A-PDF Split DEMO : Purchase from www.A-PDF.com to remove the watermark

气囊抛光工具的模块化设计及应用*

金明生，计时鸣*，张 利
（浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室，浙江 杭州 310014）

摘要： 针对主动式、磁控型和磁流变型气囊抛光工具的不同结构特点和使用功能的有效集成问题，基于模块化理论，将产品需求多变性和主体结构标准化有效结合起来，充分利用共用性和组合优化效应，完成了模块化气囊抛光工具的设计，并为产品族规划打下了基础；开展了模块化基础理论、功能模块划分、结构细化设计和产品族规划等方面的分析与研究，通过柔性工作模块、磁场发生器模块、气控容腔模块、动力模块、连接板模块和传感测控模块等，充分保证了新型气囊抛光技术自动、柔性、可控、多变的特点；在以模块化气囊抛光工具为核心的机器人辅助模具自由曲面抛光平台上，进行了相关的试验研究。研究结果表明：将模块化气囊抛光工具应用于模具钢抛光，能获得 Ra 0.006 μm的高质量表面。

关键词： 气囊抛光；模具自由曲面；模块化设计；表面质量
中图分类号： TH122；TG580.699 **文献标志码：** A **文章编号：** 1001-4551(2012)12-1395-05

Modular design of gasbag polishing tool and its application

JIN Ming-sheng, JI Shi-ming, ZHANG Li
(Key Laboratory of E&M, Ministry of Education & Zhejiang Province,
Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Aiming at the problem of effective integration of active, magnetic control and magnetorheological gasbag polishing tool with different structural features and use functions, its modular design was completed based on modular theory, considering the demand variability of product and standardization of main structure, and utilizing the sharing effect and combinatorial optimization, which is also the basis of product family programming. The basic modular theory, a functional module partition, detailed structural design and product family programming were analyzed. Through the modules of flexible working, magnetic field generator, pressure control cavity, motivation, connecting piece, measurement and control, automatic, flexible, controllable, and changeable characteristics of novel gasbag polishing technique were guaranteed. The polishing experiments were carried out on the robot-assisted polishing platform on free-form surface mould. The core of which is the modular polishing tool. The results indicate that modular polishing tool applied to polish die steel can obtain high-quality surface Ra 0.006 μm.

Key words: gasbag polishing tool; free-form surface mould; modular design; surface quality

0 引 言

气囊式抛光技术由英国伦敦光学实验室和Zeeko公司联合最早提出，并成功开发了应用于光学器件和其他复杂曲面的IRP系列高精度抛光设备。哈尔滨工业大学在国内首先进行了气囊抛光方法的研究，并研制了气囊式抛光实验样机，对BK7光学玻璃进行了抛光，得到了Ra 0.931nm的超光滑表面[1-3]。

在借鉴国内外自动化抛光技术相关研究成果的基础上，面向模具行业自由曲面精密、高效、自动化抛光的需求，基于柔性抛光的理念，本研究课题组提出了应用于模具自由曲面的新型气囊抛光技术[4]。气囊抛光工具的合理设计和研制是实现该技术高效、高质量和多领域应用的重要保证。模块化设计能有效解

收稿日期： 2012-07-13
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(50575285)；浙江省自然科学基金资助项目(LQ12E05014)
作者简介： 金明生(1982-)，男，浙江海盐人，博士，讲师，主要从事精密与超精密加工方面的研究. E-mail：jinmingsheng@zjut.edu.cn
通信联系人： 计时鸣，男，教授，博士生导师. E-mail：jishiming@zjut.edu.cn

决气囊抛光工具功能多样性的集成需求。

模块化设计是一种标准化、组合化的设计思想和方法，已渗透到许多领域。在机电产品的设计过程中，已有不少学者成功应用了模块化理论来实现产品的多样化和实用化需求[5-7]。

基于模块化理论，本研究针对新型气囊抛光技术涉及的气压调节方式、磨粒主动控制、曲率自适应性和抛光工序优化等需求，对气囊抛光工具进行模块化理论、功能模块划分、细化设计和产品族规划等方面的分析和研究，并将其应用于模具钢的抛光试验，得到高质量表面。

