

基于模糊理论和 AHP 的高速列车 端部舱设计方案评价

马思群¹, 王一丰¹, 苏众庆², 董小鹏³

(1. 大连交通大学 交通运输学院, 辽宁 大连 116028; 2. 香港理工大学 深圳研究院, 广东 深圳 518057; 3. 厦门大学 信息科学与技术学院光波技术研究所 福建 厦门 361005)

摘要: 为了使企业在面对多种结构相似的设计方案, 能做出正确、合理的选择, 提出了基于模糊理论和层次分析法的某型动车组端部舱设计方案的评价研究。为辅助工程师进行设计方案的选择, 在综合考虑制造成本、强度、抗疲劳性能的基础上, 构建了设计方案的综合评价指标体系; 借助模糊数学理论, 利用中值法确定评价因素与评价集的隶属度, 利用层次分析法确定因素权重, 对动车组端部舱三种设计方案分别进行模糊综合评价, 从中获得最优设计方案。实践表明, 所建立的评价体系可以快速获得客观综合评价结果, 能为企业设计方案的择优选择提供依据。

关键词: 动车组; 端部舱; 模糊理论; AHP

文献标识码: A

DOI:10.13291/j.cnki.djdxac.2015.02.008

0 引言

高速动车组端部舱位于动车组车下设备仓的端部, 是设备仓的重要组成部分。现有三种设计方案可供端部舱选择, 方案主要的差异体现在部分板材的厚度, 其造成了端部舱的强度、抗疲劳性能及成本等的差异, 不同的设计方案在不同的性能指标或者成本上有着不对称优势。按常规的评价方法无法快速确定最优方案, 其指标的综合评价具有模糊性。针对涉及到多个因素或指标的综合评价, 国内外学者多引用模糊数学理论解决该问题。如天津大学马一太、曾宪阳^[1]等把模糊评价方法运用在对地铁火灾危险性评估上; 大连交通大学王洪德、潘科^[2]等建立了模糊评价模型分析了地铁运营安全性; 哈尔滨工程大学穆瑞、张家泰^[3]等重点研究了模糊理论体系内评价因素权重的获取。

本文针对动车组端部舱设计时对多种相似的设计方案难以选择的问题, 在综合考虑制造成本、

强度、抗疲劳性能的基础上, 提出了基于模糊理论和层次分析法构建综合评价指标体系的方法, 快速完成了设计方案的择优选择。

1 综合评价体系及原理

1.1 综合评价体系的确立

体现轨道交通产品的性能优劣的指标主要有: 强度、抗疲劳特性、环境适用性及制造成本等。

强度分析和产品的抗疲劳特性体现在产品的设计阶段, 其中强度分析的流程为: 首先将产品的几何模型抽象为有限元网格模型, 然后依据计算标准, 添加相应的位移约束以及载荷等, 构建用于计算的仿真模型, 最后提交相应的软件中进行求解, 获得产品的在不同工况下的强度数据及变形结果。产品的抗疲劳特性可以利用虚拟疲劳实验技术来完成。虚拟疲劳实验(Virtual Fatigue Test, VFT), 是利用有限元软件(如 Ansys)的计算结果的基础上, 在计算机虚拟环境下, 利用专用软件

* 收稿日期: 2014-05-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51220001); 中国铁道总公司科技研究开发计划资助项目(2013J012-B); 大连市科技计划资助项目(2011D11ZC093)

作者简介: 马思群(1969-) 男, 教授, 博士, 主要从事大型焊接构件焊接残余应力预测、多学科优化设计、虚拟现实技术的研究

E-mail: masiqun@djtu.edu.cn.

(如 Fe-safe) 实现产品在特定工况下的该产品整体的疲劳性能的快速校核。

对于铁路车辆产品焊接结构的疲劳寿命预测, 应将关注的重点放在焊缝的疲劳上, 所采用的技术路线为: 以产品有限元分析为基础, 运用名义应力法^[4], 国际焊接学会 IIW 标准中提供的焊接

接头形式、S - N 曲线试验数据, 依据 Miner 线性累积损伤理论进行疲劳寿命评估。

某型号动车组端部舱在设计时获得三种相似的方案, 影响三种方案的评价指标除了上面两种疲劳性能指标外, 还有制造成本、强度指标等。三种方案各评价因素指标详细数据如表 1 所示。

表 1 各方案性能指标数据

目标	端部舱设计方案		各方案性能指标数据		
	方案类别	制造成本 / 万元	强度指标 / MPa	整体疲劳性能 (循环次数)	焊缝疲劳性能 (循环次数)
端部舱设计方案综合评价	方案一	15	249.3	2.08E + 7	4.820E + 8
	方案二	13	252.1	1.85E + 7	3.018E + 8
	方案三	11	255.5	1.43E + 7	2.938E + 8

