

数控机床轻量化技术研究进展*

张松^{1,2}, 刘斌^{1,2}, 房玉杰^{1,2}

(1. 山东大学机械工程学院, 高效洁净机械制造教育部重点实验室, 济南 250061;

2. 山东大学机械工程国家级实验教学示范中心, 济南 250061)

[摘要] 随着工业技术的快速发展,对数控机床和生产系统的要求越来越多地聚焦在节能与绿色发展等问题上,这给数控机床开发人员带来了新的挑战。轻量化技术不仅能够节省大量材料,而且还能优化机床结构的性能,为高性能数控机床的研制创造了有利条件。阐述了轻量化技术在数控机床中的应用,讨论了轻量化设计方法对机床绿色循环制造及其可持续发展的影响;着重分析了实现数控机床轻量化设计目标的有效方法及技术手段,并且对轻量化技术在数控机床设计中的发展前景进行了展望,提出一些建议。

关键词: 绿色制造;数控机床;轻量化;结构优化;新型轻质材料;多学科综合优化

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.14.014



张松

教授、博士生导师,山东泰山学者特聘专家,长期从事高效切削加工机理及相关技术研究,负责多项国家级和省部级科研课题,获得省级科技进步二等奖 2 项,发表研究论文 100 余篇,授权发明专利 4 项。

数控机床作为“工业母机”,为制造业的发展作出了重要贡献,因此提高数控机床的结构设计和制造水平是发展先进制造技术的重要内容^[1]。虽然目前我国数控机床行业有一定的自主研发能力,但在数控机床的稳定性、加工误差控制以及制造成本方面与欧美发达国家相比,差距仍然比较大。现阶段,国内高性能数控机床研制的成本仍然比较高,主要原因是国内的机床设计大多依赖于设计经验,设计创新力度不够。同时为了保证数控机床的加工精度需要不断提高机床刚度,由此便需要增加机床各零部件的壁厚及体积,从而造成数控机床的质量过大。因此,如何在保证机床加工精度和刚度等条件下对数控机床进行“减重”成为了当前热点议题,数控机床轻量化设计也成为了机床绿色制造领域最为有意义的课题之一。

数控机床轻量化技术是指在保证加工精度、刚度及本身静动态特性等条件下,对机床进行“瘦身”,减去

不必要的重量,同时降低数控机床在加工时的能耗。现阶段,轻量化技术的应用主要是集中在发展趋势较好的汽车领域,如汽车的车身框架和汽车的底盘结构减重等,而针对数控机床等方面的应用还相对较少。目前数控机床轻量化方法主要包括 3 个方面,一是优化结构,在保证数控机床静态性能不变的前提下,尽可能减少材料的使用;二是采用新型轻质材料,在保证刚度、强度、结构不变的前提下,对数控机床进行“瘦身”,实现轻量化设计;三是多学科综合优化,综合考虑多个学科之间的协同作用机制及耦合作用,达到机床轻量化设计的目的。

在轻量化技术实际应用中,保证数控机床自身刚度及其加工质量的同时,对其进行轻量化设计是一直以来所面临的关键问题,只有将这一难题解决,才能真正实现数控机床的轻量化^[2]。轻量化设计在机床制造业中应用日益广泛也为数控机床带来了新的发展契机,经过轻量化设计的

* 基金项目: 山东省重点研发计划——重大科技创新工程(2019JZZY010437); 山东省泰山学者工程专项(ts201712002)。

数控机床不仅降低了自重,提高了结构的性能,而且更加符合目前所提倡的绿色制造,同时也是对可持续发展战略的践行。本文结合机床自身的结构特点,具体分析了数控机床轻量化设计的3种途径,即数控机床结构优化设计技术、新型轻质材料在数控机床上的应用以及多学科综合优化在数控机床中的应用设计,以这3种途径为导向综述了轻量化技术在数控机床中的应用,并提出将来需要解决的问题。

数控机床结构优化设计技术

传统的结构优化设计,实际上是指结构分析,主要包括假设、分析、校核和重新设计,重新设计的过程是一个确定合理结构方案的过程。而现在的结构优化设计一般是指在一定的约束条件下,按照实际的要求(要求质量最轻或刚度最大等)进行结构优化,从而获得最符合设计要求的结构方案。

关于数控机床结构优化技术,国内外研究人员已经进行了大量的研究,并取得了丰富的成果。韩国学者 Kim 等^[3]面向微型数控机床采用“三明治”复合材料结构,利用灵敏度分析,优化设计了板筋厚度及复合结构厚度等多个数控机床的主要参数,提高了数控机床的动态性能,实现轻量化设计;德国学者 Weule 等^[4]结合

有限元分析与仿真对数控机床进行拓扑优化,并将得到的数据与传统拓扑优化对比,对比结果显示切削时新的拓扑优化结构性能更加优越;印度学者 Bhat 等^[5]对将灵敏度分析分别与拓扑优化及机床参数相结合的两项优化思想进行了深入研究,研究表明,两种思想对机床的优化都十分有效。在国内,华南理工大学学者姜衡等^[6]采用有限元仿真与模态试验相结合的方式对某型号数控机床进行了静动态特性分析,同时结合多目标遗传算法得到 Pareto 解集,在保证数控机床性能良好的情况下,对机床进行“瘦身”,为数控机床轻量化设计提供了参考依据;大连理工大学闫军等^[7-8]提出了一种周期性微结构的拓扑优化方法,利用均匀化理论,将两个尺度的优化问题集成为一个优化模型中,每次迭代过程只进行一次宏观结构有限元分析和一次微观组织均匀化,从而减少了拓扑优化的工作量;兰铁军等^[9]对某型号加工中心横梁进行尺寸优化,在保证加工中心刚度的前提下,加工中心“瘦身”效果显著;兰州理工大学学者侯运丰等^[10]利用灵敏度分析的理论方法,在保证珩磨机静动刚度的同时,对珩磨机进行尺寸优化,降低了珩磨头的重量;合肥工业大学陈科^[11]对液压机的工作台进行有限元分析,在确保加工性能及刚度满足要求的前

