

# 面向飞机协同设计的零部件成熟度评估方法

周安宁<sup>1,2</sup> 李文正<sup>2</sup>

1. 南京航空航天大学,南京,210016

2. 成都飞机设计研究所,成都,610041

**摘要:**飞机协同设计中并行度的提高带来了冗余反复设计的增加,实时、量化的成熟度指标是这一问题的解决途径。针对飞机协同设计对成熟度指标的要求,提出了一种综合模糊评估方法。该方法依据CPM设计理论,使用零部件的物理完备度、指标符合度、创新度和目标偏离度,评估其剩余的修改程度。在具体描述评估的方法和过程的基础上,将评估方法应用于一个具体的飞机部件协同设计场景,演示其实施过程,并探讨各影响因子在评估结果中的影响情况。最后,通过应用实例说明,该评估方法反映了设计过程中成熟度的真实取值和波动规律,能有效辅助协同设计的展开。

**关键词:**成熟度;协同设计;并行工程;评估

中图分类号:V221

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2013.01.013

## Maturity Degree Evaluation Method of Components in Plane Cooperative Design

Zhou Anning<sup>1,2</sup> Li Wenzheng<sup>2</sup>

1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016

2. Chendu Aircraft Design & Research Institute, Chengdu, 610041

**Abstract:** The improvement of concurrent degree supported by cooperative design leads to redundant reciprocating work. Degree of maturity with instant and numerical indicator is a solution to the drawback. A synthesis fuzzy assessment method was proposed, aiming at the requirements of maturity indicator in airplane cooperative design. The method gave maturity degree of component/part combined physical readiness, perspective satisfaction, implementation framework deviation and increment of design indexes. The technology and process of the assessment method was described in detail, and demonstrated by application in design of a specific airplane component, which showed the reflection of each impact factors. The use case shows that the method conforms to the real value and waving law of maturity degree in design, which can aid cooperative design efficiently.

**Key words:** maturity; cooperative design; concurrent engineering; evaluation

## 0 引言

随着信息技术在航空业的深入应用,协同设计技术受到全球航空制造业的重视。协同设计技术的应用,使飞机设计流程的并行度得以提高,从而缩短设计周期,提高设计质量。由于存在紧密关联,并行度提高后局部的设计进展会导大量关联修改,增加了工作量。成熟度作为描述子系统设计更改稳定性、修改余量的指标,是设计中间状态可参考性的衡量标准。用上游设计的成熟度指导本地设计的节奏能够减少关联修改,减少工作量。可以说,成熟度是并行工程<sup>[1]</sup>的重要保证。

在设计过程中,成熟度是描述产品零部件完成情况的指标,用于评估设计的收敛程度。即成熟度越高的产品零部件,后续修改的必要性就越小。在PDM中成熟度是产品数据控制基线管理的依据。

目前成熟度研究大多关于过程成熟度评估。

文献[2-5]将能力成熟度模型应用于各种实施过程;文献[6]提出了量化的成熟度评估方法,将产品零部件的成熟度概念应用于协同开发过程;文献[7]提出了基于产品特性和属性的量化成熟度概念;文献[8]基于波音和空客的成熟度评估方法提出了多级成熟度评估方法;文献[9]提出了基于质量屋理论的成熟度预测技术;文献[10]使用成熟度指标控制设计流程的并行和协同步骤;文献[11]根据设计状态成熟模型预先安排设计与制造之间的交互数据和交互策略。但是这些方法只针对产品的整体成熟度,即成熟度描述的对象为粗粒度的高层产品、组件,认为在产品的设计流程中成熟度单调递增。

而在飞机实时协同设计中,协作的对象则是细粒度的零部件,需要更精细的成熟度描述。细粒度的设计间关联更为紧密、复杂,前趋任务流程的往复修改会导致后继任务流程中设计工作量的急剧增加。成熟度指标需要描述细粒度数据(零部件)的局部情况,后继流程根据相关联数据的成熟度,决定自身部分设计的推进程度,这样才能避免前驱修改带来的工作量发散性扩大。此外,在

收稿日期:2011-07-14 修回日期:2012-11-10

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目  
(2007AAXXX103)

