

铣削新型 TC21 钛合金多目标参数优化

Multi-Objective Parameter Optimization on Milling New TC21 Titanium Alloy

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 陶开荣 周成 李海滨

[摘要] 通过对 TC21 钛合金铣削正交试验,测量表面粗糙度,构建粗糙度预测公式。并以最大材料去除率及最小表面粗糙度为优化目标采用遗传算法对钛合金铣削切削参数进行优化,以期对生产实践起到一定的指导作用。

关键词: TC21 钛合金 表面粗糙度 遗传算法 参数优化

[ABSTRACT] Through the milling test of titanium alloy TC21, the amount of surface roughness is measured, and roughness prediction formula is built. The maximum material removal rate and minimum surface roughness is set as the optimization objective to optimize the titanium milling cutting parameter with genetic algorithm in order to play a guiding role in the production practice.

Keywords: Titanium alloy TC21 Surface roughness Genetic Algorithm Parameter optimization

TC21 钛合金是我国自主研发的一种新型高强高韧损伤容限型钛合金,在航空航天中有广阔的应用前景,目前,对其机械加工性能了解还是一片空白。针对航空企业的特殊地位更需要高效率高质量^[1]的优化切削参数^[2],所以亟需建立合理的理论切削参数从而摆脱依靠经验不断摸索的局面。

表面粗糙度^[3-4]是衡量加工表面质量的重要指标,国内外已经开始对建立表面粗糙度模型^[5]展开广泛的研究。1995年,Alauddin通过多因素实验研究发现所采用的预测模型与实验数据之间有良好的相互作用关系,为以后公式化参数优化提供理论基础。

遗传算法是一种全局寻优的优化算法,非线性搜索能力非常强,能够求解复杂的优化问题,特别是多目标问题,非线性问题等^[6-7],近几年在工程优化得到广泛应用。

本文基于钛合金 TC21 材料铣削正交试验数据,构建 TC21 粗糙度预测公式,并以最大材料去除率及最小表面粗糙度为优化目标采用遗传算法对钛合金铣削切削参数进行优化,以期对生产实践起到一定的指导作用。

1 试验过程与结果

1.1 试验条件

试验材料选用尺寸为 140mm × 140mm × 140mm 的 TC21 钛合金,主要成分为 Tr6Al-2Zr-2Sn-3Mo-1Cr-2Nb。试验在三坐标数控加工中心 TK5680 上进行;使用的是带 TiAlN 涂层的整体硬质合金刀具(硬质合金 K30,刀具直径为 20mm,齿数为 4)。TC21 钛合金材料表面粗糙度的测量,利用 Surf Test SJ-201 型粗糙度仪。其测量范围为 350 μm (-200 μm~+150 μm),可同时测量 R_a , R_z 和 R_q 。

在飞机发动机叶轮的加工中大量用到侧铣,而且,叶轮的加工属于大去除量的整体结构件加工费时费力,所以,试验采用的是侧铣,这种切削加工方式的加工表面只测量沿进给方向的粗糙值 R_a 。每个粗糙度的值均为三次以上的测量值取平均而得到。试件是在金属去除量相同的情况下,然后检测各种加工方案下的工件表面完整性情况。为能用较少的试验次数取得较正确的试验结果,本文采用正交试验设计方法来安排试验和处理数据,本试验采用四因素三水平的 $L_9(3^4)$ 形式来安排试验,如表 1 所示。

表1 试验因素水平

因素	切削速度 $v/(m \cdot \min^{-1})$	每齿进给量 $f_z/(mm \cdot z^{-1})$	切削宽度 a_e/mm	切削深度 a_p/mm
水平 1	20	0.05	0.5	10
水平 2	60	0.1	1	20
水平 3	100	0.15	1.5	30

1.2 试验结果及处理

在机床加工系统和刀具几何参数确定的前提条件下,假定表面粗糙度与切削参数之间存在复杂的指数关系,应用统计方法,建立正交回归实验的通用模型为:

$$R_a = C v^{b_1} f_z^{b_2} a_p^{b_3} a_e^{b_4} \quad (1)$$

式中, C 为决定于加工材料、切削条件的系数; b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4 为待定系数。

