

基于理想优度的包装升降装置运动方案设计

江帆, 方伟中, 岳鹏飞, 王一军

(广州大学 机械与电气工程学院, 广州 510006)

摘要: **目的** 为更全面、更科学地评价包装升降装置的设计方案, 为其设计与优化提供有效的决策依据。**方法** 将 TRIZ 理论的理想度与可拓学的优度评价进行融合, 构建集成理想度与优度的机械运动方案评价方法, 即以规范化的理想度为关联函数, 以多级可拓综合评价过程为路径, 对机械运动方案进行可靠、客观地评价。**结果** 将理想优度用于包装升降装置运动方案设计的实践, 建立各评价指标的理想度测算方法, 并采用分子与分母的规范化来克服理想度计算中出现的分子分母量纲不一致的问题, 以规范化的理想度为关联度, 经过与权重系数合成得到优度, 将关联函数选择、关联度计算及其规范化等计算过程简化为单一的理想度计算, 快速完成包装升降装置运动方案的优选。**结论** 理想优度简化了机械运动方案的可拓评价流程, 通过在包装升降装置运动方案设计的实践, 进一步证实了理想优度评价的有效性, 并加快了评价速度, 有助于提高机械运动方案的设计与评价效率。

关键词: TRIZ 理想度; 可拓优度评价; 理想优度; 规范化; 升降装置

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)14-0011-05

Mechanical Kinematic Scheme Design of Packing Lifting Device Based on Ideal Superiority Evaluation Method

JIANG Fan, FANG Wei-zhong, YUE Peng-fei, WANG Yi-jun

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

ABSTRACT: This paper aims to evaluate the design scheme of the packaging lifting device in a more comprehensive and scientific way and provide an effective decision-making basis for the design and optimization. The ideal degree of TRIZ theory and the superiority evaluation of extenics were combined to construct an evaluation method for mechanical kinematic scheme that integrated ideal degree and superiority. This method conducted reliable and objective evaluation on the mechanical kinematic scheme with the ideal degree of normalization as the correlation function and a multi-level extenics comprehensive evaluation process as the evaluation path. As a result, in the design of mechanical kinematic scheme of the package lifting device, the ideal superiority evaluation method was adopted to establish the calculation method for ideal degree of all indexes; meanwhile, the numerator and the denominator were normalized to overcome the inconsistency between dimensions of numerator and denominator during calculation. The normalized ideal degree was used as correlation function, and was compounded with the weight coefficient, thus obtaining the superiority. This method simplified the correlation function selection, correlation calculation and normalization of the calculation into a single ideal calculation, and rapidly completed the selection of the package lifting device kinematic schemes. In conclusion, the ideal superiority method simplifies evaluation process of mechanical kinematic

收稿日期: 2016-02-21

基金项目: 广东省科技计划 (2014A070711023、2015A070710029、2015A030402009); 广东省创新方法与决策管理系统重点实验室开放基金 (2011A060901001-19D); 广州市教育科学规划课题 (1201430307); 广州市高等学校教育教学改革项目 (穗教高教[2015]0029-16); 广州大学教育教学研究项目 (JY201520)

作者简介: 江帆 (1974—), 男, 土家族, 湖南人, 博士, 广州大学机械与电气工程学院副教授, 主要研究方向为机械 CAE/CFD、TRIZ 机械创新设计以及创新工程教育。

scheme design, further confirms the validity of this evaluation by means of design practice in the package lifting mechanical kinematic scheme, and also accelerates the evaluation speed and helps to improve the efficiency of the mechanical kinematic scheme design and evaluation.