飞机实时协同设计中,设计达到适合本次验证的结果即为达到最高的成熟度。协调过后,又会出现新的修改需求,即成熟度指标下降了。因此单调递增的成熟度指标不能提供实时的参考。

因此,飞机协同设计中的成熟度概念更为精确和局部化。本文针对飞机协同设计中的要求,提出一种综合量化二级综合成熟度评估方法,并阐述其在飞机协同设计中的应用。

## 1 细粒度的成熟度评估方法

### 1.1 成熟度的因素集

Weber<sup>[7]</sup>根据 CPM (characteristics properties modeling) 设计理论和 PDD(property driven development) 产品设计过程提出了产品成熟度的计算方法。

Weber 认为产品设计是性质 (character)  $C_n$  和性能 (property)  $P_n$  的逐步明确过程,如图 1 所示。其中  $EC_n$  表示外部条件,  $R_n$  表示性质与性能的关系。

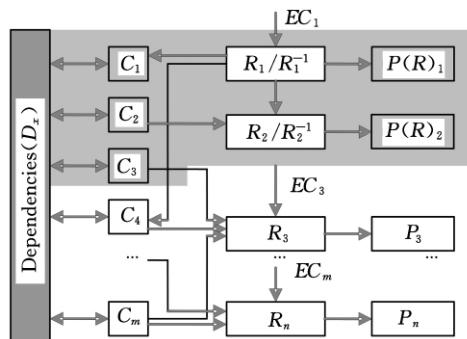


图 1 PDD 设计理论

基于 CPM 理论,Weber 指出产品的实时成熟度为性质成熟度  $M_C$  和性能成熟度  $M_P$  的积,可用下式描述:

$$M(t) = M_C(t)M_P(t) = \frac{N_{C_i}(t)}{N_{C_m}} \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left( \frac{P_j(t)}{P_{R_j}} \epsilon_j \right) \quad (1)$$

式中,  $N_{C_i}(t)$  为已经实现的性质数;  $N_{C_m}$  为需要实现的性质总数;  $n$  为属性总数;  $P_{R_j}$  为性能  $j$  要达到的值;  $P_j(t)$  为性能  $j$  已经达到的值;  $\epsilon_j$  为性能  $j$  的权重。

Weber 的评估方法较符合设计的本质,但是仍然存在明确分解设计对象的性质和性能的困难。在细粒度零部件的设计过程中这二者通常并不明确。同时,这种成熟度计算方法不能描述后续的性质修改和性能改变,对剩余的修改程度预测不准确。

在现实飞机设计中,设计者根据经验或者创新思路构建设计的实现框架,进行设计。在实现框架确定以后,设计包含的零部件名目等性质属

性才能大致确定,余下部分随着设计的细化最后明确。实现框架的适用范围与需求越相符则越易满足需求,后续修改所导致的变化量越小。设计者对实现框架的运用越熟悉,则越易达到成熟的设计。整体的实现框架对成熟度具有全局的影响。

因此本文在 Weber 的基础上,采用模糊算法,结合实现框架的情况评估细粒度零部件的实时成熟度。

### 1.2 评估指标体系

出于简明性考虑,采用二层评估指标体系。评估指标体系如图 2 所示,其中成熟度指标  $U$  包含四个子指标:模型完成度  $U_1$ ,描述性质完成的情况;指标满足度  $U_2$ ,描述性能实现的情况;创新度  $U_3$ ,描述实现框架的熟练程度;目标偏离度  $U_4$ ,描述实现框架的适用情况。四方面因素共同决定零部件剩余的修改可能。模型完成度  $U_1$  包含已完成子零部件的份额  $U_{11}$  和已完成设计任务的份额  $U_{12}$ 。指标满足度  $U_2$  分为特性完成度  $U_{21}$  和属性完成度  $U_{22}$ 。创新度  $U_3$  包含整体实现框架的偏离度  $U_{31}$  和关键技术备度  $U_{32}$ 。目标偏离度  $U_4$  包括各目标难度  $U_{41}$  和目标与经验的落差  $U_{42}$ 。

