

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2022.11.018

基于 K -means 算法的隧道机电分项工程设备设施评定标度的研究

陈 建

(中路高科交通检测检验认证有限公司, 北京 100088)

摘要: 在依据《公路隧道养护技术规范》(JTG H12—2015)标准,对分项工程设备设施的设备完好率和技术状况评分的基础上,为了满足各省运营公司分类养护,提出了基于 K -means 算法聚类的基于标度定义的设备设施的养护措施。首先,依据标准 H12 的内容,在某省 75 座隧道机电设施定检数据的基础上,得到分项工程的设备完好率和技术状况评分 2 个参数,共计 4 770 个数据,将每座隧道分项工程设备设施的设备完好率和技术状况评分组合形成 2 种结构的 2 个数组数据集合。然后,进行了 K -means 算法分类,从分第 k 类 (k 为自然数)开始,选取设备完好率和技术状况评分距离最远的 2 个参数(通过数值均一化处理)进行迭代,直至选取第 k 类结果结束。采用迭代的方法把数据集合划分为 k 类(采用基于距离的聚类算法),使相同类的内部数据之间的具有极大的相同性,而类之间的内部数据相同性尽量小,达到最优的分组聚类的效果。结果表明:分项工程设备设施的技术状况标度分为 4 类是合理的,并且提出了标度为 0, 1, 2, 3 的分类并分为不同的养护措施。该研究成果在全国部分省份的隧道机电设施养护中得到了积极推广应用,在资金使用、养护队伍人员建设、日常养护、养护科学决策和预防性养护方面获得了良好的效果。

关键词: 隧道工程; 设备设施; K -means 算法; 完好率; 技术状况; 标度; 养护

中图分类号: U453.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2022) 11-0143-08

Study on Evaluation Scale of Equipment and Facilities of Tunnel Electromechanical Subdivisional Project Based on K -means Algorithm

CHEN Jian

(China-Road Transportation Verification & Inspection Hi-Tech Co., Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract: On the basis of scoring the equipment intactness rate and technical condition of equipment and facilities of subdivisional projects in accordance with the *Technical Specification of Maintenance for Highway Tunnel* (JTG H12—2015), in order to meet the classification and maintenance of operating companies in each province, the maintenance measures of equipment and facilities based on scale definition and K -means algorithm clustering are proposed. First, according to the content of standard H12, on the basis of the regular inspection data of electromechanical facilities of 75 tunnels in a province, the of equipment readiness rate and technical condition score of subdivisional projects are obtained, with a total of 4 770 data. The equipment readiness rate and technical condition scores of equipment and facilities of subdivisional project of each tunnel are combined to form 2 data sets of 2 structures. Then, the K -means algorithm is divided into several classes. Starting from the k -class (k is a natural number) division, the 2 parameters with the farthest distance between the equipment intactness rate and the technical condition score (through numerical homogenization) are selected for iteration, until the k -class result is selected. The data sets are divided into k classes by using the iterative method (the distance based clustering algorithm), so that the internal data of the same class have

收稿日期: 2022-03-29

作者简介: 陈建 (1982-), 男, 山东烟台人, 硕士, 高级工程师. (419411707@qq.com)

great similarity while the internal data similarity between classes is as small as possible to achieve the optimal grouping and clustering effect. The result shows that it is reasonable to divide the technical status scales of equipment and facilities of subdivisional projects into 4 classes, and the classification with scales of 0, 1, 2 and 3 are proposed, and different maintenance measures are divided as well. The research result has been actively promoted and applied in the maintenance of tunnel electromechanical facilities in some provinces of China, and good effect have been achieved in terms of fund use, maintenance team construction, daily maintenance, scientific maintenance decision-making and preventive maintenance.

Key words: tunnel engineering; equipment and facility; *K*-means algorithm; intact rate; technical condition; ; scale; maintenance

0 引言

隧道机电设施定检及其技术状况评定已成为隧道机电设施养护的基础依据。现阶段隧道机电设施定检工作开展的主要依据是《公路隧道养护技术规范》(JTG H12—2015)^[1-2]或《国家公路网重点桥梁和隧道监测评价规程》(T/CECS G: E41-04—2019)^[3]这2个标准,在第1个标准中,隧道机电设施分为供配电设施、照明设施、通风设施、消防设施和监控与通信设施5个分部工程,根据分部工程的设备完好率提出技术状况评定值,但没有给出分部工程中包含的分项工程设备设施的技术状况评定值及设备设施养护的明确分类,在第2个标准中,虽然规定了各分项工程设备设施检测内容的权重,但分项工程设备设施的技术状况评定值及养护分类同样也未给出明确要求。这种情况下,各省运营公司在做分项工程设备设施的养护时缺乏针对性。

