

市域铁路梁式桥跨结构设计参数研究^{*}朱永兵¹ 王法武¹ 吴定俊²

(1. 中铁上海设计院集团有限公司, 200070, 上海; 2. 同济大学土木工程学院, 200092, 上海)

摘 要 [目的] TB 10624—2020《市域(郊)铁路设计规范》在编制的过程中,沿用了 GB 50157—2013《地铁设计规范》和 TB 10623—2014《城际铁路设计规范》的大部分内容。为了验证 TB 10624—2020 中梁式桥跨结构的挠跨比、自振频率及动力系数等设计参数制定的合理性,需对其进行深入研究。[方法]根据市域铁路与其他类型铁路在桥梁设计标准上的差异,基于车桥耦合动力仿真的理论计算,分析了市域铁路梁式桥跨结构的挠跨比、自振频率和动力系数的合理设计限值。[结果及结论]由于荷载的差异,市域铁路梁式桥跨结构挠度设计限值不宜沿用 TB 10623—2014 中的规定,需制定满足市域铁路自身的刚度的设计标准;提出了适合市域铁路梁式桥跨结构的自振频率设计限值;市域铁路桥梁采用 TB 10002—2017《铁路桥涵设计规范》中客货混运铁路桥梁的动力系数是合理的,且有一定的安全保证。

关键词 市域铁路;梁式桥跨结构;设计参数

中图分类号 U442.5:U239.5

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.03.029

Study on Design Parameters of Girder Bridge Span Structure in City Railway

ZHU Yongbing¹, WANG Fawu¹, WU Dingjun²

(1. China Railway Shanghai Design Institute Group Corporation Limited, 200070, Shanghai, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, 200092, Shanghai, China)

Abstract [Objective] The compiling of TB 10624—2020 *Urban (Suburban) Railway Design Code* follows most of the content of GB 50157—2013 *Subway Design Code* and TB 10623—2014 *Intercity Railway Design Code*. In order to verify the reasonability of the design parameters of girder bridge span structure in TB 10624—2020, such as deflection-span ratio, natural vibration frequency and dynamic factor, further research is needed. [Method] According to the differences in bridge design codes between city railway and other types of railways, the reasonable design limits of deflection-span ratio, natural frequency and dynamic factor of city railway girder bridge span structure are analyzed on the basis of the theoretical calculation of train-bridge coupling dynamic simulation method. [Result

& Conclusion] Due to the train load differences, the deflection design limits for girder bridge span structure in city railway should not follow TB 10623—2014 and the design standard that meets the rigidity requirement of city railway itself should be formulated. The natural frequency design limit applicable to the girder bridge span structure of city railway is proposed. The dynamic coefficient of city railway bridge following that of mixed passenger/freight transport railway bridge in TB 10002—2017 *Code for Design of Railway Bridges and Culverts* is reasonable and has certain safety guarantee.

Key words city railway; girder bridge span structure; design parameter

市域铁路是一种介于地铁、轻轨和城际铁路之间的城区与郊区的轨道交通,设计速度一般为 100 ~ 160 km/h。为了满足建设需要,国家铁路局制订和颁布了 TB 10624—2020《市域(郊)铁路设计规范》。该规范沿用了 GB 50157—2013《地铁设计规范》和 TB 10623—2014《城际铁路设计规范》的大部分内容。本文根据 T/SHJX 002—2018《上海市域铁路设计规范(试行)》编写前立项课题的研究,结合市域铁路桥梁设计的工作经验,对 TB 10624—2020 中梁式桥跨结构的设计参数进行了研究。

1 梁式桥跨结构竖向变形设计限值

1.1 梁式桥跨结构竖向变形设计限值制定的主要依据

为保证城市轨道交通列车运行的平稳性,减少列车对桥梁的冲击作用,桥梁设计必须保证一定的刚度。桥梁结构变形限值为梁式桥跨结构在列车设计静活载作用下的跨中挠度容许值,主要反映了梁式桥跨结构的静刚度的大小。该变形限值不是动力参数,但其取值对梁式桥跨结构的动力性能有一定的影响。

