

锥球头铣刀铣削力建模及变齿距减振优化设计

刘宽, 孙剑飞

北京航空航天大学

摘要: 在航空发动机叶轮加工过程中, 径向铣削力带来的切削振动对加工质量有较大的影响。为了降低切削振动, 基于某叶轮的加工工况, 利用有限元仿真和 MATLAB 软件计算进行了铣削力建模和分析, 以减小切削振动幅值、降低铣刀弯曲变形程度为优化条件进行了铣刀结构的优化设计。

关键词: 铣削力模型; 有限元仿真; 振动幅频特性; 弯曲变形

中图分类号: TG501; TH162

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1000-7008.2019.04.013

Milling Force Modeling and Optimization of Variable Reduction for Cone Ball End Milling Cutter

Liu Kuan, Sun Jianfei

Abstract: Radial cutting force and vibration have an essential influence on machining quality while machining aero-engine impeller. In order to reduce cutting vibration, a milling force model has been given based on finite element simulation and MATLAB numerical method in a certain machining condition. Besides, the structure of mill cutters has been optimized for achieving minimum vibration amplitude and minimum cutter bending deformation.

Keywords: cutting force model; finite element simulation; amplitude frequency characteristic of vibration; bending deformation

1 引言

发动机叶轮属于典型的难加工航空结构件, 其叶片通道狭窄、叶轮悬伸较长。利用锥柄球头铣刀可对叶轮的叶根等难加工区域进行切削加工, 并且能减小铣刀底部的直径, 从而避免与叶轮发生干涉。在发动机机匣叶轮铣削过程中, 铣削力带来的加工变形和振动对叶轮加工质量有着较大的影响^[1-5]。通过建立铣削力模型, 对铣削力进行分析, 可以对切削过程的振动频率进行较为直观地分析。之前已经有很多学者对此进行过研究^[6-10], 但关于锥球头铣刀的相关研究较少。

直接采用有限元仿真软件对整个铣刀的铣削力进行分析需要较长的计算时间, 并且容易出现错误^[11]; 而在少量有限元分析计算的基础上, 利用 MATLAB 软件进行运算模拟分析切削过程的受力情况可有效提高计算效率。

2 建立切削力模型

整个切削刃的切削力可通过对每个切削刃微元进行分析和积分得到。切削模型如图 1 所示, 在切削刃上取微元, ωr 为微元运动速度, 刃倾角 β 为铣

刀螺旋角, d 为切削层厚度。

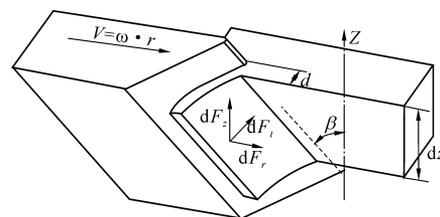


图 1 切削刃上微元受力

根据 Koenigsberger F. 等^[12]提出的切削力刚体力学模型, 切削力与切削层厚度存在一定比例关系, 将这一比例系数设为 K_s , 它与切削材料、切削参数的关系有如下参数矩阵

$$K_s = \begin{bmatrix} K_{st} & 0 & 0 \\ 0 & K_{sr} & 0 \\ 0 & 0 & K_{sz} \end{bmatrix} \quad (1)$$

切削力与切削参数之间的数学关系可表示为

$$\begin{bmatrix} dF_x \\ dF_y \\ dF_z \end{bmatrix} = K_s \begin{bmatrix} f_x(V, d, dz) \\ f_y(V, d, dz) \\ f_z(V, d, dz) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, d 为变量, 代表受力微元在刀齿上的位置。

如图 2 所示, 为了提高模型的普适性, 设定一个三齿全刀铣削模型, 刀齿以角速度 ω 进行旋转, 每转进给量为 s , 其值为各齿实际进给量 f_n 的和, 即

$$s = f_1 + f_2 + f_3 \quad (3)$$

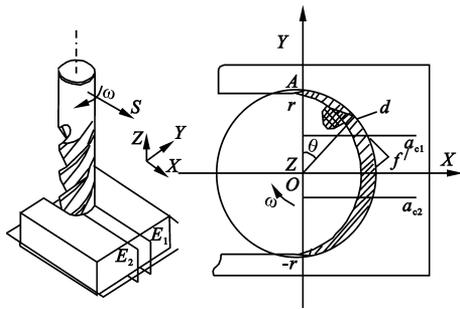


图2 铣刀旋转运动模型

对应的微元切削层厚度 d 为

$$d = \begin{cases} f' \sin\theta, \pi/2 - c < \theta < \pi/2 + c \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