提下,获得最优的尺寸,实现了工作台轻量化的目的;清华大学刘成颖等^[12]针对某卧式加工中心的立柱结构展开研究,通过采用拓扑优化技术得到其基本外形,并不断改进拓扑优化的求解算法,最终结果表明拓扑优化后的加工中心立柱重量降低,实现了数控机床性能的提高,为轻量化的设计提供了理论基础。

根据设计变量的类型,结构优化可以分为尺寸优化、形状优化及拓扑优化3个层次,结构优化的具体发展如图1所示^[13]。

1 尺寸优化

尺寸优化是对于已经存在的结构形状进行轻微的改动,对其细节进行优化,是结构优化中最基础的方法。尺寸优化的设计变量主要是杆件横截面的尺寸或壳体的厚度等,对设计变量进行尺寸优化,得到其最优值,从而实现轻量化设计,节约制造成本^[14-15]。对尺寸优化的研究重点主要聚焦于对其算法的优化以及灵敏度的分析两个方面^[16],其特点主要是:在优化过程中,设计变量以初始值的形式出现且一直不变,因此可以轻易得到优化的数学模型,且算法也比较简单,满足要求的优化结果也较容易得到,在实际的结构设计过程中被广泛应用。

2 形状优化

形状优化的设计变量通常选择

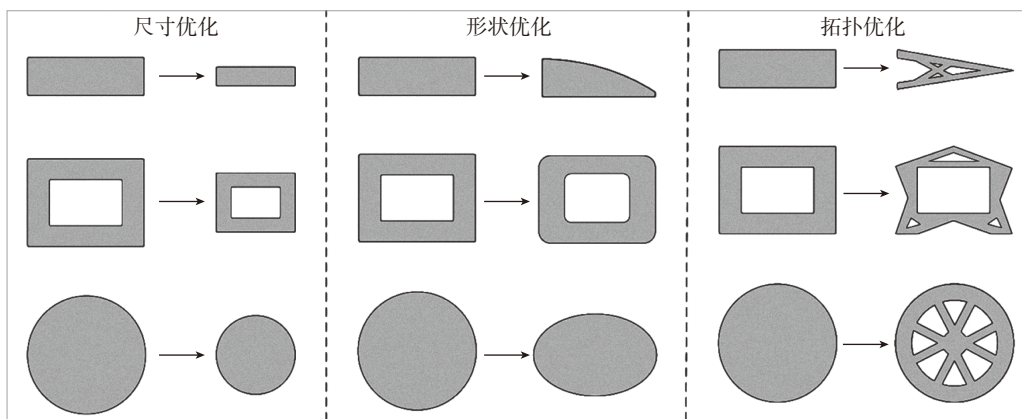


图1 结构优化技术的发展

Fig.1 Development of structure optimization techniques

结构形状边界上控制点的信息,通过优化这些控制点来改进结构的形状,达到轻量化的目的^[17]。它的特点是在优化设计过程中,能对结构的形状进行一定的改变,但优化变量数十分巨大,且无法保证设计边界上光滑度的连续性。

近些年来,部分文献提到可以利用边界单元法对边界上的点进行离散,并以此作为工具来进行形状优化的研究,收获了一些成果,形状优化逐渐走向成熟。扬州大学吴志学^[18]提出了一种模拟生物适应性生长过程的相对应力优化法,并据此得出给定许用应力下连杆的形状优化设计。吉林大学罗伟等^[19]对数控旋压机床纵向进给系统进行了结构优化,结合 ANSYS Workbench 中的“形状优化”功能对车架进行优化设计,通过将目标参数设置为质量降低 30%,生成的拓扑优化云图如图 2 所示(红色部分是可移动部分,灰色部分是保持部分);根据拓扑优化云图,建立了初步的形状优化模型,在可拆卸的红色部分,包括车厢前部、车厢后部、墙壁两侧等处开矩形照明孔,增加或减少内部加强板上的照明孔面积,并以车架重量为目标值,以加强肋开孔面积为形状设计变量,建立了最终形状优化模型(图 3),减轻了车架的重量,改善了机床的静态特性。

3 拓扑优化

目前,尺寸优化和形状优化的研究已相对成熟,但在工程中仍存在一

些结构问题是二者无法解决的,而拓扑优化则可以通过对结构的材料、数量以及材料节点、布局的优化,来寻求设计域内材料的最优分布,为工程中的结构问题提供解决思路。与尺寸优化和形状优化相比,拓扑优化不仅仅是对截面尺寸和形状的优化,更多的是对结构空间连接方式的优化。因此,拓扑优化设计是最复杂的,是现阶段结构优化的难点之一,从事结构优化设计多年的 Kirsch 等^[20-26]也认为拓扑优化设计是最具挑战性的

