

数控加工参数优化的研究现状与进展^{*}

Research and Development of Optimization of NC Machining Parameters

华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室 高亮 杨扬 李新宇

[摘要] 分析了数控加工参数优化的必要性以及目前数控加工参数优化的研究现状,指出了当前数控加工参数优化研究中存在的问题、可能的解决途径以及发展趋势,并提出了几个有代表性的研究方向。

关键词: 数控加工 参数优化 优化模型 优化算法

[ABSTRACT] The necessity and research development of the optimization of NC machining parameters is analyzed. Problems, probable solutions, development trend of the optimization research of NC machining parameters are reviewed. And some useful research directions are proposed.

Keywords: NC machining Parameter optimization Optimization model Optimization algorithm

数控加工是一种可编程的由数字和符号实施控制的自动加工过程。数控机床仍采用刀具和磨具对材料进行切削加工,但在控制切削运动等方面与传统切削加工存在本质差别,其主要特点如下:

- (1) 加工的零件精度高;
- (2) 生产效率高;
- (3) 特别适合加工形状复杂的轮廓表面;
- (4) 有利于实现计算机辅助制造;
- (5) 初始投资大,加工成本高^[1]。

数控加工的优化问题包括加工路径和工艺参数的优化等方面,其中加工路径的优化是前提。对加工路径的生成和优化进行了大量研究并取得了很多成果,出现了多种路径规划方式。而对工艺参数的优化则相对研究较少,本课题旨在研究数控加工参数优化的问题。

数控加工参数的选择关系到加工系统的生产率、生产成本以及产品的加工质量,是现代制造技术迫切需要解决的重要课题。通过建立加工参数优化模型,采用一定的优化算法进行参数寻优,得到参数的最优解,是合理选择加工参数的一种有效方法。这为加工参数的合理选择提供了科学的方法,同时避免了查手册或经验选

择参数的局限性。

国内外对数控加工参数优化已经开展了研究并取得了一定成果。总结已有的研究成果,找出现有研究的不足,这对于明确今后的研究方向有十分重要的意义。本课题在对已有成果进行归纳和分析的基础上对数控加工参数优化进行综述,并指出了几个有代表性的研究方向。

1 数控加工参数优化的发展、存在问题以及必要性研究

1.1 数控加工参数优化的发展

1.1.1 数控加工的发展

自20世纪中期数控技术出现以来,数控机床给机械制造业带来了革命性的变化。数控机床是一种高度机电一体化的产品,适用于加工多品种小批量、结构较复杂、精度要求较高、需要频繁改型、价格昂贵不允许报废、要求精密复制、需要缩短生产周期以及要求100%检验的零件。与传统的切削加工相比,数控加工实现了加工效率与加工质量的统一,形成了切削力小、加工效率高、加工质量好的技术优势。

随着科学技术的发展,对零件加工质量的要求也越来越高。FMS和CIMS的兴起对机床数控系统提出了更高的要求,现代数控加工正在向高速化、高精度化、高可靠性、高柔性化、高一体化、网络化和智能化等方向发展。

1.1.2 工艺参数优化的发展

数控技术作为先进制造的关键,其加工质量与效率和切削加工参数的合理选择有着十分重要的联系。制造过程中有2大主要实际问题:一是确定满足一定生产质量要求或技术规格的加工参数值;另一个是利用现有资源最大化制造系统的性能指标^[2]。

影响数控加工效率的因素很多,主要包括工艺系统设计、工艺过程设计、加工过程管理和加工参数选择等几个方面。由于加工参数选择几乎不涉及任何管理问题和人为因素,任何制造企业都可以直接使用,因此,采用科学方法来选择加工参数以实现生产效率最大化具有显著的现实意义。长期以来,人们在选择加工参数方

^{*} 难加工航空零件的数字化制造基础(973)项目(2011CB706804)资助。

面积积累了丰富的经验数据。虽然这些数据非常宝贵,但由于它们局限于某些特定的应用场合,一旦机床-刀具-工件组合情况发生改变,这些经验数据就变得不可用。

随着新材料、新技术、新工艺的不断涌现,工艺参数优化研究在朝着高性能、高功能、高智能方向发展:数控切削向高性能切削方向发展;优化模型向高功能方向发展;优化方法向高智能方向发展。建立科学合理的工艺参数优化方法,进而选择合适的工艺加工参数是提高数控加工效率的重要途径。