$$c = \arctan\left(1 - \frac{f}{r(z)}\right)$$

式中, f' 为该齿对应的进给量 f_n 。

建立铣刀切削刃柱面展开三维坐标系 $OX'Y'Z'$, 图3中的原点 O 即对应图2中某切削刃末端处的点 A , 该切削刃的切削层部分见图3中虚线框内区域。

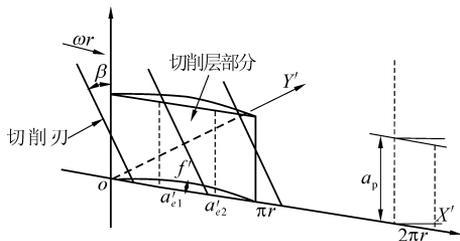


图3 切削刃及切屑层展开模型

设一个判定函数 $g(z)$, 判定在 t 时刻微元是否处于切削状态, 可表示为

$$z'_{\Delta} = -\tan\beta(x'_{\Delta} - \omega t) \quad (5)$$

$$g(z'_{\Delta}) = \begin{cases} 1 & (a'_{e1} < x'_{\Delta} < a'_{e2} \text{ 且 } 0 < z'_{\Delta} < a_p) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

综合式(4) - 式(6)得到该切削元上的切削层厚度 d 的表达式为

$$d = f_n \sin\left(-\frac{z'_{\Delta}}{r \tan\beta} + \omega t\right) g(z) \quad (7)$$

结合式(6)和式(7)可得微元的受力情况, 并进行积分可得 t 时刻某条切削刃的受力, 转化至机床坐标系中, 有

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \int_0^{a_p} \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_r(V, f_n \sin\theta g(z), dz) \\ f_t(V, f_n \sin\theta g(z), dz) \\ f_z(V, f_n \sin\theta g(z), dz) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\theta = -\frac{z}{r \tan\beta} + \omega t, 0 < t < \frac{2\pi}{\omega}$$

对于具有3个齿的铣刀, 第 N 个齿与第一个齿的时域关系数学表达式为

$$\begin{bmatrix} F_{X_n}(t) \\ F_{Y_n}(t) \\ F_{Z_n}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{X_n}(t + \sum_{i=1}^{N-1} \psi_i/\omega) \\ F_{Y_n}(t + \sum_{i=1}^{N-1} \psi_i/\omega) \\ F_{Z_n}(t + \sum_{i=1}^{N-1} \psi_i/\omega) \end{bmatrix} \quad (9)$$

3 TC4 铣削过程切削力建模

依照某发动机叶轮加工要求, 确定待优化的锥球头铣刀几何尺寸和工况, 如表1所示。

表1 锥球头铣刀几何尺寸及工况

球头直径 d (mm)	根部直径 D (mm)	刀长 L (mm)	锥度角 θ (°)
6	10	100	3
前角 γ (°)	第一后角 α (°)	螺旋角 β (°)	主轴转速 n (r/min)
10	10	45	4000
角速度 ω (rad/s)	进给量 f (mm/r)	切削宽度 a_e (mm)	切削深度 a_p (mm)
418.9	0.067	0.2	5

利用 AdvantEdge 有限元仿真软件, 采用三维切削仿真方式得到随进给量变化的三向切削力方程为

$$\begin{cases} F_x = 3698.8ds \\ F_y = -437540ds^3 + 16948ds^2 + 2559.4ds \\ F_z = -1289.8ds \end{cases} \quad (10)$$

式中, ds 为切削刃微元的厚度。

由于铣削力计算复杂度高, 微元和时间节点数量较大, 因此利用 MATLAB 软件辅助进行计算, 子程序流程见图4。将子程序得到的铣削力进行叠加就可以得到整个铣刀的切削力。

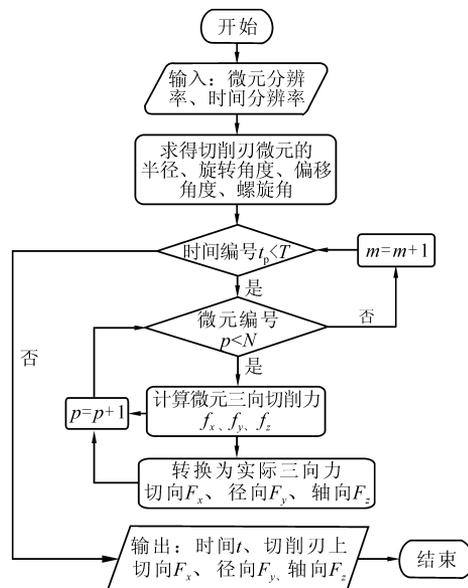


图4 铣削力计算流程

图5 是转动 2π 弧度内等齿距锥球头铣刀的铣削力随时间变化情况。

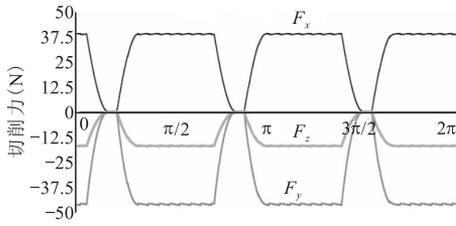


图5 等齿距铣刀周期内三向铣削力仿真

4 不等齿距减振铣刀优化

在叶轮加工过程中,由于轴向铣削力 F_y 的大小和振幅对叶轮的加工质量影响较大,因此后续主要针对 F_y 进行优化。

4.1 铣削力振动幅值优化

在切削过程中,切削系统由于力的作用处于振动状态,在阻尼特性恒定的情况下,切削力的幅频特性和系统的振动状态呈正相关。因此通过分析铣削力的振动幅频特性可以衡量切削系统的振动程度^[13]。

