机床立柱高比刚度结构仿生设计

杨永彬 陈五一 赵大海

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191) (沈阳飞机设计研究所, 沈阳 110035)

摘 要: 提高机床运动结构的比刚度对于提高机床加工精度以及系统动力学性能具有重要作用. 基于结构仿生的原理和方法, 在分析骨架对生物体刚度的贡献以及体现了最佳的载荷路径这一思想的基础上, 对叶片抛磨机立柱内部的筋板结构进行重新设计, 使其发挥骨架的作用. 对原型及仿生型立柱进行了静力、模态及瞬态动力学分析, 经过有限元分析发现, 立柱的质量减小, 比刚度结构效能得到了较大的提高, 其静动力学性能也有明显的改善.

关 键 词: 比刚度; 结构仿生; 立柱; 生物骨架; 载荷路径

中图分类号: TH 122

文献标识码: A 文章编号: 1001-5965(2008)09-0991-04

Bionic design of column structure of machine tool for high specific stiffness

Yang Yongbin Chen Wuyi

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Zhao Dahai

(Shenyang Aircraft Design & Research Institute, Shenyang 110035, China)

Abstract Improving the specific stiffness of moving structure is important for the improvement of the machining accuracy and dynamic performance of high speed machine tools. Based on structural bionic theory, through study on the contribution of biologic skeleton to organism stiffness and the concept that biologic skeleton shows the best load path of organism, the column's inner structure was redesigned as skeleton to improve the specific stiffness. The static, modal, and transient analyses of original column and bionic column were carried out, and the results are satisfying. The FEA results show that through structural bionic design the column's mass was decreased, the specific stiffness structural efficiency and the natural frequency were improved, the transient displacement was decreased, and the stability of bionic column was better than that of original column. Through structural bionic design the static and dynamic character of column was ameliorated.

Key words specific stiffness; structural bionics; column; biologic skeleton; load path

生物体结构是亿万年自然选择和生命进化的结果, 充分体现了自然进化的趋向, 往往具有人造结构无法比拟的优势. 结构仿生就是通过研究生物机体的构造, 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[1]. 现代制造业的发展使得高速化、精密化成为机床发展的趋势之一. 高速机床在大加速度下保持高精度就必须要求机床运动部件质量小、刚性高, 用最少的结构材料来承受最大的外力, 也就是达到高比刚度, 即最佳的结构效能[2].

人们已经在一定程度上利用了生物体结构的启示制造工程材料和工程结构, 例如巴黎埃菲尔铁塔的中心拱梁设计便受到了骨的微观组织的启示[2-3], 而纤维增强复合材料则参考了木材的微观组织[4-5]. 如果机床结构中的框、肋、筋、架等也能依据结构仿生的原则布置和成型, 将有可能取得更为优异的轻量化效果和整体力学性能. 本文基于结构仿生的原理, 引入生物骨架的构型思想, 对叶片抛磨机立柱的内部结构进行了结构仿生设计.

收稿日期: 2007-07-30

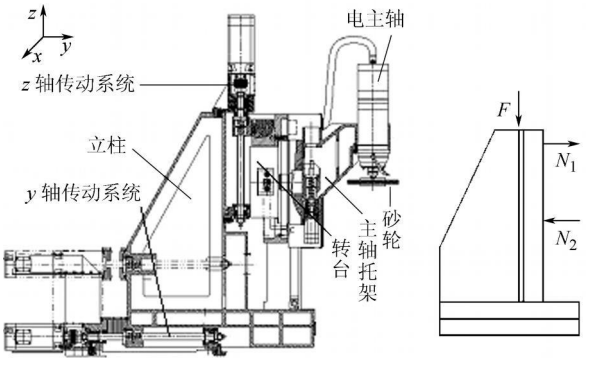
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50575008); 航空科学基金资助项目(05B01004)

作者简介: 杨永彬(1983-), 男, 山东潍坊人, 硕士生, yangyongbin_1983@126.com.

