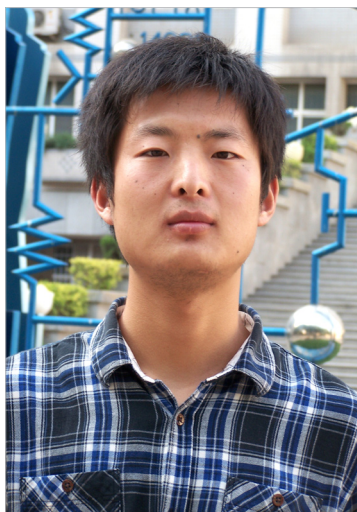


# 飞机复合材料构件模具 数字化设计与制造技术

## Digital Design and Manufacturing Technology for Aircraft Composites Component Mold

西北工业大学陕西省数字化制造工程技术研究中心 元振毅 王永军 魏生民  
中航工业西安飞机工业(集团)有限责任公司 杨选宏 杨绍昌



元振毅

西北工业大学机电学院航空宇航制造工程专业博士研究生,主要研究方向为复合材料成型及变形控制技术。

复合材料的比强度高、比模量大、耐高温、抗腐蚀、抗疲劳等一系列优点已被世人所共识。航空航天追求性能第一的特点,使其成为先进复合材料技术试验和转化的战场,先进复合材料继铝、钢、钛之后,迅速发展成四大结构材料之一,其用量成为航空航天结构的先进性标志之一<sup>[1]</sup>。

复合材料构件成型模具的数字化设计制造技术是当今航空复合材料发展的重要方向,是提高复合材料构件成型质量、降低制造成本、缩短制造周期的有效途径,是提高我国现代化航空制造技术的一项重要内容。

目前,国外已经实现了复合材料构件的无图设计、制造,全面实现了复合材料的手工设计制造向数字化设计制造的转变;国内这方面还处于起步阶段,部分航空企业将CATIA、FiberSIM等设计软件以及数控下料机、自动铺带机、激光铺层定位仪、大型C扫描等数字化设备应用到了复合材料设计制造过程中,但对复合材料成型模具的数字化设计制造技术重视不够。与常规金属材料成型不同,复合材料构件的成型是材料与结构同时成型的过程,且通常要在模具中完成。制件固化成型后几乎不再作任何加工,其外形尺寸、力学性能以及内部要求等都应满足设计要求,这些都决定了成型模具在复合材料产品制造过程中起着举足轻重的作用。另外,飞机构件外形大多为曲面,蒙皮与长桁等结构的高精

度连接配合需要其相应模具加工精度的保障。数字化设计与制造是保障模具加工精度和配合协调的关键。复合材料成型模具数字化设计制造是指将模具的外部形状信息、内部材料组织信息、制造信息、功能信息以及复合材料构件固化变形等因素统一起来,依靠模具数字化设计、数字化仿真分析、数字化制造、数字化检测等方法实现模具的设计与制造,使复合材料构件成型后不需要加工或只需少量加工即可满足设计要求<sup>[2]</sup>。

### 复合材料成型模具概述

同金属材料制造相比,复合材料的制造有很大的灵活性。目前树脂基复合材料的成型方法多达20余种。比较常见的有手工成型、缠绕成型、真空袋成型、热压罐成型、热膨胀模塑成型、拉挤成型、模压成型、树脂

传递模塑成型(RTM)、喷涂成型等。不同的成型方法对模具的结构形式和模具材料有不同的要求。比较有代表性的模具结构有缠绕成型模具、金属框架式模具、RTM成型模具等。

对于缠绕成型来说,选择适当的芯模对提高复合材料构件成型质量至关重要。合理设计的芯模将使纤维的损伤减至最小且能减小构件尺寸的偏差和残余应力。芯模要求有足够的强度、刚度,且满足精度要求。重复使用的芯模还要保证制件固化后在保持构件和芯模完整性的条件下,芯模和制件能顺利分离<sup>[3]</sup>;金属框架式模具主要用于复合材料热压罐成型,其对模具型板的尺寸精度、表面质量、型板厚度以及模具支撑结构等要求较高,既要满足刚度要求,又要满足其传热要求;RTM成型工艺对上下模具的配合精度、模具表面质量、注射口和排气孔位置、模具密封性以及构件脱模装置等要求较高。

