

DOI: 10.7667/PSPC171682

## 基于不同利益主体的 OPLC 项目效益综合评价

迟远英<sup>1</sup>, 祁齐<sup>1</sup>, 邬龙<sup>1</sup>, 葛维春<sup>2</sup>, 罗桓桓<sup>2</sup>, 于晶<sup>3</sup>, 伏丽娜<sup>3</sup>, 廉果<sup>4</sup>

(1. 北京工业大学, 北京 100124; 2. 国网辽宁省电力有限公司, 辽宁 沈阳 110006;

3. 上海电缆研究所有限公司, 上海 200093; 4. 江苏亨通电力电缆有限公司, 江苏 苏州 215234)

**摘要:** OPLC(光纤复合低压电缆)技术的应用为国家电网构建低成本、广覆盖的城市配电信息通信网络提供了新的解决方案。针对 OPLC 的应用现状, 传统的光纤、电缆项目效益评价体系已经不能适用于光纤电力到户项目, 迫切需要重新建立一套指标评价体系。基于不同的利益主体——供给侧、用户端、社会层, 将可靠性、灵活性、信息化、节约化、服务一体化、绿色生活化、经济效益、文化效益、环境效益九大指标进行量化, 并基于 OPLC 工程以及传统光纤、电缆项目的复杂性, 选用层次分析法以及灰色系统评价确定权重、优劣排序。结果表明, OPLC 项目效益优于传统项目。

**关键词:** OPLC; 利益主体; 指标量化; 效益综合评价; 灰色系统; 层次分析

### Comprehensive evaluation of OPLC project benefit based on different stakeholders

CHI Yuanying<sup>1</sup>, QI Qi<sup>1</sup>, WU Long<sup>1</sup>, GE Weichun<sup>2</sup>, LUO Huanhuan<sup>2</sup>, YU Jing<sup>3</sup>, FU Lina<sup>3</sup>, LIAN Guo<sup>4</sup>

(1. Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. State Grid Liaoning Electric Power Supply Co., Ltd.,

Shenyang 110006, China; 3. Shanghai Electric Cable Research Institute, Shanghai 200093, China;

4. Jiangsu Hengtong Power Cable Co., Ltd. Suzhou 215234, China)

**Abstract:** The application of Optical Fiber Composite Low-voltage Cable (OPLC) technology provides a new solution of constructing low-cost and widely-covered urban power distribution information and communication network for SGCC. In view of the application status of OPLC, the traditional fiber and cable project benefit evaluation system can not be applied to OPLC project, and it is urgent to re-establish a set of index evaluation system. Based on different stakeholders: the supply side, the client side and the social layer, the nine indicators of reliability, flexibility, informatization, saving, service integration, green life, economic benefit, cultural efficiency and environmental benefit are quantified. Based on the complexity of OPLC project and the traditional fiber and cable project, AHP and gray system evaluation are used to determine the weight and rank. The results show that the benefits of OPLC projects are superior to those of traditional projects.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0901200).

**Key words:** OPLC; benefit subject; index quantification; benefit comprehensive evaluation; gray system; analytical hierarchy process

## 0 引言

OPLC 全名为光纤复合低压电缆, 为国家电网公司信息通讯有限公司在 OPWG 与 OPPC 之后, 于 2009 年研发成功并投入商业使用的又一新型的光纤复合低压电缆。不同于 OPWG 和 OPPC, 它不仅适用于电网内部建设, 更是集光纤、输电铜线、

铜信号线于一体, 直接接入用户端, 实现用电网等多种功能; 同时配合 PON 技术从而达到数据、语音、视频业务的传递和电表数据的无遮挡传送, 达到以物联网技术为基础的电力远程抄表、通知以及缴费。正是由于其强大的业务优势, 从 2010 年开始, 国家就开展了基于 OPLC 的电力光纤入户的准备工作, 先后公布了《智能电网关键设备研制规划》和《智能电网技术标准体系规划》, 希望各研究机构和制造企业加大研究力度, 降低投资成本, 提升投资回报率, 同时满足绿色低碳经济的要求。当年, 在

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2016YFB0901200)  
“电力光纤到户关键技术研究示范”

14个省公司的20个城市, 国家电网实施电力光纤首批小区试点建设, 包含大概4.7万用户。为了响应国家从三网融合到四网融合这一发展战略, 在2010年试点后, 2011年开始全面推广应用。到目前, 以上海、广东、北京为首的大型城市都在开展电力光纤入户的改造工作, 顺应建设智能化小区这一发展潮流, OPLC的需求不断呈爆发式增长, 前景广阔。

