

基于AHP的光缆系统运行效能评估

王永群¹, 王晓羽¹, 寇小平¹, 金向辉²

¹69036部队, 新疆 库尔勒

²阿克苏军分区, 新疆 阿克苏

收稿日期: 2025年7月12日; 录用日期: 2025年8月4日; 发布日期: 2025年8月15日

摘要

为科学评估光缆维护工作, 综合分析影响光缆系统稳定运行的关键因素, 构建了效能评价模型。该模型在系统、技术、工艺、资料等因子基础上, 引入层次分析法(AHP), 对评价指标体系各影响因素进行重要程度排序, 合理确定指标权重。利用极值法、综合评估公式分别确定无量纲指标值和维护效能量化值。最后通过某公司维护工作实例, 验证方法的可行性。结果表明, 本方法简单高效、实用可靠。

关键词

AHP, 光缆维护, 效能评估

Evaluation of Maintenance Efficiency of Optical Cable Based on AHP

Yongqun Wang¹, Xiaoyu Wang¹, Xiaoping Kou¹, Xianghui Jin²

¹69036, Korla Xinjiang

²Aksu Army Division, Aksu Xinjiang

Received: Jul. 12th, 2025; accepted: Aug. 4th, 2025; published: Aug. 15th, 2025

Abstract

In order to scientifically evaluate the maintenance of optical cables, the key factors affecting the stable operation of optical cable systems were comprehensively analysed, and an efficiency evaluation model was constructed. On the basis of conventional factors such as system, technology, process, and data, the model introduces analytic hierarchy process (AHP) to rank the importance of each influencing factor of the evaluation index system, and reasonably determine the weight of the index. The extreme value method and the comprehensive evaluation formula were used to determine the dimensionless index value and the quantitative value of maintenance efficiency,

respectively. Finally, the feasibility of the method is verified through the maintenance work example of a company. The results show that the proposed method is simple, efficient, practical, and reliable.

Keywords

AHP, Cable Maintenance, Effectiveness Evaluation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

光缆系统运行效能是反映线路维护分队工作能力、工作效率和工作实绩的重要指标，对于预测与排除系统隐患、优化维护资源、提升运行效率、量化考核标准具有十分重要的现实意义。

目前，国内外专家学者对于光缆系统的效能评估通常基于传输性能、纤芯倒换、环网保护等方向，以巡检为主要手段[1]，通过复杂的网络管理系统、精密的震动检测设备和庞大的线路施工建设，提高光纤通信系统的稳定性和可通率。陆涛[2]等对光缆网评价指标进行分析，采用不确定层次分析法，构造出3个一级指标、并细化出15个二级指标，结合权重修正算法，计算出光缆健康度，作为巡视频率调整依据，并以实例验证，提高了检修的有效性，为光缆网络运行状态监测管理和运维工作提供有效支撑。陈铭人[3]针对光缆线路缺少高效预测管理手段的问题，采用基于三角模糊的模糊层次分析法，建立3层指标体系，综合运用AHP、三角模糊数、劣化度和MR健康度算法，旨在解决传统AHP方法受主观因素影响较大、一致性检验易出错等问题。尹婧[4]等针对干线光缆存在的纤芯老化、资源利用率差异大、业务分配不均衡等问题，通过制定效能评价规则与个性化赋能方案，将干线光缆划分为4个等级，提出了结构优化、业务分担、活力再造、降级维护、取消代维等措施，实现提高效益、降低成本目的。高飞翔[5]等从施工建设和日常维护方面考虑，分析出光缆自身特性、施工外部环境、施工人为因素、自然环境、维护人员水平等影响光缆线路的5条因素，提出了提高光缆可行性、高效性的6条措施。陈勳勳[6]等从光缆的物理脆弱性与网络的高可靠性需求之间的矛盾出发，梳理了光缆运维中常见的故障类型，介绍了当前光缆运维中应用的光时域反射仪(OTDR)、分布式光纤传感技术(DOFS)等传统手段，并对不同运维场景下的适用性进行了探讨。高强[7]等综合考虑光缆系统可能出现的故障因素、对业务的影响、故障的恢复及光缆类型，构造了4个中间层、13个最底层的AHP层次结构，引入不确定型层次分析法，削弱主观影响，并以案例验证，计算出光缆系统的可靠性，结果更加符合运维实际。

