DOI: 10.3901/JME.2020.21.186

机床结构轻量化设计研究进展*

李天箭 丁晓红 李郝林

(上海理工大学机械工程学院 上海 200093)

摘要: 对机床进行优化的结构构型设计,使得材料在机床结构空间内更加合理地分布和有效地利用,一直都是机床设计工作者追求探索的目标。论述机床构型和结构件轻量化设计的研究历程和技术发展,对机床结构轻量化设计中常用的现代设计方法:参数优化、结构拓扑优化、多方法综合结构设计、仿生优化设计方法进行具体技术介绍和综合评述,并对近年兴起的仿生优化设计方法进行从方法、实现手段和轻量化效果等方面重点分析和评述,对机床构型和结构件轻量化设计研究的未来发展提出展望。

关键词: 机床; 结构件; 构型; 轻量化

中图分类号: TH122

Research Progress on Lightweight Design of Machine Tool Structure

LI Tianjian DING Xiaohong LI Haolin

(School of Mechanical Engineering, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 200093)

Abstract: The optimized design of the machine tool structure, which makes the material more rationally distributed and effectively utilized in the machine tool structure space, has always been the pursuit goal of the machine tool design workers in the structural design. In this paper, the modern design methods commonly used in the machine tool structure are reviewed comprehensively for lightweight design. The parameter optimization, structural topology optimization, empirical design and optimization combined method, and bionic optimization design method are analyzed one by one. The research history and technical development of lightweight are discussed with the design examples of machine tool structural parts. The bionic optimization methods, which has emerged in recent years, are also provided and analyzed from the methods, implementation and lightweight effects. Moreover, several suggestions are included according to the latest development of structural lightweight design.

Key words: machine tools; structure; configuration; lightweight

0 前言

机床结构由机床床身、立柱、主轴箱、工作台等结构件组成,在承受机床切削工作载荷的同时保持机床精度。机床结构部件分为运动部件和支撑部件。运动部件轻量化设计的重要性是显而易见的,TLUSTY指出,即使采用最佳的控制策略和最强大的驱动器,也无法在大质量块运动时实现高精度的转弯控制^[1]。支撑部件的轻量化构型设计可以在节约材料的前提下,实现机床负载的均匀分布,使得

结构实现负载下的应力水平相同。而轻量化结构构型设计,正如 SCHELLEKENS 所指出的,通过“设计最小的势能/最小重量”来平衡“高刚度设计”(Design for a high stiffness with designing for a minimum potential energy)^[2],即,轻量化结构构型设计是:在使用尽可能少的材料同时,正确地将材料放置在正确的形状中,使得每单位重量提供更多的功能^[3]。

机床构型和结构件的轻量化设计,一直都是机床设计工作者在结构设计中追求探索的目标。

早期机床产品的结构设计取决于设计师的经验而不是计算。机床结构布局很大程度上取决于机床类型和机床部件本身的功能。早在1936年,机床产品设计中就已经采用了焊接或铸造的封闭箱型横截

* 国家自然科学基金(51405300)和国家科技重大专项(2019ZX04005-001)资助项目。20200212收到初稿,20200720收到修改稿

面, 以提升结构刚度, 并减少共振^[4]。在 1961 年, 已经有设计者提出在封闭箱型内部添加斜筋(Peters ribbing)可以获得最高的扭转刚度^[5]。这种方法用于改进立柱钻孔机的基板结构构型设计, 与原始结构构型相比, 重量减轻了 32%。

经验设计中有非常多的出色设计案例, 例如将立柱设计为基本形式是具有矩形横截面的截棱锥, 立柱内部中空以便于设计平衡支撑和主轴质量的配重, 为了增加扭转刚度, 避免横截面扭曲, 设计了横向加强筋, 为了获得足够的抗弯刚度, 设计纵向筋板, 导轨位于侧壁, 在导轨后部的立柱壁面上增加横向筋板以增加导轨部分刚度。在此基础上, 又进一步进行了适应力流的外形设计, 横截面从底部到顶部变得越来越小, 导轨位于侧壁附近并由横向筋支撑, 对于给定的刚度, 优化板的壁厚尺寸使立柱的质量最小化^[6]。除立柱外, 经验设计者也提出将主轴箱设计为圆形横截面, 并在管内壁设计加强筋结构, 用以保证较高的扭转刚度并进行了实际设计验证。

由于这些复杂部件在刚性方面的设计基于经验, 通常不知道刚度是否足够。在这种情况下, 一般会设置一个过高的刚度, 而导致设备费用增加^[7-8]。随着计算技术的发展, 借助虚拟样机和仿真方法计算静态力学行为, 可以在一定程度上防止结构刚度过高和费用过高, 显著改善和缩短机床产品开发^[9-11]。

但是, 机床产品对材料利用率、能源效率、环境影响和技术竞争的要求越来越高, 在保证的力学性能条件下, 具有合理经济性的最优结构设计已经变得越来越重要, 这就需要有优化理论支持的结构优化设计。机床部件结构构型的最优化设计, 在保证结构刚度、阻尼和强度的同时, 通过机床结构轻量化构型, 实现材料节省, 是机床产品设计中的一个重要发展方向^[12]。

德国 KROLL 等^[13]探讨了机床中轻量化设计的潜力, 研究了主要类型机床的轻量化需求、潜力和效果, 并采用图表的形式展示了最适合轻量化的机床及部件。我国同济大学张曙教授^[14]也指出, 磨床的运动中通常没有诸如换刀机构的高动态机构或高加速度的进给轴, 其驱动功率主要用于磨削加工, 轻量化的效果不明显, 但随着质量的减轻, 运输费用和运行能耗会有所降低。车床、车铣复合加工机床和通用铣床的运动轴一般情况下没有很大的加速度, 轻量化的节能效果不明显。如果轻量化措施能够降低驱动装置中的电损耗,