以往的研究主要集中在传统的光纤、电力综合评价, 且多具有独立性, 几乎没有将光纤电力作为一个整体目标进行综合评价。对于光纤的综合评价主要分为以下几类: 保护通道可靠性、客户服务质量、通信工程等<sup>[1-3]</sup>。对于电力的综合评价主要分为以下几类: 电力公司、能效项目、电网规划、效益、客户满意度等方面<sup>[4-9]</sup>。在光纤电缆的实际应用中, 大量的模糊因素涉及其中, 使得在项目综合效益评估时部分信息明确、部分信息不明确, 从而构成了一个灰色系统。灰色理论是由邓聚龙教授首先提出的一种新的理论, 它是一门以数学理论为基础的系统工程研究, 当一些命题含糊许多未知因素时, 可以采用灰色系统加以解决。各种灰色系统模型发展迅速, 文献[10]提出的GM(1, 1)模型, 文献[11]提出的离散灰色模型, 文献[12]提出的区间灰数自忆性模型等等。灰色理论在各自应用领域产生了很多应用成果, 但是这些研究比较集中于农业、地质、气象等学科, 在电力光纤项目效益评估中应用较少<sup>[13-14]</sup>。利用层次分析法, 将目标分解为多个目标准则, 通过定性指标模糊量化方法, 形成多方案优化决策的系统方法, 降低评估过程中的主观判断不确定性, 形成一个可靠的多因素决策方案。文献[15]运用层次分析法(AHP)建立了一套完整的分析方法, 在此基础上运用具有代表性的配电网能效模型, 计算了所有影响因素的定量权重。然而, 当前研究大多将层次分析法应用于针对城市普通电网的规划及评估方面, 对于OPLC项目的效益评估分析研究甚少<sup>[16-19]</sup>。关于效益评价, 以前的研究大多不考虑利益主体的分类, 且针对传统光纤电缆项目, 目前针对传统电力、光纤项目建立起来的一整套效益评价体系已经不能完全满足当前的电力光纤到户项目的需要, 因此基于不同利益主体建立一套新的效益评价体系是非常必要的。

## 1 指标体系构建

电力光纤到户效益评价首先基于不同的利益主体, 包括供给侧、用户端、社会层。供给侧主要是针对电力公司本身, 项目效益目标包括可靠性、灵活性、信息化、节约化; 用户端主要针对消费者,

用户层从项目中主要获得的效益包括服务一体、绿色生活; 社会层主要针对城市的区域效益, 项目效益目标主要包括经济效益、文化效益、环境效益。可靠性主要衡量故障监测方式、跨专业协调时间、处理故障速度; 灵活性主要衡量清洁能源接纳能力; 信息化主要衡量能源与信息是否可以同步传输、自动监控且实现自动检测诊断; 节约化主要衡量光缆、电缆抗外界能力、自愈能力、运维成本; 服务一体化主要衡量实现一体化信息服务平台程度; 绿色生活化主要衡量家庭用户实现清洁能源接入程度; 经济效益主要衡量促进产业升级程度; 文化效益主要衡量高科技产业繁荣程度; 环境效益主要衡量是否节能减排、避免二次破坏以及城市空间廊道资源利用率。

借鉴彭纪生(2008)等对政策量化的方法, 针对子目标对其进行了量化, 详见表1<sup>[20]</sup>。但由于不同的指标对于效益评价贡献程度不同, 并不能将量化得分简单相加, 以下通过建立层次分析模型确定各指标的权重。

表1 指标量化标准

Table 1 Indicators of quantitative standards

利益主体	得分	评价标准
供给侧 (L1)	可靠性(Z1)	
	1	故障需人工检测, 需跨专业协调, 处理速度慢。
	2	故障可自动实时监测, 但跨专业协调时间长, 处理速度慢。
	3	故障需人工检测, 不需跨专业协调, 处理速度较快。
	4	故障可自动实时监测, 且跨专业协调时间短, 处理速度快。
	灵活性(Z2)	
	1	传统能源完全接入。
	2	传统能源接入多且清洁能源接纳能力低。
	3	传统能源接入少且清洁能源接纳能力较高。
	4	清洁能源完全接入。
	信息化(Z3)	
	1	光缆和电缆独立, 能源与信息分离, 且两者不能完全自动监控。
	2	光缆和电缆独立, 能源与信息分离, 但两者能自动监控。
	3	能源与信息同步传输, 能够自动监控。
	4	能源与信息同步传输, 能够自动监控, 且实现自动检测诊断。
	节约化(Z4)	
1	光缆、电缆抗外界能力弱、自愈能力弱、运维成本高。	

