

有限元技术在航空整体结构件加工中的应用

Application of Finite Element Technology in Integral Structure Machining of Aircraft

山东大学南校区机械工程学院 孙杰
山东大学高效洁净机械制造教育部重点实验室



孙杰

教授, 博士生导师, 主要从事大型构件变形控制与校正、高速切削加工机理及表面质量完整性、加工过程动态物理仿真分析方面的研究。国内外发表论文 50 余篇, 其中 SCI、EI 收录 20 余篇。

整体结构件的广泛应用显著提高了飞机、航天器等综合性能。然而航空整体结构件大都结构复杂, 尺寸较大, 形状精度要求高, 材料去除量大, 加工周期长, 加工质量和精度难以控制, 一旦出现质量问题, 不但会造成重大经济损失, 而且会严重影响

传统研究和解决航空整体结构件高速、高效、高精度加工的问题主要依赖经验或实验, 效率低且实验数据的可重用性差。随着计算机技术和有限元技术的发展, 对加工过程的关键环节进行有限元仿真计算成为可能。

生产周期, 影响军机的批量生产和新机型的开发^[1]。传统研究和解决航空整体结构件高速、高效、高精度加工的问题主要依赖经验或实验, 效率低且实验数据的可重用性差。随着计算机技术和有限元技术的发展, 对加工过程的关键环节进行有限元仿真计算成为可能。

自从 1971 年 Wienkiewicz 与 Kakino 首先建立了切屑形成有限元模型以来^[2], 经过近 40 年的发展, 有限元技术已被广泛应用于切屑形成与流动预测、刀具结构优化设计、工艺参数优化以及航空整体结构件的变形预测、控制与校正等相关领域的研究, 有关研究结果已成功用于指导生产。Sikorsky 公司生产的直升机钛合金结构件 S-92 初始采用传统的加工方法, 需要许多设备和很长的加工时间。为了提高生

产效率和经济效益, 该公司与 Third Wave 公司合作, 利用有限元软件 AdvantEdge 模拟该零件的加工过程, 优化切削加工参数, 从而提高了工件质量, 延长了刀具寿命, 降低了劳动损耗^[3]。

有限元仿真技术在航空整体结构件加工中应用的突出优点主要表现在如下几个方面:

(1) 揭示许多实验无法获得的物理力学现象, 获得实验难以测试的加工过程参数(如切削区的温度、应变率、应力、应变等), 对不同切削条件下的切屑流动、切削力、刀具温度和应力进行预测, 为航空材料高速高效加工切削机理研究提供支持;

(2) 大大减少实验研究工作量, 降低研究投入, 缩短研发周期;

(3) 可以对整个工件的主要加工过程进行仿真分析, 对加工变形进

行预测,实现装夹方案、工艺参数等优化。

本文将结合课题组近年来的研究工作,围绕有限元仿真在航空整体结构件制造中应用所涉及的关键技术、应用领域及发展趋势进行分析。

切削条件下材料本构关系模型的建立

1 切削加工仿真分析中的材料模型

材料在高温、大应变、高应变率条件下力学行为的准确描述,即材料本构关系模型的建立是实现工件切削加工过程有效预测的基础和前提^[4]。目前,描述材料行为特性的材料模型可分为2类:显微结构模型(microstructural models)和流变学模型(rheological models)^[5]。

(1) 显微结构模型利用显微结构参数描述变形过程中和变形后材料的行为特性(包括硬化、动态回复、动态再结晶等),已有十几种动态结构模型,如切削加工中用到的Zerrilli-Armstrong模型等。它们均以实验为基础,对材料性能的预测功能较强,但外推精度较低,为获得模型参数所需进行的实验工作量大,时间和资金花费较高。这些因素导致显微结构模型在切削加工仿真分析中应用不够广泛^[5]。

(2) 流变模型又分为物理模型、经验分析模型和经验非分析模型。物理模型反映了变形过程中物理现象(包含从原子间距到连续体的尺度范围),模型参数确定需要耗费大量的时间和费用,该类模型在有限元仿真分析中很难被应用。经验非分析模型主要基于神经网络模型,不需要先验的本构法则和对复杂微观组织现象的描述。经验分析模型是宏观尺度模型(或称连续体模型),通过实验参数拟合经验公式获得,不反映变形过程中的物理现象,能很好地吻合实验获得的应力应变曲线。经验分析模型经历了由简单到复杂的演

