

复杂形状薄壁零件加工的综合质量控制*

戴一帆

(国防科技大学机械电子工程与仪器系)

Серебрянников Г. З

(莫斯科航空学院)

摘要 首先分析了加工时零件表面热量场和加工参数、余量场之间的关系;利用数字扫描及滤波的方法建立起复杂形面零件的数学模型;以此为基础,在加工过程中,对零件的几何质量和表面层质量进行了综合控制。研究表明,该方法是提高飞行器发动机中高负载复杂形状薄壁零件可靠性和寿命的有效新途径。

关键词 飞行器发动机,高负载,薄壁零件,表面层质量

分类号 TN391.5

The Synthetical Quality Control for Complicated Shape Parts Processing under High-load in aircraft engine

Dai Yifan

(Department of Mechatronics and Instruments)

Serebrennikof G. Z

(Moscow State Aircraft Institute)

Abstract The paper analyses the relation of the heat field on the parts, surface processing parameter and allowance field, then constructs the mathematical model for parts complicated shape with digital scanning and filter. Based on this, the synthetical control of the geometric and the surface quality of parts is established in the processing course. This is the new effective method of improving the reliability and service life of the thin-wall parts of complicated shap under high-load in aircraft engine.

Key words aircraft engine, thin-wall parts, high-load, surface quality.

在复杂形状薄壁零件的精加工过程中,利用计算机来进行工艺设计并控制加工过

* 1996年3月20日收稿

程,是提高该类零件在高负载条件下工作可靠性和寿命的有效方法之一。本文针对被加工毛坯的特征,建立其几何形状数学模型。分析毛坯的余量场分布,利用计算机优化工艺过程的设计并在加工过程中综合控制状态参数,以保证被加工零件具有最合适的几何形状和表面层质量。在工艺设计和控制程序中,给出工艺设计的优化算法和适应加工变化的优化变化规律,使刀具轨迹在加工过程中能相对薄壁零件的变形而产生适应性变化。

1 加工中零件表面大梯度非恒稳温度场分析

在机械加工中,无论是用磨料还是用刃口刀具,精加工都是在高速切削的条件下进行的。在这样的速度下加工区的发热量相当大,因而在加工区形成一大梯度非恒稳温度场,它成为影响零件表面物理机械性能的主要因素。本节我们建立起切削加工中加工区温度场分布的数学模型及其和残余应力分布的关系。

大梯度非恒稳温度场的理论计算公式如下:

$$T(y, \tau) = \left(\frac{q}{\sqrt{\pi\lambda c\rho\tau}} \right) \left\{ \exp\left(-\frac{y^2}{4a\tau}\right) + \sum_{i=1}^{\infty} \left[\exp\left(-\frac{(2h_i + y)^2}{4a\tau}\right) + \exp\left(-\frac{(2h_i - y)^2}{4a\tau}\right) \right] \right\} \quad (1)$$

式中 λ 、 a 、 c 、 ρ 分别为导热性,温度传导系数,热容比和材料密度。 τ 表示时间,以刀具或热源从研究点上走过的那一时刻算起; y 表示被研究点相对被加工表面的距离; $h=h(x, z)$ 表示零件在坐标 x, z 处实际壁厚值。这里 x 取沿刀具轨迹方向, $x=V_{\text{切}}\times\tau$,而 z 沿其法向; q 表示散热强度。

对于复杂形状的薄壁零件来说, $h=h(x, z)$ 可能有相当大的变化。这种变化不只发生在不同零件之间,也可能在同一零件上发生。如铸造冷却型涡轮叶片的最小壁厚可达0.4mm而其内外缘公差可分别为0.2mm。这就是说其壁厚的偶然性变化在一点处可能是翻倍的。根据公式(1)中的第二、三项可知,随着壁厚的变小,高温分布的深度在同一工序状态下变大。在表面薄层有可能产生温度接近于熔点的区域,那里工件残余应力也发生相应变化。按文献[1]中的方法可计算出最大温度线和残余压力线的相应变化规律。这些变化极大地影响了工件表面层质量。在加工过程中选择优化切削参数,是保障表面层质量的关键。

2 复杂形状薄壁零件表层物理机械性能不稳定影响因素的评价

对于复杂形状薄壁零件,由于加工余量和切削深度的波动,其表面层物理机械性能将有更剧烈的不稳定性。加工余量和切削深度产生波动的因素有

- 毛坯表面形状的不准确性 $y=y(x, z)$;
- 夹具夹紧部件对零件作用的夹紧力带来的翘曲;
- 切削时,由于温度场和应力的作用,残余应力重新分布而引起的翘曲;
- 由于高温而产生的刀具、夹具及设备部件的变形和手工调整刀具的误差而带来的刀具相对零件轨迹的误差。

这些因素对零件表层物理机械性能不稳定性影响可以由每平方厘米表面上的散热强

度关系式来表示：散热强度 $q = P_z \cdot V_{\text{切}} / B$

对工件的移动速度， P_z 表示切削力，它可根据工艺手册上的经验公式确定。如在精铣时：

$$P_z = \frac{C_f a^\alpha S_z^\beta B^u Z}{D^v n^w}$$

如铣削材料为 12C₁₈Ni9Ti，铣刀直径 $D = 50\text{mm}$ ，齿数 $Z = 6$ ， $n = 500$ 转/分， $S = 0.1\text{mm/齿}$ ， $C_f = 2180$ ， $\alpha = 0.92$ ， $\beta = 0.78$ ， $u = 1$ ， $w = 0$ ， $v = 1.15$ ， $a = 1\text{mm}$ ， $B = 12\text{mm}$ 时，将有 $P_z = 300\text{N}$ ，而 q 则为 2.5J/cm^2 。结合公式(1)我们可以定量地计算出加工过程中零件表面温度场的分布，确定其物理机械性能在加工过程中的变化情况，从而为综合质量控制提供理论基础。

