

高速桥式机床的结构设计与优化

Structure Design and Optimization of High-Speed Bridge Machine Tool

北京航空制造工程研究所 冯长征 李初晔 李中凯



冯长征

现任北京航空制造工程研究所工程师,主要从事大型高档数控机床及航空专用装备的设计与调试工作,主管实施了多个重大项目和科研课题。

高速切削技术是近些年迅速发展起来的一项先进制造技术,它不但极大地提高了加工效率,而且显著地改善了零件的加工精度和表面质量。由于高速切削时产生的切削力小,发热少,残余应力以及零件变形较小,因此在航空、航天等领域得到了广泛应用。与 CNC 技术一样,高速切削技术是加工制造业中的又一技术革新。高速切削成为一种新的切削加工理念,被认为是 21 世纪加工工艺中最重要的一种。

高速切削加工除了要进行工艺研究外,还需要着重研制开发能够适应于高速切削加工用的高速度、高精度、高性能、高可靠性的高速切削机床。

高速切削技术的快速发展对机床、刀具、工艺等方面都提出了更高的要求。而且,新型号产品性能的不断提高促使结构设计越来越多地采用结构刚度高、重量轻、承载能力强的轻合金整体结构零件。这些零件具有尺寸大、结构复杂、材料去除率高、尺寸及位置精度和表面质量要求高等特点,采用常规数控机床很难控制加工中的变形并高效率地去除大切削余量,而高速切削机床是满足这种需要的有效技术设备。因此,高速切削加工除了要进行工艺研究外,还需要着重研制开发能够适应于高速切削加工用的高速度、高精度、高性能、高可靠性的高速切削机床。

龙门机床的结构演变

高速切削机床的开发与研制,机械方面主要集中在高速主轴系统、高速进给系统和机床总体结构的改进 3 个关键技术。除此之外,还应有高速、高性能的数控系统及其他配套设

施。

要提高机床进给速度,在结构设计上的改进就是在保持强度、刚度的基础上尽可能地减轻移动部件的质量。可利用先进的 CAD/CAE 技术优化设计机床移动部件的几何形状和尺寸参数,在不影响强度、刚度的条件下减小结构件的质量,达到提高速度和增强动态性能的作用。

另外,通过改变机床的整体结构,将部分移动件转化为固定件,这对减轻移动部件质量更有作用。就龙门铣床而言,多数采用固定工作台、移动龙门结构,这样机床不仅占地面积小,而且相对于工作台移动的龙门机床, X 坐标的驱动负载变化不大,但其可移动的整个龙门架具有较大的移动质量,不能适应更高的动态性能要求。

为了减轻移动龙门的质量,将龙门机床中的立柱从龙门中分离出来,根据机床 X 坐标的行程大小,设置数个立柱,并固定在地基上, X 向导轨、

驱动和位置反馈装置安装在固定于立柱上的底座上,运动部件(包括横梁、横滑板和滑枕部件)在X向导轨上移动,这种结构形式称为高架桥式龙门结构。

图1是传统龙门结构与高架桥式结构的对比分析,高架桥式龙门机床不但有效减轻了运动部件的重量,而且使运动部件的驱动点与运动部件的重心更靠近,使得动态性能也有了很大的提高;同时,将床身和工作台剥离,减小了单个构件的重量及规格尺寸,方便了制造、装配,也降低了成本;另外,桥式高速机床的立柱材料由钢结构件改为钢板-混凝土件,这种材料阻尼特性为钢材的7~10倍,提高了整个设备的抗振性和抗干扰能力。

高速桥式机床的结构设计与优化

以我所为成都飞机工业(集团)

