第46卷 第3期 哈尔滨工业大学学报 Vol. 46 No. 3
2014年3月 JOURNAL OF HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY Mar. 2014

机械产品设计方案多指标综合评价方法

王海伟, 刘 更, 杨占铎

(西北工业大学 陕西省机电传动与控制工程实验室, 710072 西安)

摘 要: 为获得机械产品最优设计方案,对产品设计方案的指标评价矩阵进行规范化处理,并对个体设计方案的指标权向量进行优化,依据设计方案综合评价值的偏离度最小原则线性规划了方案评价问题;分析指标权重不确定性因素,引入信息熵对指标权重的不确定性进行描述;根据极大熵原理建立设计方案评价模型,通过构建拉格朗日函数形成非线性方程组的方法对该模型进行求解,并对设计方案进行排序,获得了最优的设计方案.实例结果验证了该评价方法的有效性.

关键词: 信息熵;设计方案;评价指标;线性规划;指标权重

中图分类号: TH122 **文献标志码**: A **文章编号**: 0367-6234(2014)03-0099-05

Multi-criteria comprehensive evaluation method of mechanical product design scheme

WANG Haiwei, LIU Geng, YANG Zhanduo

(Shanxi Engineering Laboratory for Transmissions and Controls, Northwestern Polytechnical University, 710072 Xi'an, China)

Abstract: To obtain excellent comprehensive performance for mechanical product, it's necessary to select the best one from multiple design schemes. Scheme criteria evaluation matrix was standardized and criteria weight vector of every design scheme was optimized. According to the principle of minimum offset of design scheme evaluation, scheme evaluation problem was linearly programmed. Uncertainty factors of criteria weight were analyzed, and entropy was introduced to describe the uncertainties. According to the maximum entropy theory, design scheme evaluation model was built, which was solved by building Lagrange function and forming nonlinear equations. Finally, these design schemes could be sorted to obtain the best one. The example demonstrated validity of the proposed evaluation method.

Keywords: entropy; design scheme; evaluation criteria; linear programming; criterion weight

在机械产品概念设计阶段,方案设计是产品设计的关键环节,最终产品质量的高低直接受产品设计方案的影响.产品概念设计阶段是一个复杂的具有创造性的智力活动过程,根据产品需求通常会产生多个候选设计方案,对方案的评价往往涉及多种技术指标. 如何考虑各种不确定性因素对指标权重的影响,对众多技术指标进行综合评价,获取最优的机械产品设计方案,是保证产品性能和进一步设计的关键.

工程中常用的评价方法有多种,如价值工程法[1]、模糊评价法[2]、灰色关联法[3]、人工神经网络[4]、层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)[5]、网络分析法(analytic network process, ANP)[6]等.LIN 等[7]通过集成层次分析法和逼近理想排序法,进行客户需求和产品设计指标识别,并完成对产品设计方案综合评价.AYAG 等[8]将模糊理论引入网络分析法,对产品设计方案进行评估,其结果显示 ANP 方法比 AHP 方法具有更强的适用性.肖人彬等[9]建立了一种基于模糊信息公理的设计方案评价方法.林晓华等[10]提出了一种基于改进 DEMATEL-VIKOR 混合模型,通过

收稿日期: 2013-04-17.
基金项目: 高等学校学科创新引智计划资助项目(B13044);
西北工业大学基础研究基金资助项目(JC201209).
作者简介: 王海伟(1978—),男,讲师;
刘 更(1961—),男,教授,博士生导师.
通信作者: 王海伟,whw@nwpu.edu.cn.

引入直觉模糊理论表达信息的不确定性,建立了产品概念方案的评价方法.邓军等[11]建立了概念设计质量评价体系,并用信息熵描述质量评价指标权重的不确定性因素,基于最大信息熵原理对质量评价问题进行优化和评价.徐晓慧等[12]将机械产品总体设计方案的评价问题描述为不完全多参数决策问题,通过信息熵与有序加权平均算子,建立了机械产品方案设计评价的决策方法.张根保等[13]建立了一种多元质量特性重要度排序模型,用三角模糊数计算主观权重,通过信息熵确定质量特性指标层的客观权重.目前,对于机械产品设计方案评价方法的研究大多是通过应用模糊理论,对定性指标进行模糊处理,采用专家评分等方法对设计方案总体评价值进行排序.在评价过程中,对指标权重的设置多采用经验方法,具有较强的主观性.

