现代包装机械设计质量综合评价体系研究

刘祎，李虹，李瑞琴，郝亮亮
（中北大学，太原 030051）

摘要：目的 研究面向现代包装机械的设计质量综合评价体系。**方法** 根据包装机械的性能要求、结构特征和相对应的质量特性，参照机械产品的评价体系，构建面向包装机械的设计质量综合评价体系。然后利用层次分析法确定指标的主观权重，利用熵值法确定指标的客观权重，通过主客观权重综合得到评价体系设计质量指标的综合权重，并以案例进行分析验证。**结果** 案例分析证明，该评价体系和评价方法可行。**结论** 使用该套包装机械设计质量评价体系，即可提高包装机械设计质量，又能降低成本。

关键词： 包装机械；设计质量；评价体系；综合评价
中图分类号： TB486+.02　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1001-3563(2015)21-0075-04

Comprehensive Evaluation System for the Design Quality of Modern Packaging Machinery

LIU Yi, *LI Hong*, *LI Rui-qin*, *HAO Liang-liang*
(North University of China, Taiyuan 030051, China)

ABSTRACT: The aim of this work was to study the comprehensive evaluation system for the design quality of modern packaging machinery. According to the function requirement, the structure features and the corresponding quality characteristics of packaging machinery, referring to the evaluation system of mechanical products, a comprehensive evaluation system for the design quality of packaging machinery was built. Analytic Hierarchy Process (AHP) was then used to determine the subjective weight of the evaluation indexes, while the entropy method was used to determine the objective weight of the evaluation indexes. Furthermore, the subjective weights and objective weights were integrated using the combination method to determine the final weight of the design quality. A case was given for analysis and verification. The case study showed that the evaluation system and evaluation method were feasible. As proven by case analysis, using this evaluation system for the design quality of packaging machinery, the design quality of packaging machinery could be improved and the cost could be reduced.

KEY WORDS: packaging machinery; design quality; evaluation system; comprehensive evaluation

包装机械是指完成全部或部分包装的机器，是使产品包装实现机械化、自动化的根本保证，它为现代工业提供先进的技术装备，在工业生产中起着重要作用，已成为机械工业系统10大行业之一。李瑞琴[1]阐述了裹包机等常用的现代包装机械的特征及设计方法。杨宁斌[2]将人机工程学原理应用到包装机械设计中，使设计的包装机械更好地满足客户需求。曾晓红等[3—4]对包装机械设计的绿色设计和概念设计方案评价进行了深入研究，并给出了相应的评价体系。随着科学技术的进步，现代包装机械在性能、技术、服务等方面发生了重大变化，为了满足现代包装机械的新变化，建立新的、系统的、有层次的、有条理的设计质量评价体系，是实现科学有效的产品设计质量综合评价的基础。

收稿日期： 2015-02-12
基金项目： 高等学校博士学科点专项科研基金(20111420110005)
作者简介： 刘祎(1989—)，男，山西大同人，中北大学硕士生，主攻质量工程与管理。
通讯作者： 李虹(1964—)，女，山西运城人，中北大学副教授，主要研究方向为机械设计与理论、工程图学。

文中以现代包装机械的总设计方案为研究对象，从设计开发、生产制造、销售服务和包装机械对环境的影响等全方位、多角度考虑包装机械的设计质量，根据机械类产品设计质量评价体系构建面向包装机械市场的需求，从源头提高产品的质量。包装机械的设计质量综合评价体系，实现现代包装机械设计质量的综合评价，以确保设计的包装机械既拥有较高的质量，又能满足市场需求。

1 现代包装机械设计质量综合评价理论与体系

产品设计质量是指为了满足对产品明示或隐含的需求或期望，产品在设计与预先设定的有关功能、性能、可靠性、安全性、经济性、环境友好性等目标的符合程度[5]。现代包装机械设计质量综合评价就是针对于包装机械的总体设计质量综合应用各种先进技术，在产品设计过程中，对影响产品设计质量的各个方面进行全方位、多层次的综合评价。

包装机械设计在包装机械中占有重要地位，一个好的设计方案对包装机械的生产和使用具有重要意义。为满足市场需求，现代包装机械应具备生产效率高、柔性和灵活性好、设备故障少、出现故障能进行远程诊断、环境友好、成本低等优点[6—7]。

