

对于 2D 端铣中恒定切削进给的刀具路径修正研究

Tool Path Modification for Constant Cutting Engagement in 2D End Milling

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 于洋 魏生民 刘平
南昌航空大学航空与机械工程学院 敖志强



于洋

西北工业大学飞行器制造工程专业博士研究生,主要从事 CAD/CAM 和数控加工仿真研究。

对于 2D 轮廓加工,除了调整刀具进给率,在调节切削角度和切削力上,刀具路径修正方法^[1]已经成为一种颇具吸引力的方法,并且很可靠。要使得整个加工过程中保持进给率的恒定,即使在没有高性能的机床伺服器调节进给切削角度和切削力^[2],也可以通过刀具路径修正的方法来实现。在 2D 加工中,对工字形简单二维轮廓直接采用通用等距算法^[3-5]

本课题提出了一种新的刀具路径的生成方法,其目的是在精加工阶段使得刀具以所需要的恒定进给角度进行加工。通过应用此方法,在精加工阶段的切削力可以维持在 1 个恒定的水平,这样就自然改善了曲面的加工质量。

外(内)偏置一个刀具半径得到凸台(凹槽)加工刀轨,加工出凸台和凹槽的轮廓形状。但是,由于这种加工方法所生成的刀具路径已经不是所期待的工件轮廓线,不适用于型腔内壁的由里向外的加工。Stori 和 Wright 首先提出前向刀具路径修正方法^[6]。本课题提出对这个算法的修正算法,以便它可以应用于任意几何的刀路,并在试验中验证此算法。

Stori 和 Wright 算法

1 传统前向刀具路径修正算法

为了保持一个恒定的切削进给,对凸包几何体的稳定切削过程,Stori 和 Wright 提出了一个著名的方法^[3]来修正刀具路径。这个方法在 2D 轮廓加工中产生恒定的修正刀路。

给定一条初始的平面曲线,这条曲线表示了即将要加工的曲面轮廓。由一系列点 $P(i) \in R^2 (i=1, \dots, N_p)$ 表示。这个算法的主要目的是产生 1 个新的偏置加工曲面轮廓和一系列刀具中心位置,以便可以在整个加工时间内保持一个恒定的进给。图 1 是 Stori 和 Wright 提出的刀具路径修正算法的简化示意图。假定在给定点上已知下列变量: $P(i), P(i+1)$ ——当前刀具和工件曲面的相交点以及紧接着的下个相交点; $Q(i) \in R^2 (i=1, \dots, N_q)$ ——刀具和最新加工过的工件曲面的相交点。

给定刀具半径 r 和所需要的切削角度可以调节 α_{cm}^* 得到。新的偏置曲面点 $Q(i+1) \in R^2 (i=1, \dots, N_q)$

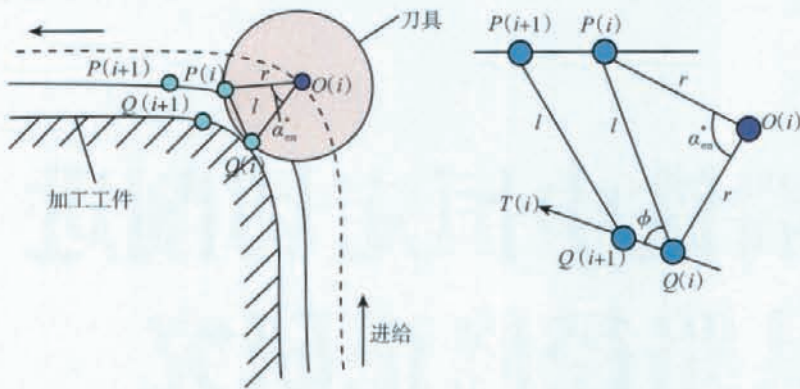


图1 刀具路径修正算法的简化示意图

和修正过的刀具中心位置 $O(i+1) \in R^2 (i=1, \dots, N_o)$, 具体算法如下。

(1) 通过下列方程计算新的偏置曲面点 $Q(i+1)$ 。

$$Q(i+1) = Q(i) + \lambda T(i), \quad (1)$$

以便

$$\|Q(i) + \lambda T(i) - P(i+1)\| = l, \quad (2)$$

其中, l 是腰长为 r 且两腰夹角为切削角度 α_m^* 的底长, 即 $l = \sqrt{2r^2(1 - \cos \alpha_m^*)}$, 并且 $T(i) \in R^2$, 是新偏置曲面的单位切矢量, 如图 1 所示。

