

城市轨道交通桥梁与铁路客运专线桥梁 刚度设计标准的比较分析

秦清华 邱 凌

(重庆市轨道交通(集团)有限公司,401120,重庆//第一作者,高级工程师)

摘 要 车速的逐步提升和旅客对乘坐舒适性的要求使得桥梁的设计思路已从过去的强度设计转化为刚度设计。对比分析了《城市轨道交通桥梁设计规范》和《新建时速 200 ~ 250 公里客运专线铁路设计暂行规定》中桥梁的适用条件和刚度标准,并简述了其对实际桥梁设计的影响。

关键词 城市轨道交通桥梁;铁路客运专线桥梁;设计刚度标准;舒适性;安全性;自振频率

中图分类号 U442.5⁺1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.03.016

Comparative Analysis of Stiffness Design Standards Between Urban Rail Transit Bridge and Railway Passenger Dedicated Lines Bridge

QIN Qinghua, QIU Ling

Abstract With the improvement of speed and the demands for passenger comfort, the design ideas of railway bridge have converted from strength design to stiffness design. The applicable condition and the rigidity standard of bridges in the Code for Urban Rail Transit Bridge Design and the Interim Provisions on the Design of Newly Built Passenger Dedicated Line with Speed of 200?~250 km/h are comparatively analyzed, their effect on the actual bridge design is briefly studied.

Key words urban rail transit bridge; bridge of passenger dedicated line; rigidity design standard; comfort; safety; natural vibration frequency

Author's address Chongqing Rail Transit Group Co., Ltd., 401120, Chongqing, China

为建立与城市轨道交通发展相配套的完备的生产、设计、科研能力和体系,中华人民共和国住房和城乡建设部于 2017 年发布了 GB/T 51234—2017《城市轨道交通桥梁设计规范》(以下简称“城轨规范”),原铁道部于 2005 年 8 月 10 日发布了《新建

时速 200 ~ 250 km 客运专线铁路设计暂行规定》(以下简称“客专规定”),国家铁路局于 2014 年 12 月 1 日发布了 TB 10621—2014《高速铁路设计规范》。上述规范对不同运营速度的线路、路基、轨道、桥涵、隧道和站场的设计技术标准作了规定。

其中,城轨规范和客专规定中桥梁的设计往往由刚度进行控制,但两部规范对于具体的刚度标准存在一定差异。本文将城轨规范与客专规定中关于桥梁的刚度设计标准作简要介绍与对比分析。

1 城轨规范和客专规定适用范围

城轨规范适用于钢轮钢轨制式和跨坐式单轨制式,最高运行速度不超过 120 km/h,且梁式桥跨度不大于 150 m、斜拉桥和拱桥跨度不大于 400 m、结合梁跨度不大于 80 m,桥梁主体结构设计使用年限为 100 a。

尽管城轨规范未对轨道结构形式提出明确建议,但在工程实践中,城市轨道交通桥梁多出出于养护维修工作量的考虑而采用无砟轨道。

客专规定适用于钢轮钢轨制式,且各项规定均适用于有砟轨道。该规范要求本线旅客列车运行速度为 200 ~ 250 km/h,跨线旅客列车运行速度不小于 160 km/h,仅适用于跨度小于 96 m 的桥梁结构,桥梁主要承重结构使用年限为 100 a。

目前,城市轨道交通高架桥主要采用箱形截面梁,近期亦开始采用 U 形截面梁;高架桥跨度通常采用 25 m、35 m、40 m,其中以 30 m 居多,高架桥结构形式采用简支结构和连续结构,其中以简支结构为主。客运专线铁路与此类似,仅在进行桥梁抢修及战备时采用军用梁进行代替,铁路简支梁常用跨度为 24 m 和 32 m,且多选用双线整孔箱形截面梁

或两个并置的单线箱形截面梁。

2 桥梁荷载

城市轨道交通桥梁和客运专线桥梁在设计中均需考虑主力、附加力和特殊荷载,且荷载分类大体相同。表 1 列出了这两类桥梁设计荷载中的共性项,表 2 则列出了这两类桥梁设计荷载中的差异项。