问题。

拓扑优化是指在给定的设计域内,针对特定的目标、约束、载荷和边界条件,寻找最优的结构配置^[27]。图 4 所示是机床底座拓扑优化设计示例^[28]。

从研究对象上分,拓扑优化主要分为离散结构拓扑优化和连续体变量拓扑优化。

(1) 离散结构拓扑优化。

在尺寸优化和形状优化中,优化前后结构的拓扑构型都不发生变

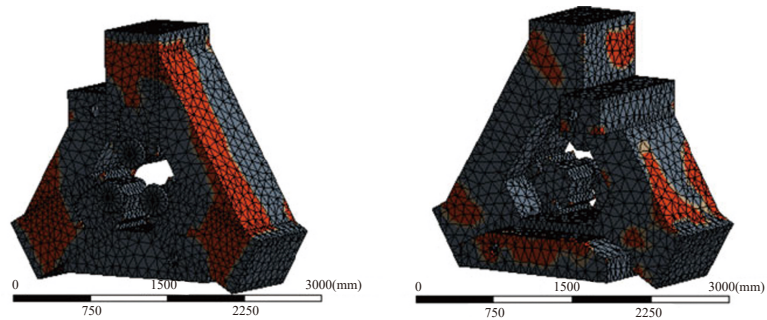


图2 车架初始模型
Fig.2 Initial model of carriage

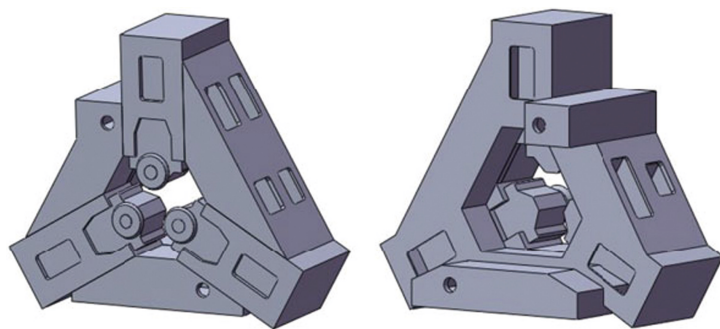


图3 车架最终设计
Fig.3 Final design of carriage

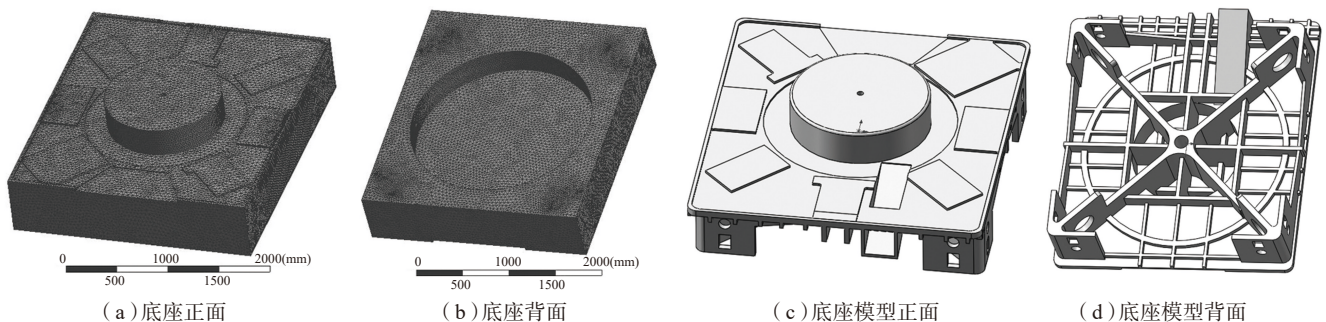


图4 机床底座拓扑优化
Fig.4 Machine base topology optimization

化,而在进行拓扑优化时,其优化算法可能会根据每一点的材料特征来确定材料的最优布局,从而获得新的结构。因此,拓扑优化设计是以结构的拓扑图形信息为设计变量,确定结构件之间最优的连接方式,优化结构中孔洞的数量及形状等,使结构在一定的约束条件下实现材料分布最优^[29]。拓扑优化设计是从对桁架等离散体进行研究开始的,Michell^[30]在1904年采用解析方法对单载荷作用的结构进行了优化设计,并提出了Michell准则。之后国内外的拓扑优化研究学者针对拓扑优化理论方法及其实际应用进行了深入研究,其中段宝岩等^[31]以实际的工况及约束为目标,对内力变量建立线性问题,实现对结构的拓扑优化。

(2) 连续体变量拓扑优化。

连续体结构是拓扑优化的主要研究对象。近年来,拓扑优化的发展主要是针对连续体结构的拓扑优化研究,通过对结构中不同位置的材料是否存在,因此,设计变量的数量比较庞大。若将其转换为有限个单元的问题,设计变量也会随之减少,再运用相关的数学处理方法,删除部分无效单元,可形成连续体变量的新结构,从而实现连续体的拓扑优化^[32]。

近年来,越来越多的国内外学者将优化设计后的结构与数控机床的制造相结合,取得了丰富的研究成果。Cervera等^[33]利用NURBS曲线及边界元理论(BEM)对结构进行拓扑优化,得到最优的拓扑结构;韩国学者Kim等^[34]运用改进的FG-ESO方法对结构进行拓扑优化,获得光滑边界的拓扑结构;另有学者则利用ITD理论方法对平面结构和空间结构进行拓扑优化,得到可加工的最优拓扑优化结构^[35-36]。而德国学者Kroll等^[37]详细地叙述了五轴铣削中心X托架进行拓扑优化的过程,提出了数控机床结构刚度不变,降低

质量,以及质量不变,提高数控机床的结构刚度两种机床轻量化设计思想。五轴铣削中心X托架进行拓扑优化的过程如图5和图6所示^[37]。

新型轻质材料 在数控机床上的应用

随着材料科学的快速发展,数控机床实现轻量化设计的途径不再局限于结构优化这一种方式。在数控机床结构优化的效果不理想时,研究者们开始考虑是否可以通过改变数控机床所用的材料,在保证机床刚度、强度等要求的情况下来实现轻量化。

意大利布雷西亚大学Aggogeri等^[38]提出适合制造数控机床运动部

件的混合轻质材料,如图7^[38]所示,并应用此材料来使数控机床零部件达到轻量化设计,从而减少加工过程中不必要的振动;韩国学者Lee等^[39]对数控机床导轨材料进行了研究,提出在导轨材料中添加碳纤维夹层,即材料结构类似于“三明治”结构,新导轨的重量降低了34%,并且在保证刚度的条件下,阻尼提高了1.5~5.7倍;Baumeister等^[40]提出了中空球形复合材料HSC(Hollow-Sphere-Composites),该材料由硅酸盐、陶瓷等不同的轻质材料成分构成,在维持数控机床静动态特性不变甚至有所改善的前提下,大幅度降低了数控机床的自重;1998年德国学者提出将泡沫金属材料应用于数控机床