某维护单位地处边远，工作环境恶劣，承载系统简单，难以进行复杂理论培训和设施建设投入，做好经常性、基础性、细致性的日常维护工作更加高效、切合实际。因此，根据影响光缆系统运行效能的关键因素，依据层次分析法原理和方法，构建评估模型，为有效消除系统隐患、确保系统稳定、科学评估维护单位的工作效能提供理论依据和数据支撑[8]，具有结合实际紧密、实施快速简单的优点。

2. 构建光缆系统运行效能影响因素指标体系

2.1. 分析影响光缆系统运行效能的主要因素

光缆作为光纤通信系统的重要组成部分，承载着设备连接、信号传输与拓扑架构等功能，从其功能

作用分析, 光缆系统运行效能主要表现为四个方面: 系统运行的稳定程度、信号传输的优劣程度、载体及附属设备的建设水平以及值勤与维护资料的管理水平。综合分析评判, 光缆系统运行效能指标体系, 包括体现光缆系统在特定时间段内能够正常运行并提供服务的能力的系统可用性指标、体现光缆系统光纤反射特性的传输性能指标、体现光缆系统路由维护能力的工艺水平指标、体现光缆系统日常管理水平和精细程度的档案资料指标。

2.2. 指标体系影响因素的筛选与优化

基于德尔菲法(Delphi Method)进行影响因素的筛选。

(1) 确定专家团队。选取某通信公司所在边境地区从事光缆维护工作 10 年以上, 熟悉本地域地理与气候环境、故障修复过程的专家人员 15 人, 其中高级职称 3 人, 中级职称 8 人, 初级职称 4 人。

(2) 组织问卷调查。基于李克特量表(Likert Scale)法, 为专家组分发光缆系统运行效能影响因素评分表, 专家通过查阅维护资料、总结工作经验、结合工作实际进行第一轮打分与反馈; 收集专家意见并调整评分表, 而后进行第 2、第 3 轮打分反馈, 最终得到一致性判断决策。

(3) 确定指标体系。综合分析上一步骤专家打分结果, 确定指标体系。

2.3. 建立关联指标体系

通过分析文献、查阅规定、咨询专家等方式[9] [10], 在全面分析掌握光缆系统运行效能含义的基础上, 将影响因素精确筛选、科学凝练, 得到 4 个一级指标和 13 个二级指标[11]。如图 1 所示。

