

# 机械结构虚拟优化设计技术与应用研究

胡如夫<sup>1,2</sup>, 吴南星<sup>1</sup>, 孙庆鸿<sup>1</sup>

(1. 东南大学机械系, 南京 210096; 2. 台州职业技术学院机电系, 浙江台州 318000)

**[摘要]** 虚拟优化设计是多学科先进知识形成的综合技术,是现代机械产品设计的发展方向。作为一种新的设计模式,应用该技术减少了产品开发中设计-试制-试验等过程的重复,设计人员可在虚拟可视化环境中对结构进行分析和优化,有利于缩短产品的设计周期,降低开发成本;分析了产品虚拟设计的特点,提出了机械结构虚拟优化设计的流程,并以数控车床主轴箱体动态优化为例进行了应用研究。

**[关键词]** 机械结构;虚拟设计;优化设计

**[中图分类号]** TH112 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2004)10-0045-03

传统的产品设计方法需经过设计、物理样机试制、试验、修改设计、重新试制,经较长时间调试后才能投入生产,许多设计问题不能及时发现,导致产品设计周期长、成本高,无法适应当今市场对产品的需求。随着计算机技术的迅速发展和在工程中应用的逐步深入,先进制造技术的新思想、新概念、新模式层出不穷。以计算机技术和信息技术为代表的高新技术在其中发挥着重要的作用,机械产品的设计和开发向着3D化和虚拟化的方向发展<sup>[1,2]</sup>。采用3D设计软件进行产品开发设计的主要优点在于,能够实时地评价零部件的结构工艺性、可装配性和可制造性等。由于3D设计软件一般都采用基于特征的参数化造型方法,因此,特别便于对三维虚拟实体零部件的结构特征进行修改,以满足可装配性、可制造性和动态特性等方面的要求;利用虚拟装配技术,得到三维虚拟样机,通过仿真分析和干涉检验,修改和完善设计方案。

机械结构虚拟优化设计是以计算机建模和仿真技术为基础,集计算机图形学、虚拟现实技术、机械动力学、有限元分析、优化设计等技术为一体,由多学科知识组成的综合系统技术,是机械结构动力学设计技术在计算机环境中数字化、图像化的映

射。笔者建立了机械结构动态虚拟设计的整体思路和流程,以数控车床主轴箱体设计为工程应用实例进行了分析,实现了结构虚拟动态优化设计。

## 1 机械结构虚拟动态优化设计的特点

虚拟产品开发由各个“虚拟”产品的开发活动组成,由“虚拟”产品的开发团队实施,由“虚拟”产品开发资源保证,通过分析“虚拟”产品信息和产品开发过程信息实现开发“虚拟产品”的时间、成本、质量和开发风险的降低。虚拟产品开发的最终目的是缩短产品开发周期,缩小产品开发和用户之间的距离<sup>[3]</sup>。虚拟产品开发的特点是产品的“虚拟化”,同时还包括功能虚拟化、地域虚拟化、组织虚拟化。功能虚拟化是指虚拟产品开发系统虽有制造、装配等功能,但没有执行这些功能的机构;地域虚拟化是指产品开发各功能活动分布在不同的地点,通过网络加以连接和控制;组织虚拟化是指扁平的多元的“网络组织结构”随着开发目标的发展而产生、变化和消亡。

机械产品结构虚拟动态优化设计是在计算机虚拟可视化环境中进行的。在虚拟可视化环境中,通过建立结构的三维CAD模型、CAE有限元模型和

**[收稿日期]** 2004-03-29; **修回日期** 2004-05-12

**[基金项目]** 国家自然科学基金资助项目(50375026)

**[作者简介]** 胡如夫(1966-),男,浙江宁波市人,东南大学博士研究生,台州职业技术学院副教授

各种运动学、动力学分析模型,形成具有一定功能的基于计算机的仿真系统,在此基础上进行模型参数化设计和动态分析,利用人-机交互的可视化环境,并根据虚拟动态分析的结果,对结构设计中的缺陷进行修改或重设计。因此,虚拟动态优化设计技术具有以下优点<sup>[4]</sup>:首先,它把人在CAD环境下的活动提升到“人-机”一体化的积极参与的主动活动,因而构成了融入性的开发系统,使机械产品的结构设计在应用虚拟设计后能充分发挥设计者的智慧和决策能力。其次,它是支持和推进并行工程实施的技术。由于虚拟现实技术能模拟产品的实际运行,具有高度可视化,各方面的专业设计人员和用户能通过直观的感受来了解产品。第三,这种优化设计方法不需要制造物理原型便能测试、评价和修改设计的某些特征,在设计阶段通过对虚拟样机的分析、评价和修改,保证产品具有优良的性能,有利于缩短产品开发周期和降低开发成本。