目前,国内外学者结合工程应用现状针对隧道机电设施的评定和养护做了一些研究,提出了相关理论算法。张伟伟等^[4]针对高速公路机电系统提出了AHP的机电系统维护质量的模糊评价模型。于艳波等^[5]结合隧道设备成新率、稳定性和合格率等评估指标所占权重,提出了隧道机电设施的评估体系。余忠磊等^[6]从高速公路隧道运营安全角度出发,引入模糊数学算法,从驾驶员和车辆特性、机电设施、土建结构、交通环境4个方面对运营安全进行了评价。康云霞等^[7]从技术性能指标、运营效果指标2个角度着手,计算检测指令执行所需的权重比数值,完成了普通公路隧道机电设施的检测指标选取。邱进^[8]结合隧道机电分项工程设备设施,从预防性检测和故障响应机制角度提出了检测技术要点和控制措施。杨松等^[9]在分析现有隧道机电系统技术现状的基础上,根据目前隧道运营风险控制的需求,提出了智慧交通隧道机电系统技术体系框架。

基于现状,隧道机电设施养护检测及技术状况评定方法要么是隧道机电设施单位工程和分部工程的养护评定方法,要么是具体设备检测养护和养护方法,但对分项工程设备设施的系统分析和分类还较少。本研究从某省营运期隧道机电设施定检数据采样分析的工程实际出发,结合聚类*K*-means算法,提出分项工程设备设施技术状况评分值的分类以及标度的新概念,根据标度提出分项工程设备设施的不同养护措施,以期在行业中得到广泛应用。

1 隧道机电设施定检数据

某省某营运高速公路涉及隧道机电设施定期检测隧道共75座,其中特长隧道4座,长隧道38座,中隧道25座,短隧道8座。隧道机电设施包括供配电设施、照明设施、通风设施、消防设施、监控与通信设施5个分部工程。根据《公路隧道养护技术规范》中定期检查的测试项内容,从设备完好率和技术状况评分这2种主要参数出发,构建隧道机电设施定检数据新模型,得出2种参数的结果(均归一化处理,完好率以100%为满分,技术状况评分以100为满分),以该省营运隧道中的1座隧道(整体评价包括隧道左幅和右幅)为例,其分部工程的分项工程设备设施的完好率和技术状况评分^[10]如表1所示,形成该隧道的2个数组,分别表示设备设施的完好率和技术状况评分。表2为隧道机电设施的整体评分值和技术状况类别。该隧道是2类隧道,对于设备故障率出现很低,运营则主要关注分项工程设备设施的技术状况评分及相应的养护措施。

2 技术路线研究

基于*K*-means算法的隧道机电分项工程设备设施评定标度的研究技术路线为:

(1) 统计该省75座营运隧道定期检测结果。对

表 1 某隧道分项设备设施的完好率和技术状况评分
Tab.1 Intactness rate and technical condition scores of
subdivisional equipment and facilities of a tunnel

序号	分部工程	分项工程	设备完好率/%	技术状况评分
1	供配电设施	高压断路器柜	100	100
		高压互感器与避雷器柜	100	100
		高压计量柜	100	100
		10 kV 电力变压器	100	100
		箱式变电站	100	100
		低压开关柜	100	100
		电缆桥架、槽盒、托架及支架	100	100
		电力电缆	100%	100
		直流电源、UPS 电源和 EPS 电源	100	100
		防雷接地设施	100	92.9
2	照明设施	隧道灯具	99.7	99.9
		洞外路灯	79.2	81.7
		照明线路	100	100
		照明控制	100	100
		照度测试	100	100
3	通风设施	射流风机	100	99
		轴流风机	100	100
4	消防设施	火灾报警设施（手动报警设施）	0	55
		火灾报警设施（自动报警设施）	0	58.3
		消火栓及灭火器	39.8	74.3
		阀门	100	80
		水泵接合器	100	100
		消防水池	100	100
		液位检测器	100	100
		给水管	100	100
		水泵	100	100
		电光标志	92.4	96.2
5	监控与通信设施	亮度检测器	0	25
		能见度检测器	100	100
		CO 检测器	100	100
		风速风向检测器	100	100
		闭路电视监视系统	96.7	85
		大屏幕投影系统	100	100
		紧急电话与广播系统	97.7	88.6
		可变信息标志	100	100
		车道控制标志	97.7	98.9
		交通信号灯	100	87.5
		区域控制单元	100	100
		通信设施（光缆电缆）	100	100
		通信设施（交换机）	100	100
		监控室设备及系统	100	100