特别是降低高动态的刀具交换过程和工件装卸系统无功率也是非常有意义的。五轴联动加工中心、高速铣削中心和龙门加工中心主要用于加工形状复杂的零件, 多轴联动时部件加速和减速频繁, 因此轻量化的结构对其动态性能和加工效率都有正面的影响。激光切割、水刀切割运动行程往往较大, 要求加速度很高, 甚至达到 6 g, 因此对轻量化的需求很迫切。可见机床结构轻量化设计前景广阔, 大有可为^[13-14]。

目前机床结构轻量化设计中常用的优化设计方法主要包括: 参数优化、结构拓扑优化、考虑多种约束条件的多方法综合结构设计, 以及近年兴起的仿生优化设计方法。

1 结构参数优化

结构轻量化是以重量为目标的优化设计。结构参数优化旨在为详细的部件和机器设计找到最佳结构参数(如壁厚、横截面参数、纤维取向等)。在 1982 年, 机床优化的最初, 我国机床结构现代化设计方向知名学者孙靖民先生曾直接定义机床结构的优化设计为: “机床结构的优化设计, 是在满足一定的静、动态性能约束和结构尺寸的侧面约束条件下, 找出结构参数的最佳值, 使其重量为最小”^[15], 并采用主轴为例进行了数学方法推导和实际案例设计^[16]。参数优化设计较拓扑优化容易实现, 可以指导结构设计参数的选择。结构参数优化的基本数学模型为:

$$\begin{aligned} \text{find } \mathbf{X} &= [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \\ \min \quad & W(\mathbf{x}) \\ \text{s.t.} \quad & g_j(\mathbf{x}) \leq 0 \quad j=1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (1)$$

式中, 矢量 $\mathbf{X}$ 为设计变量, $W(\mathbf{x})$ 是结构总质量, $g(\mathbf{x})$ 为约束条件, n 为设计变量的个数, j 为约束条件的个数, 约束条件通常包含结构尺寸比例, 静态变形和振动固有频率等条件。其含义是在满足一系列对参数(设计变量)选择的限制条件(约束条件)下, 找到一组参数(设计变量), 使设计指标结构总质量达到最小值。

2000 年, 台湾工业技术研究所 WU 等^[17]保持加强筋的形状和拓扑保持不变, 通过尺寸优化获得一组立柱和主轴箱的厚度参数和间距参数, 平均重量减少了 11%, 取得了比较好的研究成果。KOLAR 等^[18]通过在拓扑优化的基础上, 使用 10 个设计变量(5 个侧面厚度、2 个底座尺寸、可变数量的内部肋条、角杆的可变截面尺寸)以刀具中心点(TCP)、

前四阶固有频率为约束条件, 对立柱进行轻量化设计。在两步优化完成后, 柱重可分别降至 54%(全钢结构)或 59%(混合结构与铝泡沫填充)。与原始结构相比, 机床刚度增加到 102%或 106%(混合结构与铝泡沫填充), 并且第一固有频率提高了 154%或 166%(混合结构与铝泡沫填充)。

国内, 更多的学者在参数优化中增加了灵敏度分析方法。灵敏度分析是研究与分析一个系统(或模型)的状态或输出变化对系统参数或周围条件变化的敏感程度的方法。在机床结构参数优化中, 灵敏度分析可以用来研究结构参数有误差或发生变化时系统性能的稳定性。这时灵敏度分析可以通过对特征问题的直接求导或有限差分来完成。灵敏度分析也可以通过研究结构参数对机床整机性能的影响, 寻找确定对系统性能有较大影响的参数。这时灵敏度分析通常不能直接通过求导或差分来获得结论, 需要针对具体问题建立数学模型解析求解, 或通过统计学方法获取变化规律进而获得结论。清华大学郭垒等^[19]以尺寸灵敏度作为优化参数, 结构件质量作为优化目标, 刚度和铸造工艺条件作为约束条件对机床做了轻量化设计, 在保证刚度不降低的情况下, 重量降低了 312 kg, 下降比例为 6.9%, 为机床的轻量化设计提出了一种可行的方法。吉林大学付

俊涛^[20]就横梁结构的外壁和内部筋板尺寸选择 11 个设计变量作为优化设计变量, 如图 1 所示, 对机床横梁进行轻量化设计, 横梁的原质量即第一次迭代的初值为 667 6.2 kg, 优化后的质量变为 565 8.8 kg, 重量减轻了 15.24%, 实现了对横梁的轻量化设计。谭锋等^[21]对机床中滑鞍的结构尺寸进行灵敏度分析, 如图 2 所示, 获得了对结构动态性能影响较大的尺寸参数, 然后采用响应面法对这些尺寸参数进行优化研究, 最后根据优化后的尺寸参数值对滑鞍结构进行重新设计, 新设计的滑鞍结构在保证其固有频率不减小的前提下实现了结构质量 7% 的降低, 同时机床整机的静动态性能也得到了不同程度的改善。合肥工业大学朱俊等^[22]应用灵敏度分析的方法, 针对在刚度和铸造条件约束下的 TK6913 大型数控镗铣床, 进行支撑件(立柱)和运动件(滑鞍)的轻量化设计, 选择结构件壁厚和筋板厚度为尺寸优化参数, 在保证结构刚度的前提下, 整机结构质量降低了 3.14%。东北大学 ZHANG 等^[23]通过改变机床结构件的参数尺寸改变结构零件的质量, 然后通过最优的拉丁超立方体实验设计方法, 得出结构零件质量对铣床固有频率的影响规律, 从而实现定制铣床的静态刚度与质量轻量化匹配设计。

图 1 横梁结构尺寸优化选取的 11 个设计变量^[19]

图 2 滑鞍尺寸 & 一阶固有频率灵敏度分析^[21]

参数优化方法随着机床几何结构模型的参数化建模的发展, 几何建模与有限元分析方法均可以非常有利的支持模型设计更改和分析, 其优势明显, 已经在机床构型设计中有非常成熟和广泛的应用。

但是目前采用参数优化方法进行机床结构优化时, 由于缺乏对特定机床结构力学性能的准确定义, 无法给出合理的优化数学模型中的约束条件, 使得求得的“最优解”并不能真正实现结构质量的最小化。

