

基于矩形网格高速铣削的加工路径优化

熊良钊, 孙长征, 冯腾, 褚明星, 周振京

首都航天机械有限公司 北京 100076

摘要: 基于高速铣削的加工特点, 对矩形网格加工路径进行优化, 对优化后的不同轨迹受力情况进行仿真分析。通过实物切削验证, 记录各种加工路径的主轴振动情况。结果表明: 采用螺旋式加工路径切削过程最稳定, 最适合高速铣削加工。

关键词: 矩形网格; 高速铣削; 加工路径; 优化; 切削验证

1 序言

五轴高速数控加工以高效率、高精度和高表面质量为基本特征, 在曲面加工中具有非常明显的优势, 已成为提高加工效率和加工质量、降低成本的主要途径^[1-3]。高速加工不仅对机床、夹具和刀具等提出了更高的要求, 而且对刀具运动路径的要求也极为严格。如果没有合理安排走刀轨迹, 材料去除率的剧烈变化势必影响加工效率与质量, 因此生成一条光顺连续的走刀轨迹对于高速切削加工显得尤为重要^[4, 5]。大型壳段中矩形网格数量约占整个加工特征的80%左右, 编程人员必须改变网格的加工策略, 以创建安全、有效和精确的加工路径, 从而实现高速加工。

2 高速加工对走刀路径的要求

高速加工对走刀路径的要求如下。

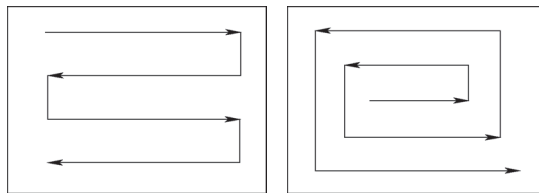
(1) 避免急速换向 在拐角处要有平滑的走刀轨迹。由于急速换向除了减慢加工速度外, 加工到拐角时, 切削角度还会迅速增加, 刀具受力增大, 切削稳定性变差, 因此应避免急速换向。

(2) 保持恒定载荷 加工过程中要保持金属去除量的恒定, 从而获得稳定的切削过程, 获得较好的热传递和较好的加工质量。

(3) 保证刀具轨迹平滑 切削过程中保证刀具轨迹平滑过渡, 减少刀具加工过程中的切入、切出次数, 从而获得相对稳定的切削轨迹。在进刀过程中, 刀具要平滑地切入, 避免采用直扎方式进刀。

3 矩形网格传统加工路径

受前期设备能力和加工方案限制, 加工方式一般采用低转速、大切削深度和低进给量的方式, 刀具路径规划方面以保证刀具使用直径最大为准, 常采用如图1所示的加工路径。



a) 往复式加工路径

b) 回字形加工路径

图1 常用加工路径

以某壳体网格为例, 由于该网格圆角R10mm, 因此网格加工时采用 $\phi 20\text{mm}$ 铣刀, 网格圆角通过刀具圆角自然形成, 加工路径如图2所示。

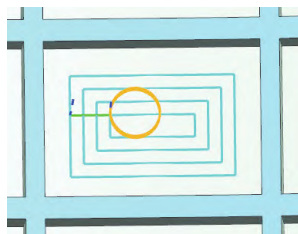


图2 某壳体网格加工路径

圆角位置切削如图3所示。由于加工到圆角位置时, 切削角度迅速增加 90° , 因此导致刀具受力增大, 拐角处往往产生过切、形成振纹等, 切削稳定性很差。为了实现切削效果, 只能通过降低转速、

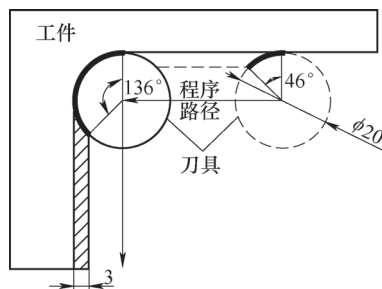


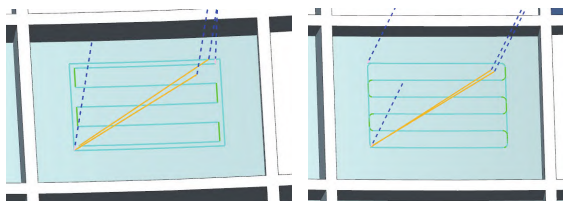
图3 圆角位置切削示意

进给量的方式解决，极大地影响加工效率。

4 高速铣削加工路径规划

4.1 往复式加工路径

优化前往复式加工路径如图4a所示，加工过程中频繁换向，机床频繁加减速。为了避免加工过程中机床频繁急速换向，切削力陡增，导致产品加工效率低和加工质量差的问题，对加工轨迹进行优化，采用如图4b所示加工轨迹，在换向处增加圆角过渡。