(2) 通过以下方程计算在新偏置曲面的单位切矢量。

$$T(i+1) = \frac{P(i+1) - Q(i+1)}{\|P(i+1) - Q(i+1)\|}$$

$$\begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中, ϕ 是单位切矢量的倾斜角; $T(i)$ 是矢量 $P(i+1) - Q(i+1)$ 。

(3) 通过以下方程计算刀具中心位置 $O(i+1)$ 。

$$O(i+1) = Q(i+1) + r \cdot T(i+1)$$

$$\begin{bmatrix} \cos \frac{\pi}{2} & -\sin \frac{\pi}{2} \\ \sin \frac{\pi}{2} & \cos \frac{\pi}{2} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

(4) 设 $i=i+1$, 并且重复步骤 (1) - (4), 直到刀具走完完整条加工路径。

值得注意的是, 由上面算法生成的刀具中心位置仅可以应用于由 $P(i)$ 定义成的凸包几何曲面。当应用

于非凸几何曲面则是不可行的。在实际中, 特别是模具加工中, 经常有复杂的集合体和几乎不能满足的凸包条件, 所以此算法必须通过改进才可以应用于实际加工中。

2 前向刀路修正算法

本课题组根据 Stori 和 Wright 所提出的 2D 轮廓加工算法, 提出了一种新的方法来生成一种恒定进给率的刀具路径, 以便这种算法可以应用于包括凸状和凹状的任意类型的几何刀路^[7]。基本算法如图 2 所示。

不同于 Stori 和 Wright 给出的算法, 提出的前向刀路修正算法不能在数学上保证收敛于一个优化的结果。然而, 该算法最大的一个优点是它可以应用到任意 2D 几何轮廓, 不

像 Stori 和 Wright 的算法, 仅限于凸几何。

对于恒定切削进给的后向刀具路径修正算法

目前, 本课题组又提出了一种新的方法来生成一种恒定进给率的刀具路径, 以便这种算法可以应用于包括凸状和凹状的任意类型的几何刀路。

用 1 条初始的平面曲线来表示需要加工零件的几何轮廓, 并且提供 1 条原始的轮廓偏置曲线, 这条曲线就是需要的精加工刀具路径, 可以从 NC 代码中提取。这个算法的主要目的就是计算相对精加工路径的前 1 条完整的刀具路径, 称其为半精加工路径。对半精加工路径进行修正, 使得刀具在最后的精加工路径中可以以恒定的速率进行加工, 并且取得恒定的切削量。此研究关注的是由直柄平头端铣刀进行的 2D 轮廓加工, 并且只考虑刀具和工件之间的干涉。

这里所提到的“刀具路径修正”可以做如下理解, 就是对于给定的最后的精加工路径, 通过修正使得刀具以所需要的恒定的切削角度来进行加工, 并且本课题所提出的算法目的是对半精加工刀路进行修正, 也就是