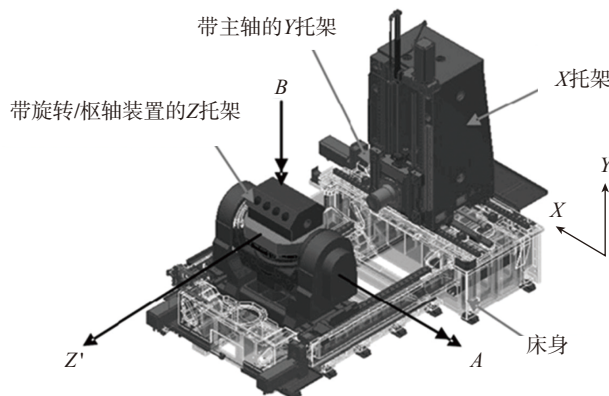


图5 五轴铣削中心是结构分析的参考设计

Fig.5 A 5-axis milling center is reference design for structure analysis

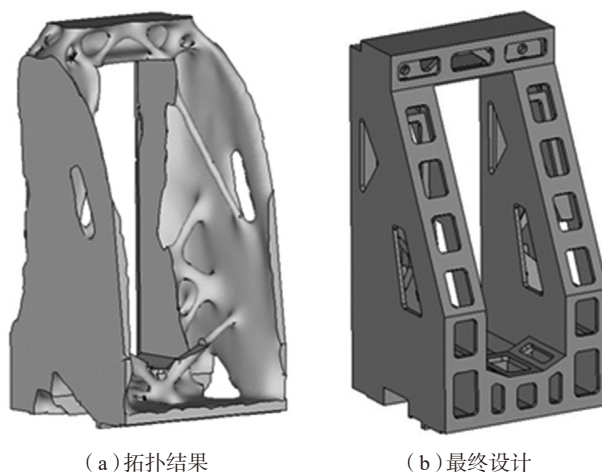


图6 X托架的拓扑优化

Fig.6 Topology optimization of X stand

的成功事例,使得泡沫金属材料在机床制造中应用的越来越广泛^[41]; Cho 等^[42]利用振动试验与有限元仿真的方法对数控机床零部件所应用的复合材料及金属材料的各项性能进行了研究,结果表明:应用复合材料的结构重量减轻了 36.8%,结构刚度提高了 16%,阻尼系数从 2.82% 提高至 3.64%,具体模型对比见图 8^[42]。而在国内,西安交通大学卢天健等^[41]将不同的新型材料应用于不同的数控机床零部件,降低了数控机床的成本和能耗,提高了数控机床的阻尼特性,实现了机床轻量化;徐

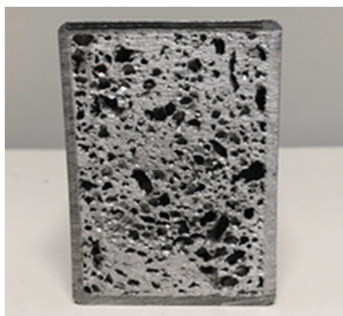
平等^[43]对数控机床的工作台进行了研究,提出了泡沫铝夹芯结构高速移动工作台,与传统材料的工作台相比较,新轻质材料的工作台重量更轻、固有频率更高且谐振响应幅值更低,在保证数控机床静态性能的前提下,实现了轻量化。

过去数控机床的主要材料大多是钢或铁,功能单一,且存在很多的问题。目前,在国家绿色制造及可持续发展战略的影响下,泡沫金属复合材料、HSC 轻质材料及蜂窝材料等多孔材料被越来越广泛地应用到数控机床的制造生产中。这些多孔轻质材料的密度比较小,重量轻,隔音、隔热的效果比较好,在提高数控机床零部件刚度和静态性能的同时,大大降低了数控机床的重量,实现“瘦身”^[2]。因此,数控机床零部件之前所使用的密度比较大的旧材料逐渐被新型轻质材料取代。数控机床的材料进入一个新的发展阶段,越来越

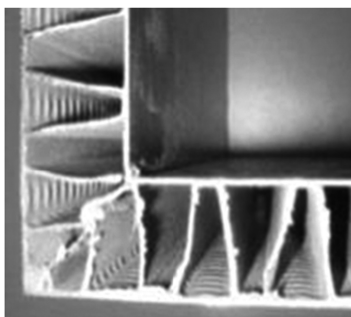
多的轻质材料被用于数控机床的各个零部件,如数控机床的一些主要承重部件,大多“体型”庞大,使用的金属材料多,其成本也比较高。因此在对其进行材料优化时,一般会将承重件的中间材料替换为花岗岩或树脂混凝土,在保证结构件刚度的同时大幅降低重量^[44]。碳纤维作为一种新型的微晶石墨材料,其密度比铝小,但结构强度却要比铝高,同时耐腐蚀,将其应用在数控机床的一些零部件上,不仅可降低机床零部件的重量也增加了其可塑性^[2],并提高了数控机床的寿命。因此,对数控机床各零部件选用合适的轻质材料制造,不仅能使其结构轻量化,提高机床的寿命,也能增强机床及其零部件的稳定性。

多学科综合优化在数控机床设计中的应用

现阶段,在数控机床功能及结构日趋复杂的大趋势下,数控机床产品



(a) 泡沫铝三明治(AFS)



(b) 波纹芯铝三明治



(c) 碳纤维增强复合材料(CFRP)

图7 轻质数控机床结构材料

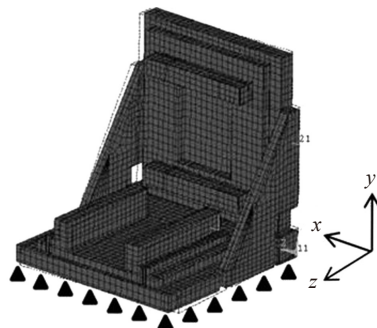
Fig.7 Structural materials of lightweight CNC machine tool