## 复合材料成型模具数字化设计

### 1 复合材料工艺数模设计

复合材料工艺数模设计是模具数字化设计制造的基础,是复合材料构件的原始数据,为后续的分析、制造等环节提供数据源头。其建模工作主要包括贴模面设计、建立铺层坐标系、区域和过渡区域的建模、铺层详细设计、铺层分块和展开以及可制造性分析等。

### 2 复合材料成型模具设计

复合材料构件成型模具结构随工艺方法的变化而变化,典型的是用于热压罐成型的框架式模具,如图1所示。模具通常由上部分的型板和下部分的支撑结构组成,型板制造中要求型面精度高、表面质量好,用来保证复合材料构件成型后的外形符合设计要求;支撑结构用于将工作载荷下支撑型板的变形控制在设计

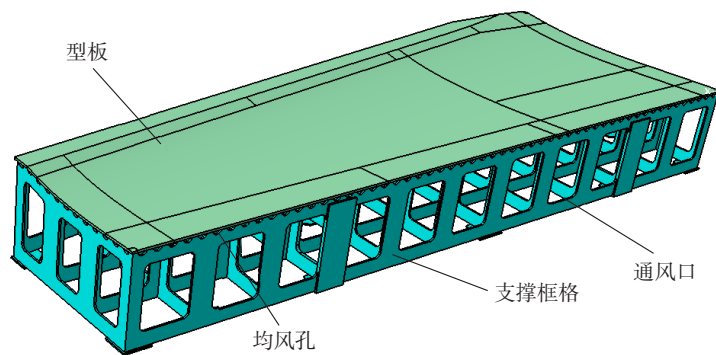


图1 复合材料成型框架式模具

要求范围内,因此要求其具有一定的刚度和强度。支撑结构上通常开有通风口、均风孔,保证模具在热压罐内的通风传热性好。框架式模具重量轻、易搬运、通风好,但其制造过程复杂,结构设计合理性要求高。对于飞机大型复合材料壁板的制造,框架式模具可兼顾保证刚度、强度;保证模具通风传热;保证模具运转方便。

传统框架式模具设计方法是工装设计部门根据复合材料构件数模,提取模具成型曲面,进而创建模具型板,模具型板通常比构件外形面要更大一些,用来安放工装夹具等;在模具型板的基础上创建支撑结构,然后在支撑结构合适的位置创建通风口等。这种传统的设计方法较依赖模具设计人员所掌握的知识 and 经验,例如不同的设计者设计出的框格间距、通风口尺寸、型板厚度等都会有所差异;且设计重复性劳动较多,效率低下。

为了提高复合材料模具的设计效率,避免大量人为的重复性设计工作,充分利用现有的设计知识和经验,提高模具设计质量,缩短设计研制周期,发展复合材料成型模具数字化设计意义重大。近年来,随着数字化技术、网络技术的不断发展,国内外学者对数字化航空钣金模具设计制造技术进行了深入研究<sup>[4-5]</sup>,但对复合材料成型模具数字化设计制造技术则研究不多,文献[6]对尺寸较

大的复合材料构件的真空注射RTM成型模具进行了研究和开发,文献[7]针对复合材料热压罐成型模具,提出了模具支撑结构的级联参数化等一系列算法,开发了复合材料构件工装设计系统。

复合材料成型模具数字化设计应将成组化模块规范、专家知识库与数字化仿真分析结合起来。由于复合材料成型方法的多样性,导致其模具结构形式的多样性,使得设计人员很难短期内熟练掌握复合材料成型模具数字化设计技术,除了进行必要的培训,还需建立相应的成组化模块规范来指导设计人员进行模具数字化设计,如图2所示。通过实例来描述不同结构形式模具的具体建模步骤、工艺分析等。同时,将前人的经验和知识进行科学、系统的提炼,形成专家知识库,设计人员根据复合材料构件的三维模型,按照模具设计流程,依靠专家知识库快速实现模具设计,最大限度地减少设计者的重复劳动工作,缩短模具的设计周期,提高模具设计质量。同时将设计数据进行数字化保存与管理,丰富专家知识库。