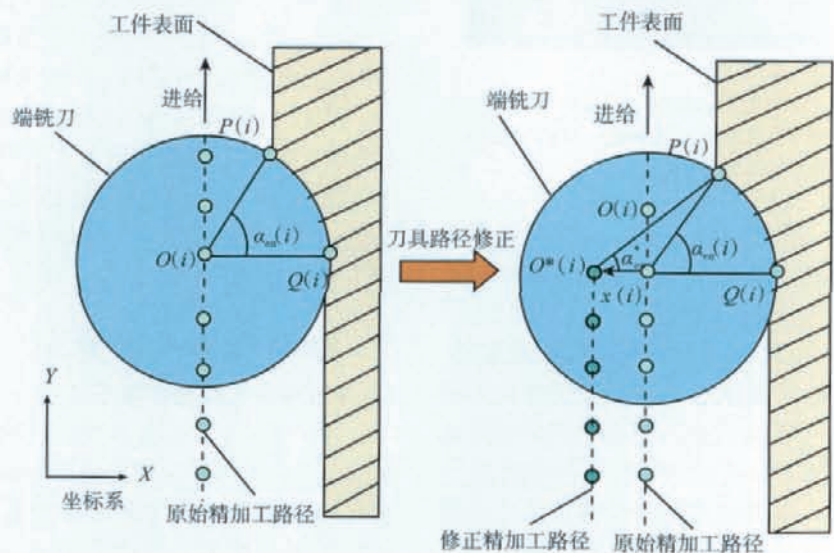


图2 前向刀路修正算法示意图

修正刀具圆周和半精加工曲面 $P_k(i)$ 的交点位置,从而得到一个新的位置 $P_k^*(i)$ 。用这种方法使得切削进给角度从 $\alpha_{en}^*(i)$ 调节到所需要的 $\alpha_{en}^*(i)$ 。半精加工路径 $P_k(i)$ 的修正可以通过对 $O_{k-1}(i)$ 的修正做到。新的半精加工路径 $O_{k-1}^*(i)$ 可以通过简单的偏置 $P_k^*(i)$ 给出。 $O_{k-1}^*(i)$ 的详细算法可以按照如下步骤进行计算。

(1) 假设在精加工中,刀具中心的轨迹为 $Q(i) \in R^2 (i=1, \dots, N_k)$ 。这条轨迹也就是被加工零件的轮廓按照刀具半径所偏置的 1 条曲线,如图 3 所示。进给角度 $\alpha_{en}(i) \in R^2 (i=1, \dots, N_Q)$ 可以由刀具中心位置 $O_k(i)$, 刀具与新加工的曲面接触点 $Q_k(i) \in R^2 (i=1, \dots, N_k)$, 刀具与半精加工曲面上的点 $P_k(i) \in R^2 (i=1, \dots, N_k)$, 这 3 个点所组成。半精加工曲面 $P_k(i)$ 的生成先于精加工,其加工路径为 $Q_{k-1}(i) \in R^2 (i=1, \dots, N_{k-1})$ 。

(2) 对于在精加工中给定的刀具中心位置 $Q_{k-1}(i) \in R^2 (i=1, \dots, N_{k-1})$, 可以将 $Q_k(i)$ 向工件加工区域偏置 1 个刀具半径 r , 从而计算出刀具圆周和新加工的零件曲面的交点。

这个操作可以表示为

$$Q_k(i) = \text{offset}(Q_k(i), +r) \quad (i=1, \dots, N_k), \quad (5)$$

其中,函数 $\text{offset}(Q(i), x)$ 表示了通过平行偏执轨迹 $Q(i)$ 1 个 x 的距离所生成的轨迹。

(3) 计算出所需要的相交点 $P_k^*(i)$, 即半精加工面和刀具周围的相交点。此计算是为了使得进给角度 $\alpha_{en}(i)$ 满足需要的精加工角度 $\alpha_{en}^*(i)$, 即寻找 $P_k^*(i)$, 使得 $\angle P_k^*(i) \cdot O_k(i) \cdot O_k(i) = \alpha_{en}^*(i)$, 并且 $\|P_k^*(i) - O_k(i)\| = r (i=1, \dots, N_k)$ 。其中,“ \angle ”表示了由点构成的角度。 $P_k^*(i)$ 定义了修正过的半精加工路径,如图 3 所示。