变,现已能很好地描述材料在高温、大应变、高应变率条件下的材料力学行为,是目前切削加工有限元仿真分析中应用最广泛的一类材料模型,如Johnson-Cook(JC)材料本构关系模型。

JC模型由Johnson和Cook在1983年提出,是描述材料在大应变、高应变率、高温条件下力学行为的现象学模型,充分体现了材料的应变强化、应变率强化以及温度软化效应。由于JC模型简单、各种材料的模型参数易于获得,使得该模型在切削仿真中获得广泛应用。针对不同材料和具体应用特点,许多研究者对JC模型进行了改进。

2 实验材料模型参数的获得

不考虑材料微观结构,综合反映材料在不同应变、应变率、温度条件下力学行为的材料模型参数的获取方法主要包括:纯材料实验方法;切削(Orthogonal Cutting, OC)实验法;材料实验与切削实验综合方法。

(1) 纯材料实验方法。

分离式霍普金森压杆实验是研究切削条件下材料力学行为最有效的纯实验方法,该实验装置由Hopkinson父子在1914年创立,并首次获得了高应变率下载荷-时间曲线^[6]。1949年,Kolsky对该装置进行了改进,将压杆分成2截,发展成分离式Hopkinson压杆(Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB),从而使这一装置可以用于测量材料在冲击载荷下的应力应变曲线^[7]、研究高应变率下材料的动态力学行为。这项技术及其相应设备得到不断发展,目前SHPB可以实现大应变(0.5)、高应变率(10^4s^{-1})和高温(1100°C)下的流动应力测量。尽管如此,SHPB实验与真实切削条件还存在一定的差异,在SHPB实验数据处理时应予以考虑。与实际切削条件相比,SHPB实验存在的主要问

题包括^[8]:

- SHPB实验中的加热过程会引起材料的退火,而这在切削过程中一般不会出现;

- SHPB的实验温度测试具有一定困难,在极短的加热时间内也很难使试样各部分的温度达到均匀一致;

- 流动应力,特别是在低应变值时存在一定波动;

- 在弹性范围内的数值一般不可用,需要另外进行实验确定;

- 高速冲击存在惯性效应;

- 应变、应变率比真实切削条件下的数值偏低。

(2) 切削实验法。

切削实验法是以Oxley的切削理论为基础,利用直角切削实验,通过测量切削力估算流动应力和应变,同时结合切削速度计算应变率和温度。多组直角切削实验可得到不同应变、应变率、温度下的流动应力,从而拟合出材料的本构模型。切削实验法能够获得SHPB无法达到的大应变、高应变率、高温材料特性。美国Ohio州立大学净成形制造工程中心的T. Altan教授在该领域做了突出工作,他所在的工程中心提出了基于Oxley平行滑移线理论,通过反求流动应力常数的方法构建材料流动应力方程的方法,并编制相应的子程序OXCUR。

直角切削实验材料模型参数确定方法存在的主要问题及产生误差的主要因素包括:

- 通过该方法获得的本构方程只适合大应变、高温、高应变率条件;

- 第一变形区形状并非Oxley所假设的规则形状;

- 应变率在第一变形区内存在波动。

(3) 综合材料实验和切削实验材料模型参数的确定方法。

为了充分发挥SHPB和正交切削实验的优势,克服各自存在的不同

足, Guo^[9]提出了综合利用 SHPB 实验数据和正交切削实验确定材料本构关系模型的方法, 选用 Johnson-Cook 材料本构关系模型进行参数拟合。其主要做法为: 将基于切削实验获得的计算剪应变、剪应变率和流动剪应力按照各向同性假设及 Mises 屈服准则转换为等效应变、等效应变率和等效流动应力, 然后通过相关计算, 使基于 SHPB 实验数据和正交切削实验数据的 JC 模型中的 C 参数相关联, 最终获得能很好反映切削条件下材料特性的材料模型参数。

基于有限元的刀具磨损仿真分析

刀具磨损特性和规律对工件表面质量、加工成本将产生重要影响, 航空整体结构件金属切除量大、难加工材料所占比例高, 因此对刀具提出了很高要求。国内外学者对不同材料加工过程中刀具磨损规律开展了大量研究工作, 然而多数研究工作是基于经验或实验的^[10]。近年来, 有限元技术在刀具磨损研究中获得应用。采用有限元仿真技术实现刀具磨损的可靠预测是学术界在刀具研究领域面临的新的挑战, 这一研究将彻底改变传统的刀具寿命研究完全依靠经验和实验的高成本、高时间消

耗的研究方法。

刀具的磨损(月牙洼形成与后刀面磨损)与加工过程中的切削温度、接触应力、刀-屑及刀-工滑动速度密切相关。采用有限元技术进行刀具磨损分析, 首先要建立由上述参数控制的刀具磨损模型, 并对这些工艺参数进行仿真^[11]。刀具磨损仿真流程如图 1 所示。

刀具磨损预测分析可分为 4 个步骤:

(1) 考虑热-力耦合作用切削过程仿真分析。实现连续稳态切削, 准确预测切屑流动和切屑形状。

(2) 刀具传热分析。要达到刀具的热稳定性, 需要较长的切削仿真时间, 以目前的计算机水平很难满足要求, Yung-Chang^[12]提出了一种计算纯刀具热传导的近似方法, 满足了仿真要求。

(3) 刀具磨损速率计算。选用合适的刀具磨损模型进行相应计算, Takeyama 和 Murata^[13]提出的刀具磨损模型能够综合考虑摩擦磨损和扩散磨损的影响, 在刀具磨损有限元仿真中应用较广泛。

(4) 磨损后刀具几何形状更新。依据刀具磨损速率相关数据, 由刀具磨损引起的新的刀具前刀面、后刀面几何形状需要重新计算, 以此作为下一个循环步计算的

一步深入;

(2) 刀具磨损后刀具形状的重构速度和精度研究的深入;

(3) 刀-屑、刀-工接触摩擦模型研究的深入。

航空整体结构件数控加工变形预测与控制

通过对航空结构件加工变形产生原因的分析可知, 毛坯初始残余应力是引起零件加工变形的主要因素, 除此之外切削力、切削热、切削顺序、走刀路径和装夹等因素对零件的加工变形也具有重要影响。采用有限元仿真技术可以对上述因素进行综合分析, 实现航空整体结构件的变形预测与控制。

1 航空整体结构件加工变形有限元仿真分析

(1) 铣削有限元仿真几何模型的建立。

航空整体结构件的加工大都为铣削加工。铣削加工中, 由于同时做旋转运动和进给运动, 使得刀具的运动轨迹为摆线, 并形成类似于扇形的切削层, 如图 2 所示。其中 a_e 为径向切深, a_p 为轴向切深, v_f 为切削速度, f_z 为每齿进给量。由于铣削刀具刃倾角的存在, 切削刃与工件加工表面的交线成一定角度, 这些因素给加工过程的模拟带来了极大的困难。为了成功实现铣削加工过程的模拟, 对铣削加工中的切削层进行了适当的简化, 如图 3 所示。在图 3(a) 中刀具对工件的切削载荷将以弧线形式随着刀具的旋转依次作用在面 $bcfe$ 和切削层底面 cdf 上, 切削层形状简化成等厚度切削层后, 圆弧形加载面 $bcfe$ 由矩形面 $b'c'g'h'$ 和 $e'f'g'h'$ 代替, 圆弧形切屑底面 cdf 由矩形面 $c'd'f'g'$ 代替, 则作用在弧线上的切削载荷将变为作用在折线上。为了模拟卸载装夹和零件自由变形过程, 在计算机中按照 4 个阶段——约束、铣削加工、卸载和约束

一个循环步计算的输入文件。

完成这 4 个步骤后即完成了一个磨损仿真循环, 并获得一个刀具磨损量仿真数据。

刀具磨损仿真研究还刚刚起步, 还有大量的工作有待研究, 主要包括:

(1) 刀具磨损模型研究的进

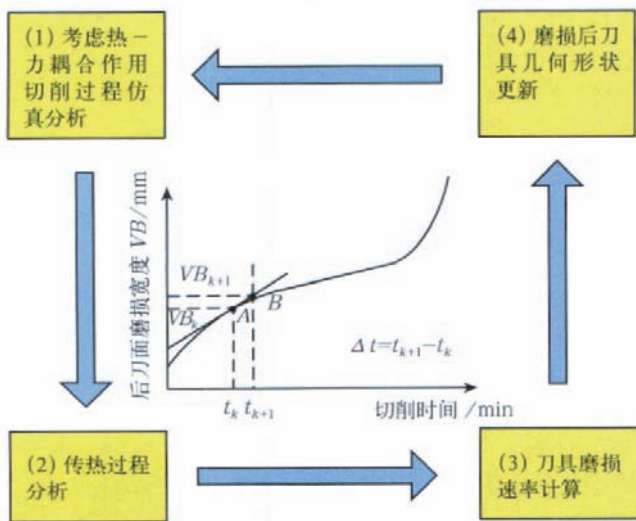


图1 刀具磨损过程有限元仿真分析过程示意图

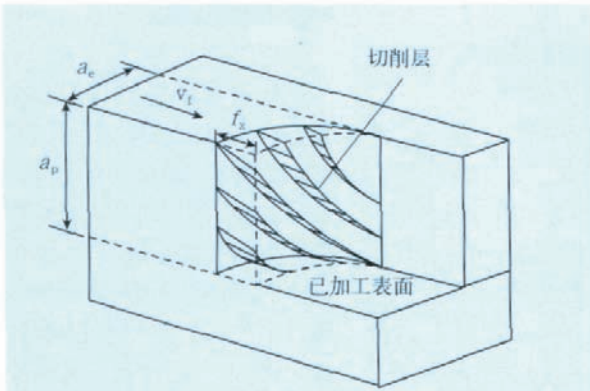


图2 铣削加工中的变厚度切削层

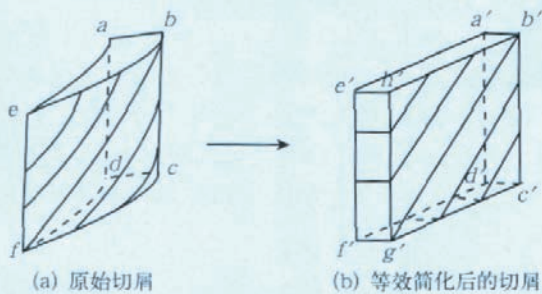


图3 切削层简化示意图

转换进行仿真分析^[14]。

(2) 整体结构件加工过程仿真网格剖分技术研究。

整体结构件尺寸大,切削层与工件尺寸相比非常小,要实现对实际尺寸整体结构件加工过程的有限元仿真分析,网格数量非常庞大,计算无法正常进行。浙江大学开发了针对航空整体结构件加工过程仿真分析的有限元接力计算系统,其核心思想是以大型有限元软件包 ABAQUS 为核心求解器,对由多个小框形特征组成的整体结构件,模拟时将以每个框为单位。根据零件的加工刀具轨迹源文件,对第一个隔框进行网格剖分,远离该框区域网格逐渐变粗,生成符合要求的网格模型;然后施加边界条件和切削荷载,生成包含节点和单元定义的文件(INP 文件),启动有限元求解器对切削加工过程进行仿真计算。第一个框计算完成后,再对第二个框进行网格剖分,生成符合要求的网格,而远离该框区域网格逐渐变稀,施加边界条件

和切削荷载到相应节点上,再次生成包含节点和单元定义的计算文件,启动有限元求解器,有限元求解器将第一框计算的场量数据插值映射到第二框作为初始条件后

重视。

有限元技术在装夹方案优化中起到了重要作用。近年来,采用有限元数值计算方法开展了装夹顺序、夹紧点布局等相关研究,并进行装夹部位优化^[17-19],航空整体结构件由于其结构特点,决定了其装夹部分非常多,往往有几十个,甚至上百个。加

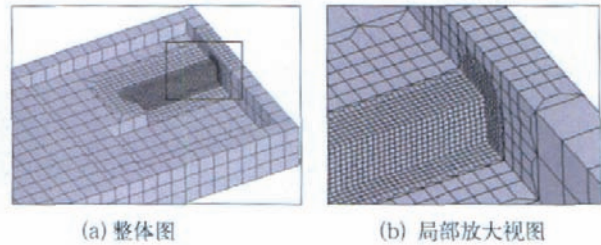


图4 自适应六面体网格剖分图

继续进行切削加工过程的仿真计算,如此循环直到完成整个零件的加工模拟。图4为接力计算系统中自

适应六面体网格^[15]。

2 有限元在装夹方案优化研究中的应用

夹紧力是影响航空整体结构件变形的重要因素之一,通过调整夹具元件的位置或添加必要的夹具元件,能够达到减少变形的目的^[16]。随着对航空整体结构件加工精度要求的提高,对装夹方案优选研究逐渐受到

工过程中随着材料的去除,工件由刚性零件逐渐变成弱刚性零件,装夹策略必须满足航空整体结构件加工过程中这一变化特点。课题组开展了以加工过程中航空框类整体结构件的最大变形最小为目标函数,采用遗传算法和有限元法相结合的方法,建立了航空框类整体结构件夹紧点位置及夹紧点数目递推优化模型。并根据该优化模型对航空整体结构件进行装夹布局优化,同时对夹紧元件的接触和摩擦问题进行了分析,为装夹方案优化有限元分析建模边界条件的确定提供依据。通过对图5所

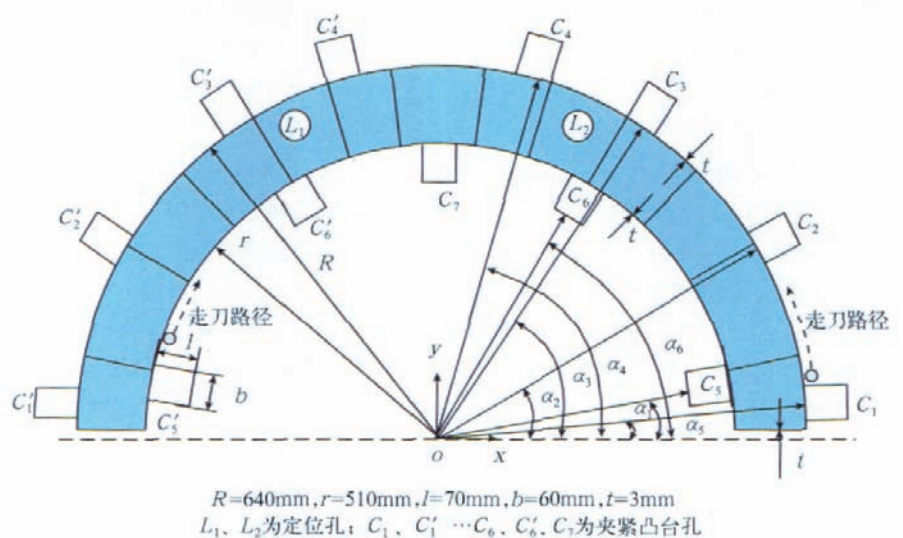


图5 装夹部位优化隔框整体结构件图

示的隔框零件采用遗传算法进行装夹部位优化,加工变形比优化前减少

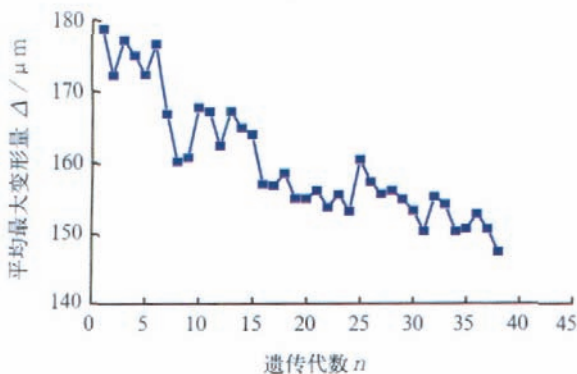


图6 外侧夹紧凸台位置布局优化收敛过程

了14.2%,图6为外侧夹紧凸台位置布局优化收敛过程。

整体结构件的数控加工变形校正技术研究

对于许多航空整体结构件来说,即使采取先进的生产工艺和优化的工艺参数,由于前文所提到的航空整体结构件加工中各种复杂因素的影响,数控加工变形也在所难免,短期内还很难将所有整体结构件的加工完全控制在设计精度范围之内,可以说变形校正是保证航空整体结构件制造精度不可缺少的重要手段^[20]。有限元数值计算在航空整体结构件变形校正中发挥重要作用,对反变形校正,通过有限元数值计算,能准确计算校正参数,将变形校正建立在科学计算基础上,改变传统凭经验的粗放型变形校正生产方式。