表 2 隧道机电设施技术状况评分和技术状况类别
Tab.2 Technical condition scores and technical status
categories of tunnel electromechanical facilities

单位工程	分部工程	设备完好率/%	技术状况评分	隧道机电设施技术状况分类
隧道机电设施	供配电设施	78.9		
	照明设施	100		
	通风设施	100	94.9	2 类
	消防设施	98.7		
	监控与通信设施	100		

隧道机电设施分部分项工程设备设施的完好率和技术状况评分，2 个数据数组，每个数组均为一维数组，约 3 000 个数据，2 个数组共约 6 000 个数据。

（2）分析现有常用的工程领域的数据处理、数据统计的算法和模型，找出适用该研究的算法。

（3）确定采用 *K*-means 算法对隧道机电分项工程设备设施评定标度进行研究。

（4）结合《公路隧道养护技术规范》和《国家公路网重点桥梁和隧道监测评价规程》这 2 个标准，对于评定划定类别的要求，对于分项工程设备设施提出划分为 *k* 类的合理性，分类选择值应与隧道机电设施的类别相对应，从 *k*=2，3，4，5，6 中选取，确定哪个值更为合适，并借此定义标度概念。

（5）用软件编程实现 *K*-means 算法，并导入 4 770 个数值，进行分类聚类计算，分析结果数据集合中的标准差，得出最为合适的值为标度的结果。

（6）对技术状况评分的数据进行评分值分类，得出分项工程设备设施技术状况评分对应的标度的分类，提出不同标度的分项工程设备设施的养护措施。

3 *K*-means 聚类算法

数据处理算法的选择直接影响数据处理、数值分析及数据统计的结果。工程领域数据处理的常用方法有主观估计法^[11]、概率分布分析法^[12]、模糊数学法^[13]、灰色关联评估法^[14]、层次分析法^[15]、熵权确定权重法^[16]、聚类算法^[17-19]等，针对上述各种算法分析其适用范围和特点，如表 3 所示。

通过对上述各数据处理算法的分析和总结，结合该省的隧道机电设施分项工程设备设施的检测结果（主要为设备完好率和技术状况评分这 2 个参数），选取聚类算法为数据处理算法。聚类常用算法方法分为 3 种，分别为基于距离的聚类算法、基于

表 3 工程领域各种算法适用范围和特点

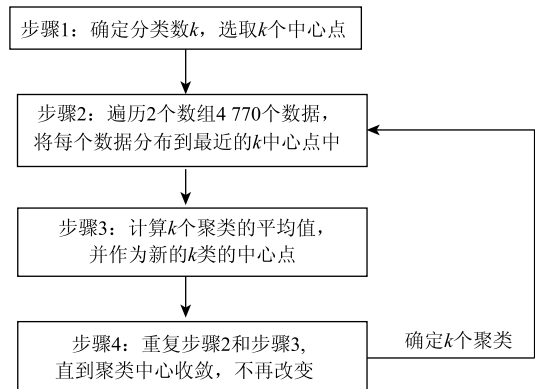
Tab. 3 Application scope and characteristics of various algorithms in engineering field

数值分析方法	适用范围	特点
主观估计法	经过长时间工作经验的积累, 对数据不足或无数据情况下适用	对行业内专家或从事很长时间工作、有一定工作经验的人适用, 可适用范围较窄
概率分布分析法	对于事件的发生概率有过长时间的统计, 并且对其后果有响应的数据支撑	需要运用大量较复杂的统计技术, 实施起来需要时间积累, 技术难度较高
模糊数学法	适用于风险评估等经济模型, 处理模糊现象的理论应用	建立模糊集合、分析模糊关系和形成矩阵, 其中重要的隶属度可能由经验给出
灰色关联评估法	对于信息已知的不完全样本给出计算方法, 研究的对象具有随机性	研究对象为小样本空间, 对周边其他因素影响较大, 属于先前预测不确定性的数据统计
层次分析法	对数据进行分层分权重分析, 着重于数据相比较, 对于提出重要隶属度有帮助	采用向量矩阵的计算方法, 一般有算术平均法、特征向量和最小二乘法等, 偏重于数据层次应用
熵权确定权重法	数据处理结果得到熵权重, 适用与层次分析法同时使用处理数据, 在对完整系统分门别类细化的情况下使用, 对系统形成初步的级别起作用	构建参数矩阵, 评价若干个对象、分类设备设施权重
聚类算法	各维度已知数据形成的数据结构或数据数组, 通过聚类算法分类形成不同组, 划分不同区域, 提出不同要求	通过大量数据的反复迭代, 找出其中各数据的中心位置, 同组数据在本组里具有更好的聚集效果, 易形成同一的对待方法

