

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2022.04.048

# 城市轨道交通桥梁墩台纵向线刚度限值问题的研究

应伯宣

(上海申通地铁公司, 上海 201103)

**摘要:** 阐述了轨道桥梁梁轨相互作用的一些概念、研究现状以及存在的问题。对城市轨道交通桥梁墩台最小纵向刚度的限值的制定的依据、演变以及铁路桥梁的一些区别做了分析比较,对公轨合建桥梁中公路车辆制动力对轨道结构的作用机理做了计算与分析。最后,对地铁规范中的轨道交通桥梁墩台纵向刚度限值条文合理值提出了看法与建议。

**关键词:** 墩台刚度,梁轨相互作用,轨道桥梁,钢轨附加应力

**中图分类号:** U44

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-7716(2022)04-0173-05

## 1 轨道交通桥梁墩台纵向线刚度限值的原理与制定

### 1.1 墩台纵向刚度限值的原理

轨道交通桥梁墩台纵向线刚度限值是轨道桥梁设计中的一个重要参数,制定桥梁墩台纵向刚度的限值主要因为桥上线路存在较大的钢轨附加应力。和路基上的轨道结构不同,桥上的钢轨除了承受长钢轨锁定时的温度应力和列车通过时产生的动弯应力外,还要承受由于列车制动、梁体伸缩以及梁体挠曲产生的附加力,如果附加应力太大,钢轨就会产生强度和稳定问题,影响线路的稳定性和列车运营安全。

制动附加力是作用在钢轨面上的纵向水平荷载,它一部份作用在钢轨上,使钢轨产生制动附加应力,一部份则通过梁轨之间的相互作用,将剩余部分的制动纵向力通过梁体传递到支座至墩台。墩台的纵向线刚度越大,传到墩台的制动力也越大,从而留在钢轨中的制动附加应力也越小。

伸缩附加力是梁体因温度变化伸长或缩短与长钢轨之间产生的相互作用,轨道纵向位移产生阻力对梁的温度位移产生约束,致使高架结构上钢轨受到伸缩附加力。

温度伸缩附加力大小也和墩台纵向刚度有关,墩台纵向刚度越小,伸缩附加力越小,反之伸缩附加力越大。

挠曲附加力是指因列车荷载作用下,桥梁挠曲使桥面与轨道之间发生相对位移而产生的作用力。钢轨挠曲附加力在列车荷载作用位置出现峰值,与制动附加力和伸缩附加力相比,数值较小。

从以上分析可见,桥上线路的钢轨附加力和桥梁墩台的线刚度密切相关,制定桥梁墩台线刚度的最小限值的目的是为了防止桥上无缝线路的钢轨产生过大的附加应力,导致钢轨产生强度问题或失去稳定性。墩台刚度限值大小直接影响墩台、基础结构的设计和工程造价。限值过严,势必增加工程造价,影响景观的设计;限值太松,则可能由于附加应力的增加导致致使钢轨总应力超过的容许使用应力,因此合理的制定轨道桥梁墩台的线刚度,是轨道桥梁设计规范中一个重要研究课题。

### 1.2 规范制定限值条文的制定和演变

我国对轨道桥梁与无缝线路纵向作用力相互作用的研究始于20世纪90年代,铁道科学研究院率先对其开展研究<sup>[1]</sup>,其研究的成果纳入了《时速350公里新建铁路桥隧设计暂行规范》的无缝线路桥梁墩台纵向刚度限值的条文,这是我国无缝线路桥梁墩台纵向线刚度限值的最早规范条文(简称暂行规范),但早期的墩台线刚度限值的制定太严,给设计人员带来不少困难。随着梁轨相互作用研究的深入,在2017年颁布的《铁路桥涵设计规范》(TB 10002—2017)中,分别制定了客货共线和高速铁路、城际铁路、重载铁路的桥梁的墩台线刚度限值,不同规范和不同类型铁路的高架线路墩台纵向线刚度的设计限值,见表1。

比较表1可以看出,对于相同跨度的桥梁、高速铁路和客货共线铁路的墩与台,纵向线刚度最小限值

收稿日期: 2022-01-12

作者简介: 应伯宣(1966—),男,硕士,高级工程师,从事科技与信息管理工作。

表1 不同类型铁路墩台纵向刚度限值

桥墩或 桥台	跨度 /m	墩台最小水平刚度/(kN·cm <sup>-1</sup> )					
		暂行规范		客货共线和高速铁路		城际铁路	
		双线	单线	双线	单线	双线	单线
桥墩	≤12	120	45	100	50	75	45
	16	200	75	160	80	120	75
	20	240	90	190	85	145	90
	24	300	130	270	135	210	130
	32	400	165	350	175	265	165
	40	700	255	550	275	415	255
	48	1 000	350	720	360	550	350
桥台		3 000	1 500	3 000	1 500	3 000	1 500