2 结构拓扑优化

拓扑优化一般用于概念设计阶段, 通过计算相对于结构载荷的最佳材料分布, 获得结构件构型草图。常用的拓扑优化方法包括变密度法(Variable materials method, VM)、进化结构优化方法(Evolutionary structural optimization, ESO)和水平集方法(Level set method, LS)等。目前在机床结构设计中经常使用的拓扑优化设计软件, 包括 OptiStruct, MSC/Nastran, ANSYS, COMSOL 等, 其内核大都是基于变密度法^[24], 它的基本思想是人为引进一种假想的密度可变的材料, 每个单元的相对密度为设计变量, 将结构拓扑优化问题转化为材料最优分布设计问题, 应用优化准则法或数学规划方法求解材料最优分布设计。

在文献[13]中 KROLL 等提出了基于拓扑优化和焊接结构材料的移动部件的轻量化方法, 他们在拓扑优化过程中考虑到 Y 滑块的不同载荷和不同位置, 详细研究了五轴加工中心的 X 机架, 其优化设计结构如图 3 所示。KOLAR 等^[18]将拓扑优化应用于机床立柱设计中, 其中在计算立柱载荷时考虑了多个滑块所在位置(图 4), 发现结构刚度相对于内部筋板的灵敏度较低, 因此提出了采用焊接钢设计生成内部筋板轻量化的构型设计。FLEISCHER 等^[25-26]进行拓扑优化与混合多体耦合仿真, 以考虑和更新机器运行期间发生的组件负载和惯性。德国学者 MENZ^[27]将仿真软件运用到机床轻量化设计中, 并对轻量化设计的结果进行验证。韩国学者 CHANGWON^[28]运用遗传算法, 选择动态补偿函数对机床结构进行了拓扑优化设计, 首先运用拓扑设计方法确定机床立柱的最佳结构, 其次分别进行静、动态设计, 结果表明, 立柱的结构形状在满足静态性能和空间尺寸的约束下, 具有较轻的质量。

图 3 五轴加工中心 X 机架拓扑优化设计及对应焊接结构^[3]

国内, 上海理工大学的丁晓红课题组^[29]运用基于密度法的拓扑优化技术及近似模型的尺寸优化方法, 提出了机床床身结构优化设计的方案, 把床身内部横隔板的间距、厚度及垫铁间距作为设计变量,

以刚度和固有频率作为设计目标, 对机床床身进行了优化, 优化后床身的刚度提高了 5.8%, 同时质量减轻了 4.45%。厦门大学饶柳生等^[30]基于拓扑优化对机床立柱筋板进行了改进研究。兰州理工大学芮执元教授课题组, 赵东平^[31]采用独立连续拓扑变量及映射变换(ICM)方法对机床立柱进行了轻量化设计, 化后在立柱顶部, 外侧面上下两处开圆孔, 增大立柱内侧板孔洞尺寸, 立柱整体质量由 2 021.2 kg 降低到 1 694.6 kg, 质量下降 16.2%。天津大学张宁^[32]基于 TOSCA 软件对精密卧式加工中心关键大件进行了拓扑优化, 在动静特性保持或提高的前提下实现了轻量化设计, 其中滑板优化前后结构质量由 1 690 kg 优化为 1 580 kg, 质量下降了 6.5%; 主轴箱质量由 372 kg 优化为 363 kg, 质量下降了 2.4%; 立柱质量由 6 580 kg 减为 598 kg, 下降了 9.1%。兰州理工大学李永强^[33]在谢黎明教授和陆学斌高工的指导下, 根据卧式加工中心拓扑优化分析的经验案例, 结合静动态特性的基本状况, 去除了立柱后部上侧的一部分材料, 两侧壁靠近中间的位置开了窗孔, 该方案对形变量和固有频率影响不大, 可认为是立柱轻量化的方案的有效途径。

图 4 立柱的拓扑优化设计^[18]

由于拓扑优化结果与传统工程加工制造要求之间的矛盾, 使得拓扑优化在很长时间内在机床构型设计领域内应用相对困难。但随着增材制造等新兴制造方法的发展, 拓扑优化设计方案的工程化问题会逐步得到良好的解决, 拓扑优化设计也会在机床轻量化构型设计中有更多的应用。

3 多方法综合结构设计

在实际设计研究中, 设计者会综合考虑设计约束和现实条件, 将经验设计、拓扑优化、参数优化相结合, 或者将结构与机电系统设计相统一, 或者对于多种约束条件进行构型综合, 从而生成更适合的轻量化设计方案。

德国西门子(SIEMENS)公司 STÖPPLER 和英国利物浦约翰摩尔大学 DOUGLASB 合作^[34], 对线

性电机驱动的龙门机床进行了机电耦合分析,并基于耦合分析完成了龙门机床的结构自适应优化设计,从而使运动部件去除了部分网状加强筋达到减重。马来西亚大学的 BESHARATI 等^[35]采用层次分析法、多目标遗传算法等对龙门机床设计采用多准则决策方法实现了包括轻量化构型在内的设计。SCHLEINKOFER 等^[36]在早期组合不同的开发方法,实现成本降低的轻量级设计。

国内,从2002年以来,多方法综合设计被应用于多种类型的机床设计中。东南大学伍建国等^[37]综合考虑设计参数的灵敏度和动态设计两方面的设计需求,对内圆磨床床身进行了轻量化构型设计沈阳机床集团有限公司研制的 VTC8080 立式车床,在经验设计的基础上,采用有限元静、动态特性仿真分析进行床身轻量化结构优化设计,实验验证表明,机床具备高刚性、精度好的优点^[38]。天津理工大学杨长青^[39]基于多目标优化对大型加工中心结构进行了优化设计。广东工业大学牛兴^[40]在多种筋板经验构型设计基础上,进行筋型间距、高度等参数尺寸优化和灵敏度分析,确定了优选构型和优化尺寸,完成了双牛头电火花成型机床鞍座轻量化设计,鞍座质量减少了 245 kg。南通大学张森^[41]为了实现横梁结构的轻量化,提出了 3 种经验设计方案,运用有限元分析方法获得优选方案,结合灵敏度分析结果和变尺寸法设计变量调整,以质量对横梁静变形量和一阶频率灵敏度为依据,运用极端尺寸调整法不断调整横梁的关键尺寸对横梁结构进行轻量化设计,如图 5 所示,轻量化后横梁结构质量共减少了 170 kg,降幅为 3.6%。