## 2 机械结构动态虚拟设计流程

在三维可视化环境中,设计者利用各种CAD设计软件(如Pro/E,UGII等)建立机械结构的实体模型,通过IGES或STEP文件传输格式将简化的CAD模型的几何特征信息输入CAE软件(如ANSYS,NASTRAN),建立三维可视化的CAE模型,并对模型进行工程分析(包括振动模态,热变形,运动学和动力学仿真等),把CAE模型数据和分析结果数据分别存入CAE模型数据库和分析结果数据库,以图形或图像的形式直观地显示出来,仿真结果可直接指导设计人员进行结构的动力学优化设计与性能预测<sup>[5]</sup>,见图1。

在三维虚拟环境中,设计人员通过直观的可视化图形和图像,直接获得模型的信息,并对有限元模型进行修正,提高建模精度。同时,在可视化环境中,结构的运动学和动力学仿真是以图形或图像的形式动态或直观地显示出来,使设计人员了解整体结构和部件的特性,如结构的运动仿真和干涉检查,结构整体或部件的静、动态特性分析等。特别是通过结构动态分析和仿真可及时发现并修改结构上的薄弱环节,以确保具有优良的动态性能。

采用虚拟设计技术,设计人员在三维可视化虚拟环境中,应用人-机交互的设计思想,利用现有的设计和分析软件对模型进行结构动态优化设计,实现机械结构的动态分析、结构优化和性能预测,

充分发挥设计人员的想象力和创造力,使设计人员的经验和科学的计算分析完美地相结合,推进结构设计的创新发展,提高机械产品的创新开发能力。

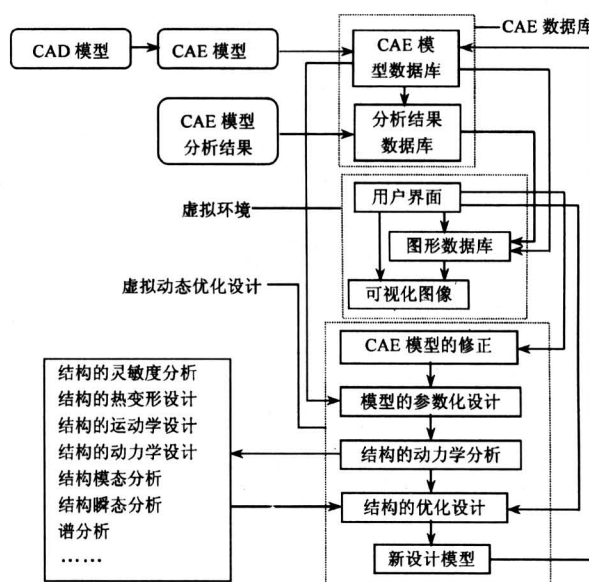


图1 机械结构虚拟优化设计与分析流程

Fig.1 The flow to implement virtual optimization design and analyse

## 3 工程实例分析

数控机床主要结构部件包括床身、主轴箱、拖板和尾架。在虚拟环境下,车床部件结构动力学优化设计方法是对原车床部件建立有限元模型,对模型进行模态振型分析,通过与试验模态频率的比较,验证所建模型的正确性和可信度,根据模态分析结果来指导对原部件结构进行重新设计和修改。

就笔者研究的主轴箱体而言,考虑到工艺及制造等方面的因素,采用增加筋板和对筋板进行合理布置来改善结构的动力学特性,最终选出最佳的部件优化方案。对原主轴箱体进行模态分析,获得前三阶振型如图2所示,模态频率见表1。由表1可知,所建模型的计算频率与试验频率吻合很好,说明该模型是正确可信的。在虚拟优化设计中就可以该模型作为基础,通过对模型结构特征的修改,实现结构的动态优化。由于数控机床主轴箱体整体结构动刚度较差,不利于提高高速主轴的旋转精度,因此,在原主轴箱体内底板分别加十字型、井字型和X型筋板进行模态振型分析,以零件前三阶固有频率的提高为优化目标。结果表明,X型筋板对提高箱体的动刚度最有效。主轴箱体的优化结构如