1 立柱受力分析

立柱与其周围相连零部件的装配关系如图 1所示. 五轴数控叶片抛磨机是 5自由度串连机构, 可以实现 x, y, z三个方向的运动, 以及叶片卡具和转台的转动 (x向运动平台和叶片卡具图中未显示), 立柱可以沿 y轴方向移动.

本文分析砂轮转台向上运动的情况, 并存在一个向上的加速度 $a = 0.3g$. 由力的平衡关系可以求得: $N_1 = N_2 = 979.50$ N; $F = 1\,680.60$ N; $f = \mu N_1 = \mu N_2 = 98$ N. 其中, N_1和 N_2为砂轮转台分别通过上下部分的滑块对立柱的作用力; F 为电机施加给立柱的作用力; f 为立柱导轨与转台滑块间摩擦力; μ为导轨与转台滑块间滚动摩擦系数, 取 0.1



a 立柱与周围部件装配关系 b 立柱受力示意图

图 1 立柱与周围部件装配图及受力示意图

2 结构仿生设计

2.1 需求分析

立柱变形过大会直接影响到零件的加工精度, 在外形及材料确定的情况下, 改变立柱内部的结构形式对于提高刚度减小变形有显著影响.

原型立柱内部的加强筋形状和分布规整, 如图 2所示, 没有更多地考虑它们在机床加工工件时的变形与应力分布, 这就有可能造成一些加强筋没有充分发挥其应有的分担变形和外载荷的功能, 而且可能会造成材料浪费, 增大质量, 降低比刚度; 两侧导轨作为主要的承力区, 其内部没有加强结构, 会使变形偏大. 因此, 有必要对立柱的内部结构进行重新设计. 本文根据结构仿生的思想, 在分析典型的生物体结构或生物体构型规律的基础上, 在图 3所示的设计空间里重新设计加强筋, 有可能取得良好的效果.

2.2 生物体性能研究

生物界飞禽走兽的骨胳, 以及植物的枝条根

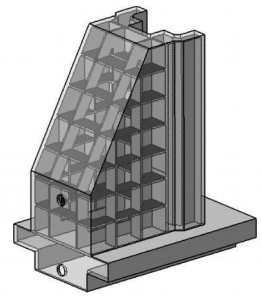


图 2 原型立柱内部加强筋形式

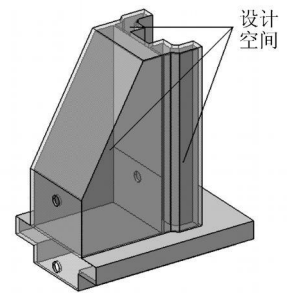
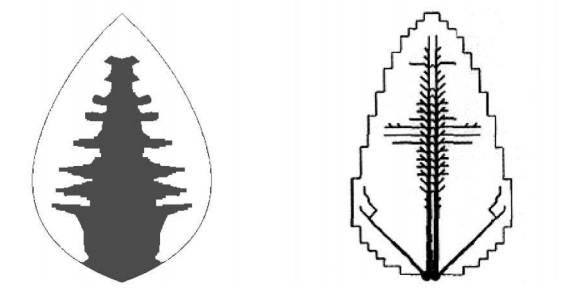


图 3 立柱仿生设计空间

干等“生物骨架”, 充分体现了自然进化的趋向: 用最少的结构材料来承受最大的外力, 使结构效能达到最高. 如果将生物体看作一个封闭的受力对象, 骨架正是一个最佳的结构布局, 体现了最佳的载荷路径, 因而符合刚度最优的原则[2]. 在图 3所示的设计空间中, 筋板仍可看作平面结构. 下面以树叶为例来分析生物骨架对刚度的贡献.