续表 1

利益主体	得分	评价标准	
	2	光缆、电缆抗外界能力强、自愈能力弱、运维成本较高。	
	3	光缆、电缆抗外界能力较强、自愈能力较强、运维成本有效降低。	
	4	光缆、电缆抗外界能力强、自愈能力强、运维成本低。	
用户端 (L2)		服务一体化(Z5)	
	1	交通管理、政府信息等系统各自完善但缺少互联, 各系统成为信息孤岛。	
	2	电力光纤到户, 实现能源互联网。	
	3	电力光纤到户, 并借助“云计算”、物联网等提高各系统互联程度。	
	4	完全实现一体化信息服务平台。	
		绿色生活化(Z6)	
	1	家庭用户广泛接入传统能源。	
	2	家庭用户可部分接入传统能源, 部分接入清洁能源。	
	3	家庭用户可少量接入传统能源, 大量接入清洁能源。	
	4	家庭用户可完全实现清洁能源接入。	
	社会层 (L3)		经济效益(Z7)
			A、为电力产业、通信产业本身创造产值。 B、促进新能源产业升级。 C、促进电网装备制造产业升级。
1		实现 A、B、C 任意一项。	
2		实现 A、B、C 任意两项。	
3		实现 A、B、C 三项。	
4		促进全方位的产业升级。	
		文化效益(Z8)	
		A、核心技术、专利数量增加。B、高科技产品数量增加。C、新兴科技企业增加。	
1		实现 A、B、C 任意一项。	
2		实现 A、B、C 任意两项。	
3		实现 A、B、C 三项。	
4		通信信息高科技产业全面繁荣, 城市发展模式创新。	
		环境效益(Z9)	
		A、保障正常能耗排放。B、使用清洁能源、节能减排。C、避免二次破坏。D、提高城市空间、廊道资源利用率。	
1		实现 A、B、C、D 任意一项。	
2		实现 A、B、C、D 任意两项。	
3	实现 A、B、C、D 任意三项。		
4	实现 A、B、C、D 四项。		

层次分析法以专家对于九大指标(专家对表 1 的具体量化得分标准未知)的重要程度两两比较打分。之后为降低专家个人偏好对打分结果的影响, 建立灰色系统评价, 专家根据表 1 的具体量化得分标准进行二次打分, 以此作为灰色系统的数据基础。

## 2 模型构建

### 2.1 明确问题及递阶层次结构的建立

“四网融合”是指电网与电信网、广电网、互联网融合。OPLC 可以达到“四网融合”, 实现电力光纤入户。与传统的 FTTB+LAN 相比, 基于复合低压电缆的电力光纤入户能够有效地降低小区和用户端的综合成本约 40%, 极大地提高了性价比。不仅如此, 它符合低碳经济的发展要求, 具有较广泛的应用。随着电力光纤技术的不断成熟, OPLC 将会被逐渐应用到具体的生产生活中。为了对 OPLC 项目效益进行更加客观的评价, 将要对传统的光纤、电缆项目建设与其进行比较。

将 OPLC 项目假设为项目 A, 将传统的光纤、电缆项目假设为项目 B。建立递阶层次结构如图 1。

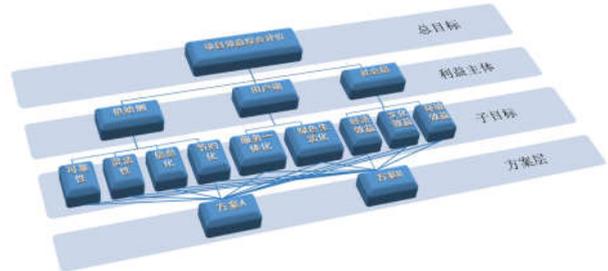


图 1 递阶层次结构图

Fig. 1 Hierarchical chart

### 2.2 建立两两比较的判断矩阵及求解目标层权重

为了作出定量判断, 对于某一标准, 可以对两种方案的相对优势进行定量描述, 并将 1~9 标度用于上级单元(元素), 根据相对重要性, 将其与本层次元素进行对比, 采取判断矩阵形式  $B$ 。  $b_{ij}$  需满足

以下关系:  $b_{ij} > 0$ ;  $b_{ij} = 1/b_{ji}$ 。

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1j} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2j} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{i1} & b_{i2} & \cdots & b_{ij} \end{bmatrix} \quad (1)$$