要比城际铁路的限值大,两者之间存在比例关系,也就是在相同跨度桥梁情况下,城际铁路墩台顶纵向线刚度的限值是客货共线、高速铁路的0.75倍,这个比值也是城际铁路列车的设计荷载与高速铁路列车设计荷载的比值。城际铁路桥梁设计规范认为桥上无缝线路附加应力中,制动附加应力占主要部分,而列车制动力与其荷载成正比,所以墩台纵向线刚度也按同比例放宽。虽然,这样处理考虑的还不是很全面,但使用下来也没出现什么问题。城市轨道交通对桥梁墩台刚度设计限值规定基本上是借鉴铁路部门早期的研究成果,《地铁设计规范》(GB 50157—2013)桥墩墩顶纵向水平线刚度规定如表2所示,它基本上就是铁道部《时速350公里新建铁路线桥隧设计暂行规范》中相关条文的内容,比现在实行的高速铁路、客货混运铁路、以及城际铁路的规范的相应条文都要严得多,这对需要考虑景观的城市轨道高架建筑来说,显然是要求太过严格。

表2 《地铁设计规范》桥墩墩顶纵向水平线刚度(双线)

跨度 L/m	双线最小水平刚度/(kN·cm <sup>-1</sup> )	备注
L ≤ 20	240	不设钢轨伸缩调节器
20 < L ≤ 30	320	不设钢轨伸缩调节器
30 < L ≤ 40	400	不设钢轨伸缩调节器

## 2 桥梁墩台纵向线刚度合理限值分析

从以上分析可以看出,城市轨道交通桥梁在墩台纵向刚度限值的参数制定时,主要是参考铁路部门早期的研究成果所制定的条文,它没有反映城市轨道交通的特点。鉴于目前轨道桥梁梁轨相互作用的研究进展和城市轨道交通和铁路两者之间的差异,结合对城市轨道交通桥梁墩台纵向刚度限值合理值的制定做一些探讨。

### 2.1 梁轨相互作用研究的现状和存在的主要问题

欧洲国际铁路联盟(UIC)是较早开展梁轨相互

作用研究的单位,我国是20世纪90年代高速铁路建设的八五国家科技攻关课题中首先开始了该项内容的研究,随后,铁科院、西南交大、北京交大、同济大学、中南大学都相继开展了研究。目前的研究大都集中在理论分析方面。早期的研究采用的是解析法,如1962年,前苏联学者鲍列耶夫柯提出一种计算桥上无缝线路的纵向附加力的解析法,分析了制动力作用下桥上钢轨附加力,1974年,捷克斯洛伐克的Fryba运用梁轨间阻力系数的概念分析计算简支梁桥钢轨附加伸缩力<sup>[2-3]</sup>。到了20世纪90年代,随着有限元和计算机的技术飞快发展和广泛应用,数值计算方法基本上取了解析法,从那时起,基本上都是采用梁单元的有限元计算模型进行梁轨相互作用的分析,由于有限元法的广泛的适用性,分析的桥型也从简支梁桥延伸到连续梁、拱桥、斜拉桥。近二十多年来国内外学者对梁轨作用的研究主要集中在计算模型、温度和制动附加力的作用机理、钢轨位移阻力系数的本构关系、结构各参数对钢轨附加力以及梁轨相对位移的影响规律等问题上,取得不少成果,并根据所获得的认识,制定了轨道桥梁纵向刚度设计时最小限值的规范条文。

当前梁轨相互作用研究虽然已经取得了不少成果,但研究的方法基本都是局限在理论分析范围之内,尽管在梁轨位移阻力系数方面的研究进行过一些实验室内的简化模型实验验证工作,但在梁轨相互作用的钢轨附加力现场测试方面试验验证的工作做的极少,一方面是试验需要较大的经费,另一方面还需要科研、运营和养护部门相互配合和协调。如果在运营线上进行试验,还要受运营时间和安全考虑的约束。缺乏试验验证的理论研究终究是不完善的,尤其是理论分析中尚存在一些不明确或模糊认识时,实验显得尤为重要,这是今后梁轨相互作用研究需要开展的重要工作。

### 2.2 城市轨道交通桥梁墩台合理限值的分析

目前我国城市轨道交通桥梁设计规范中墩台纵向设计刚度最小限值的制定,都是沿用铁路设计规范的相应条文,这种做法没有考虑铁路和城市轨道交通的不同点,存在着要求过严的问题。桥上钢轨的附加应力主要由制动附加应力、温度附加应力以及挠曲附加应力组成,对于温度附加应力,只要在同一地域,铁路和城市轨道交通没有什么大的区别,但对于制动附加应力来说,由于城市轨道交通车辆的轴重要比大铁路小,而且列车编组车辆数也要比大铁



路编组的车辆数少,如果不考虑铁路列车和城轨列车的制动力率的差异(地铁列车制动率稍大一些,但差别不大),根据制动力公式:

$$T=W \cdot \theta$$

式中: $T$ 为最大轨面制动力; $W$ 为列车重量。

城市轨道交通列车的制动作用力要比铁路小得多,所以在城市轨道交通桥上钢轨制动附加应力相应也要小得多。同理,挠曲附加力也是和车辆荷载大小成正比,所以城市轨道交通桥梁的挠曲附加力也是比铁路桥梁小。可见,从定性分析来看,城市轨道交通桥梁墩台纵向设计刚度最小限值应该比铁路设计规范相应条文规定的限值小。至于定量上如何制定城市轨道交通桥梁墩台纵向刚度最小的合理限值,这是一项很有意义的课题,城市轨道交通建设部门应该对此开展深入的研究,根据城市轨道交通特点,制定出适合的桥梁墩台合理纵向刚度的限值。

从已有的理论分析成果<sup>[4,5]</sup>来看,即使铁路桥墩纵向线刚度最小限值也有很大缩小空间,只是目前计算成果缺乏试验数据的验证,所以纵向刚度参数制定时偏于谨慎,留有较大的安全裕度。城市轨道交通桥梁除了满足使用功能外,还需特别注意景观问题。如果墩台最小纵向刚度限制过严,势必对景观设计和投资造成不良的影响。建议城市轨道交通桥梁墩台纵向设计刚度限值应该大幅度地放松,给设计人员提供更大的设计选择空间。

### 2.3 当前梁轨相互作用需要研究的问题

本节讨论目前城市轨道交通桥梁梁轨相互作用需要研究的一些问题,这些问题有的是需要进一步深入研究,有的是目前尚未涉及但有待于研究的问题,有的不仅只是城市轨道交通桥梁和所有轨道交通桥梁所共同需要解决的问题。

#### 2.3.1 桥上钢轨温度附加力计算

梁轨相互作用的计算理论来看,制动作用引起的桥上钢轨附加力计算力学概念相对清晰,计算成果可信度较高,但温度附加力的计算,尽管做了很多的研究,其相互作用机理还不是很清晰,比如由于梁体结构温度场分布的非线性性,需要研究非线性温度场环境下的梁轨相互作用以及如何等效成线性温度场的计算方法以及等效温度场中温差合理取值等,而这些研究都未系统全面开展,个别零星的研究并没有形成明确的结论。梁轨温度变化下的相互作用是个非常缓慢的过程,钢轨位移阻力系

数能否和制动作用下梁轨的位移阻力曲线相同,它有何特征?这些问题也鲜有研究成果发表,在认识上还是空白。

#### 2.3.2 曲线桥梁的梁轨相互作用机理

城市轨道交通线路弯道多,曲线半径小,曲线桥上梁轨相互作用于曲线桥梁墩台的关系目前研究较少,显然曲线梁桥墩台纵向刚度限值和直线梁桥是不同的,现有轨道桥梁对曲、直桥梁的墩台纵向刚度要求不加区分,或者曲线梁也沿用直线桥梁的规定,这是明显不合理的做法,需要对曲线梁桥梁轨相互作用的机理开展研究。

#### 2.3.3 大跨度桥梁设置轨缝伸缩器的合理跨度

轨缝伸缩器是释放桥上钢轨附加力的一个有效的构造措施。已有的理论计算表明,桥梁的跨度越大,其钢轨附加应力也越大,因此,大跨度桥梁往往在桥梁两端要设置轨缝伸缩器以释放过大的钢轨附加力,但轨缝伸缩器造价高,对列车通过车速和乘坐舒适度有不利的影响。因此尽可能准确确定大跨度桥梁轨缝伸缩器设置的跨度阈值对节省工程造价和确保列车运营安全都有重要意义。200-300 m 跨度是大跨度桥梁中最常见的跨度,在这个跨度范围内是否需要设置轨缝伸缩装置曾出现过争议,结果是有的桥梁不设置出现了钢轨应力超限现象,有的则安然无恙节省了投资,可见符合实际情况的精确分析方法是十分需要的,它对工程建设具有重要的指导作用。

#### 2.3.4 梁轨相互作用的试验验证

我国开展梁轨相互作用的研究已经有二十多年的历史,所做的研究基本上都是局限于理论分析范围和少量的试验室内的缩尺模型试验,很少见到有一定规模的现场的试验。由于梁轨相互作用理论分析存在着一定不确定性,因此试验验证工作显得尤其重要。从试验内容来看钢轨制动和挠曲附加力的试验测试比较容易实现,但温度附加力的试验就有一定难度,主要的困难是它的不是短时的效应,而是一个缓慢长时间的作用过程。

#### 2.3.5 公轨合建桥梁墩台纵向线刚度限值的问题

公轨合建桥梁在城市交通建设中比较多见,它的桥面比单一轨道交通桥梁桥面要宽的多,公轨合建桥梁承受公路、轨道车辆的两种荷载,两类车辆的制动力对钢轨附加力如何作用、合建桥梁的桥墩台纵向刚度限值如何确定这是新的研究课题。本文在下一章节对该问题做一些初步的探讨分析。

### 3 公轨合建桥梁车辆制动力传递机理分析

公、轨合建桥梁由于具有缓解城市建设用地紧张、节省建设资金等优点,在城市交通建设中得到广泛的采用,近年来全国各地城市已建设了不少公、轨合建桥梁。

对于钢轨温度附加力,由于它和车辆荷载无关,所以轨道桥梁和公、轨合建桥梁没有什么区别,但对制动力引起的钢轨附加力,由于公、轨合建桥梁由于增加了道路车辆的荷载,还须考虑它对钢轨纵向附加应力的作用,这是公、轨合建桥梁设计中应该关注的问题。

同济大学桥梁系与上海城建设计研究院曾对公轨合建桥梁道路车辆制动对钢轨纵向附加力的影响以及温度附加力作用进行了计算分析<sup>[6]</sup>。计算的桥跨结构为3孔空心板梁的简支梁,跨度20 m,桥面宽29 m,公路双向4车道、双线轨道。公路荷载参照《公路桥涵通用设计规范》I级汽车车道荷载,其制动力按车道荷载10%计,总计为660 kN,集中作用在跨中道路桥面;双线轨道交通车辆制动力为440 kN,均匀作用于轨面上,如图1所示。

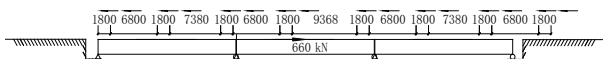


图1 制动荷载加载工况示意图(单位:mm)

根据无缝线路规范,计算公、轨合建桥梁轨道温度附加力时,梁轨温差取为30℃。

计算得到的钢轨温度和制动附加应力图2所示。

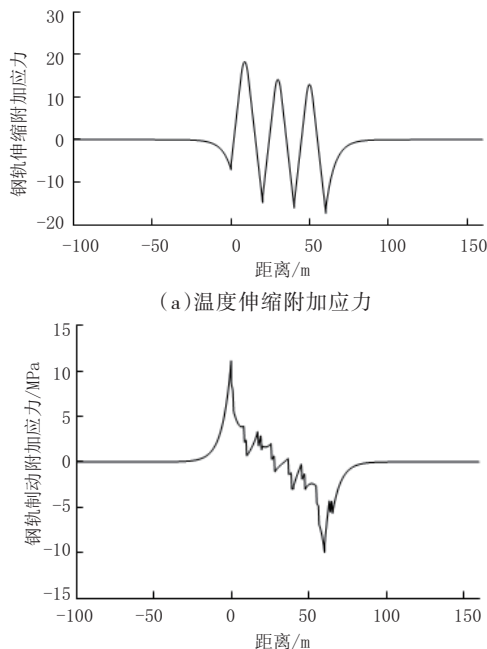


图2 钢轨附加应力图

从图2可以看出,钢轨温度伸缩附加应力在各桥跨两端及跨中出现应力峰值,桥梁首跨靠近跨中一侧出现最大拉应力18.33 MPa,在末端桥梁支座附近出现最大压应力-17.28 MPa;

由于桥梁跨径较小,轨道交通车辆加载长度64.828 m大于桥跨总长,钢轨制动附加应力在简支梁与路基相接处出现峰值,左侧固定支座附近出现最大压应力-11.92 MPa,末跨活动支座附近出现最大拉应力12.92 MPa。