KEY WORDS: ideal degree of TRIZ theory; extenics superiority evaluation method; ideal superiority; normalization; lifting device

机械运动方案评价对满足功能要求的备选方案集合进行排序和择优是一个关键问题,将对机械运动方案设计产生重要的影响。可拓优度评价是一个重要的评价方法^[1],但涉及到关联函数的选择、关联度计算与规范化,比较繁琐,如何简化优度评价过程是可拓学的发展内容之一。

1 运动方案评价的研究现状

机械运动方案评价是机械运动方案设计中的重要环节,很早就受到研究人员的重视。汪利等人研究了机械运动方案的三级模糊综合评价^[2],主要针对评价因素权分配的困难和评价结果近似相等的问题提出了解决方案。薄瑞峰等人将神经网络引入到机械运动方案评价中,建立了一种多层次多目标的方案评价模型^[3]。古莹奎等人对评价因素权重的确定进行了研究,提出了一种确定评价体系中各级评价因素权重的模糊层次分析方法^[4]。从这些研究中看到,机械运动方案评价的关键问题是评价因素的权重确定与评价指标的定量化,其中评价指标定量化受人为主观影响比较大,有进一步改进的空间。

可拓优度评价方法是我国蔡文原创的一种评价方法^[1],其建立在可拓集合论基础上,综合多种衡量条件对某一对象、方案、策略等的优劣程度进行综合评价,在方案、策略、安全、质量等评价方面有很多应用。如石兰芳等人将可拓优度评价应用在变幅液压缸可靠性评价中^[5]。江帆等人将可拓优度评价应用到吸喷嘴设计上^[6]。可拓优度评价需要选择关联函数、计算关联度及规范化,比较繁琐,进行简化有助于提高评价效率。这里将 TRIZ 理论的理想度评价与可拓优度融合,简化优度计算,提高评价效率。

2 理想优度评价方法构建

可拓优度评价的一般过程包括确定衡量指标、确定权系数、建立关联函数、计算关联度、对关联度规范化,最后计算优度,优选方案。这个过程中,

关联函数、关联度计算及其规范化比较繁琐,这里采用理想度代替这 3 个部分,即每个评价指标的理想度(用理想度描述每个指标的量值),这样可以简化评价流程,理想优度评价流程见图 1。

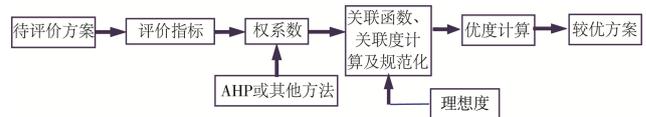


图 1 理想优度评价流程

Fig. 1 The evaluation process of ideal superiority

1) 确定评价指标 c , 根据机械运动方案设计中主要考虑的因素,选择基本功能、工作性能、动力性能、经济性能、结构性能作为评价指标。

2) 确定权系数,评价一个方案 $W_j(j=1,2,\dots,m)$ 优劣的各衡量指标 c_1, c_2, \dots, c_n 有轻重之分,以权系数 α 来表示各衡量指标的重要性程度,根据重要程度分别赋予 $[0, 1]$ 的值,权系数记作公式 (1)。其中: $\sum_{k=1}^n \alpha_k = 1$ 。确定权系数的方法很多,这里采用 AHP 层次分析方法,确定机械运动方案评价指标(基本功能、工作性能、动力性能、经济性能、结构性能)的权系数。

$$\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) \quad (1)$$

3) 计算评价指标的理想度。TRIZ 理论中,系统的理想化水平与有用功能之和成正比;与有害功能之和,及与成本之和成反比^[7]。对于每个评价指标,这里定义为:某评价指标的理想度与该评价指标对有用功能贡献率成正比,与评价指标对有害功能贡献率,与评价指标对成本贡献率成反比,如公式 (2)。其中: $\sum U_F$ 为有用功能之和; $\sum H_F$ 为有害功能之和; $\sum C$ 为成本之和; U_i 为该评价指标对有用功能的贡献; H_i 为该评价指标对有害功能的贡献; C_i 为该评价指标对成本的贡献。

