

Analytic Hierarchy Process on the Selection of Industry Steel Structure System

Wang Hao^{*}, Shen Yuekui

Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, China

Email address:

hao6825@qq.com (Wang Hao), ykshen129@126.com (Shen Yuekui)

^{*}Corresponding author

To cite this article:

Wang Hao, Shen Yuekui. Analytic Hierarchy Process on the Selection of Industry Steel Structure System. *Science Discovery*. Vol. 7, No. 6, 2019, pp. 398-403. doi: 10.11648/j.sd.20190706.14

Received: November 3, 2019; **Accepted:** December 4, 2019; **Published:** December 9, 2019

Abstract: This paper discuss the industry steel structure system. However, nowadays reinforced concrete structure which is widely used has the disadvantages of dead load, long construction time and high total cost of capital. It is urgent to find an alternative structure in the project, and the steel structure can solve this problem very well. Steel structures, being sustainable and environment-friendly, are rarely utilized in reality. In this paper, focusing on the conceptual analysis, the fuzzy multiple decision-making process which solves the multiple attributes problem successful was utilized to deal with the uncertain information of steel structure system, such as economics, mechanical performance, construction conditions and functionality. Based on the Euclid distance, the object function was set up, from the weight vector obtained by Matlab program, the braced-frame structure with floating column is advised as the optimal scheme.

Keywords: Industry Steel Structure System, Structure Type Selection, Steel Frame Structure, Analytic Hierarchy Process

层次分析法在工业特种结构体系选型中应用

王浩^{*}, 申跃奎

西安建筑科技大学土木工程学院, 西安, 中国

邮箱

hao6825@qq.com (王浩), ykshen129@126.com (申跃奎)

摘要: 本文讨论了工业特种结构体系选型问题, 该体系目前多采用的钢筋混凝土结构具有结构自重大, 施工占用井口时间长, 基建总成本高的缺点, 工程中急需寻找其替代结构, 而钢结构体系就很好的解决了这一问题, 但实际工程中还很少采用这一方案, 因此在结构选型时缺少足够的参考依据。本文从概念设计方面对工业特种结构进行选型分析, 采用层次分析法, 将经济效益、受力性能、施工条件、功能性、美学效应等模糊性因素通过定性和定量描述, 以欧氏权距离为基础建立目标函数, 将不确定因素、难以量化的因素进行模糊处理, 借助MATLAB程序求解权向量, 通过综合评分得出框架-支撑结构为最优方案。

关键词: 工业特种结构, 结构选型, 钢框架结构, 层次分析法

1. 引言

井塔是矿山地面工业场地内的重要塔式构筑物[1, 2]。自1959年在阜新五龙煤矿建成我国第一座井塔后,井塔的设计与施工在我国便得到了迅速发展。经过60年的工程实践与发展,井塔在设计、施工、生产、使用和科研等方面积累了丰富的经验,取得了丰硕的成果[3-5]。

井塔结构形式分为钢筋混凝土结构、钢结构和砖石混合结构。目前我国多采用整体浇筑的钢筋混凝土结构,截面多采用箱型、箱框型、圆筒型及框架等形式,其中箱框型钢筋混凝土结构形式应用最为广泛[6, 7]。而钢结构形式在国内很少有工程应用,其研究几乎处于空白。

钢筋混凝土井塔具有承载能力强、刚度大等优点,但是其缺点也很明显,主要表现为:结构自重重大,施工占用井口时间长,从而增加了矿山基建的总成本,因此这些问题亟待改善。综合考虑质量、进度、成本的控制,选用钢结构体系能够有效解决这一问题。