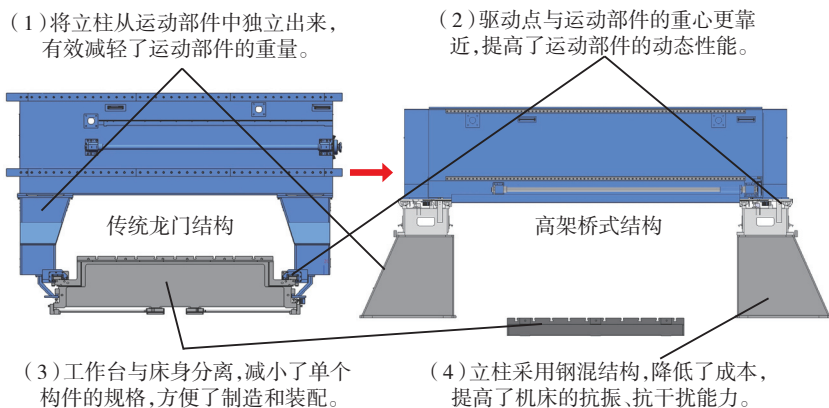


图1 传统龙门结构与高架桥式结构的对比分析

有限责任公司研制的桥式五坐标高速数控龙门铣床为例,机床要求坐标行程为X轴:8000mm、Y轴:3000mm、Z轴:1000mm;A摆角:±110°、C摆角:±400°,进给速度为X、Y、Z轴:30m/min,A、C摆角:10r/min,加速度 2m/s^2 ,主轴转速24000r/min。对于如此大规格的机床,这么高要求的速度、加速度,采用传统的动龙门结构很难实现,因此,我们采用了高架桥式结构,利用三维设计和有限元分析的手段进行了设计与优化,机床总体结构如图2所示。

对于30m/min的高速进给,导向采用高精度带预载的滚柱直线导轨,传动系统方面,X方向采用齿轮齿条双边同步驱动,Y、Z方向采用大导程滚珠丝杠副,位置反馈采用精密增量式光栅尺进行全闭环控制。

在机床结构设计方面,针对高速进给主要是在保证构件强度、刚度的基础上尽量减轻移动部件的质量。

移动部件含横梁、滑板、滑枕和摆角头,其中横梁所占比重最大,也是最为重要的承载构件,是机床总体结构设计优化的重点。

横梁的设计优化主要从两方面考虑:一是在不增加质量的前提下,使横梁上的最大变形极小化,提高横梁的静刚度;二是优化横梁结构,使其初、中阶固有频率不小于设定值,提高横梁的动刚度。设计、优化过程的具体实施步骤是:首先通过形状及拓扑优化确定横梁最佳的截面形状;然后通过尺寸优化确定最合理的外形尺寸和布筋情况。

拓扑优化是根据设定的目标通过一定的算法对小应力区域的材料不断剔除,逐步产生结构的外形轮廓和内部结构,得到最佳的概念模型。选择的横梁初始截面轮廓为长方形,如图3所示;然后根据实际工况,在底面施加两处约束,在正面按Y导轨位置施加作用力,拓扑优化的结果显示横梁中间和后上角的材料对结构刚性影响较小,可剔除,如图4所示。

形状及尺寸优化是在保证零件的拓扑结构不变的前提下,优化截面面积、筋板厚度等参数,寻求最理想的边界和几何形状。依然选择一个矩形截面的横梁初始模型,根据总体结构要求,初定横梁截面为 $950\text{mm} \times 1250\text{mm}$,长5470mm,按实际工况施加约束和作用力,如图5所示;通过优化在重量不增加和不降

