

基于虚拟制造技术加速产品自主创新

肖田元,张林镗,赵银燕

清华大学自动化系,国家 CIMS 工程技术研究中心,北京 100084

[摘要] 在落实“创新型国家”的发展战略中,提出用虚拟制造技术加速我国产品创新的技术路线。概要地讨论了虚拟制造的特点,在此基础上结合 3 个典型实例,介绍了在基于逆向工程的产品开发、自主产品开发及多学科产品开发中采用虚拟制造技术加速自主知识产权产品开发的实践。

[关键词] 虚拟制造;产品创新;逆向工程

[中图分类号] TP391.9

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2007)04-0005-10

Accelerating Independent Innovation of the Products with VM Technique

XIAO Tianyuan, ZHANG Linxuan, ZHAO Yinyan

Department of Automation, National CIMS Engineering Research Center, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: In this paper, the technical road map to accelerate independent innovation of the products with Virtual Manufacturing (VM) technique is proposed in executing the strategy “to promote the building of innovation-oriented country”. This paper discusses the features of VM technique. Three typical instances of product innovation, that is, the product innovation based on the reverse engineering, the independent product innovation, and the multi-disciplines product innovation, are introduced, in which the products of owing independent intellectual assets have been developed in short time. Some opinions how VM is applied in our industry are presented.

Key Words: virtual manufacturing; product innovation; reverse engineering

CLC Number: TP391.9

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2007)04-0005-10

0 引言

随着全球经济一体化经济环境的形成,市场竞争愈演愈烈,国内许多企业正面临着严峻的考验,有些企业陷入了困境。它们大多面临着急需解决的现实问题是缺乏具有市场竞争力的产品。

造成目前这种状况的原因有以下几个。首先,产品生命周期日益缩短,竞争日趋频繁,例如,一种完全新型的汽车研发从过去的 5 年缩短到 18 个月,一种完全创新的工程机械国外已经实现了“3,3,3 制”(3 周设计,3 个月开发,3 年换代),美国机械工业产品平均生命周期为 3 年;而我国,据统计,2 000 多种主导产品平均生命周期为 10.5 a,具有原始创新的产品开发时间太长,到产品上市时即发现已经没有竞争能力。美国制造业新产品贡献率达到国内生产总值的 50%以上,而我国制造业新产品贡献率不足国内生产总值的 10%。

其次,我国相当多的企业采取“引进消化”策略,例如,机械产品技术 50%以上来源于进口。实际上,统计资料表明,20 世纪 90 年代以来,我国来自国外的产品技术逐年递增,其中,自 1995 年以来,技术引进经费每年均超过国内科技经费投入金额。我国企业技术过多依赖国外,不拥有自主的核心技术,无法掌握产业升级和竞争能力提高的主动权。例如,我国的汽车工业没有像日本、韩国等国家那样,实现从“进口替代”到“出口导向”战略的转变。外资为了实现其市场扩张、长期攫取高额利润的战略目标,必然严格控制其核心技术。由于双方在技术、经济基础方面的巨大差距,使得外方能在技术上实施严密的控制,以长期保持技术优势。在技术动态引进的过程中由于自主开发能力有限,而使国产化速度赶不上引进技术的速度,对外方母公司的依赖程度日益严重,我方的研究开发逐步萎缩,甚至逐步

收稿日期:2007-01-23

作者简介:肖田元,男,北京市海淀区清华大学自动化系,教授,研究方向为系统仿真、虚拟制造、CIMS、网络化制造;

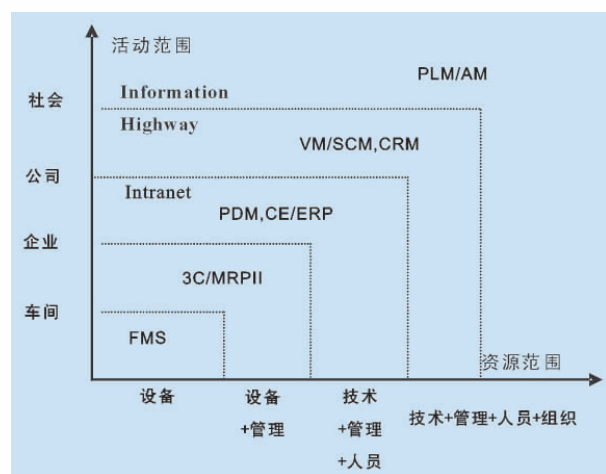
E-mail: xty-dau@tsinghua.edu.cn

放弃自主开发,走上了基本依赖进口的“拿来主义”,陷入了“引进-生产-淘汰-再引进”的不良循环。长此以往,中国制造的命运必然掌握在别人手中。

问题还不仅如此,即使引进了先进技术、先进产品,普遍的情况往往是“消化不良”、“照猫画虎反成犬”,质量往往与引进产品相差甚远。据统计,我国机械工业主导产品达到 20 世纪 90 年代国际水平的占 30%,停留在 20 世纪 80 年代国际水平的占 40%,还有 30% 产品仍停留在 20 世纪 60-70 年代水平,无法在市场找到立足之地,人们讥讽为“中国的土豆最多,美国的土豆最值钱”。

造成这种局面的原因是多方面的,其中一个重要的原因是现有技术手段严重地束缚着设计与开发人员潜能的发挥。“以信息化带动工业化”,这是在深入分析比较我国与先进国家工业发展差距后提出的我国国民经济发展的战略方针。

在实施以信息化带动工业化的发展战略中,863 计划自动化领域设立了“CIMS 主题”,探索如何用信息技术改造、提升我国的制造业,这与国际上工业发达国家的技术路线是一致的。近 20 余年来,制造业信息技术取得了长足的进步,其发展历程可用图 1 描述。横轴表示了信息系统管理的对象范围,纵轴表示了信息技术支持企业经营活动的覆盖范围。



PLM/AM——产品全生命周期管理/敏捷制造
VM/SCM, CRM——虚拟制造/供应链管理/客户关系管理
PDM, CE/ERP——产品数据管理,并行工程/企业资源计划
3C/ MRP II——CAD/CAPP/CAM/制造资源计划
FMS——柔性制造系统

图 1 制造业信息技术发展

Fig. 1 Progress of information techniques in manufacturing industry

无论是国内还是国外,也无论是大企业还是小公司,都在积极主动地采用先进技术和生产方式,如在管

理方面从早期的单项 MIS,MRP,MRP II,ERP 到 SCM,CRM,AM,在产品设计与开发方面,从 3C(CAD/CAPP/CAM),CE/PDM 到 VM,PLM 等,以增强企业在市场竞争中的应变能力和生存能力。