1 新型气囊抛光技术

应用于模具自由曲面的新型气囊抛光技术以六自由度工业机器人、多功能气囊抛光工具、旋转工作平台、频闪摄影系统和可控磁场发生器等主体组成部分为基础，充分发挥了橡胶气囊柔性在线可调和机器人辅助的优势来实现自动化抛光。该技术有效地弥补了手工抛光方式作业环境差、工作效率低、表面质量不稳定的缺点和传统刚性抛光方式接触碰撞、曲面适应性差的劣势。

已有的研究结果表明新型气囊抛光技术可实现抛光工具与被抛光工件的大面积柔性接触，研究者通过气囊内部气压的调节和机器人抛光系统对抛光工具的运动轨迹和姿态的精确控制，可有效地提升自由曲面抛光的品质和效率。

在新型气囊抛光技术的研究过程中，分别提出了已获国家授权发明专利的被动式、主动式、磁控型和磁流变型设计方案来扩展气囊抛光工具的应用面。其中，主动式气囊抛光工具自带动力，可方便地通过连接板与多自由度机器人配合使用，实现工具在三维空间内的自由移动和旋转；磁控型和磁流变型气囊抛光工具开发的目的是为实现磨粒的主动控制和气囊压力调节方式的多样性。

2 气囊抛光工具模块化设计

针对主动式、磁控型和磁流变型气囊抛光工具的不同结构特点和使用功能，基于模块化理论，本研究把抛光工具的需求多变性和主体结构标准化有效结合起来，并充分利用共用性和组合优化效应，完成模块化气囊抛光工具的设计，解决多功能气囊抛光工具的有效集成问题。

2.1 模块化理论

模块化以系统工程原理和方法、标准化原理和方法以及各种逻辑思维方法为基础，在对事物的构成模式分析、结构优化和系统的分解、重组、协调等方面有其独特的效能[8-9]，已广泛应用于机械、电子、计算机等行业。

模块是模块化产品的基本组成元素。模块及模块化设计在不同的应用领域有其特定的含义。就机电产品的模块化设计来说，其基本思路是在对产品结构和功能分析的基础上，划分出基本单元（模块），通过模块的不同选择和组合，满足产品多样化和实用化的需求。

2.2 抛光工具功能分析

气囊抛光工具应具备的主要功能是实现橡胶气囊系列更换、气囊压力实时调节、主轴转速反馈可控、连接板模块尺寸调整、磨粒运动主动控制、曲面曲率自适应、轨迹规划方便快捷和抛光工序优化等。该抛光工具是实现机器人辅助模具自由曲面抛光的核心部分，充分保证了新型气囊抛光技术自动、柔性、可控、多变的特点。

橡胶气囊系列更换是抛光过程中保证工序合理安排、抛光效率和表面质量提升的重要前提。就橡胶气囊本身而言，它是实现抛光工具与被抛模具表面柔性、大面积、顺从接触的关键所在，其结构参数和性能指标的合理选择直接关系到模具的抛光效率和质量。同时，考虑到橡胶气囊在摩擦生热条件下老化速度的加快和结构尺寸的改变，导致其使用性能降低，需定期加以更换。

气囊压力调节的实质是改变或保持橡胶气囊与模具表面接触区的压力分布。本研究将接触区涉及的尺寸、压力、速度、温度等多个参数统称为接触特性。从单一影响因素来说，改变橡胶的材料属性、气囊的形状尺寸、气囊内部的充气压力、可控磁场的电流、橡胶气囊圆心相对工件初始接触点的位置变化量、抛光工具主轴相对工件接触中心法线方向的夹角、电机的转动速度等都会影响接触特性。通过气压控制单元来调控气囊内部的充气压力是实现气囊压力实时调节的主要方式。

基于直流电机空载和负载状态下转速变化较大的情况，本研究提出了主轴转速反馈可控，使橡胶气囊与模具表面处于不同接触状态时，转速保持稳定。连接板模块的尺寸调整是为了适应结构设计改变的需求；同时也是考虑抛光工具在一定转速范围内工作时，避免机器人的共振现象。磨粒运动的主动控制是为了提高磨粒在抛光区的有效参与率、优化磨粒的分布状态和改善磨粒的运动趋势。曲面曲率的自适应充分发挥了橡胶气囊与模具表面柔性接触的特点。轨迹规划的方便快捷和抛光工序的优化是机器人辅

