



机械科学与技术

Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering

ISSN 1003-8728, CN 61-1114/TH

《机械科学与技术》网络首发论文

题目：树脂混凝土机床立柱的结构设计及性能仿真
作者：李有堂，吴荣荣，黄华，汤雷武
DOI：10.13433/j.cnki.1003-8728.20200325
收稿日期：2020-07-30
网络首发日期：2021-03-16
引用格式：李有堂，吴荣荣，黄华，汤雷武. 树脂混凝土机床立柱的结构设计及性能仿真. 机械科学与技术. <https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20200325>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

树脂混凝土机床立柱的结构设计及性能仿真

李有堂*, 吴荣荣, 黄华, 汤雷武

(兰州理工大学机电工程学院, 兰州 730050)

摘要: 传统的以铸铁或钢材为主的机床构件的性能优化已接近极值, 而高速高精的加工对机床性能的要求进一步提高, 树脂混凝土材料在机床基础件中的应用得到了广泛的关注。以 CK5116 数控机床为例, 根据等价截面原则, 设计了树脂混凝土材料的立柱模型, 应用有限元方法对其进行静态分析、模态分析和谐波响应分析, 并与传统的铸铁材料机床立柱的分析结果进行对比。结果表明: 同铸铁材料机床立柱相比, 树脂混凝土材料机床立柱满足了轻量化的设计要求, 且静刚度有所提升, 其最大响应振幅在 X 轴、Y 轴、Z 轴的振幅缩减率依次为: 55.18%、77.27%、20.88%。从而证明树脂混凝土机床立柱具有更优越的抗振性能。

关键词: 树脂混凝土; 机床立柱; 结构设计; 轻量化; 模态分析; 抗振性能

中图分类号: TH122, TH145.9

Structure design and performance simulation analysis of resin concrete machine tool column

Li Youtang, Wu Rongrong, Huang Hua, Tang Leiwu

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The performance optimization of the traditional machine tool structure based on cast iron or steel is close to the extreme value, but the high speed and high precision machining requires the machine tool performance to be further improved. In recent years, the application of resin concrete in the foundation parts of machine tools has been widely concerned. The CK5116 Computer Numerical Control (CNC) machine tool is take as an example in this study, according to the principle of equivalent cross section, its resin concrete column model is designed, combining with the finite element software on the static analysis, modal analysis and harmonic response analysis, and compared with the traditional cast iron material of machine tool column. Compared the results of the analysis, It demonstrated that the machine tool column is lightweight and the static rigidity is improved, and has better dynamic and static characteristic; The maximum response amplitude is decreased by 55.18%, 77.27% and 20.88% respectively compared with the maximum response amplitude of cast iron in X-axis, Y-axis and Z-axis. The results show that the resin concrete machine tool column has better anti-vibration performance.

Keywords: Resin concrete; Machine tool columns; Structural design; Lightweight; Modal analysis; Vibration resistance

前言

机床行业作为“中国制造 2025”的十大重点领域之一, 正朝着高精度、高效率、高速度以及柔性化的方向发展, 对机床整机性能的要求越来越严苛。对此, 国内外专家学者就新材料在机床的应用做了大量的研究^[1-13], 其中寻找一种材性优良的复合材料来代替传统机床制造材料, 是近年来机床行业比较重视的问题之一。树脂混凝土以其优越的性能, 在各行业得到了广泛的关注。Kim 等^[1]在多次实验后得出树脂混凝土的弹性模量、抗压强度、热膨胀

系数以及热传导性和阻尼因子等力学参数, 通过改变其中各组成成分和实验时间, 对树脂混凝土最佳配合比进行探究。Lokuge 和 Aravinthan^[2]研究认为环氧聚合物混凝土有着良好的结构性能, 具有一定的疲劳强度且吸水率低等优点。于英华课题组针对新材料在机床中的应用做了大量研究, 并验证了其可行性^[3-5]。南京理工大学相关团队研究了不同配比条件下树脂混凝土的力学性能以及各组成成分对树脂混凝土材料力学性能的影响规律^[6,7]。丁江民^[8]等对比分析环氧树脂混凝土和硅酸盐混凝土分别作为床身支撑材料时的各项特性, 研究表明所设计的环氧树脂混凝土床身动态性能符合相关标准。由于材料疲劳失效没有发生任何预兆, 在其使用上可能存在安全隐患, 就此问题, EL-Hawary^[9]等在四种不同

