t \quad (6)$$

$$F_{fr} = F_{frc1} + F_{frc2} + F_{fre} = K_{frc1} \cdot A_1 + K_{frc2} \cdot A_2 + K_{fre} \cdot L_t \quad (7)$$

$$F_f = F_{fr} \cdot \sin\beta \quad (8)$$

$$F_r = F_{fr} \cdot \cos\beta \quad (9)$$

其中的 F_{fr} 需要依据刀具-工件接触区域的几何划分类区分计算 F_{frc1} 和 F_{frc2} 确定。

2.2 面向工艺参数的优化过程

针对零件加工过程中工序模型的识别和加工特征的获取, 需参考机械行业标准 JB/T5992.1 对工序进行编码设置。对于零件机加工实际存在的工序类型, 结合专家经验及对应的加工要求, 对工序进行更细致的分类编码。表 1 所示为部分工序信息编码表。

工艺设计是产品开发的前提, 工艺规划的优劣直接影响着产品的质量。

表 1 部分工序信息编码表

工序类型	信息类别					编码
	加工类型		加工曲面	精度		
车削(311)	凸特征(0)	凸台(00)	内圆弧凸台	端平面(00)	粗加工 (0)	311([0-00-00-00]-[00]-0)
			圆弧凸台(00)	凸型面(01)		311([0-00-00-00]-[01]-1)
			(00)	圆锥面(02)		316([0-00-00-00]-[02]-2)
		...	...	311([0-00-00]-1)		
		方形凸台(01)	...	312([0-00-01]-1)		
		...	...	312([0-00]-1)		
铣削(312)	肋板(01)	...	...	精加工 (1)	312([0-01]-1)	
		...	...		312([0-01]-1)	
		圆环面(03)	312([1-00-00-00]-[03]-1)			
		圆环面(00)	圆柱面(04)		311([1-00-00-00]-[04]-1)	
		球面(05)	316([1-00-00-00]-[05]-2)			
		...	...		311([1-00-00]-1)	
钻削(315)	凹特征(1)	方形环(01)	...	超精加工 (2)	316([1-00-01]-2)	
		...	...		311([1-00]-1)	
		孔系(01)	...		315([1-01]-1)	
		槽系(02)	...		321([1-02]-2)	
		...	...			
		...	...			
镗削(316)	阶梯(03)	内圆弧阶梯	凹型面(06)		311([1-03-00-00]-[06]-1)	
		圆弧阶梯(00)	端平面(00)		312([1-03-00-00]-[00]-0)	
		(00)	...		321([1-03-00]-1)	
		方形阶梯(01)	...		316([1-03-01]-2)	
		...	...		316([1-03]-2)	
		...	...			
磨削(321)	修饰特征 (02)	倒边(00)	超精加工 (2)			
倒圆(01)						
倒角(02)						
下料(711)						
时效(518)						
钳工(356)						

针对复杂型面车削载荷动态变化原因分析，若使用同一把刀具切削，如果不考虑切削热和切削液等因素对切削力的影响，则其变化主要由切削参数变化引起。在某一道工序加工中，一般多个型面使用同一把刀具，甚至只能使用一把特定的刀具，所以重新选用刀具或者改变刀具几何参数的方法并不可行，只能通过改变切削参数的方式控制切削载荷。本文主要以切削深度和切削速度作为设计参数，以加工时间作为优化目标，以最大切削力作为主要约束进行工艺优化研究，其优化流程图见图 5。

3 切削载荷时不变工艺优化实例

3.1 车削工艺路线谱系获得

对于车削加工来说，其加工特征主要为回转特征。工序模型是对加工表面外形具体的描述，关系到刀具的几何参数选择及加工工艺路径的规划，图 6 所示为某典型零件车削加工过程中一个三维工序模型，其对应的典型面组包括：圆柱面、