为分析公路制动荷载对轨道交通钢轨附加力作用的影响,进行了仅考虑轨轨道交通制动荷载单独作用和公路荷载和轨道交通考荷载制动共同作用的分析比较,计算获得钢轨附加应力如表3所示。

表3 两种作用荷载下钢轨制动附加应力的比较

作用荷载	温度应力 /MPa	制动纵向附加应力 /MPa	温度纵向附加应力 /MPa
道路与轨道交通荷载共同作用	100	12.92/-11.92	18.33/-17.28
轨道交通单独作用	100	11.98/-10.92	18.33/-17.28

从表3可知,考虑公路荷载和有轨电车荷载共同制动时,钢轨中产生的制动附加应力值较仅考虑轨道交通荷载的情况稍大一点,但是从数值来说相差较小,只相差约1 MPa。

虽然公路荷载的制动力比轨道交通的制动力大,但是其对梁轨相互作用的影响却很小,这是因为两者的传力路径不同的原因所致。公路制动荷载的加载点是位于主梁上,由主梁再传给钢轨,由于梁跨结构的纵向刚度远大于钢轨的纵向刚度,按照刚度分配原则,公路车辆的制动力主要由梁跨结构承担,钢轨承受的制动力的比例非常小,见图3(a)。而轨道制动荷载是直接作用于钢轨,再由钢轨通过扣件传给梁跨,见图3(b),由于传力路径不同,所以钢轨承受的制动附加力的比例相对要大一些。

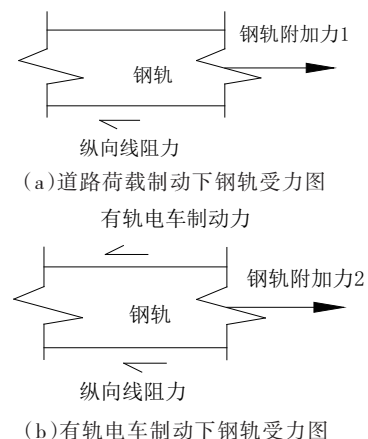


图3 不同制动荷载作用下钢轨附加力受力图

可见,对于公轨合建桥梁,我们只需考虑轨道荷载制动作用在钢轨中产生的附加应力,不必考虑公路车辆制动力对钢轨附加应力的影响。对于公轨合建的桥梁结构,可以按轨道桥梁设计规范中的墩台纵向刚度设计限值考虑就可以了,由于公轨合建桥梁墩台横向宽度较宽,一般情况下都是能满足要求的。

#### 4 结 语

本文首先阐述了轨道桥梁梁轨相互作用的一些概念、研究现状以及存在的问题,接着对城市轨道交通桥梁墩台最小纵向刚度的限值的制定的由来以及和铁路桥梁一些区别做了分析比较,然后提出了当前轨道桥梁梁轨相互作用迫切需要解决的几个问题,并对共轨合建桥梁中公路车辆制动力的传递机理做了初步研究分析,结果表明公轨合建桥梁中公路车辆的制动力对轨道的钢轨附加应力影响很小,可以不必考虑。

城市轨道交通桥梁墩台纵向刚度限值参数对桥

梁下部结构设计关系重大,它影响桥梁墩台设计时的基础刚度和墩柱的尺寸,也影响到桥梁造价和景观设计的选择空间,因此是轨道交通桥梁设计中的一个重要设计参数。合理、科学地制定该设计参数,对今后轨道交通工程建设经济和景观都具有重要的意义。从本文的分析和以及研究结果来看,城市轨道交通墩台纵向刚度限至太严,有较大放松空间,希望有关部门重视该问题的研究和论证,提高我国轨道交通桥梁建设的技术水平。

#### 参考文献:

- [1] 铁道部科学研究院铁道建筑研究所.高速铁路线桥隧设计参数选择的研究报告[R].北京:铁道部科学研究院铁道建筑研究所,1995.
- [2] 鲍列耶夫柯.铁路桥梁承受制动力的问题[M].桥梁丛译,1964.
- [3] Fryba L. Thermal Interaction Of Long Welded Rails With Railway Bridges[J]. Rail International, 1985(16).
- [4] 马坤全,沈钱斌,蒋鹏,等.城市轨道交通高架桥无缝线路梁轨相互作用研究[J].城市轨道交通研究,2008,11(8):25-29.
- [5] 马战国,王红,郝有生.城市铁路桥梁墩台线刚度限值研究[J].铁道建筑,2003(1):5.
- [6] 罗雪珍.现代有轨电车桥梁梁轨相互作用研究[D].同济大学桥梁工程系,2018.



## 《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: [cdq@smedi.com](mailto:cdq@smedi.com)