图 3 所示。表 2 为新旧主轴箱体固有振型对比，可见新床身频率比原床身有了很大提高，新床身比原床身拥有更好的刚性，从而达到了优化目的。

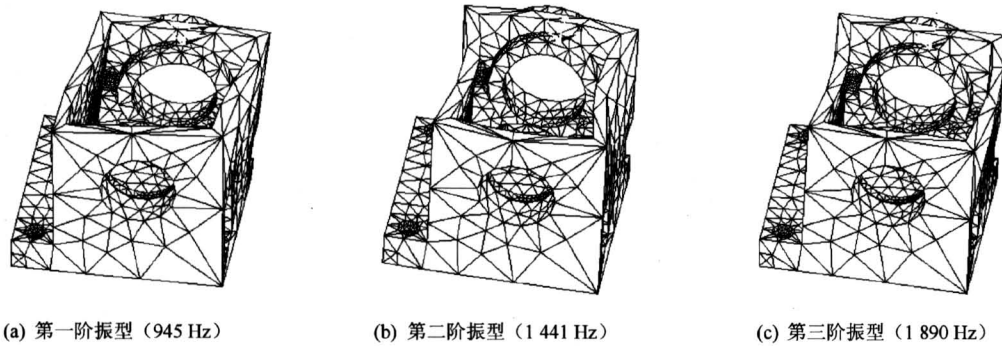


图 2 原主轴箱体前三阶振型和频率

Fig.2 The first three vibration models and mode frequencies of original NC lathe headstock

表 1 主轴箱体试验与计算固有频率对比

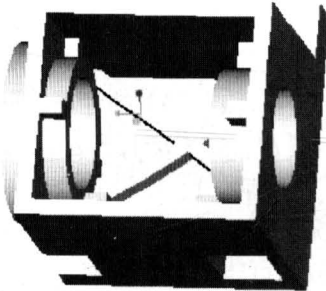
Table 1 The contrast value of test frequencies and calculation frequencies of NC lathe headstock

阶数	试验频率 /Hz	计算频率 /Hz	误差 /%	振型
第一阶	960	945	1.5	对角扭
第二阶	1 445	1 441	0.27	对边相向振
第三阶	1 883	1 890	0.3	对边同向振

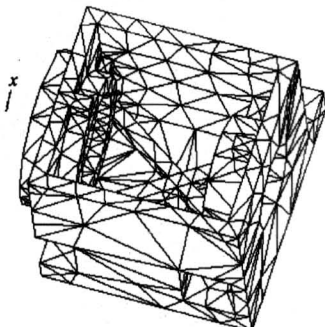
表 2 新旧主轴箱体固有振型对比

Table 2 The contrast value of natural frequencies of original and new NC lathe headstock

阶数	原主轴箱体	原主轴箱	新主轴箱体	新主轴箱
	频率/Hz	体振型	频率/Hz	体振型
第一阶	945	对角扭	1 084	对角扭
第二阶	1 441	两边相向振	1 772	两边相向振
第三阶	1 890	两边同向振	2 559	两边同向振



(a) 新主轴箱体三维 CAD 模型



(b) 新主轴箱体有限元模型

图 3 新主轴箱体的三维 CAD 模型和有限元模型

Fig.3 The CAD model and FE model of the new NC lathe headstock

### 4 结语

产品开发的全过程在可视化的虚拟环境中进行，给产品的设计开发带来了极大的方便和优势。将虚拟现实与 CAD 结合起来，在虚拟环境中进行产品设计，进一步拓宽了计算机技术在产品设计领域的应用范围，实现了产品结构动态性能的优化，缩短了产品的开发周期，是提高产品的设计水平和降低开发成本的有效途径。

#### 参考文献

[1] 王玉新,邵晓梅,姜 杉. 3 维虚拟设计环境下的机械产品概念设计[J]. 中国机械工程, 2001, 12(3): 256~258

[2] 张海霞,吴华鹏,谢洪潮. 基于因特网的机械性能虚拟设计[J]. 清华大学学报,2000, 40(4): 100~102,110

[3] 蒋祖华,唐文献,赵良才. 虚拟产品开发体系研究[J]. 华东船舶工业学院学报,1999, 13(2): 47~52

[4] 盛伯浩. 产品虚拟开发[J]. 中国机械工程,1998, 9(11): 67~68

[5] 陈 新,孙庆鸿,陈 南. 基于虚拟环境的机械结构动态设计方法的研究[J]. 制造业自动化,2000, 22(12):36~38