这里采用和积法求取权重, 具体如下。

对判断矩阵的每一列元素作归一化处理, 如此, 元素的一般项化为  $\bar{b}_{ij}$ , 如式(2)。

$$\bar{b}_{ij} = \frac{b_{ij}}{\sum_{j=1}^n b_{ij}} (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

将每一列经归一化处理后的判断矩阵按行相加为  $\bar{w}_i$ , 如式(3)。

$$\bar{W}_i = \sum_{j=1}^n \bar{b}_{ij} (i, j=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

对  $\bar{W} = (\bar{W}_1, \bar{W}_2, \dots, \bar{W}_n)^T$  归一化处理, 得式(4)。

$$W_i = \frac{\bar{W}_i}{\sum_{j=1}^n \bar{W}_j} (i, j=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

$W = (W_1, W_2, \dots, W_n)^T$  即为所求特征向量的近似解。计算判断矩阵最大特征根  $\lambda_{\max}$ , 如式(5)。

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(BW)_i}{nW_i} (i, j=1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

### 2.3 判断矩阵是否具有 consistency

层次分析法引用一致性指标  $C.I.$  来说明判断矩阵与完全一致性之间的偏离程度,  $C.I.$  的值越大说明偏离程度越大, 反之表示偏离程度越小。针对本文多阶判断矩阵, 引入平均一致性比率  $C.R.$ , 将通过  $C.R.$  的大小来确定判断矩阵是否具有可接受的一致性, 公式如式(6)和式(7)。

$$C.I. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1} \quad (6)$$

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.} \quad (7)$$

式中,  $R.I.$  为平均随机一致性指标。若  $C.R. < 0.1$ , 则表示判断矩阵具备可接受的一致性, 反之就有必要通过修正判断矩阵使其符合条件。

### 2.4 灰色矩阵构造

假设存在  $m$  个评价目标, 每个评价目标有  $n$  个评价指标,  $y_{ij} (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n)$  表示第  $i$  个评价目标的第  $j$  个指标。最优指标为  $y_{0j}$ , 其取值有很多种方法, 包括: 固定标准值、专家评估的最优值或者采用  $y_{0j} = \text{Optimum}(y_{ij})$  来确定, 即若指标越大越好则取最大值为最优值, 反之取最小值。原始矩阵构成如式(8)。

$$Y = \begin{bmatrix} y_{01} & y_{02} & \dots & y_{0n} \\ y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{m1} & y_{m2} & \dots & y_{mn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

标准化处理时可采用原值除以每列的第一个值的方法。计算第  $i$  个评价目标与第  $j$  个最优指标的灰色关联系数  $r_{ij}$ , 公式为

$$r_{ij} = \frac{\min_i \min_j |x_{0j} - x_{ij}| + \xi \max_i \max_j |x_{0j} - x_{ij}|}{|x_{0j} - x_{ij}| + \xi \max_i \max_j |x_{0j} - x_{ij}|} \quad (9)$$

式中,  $\xi \in (0, 1)$  为分辨系数, 常取  $\xi = 0.5$ 。评价矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

根据 AHP 方法计算所得的权重, 灰色关联度矩阵为:  $A = W^T \times R^T$ 。

## 3 模型验证

为使评价结果更为精准, 本文采取 AHP 层次总排序和灰色系统评价双重验证的方式。需要区别的是: AHP 评价结果基于专家主观打分, 灰色系统评价基于指标量化得分的专家打分, 如果两者结果一致, 那么说明本文所建立的效益评价指标符合业界专业评价标准。

为获取判断矩阵中的偏好关系数据, 本文采用专家打分法邀请本领域内 10 位专家进行打分, 最终结果由专家组评分算术平均数决定。利益主体层判断矩阵为

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0.5 & 4 \\ 2 & 1 & 8 \\ 0.25 & 0.125 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$C.R. < 0.1$ , 判断矩阵具有一致性。根据专家打分的两两比较结果, 按照式(2)一式(4)对判断矩阵归一化处理, 计算得利益主体层对总目标的权重分别是 0.17、0.33、0.5。

子目标判断矩阵分为三个, 其中九大指标针对供给侧、用户端、社会层的判断矩阵分别为  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ 。