1.2 模糊理论及层次分析法原理

查德(L. A. Zadeh) 于 1965 年首先提出模糊集的概念^[5]。模糊集是指用来表示界限或边界不分明具有特定性质事物的集合。则模糊集合 A 的隶属函数是指满足给定的映射 $\mu_A: \mu_A: U \rightarrow (0, 1); u \rightarrow \mu_A(u)$ 设: 论域 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 为评价指标或评价因素的集合, 其中每一因素都是评价的“着眼点”; 又设 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 是评价等级的集合。

模糊评价中由评价等级来衡量评价因素, 一般分成 5 个级别, $V = \{优, 良, 中, 可, 差\}$, 记为向量 $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$ 。在实际应用当中, 根据情况, 可适当增减其中的某些个级别。因素和评价等级用隶属度 (反映着评价体系当中最低级子因素与评价等级之间的隶属关系, 取值范围是 $[0, 1]$) 表达, R_{ij} 表示子因素, r_{ijk} 是对于等级 v_k 的隶属度。对于每一因素 R_i , 统计结果可表示为:

$$R_i = \begin{bmatrix} R_{i1} \\ R_{i2} \\ \vdots \\ R_{im_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{i11} & r_{i12} & r_{i13} & r_{i14} & r_{i15} \\ r_{i21} & r_{i22} & r_{i23} & r_{i24} & r_{i25} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{im_i1} & r_{im_i2} & r_{im_i3} & r_{im_i4} & r_{im_i5} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, R_i 称为评判矩阵, 式(1)的每一行都满足归一化条件, 即 $\sum_{k=1}^5 r_{ijk} = 1$ 。对于每一因素 R_{ijk} 均需要通过一次模糊统计试验来确定其评判矩阵 R_i 。

一阶评判 $B_i = A_i \cdot R_i = (b_{i1} b_{i2} b_{i3} b_{i4} b_{i5})$

式中, $b_{ik} = \sum_{j=1}^{m_i} a_{ij} \cdot r_{ijk}$ 表示因素 u_i 对于等级 v_i 的隶属度; B_i 为 V 上的模糊子集, 也即评判向量。则模糊综合评判 $C_i = B_i \cdot v_i$ 。对于每个因素, 一阶模糊综合判断矩阵 ($[U \times V]$ 上的模糊矩阵) R 为:

$$R = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} & b_{25} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} & b_{35} \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} & b_{45} \end{bmatrix} \quad (2)$$

层次分析法^[6-7] (Analytic Hierarchy Process 简称 AHP) 是在 1973 年由美国著名运筹学家 T. L. Saaty 提出的, 它从本质上讲实际上是一种决策思维方式, 尽管它是近几十年才提出来的, 具有深刻的数学原理和严谨的数学逻辑, 但是运用它却只掌握一些简单的数学工具便可, 它能够把这些复杂的问题体系地细分为各个因素, 同时将这些因素按一定的关系进行排序构成一个递阶层次关系, 然后通过两两比较方式确定层次中各因素的权重, 最后确定一个整体的分析体系和各层各因素的权重。它具有简洁性、实用性、系统性等特点, 是一种实用的多准则决策方法, 可以统一处理决策中的定性与定量因素。

2 端部舱设计方案评价研究

2.1 端部舱方案评价模型的确立

端部舱方案评价模型由目标层, 评价因素子集, 评价对象集组成, 具体模型见图 1。

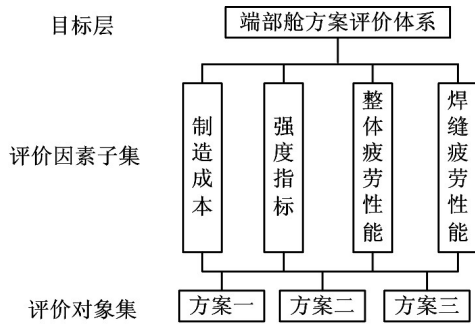


图1 端部舱方案评价模型

2.2 端部舱各评价因素对各评级隶属度的确定

本文对高寒车端部舱,选取制造成本、强度指

标和抗疲劳性能(两种计算方式)四个评价因素进行模糊综合评价。由于4个因素是分析结果或客观数据,已经完全量化,因此隶属度的确定不宜采用调查问卷和专家打分的方法。每个评价等级下的对应数据需要定制标准来确定,而因素数据大小在评价集的分布情况也需要分析。本文根据客观经验,把因素接近最优的实测数据定为评价级中的“优”,把趋于较差的结果定为评价集中的“差”,由于评价因素取值的大小对结果的影响有一定的渐变性,因此假定其符合线性分布规律,得出5个评价等级的对应物理量数据,表2是各因素对应评级中的标准值。

