

基于质量损失函数的模块实例稳健选配方法

丁力平¹ 姜丽萍^{1,2} 陈文亮¹

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016; 2. 上海飞机制造有限公司, 上海, 200436)

摘要:为提高飞机工艺装备模块化设计的质量稳健性,提出了一种基于质量损失函数的模块化产品模块实例的稳健选配方法。该方法首先在给出质量损失函数统一描述的基础上,引入信噪比表达模块实例的稳定性。并综合考虑模块的功构连接形式和装配偏差,建立面向模块化产品的模块实例稳健选配模型,同时给出模型求解方法。最后,通过实例应用验证了方法的有效性和合理性。

关键词:飞机工艺装备;模块实例;选配模型;质量特性

中图分类号:TP391

文献标识码:A

文章编号:1005-2615(2012)04-0543-05

Robust Selective Assembly Method for Module Instances Based on Quality Loss Function

Ding Liping¹, Jiang Liping^{1,2}, Chen Wenliang¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. Shanghai Aircraft Manufacturing Co. Ltd, Shanghai, 200436, China)

Abstract: In order to improve the quality robustness of modular design for aircraft assembly fixture product, a method based on quality loss function is proposed to select the robust module instances. Firstly, the unified description on quality loss function is given and the robustness index of module instance is expressed by integrating signal to noise ratio (SNR). Then, considering the connection type of function-structure and assembly deviation, robust selective assembly model oriented modular product is established, and the solution to the model is given. Finally, an example is provided to illustrate the validity and rationality of the proposed method.

Key words: aircraft assembly fixtures; module instances; selective assembly model; quality characteristic

为提高飞机生产准备的快速响应能力,降低开发成本,飞机工艺装备的模块化设计技术已成为航空制造工程的研究热点^[1-2]。由于模块化产品各功能模块具有多个可选实例,因此,给定功能模型及实例信息,如何为每个功能模块选配对应实例,以实现产品最佳性能,是飞机工艺装备模块化设计过程中必须解决的关键问题。

对于产品模块实例的优化选配问题,国内外学者进行了一些研究。文献[3]采用非线性整数规划算法求解可重构制造系统的模块实例选配方案。文献[4]在定义模块实例间连接关系基础上,通过构建模块实例选配过程模型来求解各个实例的最优组合。文献[5]提出了一种基于隐马尔可夫模型的模块化产品功能模块的实例优化选取方法。文献

基金项目:国家自然科学基金(51105200)资助项目;中国博士后科学基金(2011M500911)资助项目;江苏省博士后科研(2002008C)资助项目。

收稿日期:2011-09-26; **修订日期:**2011-11-25

通讯作者:丁力平,男,博士,讲师,1980年8月生, E-mail:lpding@nuaa.edu.cn。

[6]则考虑模块属性间的自相关性,基于规则推理来选取满足客户需求的模块实例。这些研究提供了模块化产品模块实例的选配方法,但都以追求产品质量性能的最优为目标进行实例组合,忽略了客观存在的模块实例质量特性参数波动引起的产品功能与性能损失,无法保证最终选配方案的稳健性。鉴于现有研究的不足,本文以田口理论的质量损失函数为表征工具,给出模块实例稳健性的表达方式,并通过建立模块实例稳健选配的数学优化模型,在寻求产品质量损失最小的同时,获取模块实例的最优选配组合,从而提高模块化产品的质量稳健程度。

1 质量损失函数的描述

一般情况下,模块化产品的功能模块可能对应于多个实例,每个实例具有相应的质量特性。在产品使用过程中,由于受环境和使用条件的影响,模块实例的质量特性会偏离设计目标值,继而传递并反映为整个产品的质量波动,而产品质量波动会不可避免地导致经济损失。

假设模块实例的质量特性为 y ,目标值为 y_0 ,质量特性允许的合理偏差为 $\Delta Z = Z^U - Z^L$,则田口质量观认为,当质量特性在合理偏差范围内波动时,虽然产品合格但是仍会给用户产生一定程度的质量损失。因此,选配可减少产品质量波动的模块实例是提高产品质量稳健性的有效途径。

对于不同类型的质量特性 y ,其质量损失可分别用二次损失函数式(1~3)描述,各类型质量损失曲线则分别如图1(a~c)所示。

望目特性

$$L(y) = \begin{cases} \frac{F(y - y_0)^2}{(Z^U - Z^L)^2} & Z^L \leq y \leq Z^U \\ F & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