1.2 数控加工参数优化存在的问题以及必要性研究

传统加工参数选择是参照工厂生产中的一些经验数据,辅以必要的计算,但由于受到人的客观条件限制,所获取的数据一般都不是最优结果。长期以来,工艺参数主要依靠大量的工艺试验和长期的工作积累获取,在我国加工制造业没有得到应有的重视,开展的研究较少,一直是阻碍我国加工制造业效率提升的瓶颈^[3]。随着电子计算技术特别是微型计算机技术和柔性加工技术的不断发展,可以用高速的机器运算来代替人工计算,从而可以用科学方法来寻求最佳切削参数。这种计算机辅助切削参数优化选择的方法已逐步进入实用阶段。

由于加工参数选择不当而影响零件加工质量和加工效率的情况较严重,其中常见的实际生产问题主要包括以下方面。

(1) 加工结果的不可预测性。

由于没有建立加工参数与加工结果之间的确定关系,无法预测一定的加工参数所能加工出来的结果,这导致零件的加工质量难以保证,常出现零件超差甚至报废等后果。

有关加工质量预测的研究以表面粗糙度的预测为主。方法主要包括基于知识/专家系统的方法^[4-6]、基于神经模糊推理系统的方法^[7-10]、基于模糊集的方法^[11]、基于人工神经网络的方法^[12-16]、基于支持向量机的方法^[17]、基于遗传编程的方法^[18]、基于软计算的方法^[19-20]等。

除了加工质量以外,加工时间也无法预测准,这导致工时定额不准,数控加工的管理水平难以进一步提高。

(2) 生产成本的不可控制性。

在传统的机械加工中,对于单件或者小批量生产,切削参数的确定是工艺人员通过查询机械加工手册并结合已有的加工经验来完成的。对成批生产,还要根据工艺试验结果进行工艺参数的校正。

这不仅增加了工艺编制的工作量,而且增大了生产成本,延长了生产周期,越来越不适应当今生产的需求。同时由于参数选择不当,将会造成刀具磨损剧烈,加

大加工成本。

(3) 生产效率的不可控制性。

在有些加工过程中(如自由曲面^[21-22]),切削条件一般是变化的,但目前的数控加工中多凭经验选择保守的切削参数,在加工过程中这些参数保持不变,从而大大降低了数控机床的生产效率。通过建立优化系统,优化工艺参数,可达到提高生产率、降低生产成本的目的。此外,实际生产中,很多高速机床仍使用低速的切削参数,没能发挥机床的效率,使得生产效率很低。

要解决以上这些实际生产问题,就要求整个优化过程必须要满足以下条件。

(1) 优化结果直观明了。

建立加工参数与加工结果之间的关系(最好是显式的),输入确定的加工参数就能预测出相应的具有一定准确度的加工结果以及加工时间,从而大大提高加工结果的可预测性。

(2) 优化模型清晰可行。

目前,许多研究工作得出的结论还没形成共识,对参数优化问题的认识不够清晰,其优化模型中还有很多不确定的因素,需要深入探讨才能加强生产成本和生产效率的控制。由于铣削加工是断续切削,具有更加复杂的切削特性,所以数控铣削的工艺参数优化更需要给予足够的重视。

(3) 优化算法高效可靠。

数控加工的高精度高性能要求优化结果要准,优化环境的变化要求优化速度要快。这些都对优化算法提出了更高要求,即算法不仅要可靠,还要高效率。

(4) 优化目标调和平衡。

作为数控加工的基本控制量,工艺参数的选择不当不仅难以保证工件加工精度及控制加工成本,而且可能因切削力过大等原因造成机床被迫停机,影响数控机床效能的正常发挥。

可见,数控加工中的优化目标很多,其中有些目标之间相互冲突,如何协调多个目标并同时进行优化,是提高加工效率和加工质量的重要手段。以提高数控加工效率、降低加工成本、获得高质量产品为目的进行的数控加工参数多目标优化研究,对提高数控加工经济效益具有重要意义。

2 数控加工参数优化研究

数控加工参数优化范围包括无约束优化和约束优化、单目标优化和多目标优化、单刃优化和多刃优化等。在实际生产当中,约束条件、优化目标是多方面的,并且一道工序可能会使用一把或多把铣刀进行加工,而每把铣刀的切削刃都大于或等于2个,因此数控切削参数优

化研究为多约束、多目标、多切削刃、单刀具或多刀具优化。

此外,还有一些特定环境,如在网络环境下的参数优化^[23]。

2.1 已有的数控加工参数优化方法

(1) 基于试验的优化方法。

传统的优化方法在最优化思想的指导下,以切削试验为基础,通过广义优化试验进行参数优化。试验优化设计技术将优化思想用于试验全过程,其理论基础是概率论和数理统计。试验设计方法有很多,其中最常用的是田口方法(Taguchi Method),即以正交试验设计、方差分析、信噪比分析为主要工具的试验优化技术。与试凑法相比,田口方法具有试验次数少、试验信息丰富、优化成果多等特点,但其缺点是仍需要一定数量的切削试验和长期具体生产实践的积累,需花费大量的人力、物力和时间。