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 & \frac{1}{3} & 2 & 2 & 1 & 2 & 2 \\ 1 & 1 & 2 & \frac{1}{3} & 2 & 2 & 1 & 2 & 2 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 1 & \frac{1}{6} & 1 & 1 & \frac{1}{2} & 1 & 1 \\ 3 & 3 & 6 & 1 & 6 & 6 & 3 & 6 & 6 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 1 & \frac{1}{6} & 1 & 1 & \frac{1}{2} & 1 & 1 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 1 & \frac{1}{6} & 1 & 1 & \frac{1}{2} & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & \frac{1}{3} & 2 & 2 & 1 & 2 & 2 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 1 & \frac{1}{6} & 1 & 1 & \frac{1}{2} & 1 & 1 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 1 & \frac{1}{6} & 1 & 1 & \frac{1}{2} & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 3 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 2 & 3 & 1 \\ \frac{1}{2} & 1 & \frac{3}{2} & \frac{3}{2} & \frac{1}{4} & \frac{1}{4} & 1 & \frac{3}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{3} & \frac{2}{3} & 1 & 1 & \frac{1}{6} & \frac{1}{6} & \frac{3}{2} & 1 & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & \frac{2}{3} & 1 & 1 & \frac{1}{6} & \frac{1}{6} & \frac{3}{2} & 1 & \frac{1}{3} \\ 2 & 4 & 6 & 6 & 1 & 1 & 4 & 6 & 2 \\ 2 & 4 & 6 & 6 & 1 & 1 & 4 & 6 & 2 \\ \frac{1}{2} & 1 & \frac{3}{2} & \frac{3}{2} & \frac{1}{4} & \frac{1}{4} & 1 & \frac{3}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & 1 & \frac{3}{2} & \frac{3}{2} & \frac{1}{4} & \frac{1}{4} & 1 & \frac{3}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{3} & \frac{2}{3} & 1 & 1 & \frac{1}{6} & \frac{1}{6} & \frac{3}{2} & 1 & \frac{1}{3} \\ 1 & 2 & 3 & 3 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 2 & 3 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$B_3 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 1 & 2 & 1 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{3} & \frac{2}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} \\ 1 & 3 & 1 & 2 & 1 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{2} & \frac{3}{2} & \frac{1}{2} & 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{6} & \frac{1}{6} & \frac{1}{6} \\ 1 & 3 & 1 & 2 & 1 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ 1 & 3 & 1 & 2 & 1 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ 3 & 9 & 3 & 6 & 3 & 3 & 1 & 1 & 1 \\ 3 & 9 & 3 & 6 & 3 & 3 & 1 & 1 & 1 \\ 3 & 9 & 3 & 6 & 3 & 3 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

子目标基于利益主体层权重以及对于总目标的组合权重如表 2 所示，层次总排序结果见表 3。

表 2 指标权重

Table 2 Indicator weights

	L1	L2	L3	组合权重
	0.17	0.33	0.5	
Z1	0.12	0.13	0.07	0.098 3
Z2	0.12	0.06	0.02	0.050 2
Z3	0.06	0.04	0.07	0.058 4
Z4	0.35	0.04	0.04	0.092 7
Z5	0.06	0.25	0.07	0.127 7
Z6	0.06	0.25	0.07	0.127 7
Z7	0.12	0.06	0.22	0.150 2
Z8	0.06	0.04	0.22	0.133 4
Z9	0.06	0.13	0.22	0.163 1

表 3 层次总排序

Table 3 Total hierarchy

		项目 A	项目 B
Z1	0.098 3	0.45	0.55
Z2	0.050 2	0.33	0.67
Z3	0.058 4	0.83	0.17
Z4	0.092 7	0.56	0.44
Z5	0.127 7	0.71	0.29
Z6	0.127 7	0.71	0.29
Z7	0.150 2	0.67	0.33
Z8	0.133 4	0.67	0.33
Z9	0.163 1	0.59	0.41
组合得分		0.63	0.37

由上表观察到，供给侧和社会层的子目标所占权重较大，综合得分中 OPLC 项目得分高于传统项目。

同上 AHP 计算步骤，子目标层 Z1、Z2、Z3、Z4 基于利益主体层 L1 的权重为： $W_{11} = (0.33, 0.17, 0.17, 0.33)$ ；子目标层 Z5、Z6 基于利益主体层 L2 的权重为： $W_{22} = (0.5, 0.5)$ ；子目标层 Z7、Z8、Z9 基于利益主体层 L3 的权重为： $W_{33} = (0.40, 0.20, 0.40)$ 。

