

# 钢结构吊装施工方案多目标模糊优选研究

侯筱婷<sup>1</sup>, 李昌华<sup>2</sup>, 鲁 萍<sup>1</sup>

(1. 西安建筑科技大学理学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学信息与控制工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘 要:**针对施工方案优选问题,研究了国内外研究现状,发现大部分算法在实际施工中应用于计算机辅助施工决策的案例较少,降低了算法的实用性.提出了钢结构吊装施工方案评价目标体系,研究了多目标模糊优选算法在钢结构吊装施工方案优选中的应用及辅助吊装施工方案科学化决策.为了提高该算法的实用性和可靠性,结合实例探讨了判断矩阵一致性检验及改进、主客观综合赋权法等可以进一步深入研究的问题,编写 Matlab 程序实现了相关算法,可以存入虚拟吊装系统后台施工算法库,提高系统的智能特性.结果表明:判断矩阵一致性检验是必要的,否则会影响决策可靠性;将多目标模糊优选算法应用于钢结构吊装施工方案优选是可行的和可靠的.

**关键词:**钢结构吊装;多目标模糊优选;施工方案优选;判断矩阵;虚拟吊装

**中图分类号:**O221.6;TU72;TU973+.13 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7930(2013)02-0275-05

钢结构由于其自身的特点和结构形式的多样性,体现了在建筑方面的综合效益,我国的钢结构施工也正处于蓬勃发展的时期.钢结构工程中吊装施工是一项比较复杂的系统工程,影响着整个工程的造价、进度、安全和质量,尤其需要避免由于吊装施工方案不合理而导致资源严重浪费以及重大安全事故的发生.实际施工中,需要综合考虑多项评价目标来制定或优选吊装方案.其中,工期、成本等客观的定量目标可以比较准确的表达,然而诸如施工难易程度、环境影响等具有模糊性的定性目标,往往带有较多的主观成分,难以准确表达,这些目标之间又可能相互作用和矛盾,使得施工方案优选决策过程相当复杂,多依赖于决策者的工作经验,主观任意性降低了方案可靠性.所以,需要建立一个科学的综合考虑各种定量、定性目标的优化模型来实现吊装施工方案的优选.

目前,国内外学者针对施工方案优选问题,将层次分析法、多目标规划法、灰色关联分析法、遗传算法、模糊数学理论以及神经网络理论相结合,诸如多目标模糊优选、灰色多层次综合评判、BP神经网络及网络计划多目标优化等方法成为热点研究方向<sup>[1-4]</sup>,但实际应用于计算机辅助施工决策系统的案例较少,钢结构吊装施工方案优选没有应用.本文深入研究了多目标模糊优化决策理论,将其应用于钢结构吊装施工方案科学化决策,并基于 Matlab 实现了相关算法,存入施工算法库,为后续虚拟吊装系统的开发中实现计算机辅助施工决策模块奠定了基础.

## 1 多目标模糊优化决策理论

多目标决策方法是从 20 世纪 70 年代中期发展起来的一种决策分析方法,现在已经广泛应用于工程管理、经济管理、能源、环境、人口等领域.多目标决策中存在着三个基本的要素:(1)可供选择的方案;(2)衡量选择方案的多个目标,即方案的选择取决于对多个目标的满足程度;(3)效用函数,即以衡量每种方案的收益或损失.然而,实际问题中的多个目标及效用函数大都具有模糊性,很难用数学表达式清楚表示.1970 年,南加州大学教授 R. E. Bellman 与 L. A. Zadel 在多目标决策的基础上,提出了模糊决策的数学模型即多目标模糊优化决策,较好地解决了多目标优化问题,被研究人员逐步发展和推广.<sup>[5-8]</sup>

收稿日期:2012-11-20 修改稿日期:2013-03-27

基金项目:陕西省教育厅专项科研计划项目(12JK0967)

作者简介:侯筱婷(1979-),女,河南林州人,博士研究生,讲师,主要研究方向:虚拟施工技术.

### 1.1 基于多目标模糊优化决策的施工方案优选过程

设某个具体的施工工程有  $m$  个可行方案,选取  $n$  个目标对方案进行评价,则方案优选过程如图 1 所示.其中,求特征值矩阵之前先需完成定性目标的量化,求权重矩阵还需先构造判断矩阵.

### 1.2 基于两级比例法的定性目标量化方法

定性目标的量化,普遍采用 MacCrimmon 提出的两级比例法,一般可将定性目标分为 5 个、7 个或 9 个等级.例如施工安全性这一定性目标的量化,采用 5 个等级,即(差,较差,一般,较安全,安全);如果采用 7 个等级,即(很差,差、较差、一般、较安全、安全、很安全).假设定性目标的评语集映射在  $[0,1]$  区间,可以分别给出评定值:5 级(0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9),7 级(0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8).

文献[3]中提出的集值统计量化法是经典统计与模糊统计的拓广,需要一定数量(一般不超过 20 人)的领域专家独立将各方案中的定性目标通过 3~5 次估值,使得该定性目标稳定在一个区间范围,则多个专家对此定性目标可以得出多个区间估计,然后计算分布,进而完成定性目标的量化.集值统计量化法可以减少量化结果的失真,使得定性目标量化更加客观、合理.

### 1.3 基于主客观综合赋权法的目标权重确定

多目标决策问题中目标的相对重要程度是一个重要的信息,称为目标权重(或目标加权系数),需要事先客观科学地确定各目标的目标权重.目前,确定权重的方法大致可分为主观赋权法和客观赋权法两类.主、客观赋权法具有各自的特点,但都存在一定的局限性,文献[3]、文献[5]和文献[6]提出了采用主客观综合赋权法确定各目标的权重,在一定程度上克服了单一赋权法的不足之处.主客观综合赋权法求解权重矩阵的过程如图 2 所示.

## 2 钢结构吊装施工方案评价目标体系

钢结构吊装施工是一个复杂的系统工程,方案的选择与众多因素相关.对某个具体的钢结构工程可能会有几种可行的吊装方案,需要建立一个能够综合考虑各种因素的优化模型进行吊装方案的优选工作,避免纯经验主义,使得吊装方案建立在客观性、科学性的基础上.

依据多目标模糊优化决策理论,首先确定评价吊装方案优劣的评价目标体系,包括定量目标和定性目标.定量目标主要有:(1)吊装成本.一般包括吊装设备费用、人工费用、安全措施费用及临时设施费用等,和工程结构的复杂度、施工现场条件等因素密切相关;(2)吊装工期;(3)吊装过程中的结构稳定系数.根据结构特点,应用辅助分析软件(如:ANSYS)进行施工数值仿真模拟,即施工验算(如:吊装顺序模拟,分析杆件应力和变形等是否满足要求),分析该方案在吊装施工阶段结构的稳定性,求解稳定系数.定性目标有:(1)吊装工艺的可行性和可靠性,是否有成功的先例和配套的设备;(2)吊装难易程度;(3)工作量大小,即主要指对安全性要求较高的高空作业

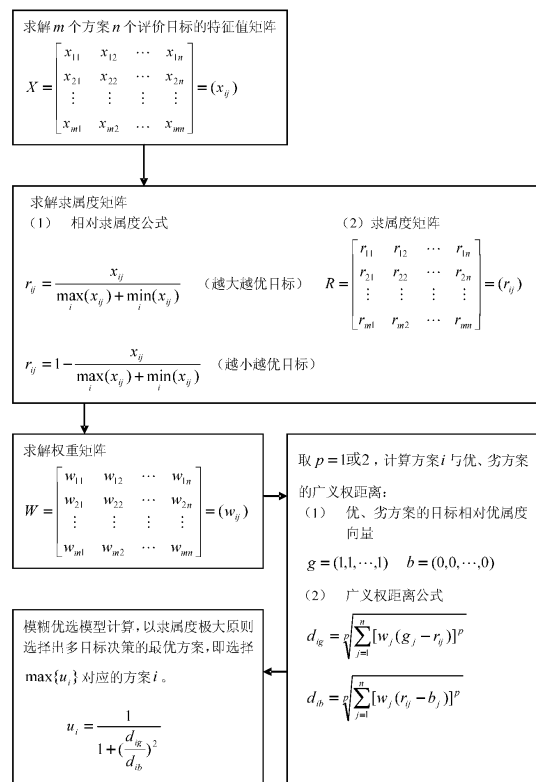


图 1 基于多目标模糊优化决策的施工方案优选过程

Fig. 1 Process of optimization of construction scheme based on multi-objective fuzzy optimization and decision-making

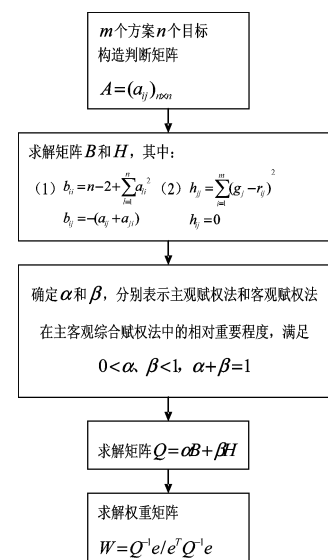


图 2 主客观综合赋权法求解权重矩阵过程

Fig. 2 Process of solving weight matrix based on the subjective and objective integrated approach

工作量,应尽量减少;(4)现场吊装机具和空间的利用率;(5)吊装过程中的干涉程度,即吊装过程中构件、吊装机具之间可能发生碰撞的程度.可以应用仿真技术和虚拟现实技术,实现吊装方案模拟试验,分析干涉情况;(6)安全性,必须坚持安全第一的原则;(7)环境影响程度,即分析在客观的施工现场条件下该方案和周边的土建施工环境、建筑物等相互影响的程度.

3 钢结构吊装施工方案多目标模糊优选实例分析

某钢结构工程吊装施工有 3 种可行方案,基于多目标模糊优化决策理论的施工方案优选过程如下:

(1) 计算特征值矩阵和隶属度矩阵

具体分析该工程的结构及施工环境等特点,将吊装施工评价目标体系定为:吊装成本、吊装工期、吊装工艺的可靠性、吊装难易程度、吊装干涉程度、安全性.对其中的定性目标完成量化,均采用 7 个等级:吊装工艺的可靠性(很差,差,较差,一般,较可靠,可靠,很可靠)、吊装难易程度(很容易,容易,较容易,一般,较困难,困难,很困难)、吊装干涉程度(很小,小,较小,一般,较大,大,很大)、安全性(很差,差,较差,一般,较安全,安全,很安全),应用量化方法,经过专家评估后,得到对应于 3 个方案的量化值表,如表 1 所示.

据表 1,得到特征值矩阵为:

$$X = \begin{bmatrix} 230 & 110 & 0.7 & 0.6 & 0.4 & 0.7 \\ 260 & 130 & 0.8 & 0.5 & 0.5 & 0.7 \\ 190 & 102 & 0.6 & 0.4 & 0.5 & 0.6 \end{bmatrix}$$

据图 1 中所示的相对隶属度公式,得到隶属度矩阵为:

$$R = \begin{bmatrix} 0.49 & 0.53 & 0.5 & 0.4 & 0.56 & 0.54 \\ 0.42 & 0.44 & 0.57 & 0.5 & 0.44 & 0.54 \\ 0.58 & 0.56 & 0.43 & 0.6 & 0.44 & 0.46 \end{bmatrix}$$

(2)构造判断矩阵

构造判断矩阵一般采用 A. L. Sarry 教授提出的 1~9 及其倒数的标度法,即通过领域专家对各目标进行两两比较,可以用 9 种判别很好地表示出来相对于总体而言两两目标之间相对重要程度,用数量表示就是 9 个标度,如表 2 所示.1~9 标度法构造的初始判断矩阵使用前要进行一致性检验<sup>[8]</sup>,通不过检验的判断矩阵要采用一些方法改进<sup>[9]</sup>为具有满意一致性的判断矩阵才可以使用.但有时改造后的矩阵和专家给的初始矩阵相差较大,由此做出的决策可靠性差.为了进一步提高决策的可靠性,文献[10]提出的比例标度法和文献[11]提出的标度扩展构造法构造的判断矩阵是完全一致性的,无需进行一致性检验,可以借鉴探讨.

据表 2,经过施工专家评估,最终给出的判断矩阵为:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 1/3 & 2 & 4 & 1/9 \\ 1/3 & 1 & 1/5 & 1/3 & 3 & 1/9 \\ 3 & 5 & 1 & 3 & 5 & 1/7 \\ 1/2 & 3 & 1/3 & 1 & 3 & 1/9 \\ 1/4 & 1/3 & 1/5 & 1/3 & 1 & 1/9 \\ 9 & 9 & 7 & 9 & 9 & 1 \end{bmatrix}$$

采用文献[6]提出的基于几何一致性指数的判断矩阵一致性改进方法,计算得到矩阵 A 的几何一致性指数  $I = 0.306 > 0$ ,要改进才能使用.基于如图 3 所示的算法流程图,改进后的判断矩阵为:

表 1 方案各目标量化值表

Tab. 1 Quantitative values of objectives

	吊装成本 /万元	吊装工期 /d	吊装工艺 可靠性	吊装难易 程度	吊装干涉 程度	安全性
方案 1	230	110	0.7	0.6	0.4	0.7
方案 2	260	130	0.8	0.5	0.5	0.7
方案 3	190	102	0.6	0.4	0.5	0.6

表 2 目标相对重要程度标度表

Tab. 2 Scale-table of the relatively important extent of objectives

目标 $x$ 和 $y$ 相比较	标度值
$x$ 和 $y$ 同等重要	1
$x$ 比 $y$ 稍微重要	3
$x$ 比 $y$ 明显重要	5
$x$ 比 $y$ 强烈重要	7
$x$ 比 $y$ 绝对重要	9
$x$ 比 $y$ 处于以上两相邻判断之间	2,4,6,8 取其一
$y$ 比 $x$ 的标度值取上述相应值的倒数	

$$A = \begin{bmatrix} 1.000 & 2.228 & 0.547 & 1.327 & 3.366 & 0.163 \\ 0.449 & 1.000 & 0.247 & 0.597 & 1.524 & 0.074 \\ 1.828 & 4.047 & 1.000 & 2.409 & 6.099 & 0.296 \\ 0.753 & 1.690 & 0.415 & 1.000 & 2.547 & 0.124 \\ 0.297 & 0.656 & 0.164 & 0.393 & 1.000 & 0.049 \\ 6.127 & 13.499 & 3.381 & 8.076 & 20.340 & 1.000 \end{bmatrix}$$

计算得到矩阵  $A$  的几何一致性指数  $I = 0.000\ 03 \cong 0$ , 满足一致性要求, 可以使用。

### (3) 主客观综合赋权法求解权重矩阵

根据图 2 所示计算权重矩阵, 取  $\alpha = 0.3, \beta = 0.7$ , 计算出矩阵  $B$ 、 $H$  :

$$B = \begin{bmatrix} 46.734 & -2.677 & -2.375 & -2.081 & -3.663 & -6.290 \\ -2.677 & 211.842 & -4.294 & -2.282 & -2.180 & -13.573 \\ -2.375 & -4.294 & 16.990 & -2.824 & -6.263 & -3.677 \\ -2.081 & -2.282 & -2.824 & 78.286 & -2.939 & -8.199 \\ -3.663 & -2.180 & -6.263 & -2.939 & 476.050 & -20.389 \\ -6.290 & -13.573 & -3.677 & -8.199 & -20.389 & 5.137 \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} 0.77 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.73 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.76 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.77 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.82 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.71 \end{bmatrix}$$

则, 权重矩阵为:

$$W = [0.103 \quad 0.045 \quad 0.188 \quad 0.077 \quad 0.029 \quad 0.559]$$

### (4) 确定最优方案

根据图 1 计算得到  $\mu_i (i = 1, 2, 3)$  的值分别为: 0.533, 0.546, 0.463, 以隶属度极大原则, 所以方案 2 为最优方案, 可以提供参考。

进一步分析表明, 如果对初始判断矩阵  $A$  不进行一致性改进, 则  $\mu_i (i = 1, 2, 3)$  的值分别为: 0.543, 0.539, 0.463, 呈现出方案 1 为最优方案, 可以看出方案决策是不可靠的, 因此证明了判断矩阵的一致性非常重要。

上述施工方案优选求解过程中所有算法均通过 Matlab 编程实现, 可以存入虚拟吊装系统后台施工算法库中, 直接调用, 缩短决策时间, 避免人工计算的错误, 辅助增强系统的智能特性, 算法结果如图 4 所示。尤其对于一些社会影响度高的复杂大型的钢结构工程, 吊装方案的制定要非常慎重。可以首先经过专家论证给出多个候选方案, 再应用虚拟吊装系统对吊装过程进行交互式虚拟仿真, 辅助分析并量化方案优选的各评价指标值, 然后直接调用该算法模块求解最优方案, 提供专家参考, 最终确