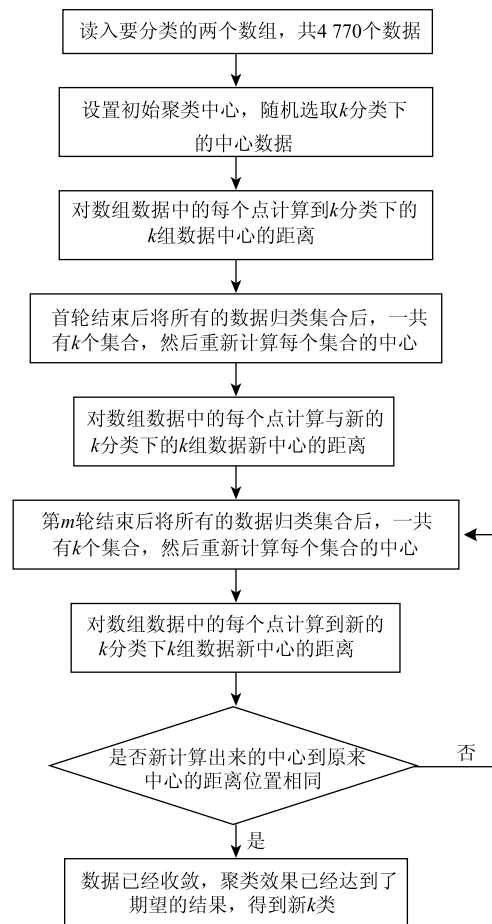
密度的聚类算法、基于互联性的聚类算法。由于只有 2 个变量参数的大规模数据, 因此采用基于距离的 K -means 聚类算法可得到更为合适的聚类结果。

首先, 将隧道机电设施的设备完好率和技术状况评分组成 2 个数组数据集合。其次, 假设 K -means 算法分为 k 类, k 为自然数, $k=1, 2, 3, \dots, n$ 。采用基于距离的聚类算法进行迭代, 把数据集合划分为 k 类。最后, 选取设备完好率和技术状况评分距离最远的 2 个参数 (通过数值均一化处理), 例如

$[0, 0]$ 和 $[100, 100]$, 按照图 1 的思想进行迭代, 直至选取 k 类结果结束。使相同类的内部数据具有极大的相同性, 而类之间的数据相同性尽量小, 达到最优的分组聚类的效果。

图 1 K -means 聚类思想Fig. 1 K -means clustering idea

数据集合分 k 类的软件算法流程图如图 2 所示。设数据集合为 P , 分类结果为 T 。

图 2 K -means 聚类软件算法Fig. 2 K -means clustering software algorithm

4 K -means 聚类结果分析

以设备完好率和技术状况评分分别为变量 P_{ij} , $P_{ij} = [a_i; b_j]$, a_i 和 b_j 分别对应隧道的分项工程设备设施的完好率和技术状况评分, i 和 j 为自然数, $i, j = 1, 2, 3, \dots, n$ 。对应 75 座隧道分项工程设备设施的完好率和技术状况评分数据, 约 4 770 个参数。设其集合为 T_k , k 为自然数, $k = 1, 2, 3, \dots, n$ 。集合 $x1$ 数组和集合 $x2$ 数组进行 k 分类后得到 T_k 集合, $x1$ 数组和 $x2$ 数组中包含 T_k 聚类后 a_i 和 b_j , 运行编制的 K -means 算法聚类程序, 根据《公路隧道养护技术规范》中隧道机电设施单位工程的技术状况评定分类为 4 类和评定划定的养护措施为 5 类的思想, 选取分项工程设备设施的科学分类与单位工程隧道机电设施相对应, 选取聚类 k 值分别为 2, 3, 4, 5, 6 进行分析研究。 K -means 聚类结果如表 4~表 8 所示。

表 4 $k=2$ 的聚类结果

Tab. 4 Clustering result of $k=2$

k	2
T_1 集合	4 188
T_2 集合	582
$x1$ 数组	a_1 2 094
	a_2 291
$x2$ 数组	b_1 2 094
	b_2 291