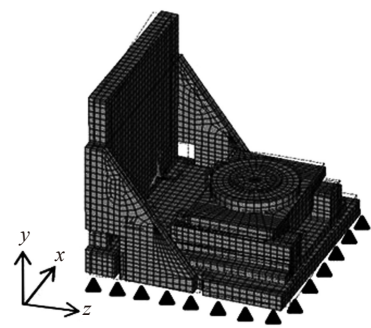
(a) 复合材料-金属混合机床结构



(b) 金属机床结构



(c) 复合材料-金属混合机床结构的有限元模型



(d) 金属机床结构的有限元模型

图8 组装复合材料-金属混合机床结构及其性能

Fig.8 Assembled composites-metal hybrid machine tool structure and its performance

的优化设计也不再单局限于某个学科。由于之前每个学科之间相互独立,相互之间没有耦合作用,所以经过优化设计所得到的结果也仅是一个学科的目标达到最优,并没有充分利用耦合作用,以至于产品的综合性能达不到最优^[1]。为了跟随时代的步伐,适应如今的工程产品设计要求,实现多个学科的协同优化设计,美籍波兰裔科学家、NASA的高级研究员 Sobieszczanski-Sobieski^[45]提出了MDO (Multidisciplinary Design Optimization)方法,此方法通过利用系统中相互作用的协同机制来设计复杂的工程产品。

MDO方法成为多学科综合设计优化方法研究领域的坚实基础,根据 Sobieszczanski-Sobieski的重要理论,国内外的科学家们探索出了更多的优化设计措施,并在现实的工程设计应用中取得优异的效果^[46]。Kroo等^[47]对运输机结构、气动等模块应用子空间优化方法,使优化分析的时间缩短了69%;Renaud等^[48]针对机械构件的设计采用了并行子空间优化方法,得到了满意的结果;Sellar等^[49]在简化飞机及旋翼机的结构问题上采用了响应面的并行子空间优化算法,降低了分析的次数,提高了找全局最优解的可能性;Braun等^[50]应用协同优化方法,求解出可反复使用的运载器设计问题,完成了多问题的并行设计。

随着多学科综合优化的广泛应用,在20世纪90年代末,许多工业产品的设计也将多学科综合优化应用其中^[46],波音公司在F-18E飞机的设计中,通过对多学科综合优化的验证及改进,快速找到了设计方案^[51];洛马公司在对F-22战机进行结构设计时亦采用了多学科综合优化技术,其在外载荷分布控制率、刚度、应力等方面有着重要的贡献^[52]。在国内,上海大学宋建军^[1]通过多学科综合优化对数控机床关键零部件的设计

开展了研究,并提出了相关的优化方法;天津大学田建伟^[53]综合利用试验设计及多目标优化算法,对机床结构方案进行了改进设计,提升了机床性能,如图9^[53]所示;华中科技大学赵明^[54]通过探索多学科综合优化技术在数控机床的应用,解决了数控机床中多个要害问题;西安交通大学于海莲等^[55]对数控机床的立柱等关键零部件运用响应面模型与多目标遗传算法相结合的方法进行了多学科综合优化,得到了满意的设计方案。

在汽车制造领域,清华大学苏瑞意等^[56]以减重及保证静动态性能良好为目标,采用协同优化的方法对客车的车身进行了多学科综合优化,得到了较好的结果;同济大学王平等^[57]运用多目标遗传算法对汽车

车身进行了多学科综合优化,在保证刚度及静动态性能的同时,实现了汽车减重的目的。

由于多学科综合优化设计技术涉及学科众多,而且要考虑学科之间耦合作用的不确定性。因此,在进行多学科综合优化设计时,必须要同时考虑到结构强度、刚度、成本及静动态性能对数控机床综合性能的影响,以保证优化得到的模型在实际应用中的有效性^[44]。数控机床在设计结构时,应以简单化为原则,将不必要的零件去除,简化成本,而对于传动系统的设计,以减少尺寸链、降低能源消耗为目标,提高传动精度。在数控机床实行轻量化技术时,结合多学科之间的耦合作用,分析零部件之间的连接方式以及能量转化形式,考虑数控机床不同部件之间材料的融合