两边分别取对数得:

$$\lg R_a = \lg C + b_1 \lg v + b_2 \lg f_z + b_3 \lg a_p + b_4 \lg a_e \quad (2)$$

$$\text{令: } y = \lg R_a, x_1 = \lg v, x_2 = \lg f_z, x_3 = \lg a_p, x_4 = \lg a_e, b_0 = \lg C,$$

$$\text{则: } y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 \quad (3)$$

建立多元线性回归方程

$$\begin{cases} y_1 = \beta_0 + \beta_1 x_{11} + \beta_2 x_{12} + \beta_3 x_{13} + \beta_4 x_{14} + \varepsilon_1 \\ y_2 = \beta_0 + \beta_2 x_{21} + \beta_2 x_{22} + \beta_3 x_{23} + \beta_4 x_{24} + \varepsilon_2 \\ y_3 = \beta_0 + \beta_1 x_{31} + \beta_2 x_{32} + \beta_3 x_{33} + \beta_4 x_{34} + \varepsilon_3 \\ \dots\dots\dots \\ y_9 = \beta_0 + \beta_1 x_{91} + \beta_2 x_{92} + \beta_3 x_{93} + \beta_4 x_{94} + \varepsilon_9 \end{cases} \quad (4)$$

根据表2正交试验表面粗糙度测量结果,通过MATLAB软件计算得:

$$X = \begin{bmatrix} 1.0000 & 1.3010 & -1.3010 & 1.0000 & -0.3010 \\ 1.0000 & 1.3010 & -1.0000 & 1.3010 & 0 \\ 1.0000 & 1.3010 & -0.8239 & 1.4771 & 0.1761 \\ 1.0000 & 1.7782 & -1.3010 & 1.4771 & 0 \\ 1.0000 & 1.7782 & -1.0000 & 1.0000 & 0.1761 \\ 1.0000 & 1.7782 & -0.8239 & 1.3010 & -0.3010 \\ 1.0000 & 2.0000 & -1.3010 & 1.3010 & 0.1761 \\ 1.0000 & 2.0000 & -1.0000 & 1.4771 & -0.3010 \\ 1.0000 & 2.0000 & -0.8239 & 1.0000 & 0 \end{bmatrix};$$

$$Y = \begin{bmatrix} -0.1427 \\ 0.4409 \\ 0.3010 \\ -0.0915 \\ 0.0334 \\ 0.4440 \\ -0.2676 \\ 0.0212 \\ 0.1875 \end{bmatrix}。$$

由 $B = (X'X)^{-1}X'Y$ 得,

$$B = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.4390 \\ -0.2876 \\ 1.0131 \\ 0.1593 \\ -0.1339 \end{bmatrix}。$$

表2 铣削TC21零件表面粗糙度测量结果

试验编号	切削速度 / (m·min ⁻¹)	每齿进给量 / (mm·z ⁻¹)	切削宽度 /mm	切削深度 /mm	表面粗糙度 R _a /μm
X-1	20	0.05	0.5	10	0.72
X-2	20	0.1	1	20	2.76
X-3	20	0.15	1.5	30	2
X-4	60	0.05	1	30	0.81
X-5	60	0.1	1.5	10	1.08
X-6	60	0.15	0.5	20	2.78
X-7	100	0.05	1.5	20	0.54
X-8	100	0.1	0.5	30	1.05
X-9	100	0.15	1	10	1.54

计算可得各切削参数的指数,建立铣削TC21钛合金粗糙度经验预测公式:

$$R_a = 27.4789v^{-0.2876} f_z^{1.0131} a_p^{0.1593} a_e^{-0.1339} \quad (5)$$

对粗糙度经验回归方程的 $F=18.5293 > F_{0.01}(4,4) = 16.0$, 则得回归方程是显著的。

2 参数优化方法

2.1 实现过程

本文采用的是间接解法求解多约束优化问题,间接解法是将约束问题转化为一系列无约束问题的一种求解方法,其中,具有代表性的是惩罚函数法。多目标参数优化在遗传算法中的实现过程,如图1所示。