在所有这些技术中,虚拟制造被研究界、工业界广泛认为是信息时代的先进制造技术,特别是对产品创新开发来说,虚拟制造被认为是最有成效的技术^[1-2]。

“虚拟制造”中的“制造”是广义的制造,即一切与产品相关的活动和过程,有些文献称为“大制造”(Big Manufacturing),这是相对于传统的狭义“制造”而言的,有些文献为了区别,将传统的狭义“制造”称为“小制造”(Small Manufacturing)。“虚拟制造”中的“虚拟”(Virtual)含义则是:这种制造技术虽然不是真实的,但却是“本质上的”,也就是说,“虚拟制造”就是“在计算机上实现一切与产品相关的活动和过程的本质内容”。实际上,虚拟制造最终提供的是一个强有力的建模与仿真环境,使得产品的规划、设计、制造、装配等均可以在计算机上实现,且对涉及生产过程的各方面提供技术支持。

1 虚拟制造的特点

虚拟制造既涉及与产品开发制造有关的工程活动,又包含与企业组织经营有关的管理活动。根据所涉及的范围不同,文献[3]根据工程活动类型将虚拟制造分成 3 类,即以设计为核心的虚拟制造、以生产为核心的虚拟制造和以控制为核心的虚拟制造。与产品创新活动直接相关的是以设计为核心的虚拟制造,有些文献亦称为虚拟产品开发(Virtual Product Development, VPD)或虚拟样机开发(Virtual Prototyping, VP)。图 2 表示出设计开发技术发展的几个阶段。直到 20 世纪末,面向计算机的产品建模技术问世以后,经过近 10 年的发展,虚拟产品开发技术才逐步显示出其巨大的能力^[4-5]。

以设计为中心的虚拟制造的核心思想是:把制造信息引入到设计过程,利用仿真来优化产品设计,从而在设计阶段,就可以对所设计的零件甚至整机进行可制造性分析,这包括加工过程的工艺分析、铸造过程的热力学分析、运动部件的运动学分析和动力学分析等,甚至包括加工时间、加工费用、加工精度分析等。它主要是解决“设计出来的产品是什么样”的问题。

虚拟产品开发基于三维模型,在计算机仿真环境下,对产品进行构思、设计、制造、测试和分析,实现产品开发的本质过程,其主要目标是减少物理样机的试制、缩短产品开发周期、降低开发成本,力争一次成功。

与以往的计算机辅助设计不同,VPD 虽然基于许多单项分析技术,但又远远高于单项技术,有以下主要特征。

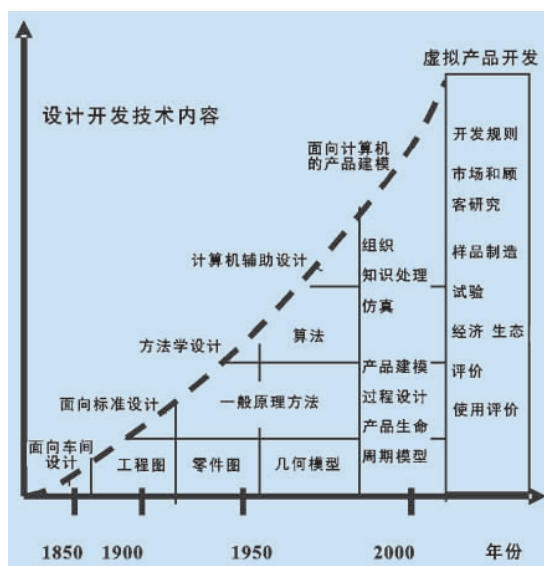


图 2 产品开发技术发展沿革

Fig. 2 Evolution of product development techniques

1) VPD 要求在设计的一开始, 描述零件或产品的模型不仅仅是几何模型, 还包括各种特征模型, 如加工特征、结构特征、装配特征等等, 从过去的 CAX 发展到 DFX (Design For Machining, Assembly, Quality) 等。

2) VPD 是在计算机上建立产品的三维全数字化模型, 从而, 在设计阶段就可以对所设计的零件甚至整机进行可制造性分析, 这包括加工过程的工艺分析、铸造过程的热力学分析、运动部件的运动学分析以及整机的动力学分析等, 甚至包括加工时间、加工费用、加工精度分析等, 从而不依赖于传统的对物理样机的反复修改, 这就使产品开发走出主要依赖于经验的狭小天地, 发展到了全方位预报的新阶段。

3) 整个设计过程是在三维画面甚至在虚拟现实环境中进行。研究者能够沉浸到由模型创建的虚拟环境中去, 通过多种感知渠道直接感受不同媒体映射的模型运行信息, 并利用人本身的智能进行信息融合, 产生综合映射, 从而深刻地把握事物的内在实质。

4) 具有三维动画能力的各类仿真分析软件实现了与 PDM 的无缝联接, 无需用户为分析重新建模。强调设计部门与制造部门之间协同工作, 包括产品异地设计、产品优化设计和产品性能评价等。

5) 虚拟产品开发“在计算机上制造”出的“数字样机”, 是已经经过仿真验证后满足“可制造性”要求的样机, 实际上这是企业基本不消耗能源和原材料的新产品储备, 一旦市场需要, 即可马上投入生产, 从而为在市场竞争中处于有利位置打下坚实基础。

2 虚拟制造支持的产品创新实例

正是由于虚拟产品开发技术的上述特点, 从 20 世

纪末以来, 面对日趋激烈的市场竞争环境, 先进工业发达国家企业已经大力推进虚拟产品开发技术, 大大缩短了新产品开发周期, 降低了开发成本, 提高了产品质量。典型的例子如下。

波音公司在研制波音 777 时, 广泛采用了虚拟制造技术, 位于美、加、日、英四国的相关单位在广域网上协同设计与开发, 对所有虚拟部件远距离实时集成测试; 飞行仿真器的虚拟现实提供了全天候飞行条件, 对全部试飞工作进行了虚拟测试, 产生了虚拟单元模拟制造过程, 设计了 NC 机床刀位轨迹、机床速度、进给速度等; 并可对虚拟系统测试控制器编程、校验机翼的铆接机器人运动轨迹等, 这样波音 777 只花了不到 5 年的时间就开始获得了订货, 比波音其他型号开发时间平均 9 年缩短了将近一半。

在汽车行业, 福特公司在 1999 年基于数字样车开发出全新的产品, 开发周期从 36 个月缩短到 18 个月, 节省开发费 4 200 万美元, 制造阶段节省费用 10 亿美元。奔驰公司采用同样的技术路线, 全新车定型前的物理样车碰撞试验, 从过去的 150 辆减少到 15 辆。

我国自 1996 年开始虚拟制造技术的跟踪研究, 并日益引起我国科技工作者的关注。据不完全统计, 目前全国已有 34 家科研机构、高等院校和企业正在开展 VM 技术方面的研究, 进行初步的应用。国家 CIMS 中心从 1996 年开始开展虚拟制造研究与开发, 本节介绍中心与企业合作开展的虚拟制造技术应用的 3 类典型实例, 其目的是为我国企业开展用虚拟制造技术加速产品自主创新作参考。