收稿日期: 2020-07-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No:51965037)

作者简介: 李有堂(1963-)男, 教授, 博士生导师, 研究方向为: 抗疲劳设计与应用, 产品创新设计等, (邮箱) liyt@lut.cn;

*通讯作者: 李有堂, 教授, 博士生导师, (邮箱) liyt@lut.cn;

温度工况下研究了树脂混凝土材料的韧性、抗压强度、抗拉强度以及弹性模量等力学性能的基础上,就其疲劳性能展开了分析。此外,有限元方法的应用是现下主要的研究手段之一^[10-13]。目前,针对树脂混凝土材料研究大多是关于其力学性能和材料性能等方面,具体在机床的应用研究较少。本文就树脂混凝土材料在机床基础件应用性能展开了相应的探索,在给出该材料的主要力学和物理性能后,按照等价截面原则对机床立柱进行结构设计,并在UG中建立该立柱模型,通过ANSYS/WORKBEN-CH对其静、动态特性展开分析,以期证明树脂混凝土材料在提高机床静、动态性能等方面的可行性和优越性。该研究为树脂混凝土材料在机床基础件上的应用提供了相应的参考。

1 树脂混凝土材料

1.1 主要组成

树脂混凝土材料主要由树脂胶,固化剂,填料,骨料(不同粒径的砂石)按一定的比例制成。本文选用的树脂混凝土选择骨料为力、热性能兼优的高纯石英砂,由连续级配5种粒径砂石组成,其粒径分别为: $<0.3\text{mm}$ 、 $0.3\sim 1.18\text{mm}$ 、 $1.18\sim 2.36\text{mm}$ 、 $2.36\sim 4.75\text{mm}$ 、 $4.7\sim 7.5\text{mm}$,其占比分别为:14.5%,18.47%,17%,20.06%,23.97%,填料为粉煤灰。

1.2 主要性能

在测定树脂混凝土材料的抗拉性能时,选取试样尺寸为: $(50\times 50\times 50)\text{mm}^3$,测定抗压性能时选取试样尺寸为: $(40\times 40\times 160)\text{mm}^3$,其主要成分混合比例为:树脂胶:骨料:填料=1:8.5:0.5,树脂胶:E51:CA:DBP=100:25:4。按混凝土成型方法,将材料搅拌均匀,压入模具,固化4天后脱模,在室温下养护7天后进行性能测试,实验所得最优结果如表1所示。

表1 数值混凝土材料主要性能参数

抗压强度/(MPa)	抗拉强度/(MPa)	弹性模量 E /(GPa)	泊松比	密度/(kg/m^3)
162.9	34.9	43.7	0.213	2.65×10^6