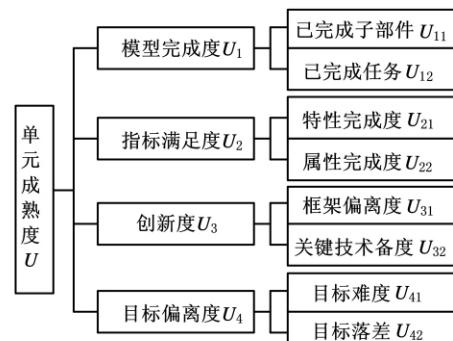


图 2 成熟度评估指标体系

### 1.3 成熟度评价算法

本文提出的成熟度评估方法需要预先根据经验赋予各级指标相应的权值来描述各指标的重要程度。与指标集相对应,权值集也分为两级:

一级指标  $U_i$  的权值为  $a_i$  ( $\sum_{i=1}^4 a_i = 1, -1 \leq a_i \leq 1$ ),

二级指标  $U_{ij}$  的权值为  $a_{ij}$  ( $\sum_{j=1}^2 |a_{ij}| = 1, -1 \leq a_{ij} \leq 1, i = 1, 2, 3, 4$ )。参与评估的设计员、校对、审核等各个角色的影响权重为  $b_i$  ( $\sum_{i=1}^n b_i = 1, -1 \leq b_i \leq 1$ )。

量化的成熟度评估要求采用连续的取值函数来描述专家的评估。隶属度—评估值分布函数

是描述专家对某项评估项目的量化评价及其明确程度的函数。分布函数  $V(x)$  需满足下式,以保证评估本身无权重:

$$\int_0^{100} V(x) dx \equiv 1 \quad (2)$$

式中,  $x$  为评估分值。

本文采用下式表示隶属度—评估分布函数中非零的部分:

$$V(x) = -\frac{6}{w^3}x^2 + \frac{12p}{w^3}x + \frac{1.5}{w} - \frac{6p^2}{w^3} \quad (3)$$

分布函数在评估值  $p\%$  ( $p \in [0, 100]$ ) 处隶属度最大, 评估值只在范围  $x \in [p - w/2, p + w/2]$  ( $w \in (0, 100]$ ) 内隶属度非零。不同  $p, w$  取值的隶属度分布如图 3 所示, 其中曲线  $F_a, F_b, F_c, F_d$  对应的  $p, w$  分别为  $p=45, w=10; p=50, w=10; p=50, w=20; p=50, w=30$ 。

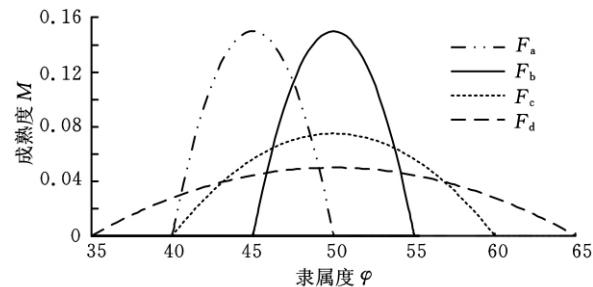


图 3 隶属度分布函数样例

评估时,首先由设计员、校验、审核员对每一个二级指标给出最大隶属度处评估值  $p$  和评估值非零范围  $w$ ,用  $E'$  表示其结果:

$$E' = \begin{bmatrix} V_{11} & V_{12} \\ V_{21} & V_{22} \\ V_{31} & V_{32} \\ V_{41} & V_{42} \end{bmatrix} \quad (4)$$

然后根据二级指标的权重,对  $E'$  进行一级模糊综合评价,一级评估矩阵  $E''$  如下:

$$E'' = A^1 \circ E' = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \\ a_{41} & a_{42} \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} V_{11} & V_{12} \\ V_{21} & V_{22} \\ V_{31} & V_{32} \\ V_{41} & V_{42} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中  $r_i = a_{i1}V_{i1} + a_{i2}V_{i2}, i = 1, 2, 3, 4$ 。

再根据一级指标的权重,对  $E''$  进行二级评估,得到个人评估结果  $E'''$ :

$$E''' = A \otimes E'' = \\ \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \end{bmatrix} \quad (6)$$