助自动化抛光和抛光工具模块化设计的优势体现。

本研究依照功能需求，对气囊抛光工具这一机电产品进行设计思考。该工具的三维机械结构示意图如图1所示。具体的设计思路和模块介绍如下文所述。

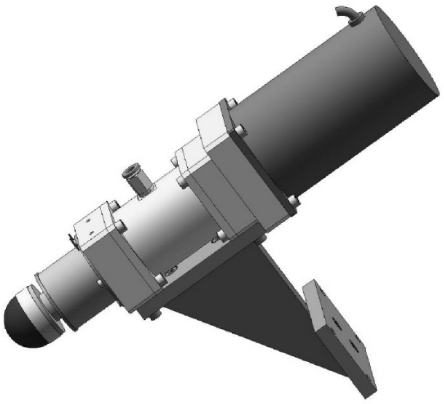

图1　气囊抛光工具三维示意图

2.3　抛光工具设计

在对抛光工具功能分析的基础上，进行模块的划分和功能模块的设计是模块化设计的重要工作。模块化设计是系统地、“由上而下”地、有计划、有目的地展开的，它在方案阶段就对系统构成单元的类型、品种、规格作了深思熟虑的规划。

气囊抛光工具作为机电一体化产品，包含机械本体、传感器、执行机构和信息处理4个部分。

抛光工具的具体机械结构如图2所示。

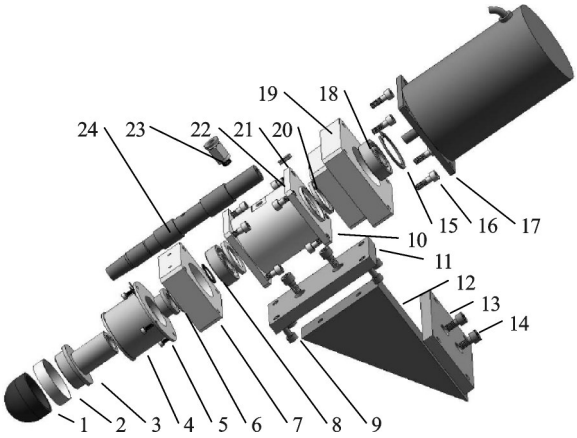

图2　气囊抛光工具机械结构图

1—橡胶气囊；2—卡环；3—气囊保持架；4—磁场发生器；5—磁场发生器固定螺钉；6—橡胶防尘圈；7—前端盖；8—轴用弹性挡圈；9—前后端盖连接板固定螺钉；10—中间体；11—前后端盖连接板；12—加强型连接板；13—机器人执行末端连接板；14—加强型连接板固定螺钉；15—孔用弹性挡圈；16—直流电机固定螺钉；17—直流电机；18—深沟球轴承；19—后端盖；20—轴承垫；21—键；22—中间体固定螺钉；23—气控接头；24—主轴。

按照模块化机电产品的特点，本研究可将新型气囊抛光工具的构成模式用一个简单的公式表达：

抛光工具=通用模块+专用模块

按一般理解，通用和专用是结构可变和不可变之分。就产品的模块化而言，模块是一种具有确定功能的通用独立单元，研究者在设计过程中应充分考虑其组合性和互换性。

基于功能分析，本研究将气囊抛光工具划分成六大模块，具体如图3所示。柔性工作模块属于专用模块，由图2所示的零件1、2、3构成。该模块是实现新型气囊抛光技术柔性大面积接触、橡胶气囊系列更换和曲面曲率自适应的核心单元。磁场发生器模块由主件4和辅件5组成，完成对磁流变液和磁性磨料的调控。气控容腔模块由零件7、10、19、22、23组成，并通过一端中空的主轴将气压传递给柔性工作模块。动力模块属于通用模块，由零件6、8、15、16、17、18、20、21、24组成，将直流电机的旋转运动通过主轴传递给柔性工作模块。连接板模块由零件9、11、12、13、14组成，一端固定于前后端盖，另一端固定于机器人执行末端。传感测控模块的功能包括压力、速度等参数的测定和调控，此处不作具体阐述。