2.1 基于逆向工程的产品创新

目前, 我国许多企业的产品采用从国外引进的先进产品作为原型样机, 采用逆向工程的思想, 对其进行测绘、分析、消化, 再根据我国市场的情况进行变型设计。然而, 国外企业从保护知识产权出发, 产品的核心技术是保密的, 如果不购买其技术, 很难被破解, 因而也难以消化与吸收, 以致变型设计的产品难以与国外的产品竞争。

虚拟制造技术可以为逆向工程提供强有力的支持。它不但可以帮助分析原有产品的机理, 而且可以帮助消化其核心技术, 并在此基础上掌握其机理, 进行真正的自主变型设计, 从而制造出具有自主知识产权的创新产品。

下面通过一个实际案例说明在逆向工程中如何采用虚拟制造技术实现产品创新^[6-8]。

1997 年, 国务院基于对我国纺织产品质量低、原材料浪费严重等问题, 决定从纺机产品入手, “限产压锭”, 限制传统的有梭织机生产, 发展无梭织机。鉴于国内无梭织机水平, 某纺机企业采用了传统的“引进”策略, 从国外引进了当时国际上最先进的剑杆织机, 开展

逆向工程。

该产品的特点是:无梭、高速、自动化水平高;五大运动系统——开口机构、引纬机构、打纬机构、卷取机构和送经机构——协调动作,其中引纬机构的作用是将纬纱快速平稳引入梭口,使之能与经纱交织组成织物,打纬机构的作用是将引入梭口的纬纱推向梭口,与经纱交织组成织物(图3);引纬和打纬机构靠共轭凸轮驱动(图4),其中引纬机构由传动机构驱动两个柔性剑带,高速相向运动,平稳实现交接纬。其是实现织机织布运动的关键,因此共轭凸轮及传动机构的设计是剑杆织机的核心技术,国外企业是绝对保密的。

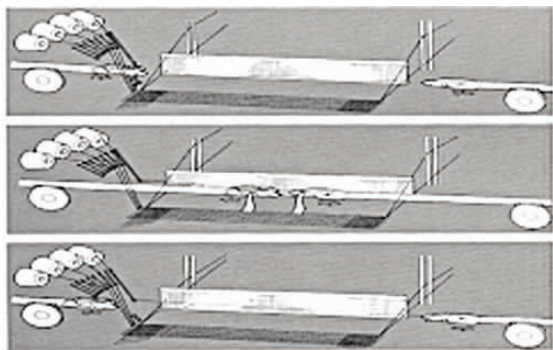


图3 剑杆织机原理示意

Fig. 3 Sword-pole textile machine principle illustration

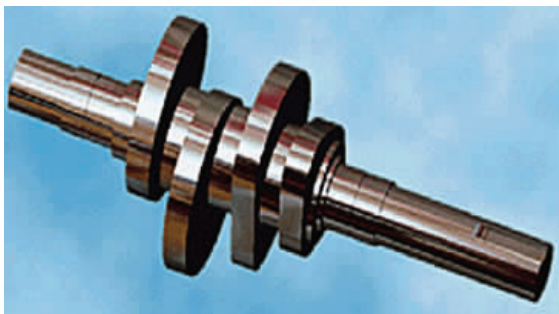


图4 共轭凸轮

Fig. 4 Conjugated cam of an rap-loom

在以共轭凸轮及交接纬机构的实物为反求对象的逆向工程中,由于测量误差不可避免地会存在,由实测数据直接绘制的轮廓线(或位移曲线)会带有很多毛刺(即噪声),引起速度和加速度曲线的失真,甚至被噪声所淹没(如图5和图6所示)。

实践证明,仅靠测绘数据复制,难以保证平稳实现交接纬,从而难以保证不同工艺条件下的织造质量。为此,需要对测量数据进行处理,包括数据光顺、插值、滤波、曲线拟合等,图7是图6进行上述处理后的结果。

处理后的加速度曲线明显地好于实测结果,但仍然难以直接使用,因为在多处出现抖动;而在交接纬过程中必须保证光滑连续。

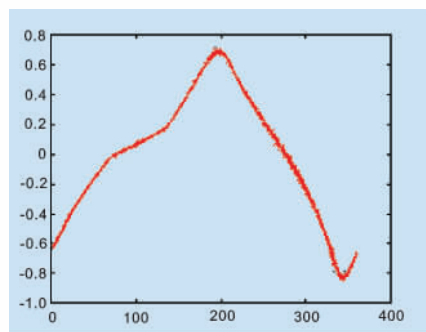


图5 由实测数据绘制的速度曲线

Fig. 5 Velocity curve of sword head of rap-loom plotted with measured data

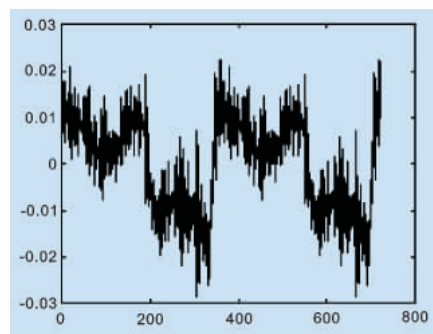


图6 由实测数据绘制的加速度曲线

Fig. 6 Acceleration curve of sword head of rap-loom plotted with measured data

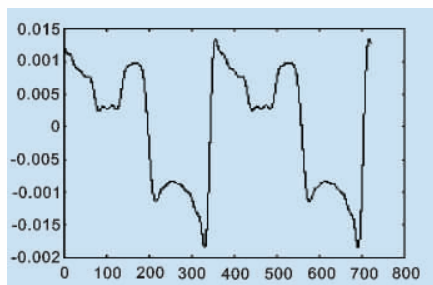


图7 滤除噪声后的加速度曲线

Fig. 7 Acceleration curve of sword head of rap-loom after filtering measured noise

加速度平滑是保证交接纬的必要条件,平滑的同时还必须保证交接纬剑头的速度和位置关系,这就必须对整个交接纬机构进行再设计。

由于剑杆织机工作时的关键机构是高速运动的,无法测试,开展剑杆织机关键机构的机理设计与性能分析需要采用模型分析,虚拟制造可为此提供技术支持。

由三维造型软件 CAD 完成凸轮轴以及所有的引纬、打纬机构中的零件的造型,生成零件三维实体模型;由ADAMS 读入这些零件实体模型,利用 ADAMS 多体动力学仿真功能,定义相应的运动副约束和驱动约束,建立虚拟样机;再由 ADAMS 内核解算系统运动学和动

力学方程,对交接纬机构的配合关系进行仿真设计,得到剑杆织机引纬和打纬机构的运动学和动力学特性(图8)。仿真输出与设计目标进行比较,返回CAD调整相关部件结构参数,使得建模变得非常容易,并且能够保证各工程分析环节所建模型数据的一致性。