最后根据各个角色的权重,对个人评估结果

$E'''$  进行综合评估,结果如下:

$$E = \sum_{i=1}^n b_i \times E'''_i \quad (7)$$

假设  $x = m$  时,评估函数  $E(x)$  取得极大值,则该产品结构节点的成熟度为  $m\%$ 。

## 2 飞机协同设计中成熟度的实例分析

某型号飞机设备舱段如图 4 所示,起落架的设计对设备舱段结构的设计存在依赖。设备舱结构的设计需求包括:维持外形、安装设备、支撑起落架、传力。实现框架可以采用侧面检修的形式或使用起落架舱作为检修通道的形式。设备舱结构由分隔舱段的隔框、填充内部空间的壁板、用于连接的角材、维持外形的蒙皮等零件组成。起落架减震支柱的设计受到隔框设计的影响;起落架舱门开合机构必须安装在能承受正向力的结构之上。因此,应用实时的成熟度指标:舱段结构成熟度达到 20% 时,传力路径已经明确,隔框的布局基本定型,可以开展减震支柱的细节设计;成熟度达到 40% 时,舱内结构布局也基本稳定,可以找到适当的地方安装舱门开合机构。这样相关设计能够提前展开,而不增加过多冗余工作。

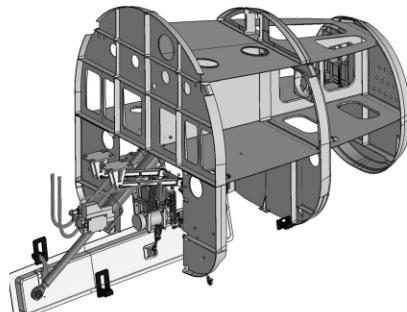


图 4 某飞机设备舱段

设备舱段结构成熟度评估过程如下:

首先设定权重。由于成熟度的评估在设计过程中完成,还没到提交审核、校对阶段,则只需由设计员评估,因此角色权重矩阵为  $[1 \ 0 \ 0]$ 。

这部分结构设计为常规技术,创新度和指标提高度的权重较小,且对成熟度有负的贡献,因此一级权重矩阵设为  $[0.7 \ 0.5 \ -0.1 \ -0.1]$ 。建立一级指标成对比较矩阵:

$$\begin{bmatrix} 1 & 7/5 & 7 & 7 \\ 5/7 & 1 & 5 & 5 \\ 1/7 & 1/5 & 1 & 1 \\ 1/7 & 1/5 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

可求出其最大特征值为 4,一致性指标为  $(4-4)/(4-1)=0$ ,可以判定成对比较矩阵具有满意的一致性。

常规设计时框架变化的影响较小,因此创新

度倾向于关键技术的完备情况,同样,目标偏离度倾向于目标落差的大小。因此二级权重矩阵设为

$$\begin{bmatrix} 0.6 & 0.4 \\ 0.1 & 0.9 \\ 0.1 & -0.9 \\ 0.15 & 0.85 \end{bmatrix}$$

飞机设备舱已完成9个部件,尚缺蒙皮、口盖、设备的安装支座等部件,共需要约24~30个部件。设计任务完成14步,尚未完成初步设计、加强起落架支撑部件、安装内部设备等步骤,共有35~42步。该段属常见结构,没有明显特性。当前的设计只能支持一小部分属性,关键技术完全具备,目标难度和目标差距中等,因此评估表格如表1所示。

表1 评估输入值表

一级指标	二级指标( $p, w$ )	
	已完成子部件 (34, 8)	已完成任务 (37, 6)
指标满足度	特性完成度 (99, 2)	属性完成度 (20, 12)
	框架偏离度 (1, 2)	关键技术完备度 (99, 2)
创新度	目标难度 (30, 10)	目标落差 (45, 6)

初始评估矩阵:

$$E' = \begin{bmatrix} V | p:34, w:8 & V | p:37, w:6 \\ V | p:99, w:2 & V | p:20, w:12 \\ V | p:1, w:2 & V | p:99, w:2 \\ V | p:30, w:10 & V | p:45, w:6 \end{bmatrix} \quad (8)$$