端面、凹型面和凸型面。

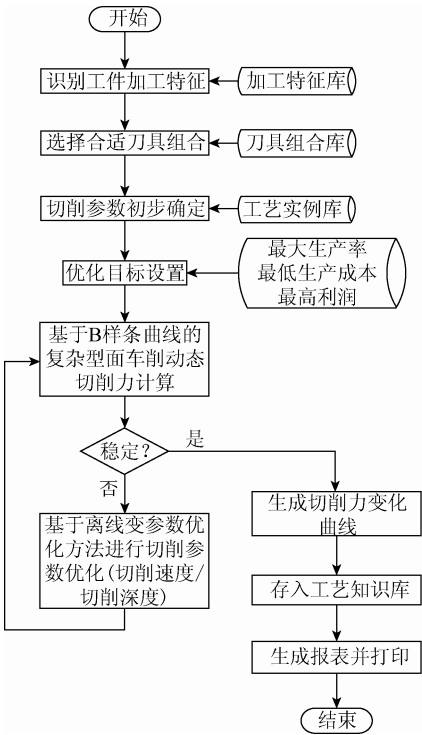


图 5 优化流程图

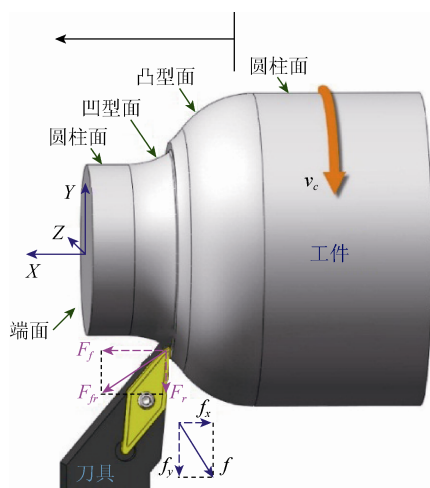


图6 零件车削加工实例

由零件车削加工过程分析,并根据表1所示的工序信息编码表,可得实例零件的工艺路线谱系如表2所示。

图7为依据表2所示车削工艺路线谱系进行加工所得切削合力的变化曲线。其中,圆柱面及端面的车削加工工艺较简单,此处不再赘述。

由曲线走势可看出,切削力在18 s左右达到了最大值,此时刀具处于工件凹型面与凸型面圆弧连接处,18 s以后进入了凸型面圆弧切削。按照表2所述工艺路线成功地完成了零件车削加工,但是切削力在15~20 s之间变化相对剧烈,容易导致刀具崩刃,为提高加工效率及刀具使用寿命,对其工艺参数进行优化。

表2 车削实例工艺路线谱系

下料	车削加工工艺信息编码					钳工
	圆柱面	凸型面	凹型面	圆柱面	端面	
711	311([1-00-00-00]-[04]-1)	311([0-00-00-00]-[01]-1)	311([1-03-00-00]-[06]-1)	311([1-00-00-00]-[04]-0)	311([0-00-00]-[00]-0)	356

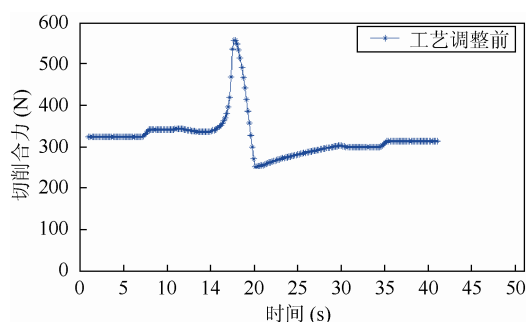


图7 工艺优化前切削载荷变化曲线

3.2 基于切削力预测模型的参数优化

本例主要利用基于B样条的复杂型面统一切削力预测模型,通过离线变参数优化方法进行工艺优化研究。

切削深度的优化通常在不改变毛坯尺寸和加工余量的前提下,通过改变瞬时切削深度得以实现。由于凹型面的切削力提升较快,且其较大的载荷对加工来说比较危险,因而凹型面的切削力控制是工艺设计人员较为关注的,通过预测模型可以看出切削力的变化范围得到了有效控制,且载荷变化较为平缓。由于在高速切削过程中,金属的流动速度会大于塑性变形的速度,导致剪切角的增大,与此同时切削温度也随之提高,使得变形区的金属层变形程度降低,又进一步增大剪切角,从而降低了切削力。从某种程度上讲,在

一定范围内提高切削速度对控制切削力是有效的。图8为切削参数优化后的切削力走势,可以看出切削参数的优化对载荷的动态变化起到了有效控制。

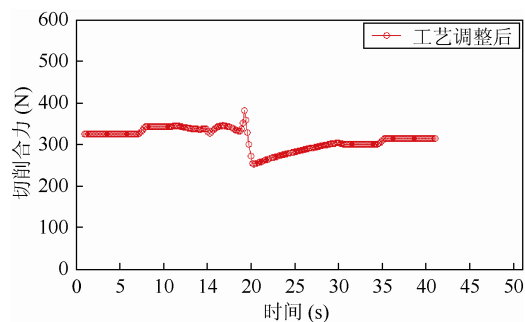


图8 工艺优化后切削载荷变化曲线

3.3 车削工艺优化原型系统

智能车削数据库系统主要实现面向三维工序特征的车削力预测与工艺优化,系统的开发采用ExtJS作为前台开发工具,同时运用平台移植性高、通用性强的Java语言作为后台服务和数据管理的开发工具。

该系统主要包括基于车削加工的特征推荐模块、基于三维工序模型的刀具和切削参数推荐模块、基于切削力预测模型加工工艺优化模块和加工结果预测模块。首先能够对车削加工特征进行