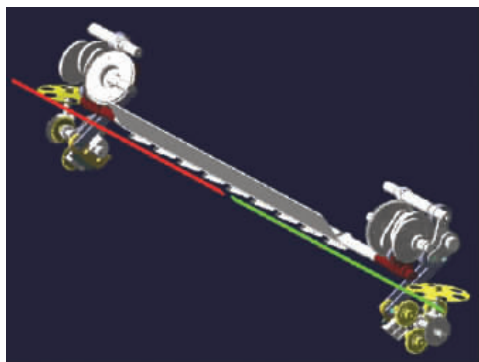


图8 交接纬机构运动学、动力学仿真

Fig. 8 Simulation on kinematics and dynamics of the warp connection mechanism

图9是最后设计结果。观察图9可以发现,图中左边的竖黑线为交接纬位置,最后的设计结果是在这一区间,左右剑头的相对位置为0,相对速度为0(绝对值很低),相对加速度为0。这样,保证了无论是何种织物,在交接纬过程中纬线都不会明显受力,从而不会因交接纬而产生断线或速度不均影响织造质量。图中右边竖黑线为打纬的位置,正好是两个箭头位置回到两端处。其它的曲线也表明,五大运动系统均能很好地保持相位、逻辑关系,完全满足系统设计的要求。

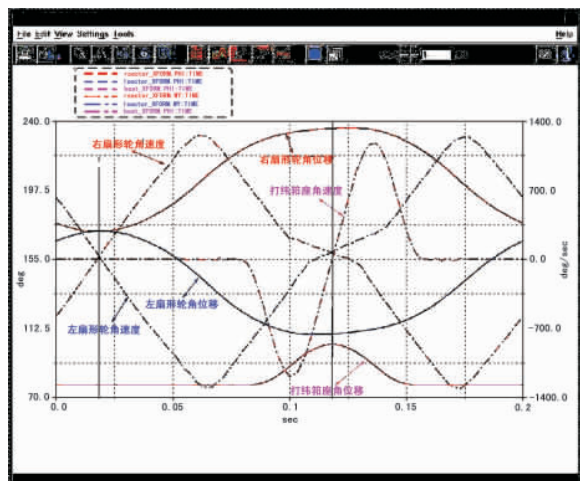


图9 某剑杆织机引纬和打纬机的运动学和动力学特性

Fig. 9 Kinematics and dynamics characteristics for a certain rap-loom textile machine

上述采用虚拟样机技术进行剑杆织机创新设计的结果,经实际应用得到了很好的验证,解决了我国剑杆

织机自主开发的关键技术,为我国自主设计开发中高档和高档剑杆织机提供了技术支持,当年就投入了批量生产,生产销售了1 000台,质量达到了同类产品的国际水平,并且其振动噪声还低于当时国际同类最先进的产品,对我国纺机行业的技术进步和产业结构优化升级产生了重大作用,该项目获得了国家科技进步二等奖。

2.2 基于虚拟制造的产品原始创新

产品原始创新是知识和经验的体现,然而,对复杂产品来说,先进的技术支持是必不可少的,从某种意义上说,缺乏先进技术支持,设计人员的经验和知识难以充分地发挥出来。有了先进技术的支持,有经验和知识的设计人员则如虎添翼。虚拟制造技术就是这样一种能有效支持产品原始创新的先进技术手段。本节介绍高速公路清扫车案例^[9],从该产品的设计开发、结构优化和性能改进等方面,说明虚拟制造如何支持该产品原始创新。

2.2.1 设计方案简介

我国高速公路总里程跃居世界第二位,然而国产高速公路清扫车性能普遍不如人意,存在着速度慢、清扫率低、舒适性差等缺点,迫切需要开发速度快、清扫率高的清扫车。某企业在自主设计开发过程中,提出了如图10的设计方案,简要说明如下。

该扫路车主要由底盘、扫刷、吸盘、风机与集尘箱等组成。底盘采用汽车底盘改装,采用双发动机的动力型式,有较高的最高行驶速度,行走系统和工作装置在动力上各自独立,行走速度和行走操作不会对工作装置的作业效果产生影响,从而操作人员可根据地面的污染状况选择最合适的清扫速度,进行最有效的清扫。扫刷采用中置式布置,较紧凑,外形美观。风机的排风采用回吹风方式,排风口分两条通路,一路通向大气,另一路通向吸盘。具有这种风机排风道反吹风风口的吸盘叫做回吹风吸盘,有利于将吸盘下紧贴地面的垃圾扰动并推向吸风道风口,提高吸盘清洁垃圾的能力。集尘箱后置,既是一个收集垃圾的容器,又是一个垃圾沉降的场所。

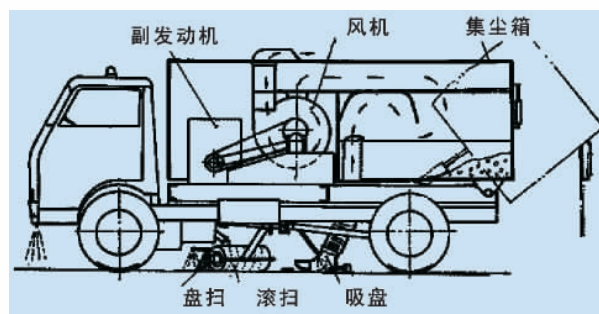


图10 高速公路清扫车结构示意图

Fig. 10 Structure of clearing vehicles

回吹风吸盘设计思想是很先进的,但国内尚无先例,国外产品也属于核心技术,无从获得。如何将上述

设计思想加以实现,特别是气路系统的设计,将直接决定产品性能的竞争能力。气路系统主要由两部分组成:一是吸尘系统,主要由位于车体下部的吸盘和相应的回吹装置组成;二是除尘系统,主要工作部分为位于车体中上部的集尘箱。由于路面垃圾清理主要是以负压气流为动力,所以扫路车的关键技术与吸盘和集尘箱中气流流动相关,主要有以下几方面:① 合理设计吸盘空间的风场模式,避免在吸扫的同时发生扬尘现象,避免二次污染;② 尽可能减少垃圾随气体回流至箱外,造成二次污染;③ 减少气体流动过程中的气体能量损失,并充分合理利用气体能量,以减少发动机功率,从而达到降耗节能的目的。因此,合理设计和优化气路结构与参数,是清扫车设计过程的重中之重。

2.2.2 吸尘系统结构创新设计

实现这一目标的手段,单靠设计人员的知识和经验是远远不够的。实际上,该车的最初设计方案后来被证明是远远难以达到上述要求的。为此,设计人员对吸尘系统的结构设计了12个方案,在虚拟样机上进行分析、优化,最后获得具有良好风场模式的吸盘结构,达到了预期目标。

