

曲面高速精加工刀具规划的研究^{*}

□ 周纯江

摘要: 分析了曲面高速加工对刀具轨迹的要求,提出了等残留高度法生成曲面高速精加工刀具轨迹的基本原理。

通过微分几何理论计算短程线曲率半径,提出了残留高度刀具轨迹生成算法。

关键词: 高速加工 短程线 残留高度

中图分类号: TH161⁺.1;TG506.1

文献标识码: B

文章编号: 1000-4998(2006)06-0057-02

高速切削加工(High Speed Machining, HSM)在航空航天、汽车工业和仪器仪表等行业得到了广泛的应用。在自由曲面高速铣削加工的刀具切削路径的规划上提出了更高的要求。如何合理规划曲面高速铣削刀具路径是近年来研究较多的一个问题。

1 刀具路径规划的基本要求

在曲面高速加工中,由于进给速度和加工速度很快,故刀具轨迹必须能够满足相应的特殊要求。高速加工对刀具轨迹要求有以下几个方面:①最少的刀具更换次数;②恒定的材料切除率和良好的切削负载管理;③平滑的进退刀,保持刀具轨迹的平稳,避免突然加速或减速;④全程自动防过切处理能力及刀柄干涉检查;⑤基于毛坯余量知识的再加工;⑥提供多种切削方式,以实现切削过程的优化,易于生成光顺的刀具轨迹。

在曲面高速铣削的精加工阶段,为了达到良好的加工精度和表面质量,恒定的材料切除率和良好的切削负载管理是极其重要的,基于等残留高度的刀具轨迹生成是解决曲面高速铣削精加工问题的有效方法。

2 基于等残留高度的刀具路径规划

(1)等残留高度方法的基本概念 在自由曲面的多坐标数控高速加工中,刀具轨迹的优劣将直接影响其加工精度和加工效率。传统的曲面数控加工刀具轨迹的生成方法有多种,比较常用的有等参数法、截平面法、投影法等,近年提出了基于 Iso-photo 方法和空间填充线法^[1,2]。在等参数加工方式中,为了达到指定的加工精度要求,刀触点轨迹的分布是按照最小步距决定的,这样相邻的刀具轨迹有大量的重复走刀,切削载荷也不稳定;截平面法的步距一般都是等距的,往往根据所允许的最大残留高度来确定步距,对于曲率变化较大的曲面,加工效率较低,载荷也不稳定^[3]。根据高速加工对刀具轨迹的要求,在高速精加工中,如果要保

持恒定的材料切除和良好的切削负载管理,就要建立真正的基于等残留高度的刀具轨迹生成方法。等残留高度法是通过控制相邻轨迹间的距离使得轨迹间的残留高度不变,不管曲面的曲率怎么变化,切削后的残留高度是相等的,并且能够保证刀具载荷的恒定,特别是加工区域从垂直区域转到水平区域,或者相反。从而在已知一条刀具轨迹的前提下计算下一条刀具轨迹。

步距 d 即两条刀具轨迹(指刀具与加工表面的接触点轨迹)之间的线间距,与残留高度(Scallop height) h 、刀具有效切削半径 R 和曲面沿行距方向的法曲率半径 R^* 密切相关。其数学表达式为:

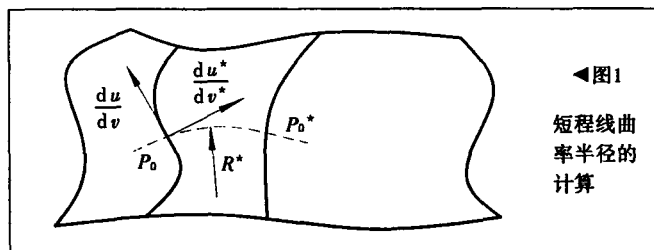
$$d = \frac{\sqrt{4(R+R^*)^2(h+R^*)^2 - [R^{*2} + 2RR^* + (h+R^*)^2]^2}}{|R^* + h|} \quad (1)$$

要保持残留高度值不变,则两切削行的步距就应该根据曲面在步距方向的法曲率半径来确定。实际上过曲面的给定点且垂直于已知刀具轨迹的曲线有无数条,相对于已知刀具轨迹,所求另一条刀具轨迹应该是在该点处与已知轨迹距离最短的曲线上。根据微分几何理论,该连接曲面上两个已知点的距离最短的曲线即为短程线。因此为求出等残留高度的另一条刀具轨迹,应该先求出短程线的曲率半径。

(2)短程线曲率半径计算 设被加工曲面方程为:

$$S(u, v) = \{x(u, v), y(u, v), z(u, v)\} \quad (2)$$

其上一条已知刀具轨迹为 $P(u(t), v(t))$, 如图1, 根据短程线的几何性质可知,曲面上在给定点处的短程线的主法矢方向是沿着曲面在该点处的法矢方向,



◀图1

短程线曲率半径的计算

^{*} 浙江省教育厅科研计划项目(编号:20050453)

于是可以根据曲面的第一和第二基本公式计算出短程线曲率半径

$$R^* = |\varphi_1 / \varphi_2| \quad (3)$$

根据计算可得:

$$R^* = \left| \frac{E + 2F\alpha + G\alpha^2}{L + 2M\alpha + N\alpha^2} \right| \quad (4)$$

其中: E 、 F 、 G 为第一类基本量, L 、 M 、 N 为第二类基本量。

$$\alpha = (F \frac{du}{dt} + G \frac{dv}{dt}) / (E \frac{du}{dt} + F \frac{dv}{dt}) \quad (5)$$

