

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.10.012

机电产品性能分析指标体系模型的构建研究^{*}

方吉庆¹, 陈 川¹, 华尔天^{1,2*}

(1. 浙江工业大学 特种装备与先进加工技术教育部重点实验室, 浙江 杭州 310014;

2. 浙江省激光装备制造协同创新中心, 浙江 杭州 310014)

摘要:针对机电产品性能分析中指标体系的构建问题,对机电产品指标的特征属性和相关性进行了研究,构建指标选取模型,提出了一种基于聚类分析和因子分析的机电产品指标选取方法。首先根据指标属性进行了特征层分类,构建了指标体系特征层,在特征层下基于聚类分析将信息量相似的指标聚为一类,保证所包含信息既不重复又能覆盖各个方面;然后通过因子分析法进行了指标遴选,确保所选指标对分析结果影响最大;最后将该模型应用在散热翅片性能分析的指标体系构建中。研究表明:该指标选取模型将指标数量精简至原60%,同时又包含了95.4%的信息量,表明该指标选取方法是可行和有效的。

关键词:机电产品;综合性能分析;指标选取;聚类分析;因子分析;散热翅片

中图分类号:TH122

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)10-1077-05

Selection model of performance analysis index system of mechanical and electrical products

FANG Ji-qing¹, CHEN Chuan¹, HUA Er-tian^{1,2}

(1. Key Laboratory of Special Equipment and Advanced Processing Technology of Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 2. Zhejiang Provincial Laser Equipment Manufacturing Collaborative Innovation Center, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Aiming at the problem of constructing the index system in the function analysis of electromechanical products, the characteristics and correlations of the indicators were studied, an index selection model was constructed, and a selection method of electromechanical products indicators based on clustering and factor analysis was proposed. Firstly, the feature layers were classified according to the attributes of the indicators, and the feature layer of index system was constructed, the indicators with similar information amount were clustered into one category, to ensure that the contained information was not overlapped and can cover all aspects. Then index was selected by factor analysis to ensure that the selected indicators have the greatest impact on the index system. Finally, this model was tested by constructing of index system for performance analysis of cooling fins. The results show that the index selection model reduces the number of indicators to 60%, and includes 95.4% of information, indicating that the method was feasible and effective.

Key words: mechanical and electrical products; comprehensive performance analysis; indicator selection; cluster analysis; factor analysis; cooling fin

0 引 言

机电类产品的综合性能分析是研究和提高产品性能的一种重要方法,建立合理的指标体系对分析结果的准确性具有重要的影响^[1]。在指标体系构建过程中,指标较多增加了分析的复杂度,同时降低了运算速

度,多余的变量还会影响分析结果的精度;但指标较少往往会损失一定的信息量,同时分析结果的精度又得不到保障。因此,如何选取关键指标,同时又确保指标体系的全面性,对产品性能分析结果的可靠性至关重要。国内学者对指标的选取提出了不同的方法,李思源等^[2]通过对指标之间的信息量进行对比,降低了机

收稿日期:2018-03-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71373242)

作者简介:方吉庆(1991-),男,河南信阳人,硕士研究生,主要从事智能设计与数字化制造、创新设计方面的研究。E-mail:qyhy1991@163.com

通信联系人:华尔天,男,教授,博士生导师。E-mail:het@zjtu.edu.cn

机械设备测试时的指标选取的工作量;李远远等^[3]将粗糙度理论应用在指标选取中,客观、有效地对有限指标数据进行了挖掘,通过属性约简剔除了冗余指标;李珂等^[4]采用效用函数分析法对电网评价体系中的指标进行了分析,对提高电网管理效率具有一定的指导作用;赵京等^[5]采用主成份分析法对各指标层进行数据降维。以上方法各有不同的特点,但在筛选指标时多只注重指标的信息量,忽略要保证指标体系的全面性。

为了解决上述问题,本文根据机电产品的特点和指标的特征属性对指标进行特征层分类,确保指标体系覆盖产品各方面,并以指标之间的相关性和对特征层的贡献度为研究切入点,提出一种基于聚类 and 因子分析指标筛选方法,对指标进行定量筛选,并以 PTC 散热翅片作为研究案例,构建散热翅片评价指标体系,对指标选取模型进行验证。

1 机电类指标体系筛选理论基础

1.1 聚类分析法

(1) 将指标分为 n 种类别,将任意两个合并同时其他的指标,共有 $n(n-1)/2$ 种方案可选,根据公式计算每一类指标的离差平方和:

$$S_i = \sum_{j=1}^{n_i} (X_i^{(j)} - \bar{X}_i)' (X_i^{(j)} - \bar{X}_i) \quad (1)$$