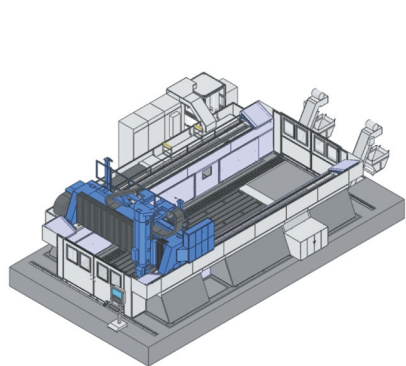


图2 桥式五坐标高速数控龙门铣床

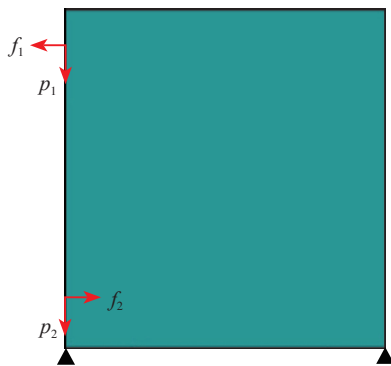


图3 横梁初始截面

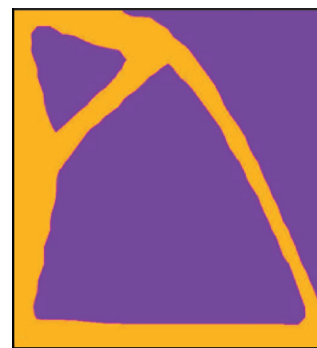


图4 拓扑优化的横梁截面

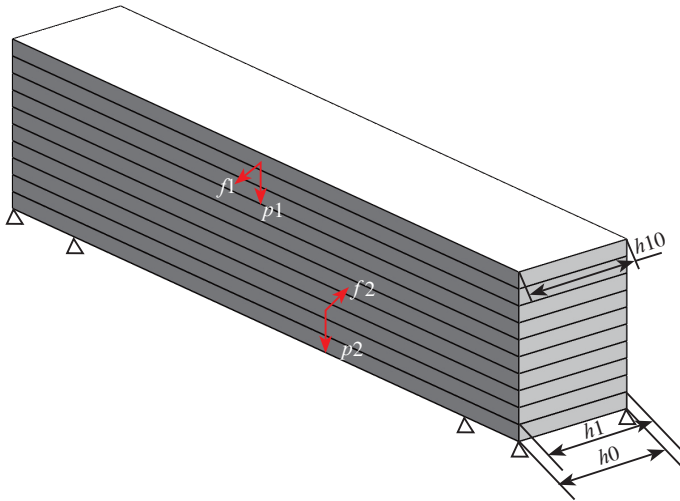


图5 横梁上的约束和作用力

低第一阶固有频率的前提下,确定最佳宽度 $h_0, h_1, h_2, \dots, h_{10}$ 数值分布,使横梁上的变形最小。

横梁形状及尺寸优化的数学模型:

(1) 寻求变量组合:

$$h_{0_{\min}} \leq h_0 \leq h_{0_{\max}},$$

$$h_{1_{\min}} \leq h_1 \leq h_{1_{\max}},$$

$$h_{2_{\min}} \leq h_2 \leq h_{2_{\max}},$$

.....、

$$h_{10_{\min}} \leq h_{10} \leq h_{10_{\max}},$$

使横梁最大变形 $\delta (h_0, h_1, h_2, \dots, h_{10})$ 极小。

(2) 满足约束条件:

$$m_s (h_1, h_2, h_3, \dots, h_{10}) \leq m_b,$$

$$\sigma (h_1, h_2, h_3, \dots, h_{10}) \leq \sigma_b,$$

$$-f_{rq} (h_1, h_2, h_3, \dots, h_{10}) \leq -f_q,$$

$h_{0_{\min}}, h_{0_{\max}}$ 等为设计变量的上下限, m_b 为横梁质量的上限, σ_b 为许用应力, f_q 为初阶固有频率下限。

通过优化计算,得出横梁的变形图和各个 h 值,如表 1 所示,结果表明在质量不变的前提下,通过形状优化使质量分布发生变化,最终变形比初始结构变形降低了 27%,而结构上的最大应力和初阶固有频率基本保持不变,因此通过形状及尺寸优化可使横梁的静、动态性能均有较大提高。

结合 2 种优化方法,最终设计的

横梁截面如图 6 所示。

桥式五坐标高速数控龙门铣床的坐标设计采用笛卡尔坐标方式,各坐标串联式叠加,机械结构如图 7 所示。滑板在横梁前,滑枕在滑板前,摆角头在滑枕上。从结构力学的角度看,很明显会发现横梁的支撑点分布很不合理,需要将前支点前移,但由于空间结构所限,内侧前支点前移空间很小,只能将外侧的前支

表1 横梁初始结构与优化后的计算值比较

参数	初始结构	优化后	说明	
计算变量	h_0	950	1120	横梁各位置的宽度/mm
	h_1	950	1123	
	h_2	950	1102	
	h_3	950	1051	
	h_4	950	1025	
	h_5	950	963	
	h_6	950	927	
	h_7	950	844	
	h_8	950	816	
	h_9	950	782	
h_{10}	950	771		
状态变量	M_s	50666	50373	横梁质量/kg
	σ	15.7	15.5	横梁应力/N
	f_m	160	162	第一阶固有频率/Hz
目标函数	δ	0.067	0.049	最大变形/mm

