

整体叶轮侧铣数控加工刀位轨迹生成新方法*

孙春华, 陈皓晖, 刘华明

(哈尔滨工业大学 机械工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 为提高整体叶轮的加工质量和效率, 提出了分段侧铣的方法。在每一段曲面上, 基于斜等距曲面的原理, 推导出叶片分段侧铣加工时刀位轨迹的生成和计算; 并用计算机仿真和刀心轨迹图对刀位进行了验证。结果表明, 采用分段侧铣的方法, 生成的刀位轨迹刀轴矢量变化均匀, 刀轴未发生干涉, 且加工效率和加工质量明显得到提高。

关键词: 叶轮; 数控加工; 铣削; 超精加工; 刀位轨迹

中图分类号: TH162.1 V232 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055(2000)05-0086-03

Algorithm for NC cutter path generation during cylindrical milling integrated impeller

SUN Chun-hua, CHEN Hao-hui, LIU Hua-ming

(Dept. of Mechanical Engineering, Harbin Inst. of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The cylindrical milling method of divided area was proposed to improve the quality and efficiency of integrated impeller. Based on the principle of inclined offset surface, the calculation and generation of NC cutter location for small divided area of blade were introduced. In addition the computer simulation and the path chart of cutter center were given to prove the tool path. The result shows that the change of cutter axis vector is distributed very well, and no interference occurs between the cutter and the impeller. Further more the efficiency and the quality of machined surface were improved.

Key words: Impeller; Numerically controlled machining; Milling machining; Superprecision processing; Cutter path

1 引言

叶轮作为航空、航天的关键部件, 其质量直接影响其空气动力性能和机械效率。若采用球头铣刀进行点切削, 不仅加工效率低, 而且加工表面的一致性差, 表面硬化严重。若采用数控侧铣的方法不仅可以提高加工质量, 而且可以提高加工效率。因此, 叶轮的数控侧铣加工一直是研究的焦点^[1-3]。侧铣加工时, 如果铣刀一次走刀形成叶片曲面, 则工艺性最好。如果一次走刀产生的曲面不符合加工要求, 可分片进行, 用多块曲面拼出所需要的曲面。每个曲面片可近似用直纹面来表示, 刀轴运动曲面即是该直纹面的斜等距曲面^[4]。运用斜等距曲面的基本原理, 可快速地计算出刀位轨迹。

整体叶轮是指轮毂和叶片在同一毛坯体上。加工整体叶轮的工艺过程为: (1) 在锻压件毛坯体上

车削加工出回转体的基本形状; (2) 气流通道的开槽加工; (3) 气流通道的扩槽加工; (4) 叶片的精加工。其中叶片精加工不仅关系到叶片的加工质量, 从而影响叶轮的力学性能, 而且该工序刀具轨迹的生成与刀位计算是扩槽加工与开槽加工刀具轨迹生成的基础。因此, 本文着重讨论叶片精加工时刀位轨迹生成。

2 叶片精加工刀位轨迹生成

2.1 刀位计算

叶片精加工刀具多采用球形锥柄棒铣刀, 标识球形锥柄棒铣刀刀位点的坐标值为 $P_o(x_o, y_o, z_o)$ 和 $T_o(t_x, t_y, t_z)$ 。 $P_o(x_o, y_o, z_o)$ 为球形锥柄棒铣刀的球心坐标, $T_o(t_x, t_y, t_z)$ 为刀轴矢量。

