

# 基于熵值法加权灰靶理论的空心板桥结构状况评价

李忠华<sup>1</sup>, 祝孝成<sup>2</sup>, 孙松<sup>3</sup>, 崔文涛<sup>2</sup>

(1.中钢集团 郑州金属制品研究院有限公司,河南 郑州 450006;2.河南省交通科学技术研究院有限公司,河南 郑州 450006;3.郑州市工程质量监督站,河南 郑州 450000)

**摘要:**选择 6 种荷载试验参数指标建立基于熵值法加权灰靶理论的预应力砼空心板桥结构状况评价模型,根据 8 座预应力砼空心板桥的荷载试验数据对桥梁结构状况进行评价。结果表明,评价模型的分析结果与按《城市桥梁养护技术规范》评价的结果基本吻合;由熵值法计算所得参数指标权重反映 6 种荷载试验参数指标对桥梁结构工作状况评价影响的相对大小,但由于样本数据差异、评价因素的灰性,该影响不具绝对性。

**关键词:**桥梁;空心板桥;结构状况评价;荷载试验;熵值法;灰靶理论

中图分类号:U446.1

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2020)03-0132-04

中国桥梁数量众多、分布地域广,如何提高桥梁维护的针对性是亟需解决的问题。荷载试验能直观评定桥梁的工作状况,在工程实际中得到广泛应用。文献[1]利用灰靶理论对现役桥梁承载能力进行了评价,文献[2]基于主成分分析法对桥梁结构工作状况进行了综合评价。受常规试验结果分析数据繁多、结果单项独立评判、待评桥梁数量众多等因素的影响,桥梁结构工作状况评定很难做到全面合理。该文基于熵值法加权灰靶理论,提出一种新的预应力砼空心板桥结构状况评价方法。

## 1 灰靶理论的基本原理

灰靶理论是处理模式序列的灰关联理论按命题信息域  $\psi(\theta)$  的要求,在一组模式序列中找出最靠近子命题  $\psi_i(\theta)$  目标值的数据构造标准模式,各模式与标准模式一起构成灰靶,标准模式是灰靶的靶心模式识别,实质上是识别模式接近靶心的程度,即靶心度。其主要计算步骤为选取灰模式及标准模式→进行灰靶变换并确定灰关联差异信息空间→确定靶心系数和靶心度,其中靶心度对应的权重为平均权重(见文献[3]~[5])。

研究表明,不同指标对桥梁状况评价的影响不同,在分析评价桥梁状况时,不同参数指标应具有不同的权重,而不宜采用平均权重。因此,采用熵值法确定指标权重,根据各项指标观测值所提供的信息大小确定指标权重。在信息论中,熵是对不确定性的一种度量,信息量越大,不确定性越小,熵越小;信息量越小,不确定性越大,熵越大。根据熵的特性,

通过计算熵值可判断一种方案的随机性及无序程度,也可用熵值来判断某个指标的离散程度,指标的离散程度越大,该指标对综合评价的影响越大。因此,可根据各指标的变异程度,利用信息熵计算各指标的权重  $q_k$ ,计算步骤见文献[6]。计算考虑权重的靶心度后,根据灰关联理论相关定理及实际工程情况,对各序列模式进行优劣排序、等级划分等,靶心度越高,与标准模式越接近,方案越优。

## 2 桥梁结构工作状况评价模型

### 2.1 样本数据采集

根据 JTG/T J21-2011《公路桥梁承载力检测评定规程》中荷载试验评定基本要求,从试验效果(静载试验效率  $\eta_q$ )、结构承载能力[挠度校验系数  $\zeta_d$ 、应力(应变)校验系数  $\zeta_s$ ]、结构工作状态(相对残余应变  $S'_p$ )、结构受迫振动(冲击系数实测最大值与理论值之比  $R_\mu$ )、结构自振(一阶竖弯自振频率实测值与理论值之比  $R_f$ )等出发,选取 8 座预应力砼空心板桥  $S'_p$  的荷载试验数据(见表 1)作为样本数据构成原始序列。