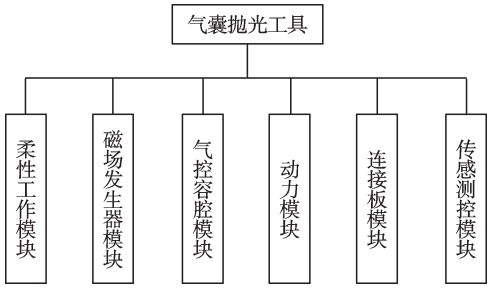

图3　气囊抛光工具功能模块划分

在柔性工作模块中，包裹抛光布的橡胶气囊通过卡环固定于气囊保持架。同时，气囊保持架与主轴通过莫氏锥度配合方式将柔性工作模块与动力模块进行功能衔接。莫氏锥度是一个锥度的国际标准，用于静配合以精确定位。由于锥度很小，通过利用摩擦力原理，可传递一定的扭矩用于抛光作业。在同一锥度的一定范围内，柔性工作模块可以自由拆装，同时在工作时又不影响其使用效果。

柔性工作模块在抛光过程中的重要环节是按工艺需求选择合适的橡胶气囊和适时更换抛光布。对橡胶气囊进行优化设计是建立理想磨粒场的重要组成部分，涉及的是多目标优化问题，从控制论角度看是一个多输入多输出模型。橡胶气囊的优化设计涉及如下两个相互影响的参数指标：结构参数指标和性能参数指标。其中，结构参数指标包括气囊的形状、壁厚和尺寸等；性能参数指标指的是气囊的材料属性，反映到橡胶本构模型是其力学性能常数。研究者在理论分析和试验研究的基础上，设计和制造系列化气囊。

磁场发生器模块主件由漆包线绕空心圆柱形基

板制作而成，通电时产生磁场。在制作和使用过程中，研究者需考虑线圈匝数和漆包线直径对磁场发生器结构尺寸和磁场强度的影响。结构较小的磁场发生器可直接通过螺钉固定于前端盖，并将主轴作为衔铁使用；结构大的则可直接安放于抛光工作台上，将抛光工件置于圆柱孔中。

磁流变液是一种智能型材料，由分散相的磁性颗粒、连续相的基载液和稳定剂组成，具有流变性能。磁流变液填充在中空气囊中，当有一定强度的外加磁场作用时，磁性颗粒在磁力、重力等联合作用下聚结成链状结构。通过调控磁场发生器的通电电流可改变磁流变液的固化程度，进而改变橡胶气囊与被抛工件的接触压力，这是磁流变液应用的一种新思路。同时，磁场发生器对磁性磨料有主动调控作用，能提高磨料在材料去除过程中的有效参与率。

气控容腔模块具有一定的气密性，通过气控接头和压力传感器与气压控制单元连接，可对气囊压力进行实时调节。同时，该模块又是动力模块中轴承、橡胶防尘圈等零件的安装载体。动力模块为柔性工作模块提供0~1 500 r/min的负载调速功能。电机与主轴通过键的方式连接，保证同轴度要求。连接板模块是气囊抛光工具与机器人之间的桥梁，将机器人自带的姿态控制功能转换到抛光中。通过合理设计连接板模块结构尺寸，可有效避免气囊抛光工具在抛光过程中的部分干涉问题和机器人运行过程中的共振现象。

在气囊抛光工具的模块化设计过程中，本研究充分运用了自上而下的建模方法。该方法从装配体中开始设计工作，充分注重零部件之间的关系，可以使用一个零件的几何体来帮助定义另一个零件，或生成组装零件后添加加工特征，可以将布局草图作为设计的开端，定义固定的零件位置、基准面等，然后参考这些定义来设计零件。此处以直流电机固定端的外围轮廓作为布局草图进行模块化抛光工具的设计和装配工作。

在产品设计过程中，有学者将层次分析法与动态规划结合起来，对其进行动态寻优组合评价[10-11]。

假设有 n 个对象 $S_1, S_2, \cdots, S_n$，要获得每个对象的权重，分别对 n 个对象进行两两比较、评比，其值用 b_{ij} 表示。评分结果用判断矩阵的元素表示：

$$\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix} \tag{1}$$

其中，$b_{ij}=1/b_{ji}$。

计算判断矩阵每一行元素的乘积 M_i 为：

$$M_i=\prod_{j=1}^{n} b_{ij} \quad (i=1, 2, \cdots, n) \tag{2}$$

计算 M_i 的 n 次方根为：

$$\bar{W}_i=M_i^{\frac{1}{n}} \tag{3}$$

对 $\bar{W}_i$ 进行归一化处理，得：

$$W_i=\frac{\bar{W}_i}{\sum_{j=1}^{n}\bar{W}_j} \quad (i=1, 2, \cdots, n) \tag{4}$$

