

# 整体叶盘铣削参数的优化

冯新敏,毛杜邦,程耀楠,裴泽

哈尔滨理工大学

**摘要:** 针对刀具的磨损和加工效率的问题,通过使用硬质合金刀具对整体叶盘(TC4)切削加工获取参数,根据试验数据建立数学模型,运用遗传算法对目标函数进行优化来解决。以 Visual Studio 2010 为开发工具, MATLAB 为算法工具, SQL Server 2008 为数据库系统管理软件,建立了铣削参数优化模块,提高了加工效率,降低了刀具磨损。

**关键词:** 刀具磨损;使用寿命;整体叶盘;数据库;参数优化

**中图分类号:** TG547; TH164

**文献标志码:** A

## Optimization System of Milling Parameters for Whole Blade Disk

Feng Xinmin, Mao Dubang, Cheng Yaonan, Pei Ze

**Abstract:** According to the tool wear and machining efficiency, through the use of hard alloy cutter of Blisk (TC4) cutting parameters and the experimental data, establish mathematical model is set up. By using genetic algorithm to optimize the objective function, using Visual Studio 2010 as the development tools, Matlab tools, SQL server algorithm 2008 as the database management system, the optimization module of milling parameters is established, which not only improves the processing efficiency (material removal rate), but also reduce the economic cost (tool wear).

**Keywords:** tool wear; tool life; integral disc; database; parameter optimization

## 1 引言

航空发动机整体叶盘的高效率、高质量加工一直是航空制造业的难题之一。随着对整体叶盘的深入研究以及对整体叶盘材料和切削机理的了解,通过智能算法的优化,可改变航空制造业依赖经验以及多次切削试验来选择加工参数的弊端,实现了优化选择加工参数的问题<sup>[1]</sup>。建立切削数据库并对加工参数进行优化,不仅可以提高整体叶盘的加工效率和加工质量,还可以减少试切、过切及刀具的磨损。

使用硬质合金刀具对整体叶盘进行切削加工,研究刀具的磨损和材料去除率,获得切削加工的约束条件和切削参数,并由此建立线性回归模型,使用遗传算法(MATLAB 进行编程)对数学模型进行优化,建立基于 Visual Studio 2010 为平台的数据库(SQL Server 2008)优化模块<sup>[2]</sup>。

## 2 建立目标函数

整体叶盘的加工和优化需确定优化目标,优化目标的确定要根据具体的加工需求而定。一般情况

下,需要解决的有加工质量、加工效率以及加工成本等问题。在整体叶盘加工过程中,主要优化加工成本与加工效率这两个单目标问题来降低成本和提高生产率,在满足加工要求的条件下使加工成本与加工效率达到最优组合。航空发动机整体叶盘在铣削加工过程中,单位时间内的材料去除率是衡量加工效率的重要方面,此外,刀具的磨损、使用寿命可以看作是衡量加工成本的一项重要指标。

### 2.1 建立刀具使用寿命数学模型

利用硬质合金刀具铣削整体叶盘,工件尺寸 60mm×65mm×100mm,试验机床选用 VDL-1000E 立式加工中心,专用插铣刀直径 12mm,采用顺铣,冷却方式为油冷却。正交表  $L_{16}(4^3)$  进行试验,测得刀具使用寿命  $T$ 。

表 1 为整体叶盘铣削加工时使用的铣削参数以及测量值。设置参数径向切深  $a_p$ 、切削速度  $v$  和每齿进给量  $f_z$ ,测得相对应的刀具使用寿命  $T$ 。在切削加工过程中,影响刀具使用寿命情况有很多种,切削参数是影响刀具寿命的主要因素之一。在机床、刀具等加工条件一定的情况下,刀具的使用寿命与切削参数满足以下公式(泰勒寿命公式)<sup>[3]</sup>

$$T = C_T a_e^{i_1} a_p^{i_2} f_z^{i_3} v^{i_4} \quad (1)$$

式中,  $C_T$  为刀具、工件与其它切削条件有关的常数;  $a_e$  为轴向切深(mm);  $a_p$  为径向切深(mm);  $f_z$  为

每齿进给量 (mm/z);  $v$  为进给速度 (m/min);  $i_1, i_2, i_3, i_4$  为指数。

表1 铣削试验参数及结果

试验序号	切削速度 $v$ (m/min)	径向切深 $a_p$ (mm)	每齿进给量 $f_z$ (mm/z)	使用寿命 $T$ (min)
1	45	1	0.01	131.51
2	60	1.5	0.03	42.96
3	75	2	0.05	21.08
4	90	2.5	0.07	12.25
5	45	2.5	0.03	60.70
6	60	2	0.01	62.79
7	75	1.5	0.07	20.04
8	90	1	0.05	19.11
9	45	1.5	0.05	57.56
10	60	1	0.07	34.05
11	75	2.5	0.01	39.22
12	90	2	0.03	18.99
13	45	2	0.07	45.32
14	60	2.5	0.05	29.17
15	75	1	0.03	32.96
16	90	1.5	0.01	33.49