在表 4 中, 由算法得出第 1 类为 T_1 集合的 $x1$ 数组和 $x2$ 数组, 第 2 类为 T_2 集合的 $x1$ 数组和 $x2$ 数组。计算 2 类集合参数完好率和技术状况评分的标准差为 $xd1$ 和 $xd2$; $xd1 = [18.541\ 0\ 22.594\ 7]$, $xd2 = [6.825\ 1\ 9.316\ 5]$ 。

在表 5 中, 由算法得出第 1 类为 T_1 集合的 $x1$ 数组和 $x2$ 数组, 第 2 类为 T_2 集合的 $x1$ 数组和 $x2$ 数

表 5 $k=3$ 的聚类结果

Tab. 5 Clustering result of $k=3$

k	3
T_1 集合	3 412
T_2 集合	514
T_3 集合	844
$x1$ 数组	a_1 1 706
	a_2 257
	a_3 422
$x2$ 数组	b_1 1 706
	b_2 257
	b_3 422

组, 第 3 类为 T_3 集合的 $x1$ 数组和 $x2$ 数组。计算 3 类集合参数完好率和技术状况评分的标准差为 $xd1$, $xd2$ 和 $xd3$ 。 $xd1 = [5.2702\ 22.113\ 2]$, $xd2 = [3.298\ 6\ 7.886\ 3]$, $xd3 = [16.682\ 7\ 16.876\ 1]$ 。

在表 6 中, 由算法得出第 1 类为 T_1 集合的 $x1$ 数组和 $x2$ 数组, 第 2 类为 T_2 集合的 $x1$ 数组和 $x2$ 数组, 第 3 类为 T_3 集合的 $x1$ 数组和 $x2$ 数组, 第 4 类为 T_4 集合的 $x1$ 数组和 $x2$ 数组。计算 4 类集合参数完好率和技术状况评分的标准差为 $xd1$, $xd2$, $xd3$ 和 $xd4$ 。 $xd1 = [2.329\ 4\ 1.837\ 7]$, $xd2 = [4.821\ 5\ 22.104\ 4]$, $xd3 = [6.514\ 3\ 9.410\ 3]$, $xd4 = [13.858\ 7\ 11.773\ 4]$ 。

表 6 $k=4$ 的聚类结果

Tab. 6 Clustering result of $k=4$

k	4
T_1 集合	3 234
T_2 集合	454
T_3 集合	848
T_4 集合	234
$x1$ 数组	a_1 1 617
	a_2 227
	a_3 424
	a_4 117
$x2$ 数组	b_1 1 617
	b_2 227
	b_3 424
	b_4 117

在表 7 中, 由算法得出第 1 类为 T_1 集合的 $x1$ 数组和 $x2$ 数组, 第 2 类为 T_2 集合的 $x1$ 数组和 $x2$ 数组, 第 3 类为 T_3 集合的 $x1$ 数组和 $x2$ 数组, 第 4 类为 T_4 集合的 $x1$ 数组和 $x2$ 数组, 第 5 类为 T_5 集合的 $x1$ 数组和 $x2$ 数组。计算 5 类集合参数完好率和技术状况评分的标准差为 $xd1$, $xd2$, $xd3$, $xd4$ 和 $xd5$ 。 $xd1 = [1.785\ 8\ 9.711\ 6]$, $xd2 = [9.965\ 5\ 11.958\ 6]$, $xd3 = [6.303\ 9\ 7.850\ 9]$, $xd4 = [1.314\ 3\ 1.771\ 6]$, $xd5 = [4.324\ 6\ 22.153\ 4]$ 。

在表 8 中, 由算法得出第 1 类为 T_1 集合的 $x1$ 数组和 $x2$ 数组, 第 2 类为 T_2 集合的 $x1$ 数组和 $x2$ 数组, 第 3 类为 T_3 集合的 $x1$ 数组和 $x2$ 数组, 第 4 类为 T_4 集合的 $x1$ 数组和 $x2$ 数组, 第 5 类为 T_5 集合的 $x1$ 数组和 $x2$ 数组, 第 6 类为 T_6 集合的 $x1$ 数组和 $x2$ 数组。计算 6 类集合参数完好率和技术状况评分的标准差为 $xd1$, $xd2$, $xd3$, $xd4$, $xd5$ 和 $xd6$ 。 $xd1 =$

表 7 $k=5$ 的聚类结果
Tab. 7 Clustering result of $k=5$

k	5
T_1 集合	194
T_2 集合	848
T_3 集合	3 234
T_4 集合	222
T_5 集合	272
x_1 数组	a_1 97
	a_2 424
	a_3 1 617
	a_4 111
	a_5 136
x_2 数组	a_6 97
	b_1 424
	b_2 1 617
	b_3 111
	b_4 136

表 8 $k=6$ 的聚类结果
Tab. 8 Clustering result of $k=6$

k	6
T_1 集合	178
T_2 集合	214
T_3 集合	744
T_4 集合	452
T_5 集合	3 174
T_6 集合	8
x_1 数组	a_1 89
	a_2 107
	a_3 372
	a_4 226
	a_5 1 587
	a_6 4
x_2 数组	b_1 89
	b_2 107
	b_3 372
	b_4 226
	b_5 1 587
	b_6 4

[1. 838 6 10. 066 7], xd_2 = [9. 965 5 11. 958 6],
 xd_3 = [5. 994 5 7. 981 6], xd_4 = [4. 3246 22. 153 4],
 xd_5 = [2. 847 4 2. 954 7], xd_6 = [1. 126 2 0. 681 5].

设备设施完好率的计算要素由设备是否有重大缺陷或故障来确定, 技术状况评分的计算要素由外观评分、安装情况、设备设施功能和性能等指标来确定, 即可能出现设备设施完好率为 0 的情况和技术状况评分不为 0 的情况。运营养护期在故障率不高的情况下, 运营更为关心的是分项工程设备设施的技术状况评分 (即定检过程中发现的问题), 因此选择技术状况评分为主要因素来选择聚类结果, 通过对比分析 k 值分别为 2, 3, 4, 5, 6 的聚类结果和聚类后的标准差, 得出其中 1 个聚类中的最大标准差分别为 22. 594 7, 22. 113 2, 22. 104 4, 22. 153 4, 22. 153 4, 不同的 k 值反映出最大标准差之间的差距, 其中 $k=4$ 时的 22. 104 4 为各方差最大值中的最小值, 同时考虑对分项工程设备设施完好率对应类别的划分, 所以将分项工程设备设施技术状况分为 4 类, 对划分为 4 类的分类, 引入标度的概念即 0, 1, 2, 3, 对分为 4 类的数据 x_2 数组进行分析整理, 对应标度为 0 时的技术状况评分值在 90 分以上, 标度为 1 时的技术状况评分值在 80~90 分之间, 标度为 2 时的技术状况评分值在 70~80 分之间, 标度为 3 时的技术状况评分值在 70 分以下, 如表 9 所示。

表 9 分项工程设备设施技术状况评分和标度
Tab. 9 Score and scale of technical conditions of equipment and facilities of subdivisional projects

标度	0	1	2	3
技术状况评分判定	技术状况评分 ≥ 90	$80 \leq$ 技术状况评分 < 90	$70 \leq$ 技术状况评分 < 80	技术状况评分 < 70

定义标度, 对评定划定不同标度的各类分部工程设备设施, 分别采取不同的养护措施:

(1) 对评定标度为 0 的分项工程设备设施进行正常养护, 做好清洁维护, 对外观产生的锈蚀部分进行及时处理, 对光、电缆进行标识。

(2) 对评定标度为 1 的分项工程设备设施进行正常养护, 对性能指标的缺陷进行关注, 并对部分功能缺失进行及时修复。

(3) 对评定标度为 2 的分项工程设备设施, 对性能指标和功能进行专项修复工程, 并加强日常巡查, 使同类型问题不再扩大。

(4) 对评定标度为 3 的分项工程设备设施实施, 完善重大缺陷, 恢复使用功能, 必要时进行体质升级, 更新换代产品或系统。

5 结 论

(1) 基于 K -means 算法的隧道机电分项工程设

备设施评定标度的研究,选取某省隧道机电设施分部分项工程设备设施的完好率和技术状况评分组成的 4 770 个数组数据,综合考虑隧道机电设施包括供电设施、照明设施、通风设施、消防设施和监控与通信设施这 5 个分部工程所包含的分项工程,应用欧式距离的 K-means 算法构建了引入标度分类养护分项工程设备设施的概念。

(2) 基于 K-means 算法的评定标度及对应的分项工程设备设施的技术状况评分,归纳设备设施出现技术状况的风险点,优化资金的预算、配置和使用,明确隧道机电设施养护工程的保养、维护、维修和改造方案,是对《公路隧道养护技术规范》中养护方法的补充,也是对《国家公路网重点桥梁和隧道监测评价规程》中分项工程设备设施评定结果的补充。