(4) 使 $i=i+1$, 并且重复步骤(3)和(4),直到 $i=N_k$ 。

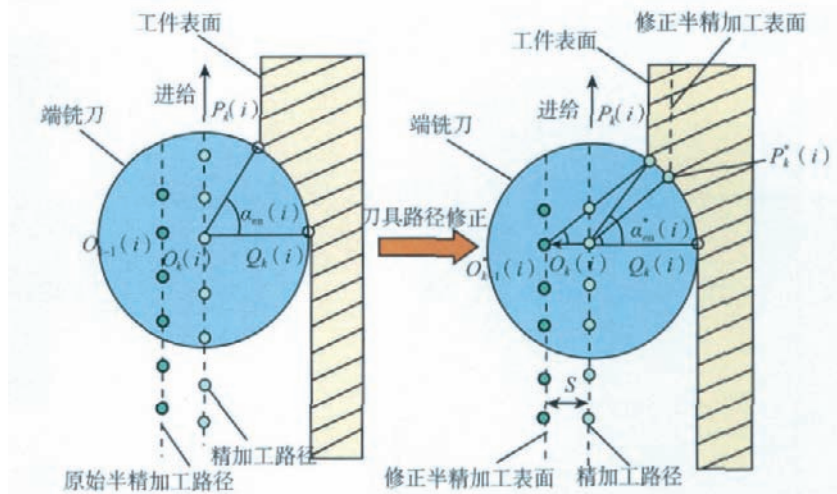


图3 调整切削进给角度的算法示意图

(5) 通过偏置半径加工区面轨迹 $P_k^*(i)$ 1 个刀具半径 r , 计算出半精加工的修正刀具中心轨迹: $O_{k-1}^*(i) \in R^2 (i=1, \dots, N_{k-1})$ 。这样

$$O_{k-1}^*(i) = \text{offset}(P_k^*(i), -r) \quad (i=1, \dots, N_{k-1}). \quad (6)$$

对于给定的刀具和工件,当计算出了所需要的进给角度 $\alpha_{en}^*(i)$ 后, 就可以使得刀具在精加工阶段始终维持一个恒定的切削力。

反向刀具路径修正的应用实例

1 仿真试验

通过具体的试验来验证后向刀具路径修正算法的有效性。本试验将在切削力、集合误差和加工时间方面与传统的方法进行对比。

在本试验中,所需要的切削角度 α_{en}^* 可以通过以下步骤得到。假定给定刀具半径为 r , 径向切削深度为 s 的路径,那么在线性切削阶段的切削角度 α_{en} 可以计算出来;然后在本算法中应用 $\alpha_{en}(i)$ 来计算所需要的进给切削角度 α_{en}^* 。其实也就是说,应用此算法是为了在整个加工阶段的切削角度不能偏离在线性加工阶段的水平。

如图 4 所示,采用一个简单的弯角几何作为实例。其中, s 是径向切削深度, α_{en} 为进给切削角度, r 为刀具半径。图 5 中显示了本算法计算所得出的修正半精加工路径,传统的半精加工路径以及精加工路径。

在精加工阶段,对传统半精加工和采用本算法进行修正的半精加工的切削角度进行了对比。从图 6 中可以明显看出,传统方法的切削角度

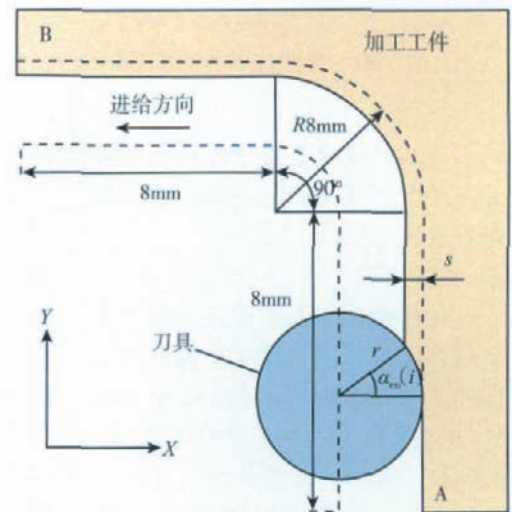


图4 工件轮廓几何图

从 11.5° 猛然跳至 19° , 这样就会造成加工的不稳定,从而使加工面质量不高;而本算法却可以使得刀具在整个精加工阶段维持一个比较好的进给角度变化水平。曲线中 1 个小