在信号分析中,一个周期性的信号 $f(t)$ 傅里叶变换可将时域信息转化为频域信息,而利用 MATLAB 软件中的快速傅里叶变换函数 FFT 可以将时域信息转换为频域信息处理。

如图6所示,对等齿间角和不等齿间角(齿间角 110° 、 120° 、 130°)两种铣刀的切削力频谱进行了对比分析。可以看出,等齿距铣刀切削力的频谱集中在 $3n\omega_0$ 上,而不等齿距铣刀铣削力频谱的幅值分布非常分散,谐波分力的幅值更多分散性地分布于高频振动。

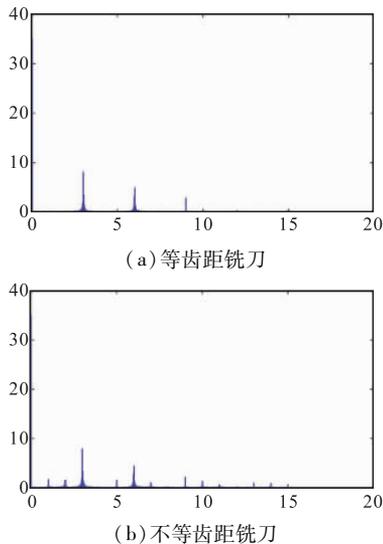


图6 两种铣刀切削力振动幅值

为了获得较低的切削力谐波分量,采取变化齿距的方式来分散振动能量。考虑到刀齿强度的需求和铣削刀结构平衡性,如图7所示,设定单个齿的最小齿间角为 105° ,最大齿间角为 135° ,备选的齿间角分布共计 240 组。利用 MATLAB 软件编制优化函数,目标函数为获得最小的 F_y 幅频特性均值。

利用 MATLAB 程序对其进行计算,切削力振动幅值优化结果为 112° 、 135° 、 113° ,振幅均值最小值为 0.0546N ,与等齿距铣刀相比,振动幅值均值减小了 8%。

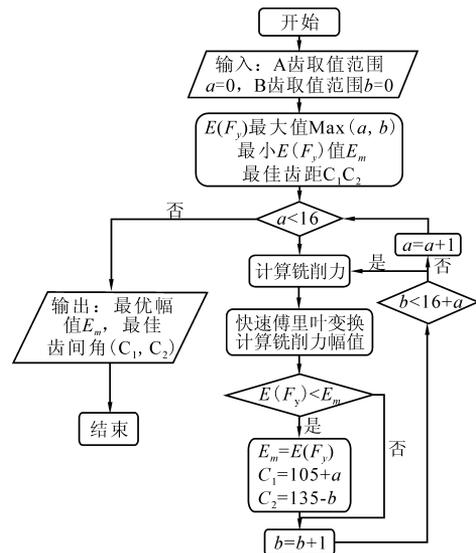


图7 铣刀齿间角 MATLAB 振动幅值优化函数

4.2 Y向铣削力弯曲变形分析

将机床一刀具系统近似看成一个悬臂梁,那么施加在刀具上的铣削力就会使悬臂梁发生弯曲变形^[14]。减小切削力、改变切削频率可以降低刀具—工件系统的振动变形。

简化后铣刀模型如图8所示。其中, l_0 为切削深度, Y 向铣削力在切深方向上近似呈均匀分布。

对于图中的铣刀悬臂梁,可以将其分为受力情况不同的三段,分段求和后再累加,从而得到最大弯曲变形的位移量为

$$\begin{cases} \omega_1(x) = -\frac{F(t)l^3}{3EI}, x \in (0, l_1) \\ \omega_2(x) = \iint \frac{F(t)(l-x)}{EI(x)} dx + C_2x + D_2, \\ x \in (l_1, l_1 + l_2 - l_0) \\ \omega_3(x) = \iint \frac{F(t)l(l-x)^2}{EI(x)} dx + C_3x + D_3, \\ x \in (l_1 + l_2 - l_0, l_1 + l_2) \end{cases} \quad (10)$$