本文以分析机械产品设计方案的技术指标特点为基础,引入信息熵描述指标权重的不确定性,应用方案综合评价值偏离度最小和最大信息熵原理,构建了产品设计方案评价的优化模型与求解方法.形成机械产品设计方案综合评价流程(如图 1).

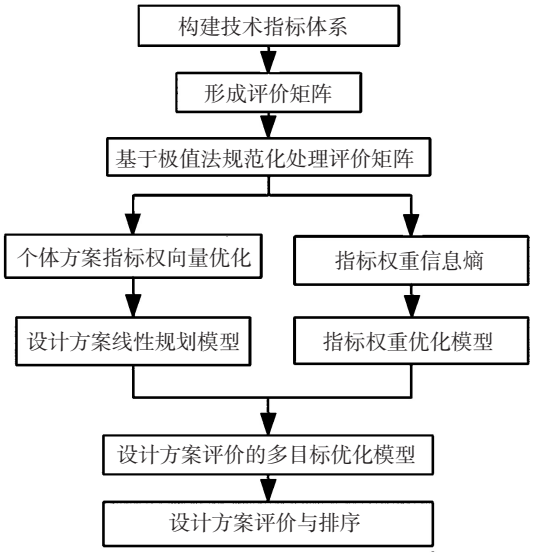

图 1 机械产品设计方案综合评价流程

1 机械产品技术指标体系

1.1 机械产品技术指标体系组成

机械产品技术指标之间具有多学科耦合的特点,由很强的系统性与复杂性,这为指标体系构建带来了困难.技术指标体系的建立应该遵循科学性、全面性、简明性、动态性、独立性和可操作性等原则.技术指标一般从常规性统计资料和相关研究中取得.对于某些不易收集、难以量化的关键指标,则可根据变量间的相关程度,开拓出可以量化的替代指标.根据指标体系的构建原则,以及技术指标间关系,可构建出图 2 所示的机械产品设计方案技术指标体系.

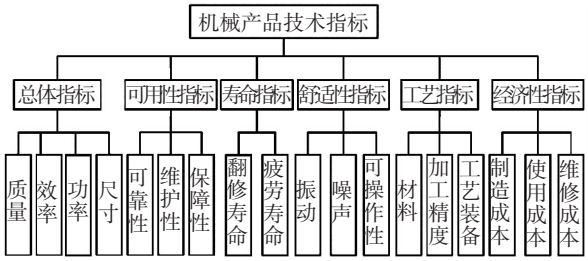

图 2 机械产品设计方案的技术指标体系

1.2 技术指标体系符号定义

假设有 m 个参与评价的技术指标,记为 $\boldsymbol{X}=[x_1,x_2,\cdots,x_m]$; n 个参与评价的设计方案,记为 $\boldsymbol{P}=[P_1,P_2,\cdots,P_n]$.方案 P_i 对应第 j 个指标用 a_{ij} 来表示($i=1,2,\cdots,n;j=1,2,\cdots,m$),则 n 个产品设计方案的 $m\times n$ 个技术指标值构成矩阵 $\boldsymbol{A}=[a_{ij}]_{n\times m}$,即

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ & & \vdots & \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nm} \end{bmatrix}.$$

把矩阵 $\boldsymbol{A}$ 称作为产品设计方案集的技术指标评价矩阵.