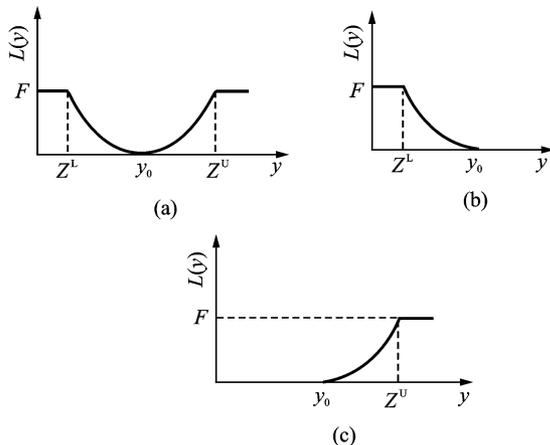


图1 各类型质量损失曲线

望大特性

$$L(y) = \begin{cases} F & y < Z^L \\ \frac{F(y - y_0)^2}{(y_0 - Z^L)^2} & Z^L \leq y \leq y_0 \end{cases} \quad (2)$$

望小特性

$$L(y) = \begin{cases} \frac{F(y - y_0)^2}{(y_0 - Z^U)^2} & y_0 \leq y \leq Z^U \\ F & y > Z^U \end{cases} \quad (3)$$

从上述描述可见,质量特性的类型不尽相同(分为望目、望大、望小3类),而且相同类型的质量特性其质量损失函数的量纲也必然存在差异^[7]。因此,为了规范化质量损失函数,消除量纲干扰,将不同类型的质量损失函数统一改写为

$$L(y) = k(y - y_0)^2 \quad (4)$$

式中: $(y - y_0)^2$ 反映了质量波动程度; k 为比例常数。

依据 Artiles-leon 选择系数^[8]定义 k ,由此可得按照质量特性分类的质量损失函数为

$$L^T(y) = \begin{cases} 4 \left(\frac{y - y_0}{\Delta Z} \right)^2 & T = 1 \\ \left(\frac{y - Z^L}{\Delta Z} \right)^2 & T = 2 \\ \left(\frac{y - Z^U}{\Delta Z} \right)^2 & T = 3 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $T=1$ 表示 y 为望目特性; $T=2$ 表示 y 为望大特性; $T=3$ 表示 y 为望小特性。

2 模块实例的稳健性表达

模块实例的质量特性在各种噪声因素的作用下具有一定的随机性,因此必须考虑其稳健性。本文借鉴文献[9]的研究成果,引入信噪比(Signal-noise ratio, SNR)定量表达质量损失权重,以度量实例质量特性的稳健性。

假设模块实例的质量特性值 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ 为随机值,则

望目特性的SNR估计值 η 可表示为

$$\eta = 10 \log \frac{\bar{y}^2}{S^2} \quad (6)$$

式中: $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$; $S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$

望大特性的SNR估计值 η 可表示为

$$\eta = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (7)$$

望小特性的SNR估计值 η 可表示为

$$\eta = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (8)$$

作为质量特性稳健性的度量指标 η ,其值越大,模块实例越稳健,导致的损失也越小。因此,为了

量不同质量特性导致质量波动的贡献差异性,可依据 η 值对质量特性赋予不同权重。质量特性 y_i 的权重 λ_i 可按式(9)计算得到

$$\lambda_i = \frac{1}{\eta_i} / \sum_{j=1}^n \eta_j \quad (9)$$

3 稳健选配模型的建立与求解

假定一模块化产品 PD 可分解成 m 个模块装配组成,模块集合为 $MO = \{MO_1, MO_2, \dots, MO_M\}$,即 $PD = MO_1 \cup MO_2 \cup \dots \cup MO_M$ 。第 m 个模块 MO_m 的实例数目为 L_m ,则模块实例可记为 $MI_{m,l}, l=1, 2, \dots, L_m$ 。该产品需要考察的质量特性集合为 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$,质量特性权重分别为 $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$ 。相应地,模块实例 $MI_{m,l}$ 的质量特性为 $Y_{m,l} = \{y_{m,l,1}, y_{m,l,2}, \dots, y_{m,l,n}\}$ 。模块实例的选配状态可记作 $x_{m,l} = \begin{cases} 1, & \text{第} i \text{ 个模块选择第} l \text{ 个实例} \\ 0, & \text{第} i \text{ 个模块未选择第} l \text{ 个实例} \end{cases}$ 。