式中：W_i — $S_1, S_2, \cdots, S_n$ 各对象的权重。

由于各功能在整个机械产品中的重要程度有差别，为使最优方案更合理，研究者需要确定功能元权重。在对功能元进行两两比较获得功能元判断矩阵的基础上，本研究用层次分析法计算各功能权重，最后根据专家不同的权重，计算各功能元权重的平均值：

$$g_k=\sum_{i=1}^{p} W_i e_{ik} \tag{5}$$

式中：p —专家数量，W_i —第 i 个专家的权重，e_{ik} —第 i 个专家对第 k 个功能元所计算出的权重。

在上述过程的基础上，还需进行指标量化，得到综合评分，最终进行组合优化等工作。

2.4 抛光工具产品族规划

基于功能分析和模块化设计，本研究将气囊抛光工具向产品族规划推进，具体的实施步骤如图4所示。

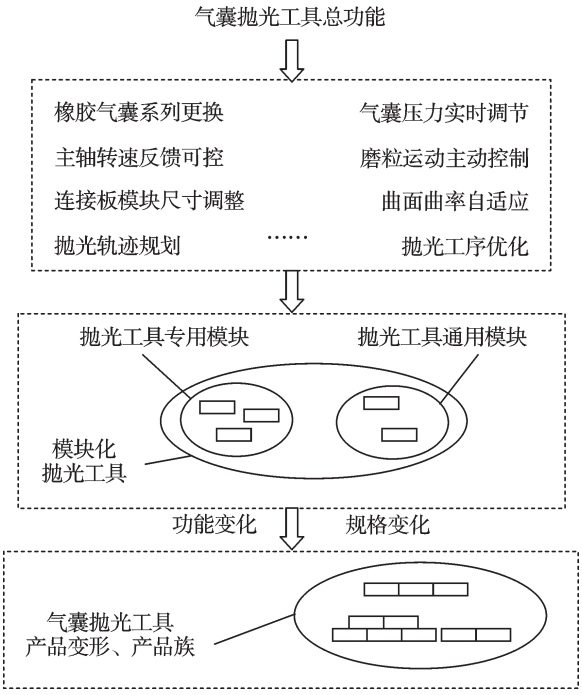

图4 气囊抛光工具产品族规划

基于功能分析的气囊抛光工具模块划分充分考虑了标准接口的可互换性，为系列模块组成产品族奠定了基础。模块接口问题主要包括两方面：① 接口本身

的设计加工技术，包括接口的可靠性、可装配性和加工工艺等；② 接口的管理技术，包括标准化、编码、接口数据库管理和模块组合测试等[12]。面向产品族的设计方法是一种以最小开发、制造、服务成本获取最多产品品种的方法。该方法要求用模块化设计方法构造模块系统，通过组合来构造产品，模块接口的标准化保证模块的互换性，从而易于实现产品的快速变型设计[13-14]。功能变化和规格变化是产品族规划的核心保证。

3　模块化气囊抛光工具的应用

模块化气囊抛光工具可应用于气控式、磁控式、磁流变式和组合式抛光。本研究以气控式抛光为例，基于机器人辅助气囊抛光系统，针对45钢模具进行抛光，被抛区域为圆弧面，磨料采用人造金刚石研磨膏。

初始抛光阶段，本研究将柔性工作模块的转数设定在1 500 r/min，气囊相对下压量为2 mm，磨料粒度为W7。该阶段为粗抛，主要目的是快速去除圆弧表面的加工刀痕和破坏层。第2抛光阶段，转数保持稳定，气囊相对下压量调整为1 mm，磨料粒度为W3.5。该阶段为半精抛，使表面粗糙度达到一定要求。第3抛光阶段，将转数调整为1 000 r/min，气囊相对下压量保持为1 mm，磨料粒度为W1.5。该阶段也为半精抛，目的是在进一步降低表面粗糙度的前提下，保证试样的形状精度。第4阶段，转数保持稳定，气囊相对下压量调整为0.5 mm，磨料粒度为W0.5。该阶段为精抛，在去除大部分划痕的同时使表面粗糙度达到一定要求。4个抛光阶段均采取横向和纵向进给交替变换的方式，以保证表面质量的均匀性。