初始吸尘系统设计如图11所示,吸盘距地面10 mm,在移动过程中由于风机的负压作用,将回吹气流吹起地面上的垃圾吸入集尘箱内,该吸尘系统的尺寸是1 000 mm×500 mm×300 mm,通往集尘箱的导管位于一侧。

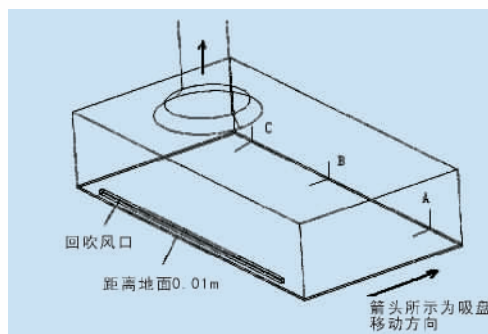


图 11 初始吸尘系统设计示意图

Fig. 11 Original design of the dust inhalation system

以CFD(Computational Fluid Dynamics)为特点的流体产品现代设计方法的应用将传统设计的大循环转变成方案设计阶段带有预测性质的校验循环,大大地减少了产品设计过程的中间环节。CFD可以准确给出流体流动的细节,如全场速度、压力、温度分布,因而不仅可以准确预测流体产品的整体性能,而且很容易从对流场的分析中发现产品设计的问题,据此提出的改进方案只需重新计算就可以评估改进是否有效。这样,产品的设计和优化很少依赖经验和实验。

对上述设计方案的吸盘建立区域守恒方程组、确定边界条件、选择模型或封闭方法、建立有限差分方程

组、制定求解方法、划分网格(混合网格与自适应网格结合,总网格数达到 4×10^6 量级)等。关于如何使用CFD进行流场分析,本文不做进一步介绍,这里仅介绍相应的结果。

图12显示了吸盘内流场分布情况(一个剖面)。左下角是回吹风口,角度为 0° 。按这种结构,会使吸盘内灰尘从后部泄漏出去(右下角的流场流速方向为箭头向外),造成扬尘(图13),说明不能采用这种结构。

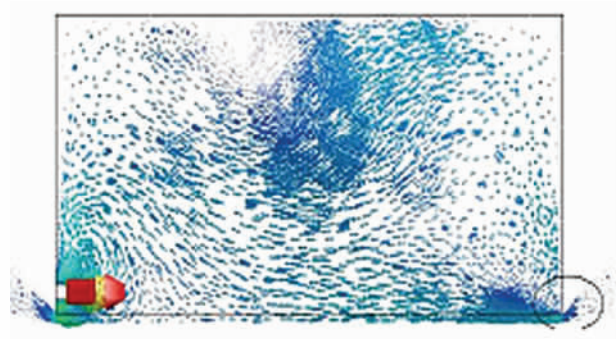


图 12 吸盘内流场分布情况(一个剖面)

Fig. 12 Flow field distribution in the cupules (one section)

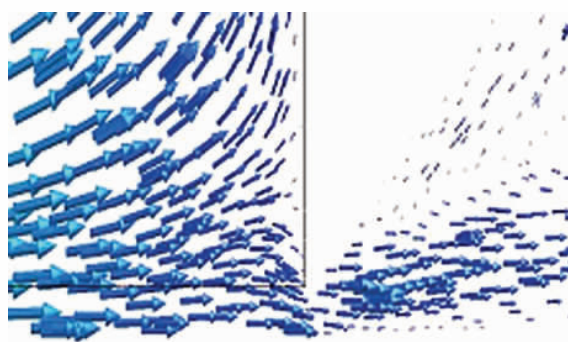


图 13 吸盘内灰尘泄漏

Fig. 13 Dust leak inside the cupules

经过对十几种不同结构的吸尘系统分析,设计人员逐步掌握了吸盘结构对流场分布的影响,最后得到如图14所示结构的吸盘。相对初始设计有如下不同:① 通往垃圾箱的风管居中;② 形状改变为圆滑的弧形以消除死区;③ 添加导流挡板;④ 加大前吸尘口的高度;⑤ 回吹风口角度变为 45° 。相应剖面的流场分布如图15所示。

进一步对流场各剖面进行分析,结果表明,在这种结构下:

1) 气流最大速度存在于回吹风口位置,该风口与地面夹角为 45° ,并且在靠近地面的位置一直存在着较大的速度矢量,该速度矢量有利于气流将地面的垃圾与灰尘吹离地面;

2) 气流在进入吸盘后,迅速朝排气管方向流动,在

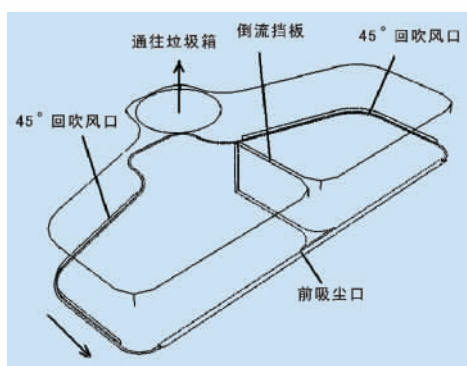


图 14 优化后吸盘的结构

Fig. 14 Optimized cupules structure

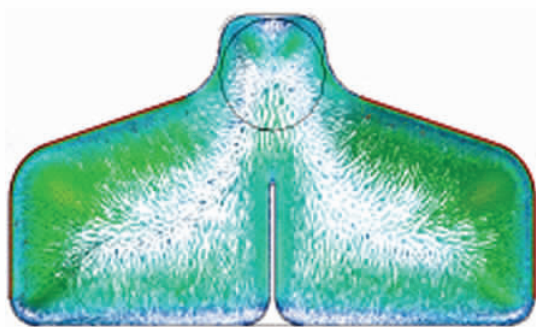


图 15 优化后吸盘内流场分布图

Fig. 15 Optimized flow field distribution in the cupules

排气管附近达到最大气流速度;

3) 吸盘的周边, 气流在负压的作用下从外部进入吸盘, 不存在由于气流外泄造成的二次污染(见图 16);

4) 最大的气流速度在吸盘与外部的结合位置, 即在靠近地面的位置, 所以在这两个涡中运动的气流一旦回到吸盘底部即会被主气流携带朝吸盘排气管方向运动;

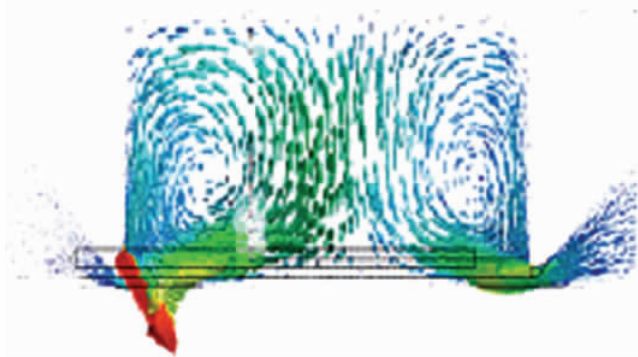


图 16 负压作用下气流从外部进入吸盘

Fig. 16 Airflow comes into the cupules from the outside under the effect of the negative pressure