$$I_i = \frac{U_i / \sum U_F}{H_i / \sum H_F + C_i / \sum C} \quad (2)$$

4) 计算理想优度^[7-8]。对于方案 W_j 关于各评价指标 c_1, c_2, \dots, c_n 的理想度为公式 (3),各个方案的

理想优度计算如公式 (4)。

$$L(W_j) = \begin{bmatrix} I_{1j} \\ I_{2j} \\ \dots \\ I_{nj} \end{bmatrix} \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

$$Y(W_j) = \alpha L(W_j) = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) \begin{bmatrix} I_{1j} \\ I_{2j} \\ \dots \\ I_{nj} \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^n \alpha_i I_{ij} \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

5) 根据优度确定较优方案。根据公式 (4) 计算出的各个方案的理想优度进行排序, 选用理想优度值较大的方案作为优选运动方案进行具体的方案设计。

3 包装升降装置运动方案设计

升降装置是包装机械的重要组成部分, 这里针对要求占空间小的升降装置设计方案进行设计。根据收缩后占空间小的要求, 构想的方案为: 液压缸升降机构、卷尺弹簧片升降机构和刚性链升降机构, 升降机构方案见图 2。以上 3 个升降机构方案均有各自的优势, 采用理想优度进行评价选优。

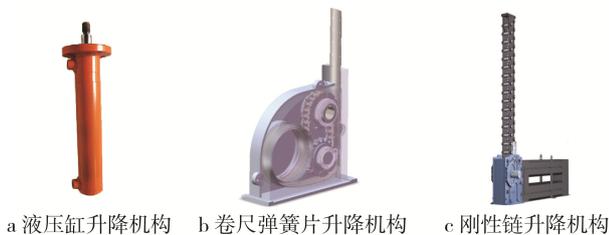


图 2 升降机构方案
Fig.2 The scheme of lifting mechanism

1) 确定评价指标。根据前面的分析, 选择基本功能 c_1 , 工作性能 c_2 , 动力性能 c_3 , 经济性能 c_4 , 结构性能 c_5 作为评价指标。

2) 确定权系数。建立调查问卷, 对某公司研发部的设计师、高校教师和普通消费者进行问卷调查, 由于数据来源较广, 个别得分属于异常值, 会影响数据的准确性, 因此对个别异常值进行剔除。对于描述性统计分析, 体现数据趋势的分析中主要有平均值、中位数和众数。本次调查中以分隔数值打分来得到权重, 平均值反应的是调查者的平均得分, 明显不合适, 而众数体现的是多数人的打分, 对本

次调查有一定的参考性意义, 因此在数据分析中以得分众数为主^[9]。再根据层次分析方法 (AHP) 得到以上考核项目在升降装置设计中的权重。升降机构各个评价指标的权重见表 1。由表 1 可见, 工作性能权重最大。对所得到的矩阵进行一致性判断, 其一致性比例小于 0.1, 因此矩阵均能达到一致性指标。

表 1 升降机构各个评价指标的权重
Tab.1 The comparison of mechanical product design's assessment

	基本功能	工作性能	动力性能	经济性能	结构性能	W_i
基本功能	1	1/2	3	2	3	0.2720
工作性能	2	1	3	2	3	0.3613
动力性能	1/3	1/3	1	1/2	1	0.0969
经济性能	1/2	1/2	2	1	2	0.1729
结构性能	1/3	1/3	1	1/2	1	0.0969

3) 各评价指标理想度的确定。本次调查有 10 个调查样本, 广州大学 4 位机械专业的专家以及芬尼克兹节能设备有限公司研发部的 6 位工程师。收集数据后, 通过公式 (2) 计算出平均值, 方案评价指标的理想度见表 2。

表 2 方案评价指标的理想度
Tab.2 The schemes evaluation indexes'ideality

评价指标	方案理想度得分		
	液压缸升降机构	卷尺弹簧片升降机构	刚性链条升降机构
基本功能	1	0.7368	0.7368
工作性能	0.6632	1	0.8947
动力性能	0.7850	1	0.8570
经济性能	1	0.7223	0.7556
结构性能	0.6667	0.8334	1

