

# 建模与仿真在装备制造中的作用与前景\*

清华大学 柳百成



柳百成

中国工程院院士,清华大学教授,铸造工艺与设备专家。长期从事用信息技术提升铸造行业技术水平及提高铸造合金性能的研究。近年来,致力于振兴我国制造业及推广先进制造技术等战略研究。

装备制造业是为国民经济各部门和国防建设提供技术装备的基础性产业,是国家工业化、现代化水平和综合国力的重要标志。提高装备制造业的技术水平:一是要将高新技术与制造技术相互融合,发展高技术含量装备制造业;二是要广泛采用信息化技术,促进装备制造业的

信息化是提升装备制造业的重要途径,而数字化设计与制造是制造业信息化的重点。建模与仿真是数字化设计与制造的核心技术。广泛采用建模与仿真技术,能够更好、更快、更有效地制造出创新产品。

产品创新和技术创新。

## 数字化设计与制造是制造业信息化的重点

信息化是提升装备制造业的重要途径,而数字化设计与制造是制造业信息化的重点。我国高度重视采用信息化技术提高装备制造业的水平。《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006-2020)》将“数字化和智能化设计制造”列为制造业发展的优先主题之一,重点研究数字化设计制造集成技术,建立若干行业的产品数字化和智能化设计制造平台;开发面向产品全生命周期的、网络环境下的数字化、智能化创新设计方法及技术,计算机辅助工程分析与工艺设计技术,设计、制造和管理的集成技术。

2007年发布的中国工程院咨询报告《装备制造业自主创新战略研

究》将“数字化和智能化设计与制造”列为关键共性技术<sup>[1]</sup>。提出重点研究:基于建模与仿真的数字化和智能化成形及加工制造技术与系统,成形制造及加工制造过程的多尺度、多学科和多功能数理建模理论与方法,复杂成形及加工制造过程的高精度、高效率的大规模仿真计算方法与技术,KBE(Knowledge-Based Engineering)理论与方法,数字化和智能化管理技术与系统,数字化和智能化制造过程技术与集成平台等。

## 建模与仿真是数字化设计与制造的核心技术

建模与仿真是数字化设计与制造的核心技术。广泛采用建模与仿真技术,能够更好、更快、更有效地制造出创新产品。例如,波音公司大量利用建模与仿真技术设计的波音777喷气式客机,设计过程使用了数字化预装配和并行协同工程技术,大大减少了设计更改和错误量,减少

\* 本文获国家重点基础研究计划(2005CB724105)的支持。



返工量 50%，缩短研发周期 40%，显著降低了成本<sup>[2]</sup>。福特汽车公司在发动机的设计过程中建立了产品的三维模型，可以模拟分析发动机的运动学、动力学及燃烧过程的温度场、应力场等，从而保证产品一次研发成功。

### 建模仿真与数字化设计

数字化设计技术是指利用计算机软硬件及网络环境，建立产品数据模型，进行产品的设计、分析等过程，包括产品几何、静态、动态和产品的可制造、可装配等特性的建模与分析。数字化设计技术的应用能够提高企业的产品开发能力，缩短产品研制周期，降低开发成本，从而大大提高企业的竞争能力。

#### 1 网络化、协同化、开放式产品创新设计平台

网络化、协同化、开放式产品创新设计平台是进行数字化设计的基础和关键，该平台应具有以下特征：

(1) 有丰富的知识库 (KBE) 支持的智能化设计 / 工艺制造开发系统。国外一些企业的数字化设计已经采用了丰富的知识库，形成一个完全集成的数字技术平台。

(2) 在功能、质量、可靠性与成

本方面能提供最优产品。

(3) 广泛采用建模与仿真技术，使产品及零部件的研发做到一次成功，美国提出了产品及零部件一次成功的理念<sup>[4]</sup>。

以网络化、协同化、开放式的产品创新设计平台为基础，现代的产品设计及制造开发是以建模与仿真为核心内容，进行产品的全寿命设计。网络化环境下，产品零部件设计的重点工作是产品及部件制造过程的建模与仿真，建模与仿真将不仅可以提

供产品零部件的可制造性，而且可以提供产品零部件的性能预测。美国汽车工业希望汽车的研发周期缩短为 15 ~ 25 个月，而 20 世纪 90 年代汽车的研发周期为 5 年。