用一块叶状板来模拟叶脉的分布. 根据叶子的重力分布和实际的固定情况, 假设板的上面承受均布的横向载荷, 板的下边中间部分固定. 作者采用连续体的变密度拓扑优化方法以柔度最小化 (刚度最大化)为优化目标对叶片结构进行优化, 如图 4a所示, 得到的结构在形状、分布及作用上, 与叶脉非常相似; 上海理工大学的丁晓红基于自适应成长设计法模拟叶脉的结构, 如图 4b所示, 得到的加强筋的分布十分类似于实际的叶脉分布. 通过以上分析可见, 自然界叶脉的分布确实具有增加叶子整体刚度的功能.



a 拓扑优化效果图 b 自适应成长设计法[6]

图 4 叶脉结构的模拟

因此, 在立柱加强筋的设计中, 突破传统的形状和布置形式, 将其作为立柱的骨架来设计, 将有可能取得更好的效果.

2.3 仿生设计

根据以上分析, 生物体的骨架体现了最佳的载荷路径, 作为最佳的结构布局, 使结构的刚度达到最优; 而连续体的变密度法拓扑优化可以将结构的载荷路径体现出来. 按照这个思路, 设计非生

物体立柱的“骨架”时, 就要明确立柱受载下的载荷路径的基本形式.

拓扑优化体现的立柱的载荷路径如图 5所示, 据此可以确定一个拥有最佳载荷路径的设计方案, 将结果中的材料高密度区域作为结构, 而将材料低密度的区域用孔来表示, 再经过局部的细节设计得到的设计结果如图 6所示.

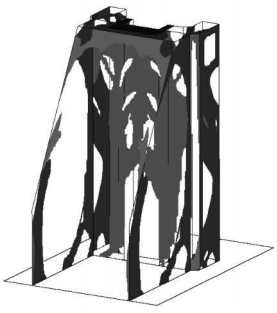


图 5　载荷路径效果图

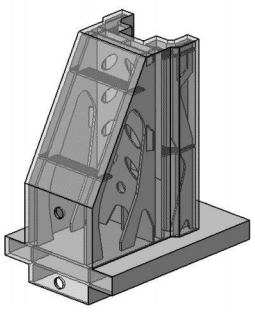


图 6　仿生型立柱

3　有限元分析

3 1　静力学分析

立柱材料选用灰铸铁, 其材料特性参数如下: 密度 $\rho = 7 \times 10^3$ kg/mm^3; 弹性模量 $E = 145$ GPa; 泊松比 $\gamma = 0.25$ 立柱变形云图见图 7和图 8.

本文综合考虑刚度及质量的结构效能概念, 采用了专门针对比刚度设计的评价标准——比刚度结构效能 ε[2]. 立柱静力学分析结果及比刚度结构效能值如表 1所示.

