

# 薄壁件铣削路径的研究现状\*

## Research Status on Thin-Wall Part Milling Path

沈阳理工大学机械工程学院 王志刚 王 凡 姜增辉



王志刚

沈阳理工大学机械制造及其自动化专业硕士研究生,主要从事高速切削技术和加工工艺的研究。

薄壁零件普遍具有结构复杂、变厚度、曲面曲线结构多、协调精度要求较高等特点,目前此类零件都采用数控铣削的方法来加工<sup>[1]</sup>。但在加工过程中由于零件刚度差等多种原因,容易产生变形,因而难以控制加工精度和达到较高的加工效率。薄壁件的加工效率及变形误差,很大程度上取决于走刀策略。随着走刀路径的不同,工件内原有的残余应力释放顺序也不同,同时由于加工中切削

随着走刀路径的不同,工件内原有的残余应力释放顺序也不同,同时由于加工中切削力与切削热的作用,产生新的应力,新应力与原有残余应力的耦合作用也不相同,从而造成工件变形程度不一。因此对薄壁件铣削路径的研究是十分必要的。

力与切削热的作用,产生新的应力,新应力与原有残余应力的耦合作用也不相同,从而造成工件变形程度不一。因此对薄壁件铣削路径的研究是十分必要的。

### 路径规划特征及原则

铣削路径是指铣削加工过程中刀具相对于被加工零件的运动轨迹和运动方向,即指刀具从对刀点开始运动起,直至返回该点并结束加工程序所经过的路线,包括切削加工的路径及刀具引入、返回等非切削空行程。铣削路径也是编制程序的依据之一。因此为了避免刀具位置和切削速度在加工中的突然变化,从而能够输出光滑、平顺的刀具路径,加工时刀具路径规划应遵循如下原则<sup>[2-4]</sup>。

(1)在确定铣削路径时最好画一张工序简图,这样可为编程带来不

少方便。铣削路径应能保证被加工工件的加工质量。为了保证工件轮廓表面的表面粗糙度满足要求,最终轮廓表面应安排最后一次走刀连续加工出来。

(2)应尽量使走刀路径最短,减少空行程时间,以提高加工效率,合理选用铣削加工中的顺铣或逆铣。一般来说,数控机床采用滚珠丝杠,运动间隙很小,因此顺铣优点多于逆铣。还要选择工件加工变形相对较小的加工路线。

(3)根据工件的形状、刚度、加工余量、机床系统的刚度等情况,确定循环加工次数,合理设计刀具的切入与切出的方向。采用单向趋近定位方法,避免传动系统反向间隙而产生的定位误差。刀具的进退方向及路线要认真考虑,以尽量减少接刀痕迹。另外,在切削过程中,刀具不能与工件轮廓及夹具发生干涉,还要确

\* 国家科技重大专项(2012ZX04003-061)资助。

保机床主轴不会过载。

(4)在数控铣床上铣削零件时,尽量不要在连续的轮廓中安排切入和切出,或换刀及停顿,避免因切削力突然变化而造成弹性变形,致使光滑连续轮廓上产生表面划伤、形状突变或滞留刀痕等。

(5)粗加工时尽量保证所留余量均匀,以减少精加工时切削负荷的变化;尽可能减少刀具的换向次数与加工区域之间的跳转次数;切削过程中尽可能保持恒定的切削负荷及金属去除率。

(6)在铣削圆弧与直线的连接处,可能由于刀具的原因会产生“欠切”现象,这时在设计进给路线时,须选用直径较小的刀具,采用补加工的方式消除欠切现象。在空载运行过快和高速进给的轮廓加工中,由于工艺系统的惯性容易出现过切现象。那么在加工过程中,采用先快后慢的进给方式,特别是拐角处应通过进给修调的方式,选择变化的进给速度进行加工。

(7)在满足加工质量、生产效率等条件下,尽量简化数学处理的数值计算工作量,以简化编程工作。

## 铣削方式

数控加工能提供各种不同的加工方法以满足不同形状和类别的薄壁零件加工要求,同时加工方法具有智能、简便、快捷、准确等特点,走刀方法丰富。薄壁零件的铣削方式主要有下面几种。

### 1 Z向等高线层切加工

Z向等高线层切加工是将零件分成若干层,逐层往下切,在每层中将零件的所有区域加工完再进入下一层,在每一层均采用螺旋或圆弧进刀,同时采用无尖角刀具路径。这样有利于排屑,也避免了切削力发生突变。对薄壁件来说,更应采用这种刀具路径,因为这种刀具路径在切削过程中还能使薄壁保持较好的刚性。