建立经验公式将上式两边取对数,化成线性函数有

$$\ln T = \ln C_T + i_1 \ln a_e + i_2 \ln a_p + i_3 \ln f_z + i_4 \ln v \quad (2)$$

令  $y = \ln T$ ,  $i_0 = \ln C_T$ ,  $x_1 = \ln a_e$ ,  $x_2 = \ln a_p$ ,  $x_3 = \ln f_z$ ,  $x_4 = v$ , 可得

$$y = i_0 + i_1 x_1 + i_2 x_2 + i_3 x_3 + i_4 x_4 \quad (3)$$

在有随机误差的情况下,通过表1试验获得16组切削数据,建立多元线性回归方程可得

$$\begin{cases} y_1 = \alpha_0 + \alpha_1 x_{1,1} + \alpha_2 x_{2,1} + \alpha_3 x_{3,1} + \alpha_4 x_{4,1} + \varepsilon_1 \\ y_2 = \alpha_0 + \alpha_1 x_{1,2} + \alpha_2 x_{2,2} + \alpha_3 x_{3,2} + \alpha_4 x_{4,2} + \varepsilon_2 \\ \dots \\ y_{16} = \alpha_0 + \alpha_1 x_{1,16} + \alpha_2 x_{2,16} + \alpha_3 x_{3,16} + \alpha_4 x_{4,16} + \varepsilon_{16} \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  为常数项系数;  $\varepsilon$  为加工随机误差。

将式(4)用矩阵的形式表示可得

$$\begin{aligned} Y &= X\alpha + \varepsilon \quad (5) \\ Y &= \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_{16} \end{pmatrix}, X = \begin{pmatrix} 1 & x_{1,1} & x_{2,1} & x_{3,1} & x_{4,1} \\ 1 & x_{2,1} & x_{2,2} & x_{2,3} & x_{2,4} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{16,1} & x_{16,2} & x_{16,3} & x_{16,4} \end{pmatrix}, \\ \alpha &= \begin{pmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \dots \\ \alpha_4 \end{pmatrix}, \varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \dots \\ \varepsilon_4 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

使用最小二乘法,估计矩阵  $\alpha$  的值,使  $i = (i_0, i_1, i_2, i_3, i_4)$  为  $\alpha = (\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4)$  的最小二乘估值,则

多元线性回归方程为

$$\hat{y} = i_0 + i_1 x_1 + i_2 x_2 + i_3 x_3 + i_4 x_4 \quad (6)$$

使用 MATLAB 进行处理,可以得到刀具使用寿命的线性回归模型,即

$$T = 15958.47 a_e^{-0.327} f_z^{-0.431} v^{-1.782} \quad (7)$$

通过  $F$  检验法进行显著性检验,使用  $F_{0.05}$  进行线性回归模型的显著性检验,得出刀具使用寿命的线性回归模型高度显著,因此,可以使用此模型进行刀具寿命的预测。

## 2.2 单位时间内的材料去除率

材料去除率是指在单位时间内被加工件切削去除的体积。为了提高加工效率,在保证加工工件质量的前提下整体叶盘材料的去除率最高<sup>[4]</sup>。铣削试验的刀具宽度为 12mm,单位时间内材料的去除率为

$$Q_1 = a_e a_p f_z n z \quad (8)$$

式中,  $Q_1$  为盘铣刀加工过程中单位时间内的材料去除率 (mm<sup>3</sup>/min);  $n$  为主轴转速 (r/min);  $z$  为盘铣刀刀具齿数。

从上式可以看出,在铣刀刀具齿数确定的情况下要使单位时间内的材料去除率最高,就要合理优化选择切削参数。为了保证材料去除率最大化,需要均衡轴向切深、径向切深、每齿进给量和主轴转速之间的关系。根据试验获得切削参数数据并建立数学模型,可得

$$Q_1 = \frac{5729.60 a_p f_z v}{[\sqrt{36 - (6 - a_p)^2} + 20]} \quad (9)$$

由上式可知,单位材料去除率与切削参数的关系最为紧密,合理选择切削参数可以使材料去除率达到最大化,提高加工效率。

## 3 建立铣削参数优化模块

### 3.1 多目标问题求解

要兼顾加工效率和降低经济成本,必须使刀具的使用寿命和单位时间内的材料去除率达到最佳值,这是多目标函数的优化问题<sup>[5-7]</sup>,其中有两个子目标函数。在整体叶盘加工过程中,加工效率和经济成本同样重要,即刀具的使用寿命等同于单位时间内材料的去除率,权重相同。采用遗传算法中的权重系数变换法进行各个子目标函数线性加权,可表示为

$$w = \sum_{i=1}^n u_i f_i(x) \quad (10)$$

式中,  $u_i$  为  $f_i(x)$  在多目标函数问题中的重要程度。

遗传算法求得的最大值可以转换,即

$$w = -15958.47a_p^{-0.327}f_z^{-0.431}v^{-1.782} - \frac{5729.60a_p f_z v}{[\sqrt{36 - (6 - a_p)^2} + 20]} \quad (11)$$