4) 方案的优度计算。综上, 3 个方案关于评价指标: 基本功能 c_1 、工作性能 c_2 、动力性能 c_3 、经济性能 c_4 、结构性能 c_5 的理想度分别为:

$$L_{c_1} = (L_{c_1}(W_1), L_{c_1}(W_2), L_{c_1}(W_3)) = (1, 0.7368, 0.7368);$$

$$L_{c_2} = (L_{c_2}(W_1), L_{c_2}(W_2), L_{c_2}(W_3)) = (0.6632, 1, 0.8947);$$

$$L_{c_3} = (L_{c_3}(W_1), L_{c_3}(W_2), L_{c_3}(W_3)) = (0.7850, 1, 0.8570);$$

$$L_{c_4} = (L_{c_4}(W_1), L_{c_4}(W_2), L_{c_4}(W_3)) = (1, 0.7223, 0.7556);$$

$L_{c5} = (L_{c5}(W_1), L_{c5}(W_2), L_{c5}(W_3)) = (0.6667, 0.8334, 1)$ 。

方案 1 关于各评价指标的理想度为 $L(W_1) = (1, 0.6632, 0.785, 1, 0.667)^T$ ；方案 2 关于各评价指标的理想度为 $L(W_2) = (0.7368, 1, 1, 0.7223, 0.8334)^T$ ；方案 3 关于各评价指标的理想度为 $L(W_3) = (0.7368, 0.8947, 0.857, 0.7556, 1)^T$ 。

根据公式 (4) 可以得到各个方案的理想优度：液压缸升降机构为 $Y(W_j) = \alpha L(W_j) = 0.8072$ ；卷尺弹簧片升降机构为 $Y(W_j) = \alpha L(W_j) = 0.8417$ ；刚性链升降机构为 $Y(W_j) = \alpha L(W_j) = 0.8069$ 。对比 3 个理想优度，卷尺弹簧片升降机构较优，下面选择卷尺弹簧片升降机构进行结构分析。

4 卷尺弹簧片升降机构设计

升降装置内部结构见图 3，由箱体、驱动链条、从动链轮、主动链轮、卷尺弹簧片、底座、外套筒、若干中间套筒、中心套筒 3 及连接销钉组成。

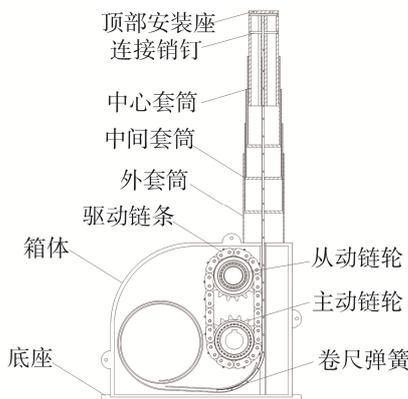


图 3 升降装置内部结构

Fig.3 The structure of lifting mechanism

卷尺弹簧片升降机构的工作过程为：电机通过减速箱输出轴与键直接和主动链轮相连，动力从主动链轮传入，主动链轮带动驱动链条运动，通过驱动链条带动从动链轮转动，同时驱动链条通过球形凸起啮合到柔性卷尺弹簧片，驱动柔性卷尺弹簧片运动，随后卷尺弹簧片推动伸缩套筒组的运动，这样实现了装置的升降运动。

卷尺弹簧片升降机构中卷尺弹簧片的结构尺寸是关键参数，需要进行优化，卷尺弹簧片几何参数与力学模型见图 4，基于轴压开口圆柱薄壳理论以及其临界载荷理论，可知其屈曲时的载荷，将此作为卷尺弹簧片支撑的最大值，以许用应力强度理论和