参考文献:

References:

- [1] JTG H12—2015, 公路隧道养护技术规范 [S].
JTG H12—2015, Technical Specification of Maintenance for Highway Tunnel [S].
- [2] JTG H10—2009, 公路养护技术规范 [S].
JTG H10—2009, Technical Specifications of Maintenance for Highway [S].
- [3] T/CECS G: E41-04—2019, 国家公路网重点桥梁和隧道监测评价规程 [S].
T/CECS G: E41-04—2019, Evaluating Specifications for Supervision and Test of the Key Bridges and Tunnels of National Road Network [S].
- [4] 张伟伟, 廖庆华, 郝国昌. 基于 AHP 的高速公路机电维护质量的模糊评价模型 [J]. 交通标准化, 2011 (21): 172-176.
ZHANG Wei-wei, LIAO Qing-hua, HAO Guo-chang. Fuzzy Evaluation Model of Expressway Electromechanical Engineering Maintenance Quality Based on AHP [J]. Transportation Standardization, 2011 (21): 172-176.
- [5] 于艳波, 黄凯. 公路隧道机电设施状态检测及评估技术分析 [J]. 公路, 2021, 66 (11): 365-368
YU Yan-bo, HUANG Kai. Analysis on Condition Detection and Evaluation Technology of Electromechanical Facilities in Highway Tunnel [J]. Highway, 2021, 66 (11): 365-368
- [6] 余忠磊, 郑旭光. 基于模糊综合评价法的山区高速公路隧道运营安全评价研究 [J]. 公路交通技术, 2018, 34 (2): 102-106.
YU Zhong-lei, ZHENG Xu-guang. Research on Evaluation of Operation Safety of Expressway Tunnel in Mountainous Areas Based on Fuzzy Synthetic Evaluation Method [J]. Technology of Highway and Transport, 2018, 34 (2): 102-106.
- [7] 康云霞, 潘江塞, 程旭. 普通公路隧道机电设施故障检测方法研究 [J]. 机械与电子, 2022, 40 (4): 50-55.
KANG Yun-xia, PAN Jiang-sai, CHENG Xu. Research on Fault Detection Method of Electromechanical Facilities in Ordinary Highway Tunnel [J]. Mechanical and Electronic, 2022, 40 (4): 50-55.
- [8] 邱进. 高速公路隧道机电设施检测技术要点与控制措施 [J]. 中国高新技术, 2021 (24): 78-79.
QIU Jin. Key Points and Control Measures of Expressway Tunnel Mechanical and Electrical Facilities Detection Technology [J]. China High and New Technology, 2021 (24): 78-79.
- [9] 杨松, 马非, 娄刃. 基于风险控制的智慧交通隧道机电技术体系与方案研究 [J]. 公路交通技术, 2021, 37 (增 1): 71-76.
YANG Song, MA Fei, LOU Ren. Research on Electromechanical Technology System and Scheme of Smart Traffic Tunnel Based on Risk Control [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 37 (S1): 71-76.
- [10] 陈建, 王磊, 张萌, 等. 营运公路隧道机电设施技术状况评定方法探究 [J]. 中国交通信息化, 2020 (6): 127-130.
CHEN Jian, WANG Lei, ZHANG Meng, et al. Discuss on Evaluation Method for Technical Status of Electromechanical Facilities on Operating Road Tunnels [B]. China ITS Journal, 2020 (6): 127-130
- [11] 张杰, 王海清, 李玉明, 等. 基于主观估计法和 FMEDA 的失效数据分析及应用 [J]. 计算机工程与应用, 2013 (16): 255-259.
ZHANG Jie, WANG Hai-qing, LI Yu-ming, et al. Failure Data Analysis Based on Subjective Estimation and FMEDA and Application [J]. Computer Engineering and Applications, 2013 (16): 255-259.
- [12] 田堃, 蒋树屏, 宫伟军. 基于蒙特卡洛法的城市隧道火灾概率分布研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16 (增 1): 329-340.
TIAN Kun, JIANG Shu-ping, GONG Wei-jun. The Probability Distribution of Urban Tunnel Fire Based on Monte Carlo Method [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16 (S1): 329-340.
- [13] 刘乔, 刘少华, 潘娟, 等. 基于模糊数学的城市地面塌陷危险性评估系统设计与实现 [J]. 现代电子技术, 2021, 44 (17): 173-177.