5) 气流从各个方向进入其吸盘后, 其主速度方向都是朝着排气管方向流动, 有利于降低携带垃圾气流在吸盘中的停留时间, 提高清扫车的行进速度。

总之, 采用本方案, 不会出现气流外泄造成二次污染; 不会出现吸盘内部有部位吸尘效率很低的现象; 大大提高了吸盘靠近地面部位的气流速度, 有利于提高吸尘效率; 吸盘内部主气流方向为沿着排气管方向运动, 降低了灰尘与垃圾在吸盘内部的停留时间, 有利于提高清扫速度。

2.2.3 集尘箱的结构设计和优化

清扫车工作时, 从吸盘中吸入的垃圾随着高速气流一起进入集尘箱内, 由于集尘箱体内部空间大, 气流在集尘箱内速度迅速下降, 当气流速度下降到一定程度, 在重力的作用下, 垃圾将会与气流分离并沉降在集尘箱的底部, 而气流则会经由集尘箱的顶部, 在风机的作用下排出集尘箱, 其中一部分气流被输送到吸盘作为二次回吹气流, 另一部分则直接排入大气。显然, 集尘箱的结构直接决定了其流场分布, 从而决定了集尘效率。图 17 为最初设计的清扫车集尘箱体结构示意图。

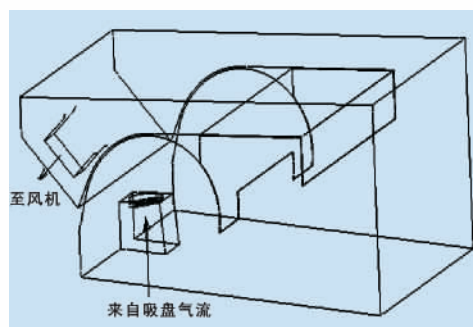


图 17 集尘箱结构初始设计

Fig. 17 Original sketch structure design for the dust collecting box

为避免造成二次污染, 集尘箱内的垃圾沉降格外重要。要实现较好的垃圾沉降, 需要实现如下要求:

- ① 在集尘箱内气流速度应尽可能降低, 以利于垃圾沉降;
- ② 气流在集尘箱内停留时间尽可能长, 使垃圾有充分的时间沉降;
- ③ 在集尘箱底部的垃圾堆积区域, 气流速度尽可能低, 使气流不会将沉降垃圾吹起, 影响沉降效率;
- ④ 尽可能提高集尘箱的有效容积利用率。

图 18 是对集尘箱 CFD 分析后得到的气流速度等值线图(中心线剖面), 从图中可以看到:

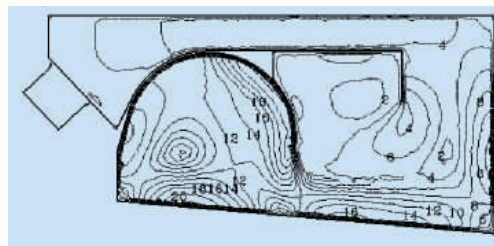


图 18 集尘箱气流速度等值线图

Fig. 18 Airflow speed isogram of the dust collecting box

1) 气流从与吸盘连接的管道中高速流入集尘箱内,受圆弧挡板的影响,在该部位形成了一个涡,速度很高,这是因为圆弧挡板导流而没有使气流降速;

2) 由于圆弧挡板的作用,致使气流沿挡板改变方向,直接吹往集尘箱底部,底部速度较大,这将导致底部的垃圾重新扬起,不利于沉降;

3) 垃圾只能堆到不超过圆弧挡板和垃圾气流入口的位置,降低了集尘箱容积利用率;在垃圾逐步堆积的过程中,由于气流的出路越来越窄,势必加大靠近垃圾堆部位气流速度,进一步影响垃圾堆积,并可能造成二次污染。

为此对集尘箱体的结构进行再设计,通过 CFD 计算得到不同结构下气流分布结果。最后的结果与原设计相比,优化结构后集尘箱提高了吸盘至集尘箱体内部的管道高度,将圆弧挡板更换为一较小垂直挡板。图 19 是优化后集尘箱气流速度等值线图,由图可以看到:

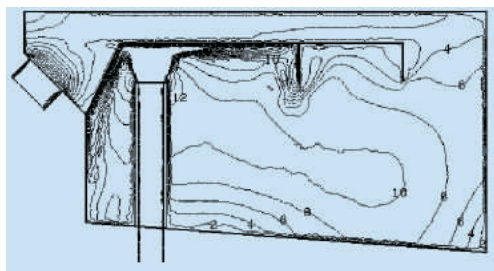


图 19 优化后集尘箱气流速度等值线图

Fig. 19 Airflow speed isogram of the optimized dust collecting box

1) 高速气流主要集中在吸盘导管的出口处与集尘箱内部挡板处,且所占面积很小;

2) 在集尘箱体内部大部分区域,气流速度比较均匀,且气流速度较低,有利于垃圾与气流的分离;

3) 在集尘箱体的底部,仅有少部分气流速度达到了 8 m/s,远远低于原设计之前的最大 20 m/s,这也有利于垃圾在该部位的堆积;

4) 底部不再被当作气流的通道,成为垃圾的沉降区域,将延长气流和垃圾在集尘箱体内部的停留时间,有利于垃圾与气流的分离。

2.2.4 物理样机结果

基于虚拟样机的设计结果,对原设计方案进行修改,制造出物理样机。通过对物理样机的测试表明,各技术指标达到了预定的设计指标值,部分关键指标达到并超过了国标的要求,清扫能力、最大清扫速度、最大吸入颗粒等指标超过了国内同类产品的相应参数(表 1),设计的吸盘已经申请专利,实现了我国高速公路清扫车原始创新开发。

2.3 多学科产品创新设计

前面介绍的是如何基于虚拟制造技术进行产品机

表 1 清扫车各项性能指标对照表

Table 1 Clearing vehicle performance index comparison matrix

性能指标	国标 QC/T29111-1993	中标 ZLJ5150TSL	本车设计值	各项指标实测值	与中标比较结果
清扫宽度	—	3 500 mm	3 500 mm	3 506 mm	持平
清扫效率	>90%	>90%	90%	93.8%	超过
清扫能力	—	70 000 m ³ /h	87 500 m ³ /h	87 500 m ³ /h	超过
最高清扫速度	—	20 km/h	25 km/h	25 km/h	超过
最低清扫速度	—	5 km/h	5 km/h	5 km/h	持平
最大吸入颗粒	>15 mm	120 mm	120 mm	140 mm	超过
最大气流速度	>25 m/s	—	71 m/s	85.8 m/s	—