试样在4个抛光阶段后的表面质量效果图如图5所示。其中，未抛光平面（也即未抛光圆弧面）的原始表面粗糙度在Ra 0.670 μm左右，部分抛光圆弧面的表面粗糙度整体稳定在Ra 0.006 μm。

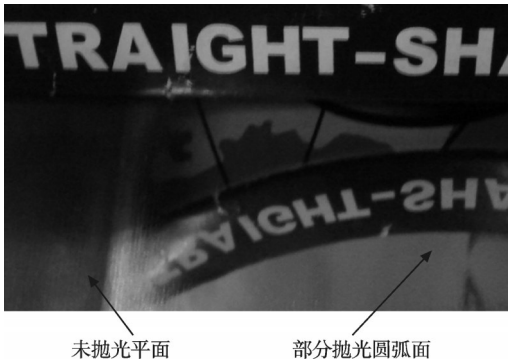

图5　试样抛光前后表面质量

4　结束语

本研究针对气囊抛光工具涉及的橡胶气囊系列更换、气囊压力实时调节、主轴转速反馈可控、磨粒运动主动控制、曲面曲率自适应、抛光工序优化等需求，运用模块化原理，对其进行功能分析和设计思考。在功能分析的基础上，将气囊抛光工具划分为六大功能模块，把需求多变性和主体结构标准化有效结合起来，充分利用共用性和组合优化效应，完成模块化气囊抛光工具的设计，并为产品族规划奠定了基础。

基于机器人辅助气囊抛光系统，笔者以气控式抛光为例，在45钢试样的圆弧面上进行试验研究。经过4个抛光工艺阶段的合理规划和横纵向进给的交替进行，最终获得较好的表面质量Ra 0.006 μm。

从气囊抛光工具产品系列化设计和多功能应用角度来说，确定参数范围和系列型谱、考虑机器人额定负载问题、优化功能模块的组合性和互换性是提高设计效率和完善产品功能的必要前提。

参考文献（References）：

[1]　计时鸣，张　利，金明生，等. 气囊抛光技术及其研究现状[J]. 机电工程，2010，27(5)：1-12.

[2]　BINGHAM R G，WALKER D D，KIM D H，et al. A Novel Automated Process for Aspheric Surfaces[C]. Proc. SPIE，2000，4093：445-450.

[3]　宋剑锋，姚英学，谢大纲，等. 超精密气囊工具抛光方法的研究[J]. 华中科技大学学报：自然科学版，2007，35(1)：104-107.

[4]　计时鸣，金明生，张　宪，等. 应用于模具自由曲面的新型气囊抛光技术[J]. 机械工程学报，2007，43(8)：2-6.

[5]　刘金华. 超声磨削加工机及其模块化设计研究[D]. 天津：天津大学机械工程学院，2001.

[6]　祁卓娅. 机械产品模块化设计方法研究[D]. 北京：机械科学研究院，2006.

[7]　杨海飞. 小农机减速箱可重构模块化与能源设计研究[D]. 杭州：浙江工业大学机械工程学院，2007.

[8]　陈微战，姜献峰. 面向客户定制需求的塑料平托盘模块化设计[J]. 轻工机械，2011，29(6)：14-17.

[9]　童时中. 模块化原理设计方法及应用[M]. 北京：中国标准出版社，2000.

[10]　刁培松，仪垂杰，吴文权，等. 基于结构模块化方法的小麦联合收获机方案设计[J]. 农业机械学报，2003，34(4)：94-97.

[11]　张立彬，叶永伟，蒋建东，等. 基于可重构模块化的小型农业作业机方案设计[J]. 农业机械学报，2005，36(4)：78-81.

[12]　侯　亮，唐任仲，徐燕申. 产品模块化设计理论、技术与应用研究进展[J]. 机械工程学报，2004，40(1)：56-61.

[13]　高卫国，徐燕申，陈永亮，等. 广义模块化设计原理及方法[J]. 机械工程学报，2007，43(6)：48-54.

[14]　徐建萍，罗　妤. 面向大规模定制的生产计划研究[J]. 机械，2010，37(1)：59-62.

［编辑：罗向阳］