刚度是结构产生单位变形时所需的力。梁式桥

^{*} 国家自然科学基金项目(51878501)

跨结构的刚度限值,采用了柔度的概念,即考虑梁式桥跨结构在设计列车荷载下所产生的挠度限值,通常将该限值表示为挠度与跨度之比,即挠跨比限值。由于桥梁的刚度和柔度互为倒数,因此各国桥梁都以挠跨比来表示梁式桥跨结构的刚度限值。

确定梁式桥跨结构挠度限值的主要依据是列车过桥时乘客的舒适度^[1]。梁式桥跨结构刚度越大,桥梁变形越小,列车过桥运行越平稳,乘客的舒适度越高。此外,乘客的舒适度还和列车的过桥速度、车辆的动力性能、梁式桥跨结构的跨度,以及轨面的平顺性有关。因此,可根据设计时所确定运营列车的车辆、设计速度及线路等级,通过车桥动力仿真计算或实测来分析列车通过不同刚度桥梁时的车体加速度时程响应,获得乘客的舒适度,从而确定相应的桥梁挠度限值。乘客舒适度的评判与所采用的评判标准和所要求的舒适度等级有关。目前,评判乘客舒适度的主要标准或指标有 ISO 2631-1:1997《机械振动和冲击—人体承受全身振动

评价—第 1 部分:一般要求》、Spering (见 GB 5599—1985《铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范》)、Janeway^[2]等,评判等级分为优秀、良好、合格及不合格,也有其他评判标准将其分为合格与不合格两个等级,采用不同评判标准和不同等级要求所得到的梁式桥跨结构挠度限值是不同的。

1.2 梁式桥跨结构挠跨比设计限值对比分析

表 1 为各规范中梁式桥跨结构的挠跨比设计限值。表 2 为各规范中梁式桥跨结构的当量挠跨比设计限值。由于不同规范中列车荷载设计值差异较大,直接对比各本规范中梁式桥跨结构的挠跨比设计限值不能得到该结构刚度的差异,但将其转换成当量挠跨比就可以得到梁式桥跨结构的刚度。所谓的当量挠跨比,指的是根据各本规范中列车设计荷载获得满足其相应挠跨比设计限值的桥梁刚度。利用 GB 50157—2013 中的设计荷载重新计算对应桥梁刚度下的挠跨比,即可得到当量挠跨比。

表 1 各规范中梁式桥跨结构的挠跨比设计限值

Tab.1 Deflection-span ratio design limits of girder bridge span structure in national specifications												
跨度/ m	文献[3]				文献[4]		TB 10624—2020		TB 10623—2014		GB 50157—2013	
	设计速度/ (km/h)	挠跨比设计限值			设计速度/ (km/h)	挠跨比设计 限值	设计速度/ (km/h)	挠跨比设计 限值	设计速度/ (km/h)	挠跨比设计 限值	设计速度/ (km/h)	挠跨比设计 限值
		优秀	良好	合格								
20	120	1/850	1/650	1/425	130	1/900	120	1/1 607	120	1/1 607	100	1/2 000
	140	1/950	1/730	1/475	160	1/1 100	160	1/1 904	160	1/1 904		
30	120	1/700	1/540	1/350	130	1/900	120	1/1 607	120	1/1 607	100	1/2 000
	140	1/950	1/730	1/475	160	1/1 100	160	1/1 904	160	1/1 904		
40	120	1/600	1/460	1/300	130	1/900	120	1/1 607	120	1/1 607	100	1/1 500
	140	1/750	1/580	1/375	160	1/1 100	160	1/1 904	160	1/1 904		