根据现代包装机械的特点，将包装机械的设计质量评价准则归结于功能/性能、技术性、经济性、服务性、环保性等五大方面，对现代包装机械设计质量进行综合评价。

1）功能/性能，是指从包装机械的功能和性能的角度对其进行设计质量评价，主要评价包装机械的多功能性、工作稳定性、可靠性、精度、安全性、柔性自动化、美观性等是否满足要求。

2）技术性，是指从包装机械运用的现代高新技术、包装机械设计结构和零部件可制造性、标准化等角度进行综合评价。

3）经济性，是指从现代包装机械产品的制造成本、使用成本和对包装机械的使用等进行综合评价。使用成本主要指包装机械的能耗，包装机械的使用主要指包装机械的寿命、生产效率、质量和周期等。

4）服务性，是指从现代包装机械的故障诊断分析和维修角度进行综合评价。

5）环保性，是指从产品设计制造和使用对生态环境或人影响的角度来评价产品设计质量，主要包括制造资源的可循环性和设备使用时噪声对人的影响。

设计质量综合评价最终的目标以质量特性指标表示，指标从不同侧面反映产品设计质量。参照机械类产品的评价体系[8—10]构建面向包装机械设计质量综合评价体系，见图1。

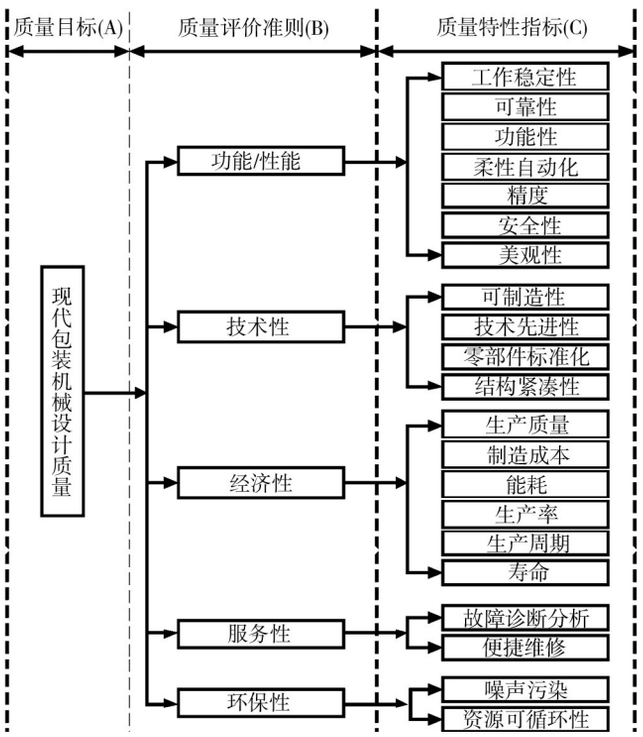

图1 现代包装机械设计质量综合评价体系

Fig.1 The comprehensive evaluation system for design quality of modern packaging machinery

将现代包装机械设计质量综合评价体系划分为设计质量目标A、质量准则B和质量特性指标C。质量评价准则从以上五方面反映产品设计质量，每一方面又分为更详细的质量特性指标，从而构成现代包装机械设计质量的多层次、多角度的综合评价体系。

2 包装机械设计质量综合评价

在设计质量评价体系中，各指标权重的确定是十分重要的环节，选用不同的方法可能得到不同的结果，有的偏重于主观，有的则偏重于客观。文中将层次分析法[13—15]和熵值法[11—12]相结合，确定指标的主客观综合权重。

2.1 指标综合权重计算

2.1.1 基于层次分析法的主观权重

1）评判矩阵。根据因素i与因素j相比的重要程度，设置评判比例标度值。i与j同等重要时标度值为

1，i比j稍微重要时标度值为3，i比j明显重要时标度值为5，i比j强烈重要时标度值为7，i比j极端重要时标度值为9。两因素相比时，介于上述相邻重要程度的标度值分别为2，4，6，8。