2 设计方案评价的线性规划

2.1 评价矩阵的规范化处理

由于技术指标性质各不相同,各指标值所表达含义及量纲无法直接进行比较,为避免量纲间的差异给产品设计方案的评价带来影响,需通过适当变换,将不同量纲的技术指标化为量纲一的标准化指标,即对技术指标评价矩阵 $\boldsymbol{A}$ 进行规范化处理,记规范化后的矩阵为 $\boldsymbol{R}=[r_{ij}]_{n\times m}$.定性指标参与设计方案评价(如可操作性等)常用的方法是专家打分法,从而将定性指标转化为定量指标进行处理.本文以下所考虑的技术指标都是定量指标,只需对技术指标值进行归一化处理即可,采用极值处理法[14]进行归一化处理.设计方案集 $\boldsymbol{P}$ 的第 j 个技术指标值集为 $\boldsymbol{X}=[x_1,x_2,\cdots,x_n]$,对于指标值越大越优的技术指标,如效率、可靠性等,采用的归一化公式为

$$r_{ij}=\frac{x_i-\min x_i}{\max x_i-\min x_i},(i=1,2,\cdots,n;j=1,2,\cdots,m). \tag{1}$$

对于指标值越小越优的技术指标,如质量等,采用的归一化公式为

$$r_{ij}=\frac{\max x_i - x_i}{\max x_i - \min x_i},(i=1,2,\cdots,n;j=1,2,\cdots,m). \tag{2}$$

通过上述归一化处理后，$0 \leqslant r_{ij} \leqslant 1$，如此就把 $\boldsymbol{A}$ 构造成了规范化矩阵 $\boldsymbol{R}$.

2.2　个体方案指标权向量优化

假设已知指标集权向量 $\boldsymbol{\omega}=[\omega_1,\omega_2,\cdots,\omega_m]$，指标权向量变化范围 $\alpha_j \leqslant \omega_j \leqslant \beta_j(\alpha_j \geqslant 0, \beta_j \geqslant 0)$，权系数满足 $\sum_{j=1}^{m}\omega_j=1$. 可以得到方案 P_i 的综合评价值为

$$v_i=\sum_{j=1}^{m}\omega_j r_{ij},\quad (i=1,2,\cdots,n). \tag{3}$$

设计方案的多技术指标评价其实质就是对各方案的综合评价值进行排序，v_i 越大，其所对应的方案越优；因此，先进行个体方案综合评价值最大所对应的技术指标权重的确定，也即是个体方案指标权向量的优化. 对于方案 P_i，构建的单目标优化模型如下：

$$\max \sum_{j=1}^{m}\omega_j r_{ij},\quad (i=1,2,\cdots,n), \tag{4a}$$

$$\text{s.t. } \alpha_j \leqslant \omega_j \leqslant \beta_j;\ \sum_{j=1}^{m}\omega_j=1,(j=1,2,\cdots,m). \tag{4b}$$

求解该模型可得方案 P_i 对应的最优指标权重 $\boldsymbol{\omega}^{(i)}=[\omega_1^{(i)},\omega_2^{(i)},\cdots,\omega_m^{(i)}]$.

2.3　设计方案线性规划

产品设计方案中技术指标的真实权重属于一个随机变量，它可以表述为均值与一个随机误差之和. 通过式(4)得到的 n 组权重可看作真实权重的一次随机抽样抽取的子样，从最小偏差的角度出发，方案 P_i 的综合评价值的偏离度为

$$u_i=\sum_{j=1}^{m}[(\omega_j-\omega_j^{(i)})r_{ij}]^2,\ (i=1,2,\cdots,n).$$

要使指标权重最接近于真实权重，则应使偏差尽可能小，故可建立如下多目标规划模型：

$$\min\{u_i\},\quad (i=1,2,\cdots,n),$$

$$\text{s.t.}\quad \sum_{j=1}^{m}\omega_j=1;\ \omega_j \geqslant 0\ (j=1,2,\cdots,m).$$

该多目标规划问题可转化为单目标规划问题，即

$$\min \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}[(\omega_j-\omega_j^{(i)})r_{ij}]^2, \tag{5a}$$

$$\text{s.t.}\quad \sum_{j=1}^{m}\omega_j=1;\ \omega_j \geqslant 0,\ (j=1,2,\cdots,m). \tag{5b}$$

2.4　指标权重不确定性

机械产品设计方案技术指标的评价权重 ω_j 主要取决于产品设计目标与技术指标间的相关重要度，以及技术指标间的相关性.