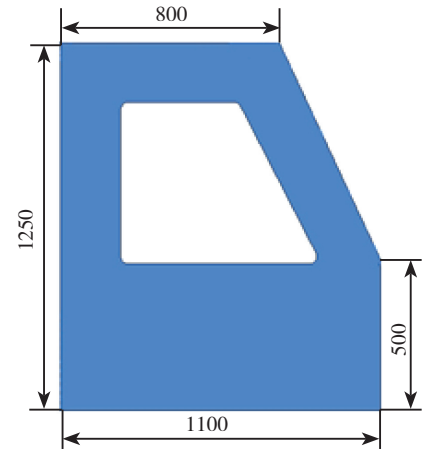


图6 横梁最终截面

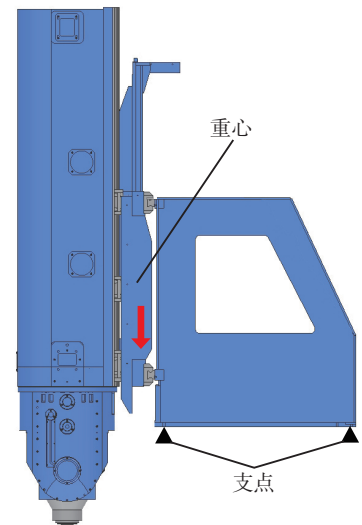


图7 运动部件的支点与重心位置

点前移,因此横梁的最终设计模型如图 8 所示。通过计算得出各个导轨滑块上的支反力,如表 2 所示,各数值得到明显优化,满足设计要求;而受力最大的正是两个内侧前滑块,约 17kN,此数值为导轨的选择提供了理论依据。

通过以上的优化设计手段,完成了桥式五坐标高速数控龙门铣床的整机设计,在此基础上,利用有限元分析手段对整机进行了静、动态的模拟仿真,图 9~ 图 12 是分析结果。计算表明在机床自重和切削力作用下,机床上的应力都很低,从强度方面考虑机床是安全可靠的。

对整体机床进行模态分析,目的是通过计算固有频率和振型对结构

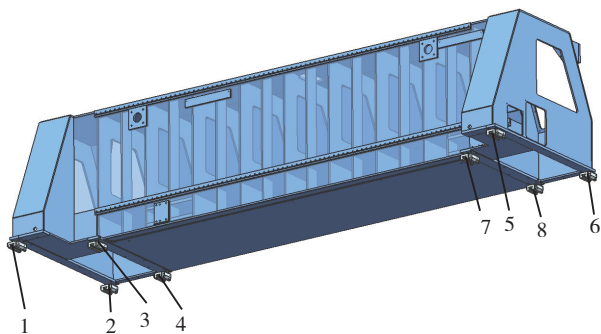


图8 横梁及滑块支点

表2 横梁导轨滑块上的支反力

滑块	f_y / N	f_z / N
1	-1470	6023
2	-1710	668
3	-3845	16382
4	-2326	5781
5	1209	6256
6	1748	636
7	4372	16827
8	2020	5471