专家根据评判比例标度对同级指标进行比较评价得判断矩阵$\boldsymbol{R}$，$\boldsymbol{R}$表示某个评价目标或方面B对应的下级评价元素a_1到a_n有联系，r_{ij}表示a_i和a_j相对于B比较时a_i和a_j的模糊关系，见表1。

表1　模糊关系

Tab.1 Fuzzy relational tables

B	a_1	…	a_j	…	a_n
a_1	r_{11}	…	r_{1j}	…	r_{1n}
…					
a_i	r_{i1}		r_{ij}		r_{in}
…			…		
a_n	r_{n1}	…	r_{nj}	…	r_{nm}

当$i\neq j$时，若因素i与因素j比较得r_{ij}，则因素j与i相比较可得$r_{ij}=1/r_{ij}$；当$i=j$时，即对角线位置元素的值$r_{ij}=1$。$\boldsymbol{R}$可表示为：

$$\boldsymbol{R}=\begin{pmatrix}1 & \cdots & r_{1n}\\ \vdots & & \vdots\\ r_{n1} & \cdots & a_1\end{pmatrix}$$

2）权重确定及其一致性检验。对于每一个比较判断矩阵$\boldsymbol{R}$，显然具有特征值K及其相应的特征向量$\boldsymbol{P}$，满足：

$$\boldsymbol{RP}=K\boldsymbol{P} \tag{1}$$

根据式(1)求解矩阵$\boldsymbol{R}$的最大特征值$K_{\max}$及其相应的特征向量$\boldsymbol{P}_{\max}$，然后将特征向量$\boldsymbol{P}_{\max}$进行归一化处理，得到的向量即可认为是同一层中各因素权重向量。为了避免出现甲比乙极端重要，乙比丙极端重要，而丙又比甲极端重要的情况，在确定每一层次权重向量时，均需对比较判断矩阵$\boldsymbol{R}$作一致性检验。进行一致性检验可通过计算一致性比例C_{R}的大小来完成。当$C_{\mathrm{R}}<0.1$时，说明一致性检验通过，否则比较判断矩阵不合理，需要重新建立，直至满足一致性检验标准。

C_{R}计算表达式为：

$$C_{\mathrm{R}}=\frac{C_{\mathrm{I}}}{R_{\mathrm{I}}} \tag{2}$$

其中，

$$C_{\mathrm{I}}=\frac{K_{\max}-n}{n-1} \tag{3}$$

式中：C_{I}为一致性指标；n为比较判断矩阵$\boldsymbol{R}$的阶数；R_{I}为随机一致性指标，n为1，2，3，4，5，6，7，8，9时，R_{I}分别为0，0，0.58，0.90，1.12，1.24，1.32，1.41，1.45。

自上而下计算各级指标对顶级指标的权重：设A级下m个质量评价准则的权重分别为$b_1,b_2,\cdots,b_m$，b_i级下有k个指标$c_1^i,c_2^i,\cdots,c_k^i$，它们关于指标b_i的相对权重$\boldsymbol{c}_i=(c_1^i,c_2^i,\cdots,c_k^i)^{\mathrm{T}}$，则指标级$c_j^i$对A级评价目标的主观权重为：

$$w_j=b_i\times c_j^i \quad i=1,2,\cdots,m;\ j=1,2,\cdots,k \tag{4}$$

设C级共有n个质量特性指标，则将求出各指标对顶层目标的权重并归一化处理后得各指标主观权重$\boldsymbol{w}=(w_1,w_2,\cdots,w_n)$。

2.1.2　基于熵值法的客观权重

以包装机械为对象，按照定性和定量相结合的方法，取得n个被评价对象m评价指标的原始数据，构造评价矩阵$\boldsymbol{R}'=(r_{ij}')_{n\times m}$，$r_{ij}'$表示第$i$个对象的第$j$个分指标值。

评价矩阵数据标准化处理：正向指标为$r_{ij}=\dfrac{r_{ij}'-\max\{r_j'\}}{\max\{r_j'\}-\min\{r_j'\}}+1$，负向指标为$r_{ij}=\dfrac{\max\{r_j'\}-r_{ij}'}{\max\{r_j'\}-\min\{r_j'\}}+1$，其中，$r_{ij}$为数据处理后第$i$个对象的第$j$个分指标值，处理后的矩阵$\boldsymbol{R}=(r_{ij})_{n\times m}$；$r_j'$为评价矩阵$\boldsymbol{R}'$第$j$列元素。