图5 经验设计及尺寸优化相结合设计的横梁^[41]

清华大学刘成颖等^[42-43]为了实现机床立柱结构

的轻量化设计,根据拓扑优化的材料分布结果设计了立柱的基本外形,对比了 5 种不同类型筋板形式的单元结构,选择 W 形式的筋板对立柱的外形结构进行布局及尺寸优化,立柱质量降低了 333 kg,减轻了 8.3%,并且其静、动力学性能得到了不同程度的改善,实现了立柱结构的轻量化设计,整体设计流程如图 6 所示。长春工业大学贾成阁^[44]对 XHGS256 立柱结构的静动态多目标拓扑优化,得到了立柱结构的最佳材料分布,重量由 5.36 t 降低为 5.03 t,减少 6.16%。通过对整机结构的 29 个尺寸设计参数进行试验设计分析,找到对整机质量、1 阶固有频率、最大变形影响最为显著的 11 个设计变量作为关键设计尺寸,运用自适应响应面法完成了整机静、动态多目标尺寸优化。最终在保证设计指标的前提下,相比于初始整机结构,整机质量降低 16.05%。重庆大学李聪波等^[45]综合考虑机床的能耗,静态和动态性能,在保证静态和动态性能的同时,减少了优化结构的能耗,同时也实现了结构的轻量化设计。

图6 立柱拓扑优化+经验设计+尺寸优化设计^[42-43]

值得一提的是,大连理工大学王德伦课题组从2004年开始与国内多家机床企业(昆明机床厂、北一机床厂、沈阳机床厂等)和知名高校合作完成了多项国家科技重大专项。课题组提出机床轻量化设计的“概念一单元”技术,按照零件不同工况下力传递路

线科学分布材料，综合形成零件主体结构的概念构型，而零件局部结构细节上建立相应单元形状^[46]。并将此技术应用于大连机床集团有限责任公司 4 个

系列机床零件的轻量化设计中，实现平均减重 8% 以上的目标，其机床轻量化设计“概念—单元”技术与应用成果见表 1 所示^[47-52]。

表 1 大连理工大学&大连机床集团 4 个系列机床整机轻量化设计成果^[47-52]

研究内容	研究成果	取得效益		
		整机减重/t	减重比(%)	节省材料费用/万元
CKA61160H 平床身车床轻量化设计	床身 原方案 → 主传力路径云图 → 轻量化方案	0.721 4	8.43	4.32
	床头箱 原方案 → 主传力路径云图 → 轻量化方案			
DL32M 斜床身机床轻量化设计	床身 原方案 → 主传力路径云图 → 轻量化方案	0.514 0	9.60	30.36
	床鞍 原方案 → 主传力路径云图 → 轻量化方案			
XK2140 重型数控龙门加工中心轻量化设计	横梁 原方案 → 主传力路径云图 → 轻量化方案	13.480 0	22.60	24.28
	立柱 原方案 → 主传力路径云图 → 轻量化方案			
VDL600E 立式加工中心轻量化设计	床身 原方案 → 主传力路径云图 → 轻量化方案	0.721 4	8.40	60.72
	工作台 原方案 → 主传力路径云图 → 轻量化方案			

天津大学黄田教授团队^[53]特别考虑了提供加工应用所需的精度和动态响应的机构，通过考虑对可重构性、运动能力、合理的部件设计等的实际要求，提出了从众多候选方案中选择合适结构的标准：“合适的结构必须允许(通过其关节的类型和布置)所有下部活动构件的主体具有高弯曲和/或扭转刚度-质量比的形状”。然后，将连接基础连杆和机架的所有关节都集成到一个紧凑的零件中，实现了轻巧，经济高效且灵活的设计，特别适合于配置各种并联机床。

随着综合考虑因素的增多，机床结构件和构型轻量化设计分析中使用的理论分析和计算也涉及到越来越多的背景知识，综合了多种方法，形成了多样性的各种特色设计研究和成果。

4 结构仿生优化

除了对各种约束条件的综合分析之外，结构轻量化的另一个分支是向自然学习，设计轻量化的仿生结构^[54]。仿生结构是通过研究生物肌体的构造，

建造类似生物体或其中一部分的机械装置,通过结构相似实现功能相近。近年来,结构仿生学应用于机床结构构型设计中,激发并创造了许多具有更高结构刚度的发明。

4.1 结构形态仿生

北京航空航天大学的 ZHAO 等^[55]使用生物骨架和夹层杆进行机床立柱设计,机床立柱的质量减少 2.24%,比强度增加 21.10%。继而,赵岭等使用了三种不同的生物灵感:空心茎、夹心节和径向根,并在决定何时使用哪种方法时采用了模糊评估,设计完成了一个轻型的机床工作台,并进一步研究了仿生灵感的横梁设计^[55-56]。与传统结构相比,质量减少 3.31%并且比刚度增加 23.29%^[57-58]。使用类似

的方法,该课题组对工作台的加强筋进行了优化,提高了称重效率^[57]。孙剑飞等^[59]为了提高机床立柱的机械性能,根据叶脉的结构重新布置了构件内部加强筋,并设计了仿生立柱。广东工业大学牛兴^[40]对双牛头电火花成型机床进行动静态特性分析,经仿生设计和尺寸优化后滑枕质量减轻了 80.32 kg,减重量达到 7.96%,如图 7 所示,结合其他结构件的尺寸优化设计,最终达到了机床的整体最大变形减少了 30.6 μm ,主轴加工方向的形变量减少了 7.4 μm ,机床各阶次的固有频率得到提高,机床质量减轻了 378.86 kg。海南大学刘世豪等^[60]采用亚马逊王莲仿生数控转盘,获得最优解,使最大变形减小了 2.37%,质量减小了 15.60%。