### 3 复合材料成型模具数字化仿真分析

复合材料成型过程中因材料热膨胀系数不一致、树脂基体的固化收缩以及模具与构件相互作用易产生固化变形<sup>[8]</sup>。这种固化变形对构件

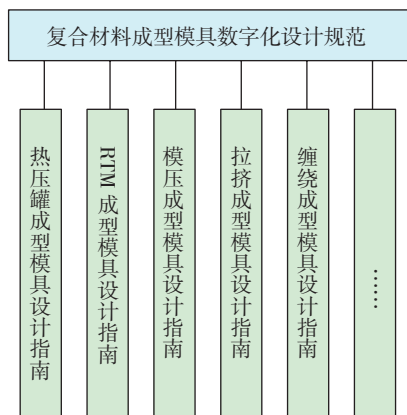


图2 复合材料成型模具数字化设计规范

外形尺寸精度和构件后续的连接装配带来极为不利的影 响。为了克服这方面的问题,传统的方法是依靠设计者经验和试验来对成型工艺和模具型面进行修正加工,从而减小甚至抵消构件变形。但这种试错法耗时费力,不利于提高模具的设计效率。传统模具调试修正工作一般过程如图 3 所示。

随着计算机技术的发展,以数值模拟技术实现工艺的虚拟设计,使得基于经验和工艺试验的处理模式朝数值分析的方向进行完善<sup>[9]</sup>。图 4 为某复合材料蒙皮成型过程的模拟仿真结果。利用数值模拟软件,模拟复合材料构件成型过程,分析模具和复合材料构件温度场是否均匀、复合材料构件固化是否均匀以及固化变形是否满足生产要求等,从而反复优化模具结构及升降温速率等成型工艺参数,直到模拟结果满足一定要求,完成模具结构修正设计,总结以上过程如图 5 所示。由于影响复合材料构件变形的因素较多、较复杂,目前对复合材料成型模具的型面修正多限于 T 型、L 型长桁等结构较简单的构件。对于大尺寸构件或复杂曲面外形构件,目前国内航空企业主要利用模具缩比来抵消部分变形。构件翘曲变形等问题的局部修正还比较困难,有待于进一步的研究。

在框架式模具设计时,设计者往

往仅考虑模具在工作载荷下的变形及其对复合材料固化过程中的温度场均匀性的影响,而忽略了对模具结构的优化分析。对于大型复合材料制件,这种方法设计出来的模具通常都非常笨重,不仅耗费大量原材料,对模具的传热以及运输、使用等都造成了影响。因此,减重也是模具数字化设计的一个重要方面。通过计算机辅助技术,模拟模具在不同工况下的变形,进而优化模具的拓扑结构,在满足结构刚度的条件下,尽可能降低模具的重量。

#### 4 复合材料构件模具 CAPP 技术

计算机辅助工艺规划(CAPP)被认为是连接计算机辅助设计(CAD)与计算机辅助制造(CAM)的桥梁。模具 CAPP 系统中包含了众多模块与功能,包括系统管理模块、典型工艺生成模块、工艺编辑模块、工艺辅助计算模块、报表以及查询等模块。CAPP 系统可以利用工艺人员的经验知识和工艺数据进行科学决策,对工艺结果进行优化,大大提高工艺设计的效率。长期以来,复合材料模具加工车间的工艺编制主要