表2 各因素评价指标数据

方案设计影响因素	制造成本/万元	强度指标/MPa	整体疲劳性能(循环次数)	焊缝疲劳性能(循环次数)
优	9	200	1.0E+8	1.0E+9
良	11.75	225	7.5E+7	7.5E+8
中	14.5	250	5.0E+7	5.0E+8
可	17.25	275	2.5E+7	2.5E+8
差	20	300	1.0E+6	1.0E+7

各因素数据的大小在评价级上也认为是线性分布的。这种情况适用中值法,下式为中值法计算隶属函数的通用解析式:

$$\mu_i(x) = 1 - A(x - S_m) \quad (3)$$

式中, μ_i 为评价因素对评价等级的隶属函数,脚码 i 代表评价等级, x 为某因素的值; S_m 为某评价等级的标准值, A 为一种平衡系数,它是使等式两端相等的一个值,当 $(x - S_m)$ 为负时它取负号,当 $(x - S_m)$ 为正时它取正号。求 A 可通过两个评价等级标准值的中值来进行, x 取中值时其对于两个评价级的隶属资格均为0.5,即 $\mu_i(x) = 0.5$,将它和中值并与某一评价级的标准值同时代入通式,即可求得 A 值。

但中值法只能确定一个因素与两个评价级的隶属关系,而本文有五个评价级,由于客观分布规律的相同,可以分别确定一个因素与“优”与“良”的隶属度、“优”与“中”的隶属度、“优”与“可”的隶属度、“优”与“差”的隶属度四组解,对每一组得到的解分别乘以那个组与其它三组“优”的隶属度的最小公倍数,并归一化,最终得到了每个因素值对各个评价级的隶属度,三方案隶属度情况如表3所示。

表3 各因素隶属度数据

	指标	优	良	中	可	差
方案一	制造成本	0.06	0.10	0.62	0.15	0.07
	强度指标	0.01	0.03	0.92	0.03	0.01
	整体疲劳性能	0.04	0.05	0.10	0.67	0.14
	焊缝疲劳性能	0.03	0.06	0.81	0.07	0.03
方案二	制造成本	0.12	0.38	0.32	0.11	0.07
	强度指标	0.03	0.06	0.79	0.08	0.04
	整体疲劳性能	0.04	0.06	0.12	0.57	0.21
	焊缝疲劳性能	0.05	0.07	0.16	0.61	0.11
方案三	制造成本	0.08	0.65	0.14	0.08	0.05
	强度指标	0.06	0.11	0.59	0.17	0.07
	整体疲劳性能	0.05	0.07	0.14	0.41	0.33
	焊缝疲劳性能	0.04	0.06	0.12	0.68	0.10

2.3 端部舱方案影响因素权重的确定

由于这四个评价因素不属于同一类,因此不适合采用非固定权重,因而较适合采用AHP求得。根据评价因素的特性,确定制造成本、强度指标和两个抗疲劳特性的重要度标度分别定为2、5、3、4,构造重要度对比矩阵,得出对比矩阵为:

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

经计算,归一化权向量为: $\omega = [0.13 \ 0.36 \ 0.22 \ 0.29]^T$. 比较矩阵 R 的最大特征值为 $\lambda = 4.03$. 对 R 进行一致性验证 $CI = 0.01$,查表得 $RI = 0.9$ 则 $CR = 0.01 < 0.1$,通过一致性验证. 综上,评价指标体系及权重分配为:制造成本为 0.13;强度指标为 0.36;抗疲劳性能 1 为 0.22;抗疲劳性能 2 为 0.29.