(2) 基于数值模拟的优化方法。

随着计算机技术的迅速发展,现在多采用数值模拟方法来对复杂的非线性过程进行预测和优化。CAD/CAM/CAE技术的应用日益普遍,而计算机模拟则是目前塑性加工中最为活跃的领域。

工艺参数的优化设计应建立在对成形过程模拟分析的基础上,正确分析模型是建立正确优化目标函数、约束条件并选择合适设计变量的前提。基于数值模拟对工艺参数进行优化设计应用广泛。商用软件VERICUT、Matlab-GUIDE、MARC、PAM-STAMP、DEFORM2D&3D、ANSYS、Third Wave、FORGE2D&3D、ABAQUS等广泛应用于数值模拟。

采用数值模拟进行优化设计,可以大大缩短设计时间,对加工质量进行预测,同时对工艺进行精确设计,减少了设计成本及原材料的浪费。

(3) 基于专家知识的优化方法。

专家系统将人类专家的知识 and 经验以知识库的形式存入计算机,并模仿人类专家解决问题的方法和思维过程,利用这些知识和经验对现实中的问题进行判断和决策。专家系统利用知识库中的知识指导试验设计、数值模拟、结果解释、选择合理的优化方法并推荐迭代初值等,从而减少试验次数和迭代次数,提高优化精确度,降低成本。

应用于加工参数优化的专家系统,例如切削用量匹配知识库(专家系统);基于知识工程(Knowledge Based Engineering, KBE),通过知识的驱动和繁衍对工程问题和任务提供最佳的解决方案的计算机集成处理技术。

建立合理、科学的数控切削知识库系统对发展机械

制造业具有长远的战略意义,一旦系统建成,便可通过计算机网络实现数据共享,获取所需的各种切削数据。由于这是一项巨大工程,要耗费大量的人力、物力和资金,在国内有些科研院所研制了一些面向行业的小型数据库,但至今我国还不具有通用性的金属切削知识库系统。

(4) 基于优化算法的优化方法。

实现参数的优化采用的方法可以归结为2类,一类是离线方法,另一类是在线方法。其中离线方法有遗传算法、模拟退火算法、粒子群算法、神经网络和混合优化算法。由于离线方法需要在编程前设定优化的参数,仍然无法预料加工过程中干扰因素的影响,因此在线实时监控方法应得到重视。离线算法分为传统优化算法和现代优化算法。

其中,传统优化算法包括线性规划、单纯形法、坐标轮换法、复合形及分层复合形法、图解法、几何规划、加权法、罚函数法、离散变量网格直接寻优算法等。现代优化算法包括粒子群优化算法^[24-25]、模拟退火算法^[25-26]、蚁群系统^[27]、人工蜂群算法^[25]、遗传算法^[28]、变搜索域遗传算法^[29]、自适应遗传算法^[30]、模拟退火遗传算法、混合惩罚函数方法^[31]、神经网络^[32],其中进化算法^[33]和人工智能^[34]应用广泛。

上述方法各有优劣,但是总体来说,基于优化算法尤其是现代优化算法的优化方法将是研究发展的趋势。

2.2 数控加工参数优化模型

数控切削优化模型可以分为4个层次。

第一层次是生产需求,被加工的工件材料和工件形状;第二、三、四层次分别是优化模型需要确定的目标函数、约束条件和决策变量,这3个层次是优化模型的主体。

(1) 目标函数。

数控加工参数优化的目标可以分为3类。

第一类是与加工效率相关的目标,如材料去除率、加工时间、机器利用率;

第二类是与加工质量相关的目标,主要体现在减少加工误差、提高工件的加工精度,减小表面粗糙度、提高工件的表面质量,以及减少残余应力、提高工件的使用寿命;

第三类是加工成本相关的目标,如材料成本和工具成本,其中工具成本中最重要的是刀具磨损。

(2) 约束条件。

整个数控加工过程复杂多变,需要满足的约束很多。如切削速度约束、进给量约束、切削功率约束、切削扭矩约束、工件刚度约束、刀片强度约束、零件表面粗糙度约束等。

(3) 决策变量。

数控加工参数优化中需要确定的重要变量是切削速度、进给量和切削深度^[35]。

(4) 建模方法。

加工参数优化模型分为机械模型和经验模型。输入输出和加工参数之间的关系直接由推导而来的模型为机械模型,然而当前并无通用的机械模型^[36]。现有的建模方法主要有统计回归技术、基于模糊集的建模技术和基于人工神经网络的建模技术。