(3) 等残留高度相邻刀具轨迹线计算 设已知一条刀具轨迹 $P(u(t), v(t))$ (可以是曲面的一条边界曲线), 为求得等残留高度的相邻刀具轨迹线先给出下列定义:

对应刀位点: 在刀具轨迹线 $P(u(t), v(t))$ 上的已知刀位点为 $P_0(u(t_0), v(t_0))$, 与 P_0 对应的刀位点 P_0^* 是指曲面上过 P_0 且垂直 $P(u(t), v(t))$ 的短程线上距离为 d 的点。

相邻轨迹线: 连接刀具轨迹线 $P(u(t), v(t))$ 上的所有刀位点的对应刀位点的连续曲线。下面推导对应刀位点的计算公式。

与 P_0 距离为 d 的对应刀位点 P_0^* 必须满足下列条件:

$$\begin{cases} (P^* - P_0) \left(P_{0u} \frac{du}{dt} + P_{0v} \frac{dv}{dt} \right) = 0 \\ \| P_0^* - P_0 \| = d \end{cases} \quad (6)$$

求解上述方程、可得参数增量:

$$\Delta u = \frac{\pm d \left(F \frac{du}{dt} + G \frac{dv}{dt} \right)}{\sqrt{EG - F^2} \sqrt{E \left(\frac{du}{dt} \right)^2 + 2F \frac{du}{dt} \frac{dv}{dt} + G \left(\frac{dv}{dt} \right)^2}} \quad (7)$$

$$\Delta v = \frac{\pm d \left(E \frac{du}{dt} + F \frac{dv}{dt} \right)}{\sqrt{EG - F^2} \sqrt{E \left(\frac{du}{dt} \right)^2 + 2F \frac{du}{dt} \frac{dv}{dt} + G \left(\frac{dv}{dt} \right)^2}} \quad (8)$$

连接各对应刀位点可求出与刀位轨迹线 $P(u(t), v(t))$ 相邻且残留高度为常数的另外一轨迹线为:

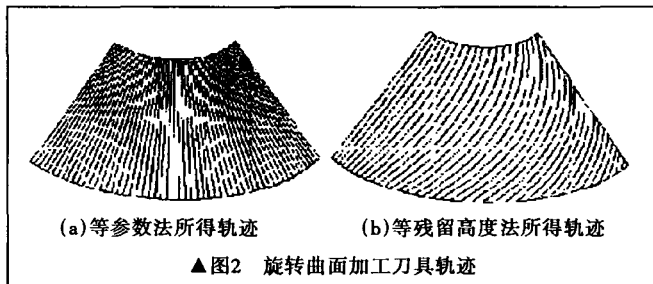
$$P^*(t) = P[u(t) + \Delta u(t), v(t) + \Delta v(t)] \quad (9)$$

根据上述讨论, 可得到残留高度刀具轨迹生成算法为:

① 给定一条刀触点轨迹, 按走刀步长离散, 得到对应的 $u-v$ 曲线的离散点列;

② 按式(7)、(8)计算原始刀具轨迹线上等残留高度的对应刀位点的参数增量 Δu 、 Δv , 得到对应刀位点的 u 、 v 参数值 $u + \Delta u$, $v + \Delta v$;

③ 用三次样条拟合 u 、 v 参数域中的这些点, 并将该样条延伸或修剪至参数域的边界, 得到对应刀触点



的 $u-v$ 曲线;

④ 将该 $u-v$ 曲线映射到参数曲面上, 即为对应刀位点的轨迹;

⑤ 以对应刀位点轨迹作为新的刀触点轨迹, 重复①、②、③、④步骤, 得到新的刀触点轨迹, 如此循环, 即可得到加工曲面的等残留高度刀触点轨迹。

3 加工状态分析

等残留高度法比其他刀具轨迹生成法具有更好的加工稳定性和更高的加工效率。以旋转曲面加工为例, 本例采用半径为 5 mm 的球头刀进行加工, 残留高度限制在 0.1 mm 范围内, 预设刀轴倾角为 10° , 按等参数法和等残留高度法规划刀触点轨迹, 生成轨迹如图 2 所示。统计两种方法所生成的刀触点轨迹总长度, 对两种加工方法的加工效率作了比较。实践证明, 等残留高度法可获得高效的数控加工刀具轨迹, 并具有较好的加工质量。

参考文献

- 1 武斌功. 高速切削与常规切削数控编程方法的对比分析[J]. 新技术新工艺, 2003, (2)
- 2 孙全平等. 高速铣削刀轨优化技术的研究[J]. 机械科学与技术, 2004, (8)
- 3 艾兴等. 高速切削加工技术[M]. 国防工业出版社, 2003
- 4 任秉银, 唐余勇编著. 数控加工中的几何建模理论及其应用[M]. 哈尔滨工业大学出版社, 1999
- 5 刘雄伟编著. 数控加工理论与编程技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000
- 6 王知行, 王哲. 一种新的数控加工刀具轨迹生成算法的研究[J]. 机械设计, 2000, (11)
- 7 Elber G, Cohen E. Tool-path Generation for Free-form Surface Models[J]. Computer-aid Design, 1994, 26(6): 490 ~ 496

△

(编辑 方也)

作者单位: 浙江机电职业技术学院

邮政编码: 杭州·310053

收稿日期: 2006年1月