一般而言,模块化产品的质量特性 Y 除了与模块实例质量特性 $Y_{m,l}$ 有关外,还与产品的装配关系、功构组合等有关。比如,产品的可靠性除了受模块实例本身可靠性的影响外,还与实例间的功构连接形式有关。为了便于计算产品的质量特性,本文将质量特性的计算类型分为累加型(I_1)、累积型(I_2)和混合型(I_3)3类。其计算表达式分别为

$$I_1: Y_i = \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^{L_m} (x_{m,l} y_{m,l,i}) \quad (10)$$

$$I_2: Y_i = \prod_{m=1}^M \sum_{l=1}^{L_m} (x_{m,l} y_{m,l,i}) \quad (11)$$

$$I_3: Y_i = \Theta \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^{L_m} (x_{m,l} y_{m,l,i}) \quad (12)$$

由于模块化产品由多个模块实例(零部件)装配而成,装配体之间的装配精度是产品选配的重要指标。为了衡量产品的装配稳健性,本文将由于装配偏差偏离目标偏差而产生的损失作为其度量计算方法。假设产品在装配过程中有 r 个模块配合尺寸封闭环,每个封闭环的配合偏差为 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_r\}$,通常配合偏差为望目特性,因此,第 r 个模块的配合尺寸封闭环由于偏离目标值而产生的损失函数可表示为

$$L(a_r) = 4 \left(\frac{a_r - a_r^0}{a_r^+ - a_r^-} \right)^2 \quad (13)$$

式中: a_r^0 为配合偏差的目标值; a_r^+, a_r^- 为配合偏差的上、下限;每个封闭环的配合偏差 a_r 为封闭环内配合尺寸的计算关系表达式。

模块化产品的选配过程需要综合考虑产品质

量特性变动和装配体间的配合偏差所引起的质量损失。因此,基于质量损失的产品模块实例选配数学模型可表达为

$$\begin{aligned} \min L(Y) &= \sum \lambda_i L^T(y_i) + \sum L(a_r) = \\ & \sum_{i \in I_1} \lambda_i L^T \left(\sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^{L_m} (x_{m,l} y_{m,l,i}) \right) + \\ & \sum_{i \in I_2} \lambda_i L^T \left(\prod_{m=1}^M \sum_{l=1}^{L_m} (x_{m,l} y_{m,l,i}) \right) + \\ & \sum_{i \in I_3} \lambda_i L^T \left(\Theta \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^{L_m} (x_{m,l} y_{m,l,i}) \right) + \sum_{r=1}^R L(a_r) \\ \text{s.t. } \lambda_i &= \frac{1}{\eta_i} / \sum_{j=1}^n \eta_j; \sum_{l=1}^{L_m} x_{m,l} = 1; \\ & x_{m,l} = 1 \text{ 或 } 0; T \in \{1, 2, 3\} \end{aligned} \quad (14)$$

以所建立的实例选配数学模型为基础,综合前述内容,模块实例选配的主要求解步骤如下:

步骤1:分析产品质量特性特点,判断其类型为望目特性、望大特性还是望小特性;

步骤2:根据所有模块实例的统计数据,依据式(6~8)分别计算各质量特性的信噪比 η_i ;

步骤3:参照式(9)计算得到各质量特性权重分别为 $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$;

步骤4:确定各质量特性的类型,并依据式(10~12)计算产品质量特性值;

步骤5:分析产品的装配封闭环,按式(13)计算配合偏差;

步骤6:以式(14)为优化数学模型,将本文所提选配问题视为指派问题并参照指派问题^[10]的求解思想进行优化求解;

步骤7:最优解所对应的各个模块实例的选配状态即为最佳选配方案。

4 实例分析

本文以图2所示的飞机柔性装配型架可调支撑部件的调节装置为例,分析其模块实例的选配。

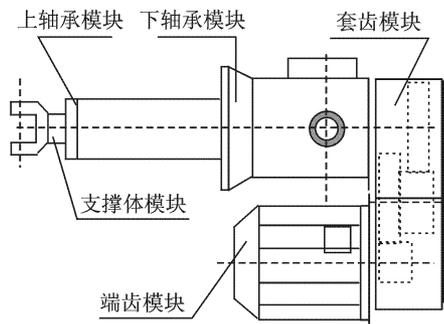


图2 调节装置结构示意图

通过功构分析,该装配的功能模块与模块接口的装配关系如图3所示,相应地,各模块的可能实例如表1所示。分析零部件的质量特征及装配要求,得到各个模块实例的质量特性及接口配合尺寸如表2~6所示。