一级评估:

$$E'' = \begin{bmatrix} 0.6 & 0.4 \\ 0.1 & 0.9 \\ 0.1 & -0.9 \\ 0.15 & 0.85 \end{bmatrix} \circ E' = \begin{bmatrix} 0.6 \times V | p:34, w:8 + 0.4 \times V | p:37, w:6 \\ 0.1 \times V | p:99, w:2 + 0.9 \times V | p:20, w:12 \\ 0.1 \times V | p:1, w:2 - 0.9 \times V | p:99, w:2 \\ 0.15 \times V | p:30, w:10 + 0.85 \times V | p:45, w:6 \end{bmatrix} \quad (9)$$

二级评估:

$$E''' = [0.7 \ 0.5 \ -0.1 \ -0.1] \otimes E'' = \\ 0.42 \times V | p:34, w:8 + 0.28 \times V | p:37, w:6 + \\ 0.05 \times V | p:99, w:2 + 0.45 \times V | p:20, w:12 \\ - 0.01 \times V | p:1, w:2 + 0.09 \times V | p:99, w:2 \\ - 0.015 \times V | p:30, w:10 - 0.085 \times V | p:45, w:6 \quad (10)$$

综合评估:

$$E = 1 \times E''' + 0 + 0 = E''' \quad (11)$$

可求出当 $x=35.84$ 时 $E$ 出现最大值。因此,本方法评估的设备舱成熟度为35.84%。隶属度

分布函数如图5所示。

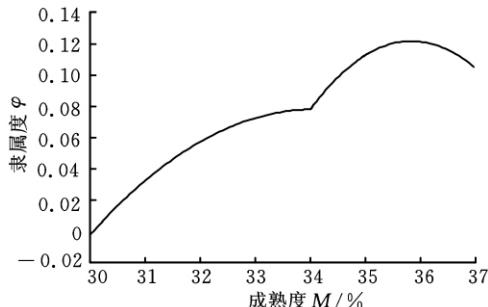


图5 隶属度分布函数局部

本例中创新性和目标偏离度权重较低,成熟度微微偏离完成率;而对于创新性较高,特性要求较重要的场合,完成率对成熟度的权重就会降低,成熟度受创新性的影响更多。如果采用不成熟的创新技术方案,有可能难以达到较高的成熟度。或者所需求的目标与所用框架的常见实现目标相比,偏离较远,而该框架提高目标的难度较大,则后续所需的修改较难预测,因此给予较低的成熟度估值。

### 3 成熟度的应用

在飞机协同设计过程中,产品结构的各个细节的节点都应带有成熟度标记。承担特定功能,有一定独立性的部件和重要零件,是协同过程中常见的协调对象粒度。因为它们通常具有单一的设计者,方便交流协商,消除冲突的修改方案尽可能发生在内部。

不同于产品数据管理中的成熟度标记(在设计数据入库之后赋予相应的成熟度级别),协同设计中的成熟度被赋给尚在设计中的产品结构节点,其版本号尚未明确。因此采用原始版本号来标记成熟度的描述对象,同时辅以设计任务编号来区分从同一版本出发的多分枝情况。

节点成熟度的增长对其父节点成熟度的影响体现在模型完成率和指标满足度的提升,无法直接体现在父节点成熟度的增量上。

设计中评估的频率越高越具实时性,占据设计者的额外精力也越多。一般以完成单个零件或者单项属性、特性的设计之后即进行评估为宜。同时结合设计任务中的内容列表,每次评估只须勾选完成的内容,计算程序自动生成成熟度值,这样占用设计者的精力少,操作方便。

在设备段设计的7个时间点进行成熟度评估,结果如图6所示,图中小圆实心点为真实的完成度。完成度为该时间点时投入的工作量与下次协调前投入的总工作量的比值。

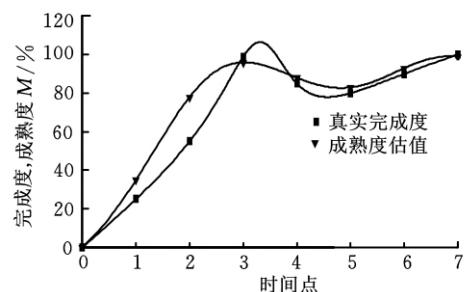


图 6 成熟度估值与完成度

由图 6 可见：

(1)本文提出的成熟度算法随设计进展波动，具备即时性。其估值与完成度接近，变化规律吻合，较准确地描述了剩余的修改需求。

(2)整体上成熟度估值比完成度稍好，尤其在接近首次协调前表现得较明显。在这个时间段，设计进行了部分微调，投入了部分工作量，降低了完成度。微调涉及的范围较小，同时变化值也较小，因此设计的稳定性本身是高于完成度的。故与完成度相比相对乐观的估值是合理的。