2 立柱的结构设计及模型建立

2.1 立柱简介

机床立柱是机床重要的基础件(支撑件),是连接床身与主轴、刀库的重要部件,保证机床主轴的Z向运动。CK5116机床立柱采用的是对称性结构,座落式安装。

2.2 模型建立

本文以CK5116数控机床为例,按照1:1的设计尺寸建立铸铁立柱的三维实体模型,如图1(a)所示,其截面简图如图1(b)所示,其中的主要尺寸参数如表1所示。

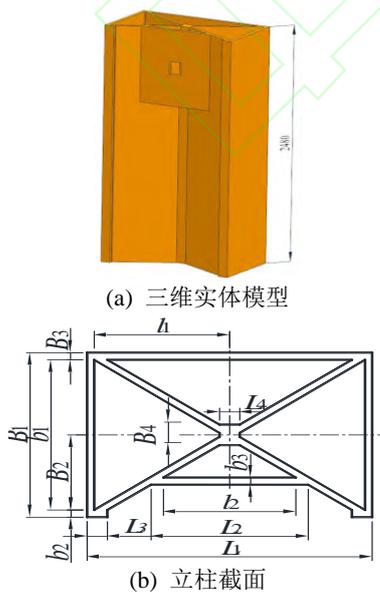


图1 铸铁立柱模型图

由于树脂混凝土材料的阻尼高,流动性差,且

其抗压性能、抗拉性能均低于铸铁材料,因此,在使用树脂混凝土材料制造机床基础件时,不能完全套用由传统铸铁制造的立柱结构,而应按照等价截面的原则,重新设计计算机床立柱结构,断面大小控制比为,铸造结构:焊接结构:混凝土结构=1:0.53:3.14,此时,三种材料的结构刚度相同,而树脂混凝土材料构件的生产成本比铸铁低20%^[14]。据此,设计出的其立柱的三维实体模型,如图2(a)所示,其截面简图如图2(b)所示,其中的主要尺寸参数如表2所示。

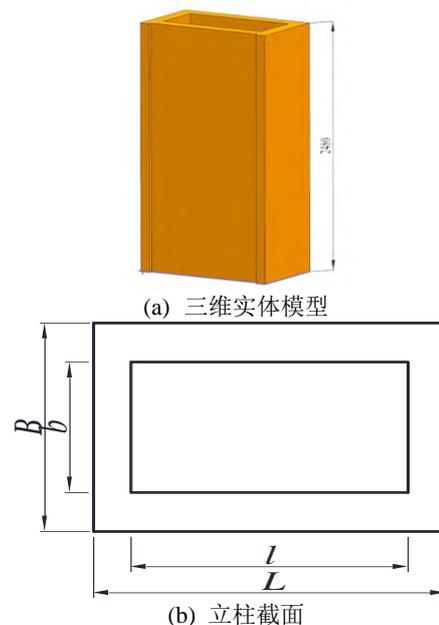


图2 树脂混凝土立柱模型图

表 2 CK5116 数控机床铸铁立柱主要尺寸(单位: mm)

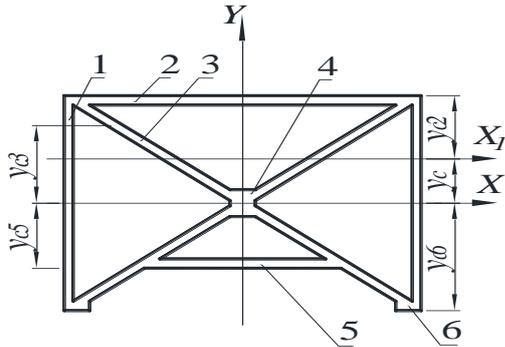
L_1	L_1	L_2	L_2	L_3	L_4	B_1	b_1	B_2	b_2	B_3	B_1	b_3
1 410	605	810	687	100	100	800	730	400	35	35	100	35

表 3 CK5116 数控机床树脂混凝土立柱主要尺寸(单位: mm)

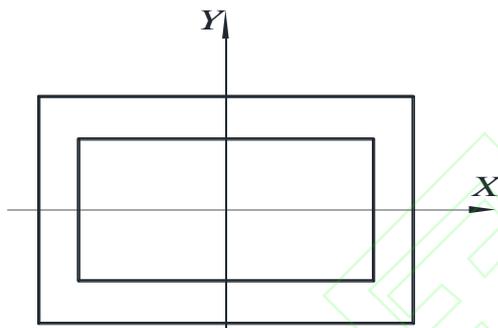
L	l	B	b
1 410	1 110	800	500

2.3 截面划分

将各立柱按截面进行划分, 如图 3 所示, 可根据平行移轴定理^[15,16], 计算机床立柱的截面惯性矩。



(a) 铸铁立柱



(b) 树脂混凝土立柱

图 3 立柱截面划分

$$I_c = \sum I_{ic} = 2I_{1c} + I_{2c} + 4I_{3c} + I_{4c} + I_{5c} + 2I_{6c} \quad (1)$$