2. 工业特种结构

2.1. 结构特点

钢结构重量轻,建造速度快,对基础要求比较小,有利于地基处理;钢材在工厂加工,运输到施工现场可以实现快速拼装;钢结构可以兼做凿井井架,省去凿井井架拆除时间,节约占用井口时间;钢结构柔性好,具有很强的抗震性能。另外,近年来国家实施资源整合、提倡节能减排等举措,建筑业朝着绿色、生态和现代化理念改革转型,国家及地方政府密集出台发展钢结构建筑的指导文件,这些政策的颁布和实施为推广钢结构提供了有力的政策保障。

基于以上因素,本文提出采用钢结构代替传统的钢筋混凝土结构。

2.2. 概念性分析

对于工业特种结构,目前国内没有大型钢结构实例,因此,首先需要从概念上对结构进行分析,找出较为适宜的体系。通过搜集资料,分析井塔构造特点,概括出结构选型的关键因素,制定出体系选型评价指标,从概念上进行对比分析,选择最符合井塔特点的钢结构体系。

2.3. 选型原则

结构选型应遵循以下原则:

2.3.1. 功能适应性要求

井塔由提升机大厅,塔身和基础三部分组成直立的高耸空间结构。井塔内布置提升机、电动机、导向轮、供电设备等,井塔剖面如图1所示。

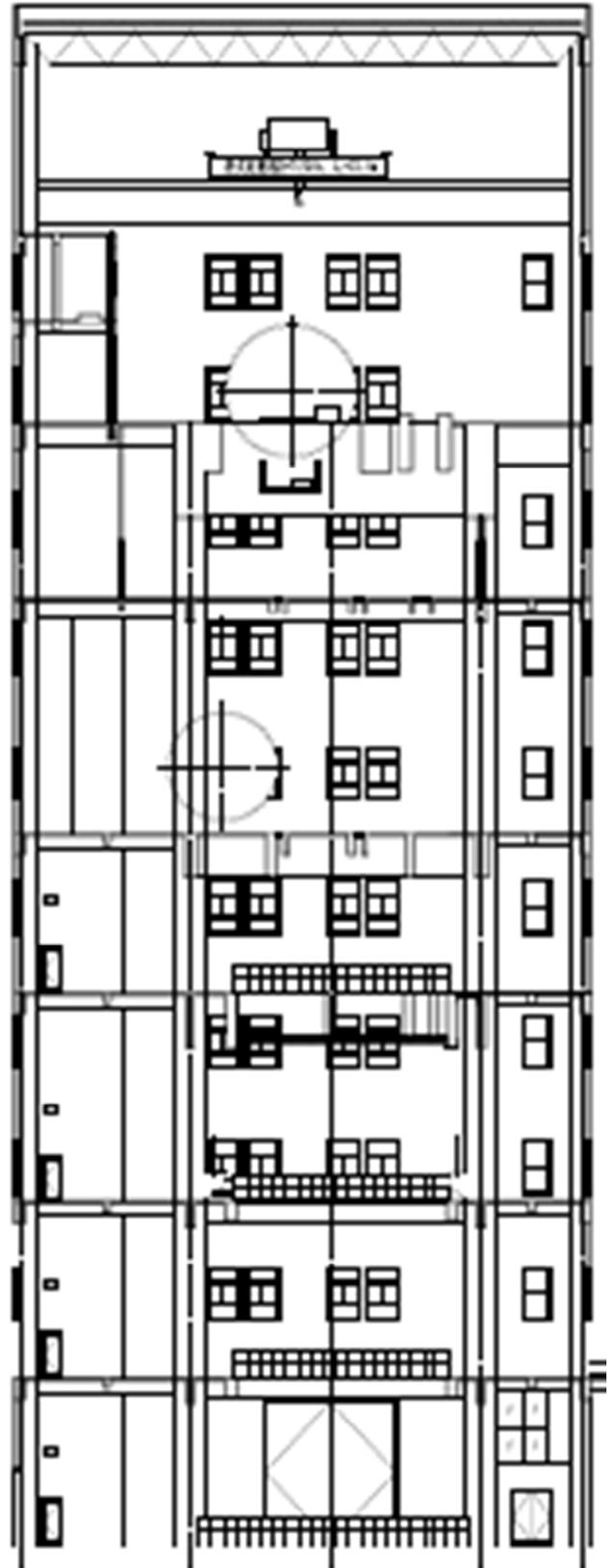


图1 某工业特种结构。

在选择结构形式时,需要保证具有足够空间使这些设备正常运转。

2.3.2. 充分发挥结构自身的优势

每种结构形式都有各自的特点和不足,有其各自的适用范围,所以要结合建筑设计的具体情况进行结构选型。

2.3.3. 施工方便性要求

由于施工技术的不同,结构形式也不同。决定施工可行性的因素主要有两方面:一是工程的难易程度;二是施工人员的自身因素(经验、知识等),对于复杂的结构有时还需要专家进行论证。

2.3.4. 经济有效性要求

当几种结构形式都有可能满足建筑设计条件时,经济条件就是决定因素,尽量采用能降低工程造价的结构形式。

2.3.5. 美学效应要求

美学效应主要可概括为以下4个方面:单体视觉形象美、外部环境系统的协调美、内部功能系统的协调美、结构系统的技术美等。结构构件材料性能及充分发挥的先进性,结构形式的新颖性及高新技术含量,结构形式所决定结构体系的施工工艺、施工技术的先进性、经济有效性及设计理论的先进性等。

3. 层次分析法

3.1. 基本概念

多属性决策的研究始于1957年,当时Churchman, Ackoff 和Arnoff 首次正式利用简单加权法处理了“选择企业投资方案”这样一个多属性决策问题。进入20世纪70年代后,随着决策科学的发展以及实际的需要,多属性决策的研究又开始热门起来[8, 9]。对于一个多属性决策问题,计算流程如图2所示。

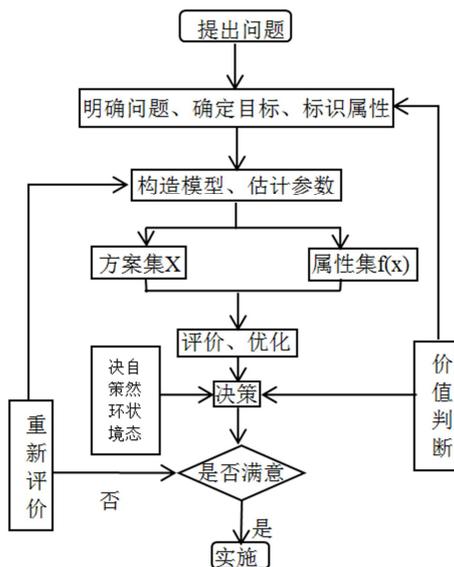


图2 多属性决策流程。

根据模糊优化理论,将结构经济有效性,施工可行性,功能的适用性,安全性等作为优化目标,其余作为约束条

件。设工程有n个方案,对于任意方案j,建造造价低、施工方便,适用性能好,受力性能强的方案是最佳的选型。

多属性决策问题的特点,也是求解的难点在于目标的矛盾性和各目标的属性值不可公度[10]。其中不可公度性可以通过属性矩阵的规范化部分解决,但这些规范化方法无法反映目标的重要性。因此需要引入权的概念。

首先由决策人对目标的重要性进行成对比较,设有n个目标,则需要比较如下次数。

$$C_n^2 = \frac{1}{2}n(n-1) \tag{1}$$

把第i个目标对第j个目标的相对重要性记为 a_{ij} ,并认为这就是属性i的权 w_i 和属性j的权 w_j 之比的近似值, $a_{ij}=w_i/w_j$, n个目标成对比较的结果为矩阵A。

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$\approx \begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{bmatrix}$$