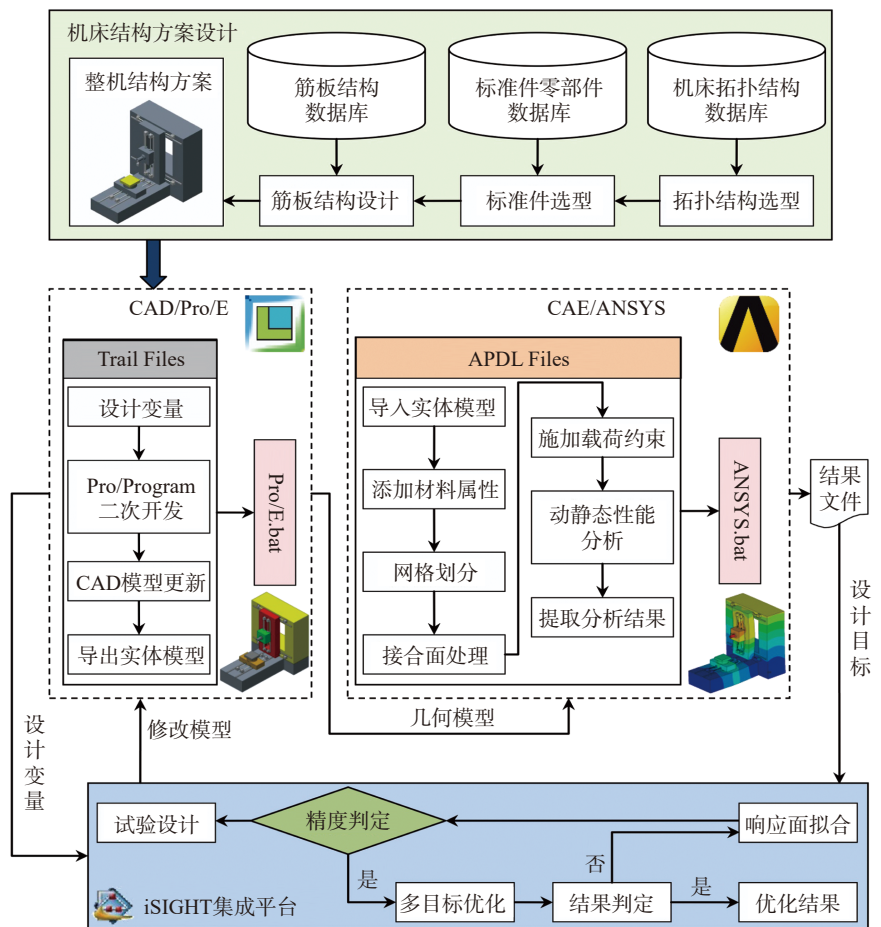


图9 机床结构方案设计

Fig.9 Machine tool structure design

形式、结构形式、刚度、加工精度、尺寸传动链等其他因素,实现对数控机床零部件加工工艺的优化,从而实现对数控机床综合性能的优化。同样,数控机床振动的控制,以及刚度、强度等基本指标的改进也离不开多学科耦合作用的支持,这可以实现数控机床轻量化设计的最大化^[2],并促进数控机床现代化的发展。

结论

通过总结最近几年轻量化技术在数控机床领域里的应用,可以看出轻量化技术推动了数控机床的研究和发展,主要总结为以下3个方面。

(1) 结构优化设计方面,目前在数控机床行业,研发人员越来越多地采用拓扑优化这一新兴的结构优化方法。拓扑优化较尺寸优化和形状优化有更大的应用范围及空间,轻量化效果更加显著。

(2) 新型轻质材料应用方面,随着材料科学的发展,越来越多的新兴轻质材料被应用于数控机床零部件的制造当中,使得数控机床的结构更加轻量化,同时寿命及稳定性都得到了一定的提高。

(3) 多学科综合优化方面,在设计过程中,通过考虑不同学科之间的耦合作用,使数控机床的综合性能达到最优,保证优化得到的模型在实际应用中的有效性。

目前,尽管轻量化技术在数控机床领域的应用取得了显著的进步,并且体现了巨大的应用潜力,但应该注意到,传统的数控机床设计仍然存在一些问题与不足,值得以后做进一步的探索:

(1) 数控机床的轻量化结构有一定的局限性,大多是设计者的经验水平问题,如果在投入到实际应用中再发现问题,则需要投入更多的人力、物力。因此,加强数控机床轻量化结构理论设计,从根源上解决结构优化问题、降低制造成本是目前数控机床

轻量化设计面临的关键问题之一。

(2) 新型轻质材料某些方面的性能要优于数控机床的旧材料,但其制造成本、制备的难易程度及加工工艺的复杂性仍是亟需解决的问题。

(3) 近年来,自然界生物的优点在多个行业被人们广泛应用,取得了良好的效果。但目前对于结构仿生学理论的创新设计却少有研究者,仅有少数学者发表过相关的研究理论,目前仍处在一个探索的阶段。

参考文献

- [1] 宋建军. 多学科优化方法在数控机床设计中的应用研究[D]. 上海: 上海大学, 2016.
- [2] SONG Jianjun. Application of multidisciplinary optimization method in NC machine tool design[D]. Shanghai: Shanghai University, 2016.
- [3] 秦飞, 孙浩. 轻量化技术在机床设计中的应用[J]. 科技风, 2018(14): 136.
- [4] QIN Fei, SUN Hao. Application of lightweight technology in machine tool design[J]. Technology Wind, 2018(14): 136.
- [5] KIM D I, CHANG S H, JUNG S C. Parametric study on design of composite concrete sandwich structures for precision machine tool structures[J]. Composite Structures, 2006, 75(1): 408-414.
- [6] WEULE H, FLEISCHER J, NEITHARD W, et al. Structural optimization of machine tools including the static and dynamic workspace behavior[C]//Proceedings of 36th CIRP-International Seminar on Manufacturing Systems. Saarbruecken, 2003.
- [7] BHAT K G, KUNDRA T K, MODAK S V, et al. Optimization driven design of lean machine tool structures[C]//Proceedings of Transaction of the North American Manufacturing Research Institution of SME NAMRC. Detroit, 2014.
- [8] 姜衡, 管贻生, 邱志成, 等. 基于响应面法的立式加工中心动静态多目标优化[J]. 机械工程学报, 2011, 47(11): 125-133.
- [9] JIANG Heng, GUAN Yisheng, QIU Zhicheng, et al. Dynamic and static multi-objective optimization of a vertical machining center based on response surface method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(11): 125-133.
- [10] LIU L, YAN J, CHENG G D. Optimum structure with homogeneous optimum truss-like material[J]. Computers & Structures, 2008, 86(13/14): 1417-1425.
- [11] YAN J, CHENG G D, LIU L. A uniform optimum material based model for concurrent optimization of thermoelastic structures and materials[J]. International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization, 2008, 2(4): 259-266.
- [12] 兰铁军, 刘德栋, 段周波, 等. 基于 TOPO&DXVT 的立式加工中心横梁复合优化设计[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2011(5): 89-92.
- [13] LAN Tiejun, LIU Dedong, DUAN Zhoubo, et al. A complex optimization method of the beam of vertical machine center based on TOPO & DXVT[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2011(5): 89-92.
- [14] 侯运丰, 陈刚, 李隆. 基于 ANSYS Workbench 的双进给珩磨头的刚度优化[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2013(12): 53-54.
- [15] HOU Yunfeng, CHEN Gang, LI Long. Stiffness optimization of dual-feed honing head based on ANSYS Workbench[J]. Modular Machine Tool & Automatic Processing Technology, 2013(12): 53-54.
- [16] 陈科. 基于工程分析的液压机工作台轻量化设计[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2008.
- [17] CHEN Ke. Lightweight design of hydraulic press table based on engineering analysis[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2008.
- [18] 刘成颖, 谭锋, 王立平. 基于拓扑优化与筋板布局的立柱轻量化设计[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(4): 1-4.
- [19] LIU Chengying, TAN Feng, WANG Liping. Lightweight design of column based on topology optimization and rib layout[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technology, 2015(4): 1-4.
- [20] WANG Y J, WANG Z P, XIA Z H, et al. Structural design optimization using isogeometric analysis: A comprehensive review[J]. Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2018, 117(3): 455-507.
- [21] 王伟, 杨伟, 赵美英. 大展弦比飞翼结构拓扑、形状与尺寸综合优化设计[J]. 机械强度, 2008, 30(4): 596-600.
- [22] WANG Wei, YANG Wei, ZHAO Meiyang. Integrate topology/shape/size optimization into high aspect-ratio wing design[J]. Journal of Mechanical Strength, 2008, 30(4): 596-600.
- [23] 王赢利. 新能源汽车白车身结构拓扑及尺寸优化设计[D]. 大连: 大连理工大学

