

文章编号:1005-0523(2020)04-0021-06

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2020.04.004

# 基于概率统计的桥梁校验系数常值范围精细化研究

梁茜雪

(广西交科集团有限公司,广西 南宁 530007)

**摘要:**为了克服传统荷载试验评定中校验系数长期以来取值粗略而无法适应目前桥梁承载能力评定的难点,提高校验系数常值范围的精确性,以大量预应力混凝土小箱梁校验系数实测值为统计样本,采用概率统计方法对桥梁承载能力评定的校验系数范围进行研究,优化统计样本的选取原则,提出桥梁校验系数常值精细化范围。研究表明:样本选取原则对试验数据离散度具有决定作用;不同结构部位校验系数常值范围具有一定差异,按结构部位分别进行取值,可明显提高校验系数常值的准确性,对桥梁荷载试验的发展与完善具有推动作用。

**关键词:**荷载试验;桥梁承载能力;校验系数;统计样本;概率统计

中图分类号:U44

文献标志码:A

本文引用格式:梁茜雪. 基于概率统计的桥梁校验系数常值范围精细化研究[J]. 华东交通大学学报,2020,37(4):21-26.

**Citation format:**LIANG Q X. Research on refinement of constant range of bridge testing coefficient based on probability statistics[J]. Journal of East China Jiaotong University,2020,37(4):21-26.

校验系数是桥梁荷载试验评定最重要的指标之一,校验系数常值范围的精度直接决定桥梁承载力评定的可靠程度,传统荷载试验评定中校验系数常值范围长期以来取值粗略而无法适应目前桥梁承载能力评定,使得传统荷载试验评定方法在承载力评价时存在错判、误判的风险。目前校验系数常值范围的研究方法主要包括按统计方法对多座桥梁的试验数据进行分析确定<sup>[1-10]</sup>,或由校验系数主要影响因素的统计特征值确定<sup>[11]</sup>,或引入校验系数影响因子确定<sup>[12]</sup>。由影响因素的统计特征值确定校验系数的方法因需要建立基本变量与综合变量间的数学表达式,目前仅适用简单结构,且多数影响因素的特征值也建立在经验和假设的前提下,故暂时无法用于实际检测中。校验系数影响因子的概念是由长安大学王凌波提出,将影响校验系数的因素分为3类,对应得出3个影响因子,并采用单位值1与3个因子极值之和进行阐述,但由于影响因子极值的取值没有可靠的依据,这种方法仍处于理论研究状态。本文以大量预应力混凝土小箱梁校验系数实测值为统计样本,采用概率统计方法对桥梁承载能力评定的校验系数范围进行了研究,优化了统计样本的选取原则,提出了桥梁校验系数常值精细化范围,对桥梁荷载试验的发展与完善具有推动作用。

## 1 校验系数常值研究现状

近十余年来国内陆续开展了对空心板、T梁、箱梁、拱桥、连续刚构、斜拉桥等桥型的校验系数常值范围统计分析,但鉴于校验系数的影响因素种类多,仅从某一大类桥型来确定常值范围,要求有足够的样本以涵盖各类因素的变化,才可反映总体的统计特征,而现有的研究采用的样本范围较窄、数量较少,未能给出科学的指导范围。校验系数常值是在1988年颁布的《公路旧桥承载能力鉴定方法(试行)》(以下简称《试行方法》)首先提出,方法中对4大类桥型的应变和挠度校验系数常值范围做了规定。如表1所示,现行常值范围按《公路桥梁荷载试验规程》(JTG/T J21-01-2015)(以下简称《试验规程》)选取,规程在《试行方法》的4类桥型的基础上增加了2类桥型的校验系数常值<sup>[13-16]</sup>。

收稿日期:2019-01-03

基金项目:南宁市创新人才资助项目(2018-01-04)