各指标的熵值：

$$E_j=-\sum_{i=1}^{n}P_{ij}\cdot\ln(P_{ij})\quad j=1,2\cdots,m \tag{5}$$

式中：$P_{ij}=\dfrac{|r_{ij}|}{\sum_{i=1}^{n}r_{ij}}$。

评价指标j的评价决策重要性的熵e_j：

$$e_j=\frac{1}{\ln n}\cdot E_j\quad j=1,2\cdots,m \tag{6}$$

求第j个指标的熵权θ_j：

$$\theta_j=\frac{(1-e_j)}{\sum_{j=1}^{m}(1-e_j)}\quad j=1,2\cdots,m \tag{7}$$

最后求得各指标的客观权重$\boldsymbol{\theta}=(\theta_1,\theta_2,\cdots,\theta_m)$。

2.1.3　综合权重

将各指标对应的主客观权重相乘，并归一化处理得各指标的综合权重，计算公式为：

$$\lambda_j=\frac{w_j\times\theta_j}{\sum_{i=1}^{n}w_j\times\theta_j}\quad j=1,2\cdots,m \tag{8}$$

式中：λ_j为第j项指标的综合权重；w_j为第j项指标的主观权重；θ_j为第j项指标的客观权重。

最后求得各指标综合权重$\boldsymbol{\lambda}=(\lambda_1,\lambda_2,\cdots,\lambda_m)$。

2.2 综合评价数学模型

在评价过程中，每个指标分5个评价等级分别为1,2,3,4,5，每个等级对应的模糊评价值为45,60,75,80,95。专业人员对专业相关的模块进行质量指标打分，并将打分的值汇总处理得到最后的指标分值。设有n个方案，21个指标，得到评价矩阵$\boldsymbol{Y}'=(y_{ij})_{n\times 21}$。

在评价矩阵中有指标趋向不同，例如成本和环保性的质量指标评价值越小，经济性和环保性越好，而其他的特性指标值越大越好，因此对用经济性和环保性下的负向质量指标采用$6-y_{ij}$法的评价指标的等级。对评价矩阵$\boldsymbol{Y}'$标准化得$\boldsymbol{Y}$。根据组合权重法确定的各指标权重，计算设计质量的综合评价值。

$$\boldsymbol{T}=\boldsymbol{Y}_{n\times 21}\times\boldsymbol{\lambda}_{21\times 1} \tag{9}$$

3 案例分析

以某纺织厂纱筒包装工序设计的包装机械方案为对象，对该套方案的设计质量进行综合评价。针对$\boldsymbol{Y}_1$和$\boldsymbol{Y}_2$两套方案，各阶层专业人士根据质量特性指标的描述对相应设计模块进行评价，得到两套方案的评价矩阵$\boldsymbol{Y}'$，$\boldsymbol{Y}'$标准化得$\boldsymbol{Y}$，$\boldsymbol{Y}=[\boldsymbol{Y}_1;\boldsymbol{Y}_2]$，其中：$\boldsymbol{Y}_1$=[95,80,80,95,80,80,95,75,95,75,80,95,60,60,95,80,95,95,80,60,80]，$\boldsymbol{Y}_2$=[80,75,75,80,80,75,95,80,80,75,75,80,75,80,75,60,95,75,95,45,80]。

以5个质量评价准则为例求权重，根据专家打分得到质量指标、特性间模糊关系评判矩阵为$\boldsymbol{R}$；

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}1 & 2 & 3 & 4 & 5\\ 1/2 & 1 & 2 & 3 & 4\\ 1/3 & 1/2 & 1 & 2 & 3\\ 1/4 & 1/3 & 1/2 & 1 & 2\\ 1/5 & 1/4 & 1/3 & 1/2 & 1\end{bmatrix}$$

通过一致性检验，评判矩阵$\boldsymbol{R}$具有一致性，然后利用式(1)求得$\boldsymbol{P}_{\max}$，$\boldsymbol{P}_{\max}$归一化处理得质量评价准则的主观权重$\boldsymbol{w}_{\mathrm{b}}$：