1）产品设计目标与技术指标之间存在着密切的关系，不同的产品设计目标对技术指标的重要度产生主要影响，即产品设计目标反映出技术指标的重要性概率水平；因此，变化的产品设计目标使技术指标的重要性具有不确定性.

2）机械产品技术指标间常常存在着错综复杂的关联关系，当某一技术指标发生变化，将引起另一技术指标值的改变，它们之间的这种关联关系即指标相关性. 根据指标值变化的相互影响方向，可把相关性分为正相关和负相关. 正相关指标值变化方向一致，负相关指标值的变化方向相反. 指标之间的相关性往往不是恒定不变的值，存在着很大的不确定性.

由于产品性能与技术指标间的相关重要度以及技术指标间的相关性的不确定性，使得评价技术指标的权重 ω_j 存在着不确定性.

2.5　指标权重信息熵

信息熵常用于描述信息的不确定性[15]，因此可以用信息熵对指标权重的不确定性进行描述.

$$H_\omega=-\sum_{j=1}^{m}\omega_j \ln \omega_j.$$

为了消除指标权重的不确定性，根据极大熵原理，确定的技术指标权重应使信息熵取最大值，即

$$\max H_\omega=-\sum_{j=1}^{m}\omega_j \ln \omega_j, \tag{6a}$$

$$\text{s.t. } \sum_{j=1}^{m}\omega_j=1;\ \omega_j \geqslant 0,\ (j=1,2,\cdots,m). \tag{6b}$$

3　设计方案评价优化

为了同时达到方案综合评价值偏离度最小和指标权重不确定性最小的目的，则需联立式(5)和式(6)，得

$$\begin{cases}\min \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}[(\omega_j-\omega_j^{(i)})r_{ij}]^2,\\ \max H_\omega=-\sum_{j=1}^{m}\omega_j \ln \omega_j,\\ \text{s.t. } \sum_{j=1}^{m}\omega_j=1;\ \omega_j \geqslant 0,\ (j=1,2,\cdots,m).\end{cases}$$

由此可知，设计方案评价的线性规划问题属于多目标优化问题，可以转化为单目标优化问题，即

$$\begin{cases}\min \varepsilon \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}[(\omega_j-\omega_j^{(i)})r_{ij}]^2+(1-\varepsilon)\sum_{j=1}^{m}\omega_j \ln \omega_j,\\ \text{s.t. } \sum_{j=1}^{m}\omega_j=1;\ \omega_j \geqslant 0,\ (j=1,2,\cdots,m).\end{cases}$$

式中 ε 为平衡系数,其值的确定可根据具体情况给定.为求解该优化模型,构造 Lagrange 函数,即

$$L(\omega_j,k)=\varepsilon\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}[(\omega_j-\omega_j^{(i)})r_{ij}]^2+(1-\varepsilon)\sum_{j=1}^{m}\omega_j\ln\omega_j-k\Big(\sum_{j=1}^{m}\omega_j-1\Big).$$

根据该方程存在极值的必要条件,可得

$$\frac{\partial L}{\partial\omega_j}=2\varepsilon\sum_{i=1}^{n}(\omega_j-\omega_j^{(i)})r_{ij}^2+(1-\varepsilon)(\ln\omega_j+1)-k=0,\qquad(7)$$

$$\frac{\partial L}{\partial k}=1-\sum_{j=1}^{m}\omega_j=0.\qquad(8)$$

令

$$s_j=\sum_{i=1}^{n}r_{ij}^2,\quad t_j=\sum_{i=1}^{n}\omega_j^{(i)}r_{ij}^2,\qquad(9)$$