作者简介:梁茜雪(1975—),女,高级工程师,硕士,研究方向为桥梁检测评估、健康监测和加固设计。

表1 常见桥梁结构试验校验系数常值表  
Tab.1 Testing coefficient of common bridge structure

桥梁类型	应变(或应力)校验系数	挠度校验系数
钢筋混凝土板桥	0.20~0.40	0.20~0.50
钢筋混凝土梁桥	0.40~0.80	0.50~0.90
预应力混凝土桥	0.60~0.90	0.70~1.00
圬工拱桥	0.70~1.00	0.80~1.00
钢筋混凝土拱桥	0.50~0.90	0.50~1.00
钢桥	0.75~1.00	0.75~1.00

## 2 校验系数常值确定方法

### 2.1 概率统计分析方法

采用数理统计方法进行校验系数常值范围研究的原理是将校验系数作为随机变量,通过对校验系数样本的分析得出总体的数字特征,由总体数字特征确定校验系数常值区间。本文采用蒙特卡罗法(Monte Carlo Method),又称随机抽样法或统计试验法,在目前结构特性的随机分析中,它被认为是一种相对精确的方法,分析方法流程图见图1。

### 2.2 校验系数样本选取原则

通过设置样本选取原则,减少校验系数影响因素,同时在限定条件下,样本空间包含足够多其它因素影响的样本,误判风险明显下降。根据此原则分别对校验系数影响较大的主要因素进行限定,包括桥梁的施工及设计质量控制水平、测试截面位置和数量、结构分析方法、附属结构对刚度影响、试验加载方式及效率,本文样本选取的具体要求为:

- 1) 桥梁为近5年广西高速公路新建预应力混凝土小箱梁桥;
- 2) 桥梁未发生施工质量事故,外观质量较好,承重构件无裂缝及较大缺损;
- 3) 桥梁测试截面位置和数量根据《试验规程》进行选定;
- 4) 结构分析采用梁格法建立有限元空间模型,考虑混凝土铺装层对结构刚度提高(扣除2cm混凝土铺装层厚度),但不计入沥青铺装及护栏影响;
- 5) 按照《试验规程》进行试验工况设计,且加载效率满足0.85~1.05。

## 3 校验系数常值精细化范围研究

### 3.1 校验系数样本

以预应力混凝土小箱梁桥为例进行校验系数常值精细化范围研究,通过收集近5年建成的11条高速公路上77座预应力混凝土小箱梁桥交工验收荷载试验数据作为样本。按照最不利原则,以控制截面控制梁片的应变和挠度校验系数为主要研究对象,使用数理统计方法确定预应力混凝土小箱梁桥的应变和挠度校

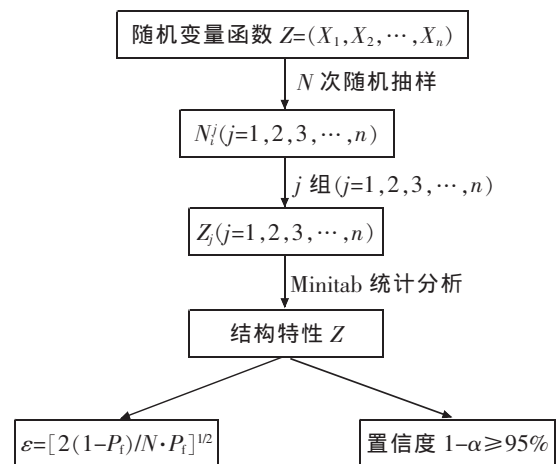


图1 蒙特卡罗分析方法流程图  
Fig.1 Flow chart of the Monte Carlo method

验系数常值范围。进行统计分析前需剔除因测量误差、计算误差、环境影响等引起的疑似异常值。本文采用拉依达准则进行异常值判别,认为 $[\mu-3\sigma, \mu+3\sigma]$ 之外的数据为异常值,其中,最大正弯矩工况控制梁片应变和挠度异常值分别占样本总体的 1.18%和 0.07%,判别前后的样本参数见表 2。