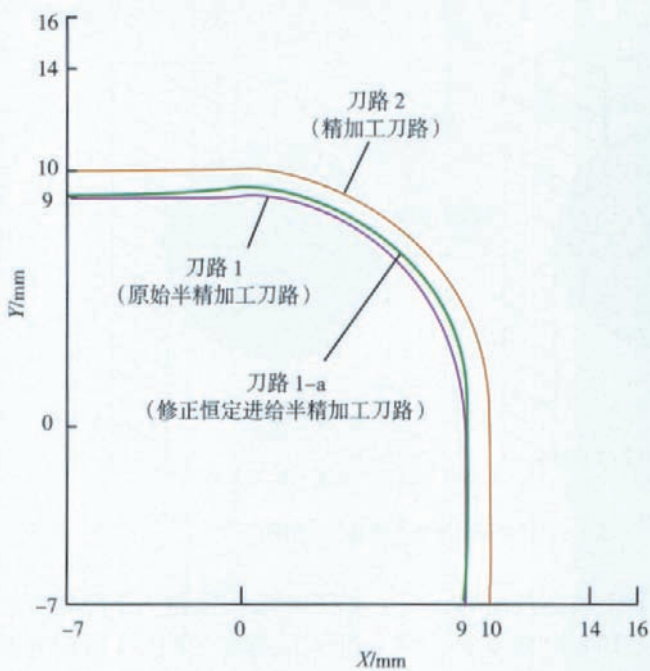


图5 半精加工路径

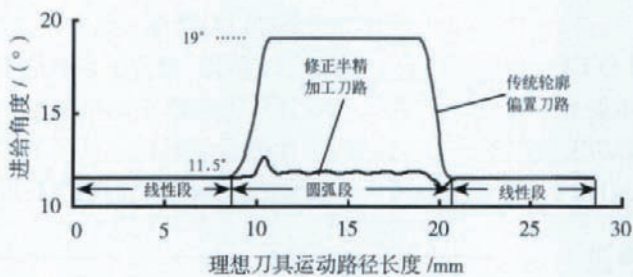


图6 传统算法和修正算法切削角度的变化

的不连续的变化是由于线性与圆弧的连接点,这是由于在仿真中的计算误差造成的。

2 具体试验

在具体加工上来验证本算法的有效性。本试验使用1台高速三坐标加工中心,型号是proLIGHT 1000 Machining Center,加工件的轮廓如图4所示。用于本试验的加工条件如表1所示。为了比较切削性能,采用了3种方法。

(1) 加工策略1。

本加工方法采用传统的轮廓偏置加工方法,并且应用于半精加工和精加工中,在加工过程中保持进给率的恒定。

(2) 加工策略2。

可变进给率加工法,以便在整个精加工过程中使得切削力维持1个恒定值。半精加工路径和精加工路径与加工策略1相同。在半精加工中维持恒定的进给率。在这里需要注意,可变进给率的值是由切削力的预测模型所决定的。

在以上的3种试验策略中,试验件的材料均为淬火钢 JIS SKD61; 刀具直径为 $D=10\text{mm}$,4

表1 试验采用的加工条件

主轴转速 / ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	4775
轴向每刀切削深度 /mm	5
每齿进给量 / ($\text{mm} \cdot \text{齿}^{-1}$)	策略1和2: 0.04 策略3: 0.04 (线性阶段) 0.015 (圆弧阶段)
径向进给步距 s/mm	0.10
冷却液开关	关闭
切削方向	顺铣

是应用于半精加工的恒定进给路径的修正方法,也就是后向刀具路径修正方法,而精加工路径和策略1使用相同的路径,并且加工过程中始终维持恒定进给率。

(3) 加工策略3。

本策略采用进给率调整加工法,在精加工路径中使用

刃。

3 试验结果与讨论

在加工试验中,XY平面上合成的切削力 F_{xy} 可以通过测力计来测得。图7中显示了3种精加工方法中的切削力。在加工策略1中,刀具进入圆弧阶段时切削力陡然增加;在加工策略2中,通过应用本算法可以看出切削力的变化被限制在17N以内;在加工策略3中可以看出切削力的变化减小,但是其切削力的变化大于策略2。这主要是因为缺乏高性能的伺服控制系统来响应进给率的变化,不能调节到所需要的切削力。