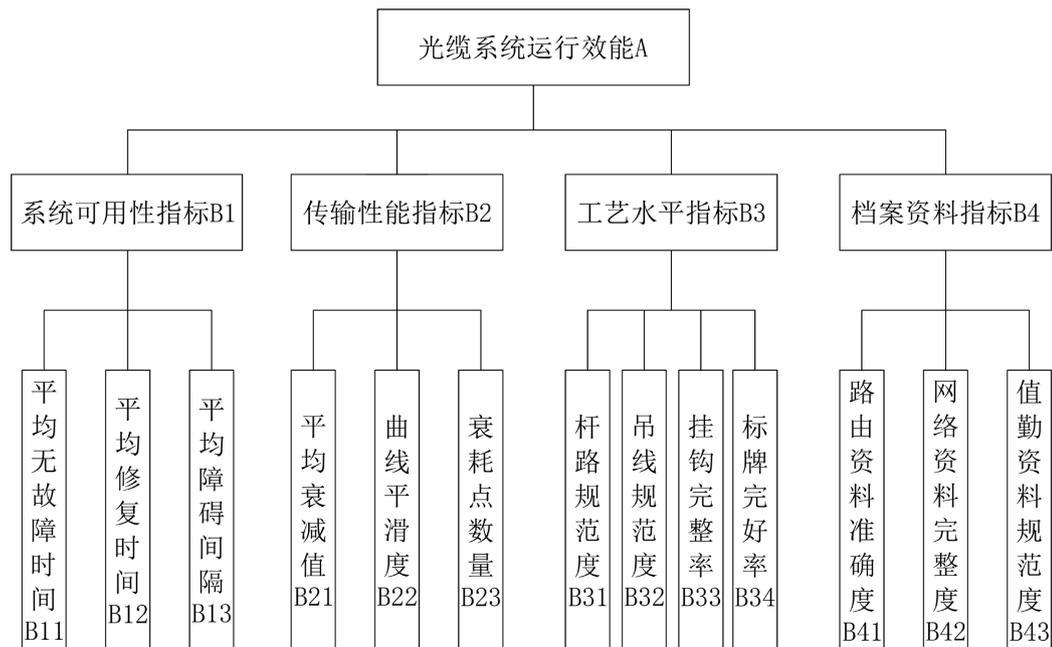


Figure 1. Operational efficiency index system of optical cable system

图 1. 光缆系统运行效能指标体系

系统可用性指标包括反映系统在规定时间内功能保持能力的平均无故障时间、反映维护人员对系统故障维修能力的平均修复时间、反映系统时间质量的平均障碍时间; 传输性能指标包括反映中继段内光纤损耗的平均衰减值、反映中继段内光纤后向散射曲线事件数量的曲线平滑度、反映中继段内 0.5 dB 以上损耗点数量的超标衰耗点数量; 工艺水平指标包括反映架空光缆电杆杆身、杆面、杆距等符合建设标

准的杆路规范度，反映线路吊线安全性、美观性和规范性的吊线规范度，反映光缆托挂与稳定水平的挂钩完整率，反映光缆系统各类标示指标齐全程度的标牌完好率；档案资料指标包括反映光缆系统物理坐标的路由资料准确度、反映光缆系统连接与开通关系的网络资料完整度、反映光缆系统运行与管理情况的值勤资料规范度。

2.4. 构造指标判断矩阵

判断矩阵是本层所有因素的相对重要性和相对于上层因素所占权重的定量描述。

1~9 标度法由美国国家工程院院士萨蒂(T.L.Satty)提出，是构建判断矩阵的常用方法之一[12]，见表 1。

Table 1. 1~9 scale values

表 1. 1~9 标度值

标度值	a_{ij} 数值表示的重要性等级
1	元素 a_i 与元素 a_j 同等重要
3	元素 a_i 比元素 a_j 稍微重要
5	元素 a_i 比元素 a_j 明显重要
7	元素 a_i 比元素 a_j 非常重要
9	元素 a_i 比元素 a_j 绝对重要
2, 4, 6, 8	介于上述相邻标度的中间值
1~9 的倒数	两元素交换次序后的重要性比值 $a_{ij} = 1/a_{ji}$

判断矩阵模型如下：

$$M = (a_{ij})_{m \times n} = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中， a_{ij} 为指标 a_i 与指标 a_j 的重要性比值； n 为指标数量。判断矩阵须满足以下条件：

- (1) $a_{ij} > 0$ ；
- (2) $a_{ij} = 1/a_{ji}$ ；
- (3) $a_{ii} = 1$ 。

根据以上原则构造判断矩阵如下。

目标层 - 准则层判断矩阵，见表 2。

Table 2. Target layer-criterion layer judgment matrix

表 2. 目标层 - 准则层判断矩阵

判断矩阵 M	工艺水平指标	传输性能指标	系统可用性指标	档案资料指标
工艺水平指标	1	1/2	1/3	6
传输性能指标	2	1	1/2	5
系统可用性指标	3	2	1	7
档案资料指标	1/6	1/5	1/7	1

其他层次判断矩阵如下，系统可用性指标判断矩阵：

$$M_1 = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1/2 \\ 1/2 & 1 & 1/3 \\ 2 & 3 & 1 \end{pmatrix}$$

传输性能指标判断矩阵:

$$M_2 = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 4 \\ 1/3 & 1 & 2 \\ 1/4 & 1/2 & 1 \end{pmatrix}$$

工艺水平指标判断矩阵:

$$M_3 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 3 & 5 \\ 1 & 1 & 3 & 5 \\ 1/3 & 1/3 & 1 & 2 \\ 1/5 & 1/5 & 1/2 & 1 \end{pmatrix}$$