### 2.2 样本数据处理

(1) 构建标准模式序列。分别以  $POL(\max)$ 、 $POL(\min)$ 、 $POL(\text{mem})$  表示各指标的极大值极性、极小值极性和适中值极性。 $k=1$  时,对应静载试验效率均值指标,具有适中值极性  $POL\omega(1)=POL(\text{mem})$ , $\omega_0(1)=1$ ;同理,应力(应变)校验系数均值、相对残余应变均值、冲击系数实测最大值与理论值之比都具有极小值极性,一阶竖弯自振频率实

测值与理论值之比为极大值极性。标准模式序列为:

$$\omega_0 = \min \{\omega_0(1), \omega_0(2), \dots, \omega_0(6)\} = \{1.000, 0.475\ 8, 0.600\ 2, 3.218\ 0, 0.855\ 9, 1.342\ 9\}$$

表 1 预应力砼空心板桥荷载试验数据

桥梁编号	静载试验效率 均值 $\bar{\gamma}_q$	挠度校验 系数均值 $\bar{\zeta}_d$	应力(应变)校验 系数均值 $\bar{\zeta}_s$	相对残余 应变均值 $\bar{S}_p$	$R_\mu$	$R_t$
1	0.970 0	0.475 8	0.600 2	6.156 1	0.966 9	1.301 0
2	1.003 3	0.583 3	0.655 8	5.888 8	0.855 9	1.342 9
3	1.006 7	0.516 0	0.636 3	3.218 0	0.864 7	1.244 9
4	0.970 0	0.561 4	0.706 7	5.635 8	1.171 6	1.140 8
5	0.990 0	0.956 7	1.323 3	8.598 8	0.819 8	0.835 9
6	0.950 0	0.632 0	0.704 6	6.410 8	0.950 3	1.277 7
7	1.013 3	0.766 3	0.741 5	8.096 3	0.997 5	1.180 6
8	1.013 3	0.864 5	0.877 6	6.962 7	1.457 6	0.938 8

(2) 灰靶变换及灰关联差异信息空间计算。依据灰靶变换公式[见式(1)]、灰关联差异信息空间计算公式[见式(2)]和靶位坐标偏差计算公式[见式(3)],靶位坐标偏差极大值见式(4),极小值见式(5)。

$$T=\omega_i(k)=\frac{\min\{\omega_i(k),\omega_0(k)\}}{\max\{\omega_i(k),\omega_0(k)\}}=x_i(k)$$

(1)

$$\Delta_{GR}=(\Delta,\xi,\Delta_{0i}(\max),\Delta_{0i}(\min))$$

(2)

$$\Delta_{0i}(k)=|x_0(k)-x_i(k)|=|1-x_i(k)|$$

(3)

$$\Delta_{0i}(\max)=\max_i\max_k\Delta_{0i}(k)=\max_i\max_k|1-x_i(k)|=0.625\ 8$$

(4)

$$\Delta_{0i}(\min)=\max_i\min_k\Delta_{0i}(k)=\min_i\min_k|1-x_i(k)|=0$$

(5)

(3) 靶心系数及靶心度计算。由靶心系数计算公式[见式(6)],取分辨系数  $\xi=0.5$ ,得式(7),计算结果见表 2。

$$\gamma(x_0(k),x_i(k))=\frac{\min_i\min_k\Delta_{0i}(k)+\xi\max_i\max_k\Delta_{0i}(k)}{\Delta_{0i}(k)+\xi\max_i\max_k\Delta_{0i}(k)}$$

(6)

$$\gamma(x_0(k),x_i(k))=\frac{0.312\ 9}{x_{0i}(k)+0.312\ 9}$$

(7)