设计提供参考,当激振力频率接近某一固有频率时,结构将发生共振。由于激振力频率不可改变,所以只有通过改变设计使结构固有频率避开激振频率。

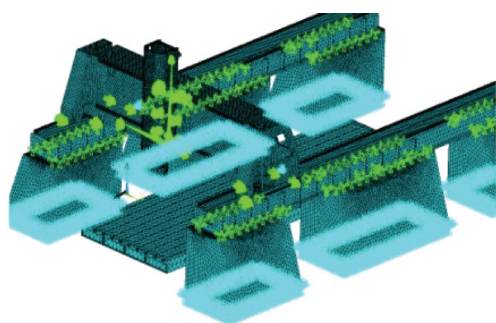


图9 有限元网格和耦合约束图

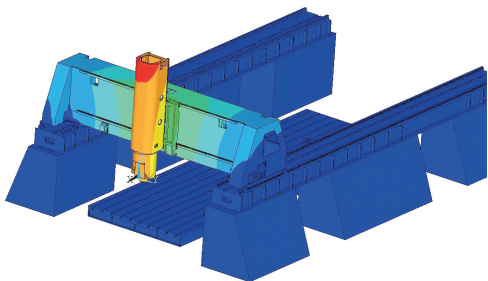


图10 自重下机床的综合变形云图

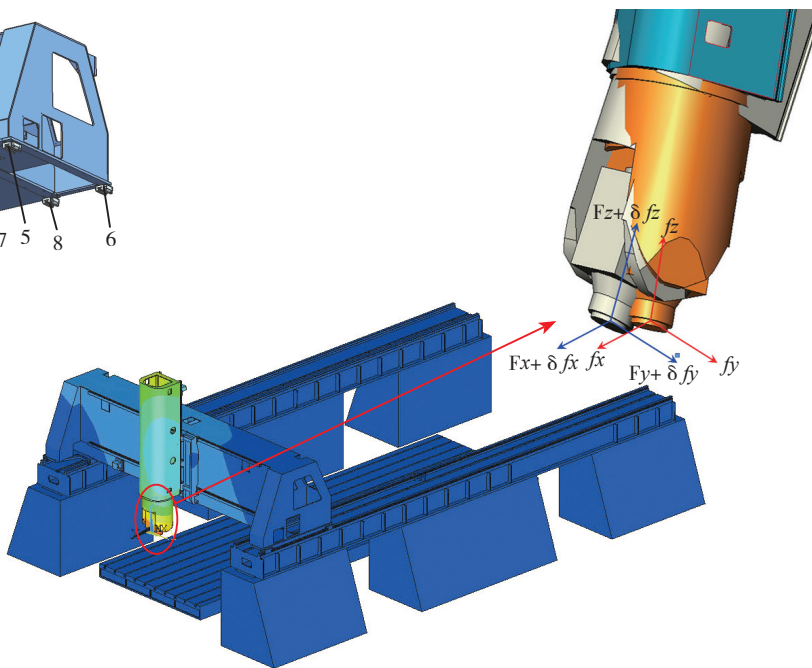


图11 切削力下机床的综合变形云图

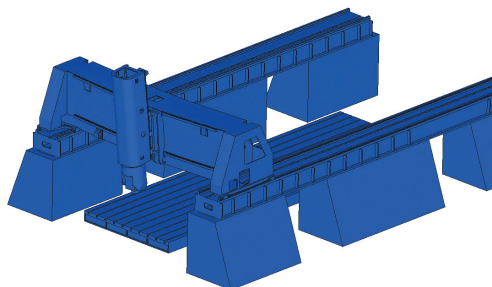


图12 机床第一阶阵型

通过对该机床各阶振型分析了解到,前10阶固有频率在48~139Hz范围内,而最常遇到的激振频率由加工产生,例如一把三齿铣刀以20000r/min的速度进行加工,产生的振频为1000Hz,离机床的固有频率较远,不易产生共振。

结束语

人们对“高速”、“高效”的追求是永无止境的,高速机床将仍然有很大的发展空间。而高速桥式结构以其动态性能好、敞开性、可扩展性好等特点,将越来越多地应用到航空、航天等领域的大型设备上,不

仅是金属切削机床,也会应用到一些高速的专用设备上,如复合材料铺设设备、激光焊接设备、无损检测设备等,因此,高速桥式机床的应用也将会非常广泛。

参考文献

- [1] 张根保,王时龙,徐宗俊. 先进制造技术. 重庆:重庆大学出版社,1996.
- [2] 王爱玲,白恩远,赵学良,等. 现代数控机床. 北京:国防工业出版社,2003.
- [3] 徐维新,刘国春,彭涛等. 机械强度可靠性计算. 北京:科学技术文献出版社,1994.
- [4] 郑修麟. 材料的力学性能. 西安:西北工业大学出版社,1994.
- [5] R.W. 克拉夫, J. 彭津. 结构动力学. 北京:科学出版社,1983.
- [6] 魏志强,王先逵,杨志刚. 高速加工机床及其关键技术. 制造技术与机床,1998(1):5-7.
- [7] 林胜. 数控高速切削加工技术. 航空制造工程,1997(2):16-17.
- [8] 陈小明. 飞机零件的高速高效加工. 航空制造技术,2004(4):44-47.
- [9] 覃文洁,左正兴,刘玉桐,等. 机床整机的动态特性分析. 机械设计,2000(10):24-26.

(责编 泰山)