3 精加工工序的综合控制方法

这里提出的计算机综合控制精加工工序方法包括二个自动完成的工序：1)在毛坯装夹到夹具上后的识别工序。2)在计算机上形成并由机床或机器人完成的加工立体表面的控制程序工序。它保证在高负载薄壁零件的任一点具有所给定的精确几何形状和物理机械性能参数。

在识别工序 1)中完成 $h(x, z)$ ， $y(x, z)$ 的数学建模。沿刀具走过的被加工表面的行轨迹，采样毛坯表面的实际坐标 h 和 y ，用样条逼近法建模。

为完成采样，在工艺装备的实行部件上安装超声波测量头^[2]。走刀轨迹的设计可按文献[2]中提供的算法在计算机上设计，其中采用了零件图上被加工表面的理想形状所给出的信息，它们通常以离散点的形式给出表面框架上的坐标。研究表明，在没有拐点时要测量 6 到 8 次。而有拐点的线段上每二个拐点间测量 6 到 8 次也是足够的。

研究指出在图纸中原始信息常带有圆整误差，为了挑选并剔除这些误差我们采用了数字滤波的方法。

数字滤波公式如下：

$$\begin{aligned} y_i &= \frac{1}{3} \sum_{k=-1}^1 y_{i+k}^{N-1}; & \epsilon_i^{(N)} &= y_i^{(N-1)} - y_i^{(N)}; \\ S^{(N)} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\epsilon_i^{(N)})^2; & \epsilon_{ic}^{(N)} &= Y_i - y_i^{(N)}; \\ S_c^{(N)} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\epsilon_{ic}^{(N)})^2; \end{aligned} \quad (3)$$

式中 y_i 为数学期望，表示理论轮廓，由 B 样条逼近得来。 Y_i 为初始值， ϵ_i 为偶然误差。 N 为滤波次数。 S 为滤波后曲线坐标残噪声的评价值，表达了滤波效率。 S_c 是实际曲线相对理论曲线的评价值。

分析算法(3)及滤波结果得出如下结论：

- ①对于叶片叶身轮廓形状的误差来说，数字滤波能力处于 $|\epsilon| = 10^{-4}\text{mm}$ 区间段。
- ②为获得尺寸误差局部统计评价， N 应不少于 5 次，在一般情况下 N 取 1 到 4 次。因为第一次滤波后原始误差剩余 15%，而第三次后仅剩 1%。

在算法里包括用三次 B 样条建立实际零件数学模型 $h(x, z)$ ， $y(x, z)$ 的模块，所用

的三次 B 样条函数的基函数表示如下:

$$\begin{aligned}
 & [N_{0,4}(u), N_{1,4}(u), N_{2,4}(u), N_{3,4}(u)] \\
 & = [1, u, u^2, u^3] \frac{1}{3!} \begin{bmatrix} 1 & 4 & 1 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -1 & 3 & -3 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)
 \end{aligned}$$

第 i 段 B 样条曲线表示如下:

$$S(u) = [N_{0,4}(u), N_{1,4}(u), N_{2,4}(u), N_{3,4}(u)] \begin{bmatrix} V_i \\ V_{i+1} \\ V_{i+2} \\ V_{i+3} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中 V 表示特征多边形的顶点向量。

在三次 B 样条的逼近算法中包含了三种边界条件选择: 自由端点, 切矢量, 封闭轮廓。

在工序 2) 中混合优化模块综合考虑了零件的结构特性、加工方法和使用时的载荷条件。对于高负载薄壁零件来说, 为满足它的等强度和稳定的冷却条件, 要求保证精确的壁厚 $h = h_{\text{允}}$ 。在利用控制程序形成刀具轨迹时, 首先优先考虑的是保证这一要求。被加工毛坯装夹后根据测量或样条逼近而得到表面形状实际坐标点值, 由此加工余量和切削深度将成为已知函数, 利用该函数及公式 (1)~(3) 和文献 [1] 中的算法, 可形成一套控制程序, 它可控制工艺参数对散热强度的影响 (一般程序中这些参数为常数, 如铣刀每齿进给量)。由此而保持在零件上每一点对零件强度而言的优化的最高温度、冷作硬化及残余应力的深度和强度。由于所给的状态参数同时同等重要地反映了精加工工序对零件危险区强度的影响, 我们提出的对每一道工序的适应性自动化设计和控制的算法, 保证了高负载零件的稳定优化的强度和耐久性, 并且是传统工艺所不能做到的。

4 结 论

以上讨论了高负载复杂形状薄壁零件加工的质量控制问题。提供了优化表面层加工质量的理论依据, 以及曲面造型和加工程序生成的具体方法。这项技术主要可用于优化零件精加工工序, 提高加工质量 (几何质量和表面层质量)。特别是对高负载复杂形状薄壁零件来说, 该方法是提高它们使用可靠性和寿命的有效新途径。

参 考 文 献

- 1 Серебренников Г. З. Оптимизация технологии изготовления тяжело нагруженных деталей с помощью ЭВМ. М.: Машиностроение. 1981г
- 2 Никитин А. Н., Серебренников Г. З. Технология сборки и автоматизация производства ВРД. М.: Машиностроение. 1992 г

(责任编辑 卢天贶)