式中:

$$I_{ic} = I_{ix} + A_i(y_{ci} - y_c)^2 = \frac{L_i B_i^3}{12} + L_i B_i (y_{ci} - y_c)^2 \quad i=1, 2, 3, 4, 6 \quad (2)$$

$$I_{5c} = I_{5x} + A_5(y_{c5} - y_c)^2 = \frac{(L_2 + l_2)B_3^3}{2 \times 12} + \frac{(L_2 + l_2)B_3}{2} (y_{c5} - y_c)^2 \quad (3)$$

$$y_c = \frac{\sum A_i y_{ci}}{\sum A_i} = \frac{2A_1 y_{c1} + A_2 y_{c2} + 4A_3 y_{c3} + A_4 y_{c4} + A_5 y_{c5} + 2A_6 y_{c6}}{2A_1 + A_2 + 4A_3 + A_4 + A_5 + 2A_6} \quad (4)$$

根据表 3 及图 3(b), 可计算出树脂混凝土机床立柱的截面惯性矩为:

$$I = \frac{LB^3 - lb^3}{12} \quad (5)$$

式中,

- y_c —— 截面形心距, 单位: mm;
- y_{ci} —— 各截面的中心距, 单位: mm;
- A_i —— 各截面的面积, 单位为: mm^2 ;
- I_{ic} —— 各截面对形心轴 X_I 的惯性矩, 单位: mm^4 ;
- I_{ix} —— 各截面对坐标轴 X 的惯性矩, 单位: mm^4 ;

通过(1)~(5)式可计算得出这两种不同材料机床立柱的截面惯性矩、断面刚度系数及质量, 其材料参数如表 4 所示。

表 4 不同材料立柱性能与材料参数

立柱材料	密度 (g/cm^3)	质量 (kg)	截面惯性矩 $I \times 10^{10}$ (mm^4)	断面刚度系数 $EI \times 10^9$ (N/m)	弹性模量 (GPa)	泊松比
铸铁	7.35	2 000	1.51	1.812	120	0.27
树脂混凝土	2.65	1 537	4.87	2.128	43.7	0.213

由表 4 可知, 本文设计的树脂混凝土机床立柱的抗弯刚度系数较铸铁立柱提升了 22.4%, 而质量则减少了 23.15%。由此可见, 树脂混凝土机床立柱静刚度较铸铁立柱有所提升, 且能较好的满足轻量化的设计要求, 符合目前市场需求。

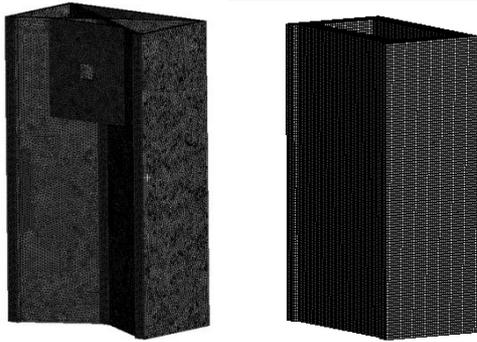
3 机床立柱的静态特性分析

3.1 材料模型建立及材料属性定义

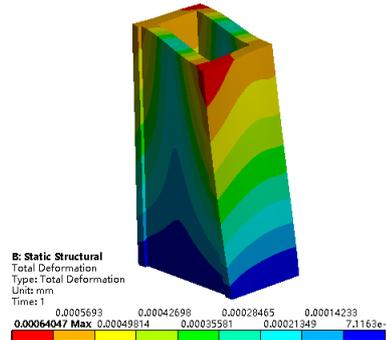
根据两种材料机床立柱的尺寸参数, 通过 UG NX 软件建立其三维实体模型后, 导入 ANSYS WORKBENCH 分析软件中, 其中材料属性按表 3-3 中参数进行赋值。