其中的积分常数及截面矩为

$$C_2 = \theta_1 = -\frac{F(t)l^2}{2EI}, D_2 = \omega_1$$

$$C_3 = \theta_2 = - \int \frac{F(x)(l-x)}{EI(x)} dx + C_2, D_3 = \omega_2$$

$$I(x) = \frac{\pi}{64} d(x)^4 = \frac{\pi}{64} \left[(6 + 2 \tan 3^\circ) - 2 \tan 3^\circ x \right]^4 \quad (11)$$

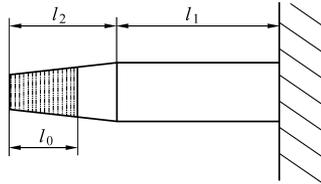


图8 悬臂梁受力运动简图

利用 MATLAB 软件编写程序,将式(10)编写为子程序,结合主程序。以 Y 向切削力弯曲变形为目标进行优化(见图9)。得到的齿间角结果为 109°、125°、126°,刀具的振动变形为 39μm。与等齿距铣刀相比,振动变形最大值减小了 11%,Y 向力峰值最小值为 -44.02N。

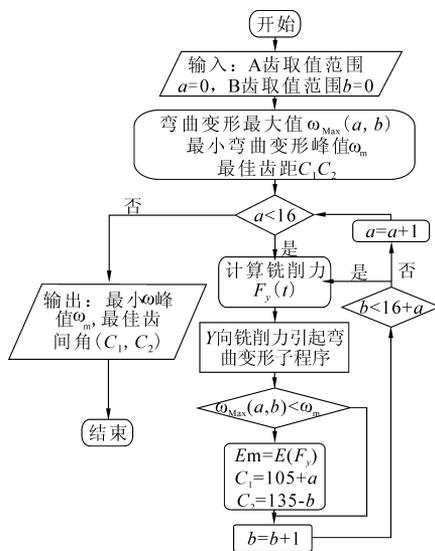


图9 Y向铣削力变形计算主程序

5 结语

本文以锥球头铣刀铣削力模型 MATLAB 建立为基础,结合 AdvantEdge 的切削仿真和 MATLAB 软件辅助数学计算,采用两种优化函数对于锥球头铣刀的齿间角进行了优化。

结果表明,变齿距铣刀具有降低振幅和减小切削力的效果。两种优化后齿间角分别为 112°、135°、113°和 109°、125°、126°,对应的振幅均值和最大弯曲变形分别减小了 8% 和 11%。

参考文献

[1]周瑞. 高速铣削过程中薄壁板零件颤振问题的研究[D].

北京:北京工业大学,2013.

[2]翟洁. 薄壁件铣削振动的预测控制研究[D]. 武汉:华中科技大学,2014.

[3]朱红波. 基于切削参数与刀具磨损的铣削振动影响因素研究[J]. 机械研究与应用,2015,28(4):57-59.

[4]Kolluru K, Axinte D, Becker A. A solution for minimising vibrations in milling of thin walled casings by applying dampers to workpiece surface [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2013, 62(1):415-418.

[5]Wang T, He Ning, Li Liang. Vibration model in milling of thin-walled components [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(8):22-25.

[6]Altintas Y. Manufacturing automation; metal cutting mechanics, machine tool vibrations and CNC design [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.

[7]Geng L, Liu P L, Liu K. Optimization of cutter posture based on cutting force prediction for five-axis machining with ball-end cutters [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 78(5-8):1289-1303.

[8]Peng C, Wang L, Liao T W. A new method for the prediction of chatter stability lobes based on dynamic cutting force simulation model and support vector machine [J]. Journal of Sound & Vibration, 2015, 354:118-131.

[9]杨毅青, 徐东东. 铣削力建模技术研究及实验对比 [J]. 中国科技论文, 2015, 10(4):391-393, 398.

[10]张学中. 数控铣削过程铣削力建模及仿真系统研发 [D]. 天津:河北工业大学, 2011.

[11]丁志纯, 孙剑飞, 陈五一. 基于结构特性的玉米铣刀切削仿真 [J]. 工具技术, 2015, 49(12):28-30.

[12]Koenigsberger F, Sabberwal A J P. An investigation into the cutting force pulsations during milling operations [J]. International Journal of Machine Tool Design & Research, 1961, 1(1):15-33.

[13]江浩. 铣削加工振动主动控制 [D]. 上海:上海交通大学, 2009.

[14]倪其民, 李从心, 吴光琳, 等. 考虑刀具变形的球头铣刀铣削力建模与仿真 [J]. 机械工程学报, 2002, 38(3):108-112.

第一作者:刘宽, 硕士研究生, 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 100191 北京市

First Author: Liu Kuan, Postgraduate, School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China

通信作者:孙剑飞, 讲师, 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 100191 北京市

Corresponding Author: Sun Jianfei, Lecturer, School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China