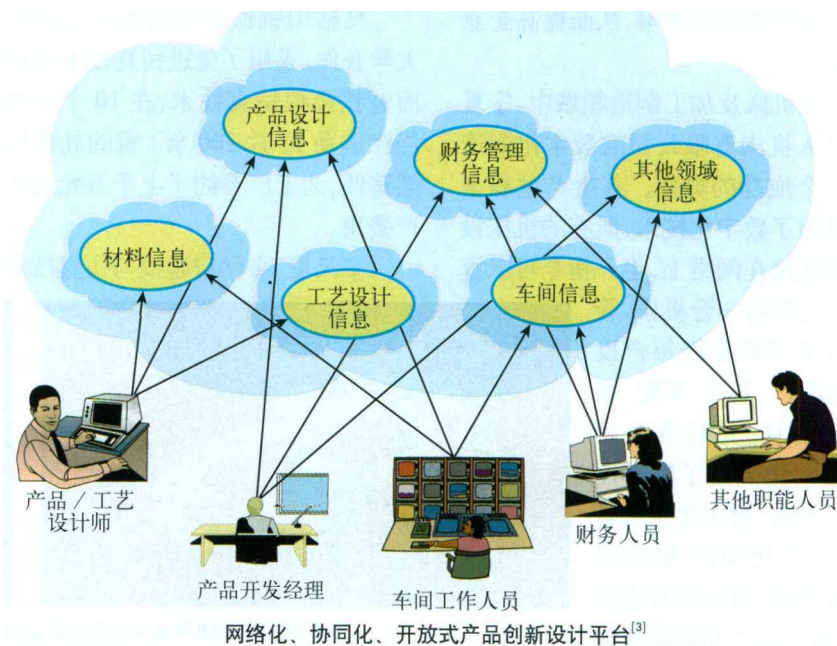
当今，制造业数字化设计技术的应用范围已经扩大到产品的全生命周期，主要包括以下内容：

- 3P 分析：即生产率 (Productivity)、可制造性 (Producibility) 及可预测性 (Predictability) 分析，其中可预测性分析包括组织、性能与寿命的预测；

- 3E 分析：能源 (Energy)、环境 (Environment) 及经济 (Economy) 分析。

#### 2 产品创新设计与加快材料研发计划 (AIM)

新材料的研发往往需要经历很长的周期，不能满足产品设计的最新要求。为了缩短新材料转入产品创新设计的工程化应用的时间，美国国防高级研究计划署 (DARPA) 制订了“加快材料开发 (Accelerated Insertion of Materials, AIM)”计划，该计划的目的是主要是缩短材料的研发周期，确保产品进行创新设计的



成功。在该计划的实施过程中,建模与仿真技术发挥了重要和核心作用。以航空发动机涡轮盘的设计为例,在涡轮盘的设计过程中,广泛采用了建

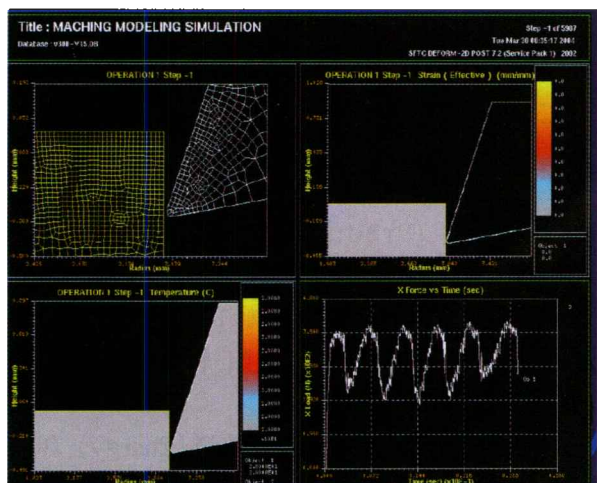
等方面。数字化技术的应用大大提高了每台机床的加工效率,提高了企业的核心竞争力,促进了小巨人公司的迅速发展。另一方面,加工制造过程的建模与仿真也是重要的研究热点,上海交通大学在此方面取得了一定的研究进展。

是当前数字化成形制造领域的研究热点。福特汽车公司提出从原子尺度到发动机宏观尺度的虚拟铝合金铸造技术,可缩短研发周期 15% ~ 20%,使公司每年获得数千万美元的经济效益。

多尺度、多学科建模与仿真技术在航空、航天、交通运输业关键零部件的精确成形制造过程中发挥了重要作用。例如,采用定向凝固熔模铸造新技术,可以直接制造高温合金单晶体燃气轮机叶片,这是精确成形铸造技术在航空工业中应用的典范,在燃气轮机定向凝固建模与仿真方面北京航空材料研究院与清华大学合作已取得重要进展。

### 建模仿真与数字化成形制造

借助建模与仿真技术可以直观地观察到铸、锻、焊等成形制造过程的温度场、溶质场及应力应变场的动态变化。建模与仿真



加工制造过程的建模与仿真(上海交通大学提供)