式中: S_i —第 i 类指标的离差平方和。

(2) 根据式(1)中的公式计算各类的利差平方和,按离差平方和最小进行重新分类,并计算各类别的总离差平方和:

$$S = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (X_i^{(j)} - \bar{X}_i)' (X_i^{(j)} - \bar{X}_i) \quad (2)$$

式中: S —第 k 类指标的总利差值。

(3) 重复利用式(1~2),直到最终分类的数目为 l 。

1.2 因子分析法

将原有的变量通过数据处理得到几个最具代表性的核心内容。决定共同因子的方法主要有主成份分析法、主轴法、一般化最小平均法等。首先对分析对象进行检验,以确定是否适合因子分析,然后采用主成份分析法计算各指标的贡献度。

(1) 计算相关系数公式:

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)(x_{kj} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)^2 (x_{kj} - \bar{x}_j)^2}} \quad (3)$$

式中: r_{ij} —变量 x_i 和 x_j 的相关系数。

(2) 求得相关系数矩阵 C ,并计算矩阵 C 的特征值和特征向量:

$$C\lambda_i = \lambda_i e_i \quad (4)$$

式中: λ_i —矩阵特征值; e_i —矩阵特征向量。

(3) 计算成份贡献率:

$$Q_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{k=1}^p \lambda_k} (i = 1, 2, \dots, p) \quad (5)$$

式中: Q_i —前 i 个主成分的贡献率。

(4) 计算载荷值:

$$l_{ij} = \sqrt{\lambda_i} e_{ij} \quad (6)$$

式中: l_{ij} —前 i 个成份在各变量上的载荷值。

2 机电产品性能评价指标筛选策略

(1) 根据所研究产品的相关文献中出现的指标和分析的目标,初步确定海选指标体系。

指标选取原则:①该指标是衡量产品某项性能的常用指标,②该指标在该产品研究文献中出现频率较高。

(2) 根据产品的指标属性对海选指标进行特征层划分,特征层划分后的指标体系能够保证指标的全面性。得到评价对象指标集 $U = \{u_1, \dots, u_m\}$ 为评价对象的指标集,共 m 个特征层,各层子类指标 $u_i = \{u_{i1}, \dots, u_{ij}\}$ 。其中,第 i 个指标类共 j 个指标。

(3) 由于各指标采用的计量单位并不相同,需要对指标进行标准化处理,以便于进行数据分析,处理公式如下:

$$p_{ij} = \frac{(u_{ij} - \min_{1 \leq i \leq m} (u_{ij})) \text{ or } (\max_{1 \leq i \leq m} (u_{ij}) - u_{ij})}{\max_{1 \leq i \leq m} (u_{ij}) - \min_{1 \leq i \leq m} (u_{ij})} \quad (7)$$

式中: u_{ij} —第 i 类的第 j 个指标的数值; p_{ij} —标准化后数值; $\min(u_{ij}), \max(u_{ij})$ — u_{ij} 所能取得的最小值和最大值,根据指标对特征层的作用分为正向指标和负向指标。

(4) 指标参数标准化之后,采用聚类分析法对同一个特征层的指标进行聚类分析。将 u_i 聚类为 k 类 ($k \leq j$),通过聚类分析可以将信息量相似的指标归为 1 类,防止信息重复。

(5) 特征层指标的因子分析,采用 KMO 检验和 Bartlett 检验方法对各特征层进行检验。正常状态下,当变量之间相关性在 0.7 以上时,说明相关性较好,而低于 0.5 时说明不适合做因子分析。Bartlett 则是检验变量组成的相关阵中变量的相关性,即检验各变量之间是否相互独立。检验结果的临界点是在 0.05,当低于 0.05 时,说明不适合做因子分析。

(6) 根据聚类分析和因子分析的结果对指标进行筛选,将聚类中只有一个指标的保留,其余聚类中对成份综合载荷最大的指标保留,其余指标删除。

(7) 构建指标的合理性进行检验,筛选后指标的贡献率 ln 为:

$$ln = \frac{\text{tr}C_2}{\text{tr}C_1} \quad (8)$$

式中: C_1 — 筛选前指标数据的协方差矩阵; $\text{tr}C_1$ — 筛选前指标协方差矩阵的迹; C_2 — 筛选指标数据的协方差矩阵; $\text{tr}C_2$ — 筛选后指标协方差矩阵的迹。当选取后的指标的贡献率超过 85% 时^[6],证明筛选后的指标信息量足够,满足要求。