表 4 方案评价结果

		权重	单因素评分	优	良	中	可	差	总评
方案一	制造成本	0.13	48.6	5.4	7.0	31	4.5	0.7	46.2
	强度指标	0.36	50	0.9	2.1	46	0.9	0.1	
	整体疲劳性能	0.22	33.6	3.6	3.5	5	20.1	1.4	
	焊缝疲劳性能	0.29	49.8	2.7	4.2	40.5	2.1	0.3	
方案二	制造成本	0.13	57.4	10.8	26.6	16	3.3	0.7	43.11
	强度指标	0.36	49.2	2.7	4.2	39.5	2.4	0.4	
	整体疲劳性能	0.22	33	3.6	4.2	6	17.1	2.1	
	焊缝疲劳性能	0.29	36.8	4.5	4.9	8	18.3	1.1	
方案三	制造成本	0.13	62.6	7.2	45.5	7	2.4	0.5	42.81
	强度指标	0.36	48.4	5.4	7.7	29.5	5.1	0.7	
	整体疲劳性能	0.22	32	4.5	4.9	7	12.3	3.3	
	焊缝疲劳性能	0.29	35.2	3.6	4.2	6	20.4	1.0	

2.4 端部舱三设计方案评价结果对比

结合以上计算得出最终三方案模糊评价结果如表 4. 五个评价级分别对应 90,70,50,30,10 分. 由表 4 可知,方案一总评分数为 46.2,方案二总评分数为 43.11,方案三总评分数为 42.81,虽然方案一比方案二和方案三的成本高,但在强度指标、抗疲劳性能方面指标性能均较高,综合评分最高,故方案一为最优设计.

3 结论

本文针对某型高速动车组端部舱设计方案的评价研究,将模糊理论和层次分析法引入到端部舱设计方案的评价中,建立了基于上述两种方法的评价模型. 针对评价对象权重值不固定,评价对象的影响因素重要度本身区分不大,对评价对象的影响主要取决于评价因素自身的优劣程度等问题,提出层次分析法确定权重,比传统权重确定方法更客观;再结合模糊理论来解决具有多方案多因素的端部舱方案评价问题,能获得比较准确的结果. 基于层次分析法和模糊理论相结合建立的评价体系,是一种简单、快捷、可靠的评价体系,不

仅仅适用于端部舱方案的研究,也适用与其他部件设计方案的研究,为企业的设计方案评价提供了一种有效手段,使分析结果更具科学性和准确性.

参考文献:

- [1] 马一太,曾宪阳,刘万福. 地铁火灾危险性的模糊综合评判[J]. 铁道学报,2006,28(3):106-110.
- [2] 王洪德,潘科,姜福东. 基于 AHP 的影响城市地铁运营安全的危害分析及预防对策[J]. 铁道学报,2007(2):27-31.
- [3] 穆瑞,张家泰,王正博. 基于递阶质量屋的设计要求权重计算方法研究[J]. 计算机集成制造系统,2008,14(6):1189-1193.
- [4] 赵少汴,王忠保. 抗疲劳设计[M]. 北京:机械工业出版社,1997.
- [5] 姚锡凡,李旻. 人工智能技术及应用[M]. 北京:中国电力出版社,2008.
- [6] 许树柏. 层次分析法原理[M]. 天津:天津大学出版社,1986.
- [7] 郭汉丁. 层次分析法在住宅设计经济性评价中的应用[J]. 石家庄经济学院学报,2002,25(3):220-224.

Study of High Speed Train Terminal Cabin Design Scheme Evaluation Based on Fuzzy and AHP

MA Siquan¹, WANG Yifeng¹, SU Zhongqing², DONG Xiaopeng³

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China; 2. Research Institute of Shenzhen, The Hong Kong Polytechnic University, Shenzhen 518057, China; 3. Study on Optical Technology College of information science and technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: In order to make correct and rational choice, a certain type of EMU terminal cabin design evaluation scheme is proposed based on AHP and fuzzy theory. To assist engineers to select design, an evaluation system of comprehensive evaluating index is designed based on manufacturing cost, strength and fatigue properties. Using the determined value method in evaluation factors and evaluation of set membership, the analysis of hierarchy process is conducted to determine weight, and get the optimal design from the EMU end-class fuzzy comprehensive evaluation of the three design options. Practice shows that this scheme can quickly obtain objective evaluation system established by comprehensive evaluation, which achieves function of selecting design in a scientific way.

Keywords: EMU; terminal cabin; fuzzy theory; AHP

(上接第13页)

Study on Supplying Strategies of Parking Zone in Dalian City

LU Yuhong¹, LU Zhicheng²

(1. Dalian Architectural Design & Research Institute, Dalian 116021, China; 2. Dalian Urban Planning and Design Institute, Dalian 116011, China)

Abstract: With the rapid growth of vehicle population and the expanding scale of city in Dalian, parking problem is increasingly prominent, which shows a characteristic of regional differences. On the basis of summarizing the experience of other cities and considering the status-quo and planning of Dalian, a parking zone scheme is proposed, and the supply strategies of the parking establishments are given in each zone, which provides a reference for the development of parking system in the future.

Keywords: parking zone; supplying strategies; park-and-ride