3.2 网格划分

采用自动网格划分的方法, 取 smartsize=2, 划分完成后, 铸铁立柱模型共有 950404 个网格, 590959 个节点, 树脂混凝土立柱模型得到 845008 个单元, 191952 个节点, 如图 4 所示:



(a) 铸铁立柱 (b) 树脂混凝土立柱
图 4 网格划分



(b) 树脂混凝土材料立柱
图 6 立柱变形图

3.3 施加载荷与约束

依据机床立柱实际安装情况, 约束立柱底面所有自由度, 在其顶端施加垂直向下的均布载荷, 同时在导轨面上施加水平的均布载荷。

3.4 结果分析

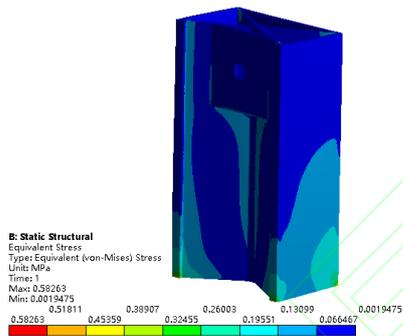
通过静力学分析, 分别得出铸铁和树脂混凝土两种材料机床立柱的应力云图和应变图, 分别如图 5 和图 6 所示。

由分析结果可知, 树脂混凝土立柱的最大应力为 0.16747 MPa, 相比铸铁材料立柱的最大应力 0.58263 MPa 降低了 71.25%; 同时两种材料立柱的最大变形均发生在顶部, 树脂混凝土材料立柱的最大变形量为 6.4047 μm , 相比铸铁材料机床立柱的最大变形量 7.8618 μm 降低了 18.53%, 由此可得出树脂混凝土材料立柱的静态特性优于铸铁立柱。

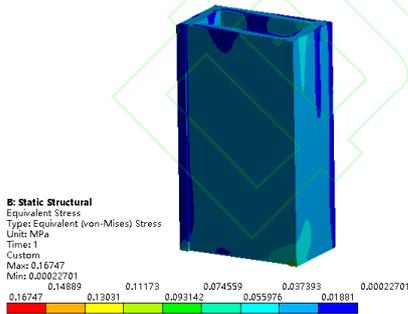
4 机床立柱的动态特性分析

4.1 模态分析

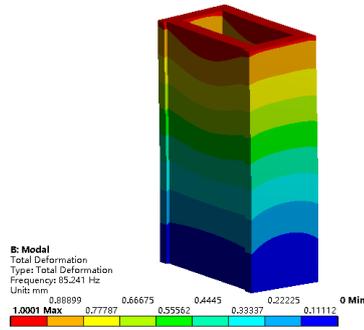
选用 ANSYS WORKBENCH 的 model 模块对立柱进行模态分析, 所施加的载荷频率范围为: 0~1000Hz, 这两种材料的立柱前六阶模态振型相同, 只是固有频率和振幅不同, 由于篇幅限制, 因此只列出树脂混凝土机床立柱前六阶模态振型图, 如图 7 所示, 并将各立柱的前六阶模态固有频率列在表 5 中。