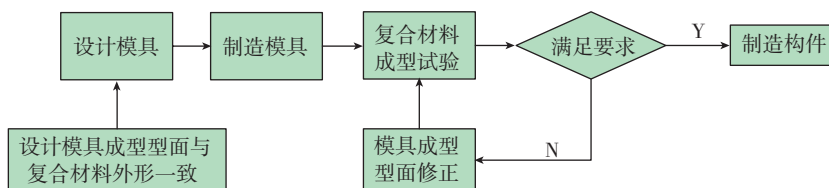


图3 传统复合材料成型模具型面修正

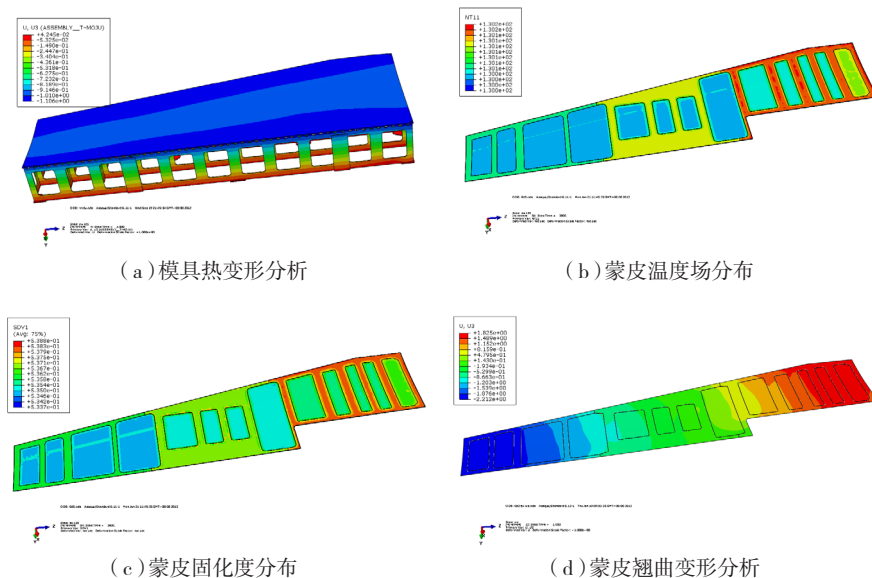


图4 复合材料成型仿真分析

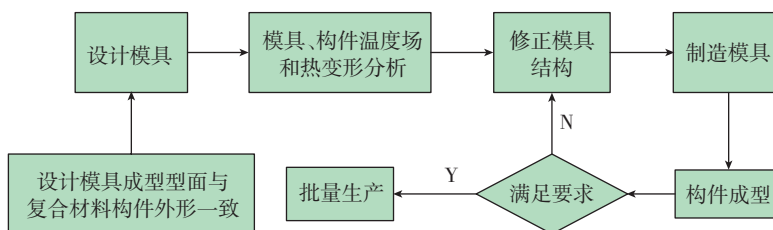


图5 复合材料成型模具模拟修正

依赖手工,模具种类多、批量小、规范性差。复合材料成型模具 CAPP 的研究和应用可提高模具的产品质量,缩短模具制造周期,降低生产制造成本。

## 复合材料构件模具 数字化制造

模具的数字化制造需要依靠各种自动化程度较高的精密、高效数字化加工设备。这些先进制造技术的应用将对缩短模具制造周期,提高模具质量有显著效应。

### 1 数控加工技术

数控加工是复合材料成型模具常用的加工制造方法。框架式模具的型板、缠绕成型的芯模、RTM 成型模具的型腔以及一些有配合要求的工装等,都需要采用数控加工来保证加工精度和表面质量。近年来,高速数控铣削技术(HSMT)发展迅速,其具有较高的材料切除效率、高切削表面质量,并能实现以车代磨,在钣金模具加工上应用越来越多。对于复合材料成型模具,发展高速数控铣削技术将对缩短模具制造周期,提高模具制造质量有着显著成效。

### 2 先进表面处理技术

通过采用不同的表面处理技术,可以改变模具表层的成分、组织、性能,从而大幅度地改善模具的表面性能,如硬度、耐磨性、摩擦性能、耐腐蚀性、抗氧化性及脱模能力等。目前使用的表面处理方法可归纳为物理表面处理法、化学表面处理法和表层覆层处理法。比较具有代表性的是激光表面强化处理法。激光强化加工系统主要由三部分组成,激光器系统、光束传输与变换装置及计算机数控系统<sup>[10]</sup>。对于复合材料热压罐成型模具型板,采用激光表面强化,可以达到提高模具表面质量,延长模具使用寿命的效果。

### 3 加工制造中面临的问题

对于热压罐成型模具,型板与支

撑结构间大多是通过焊接连接到一起,而焊接残余变形和残余应力是焊接制造过程中最常见的问题。由于焊接物理过程十分复杂,快速地不均匀加热与冷却,将不可避免地产生焊接残余应力与焊接变形。影响焊接变形的因素很多,包括焊缝分布、焊缝过于集中、结构刚度、焊接装配、焊接顺序、焊接工艺以及焊接方法和材料等<sup>[11]</sup>。一般来说,可以从焊件结构设计和焊接工艺两方面来解决焊接残余变形问题。一是选择科学的设计方法,包括合理选择构件结构、合理选择焊缝尺寸和布局、合理选择焊缝的截面和坡口形式;二是制定合理的工艺措施,例如选择合理的焊接线能量、选择合理的工艺参数、选择合理的装配焊接顺序以及采用反变形法等<sup>[12]</sup>。