采用本征向量法求最大特征值,即

$$(A - nI)W = 0 \tag{3}$$

其中, I是单位矩阵,如果目标重要性判断矩阵A中的值估计准确,上式严格等于0 (n维0向量),如果A的估计不够准确,则A中元素的小的振动意味着本征值的小的振动,从而有

$$AW = \lambda_{max}W \tag{4}$$

其中, λ_{max} 是矩阵A的最大本征值。由上式可以求得本征向量

$$W = (w_1 \ w_2 \ w_3 \ \dots \ w_n)^T \tag{5}$$

对任意的方案,它满足

$$\sum_{i=1}^4 w_{ij} = 1 \tag{6}$$

为了求得方案对优的相对隶属度 μ_i , 设方案与优、劣的广义欧氏权距离分别为 s_{jg} 与 s_{jh} ,即

$$s_{jg} = \left| \sum_{i=1}^4 [w_{ij} \cdot (1 - k_{ij})]^2 \right|^{1/2} \tag{7}$$

$$s_{jh} = \left| \sum_{i=1}^4 [w_{ij} \cdot k_{ij}]^2 \right|^{1/2}$$

由模糊集合的理论,方案j对劣的相对隶属度为 μ_{pj} , $\mu_{pj} = 1 - \mu_j$,在模糊集合理论中,隶属度可认为是权重,则方案j与优、劣方案之间的权距离分别为 D_{jg} 与 D_{jh} .

$$D_{jg} = \mu_j \cdot s_{ig} \tag{8}$$

$$D_{jh} = \mu_j \cdot s_{ih}$$

根据距离最短的原则,目标函数定义为:方案j的加权距优距离的平方与加权距劣距离的平方之和为最小,即目标函数为

$$\min F_j = D_{jg}^2 + D_{jh}^2 = \mu_j^2 \sum_{i=1}^4 [w_{ij} \cdot (1-k_{ij})]^2 + (1-\mu_j)^2 \sum_{i=1}^4 [w_{ij} \cdot k_{ij}]^2 \tag{9}$$

令其导数为0,得到以距离参数 $P=2$ 的欧氏距离表示的模糊优化模型为

$$\mu_j = \frac{1}{1 + \frac{\sum_{i=1}^4 [w_{ij} \cdot (1-k_{ij})]^2}{\sum_{i=1}^4 [w_{ij} \cdot k_{ij}]^2}} = \frac{1}{1 + \left| \frac{S_{jg}}{S_{jh}} \right|} \tag{10}$$

对于不同的方案,都可以依据以上步骤求得各方案对优的相对隶属度,得到相对隶属度向量为

$$\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_j, \dots, \mu_n) \tag{11}$$

取其中最大者即为最佳方案。

3.2. 一致性检验

为防止在确定相对权值时出现逻辑错误。如A比B重要,B比C重要,但C比A又重要。一致性检验的步骤是先计算判断矩阵的平均偏离指标

$$CI = (\lambda_{max} - n) / (n-1) \tag{12}$$

然后与随机偏离指标RI比较(RI是由500个随机正互反矩阵算得的平均偏离指标的平均值),当其比值 $CR=CI/RI < 0.1$,认为一致性检验通过,否则需调整判断矩阵直到通过为止。

表1 判断矩阵标度及其含义。

| 标度 | 含义 |
|---------|---|
| 1 | 表示两个因素相比具有相同的重要性 |
| 3 | 表示一个因素比另一个稍微重要 |
| 5 | 表示一个因素比另一个明显重要 |
| 7 | 表示一个因素比另一个强烈重要 |
| 9 | 表示一个因素比另一个极端重要 |
| 2,4,6,8 | 为上述两相邻判断的中值 |
| 倒数 | 当i与j相比较取 b_{ij} 时,则j与i的比较取 $1/b_{ij}$ |

表2 随机偏离指标。

| n | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|----|---|---|------|------|------|------|------|------|------|
| RI | 0 | 0 | 0.58 | 0.90 | 1.12 | 1.24 | 1.32 | 1.41 | 1.45 |