图 7 双牛头电火花成型机床滑枕仿生设计^[40]

4.2 生长机理仿生

结构形态仿生是根据自然生物的结构形态进行拷贝和修改得到的。另一类仿生优化方法通过学习自然生物结构的生长机理,根据结构承受的载荷和设计目标来得到轻量化结构。

西安交通大学李宝童等^[61]开发了一种新的实

用拓扑优化器,提出了承载结构的脉络生长法及优化过程,图 8 所示为将承载结构的脉络生长算法应用于精密磨床立柱设计当中,构建适应实际工程载荷条件的磨床立柱筋板布局,并通过 3D 缩比模型的力学试验研究,验证了其仿生设计结果的正确性。

图 8 脉络生长法仿生机床立柱设计流程及 3D 打印模型^[61]

这类方法具有代表性的是上海理工大学丁晓红等^[62-65]提出的自适应成长法。自适应成长法通过研究自然界中的各种分枝系统(如植物根系等)的形态形成机理,使机床结构上的加强筋与自然分支系统的生长一样,在一定的载荷边界条件下,沿着使结构的某种性能最优(如结构应变能最小)的方向生长,最终得到合理的结构筋型^[66-77]。如图 9 所示,将自适应成长法应用于某立式加工中心的结构轻量化设计中,根据实际结构的载荷工况,建立优化数学模型,得到主轴箱、立柱、床身等的优化结构构型。以主轴箱设计为例,说明其具体的设计步骤。如图 9b 所示,首先根据实际情况建立设计模型,该模型为悬臂结构,设计区域为长方体,并在主轴轴线位置施加载荷;其次将设计区域进行有限元离散,形成加强筋设计用的基结构,选择载荷和支撑位置处的节点为初始成长点(图中圆点),加强筋首先从这些初始点开始成长;接着,对结构进行有限元分

析,并计算成长加强筋的设计灵敏度,使加强筋沿着使结构刚度最大的方向成长;当某一加强筋成长到分枝临界值,则该加强筋两个端点也成为新的成长点,与它们相连的所有加强筋即可成长,而当某一加强筋退化到一定值时,则删除与其两个端点相连的加强筋的成长能力;最终可以得到图 9b 所示的设计构型,该构型主轴箱内部筋板为交叉筋结构^[75-77]。同理,通过自适应成长法设计床身结构,床身较厚的筋板分布在承载点和约束处,交叉筋板连接着承载点和约束点,在整个结构的中间位置又形成两圈筋板,直接抵抗变形,如图 9c 所示,最终设计结果如图 9d 所示。

通过形态结构仿生和生长机理仿生,仿生设计在机床轻量化结构构型中已经有了一定的研究探索。尤其是基于生长机理的机床结构仿生设计,已经形成比较有特色、并在国际上有一定影响的科研方向。

(a) 某立式加工中心原始设计

(b) 自适应成长法生成结构件工程

(c) 采用自适应成长法设计的立式加工中心结构

(d) 设计结果样机

图 9 采用自适应成长法设计的立式加工中心结构^[75-77]

5 未来研究方向

综上所述,机床结构设计奠定了机床性能的基

础。经过半个多世纪的发展,机床结构轻量化研究从经验设计、走向参数设计,并能够综合考虑实际设计约束条件,形成了多方法综合结构设计,甚至,仿生学方法在机床结构设计中也有了广泛的应用。

然而根据现有研究成果,理论上与工程中仍存在着大量的挑战和问题有待进一步研究。下面主要对未来可能的研究方向进行详细的说明。

(1) 结构与材料相结合实现轻量化设计。材料轻量化与机床结构轻量化同样为机床轻量化的重要方法^[78]。随着材料科学的进一步发展,将两种轻量化方法融合,降低构型轻量化过程中材料性能约束,在构件中使用各向异性的复合材料甚至在同一构件中使用多种材料实现结构构型轻量化是必然的发展趋势。

(2) 增材制造下,传统制造约束的减少和新工艺制造约束的出现^[79]而研发新的轻量化结构。传统轻量化设计中,受到制造工艺的约束,例如,铸造的床身等零件其最小筋板厚度约束条件,在增材制造条件下将不再是必须要满足的约束条件。制造手段的进步使得机床构型设计探索空间增大,轻量化构型设计方案将增多。

(3) 机床功能变化带来新的轻量化结构件和构型需求。机床已经从传统的金属切削加工机床已经发展到“三束”加工普及^[80];从数控机床到超精密加工机床^[81];从串联机床发展到并联机床^[82];从单独功能机床发展到控制、机器人集成的一体化加工中心。机床工作空间、加工性质的变化,使得机床的构型设计必须变化才能满足性能要求。无论是结构轻量化设计数学模型还是轻量化数值计算和优化算法方法,都需更具机床结构和功能特性进行重点研究,使得轻量化设计在工程应用上取得重大突破。

6 结 论

在机床设计的发展历程中,从没有停止过探索机床减重设计的新方法以实现机床结构设计进一步的轻量化。

本文结合设计案例,系统综述了从 1936 年到现在在国内外典型的机床轻量化结构件和构型设计研究的进展和成果。重点阐述了我国从 20 世纪 80 年代到现在,机床轻量化设计理论、方法和实践的研究成果。对现有机床结构轻量化设计方法:经验设计、参数优化、拓扑优化、多方法综合结构设计、仿生优化等方法进展进行了梳理和总结。最后探讨了机床结构轻量化设计方法的未来研究方向。