边界条件作为卷尺弹簧片的设计约束条件^[10-11]，对卷尺弹簧片进行最优解设计，建立参数优化模型，如公式 (5)。

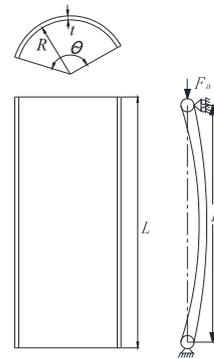


图 4 卷尺弹簧片几何参数与力学模型

Fig.4 Geometric parameter and mechanics model of tape spring shells

$$\begin{aligned} \min \quad & m = \frac{1}{2} \rho L x_1 (R_2 - x_2^2) \\ \text{s.t.} \quad & g_1(x) = \frac{2F}{x_1 (R_2 - x_2^2)} - \sigma_y \leq 0 \\ & g_2(x) = 3.2 \times 10^{-14} \frac{E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} (L \times 10^3)^{-1.5} \\ & (x_2 \times 180 / \pi)^{2.4} (x_1 \times 10^3)^{3.5} (t \times 10^3)^2 - F_{CR} \leq 0 \quad (5) \\ & g_3(x) = -x_1 < 0 \\ & g_4(x) = x_1 - \frac{\pi}{2} < 0 \\ & g_5(x) = -x_2 < 0 \end{aligned}$$

其中：设计变量为扇形角 θ 、卷尺弹簧片的半径 r ，这里分别用通用变量 x_1, x_2 代替； L 为卷尺长度； $g_1(x)$ 为许用应力约束条件； F 为压力； σ_y 为许用应力； $g_2(x)$ 为屈曲临界载荷约束条件； E 为弹性模量； ν 泊松比； F_{CR} 为屈曲载荷； $g_3(x) \sim g_5(x)$ 为边界约束条件。

对上述优化模型用 MATLAB 程序求解，得到的最优值是 $m=0.287 \text{ kg}$ 。对应的扇形角和半径为 $\theta = 24.6^\circ$ ， $r=52.5 \text{ mm}$ 。由于需要在卷尺弹簧片上开孔，会对卷尺弹簧片产生削弱的作用，由屈曲临界载荷公式可知，扇形角和半径的指数成正比，因此在此基础上增大扇形角和半径以增加其屈曲强度，保证开孔之间的有效弧长，最优解的弧长为 $l = \frac{180\theta r}{\pi} = 22.5 \text{ mm}$ 。选取卷尺弹簧片的扇形角和半径为 $\theta = 45^\circ$ ， $r=57.8 \text{ mm}$ 。考虑到其可弯曲性，厚度 t 初选为 1.2 mm 。

对于升降装置的卷尺弹簧片中，既要求其在垂

直状态下有足够的刚性以支撑重物, 又要有一定的柔性以能使回缩时弯曲储存, 这主要利用其正面所需弯矩远小于其反面弯矩的特殊性能, 以及其在发生屈曲时应变能会产生突减, 因此在收纳装置和拐角处预先设置导轨, 使卷尺弹簧片由垂直状态进入收纳部分过渡位置时处于屈曲状态, 从而使其在一定转弯半径下实现自动弯曲。其正向弯矩可以根据薄板弯曲理论公式(6)进行计算。

$$M_x = D(\Delta k_x + \nu \Delta k_y) \quad (6)$$

其中: D 为抗弯刚度, $D = Et^3 / [12(1 - \nu^2)]$; Δk_x 为沿长度方向的曲率; Δk_y 为横截面方向的曲率。再结合最小势能原理, 可以得到最小的正向弯矩。

$$M_x = D\theta(-1 + \nu) \quad (7)$$

设计的卷尺弹簧片正向转弯时, 需要的弯矩为 $M_x = 9.91 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