通过分析可知,在模块实例的质量特性中,质量 W 与成本 C 的计算类型为累加型,可按式(10)计算。可靠性 B 的计算类型为混合型,依据调节装

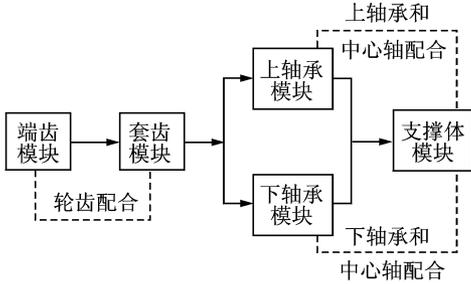


图3 调节装置的功构及接口装配示意图

表1 调节装置模块及其实例

模块名称	模块实例
端齿模块 MO_1	$MI_{1,1}, MI_{1,2}, MI_{1,3}$
套齿模块 MO_2	$MI_{2,1}, MI_{2,2}, MI_{2,3}, MI_{2,4}$
上轴承模块 MO_3	$MI_{3,1}, MI_{3,2}, MI_{3,3}$
下轴承模块 MO_4	$MI_{4,1}, MI_{4,2}, MI_{4,3}$
支撑体模块 MO_5	$MI_{5,1}, MI_{5,2}, MI_{5,3}$

表2 套齿质量特性及装配尺寸

模块实例	质量 W/kg	成本 $C/\text{元}$	可靠性 B	径向跳动 $D/\mu\text{m}$
$MI_{2,1}$	15.2	456	0.942	14.96
$MI_{2,2}$	14.1	420	0.867	14.78
$MI_{2,3}$	16.7	518	0.913	14.85
$MI_{2,4}$	18.5	387	0.845	14.72

表3 端齿质量特性及装配尺寸

模块实例	质量 W/kg	成本 $C/\text{元}$	可靠性 B	径向跳动 $D/\mu\text{m}$
$MI_{1,1}$	86.6	750	0.935	14.34
$MI_{1,2}$	91.4	670	0.846	14.42
$MI_{1,3}$	79.8	840	0.962	14.53

表4 上轴承质量特性及装配尺寸

模块实例	质量 W/kg	成本 $C/\text{元}$	可靠性 B	径向跳动 D/cm
$MI_{3,1}$	34.4	397	0.912	4.076
$MI_{3,2}$	41.8	364	0.931	4.087
$MI_{3,3}$	38.2	405	0.968	4.092

表5 下轴承质量特性及装配尺寸

模块实例	质量 W/kg	成本 $C/\text{元}$	可靠性 B	径向跳动 D/cm
$MI_{4,1}$	35.2	373	0.923	4.091
$MI_{4,2}$	42.1	358	0.956	4.072
$MI_{4,3}$	38.8	385	0.942	4.085

表6 支撑体质量特性及装配尺寸

模块实例	质量 W/kg	成本 $C/\text{元}$	可靠性 B	径向跳动 D/cm
$MI_{5,1}$	78.7	1085	0.912	4.014
$MI_{5,2}$	86.4	960	0.924	4.021
$MI_{5,3}$	98.5	1145	0.965	4.018

置功构模式的串并联关系,整个装置的可靠性 B 的计算公式为 $B=B_1 \times B_2 \times [1 - (1 - B_3) \times (1 - B_4)] \times B_5$ 。另外,根据技术要求,端齿和套齿之间的配合偏差以两者径向跳动偏差的绝对值为准,误差为 $0.15 \sim 0.65 \mu\text{m}$,以 0.4 cm 为目标值;上轴承和中心轴以及下轴承和中心轴的配合间隙要求为 $0.045 \sim 0.085 \text{ cm}$,以 0.065 cm 为目标值,则可调装置的稳健选配优化模型如下

$$\begin{aligned} \min L(Y) &= \lambda_1 L^3 \left(\sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^{L_m} (x_{m,l} W_{m,l,1}) \right) + \\ &\lambda_2 L^3 \left(\sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^{L_m} (x_{m,l} C_{m,l,2}) \right) + \\ &\lambda_3 L^2 \left(\prod_{m=1}^M \sum_{l=1}^{L_m} (x_{m,l} B_{m,l,i}) \right) + \\ &L(a_1) + L(a_2) + L(a_3) \\ \text{s. t. } &\prod_{m=1}^M \sum_{l=1}^{L_m} (x_{m,l} B_{m,l,i}) = \left(\sum_{l=1}^{L_m} (x_{1,l} B_{1,l,3}) \right) \times \\ &\left(\sum_{l=1}^{L_m} (x_{2,l} B_{2,l,3}) \right) \times \left[1 - \left(1 - \left(\sum_{l=1}^{L_m} (x_{3,l} B_{3,l,3}) \right) \times \right. \right. \\ &\left. \left. \left(1 - \left(\sum_{l=1}^{L_m} (x_{4,l} B_{4,l,3}) \right) \right) \times \left(\sum_{l=1}^{L_m} (x_{5,l} B_{5,l,3}) \right) \right) \right] \\ &a_1 = \left| \sum_{l=1}^{L_m} (x_{2,l} D_{2,l}) - \sum_{l=1}^{L_m} (x_{1,l} D_{1,l}) \right|; \\ &a_2 = \sum_{l=1}^{L_m} (x_{5,l} D_{5,l}) - \sum_{l=1}^{L_m} (x_{3,l} D_{3,l}); \\ &a_3 = \sum_{l=1}^{L_m} (x_{5,l} D_{5,l}) - \sum_{l=1}^{L_m} (x_{4,l} D_{4,l}); \\ &\lambda_1 = 0.167, \lambda_2 = 0.462, \lambda_3 = 0.371. \end{aligned}$$