档案资料指标判断矩阵:

$$M_4 = \begin{pmatrix} 1 & 4 & 6 \\ 1/4 & 1 & 3 \\ 1/6 & 1/3 & 1 \end{pmatrix}$$

2.5. 层次单排序及一致性检验

层次分析法中, 层次单排序是指每一个判断矩阵本层次各关联因素相对于其上一层准则的权重, 一致性检验用于评估判断矩阵的构造是否逻辑合理、有无一致性问题。

(1) 利用方根法计算各判断矩阵权重向量, 步骤如下:

1) 计算本层次元素权重初始值

$$w_j = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n a_{ij}} \quad (2)$$

其中, w_j 为本层次第 j 个元素的初始权重值, 元素 a_{ij} 为第 i 个元素与第 j 个元素的重要性比值, n 为该判断矩阵阶数。

2) 计算本层次元素权重向量

$$\bar{w}_j = \frac{w_j}{\sum_{j=1}^n w_j} \quad (3)$$

\bar{w}_j 为初始权重值归一化处理后得到的权重列向量。

3) 计算判断矩阵的特征根

$$\lambda_j = \sum_{i=1}^n a_{ij} \times \bar{w}_j \quad (4)$$

4) 计算最大特根值

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{\lambda_j}{\bar{w}_j} \quad (5)$$

5) 计算本层次判断矩阵一致性指标值

$$C.I. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \tag{6}$$

6) 计算一致性比率值(平均随机一致性检验指标 *R.I.*值, 见表 3)。

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.} \tag{7}$$

Table 3. RI value of mean stochastic consistency test

表 3. 平均随机一致性检验指标 *R.I.*值

阶数 <i>n</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>R.I.</i> 值	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49

实际应用中, 阶数 *n* 一般不超过 10; 若阶数大于 10, 可考虑新建下级指标体系。

(2) 根据上述步骤与公式, 各层次单排序权重向量和一致性检验计算结果如下:

目标层 - 准则层:

$$w = (0.4754, 0.2777, 0.1954, 0.0515); \lambda_{\max} = 4.1207; CR = 0.0452;$$

判断矩阵一致性满足要求, 系统可用性指标在光缆系统运行效能中所占权重最大(0.4754), 符合客观逻辑;

系统可用性指标:

$$w^1 = (0.2973, 0.5390, 0.1638); \lambda_{\max} = 3.0092, CR = 0.0089;$$

判断矩阵一致性满足要求, 平均无障碍时间在系统可用性指标中所占权重最大(0.5390);

传输性能指标:

$$w^2 = (0.6232, 0.2395, 0.1373); \lambda_{\max} = 3.0183, CR = 0.0176;$$

判断矩阵一致性满足要求, 平均衰减在衰减性能指标中所占权重最大(0.6232);

工艺水平指标:

$$w^3 = (0.3935, 0.3935, 0.1376, 0.0754); \lambda_{\max} = 4.0042, CR = 0.0016;$$

判断矩阵一致性满足要求, 杆路规范度和吊线规范度在工艺水平指标中所占权重最大(0.3935);

档案资料指标:

$$w^4 = (0.6853, 0.2213, 0.0934); \lambda_{\max} = 3.0541, CR = 0.0521;$$

判断矩阵一致性满足要求, 路由资料准确度在衰档案资料指标中所占权重最大(0.6232)。

2.6. 层次总排序及一致性检验

(1) 层次总排序是指计算某一层次所有因素对于最高层(目标层)相对重要性的组合权重。该过程需要利用本层次所有因素与上层对应因素及相关联各因素的层次单排序结果, 通常自上而下逐层进行。计算公式如下:

$$W^k = w^k \times w^{k-1} \times \dots \times w^2 \tag{8}$$

其中, W^k 为第 *k* 层各指标的总排序权重向量, w^k 为第 *k* 层各相关指标相对于其上层准则构成的权重向量。

计算出层次总排序结果如下:

$$W = \begin{pmatrix} 0.4754 \\ 0.2777 \\ 0.1954 \\ 0.0515 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0.2973 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1638 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5390 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.6232 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2395 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1373 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3935 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3935 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1376 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0754 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.6853 \\ 0 & 0 & 0 & 0.2213 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0934 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.1413 \\ 0.0779 \\ 0.2562 \\ 0.1731 \\ 0.0381 \\ 0.0665 \\ 0.0769 \\ 0.0769 \\ 0.0269 \\ 0.0147 \\ 0.0353 \\ 0.0114 \\ 0.0048 \end{pmatrix}$$