热压罐成型模具型板的加工质量主要是指加工精度和表面质量。型板通常是采用数控加工成形,虽然提高了型板加工质量,但是由于影响加工质量的因素较多,且这些因素之间相互耦合,会导致型板产生机加变形。影响机加变形的因素包括型板材料特性、毛坯初始残余应力、切削力和切削热以及走刀路径等因素。除此之外,切削参数、切削方式、刀具、切削过程中的振动等因素对机加变形和表面质量都有一定的影响<sup>[13-14]</sup>。如何减小数控加工中的机加变形也是模具数字化制造过程中应该考虑的重要问题。

在复合材料构件成型过程中,模具材料同复合材料间热膨胀系数的不同会影响到复合材料的成型质量。因此,在选择模具材料时应尽可能选用热膨胀系数与复合材料相接近的材料。殷钢是近年来国外大量使用的一种复合材料成型模具材料,其具有与复合材料热膨胀系数相匹配,耐温性能好,使用寿命长,焊接性能好等优点。但其美中不足的是材料成本昂贵,且机械加工性能一般,切削

时易造成切削力大、切削温度高、刀具加剧磨损等问题,需要在不同阶段进行相应的热处理等<sup>[15]</sup>。国外在殷钢模具的加工方面技术比较成熟,采用五坐标数控机床可使模具加工达到很高精度。目前国内航空企业,通常采用先滚弯或压弯的方法粗加工,继而通过数控铣削的方法进行精加工,加工效率低、周期长,如何提高殷钢数字化加工制造水平对于缩短殷钢模具质量、提高复合材料成型质量至关重要。图 6<sup>[6]</sup>为 Invar 模具。



图6 Invar模具

## 复合材料构件模具 数字化检测

精密、复杂、大型模具的发展,不仅对制造设备要求越来越高,同样对检测设备的要求也越来越高。随着电子技术的发展,测量技术向着高精度、高效率的方向发展。激光、光栅、磁栅等新技术的应用,诞生了更先进的数字化测量设备。数字化检测技术已成为现代飞机数字化设计制造技术的重要组成部分。近 10 年来,出现了各种各样的检测方法,可分为接触式和非接触式两大类。复合材料成型模具数字化检测流程如图 7<sup>[17]</sup>所示。

### 1 接触式测量检测

接触式测量是指通过测量仪的测头与模型轮廓接触进行测量获得模型轮廓点云数据的一种测量方式,主要有三、五坐标测量机(CMM)、便携式测量机(PCMM)等。接触测量法测量精度较高、可重复性好、噪声低;但无法对软实体表面或易损伤

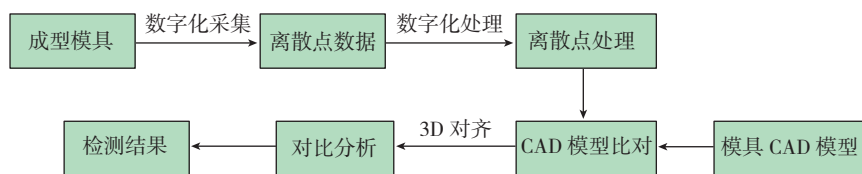


图7 成型模具数字化检测流程图

物体表面进行测量;因其要在模型上逐点测量,故测量效率较低;当物体形状复杂时,对测头运动路径的规划与控制也较复杂;测量时还需对测量头半径进行补偿;测量路径需人工干预,目前还无法实现全自动测量。

## 2 非接触式测量检测

非接触式测量顾名思义,是指测量设备的测头不与被测件表面接触,利用某种与实物表面发生相互作用的原理对型面进行测量,进一步获取三维数据信息,实现对零部件或模具的测量。非接触式测量主要有计算机辅助经纬仪(CAT)、激光跟踪仪、照相测量术等。其中较为成熟的是光学测量法,包括结构光法、激光三角法、激光干涉法、图像分析法等。采用激光扫描法可以达到很高的测量速度和精度,对被测物体的材质和形状也限制不大,但测量精度易受环境光线的影响。