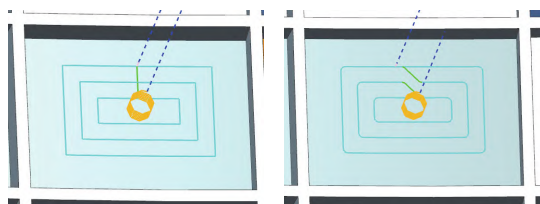
a) 优化前

b) 优化后

图4 往复式加工路径

4.2 回字形加工路径

优化前回字形加工路径如图5a所示，加工过程中也需频繁换向，机床频繁加减速，加工到圆角位置时，切削角度迅速增加，往往在拐角处产生过切、振纹等现象，切削稳定性很差，导致产品加工质量差。为了适应高速加工，对加工轨迹进行优化，采用如图5b所示优化后的加工轨迹，在拐角处增加圆角过渡，同时在轨迹间的直线切入增加圆



a) 优化前

b) 优化后

图5 回字形加工路径

角。由于该加工方式轨迹从内往外，因此采用螺旋进刀方式，可有效解决狭小网格进刀轨迹不好控制的问题。

4.3 螺旋式加工路径

采用图6所示的螺旋走刀方式，在每一层均采用螺旋进刀，螺旋铣削加工路径为曲率连续的圆弧，在圆弧路径不同位置切削量一致，铣削均匀，各轴速度变化比较平滑，可大大提升刀具寿命和加工效率。同时，该螺旋轨迹避免了刀具的行间移刀，只需要一次切入和切出就可以完成加工。

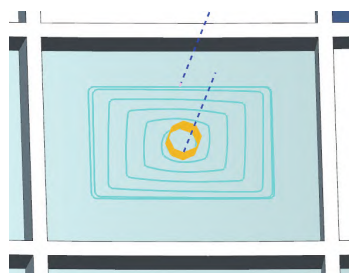


图6 螺旋式加工路径

5 虚拟仿真

采用VERICUT三维虚拟仿真软件对优化后的不同轨迹进行仿真分析，同时利用其Force物理优化模块对不同轨迹切削过程中刀具的受力情况进行仿真分析。利用优化模块，选择切削材料参数库，设置刀具信息，执行程序即可获得切削过程中刀具的受力情况。优化后往复式加工路径、回字形加工路径和螺旋式加工路径受力情况分别如图7~图9所示。从仿真结果可以看出，在切削过程中，采用往复及回字形路径加工时，刀具受力不平稳，在拐角及移

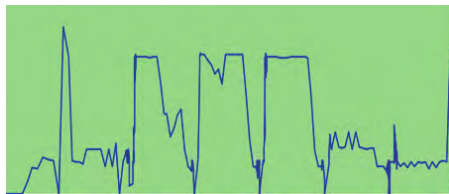


图7 优化后往复式加工路径受力情况

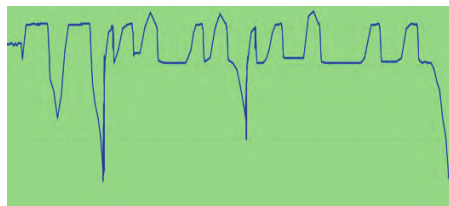


图8 优化后回字形加工路径受力情况

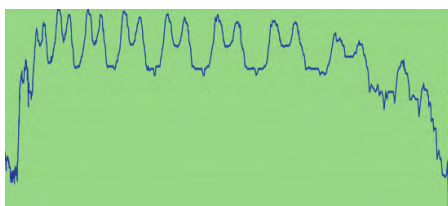


图9 优化后螺旋式加工路径受力情况

刀过程中，刀具受力发生急剧变化，切削稳定性较差。采用螺旋式加工时，切削过程中刀具受力无急剧变化，切削过程相对较平稳。

6 切削验证

对优化后的3种轨迹进行切削试验，切削过程中设定转速 $n=12000\text{r/min}$ ，对其切削过程中的主轴振动情况进行了记录。

6.1 往复式轨迹主轴振动曲线

图10所示为往复式加工路径主轴振动曲线，可以看出切削过程不平稳，切削振动变化较大，不利于高速加工。同时由于加工轨迹限制，进刀方式只能采用沿形状斜进刀，且斜进刀角度一般 $\leq 5^\circ$ ，因此进刀轨迹需要拉长，对于狭小网格，该方法十分不实用。

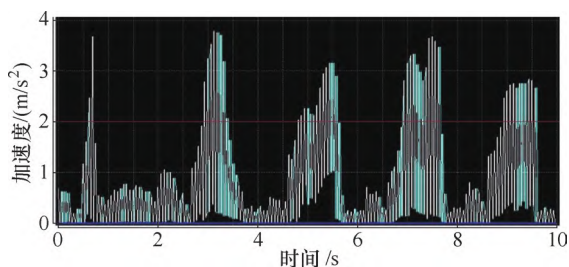


图10 往复式加工切削振动曲线

6.2 回字形轨迹主轴振动曲线

图11所示为回字形加工路径主轴振动曲线，可以看出该切削方式较往复式加工更平稳，但加工轨迹间存在移刀，移刀过程中切削量增大，切削振动增大。

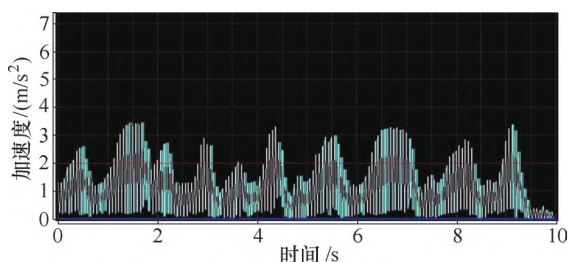


图11 回字形加工切削振动曲线

6.3 螺旋式轨迹主轴振动曲线

图12所示为螺旋式加工路径主轴振动曲线，该加工方式在每一层均采用螺旋进刀，螺旋铣削加工路径为曲率连续的圆弧，主轴振动较其余两种轨迹更平滑，切削过程最稳定。

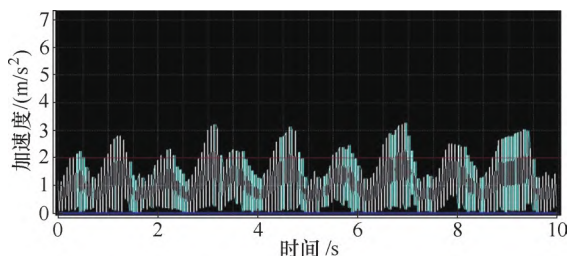


图12 螺旋式加工切削振动曲线

7 结束语

采用往复式加工路径，切削过程波动较大，切削不平稳，且受进刀方式的限制，其不适合于小尺寸网格的加工；采用回字形加工路径，切削过程较往复式加工更平稳，但该加工方式轨迹间存在移刀，移刀过程中切削量增大，切削振动增大；采用螺旋式加工路径，由于加工路径为曲率连续的圆弧，因此铣削相对均匀，刀具受力无急剧变化，相对于其他两种加工轨迹，切削过程最平稳，这种轨迹能够很好地减少刀具负载的波动及移刀次数，从而可以获得较好的加工效果。为了实现高速加工，需要保证切削载荷均匀、不产生剧烈变化。在刀轨拐角处需要增加圆弧过渡，避免出现尖锐拐角，所有进退刀的过渡也都需要尽可能圆滑。

参考文献：

- [1] 谢大叶，张震，安卫星. 航空复杂模锻件的高速加工技术[J]. 工具技术，2015（1）：54-57.
- [2] 毛旭. 基于高速切削在大型铝合金铸件的应用[J]. 装备制造技术，2017（6）：98-100.
- [3] 王素玉. 高速铣削加工表面质量的研究[D]. 济南：山东大学，2017.
- [4] 桂树国，谢向荣. 数控高速切削加工工艺设计及其经济性试验研究[J]. 制造技术与机床，2009（7）：26-28.
- [5] 楚王伟，牟文平，龚清洪，等. 钛合金飞机结构件高效铣削技术研究[J]. 工具技术，2008（8）：43-46.

MW 20240823