5 结语

(1) 理想优度评价采用评价指标的理想度替代可拓优度评价中的关联函数、关联度计算及其规范化, 简化了可拓优度评价流程, 有利于提高评价效率。(2) 利用理想优度评价方法对包装升降装置运动方案进行评价, 由评价结果可知, 卷尺弹簧片升降机构的综合性能较好。(3) 对卷尺弹簧片升降机构的卷尺弹簧片进行优化分析, 得到较优的几何参数, 卷尺弹簧片的扇形角和半径为 $\theta = 45^\circ$, $r = 57.8 \text{ mm}$; 厚度 t 为 1.2 mm 。并计算了其回缩时的弯曲力矩 $M_x = 9.91 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。这些数据将为卷尺弹簧片升降机构的设计与优化提供数据支持。

参考文献:

- [1] 杨春燕, 蔡文. 可拓工程[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
YANG Chun-yan, CAI Wen. Extenics Engineering[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [2] 汪利, 邹慧君. 机械运动方案的三级模糊综合评价[J]. 机械设计与研究, 1998, 15(1): 9—11.
WANG Li, ZOU Hui-jun. Three Stage Fuzzy Comprehensive Evaluation of Mechanical Motion Scheme[J]. Machine Design & Research, 1998, 15(1): 9—11.
- [3] 薄瑞峰, 黄洪钟, 薛立华. 基于神经网络的机械运动方案多级模糊综合评价模型[J]. 工程设计学报, 2006, 13(2): 65—69.
BO Rui-feng, HUANG Hong-zhong, XUE Li-hua. Study on Multi-level Fuzzy Synthetic Evaluation Model for Mechanical Kinematical Scheme Based on Neural Network[J]. Journal of Engineering Design, 2006, 13(2): 65—69.
- [4] 古莹奎, 吴陆恒. 机械运动方案评价中评价因素权重确定的模糊层次分析法[J]. 中国机械工程, 2007, 18(9): 1052—1055.
GU Ying-kui, WU Lu-heng. A Fuzzy AHP Approach to the Determination of Weight of Evaluation Factors in Mechanism Scheme Evaluation Process[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(9): 1052—1055.
- [5] 石兰芳, 张萃. 基于模糊可拓的大吨位起重机液压缸可靠性评价[J]. 液压与气动, 2014, 38(9): 48—53.
SHI Lan-fang, ZHANG Cui. Evaluation of Reliability Based on Fuzzy Extension Model for Cylinder of Large Tonnage Crane[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2014, 38(9): 48—53.
- [6] 江帆, 杨鹏海. TRIZ 理论与可拓学的融合方法研究[J]. 广州大学学报, 2014, 13(6): 59—64.
JIANG Fan, YANG Peng-hai. Study of the Combined Method Based on TRIZ and Extenics[J]. Journal of Guangzhou University, 2014, 13(6): 59—64.
- [7] 江帆. TRIZ 与可拓学比较及融合机制研究[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2015.
JIANG Fan. Study on the Comparison and Integration Mechanism between TRIZ and Extenics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2015.
- [8] 江帆. TRIZ 创新应用与创新工程教育研究[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2013.
JIANG Fan. TRIZ Innovation Applications and Innovation Engineering Education[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2013.
- [9] 康辉, 赵凯勋. 基于层次分析法的汽车设计方案评价模型[J]. 包装工程, 2014, 35(22): 53—57.
KANG Hui, ZHAO Kai-xun. Evaluation Model of Automobile Design Scheme Based on Analytic Hierarchy Process[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(22): 53—57.
- [10] 方伟中. 新型半自动手推叉车设计[D]. 广州: 广州大学, 2015.
FANG Wei-zhong. A Design of a New Semi-auto Hand Pallet Forklift[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2015.
- [11] 向雪梅, 马振利, 欧忠文. 受限空间车载升降装置方案研究[J]. 包装工程, 2013, 34(7): 56—60.
XIANG Xue-mei, MA Zhen-li, OU Zhong-wen. Scheme Research of Vehicular Lifting Device for Restricted Space[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(7): 56—60.