注:表中的挠跨比设计限值均为单线线路。

表 2 各规范中梁式桥跨结构的当量挠跨比设计限值

Tab.2 Equivalent deflection-span ratio design limits of girder bridge span structure in national specifications												
跨度/ m	文献[3]				文献[4]		TB 10624—2020		TB 10623—2014		GB 50157—2013	
	设计速度/ (km/h)	当量挠跨比设计限值			设计速度/ (km/h)	当量挠跨比设计限值	设计速度/ (km/h)	当量挠跨比设计限值	设计速度/ (km/h)	当量挠跨比设计限值	设计速度/ (km/h)	当量挠跨比设计限值
		优秀	良好	合格								
20	120	1/2 429	1/1 868	1/1 215	130	1/1 067	120	1/1 398	120	1/2 475	100	1/2 000
	140	1/2 715	1/2 088	1/1 358	160	1/1 305	160	1/1 656	160	1/2 932		
30	120	1/2 386	1/1 835	1/1 193	130	1/1 058	120	1/1 961	120	1/3 487	100	1/2 000
	140	1/3 239	1/2 492	1/1 620	160	1/1 291	160	1/2 323	160	1/4 132		
40	120	1/2 032	1/1 563	1/1 016	130	1/1 161	120	1/1 864	120	1/3 294	100	1/1 500
	140	1/2 540	1/1 954	1/1 270	160	1/1 419	160	1/2 209	160	1/3 903		

桥梁结构的当量挠跨比直接反映了各规范中桥梁刚度设计值的大小。由于挠跨比设计限值与设计速度相关,在设计速度差异较大情况下的桥梁结构当量挠跨比不具有可比性。表 1 仅列出了设计速度为 100 ~ 200 km/h 范围内的梁式桥跨结构挠跨比设计限值。

从表 1 中可以看出:

1) 文献[4]中桥梁结构当量挠跨比设计限值与文献[3]中对应的乘客舒适度为合格条件下的桥梁结构当量挠跨比设计限值较为接近,即日本城市轨道交通桥梁刚度设计值要求相对较低。文献[4]制定挠跨比的依据是满足 Janeway 舒适度等级 $J = 1.5$ 的要求,其对应的最大车体加速度为 2.0 m/s^2 ,这与文献[3]中乘客舒适度等级为合格对应的最大车体加速度是一致的。

2) TB 10623—2014 中桥梁结构的当量挠跨比设计限值比文献[3]中的乘客舒适度为优秀条件下的桥梁结构当量挠跨比设计限值要求要严格,这表明该规范中桥梁刚度设计值较大,此处考虑了城际铁路设计速度较高的情况。而 GB 50157—2013 中桥梁结构当量挠跨比设计限值接近文献[3]中舒适度为良好条件下的当量挠跨比,但比文献[4]中的桥梁结构当量挠跨比的限值要严格。由于城市轨道交通设计速度相对较低,因此从乘客舒适度控制角度来看,城市轨道交通桥梁结构刚度设计值相对较大。

3) 我国市域铁路桥梁结构当量挠跨比和城际铁路当量挠跨比相比,在车速相差不大的情况下,挠跨比限值的比值相差接近 1 倍,即市域铁路桥梁的刚度限值大约是城际铁路的 1/2。此差别非常明显,以下对该问题作更加详细的分析。

1.3 TB 10624—2020 中挠度设计限值存在的问题

TB 10624—2020 中桥梁结构的挠度设计限值完全沿用 TB 10623—2014 中的相应条文,但未考虑市域铁路和城际铁路之间的差异。城际铁路的车辆选型与高速铁路相近,而市域铁路的车辆选型与城市轨道交通相近。不同类型车辆的动力性能、轴重及荷载分布不同,因此乘客的舒适度对桥梁刚度的要求亦存在差别,且较大的差别是城际铁路列车活载设计值要比市域铁路大很多。

图 1 和图 2 为市域铁路和城际铁路列车设计活载图式^[5]。由图 1 和图 2 可以看出:市域铁路的列车荷载设计值与实际运营的列车非常接近,其中,

集中荷载的大小及其分布代表相邻 2 节车辆间 2 个相邻转向架的 4 个轴重的大小和分布,均布荷载为车辆的均布荷载;城际铁路的荷载为概化荷载,其加载图式与文献[4]相同,其大小为文献[4]中荷载的 0.6 倍,这与实际运营列车荷载在大小及分布方面都有较大差异。

