

基于熵权TOPSIS模型的火灾报警器可靠性和消防管理水平评价

李 乾

华北电力大学, 北京

收稿日期: 2022年7月11日; 录用日期: 2022年8月4日; 发布日期: 2022年8月12日

摘 要

火灾是最为频繁, 也是对现代人类社会危害最大的灾害之一。为了能够及时对火灾发生的地点进行精确报警, 对火灾报警器的选择非常重要。为了选择可靠性更好的火灾报警器, 我们分析了国内某城市在一段时间内所有类型的火灾报警器报警记录和故障记录, 建立基于熵权法的TOPSIS综合评价模型, 选出可靠性最好的火灾报警器类型。同时, 为了评估区域内各消防大队的管理水平, 我们同样使用熵权TOPSIS模型建立了综合管理水平评价模型, 选出了管理水平最好的三只消防队和管理水平最差的三只消防队。最后, 我们针对火灾报警器和消防管理存在的问题提出了建议。

关键词

熵权法, TOPSIS综合评价, 火灾报警器, 可靠性, 综合管理水平

Reliability of Fire Alarms and Management Level Evaluation Based on Entropy Weight TOPSIS Evaluation Model

Qian Li

North China Electric Power University, Beijing

Received: Jul. 11th, 2022; accepted: Aug. 4th, 2022; published: Aug. 12th, 2022

Abstract

Fire is one of the most frequent and the most harmful disasters to modern human society. In order to give accurate alarm when the fire occurs in time, it is of great significant to choose the proper

fire alarm. In order to select the fire alarm with better reliability, we analyze the alarm records and failure records of all types of fire alarms in a certain city in China during a period of time and establish TOPSIS comprehensive evaluation model based on entropy weight method. At the same time, in order to evaluate the management level of the fire brigade in the region, we also establish a comprehensive management level evaluation model using the entropy weight TOPSIS model, and select the three fire brigades with the best management level and the three fire brigades with the worst management level. Finally, we put forward some suggestions for the problems existing in fire alarm and fire management.

Keywords

Entropy Weight Method, TOPSIS Comprehensive Evaluation, Fire Alarm, Reliability, Comprehensive Management Level

Copyright © 2022 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

在各种自然或人为灾害中,火灾是发生频率最高,影响社会安全和发展最为严重的灾害之一。在2022年的第一季度,我国共发生了火灾21.9万起,其中625人因火灾丧失、397人受伤,造成了高达15.2亿元人民币的经济损失[1]。因此,在发生火灾时及时报警并迅速做出反应极为重要。近年来,随着相关技术的不断发展,火灾报警器发展迅速,其类型和生产数量正在快速增长。对于不同类型的火灾报警器,评价其可靠性可以为人们的购买和安装提供参考。此外,对消防大队综合管理水平的评价有利于各队及时发现并解决区域内整体火灾报警系统存在的问题,从而选择合适的火灾报警器类型进行搭配,提高区域内报警器整体可靠性,以此达到准确播报火灾、精确采取措施的目的。

目前国内外比较主流的评价模型多达数十种,而评价模型的关键在于对评价指标权重的确定。根据不同指标选定方法,评价模型的类型可以被分为两类:一类是基于主观赋权法的评价模型,通过决策者或专家基于自身的知识和经验对评价指标进行主观判断,从而进行权重赋值,比较成熟的方法有专家咨询法、层次分析法[2]、综合指数法[3]等;另一类是基于客观赋权法的评价模型,主要通过分析原始数据各指标之间的关系和变异程度确定权重,比较成熟的方法有主成分分析法[4]、优劣解距离法(TOPSIS法)[5]、因子分析法[6]等。

