

面向生产应用的优化型切削数据库研究与开发^{*}

Research and Development on Optimized Cutting Database for Production Application

北京航空航天大学机械工程及自动化学院 张福梅 刘强

[摘要] 针对企业生产应用中缺乏合理的优化型切削参数的问题,提出了基于动力学仿真的切削参数优化方法,并开发切削数据库,实现对优化后的切削加工参数的有效管理,便于生产人员进行查阅作为参考依据,现已在多家企业应用。

关键词: 切削参数优化 切削数据库 动力学仿真 生产应用

[ABSTRACT] According to the problem that is in production application, the method of cutting parameter and optimization based on dynamic simulation is proposed, and the cutting database is developed to realize effective management for optimized cutting parameters, which is convenient to consult as a reference for production personnel, and this method is used in several enterprises.

Keywords: Cutting parameter optimization Cutting database Dynamic simulation Production application

随着数控技术和高速切削加工技术的发展,国内越来越多的企业,尤其是航空制造企业花费巨资购买了先进的高速加工机床或加工中心来加工飞机的大梁、隔框、壁板等整体结构件,由于整体结构件存在体积大、壁薄、刚度差、易变形、切削加工余量大,加工周期长,加工质量和精度很难控制这些问题^[1],使得加工效率逐步成为制约飞机研制和批量生产的关键因素。而目前由于缺乏实用的切削数据库,大多数情况下还是凭编程加工人员的实际加工经验或是工艺手册提供切削参数,这往往导致切削参数选择不规范,加工效率低下,甚至出现零件报废的情况,这直接阻碍了相关先进技术在机械制造业领域的推广应用,以至先进的加工设备得不到最充分的利用,不能获得最大的经济和社会效益。由此可见,研究优化型切削数据库,为生产企业提供合理、优化的切削加工参数,改变企业中长期存在的“高投入、低产出”的状况,实现高精度、高效率和高可靠性的切削加工,就具有十分重要的意义。

^{*} 国防基础科研项目(B2120080261)。

1 切削参数优化原理

目前,企业虽然有很多高速机床,但始终无法充分发挥高速机床的优良性能,机床的利用率不高,实际生产效率低下,已成为企业迫切需要解决的难题,针对这一难题,本课题提出了一种基于铣削加工动力学仿真的切削参数优化的方法。该方法以瞬时刚性力模型和再生颤振理论为基础^[2],用试验方法获得工件材料的切削力系数和加工系统的动力学特性参数,对颤振稳定域和铣削加工中的切削力、主轴利用率、扭矩等各物理量进行仿真,以最大材料去除率为目标函数,以切削力、主轴功率、扭矩、切削速度、刀具使用寿命、颤振稳定域等为约束条件来优化切削参数,得到能够使零件生产加工效率、机床利用率提高的符合实际需求的优化型切削参数,并建立切削数据库对优化后的切削数据进行管理。

1.1 目标函数

对于铣削加工而言,优化目标函数通常包括最大生产率、最低成本、最大经济利润及可变综合目标函数等几方面。文中以最大生产率作为目标函数,即生产单个零件的时间最短,可以将铣削深度看作多层铣削加工的叠加,故只要每层铣削加工材料去除率最大,整个零件的生产时间就最短。对铝合金等易加工材料,由于刀具磨损小,可直接将材料去除率(MRR)作为优化的目标函数;而钛合金、高温合金等难加工材料,由于存在严重刀具磨损现象,故必须兼顾刀具的使用寿命。可将 MRR 作为唯一的目标函数,而把刀具使用寿命作为1个约束条件处理,材料去除率的定义如下^[3]:

$$MRR = a_e \cdot a_p \cdot n \cdot f_z \cdot N \quad (1)$$

式中, a_e 为切宽; a_p 为切深; n 为主轴转速; f_z 为每齿进给量; N 为齿数。因此,设计变量有 a_e 、 a_p 、 n 和 f_z 4个。

1.2 约束条件

在确定了优化目标函数和设计变量后,需要确定约束条件。加工过程的约束条件主要包括机床、刀具和工件的约束条件。机床约束条件是指机床主轴转速、功率、扭矩及进给速度的限制。刀具约束条件是指每齿进给量、切削线速度及刀具使用寿命。其他的还包

括工件表面质量(精加工)、弱刚性零件的变形、颤振稳定域。

一般情况下,机床的约束条件可以从机床的使用手册中查得;刀具的约束条件可以从刀具厂商提供的刀具使用手册中获得,也可以参考相关工艺手册^[4];工件变形量的约束由零件的形位公差确定;颤振稳定域曲线可以由动力学仿真软件得到。

1.3 参数优化

1.3.1 初步确定参数范围

(1) 确定主轴转速和切削线速度。

$$\text{切削线速度 } v_c = \frac{n\pi D}{1000}, \quad (2)$$

式中, n 为主轴转速; D 为刀具直径。

根据机床约束中主轴转速和刀具约束中刀具切削线速度,可以确定加工中的许用主轴转速和切削线速度。

(2) 确定切削宽度和切削深度。

切削宽度和切削深度的优化与刀具轨迹及加工余量等密切相关,工艺人员需要根据实际加工情况初步确定几组切宽与切深值。

(3) 确定每齿进给量和进给速度。

每齿进给量和进给速度存在以下关系:

$$v_f = n \cdot N \cdot f_z, \quad (3)$$

式中, v_f 为进给速度; N 为齿数; n 为主轴转速。根据刀具约束条件和机床进给速度的约束条件,初选每齿进给量 f_z 范围。

1.3.2 优化策略

根据上述原则初步选择的切削参数,具体优化步骤如下。

(1) 根据实际加工情况确定切宽 a_e 后,结合颤振稳定域仿真结果来确定主轴转速 n ,应尽量在较大的稳定性叶瓣中选取转速高、轴向切深大的点。如果系统的颤振稳定域图形无较大的稳定性叶瓣,应在稳定性叶瓣下部选取。选择的主轴转速 n 必须小于主轴最大转速和刀具的许用线速度要求。

(2) 选定 n 后,在颤振稳定域图(见图1)中选取该主轴转速所对应的最大稳定轴向切深 a_p 。鉴于仿真得到的颤振稳定域图形的精确度,为安全起见,所选轴向切削深度不能太靠近稳定域边界线并应同时满足刀具约束条件。

(3) 根据已确定的切削参数 (a_e, n, a_p) 并结合动力学仿真系统计算得到的时域结果进一步确定每齿进给量 f_z 。每齿进给量 f_z 应满足切削力、切削功率、主轴转矩等约束条件。将以上参数代入到 MRR 的表达式中,

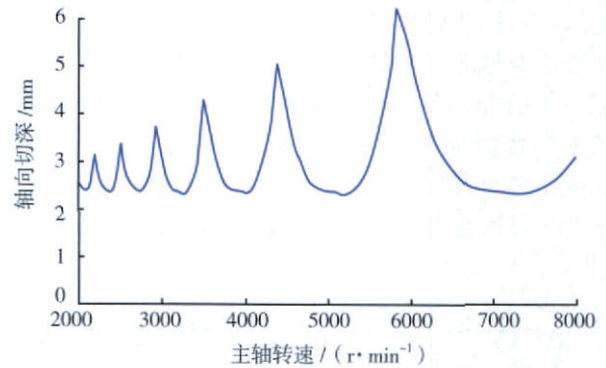


图1 颤振稳定性叶瓣图

Fig. 1 Stability lobes

计算 MRR 值,进行多组计算后,挑选出最大值,即为优化的切削参数组合。

2 切削数据库的设计

为了实现对优化后的切削加工参数的有效管理,开发了切削数据库管理系统,常见的数据库管理系统的架构设计主要分为 C/S 架构和 B/S(Browser/Server) 架构 2 种。传统的 C/S 体系结构虽然采用的是开放模式,但这只是系统开发一级的开放性,在特定的应用中无论是 Client 端,还是 Server 端都还需要特定的软件支持,而 B/S 结构即浏览器和服务器结构。在这种结构下,用户工作界面是通过 WWW 浏览器来实现,极少部分事务逻辑在前端实现,但是主要事务逻辑在服务器端实现,这样就大大简化了客户端电脑载荷,减轻了系统维护与升级的成本和工作量,降低了用户的总体成本。以目前的技术看,局域网建立 B/S 结构的网络应用,并通过 Internet/Intranet 模式下数据库应用,能实现不同的人员,从不同的地点,以不同的接入方式(如 LAN、WAN、Internet/Intranet 等)访问和操作共同的数据库;它能有效地保护数据平台和管理访问权限,服务器数据库也很安全。

为此,本课题设计的数据库系统采用 B/S 模式,利用 ASP.NET+C#+Sql Server 2000 开发,通过对整个铣削加工过程的分析研究,确定数据库的基本功能需求和数据元素,完成概念设计,建立 E-R 模型,并转换成逻辑模型,最终在 SQL Server 2000 中生成物理数据库,利用 Dreamweaver 进行美观简洁的页面设计^[5],在 ASP.NET 框架下用 C# 编写相关程序源代码,通过 ADO.NET 实现页面访问数据库的功能^[6]。

2.1 总体功能描述

为了实现对优化型切削参数的有效管理,开发了基于动力学仿真的优化型切削数据库系统,该数据库

系统主要是对铣削加工过程中使用的切削参数,按照机床、刀具、工件材料、典型零件的加工工艺以及动力学仿真时域结果和颤振稳定域图形进行分类管理,根据一定的查询条件进行简单查询和多字段组合查询。图2为数据库系统总体功能框架图,以“机床—刀具—工件材料”为主线生成一套完整的数据手册,方便工艺人员查阅。该切削数据库已经在多个企业中应用。

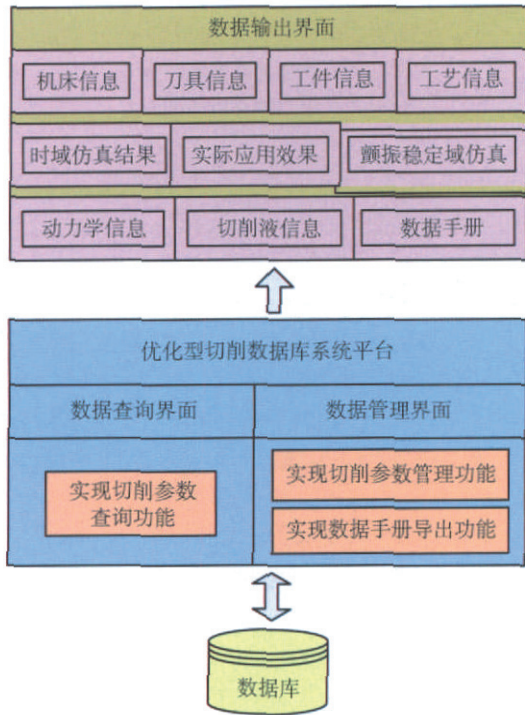


图2 数据库系统功能框架图
Fig. 2 Database function framework

2.2 功能模块介绍

2.2.1 用户登陆和管理模块

该模块主要是用于验证用户的信息是否合法,是否为系统的合法用户,并可以添加新的用户,以及对不同用户的角色和权限的管理。根据用户身份的不同,分为普通用户和管理员用户2种,普通用户只能使用数据库的查询功能,而管理员用户既可以查询,同时还可以对数据库进行编辑、更新、添加和删除等操作,便于管理。

2.2.2 数据查询功能模块

在实际应用中,通过该模块,用户可以根据不同的查询条件,对切削加工参数和其他信息进行查询,步骤如下。

(1) 选择查询内容,是切削加工参数查询还是其他信息查询(机床、刀具、工件及工艺和动力学等信

息);

(2) 选择查询条件,包括机床(主轴转速和进给速度等)、工件材料牌号、刀具(类型和几何参数等)、数据来源(试验、应用和仿真)几方面;

(3) 选择查询方式,单一条件查询或多条件组合查询;

(4) 得到符合条件的结果,在切削加工参数查询结果中,有材料去除率、主轴功率利用率等信息,材料去除率高表示生产效率较高,主轴功率利用率高表示机床利用率较高,所以,在结果中选择这2个指标较高的数据作为可以作为选取合理参数的依据,查询结果如图3和图4所示。

工厂	零件名称	材料类别	刀具名称	牌号及热处理状态	刀具
刀具材料	材料牌号	刀具类型	刀具几何参数	刀具编号	刀具材料
机床类型	加工中心	机床型号	刀具直径	刀具长度	刀具材料

主轴转速 (r/min)	切削进给速度 (m/min)	进给速度 (mm/min)	每齿进给量 (mm/z)	切削力 (N)	切削功率 (W)	切削温度 (°C)	材料去除率 (mm³/min)	主轴功率利用率 (%)	颤振稳定域	刀具
24000	452.39	5000	0.1	3	0.5	无切削液	仿真	查看	查看	查看
24000	452.39	6000	0.13	3	0.5	无切削液	仿真	查看	查看	查看
24000	452.39	8000	0.17	6	1.8	无切削液	仿真	查看	查看	查看
24000	452.39	9000	0.19	6	1.8	无切削液	仿真	查看	查看	查看
24000	452.39	5000	0.1	6	1.4	无切削液	实验	查看	查看	查看
24000	452.39	6000	0.13	6	1.4	无切削液	应用	查看	查看	查看

图3 切削加工参数查询界面

Fig. 3 Cutting Parameter query interface

切削参数										切削过程仿真结果										数据状态	
切削速度 (m/min)	进给速度 (mm/min)	每齿进给量 (mm/z)	切削力 (N)	切削功率 (W)	切削温度 (°C)	材料去除率 (mm³/min)	主轴功率利用率 (%)	颤振稳定域	刀具	切削速度 (m/min)	进给速度 (mm/min)	每齿进给量 (mm/z)	切削力 (N)	切削功率 (W)	切削温度 (°C)	材料去除率 (mm³/min)	主轴功率利用率 (%)	颤振稳定域	刀具	仿真	实验
24000	452.39	0.1	3	0.5	无切削液	仿真	查看	查看	24000	452.39	0.1	3	0.5	无切削液	仿真	查看	查看	查看	查看	查看	查看
24000	452.39	0.13	3	0.5	无切削液	仿真	查看	查看	24000	452.39	0.13	3	0.5	无切削液	仿真	查看	查看	查看	查看	查看	查看
24000	452.39	0.17	6	1.8	无切削液	仿真	查看	查看	24000	452.39	0.17	6	1.8	无切削液	仿真	查看	查看	查看	查看	查看	查看
24000	452.39	0.19	6	1.8	无切削液	仿真	查看	查看	24000	452.39	0.19	6	1.8	无切削液	仿真	查看	查看	查看	查看	查看	查看
24000	452.39	0.1	6	1.4	无切削液	实验	查看	查看	24000	452.39	0.1	6	1.4	无切削液	实验	查看	查看	查看	查看	查看	查看
24000	452.39	0.13	6	1.4	无切削液	应用	查看	查看	24000	452.39	0.13	6	1.4	无切削液	应用	查看	查看	查看	查看	查看	查看

图4 切削加工参数查询结果

Fig. 4 Cutting parameter query result

2.2.3 数据管理功能模块

将整个铣削加工过程中的相关信息进行分类,分别对机床、刀具、工件材料、工艺和动力学等信息,按照数据或图形的格式进行管理,并对这些信息进行编辑、删除、添加、更新等操作,不断丰富数据库中的内容,保证数据库的有效运行。图5为数据管理界面。

编辑	删除	机床制造商	所属单位	机床类型	机床名称	机床编号	数控系统	主轴转速	转速范围	主轴功率(连续)
编辑	删除	4	8	加工中心	UCP710-1加工中心	UCP710-1	HEIDENHAIN	5	0-12000	11
编辑	删除	4	8	加工中心	UCP710-2加工中心	UCP710-2	HEIDENHAIN	5	0-12000	11
编辑	删除	4	8	加工中心	UCP710-3加工中心	UCP710-3	HEIDENHAIN	5	0-12000	11
编辑	删除	26	28	加工中心	HERMLE C30高转速	C30	Heidenhain iTNC530	5	0-40000	26
编辑	删除	26	28	加工中心	HERMLE C40高转速	C40	Heidenhain iTNC530	3	0-28000	23

机床信息		请注意带*的项目必须填写	
机床制造商	哈默	机床名称	电子38所
机床类型	加工中心	机床名称	HERMLE C30高转速
机床编号	C30	数控系统	Heidenhain iTNC530
主轴轴数	5	主轴转速范围 (r/min)	0-40000
主轴功率(连续)(kW)	26	主轴功率(峰值)(kW)	
额定转速(连续)(RPM)	17	额定转速(峰值)(RPM)	
工作台面长(mm)	900/650	主轴类型	
最大进给速度 (m/min)	60	最大进给加速度 (m/s ²)	10
工作行程A(mm)	650	工作行程B(mm)	600
工作行程C(mm)	500	工作行程A(mm)	+30/-115
工作行程D(mm)		工作行程C(mm)	360
X轴位置精度(μm)	8	Y轴位置精度(μm)	8
Z轴位置精度(μm)	8	W轴位置精度(μm)	

图5 切削参数管理界面

Fig. 5 Cutting parameter management interface

2.2.4 数据导出模块

此模块主要利用水晶报表功能按格式生成数据手册,并按不同格式输出以便打印,生成的数据手册涵盖机床、刀具、工件以及由仿真优化软件得到的切削参数数据信息,为生产人员提供可靠的参考依据,同时也便于以文档的形式保存,对以后的生产进行指导。

2.3 数据来源

2.3.1 获取数据方法

以作者所在课题组自主研发的动力学测试软件 Dynacut 和仿真软件 Simucut 为基础,进行“主轴+刀具”系统动力学特性测试,并根据不同的切削加工条件和加工参数,进行仿真计算,初步获得大量数据,进一步进行试验验证、筛选,并利用优化软件 Opticut 进行参数优化,将最终得到的数据运用数据库技术进行管理,建立切削数据库用于生产指导。获取数据的流程如图6所示,具体操作步骤如下。

(1)应用动力学测试软件 Dynacut 现场进行机床“主轴+刀具”系统的动力学特性测试,获取数控机床加工动力学特性参数,并用试验的方法获得工件材料的切削力系数。

(2)针对完成动力学特性测试的机床和刀具,选择不同的切削加工条件和切削参数,应用仿真软件 Simucut 对数控铣削加工过程进行动力学仿真,获取切削力/切削转矩/切削功率/切屑厚度等时域信息和切削稳定性曲线,用于对切削参数的进一步筛选、分析与优化选择。

(3)从大量的仿真数据中选取若干组进行现场试

验,得到满足生产要求的有效数据。

(4)从试验数据中挑选加工效率较高的数据,或者运用优化软件 Opticut 对进行参数优化,挑选几组较优的数据应用于实际生产中。

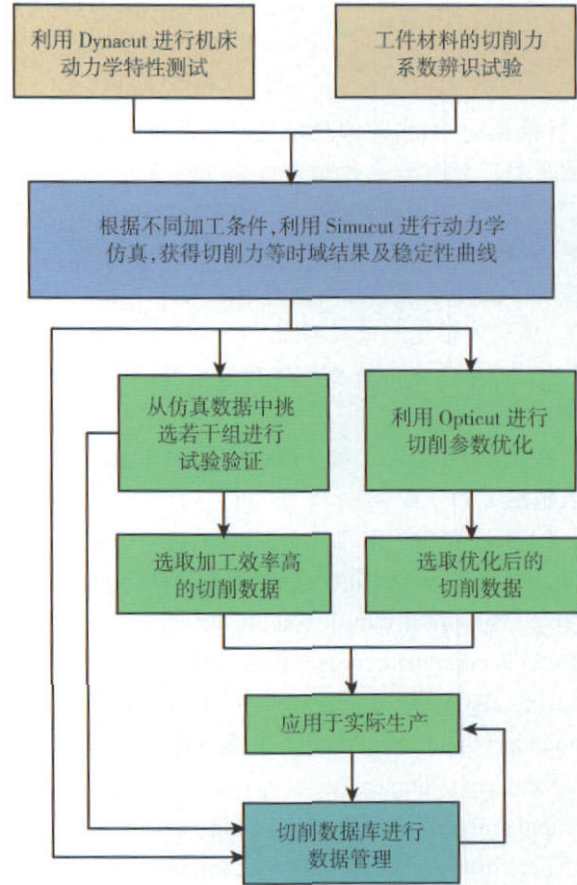


图6 获取数据流程图

Fig. 6 Data acquisition flowchart

(5)建立切削数据库对数据进行有效管理,并按照“仿真”、“试验”、“应用”对切削数据进行标识,方便用户选用。

表1 数据库现有数据分类统计说明

分类	统计说明
工件材料	覆盖国内常用的 24 种金属材料,包括典型牌号的铝合金、钛合金和合金钢等
机床	国内以及进口数控铣床 42 台,涉及中低速、准高速和高速 3 个层次
刀具	各种类型刀具 276 把,材料以硬质合金、高速钢为主,铣刀类型多种多样
典型零件	涉及航空航天、兵器 and 电子等领域的典型零件 33 件,包括板类、薄壁件、支架类和壳体等

(下转第 72 页)

表2 点云数据处理时间表

曲面	数据点数	去噪时间 (s)/次数	平滑时间 (s)/次数	作样条曲线时间/s	作曲面时间/s
A	41 127	0.6/2	2/3	0.4	6
B	75 909	4/2	6/3	0.5	8

表3 曲面误差分析表

曲面	检查点数/个	最大误差值/mm	平均误差值/mm
A	1 000	3.41×10^{-4}	2.13×10^{-5}
B	1 000	6.18×10^{-4}	2.36×10^{-5}

UF_CURVE_create_spline_thru_pts(…) 和 UF_MODL_create_thru_curves1(…), 自由曲面建模的完整步骤如图 8 所示。