因此，协同设计者依据成熟度可以准确判断出该段设计的可参考性。

#### 4 结束语

采用基于性质和性能的指标体系，结合创新程度和需求情况预测成熟度克服了细粒度产品零部件的模糊性。紧随设计操作的评估时机确保了实时性，以单次迭代的需求为基准保证了适度的动态性。实例证明本文提出的方法贴合实际设计中的成熟度取值和变化规律，对飞机实时协同设计具有较高参考性。

结合自身的企业文化沿袭，选取适当的权重值集合，运用成熟度评估方法，使得飞机设计中的并行度得以提高。更实时、准确的动态成熟度评估方法能够有效消除并行度提高而带来的冗余工作量，从而能借助协同设计，在设计周期较长的航空类行业改进设计流程，提高设计并行度得以实现，最终缩短设计周期，提高设计效率。

#### 参考文献：

- [1] 范玉青. 现代飞机制造技术[M]. 北京：北京航空航天出版社，2001.
- [2] Daniel A, Henrique R, Camila de A. A Case Study about the Product Development Process[C]//Geilson Loureiro. Proceedings Book of the 14th ISPE International Conference on Concurrent Engineering. Sao Jose Dos Campos London, Springer, 2007:211-218.
- [3] Stark J. Product Lifecycle Management[M]. London: Springer, 2005.

- [4] 袁家军,王卫东,欧立雄. 神舟项目管理成熟度模型的建立与应用[J]. 航天器工程,2007,16(1):1-9.  
Yuan Jiajun, Wang Weidong, Ou Lixiong. Establishment and Application of Shenzhou Project Management Maturity Model [J]. Spacecraft Engineering, 2007,16(1):1-9.
- [5] Zephir O, Minel S. Reaching Readiness in Technological Change through the Application of Capability Maturity Models Principals[C]//Geilson Loureiro. Proceedings Book of The 14th ISPE International Conference on Concurrent Engineering. Sao Jose Dos Campos London, Springer, 2007:57-64.
- [6] 陈淑燕,吴明赞. 模糊多级综合评价方法在企业资源评估中的应用[J]. 运筹与管理,2002,11(3):101-105.  
Chen Shuyan, Wu Mingzan. Application of Fuzzy Multilevel Comprehensive Evaluation Method in Enterprise Resource[J]. Operations Research and Management Science, 2002,11(3):101-105.
- [7] Weber C. Looking at “DFX” and “Product Maturity” from the Perspective of a New Approach to Modeling Product and Product Development Processes [M]//Frank — lothar Krause. The Future of Product Development. Heidelberg, Berlin: Springer, 2007:85-104.
- [8] 陶剑,范玉青. 成熟度在飞机研制一体化流程的应用[J]. 北京航空航天大学学报,2006,32(9):1117-1120.  
Tao Jian, Fan Yuqing. Application of Maturity in Development of Aircraft Integrated Process [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006,32(9):1117-1120.
- [9] 邹灵浩,郭东明,高航,等. 协同产品开发设计成熟度的模糊预测方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2010,22(5):791-796.  
Zou Linghao, Guo Dongming, Gao Hang, et al. Fuzzy Evaluation Method of Design Maturity for Collaborative Product Development[J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2010, 22 (5):791-796.
- [10] Zhou Q Z, Zha H Y. Application of Data Maturity in Product Development Process Control [J]. Applied Mechanics and Materials, 2011,58/60:657-661.
- [11] Zhao Y, Mo R. The Design State Maturity Model for Collaboration between Design and Manufacturing[J]. Applied Mechanics and Materials, 2008,10/12:165-171.

(编辑 郭伟)

作者简介：周安宁，男，1979 年生。南京航空航天大学航空宇航学院博士研究生，成都飞机设计研究所第 9 研究部工程师。主要研究方向为计算机辅助设计、协同设计。李文正，男，1948 年生。成都飞机设计研究所科技部教授、博士研究生导师。