械结构和机构运动学、动力学设计。随着信息技术的发展,产品的机电一体化趋势日益明显,产品的设计也日益复杂,需要跨学科虚拟制造技术的支持。本节介绍机电两个领域协同设计,进行心血管介入治疗系统的创新开发,实现产品创新^[10-11]。

2.3.1 心血管介入治疗系统简介

心血管造影介入治疗系统目前已用于心血管介入诊断和治疗临床。最新型的 X 射线心血管造影系统是一类复杂的机电一体化产品,目前其运动机构大多采用 C 形臂结构,特点是有一个可以进行 3 自由度旋转的 C 形臂(图 20)。

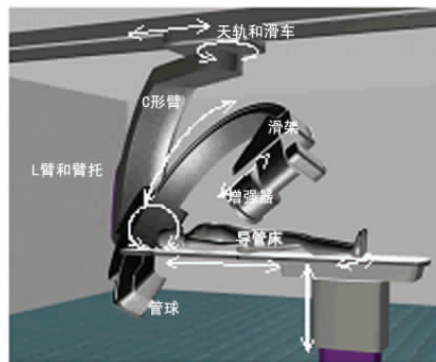


图 20 心血管造影介入治疗系统示意

Fig. 20 Sketch of a medical angiocardiology interventional therapy system

心血管造影介入治疗系统的基本工作原理是:在医生的操作下,PLC 通过程序指令控制电机,电机再通过带轮、齿轮等驱动 C 臂、导管床、L 臂、增强器滑块等运动;C 臂可绕水平横轴、水平纵轴和竖直轴旋转,以及沿天轨直线方向运动,在导管床、L 臂、增强器滑块等辅助机构运动的配合下,把 X 射线发生装置和影像增强器迅速准确地定位到病灶部位,对病灶进行摄像,医生通过观测图像,进行诊断或治疗。

设备的主要特点是 C 臂大、运动自由度多且各自由度运动随机性大。而作为医疗产品,其安全性能和操

作适应性要求非常高,因此C形臂系统在尽可能增大运动范围的情况下,防碰撞干涉是运动学设计需要考虑的首要内容。另一方面,必须减少和克服系统C形臂在匀速、加速、减速、停止过程中的振动,以保证旋转造影过程中匀速和良好的重复精度,如果运动过程中出现明显振动,而调节时间又过长,很有可能使得拍摄的部分照片作废,从而导致三维影像重构的失败。

下面介绍如何利用虚拟样机进行具有自主知识产权的创新设计,以提高我国自行设计开发的心血管造影介入治疗系统性能。

2.3.2 碰撞干涉分析

图20中标明了系统的主要构成部件和自由度,可以看出,如果对各自由度的运动不加约束条件,系统存在着相当多的碰撞干涉隐患。其中最主要的碰撞干涉是图中的C形臂进行转动和弧形滑动时,增强器和发射器与导管床(包括病人)发生碰撞,碰撞概率随增强器的下行位移不同而不同,一般来说增强器下行位移越大,越容易发生碰撞。

目前业内常用的防碰控制基本上都是被动防碰,在保证功能及性能的前提下,避免或尽量减少碰撞,达到“无论医师如何操作,都不会有发生碰撞的可能”,实现主动防碰。这是在产品结构及运动机构设计时应该努力解决的问题,也是各类心血管造影介入治疗系统创新的重要内容。

根据C臂的几何外形特点以及C臂和导管床的位置设置特点,系统的碰撞可以归结为以下两种:C臂头端(增强器和管球)与人-床体的碰撞;C臂臂身中段(臂托位置)与导管床头端的碰撞。

应基于三维CAD模型建立开发虚拟样机,并根据碰撞工况进行运动分析,测量运动过程中各个时间点运动部件之间的距离,做出运动部件外表面之间的最小相对距离-时间曲线,当曲线出现零点时,表明部件之间发生了碰撞干涉。

2.3.3 PLC控制器设计

采用运动干涉检测方法对C臂沿 α, δ, θ 自由度运动过程中发生干涉的情况进行仿真,得到对应于 (α, δ, θ) 位置的三维干涉信息表格(见图21),在此基础上设

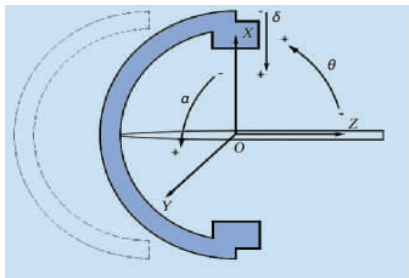


图 21 运动关系示意图

Fig. 21 Sketch of the movement relation

计控制算法。

设计控制算法的总体思路是:将仿真分析、探测所得的干涉点信息和数据拟合成所关心自由度的函数,对C臂转动角位移 $\alpha(-\alpha_0 \sim \alpha_0)$ 、C臂滑动角位移 $\theta(-\theta_0 \sim \theta_0)$ 和增强器下行 $\delta(\delta_0 \sim \delta_1)$ 这3个自由度进行数据列表。

这张表本身可以植入PLC控制器,并编制好先后判断顺序。运行过程中,PLC根据位置反馈信息,及时查找表格元素以作为限位准则,实现控制效果。

2.3.4 机电一体化仿真设计

心血管造影介入治疗系统是控制系统和机械系统都相当复杂的系统,在进行系统防碰仿真分析和设计时,需要兼顾对系统整体动态特性的分析。对于一个控制系统和机械系统都相当复杂的模型,单纯用MATLAB需要求取复杂的机械系统的传递函数关系式;单纯用ADAMS则将面临控制系统输入困难的问题。将二者相结合,令MATLAB分管控制系统部分,ADAMS分管机械系统部分,充分发挥二者优势,建立机电一体化仿真模型,则能更好地体现虚拟样机仿真试验的优势。

基于ADAMS-MATLAB建立的C形臂系统机电一体化仿真模型如图22所示,其中机械部分直接从CAD导入实体模型,在ADAMS环境下形成多体动力学模型(图23)。为了实现ADAMS/MATLAB的集成,需要分别按照各自的要求,定义相互之间的控制逻辑以及输入/输出关系,这里不再赘述。