技术已经成功应用在铸、锻、焊等成形制造行业,并取得了显著的经济和社会效益。例如,第一个长江三峡水轮机不锈钢叶片已由德阳中国二重集团铸造厂于 2001 年首次试制成功,其铸造工艺方案采用了自主知识产权的模拟仿真技术,经反复模拟得到了最优化的铸造工艺方案。又例如,马鞍山钢铁公司的热轧及冷轧薄板工程,是设计年产 200 万 t 热轧薄板生产线以及年产 150 万 t 的冷轧板生产线。

技术已经成功应用在铸、锻、焊等成形制造行业,并取得了显著的经济和社会效益。例如,第一个长江三峡水轮机不锈钢叶片已由德阳中国二重集团铸造厂于 2001 年首次试制成功,其铸造工艺方案采用了自主知识产权的模拟仿真技术,经反复模拟得到了最优化的铸造工艺方案。又例如,马鞍山钢铁公司的热轧及冷轧薄板工程,是设计年产 200 万 t 热轧薄板生产线以及年产 150 万 t 的冷轧板生产线。

### 建模仿真与数字化制造的发展趋势

#### 1 高精度、高效率建模与仿真

多学科、多尺度、高性能、高保真及高效率一直是建模与仿真技术发展的目标,而微观组织模拟(从毫米、微米到纳米尺度)则是近年来研究的热点课题。通过计算机模拟,可深入研究材料的结构、组成及其各物理化学过程宏观、微观变化机制,并由材料成分、结构及制备参数的最佳组合进行材料设计。

20 世纪 90 年代后期铸造微观模拟开始由试验研究向实际应用发展,并在国外汽车及航天工业得到应用。福特公司提出了虚拟铝合金发动机缸体研究,其目标是能预测缸体的疲劳寿命。

为了能够满足超大规模的计算,

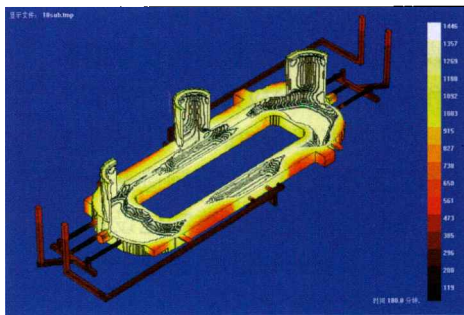
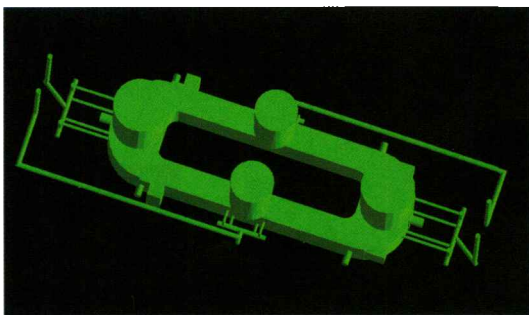
### 建模仿真与数字化加工制造

数字化加工制造体现在两个方面:一是硬件设备主要采用数字化加工设备;二是加工过程(如切削加工)主要采用建模与仿真技术。数字化加工制造技术能够大幅提高企业的生产和管理效率,从而提高企业效益。

在机床及加工制造领域中,宁夏小巨人机床有限公司的数字化制造是一个成功的典型。其生产过程全面采用了数字化技术,所有的机床设备都连接在网络上,生产指令可以直接下达到每一台机床,管理人员实时掌握每台设备的生产、加工、装配、维修等信息;小巨人公司的数字化涵盖了数字化加工设备、数字化生产管理、数字化测量、数字化物流管理、数字化钣金加工、数字化产品数据管理

马鞍山钢铁公司制造厂与清华大学合作,采用了先进铸造技术及凝固过程模拟仿真技术,在 10 个月内浇注成功 18 片 200 余 t 重的轧机机架铸件,为工厂节约了上千万元的生产费用。

多尺度、多学科建模与仿真技术



大型轧机机架铸件采用凝固过程模拟仿真技术一次试制成功

国外一直致力于先进计算方法及并行计算的研究。美国科研人员用橡树岭国家实验室的超级并行计算平台(128节点)计算铝合金的超塑性,用工作站需31d,而采用并行计算只需6h,效率提高了100多倍。这就为成形制造过程的多尺度、多物理量模拟仿真提供了可能条件。

## 2 集成计算材料工程

近年来,美国提出了“集成计算材料工程(Integrated Computational Materials Engineering, ICME)”的概念,特别强调在材料及零部件的研发设计过程中要重视“集成化”与“工程化”,要求研究人员不仅要从事基础研究,更要注重材料的工程化应用。集成计算材料工程的实施离不开多尺度的建模与仿真技术。

在航空发动机研发过程中,叶片和涡轮盘的设计制造过程极为复杂,更体现了“集成计算材料工程”的理念。美国通用电气公司在设计发动机叶片和涡轮盘时,建立了工艺模型、组织模型和性能模型,并实现了3个模型的集成。