参 考 文 献

- [1] TLUSTY J. High speed machining[J]. Annals of the CIRP, 1993, 42(2): 733-738.
- [2] SCHELLEKENS P, ROSIELLE N. Design for precision: current status and trends[J]. Annals of the CIRP, 1998, 47(2): 557-586.
- [3] HERRMANN C, DEWULF W, HAUSCHILD M, et al. Life cycle engineering of lightweight structures[J]. CIRP Annals, 2018, 67(2): 651-672.
- [4] SCHLESINGER G. Die werkzeugmaschinen[M]. Berlin: Verlag von Julius Springer, 1936.
SCHLESINGER G. The machine tools[M]. Berlin: Publisher of Julius Springer, 1936.
- [5] KOENIGSBERGER F. Berechnung, konstruktionsgrundlagen und bauelemente spanender werkzeugmaschinen[M]. Berlin: Springer Verlag, 1961.
KOENIGSBERGER F. Calculation, basic design and components of cutting machine tools [M]. Berlin: Springer Verlag, 1961.
- [6] WECK M, BRECHER C. Werkzeugmaschinen 2 - konstruktion und berechnung[M]. Berlin: Springer Verlag, 2007.
WECK M, BRECHER C. Machine tools 2 - design and calculation [M]. Berlin: Springer Verlag, 2007.
- [7] WECK M, ASBECK J, BÜSSENSCHÜTT A. Potentials of structural optimizations systems in product development. Annals of the CIRP, 1996, 45(1): 165-168.
- [8] BENDSØE M, SIGMUND O. Topology optimization[M]. Berlin: Springer, 2004.
- [9] ALTINTAS Y, BRECHER C, WECK M, et al. Virtual machine tool[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2005, 54(2): 651-675.
- [10] KADIR A, XU X, HAMMERLE E. Virtual machine tools and virtual machining - a technological review[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2011, 27: 494-508.
- [11] FORTUNATO A, ASCARI A. The virtual design of machining centers for hsm: towards new integrated tools[J]. Mechatronics, 2013, 23: 264-278.
- [12] HUANG X, XIE Y. Evolutionary topology optimization of continuum structures - methods and applications[M]. New York: John Wiley & Sons, 2010.
- [13] 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.
- [14] 张曙, 张柄生. 机床的总体配置和结构设计(上)[J]. 机械设计与制造工程, 2016(3): 1-10.

- ZHANG Shu, ZHANG Shansheng. Overall configuration and structural design of machine tools (part 1) [J]. Mechanical Design and Manufacturing Engineering, 2016(3): 1-10.
- [15] 米成秋, 孙靖民. 机床部件的有限元优化设计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1982(2): 72-84.
- MI Chengqiu, SUN Jingmin. Finite element optimization of machine tool components [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1982(2): 72-84.
- [16] 米成秋, 孙靖民. 机床结构优化方法初探[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1983(3): 71-78.
- MI Chengqiu, SUN Jingmin. Preliminary study on optimization method of machine tool structure [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1983(3): 71-78.
- [17] WU B, YOUNG G, HUANG T. Application of a two-level optimization process to conceptual structural design of a machine tool[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2000, 40(6): 783-794.
- [18] KOLAR P, SMOLIK J, SULITKA M, et al. An integrated approach to the development of machine tool structural parts, MATAR2012-12082, MM science journal[C]. 9th International Conference on Machine Tools, Automation, Technology and Robotics, 12-14 September, 2012, Prague, Czech Republic.
- [19] 郭垒, 张辉, 叶佩清, 等. 基于灵敏度分析的机床轻量化设计[J]. 清华大学学报, 2011, 51(6): 846-850.
- GUO Lei, ZHANG Hui, YE Peiqing. Light weight design of a machine tool based on sensitivity analysis[J]. Journal Tsinghua University, 2011, 51(6): 846-850.
- [20] 付俊涛. 数控立式车床关键零件轻量化设计研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- FU Juntao. Research on mass-reduction design of key parts of cnc vertical lathe[D]. Changchun: Jilin University, 2011.
- [21] 谭锋. 高速卧式加工中心静动态性能分析与结构优化[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- TAN Feng. The Static/dynamic performance analysis and structural optimization of the high-speed horizontal machining centers[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.
- [22] 朱俊, 韩江, 许家凯, 等. 大型数控镗铣床基于灵敏度分析的轻量化设计[J]. 合肥工业大学学报, 2016, 39(6): 721-724.
- ZHU Jun, HAN Jiang, XU Jiakai, et al. Lightweight design of large CNC boring and milling machine based on sensitivity analysis[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2016, 39 (6): 721-724.
- [23] ZHANG L, MA L, WU D, et al. A novel integrated process-machine approach for designing customized milling machines[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104(1-4): 245-260.
- [24] BENDSØE M. Optimal shape design as a material distribution problem[J]. Structural Optimization, 1989, 1: 193-202.
- [25] WEULE H, FLEISCHER J, NEITHARDT W, et al. Structural optimization of machine tools including the static and dynamic workspace behavior[C]. The 36th CIRP-International Seminar on Manufacturing Systems, 03-05 June, 2003, Saarbruecken, Germany.
- [26] FLEISCHER J, MUNZINGER C, TRÖNDLE M. Simulation and optimization of complete mechanical behaviour of machine tools[J]. Production Engineering - Research and Development, 2008, 2: 85-90.
- [27] MENZ P. Simulation and modelling of the design of forward feeds in lightweight construction[J]. Prace Naukowe Instytutu Technologii Maszyn I Automatyzacji Pllitechniki Wroclawskiej. 1998, 69(31): 130-140.
- [28] CHANGWON. A genetic algorithm based multi -step design optimization of a machine structure for minimum weight and compliance[C]// Proceedings of the SICE Annual Conference. 2005, 476-481.
- [29] 陈叶林, 丁晓红, 郭春星, 等. 机床床身结构优化设计方法[J]. 机械设计, 2010, 27(8): 65-68.
- CHEN Yelin, DING Xiaohong, GUO Chunxing, et al. Study on optimization design method of machine tool bed structure[J]. Mechanical Design, 2010, 27 (8): 65-68.
- [30] 饶柳生, 侯亮, 潘勇军. 基于拓扑优化的机床立柱筋板改进[J]. 机械设计与研究, 2010, 26(1): 87-91.
- RAO Liusheng, HOU Liang, PAN Yongjun. Improvement of the rib plate in machine tools column based on topology optimization[J]. Machine Design and Research, 2010, 26(1): 87-91.
- [31] 赵东平. 高速卧式加工中心立柱的轻量化设计[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2012.
- ZHAO Dongping. Lightweight design of high-speed horizontal machining center of column[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2012.
- [32] 张宁. 基于 TOSCA 的精密卧式加工中心关键大件拓扑优化方法[D]. 天津: 天津大学, 2015.
- ZHANG Ning. The topological optimization method for

