

基于德尔菲法的轨道交通桥梁关键检测指标研究\*

付俊俊

(上海市建筑科学研究院有限公司, 上海 201108)

**摘要:** 构建轨道交通桥梁技术状况评定关键指标,为轨道交通桥梁技术状况评定提供依据。在公路、市政桥梁技术状况评定指标的基础上,结合铁路桥梁检测规范,初步筛选 9 个评定指标;采用德尔菲法,对 10 名专家进行 2 轮问卷调查,最终确定 8 个关键检测指标。这 8 个关键检测指标的算术平均值为 8.2~9.4,满分频率为 30%~80%,变异系数为 12.77%~17.92%,收敛性较好,结果可信度较高,可为轨道交通桥梁检测评定提供借鉴。

**关键词:** 工程管理;轨道交通桥梁;技术状况评定;关键检测指标;德尔菲法

**中图分类号:** U415.12

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2022)01-0147-04

随着轨道交通运营里程的日益增加,轨道交通桥梁得到迅猛发展。但针对服役期轨道交通桥梁的检测评定标准尚未颁布,各检测单位大多以公路、市政桥梁检测评定规范为基础,参照铁路桥梁检测规范对其进行技术状况评定。而轨道交通桥梁与公路、市政桥梁在结构形式、荷载作用、结构响应等方面存在较大差异,对应的检测评定指标不尽相同,且限值大小有差异;《铁路桥梁检定规范》主要偏向于承载力检算,且是基于部件评估,未提及桥梁总体技术状况评价准则,也无法对全桥进行技术状况评定。上述原因导致针对同一座服役期轨道交通桥梁,不同检测单位评定指标不同、评定等级不同的情况经常发生。因此,在公路、市政桥梁检测评定规范的基础上,考虑轨道交通桥梁的特殊性,构建服役期轨道交通桥梁检测评定关键指标非常必要。该从桥梁结构运营安全性、轨道车辆运营安全性和乘坐人员舒适性角度出发,在公路、市政桥梁检测评定标准的基础上,结合铁路桥梁检测规范,通过德尔菲法筛选轨道交通桥梁的关键检测指标,并对部分关键指标进行理论分析,为轨道交通桥梁技术状况评定提供技术支撑。

1 关键检测指标的初次筛选

轨道交通桥梁作为一个复杂系统,影响其运营安全和行车舒适性的因素多且复杂,大多数因素只能定性描述,无法准确定量。对于砼破损、钢筋锈蚀、砼保护层厚度等普遍性检测指标,技术状况评定

时一般直接参考公路、市政桥梁。而轨道交通桥梁对结构自身响应要求较严,除上述普遍性检测指标外,还有部分区别于公路、市政桥梁的关键检测指标。通过文献调研、设计单位和检测单位走访,确定上部结构姿态变化、边界条件变化、关键构件振动和关键构件损伤 4 类,梁端转角、梁端空隙等 9 个小类关键检测评定指标(见表 1)。

表 1 初次筛选的轨道交通桥梁关键检测指标

指标类型	检测指标
上部结构姿态变化	梁端转角
	梁端空隙
边界条件变化	基础变位
	支座变位
关键构件振动	主梁竖向振动
	主梁横向振动
	墩顶横向振动
关键构件损伤	钢轨螺栓、联结零件劣化
	护轨、钢轨伸缩调节器损伤、失效

2 基于德尔菲法的关键检测指标二次识别

2.1 德尔菲法简介

德尔菲法又称专家调查修正法,主要针对预测参数通过问卷调查获取专家意见,根据专家意见对参数进行增减,寻求意见逐渐收敛,确定最终指标。其基本步骤:1) 通过文献调研、现场实测等确定预测参数并制作问卷调查表;2) 通过问卷调查向熟悉该行业的专家征询意见;3) 收到专家的反馈意见后对预测参数进行整理、研判,并根据修正后参数进行

\* 基金项目:上海市建筑科学研究院(集团)有限公司科研创新项目(HT0218122S0401)

下一轮问卷调查,直到专家意见一致性较高,结束问卷调查,筛选关键指标,形成评价指标体系。

## 2.2 调查实施

邀请 10 名专家,包括 2 名检测单位教授级高工、3 名检测单位高工、2 名设计单位高工、1 名业主单位高工,均为桥梁工程专业专家。采用微信小程序向 10 名专家投递调查表进行 2 轮问卷调查,请专家对初次筛选的 9 个指标按照重要性程度分别按 10、7、4、0(很重要、重要、一般、不重要)进行打分。调查表设有指标补充栏,便于专家进一步补充完善。