联立式(7)和式(8)可形成一个非线性方程组,即

$$\begin{cases}2\varepsilon s_j\omega_j+(1-\varepsilon)\ln\omega_j-k+1-2\varepsilon t_j-\varepsilon=0,\\ \sum_{j=1}^{m}\omega_j=1;\ (j=1,2,\cdots,m).\end{cases}\qquad(10)$$

方程组(10)由 $m+1$ 个方程组成,共有 $m+1$ 个变量,即 $\omega_j(j=1,2,\cdots,m)$ 和 k.通过牛顿迭代法等非线性方程组的数值解法可求解该方程组,从而得到设计方案技术指标评价的最优权重系数.将该权重系数代入式(3)可得到各设计方案的综合评价值,对所有方案的评价值进行排序,评价值最大的即为最优的产品设计方案.

4 实例研究

以某型直升机传动系统为例,本文选用 5 种主要技术指标进行评价:质量、效率、平均故障间隔时间 t_{MTBF}、平均修复时间 t_{MTBR} 和干运转时间 t_{ooc}.其中 t_{MTBF} 和 t_{MTBR} 的单位为小时(h),干运转时间 t_{ooc} 指直升机传动系统在无润滑油供给情况下的正常工作时间,单位为分钟(min).现有 4 个设计方案,各方案的技术指标值如表 1 所示.

表 1 某型直升机传动系统设计方案技术指标值

设计方案	质量/kg	效率	t_{MTBF}/h	t_{MTBR}/h	t_{ooc}/min
P_1	575	0.988	4 500	2 000	35
P_2	530	0.966	4 320	1 880	29
P_3	620	0.985	4 550	1 990	34
P_4	590	0.979	4 350	1 980	32

用式(1)对效率、t_{MTBF}、t_{MTBR} 和 t_{ooc} 的指标值进行归一化处理,用式(2)对重量指标值进行归一化处理,则由表 1 数据构成的矩阵 $\boldsymbol{A}$ 可得规范化矩阵 $\boldsymbol{R}$:

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}0.5 & 1 & 0.783 & 1 & 1\\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0.864 & 1 & 0.917 & 0.833\\ 0.333 & 0.591 & 0.13 & 0.833 & 0.5\end{bmatrix}.$$

设定各权重的约束范围为

$0.10\leqslant\omega_1\leqslant0.50$, $0.10\leqslant\omega_2\leqslant0.35$, $0.10\leqslant\omega_3\leqslant0.30$, $0.10\leqslant\omega_4\leqslant0.25$, $0.10\leqslant\omega_5\leqslant0.20$.

根据式(4)可求解出对应于各方案的最优目标权重:

$$\omega^{(1)}=[\omega_1^{(1)},\omega_2^{(1)},\omega_3^{(1)},\omega_4^{(1)},\omega_5^{(1)}]=(0.1,\ 0.35,\ 0.1,\ 0.25,\ 0.2),$$

$$\omega^{(2)}=[\omega_1^{(2)},\omega_2^{(2)},\omega_3^{(2)},\omega_4^{(2)},\omega_5^{(2)}]=(0.5,\ 0.2,\ 0.1,\ 0.1,\ 0.1),$$

$$\omega^{(3)}=[\omega_1^{(3)},\omega_2^{(3)},\omega_3^{(3)},\omega_4^{(3)},\omega_5^{(3)}]=(0.1,\ 0.25,\ 0.3,\ 0.25,\ 0.1),$$

$$\omega^{(4)}=[\omega_1^{(4)},\omega_2^{(4)},\omega_3^{(4)},\omega_4^{(4)},\omega_5^{(4)}]=(0.1,\ 0.35,\ 0.1,\ 0.25,\ 0.2).$$

根据式(9),可得

$s_1=1.361$, $s_2=2.095$, $s_3=1.630$, $s_4=2.535$, $s_5=1.944$, $t_1=0.535$, $t_2=0.659$, $t_3=0.378$, $t_4=0.633$, $t_5=0.319$.