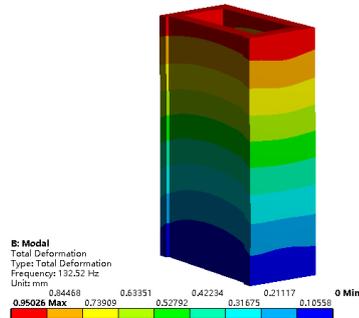
(a) 铸铁材料立柱



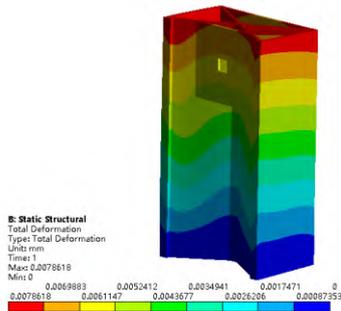
(b) 树脂混凝土材料立柱
图 5 立柱等效应力云图



(a) 一阶模态



(b) 二阶模态



(a) 铸铁材料立柱

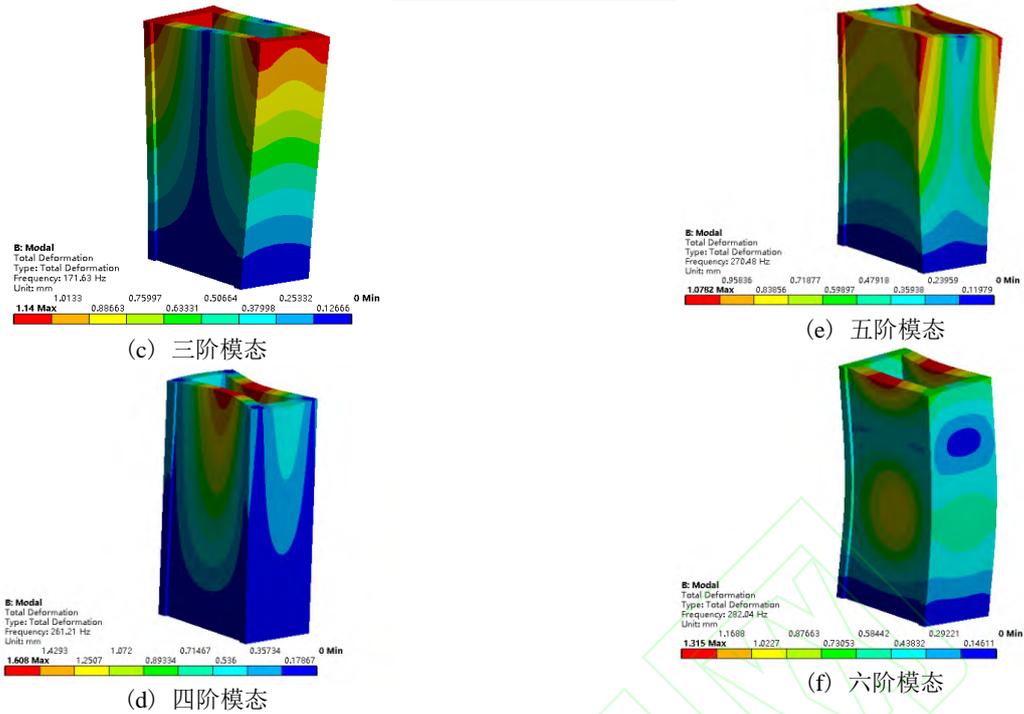


图7 树脂混凝土材料立柱的各阶模态振型图

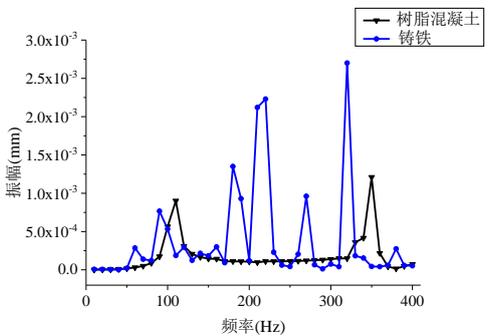
表5 两种立柱各阶模态振型固有频率(单位: Hz)

材料	一阶	二阶	三阶	四阶	五阶	六阶
铸铁	61.164	89.382	97.013	101.92	124.89	129.31
树脂混凝土	85.241	132.52	171.63	261.21	270.48	282.04
变化率	39.36%	48.26%	76.91%	156.28%	116.57%	118.11%

