

基于质量特性与参数隐式函数关系的 DEA 混合稳健设计模型

李亚平 刘思峰 方志耕 徐雷 陶良彦
南京航空航天大学,南京,210016

摘要:利用正交试验和 DEA 博弈交叉效率模型,研究了质量特性与参数隐式函数关系下的混合稳健设计模型。首先设计质量指标和成本指标,将其作为试验指标对变量(即未知的参数和容差)进行正交试验;然后将每组试验方案看作一个决策单元,分别将质量指标和成本指标作为 DEA 博弈交叉效率模型的输出指标、输入指标,构建 DEA 混合稳健设计模型,评价出质量—成本效率相对最高的组合方案(即最佳参数、容差组合);最后用案例验证了该方法的可行性和有效性。结果表明,该模型能够有效解决质量特性与参数隐式函数关系下的混合稳健设计问题,其工程适用性更为广泛。

关键词:混合稳健设计;隐式函数关系;DEA 博弈交叉效率;质量;成本

中图分类号:F273.2;TB21

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2012.09.016

A Hybrid Robust Design Model by DEA for Implicit Function of Quality Characteristics and Its Parameters

Li Yaping Liu Sifeng Fang Zhigeng Xu Lei Tao Liangyan

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016

Abstract: This paper introduced a novel model for implicit function of the quality characteristics and its parameters. The model was established based on the methods of orthogonal and DEA game cross efficiency. First, we arranged orthogonal test, considering quality indexes and cost indexes as unknown experimental indexes. Then, to build the model of hybrid robust design, we had cost indexes and quality indexes as the inputs and outputs of the model, DEA game cross efficiency, respectively, by taking each pilot program as a decision making unit. In this way, it can evaluate the combination of parameters and its tolerances which had the highest efficiency of the quality to the cost. At last, for verification purposes, a case was conducted and analyzed. The research shows that the engineering applicability of the hybrid robust design model is broader than previous models.

Key words: hybrid robust design; implicit function; data envelopment analysis (DEA) game cross efficiency; quality; cost

0 引言

稳健设计作为一种提高产品质量和降低产品成本的有效工程方法,已经在电子、机械等诸多领域得到推广和应用^[1]。稳健设计是使所设计的产品无论在制造还是在使用中当结构参数发生变差,或在规定寿命内结构发生老化和变质(在一定范围内)时都能保持产品性能稳定的一种工程设计方法^[2]。稳健设计的目的:①使产品质量特性的均值尽可能达到目标值;②使各种干扰因素引起的功能特性波动的方差尽可能小,这两个目的决定了产品的质量稳健性^[1]。相对而言,参数设计阶段更注重产品质量,而容差设计阶段更注重产品的制造成本,容差越小,制造成本越高。因

此,现代稳健设计应该在质量和成本的混合视角下进行,即混合稳健设计^[2]。

关于混合稳健设计的研究有:陈立周^[2-3]提出基于成本—质量模型的混合稳健设计,并给出交互进行优化设计的模型求解方法。耿金花等^[4]将与波动相关的质量损失和与容差相关的制造成本综合平衡,基于多响应优化建立了一种多因素、多指标优化的混合稳健设计模型。而关于质量特性和参数隐式函数关系下的稳健设计方法的研究多以响应面法为主,响应面法自 Box 和 Wilson 提出以来,相关的研究非常多^[2,4-15],有一阶响应面模型、二阶响应面模型、双响应面法、多响应面法、混合响应面法、随机响应面法等。不难看出,目前稳健设计模型的研究仍存在以下几方面不足:①文献^[2-3]提出的混合稳健设计模型局限于质量特性与参数显式函数关系的情况,并不能解决隐式函数关系问题;②目前解决质量特性与参数

收稿日期:2011-03-21

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划培育项目(90924022);国家社会科学基金资助重点项目(08AJY024);国家大学生创新性实验计划资助项目(101028734)

隐式函数关系问题的响应面模型存在很大局限性,比如响应值对未考虑到的因素的影响不灵敏以及对拟合的良好性和可检测性要求较高等;③响应面模型并没有考虑容差的制造成本,这不符合稳健设计需要在质量—成本混合视角下研究的实际情况。