- the key components of precision horizontal machining center based on TOSCA[D]. Tianjin: Tianjin University, 2015.
- [33] 李永强. 高速卧式加工中心支承件结构分析及优化设计[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2017.
- LI Yongqiang. Structural analysis and optimization design of the supporting part for machining center [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2017.
- [34] STÖPLER G, DOUGLAS S. Adaptronic gantry machine tool with piezoelectric actuator for active error compensation of structural oscillations at the tool centre point[J]. *Mechatronics*, 2008, 18(8): 426-433.
- [35] BESHARATI S R, DABBAGH V, AMINI H, et al. Multi-objective selection and structural optimization of the gantry in a gantry machine tool for improving static, dynamic, and weight and cost performance[J]. *Concurrent Engineering: Research and Applications*, 2016, 24(1): 83-93.
- [36] SCHLEINKOFER U, LAUFER F, ZIMMERMANN M, et al. Resource-efficient manufacturing systems through lightweight construction by using a combined development approach[J]. *Procedia CIRP*, 2018, 72: 856-861.
- [37] 伍建国, 陈新, 毛海军, 等. 内圆磨床床身设计参数的灵敏度分析及动态设计[J]. *南京航空航天大学学报*, 2002, 34(6): 545-546.
- WU Jianguo, CHEN Xin, MAO Haijun, et al. Sensitivity analysis and dynamic design of design parameters for internal grinder bed[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2002, 34(6): 545-546.
- [38] 谢志坤, 路平, 史科科, 等. 轻量化技术在机床设计中的应用[J]. *制造技术与机床*, 2012(12): 56-59.
- XIE Zhikun, LU Ping, SHI Keke, et al. The application of the lightweight technology in machine tool design field[J]. *Manufacturing Technology and Machine Tool*, 2012(12): 56-59.
- [39] 杨常青. 基于多目标优化的大型加工中心结构优化设计[D]. 天津: 天津理工大学, 2013.
- YANG Changqing. The structural optimization and design of the large machining center based on multi-objective optimization[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2013.
- [40] 牛兴. 双牛头电火花成型机床的动静态特性分析[D]. 广州: 广东工业大学, 2014.
- NIU Xing. The dynamic and static characteristics analysis of double tauren type EDM machine[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2014.
- [41] 张森. 基于灵敏度和有限元分析的龙门加工中心横梁结构轻量化设计 [D]. 南通: 南通大学, 2014.
- ZHANG Sen. Light weight design of gantry machining center crossbeam based on sensitivity and finite element analysis[D]. Nantong: Nantong University, 2014.
- [42] 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.
- LIU Chengying, TAN Feng, WANG Liping. Lightweight design of column structure based on topology optimization and reinforcing rib layout [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2015 (4): 1-4.
- [43] 刘成颖, 谭锋, 王立平, 等. 面向机床整机动态性能的立柱结构优化设计研究[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(3): 161-168.
- LIU Chengying, TAN Feng, WANG Liping, et al. Research on optimization of column structure design for dynamic performance of machine tool [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(3): 161-168.
- [44] 贾成阁. 小型龙门加工中心结构优化设计研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2017.
- JIA Chengge. Research on structural optimization design of small gantry machining center [D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2017.
- [45] 纪倩倩, 李丛博, 朱道广, 等. 结构优化设计在 CNC 机床工具能量节约中的应用[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 246: 118976.
- [46] 王德伦, 申会鹏, 孙元, 等. 复杂零件结构设计概念单元方法[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(7): 152-163.
- WANG Delun, SHEN Huipeng, SUN Yuan, et al. A novel approach for conceptual structural design of complex machine elements[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52 (7): 152-163.
- [47] 马超. 机床结构设计方法研究及在立柱设计中的应用 [D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- MA Chao. Research on machine tool structure design method and application in column design [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [48] 董惠敏, 丁尚, 王海云, 等. 床鞍的轻量化设计数据库研究[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2014 (3): 33-36.