(2) 进行总的一致性检验

本层次相对于上一层次的一致性指标值计算公式如下：

$$CR = \frac{w_1 \times CI_1 + w_2 \times CI_2 + \dots + w_m \times CI_m}{w_1 \times RI_1 + w_2 \times RI_2 + \dots + w_m \times RI_m} = \sum_{i=1}^m w_i \times CI_i \quad (9)$$

本层次总的一致性指标值需要从底层向上逐层累加，计算公式为：

$$CR^k = CR^{k-1} + \frac{\sum_{i=1}^m w_i \times CI_i^k}{\sum_{i=1}^m w_i \times RI_i^k} \quad (10)$$

CI_i^k 、 RI_i^k 分别为第 k 层各元素相对于上一层即 $k-1$ 层中第 i 个元素的判断矩阵的一致性指标值和平均随机一致性指标值。

依此公式，光缆系统运行效能 3 层指标体系总的一致性检验结果为：

$$CR = \frac{0.4751 \times 0.0089 + 0.2777 \times 0.0176 + 0.1954 \times 0.0016 + 0.0515 \times 0.0521}{0.4754 \times 0.52 + 0.2777 \times 0.52 + 0.1954 \times 0.89 + 0.0515 \times 0.0521} = 0.0205$$

$CR < 1$ ，总的一致性检验值满足要求。

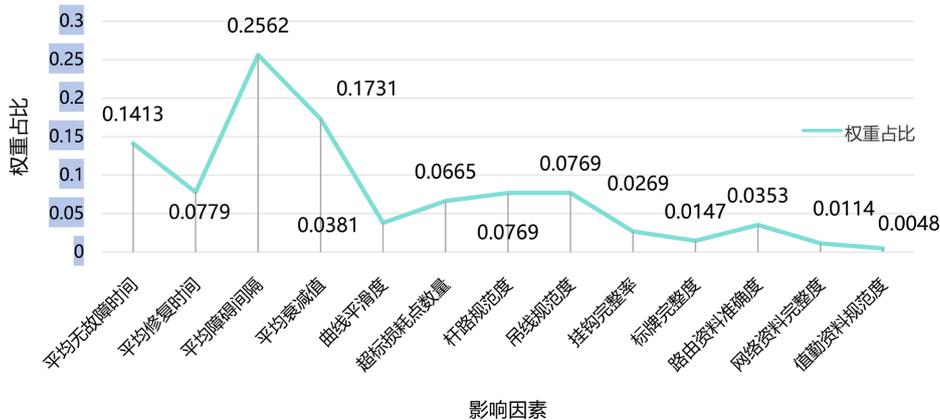


Figure 2. The total ranking of the operational efficiency of the optical cable system
图 2. 光缆系统运行效能层次总排序

光缆系统运行效能层次总排序，如图 2 所示。

3. 计算综合效能值

光缆系统运行效能 13 项指标中，定性指标包括：杆路规范度、吊线规范度、路由资料准确度、网络资料完整度、值勤资料规范度；定量指标包括：平均无故障时间、平均修复时间、平均障碍间隔、平均衰减值、曲线平滑度、衰耗点数量、挂钩完整率、标牌完好率；定量指标中，平均修复时间、平均衰减值、衰耗点数量为成本型指标，数值越小越好；其余为效益型指标，数值越大越好。