经计算可得当模块实例组合为 $\{MI_{1,3}, MI_{2,4}, MI_{3,1}, MI_{4,3}, MI_{5,2}\}$ 时,质量损失 $L(Y)$ 有最小值1.3834。因此,当选择端齿模块选择实例 $MI_{1,3}$,套齿

齿模块选择实例 $MI_{2,4}$,上轴承模块选择实例 $MI_{3,1}$,下轴承模块选择实例 $MI_{4,3}$,支撑体模块选择实例 $MI_{5,2}$ 装配成调节装置时,可使该装置的质量特性在产生波动时造成的损失最小,产品性能最稳健。

5 结 论

(1)针对模块化产品设计中的实例选配问题,基于田口理论的质量损失函数能有效适用于评价模块实例选配的稳健程度,并且与其他模块实例选取策略相比,本文所提方法结合了模块化产品的结构和装配特点,增强了模块实例优化选配的准确性。

(2)实例分析表明本文方法可在获得模块实例最佳选配的同时,使得组合产品的质量特性波动最小,完全满足模块化产品的设计需求,从而为提高模块化产品的质量稳健性提供了新的解决思路和技术手段。

参考文献:

- [1] 耿其亚,王仲奇,康永刚,等. 飞机工艺装备模块化设计系统技术研究[J]. 现代制造工程, 2009(10): 65-68.
Geng Qiya, Wang Zhongqi, Kang Yonggang, et al. Research on modular design system for aircraft assembly fixtures product[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2009(10):65-68.
- [2] 李桂东,周来水,安鲁陵,等. 基于八元集合模板和专用模块的产品快速设计方法研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(19): 2348-2353.
Li Guidong, Zhou Laishui, An Luling, et al. Research on a rapid product design method based on eight element set pattern and dedicated module[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(19): 2348-2353.
- [3] Ahmet S, Yigit A A. Optimal selection of module instances for modular products in reconfigurable

manufacturing systems[J]. International Journal of Production Research, 2003, 41(17): 4063-4074.

- [4] Bryant R, Mcadams D, Stone R, et al. A validation study of an automated concept generator design tool [C]//Proceedings of ASME IDETC/CTE 2006. New York, USA:ASME, 2006:DETC2006-99489.
- [5] 汪文旦,秦现生,应申舜,等. 基于隐马尔科夫模型的产品功能模块实例选取方法[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(2):268-274.
Wang Wendan, Qin Xiansheng, Ying Shenshun, et al. HMM-based method for selecting of product function module[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14(2):268-274.
- [6] 延鹏,赵丽萍,王冠群,等. 面向客户需求分析的产品模块化配置方法[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(11):2341-2345.
Yan Peng, Zhao Liping, Wang Guanqun, et al. Product modular configuration oriented to customer requirements analysis[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(11):2341-2345.
- [7] Sharma N K, Cudney E A, Drain D, et al. Implications of quality loss function in unified methodology-ltb case with target[J]. SAE International Journal of Materials and Manufacturing, 2009, 1(1):768-777.
- [8] Artiles-Leon N. A pragmatic approach to multiple-response problems using loss function[J]. Quality Engineering, 1996, 9(2):213-220.
- [9] 刘明周,张凤琴,吴俊峰,等. 基于田口质量观的机械产品选配方法[J]. 机械工程学报, 2006, 42(10): 127-131.
Liu Mingzhou, Zhang Fengqin, Wu Junfeng, et al. Method of selective assembly about mechanical product based on Taguchi-quality-thinking[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(10):127-131.
- [10] Demirel N C, Toksarim D. Optimization of the quadratic assignment problem using an ant colony algorithm[J]. Applied Mathematics and Computation, 2006, 183(1):427-435.