- LIU Qiao, LIU Shao-hua, PAN Juan, et al. Design and Implementation of Urban Ground Subsidence Risk Assessment System Based on Fuzzy Mathematics [J]. Modern Electronics Technique, 2021, 44 (17): 173-177.
- [14] 郝伟, 魏雪萍. 基于灰色关联度的高寒地区混凝土梁桥耐久性评估 [J]. 安全与环境学报, 2021, 21 (5): 1889-1897.
- HAO Wei, WEI Xue-ping. On the Durability Evaluation of the Concrete Beam Bridges in Alpine Region Based on the Grey Relation Degree [J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21 (5): 1889-1897.
- [15] 吴传贵, 李金猛, 黄文, 等. 层次分析法在关键技术项目多维目标评价中的应用研究 [J]. 中国设备工程, 2022 (4): 10-12.
- WU Chuan-gui, LI Jin-meng, HUANG Wen, et al. Application of Analytic Hierarchy Process in Multi-dimensional Objective Evaluation of Key Technology Projects [J]. China Plant Engineering, 2022 (4): 10-12.
- [16] 曾小康, 冯阳, 赖文庆, 等. 基于 AHP-熵权法的城市燃气管道风险评价 [J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17 (5): 130-135.
- ZENG Xiao-kang, FENG Yang, LAI Wen-qing, et al. Risk Assessment of Urban Gas Pipeline Based on AHP and Entropy Weight Method [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17 (5): 130-135.
- [17] 任远航. 面向大数据的 K-means 算法综述 [J]. 计算机应用研究, 2020, 37 (12): 1001-3695.
- REN Yuan-hang. Survey of K-means Algorithm on Big Data [J]. Application Research of Computers, 2020, 37 (12): 1001-3695.
- [18] 许进文. 数据挖掘中聚类分析算法及应用研究 [J]. 计算机光盘软件与应用, 2013 (6): 176-177.
- XU Jin-wen. Research on Clustering Analysis Algorithm and Application in Data Mining [J]. Computer CD Software and Applications, 2013 (6): 176-177.
- [19] 柏宇轩. Kmeans 应用与特征选择 [J]. 电子技术与软件工程, 2018 (1): 186-187.
- BAI Yu-xuan. Kmeans Application and Feature Selection [J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2018 (1): 186-187.

(上接第 94 页)

- [10] JTG C30—2015, 公路工程水文勘测设计规范 [S]. JTG C30—2015, Hydrological Specifications for Survey and Design of Highway Engineering [S].
- [11] TB 10017—99, 铁路工程水文勘测设计规范 [S]. TB 10017—99, Code for Survey and Design on Hydrology of Railway Engineering [S].
- [12] 茅泽育, 吴剑疆, 余云童. 河冰生消演变及其运动规律的研究进展 [J]. 水力发电学报, 2002 (增 1): 153-161.
- MAO Ze-yu, WU Jian-jiang, SHE Yun-tong. River Ice Processes [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2002 (S1): 153-161.
- [13] 陈云飞. 冰水二相流输水渠道流冰输移演变机理研究及其应用 [D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019.
- CHEN Yun-fei. Study on Mechanism of Flowing Ice Transport in Ice-water Two-phase Water Delivery Channel and Application [D]. Beijing: China Institute of Water Resources & Hydropower Research, 2019.
- [14] 王兴奎, 邵学军, 李丹勋. 河流动力学基础 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.
- WANG Xing-kui, SHAO Xue-jun, LI Dan-xun. Fundamental River Mechanics [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2002.
- [15] 陆昌根. 流体力学中的数值计算方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- LU Chang-gen. Numerical Calculation Methods in Fluid Mechanics [M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [16] ETTEMA R, CONSTANTINESCU G, MELVILLE B W. Flow-field Complexity and Design Estimation of Pier-scour Depth: Sixty Years since Laursen and Toch [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 143 (9): 03117006.
- [17] CHEN Q G, ZHONG Q, QI M L, et al. Comparison of Vortex Identification Criteria for Planar Velocity Fields in Wall Turbulence [J]. Physics of Fluids, 2015, 27 (8): 085101.
- [18] 陈启刚, 齐梅兰, 李金钊. 明渠柱体上游马蹄涡的运动学特征研究 [J]. 水利学报, 2016, 47 (2): 158-164.
- CHEN Qi-gang, QI Mei-lan, LI Jin-zhao. Kinematic Characteristics of Horseshoe Vortex Upstream of Circular Cylinders in Open Channel Flow [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47 (2): 158-164.