(1) 专家积极系数。用调查表的有效回收率表示。调查第 1 轮、第 2 轮均发出问卷 10 份,收回有效问卷 10 份,支持系数均为 100%,专家积极系数

较高。

(2) 专家权威程度。包括专家对调查事项的熟悉程度和自我判断依据 2 个指标,权威程度取 2 个指标的平均值。10 位专家均为桥梁专业的高工,长期从事相关工作,权威程度为 0.94,一般不小于 0.70 即可接受。参与调查的专家的权威性较高,调查结果可信。

(3) 指标筛查情况。经过 2 轮指标筛查后,初步拟定的 9 项指标中,支座变位、钢轨螺栓和联结零件劣化及护轨和钢轨伸缩调节器损伤、失效 3 个指标被剔除,其余指标专家意见趋于一致,新增钢梁疲劳损伤指标,最终形成 7 个轨道交通桥梁关键检测指标(见表 2)。

表 2 轨道交通桥梁关键检测指标专家咨询结果

指标类型	权重	关键检测指标	算术平均值	满分频率/%	变异系数/%	Kendall 系数	权重
上部结构姿态变化	0.15	梁端转角	8.5	40	17.65	0.83	0.60
		梁端空隙	8.2	30	17.92	0.77	0.40
边界条件变化	0.25	基础变位	8.8	60	16.70	0.89	0.25
		主梁竖向振动	9.1	70	15.11	0.94	0.35
关键构件振动	0.35	主梁横向振动	9.4	80	12.77	0.95	0.40
		墩顶横向振动	8.2	40	17.92	0.77	0.25
关键构件损伤	0.25	钢梁疲劳损伤	8.2	40	17.92	0.77	0.25

## 2.3 专家意见协调程度及显著性检验

经过 2 轮专家问卷调查后,7 个关键检测指标的算术平均值为 8.2~9.4,满分频率为 30%~80%,变异系数为 12.77%~17.92%(见表 2)。一般以满分比大于 20%且变异系数小于 20%为筛选标准,据此认为专家咨询结果可信。同时,Kendall 系数为 0.77~0.95,比较接近 1,表明表 2 所示关键检测指标的收敛性较好,专家的认可度较一致。

## 3 关键检测指标研究

### 3.1 上部结构姿态变化指标

上部结构姿态变化指标包括梁端转角和梁端空隙。梁端转角会导致墩顶处轨道扣件系统产生附加上拔力,易使扣件系统疲劳、失效。目前中国铁路桥梁设计时采用强度、基频和梁端转角共同控制,要求有砟轨道梁端转角 $\leq 3\%$ 、无砟轨道 $\leq 1.5\%$ 。对于服役期桥梁,铁路桥梁规定主梁弯曲矢度不超过跨度的 1/1 000,进而控制梁端转角。轨道交通桥梁目前暂未作出限值要求。

针对梁端空隙,目前《铁路桥涵设计规范》综合施工误差、温度变形、弹性变形等因素对梁端最大空

隙提出了限值要求(见表 3),同时对于服役期桥梁,《铁路桥梁检定规范》要求梁端空隙最小值 $\geq 2$  mm(见表 4)。公路市政和轨道交通桥梁相关规范对梁端空隙最大值和最小值均未作要求。

表 3 铁路桥梁梁端空隙设计允许值

桥梁类型		梁端空隙设计 允许值/mm
钢筋砼梁和	桥梁跨度 $L > 16$ m	100
预应力砼梁	桥梁跨度 $L \leq 16$ m	60
钢梁		100

表 4 铁路桥梁运营期梁端空隙检定标准

类型等级	劣化程度
AA	梁端顶紧,已造成梁或墩台砼溃碎和严重裂缝
A1	相邻跨梁端或梁端与桥台顶紧(无支座或就地灌注梁两端未留缝隙者除外)
B	相邻跨人行道顶紧;相邻跨梁端或梁端与墩台间隙小于 2 mm,有顶紧的可能

虽然公路和轨道交通桥梁规范中均未对梁端间隙作出规定,但过大的间隙和过小的间隙均不合适。对于轨道交通桥梁,过大的间隙会导致轨道梁下方无支撑而发生变形,影响行车舒适性和安全性;顶死

的梁端可能导致桥梁内力变化、轨道变形,也将影响行车舒适性和安全性。因此,这一指标应在运营检测中测试。

3.2 边界条件变化指标

基础沉降对桥梁结构的影响主要包括均匀沉降和沉降差,其中沉降差对结构的影响更显著。桥梁结构对基础沉降的要求非常严格,特别是高速铁路桥梁(见表 5)。基础沉降对高速铁路的影响更多体现在无砟轨道桥梁上,因为无砟轨道对沉降变形的自适应性能较差,轨道的几何调整能力有限,沉降变形大会导致轨道线形平顺性恶化,影响行车安全。为此,曾有学者提出,桥梁基础工后沉降能否控制在规定范围内决定高速铁路桥梁能否顺利铺设无砟轨道,德国更是提出“工后零沉降”的要求。上海地区多为软土地基,基础工后沉降更明显,轨道交通桥梁的基础沉降应作为检测评定指标。