学, 2012.

WANG Yingli. Topology and size optimization design of new energy vehicle body-in-white structure[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.

[16] ARORA J S, HAUG E J. Methods of design sensitivity analysis in structural optimization[J]. AIAA Journal, 1979, 17 (9): 970-974.

[17] 侯贯泽, 刘树堂, 简国威. 工程结构优化设计理论与方法[J]. 钢结构, 2009, 24(8): 30-33.

HOU Guanze, LIU Shutang, JIAN Guowei. Theory and method for optimum design of engineering structures[J]. Steel Construction, 2009, 24(8): 30-33.

[18] 吴志学. 机械零件形状优化设计的仿生学方法[J]. 中国机械工程, 2005(10): 25-29.

WU Zhixue. Bionics method for optimal shape design of mechanical parts[J]. China Mechanical Engineering, 2005(10): 25-29.

[19] LUO W, YANG Z, CHEN F, et al. Research on structure optimization of longitudinal feed system design of CNC spinning machine[C]//Proceedings of International Conference on Mechanical Design. Berlin: Springer, 2017: 853-871.

[20] KIRSCH U. Integration of reduction and expansion processes in layout optimization[J]. Structural Optimization, 1996, 11(1/2): 13-18.

[21] KIRSCH U, TOPPING B H V. Minimum weight design of structural topologies[J]. Journal of Structural Engineering, 1992, 118(7): 1770-1785.

[22] KIRSCH U. On singular topologies in optimum structural design[J]. Structural Optimization, 1990, 2(3): 133-142.

[23] KIRSCH U. Optimal topologies of structures[J]. Applied Mechanics Reviews, 1989, 42(8): 223-239.

[24] KIRSCH U. Optimal topologies of truss structures[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1989, 72(1): 15-28.

[25] KIRSCH U. Optimal topologies of flexural systems[J]. Engineering Optimization, 1987, 11: 141-149.

[26] KIRSCH U, TAYE S. On optimal topology of grillage structures[J]. Engineering With Computers, 1986, 1(4): 229-243.

[27] ZHU J H, ZHANG W H, XIA L. Topology optimization in aircraft and aerospace

structures design[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2016, 23(4): 595-622.

[28] 赵海鸣, 蒋彬彬, 李密. 基于拓扑优化与多目标优化的机床底座结构设计[J]. 机械设计与研究, 2018, 34(4): 100-105.

ZHAO Haiming, JIANG Binbin, LI Mi. Structure design of machine tool base based on topology optimization and multi-objective optimization[J]. Machine Design & Research, 2018, 34(4): 100-105.

[29] 郭中泽, 张卫红, 陈裕泽. 结构拓扑优化设计综述[J]. 机械设计, 2007, 24(8): 1-6.

GUO Zhongze, ZHANG Weihong, CHEN Yuze. An overview on the topological optimization design of structures[J]. Journal of Machine Design, 2007, 24(8): 1-6.

[30] MICHELL A G M. LVIII. The limits of economy of material in frame-structures[J]. Philosophical Magazine and Journal of Science, 1904, 8(47): 589-597.

[31] 段宝岩, 叶尚辉. 考虑性态约束时多工况桁架结构拓扑优化设计[J]. 力学学报, 1992, 24(1): 59-70.

DUAN Baoyan, YE Shanghui. On topology optimization of trusses with multiple loading conditions and behaviour constraints[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 1992, 24(1): 59-70.

[32] 周克民, 李俊峰, 李霞. 结构拓扑优化研究方法综述[J]. 力学进展, 2005, 35(1): 69-76.

ZHOU Kemin, LI Junfeng, LI Xia. A Review of Research Methods of Structural Topology Optimization[J]. Advances in Mechanics, 2005, 35(1): 69-76.

[33] CERVERA E, TREVELYAN J. Evolutionary structural optimisation based on boundary representation of NURBS. Part I: 2D algorithms[J]. Computers & Structures, 2005, 83 (23/24): 1902-1916.

[34] KIM H, QUERIN O M, STEVEN G P, et al. Improving efficiency of evolutionary structural optimization by implementing fixed grid mesh[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2002, 24(6): 441-448.

[35] WANG P. Multidisciplinary design optimization of vehicle body structure based on collaborative optimization and multi-objective genetic algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(2): 102.

[36] VICTORIA M, QUERIN O M, MARTI P. Topology design for multiple loading conditions of continuum structures using isolines

and isosurfaces[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2010, 46(3): 229-237.

[37] KROLL L, BLAU P, WABNER M, et al. Lightweight components for energy-efficient machine tools[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2011, 4(2): 148-160.