它主要有以下两种类型。

(1)平行轨迹加工(Raster)。该类刀具轨迹又称为扫描行切“Zigzag”类轨迹<sup>[5]</sup>。该类型加工路径优点为切削效率高,计算量小。缺点是对于平行刀具轨迹的陡斜面,将得到Z向间隔很大的刀具路径,加工质量不高,对此可以通过调整刀具路径摆放角度或采用补充垂直路径的方法加以修正。

(2)环行铣削。这种切削方式是同时对多张曲面进行加工的计算方法,其走刀路径是以外轮廓的形状由内向外(或由外向内)进行走刀,是最常用的走刀方式之一。

### 2 插铣加工

对于深度很深的腔体的粗加工可采用插铣的方法来进行,因为腔体很深时,需要很长的刀具,这时刀具的刚性很差,按常规的切削路径切削刀具易变形,而且也易产生振动,影响加工质量和效率,采用插铣的路径正好可解决这一问题<sup>[6]</sup>。

### 3 摆线式加工

这是一种专门针对高速加工的刀位轨迹策略,所谓“摆线”即为圆上一固定点随着圆沿曲线滚动时生成的路径,由于切削过程中总是沿一条具有固定曲率的曲线运动,使得刀具运动总能保持一致的进给率,所以对高速铣削比较适合<sup>[7]</sup>。

采用这种刀具路径使刀具在切削时距某条曲线(一般是零件的轮廓线及其平移线)保持一个恒定的半径,从而可使进给速度在加工过程中可保持不变,而且这时的径向吃刀量一般取刀具直径的5%左右,因此刀具的冷却条件良好,刀具的寿命较长。此外该切削方式以回旋方式逐步去除材料,避免全刀切削,保证薄壁零件的侧壁材料受力均匀,表面质量较好。加工薄壁型腔时,螺旋下刀切入工件后,先利用摆线切削方式切开通槽后,再利用直线走刀进行切削,实行分步环切,使切削负荷更加

平均。加工圆角处,摆线加工可使刀路更加平滑。

## 路径仿真与优化方法

随着薄壁件在航空航天、汽车、电子电器等工业领域的广泛应用,对其加工质量、加工效率的要求也越来越高。铣削路径是影响加工质量、效率的主要因素,因此对铣削路径的仿真优化变得十分重要。路径仿真可以通过计算机模拟整个加工过程,减少昂贵的现场试验成本,提高设计效率,降低生产和材料成本。路径优化是根据仿真结果更进一步完善铣削路径,细化拐角等难加工部位的路径。

### 1 路径仿真

计算机技术的高速发展出现了比较多的可以进行路径仿真的软件,它们在处理不同的问题时,各有其特点。下面就简略的介绍两种可以进行路径仿真的方法。

#### 1.1 VERICUT 软件

VERICUT 软件<sup>[8-9]</sup>是美国CGTECH公司开发的数控加工仿真系统,由NC程序验证模块、机床运动仿真模块、优化路径模块、多轴模块、高级机床特征模块、实体比较模块和CAD/CAM接口等模块组成,可仿真数控车床、铣床、加工中心、线切割机和多轴机床等多种加工设备的数控加工过程。

数控机床铣削路径仿真工作基本流程为<sup>[10]</sup>:启动VERICUT软件→建立新的项目文件→选择构建的数控加工仿真机床→选择机床配置的控制文件→选择所使用的刀具库→选择需要加工仿真的数控程序→在项目树中添加毛坯、工件、夹具到机床上→进行各种基础设置,如刀具半径补偿、长度补偿、机床初始化位置、换到位置等→开始刀具路径仿真→比较检查→编辑程序→重新加载路径仿真程序→仿真结束。

#### 1.2 三维设计软件

在计算机上利用三维图形技术

对数控加工过程进行模拟仿真,可以快速、安全和有效地对 NC 程序迅速进行修改,免除反复试切过程,降低材料消耗和生产成本,提高工作效率。因此,数控加工过程中的计算机仿真是 NC 程序高效、安全和有效的检验方法<sup>[11]</sup>。

三维设计软件中的 CAM 模块可以实现加工过程的模拟,这类软件有 UG、CAXA、PRO/E 等。以 CAXA 为例,它能够模拟走刀路径,对毛坯切削的动态图像进行模拟仿真,并对代码进行反读校验。仿真过程中可以检查刀柄干涉、快速移动过程中的干涉、刀具无切削刃部分的干涉等,这一点与 VERICUT 类似。并把切削仿真结果与零件理论形状进行比较,把实际加工的风险率降为最低。CAXA 可以自动生成刀具路径如图 1。