机电产品性能指标选取流程图如图 1 所示。

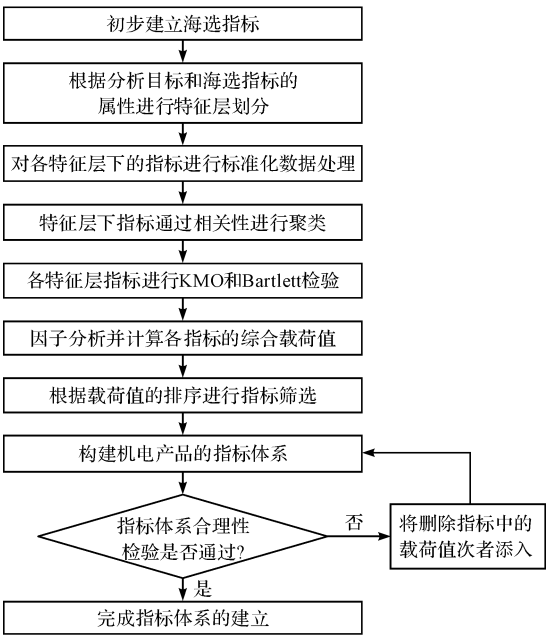


图 1 机电产品构建指标体系流程图

3 工程案例应用实例

3.1 翅片指标特征层分类和数据标准化

波纹翅片是家用电器中常见的传热和散热机构,

其中最通用三角形翅片的机械结构图如图 2 所示。

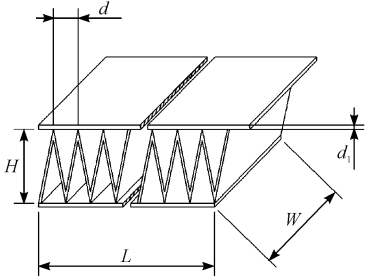


图 2 三角形翅片的机械结构图

H — 翅片高度; d — 翅片距离; W — 宽度; d_1 — 板厚度

现本研究对三角形翅片综合性能进行分析,以判断该结构选型的翅片在同类产品中性能的优劣,散热翅片通用的结构选型有矩形、梯形、三角形、U 形和插片式等 5 种^[7]。

根据指标选取原则并查阅对散热翅片研究文献出现的高频指标^[8-10],将指标划分为热力学、力学和经济性共 3 个特征层 10 个指标^[11],如表 1 所示。

本研究计算 PTC 散热翅片数值,热力学指标通过查询相关的文献和仿真分析得到^[12],力学指标通过查询相关手册并结合有限元分析得到,得到指标数值后采用公式(7) 进行标准化,各指标原始数据和标准化后的数值如表 2 所示。

由表 2 可知:热力学特征中传热系数为正向指标,故原始数据和标准化数值成正比。热阻值在热力学特征中为负向指标,故原始数据和标准化数据成反比。

表 1 散热片特征层和指标

特征	指标			
热力学特征(U_1):	U_{11} 传热系数/ $(W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1})$	U_{12} 导热系数/ $(W \cdot (m \cdot K)^{-1})$	U_{13} 热阻值/ $(m \cdot K \cdot W^{-1})$	U_{14} 通风面积/ m^2
力学特征(U_2):	U_{21} 弯曲刚度/ $(N \cdot m^{-1})$	U_{22} 拉伸刚度/ $(N \cdot m^{-1})$	U_{23} 强度/MPa	
经济性特征(U_3):	U_{31} 材料价格/ $(yuan \cdot m^{-2})$	U_{32} 单元成本/yuan	U_{33} 零件寿命/year	

表 2 指标参数的原始值和标准化后的值

指标	指标原始数据			指标标准化数据		
	三角形	梯形	矩形	三角形	梯形	矩形
传热系数	187. 8	200	168	0. 44	0. 71	0
.....						
热阻值	3. 25	2. 32	1. 38	0	0. 71	0. 84
.....						
弯曲刚度	158. 1	135. 3	150. 8	1	0	0. 68
单元成本	12. 2	15. 1	24. 4	0. 88	0. 67	0
.....						
寿命	5. 0	4. 0	4. 5	1	0	0. 60