为了使评价结果更为准确，现在在 AHP 计算的权重基础上，基于本文建立的指标量化得分体系建立灰色评价系统。对原始矩阵标准化处理和计算灰色关联系数后，得到子目标层 Z1、Z2、Z3、Z4 基于利益主体层 L1 的评价矩阵  $R_1$ ；子目标层 Z5、Z6 基于利益主体层 L2 的评价矩阵  $R_2$ ；子目标层 Z7、Z8、Z9 基于利益主体层 L3 的评价矩阵  $R_3$ 。

$$R_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0.07 \\ 0.33 & 0.07 & 0.56 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0.56 & 0.67 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0.67 & 1 & 0.33 \end{bmatrix} \quad (17)$$

由矩阵  $W_{11}$  与  $R_1^T$ 、 $W_{22}$  与  $R_2^T$ 、 $W_{33}$  与  $R_3^T$  的乘积得到子目标关于利益主体层的灰色关联度矩阵，组成利益主体层关于总目标的评价矩阵  $R$ 。

$$R = \begin{bmatrix} 0.6931 & 1 & 1 \\ 0.546 & 0.615 & 0.6 \end{bmatrix} \quad (18)$$

最后基于利益主体层关于总目标的 AHP 所得权重与评价矩阵  $R^T$  的乘积得到利益主体层关于总目标的灰色关联度矩阵为  $(0.947 8, 0.595 8)$ ，可见 OPLC 项目更接近于最优方案。灰色系统评价与层

次分析结果一致, 说明本文所建立的效益评价指标符合业界专业评价标准。

## 4 效益评价及分析

### 4.1 供给侧效益评价

供给侧子目标所占组合权重为 29.96%。就可靠性而言, 组合权重为 9.83%, 不管是专家打分还是指标量化结果都表明传统项目优于 OPLC 项目。由于传统电网和通信网已经处于成熟阶段, 对于故障的处理各自有一套完整的体系, 这是 OPLC 项目还需不断完善的地方。但是, OPLC 有自动检测系统和科学化的应急方案, 提升了电网运行的准确合理水平。

就灵活性而言, 组合权重为 5.02%, 专家打分结果表明传统项目优于 OPLC 项目, 但指标量化结果相反, 这里产生分歧的原因应该是对灵活性定义产生歧义。本文的层次分析法基于专家对九大指标的经验(打分时, 只有九大指标, 没有具体量化标准), 因个体偏好差异, 每位专家对于 Z2 灵活性的定义理解不同, 所以存在一些专家不按本文所建指标体系中 Z2 的“清洁能源接纳能力”量化标准而打分。本文的灰色系统则基于专家对本文九大量化指标的具体量化标准进行打分, 所以每位专家只能按照本文所建指标体系中 Z2 的“清洁能源接纳能力”量化标准而打分。所以打分结果的差异, 表明了专家与本文量化标准对于 Z2 灵活性理解的不同: 专家各凭主观经验打分时可能一些强调应急方案处理速度, 专家按本文量化标准打分时强调清洁能源接纳能力。本文的“应急方案处理速度”主要体现在可靠性 Z1 指标中, 如此也可以看出: 仅凭借层次分析的专家打分容易忽略指标的全部含义, 这便需要灰色系统的具体量化指标体系的建立。

就信息化而言, 组合权重为 5.84%, OPLC 项目明显优于传统项目。具体表现在: OPLC 电力光纤到户按照信息资源集中管理的原则, 建立了全局性的三大中心即业务信息仓库及实时数据库为基础的数据中心、存储阵列组成的存储中心以及统一的备份中心。以一大网络三大中心为支撑, 逐步建成了以 ERP 系统为核心、外部系统为辅助, 高度统一的企业级信息化业务系统和保障体系。能源与信息同步传输, 能够自动监控, 且实现自动检测诊断。

就节约化而言, 组合权重为 9.27%, OPLC 项目优于传统项目。OPLC 显著的优势即光缆、电缆抗外界能力强、自愈能力强, 这样有效地降低了运维成本; 电网与通信网无需分别挖设管道, 在避免对土地的二次破坏的同时也降低了建设成本。

### 4.2 用户端效益评价

用户侧子目标所占组合权重为 25.54%, 比重较大。从服务一体化来看, 组合权重为 12.77%, OPLC 项目优于传统项目, OPLC 项目把实现消费者的利益放在突出位置。OPLC 项目通过通信网络将交通网、政府信息网、教育网等“信息孤岛”有效地连接起来, 逐步推进城市的智慧化, 居民越来越享受到了服务一体化的便利。