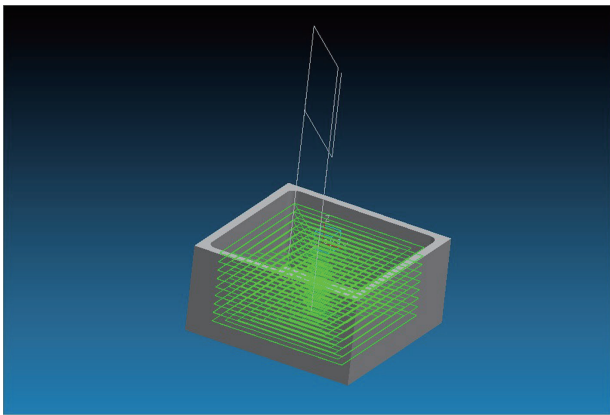


图1 CAXA刀具路径

## 2 路径优化

### 2.1 铣削路径优化意义

可以减少生产零件的加工周期,使其更快速地进入市场;减少每个零件的加工时间,使生产成本大大降低;提高生产效率;加工时间少可减少刀具的磨损,可以延长刀具寿命;提高加工质量,稳定的切削压力减少甚至消除了切刀的偏差,从而使角、边沿、和凸缘的加工精度大大提高,从而减少抛光的时间<sup>[12]</sup>。

### 2.2 铣削路径优化原则

首先,在保证安全平面的前提

下,选择高度最小的安全平面。对刀具快速接近工件加工部位路线的终点和刀具快速离开工件路线的起点的位置应该严格设计,保证刀具的安全平面与工件的轮廓有足够的安空间隙。其次,应该先保证加工工件的尺寸精度以及表面质量,然后再考虑编程中数值计算简单、路径最短、效率最高。除此之外,还应仔细核对检查模拟生成的刀具路径,保证工件不过切。

### 2.3 铣削路径优化方法

(1)有限元优化铣削路径:有限元的仿真与优化一般是同时进行的,通过软件分析不同铣削路径下零件的变形情况,通过变形对比分析,提出一个合理的加工路径参考方案。

(2)VERICUT 仿真优化铣削路径:VERICUT 仿真优化就是模拟生产过程的切削模型,根据当前所使用的刀具及每步走刀路径,计算每步程序的切削量,再和切削参数数值进行比较;经计算分析,当余量大时,VERICUT 就降低速度;当余量小时,就提高速度,进而修改程序,插入新的进给速度,最终创建更安全更高效的数控加工程序<sup>[13]</sup>。

(3)遗传算法优化铣削路径:遗传算法<sup>[14]</sup>(Genetic Algorithm)是模拟达尔文生物进化论的自然选择和遗传学机理的生物进化过程的计算模型,是一种通过模拟自然进化过程搜索最优解的方法。它最初是由美国 Michigan 大学 J.Holland 教授于 1975 年首先提出来的。遗传算法实现全局并行搜索,搜索空间大,并且在搜索过程中能够不断的向可能包含最优解的方向做空间的调整,因此易于寻找到最优解或准最优解。需

要解决的问题越复杂,目标越不明确,遗传算法的优越性越大<sup>[15]</sup>。

### 2.4 拐角处理

在铣削薄壁件的过程中,刀具轨迹拐角的处理是十分重要的,因为即使切削深度很浅,进给速度和走刀轨迹的剧烈变化也是造成零件变形及刀具破损的重要原因之一<sup>[16]</sup>。为避免这种情况,应调整进给速度,从而调整每一个刀刃的切削量。一般采用分布减速的方法,同时要避免刀具轨迹的剧烈变化。圆角如果用等半径的刀具直接加工,则进给方向发生突变势必会使机床负荷猛然增加,所以,加工这种类型的圆倒角最好是使用较小半径的刀具。一般情况下刀具半径最好为圆倒角几何尺寸的 70% 或更小,这样可使拐角处的切削刀具进给方向变化平滑,避免刀具的突然转向。使用小直径刀具加工和直接切入拐角相比,机床负荷可以降低 3 倍左右。

## 结束语

薄壁件的加工效率和质量极大地取决于铣削路径的合理选择。要合理的规划路径,选择路径类型,根据不同情况用一种或多种路径相结合,初步确定路径后可以通过计算机实现路径的仿真与优化,最终确定较为合理的铣削路径。但在实际加工中,不同的机床上加工相同的零件时,选择铣削路径所考虑的内容不完全一样,铣削路径的确定要根据零件的具体结构特点综合考虑、灵活运用。在工艺处理过程中,应认真分析零件的加工要求及其结构特点,找出刀具路径中影响加工效率的因素,在保证零件加工精度和表面粗糙度的前提下,尽量缩短铣削路径,从而提高加工效率,降低生产成本。

本文共有参考文献 16 篇,因篇幅有限,未能一一列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。(责编 深蓝)