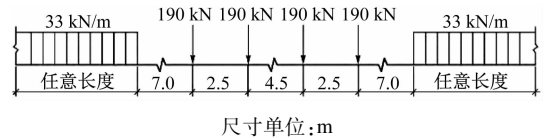


图 1 市域铁路列车设计活载图示

Fig. 1 Illustration of mobile load design for city railway train

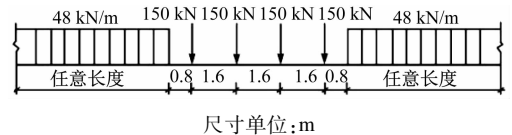


图 2 城际铁路列车设计活载图示

Fig. 2 Illustration of mobile load design for intercity railway train

计算表明:跨度为 20 ~ 40 m 范围内时,在相同刚度下,城际铁路列车静活载作用下的简支梁跨中最大挠度效应约为市域铁路的 2 倍,即市域铁路桥梁结构的抗弯刚度仅需为城际铁路梁桥结构的 1/2 就能满足条文中的挠度设计限值要求。因此,市域铁路和城际铁路桥梁结构采用相同的挠度设计限值,则市域铁路桥梁结构刚度设计限值相对城际铁路较低,其值约为城际铁路桥梁结构刚度设计限值的 1/2。由于桥梁结构刚度减少较为显著,其竖向自振频率相应也将有较大减小。而桥梁结构竖向自振频率是影响车桥耦合振动的重要参数,对车辆过桥舒适度和桥梁振动剧烈程度都有较大影响。因此,市域铁路桥梁结构刚度设计值不宜沿用 TB 10623—2014 的相应规定,应根据市域铁路的实际车桥条件,分析列车过桥动力响应和乘客舒适度,制定反映市域铁路桥梁自身特点的合理刚度限值。

2 梁式桥跨结构自振频率设计限值

2.1 梁式桥跨结构自振频率设计限值制定的目的

铁路桥梁比公路桥梁更容易产生共振,这是因为铁路桥梁运营的是编组列车。这是一种轴重排列具有规律性的系列荷载,因此容易在一段持续时间内形成具有相对稳定频率作用的激振荷载。当该激振荷载和桥梁自振频率接近时,会引起列车和

桥梁共振。而公路桥梁上运营车辆的多样性以及轴重排列的随机性,不太容易形成稳定的加载频率,因此也就不大容易发生共振。早期铁路桥梁设计规范对梁式桥跨结构设计无频率限值要求,但由于运营车速较低,桥梁结构在满足刚度和强度的条件下,列车激振频率一般均远小于其自振频率而不会产生共振现象。城际铁路、高速铁路由于运营车速大幅提高,列车激振频率也随之增大,因此 TB 10621—2014《高速铁路》、TB 10623—2014 中均考虑了梁式桥跨结构自振基频最小限值的要求,以保证列车激振频率和桥梁的基频保持一定的差值,避免列车通过时桥梁发生较大振动。

目前 GB 50157—2013 和 TB 10624—2020 中均未考虑梁式桥跨结构自振频率设计限值的要求。有一种观点认为,地铁、市域铁路设计速度较低,只要保证刚度要求,不必进行自振频率最小限值检算,但这对市域铁路是不合适的。市域铁路的设计速度为 160 km/h,某些市域铁路的设计速度达到 200 km/h。市域铁路是一种设计速度远高于城市轨道交通且接近城际铁路的轨道交通。市域铁路中列车对桥梁产生的激振频率更接近一般桥梁的自振频率,有可能导致桥梁产生的振动加剧。桥梁结构刚度检算不能代替自振频率检算。刚度是静力学中的参数,是抗静力变形的能力。虽然刚度和结构的自振特性的频率具有相关性,但目前针对桥梁结构刚度和自振频率关系的影响规律研究还不够,制定桥梁结构刚度限值时也未考虑其对动力的影响作用,因此刚度限值检算不能取代自振频率限值检算。特别是 TB 10624—2020 中关于桥梁结构刚度限值的条文还不是很成熟的情况下,应当添加梁式桥跨结构自振频率设计限值的条文,以确保市域铁路桥梁运营时的良好动力性能。