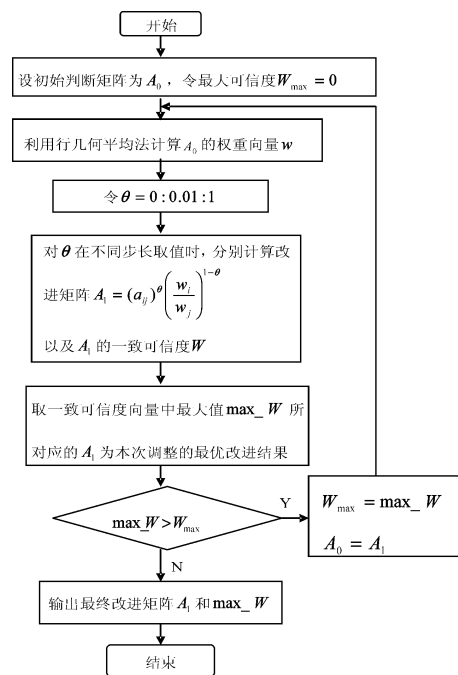


图 3 判断矩阵的一致性改进算法流程图

Fig. 3 Flow chart of arithmetic for improving consistency of comparison matrix

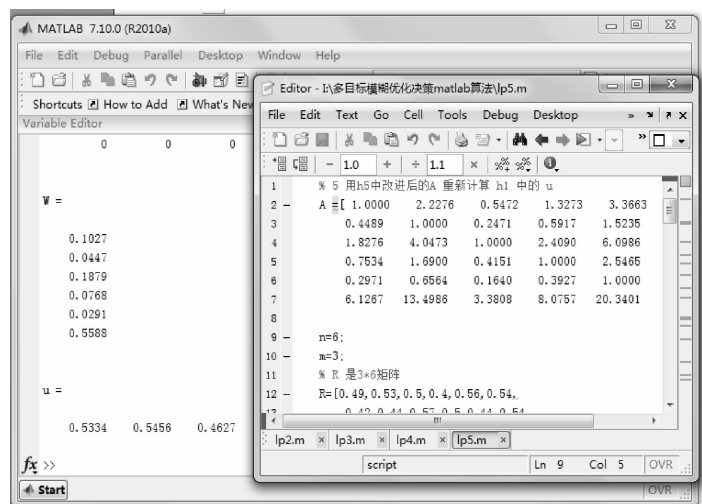


图 4 算法结果 Matlab 图示

Fig. 4 Arithmetic result based on Matlab programming

定最合适的方案。

## 4 结 论

本文针对钢结构吊装施工方案优选所采用的多目标模糊优化决策理论具有良好的可行性和实用性,使得施工方案的选择不单纯依靠施工专家的经验型知识,而是建立在客观性、科学性的基础上,保证了施工各项目标的实现。其中,有几点需要注意以及可以进一步深入研究的问题:(1)采用集值统计量化法完成定性目标的量化、构造初始判断矩阵都需要专家的参与,所以专家组成员的选择很重要,直接影响到决策结果的可靠性。专家需具备丰富的领域经验和合理的知识结构,而且要保证一定数量;(2)具体施工项目具体分析,选择合理的定量目标和定性目标评价体系;(3)具备良好智能交互特性的虚拟吊装系统的研发正在进行中,除了本论文实现的吊装方案多目标模糊优选算法可以作为系统中施工决策模块的一项功能,还需要进一步丰富施工算法库,辅助实现其它施工决策问题。

## 参考文献 References

- [1] WANG J, MALAKOOTI B. A feedforward neural network for multiple criteria decision making[J]. Computer Operations Research, 1992, 19(2): 151-167.
- [2] 李艳玲, 王民寿, 杨兴国, 等. 施工方案优选方法的探讨[J]. 四川水利发电, 2000, 19(3): 80-85.  
LI Yan-ling, WANG Min-shou, YANG Xing-guo, et al. Discussion on optimized method for construction alternative [J]. Sichuan Water Power, 2000, 19(3): 80-85.
- [3] 张海涛. 深基坑支护设计与施工方案优化研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004.  
ZHANG Hai-tao. Optimum research on bracing design and construction schemes for deep foundation pits[D]. Wuhan: Wuhan University, 2004.
- [4] 张 猛, 曹德成. GA 及模糊理论在资源优化配置中的应用[J]. 土木工程学报, 2004, 37(6): 105-110.  
ZHANG Meng, CAO De-cheng. Application in optimize allocation of resources based on GA and fuzzy theory[J]. CHINA CIVIL ENGINEERING JOURNAL, 2004, 37(6): 105-110.
- [5] MA Jian, FAN Zhi-ping, HUANG Li-hua. A subjective and objective integrated approach to determine attribute weights[J]. European Journal of Operational Research, 1999, 112(2): 397-404.
- [6] 许叶军, 达庆利. 基于理想点的多属性决策主客观赋权法[J]. 工业工程与管理, 2005(4): 45-47.  
XU Ye-jun, DA Qing-li. An objective and subjective synthetic approach to determine weights based on ideal-solution for multi-attribute decision making[J]. Industrial Engineering and Management, 2005(4): 45-47.
- [7] 徐裕生. 优化与决策(修订版)[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2004.  
XU Yu-sheng. Optimization and Decision[M]. Xi'an: Shaanxi Science & Technology Press, 2004.
- [8] 宣家骥. 多目标决策[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1989.  
XUAN Jia-yi. Multiobjective Decision[M]. Changsha: Hunan Science & Technology Press, 1989.
- [9] 周群艳, 田 澎, 田志友. 基于几何一致性指数的判断矩阵一致性改进[J]. 西南交通大学学报, 2006, 41(2): 236-240.  
ZHOU Qun-yan, TIAN Peng, TIAN Zhi-you. Consistency Improvement of Comparison Matrix based on Geometric Consistency Index[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2006, 41(2): 236-240.
- [10] 黄德才, 胥 琳. AHP 法中判断矩阵的比例标度构造法[J]. 控制与决策, 2002, 17(4): 484-486.  
HUANG De-cai, XU Lin. Proportion criteria and method for building comparison matrices in the analytic hierarchy process[J]. Control and Decision, 2002, 17(4): 484-486.
- [11] 黄德才, 郑河荣. AHP 方法中判断矩阵的标度扩展构造法[J]. 系统工程, 2003, 21(1): 105-109.  
HUANG De-cai, ZHENG He-rong. Scale-Extending Method for Constructing Judgment Matrix in the Analytic Hierarchy Process[J]. Systems Engineering, 2003, 21(1): 105-109.