## 并行工程

并行工程是对传统串行产品开发方式的一种根本性改进,要求设计者在设计初期就将产品的整个设计制造过程,包括成本、工艺、环保以及用户需求等考虑在内。其在美国、日本等国家已得到广泛应用,波音公司采用并行工程的方法开发 777 大型客机,实现了 3 年内从设计到试飞成功的目标,比传统的串行模式节约了近 70% 的时间<sup>[18]</sup>。并行工程在我国模具制造业也有一定的应用,文献[19]采用并行工程的方法设计汽车覆盖件模具,较传统的设计方法设计

质量大幅提高,设计周期缩短了一半以上。

目前国内航空企业在并行工程应用方面与国外还有很大差距,在复合材料成型模具的设计制造上应用还很少。发展复合材料成型模具的数字化并行工程,在初步确定复合材料构件的三维模型后,多位设计人员同时进行构件工艺设计、模具结构设计、工程详图设计、模具性能辅助分析、仿真模拟及数控机床加工指令编程等,实现模具无纸设计制造,提高模具生产效率。

## 结束语

复合材料构件制造过程中,模具的设计与制造是影响复合材料质量、周期和成本的重要环节。因此,在复合材料构件数字化设计技术广泛应用的基础上,通过模块化规范、专家知识库与数值模拟结合起来进行模具结构的三维数字化设计与优化,采用 CAPP、数控加工、数字化检测等数字化技术制造模具,并且通过并行工程来缩短模具的设计制造周期。可以说,这些复合材料构件成型模具的数字化设计制造技术是当今航空复合材料发展的重要方向,是提高复合材料构件成型质量、降低制造成本、缩短制造周期的有效途径,是提高我国现代化航空制造技术的一项重要内容。

## 参考文献

- [1] 杜善义. 先进复合材料与航空航天. 复合材料学报, 2007, 24(1): 1-12.
- [2] 杨汉, 陈佳, 兰勇, 等. 数字化技术在航空钣金成形模具制造中的应用. 航空制造

技术, 2012(17): 60-62.

[3] 黄发荣, 周燕. 先进树脂基复合材料. 北京: 化学工业出版社, 2008: 315.

[4] Ye X G, Fuh J Y H, Lee K S. Automated assembly modelling for plastic injection moulds. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2000(10): 739-747.

[5] Wu S H, Lee K S, Fuh J Y H. Feature-based parametric design of a gating system for a die-casting die. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2002(11): 821-829.

[6] Brouwer W D, Van Herpt E C F C, Labordus M. Vacuum injection moulding for large structural applications. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2003, 34(6): 551-558.

[7] 李桂东. 复合材料构件热压罐成型工装设计关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.

[8] D Chen S. Dimension variation predication and control for composites[D]. The Florida State University, 2003.

[9] 岳广全. 整体化复合材料壁板结构固化变形模拟及控制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.

[10] 周建忠, 杨超君, 杜生亚. 激光强化技术提高模具使用寿命. 电加工与模具, 2000(1): 42-44.

[11] 王世斌. 浅谈大型钢结构的焊接变形控制. 中国水运(下半月), 2008, 8(11): 178-179.

[12] 张志伟. 论焊接件变形的结构和工艺分析. 机械研究与应, 2007, 20(3): 18-19.

[13] 王立涛. 航空整体结构件数控加工变形校正理论和方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.

[14] 刁成顺, 王印凯. FT8 大型薄壁环形件的加工. 航空制造工程, 1996(6): 10-12.

[15] 杨博, 李宏, 曹正华. 殷钢在复合材料成形模具中的应用. 玻璃钢/复合材料, 2010(6): 68-69.

[16] Sheppard R, Schmitz T. Aerospace. 2013[2013-04-30]. <http://www.webermfg.ca/Resources/presentations/Aerospace.pdf>.

[17] 饶锡新, 钟春华. 3D 扫描的产品质量检测方法. 江西冶金, 2006(2): 35-36.

[18] 朱焕立, 刘玉宾. 并行工程的产生、应用及研究现状. 中州大学学报, 2003, 20(2): 122-124.

[19] 梁琼仙, 杨维平. 基于并行工程的汽车覆盖件模具开发应用研究. 现代机械, 2008(1): 26-29. (责编 夏宛)