[38] AGGOGERI F, BORBONI A, MERLO A, et al. Vibration damping analysis of lightweight structures in machine tools[J]. Materials, 2017, 10(3): 297.

[39] LEE D G, DO SUH J, SUNG KIM H, et al. Design and manufacture of composite high speed machine tool structures[J]. Composites Science and Technology, 2004, 64(10/11): 1523-1530.

[40] BAUMEISTER E, KLAEGER S, KALDOS A. Lightweight, hollow-sphere-composite (HSC) materials for mechanical engineering applications[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 155: 1839-1846.

[41] 卢天健, 张钱城, 王春野, 等. 轻质材料和结构在机床上的应用[J]. 力学与实践, 2007, 29(6): 1-8, 26.

LU Tianjian, ZHANG Qiancheng, WANG Chunye, et al. Application of lightweight materials and structures in machine tools[J]. Mechanics in Engineering, 2007, 29(6): 1-8, 26.

[42] CHO S K, KIM H J, CHANG S H. The application of polymer composites to the table-top machine tool components for higher stiffness and reduced weight[J]. Composite Structures, 2011, 93(2): 492-501.

[43] 徐平, 肖振, 于英华, 等. 泡沫铝夹芯结构高速移动工作台研究[J]. 机械设计, 2012, 29(3): 65-68.

XU Ping, XIAO Zhen, YU Yinghua, et al. Study of high-speed moving table with aluminum foam sandwich structure[J]. Journal of Machine Design, 2012, 29(3): 65-68.

[44] 宋伟. 机床设计中轻量化技术的应用[J]. 民营科技, 2015(6): 19.

SONG Wei. Application of lightweight technology in machine tool design[J]. Private Technology 2015(6): 19.

[45] SOBIESZCZANSKI-SOBIESKI J. Multidisciplinary design optimization: an emerging new engineering discipline[M]. Berlin: Springer Netherlands, 1995.

[46] 陈文. 基于多学科设计优化理论的数控机床综合误差补偿的并行算法[D]. 北京: 北京工业大学, 2009.

CHEN Wen. Parallel computation of synthesis errors compensation for CNC machine

tool based on MDO theory[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2009.

[47] KROO I, ALTUS S, BRAUN R, et al. Multidisciplinary optimization methods for aircraft preliminary design[C]//Proceedings of 5th Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization. Panama, 1994.

[48] RENAUD J E, GABRIELE G. Improved coordination in nonhierarchical system optimization[J]. AIAA Journal, 1993, 31(12): 2367-2373.

[49] SELLAR R, BATILL S, RENAUD J. Response surface based, concurrent subspace optimization for multidisciplinary system design[C]//Proceedings of 34th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reston, AIAA, 1996.

[50] BRAUN R, MOORE A, KROO I. Use of the collaborative optimization architecture for launch vehicle design[C]//Proceeding of 6th Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization. Reston, AIAA, 1996.

[51] YOUNG J, ANDERSON R, YURKOVICH R. A description of the F/A-18E/F design and design process[C]//Proceeding of 7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium

on Multidisciplinary Analysis and Optimization. Reston, AIAA, 1998.

[52] RADOVCICH N, LAYTON D. The F-22 structural/aeroelastic design process with MDO examples[C]//Proceeding of 7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization. Reston, AIAA, 1998.

[53] 田建伟. 精密卧式加工中心整机结构方案设计与集成优化[D]. 天津: 天津大学, 2016.

TIAN Jianwei. Schematic design and integrated optimization of precession horizontal machining center structure[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.

[54] 赵明. 重型数控机床多学科设计优化若干关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.

ZHAO Ming. Research on some key technologies of multidisciplinary design optimization of heavy-duty CNC machine tools[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.

[55] 于海莲, 王永泉, 陈花玲, 等. 响应面模型与多目标遗传算法相结合的机床立柱参数优化[J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(11): 80-85.

YU Hailian, WANG Yongquan, CHEN Hualing, et al. Parameter optimization of machine tool columns based on response surface model and multi-objective genetic algorithm[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(11): 80-85.

[56] 苏瑞意, 桂良进, 吴章斌, 等. 大客车车身骨架多学科协同优化设计[J]. 机械工程学报, 2010, 46(18): 128-133.

SU Ruiyi, GUI Liangjin, WU Zhangbin, et al. Multidisciplinary collaborative optimization design of bus body skeletons[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(18): 128-133.

[57] 王平, 郑松林, 吴光强. 基于协同优化和多目标遗传算法的车身结构多学科优化设计[J]. 机械工程学报, 2011, 47(2): 102-108.

WANG Ping, ZHENG Songlin, WU Guangqiang. Multidisciplinary optimization design of vehicle body structure based on collaborative optimization and multi-objective genetic algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(2): 102-108.

通讯作者: 张松, E-mail: zhangsong@sdu.edu.cn.

Research Development of Lightweight Technology for CNC Machine Tools

ZHANG Song^{1,2}, LIU Bin^{1,2}, FANG Yujie^{1,2}

(1. Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture of Minister of Education, School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Key National Demonstration Center for Experimental Mechanical Engineering Education, Shandong University, Jinan 250061, China)

[ABSTRACT] With the rapid development of industrial technology, the requirements for machine tools and production systems are mostly focused on energy saving and green development, which brings new challenges to designers of machine tools. Lightweight technology not only saves a lot of materials, but also optimizes the performance of machine structure, which creates favorable conditions for the development of high-performance CNC machine tools. This paper describes the application of lightweight technology in CNC machine tools, discusses the influence of lightweight design method on green cycle manufacturing and its sustainable development of CNC machine tools. It also emphatically analyzes the effective methods and technical means to achieve the goal of lightweight design of CNC machine tools. Finally, it prospects the development prospect of lightweight technology in CNC machine tool design, and puts forward some suggestions.

Keywords: Green manufacturing; CNC machine tool; Lightweight; Structure optimization; New lightweight materials; Multidisciplinary comprehensive optimization

(责编 逸飞)