(下转第 291 页)

## Best model and countermeasures research on the sustainable development of energy and chemical base in Northern Shaanxi

YAN Wen-zhou, YANG Rui, YU Sen, HUA Shan

(School of Management, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Based on the complex and dynamic nature of the system of sustainable development of Energy and Chemicals Base of Northern Shaanxi, five subsystems of sustainable development in Energy and Chemical Base of Northern Shaanxi are analyzed to explore the causal relationship between subsystems, built system dynamics models of sustainable development of Energy and Chemicals Base of Northern Shaanxi. According to the emphases on economic, social and environmental development, the paper sets for kinds of simulation scheme such as traditional development plan, industrial type development plan, environmental protection development plan, coordinate type development plan. Through computer simulation, the coordinated and balanced development program of economy turned out to be the best model for the sustainable development of the base. The paper concluded that developing circular economy, frugally and intensively utilizing resources, optimizing industrial structuring and strengthening the ecological protection and construction are the best countermeasures to realize the sustainable development of the Base.

**Key words:** *energy and chemical industry Energy; circular economy; optimization of industrial structure; sustainable development*

**Biography:** YAN Wen-zhou, Ph. D., Professor, Xi'an 710055, P. R. China, Tel: 0086-13991285876, E-mail: yan82202896@126.com

(上接第 279 页)

## Research of multi-objective fuzzy optimum seeking on scheme for steel structure lifting construction

HOU Xiao-ting<sup>1</sup>, LI Chang-hua<sup>2</sup>, LU Ping<sup>1</sup>

(1. School of Science, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. School of Information and Control Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Researches at home and abroad working on optimum seeking of construction scheme were investigated. As a result, there are fewer related cases used for the computer-aided construction decision-making system in reality, so that the practicability of algorithm was reduced. A system of evaluation objectives on scheme for steel structure lifting construction was proposed. Application of multi-objective fuzzy optimum seeking algorithm in the optimum seeking of construction scheme for steel structure lifting was studied and the algorithm could assist a scientific decision on scheme for lifting construction. To perfect the practicability and reliability of the algorithm, it discussed such problems, as the examination and improvement of consistency of comparison matrix, the subjective and objective integrated approach to determine attribute weight and so on. It compiled Matlab programs based on the relative algorithm and these programs can be stored into the construction arithmetic database of virtual lifting system for improving the intelligent characteristic. The results indicate that it's necessary to take the test for the consistency of comparison matrix. Otherwise, the reliability of decisions would be affected, and it is feasible and reliable to apply the multi-objective fuzzy optimum seeking algorithm to the optimum seeking of scheme for steel structure lifting construction.

**Key words:** *steel structure lifting; multi-objective fuzzy optimum seeking; optimization of construction scheme; comparison matrix; virtual lifting*

**Biography:** HOU Xiao-ting, Candidate for Ph. D., Xi'an 710055, P. R. China, Tel: 0086-18966914896, E-mail: hxtdatabase@126.com