在客观赋权法中,有一种基于熵权法的TOPSIS评价法[7]。它的基本思想是:根据数据本身的特点计算信息熵,从而确定不同评价指标的权重,再将所求权重代入TOPSIS评价模型进行计算。相比于其他确定权重的方法,熵权法可以充分利用原始数据,得到符合客观实际、更加精确的权重。同时,其确定的权重可以进行修正,使得该方法具有较高的适应性。在该方法的基础上,众多学者展开了工作,如评价土地利用绩效[8]、港口综合竞争力[9]、高校科技竞争力评价[10]等。对于本文的数据情况而言,选择使用基于熵权法的TOPSIS评价法作为评价模型更加合适。

2. 基于熵权法权重的TOPSIS评价方法

2.1. 熵权法

为了确定不同指标所占的权重,我们可以使用一种基于指标数据本身的客观赋权法——熵权法。熵

权法的主要思路是通过分析指标数据本身的离散程度，计算指标所具有的信息熵大小，从而确定指标在评价系统中所占的比重。指标的信息熵越大，表明该指标对评价系统的整体影响越大，则其对应的权重也应该越大。熵权法的实现步骤如下：

第一步：首先对原始数据进行标准化处理。假设有 m 个评价对象， n 个评价指标，所对应的向量为 X_1, X_2, \dots, X_m ，则原始数据矩阵表示为 $X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} = [x_{ij}]_{m \times n}$ ，不妨设数据标准化处理后为

$R = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} = [r_{ij}]_{m \times n}$ 。当评价指标为正向指标时：

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}\}}{\max\{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}\} - \min\{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}\}} \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

当指标为负向指标时：

$$r_{ij} = \frac{\max\{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}\} - x_{ij}}{\max\{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}\} - \min\{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}\}} \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

第二步：求各评价指标在各评价对象中所占比重，不妨设比重为 p_{ij}

$$p_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^m r_{ij}} \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

第三步：求各评价指标的信息熵 e_j ，信息效用值 d_j

$$e_j = -\ln(m)^{-1} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$d_j = 1 - e_j \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

第四步：通过信息熵计算各评价指标的权重 w_j

$$w_j = \frac{1 - e_j}{n - \sum_{j=1}^n e_j} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

2.2. TOPSIS 评价法

TOPSIS 综合评价法是一种逼近于理想解的排序法，又称优劣解距离法，基本原理是通过计算数据的正负理想解以及相应距离，得到相对贴进度，通过贴进度进行优劣排序，选出接近程度最佳者作为所求目标对象[11]。在使用熵权法计算出各评价指标的权重后，TOPSIS 综合评价法可以在此基础上构造加权规范化矩阵进行运算。TOPSIS 综合评价法主要分为以下几个步骤：

第一步：构建标准化矩阵。在熵权法对数据进行正向化处理的结果基础上，对数据进行标准化。设

标准化后的数据矩阵为 $Z = \begin{bmatrix} z_{11} & \cdots & z_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{m1} & \cdots & z_{mn} \end{bmatrix} = [z_{ij}]_{m \times n}$ ，其中 $z_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m r_{ij}^2}}$ 。

第二步：求正负理想解。设第 j 个评价对象的正理想解为 Z_j^+ ，负理想解为 Z_j^- ，其中

$$Z_j^+ = \max \{z_{1j}, z_{2j}, \dots, z_{nj}\} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

$$Z_j^- = \min \{z_{1j}, z_{2j}, \dots, z_{nj}\} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

第三步：计算各评价指标与正负理想解之间的差距，其中 w_j 为熵权法计算所得权重：

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n w_j (Z_j^+ - z_{ij})^2} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n w_j (Z_j^- - z_{ij})^2} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

第四步：计算评价对象与最优方案的接近程度，记为综合得分指数 C_i

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

综合得分指数值越大，代表评价对象越优。按照得分结果大小进行排序，即可得到评价对象的优劣程度排名。

3. 数据处理

本文的数据来源于第十九届五一数学建模竞赛 C 题。我们根据题干得到了我国某城市内 18 个消防大队(编号由 A~R)的管辖面积，根据附件一得到了该城市在 2021 年 6 月 1 日至 2021 年 6 月 18 日的所有火灾报警系统的报警数据(包括误报)，如表 1 所示。根据附件二得到了该城市在 2021 年 6 月 1 日至 2021 年 6 月 18 日的所有火灾报警系统的故障报告，如表 2 所示。