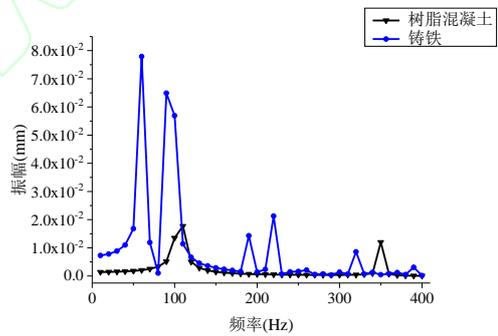
从表5中列出的不同材料立柱的各阶模态振型固有频率可知,采用树脂混凝土材料制造的机床立柱的各阶固有频率均明显高于传统铸铁材料立柱,可得出树脂混凝土机床立柱较铸铁立柱具有更优的动态性能。

4.2 谐响应分析

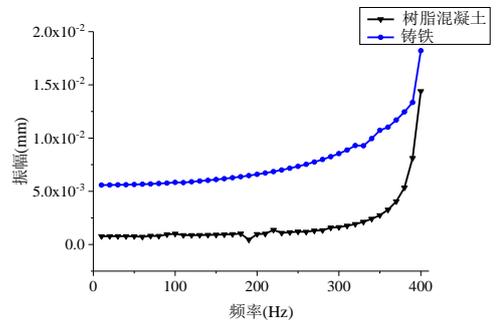
为了比较两种不同材料立柱在不同频率下的响应值对频率的曲线,对它们进行谐响应分析,以立柱的顶面为参考面,分别对其施加大小与模态分析相同的激振力,设定频率范围为0~400Hz,步长为10Hz,分析得出两种立柱各方向的振幅-频率图,如图8所示。



(a) X轴向各立柱频率-振幅曲线



(b) Y轴向各立柱频率-振幅曲线



(c) Z轴向各立柱频率-振幅曲线

图8 各方向频率-振幅曲线

两种材料各方向最大响应振幅如表6所示。

表6 最大响应振幅

	X轴	Y轴	Z轴
铸铁	2.70×10^{-3}	7.79×10^{-2}	1.82×10^{-2}
树脂混凝土	1.21×10^{-3}	1.77×10^{-2}	1.44×10^{-2}
变化率	55.18%	77.27%	20.88%

在相同加载及频率范围内, 通过比较两种不同材料机床立柱频率-振幅图可知, 树脂混凝土机床立柱比铸铁材料机床立柱的振幅变化跳动较小, 且对比其各方向的最大相应振幅可知, 树脂混凝土机床立柱的最大响应振幅小于铸铁材料的最大响应振幅, X轴、Y轴、Z轴的振幅缩减率依次为: 55.8%、77.27%、20.88%。从而可证明树脂混凝土机床立柱具有更优越的抗振性能。

5 结论

本文以 CK5116 数控机床的立柱为例, 研究了以树脂混凝土为原料的立柱结构, 并与传统的铸铁材料立柱做了分析对比, 得到了以下主要结论:

(1) 运用等价截面原则, 设计了该型号机床的树脂混凝土立柱, 通过对比树脂混凝土材料和传统铸铁材料两种不同材料机床立柱的性能, 得出树脂混凝土机床立柱的质量减少的同时抗弯刚度系数有所提高, 满足轻量化的设计要求, 符合市场需求。

(2) 应用有限元方法对铸铁和树脂混凝土两种材料的机床立柱进行静、动态性能分析。结果表明, 在相同的加载条件下, 树脂混凝土机床立柱比铸铁材料立柱的最大应力减低 77.52%, 变形量降低 17.11%, 树脂混凝土材料立柱的静态特性优于铸铁立柱。

(3) 模态分析结果表明, 树脂混凝土材料机床立柱的各阶固有频率均明显高于铸铁材料立柱。通过谐响应分析, 树脂混凝土机床立柱最大响应振幅较铸铁材料最大响应振幅在 X 轴、Y 轴、Z 轴的缩减率依次为: 55.18%、77.27%、20.88%。从而证明了树脂混凝土材料在提高机床静、动态性能方面的优越性能。