按熵值法计算步骤求得各指标权重为: $q_1=0.194\ 0$ 、 $q_2=0.1875$ 、 $q_3=0.135\ 2$ 、 $q_4=0.160\ 2$ 、 $q_5=0.145\ 5$ 、 $q_6=0.177\ 7$ 。各参数指标权重大小不一,其中静载试验效率均值的权重最大(为 0.194 0),应力(应变)校验系数均值的权重最小(为 0.135 2),说明各参数指标对桥梁结构工作状况评价的影响不同。究其原因,一方面是数据样本差异,另一方面是由于桥梁结构工作状况评价因素的灰性,该权重值不具有绝对性。将各参数指标权重带入考虑权重的靶心度计算公式[见式(8)],计算结果见表 3。

表 2 靶心系数值

靶心系数	$\Delta_{01}(k)$	$\Delta_{02}(k)$	$\Delta_{03}(k)$	$\Delta_{04}(k)$	$\Delta_{05}(k)$	$\Delta_{06}(k)$
$\gamma(x_0(k),x_1(k))$	0.912 5	1.000 0	1.000 0	0.396 0	0.731 7	0.909 3
$\gamma(x_0(k),x_2(k))$	0.989 5	0.629 3	0.786 9	0.408 3	1.000 0	1.000 0
$\gamma(x_0(k),x_3(k))$	0.979 3	0.800 7	0.846 5	1.000 0	0.968 6	0.810 9
$\gamma(x_0(k),x_4(k))$	0.912 5	0.672 4	0.674 9	0.421 8	0.537 3	0.675 2
$\gamma(x_0(k),x_5(k))$	0.969 0	0.383 7	0.364 1	0.333 3	0.578 9	0.453 2
$\gamma(x_0(k),x_6(k))$	0.862 2	0.558 8	0.678 6	0.385 9	0.759 0	0.865 6
$\gamma(x_0(k),x_7(k))$	0.959 7	0.452 2	0.621 5	0.341 8	0.687 9	0.721 4
$\gamma(x_0(k),x_8(k))$	0.959 7	0.410 4	0.497 5	0.367 8	0.431 2	0.509 8

$$\gamma(x_0, x_i)' = \sum_{k=1}^n q_k \gamma[x_0(k), x_i(k)] \quad (8)$$

表3 基于熵值法加权灰靶理论的桥梁结构状况评价模型的评价结果

桥梁编号	考虑权重的靶心度 $\gamma'$	评价等级	桥梁编号	考虑权重的靶心度 $\gamma'$	评价等级
1	0.831 1	B	5	0.527 3	D
2	0.804 9	B	6	0.689 8	C
3	0.899 7	A	7	0.638 0	C
4	0.660 0	C	8	0.542 6	D

按照 CJJ 99—2017《城市桥梁养护技术规范》中的评价方法对这 8 座桥梁的技术状况进行评价,结果见表 4。

表4 基于《城市桥梁养护技术规范》的桥梁结构状况评价结果

桥梁编号	综合指标 BCI	评价等级	桥梁编号	综合指标 BCI	评价等级
1	81.00	B	5	—	D
2	100.00	A	6	67.68	C
3	67.40	C	7	72.68	C
4	60.20	C	8	—	D

注:“—”表示该桥不打分,某种损坏类型达到规定的损坏程度,直接将该桥定为 D 级。

### 3 评价模型结果分析

#### 3.1 评定等级划分

依据灰色系统理论的相关定理,指标的评价等级由靶心度大小决定,  $[0.33, 0.4]$  以下各档无意义,等级从  $[0.33, 0.4]$  开始。根据靶心度的取值和 CJJ 99—2017《城市桥梁养护技术规范》关于桥梁完好状态的评估标准,结合实际桥梁结构工作状态,将其均匀划分成 5 等份,即靶心度分为以下 5 个类别:

$[0.85, 1.0]$ , A 级,结构呈完好状态,桥体需进行日常保养。

$[0.72, 0.85]$ , B 级,结构呈良好状态,桥体需进行日常保养和小修。

$[0.59, 0.72]$ , C 级,结构呈合格状态,桥体需进行专项检测后保养、小修。

$[0.46, 0.59]$ , D 级,结构呈不合格状态,桥体需检测后进行中修或大修。

$[0.333, 0.46]$ , E 级,结构呈危险状态,桥体需

检测评估后进行大修、加固或改扩建。

按照上述分类标准,依据熵值法加权灰靶理论计算的靶心度,3# 桥梁完好状态等级为 A 级;1#、2# 桥梁完好状态等级为 B 级;4#、6#、7# 桥梁完好状态等级为 C 级;5#、8# 桥梁完好状态等级为 D 级(见表 3)。

#### 3.2 评价结果一致性分析

对桥梁结构工作状态进行评价时,不同评价方法由于原理不同,评价结果可能不一致,需对模型评价结果的一致性进行分析。两种方法评价结果的一致性计算公式为:

$$CD(k, l) = \frac{\sum_{m=1}^M uf(m)}{M} \quad (9)$$

式中:  $CD(k, l)$  为第  $k$  种与第  $l$  种方法评价结果的一致程度,  $k \geq 1, l \leq N$ ;  $uf(m)$  为两种评价方法对第  $m$  ( $1 \leq m \leq M$ ) 个桥梁工作状态优劣排序的一致性判断指标,按式(10)计算;  $i, j$  分别为第  $k$  种和第  $l$  种评价方法对第  $m$  个桥梁工作状态的排序位置。

$$uf(m) = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0.5, & i < |i - j| \leq 1 \\ 0, & |i - j| > 1 \end{cases} \quad (10)$$

$CD(k, l) = 0$  时,两种方法的评价结果完全不同;  $0 < CD(k, l) \leq 0.5$  时,两种方法的评价结果有一定差异;  $0.5 < CD(k, l) \leq 1.0$  时,两种方法的评价结果基本一致;  $CD(k, l) = 1.0$  时,两种方法的评价结果完全一致。

按式(9)、式(10)计算,基于熵值法加权灰靶理论的预应力砼空心板桥评价模型评价结果和《城市桥梁养护技术规范》评价结果的一致性判断指标  $CD(k, l) = 0.437 5$ ,评定结果有一定差异。对比表 3、表 4,除 2#、3# 桥梁评定结果排序有较大差异外,其余各桥评定结果相差较小,评价模型的准确率达 75%,其分析结果与按桥梁规范评价的结果基本吻合,基本满足评定需求。评定结果存在一定差异的主要原因在于各自的评价原理有所不同,《城市桥梁养护技术规范》中桥梁综合指标 BCI 的计算方法为分层加权法,即根据观测的损坏状况及扣分值逐级、分层加权,得到桥梁各部分及全桥的 BCI,计算中涉及的扣分标准、权重根据专家评分结果反演得到。

### 4 结论

(1) 选择静载试验效率均值、挠度校验系数均

值、应力(应变)校验系数均值、相对残余应变均值、冲击系数实测最大值与理论值之比、一阶竖弯自振频率实测值与理论值之比 6 种荷载试验参数指标建立基于熵值法加权灰靶理论的空心板桥结构状况评价模型,对 8 座桥梁的技术状况进行评价,评价结果与按《城市桥梁养护技术规范》评价的结果基本一致,准确率达 75%,该模型可用于预应力砼空心板桥结构工作状况评价。

(2) 参数指标权重值经熵值法求得,由于数据样本差异、参与评价因素的灰性等原因,该权重值能反映各指标对桥梁结构工作状况评价影响的相对大小,可为桥梁结构工作状况评价提供一定参考,但不具有绝对性。

#### 参考文献:

- [1] 张彬,滕飞.现役桥梁承载能力的灰靶理论评价[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2015,34(4).