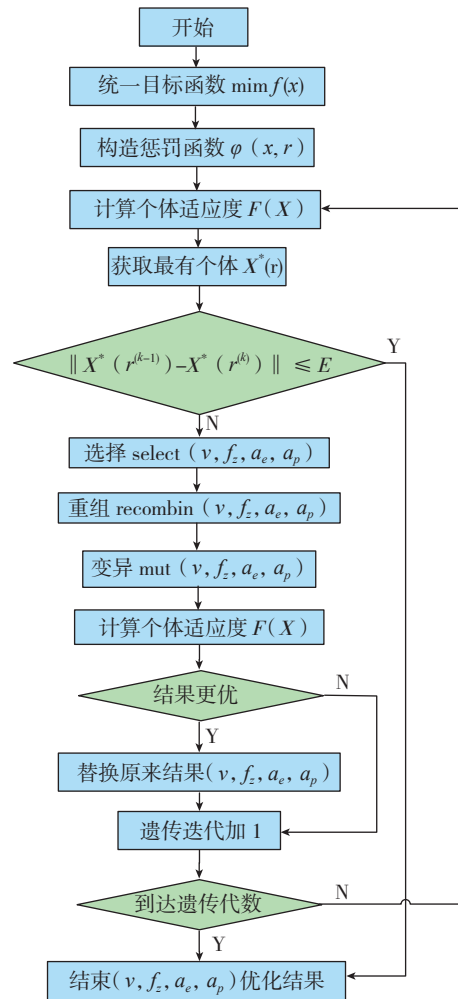


图1 参数优化系统实现流程图

Fig.1 Flow chart of parameter optimization system realization

2.2 前期处理

2.2.1 构建目标函数

切削参数优化模型的建立必须遵循如下原则:必须能在所受的约束条件下获得好的试验结果,应该在保证

达到切削表面质量和其他要求的条件下,使得切削加工达到期望最高加工效率的最优化。在优化设计过程中,要选择合理的设计变量,对目标影响比较大的参数定为设计变量,对目标影响不大的参数可根据具体的实际情况作处理。设计变量的选择越多,自由度就越大,就有利于寻找最好的设计方案,但是变量增多,求解就越复杂。因此,对于较复杂的问题求解时,必须选择合理的确定设计变量。当工件、刀具和机床的参数确定后,影响加工效率的主要因素有:每齿进给量、铣削速度、切削宽度、切削深度。

切削加工主要优化目标是加工成本最低、加工质量最好、切削效率最高、刀具寿命最长等。针对航空企业的特殊地位,本文主要考虑当生产任务紧迫时,以最大生产率为主要目标函数,同时保证加工质量。实际生产中进行单目标优化时,可能出现一些不合理的结果。这是因为优化的评价指标往往会互相冲突,某一评价指标的上升可能会导致其他指标降低。为了获得较好的综合质量,在提高某一个主要评价指标的同时,必须兼顾到其他指标的要求。因此,为满足工厂高效优质生产的实际,本文采用了材料去除率 $\max S(x)$ 和表面粗糙度 $\min R_a(x)$ 为目标函数,对 TC21 钛合金铣削进行多目标优化。

(1) 以材料去除率为优化目标。

材料去除率:

$$m_1(v, f_z, a_e, a_p) = S = v f_z a_e a_p n \frac{1000}{\pi D}, \quad (6)$$

式中, S 为材料去除率, D 为刀具直径; n 为主轴转速; z 为刀具齿数。

(2) 粗糙度为优化目标。

优化目标函数为:

$$m_2(v, f_z, a_e, a_p) = R_a = C v^{b_1} f_z^{b_2} a_e^{b_3} a_p^{b_4}, \quad (7)$$

式中, C 为取决于加工材料、切削条件的系数; b_1, b_2, b_3, b_4 为待定系数。

2.2.2 约束条件

在工程实际中,任何优化设计都是有约束条件的。只有满足优化条件的优化设计方案才是可行的。约束条件的建立,使得参数优化的结果符合实际需要,在生产中一般要考虑机床、刀具、工艺三方面的影响。当工件、刀具和机床的参数确定后对加工质量有影响的约束条件为以下 4 个方面。

(1) 机床主轴转速约束:

$$g_1(v, f_z, a_e, a_p) = \frac{\pi D n_{\min}}{1000} - v \leq 0, \quad (8)$$

$$g_2(v, f_z, a_e, a_p) = v - \frac{\pi D n_{\max}}{1000} \leq 0. \quad (9)$$

(2) 每齿进给量约束:

$$g_3(v, f_z, a_e, a_p) = f_z - \frac{\pi D v f_{f \max}}{1000} \leq 0, \quad (10)$$

$$g_4(v, f_z, a_e, a_p) = \frac{\pi D v f_{f \min}}{1000} - f_z \leq 0. \quad (11)$$