表 5 静定结构墩台基础工后沉降限值 mm

沉降类型	桥上轨道类型	沉降限值
墩台均匀沉降	有砟轨道	30
	无砟轨道	20
相邻墩台沉降差	有砟轨道	15
	无砟轨道	5

3.3 关键构件振动指标

3.3.1 主梁竖向振动

研究表明,对于设计速度在 120 km/h 及以下的轨道交通桥梁,列车运行产生的激振频率一般为 1.0~1.5 Hz。对于目前设计体系下轨道交通用简支梁,自振频率远在激振频率范围外,故轨道交通桥梁设计规范中未直接对桥梁的竖向自振频率进行限制。但对于像上海地铁 11 号线跨沪宁(上海—南京)高速公路大桥(75.5 m+129 m+75.5 m)这样的大跨径桥梁,其竖向振动频率较小,列车高速行驶可能产生共振现象。该桥位处实际列车运营的最高速度限制在 70 km/h。铁路桥梁对桥面竖向加速度和车体竖向加速度均作了明确限值要求(见表 6)。在结构运营过程中,有必要结合列车行驶速度对结构竖向自振特性进行检测,特别是对于刚度较小的大跨度轨道交通桥梁。

此外,根据表 6,在设计阶段,考虑运营速度的差别,轨道交通桥梁并未像铁路桥梁那样限制桥面竖向加速度。但从运营期检测角度出发,建议将轨道交通桥梁桥面竖向加速度作为检测指标,从安全性角度对运营期桥面竖向加速度进行检测,确保列

车运营安全。

表 6 轨道交通桥梁和铁路桥梁竖向加速度限值

桥梁类型	桥面竖向加速度	车体竖向加速度
轨道交通桥梁	—	$\leq 0.13g$ , 计入动力系数
铁路桥梁	有砟桥面 0.35g, 无砟桥面 0.50g, 设计时速 200 km/h	$\leq 0.13g$

3.3.2 主梁横向振动

据统计,一般梁式桥的横向一阶自振频率在竖向一阶自振频率之后出现,且随跨径的增加而减小。相较于竖向刚性的桥墩支撑,横向一般依靠支座的约束力,故横向安全需重点关注。针对横向振幅,铁路桥梁仅考虑桥梁结构形式、材料等,未考虑列车载重和车速。而现有研究表明,同一车速下列车空载过桥时桥梁的横向振幅明显高于重载。因此,对轨道交通桥梁进行检测评定时,有必要在不同时段、不同车速时进行横向振幅检测。

轨道交通桥梁设计规范和铁路桥梁设计规范都从列车乘坐舒适性的角度对列车横向加速度进行了限制(见表 7),同时《铁路桥梁检定规范》对运营过程中振动加速度进行了限制,有必要参考铁路桥梁的规定,在轨道交通桥梁运营期对桥梁横向加速度进行测试,并按照铁路桥梁 1.4 m/s<sup>2</sup> 的限值进行安全性评定。

表 7 轨道交通桥梁和铁路桥梁横向加速度限值

桥梁类型	设计车体横向加速度	检定桥梁横向加速度
轨道交通桥梁	$\leq 0.10g$ , 静活载	—
铁路桥梁	$\leq 0.10g$	$\leq 1.4 \text{ m/s}^2$

3.3.3 墩顶横向振动

出于节约成本和城市空间利用等考虑,类似武汉轻轨 1 号线的高墩桥梁越来越多地被应用于城市轨道交通中。而随着桥墩高度的增加,桥墩的横向自振频率逐渐降低,当桥墩横向自振频率低于上部结构主梁时,对全桥横向振动的影响会显著加大。《铁路桥梁检定规范》及《铁路桥隧建筑物大修维修规则》采用墩顶横向最大振幅和最低频率 2 个指标综合评价桥墩在运营过程中的刚度状态。

表 8 为轨道交通桥梁和铁路桥梁桥墩刚度特点对比。由表 8 可知:轨道交通桥梁桥墩刚度设计标准相对于铁路桥梁略有降低,这与轨道交车速、运载力等参数适配。针对轨道交通桥梁墩顶振动的检测评估标准的取值也应体现与轨道交通桥梁与铁路