表 2 校验系数样本参数表  
Tab.2 The sample parameters of testing coefficient

样本参数	应变校验系数				挠度校验系数		
	最大正弯矩工况		最大负弯矩工况		最大正弯矩工况		
	控制梁	截面平均	控制梁	截面平均	控制梁	截面平均	
判别前	数量	423	423	67	67	429	429
	范围	0.388~0.993	0.377~0.876	0.250~0.767	0.295~0.776	0.272~0.940	0.318~0.872
判别后	数量	418	420	67	67	426	426
	范围	0.388~0.904	0.377~0.847	0.250~0.767	0.295~0.776	0.351~0.884	0.318~0.838

### 3.2 校验系数总体统计分析

选取的样本包含预应力混凝土小箱梁各种标准跨径,分别为 20,25,30,35,40 m。由于连续梁桥荷载试验时的最大正、负弯矩控制截面分别位于跨中和支点附近,截面布置和受力均不相同,为分析箱梁不同部位校验系数常值范围的差别,按最大正、负弯矩工况控制截面将校验系数分为两大类,在前述分类的基础上再细分为控制梁校验系数和截面平均校验系数(所在截面各片梁校验系数的平均值),以分析局部和整体校验系数是否存在不同。

采用统计软件 Minitab 分析控制梁及截面平均应变和挠度校验系数样本。首先对各组样本进行概率统计分析,限于文章篇幅,仅列出最大正弯矩工况时控制梁的应变和挠度校验系数服从 95%置信区间的正态概率图。从图 2 和图 3 可见,各交点的变化大致在同一直线上,说明校验系数与其概率基本呈线性关系,认为箱梁应变和挠度校验系数服从正态分布(图中百分比表示相应校验系数占总体样本的百分比)。

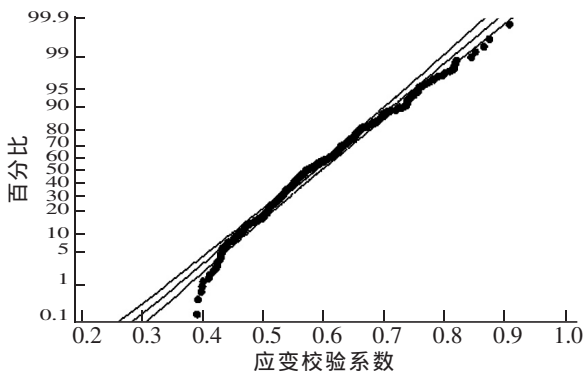


图 2 最大正弯矩工况应变校验系数概率图

Fig.2 Probability diagram of stress testing coefficient under maximum positive bending moment condition

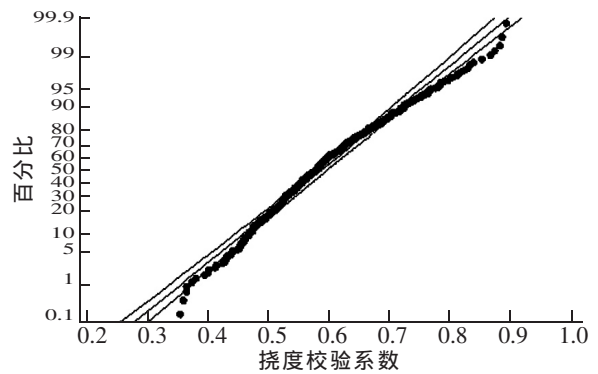


图 3 最大正弯矩工况挠度校验系数概率图

Fig.3 Probability diagram of deflection testing coefficient under maximum positive bending moment condition

按样本分类进行总体参数估计,校验系数常值范围按 95%概率统计,对于服从正态分布的随机变量分布在区间 $[\mu-2\sigma, \mu+2\sigma]$ 内的概率约有 95%,再按精度 0.05 取该区间的上限和下限作为校验系数常值范围。统计分析结果分别见表 3 和图 4~图 7(图中频率表示相应校验系数分布概率)。