对薄壁结构件提出了基于滚压应力再分布变形校正理论和方法。研究中毛坯材料采用7050-T7451铝合金预拉伸板材,其内部的残余应力分布具有一定的规律性,即在板厚相同的平面内,其应力分布可以认为是面内二维平面应力状态,层与层之间没有剪应力。采用有限元生死单元技术模拟材料的去除过程,工件外形尺寸为408mm×120mm×40mm,各侧

壁厚为4mm,工件底面厚为2mm。同样采用非线性求解功能较强的

商业有限元分析软件ABAQUS对滚压过程进行仿真分析,仿真过程中除沿X方向的位移、绕Y方向的旋转,其余自由度均约束。滚压时采用400N的预紧力,校正滚轮的滚压位置h为4.3mm。采用该滚压参数进行滚压校正,单端滚压和两端滚压前后工件变形

对比如图7所示。由图7可看出,滚压获得了较好的校正效果。滚压后底面残余变形量为 6.86×10^{-3} mm,相对初始变形,消除了90%的变形量。另外还进行了实验设计,验证了所提出校正理论和方法的正确性。

结论

国内外对数值计算在工程科学中的应用给予高度重视,美国于2006年就计算机建模和仿真对美国工程和科学进步的影响形成专题报告。有限元数值计算在航空整体结构件制造中的应用刚刚起步,有大量的科学和工程问题有待进一步研究以促使其在实际生产中的应用:

(1) 材料性能基础数据库及材料模型参数库的建立有待加强。离开了准确材料模型参数,加工过程仿真将无法进行。我国在材料基础数据研究以及材料模型参数库的建立还不能满足有限元仿真分析的需要,特别是新涌现的航空材料更是如此,这方面与国外差距较大。

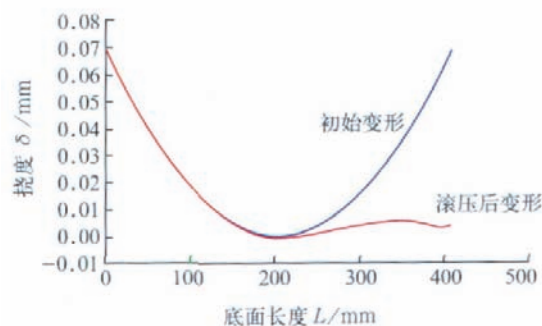
(2) 需要进一步研究反映切削条件的刀-屑、刀-工接触摩擦模

型,以提高切削加工有限元仿真分析精度。

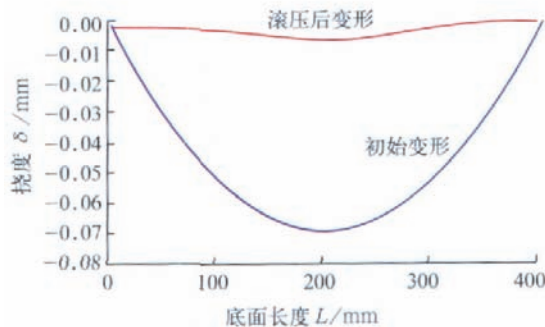
(3) 刀具磨损模型的建立仍需开展大量的理论研究工作,以真实反映刀具的磨损特点,为刀具寿命预测提供支持,这也必将为刀具寿命研究提供新的高效的研究手段。

(4) 航空整体结构件变形预测涉及毛坯数字化残余应力场的构建、装夹方案优化、走刀路径及工艺顺序等方面,每个环节都需要进行深入的理论和数值模型建立研究。

(5) 应开发针对航空整体结构件变形预测与工艺策略优化的专业化有限元仿真分析软件系统,这方面的工作国外才刚刚起步,我国也应整合各方面力量,尽早开发具有自主知



(a) 单端滚压后工件底面变形对比



(b) 两端滚压后工件底面变形对比

图7 滚压对工件变形影响

识产权的航空整体结构件变形预测与工艺参数优化软件系统。

本文有参考文献20篇,由于篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 小颖)