- [2] 秦煜,刘来君,张艳,等.混凝土桥梁结构工作状况综合评价体系[J].广西大学学报:自然科学版,2011,36(4).  
[3] 邓聚龙.灰理论基础[M].武汉:华中科技大学出版社,2002.  
[4] 邓聚龙.灰色理论基本方法[M].武汉:华中科技大学出版社,2005.  
[5] 许涛,黄晓明,赵永利.隧道路面类型选择及调查研究[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2011,35(1).  
[6] 邱菀华.管理决策与应用熵学[M].北京:机械工业出版社,2002.  
[7] JTG/T J21—2011,公路桥梁承载能力评定规程[S].  
[8] CJJ 99—2017,城市桥梁养护技术规范[S].  
[9] 赵慧.预应力砼空心板现场静载试验研究[J].公路与汽运,2019(2).  
[10] 张永平,关良勇,黄应征.某预应力混凝土空心板桥火灾后检测评估[J].公路交通科技:应用技术版,2018(11).

收稿日期:2019-08-01

(上接第 120 页)

度预测。

#### 参考文献:

- [1] 牛艳伟,石雪飞,阮欣.大跨径砼梁桥的长期挠度实测分析[J].工程力学,2008,25(增刊 1).  
[2] 贺拴海,李源,任伟,等.大跨连续刚构桥长期挠度实测分析及预测[J].武汉理工大学学报,2014,36(4).  
[3] 郝章喜,吴雪城,彭鹏,等.大跨径预应力混凝土箱梁桥长期挠度分析[J].西部交通科技,2016(6).  
[4] 杨斌,陈闯,韦仕荣,等.大跨径连续刚构桥长期下挠影响因素分析[J].贵州大学学报:自然科学版,2017,34(6).  
[5] 陈旭,刘秀霞,谭建德.大跨径连续刚构桥跨中下挠影

响因素分析[J].西部交通科技,2012(2).

- [6] 王培金,盛洪飞,赵尚栋.大跨连续刚构桥预应力混凝土箱梁的长期挠度预测探讨[J].公路交通科技,2015,26(1).  
[7] 杜晓冬.大跨径预应力混凝土连续刚构桥长期挠度分析及施工控制实践[D].西安:长安大学,2011.  
[8] 叶贵如,周玉龙.倾角仪在大跨度桥梁挠度检测中的应用[J].公路交通科技,2015,26(11).  
[9] 戈铭,孙泽信.大跨度预应力混凝土箱梁桥的挠度监测与预测研究[J].现代交通技术,2016,7(5).  
[10] JTG/T J21—2011,公路桥梁承载能力评定规程[S].

收稿日期:2019-06-24

(上接第 131 页)

从三维方向上分别就位。其主要技术特点:1) 顺桥向设置可靠的反力座,临时墩采用精轧螺纹钢串联,使千斤顶和临时墩的水平力可靠地传递到反力座上,有效解决拖拉过程中抵抗水平力的关键问题。2) 纵移滑道和横移滑道的合理转换是其关键施工技术之一。3) 不设导梁是其特点之一。

#### 参考文献:

- [1] 程慧林.曲线桥顶推施工技术[J].铁道建筑技术,2004(2).  
[2] 贾建平.高架桥施工支架横移及纵向拖拉施工技术[J].国防交通工程与技术,2003(4).

- [3] 胡云江,王骞.拱架横移技术在吊南河大桥上的运用[J].交通世界,2013(15).  
[4] 洪建和,齐庆明,杨春梅.跨线桥整体纵向拖拉就位法简介[J].铁道建筑技术,2008(8).  
[5] 刘文武,张志才,范君.晋豫鲁铁路通道跨京广线钢桁梁拖拉法施工技术[J].铁道建筑,2014(9).  
[6] 巩立伟.浅谈 70 m 箱梁 MGB 板滑移法[J].铁道建筑技术,2007(增刊).  
[7] 王德宇,卢浩,孟庆祥.大跨度预制箱梁横移架设技术[J].铁道建筑,2003(7).  
[8] 韩荟,石雅清.侧位横移转纵移喂梁在架梁工程中的应用[J].山西建筑,2012,38(18).

收稿日期:2019-10-27