为保证叶片曲面在分片后型线的一致, 将各型线分成几段, 连接相同段端点作为曲面片的边界线。

* 收稿日期: 1999-10-08; 修订日期: 2000-02-04。基金项目: 原航天总公司重点攻关项目。

作者简介: 孙春华 (1966—), 女, 博士生。研究领域为复杂曲面数控加工理论、机械制造 CAD/CAM。

采用直纹面来拟合各曲面片，则刀具刀轴的运动曲面即为该直纹面的斜等距曲面。

如图 1 所示，设被加工叶轮叶根线的方程和叶顶线的方程分别为

$$\rho_1(u) = \{x_1(u) y_1(u) z_1(u)\}$$

$$\rho_2(u) = \{x_2(u) y_2(u) z_2(u)\}$$

使 $\rho_2(u) = \rho_2(u) + K^* (\rho_2(u) - \rho_1(u))$
 $0 < K \leq 1$

由曲线 $\rho_1(u)$ 和 $\rho_2(u)$ 构成的直纹面方程为

$$r(u, h) = \rho_1(u) + h\tau(u) \quad (1)$$

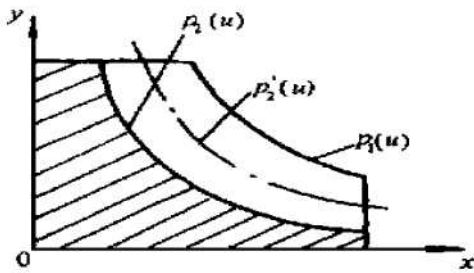


Fig. 1 Chart for method of divided area

式 (1) 中 $\tau(u)$ 为曲面片型线的单位矢量

$$\tau(u) = \frac{\rho_2(u) - \rho_1(u)}{|\rho_2(u) - \rho_1(u)|}$$

显然曲面片上任一点法线单位矢量 $n(u, h)$ 为

$$n(u, h) = r_u \times r_h / |r_u \times r_h| = \{n_x n_y n_z\} \quad (2)$$

刀轴运动曲面与直纹面的法向距离满足下列的线性关系: $r = h \tan \alpha + r_0$ 。 α 为球形锥柄棒铣刀的半锥角。 r_0 为 $h = 0$ 时两曲面之间的距离，即刀具球头半径。于是刀具运动曲面方程为

$$r^*(u, h) = \rho_1(u) + h\tau(u) + (h \tan \alpha + r_0)n(u, h) \quad (3)$$

经推导，求得铣刀刀心坐标 $P_o(x_o, y_o, z_o)$ 和刀轴矢量 $T_o(t_x, t_y, t_z)$ 为

$$\left. \begin{aligned} x_o &= \rho_1(u) + r_o \cdot n_x \\ y_o &= \rho_1(u) + r_o \cdot n_y \\ z_o &= \rho_1(u) + r_o \cdot n_z \\ t_x &= |x_i - x_o| / L \\ t_y &= |y_i - y_o| / L \\ t_z &= |z_i - z_o| / L \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$L = \sqrt{(x_i - x_o)^2 + (y_i - y_o)^2 + (z_i - z_o)^2}$$

$P_i(x_i, y_i, z_i)$ 为刀轴上任意点的坐标，取 h 为某定值，由联立方程组可求出刀轴上任意点 P_i 。系数 K 可根据刀具锥面所包络出的加工表面与理想加工曲

面之间存在的加工误差是否超过给定的误差值来确定。

2.2 步长的选择

当用球形锥柄棒铣刀的侧刃沿加工表面上某一曲线作直线插补运动时，加工误差包括直线逼近误差和法矢转动误差两部分。如图 2 所示，设 k_f 为加工表面在插补段内沿进给方向的法曲率， θ 为插补段内加工表面法矢沿插补直线方向的转动角， l_s 为弧长， L 为逼近直线长度，可近似用 L 来代替 l 。 ϵ_1 为直线逼近误差， ϵ_2 为法矢转动误差。由图 2 所示的几何关系得

$$\epsilon_1 = \frac{l}{2\cos(\theta/4)} \sin(\theta/4) \leq \frac{1}{8} l\theta \approx \frac{1}{8} k_f L^2 \quad (5)$$

$$\epsilon_2 = 2R \sin^2(\theta/4) \leq \frac{1}{8} R\theta^2 \approx \frac{1}{8} R k_f^2 L^2 \quad (6)$$

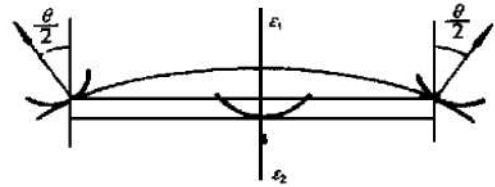


Fig. 2 Error analysis between tool paths

当 $k_f < 0$ 时，加工表面沿走刀方向为凸曲线，刀触点轨迹为凹曲线，加工误差较大，为直线逼近误差与法矢转动误差绝对值之和。为此，可通过修正刀心坐标的法矢转动误差 ϵ_2 进行补偿。将刀触点沿加工表面外法矢平移 $\epsilon_2/2$ ，改变加工误差的分布，达到补偿加工误差的目的。

当消除了法矢转动误差后，插补段内加工误差只剩余直线逼近误差了。对任一指定的逼近误差极限 δ ，式 (5) 满足 $|\epsilon_1| < \delta$ ，因此走刀步长可用下式进行估算

$$L < 2 \sqrt{2\delta / |k_f|} \quad (7)$$

当 $k_f > 0$ 时，加工表面沿走刀方向为凹曲线，刀触点轨迹亦为凹曲线，由于法矢转动误差 $|\epsilon_2|$ 小于直线逼近误差 $|\epsilon_1|$ ，因此不会发生超差，也无需进行加工误差的补偿。