【参考文献】

- [1] Kim H S, Park K Y, Lee D G. A study on the epoxy resin concrete for the ultra-precision machine tool bed[J]. Journal of materials processing technology, 1995, 48(1): 649-655
- [2] Lokuge W, Aravinthan T. Comparative assessment of polymer concrete with different types of resin[J]. Proceedings of Concert, 2013
- [3] 沈佳兴, 徐平, 于英华, 郑思贤. BFPC 机床龙门框架组件优化设计及综合性能分析[J]. 机械工程学报, 2019, 55(9): 127-135
Shen J X, Xu P, Yu Y H, et al. Optimization design and comprehensive performance analysis of BFPC gantry, machine framework components[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(9): 127-135 (in Chinese)
- [4] 徐平, 盖巍巍, 于英华. 钢纤维树脂混凝土填充结构机床构件静态性能研究[J]. 制造技术与机床, 2011(4): 66-68+71
Xu P, Gai W W, Yu Y H. The performance of machine tool component of steel fiber concrete filled structure[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2011(4): 66-68+71 (in Chinese)
- [5] 于英华, 郑思贤, 徐平, 等. BFPC 龙门框架组件拓扑优化及性能分析[J]. 计算机仿真, 2020, 37(2): 216-220+236
Yu Y H, Zheng S X, Xu P. Topology optimization and performance analysis of BFPC gantry machine framework components[J]. Computer Simulation, 2020, 37(2): 216-220+ 236 (in Chinese)
- [6] 张园. 基于剩余强度理论的树脂混凝土疲劳性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015
Zhang Y. Study on fatigue performance of resin concrete based on residual strength theory[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015 (in Chinese)
- [7] 任娜娜. 机床用矿物复合材料的制备及性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015
Ren N N. Preparation and properties of mineral composites for machine tools[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015 (in Chinese)
- [8] 丁江民, 彭世财. 复合混凝土机床床身的设计[J]. 机械制造, 2018, 56(7): 34-36
Ding J M, Peng S C. The design of compound concrete machine tool bed[J]. Machinery, 2018, 56(7): 34-36 (in Chinese)
- [9] El-Hawary M M, Abdel-Fattah H. Temperature effect on the mechanical behavior of resin concrete[J]. Construction and Building Materials, 2000, 14(6): 317-323
- [10] Hans-Christian M, Christian B, Eberhard A, et al, Friedrich Bleicher. Materials in machine tool structures[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2015, 64(2): 725- 748
- [11] 李鹏, 季忠, 刘韧, 等. 矿物复合材料及其在机床上的应用[J]. 机床与液压, 2013, 41(19): 159-163
Li P, Ji Z, Liu R, et al. Mineral composite material and its application on machine tools[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2013, 41(19): 159 -163 (in Chinese)
- [12] Kamrun N. K, Alamgir H, Sampa A, et al. Analytical Study and Laboratory Tests for Investigating the Application of Polymer for Achieving High Strength Concrete[J]. Nano Hybrids and Composites, 2019, 46(39):39-51
- [13] Prabhu R V, Kalayarasan M, Thyla P R, et al. Structural investigation of steel-reinforced epoxy granite machine tool column by finite element analysis[J]. Journal of Materials: Design and Applications, 2019, 233(11): 2267-2279
- [14] 叶瑞汶. 机床大件焊接结构设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986
Ye R W. Machine tool large welding structure design[M]. Beijing: China Machine Press, 1986 (in Chinese)
- [15] 王学滨, 杨梅, 姜健. 利用平行移轴定理计算刚体的重心[J]. 辽宁工业大学学报: 自然科学版, 2001, 21(4): 49-51
Wang X B, Yang M, Jiang J. Computation of the gravity center of plane rigid body with parallel axis theorem[J]. Journal of Liaoning Institute of Technology, 2001, 21(4): 49-51 (in Chinese)
- [16] 白治明. 金属包装箱动力学分析及结构优化[D]. 陕西: 陕西科技大学, 2019
Bai Z M. Dynamic analysis and structural optimization of metal packing cases[D]. Shanxi: Shaanxi University of Science & Technology, 2019 (in Chinese)