表3 校验系数统计分析表  
Tab.3 Statistical analysis of testing coefficient

样本分类	样本数量	范围	均值	标准差	$[\mu-2\sigma, \mu+2\sigma]$	常值范围	均值 95% 置信区间	
最大正弯矩工况	控制梁	418	0.388~0.904	0.586	0.098	[0.390, 0.782]	[0.40, 0.80]	(0.577, 0.596)
	应变							
	截面平均	420	0.377~0.876	0.584	0.088	[0.407, 0.761]	[0.40, 0.75]	(0.575, 0.592)
	挠度							
最大负弯矩工况	控制梁	426	0.351~0.884	0.584	0.100	[0.385, 0.783]	[0.40, 0.80]	(0.575, 0.594)
	应变							
	截面平均	426	0.318~0.838	0.577	0.086	[0.405, 0.748]	[0.40, 0.75]	(0.568, 0.585)
	挠度							
最大负弯矩工况	控制梁	67	0.250~0.767	0.529	0.108	[0.313, 0.744]	[0.30, 0.75]	(0.502, 0.555)
	应变							
	截面平均	67	0.295~0.776	0.526	0.106	[0.314, 0.737]	[0.30, 0.75]	(0.500, 0.552)

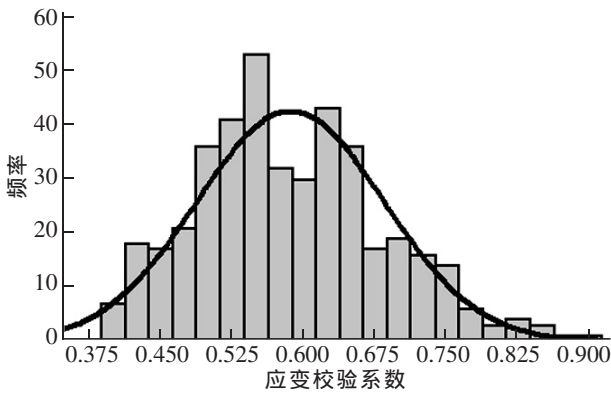


图4 最大正弯矩工况控制梁应变校验系数直方图  
Fig.4 Column diagram of stress testing coefficient under maximum positive bending moment condition

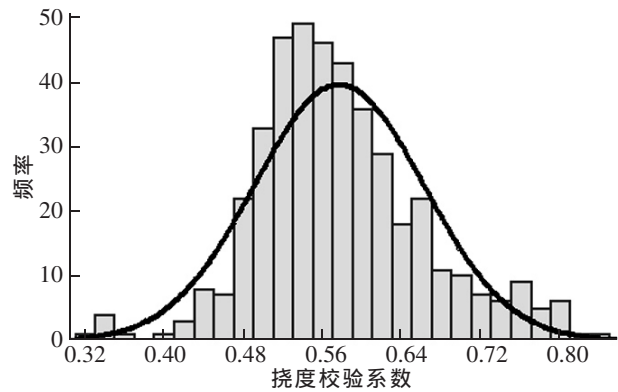


图5 最大正弯矩工况控制梁挠度校验系数直方图  
Fig.5 Column diagram of deflection testing coefficient under maximum positive bending moment condition

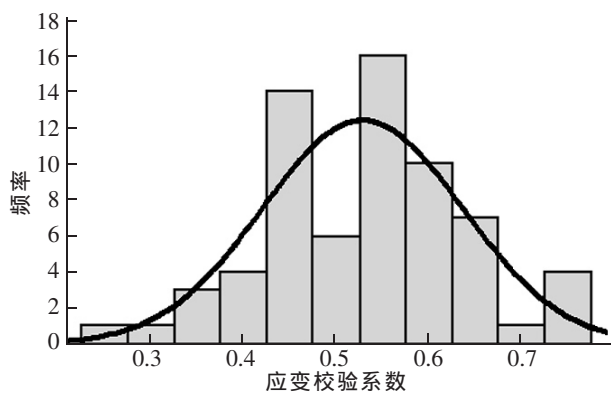


图6 最大负弯矩工况控制梁应变校验系数直方图  
Fig.6 Column diagram of stress testing coefficient under maximum negative bending moment condition