选择确定, 如图 9 所示; 且能够针对车削加工特征要求, 形成车削工艺路线信息, 实现刀具和切削参数的选择推荐, 如图 10 所示。根据推荐的切削参数进行动态切削力模型的预测和切削参数优化, 获得较平稳的切削载荷变化, 切削参数优化界面如图 11 所示, 显示了优化前后的切削载荷变化曲线。

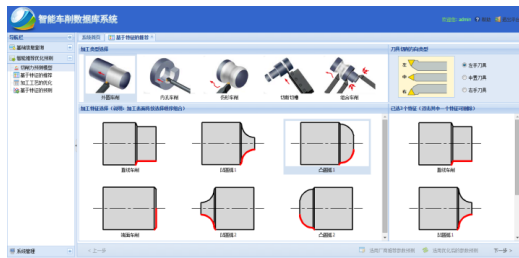


图 9 基于三维工序模型的加工特征选择界面



图 10 加工特征、刀具、切削参数选择推荐界面

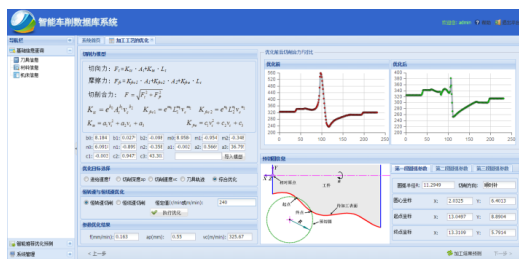


图 11 切削参数优化界面

4 结 论

本文运用布尔差运算实现零件从毛坯到零件设计模型之间三维工序模型的提取, 并对其进行加工特征及典型面组的识别, 通过对工序模型的叠加与重构获得工艺路线谱系。通过基于 B 样条曲线的复杂型面车削动态切削力预测模型进行动态载荷的预测, 并通过切削参数的优化得到平稳的载荷变化趋势, 使得零件加工过程达到最佳状态, 从而缩短工艺设计周期、提高零件加工精度。

参 考 文 献

- [1] 张 辉, 裘乐淼, 张树有, 等. 基于智能聚类分析的产品典型工艺路线提取方法[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(3): 490-498.
- [2] Marchetta M G, Forradellas R Q. An artificial intelligence planning approach to manufacturing feature recognition [J]. Computer-Aided Design, 2010, 42: 248-256.
- [3] Tost D, Puig A, Perez-Vidal L. Boolean operations for 3D simulation of CNC machining of drilling tools [J]. Computer-Aided Design, 2004, 36: 315-323.
- [4] Hoque A S, Halder P K, Parvez M S, et al. Integrated manufacturing features and design-for-manufacture guidelines for reducing product cost under CAD/CAM environment [J]. Computers and Industrial Engineering, 2013, 66(4): 988-1003.
- [5] Liu S N, Zhang Z M, Tian X T. A typical process route discovery method based on clustering analysis [J]. International Journal of Advanced Manufacturing System, 2007, 35(1-2): 186-194.
- [6] Xu H M, Yuan M H, Li D B. A novel process planning schema based on process knowledge customization [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 44(1): 161-172.
- [7] 邹定国, 朱心雄. 基于特征设计和参数设计的零件模型[J]. 工程图学学报, 1997, 18(1): 26-33.
- [8] 蔡立钢, 曹希彬, 李培根. 基于实例的回转类零件的工艺路线的决策方法研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2000, 12(3): 76-81.
- [9] 金 涛, 单 岩, 童水光. 产品反求工程中基于几何特征及约束的模型重建[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2001, 13(3): 1-6.
- [10] 凌卫青, 赵艾萍, 谢友柏. 基于实例的产品设计知识获取方法及实现[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2002, 14(11): 1014-1019.
- [11] 赵艾萍, 凌卫青, 谢友柏. 支持性能驱动设计的产品性能表达[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2002, 14(11): 1020-1025.
- [12] 肖海燕, 张家泰, 张艳丽. 零件库开发工具关键技术的研究[J]. 工程图学学报, 2007, 28(3): 7-12.
- [13] 张 禹, 白晓兰, 张朝彪, 等. 基于实例推理的数控车床智能模块组合方法[J]. 机械工程学报, 2014, 50(1): 120-129.
- [14] 胡淑慧, 杨海成, 张招建, 等. 三维工序模型几何演变序列的相似性度量[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 26(7): 1176-1183.
- [15] 朱文博, 吴新仁, 甘 屹. 基于形状拆分的机械零件三维模型检索[J]. 图学学报, 2015, 36(1): 35-40.
- [16] Atabey F, Lazoglu I, Altintas Y. Mechanics of boring processes-Part I [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43: 463-476.