$\boldsymbol{w}_{\mathrm{b}}$=(0.4185,0.2625,0.1599,0.0973,0.0618)

同理求得各质量评价准则下质量特性指标的主观权重向量。

$\boldsymbol{w}_{\mathrm{b1}}$=(0.3511, 0.2394, 0.1598, 0.1230, 0.0689, 0.0365,0.0212)

$\boldsymbol{w}_{\mathrm{b2}}$=(0.5495,0.2389,0.1466,0.0650)

$\boldsymbol{w}_{\mathrm{b3}}$=(0.3825, 0.2504, 0.1596, 0.1006, 0.0641, 0.0428)

$\boldsymbol{w}_{\mathrm{b4}}$=(0.6667,0.3333)

$\boldsymbol{w}_{\mathrm{b5}}$=(0.6667,0.3333)

利用式(4)得底层指标相对于顶层目标的主观权重，归一化得主观权重向量$\boldsymbol{w}$：

$\boldsymbol{w}$=(0.1469, 0.1002, 0.0669, 0.0515, 0.0288, 0.0153, 0.0089, 0.1442, 0.0627, 0.0385, 0.0171, 0.0612, 0.0400 0.0255, 0.0161, 0.0102, 0.0068, 0.0648, 0.0324, 0.0412, 0.0206)

针对3家企业的包转机械调查分析，提取得到原始数据，利用式(5)、(6)和(7)计算客观权重$\boldsymbol{\theta}$；

$\boldsymbol{\theta}$=(0.0402, 0.0401, 0.0402, 0.0627, 0.0402, 0.0465, 0.0627, 0.0465, 0.0627, 0.0402, 0.0627, 0.0433, 0.0399 0.0463, 0.0402, 0.0399, 0.0402, 0.0401, 0.0627, 0.0402, 0.0627)

利用式(8)计算综合权重$\boldsymbol{\lambda}$：

$\boldsymbol{\lambda}$=(0.1288, 0.0876, 0.0586, 0.0704, 0.0253, 0.0155, 0.0121, 0.1463, 0.0857, 0.0337, 0.0233, 0.0578, 0.0349 0.0258, 0.0141, 0.0089, 0.0060, 0.0567, 0.0443, 0.0361, 0.0281)

根据评价矩阵和综合指标权重利用式(9)计算得两套设计方案的综合评价值为$\boldsymbol{T}$=[83.6388 77.8731]。结果表明第1套方案更好，目前厂家已经选用第1套方案，并投入生产。通过使用该评价体系得到的方案，既缩短了产品生产制造周期、降低了成本，又提高了总质量。

4 结语

从全方位的角度出发，以包装机械的设计质量为目标，建立了面向包装机械的设计质量的综合评价体系，阐述了该评价体系的质量准则和质量指标，并采用主客观相结合的方法确定权重。最后以案例验证了该体系的可行性。

参考文献

[1] 李瑞琴. 包装科学与技术基础[M]. 北京：化学工业出版社，2015.
LI Rui-qin. Packaging Science and Technology Foundation [M]. Beijing：Chemical Industry Press，2015.

[2] YANG Ning-bin. Application of Ergonomics Principles in the Packaging Machinery Design[J]. Applied Mechanics and Materials，2012，215/216：378—381.

（下转第121页）

评估[J]. 统计与决策,2008 (5):168—170.
CHEN Juan. Risk Assessment Based on Multi-level Fuzzy Comprehensive Evaluation Model of International Engineering Project [J]. Statistics and Decision,2008(5):168—170.

[15] 吴春英. 基于层次算法的客户满意度算法的研究[J]. 四川理工学院学报:自然科学版,2007(1):86—89.
WU Chun-ying. Research on Customer Satisfaction Algorithm Based on Hierarchical Algorithm Journal of Sichuan Institute of Technology:Natural Science Edition,2007(1):86—89.

[16] 但斌,姚玲,经有国,等. 基于本体映射面向模糊客户需求的产品配置研究[J]. 计算机集成制造系统,2010(2):225—232.
DAN Bin, YAO Ling, JINHG You-guo, et al. Research on Product Configuration Based on Ontology Mapping for Fuzzy Customer Requirements[J]. Computer Integrated Manufacturing System,2010(2):225—232.