表 1 城市轨道交通桥梁和客运专线桥梁设计荷载中的共性项

荷载分类	城市轨道交通桥梁	客运专线桥梁
主力	结构自重	
	附属设备和附属建筑自重	结构自重
	恒载	
	预加应力	预加应力
	混凝土收缩及徐变影响	混凝土收缩和徐变的影响
	基础变位的影响	基础变位的影响
	土压力	土压力
	静水压力及浮力	静水压力及浮力
	列车竖向静活载	列车竖向静活载
	列车竖向动力作用	列车竖向动力作用
活载	列车离心力	列车离心力
	列车横向摇摆力	列车横向摇摆力
	列车竖向静活载产生的土压力	列车竖向活载产生的土压力
	公路或城市桥梁活载	公路竖向静活载(需要时)
	无缝线路纵向水平力	长钢轨纵向力
附加力	制动力或牵引力	制动力或牵引力
	风力	风力
	温度影响力	温度变化的影响
	流水压力	流水压力
特殊荷载	无缝线路断轨力	长钢轨断轨力
	船只或汽车的撞击力	船只或排筏的撞击力、汽车撞击力
	地震力	地震力
	施工临时荷载	施工荷载
	列车脱轨荷载	列车脱轨荷载

表 2 城市轨道交通桥梁和客运专线桥梁设计荷载中的差异项

荷载分类	城市轨道交通桥梁	客运专线桥梁
主力(活载)	人群荷载	无
附加力	救援、检修列车荷载、顶梁荷载	冰压力、冻胀力
特殊荷载	列车脱轨水平撞击力	

刚度标准决定桥梁主要设计参数的选取。两部规范中由刚度要求对应的荷载组合相同,其中列车竖向静活载是多项取值的基准,因此有必要对两部规范中的静活载取值加以对比。在城轨规范中,列车竖向静活载图式按本线列车的最大轴重、轴距及初期、近期和远期中最长的列车编组确定,并按

实际列车编组进行加载。常见的城市轨道交通 A、B、C 型车活载图式见城轨规范^[2]。

在客专规定中,列车竖向活载采用 ZK(中国客运)活载^[3],其标准图式见客专规定。将其与城轨荷载对比可知,以城市轨道交通常见的 6 辆编组、A 型车为例,在对应于列车长度的 136.8 m 范围内,城市轨道交通桥梁的活载总重为 3 840 kN,而客运专线桥梁的活载总重为 9 145.6 kN。如按常见的 32 m 简支梁考虑,则城市轨道交通桥梁的活载总重为 1 120 kN,客运专线桥梁的活载总重为 2 438.4 kN。由此可见,两种情况下客运专线桥梁活载均为城市轨道交通桥梁活载的 2 倍以上。

3 桥梁刚度要求

3.1 竖向挠度

根据城轨规范,由列车竖向静活载引起的竖向挠度需要满足表 3 中规定的限值要求。

表 3 列车静活载作用下的城市轨道交通桥梁竖向挠度限值

项目	L/m	竖向挠度允许值
梁式桥	≤30	L/2 000
	30 < · ≤60	L/1 500
	60 < · ≤80	L/1 200
	>80	L/1 000
拱桥		桥梁 1/4 跨度处上下挠度绝对值之和不大干计算跨度的 1/800
斜拉桥		①列车静活载产生的竖向挠度不大干计算跨度的 1/600;②列车静活载与公路静活载同时作用下,竖向挠度不大干计算跨度的 1/500

注:L 代表桥梁跨度

根据客专规定,在 ZK 活载静力作用下,桥梁梁体的竖向挠度限值如表 4 所示。此外,计算拱桥和刚架桥的竖向挠度时,除考虑 ZK 活载外,尚应计入温度变形的影响,此时需按下列情况之不利者取值:①ZK 静活载挠度与 0.5 倍温度变形引起的挠度值之和;②0.63 倍静活载挠度与全部温度变形引起的挠度值之和。同时竖向挠度需满足表 4 所列限值的要求。

表 4 ZK 活载静力作用下的客运专线桥梁梁体竖向挠度限值

L/m	竖向挠度限值/mm	
	单跨	多跨
≤24	L/1 300	L/1 800
24 < · ≤40	L/1 000	L/1 500
40 < · ≤96	L/1 000	L/1 200

对比两规范的规定可知,客运专线对梁式桥分

别规定了单跨布置和多跨布置条件下的挠度限值,且对温度较为敏感的拱桥和刚架桥,还考虑了温度的不利影响。城市轨道交通桥梁未将温度变形纳入考量,但对拱桥和斜拉桥专门作了挠度限值方面的规定,这样降低了竖向挠度要求,也便于与梁式桥进行区分。以长度为32 m的简支梁为例,客运专线规定 ZK 静活载作用下挠跨比限值为 $L/1\ 500$,城市轨道交通桥梁规定在实际列车作用下挠跨比限值亦为 $L/1\ 500$,但由于活载取值的差异性,使得客运专线桥梁的实际竖向刚度要求明显高于城市轨道交通桥梁。