Table 1. Part of the fire alarm data

表 1. 部分火灾报警数据

机号	回路	地址	用户编码	部件名称	报警次数	项目名称	隶属机构	是否误报
2	5	147	20593	点型感温探测器	1298	BTJSYD5#L	G 大队	是
0	1	7	107	线型光束感烟探测器	1066	MZXCLYXGS	G 大队	是
2	5	125	02057D	智能光电探头	788	BTJSYD5#L	G 大队	是
0	1	4	104	线型光束感烟探测器	614	MZXCLYXGS	G 大队	是
0	3	233	231233	点型感温探测器	578	SDBHJTGFYX GSYALJLJCS	A 大队	是
1	5	21	13021	点型感烟探测器	498	SDBHJTGFYX GSCLJLJCS	C 大队	1 次为真
0	1	97	161	手动报警按钮	1	ZBDQSLD	P 大队	否

Table 2. Part of the failure records of the fire alarms

表 2. 部分报警器故障报告

机号	回路	地址	用户编码	部件名称	故障次数	项目名称	隶属机构
1	4	105	10469	点型感烟探测器	6650	BJGG5、6#L	N 大队
0	1	166	106166	消火栓按钮	6629	SGZFWZJPJD	M 大队
0	3	168	213168	设备故障	6566	XHGJQFC	J 大队

Continued

0	1	156	105156	手动报警按钮	6420	SGZFWZJPJD	M 大队
0	1	52	105052	点型感烟探测器	6394	SGZFWZJPJD	M 大队
1	3	197	31197	卷帘门	6392	JTDGWGC	L 大队
1	4	105	10469	点型感烟探测器	6650	BJGG5、6#L	N 大队

为了对不同类型火灾探测器的可靠性进行评价,根据现有数据,我们选择报警准确率和故障率作为评价指标。首先对报警数据进行筛选和分类,按照火灾探测器的类型对报警数据进行整合,得到了每一种火灾报警器的报警次数和非误报次数,从而计算出报警准确率。接着对故障报告进行筛选和分类,得到了每一种火灾报警器的故障次数,从而计算出故障率,如下表 3 所示。

Table 3. Rates of the non-false alarm and failure of the fire alarm

表 3. 火灾报警器的非误报率和故障率

部件名称	非误报数	报警次数	非误报率	故障次数	故障率
点型点烟	0	6	0.000%	2	0.000%
点型感温探测器	37	6881	0.538%	230,602	6.490%
点型感烟探测器	288	230,357	0.125%	1,389,358	39.102%
点型温烟	0	1	0.000%	0	0.000%
复合探测器	0	121	0.000%	1574	0.044%
光束感烟	2	40	5.000%	0	0.000%
火焰探测器	0	6	0.000%	1	0.000%
气体探测器	0	28	0.000%	0	0.138%
手动报警按钮	60	6566	0.914%	209,045	5.883%
线型光束感烟探测	3	1927	0.156%	2234	0.063%
消火栓	0	2	0.000%	184,996	5.207%
信号阀	0	6	0.000%	0	0.144%
压力开关	0	1	0.000%	7544	0.212%
智能感温	0	2	0.000%	0	0.000%
智能光电探测器	0	10	0.000%	0	0.000%
智能光电探头	109	11,225	0.971%	568,185	15.991%

为了对该城市内 18 个消防大队的综合管理水平进行评价,我们选择不同消防大队管辖区域内所有火灾报警器的总体报警准确率、总体故障率、火灾面积比作为评价指标。首先根据报警数据,按照消防大队对数据进行筛选和分类,统计各消防大队中所有报警器接收的报警总次数和非误报次数,算出总体报警准确率。同样的,对故障报告进行筛选,可以得到各队探测器的总体故障率。对于实际火灾数,当报警记录中不同记录的机号、回路编号以及项目编号相同时,我们可以认为是同一场火灾,从而分别得到各大队的实际发生火灾次数,如下表 4 所示。

Table 4. The comprehensive management levels of each fire brigade
表 4. 各消防大队的管理情况

消防大队	非误报数	报警次数	总体非误报率	实际火灾数	管辖面积	火灾面积比	总体故障次数	总体故障率
A 大队	36	3844	0.937%	20	1712	0.01168	26,333	0.741%
B 大队	19	10,194	0.186%	15	692	0.02168	112,339	3.162%
C 大队	43	4152	1.036%	30	1100	0.02727	287,300	8.086%
D 大队	13	1158	1.123%	10	1631	0.00613	56,917	1.602%
E 大队	8	1077	0.743%	5	412	0.01214	19,472	0.548%
F 大队	15	2718	0.552%	11	1524	0.00722	138,707	3.904%
G 大队	67	59,575	0.112%	29	122	0.23770	553,704	15.583%
H 大队	12	2357	0.509%	9	532	0.01692	312,371	8.791%
I 大队	11	134,362	0.008%	8	96	0.08333	11,152	0.314%
J 大队	33	6647	0.496%	21	58	0.36207	788,875	22.202%
K 大队	18	1764	1.020%	12	1831	0.00655	26,181	0.737%
L 大队	19	2843	0.668%	14	1561	0.00897	125,681	3.537%
M 大队	65	13,808	0.471%	42	1997	0.02103	557,180	15.681%
N 大队	45	7130	0.631%	32	246	0.13008	290,940	8.188%
O 大队	14	1501	0.933%	6	483	0.01242	21,710	0.611%
P 大队	31	1853	1.673%	13	24	0.54167	60,453	1.701%
Q 大队	34	1867	1.821%	20	2151	0.00930	161,531	4.546%
R 大队	16	329	4.863%	9	13	0.69231	2298	0.065%

4. 模型的建立、求解和分析

4.1. 火灾报警器可靠性评价模型

根据数据处理结果，观察到有部分火灾报警器的报警次数和报警准确率过低，可以认为是数据量的缺少导致的偶然性结果，所以我们只对点型感温探测器、点型感烟探测器、手动报警按钮、线性光束感烟探测器和智能光电探头这五种火灾探测器进行评价，如表 5 所示。对于报警器的可靠性评价，显然报警准确率属于正向指标，故障率属于负向指标。根据熵权法的计算步骤，得到了评价指标的信息熵值、信息效用值，从而计算出了各指标的权重，如下表 6 所示：

Table 5. Rates of the non-false alarm and failure of the five fire alarms
表 5. 五种火灾报警器的非误报率和故障率

部件名称	非误报率	故障率
点型感温探测器	0.538%	6.490%
点型感烟探测器	0.125%	39.102%
手动报警按钮	0.914%	5.883%
线型光束感烟探测	0.156%	0.063%
智能光电探头	0.971%	15.991%

Table 6. Entropy weight results of non-false positive rate and failure rate
表 6. 非误报率和故障率的熵值计算结果

评价指标	信息熵值	信息效用值	权重	正理想解	负理想解
非误报率	0.718	0.282	0.655	0.6873	0.0080
故障率	0.852	0.148	0.345	0.6006	0.0002

将计算所得的权值代入 TOPSIS 评价模型中计算, 求得了各指标的正负理想解, 在此基础上求得每种火灾报警器的与正负理想解的距离以及综合得分指数, 按照从大到小的顺序进行排序, 如下表 7 所示:

Table 7. TOPSIS evaluation results of five fire alarms
表 7. 五种火灾报警器的 TOPSIS 评价结果

部件名称	正理想解距离	负理想解距离	综合得分指数	排序
点型感温探测器	0.2875	0.3984	0.5809	3
点型感烟探测器	0.6531	0	0	5
手动报警按钮	0.0644	0.5939	0.9022	1
线型光束感烟探测	0.5298	0.3533	0.4001	4
智能光电探头	0.1439	0.5880	0.8034	2

根据排序结果, 手动报警按钮的可靠性最佳, 综合得分指数为 0.9022, 智能光电探头次之, 综合得分为 0.8034。而点型感烟探测器的可靠性最差, 综合得分指数为 0。

4.2. 消防大队综合管理水平评价模型

为了评价该城市 18 个消防大队的综合管理水平, 我们选用了各个大队中报警器的总体报警准确率、总体故障率、单位面积真实火灾数作为评价指标, 其中总体报警准确率为正向指标, 总体故障率和单位面积真实火灾数为负向指标。按照熵权法求权重的步骤计算出各指标的信息熵值、信息效用值和权重, 如下表 8 所示:

Table 8. Entropy weight calculation results of overall reliability rate, failure rate and the ratio of fire and area
表 8. 总体可靠率、总体故障率、火灾面积比的熵值计算结果

评价指标	信息熵值	信息效用值	权重	正理想解	负理想解
总体可靠率	0.861	0.139	0.67	0.7952	0.0016
火灾面积比	0.967	0.033	0.159	0.2680	0.0000
总体故障率	0.965	0.035	0.171	0.2935	0.0001

将计算所得权值代入 TOPSIS 评价模型中计算, 求出各指标的正负理想解, 并在此基础上求各消防大队与正负理想解的距离和综合得分指数, 并按从大到小的顺序进行排序, 如下表 9 所示:

Table 9. TOPSIS evaluation results of the comprehensive management levels of each fire brigade
表 9. 各消防大队管理情况的 TOPSIS 排序结果

消防大队	正理想解距离	负理想解距离	综合得分指数	排序
A 大队	0.5253	0.2012	0.2770	6
B 大队	0.6259	0.1496	0.1929	14

Continued

C 大队	0.5139	0.1887	0.2686	8
D 大队	0.5005	0.2154	0.3009	4
E 大队	0.5512	0.1870	0.2533	9
F 大队	0.5771	0.1635	0.2208	11
G 大队	0.6422	0.0808	0.1118	18
H 大队	0.5844	0.1448	0.1986	13
I 大队	0.6496	0.1529	0.1906	15
J 大队	0.5992	0.0832	0.1219	17
K 大队	0.5141	0.2088	0.2888	5
L 大队	0.5615	0.1720	0.2345	10
M 大队	0.5938	0.1267	0.1759	16
N 大队	0.5682	0.1432	0.2013	12
O 大队	0.5258	0.2013	0.2768	7
P 大队	0.4349	0.2505	0.3655	3
Q 大队	0.4077	0.2820	0.4088	2
R 大队	0.1070	0.6607	0.8607	1

根据排序的结果可以得出结论，R、Q、P 为管理水平最高的三只消防大队，综合得分分别为 0.8607、0.4088、0.3655。G、J、M 为管理水平最低的三只消防大队，综合得分为 0.1118、0.1219、0.1759。

5. 建议

从数据处理和分析的结果来看，目前正在使用的大部分火灾报警器都存在误报率偏高的问题。通过查阅资料，火灾报警器是通过持续不断探测捕捉特定火灾信号，将所捕捉的信号转换为电信号传输至控制器，再通过特定算法进行火灾判定。当信号的数值或者变化特征超过设定的阈值时，则会将信号判定为火灾信号。建议在安装火灾探测器的时候考虑安装地点本身的环境特征，比如对于环境温度变化较大的地点减少安装感温型火灾报警器，环境内烟雾较多的地点减少安装感烟型火灾报警器，或根据地区的不同设置不同的报警阈值。而为了降低故障率，需要及时对线路老化或版本过时的报警器进行及时的检修和更换。