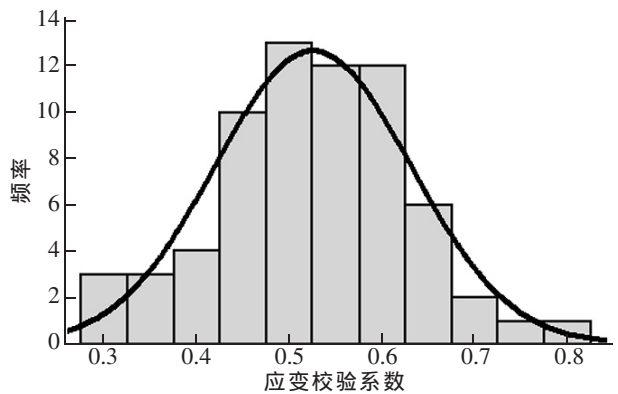


图7 最大负弯矩工况截面平均应变校验系数直方图  
Fig.7 Column diagram of average stress testing coefficient under maximum negative bending moment condition

通过以上分析可知,各类样本对应的总体标准差和均值置信区间均较小,说明试验数据离散度低,结果可靠。在最大正弯矩工况时控制梁的应变和挠度校验系数常值范围均为[0.40, 0.80],截面平均的应变和挠度

常值范围均为[0.40,0.75]。控制梁和截面平均校验系数常值范围很接近,截面平均的上限略小;因此可统一取[0.40,0.80]。最大负弯矩工况时控制梁和截面平均的应变校验系数常值范围均为[0.30,0.75],与最大正弯矩工况时的[0.40,0.80]明显不同,表明按不同部位分别统计常值范围是合理的。本文校验系数常值范围分析结果与《荷载规程》差别较大,具体比较见表4。

表4 预应力钢筋混凝土小箱梁桥校验系数常值范围对比表

Tab.4 Comparison of the testing coefficient of prestressed reinforced concrete small box girder bridge

方法	分类	应变校验系数	挠度校验系数
本文结果	预应力混凝土小箱梁桥	最大正弯矩工况	[0.40,0.80]
		最大负弯矩工况	[0.30,0.75]
《荷载规程》	预应力混凝土桥	[0.60,0.90]	[0.70,1.00]

### 3.3 正载和偏载校验系数分析

荷载试验工况加载根据横向位置不同分为正载(中载)和偏载两种方式,对多梁式桥正载的控制梁为中梁,偏载的控制梁为边梁。各组数据仍近似服从正态分布,正载和偏载下校验系数统计见表5。由分析结果可见,不仅应变在正偏载时、挠度在正偏载时的校验系数的统计结果接近,而且应变和挠度两者结果也很接近。校验系数是实测值和理论值的比值,当仅改变横向加载位置,其它影响因素不变时,校验系数影响很小,表明桥梁变形(变位)沿横向分布趋势与实际基本相符。这也是对校验系数总体分析时,应变和挠度校验系数采用控制梁样本与截面平均样本所得到的统计参数非常相近的原因。从统计分析的角度说明采用梁格法并考虑部分桥面铺装刚度的计算模型在模拟小箱梁桥结构的横向联系上是和实际情况相符的,表明这种建模方式的合理性。

表5 正载和偏载下校验系数统计表

Tab.5 Statistical table of testing coefficient under positive and partial load test

样本分类		均值	标准差	$[\mu-2\sigma, \mu+2\sigma]$	均值 95% 置信区间
应变	正载	0.594	0.095	[0.404,0.783]	[0.580,0.607]
	偏载	0.578	0.097	[0.386,0.771]	[0.566,0.591]
挠度	正载	0.610	0.091	[0.428,0.793]	[0.597,0.623]
	偏载	0.557	0.100	[0.355,0.758]	[0.543,0.570]