表 8 桥墩刚度设计允许值

项目	轨道交通桥梁	铁路桥梁
横桥向刚度	$\leq 4\sqrt{L}, L \geq 5 \text{ m}$	1.0‰rad, 200 km/h 公路及以上铁路桥梁
	水平折角 $\leq 2.5\text{‰ rad}, L < 5 \text{ m}$	160 km/h 公路及以下铁路桥梁
顺桥向刚度	$\leq 5\sqrt{L}, L \geq 25 \text{ m}$	$\leq 5\sqrt{L}$ , 简支梁, $L \geq 24 \text{ m}$
	$\leq 25, L < 5 \text{ m}$	$\leq 24.5 \text{ kN/m}$ , 简支梁, $L < 24 \text{ m}$

桥梁的差异。

### 3.4 关键构件损伤指标

在调查表意见栏,10 位专家一致建议(4 位 10 分,6 位 7 分)轨道交通桥梁关键检测指标应考虑钢梁疲劳损伤。中国城市轨道交通服役期桥梁钢桥占比大,而且后续会逐年增加,发生疲劳破坏的基数较大;另一方面,钢梁的疲劳破坏为脆性破坏,无明显塑性变形,难以在破坏前采取有效预防措施,而一旦发生疲劳破坏,将造成巨大人员伤亡事故。因此,城市轨道交通桥梁和铁路桥梁规范均对钢结构主梁有严格要求。对于服役期钢桥,铁路桥梁检测规范通过疲劳应力截止限检验、疲劳损伤度检验及运营应力谱进行疲劳损伤检测。而轨道交通桥梁尚未提及,应在公路、市政桥梁关于钢结构桥梁检测评定指标的基础上,参照铁路桥梁检测规范,对轨道交通钢结构桥梁进行疲劳损伤检测判定。

## 4 结语

通过德尔菲法构建轨道交通桥梁关键检测指标,收敛性较好,专家认可度较一致,可为轨道交通桥梁检测评定提供借鉴。对轨道交通桥梁进行检测评定时,应在公路、市政桥梁检测规范的基础上,将上部结构姿态变化、边界条件变化、关键构件振动、关键构件损伤纳入检测评定范围。

该文仅研究了轨道交通桥梁的关键检测指标,各指标的具体取值还需结合设计标准和运营实际进一步研究。

### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国铁道部.铁路桥梁检定规范:铁运函[2004]120 号[S].北京:中国铁道出版社,2004.
- [2] 交通运输部公路科学研究院.公路桥梁技术状况评定标准:JTG/T H21—2011[S].北京:人民交通出版社,2011.
- [3] 北京市政路桥管理养护集团有限公司,振华集团(昆山)建设工程有限公司.城市桥梁养护技术标准:CJJ 99—2017[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.
- [4] 王维康.基于层次分析法和模糊理论的矮塔斜拉桥状态综合评估[D].西安:长安大学,2014.
- [5] 郭秀华.实用医学调查分析技术[M].北京:人民军医出版社,2005.
- [6] 魏亚辉.高速铁路无砟轨道桥梁梁端变形相关问题研究[D].北京:中国铁道科学研究院,2012.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部.城市轨道交通桥梁设计规范:GB/T 51234—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [8] 宁星.地面沉降下无砟轨道的力学特性研究[D].北京:北京交通大学,2014.
- [9] 申磊.梁端无砟轨道扣件系统受力研究[D].成都:西南交通大学,2008.
- [10] 吴定俊,曹雪琴,许恺.上海地区铁路桥梁基础沉降和高速铁路桥式性能比较[J].上海铁道大学学报(自然科学版),1997,18(4):17—23.
- [11] 汪振国.轨道交通简支梁桥振动特性与控制研究[D].上海:华东交通大学,2018.
- [12] 国家铁路局.铁路桥涵设计规范:TB 10002—2017[S].北京:中国铁道出版社,2017.
- [13] 周细辉,黄坤.钢桥面板纵肋对接焊缝疲劳裂纹扩展特性及加固方法研究[J].中外公路,2019,39(3):138—142.
- [14] 企业导报,2011(12):284.
- [4] 孙慧,刘军,童军.高分子抗裂贴拉伸强度特性试验研究[J].长江科学院院报,2017,34(2):5—7.
- [5] 李汝凯,刘秘强,周刚,等.DZFH 新型道路抗裂贴反射裂缝性能研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2017,36(10):51—55.
- [6] 蔡氧,付伟,陶泽峰,等.基于扩展有限元模型的土工布防荷载型反射裂缝影响分析[J].吉林大学学报(工学版),2017,47(3):765—770.

收稿日期:2021—06—25

收稿日期:2021—02—28