目标函数的影响因素很多,如机床、刀具和加工材料等。为了使参数的优化结果更加合理和可靠,建立实际的约束条件进行加工,则最大去除率和最大寿命的关于径向切深、每齿进给量和切削速度之间的约束条件可表示为

$$\begin{cases} \max[Q_t(a_p, f_z, v)] \\ T(a_p, f_z, v) \geq T_{\min} \\ 1 \leq a_p \leq 2.5 \\ 45 \leq v \leq 90 \\ 0.01 \leq f_z \leq 0.07 \end{cases} \quad (12)$$

### 3.2 遗传算法优化模型

遗传算法是基于生物进化的过程搜索最优解的仿生问题。通过模拟生物的自然选择、交叉和变异等过程,经过多次迭代直到出现最优结果。该算法是对编码进行操作,而不是参数本身,可有效避免微分操作的运算,适应性很强。遗传算法可以同时多点进行搜索,全局搜索能力强且能够与其它优化算法进行结合,共同解决复杂的多目标问题<sup>[8]</sup>。

遗传算法是通过模拟生物进化来搜索最优解的过程,运用编码技术将参数进行编码来适应群体的进化过程。该算法任意产生初始种群,按照选择、交叉和变异对群体进行迭代操作,产生新的个体用适应度值(Fitness Function)进行衡量,可以产生更好的个体,从而使群体进化到更加好的搜索区域。经过每一代的进化,最后会收敛到最适应环境的群体,得到最好的目标个体,求得满足问题的最优解<sup>[9,10]</sup>。

目标函数为:

```
function[w] = targetValue(v, fz, ap)
x1 = ap; x2 = fz; x3 = v;
w = -15958.47 * x1^-0.327 * x2^-0.431 * x3^(-1.782) - 5729.60 * x1 * x2 * x3 / ((36 - (6 - x1)^2)^(1/2) + 20);
Size = 20; % 初始种群大小, CodeL = 3; % 变量个数, G = 100; % 代数, Pc = 0.75; % 交叉概率。
```

使用 MATLAB 编写的遗传算法优化结果见表 2。由表可知,在约束条件范围内,使用优化算法选择参数,通过遗传算法的计算优化结果,可使材料去除率提高 2%,刀具使用寿命提高 19.6%,提高了切削加工生产率,降低了经济成本,使全局得到最优。

表 2 参数优化结果对比

参数条件	$a_p$ (mm)	$f_z$ (mm/z)	$v$ (m/min)	$Q_t$ (mm <sup>3</sup> /min)	$T$ (min)
优化结果	2.3	0.04	55	1465.80	35.00
约束条件	[1, 2.5]	[0.01, 0.07]	[45, 90]	—	—
正常使用	1.75	0.04	67.5	1117.10	29.26

### 3.3 铣削参数优化系统

根据以上研究建立基于 Visual Studio 2010 为平台的数据库管理系统,并与 SQL sever 数据库相连接,功能强大,可视化界面操作简单,能实现人机互助功能。再运用 MATLAB 软件串联到数据库系统平台,实现复杂的数学运算和繁重的数学推导,把要优化的结果用可视化界面呈现,方便操作人员使用。整体叶盘复合铣削系统的首页有知识查询、目标预测、参数优化、数据管理、系统维护和系统帮助等模块。在切削参数优化系统界面,用户可以通过选择加工条件、铣削参数范围和约束条件对加工参数进行优化。在优化结果一栏中可以看到被优化过选取的参数,其中有刀具使用寿命和单位时间内的材料去除率等参数可供参考和选择。

## 4 结语

(1)使用硬质合金刀具对整体叶盘材料进行切削,采用多目标线性回归方程,建立参数优化模块,以最大加工效率(单位时间内的材料去除率)和降低经济成本(刀具的使用寿命)为目标,利用权重系数变换法,将多目标函数转化成单目标函数,对铣削参数进行约束。

(2)从优化切削参数着手,利用遗传算法的特性及求解过程,通过 MATLAB 遗传算法的编写以及连接到数据库,并运用 Visual Sever2010(C#为编程语言)平台进行可视化设计,对切削参数进行计算并建立了铣削参数优化模型。

(3)优化模型可以进行切削加工条件的查询和对切削参数进行优化,对选择切削参数提供了可靠的保障,提高了刀具使用寿命和单位时间的材料去除率,不仅降低了生产成本,还提高了加工效率。

## 参考文献

- [1]张海艳,张连锋.航空发动机整体叶盘制造技术国内外发展概述[J].航空制造技术,2013(23/24):38-41.
- [2]陈真.开式整体叶盘复合铣削参数优化系统的研究与开发[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2014.
- [3]王亮.铣削 Cr12MoV 淬硬钢的刀具使用寿命的研究[D].苏州:苏州大学,2015.