3.2 竖向梁端转角

城轨规范规定,在列车静活载作用下,有砟轨道桥梁梁体单端竖向转角不应大于 $5‰$,无砟轨道桥梁梁体单端转角不应大于 $3‰$;当无砟轨道桥梁梁体单端竖向转角大于 $2‰$ 时,应检算梁端处轨道扣件的上拔力。客专规定则要求在 ZK 静活载作用下,有砟轨道梁端竖向转角不应大于 $2‰$,无砟轨道梁端竖向转角不应大于 $1‰$ 。

为分析竖向梁端转角对列车行车性能的影响,采用地铁 B 型车进行了竖向线动力分析,其中轮轨采用赫兹非线性弹性接触理论,并允许跳轨。车辆模型共 10 个自由度,且包涵车体和前后转向架的沉浮和点头以及轮对的沉浮等车辆振动型式。为避免实际桥梁刚度与规范限值的差异,采用连续布置的正弦波作为不平顺输入以表征桥梁变形的影响,波长范围为 30~40 m,幅值按照表 3 确定。当车速为 120 km/h,得到车辆响应结果列于表 5。

表 5 连续布置的正弦波不平顺对应的地铁列车动力响应			
正弦波长/m	幅值/mm	车体加速度/(m/s^2)	轮重减载率
30	15.000	0.978	0.280
32	21.333	1.346	0.309
34	22.667	1.380	0.375
36	24.000	1.390	0.406
38	25.333	1.372	0.396
40	26.667	1.329	0.371

由表 5 可知,最不利波长为 36 m。在此不平顺的基础上,通过叠加竖向梁端转角引起的附加不平顺,来考察由基础沉降和跨中下挠、梁端上翘引起的转角不平顺。竖向梁端转角范围为 $3‰\sim9‰$ 。计算得到的地铁列车动力响应如表 6 所示。

由表 6 可知,竖向梁端转角主要影响轮重减载率,对车体加速度影响不大。如以车体加速度达到的 $1.5\ m/s^2$ 为舒适度限值,则梁端转角允许达到

表 6 正弦波不平顺叠加梁端转角对应的地铁列车动力响应

项目	竖向梁端 转角/ $‰$	车体加速度/ (m/s^2)	减载率
由沉降引起的 竖向梁端转角	3	1.431	0.406
	4	1.453	0.406
	5	1.475	0.448
	6	1.498	0.513
	7	1.520	0.579
	8	1.543	0.643
	9	1.566	0.709
由均布荷载引 起的竖向梁端 转角	3	1.424	0.406
	4	1.435	0.406
	5	1.451	0.437
	6	1.471	0.498
	7	1.490	0.558
	8	1.510	0.620
	9	1.529	0.680

$6‰$;如以轮重减载率 0.60 作为安全性标准,则梁端转角允许达到 $7.5‰$ 。另一个影响梁端转角限值的因素是梁端区域的无砟轨道扣件上拔力。根据北京地铁现场防爬试验和多年列车运营经验可知,当一组扣件的扣压力大于 12 kN 时方能防止钢轨爬行。对采用 WJ-7 型扣件的无砟轨道,当扣件间距为 0.629 m、转角为 $1‰$ 时,得到扣件上拔力为 3.49 kN、下压力为 9.86 kN^[4],因此要求无砟轨道梁端转角不超过 $3‰$,且在超过 $2‰$ 后就应检算扣件上拔力。有砟轨道虽未对扣件上拔力设限,但从保证梁缝处道床的稳定性和满足乘坐舒适度要求的角度而言,要求梁端转角不超过 $5‰$ 。

与城市轨道交通相比,客运专线桥梁对梁端转角的限值显得更为严格。其中,有砟轨道梁端转角限值主要参考德国 DIN-101 标准中的相关规定,并综合考虑设计活载、动力系数和温差影响等方面的差异,最终规定 ZK 静活载作用下梁端转角不应大于 $2‰$ 。无砟轨道梁端转角限值参考 DS 804.5401《桥上无砟轨道的基本原则和一般要求》中“伸缩缝两侧钢轨支点的竖向错位不应超过 1 mm”的规定以及扣件上拔力的限制。经计算,最不利情况下由错台 1 mm 引起的梁端转角为 $1.6‰$;ZK 静活载作用下梁端竖向转角不大于 $1‰$ 且梁端悬出长度不大于 0.75 m 时,梁端钢轨支点可满足扣压力为 12 kN 的小阻力扣件受力要求。考虑一定安全余量后,以 $1.0‰$ 作为无砟轨道梁端竖向折角的限值。