对于各地区的消防大队而言，为了提高综合管理水平，首先需要因地制宜，正确认识管辖区域内的环境的特殊性，选择合适的火灾探测器进行安装。其次，从综合评价分析的结果来看，管理水平最低的消防大队都存在总体故障率较高的情况。为了避免误报率太高和报警器故障导致火灾发生时不能及时通报，各大队可以在同一地点串联安装多种类型的报警器，当多个报警器发出火灾信号时再判定为发生火灾，同时也能降低整体的故障频率。除此之外，各消防大队还需要考虑管辖区域内的历史实际火灾发生频率，将火灾发生的概率加入判断报警真实性的判断中，从而使报警结果更符合实际。

6. 结论

本文对某城市的报警数据和火灾报警器故障记录数据进行了数据处理和分析，并使用基于熵权法的 TOPSIS 评价法建立了综合评价体系，对某城市中所安装的各种类型火灾报警器的可靠性以及该城市中 18 只消防大队的综合管理水平进行了排序和评价。选用了火灾报警器的非误报率和故障率作为可靠性的

评价指标, 结合筛选整理后的数据, 对数据较为健全的五类火灾报警器进行评价, 最终得出了手动报警按钮和智能光电探头为可靠性最高的两种探测器, 点型感烟探测器为可靠性最低的探测器。选用了各消防大队管辖区域内的火灾报警器总体非误报率、总体故障率和火灾面积比作为管理水平的评价指标进行评价排序, 根据结果最终认定为 R、Q、P 为管理水平最高的三只消防大队, G、J、M 为管理水平最低的三只消防大队。基于数据分析和评价的结果, 分别对提高火灾报警器的可靠性和提高区域管理水平提出了针对性的建议。本文评价模型的缺点在于火灾报警器的种类过多, 导致每种报警器的数据量较少, 从而评价的指标较少。同时较少的数据量也会存在偶然性, 导致评价指标数据的变化较大, 从而导致熵权法所附权重过大, 影响评价结果。

参考文献

- [1] 中华人民共和国应急管理部消防救援局. 全国一季度火灾 21.9 万起, 死亡 625 人![EB/OL]. <https://www.119.gov.cn/article/47Sd3LDSJrA>, 2022-04-04.
- [2] 郭金玉, 张忠彬, 孙庆云. 层次分析法的研究与应用[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(5): 148-153.
- [3] 王文强. 综合指数法在地下水水质评价中的应用[J]. 水利科技与经济, 2008, 14(1): 54-55.
- [4] 李艳双, 曾珍香, 张闯, 于树江. 主成分分析法在多指标综合评价方法中的应用[J]. 河北工业大学学报, 1999, 28(1): 94-97.
- [5] 周亚. 多属性决策中的 TOPSIS 法研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
- [6] 任胜钢, 彭建华. 基于因子分析法的中国区域创新能力的评价及比较[J]. 系统工程, 2007, 25(2): 87-92.
- [7] 赵静, 王婷, 牛东晓. 用于评价的改进熵权 TOPSIS 法[J]. 华北电力大学学报: 自然科学版, 2004, 31(3): 68-70.
- [8] 李灿, 张凤荣, 朱泰峰, 奉婷, 安萍莉. 基于熵权 TOPSIS 模型的土地利用绩效评价及关联分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(5): 217-227.
- [9] 匡海波, 陈树文. 基于熵权 TOPSIS 的港口综合竞争力评价模型研究与实证[J]. 科学学与科学技术管理, 2007, 28(10): 157-162.
- [10] 俞立平, 张晓东. 基于熵权 TOPSIS 的地区高校科技竞争力评价研究[J]. 情报杂志, 2013, 32(11): 181-186.
- [11] 岳超源. 决策理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003.