[17] 胡小梅,朱文华,俞涛. 基于模糊粗糙集的并行装配序列规划方法[J]. 机械工程学报,2010(15):130—135.
HU Xiao-mei, ZHU Wen-hua, Yu Tao. Planning Method of Parallel Assembly Sequence Based on Fuzzy Rough Sets[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2010(15):130—135.

[18] 王双华,张恒. 机械功能微晶玻璃可加工性能的模糊综合评价[J]. 材料导报,2009(20):115—117.
WANG Shuang-hua, ZHANG Heng. Fuzzy Comprehensive Evaluation on Machinable Property of Glass-ceramics with Mechanical Function[J]. Materials Review, 2009(20):115—117.

(上接第78页)

[3] 曾晓红,刘春辉,郝喜海. 包装机械产品绿色设计评价体系及方法研究[J]. 包装工程,2007,28(4):71—73.
ZENG Xiao-hong, LIU Chun-hui, HAO Xi-hai. Packaging Machinery Product Green Design Evaluation System and Method Research[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(4):71—73.

[4] 洪波,包能胜. 包装机械的概念设计方案评选方法的研究[J]. 包装工程,2010,31(11):80—83.
HONG Bo,BAO Neng-sheng. Research of Scheme Optimization Method for Packaging Machinery Conceptual Design[J]. Packaging Engineering,2010,31(11):80—83.

[5] 唐晓青. 产品设计质量保证理论与方法[M]. 北京:科学出版社,2011.
TANG Xiao-qing. Product Design Quality Assurance Theory and Method[M]. Beijing:Science Press,2011.

[6] 孙智慧,晏祖根. 包装机械概论[M]. 北京:印刷工业出版社,2012.
SUN Zhi-hui, YAN Zu-gen. Introduction to Packaging Machinery[M]. Beijing:Printing Industry Press,2012.

[7] 高德. 包装机械设计[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
GAO De. Packaging Machinery Design[M]. Beijing: Chemical Industry Press,2005.

[8] 商建东,陈康宁. 生命周期产品设计质量评价及方案决策模型研究[J]. 机械设计,2000(7):6—9.
SHANG Jian-dong, CHEN Jiang-kang. The Life Cycle of Product Design Quality Evaluation and Scheme Decision-making Model Study[J]. Mechanical Design, 2000(7):6—9.

[9] 张在房,褚学宁. 面向生命周期的完整产品总体设计方案决策研究[J]. 计算机集成制造系统,2009,15(5):833—841.
ZHANG Zai-fang, ZHU Xue-ning. Decision-making for Overall Design Alternative of Full Product under Life Cycle[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2009, 15(5):833—841.

[10] 姜兴宇,王贵和,张新敏,等. 面向全生命周期的产品质量综合评价方法研究[J]. 系统仿真学报,2008,20(20):5581—5584.
JIANG Xing-yu, WANG Gui-he, ZHANG Xin-min, et al. Research on Comprehensive Quality Evaluation Method of Oriented-product Life Cycle[J]. Journal of System Simulation, 2008,20(20):5581—5584.

[11] SATTY T L. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting[M]. New York:Mcgraw Hill,1998.

[12] 钟欣. 基于层次分析法的电子产品概念设计评价研究[J]. 包装工程,2008,29(11):108—111.
ZHONG Xin. Research on AHP-based Evaluation of Electronic Product Conceptual Design[J]. Packaging Engineering, 2008,29(11):108—111.

[13] 荆洪英,张利,闻邦椿. 基于层次分析法的产品设计质量权重分配[J].东北大学学报(自然科学版),2009,30(5):712—715.
JING Hong-ying, ZHANG Li, WEN Bang-chun. AHP-based Assignment of Weight in Product Design Quality[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science Edition), 2009, 30(5):712—715.

[14] LI Guang-fan, CHEN Chao-he, JIANG Bi-feng, et al.Research of Shaanxi Province Urbanization Development Quality Evaluation Based on the Entropy Value Method[J]. Applied Mechanics and Materials,2014,587/589:155—160.

[15] LI Fei. Comprehensive Evaluation Research on Cyclic Economy Based on Entropy Value Method[C]// Proceedings of 2013 6th International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering.Xi′ an: ICIII,2013.