从绿色生活来看, 组合权重为 12.77%, OPLC 项目优于传统项目。电力光纤复合低压电缆内含多股纤芯, 一则可以满足由于大量智能用电设备、分布式清洁能源及汽车充换电设施接入带来的海量信息传送的需求; 二则可实现搭建全开放性公共光纤网络平台。智慧城市电力光纤到户促进家庭用户广泛接入太阳能, 这种清洁能源的广泛接入, 使人们对资源的利用更加多样化, 使居民的生活更加绿色环保, 也是国家对资源利用的合理化。

### 4.3 社会层效益评价

社会层子目标所占组合权重为 44.67%, 占比最大, 与生产者和消费者效益相比, 社会效益更为重要。就经济效益而言, 组合权重为 15.02%, OPLC 项目优于传统项目。OPLC 电力光纤到户的发展将为传统优势产业、基础薄弱产业及新兴产业提供发展机遇, 可以有效带动多产业共同发展, 实现产业结构调整与升级, 体现对国民经济的推动作用。

就文化效益而言, 组合权重为 13.34%, OPLC 项目与传统项目各有优势。传统项目更趋于成熟, 在发展成熟的过程中实现了很多关键技术和难点的突破, 对于电力产业和通信产业来说都有至关重要的作用。OPLC 项目需实现“四网融合”, 在此过程中需要建立新的技术标准, 攻克新的技术难题, 新的科技成果也会应运而生。两者对于社会层文化效益的大小比较还需要细化的指标量化结果对比。

就环境效益而言, 组合权重为 16.31%, 在单项指标权重比较中所占比例最大, OPLC 项目优于传统项目。OPLC 电力光纤到户建设, 提高了单位空间的能源与信息的传输能力, 为智慧城市的发展破除要素制约。通过城区变电站智能化改造, 减少土地占用面积, 为城市公共资源的配置提供空间; 通过城市电网廊道和地下电缆管道的集约使用, 破解电信运营商城市通信管道紧张的局面。

## 5 结论

传统的电力、光纤效益评价体系已经不能满足 OPLC 项目的效益评价, 而现阶段针对 OPLC 项目效益评价的研究基本处于空白, 本文应 OPLC 效益

评价的迫切性,建立了一套具有针对性的效益评价体系。其中的指标量化方法得到了层次分析模型的验证。OPLC 项目为构建智慧城市公共信息服务平台奠定基础,为政府、企业和公众营造一个安全、和谐、便捷的人居环境。正是基于这样的人居环境,从不同的利益主体出发,在可靠性、灵活性、信息化、节约化、服务一体化、绿色生活化、经济效益、文化效益、环境效益九大指标下,不管是以专家主观打分为基础的层次分析法还是以指标量化得分为基础的灰色系统评价,都得到 OPLC 项目效益更优的一致结果,说明本文所建立的效益评价指标符合业界专业评价标准。但是本文所建指标量化体系仍存在问题,比如:第一,由于针对 OPLC 项目的效益评价研究较少,本文的效益评价指标参考来源不足,有待于进一步完善;第二,所列节约化等相关指标缺乏对综合成本(包括经济成本和时间成本)的考虑,OPLC 项目和传统项目的成本比较还须从短期和长期综合来看,需要通过具体的工程数据计算实证,对此未能考虑全面,希望在后续的研究中逐渐完善。