3.1. 采用专家评分法确定各因素指标值

计算公式为：

$$v_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m v_{ij} \tag{11}$$

其中， v_i 为第 i 个因素的综合指标值， v_{ij} 指专家 j 为因素 i 的打分值， m 为专家组成员数量；

3.2. 无量纲化指标值

指标值无量纲化主要为消除不同指标单位影响，便于计算，公式如下：

$$V = \frac{v_{\max} - v_i}{v_{\max} - v_{\min}} \text{ 成本型指标} \tag{12}$$

$$V = \frac{v_i - v_{\min}}{v_{\max} - v_{\min}} \text{ 效益型指标} \tag{13}$$

其中 V 为因素 a_i 的无量纲化指标值， v_{\max} 、 v_{\min} 分别为专家打分赋予因素 a_i 的最大值和最小值； v_i 为因素 a_i 经步骤 1 计算后的指标值；

3.3. 计算综合效能值

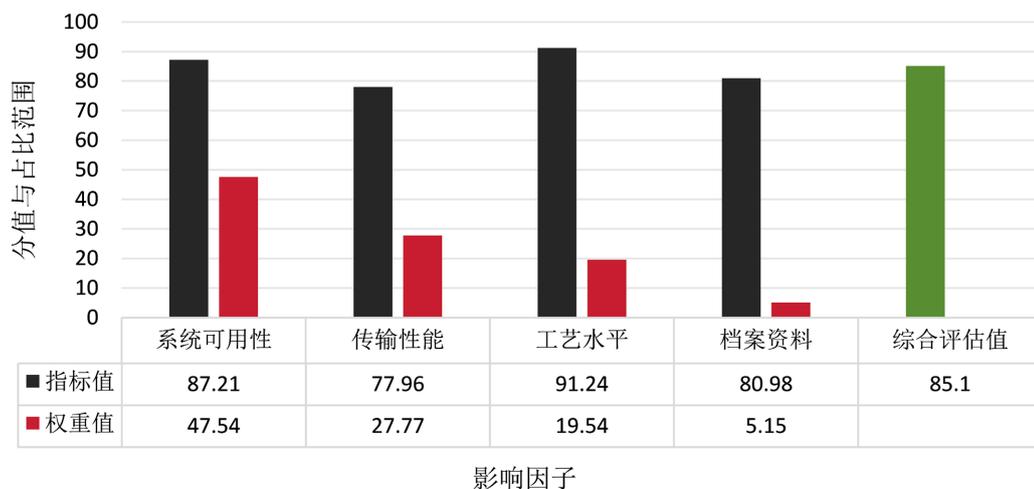


Figure 3. Operational efficiency of the optical cable system

图 3. 光缆系统运行效能值

综合效能值计算公式如下：

$$E^{ki} = V^{kiT} \times W^{ki} \tag{14}$$

其中, E^{ki} 为第 k 层以元素 i 为准则的指标子体系效能评估值, W^{ki} 为第 k 层以元素 i 为准则的各关联因素的权重向量, V^{kiT} 为第 k 层元素 i 准则下各关联因素经步骤 2.1、2.2 计算后的指标值向量转置。

专家组采用百分制为光缆系统运行效能指标体系中 13 个影响因素打分的指标值向量 $V = (78, 92, 84, 72, 86, 91, 93, 89, 90, 96, 75, 94, 94)$; 即 $V^1 = (78, 92, 84)$; $V^2 = (72, 86, 91)$; $V^3 = (93, 89, 90, 96)$; $V^4 = (75, 94, 94)$;

$V^i (i=1, 2, 3, 4)$ 表示“系统可用性指标、衰减性能指标、工艺水平指标、档案资料指标”所属各关联要素指标值向量;

由此计算出: $E1 = 0.2519 \times 78 + 0.5889 \times 92 + 0.1593 \times 84 = 87.21$;

同理, $E2 = 77.96$; $E3 = 91.24$; $E4 = 80.98$;

根据式 $E = V^T * W$, 计算出光缆系统运行效能值:

$E = 85.10$ 。

依据“四级评分法”, 该光缆通信系统运行效能结果评定为“良好”, 与综合考评结果一致, 如图 3 所示。

4. 结果分析

对层次总排序计算结果分析, 平均障碍间隔、平均衰减、平均无故障时间 3 个指标对光缆系统运行效能影响相对较大, 反映了光缆系统平稳运行能力和传输性能优异性。光缆系统运行效能是维护分队工作实绩体现的重要体现, 日常维护工作中, 应当调整工作偏差, 注重三个方面: 一是及时发现和着力解决光缆路由存在隐患, 避免重复发生故障, 重点关注自然灾害多发地段和超高车辆影响路段; 二是定期组织纤芯质量测试, 发现大损耗点及时处理, 提高传输性能; 三是巡线制度的制定与实施, 定期巡护, 全面掌握路由情况。同时, 反映抢修能力和路由维护能力的平均修复时间、杆路与吊线规范度, 也应当给予足够重视, 加强抢修分队的业务训练和路由整治。

5. 结束语

文章提出了一种光缆系统运行效能评估的方法, 该方法在综合并深入分析文献资料的基础上, 确定了光缆系统运行效能的影响因素及其内部关系, 引入层次分析法(AHP)建立了层次分析模型, 确定了各影响因素权重的综合评估值, 以专家打分、无量纲化方法综合计算出光缆系统运行效能值。此方法能够确定光缆通信系统各分项指标相对重要程度, 量化分析系统运行效能, 为确定光缆系统运行效能值提供参考, 方法简单, 易于实施, 契合边境地区线路维护人员整体理论水平较低的实际, 对于提高光缆线路维护水平具有较强的操作性, 同时对公司内部电源系统、SDH 和 OTN 系统运行效能的评估方式具备一定的参考意义。但文中仅以架空光缆建模, 也未考虑人工主观因素影响二次消弱, 实际评估时, 其他敷设方式应更新评估指标, 引入熵权法、TOPSIS、模糊综合评判等方法与 AHP 综合使用, 可得到更加客观、科学的效果。

参考文献

- [1] 李锦华, 贺雄, 彭磊, 等. 一种提高光缆维护质量的方法[J]. 通讯世界, 2019, 26(12): 34-35.
- [2] 陆涛, 吕顺利, 缪巍巍, 吴海洋, 吴昊, 腾欣元. 基于不确定层次分析法的电力光缆网健康度评估研究[J]. 智能电网, 2019, 9(2): 41-48.
- [3] 陈铭人. 广电主干网光缆线路健康状态评估研究[J]. 广播与电视技术, 2022, 49(11): 92-95.
- [4] 尹婧, 马梁, 孟超. “1 + 3 + 4”光缆效能评价体系的分析[C]//中国通信学会通信线路委员会, 四川省通信学会通信线路委员会, 电信科学技术第五研究所有限公司. 中国通信学会 2020 年通信线路学术年会论文集. 北京: 人

民邮电出版社, 2020: 296-300.

- [5] 高飞翔. 通信光缆线路施工与日常维护常见影响因素分析[J]. 中国新通信, 2023, 25(5): 7-9.
- [6] 陈勐勐, 薛毅, 高成岗, 等. 通信光缆运维技术综述[J]. 激光与光电子学进展, 2025, 62(13): 101-127.
- [7] 高强, 耿方方, 芦杉. 基于不确定型 AHP 的电力光缆线路模糊综合评估[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(3): 46-49.
- [8] 刘华丽, 卢厚清, 李宏伟, 等. 模糊综合评判法在边坡稳定性分析中的应用[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2013, 14(1): 84-88.
- [9] 苏醒. 一种基于层次分析法(AHP)的光缆网资源规划[J]. 办公自动化, 2021, 26(7): 8-9, 64.
- [10] 黎明, 刘华丽, 邢英, 张锐, 范文杰. 基于熵权 TOPSIS 模型的爆破作业安全风险影响因素评价分析[J]. 建模与仿真, 2025, 14(5): 405-416.
- [11] 邱雄飞, 张桦, 赵张鹏, 赵润泽. 基于 AHP 和模糊综合评判的装备综合保障效能评估[J]. 指挥控制与仿真, 2024, 46(2): 78-83.
- [12] Franek, J. and Kresta, A. (2014) Judgment Scales and Consistency Measure in AHP. *Procedia Economics and Finance*, 12, 164-173. [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(14\)00332-3](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(14)00332-3)