针对以上不足,本文提出基于质量特性与参数隐式函数关系的混合稳健设计模型,考虑到探索质量特性和参数显式函数关系的局限性,本模型并不研究质量特性和参数函数关系,而是直接进行稳健设计,利用正交试验工具和数据包络分析(data envelopment analysis,DEA)相对效率评价方法构建一类新的 DEA 混合稳健设计模型。

1 基于正交试验的参数—容差并行设计

定义 1 称 $\mathbf{y}=(y_1, y_2, \dots, y_s)$ 为关于产品的质量特性向量, $\mathbf{x}=(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 为关于产品的设计参数向量, $\Delta\mathbf{x}=(\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_m)$ 为关于设计参数的容差向量。

由于产品质量问题而导致的损失称为质量损失,质量损失函数是度量质量损失的一种典型方法^[2]。质量损失函数的通用模型为: $L(y) = K(y - y_0)^2$, K 是不依赖于 y 的常数,称为质量损失系数, y 为质量特性值, y_0 是其目标值。 y 离 y_0 愈近,则 $L(y)$ 值愈小,表明该项设计的质量损失愈小,功能质量愈好。

定义 2 称 $L(y)$ 的期望值 $E(L(y)) = K(E(y - y_0)^2) = K[\sigma_y^2 + (\mu_y - y_0)^2]$ 为产品关于质量特性的质量损失。

定义 3 称 $\mathbf{E}(L(y)) = (E(L(y_1)), E(L(y_2)), \dots, E(L(y_s)))$ 为产品关于质量特性的质量损失向量。

定义 4 称 $\mathbf{u}(L(y)) = (1/E(L(y_1)), 1/E(L(y_2)), \dots, 1/E(L(y_s)))$ 为产品关于质量特性的用户满意度向量。

由于用户满意度为质量损失的倒数,显然质量特性的质量损失越小,用户满意度越高。

定义 5 称 $\mathbf{c}(\Delta\mathbf{x}) = (c(\Delta x_1), c(\Delta x_2), \dots, c(\Delta x_m))$ 为产品关于设计参数容差的制造成本向量。

按照正交试验的一般步骤,对参数—容差进行并行试验设计,步骤如下:①选定设计参数,制作参数—容差水平表。选择需要设计的参数,设计参数—容差并行设计的水平表。设各变量的水平数相等,均为 p 个水平,则参数—容差并行水平表安排见表 1。②确定正交试验指标。由于产

品关于质量特性的用户满意度体现质量稳健性,产品关于设计参数容差的制造成本体现产品成本,因此将 s 个用户满意度和 m 个容差的制造成本作为试验指标。根据设计参数和容差的数目及其水平表,选择合适的正交表安排试验。

表 1 参数—容差并行水平表

	x_1	...	x_m	Δx_1	...	Δx_m
水平 1	a_{11}	...	a_{m1}	b_{11}	...	b_{m1}
水平 2	a_{12}	...	a_{m2}	b_{12}	...	b_{m2}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
水平 p	a_{1p}	...	a_{mp}	b_{1p}	...	b_{mp}

根据每组试验得到的质量特性值 y 及其目标值 y_0 ,结合质量损失的定义,得到各组试验方案关于 s 个质量特性的质量损失向量 $\mathbf{E}(L(y))$ 。

关于制造成本与容差之间的关系已有广泛的研究,常用的模型有指数模型、幂指数模型、多项式模型以及各种复合模型。根据国内中型机械企业的制造水平,中等批量加工时,各类加工特征尺寸的最适用模型^[2]已经给出,可根据产品的实际情况选择适当的模型,给出每组试验方案 m 个容差的制造成本向量 $\mathbf{c}(\Delta\mathbf{x})$ 。

2 DEA 混合稳健设计模型

数据包络分析方法^[16]是一种用来评价一组具有多输入和多输出的决策单元(decision making units,DMUs)之间的相对效率的数学规划方法。该方法能够体现最优性价比的思想,将质量和成本融合在一起考虑,最终得到质量—成本相对效率最高的方案。由于交叉效率是利用 DEA 对决策单元进行充分排序的优化方法,而博弈交叉效率是解决交叉效率解不唯一问题的有效手段^[17],因此,本文采用 DEA 博弈交叉效率来获得唯一的参数—容差最佳组合。