3.3 梁体扭转

城轨规范规定,在计入动力系数的列车活载作用下,由桥跨结构整体扭转产生的梁体同一横断面

上两根钢轨的竖向变形差不应大于 6 mm;在列车静活载作用下,由沿梁纵向 3 m 长范围内局部翘曲变形引起的两根钢轨的竖向相对变形量不应大于 4.5 mm。客专规定则要求在 ZK 活载作用下,3 m 长线路基准范围内两根钢轨的竖向相对变形量不应大于 1.5 mm。尽管两部规范在梁体扭转限值上存在差异,但由于客专规定仅适用于双线且跨度不大于 96 m 的桥式结构,因此梁体扭转限值通常不控制客运专线桥梁设计;另一方面,部分抗扭刚度较小的大跨度城市轨道交通桥梁,如拱桥、斜拉桥和悬索桥,在风场作用下可能会出现扭转超限的情况,因此需进行相应检算。

3.4 横向水平挠度

城市轨道交通桥梁和客运专线桥梁均要求在列车横向摇摆力、离心力、风力和温度力作用下,桥跨结构梁体的横向水平挠度不宜大于计算跨度的 1/4 000。其中,城轨规范规定,列车横向摇摆力按相邻两节车 4 个轴轴重的 15% 计,若按地铁 A 型车计算,列车横向摇摆力为 96 kN;客专规定中,列车横向摇摆力为 100 kN。由此可知,两部规范中列车横向摇摆力相差很小,因此针对横向水平挠度,两部规范要求基本一致。

3.5 墩台横向刚度

城轨规范规定了最不利荷载作用下桥墩的横向刚度。当 $L \geq 5$ m 时,墩顶横向水平位移 $\leq 4\sqrt{L}$;当 $L < 5$ m 时,梁缝处水平转角不大于 2.5‰。

根据客专规定,客运专线桥梁在 ZK 活载、横向摇摆力、离心力、风力和温度力的作用下,由墩顶横向水平位移引起的桥面处梁端水平转角不大于 1.0‰。此项规定与德国规范对于 160 km/h 以上车速的墩台刚度标准相当,主要目的是保证高速行驶时的列车安全性和旅客乘坐舒适度。当 L 处于 32 m 以下时,1‰的水平转角基本相当于 $3\sqrt{L}$;当 L 为 40~56 m 时,1‰的水平转角相当于 $4\sqrt{L}$;当 L 为 80~96 m 时,1‰的水平转角相当于 $5\sqrt{L}$ 。由此可认为两规范对墩台横向刚度的要求大致相当。

3.6 车桥耦合振动分析

城轨规范规定,针对 L 大于 100 m 的桥梁,应按照实际运营列车进行车-桥或风-车-桥耦合振动分析,客专规定则要求对设计桥梁均按实际运营列车进行车-桥耦合动力响应分析。两部规范对列车走行安全性和乘坐舒适性的要求基本相同,在实际计

算过程中,对桥面振动加速度的限值亦相同。

3.7 徐变上拱

城轨规范规定, L 不大于 50 m、铺设无砟轨道的预应力混凝土梁后期徐变变形量不大于 10 mm,当 L 大于 50 m 时,则后期徐变变形量不大于 $L/5\ 000$ 。客专规定要求常用跨度的简支梁铺轨后徐变上拱值不大于 20 mm(有砟轨道)或 10 mm(无砟轨道)。两部规范针对混凝土梁徐变变形的限值相当,目的都是为了保证轨面的平顺性。

3.8 自振频率

城轨规范未对桥梁结构的竖向自振频率加以限制,而客专规定为避免桥梁激烈振动,以及保证高速行车安全,对竖向自振频率规定了限值。

4 结论

(1) 城轨规范和客专规定在车辆活载、动力响应以及乘客乘坐舒适度等方面的差异是造成两部规范对桥梁刚度要求不同的主要原因。

(2) 城轨规范适用于跨度不大于 400 m 的梁式桥、拱桥和斜拉桥,并分别针对这 3 种桥式规定了静活载作用下的竖向挠度限值。客专规定适用于跨度不大于 96 m 的梁式桥,在规定竖向挠度限值时,除静活载外还考虑了温度变形的影响。两部规范在车辆活载、动力响应以及乘客乘坐舒适度等方面存在的差异,使得客运专线桥梁的实际竖向刚度要求明显高于城市轨道交通桥梁。

(3) 城市轨道交通桥梁和客运专线桥梁均需满足竖向梁端转角限值要求。对有砟轨道梁端转角加以限制的目的是保证梁缝处道床的稳定性和满足乘坐舒适度要求,对无砟轨道梁端转角加以限制的目的是保证扣件上拔力。其中针对客运专线桥梁的要求相对更为严格。