4. 结构选型

4.1. 工程实例

井塔资料参数如表3所示,将提升孔布置在井塔一侧,平面一角布置楼梯间与电梯间。

表3 某井塔层高表。

| 楼层 | 层高 (m) |
|-------|--------|
| 首层 | 15.500 |
| 防撞梁层 | 24.900 |
| 导向轮层 | 32.100 |
| 设备层 | 42.700 |
| 提升大厅层 | 50.700 |
| 顶层 | 68.000 |

在井塔结构中,往往需要根据工艺要求设置夹层。因本章重点研究整体结构,对于楼层的选择比较粗略,只考虑关键楼层,夹层不再考虑。关键楼层为首层平面、防撞梁层平面、导向轮层平面、设备层平面、提升大厅层平面。

4.2. 构造结构层次模型

《矿山提升井塔设计规范》给出,“钢筋混凝土结构可采用框架、筒体结构体系;钢结构可采用框架、框架支撑结构体系”。

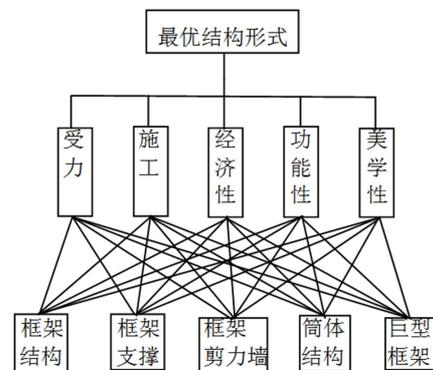


图3 结构选型层次结构模型图。

《高层民用建筑钢结构技术规程》3.2.1给出:“高层民用建筑钢结构可采用以下结构体系:①框架结构,②框架支撑结构(包括框架-中心支撑、框架-偏心支撑等)③框架-延性墙板结构,④筒体结构,⑤巨型框架结构”。这里结合受力和使用特点,从概念上分析井塔钢结构体系的适应性及较优体系,以结构最优形式作为目标层,各影响因素作为准则层,备选方案作为方案层,模型图如图3所示。

4.3. 建立判断矩阵

首先建立准则层到方案层的判断矩阵如表4所示,各标度的含义见表1,借助MATLAB求解判断矩阵的最大特征值并检验其一致性:

表4 准则层到方案层判断矩阵。

| 受力 | 1 | 1/2 | 1/5 | 1/3 | 2 |
|----|-----|-----|-----|-----|---|
| 施工 | 2 | 1 | 1/3 | 1/2 | 4 |
| 经济 | 5 | 3 | 1 | 2 | 7 |
| 功能 | 3 | 2 | 1/2 | 1 | 5 |
| 美学 | 1/2 | 1/4 | 1/7 | 1/5 | 1 |

输出结果如下：

权向量: [0.0876 0.1608 0.4420 0.2603 0.0493]

最大特征值: 5.0415

CI= 0.0104, CR=0.0093<0.1

此矩阵的一致性可以接受!

4.4. 方案比选

对上述五种结构方案采用综合加权评分法进行比较。如表5所示，主要考虑使用功能、结构受力、加工安装、经济造价、美学效应五个影响因素。为了便于不同参数之间统一比较，对数据进行了归一化处理[11,12]，从而确定出最优方案。

表5 钢结构体系对比。

| 因素 | 方案 | 框架结构 | 框架支撑 | 框剪结构 | 筒体结构 | 巨型框架 |
|----|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 受力 | 0.09 | 0.556 | 0.778 | 0.778 | 1.000 | 1.000 |
| 施工 | 0.16 | 1.000 | 1.000 | 0.889 | 0.667 | 0.778 |
| 经济 | 0.44 | 1.000 | 0.950 | 0.850 | 0.850 | 0.950 |
| 功能 | 0.26 | 0.800 | 1.000 | 1.000 | 0.800 | 0.900 |
| 美学 | 0.05 | 0.900 | 0.950 | 0.950 | 1.000 | 1.000 |
| 评分 | 1.00 | 0.903 | 0.956 | 0.894 | 0.829 | 0.916 |

在实际工程中，工业特种结构投资资金大、钢材用量大、早期投资较高，为了快速获得收益，需要重点考虑经济效益。通过上述分析，经济因素的权向量为0.44，是首要考虑因素；另外该结构的布置不同于一般的高层民用建筑，内部布置要求特殊，因此需要考虑功能适应性的影响[13, 14]。功能适用性的权重为0.26，为次要考虑因素。通过综合评分得到，框架支撑结构为0.956，相比于其他备选方案优势明显。

5. 结论

本文从概念上对工业特种结构进行分析，选取了五个主要影响因素，其中受力方面考虑了承载力和刚度的影响；施工条件方面考虑了质量控制难度，材料堆放、运输难度影响；经济效益方面考虑了项目的投资及资金回收速度；功能适用性方面考虑了结构布置影响；美学效用方面考虑了结构形式的新颖性、美观性及高新技术含量，采用层次分析法对工业特种结构选型问题作出了系统讨论。根据实际工程中对各影响因素不同要求，引入了权向量的概念，借助MATLAB程序求解各因素权重后分别对五个备选方案进行科学评分。

根据评分结果，总分数从上到下依次为框架-支撑结构体系，巨型框架结构体系，巨型支撑体系，框架剪力墙结构体系，框架结构体系，筒体结构体系。由此判断，框架-支撑结构体系、巨型框架结构体系更符合井塔的特点。考虑到框架支撑结构评分相对较高，建议采取框架-支撑结构为工业特种结构体系的最优方案。

致谢

本文为陕西省自然科学基金2018JM5130的阶段性成果之一。

参考文献

- [1] 任建喜, 侯俊锋等. 矿山特种结构设计[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社. 2014.
- [2] 瞿金兰, 海石湾矿井主井井塔设计的体会[J]. 煤炭工程, 2007(8): 30-31.
- [3] 周家英, 朱晓辉, 柯文改, 刘庄矿主井井塔设计[J]. 煤炭工程, 2011(6): 5-6.
- [4] 吴兵锐, 刘慧云, 江声述. 济宁三号井特大井塔设计[J]. 山东煤炭科技, 2001(1): 28-29.
- [5] 白丽红, 李玉山. 国内部分井塔情况与陈四楼矿主塔的主要特点[J]. 煤矿设计, 1999(02): 33-37.
- [6] 冯荣杰, 许立功, 赵仁等. 多绳提升机井塔设计[M]. 北京: 煤炭工业出版社. 1984.
- [7] 张家康, 黄文萃. 井塔楼层结构设计问题[J]. 特种结构. 1994, 11(2): 28-33.
- [8] 姬东朝, 宋笔锋, 喻天翔. 基于模糊层次分析法的决策方法及其应用[J]. 火力与指挥控制, 2007, 32(11): 38-41.
- [9] Nikolai Krivulin, Sergei Sergeev. Tropical implementation of the Analytical Hierarchy Process decision method[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2019, 31-51.
- [10] 王力, 吕大海, 张世海, 王光远. 基于相对接近度的结构选型模糊多属性决策方法[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2002, 35 (3): 1-4.
- [11] 王经建, 刘伯权. 结构选型的模糊多属性决策方法[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2004, 24(3): 62-65.

- [12] 赖明, 杨溥.钢筋混凝土抗震结构选型的模糊综合评定法[J]. 建筑结构学报, 1996, 17(4): 44-51。
- [13] 张世海, 王力, 欧进萍, 王光远.高层建筑结构智能型式优化的现状与趋势[J].哈尔滨工业大学报, 2006, 02: 194-198。
- [14] 张世海, 欧进萍, 王光远.高层结构抗震选型的集成加权模糊推理网络法[J]. 2005, 06: 13-19。