定义 6 设正交试验方案有 n 组,则称这 n 组试验方案为 n 个决策单元,用户满意度和容差的制造成本分别为每个决策单元 DMU_j 的输出指标和输入指标, DMU_j 的第 i 种输入和第 r 种输出分别记作 $x_{ij} (i = 1, 2, \dots, m)$ 和 $y_{rj} (r = 1, 2, \dots, s)$ 。

基于 DEA 博弈交叉效率的混合稳健设计模型构建步骤如下。

(1)根据试验结果,建立原始 DEA 模型。对于任意给定的试验方案 $DMU_d (d \in (1, 2, \dots, n))$,建立原始 DEA 模型:

$$\left. \begin{aligned} \max \quad & \sum_{r=1}^s \mu_r y_{rd} = E_{dd} \\ \text{s. t.} \quad & \sum_{i=1}^m \omega_i x_{ij} - \sum_{r=1}^s \mu_r y_{rj} \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n \\ & \sum_{i=1}^m \omega_i x_{id} = 1 \\ & \omega_i \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \\ & \mu_r \geq 0 \quad r = 1, 2, \dots, s \end{aligned} \right\} (1)$$

式中, E_{dd} 为试验方案 DMU_d 的 DEA 效率值; ω_i 为第 i 种输入指标的权重; μ_r 为第 r 种输入指标的权重。

(2) 计算每组试验方案的交叉效率值, 实现对 n 组方案的充分排序。首先计算各试验方案的效率值, 得到每组被评价试验方案 DMU_d 的一组最优权重 $(\omega_{1d}^*, \omega_{2d}^*, \dots, \omega_{md}^*, \mu_{1d}^*, \mu_{2d}^*, \dots, \mu_{sd}^*)$ 。再利用这 n 组最优权重, 求解每组试验 DMU_j 相对于第 d 组试验 DMU_d 的交叉效率, 即

$$E_{dj} = \frac{\sum_{r=1}^s \mu_{rd}^* y_{rj}}{\sum_{i=1}^m \omega_{id}^* x_{ij}} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$DMU_j (j = 1, 2, \dots, n)$ 的交叉效率值为所有 $E_{dj} (d = 1, 2, \dots, n)$ 的平均值 $\bar{E}_j = \frac{1}{n} \sum_{d=1}^n E_{dj} (d = 1, 2, \dots, n)$, 这样就得到 n 组试验方案的交叉效率值。

(3) 利用 DEA 博弈交叉效率构建 DEA 混合稳健设计模型。对于每组试验方案 DMU_j , 在保证第 d 组试验方案的效率 α_d 不降低的基础上, 建立 DEA 混合稳健设计模型:

$$\left. \begin{aligned} \max \quad & \sum_{r=1}^s \mu_{rj}^{(d)} y_{rj} \\ \text{s. t.} \quad & \sum_{i=1}^m \omega_{ij}^{(d)} x_{ij} - \sum_{r=1}^s \mu_{rj}^{(d)} y_{rj} \geq 0 \quad l = 1, 2, \dots, n \\ & \sum_{i=1}^m \omega_{ij}^{(d)} x_{ij} = 1 \\ & \alpha_d \sum_{i=1}^m \omega_{ij}^{(d)} x_{id} - \sum_{r=1}^s \mu_{rj}^{(d)} y_{rd} \leq 0 \\ & \omega_{ij}^{(d)} \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \\ & \mu_{rj}^{(d)} \geq 0 \quad r = 1, 2, \dots, s \end{aligned} \right\} (3)$$

对于每个 DMU_j , 模型将对每个 $DMU_d (d = 1, 2, \dots, n)$ 进行计算, 则试验方案 DMU_j 的平均博弈交叉效率为

$$\alpha_j = \frac{1}{n} \sum_{d=1}^n \sum_{r=1}^s \mu_{rj}^{(d^*)} (\alpha_d) y_{rj}$$

(4) 循环求解式(3), 得到每组试验方案的唯一效率值, 效率值最大的方案即为最佳参数-容差混合组合。以传统的平均交叉效率值作为 α_d 的初始取值, 对于试验方案 DMU_j , 针对每个 DMU_d , 利用初始 α_d 求解式(3), 并且将求解到的

新的平均目标函数值作为 α_d , 对所有的试验方案重复上述过程, 当所有试验方案两次得到的 α_d 差值收敛于 ϵ 时, 算法终止, 最终得出所有试验方案的 DEA 博弈交叉效率值。每组试验方案的解的唯一性证明参见文献[17]。根据模型的求解结果, 将所有试验方案的 DEA 效率值按大小顺序进行排序, 效率值最大的试验方案即为参数-容差混合稳健设计的最佳组合方案。