3 刀位验证

如图 3 所示是采用上述算法得到的精加工某风扇叶轮叶片时的刀心轨迹图及计算机仿真图。采用的球形锥柄棒铣刀刀头半径为 $r = 3.5 \text{ mm}$ ，刀具半锥度角 $\alpha = 3.5^\circ$ 。所选取的系数 $K = 0.2$ ，整个叶片分成五个曲面片进行加工，每片切削宽度约为 10 mm 。

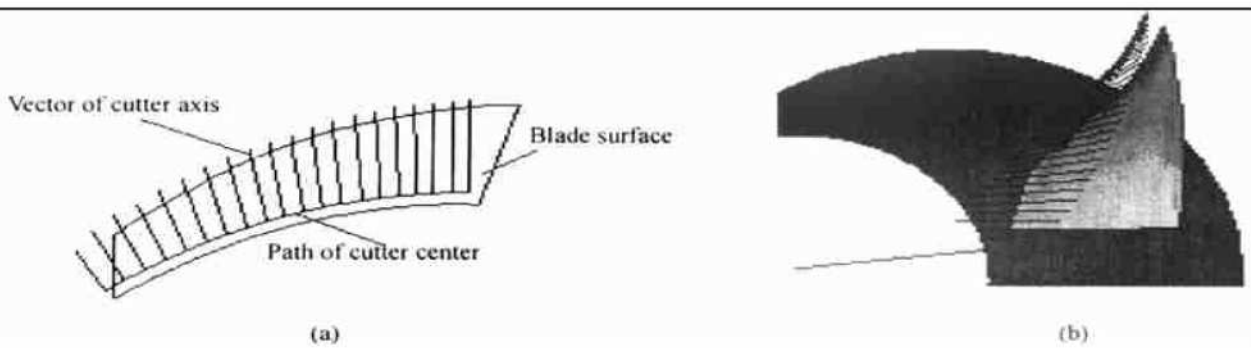


Fig. 3 Computer simulation

(a) Verification for vector of cutter axis

(b) Computer simulation for tool path

由图 3 (a) 可以看出各刀位点之间的刀轴矢量变化非常均匀; 由图 3 (b) 的计算机仿真可以看出在整个加工过程中, 刀具与被加工表面之间未发生干涉与碰撞。而采用点铣方式加工同一叶片, 走刀步长仅为 0.3 mm, 加工表面有严重的刀具挤压痕迹, 且刀具球头部分的磨损非常快。

4 结论

(1) 本文提出了将被加工曲面分片, 用分段侧铣代替点铣的方法。采用该方法加工, 提高了整体叶轮的加工效率和质量;

(2) 本文基于斜等距曲面理论推导出球形锥柄棒铣刀刀位点的计算方法; 并对走刀步长的控制进

行了分析。结果表明, 本算法是一种快速有效、可靠的刀位轨迹生成方法。

参 考 文 献

- [1] 刘雄伟, 张定华. 数控加工理论与编程技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [2] 三宅庆明, 平田孝一. 离心压缩机叶轮的三元加工 [J]. 风机技术, 1985 (6): 33~40.
- [3] 赵 鸿, 袁哲俊, 卢泽生. TC₆ 钛合金整体叶轮数控铣削工艺研究 [J]. 推进技术, 2000, 21 (3).
- [4] 唐余勇. 机械工程中常用的几何模型 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1989.

(责任编辑: 史亚红)

简 讯

2000 年全国 SRM 设计技术学术交流会在银川召开

由中国航天科技集团陕西动力机械研究所和中国宇航学会固体火箭推进专业委员会联合主办, “2000 年全国 SRM 设计技术学术交流会” 于 2000 年 8 月 12 日至 14 日在宁夏回族自治区银川市召开。19 个单位共 85 名代表出席了会议。会议共发表论文 57 篇, 内容涉及固体发动机总体、壳体、装药、安全点火装置、贮存寿命、可靠性设计及试验技术等。经评审组评审, 评选出优秀论文 10 篇。

会议就所发表的论文和今后的发展方向进行了热烈的讨论, 认为大部分论文既注重理论分析, 又突出了理论与实际的结合, 在工程应用中具有较高的使用价值, 水平较高。会议学术气氛浓厚, 并促进了设计单位、使用单位、教学与科研单位之间的相互了解, 对促进固体火箭发动机设计技术的发展起到了积极作用。

(文式玲 供稿)