2.2 梁式桥跨结构自振频率的确定方法

关于市域铁路梁式桥跨结构自振频率的限值,中铁上海设计院集团有限公司在编制 T/SHJX 002—2018《上海市域铁路设计规范(试行)》时,与同济大学土木工程学院桥梁系合作对常用跨度简支梁的自振频率限值进行了理论分析。首先确定各常见跨度简支梁的最大容许动力系数 Φ_{\max} ,根据 Φ_{\max} 确定相应梁式桥跨结构的最小自振频率。 Φ 的计算公式为:

$$E_{\text{设计}}(1 + \mu) > E_{\text{运营}}\Phi \quad (1)$$

式中:

$E_{\text{设计}}$ 、 $E_{\text{运营}}$ ——表示设计荷载、实际运营荷载的静载效应,一般常采用跨中挠度;

$1 + \mu$ ——动力系数设计值,根据 TB 10624—2020 条文说明给定的动力系数计算公式取值;

Φ ——不同跨度、不同截面梁式桥跨结构在实际运营荷载下的动力系数容许值。

$E_{\text{设计}}$ 、 $1 + \mu$ 及 $E_{\text{运营}}$ 对于已确定的跨度、刚度、设计荷载,以及 T/SHJX 002—2018 而言,其值都是已知的,而 Φ 可从式(1)中求出。对于同一跨度桥梁, Φ 值随桥梁的刚度、设计速度等参数的变化而变化。 Φ_{\max} 为该跨度下梁式桥跨结构的动力系数最大容许值。在保证 $\Phi < \Phi_{\max}$ 的前提下,根据车桥动力仿真分析可以得到不同跨度下梁式桥跨结构的基频下限值。

2.3 梁式桥跨结构自振频率的最小限值

根据上述分析思路,采用市域铁路 D 型车进行计算,得到市域铁路荷载作用下,简支梁桥跨结构自振频率下限值与跨度的关系^[6]:

$$f_{0,c} = 112.23L^{-1.031} \quad (2)$$

式中:

L ——桥梁的计算跨长,单位 m, $16 \text{ m} \leq L \leq 48 \text{ m}$;

$f_{0,c}$ ——梁式桥跨结构竖向基频限值,单位 Hz。

式(2)中的 $f_{0,c}$ 与文献[4]中的梁式桥跨结构自振频率下限值 $f_{0,JP} = 55L^{-0.8}$ 比较接近; $f_{0,c}$ 与 EN 1990 中的 $f_{0,EN}$ 相比,当跨度小于 30 m 时, $f_{0,c}$ 比 $f_{0,EN}$ 大;当跨度在 30 ~ 40 m 范围内时, f_0 与 $f_{0,EN}$ 相当;当跨度大于 40 m 时, $f_{0,c}$ 比 $f_{0,EN}$ 小。究其原因为我国市域铁路 D 型车的车速、轴重、轴距,以及车长和定距与日本轨道交通车辆均较为接近。

图 3 为各规范下市域铁路梁式桥跨结构自振频率下限值对比曲线。

3 梁式桥跨结构的动力系数

目前 TB 10624—2020 中桥梁动力系数采用的是客货混跑铁路桥梁的动力系数计算表达式,其中钢筋混凝土桥跨结构的动力系数为:

$$1 + \mu = 1 + \alpha \left(\frac{6}{30 + L} \right) \quad (3)$$

式中:

α ——系数。

式(3)在我国客货混跑铁路上已经沿用了几十年,它是根据早期蒸汽机车通过常用跨度简支梁桥

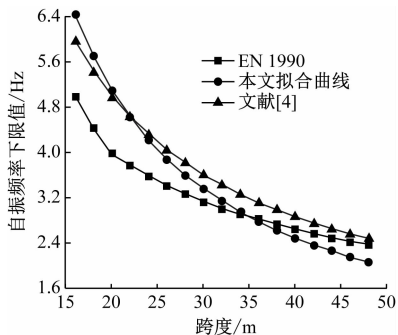


图3 各规范下市域铁路梁式桥跨结构自振频率下限值对比曲线

Fig. 3 Comparison of lower limit curves for natural frequency of beam bridge span structure in city railway under different specifications