(4) 城轨规范和客专规定均对梁体扭转进行了限制,且两部规范的具体限值不同。但客运专线梁体扭转往往不控制设计,而城市轨道交通则在部分大跨度桥梁上需据此确定抗扭刚度。

(5) 结构横向刚度的限值均需考虑梁体水平挠度、墩顶水平位移等因素,且两部规范对该限值的要求基本相当。

(6) 两部规范对墩顶水平挠度、徐变上拱等刚度指标限值的要求基本一致。

(7) 总体而言,铁路运输因其高密度、大运量、

(下转第 131 页)

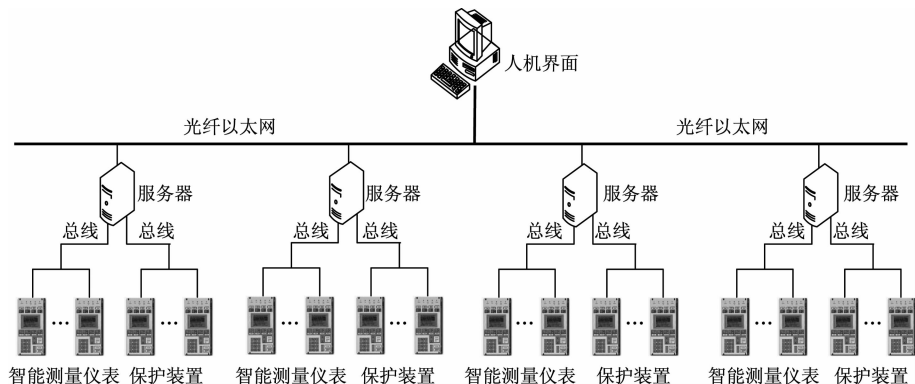


图5 SCADA系统结构图

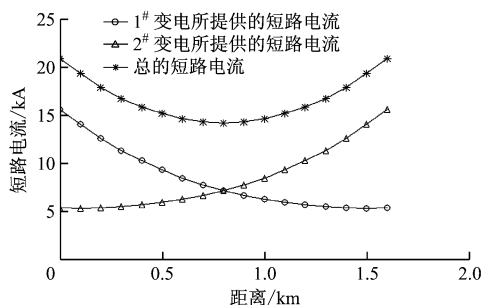


图6 牵引变电所直流侧稳态短路仿真计算结果

电流值出现在相邻变电所附近,为5.312 kA。

3 结语

利用笔者开发的 PSSC 2016 V 1.0. Net 软件,对黄帝陵观光线的牵引供电系统的关键参数进行了仿真计算。依据仿真结果及工程特点,提出了合

(上接第74页)

全天候运营的要求,对运行计划和运输秩序要求极高,且随着客运专线里程的迅猛增长,少维修乃至免维修日益成为铁路养护维修部门的迫切需要,因此铁路桥梁的设计长期以来采取了相对较高的标准。通过与城市轨道交通桥梁设计标准进行对比,并结合桥梁长期使用性能的监测结果,发现铁路桥梁部分刚度控制标准仍存在优化空间,今后应加强这一方面的研究。

参考文献

[1] 智研咨询集团. 2016—2022 年中国城市公交行业发展态势及

理的方案,完成了黄帝陵观光线牵引供电系统各部分的初步设计。对于今后国内景区观光线供电系统的设计有较好的借鉴意义。

参考文献

- [1] 陈厚文. 山地森林景区旅游观光轨道交通发展研究[J]. 交通科技, 2013(1):72.
- [2] 负虎. 观光列车的分类与特点[J]. 铁道车辆, 2015(8):38.
- [3] 冯帅. 对齿轨铁路在旅游观光铁路上的适用性分析[J]. 交通企业管理, 2015(1):66.
- [4] 戴建龙. 环长白山旅游产业开行观光小火车可行性及主要技术特征探讨[J]. 铁道建筑技术, 2013(1):1.
- [5] 王会丰, 江志忠. 城市轨道交通牵引供电制式的比较与选择[J]. 铁道经济研究, 2014(2):43.

(收稿日期:2018-05-20)

投资战略咨询报告[R]. 北京:智研咨询集团, 2016.

- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 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.
- [3] 中华人民共和国铁道部. 新建时速200~250公里客运专线铁路设计暂行规定: 铁建设[2005]140号[S]. 北京:中国铁道出版社, 2005.
- [4] 魏亚辉, 徐鹤寿, 牛斌. 梁端无砟轨道扣件力学行为室内试验研究和数值仿真分析[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(6):43.

(收稿日期:2018-01-29)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao. umt1998. com