(3) 切削深度约束:

$$g_5(v, f_z, a_e, a_p) = a_p - D/2 \leq 0. \quad (12)$$

(4) 切削宽度约束:

$$g_6(v, f_z, a_e, a_p) = a_p - D \leq 0. \quad (13)$$

通过前面对优化目标函数和约束条件的建立,可以把参数优化问题归为以下的优化问题,表达式为:

$$\begin{cases} \min f(v, f_z, a_e, a_p) \\ \text{s.t. } g(v, f_z, a_e, a_p) \leq 0 \end{cases}$$

其中, $f(v, f_z, a_e, a_p)$ 为目标函数, $g(v, f_z, a_e, a_p) \leq 0$ 为约束条件。

2.2.3 统一目标函数

统一目标函数方法,又称综合目标法。它是将多目标问题中各分目标函数通过一定方法转化为统一目标函数作为该多目标优化问题的评价函数,然后,用单目标函数优化方法求解。

在钛合金铣削中,为了顾及效率和质量,材料去除率越大越好,表面粗糙度越小越好,这属于典型的多目标混合优化问题,宜选择乘法来统一目标函数。其原理:如目标函数中有些分目标属于费用类,即目标函数值越小越好,有些分目标属于效果类,即目标函数值越大越好。该方法的主要特点是:将模型中的各分目标函数进行相乘和相除处理后,在可行域上进行求解。设 q 个分目标函数中有 t 个属于费用类目标函数, $q-t$ 个属于效果类目标函数,总目标函数表达式如下:

$$\min f(x) = \frac{\sum_{j=1}^t w_j f_j(x)}{\sum_{j=t+1}^q w_j f_j(x)}, \quad (0 < w_j < 1). \quad (14)$$

上述问题所得的优化解,显然是使位于分子的各目标函数尽可能小,使位于分母的各目标函数尽可能大的值的解。基于上述乘除法的理论,统一最小表面粗糙度和最大材料去除率目标函数,可得钛合金铣削用量的多目标优化的目标函数是:

$$\min f(x) = \frac{C_{K_1} R_a(x)}{C_{K_2} S(x)} = \frac{C_{K_1} C v^{b_1} f_z^{b_2} a_e^{b_3} a_p^{b_4}}{C_{K_2} v f_z a_e a_p z}, \quad (15)$$

式中, C_{K_1}, C_{K_2} 为加权系数; C 为取决于加工材料、切削条件的系数; b_1, b_2, b_3, b_4 为待定系数。

2.2.4 构建惩罚函数

为了将约束优化计算问题转化为无约束问题求解,引入一个罚函数 $\varphi(x, r)$, 即:

表3 优化参数与实际采用参数的切削效率对比

对比项	线速度 $v / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	每次进给 $f_z / (\text{mm} \cdot \text{z}^{-1})$	切削宽度 /mm	切削深度 /mm	粗糙度值 / μm	加工效率 $\eta / (\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	效率比
工厂实际	20	0.1	1	20	2.76	4×10^5	1
优化参数	63	0.115	1.473	12.40	0.94	1.15×10^6	2.9
试验验证	63	0.115	1.473	12.40	0.94	1.15×10^6	2.9

$$\min \varphi(x, r^{(k)}) = \frac{1}{F(X)} = f(x) + r^{(k)} \sum_1^m \{\max[p(x), 0]\}^2, \quad (16)$$

式中, $F(X)$ 为适应度函数; $p(x)$ 为惩罚项, $r^{(k)}$ 为惩罚因子。随着进化不断进行,惩罚项越来越小。为了保证惩罚项的作用,必须逐步增大惩罚因子 $r^{(k)}$; 初始惩罚因子 $r^{(0)}=1$, 取 $C=2$, $r^{(k)}=C \cdot r^{(k-1)}$; 给定搜索精度 ε , 若 $\|X^*(r^{(k-1)}) - X^*(r^{(k)})\| \leq \varepsilon$, 则输出最优解, 否则令 $r^{(k)}=C \cdot r^{(k-1)}$, 转下一步。