3 案例研究

图 1 所示为一个带有电阻 R 和自感线圈 L 的电路。电流表 A 中的电流目标值为 $y_0 = 10A$; 电路两端的电压 $U = 120V$, 频率 $f = 60Hz$; 电阻 R 和电感 L 的取值范围分别为 $8\Omega \leq R \leq 12\Omega$ 和 $0.01H \leq L \leq 0.02H$ 。电阻和电感的容差和价格对应关系见表 2。设计该电路, 使其达到高质量低成本的目标。

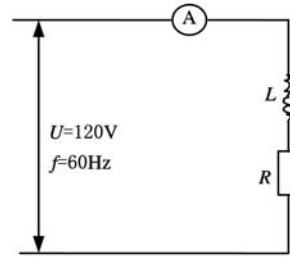


图 1 电路示意图

表 2 元件容差/价格表

元件	一级品	二级品	三级品
电阻	0.005Ω/0.30 元	0.01Ω/0.70 元	0.02Ω/1.40 元
电感	0.005H/0.70 元	0.01H/0.90 元	0.02H/1.60 元

(1) 确定可控因素及其水平。根据题意, 确定可控因素为电阻 R 和电感 L , 对电阻和电感各选定三个水平, 即 $R_1 = 8\Omega, R_2 = 10\Omega, R_3 = 12\Omega, L_1 = 0.01H, L_2 = 0.014H, L_3 = 0.020H$ 。

(2) 确定设计变量的容差。不妨对电阻 R 和电感 L 这两个设计参数的容差 $\Delta R, \Delta L$ 各选定三个水平, 即 $\Delta R_1 = 0.02\Omega, \Delta R_2 = 0.01\Omega, \Delta R_3 = 0.005\Omega, \Delta L_1 = 0.02H, \Delta L_2 = 0.01H, \Delta L_3 = 0.005H$ 。

(3) 确定正交试验指标。不难看出, 题中质量特性仅为电路输出电流, 设计参数分别为电阻 R 和电感 L 。因此, 正交试验的指标为电阻 R 和电感 L 的容差成本 $c(\Delta R), c(\Delta L)$ (可直接用容差/价格表计算) 以及电流稳健性的用户满意度 $s(y)$ 。显然, 电流的质量损失越小, 用户满意度越高。

(4) 正交试验设计。按照确定的设计参数和

容差水平以及正交试验指标,给出质量—成本混合正交试验表,见表 3。

表 3 混合正交试验表

	$R(\Omega)$	$L(H)$	$\Delta R(\Omega)$	$\Delta L(H)$	$L(y)$ (元)	$c(\Delta R)$ (元)	$c(\Delta L)$ (元)	$s(y)$
1	1	1	3	2	12.7458	1.4	0.9	0.08
2	2	1	1	1	1.5112	0.3	0.7	0.66
3	3	1	2	3	0.2109	0.7	1.6	4.74
4	1	2	2	1	6.3635	0.7	0.7	0.16
5	2	2	3	3	0.3767	1.4	1.6	2.65
6	3	2	1	2	0.7149	0.3	0.9	1.40
7	1	3	1	3	0.8437	0.3	1.6	1.19
8	2	3	2	2	0.1735	0.7	0.9	5.76
9	3	3	3	1	2.3454	1.4	0.7	0.43

(5)DEA 混合稳健设计模型求解。从表 3 中可以看出: $c(\Delta R)_{\min} = 0.3, c(\Delta L)_{\min} = 0.7, s(y)_{\min} = 0.08$ 。为便于 DEA 混合稳健设计模型计算,将 $c(\Delta R)$ 、 $c(\Delta L)$ 和 $s(y)$ 分别作初值化处理,即作 $c(\Delta R)/c(\Delta R)_{\min}$ 、 $c(\Delta L)/c(\Delta L)_{\min}$ 和 $s(y)/s(y)_{\min}$ 处理,结果分别记作 $c'(\Delta R)$ 、 $c'(\Delta L)$ 和 $s'(y)$ 。 $c'(\Delta R)$ 、 $c'(\Delta L)$ 作为模型输入, $s'(y)$ 作为模型输出,取 $\epsilon = 0.002$,模型求解结果见表 4。