图8显示在曲面轮廓加工中通过坐标测量仪测量出的几何误差图,几何误差可以通过实际加工轮廓和理想加工轮廓之间的距离得出。图9清晰地比较了3种加工策略从A加工到B的误差对比图。通过图8和9可以看出,在传统加工策略1中,

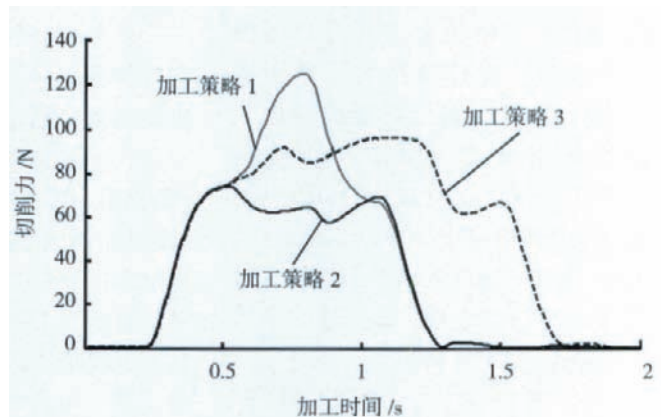


图7 3种精加工策略的切削力比较

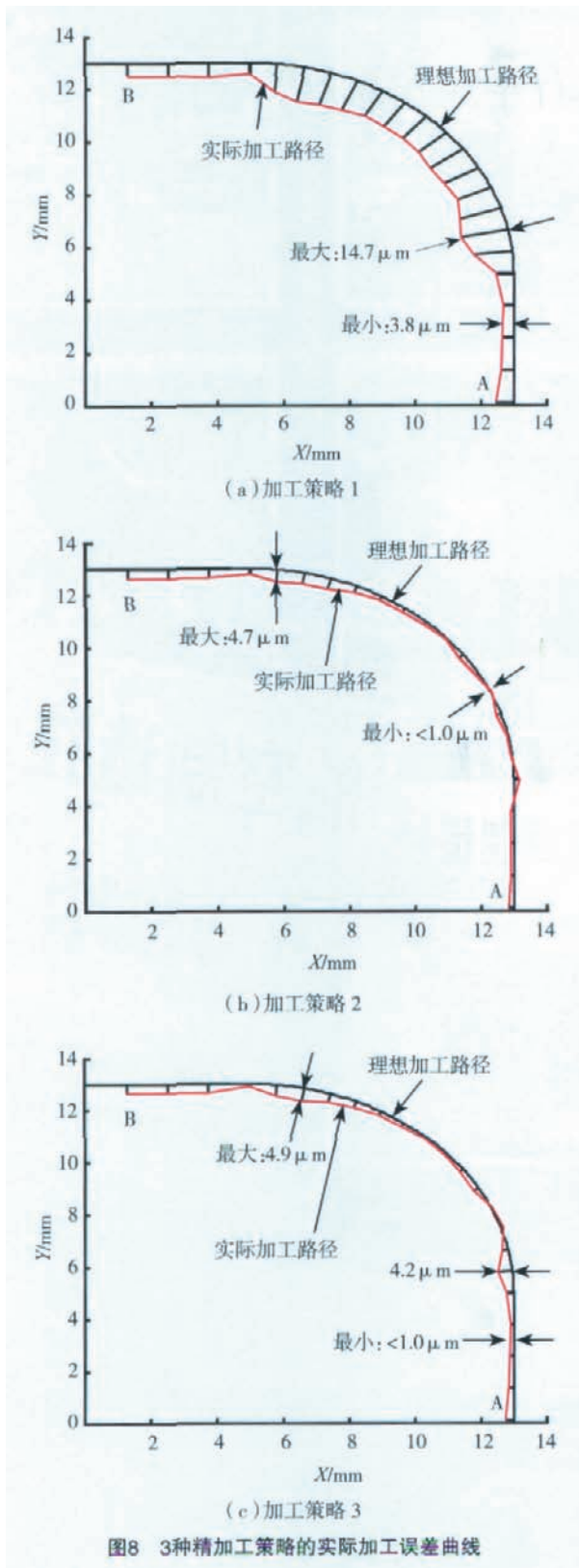


图8 3种精加工策略的实际加工误差曲线

误差最大发生在刀具进入圆弧时,此时误差达到 $14.7\ \mu\text{m}$,然而通过应用本算法,在进入圆弧时的最大误差将大大减小,达到 $4.7\ \mu\text{m}$,最小误差将

(1) 相对于传统的轮廓偏置算法,通过应用本修正算法,可以使得最大切削力的变化减少 $75\%\sim 83\%$ 。

(2) 缺少高性能伺服系统的机

小于 $1.0\ \mu\text{m}$,效果很好。

加工策略了3也很好地解决了加工误差问题,但是这种加工方法最主要的问题在于机床是否具备高性能的伺服系统,伺服控制系统的性能将直接影响加工效率。在进入圆弧和出圆弧的时候,加工误差最大,这是因为伺服系统在刀具进给率控制上的伺服延迟造成的。特别是在高速加工中,当机床缺乏高性能的伺服控制系统时,这种现象尤为明显。

结论

本课题提出了一种新的刀具路径的生成方法,其目的是在精加工阶段使得刀具以所需要的恒定进给角度进行加工。通过应用此方法,在精加工阶段的切削力可以维持在1个恒定的水平,这样就自然改善了曲面的加工质量。试验验证了本算法在提高加工效率和精度方面的优势。

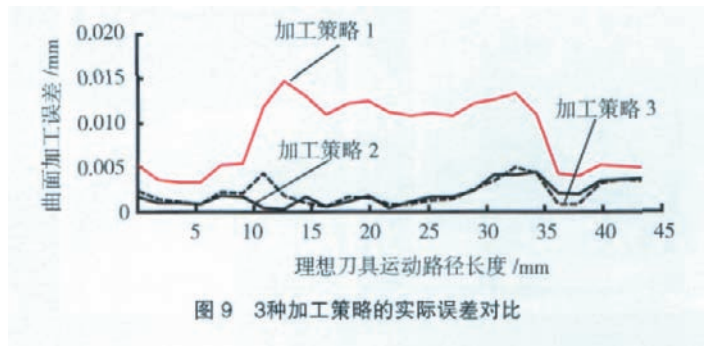


图9 3种加工策略的实际误差对比

床时,采用此算法,在不降低加工质量的情况下,得到很好的加工质量,而不用通过调整切削进给率的方法来加工。所以在实际的加工应用中,此算法的效果要明显好于传统的通过调整进给率的加工方法。

在2D轮廓加工中,本课题对改善数控加工中缺少高性能的伺服系统的机床的加工精度和效率都有其重要的意义。

参考文献

- [1] Elbestawi M A, Mohamed Y, Liu L. Application of some parameter adaptive control algorithms in machining. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1990, 112 (4): 611-617.
- [2] Rober S J, Shin Y C. Control of cutting force for end milling using an extended model reference adaptive control schemes. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1996, 118: 339-347.
- [3] Lee In-Kwon, Kim Myung-Soo, Elber G. Planar curve offset based on circle approximation. Computer-aided Design, 1996, 28 (8): 617-630.
- [4] Held M. Voronoi diagrams and offset curves of curvi-linear polygons. Computer-aided Design, 1998, 30 (4): 287-300.
- [5] Choi B K, Park S C. A pair-wise offset Algorithm for 2D point sequence curve. Computer-aided Design, 1999, 31 (12): 735-745.
- [6] Stori J A, Wright P K. Constant engagement tool path generation for convex geometries. Journal of Manufacturing System, 2000, 19 (3): 172-184.
- [7] 于洋,魏生民,刘平,等. 对于切削进给的前向刀具路径修正研究. 机床与液压, 2009, 37 (11): 54-56.

(责编 良辰)