## 4 结论

1) 运用于新建桥梁的考虑校验系数常值范围荷载试验评定法,精细化了传统荷载试验评定中校验系数的取值范围,取值范围更具有代表性。

2) 以考虑主要影响因素为限定条件选取样本,最大正弯矩工况控制梁片应变和挠度异常值分别占样本总体的1.18%和0.07%,舍弃后的试验数据离散度减小。

3) 最大负弯矩工况与最大正弯矩工况应变校验系数常值范围分别为[0.30,0.75]和[0.40,0.80],按结构部位对常值范围进行分类,可明显提高校验系数常值的准确性。

### 参考文献:

[1] 夏超,黄福伟,张晓东,等. 20 m 预应力混凝土空心板桥的结构校验系数统计分析[J]. 西南科技大学学报,2013,28(4):1-3.

[2] 杨菲. 桩板及空心板梁桥结构下穿软土区高铁桥梁的数值模拟研究[J]. 华东交通大学学报,2017,34(5):12-20.

- [3] 曾金雄. 预应力混凝土连续 T 梁校验系数分析[J]. 广东土木与建筑, 2018, 25(5): 28-30.
- [4] 孙伟, 马超. 基于 matlab 的高速公路常见桥荷载试验挠度及其校验系数的常值范围分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2013(7): 38-40.
- [5] 刘旭政, 王丰平, 黄平明. 斜拉桥各构件校验系数的常值范围[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2012(1): 57-61.
- [6] 孙冬. 混凝土拱桥校验系数的统计分析影响因素研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
- [7] 刘凯宇. 高墩大跨 PC 连续刚构桥荷载试验评价关键参数研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- [8] 刘利军. 梁桥静载试验结果评定分析[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- [9] 徐长峰, 高崇威. 统一模型下的桥梁静载试验挠度校验系数分析[J]. 公路, 2016(12): 97-100.
- [10] 王伟哲, 江阿兰. 预应力钢筋混凝土梁结构校验系数的研究[J]. 森林工程, 2003, 19(2): 45-48.
- [11] 司徒毅. 预应力混凝土单片梁静载试验应变校验系数随机分析与评估指标研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [12] 王凌波. 桥梁静载试验校验系数及优化评定方法研究[J]. 公路交通科技, 2015, 32(6): 62-68.
- [13] 谌润水, 胡钊芳. 公路桥梁承载荷载试验[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003: 18-24.
- [14] 中华人民共和国交通运输部. JTG/T J21-2011 公路桥梁承载能力检测评定规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [15] 中华人民共和国交通运输部. JTG/T J21-01-2015 公路桥梁荷载试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T50153-2008 公路工程结构可靠性设计统一标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.

## Research on Refinement of Constant Range of Bridge Testing Coefficient Based on Probability Statistics

Liang Qianxue

(Guangxi Transportation Science & Technology Group Co., Ltd., Nanning 530007, China)

**Abstract:** In order to overcome the difficulty that the value of testing coefficient in traditional load test evaluation has been rough for a long time and cannot adapt to the current evaluation of bridge bearing capacity, and to improve the accuracy of the constant value range of bridge testing coefficient, the measured value of testing coefficient of a large number of prestressed concrete small box girder is taken as the statistical sample. The testing coefficient of bridge bearing capacity evaluation was studied and optimized by using the probability statistical method. The selection principle of the statistical samples and the refining constant range of bridge testing coefficient were put forward. The results show that the principle of sample selection determines the dispersion of test data. The range of the testing coefficient of different structural parts is different, and the value of the testing coefficient according to the structural parts can obviously improve the accuracy of the testing coefficient constant. The research can promote the development and perfection of the bridge load test.

**Key words:** load test; bridge carrying capacity; testing coefficient; statistical samples; probability statistics