表 4 DEA 混合稳健设计模型求解结果

	$s'(y)$	$c'(\Delta R)$	$c'(\Delta L)$	效率	效率 排序	满意度 排序
1	1.00	4.67	1.29	0.0109	9	9
2	8.43	1.00	1.00	0.2237	6	5
3	60.42	2.33	2.29	0.6913	2	2
4	2.00	2.33	1.00	0.0322	8	8
5	33.84	4.67	2.29	0.2489	5	6
6	17.83	1.00	1.29	0.4424	3	3
7	15.11	1.00	2.29	0.3316	4	4
8	73.44	2.33	1.29	1.0000	1	1
9	5.43	4.67	1.00	0.0719	7	7

由表 4 中求解结果的效率排序和用户满意度排序可以看出,两者的排序并不完全一致。用户满意度排序即为质量损失的倒排序,并未考虑成本的影响,这不符合实际情况;而效率排序则考虑制造成本,满足质量—成本相对效率最高的要求才能成为最终的组合方案。第 8 组试验方案的 DEA 博弈交叉效率值为 1,优于其他组试验方案。因此,满足电路设计的高质量低成本要求的最佳参数和容差组合是: $R = 10\Omega, L = 0.02H, \Delta R = 0.01\Omega, \Delta L = 0.01H$ 。

4 结语

本文提出的模型能够解决质量特性和参数关系未知情形下参数—容差混合稳健设计问题,得到参数—容差设计的最佳组合方案,弥补了以往研究的不足。因此,基于 DEA 博弈交叉效率的

参数—容差混合设计模型在一定程度上完善了目前工程设计方法体系,推动了工程稳健设计的优化进程的发展。

关于质量稳健性的研究非常多,正交试验设计中的质量稳健性指标亦可以尝试用其他指标来衡量;关于容差的制造成本,虽然有经验模型可借鉴,但如何利用更准确的方法去测算成本仍是今后需要进一步探讨的问题;关于成本,如何挖掘得更全面一些亦是今后致力研究的内容。

参考文献:

- [1] 韩之俊. 质量工程学[M]. 北京:北京理工大学出版社,1991.
- [2] 陈立周. 稳健设计[M]. 北京:机械工业出版社,1999.
- [3] 陈立周. 基于质量—成本模型的稳健优化设计[M]. 北京:人民交通出版社,1998.
- [4] 耿金花,高齐圣,张嗣瀛. 多因素、多指标产品系统的建模与优化[J]. 系统工程学报,2008,23(4):449-454.
- [5] Lee S B, Park C. Development of Robust Design Optimization Using Incomplete Data[J]. Computers & Industrial Engineering, 2006, 50(3):345-356.
- [6] Kóksoya O. A Nonlinear Programming Solution to Robust Multi—response Quality Problem[J]. Applied Mathematics and Computation, 2008, 196(2):603-612.
- [7] Sun Guangyong, Li Guangyao, Gong Zhihui, et al. Multiobjective Robust Optimization Method for Drawbead Design in Sheet Metal Forming[J]. Materials & Design, 2010, 31(4):1917-1929.
- [8] Pickle S M, Robinson T J, Birch J B, et al. A Semi—parametric Approach to Robust Parameter Design [J]. Journal of Statistical Planning and Inference, 2008, 138(1):114-131.
- [9] Steenackers G, Guillaume P. Bias—specified Robust Design Optimization: a Generalized Mean Squared Error Approach[J]. Computers & Industrial Engineering, 2008, 54(2):259-268.
- [10] 许焕卫,孙伟,张旭. 基于混合响应面的多目标稳健设计[J]. 机械科学与技术, 2008, 27(5):628-632.
- [11] 杨方,高齐圣,于增顺. 多响应问题的稳健性设计优化[J]. 工业工程, 2010, 13(3):43-46.
- [12] 何桢,马彦辉,赵有. 基于田口过程能力指数和熵权理论的多响应稳健优化设计[J]. 中国农机化, 2008(3):33-36.
- [13] 董恩国,张蕾,孙奇涵. 基于双响应面法的行星齿轮机构稳健设计研究[J]. 机械传动, 2009, 33(2):35-39.