# 圆弧刃金刚石刀具研抛新方法 & 微摆幅机构设计

颜认, 陈枫, 陈小丹, 周一丹

南通大学

**摘要:** 圆弧刃金刚石刀具制造的目标是获得刃口锋利、刀尖圆弧轮廓精度高和刃口表面质量高的金刚石刀头, 其研抛工艺一直是国内外研究的热点。为提高圆弧刃金刚石刀具研抛效率和研抛质量, 提出了微摆辅助机械研抛方法, 理论分析表明该方法能有效提高金刚石刀具的研抛效率和研抛质量。对实现该方法的微摆幅机构进行设计和有限元模态分析, 研究结果对微摆幅机构微摆频率的选择具有重要指导意义, 为微摆幅机构的结构改进提供了依据。

**关键词:** 微摆辅助机械研抛; 圆弧刃金刚石刀具; 微摆幅机构; 模态分析

**中图分类号:** TG711; TH122

**文献标志码:** A

## New Method of Polishing Diamond Tools with Circular Arc Edge and Design of the Microswing Mechanism

Yan Ren, Chen Feng, Chen Xiaodan, Zhou Yidan

**Abstract:** The purpose of the arc edge diamond tool is to obtain a diamond blade with high edge sharpness, high precision of the tool nose and high surface of the cutting edge, and its polishing process has been a hot topic both at home and abroad. The method of microswing assisted mechanical polishing is put forward, in order to improve the polishing efficiency and polishing quality of the diamond cutting tool. The theoretical analysis shows that the method can improve the polishing efficiency and polishing quality of the diamond tool effectively. The design and the finite element modal analysis of the micro-swing mechanism is carried out. The results are of great significance to the selection of the micro-swing frequency of the micro-swing mechanism and provide the basis for the structural improvement of the micro-swing mechanism as well.

**Keywords:** microswing assisted mechanical polishing; arc edge diamond tool; microswing mechanism; modal analysis

## 1 引言

金刚石刀具因具有加工精度高、使用寿命长等特点, 成为精密和超精密切削加工中的理想刀具, 在国防工业和民用工业等领域得到了越来越广泛的应用。然而金刚石硬度高、耐磨性好的特点也成了金

刚石刀具研抛的一大难题<sup>[1]</sup>。特别是对于圆弧刃金刚石刀具, 研抛后的刀尖圆弧轮廓精度和刃口表面质量要求极高, 使金刚石刀具刀尖圆弧的研抛需要大量时间, 导致刀具生产成本大大提高。

本文从提高圆弧刃金刚石刀具研抛效率、研抛质量和降低刀具研抛成本的角度出发, 首次提出了在原机械研抛方法基础上增加微摆研抛的方法, 并进行了理论分析, 设计了一种可实现金刚石刀具微摆运动的微摆幅机构。

**基金项目:** 2016年度江苏省普通高校学术学位研究生科研创新计划项目(KYLX16-0967)  
**收稿日期:** 2017年4月

- [4] 李锋, 刘维伟, 史凯宁, 等. GH4169 高速切削刀具耐用度及给定约束参数优化方法研究[J]. 西安工业大学学报, 2014(8): 643-647.
- [5] 雷英杰, 张善文. 遗传算法工具箱及应用(第二版)[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2013: 29-102.
- [6] 俞国燕, 王筱珍. 改进遗传算法的应用研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2007.
- [7] 方沂, 田美丽, 陈小润, 等. 高速加工切削参数优化及试验分析[D]. 天津: 天津工程师范学院, 2007.
- [8] 黄豪. 基于改进遗传算法的切削参数优化[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.

- [9] 王明海, 王京刚, 郑耀辉, 等. 基于改进遗传算法的钛合金铣削参数优化[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2013(11): 44-46.
- [10] 吴玲, 左健民, 王保升, 等. 基于遗传算法的铣削参数优化[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2014(4): 108-111.

第一作者: 冯新敏, 副教授, 哈尔滨理工大学机械动力工程学院, 150080 哈尔滨市

First Author: Feng Xinmin, Associate Professor, School of Mechanical and Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China