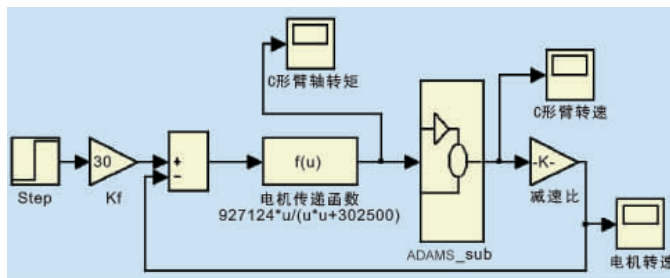


图 22 MATLAB-ADAMS 交互仿真模型

Fig. 22 Interactive simulation model with MATLAB and ADAMS

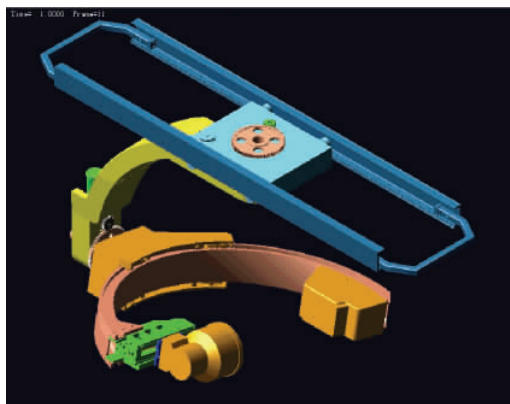


图 23 C形臂系统多体动力学模型

Fig. 23 Multi-body dynamics model of C-Arm system

基于该模型,对系统中存在的各种非线性因素(如齿轮间隙、旋转过程重心变化进而引起力矩的变化等)对系统动态性能的影响进行了全面分析,为产品的定型提供了准确而有效的方案。最后的物理样机测试结果表明,产品达到了预期目标和技术指标。表2列出了基于虚拟样机开发出 的心血管造影系统与国外同类产品的技术性能比较,可以看出已经达到或超过国际同类产品水平,并且完全拥有自主知识产权。

表2 与国际同类产品的主要技术参数比较
Table 2 Key performances comparison of self-developed medical angiocardiology interventional therapy system with the same kind of foreign products

产品型号	旋转造影	绕水平纵轴	C臂绕水平
	速度	转动角度	横轴转动
本产品	40°/s	范围 ±120°	-45°~+50°
Philips 同类产品	30°/s	范围±90°	±90°
GE 公司的 LC+型 C 形臂系统	35°/s	范围-117°~+105°	-50°~+45°

3 结束语

虚拟制造技术可以高效、准确、直观地对所开发的对象进行产品结构、产品性能、功能等全方位的分析与优化,从而真正掌握产品机理,不用进行破坏性的物理样机试验,节省了大量的人力物力,被认为是信息时代对传统产品开发技术的一次革命^[1,12]。

近 10 年的发展已经证明虚拟制造是产品创新的强有力支撑技术,其前景是无可置疑的,但是,要全面实现它还有很长的一段路要走。由于虚拟制造本身具有多学科交叉特点,因而其发展必然依赖于多学科的发展,涉及到众多单项仿真技术和若干关键技术的突破。又由于虚拟制造的核心是信息的多层面表示与集成问题,因此,它的实现离不开信息技术自身的发展以及有关的标准和规范的制定。

我国的虚拟制造技术刚刚起步,与发达工业国家相比,我国企业的差距无疑是很大的。我国要从制造大国走向制造强国,一个重要的标志是,我国制造的产品的核心技术有多大比例是我国企业所拥有。因此,从这一意义上说,广泛而深入地研究及应用虚拟制造技术,是我国制造业面临的重要任务。可以预见,虚拟制造技术必将在我国产品结构调整和自主创新中发挥越来越重要的作用。

参考文献 (References)

- [1] 肖田元.虚拟制造研究进展与展望[J],系统仿真学报,2004,16(9): 1879-1883.
XIAO Tianyuan. The progresses and prospects of the research on virtual manufacturing [J]. Acta Simulata Sys-

tematica Sinica,2004,16(9): 1879-1883.

- [2] WIENS G J. An overview of virtual manufacturing[C]//Virtual Manufacturing- Proceeding of 2nd Agile Manufacturing Conference (AMC'95), Albuquerque, New Mexico, USA, 1995. ERI Press, 233-243.
- [3] VM User Workshop Report [R]. Compiled and Edited by Lawrence Associates Inc, 1996.
- [4] 施普尔,克劳舍 著. 虚拟产品开发技术[M]. 宁汝新,等译. 北京: 机械工业出版社, 2000.
SPUR G, KRAUSE F-L. The virtual product development technique [M]. translated by NING Ruxing, *et al.* Beijing: China Machine Industry Press, 2000.
- [5] 李玉忠,甘巨麟,李岳川. 基于逆向工程的虚拟设计研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2006(4): 47-51.
LI Yuzhong, GAN Julin, LI Yuechuan. A study of virtual design on reverse engineering[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2006(4): 47-51.
- [6] 吴群波,肖田元,韩向利,等. 剑杆织机运动机构的实时仿真与运动分析[J]. 机械科学与技术, 2001, 20(5): 659-660.
WU Qunbo, XIAO Tianyuan, HAN Xiangli, *et al.* Real-time simulation and movement analysis of rapier loom movement mechanism [J]. Mechanical Science and Technology, 2001, 20(5): 659-660.
- [7] 肖田元,韩向利,张林镇. 虚拟制造内涵及其应用研究 [J]. 系统仿真学报, 2001,13(1): 118-123.
XIAO Tianyuan, HAN Xiangli, ZHANG Linxuan. Research on virtual manufacturing technology and it's application [J]. Journal of System Simulation, 2001,13(1): 118-123.
- [8] 吴群波,张林镇,肖田元,等. 虚拟产品开发环境下的产品创新设计[J]. 中国机械工程, 2003(2): 116-119.
WU Qunbo, ZHANG Linxuan, XIAO Tianyuan, *et al.* Product innovation design under virtual product development environment[J]. China Mechanical Engineering, 2003(2): 116-119.
- [9] 徐云,李欣峰,肖田元,等. 计算流体力学在清扫车仿真分析中的应用研究[J]. 系统仿真学报, 2004,16(2): 270-273.
XU Yun, LI Xinfeng, XIAO Tianyuan, *et al.* Research on applications of computational dynamic fluid in the simulation analysis of highway mechanical sweeper[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(2): 270-273.
- [10] GU Y, XIAO T Y, ZHAO Y Y. Interference analysis for C-arm angiographic system under simulation environment [C]. Asian Simulation Conf/the 5th Conf on System Simulation and Scientific Computing, 2002: 795-800.
- [11] 肖田元,赵银燕,古月. 多自由度机械臂系统的虚拟样机开发[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(2): 264-267.
XIAO Tianyuan, ZHAO Yinyan, GU Yue. The development of the virtual prototype of a multi-freedom mechanism[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(2): 264-267.
- [12] 宁汝新,刘检华,唐承统. 数字化制造中的建模和仿真技术[J]. 机械工程学报, 2006,42(7): 132-137.
NING Ruxin, LIU Jianhua, TANG Chengtong. Modeling and simulation technology in digital manufacturing [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(7): 132-137.

(责任编辑 赵佳)