- DONG Huimin, DING Shang, WANG Haiyun, et al. Research on lightweight design database of bed saddle [J]. Modular Machine Tool and automatic Processing Technology, 2014 (3): 33-36.
- [49] 张龙. 车床轻量化设计数据库系统研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- ZHANG Long. Study on the database system of lathe structural parts lightweight design[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [50] 马雅丽, 张霄, 申会鹏, 等. 机床螺栓联接结构的静动态优化设计[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2016(2): 1-4.
- MA Yali, ZHANG Xiao, SHEN Huipeng, et al. Static and dynamic optimization design bolted joints structure of machine tool[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2016(2): 1-4.
- [51] 赵二晷. 车削中心静热特性分析及床鞍结构优化设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- ZHAO Erjing. Analysis of static and dynamic thermal characteristics of turning center and optimization design of saddle structure[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [52] 申会鹏. 机床运动链及其零件的结构设计方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- SHEN Huipeng. Research on structural design method of machine tool kinematic chain and its parts [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
- [53] HUANG T, DONG C, LIU H, et al. A simple and visually orientated approach for type synthesis of overconstrained 1T2R parallel mechanisms[J]. Robotica, 2019, 37(7): 1161-1173.
- [54] 罗仕鉴, 张宇飞, 边泽, 等. 产品外形仿生设计研究现状与进展[J]. 机械工程学报, 2018, 54(21): 138-155.
- LUO Shijian, ZHANG Yufei, BIAN Ze, et al. Status and progress of product shape bionic design[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(21): 138-155.
- [55] ZHAO L, CHEN W, MA J, et al. Structural bionic design and experimental verification of a machine tool column[J]. Journal of Bionic Engineering, 2008, 5(Suppl.): 46-52.
- [56] ZHAO L, MA J, WANG T, XING D. Lightweight design of mechanical structures based on structural bionic methodology[J]. Journal of Bionic Engineering, 2010, 7: S224-231.
- [57] ZHAO L, MA J, CHEN W, GUO H. Lightweight design and verification of gantry machining center crossbeam based on structural bionics[J]. Journal of Bionic Engineering, 2011, 8: 201-206.
- [58] ZHAO L, WANG T, GUO H, et al. Structural bionic design of machine tool structures[J]. CADDM, 2011; 21: 45-50.
- [59] GAO H, SUN J, CHEN W, et al. Structural bionic design for a machine tool column based on leaf veins[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2017, 232(16), 2764-2773.
- [60] LIU Shihao, LIN Mao. Bionic optimization design for a CNC turntable based on thermal-mechanical coupling effect[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2020, 42: No253.
- [61] LI Baotong, HONG Jun, LIU Zhifeng. Stiffness design of machine tool structures by a biologically inspired topology optimization method[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2014, 84: 33-44.
- [62] DING Xiaohong, YAMAZAKI K. Stiffener layout design for plate structures by growing and branching tree model (application to vibration-proof design)[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2004, 26(1-2): 99-110.
- [63] DING Xiaohong, YAMAZAKI K. Adaptive growth technique of stiffener layout pattern for plate and shell structures to achieve minimum compliance[J]. Engineering Optimization, 2005, 37(3): 259-276.
- [64] DING Xiaohong, LI Guojie, YAMAZAKI K. Topology design optimization based on biotic branch net[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 18(2): 187-191.
- [65] 丁晓红, 李国杰, 蔡戈坚, 等. 薄板结构的加强筋自适应成长设计法[J]. 中国机械工程, 2005, 16(12): 1057-1060.
- DING Xiaohong, LI Guojie, CAI Gejian, et al. Adaptive growth method of rib distribution for thin plate structure[J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16 (12): 1057-1060.
- [66] 丁晓红, 林建中, 山崎光悦. 利用植物根系形态形成机理的加筋薄壳结构拓扑优化设计[J]. 机械工程学报, 2008, 44(4): 201-205.
- DING Xiaohong, LIN jianzhong, YAMAZAKI K. Topology design optimization of stiffened thin-wall shell structures based on growth mechanism of root system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(4): 201-205.
- [67] 丁晓红, 程莉. 基于 SKO 方法的满应力结构拓扑优化

- 设计[J].中国机械工程, 2009, 20(15): 1765-1770.
- DING Xiaohong, CHENG Li. Topology optimization design of full stress structure based on SKO method [J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20 (15): 1765-1770.
- [68] 丁晓红, 郭春星, 季学荣. 基于自适应成长原理的板壳结构加强筋分布设计技术[J]. 工程设计学报, 2012, 19(2): 118-122.
- DING Xiaohong, GUO Chunxing, JI Xuerong. Stiffener layout design of plate structures based on adaptive growth mechanism[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2012, 19 (2): 118-122.
- [69] 丁晓红, 李国杰. 箱型支撑结构加强板布局设计方法研究[J]. 中国机械工程, 2012, 23(4): 449-453.
- DING Xiaohong, LI Guojie. Layout design optimization of stiffener plates inside housing structures[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23 (4): 449-453.
- [70] DING Xiaohong, JI Xuerong, MA Man, et al. Key techniques and applications of adaptive growth method for stiffener layout design of plates and shells[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(6): 1138-1148
- [71] 季金, 丁晓红, 熊敏. 基于最优准则法的板壳结构加强自适应成长技术[J]. 机械工程学报, 2014, 51(11): 162-169.
- JI Jin, DING Xiaohong, XIONG Ming. Adaptive growth technique of stiffener layout design for plate/shell structures based on optimality criterion[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 51(11): 162-169.
- [72] JI Jin, DING Xiaohong. Stiffener Layout optimization of inlet structure for electrostatic precipitator by improved adaptive growth method[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014, 11: 1-8.
- [73] JI Jin, DING Xiaohong, XIONG Ming. Optimal stiffener layout of plate shell structures by bionic growth method [J]. Computers and Structures, 2014, 135(135): 88-99.
- [74] DONG Xiaohu, DING Xiaohong, XIONG Min. Optimal layout of internal stiffeners for three-dimensional box structures based on natural branching phenomena[J]. Engineering Optimization, 2019, 51(4): 590-607.
- [75] ZHANG Heng, DING Xiaohong, DONG Xiaohu, et al. Optimal topology design of internal stiffeners for machine pedestal structures using biological branching phenomena[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2018, 57(6): 2323-2338.
- [76] SHEN Lei, DING Xiaohu, LI Tianjian, et al. Structural dynamic design optimization and experimental verification of a machine tool[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104: 3773-3786.
- [77] DONG Xiaohu, DING Xiaohong, LI Guojie, et al. Stiffener layout optimization of plate and shell structures for buckling problem by adaptive growth method[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2020, 61: 301-318.
- [78] WANG Pengjia, GONG Yadong, XIE Hualong, et al. Applying CBR to machine tool product configuration design oriented to customer requirements[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 31(1): 60-76.
- [79] HUGO I. Medellin-castillo and jorge zaragoza-siqueiros. design and manufacturing strategies for fused deposition modelling in additive manufacturing: A review[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2019, 32(1): 53.
- [80] PFAFF A, BIERDEL M, HOSCHKE K, et al. Resource analysis model and validation for selective laser melting, constituting the potential of lightweight design for material efficiency[J]. Sustainable Production and Consumption, 2020, 21: 182-191.
- [81] CHEN Guoda, SUN Yazhou, ZHANG Feihu, et al. Dynamic accuracy design method of ultra-precision machine tool[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2018, 31(1): 8.
- [82] YE Wei, LI Qinchuan. Type synthesis of lower mobility parallel mechanisms: A review[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2019, 32(1): 38.

作者简介: 李天箭(通信作者), 女, 1975 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为机床优化设计。

E-mail: litianjian99@163.com

丁晓红, 女, 1965 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机械系统和结构优化设计理论和方法。

李郝林, 男, 1961 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为数控机床。