4 结束语

通过 UG/Open API 二次开发平台上实现凸轮自由曲面的快速精确建模,并用 VC++6.0 环境对点云数据进行预处理,有效地解决了大密度点云数据在 UG 中快速建模问题。本课题设计的去除噪声算法、曲面平滑算法等,处理速度快,建立的曲面模型精度高。曲面模型效果如图 9 所示。表 2 是各种算法及曲面建模的运行时间,表 3 是曲面的建模精度。经四坐标机床数控加工后,凸轮型面公差达 $\pm 0.01\text{mm}$ 。

参考文献

[1] Werner A,Skalski K. Piszczatowski S, et al. Reverse engineering of free-form surfaces. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 76(1-3): 128-132.

[2] 罗瑜, 邱望标. UG 二次开发中的点云滤波预处理方法和实现. 兰州理工大学学报, 2008, 34(5):41-44.

[3] 李江雄, 柯映林. 基于特征的复杂曲面反求建模技术研究. 机械工程学报, 2000, 36(5): 18-22.

[4] 柯映林, 刘云峰. 基于三角 Bézier 曲面的复杂特征模型重建及特征融合技术研究. 机械工程学报, 2004, 40(6): 85-90.

[5] 刘伟军, 孙玉文, 刘健. 点云数据的曲面重构新算法. 工程图学学报, 2001(2): 47-52.

[6] 展益彬, 林大钧, 安琦. 反求工程中基于曲面特性的离散数据优化方法. 东华大学学报(自然科学版), 2008, 34(3): 278-281.

[7] 武剑洁. 基于点的散乱点云处理技术的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.

[8] 张力宁. 点云数据抗噪处理方法及其在叶片重建中的应用研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.

[9] 何朝明. 离散点云处理的关键技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.

[10] 董明晓, 郑康平. 一种点云数据噪声点的随机滤波处理方法. 中国图象图形学报, 2004, 9(2): 245-248.

[11] 王格芳, 吴国庆, 沙晓光, 等. 激光测量的自由曲面点云数据处理方法. 工程图学学报, 2008, (5): 33-37.

[12] 张晓娟, 李忠科, 赵静, 等. 牙冠的三维点云数据重建技术研究. 计算机测量与控制, 2006, 14(10): 1401-1403.

[13] 张宏伟, 赵小松, 张国雄. 三维曲面重构技术. 天津大学学报, 2002, 35(2): 183-186.

[14] 黄翔 李迎光. UG 应用开发教程与实例精解. 北京: 清华大学出版社, 2005.

(责编 侧卫)

(上接第 67 页)

2.3.2 数据库现有数据

数据库中现有数据总量 25 000 多组,涉及到航空航天、电子、兵器等领域,涵盖了目前国内常用 24 种金属材料、43 台机床、276 把刀具、33 件典型零件,详细信息如表 1 所示。

3 结论

(1) 针对企业生产应用中存在的缺乏合理的优化型切削参数,导致零件的加工质量差,生产效率低的问题,提出了获得优化型切削加工参数,并建立切削数据库是十分必要的。

(2) 本课题提出了一种基于铣削加工动力学仿真的切削参数优化方法,运用自主研发的动力学仿真软件 Simucut 对颤振稳定域和铣削加工中的各物理量进行仿真,以最大材料去除率为目标函数,以切削力、主轴功率、扭矩、切削速度、刀具使用寿命和颤振稳定域等为约束条件来确定优化的切削参数。

(3) 建立切削数据库系统实现了对优化后的切削参数的有效管理,并利用数据查询功能获得符合要求的数据,为工艺人员提供可靠的参考依据。

参考文献

[1] 付秀丽, 艾兴, 张松, 等. 航空整体结构件的高速切削加工. 工具技术, 2006(3):80-83.

[2] 刘强, 尹力. 一种面向数控工艺参数优化的铣削过程动力学仿真系统研究. 中国机械工程, 2005, 16(13):1146-1149.

[3] 李忠群, 刘强. 基于频响函数的高速铣削颤振稳定域快速分析与研究. 制造技术与机床, 2008, (4):53-57.

[4] 太原市金属切削刀具协会. 金属切削实用刀具技术. 北京: 机械工业出版社, 2002.

[5] 顾群业, 王晓峰. Dreamweaver 网页设计标准教程. 北京: 中国电力出版社, 2008.

[6] 章立民. 用实例学 ASP.NET- 使用 C# 与 ADO.NET. 北京: 电子工业出版社, 2005.

(责编 岩石)