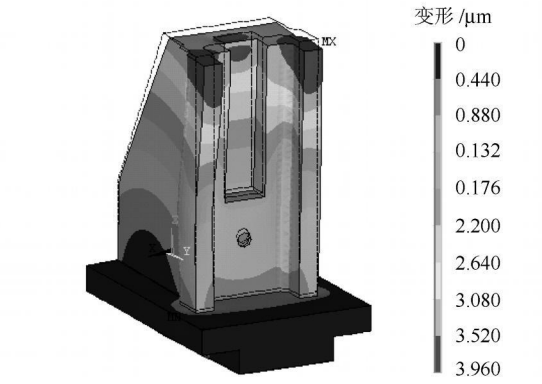


图 7　原型立柱变形云图

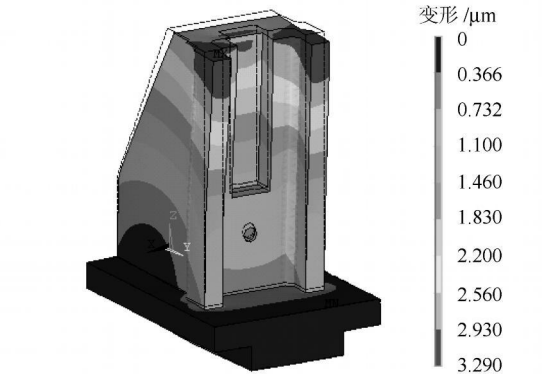


图 8　仿生型立柱变形云图

表 **1**　立柱有限元分析结果

立柱	质量 /kg	最大应力 /MPa	最大变形 /μm		ε
			总量	y向	
原型	798	0.96	3.96	3.6	45.88
仿生型	763	6.73	3.29	3.0	57.76
(仿生型 - 原型)/原型	%	-4.39	+601	+16.92	+16.67	+25.9

注: $\varepsilon = \dfrac{\text{材料弹性模量}/\text{结构变形}}{\text{结构质量}}$.

1) 应力分析: 仿生型的最大应力值比原型立柱有较大幅度的增长, 是原型的 6倍. 但即使这样, 工作台的最大应力值也远远小于材料的应力极限. 在设计机床立柱这样的结构件时, 强度不是主要考虑的因素, 达到高刚度才是主要的. 因此, 本文偏重于刚度设计, 把更多的质量放到了受载大、变形大的区域, 而非应力集中区域.

2) 轻量化效果: 立柱质量由原来的 798 kg减小到 763 kg 减重量达 4 39%.

3) 静力学性能: 最大变形减小, 特别是在对加工精度影响较大的 y 方向, 变形从 3.6μm减小到 3.0μm, 减小了 16.67%, 同时立柱的质量也有所减轻, 比刚度结构效能提高 25.9%. 这说明立柱的静刚度得到了较大的提高.

3 2　模态分析

本文取立柱前三阶固有频率及振型进行对比, 结果如表 2所示. 低阶固有频率较原型都有不同程度增加, 其中一阶固有频率提高 4.1%. 说明经过仿生设计, 立柱的抗振性能得到相应的提高.

表 **2**　立柱固有频率及振型

模态阶数	固有频率 /Hz		振型
	原型	仿生型	
1	159.36	165.91	绕 y 轴左右弯曲
2	165.84	171.25	绕 x 轴前后弯曲
3	361.14	402.63	绕 z 轴扭转

3 3　瞬态动力学分析

立柱受到电机驱动沿 y 方向作间歇运动, 在加减速及快速移动中就会产生惯性力, 对立柱造成冲击, 当立柱刚度不足时, 就很容易产生很大的振颤. 这将直接影响机床的寿命和工作性能, 甚至产生较大的噪音. 因此, 有必要对原型和仿生型立柱的瞬态动力学特性进行分析和比较.

模仿这一瞬态的冲击力, 在立柱的质心上加载一个沿 y 轴方向的冲击载荷, 该力共加载 2次, 模拟加速和减速 2个过程, 立柱对应的运动状态为: 启动—平稳进给—停止. 为了让立柱在不同的

载荷阶段充分响应, 在多次尝试的基础上, 选取如图 9所示的加载模式. 分析中仍然保持静力学分析时的外载荷.

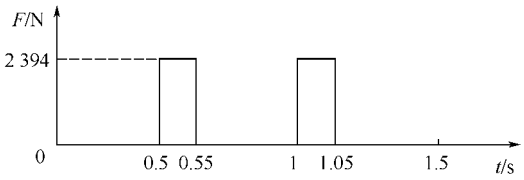


图 9 冲击载荷与时间关系曲线

为了更好地分析立柱的动态响应情况, 从立柱导轨的顶端选取 2个节点 *A* 和 *B* 进行动态响应分析, 其位置如图 10所示.