3.2 散热翅片特征指标的聚类分析

本研究之所以在已经分配好的特征层中聚类而不是直接对整个指标体系进行聚类分析,原因在于为了保

证指标体系能够代表散热翅片性能的全面性,使指标体系能够包含各个方面,采用 SPSS 软件对标准化后的指标数据进行聚类分析,分析结果如图(3 ~ 5) 所示。

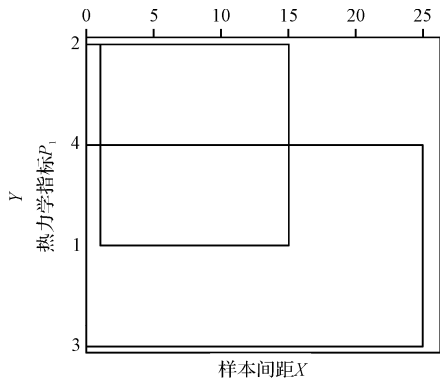


图 3 热力学特征聚类分析

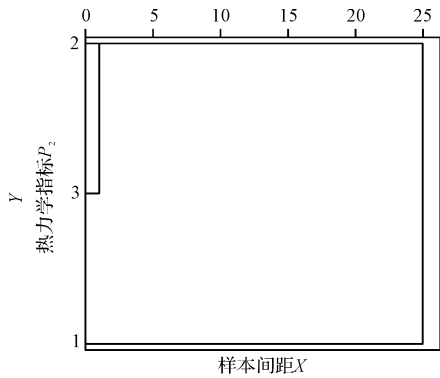


图 4 力学特征聚类分析

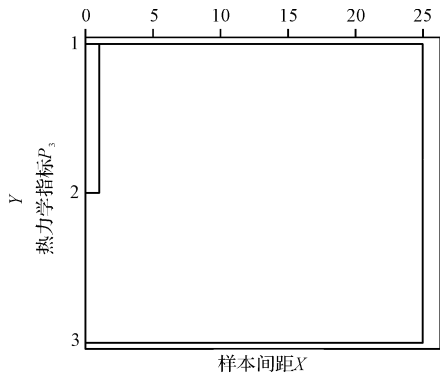


图 5 经济性特征聚类分析

图 3 中,热力学特征中的指标 1、指标 2 和指标 4 可以归为一类为聚类 P_{11} ,指标 3 归为聚类 P_{12} ;图 4 中,力学特征中的指标 2 和指标 3 归为一类为聚类 P_{21} ,指标 1 归为聚类 P_{22} ;图 5 中,经济性的指标 1 和指标 2 为聚类 P_{31} ,指标 3 为聚类 P_{32} 。

3.3 散热翅片特征指标的因子分析

指标体系通过聚类分析之后,同一特征层的指标中信息量相同的归为一类。通过因子分析法对同类中的指标进行分析,首先需要对各特征层的指标类进行相关性检验。

特征层 KMO 检验和 Bartlett 检验如表 3 所示。

表 3 特征层 KMO 检验和 Bartlett 检验

检验结果	热力学特征	力学特征	经济性特征
KMO 检验	0.760	0.816	0.751
Bartlett 检验	0.066	0.053	0.059
是否通过	是	是	是

由表 3 可以看出,力学特征、热力学特征层和经济性特征层的 KMO 检验和 Bartlett 检验均满足要求,可以进行因子分析。

本研究借助 Matalb 和 SPSS 软件,对特征层进行因子分析,并计算出各指标在各因子的综合载荷值。多个指标的聚类选取综合载荷值最大的保留,较少的删除,单指标的聚类指标保留。分析的结果如表 4 所示。

表 4 聚类-因子分析指标筛选方案

序号	特征层	指标层	聚类类别	综合载荷值 $ a_{ij} $	是否保留
1	热力学特征	传热系数	P_{11}	0.997	保留
2		导热系数	P_{11}	0.975	删除
3		散热面积	P_{11}	0.962	删除
4		热阻值	P_{12}	0.996	保留
5	力学特征	弯曲刚度	P_{21}	0.993	保留
6		拉伸刚度	P_{21}	0.899	删除
7		强度	P_{22}	0.989	保留
8	经济性特征	材料价格	P_{31}	0.995	保留
9		单元成本	P_{31}	0.893	删除
10		零件寿命	P_{32}	0.967	保留

3.4 指标体系合理性检验

本研究通过计算原始指标的协方差矩阵的迹 trC_1 和筛选后指标协方差矩阵的迹 trC_2 ,根据式(8)得到筛选后指标体系的信息贡献度: $ln = trC_2/trC_1 = 95.4\%$ 。

即筛选后的指标中的 60% 的指标可以代表 95.4% 的信息含量,能够代表原有海选指标的信息。

最终确定的指标体系结果如图 6 所示。

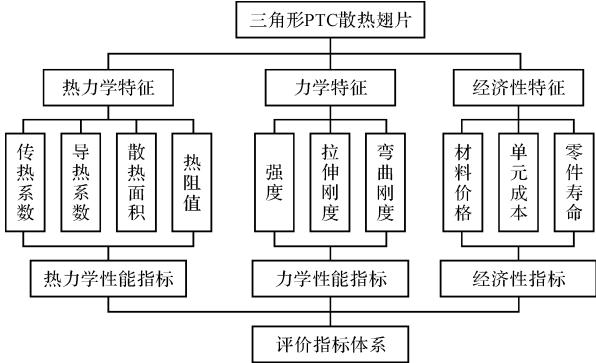


图 6 PTC 翅片的性能评价指标体系

(下转第 1099 页)

本文引用格式: