

考虑多利益主体的电力与通信共享铁塔综合效益评估

李凌云*, 席小娟, 齐道坤, 李旭阳

(国网河南省电力公司经济技术研究院, 河南省 郑州市 450000)

Evaluation on the Comprehensive Benefits of Shared Towers for Power and Communication Considering Multi-stakeholders

LI Lingyun*, XI Xiaojuan, QI Daokun, LI Xuyang

(State Grid Henan Economic and Technological Research Institute, Zhengzhou 450000, Henan Province, China)

Abstract: Energy Internet is the future development direction of the power grid company, and it is in line with the general trend of the energy revolution and the digital revolution. The construction of the energy Internet needs to integrate the power grid and the communication network more closely and strengthen the interconnection. Under this background, the “shared tower” came into being, and the analysis of its comprehensive benefits is conducive to stimulating the development potential of the shared tower. The interval number is introduced to represent the fuzziness of expert judgment information, and a comprehensive benefit evaluation model based on the interval number fuzzy analytic hierarchy process is constructed. The key indicators affecting the future development of the shared tower are obtained, and the key indicators are selected for quantitative analysis. The research results provide an important reference for the popularization and application of the shared tower.

Keywords: shared tower; comprehensive benefits; interval numbers; comprehensive evaluation

摘要: 能源互联网以其灵活适应能源和数字革命且交互相融的独特优势成为电网公司发展的重要前进方向。能源互联网的建设需要将电网与通信网更紧密地结合在一起, 互联互通功能的增强, 促成了“共享铁塔”的产生, 分析共享铁塔的综合效益有利于激发其发展潜力。从电网公司、铁塔公司和政府主体出发, 构建了共享铁塔综合效益评价指标体系, 并引入区间数表征专家判断信息的模糊性, 得到基于区间数的共享铁塔的综合效益评价模型, 得出影响共享铁塔未来发

展的关键指标, 选取关键指标量化分析, 为共享铁塔推广应用提供了重要参考。

关键词: 共享铁塔; 综合效益; 区间数; 综合评价

0 引言

电力与通信共享铁塔(以下简称“共享铁塔”)是指在电力铁塔上加装通信设备, 将光缆、移动天线等通信设施附着在输电铁塔本体上, 从而实现电力和通信基础设施资源共享, 是共享经济的典范^[1-3]。共享铁塔借助电力铁塔加载通信设施, 能够有效缓解通信铁塔基站重复建设占用土地资源的情况, 同时由于电力铁塔分布密集, 在电力铁塔上加载通信设施能够有效推动第五代移动通信(5G)等通信网络快速全面覆盖, 最终实现电网公司和铁塔、通信公司资源共享和互利共赢^[4]。2018年4月24日, 国家电网有限公司与中国铁塔股份有限公司签订了战略合作框架协议, 已在重庆、湖北、福建三省(市)电力公司开展试点共享合作, 中国南方电网有限责任公司也已启动共享铁塔应用^[5]。构建包含多主体的综合效益评价方法, 提高共享铁塔的技术经济价值, 对共享铁塔未来发展至关重要。

目前, 对共享铁塔的研究多聚焦于通信设施连接和安装、防雷接地、电磁环境干扰等关键技术方面, 对综合效益的研究较少。文献[6-7]对共享铁塔通信设施的具体安装位置、通信连接方式、铁塔荷载计算、布置通信机房等进行了探讨, 为共享铁塔如何具体应用在工程实践中提供了参考。文献[8]聚焦电磁干扰, 探讨了通信基站天线安装方式对铁塔在线监测设备的影响。文献[9-10]均构建了基于经济效益分析的测算

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(电力与通信共享铁塔关键技术, 5217L0190009)。

Science and Technology Foundation of SGCC (Research on Key Technology of Radio Base Stations Sited on Power Line Towers, 5217L0190009).

模型, 计算了共享铁塔的净现值、投资回收期、投资收益率, 适用于工程领域经济效益的具体测算。

关于综合评价方法和理论的研究相对成熟。文献[11]从技术、经济及环保等方面构建江水源热泵供能系统指标体系, 采用层次分析法-熵权法构建动态模糊综合评价模型进行评价。文献[12]提出了基于解释结构模型及层次分析法的工业型城市能源转型的综合评价体系。文献[13]综合考虑能值可持续指数、发电效率、全生命周期成本3个维度指标, 基于灰色关联分析法构建了计及能值的中国电力能源系统可持续性综合评价体系。文献[14]从经济、技术、社会和环境等方面构建了电动汽车综合效益评价指标体系, 采用区间数形式表示的模糊层次分析法对电动汽车的综合效益进行评价。文献[15]从电网负荷、配网设备、网架结构和电压质量等方面构建了配电网经济运行评价指标体系, 运用基于区间数的模糊综合评价方法对城市配电网经济运行进行评价。可见, 综合评价相关理论和方法已广泛应用于能源系统各类对象的评价。

共享铁塔产生的综合效益究竟如何, 有哪些指标可以具体体现其所产生的综合效益, 是当前亟待研究的热点问题。本文首先从共享铁塔利益主体出发, 对共享铁塔的综合效益进行识别并构建评价指标体系, 然后结合定性和定量分析, 引入区间数表征专家判断信息的模糊性, 建立基于区间数的共享铁塔综合效益评价模型, 并对关键效益进行量化分析, 为共享铁塔未来发展提供借鉴。

1 共享铁塔综合效益识别及其评价指标体系

1.1 共享铁塔潜力分析

大规模建设5G通信设施必须以众多的铁塔资源作为基础支撑, 但是由铁塔公司单独建设通信基站, 或者依靠高铁、高速资源建立通信基站面临诸多困难, 比如通信基站征地难、配套电力供应困难以及后期运维难度大、费用高等问题。另一方面, 随着人民生活水平的日益提高, 偏远乡村地区对5G信号的需求不断增加, 如果铁塔公司可以使用已有的“社会塔”(如电力铁塔)资源, 将其融合为可以传递5G信号的“通信塔”, 这样不仅会降低铁塔公司建造通信塔的成本, 更在一定程度上减轻了铁塔公司在偏远地区单独组网的压力。与通信铁塔资源相比, 电力铁塔资源具有分布区域广泛、数量庞大的特点, 而且通信铁塔和电力铁塔存在重叠的空间布局。将通信设施安装架设在电

力铁塔上可有效提高土地资源利用率, 降低通信铁塔建设成本, 对于高速铁路、公路、偏远农村等场景中的宏站替代和城市中心区、街道定向等场景的微站建设以及通信站选址困难等问题提供了很好的解决方案, 共享价值较大。电力与通信铁塔在高度、分布位置等方面具有较高的契合度, 且电网公司的铁塔数量庞大, 能很好地满足铁塔公司5G建设的需求, 共享铁塔发展潜力较大。

1.2 共享铁塔综合效益识别

共享铁塔的主要利益主体有三方, 分别是电网公司、铁塔公司和政府。如图1所示, 电网公司作为共享铁塔的建设方, 提供铁塔资源; 铁塔公司为共享铁塔的承租方, 租用电力铁塔并支付租金; 政府主要发挥撮合两方进行资源共享的作用, 同时实现一定的环境和社会效益。下面从电网公司、铁塔公司和政府不同利益主体方面来对共享铁塔综合效益进行识别^[16-17]。

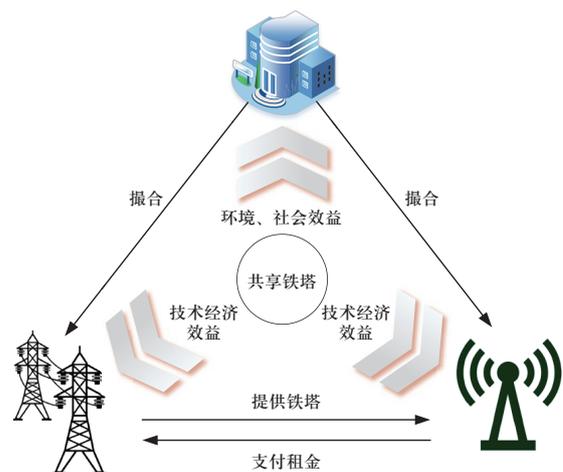


图1 共享铁塔利益主体分析

Fig. 1 Multi-stakeholders analysis of shared towers

1.2.1 电网公司

电网公司在共享铁塔的过程中, 主要负责铁塔的建设。铁塔的建设主要取决于输电线路的规划, 通过共享建成的输电铁塔, 电网公司可以盘活固定资产, 提高自身资产的收益。具体效益体现为:

1) 激活存量资源, 获取租金收益。

电网公司拥有大量的铁塔及变电站资源, 但这些资产对于电网公司来说只是固定资产, 用以保障电力输送, 难以直接产生收益。通过将铁塔共享给通信公司, 可以大大提高资产的利用率, 激活存量资源的价值, 通过收取租金等方式获得经济利益。

2) 减少通信铁塔拆迁费用。

当高压输电线路经过的路径上有已建的通信铁塔时, 需要对已有的通信铁塔进行拆除, 电网公司需要向铁塔公司赔偿大量的拆迁费用。但通过共享铁塔, 可以大大减少拆迁费用, 因为通信铁塔拆除后不需要再建新塔, 只需要把原有的基站与天线设备转移到新建输电线路的铁塔上即可替代原有的通信铁塔, 减少了铁塔公司的损失, 也降低了电网公司拆迁赔款的费用。

3) 有利于推动能源互联网建设。

能源互联网建设需要将电网与通信网更紧密地结合在一起, 强化互联互通, 共享铁塔可为电网公司自建通信网络提供支撑, 既可以利用通信运营商的通信网络进行设备互联, 也可以通过共享铁塔实践通信设备与输电线路的兼容性, 为未来自行建设通信网络积累经验。

1.2.2 铁塔公司

铁塔公司主要以向通信公司提供通信铁塔租赁服务而获取利润, 通过共享铁塔, 减少了自身新建通信铁塔的成本, 大大降低了自身投资的资金压力, 同时也缩短了铁塔的建设周期。具体效益体现为:

1) 减少铁塔建设投资。

新建一座地面通信塔塔体及基础平均造价约14.2万元, 占地30 m², 且还需要按年支付一定金额的租金。而通过铁塔资源共享的方式, 可以大大降低铁塔公司在通信铁塔建设方面的投资, 降低公司运营成本和融资压力。

2) 减少占地费用。

铁塔公司以往建设的通信铁塔除了铁塔本身的建设成本外, 还需要支付铁塔的占地租赁费用, 通常是按年支付。通过与电力铁塔共享, 可以省去该费用, 实现一定的经济效益。

3) 缩短基站建设周期。

利用已有的电力铁塔杆体进行基站建设, 无需地勘、引电, 只需新增天线支架、水泥平台及配套设备, 整站建设时间最短仅需3 d, 能快速满足运营商新建需求。据中国铁塔股份有限公司统计, 平均每个站可缩短建设周期约60 d。

1.2.3 政府

政府是共享铁塔建设的推动者。通过推动共享铁塔的建设, 可以实现减少能源消耗、减少占地、降低污染排放、避免重复投资、促进产业发展和就业的目标, 提高了整个社会的资源利用效率。具体效益体现为:

1) 带来显著的环境效益。

铁塔的生产与施工会造成一定的污染, 包括噪声污染、温室气体排放、污染气体排放等。共享铁塔可以避免重复施工, 节约资源的同时减少温室气体和污染气体排放, 也避免了机械施工对周边环境的噪声污染, 减少了施工过程中对植被土壤的破坏。

2) 促进地区经济协调发展。

随着社会经济的发展, 除了人口密度较高的城市外, 在人口较少的地区同样需要通信网络的覆盖。电网公司的铁塔遍布全国, 在各种地形和区域都建有一定数量的电力铁塔, 在一些偏远或人烟稀少的地区, 通信铁塔建设较为困难, 可以共享已有的输电线路铁塔, 在铁塔上加装通信天线与基站, 解决这些地区的信号覆盖问题, 具有较高的社会效益。

3) 避免资源浪费。

电力铁塔的功能单一, 仅有传输电能的作用, 通信铁塔也只有传播通信信号的作用, 但以上两种铁塔的高度、位置、结构强度等都具有较高的相似度, 共同建设共享不仅减少了土地资源的浪费, 同时也减少了铁塔大规模建设造成的钢铁资源和能源的浪费。

1.3 共享铁塔综合效益评价指标体系

共享铁塔综合效益评价指标体系的建立, 除了应满足全面性、客观性、典型性及可操作性等传统指标设计原则之外, 还应当能够反映共享铁塔的建设和运营对参与主体各方面利益的影响。基于此, 建立多主体共享铁塔综合评价指标体系。根据上述对共享铁塔综合效益的分析, 得到了共享铁塔综合效益评价指标体系, 分为主体层和指标层两个层级, 主体层包含电网公司、铁塔公司和政府三个主体, 指标层共包含12个指标, 以定量指标为主, 定性指标为辅, 各指标间相互独立, 如表1所示。

表1 共享铁塔综合效益评价指标体系

Table 1 Evaluation index of the comprehensive benefits of shared towers for power and communication

主体层	指标层
电网公司 (A)	激活存量资源, 获取租金收益 (A1)
	减少通信铁塔拆迁费用 (A2)
	有利于推动能源互联网建设 (A3)
铁塔公司 (B)	减少铁塔建设投资 (B1)
	减少占地费用 (B2)
	缩短基站建设周期 (B3)

续表

主体层	指标层
政府 (C)	带来显著的环境效益 (C1)
	促进地区经济协调发展 (C2)
	避免资源浪费 (C3)

对表1各指标分析如下:

1) 激活存量资源, 获取租金收益。该指标为定量指标, 指电网公司将电力铁塔租赁给铁塔公司, 铁塔公司向电网公司按年支付租金所获得的收入, 约为1万元/基^[18]。

2) 减少通信铁塔拆迁费用。该指标为定量指标, 指未开展共享铁塔情况下电网公司为保障输电线路运行安全将通信铁塔拆迁发生的费用。

3) 有利于推动能源互联网建设。该指标为定性指标, 指共享铁塔推动电网公司能源互联网建设的作用。

4) 减少铁塔建设投资。该指标为定量指标, 指通过将基站安装在电网公司的输电铁塔上, 铁塔公司可以减少自有铁塔建设, 所减少的铁塔建设成本。以30 m三管塔为例, 塔桅改造、机房、动力配套、外市电引入总造价约11万元, 而新建塔相应造价约22万元, 铁塔公司节约投资11万元/基。

5) 减少占地费用。该指标为定量指标, 指铁塔公司不需要自建铁塔的情况下, 可以减少的通信铁塔占地租赁成本, 即通信铁塔占地年租金。

6) 缩短基站建设周期。该指标为定量指标, 指通过不同建设方式建成通信铁塔的时间。从进度来看, 共享铁塔可以使通信基站的建设周期大为缩短, 共享用电力塔无需地勘、引电, 只需新增天线支架、水泥平台及配套设备, 整站建设时间最短仅需3 d, 能快速满足运营商新建需求。

7) 带来显著的环境效益。该指标为定量指标, 主要是指CO₂、SO_x、NO_x等温室气体或污染物的减排效益。共享铁塔避免了重复施工, 大大降低了施工过程中带来的污染排放, 可以用各种方案在施工与建设中温室气体和污染气体的排放水平表示。

8) 促进地区经济协调发展。该指标为定性指标, 指不同方案对地区经济发展的影响。共享铁塔在5G建设、经济欠发达地区信号覆盖等方面具有一定作用, 从而推动地区经济协调全面发展。

9) 避免资源浪费。该指标为定量指标, 指共享铁塔方案较常规方案减少的钢材、线材等资源消耗, 以钢材、线材量表示。

2 基于区间数的共享铁塔综合效益评价模型

层次分析法 (analytic hierarchy process, AHP) 是一种常见的评价方法, 通常采用1~9标度构造判断矩阵, 用特征根法计算得出权重向量^[19]。但是, 随着AHP理论的发展和实际应用的需要, 越来越多的学者把模糊思想和方法引入到层次分析中, 采用0.1~0.9标度构造互补判断矩阵, 通过可能度转换公式把互补判断矩阵变成互补一致性判断矩阵, 并利用行和归一化方法求出权重向量^[20]。由于判断的不确定性, 在采用0.1~0.9标度进行两两比较时可能无法得到确定的数值, 需要引入[0,1]区间数形式。

本文以模糊综合评价法为基础, 首先构建因素集和评语集, 再计算权重向量和模糊评判矩阵, 将模糊评判矩阵与因素权集进行模糊运算并归一化, 最后得到模糊评价结果。在计算权重向量时, 运用了区间数互补判断矩阵和可能度转换公式, 较传统层次分析法省去了对判断矩阵一致性检验的过程, 弥补其计算冗余的缺点, 同时由于引入区间数, 能够较好地表示专家对信息判断和认识的模糊性, 使得评价结果更为接近真实情况。

基于区间数的共享铁塔综合效益评价分析流程如图2所示。

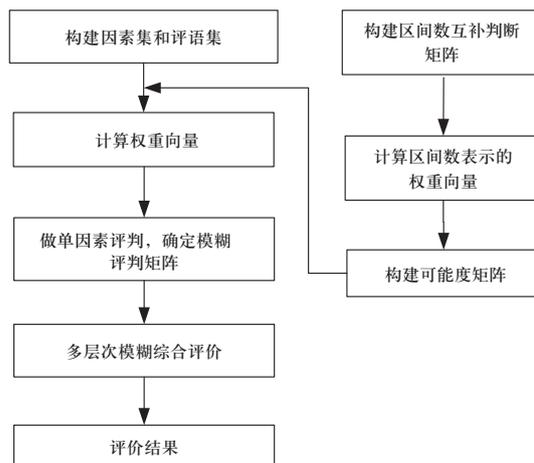


图2 基于区间数的共享铁塔综合效益评价分析流程图

Fig. 2 Flow chart of comprehensive benefits evaluation of shared towers based on interval numbers

2.1 构建因素集和评语集

构建因素集时, 设第一层因素集 U , 包含 n 个因素, 表示为 $U = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_n\}$, 第二层因素集中, 第 i 个因素包含 m 个子因素, 表示为

$U_i = \{u_{i1}, u_{i2}, u_{i3}, \dots, u_{im}\}$ 。构建评语集时, 需要对每个指标都进行等级评定, 假设等级共有 s 个, 那么评语集便可以表示为 $V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_s\}$ 。

2.2 计算权重向量

1) 构建区间数互补判断矩阵。

专家根据0.1~0.9九标度法的要求, 对需要评价的指标两两之间进行比较, 便可构建区间数互补判断矩阵 A , 即

$$A = (a_{ij})_{n \times n} \quad (1)$$

式中:

$$a_{ij} = [a_{ij}^-, a_{ij}^+], \quad a_{ij}^- + a_{ji}^+ = a_{ji}^- + a_{ij}^+ = 1 \quad i, j \in N \quad (2)$$

0.1~0.9九标度法是常用的构建互补判断矩阵的方法^[21-23], 标度值如表2所示。

表2 0.1~0.9九标度法及其含义

Table 2 0.1~0.9 nine-scale method and its meaning

0.1~0.9九标度	含义
0.100	乙元素与甲元素相比极端重要
0.138	乙元素与甲元素相比强烈重要
0.325	乙元素与甲元素相比明显重要
0.439	乙元素与甲元素相比稍微重要
0.500	乙元素与甲元素相比同等重要
0.561	甲元素与乙元素相比稍微重要
0.675	甲元素与乙元素相比明显重要
0.862	甲元素与乙元素相比强烈重要
0.900	甲元素与乙元素相比极端重要

2) 计算区间数表示的权重向量。

对互补判断矩阵 A 的行进行求和计算, 然后归一化, 得到以区间数形式表示的权重向量, 即

$$\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T \quad (3)$$

式中:

$$\omega_i = \frac{\sum_{j=1}^n A_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n A_{ij}} = \frac{\sum_{j=1}^n [a_{ij}^-, a_{ij}^+]}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [a_{ij}^-, a_{ij}^+]} = \left[\frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}^-}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij}^+}, \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}^+}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij}^-} \right] = [\omega_i^-, \omega_i^+] \quad (4)$$

3) 构建可能度矩阵。

根据可能度公式两两比较以区间数表示的权重向量, 计算得到可能度矩阵 P , 即

$$P = (p_{ij})_{n \times n} \quad (5)$$

$$p_{ij} = P(\omega_i \geq \omega_j) = \frac{\max\{0, d(\omega_i) + d(\omega_j) - \max(\omega_j^+ - \omega_i^-, 0)\}}{d(\omega_i) + d(\omega_j)} \quad (6)$$

式中: $d(\omega_i) = \omega_i^+ - \omega_i^-$, $d(\omega_j) = \omega_j^+ - \omega_j^-$ 。

4) 计算权重向量。

对可能度矩阵 P 的行求和, 然后归一化, 计算获得权重向量, 即

$$k = (k_1, k_2, \dots, k_n)^T \quad (7)$$

式中:

$$k_i = \sum_{j=1}^n p_{ij} / \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_{ij} \quad (8)$$

2.3 做单因素评判, 确定模糊评判矩阵

综合分析单个指标隶属于评语集的程度, 构建评判矩阵 R_i :

$$R_i = (r_{ij})_{m \times s} \quad (9)$$

对评判矩阵的行求和, 其值为1, 即

$$\sum_{j=1}^m r_{ij} = 1 \quad (10)$$

2.4 多层次模糊综合评价

1) 一级模糊综合评价。

第二层评价指标计算得到的权重矩阵乘以单因素模糊评价矩阵, 即

$$\bar{B}_i = k_i \circ R_i = (\bar{b}_1, \bar{b}_2, \dots, \bar{b}_s) \quad (11)$$

式中: 符号 \circ 为合成运算中的取大取小算子。

通过上述计算, 可以获得总模糊综合评判矩阵 \bar{B} , 即

$$\bar{B} = (\bar{B}_1, \bar{B}_2, \dots, \bar{B}_n)^T \quad (12)$$

2) 二级模糊综合评价。

将 \bar{B} 与第一层因素集计算得到的权重 \bar{W} 进行合成运算, 即

$$\bar{Q} = \bar{W} \circ \bar{B} = (\bar{q}_1, \bar{q}_2, \dots, \bar{q}_s) \quad (13)$$

对 \bar{Q} 进行归一化计算, 即

$$q_i = \bar{q}_i / \sum_{j=1}^s \bar{q}_j \quad (14)$$

最终, 计算结果为 $Q = (q_1, q_2, \dots, q_s)$ 。根据最大隶属度原则分析, 可获得共享铁塔综合效益的评价结果。

3 案例研究

本文以某省电力公司共享铁塔典型工程为例进行

研究,采用基于区间数的模糊综合评价法对其进行综合效益评价。

该典型工程为220 kV线路工程,平地地形,路径长度40 km,直线塔采用酒杯型铁塔,耐张塔采用干字形铁塔,静态投资3399万元,其中杆塔与基础工程投资1312万元,共计117基塔,输电铁塔加挂通信设备。本文分析共享铁塔建设情景较非共享铁塔建设情景带来的综合效益。

3.1 构建因素集和评语集

由上文可知,评价对象为共享铁塔典型工程的综合效益。第一层因素集包含3个因素,表示为 $U=\{u_1, u_2, u_3\}=\{\text{电网公司, 铁塔公司, 政府}\}$ 。第二层因素集中,电网公司子因素集表示为 $U_1=\{u_{11}, u_{12}, u_{13}\}=\{\text{激活存量资源、获取租金收益, 减少通信铁塔拆迁费用, 有利于推动能源互联网建设}\}$;铁塔公司子因素集表示为 $U_2=\{u_{21}, u_{22}, u_{23}\}=\{\text{减少铁塔建设投资, 减少占地费用, 缩短基站建设周期}\}$;政府子因素集表示为 $U_3=\{u_{31}, u_{32}, u_{33}\}=\{\text{带来显著的环境效益, 促进地区经济协调发展, 避免资源浪费}\}$;评语集分为5个等级,表示为 $V=\{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}=\{\text{很好, 较好, 一般, 较差, 很差}\}$ 。

3.2 计算权重集

根据0.1~0.9九标度法要求,对评价指标两两之间进行比较,得到区间数互补判断矩阵。电网公司、铁塔公司和政府的区间数互补判断矩阵为

$$A_1 = \begin{bmatrix} [0.500, 0.500] & [0.675, 0.862] & [0.561, 0.675] \\ [0.138, 0.325] & [0.500, 0.500] & [0.325, 0.439] \\ [0.325, 0.439] & [0.561, 0.675] & [0.500, 0.500] \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} [0.500, 0.500] & [0.675, 0.862] & [0.675, 0.862] \\ [0.138, 0.325] & [0.500, 0.500] & [0.439, 0.500] \\ [0.138, 0.325] & [0.500, 0.561] & [0.500, 0.500] \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} [0.500, 0.500] & [0.561, 0.675] & [0.561, 0.675] \\ [0.325, 0.439] & [0.500, 0.500] & [0.561, 0.675] \\ [0.325, 0.439] & [0.325, 0.439] & [0.500, 0.500] \end{bmatrix}$$

根据式(3)~(4)计算得到电网公司、铁塔公司和政府以区间数形式表示的权重向量为

$$\omega_1 = ([0.353, 0.499], [0.196, 0.309], [0.282, 0.395])^T$$

$$\omega_2 = ([0.375, 0.547], [0.218, 0.326], [0.231, 0.341])^T$$

$$\omega_3 = ([0.335, 0.445], [0.286, 0.388], [0.238, 0.331])^T$$

根据式(5)~(6)计算得到电网公司、铁塔公

司和政府可能度矩阵为

$$P_1 = \begin{bmatrix} 0.500 & 1.000 & 0.838 \\ 0.000 & 0.500 & 0.121 \\ 0.162 & 0.879 & 0.500 \end{bmatrix}$$

$$P_2 = \begin{bmatrix} 0.500 & 1.000 & 1.000 \\ 0.000 & 0.500 & 0.437 \\ 0.000 & 0.563 & 0.500 \end{bmatrix}$$

$$P_3 = \begin{bmatrix} 0.500 & 0.749 & 1.000 \\ 0.251 & 0.500 & 0.769 \\ 0.000 & 0.231 & 0.500 \end{bmatrix}$$

再根据式(7)~(8)计算得到电网公司、铁塔公司和政府的权重向量为

$$k_1 = (0.520, 0.138, 0.342)^T$$

$$k_2 = (0.556, 0.208, 0.236)^T$$

$$k_3 = (0.500, 0.338, 0.162)^T$$

3.3 确定总模糊评判矩阵

基于共享铁塔综合效益的因素集和评语集,专家进行打分,得出电网公司、铁塔公司和政府的模糊评判矩阵为

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.3 & 0.2 & 0.1 & 0 \\ 0.1 & 0.3 & 0.3 & 0.2 & 0.1 \\ 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.3 & 0.1 & 0.1 & 0 \\ 0.1 & 0.4 & 0.3 & 0.1 & 0.1 \\ 0.1 & 0.5 & 0.2 & 0.1 & 0.1 \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.3 & 0.2 & 0.1 & 0 \\ 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.1 & 0 \\ 0.1 & 0.3 & 0.3 & 0.2 & 0.1 \end{bmatrix}$$

作一级模糊综合评价 $\bar{B}_i = k_i \circ R_i$,得到总模糊评判矩阵,即

$$\bar{B} = \begin{bmatrix} 0.400 & 0.342 & 0.200 & 0.138 & 0.100 \\ 0.500 & 0.300 & 0.208 & 0.100 & 0.100 \\ 0.400 & 0.338 & 0.200 & 0.162 & 0.100 \end{bmatrix}$$

3.4 多层次模糊综合评价

作二级模糊综合评价,两两比较电网公司、铁塔公司、政府三方面综合效益,得到一级指标权重 $\bar{W} = (0.334, 0.416, 0.250)$ 。

通过计算 $\bar{Q} = \bar{W} \circ \bar{B}$ 并将 \bar{Q} 归一化,得最后的评价结果为

$$Q = (0.37, 0.28, 0.17, 0.11, 0.08)$$

根据最大隶属度原则可知, 共享铁塔综合效益等级为最高级“很好”, 即共享铁塔综合效益可观。

进一步地, 通过计算各评价指标的权重, 可以判断共享铁塔综合效益体现的主要方面, 各指标的权重如表3所示。

表3 共享铁塔综合效益评价表

Table 3 Evaluation of the comprehensive benefits of shared towers for power and communication

一级指标	二级指标	三级指标	权重值	总权重值
共享铁塔综合效益 U	U_1 电网公司 $W_1=0.334$	激活存量资源, 获取租金收益	0.520	0.174
		减少通信铁塔拆迁费用	0.138	0.046
		有利于推动能源互联网建设	0.342	0.114
	U_2 铁塔公司 $W_2=0.416$	减少铁塔建设投资	0.556	0.232
		减少占地费用	0.208	0.087
		缩短基站建设周期	0.236	0.098
	U_3 政府 $W_3=0.250$	带来显著的环境效益	0.500	0.125
		促进地区经济协调发展	0.338	0.084
		避免资源浪费	0.162	0.040

从表2可以看出, 在9个评价指标中, 总权重较高的是减少铁塔建设投资, 激活存量资源、获取租金收益, 带来显著的环境效益等指标, 说明电力与通信共享铁塔的综合效益主要体现在这几个方面, 是影响共享铁塔未来发展的关键因素。

选取前两个关键效益进行量化分析, 减少铁塔建设投资为11万元/基, 年租金收益为1万元/基, 租赁期限15 a, 折现率8%, 则租赁期内该共享铁塔典型工程将实现效益2976万元, 具有较好的经济效益。

4 结语

共享铁塔的根本目的是实现电网公司和铁塔公司资源共享和互利共赢。共享铁塔作为“共享经济”的典范, 已得到电网公司和铁塔公司的高度关注和大力推动, 能够有效推动能源互联网企业建设。本文从电网公司、铁塔公司和政府三方面多主体角度构建了共享铁塔综合效益评价指标体系, 提出基于区间数的模糊综合评价方法用于评估共享铁塔的综合效益, 主要结论如下。

1) 共享铁塔的利益主体分为三方, 分别是电网公司、铁塔公司和政府, 通过共享铁塔, 电网公司、铁塔公司都能获得较好的技术和经济效益, 电网公司盘活了资产, 铁塔公司节省了投资, 同时政府还可获得节能减排、减少占地、促进经济等方面的社会效益。

2) 从不同利益主体的角度出发总结出影响共享铁塔未来发展的指标, 包括减少铁塔建设投资, 激活存量资源、获取租金收益, 带来显著的环境效益指标等, 这些是影响共享铁塔长远发展的关键因素。典型工程测算得到效益2976万元, 证明了共享铁塔具有较好的经济效益。

3) 以模糊综合评价法为基础, 引入区间数表征专家判断信息的模糊性, 使评价更为合理。评价结果表明共享铁塔综合效益可观, 结果与实际相符, 从而验证了评价指标的合理性以及基于区间数的评价模型的有效性。

本文量化分析仅限于关键的减少铁塔建设投资和租金收益等指标, 未来可结合更多的实际共享铁塔项目, 对其他量化指标细化测算, 进一步明确共享铁塔综合效益。

参考文献

- [1] 唐波, 肖乔莎, 刘兴发, 等. 共享铁塔无源干扰水平的求解与分析[J]. 高电压技术, 2021, 47(10): 3724-3732.
TANG Bo, XIAO Qiaosha, LIU Xingfa, et al. Calculation and analysis of passive interference level of shared tower[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(10): 3724-3732(in Chinese).
- [2] 赵一冰, 蔡闻佳, 丛建辉, 等. 低碳战略下供给侧减缓技术的综合成本效益分析[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(4): 319-327.
ZHAO Yibing, CAI Wenjia, CONG Jianhui, et al. Comprehensive cost-benefit evaluation of supply side mitigation technologies for low-carbon strategy[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(4): 319-327(in Chinese).
- [3] 江涵, 高艺, 李隽, 等. 基于系统动力学的区域能源互联网综合效益分析[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(1): 16-26.
JIANG Han, GAO Yi, LI Jun, et al. The comprehensive benefit analysis of regional energy interconnection based on system dynamics method[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(1): 16-26(in Chinese).
- [4] 王奕. “铁塔模式”的共享经济评价[J]. 中国集体经济, 2020(11): 13-14.
- [5] 赵伟博, 董玉明, 莫娟, 等. 电力与通信共享铁塔的关键技术与商业模式[J]. 中国电力, 2021, 54(11): 171-180.
ZHAO Weibo, DONG Yuming, MO Juan, et al. Key technologies and business model of shared towers for power

- and communication[J]. Electric Power, 2021, 54(11): 171-180(in Chinese).
- [6] 鲁修学, 胡淑兵, 胡能萍. 电力铁塔与通信行业共享的技术研究[J]. 江西电力, 2020, 44(12): 23-26.
- [7] 刘堃, 曾二贤, 冯衡, 等. 基于5G环境下输电杆塔共享改造技术研究[J]. 广西电力, 2020, 43(1): 43-46.
LIU Kun, ZENG Erxian, FENG Heng, et al. Study on transmission tower sharing modification technology based on 5G environment[J]. Guangxi Electric Power, 2020, 43(1): 43-46(in Chinese).
- [8] 唐波, 张楠, 齐道坤, 等. 共享铁塔基站天线对在线监测设备的电磁干扰及防护[J]. 高电压技术, 2020, 46(12): 4365-4375.
TANG Bo, ZHANG Nan, QI Daokun, et al. Electromagnetic interference of base station antenna to on-line monitoring equipment on shared tower and protection[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(12): 4365-4375(in Chinese).
- [9] 刘欣博, 李宗阳, 刘帆. 共享电力铁塔搭载通信基站经济效益分析模型[J]. 浙江电力, 2021, 40(2): 73-77.
LIU Xinbo, LI Zongyang, LIU Fan. Economic benefit analysis model of communication base station on shared power tower[J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(2): 73-77(in Chinese).
- [10] 戴雨剑, 侯聪, 陈立国, 等. 共享铁塔的效益分析研究[J]. 电力设备管理, 2021(6): 166-168.
DAI Yujian, HOU Cong, CHEN Liguang, et al. Analysis and research on the benefits of sharing towers[J]. Electric Power Equipment Management, 2021(6): 166-168(in Chinese).
- [11] 郭松, 冯澎湃, 胡文博, 等. 考虑动态赋权的江水源热泵供能系统模糊综合评价方法研究[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(5): 516-524.
GUO Song, FENG Pengpai, HU Wenbo, et al. Fuzzy comprehensive evaluation method of river source heat pump energy supply system considering dynamic weighting[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(5): 516-524(in Chinese).
- [12] 王永真, 林伟, 李成宇, 等. 工业型城市能源转型的综合评价: 以苏州市为例[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(2): 188-196.
WANG Yongzhen, LIN Wei, LI Chengyu, et al. Comprehensive evaluation of energy transition in industrial cities: a case study of Suzhou[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(2): 188-196(in Chinese).
- [13] 王永真, 朱铁林, 康利改, 等. 计及能值的中国电力能源系统可持续性综合评价[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(1): 19-27.
WANG Yongzhen, ZHU Yilin, KANG Ligai, et al. Comprehensive sustainability evaluation of China's power system based on emergy analysis[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(1): 19-27(in Chinese).
- [14] 刘志刚. 基于模糊层次分析法的电动汽车综合效益评价研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
LIU Zhigang. Evaluation on the comprehensive benefits electric vehicles based on fuzzy analytic hierarchy process[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013(in Chinese).
- [15] 马丽叶, 卢志刚, 胡华伟. 基于区间数的城市配电网经济运行模糊综合评价[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 163-171.
MA Liye, LU Zhigang, HU Huawei. A fuzzy comprehensive evaluation method for economic operation of urban distribution network based on interval number[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 163-171(in Chinese).
- [16] 蒋素霞. 通信铁塔的经济效益和社会效益[J]. 中国电信业, 2020(7): 63-65.
- [17] 许建雷, 韩露, 吴毅. 建立基于铁塔租赁的共建共享效益评价体系[J]. 电信工程技术与标准化, 2017, 30(4): 58-64.
XU Jianlei, HAN Lu, WU Yi. Setting up the benefit evaluation system of co-construction and sharing based on tower leasing[J]. Telecom Engineering Technics and Standardization, 2017, 30(4): 58-64(in Chinese).
- [18] 李艳思, 高振宇, 黄德祥. 南网云南电网有限责任公司 共享共赢 绿色发展[J]. 中国电力企业管理, 2019(33): 24.
- [19] CHENG C, ZHOU Y H, YUE K W, et al. Study of SEA indicators system of urban green electricity power based on fuzzy AHP and DPSIR model[J]. Energy Procedia, 2011, 12: 155-162.
- [20] 徐泽水. 区间数互补判断矩阵排序的一种实用方法[J]. 运筹与管理, 2001, 10(1): 16-19.
XU Zeshui. A practical method for priority of interval number complementary judgement matrix[J]. Operations Research and Management Science, 2001, 10(1): 16-19(in Chinese).
- [21] 孟凡永. 区间数、三角模糊数及其判断矩阵排序理论研究[D]. 南宁: 广西大学, 2008.
MENG Fanyong. Research the priority theory of interval numbers, triangular fuzzy numbers and their judgment matrices[D]. Nanning: Guangxi University, 2008(in Chinese).
- [22] 林钧昌, 徐泽水. 模糊AHP中一种新的标度法[J]. 运筹与管理, 1998, 7(2): 37-40.
LIN Junchang, XU Zeshui. A new scale in fuzzy AHP[J]. Operations Research and Management Science, 1998, 7(2): 37-40(in Chinese).
- [23] 徐泽水. 模糊互补判断矩阵排序的一种算法[J]. 系统工程学报, 2001, 16(4): 311-314.
XU Zeshui. Algorithm for priority of fuzzy complementary judgement matrix[J]. Journal of Systems Engineering, 2001, 16(4): 311-314(in Chinese).

收稿日期: 2022-02-22; 修回日期: 2022-05-10。



李凌云

作者简介:

李凌云(1989), 女, 经济师, 研究方向为技术经济及管理、电力工程造价。通信作者, E-mail: 454174972@qq.com。

席小娟(1978), 女, 教授级高级工程师, 研究方向为输变电、技术经济及管理, E-mail: 30893855@qq.com。

(责任编辑 李锡)