3 研究展望

3.1 优化模型的研究

现有的数控切削优化模型多是对切削速度、切削深度、进给量等工艺参数进行优化,但研究背景主要是针对1台机床或1种工件材料,使得优化模型的实用功能受到很大的限制。未来对于优化模型的优化空间应进一步拓展,主要包括以下部分。

(1) 优化目标由单目标向多目标延伸。

有关多目标问题的研究^[30-31,33,37-39]较少。解决多目标的方法是主要目标法或线性加权法,而不是真正意义上的多目标处理方法,考虑诸多相互矛盾的多目标应该采用先优化再决策的多目标优化方法。

(2) 优化算法由离线调整向在线自适应控制延伸。

加工参数优化分为离线调整和在线自适应控制。有些加工过程的要求较高,需要对加工参数进行在线自适应控制。整个过程中需要传感器、传感器信息的表达和加工参数的优化。

对于连续在线控制而言,最重要的因素是加工控制或优化加工参数的执行时间。为保证加工过程的安全性和可靠性,对于刀具磨损、机器故障和其他事故的处理时间必须在s级甚至ms级。然而,一个对于加工控制的简单适应是不够的,因为这些系统的执行时间相对于加工控制需要的反应时间太长。

一些将人工智能技术用于在线控制的研究,如通过神经网络建立输入变量和输出变量之间的关系,其中输入变量为进给速率、切削速度等,输出变量为来自传感器的信息,如切削力、刀具磨损、温度、声发射等^[40-41]。如何建立输入、输出变量之间的显式函数关系,进而对加工参数进行在线控制是使该类问题更贴近实际生产的重要延伸。

(3) 优化模型由定参数向变参数延伸。

复杂零件铣削过程中的切削用量(切削深度和切削宽度)变化较大。为了尽可能贴近实际,需要根据不同时刻的切削用量选择不同的加工参数。在数控机床的整个加工过程中,不可能每时每刻调整加工参数,并且

切削用量虽然在整个过程中变化较大,但在某一个小时内变化可能并不大,所以可以采取相应的措施将变参数问题转化为多参数问题^[24]或者带时间窗口的优化问题。

(4) 优化模型由确定型向模糊化延伸。

由于加工过程的复杂性和不确定性,切削加工参数优化问题本质上是模糊的,而传统的优化模型则具有不符合生产实际的缺点,应该采用模糊的方法进行处理,建立“非确定性”的模型,进而获得更加贴近实际生产的模型。

3.2 优化算法的研究

优化模型的拓展将会带来优化空间的复杂化,从连续变量到离散变量,从线性到非线性优化,从静态到动态优化,优化计算工作量和优化全局最优解的矛盾更加突出。

近年来,着眼于群体智能优化的研究越来越多,类电磁机制算法、基于元胞自动机的粒子群优化算法等智能优化通过诸多个体之间的互动协作搜寻全局最优解,不仅鲁棒性能好,而且适于解决动态优化问题,有利于推动加工参数优化问题的进一步发展。

3.3 加工表面粗糙度的预测

表面粗糙度是机械产品广泛使用的产品质量指标和技术要求。实现理想的表面质量对于功能行为至关重要。表面粗糙度的形成机制和许多不可控因素都取决于加工过程,导致了简单解决方法的不可行性。一般常见的策略是根据经验保守选择加工参数,既不能保证加工表面质量也不能获得高的金属去除率。

建立起加工表面粗糙度和加工参数之间的关系,从而根据设定的参数预测可以加工出来的表面粗糙度是保证表面粗糙度的重要途径,同时也能获得高的金属去除率。基因表达式编程算法在函数发现方面具有很广泛的应用和很好的效果,将其应用于表面粗糙度的预测将会取得不错的结果。

4 结束语

本课题概述了数控加工参数优化的发展现状,指出了存在的问题,并阐述了数控加工参数优化的必要性;然后从优化方法和优化模型2个方面集中介绍了关于数控加工参数优化的研究;最后指出了需要解决的问题,以及未来的发展方向。数控加工参数优化是一项非常重要且艰巨的工作,有待进一步深入研究。

本文共有参考文献41篇,因篇幅所限,未能一一列出,如有需要请向本刊编辑部索取。

(责编 良辰)