2.3 优化结果

采用遗传算法与惩罚函数相结合优化方法取: 每齿进给量(0.05~0.15mm/z, 编码精度 0.001mm/z), 铣削速度(0~100m/min, 编码精度 1m/min); 切削宽度(0~10mm, 编码精度 0.001mm); 切削深度(0~20mm, 编码精度 0.01mm), 优化参数考虑这 4 个参数, 群体规模 100, 100, 1000, 2000, 采用二进制编码, 编码长度为 35 位, 种群规模 50, 最大遗传代数 100, 交叉概率 0.7, 变异概率 0.5, 用 matlab 编程计算结果。并分别用所得结果和工厂实际使用的参数, 在同一机床使用同一刀具加工钛合金块, 结果如表 3。

从表中可以看出铣削参数优化后材料去除率比实际工厂生产最大材料去除率提高 74%, 粗糙度明显降低。为得出具有说服力的结论, 用本文优化的参数值进行切削实验, 切削过程平稳、排屑流畅、机床噪声较小, 已加工表面粗糙度 R_a 理论计算吻合较好, 并且表面粗糙度以及材料去除率都比较好。可以得到的结论是: 文中所提到的优化方法是合理有效的, 所得优化参数的切削效率有较大的提高, 约为工厂实际效率的 2.7 倍, 对生产实践具有重要的指导意义。

参考文献

- [1] Rahman M, Wang Z G, Wong Y S. A review on high-speed machining of titanium alloys. *JSME International Journal, Series C*, 2006, 49(1):11-20.
- [2] Vivancos J, Luis C J, Costa L. Optimal machining parameters selection in high speed milling of hardened steels for injection moulds.

Journal of Materials Processing Technology, 2004, 155-156: 1505-1502.

- [3] Lee K, Dornfeld D A. A study of surface roughness in the micro-end-milling process. *Laboratory for Manufacturing Atom Action*. 2004.
- [4] Sahin Y, Riza M A. Surface roughness prediction model in machining of carbon steel by PVD coated cutting tools. *American Journal of Applied Sciences*, 2004, (1):12-17.
- [5] 刘晓志, 陶华, 李茂伟. 钛合金 TC18 铣削表面粗糙度预测模型的研究. *组合机床与自动化加工技术*, 2010, 7:8-11.
- [6] 高玉根, 王国彪, 丁予展. 遗传算法在机械优化设计中的应用现状及展望. *机械*, 2002, 29(3): 8-12.
- [7] 刘琼荪, 周声华. 基于自适应惩罚函数法的混合遗传算法. *重庆大学学报*, 2006, 29(6): 78-81.

(责编 日午)

(上接第 61 页)

在数据模型的基础上给出了电子化履历实现过程。该模型可以有效地实现数据的结构化, 简化装配数据的提取, 支持履历电子化的生成。本文主要从模型的构建和应用方面进行相关研究, 对数据挖掘研究不足。装配数据的后期处理和挖掘是航空发动机装配研究的后续课题。

参考文献

- [1] 任良全, 张力, 王建民. 产品维修阶段 BOM 数据起源研究. *计算机集成制造系统*, 2010, 16(10):2187-2195.
- [2] 王成恩, 于宏, 张闻雷, 等. 面向对象的航空发动机装配模型. *计算机集成制造系统*, 2010, 16(5):942-948.
- [3] 魏志强, 王先逵, 吴丹, 等. 基于单一数据源的产品 BOM 多视图映射技术. *清华大学学报(自然科学版)*, 2002, 42(6):802-805.
- [4] 孙惠斌, 常智勇. 航空发动机装配技术状态数据模型研究. *航空制造技术*. 2009, (16):74-78.
- [5] Niu X X, Ding H, Xiong Y L, et al. A hierarchical approach to generating precedence graphs for assembly planning. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2003, 43 (14): 1473-1486.
- [6] Henrioud J M, Bourjault A. Lega: a computer-aided generator of assembly plants//computer-aided mechanical assembly planning. Dordrecht. the Netherlands: Kluwer Academic Publishers Group, 1991: 191-215.
- [7] 钟诗胜, 张永健, 林琳. 基于上下文的适应性产品数据管理模型及应用. *计算机集成制造系统*, 2011, 17(1):45-52.

(责编 小城)