### 参考文献

- [1] 石征, 侯思祖. 光纤保护通道的可靠性综合评价研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(11): 91-94.  
SHI Zheng, HOU Sizu. Reliability comprehensive evaluation for optical fiber protection channel[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(11): 91-94.
- [2] 韩中合, 祁超, 向鹏, 等. 分布式能源系统效益分析及综合评价[J]. 热力发电, 2018, 47(2): 31-36.  
HAN Zhonghe, QI Chao, XIANG Peng, et al. Benefit analysis and comprehensive evaluation for distributed energy system[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(2): 31-36.
- [3] 杨彩艳. 掌岗图变电站光纤通信工程综合评价研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.  
YANG Caiyan. Comprehensive evaluation research for optical fiber communication engineering of Zhanggangtu substation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [4] KHODAPARAST J, KHEDERZADEH M. Least square and Kalman based methods for dynamic phasor estimation: a review[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 1-18. DOI: 10.1186/s41601-016-0032-y.
- [5] 梁纪峰, 胡雪凯, 胡文平, 等. 基于 PSASP 的高阻抗变压器工程应用价值模糊综合评价[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 134-139.  
LIANG Jifeng, HU Xuekai, HU Wenping, et al. Fuzzy comprehensive evaluation for engineering value of high impedance transformer based on PSASP[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 134-139.
- [6] 李珊, 欧世锋, 李克文, 等. 配电网故障应急资源自适应优化分配策略[J]. 广东电力, 2017, 30(11): 38-43.  
LI Shan, OU Shifeng, LI Kewen, et al. Self-adaptive optimal allocation strategy for emergency resources for power distribution network failure[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(11): 38-43.
- [7] 曾博, 李英姿, 张建华, 等. 电力市场新格局下智能配电网规划的综合评价模型及方法[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3309-3316.  
ZENG Bo, LI Yingzi, ZHANG Jianhua, et al. Comprehensive evaluation model and method for smart distribution network planning under new electricity market layout[J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3309-3316.
- [8] LI H, ESEYE A T, ZHANG J H, et al. Optimal energy management for industrial microgrids with high-penetration renewables[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 122-135. DOI: 10.1186/s41601-017-0040-6.
- [9] 刘悦. 电力企业员工综合素质评价研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.  
LIU Yue. Research on the evaluation of electric power enterprise employees' comprehensive quality[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [10] DANG Y G, LIU S F. The GM models that  $x(n)$  be taken as initial value[J]. Kybernetes: The International Journal of Systems & Cybernetics, 2004, 33(2): 247-254.
- [11] WU L F, LIU S F, YAO L G, et al. Grey system model with the fractional order accumulation[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2013, 18(7): 1775-1785.
- [12] 郭晓君, 刘思峰, 方志耕. 基于合成灰数灰度的区间灰数自忆性预测模型[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(6): 1124-1129.  
GUO Xiaojun, LIU Sifeng, FANG Zhigeng. Self-memory prediction model of interval grey number based on grey degree of compound grey number[J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(6): 1124-1129.
- [13] 林跃忠, 王铁成, 王来, 等. 三峡工程高边坡的稳定性分析[J]. 天津大学学报, 2005, 38(10): 936-940.  
LIN Yuezhong, WANG Tiecheng, WANG Lai, et al.

- Stability analysis of high excavated slope in three gorges project[J]. Journal of Tianjin University, 2005, 38(10): 936-940.
- [14] HAO Y H, ZHAO J J, LI H M, et al. Karst hydrological processes and grey system model[J]. Journal of American Water Resources Association, 2012, 48(4): 656-666.
- [15] 饶尧, 邱泽晶, 彭旭东. 基于层次分析法的电网能效影响因子分析研究[J]. 节能技术, 2014, 32(1): 51-54.
- RAO Yao, QIU Zejing, PENG Xudong. Analysis of grid energy efficiency factors based on analytic hierarchy process[J]. Energy Conservation Technology, 2014, 32(1): 51-54.
- [16] 肖峻, 王成山, 周敏. 基于区间层次分析法的城市电网规划综合评判决策[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 50-57.
- XIAO Jun, WANG Chengshan, ZHOU Min. An IAHP-BASED MADM method in urban power system planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 50-57.
- [17] 李晓辉, 张来, 李小宇, 等. 基于层次分析法的现状电网评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(14): 57-61.
- LI Xiaohui, ZHANG Lai, LI Xiaoyu, et al. The research on the evaluation system for existing network based on analytic hierarchy process and Delphi method[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(14): 57-61.
- [18] 雷琪, 苗世洪, 郭宝甫, 等. 基于层次分析和改进逼近理想解法的分层储能系统综合评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 13-19.
- LEI Qi, MIAO Shihong, GUO Baofu, et al. Comprehensive evaluation of hierarchical storage system based on analytic hierarchy process and improved technique for order preference by similarity to ideal solution[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 13-19.
- [19] 邓红雷, 戴栋, 李述文. 基于层次分析-熵权组合法的架空输电线路综合运行风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 28-34.
- DENG Honglei, DAI Dong, LI Shuwen. Comprehensive operation risk evaluation of overhead transmission line based on hierarchical analysis-entropy weight method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 28-34.
- [20] 彭纪生, 仲为国, 孙文祥. 政策测量、政策协同演变与经济绩效: 基于创新政策的实证研究[J]. 管理世界, 2008(9): 25-36.
- PENG Jisheng, ZHONG Weiguo, SUN Wenxiang. Measurement of policy, coordination of policy and economic performance: an empirical study on innovation policy[J]. Management World, 2008(9): 25-36.

---

收稿日期: 2017-11-15; 修回日期: 2018-01-18

作者简介:

迟远英(1968—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力经济学; E-mail: goodcyy@bjut.edu.cn

祁齐(1996—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力经济学。E-mail: 490817212@qq.com

(编辑 魏小丽)