代入到式(10),取平衡系数 $\varepsilon=0.5$,利用 Matlab 软件编制相应非线性方程组求解程序,可得技术指标的优化权重为

$$\omega=[0.228,\ 0.22,\ 0.186,\ 0.2,\ 0.166].$$

将该权重值代入式(3),得各方案综合评价值

$$\nu=[0.846,\ 0.228,\ 0.697,\ 0.48],$$

由该数据可对直升机传动系统 4 个设计方案进行排序:$P_1>P_3>P_4>P_2$,因此方案 1 为最优方案.

5 结 论

1)本文构建了用于机械产品设计方案评价的技术指标体系,采用极值处理法对指标评价矩阵进行了规范化处理,并对各设计方案的指标权向量进行了规划.

2)基于信息熵进行指标权重不确定性的描述.以设计方案综合评价值的最小偏差和指标权重最大信息熵为目标,建立了设计方案评价的优化模型.

3)采用拉格朗日乘子法则构造非线性方程组对该模型求解,得到最优指标权重向量,从而可对各设计方案综合评价值进行计算与排序,最终优选出最优设计方案.

参考文献

[1] SHI Qian, XIE Xin. A fuzzy-QFD approach to the assessment of green construction alternatives based on value engineering [C]//2009 International Conference on Management and Service Science. Wuhan: IEEE, 2009: 1-6.

[2] ZHAO Fangfang, HE Zhen, SUN Huilai. The application of fuzzy evaluation method on design quality evaluation of mine disaster rescue vehicle detection [C]//2008 International Conference on Computing, Communication, Control, and Management. Guangzhou: IEEE, 2008: 185-188.

[3] YANG Daheng. Optimizing design scheme of energy saving in warehouse building based on grey relational analysis [C]//2010 International Conference on Logistics Systems and Intelligent Management. Harbin: IEEE, 2010: 1090-1092.

[4] KRZYSZTOF K, KAROL T. Application of artificial neural networks in investigations of steam turbine cascades[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2010, 132(1): 1-5.

[5] WANG Hua, CHEN Ningning, CHEN Jing. Research and application of the analytic hierarchy process in the Index weight of teaching evaluation [C]//2012 Fifth International Symposium on Computational Intelligence and Design. Hangzhou: IEEE, 2012: 164-167.

[6] HABIB M, KHAN R, PIRACHA J L. Analytic network process applied to R & D project selection[C]//2009 International Conference on Information and Communication Technologies. Karachi: IEEE, 2009: 274-280.

[7] LIN M C, WANG C C, CHEN M S, et al. Using AHP and TOPSIS approaches in customer-driven product design process[J]. Computers in Industry, 2008, 59 (1):17-31.

[8] AYAG Z, OZDEMIR R G. A hybirid approach to concept selection through fuzzy analytic network process [J]. Computers & Industrial Engineering, 2009, 56 (1):368-379.

[9] 肖人彬，程贤福，廖小平. 基于模糊信息公理的设计方案评价方法及应用[J]. 计算机集成制造系统，2007，13(12)：2331-2338.

[10] 林晓华，冯毅雄，谭建荣，等. 基于改进 DEMATEL-VIKOR 混合模型的产品概念方案评价[J]. 计算机集成制造系统，2011，17(12):2552-2561.

[11] 邓军，余忠华，吴昭同. 基于信息熵的概念设计的质量评价[J]. 浙江大学学报:工学版，2009，43(8)：1480-1484.

[12] 徐晓慧，冯涓，童秉枢. 具有不完全多性能参数的机械产品总体设计方案评价方法[J]. 工程图学学报，2006 (2):27-31.

[13] 张根保，庞继红，任显林，等. 机械产品多元质量特性重要度排序方法[J]. 计算机集成制造系统，2011，17(1)：151-158.

[14] 郭亚军，马凤妹，董庆兴. 无量纲化方法对拉开档次法的影响分析[J]. 管理科学学报，2011，14(5)：19-28.

[15] SHANNON C E. Prediction and entropy of printed English[J]. Bell System Technical Journal, 1951, 30 (1): 50-64.

（编辑　杨　波）