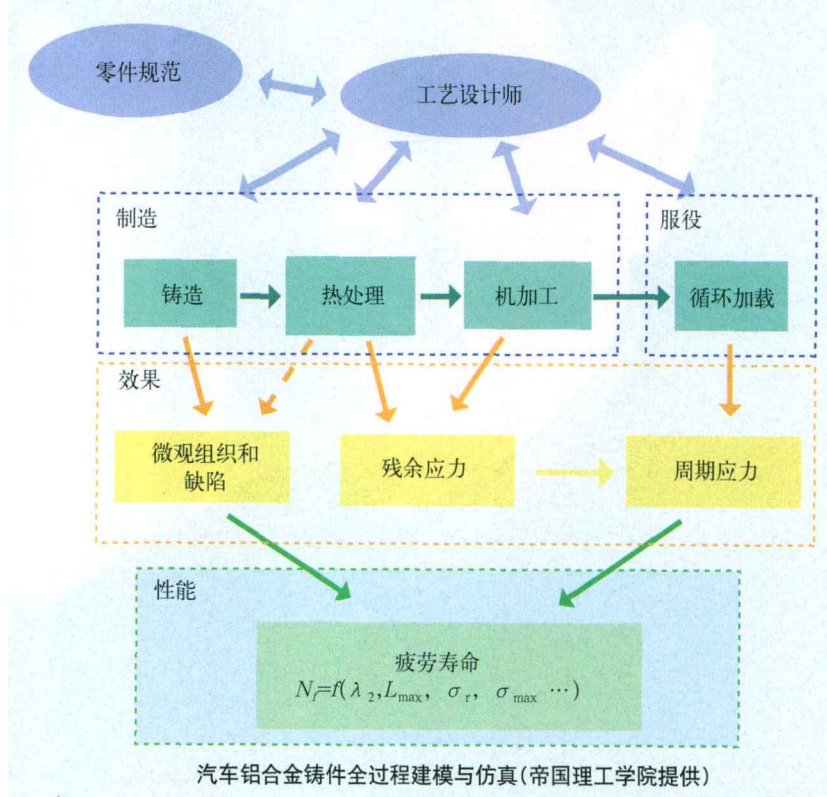
2007年2月,中国、美国、加拿大3个国家联合启动了“镁合金前车架研究与开发”合作项目。这个项目的课题之一就是“镁合金前车架集成计算材料工程”,要将集成计算材料工程技术应用到镁合金前车架的研究与开发过程中。主要是建立镁合金成形加工过程从宏观到微观到性能模型,涵盖了镁合金的挤压成型、焊接、铸造及热处理等过程。

## 3 多尺度、全过程建模与仿真

随着科学技术的迅猛发展,在强大的应用需求带动下,建模与仿真技术的应用已经从单一系统走向开放复杂的大系统,其应用范围覆盖从产品概念形成设计到制造的全过程,正在向着多尺度、全过程的建模与仿真方向发展。以汽车铝合金铸件的成

形制造过程为例,其全过程建模与仿真涉及了铝合金的铸造、热处理、机加工、受载,直至疲劳寿命预测。

罗·罗公司与帝国理工学院、剑桥大学合作进行发动机涡轮盘的研究与开发,整个研究过程涉及金属熔炼、电渣重熔、凝固及均匀化处理、形变热加工及热处理,切削加工、焊接,直到涡轮盘服役,开展了相应的全过程建模与仿真研究。



## 4 建模与仿真和快速产品开发

数字化制造已经是制造业的发展方向,而建模与仿真和快速产品开发集成是发展趋势。在韩国工业技术研究院的数字化设计中心,建模与仿真技术和快速产品开发的集成,成为该中心实现快速研发的有效手段。在产品的研发阶段,首先要实现产品的数字化铸造,由工作人员建立铸造仿真模型;其次利用快速原型制造技术(RP)加工出砂型,有些砂型还要利用五轴加工中心(CNC)进行切削加工;最后将砂型合并进行产品的铸造及工业CT扫描检测内部缺陷(ECT)。

研、用的协作,形成联盟,更要加大对集成计算材料工程研发投入。

## 参考文献

- [1] 中国工程院“装备制造业自主创新”咨询研究项目组. 装备制造业自主创新战略研究. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [2] IMTI, Inc. Manufacturing Success in the 21st Century [EB/OL]. 2000[2007-6-20]. <http://www.imti21.org>.
- [3] IMTI, Inc. Integrated Manufacturing Technology Roadmapping Project [EB/OL]. 2000[2007-6-20]. <http://www.imti21.org>.
- [4] IMTI, Inc. First Product Correct [EB/OL]. 2000[2007-6-20]. <http://www.imti21.org>.

(责编 金卯)