高性能同轴式磁力齿轮结构设计与实验研究

杨超君 李志宝 芦玉根 李直腾 杨巧绒 胡友

江苏大学, 镇江, 212013

摘要: 为了改善磁力齿轮的扭矩传递能力, 研究了一种采用鼠笼式调磁装置的同轴式磁力齿轮。通过建立磁力齿轮的瞬态分析有限元模型, 模拟分析得到内外气隙长度、永磁体厚度和长径比等结构参数对其传递扭矩能力的影响规律曲线, 并得出了机构参数的优化值, 模拟了该参数下磁力齿轮的运行情况。基于优化值制作实验样机进行实验研究, 实验结果表明, 采用此种调磁极片能够实现定传动比传动并能传递一定的扭矩。实验结果与模拟分析具有相似性, 表明优化的结构参数能够保证磁力齿轮扭矩传递能力。

关键词: 高性能同轴式磁力齿轮; 结构优化; 有限元分析; 实验研究

中图分类号: TH133

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2012.09.017

Design and Experiment of a High-performance Coaxial Magnetic Gear

Yang Chaojun Li Zhibao Lu Yugen Li Zhiteng Yang Qiaorong Hu You
Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu, 212013

Abstract: In order to improve the torque transmission ability of a magnetic gear, a coaxial magnetic gear of modulating pole-pieces squirrel-cage structure was developed. A finite element model of transient analysis of the magnetic gear was built to obtain the law curve of transmission torque affected by a series of structural parameters, such as air gap, the thickness of permanent magnet and length-diameter ratio, as well as the optimal value of these structural parameters. The operation of the magnetic gear with these parameters was simulated. An experimental prototyping was designed based on the optimal values and tests. The experimental results show that fixed ratio drive and transmission torque can be achieved using this modulating pole-pieces, and verify that the optimal structural parameters can ensure torque transmission ability of magnetic gear, which indicates high similarity with simulation analyses.

Key words: high-performance coaxial magnetic gear; structure optimization; FEM (finite element method); experimental research

0 引言

工业上广泛采用机械齿轮来达到传递扭矩和改变转速的目的, 但是机械齿轮有很多不可避免的缺陷, 诸如齿轮之间的机械接触磨损、噪声、振动等, 因此越来越多的学者进行磁力齿轮方面的研究^[1-4], 磁力齿轮同机械齿轮相比有着很多重要的优点, 比如维护少、传动稳定性高、内部可过载保护、输入输出轴之间可物理分离等。磁力齿轮

可以在各种不同的嵌入式电动机或发电机中使用, 如多电航空引擎、电力轮船推进系统、风力发电机等。随着高性能永磁体的问世, 磁力齿轮传递的扭矩密度和效率有了很大的提高^[5-6]。

针对高性能磁力齿轮, 考虑其结构参数与调磁极片对转矩的影响, 本文设计了一种由非导磁材料与软磁材料组合的鼠笼式调磁极片结构^[7]。利用 Ansoft Maxwell 软件对其进行了模拟分析, 根据分析结果得出了各种参数的最优值。模拟最优值情况下磁力齿轮的传动性能, 并试制了此种

收稿日期: 2011-05-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51075189)

[14] 赵媚, 潘尔顺, 郭瑜, 等. 基于双响应曲面法的稳健参数设计[J]. 工业工程与管理, 2010, 15(1): 87-91.

[15] 乔红威, 吕震雷, 李洪双. 基于随机响应面法的响应灵敏度分析及稳健优化设计[J]. 中国机械工程, 2009, 20(3): 337-341.

[16] 魏权龄. 数据包络分析[M]. 北京: 科学出版社, 2004.

[17] Liang Liang, Wu Jie, Cook W D, et al. The DEA Game Cross Efficiency Model and Its Nash Equilib-

rium[J]. Operations Research, 2008, 56(5): 1278-1288.

(编辑 陈勇)

作者简介: 李亚平, 女, 1985年生。南京航空航天大学经济与管理学院博士研究生。主要研究方向为稳健设计、质量管理。刘恩峰, 男, 1955年生。南京航空航天大学经济与管理学院教授、博士研究生导师。方志耕, 男, 1962年生。南京航空航天大学经济与管理学院教授、博士研究生导师。徐雷, 男, 1983年生。南京航空航天大学电子与信息学院博士研究生。陶良彦, 男, 1988年生。南京航空航天大学经济与管理学院硕士研究生。