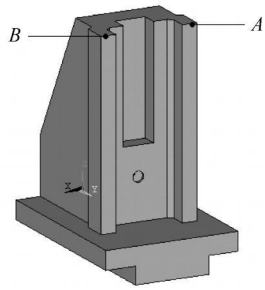


图 10 立柱动态响应节点选取位置示意图

A 和 *B* 两节点所处的位置位于最大变形区, 其变形特别是 *y* 轴方向的变形对加工质量影响最大. 由于 *A* 和 *B* 两节点左右对称, 其变形基本一致, 故只列出 *A* 点沿 *y* 轴的瞬态响应曲线, 如图 11所示

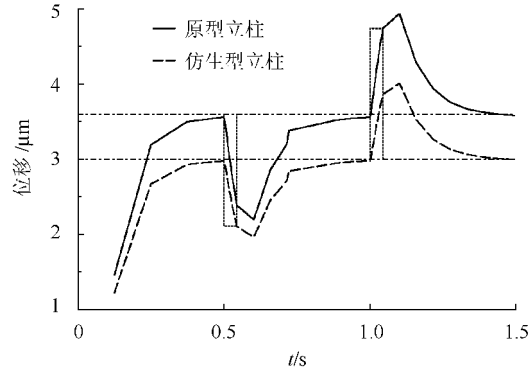


图 11 节点 *A* 沿 *y* 轴动态响应曲线

由图 11可以看出: *y* 轴方向由于受到 2次瞬态载荷的冲击, 节点 *A* 处有明显的变形突变. 第 1次冲击为立柱加速过程 (启动), 惯性力 (冲击力) 沿 - *y* 方向, 起到抑止变形的作用, 故 *A* 处变形较稳态时减小; 第 2次冲击为立柱减速过程 (急停), 惯性力沿 *y* 轴正向, 增大了 *A* 处的变形.

从变形数值来看, 原型立柱的最大值为 4.94 μm, 与相同位置稳态的数值 3.6 μm 相差 1.34 μm; 而仿生型立柱的最大值为 4.01 μm, 与相同位置稳态静力作用下的数值 3.0 μm 相差 1.01 μm, 最大变形较原型减小 18.83%. 可以看出, 仿生型立柱的最大变形及波动都要小于原型.

从响应时间来看, 冲击结束后, 原型立柱恢复到稳态所用的时间是 0.4 s, 而仿生型为 0.342 s, 可以说, 仿生型较原型更快进入稳定的变形状态, 刚度较好.

4 结 论

本文对机床立柱进行了结构仿生设计, 并对立柱的各项力学性能进行了仿真和分析, 结果表明, 立柱的比刚度结构效能提高 25.9%, 一阶固有频率提高 4.1%, 瞬态动力学响应位移减小 18.83%, 并且更快达到稳定, 达到了较为满意的结果.

参考文献 (References)

[1] 喻懋林. 基于结构仿生理论的高比刚度、比强度结构设计研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 2005
Yu Maolin. Research on the high specific strength and specific stiffness structure design based on the structural bionic theory [D]. Beijing: School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005. (in Chinese)

[2] 岑海棠. 结构仿生理论、轻质零件结构仿生设计及 RP工艺验证 [D]. 北京: 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 2004
Cen Haitang. Study on structural bionics theory, light weight structure bionics design and rapid prototyping testing [D]. Beijing: School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004. (in Chinese)

[3] 盛勇, 陈艾荣. 从埃菲尔铁塔看结构艺术的表现 [J]. 结构工程师, 2005, 21(1): 1-5
Sheng Yong, Chen Airong. Structural art of eiffel tower [J]. Structural Engineers, 2005, 21(1): 1-5. (in Chinese)

[4] 大谷杉郎. 复合材料入门 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1995: 4-5
Otani S. Introduction of composite material [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1995: 4-5. (in Chinese)

[5] 胡巧玲, 李晓东, 沈家骢. 仿生结构材料的研究进展 [J]. 材料研究学报, 2003, 17(4): 337-344
Hu Qiaoling, Li Xiaodong, Shen Jiacong. Progress in structure biomimetic materials [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2003, 17(4): 337-344. (in Chinese)

[6] 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. (in Chinese)

(责任编辑: 文丽芳)