实测的动力系数经过统计分析而得出的经验公式。如今内燃机车和电力机车已经完全取代了蒸汽机车,设计速度提高了,轴重和轴距也改变了,但该公式仍在沿用。式(3)将动力系数表示为跨度的函数,未反映设计速度、梁式桥跨结构自振频率和刚度,以及轨面平顺度对车桥动力作用的影响,但应用方便简单,基本上能包络住当前客货混跑列车过桥的动力放大作用影响的区域。

动力系数制定的主要目的是考虑桥梁强度检算时列车荷载的动力放大作用。通常将规定的列车静活载效应设计值乘以动力系数来考虑其动力放大作用。我国客货混跑、城际铁路及高速铁路的列车荷载设计值均为概化荷载,其值均比实际运营列车大得多。根据式(1), Φ 可以相当大,比直接采用现场实测数据或车桥动力仿真计算数据要大得多。因此,将现场实测和车桥动力仿真计算数据作为制定规范中的动力系数的依据也不是很合理,究其原因设计荷载和实际运营荷载有较大差别。城市轨道交通和市域铁路的列车设计荷载与实际运营列车的荷载较为接近,因此,其现场实测资料和车桥动力仿真计算数据可作为制定其动力系数的重要依据。

活载作用下简支梁动力系数-跨度关系曲线,见图4。由图4可见:当列车运行速度不超过160 km/h时,不同列车运行速度下梁式桥跨结构的动力系数基本均在式(3)所表示的曲线范围内。这说明TB 10624—2020采用TB 10002.1—2005《铁路桥涵设计基本规范》中客货混运动力系数的计算公式是安全的,也是合理的。

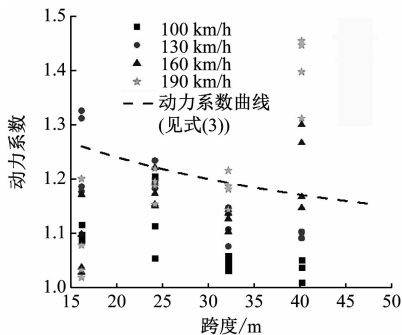


图4 活载作用下简支梁动力系数-跨度关系曲线

Fig. 4 Curve of dynamic factor and span relation of simply supported beam under mobile load

4 结语

市域铁路是近年来城市发展中的一种新的轨道交通模式,目前我国不少城市都在开展或规划市域铁路的建设。设计规范是行业技术水平和经验积累的结晶,对工程建设具有重要的指导作用。但设计规范的编制从来不是一蹴而就的,需要在使用过程中发现问题、解决问题及逐步完善。本文的研究成果可为市域铁路梁式桥跨结构设计参数的研究提供参考。

参考文献

- [1] 松浦章夫. 新干线铁路桥梁竖向允许挠度[J]. 铁道技术研究报告, 1974, 31(10):445.
MATSUURA Akio. Vertical allowable deflection of the shinkansen railway bridge[J]. Railway Technology Research Report, 1974, 31(10):445.
- [2] JANWAY R N. Vehicle vibration limit to fit the passenger[J]. SAE, 1948, 12: 48.
- [3] CENELEC. Eurocode: Basis of structural design; EN 1990[S]. Brussels: CENELEC, 1990.
- [4] 日本铁道综合技术研究所. 铁道结构物设计标准及解说——混凝土构造物[S]. 东京:丸善株式会社,2004.
Railway Technical Research Institute, Japan. Design code and explanation of railway structure—concrete structure[S]. Tokyo: Maruzen Co., Ltd., 2004.
- [5] 国家铁路局. 铁路列车荷载图示:TB/T 3466—2016[S]. 北京:中国铁道出版社,2016.
National Railway Administration of the People's Republic of China. Code for train load diagrams: TB/T 3466—2016[S]. Beijing:China Railway Publishing House, 2016.
- [6] 中铁上海设计院集团有限公司. 上海市市域铁路梁跨结构动力性能设计参数和刚度合理限值研究报告[R]. 上海:中铁上海设计院集团有限公司,2022.

(下转第176页)

liability modeling method of low-voltage switchgear based on competitive failure [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40 (21): 7094.

- [5] 赵书涛, 王波, 华回春, 等. 基于马尔科夫模型的直流断路器可靠性评估方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34 (增刊 1): 126.

ZHAO Shutao, WANG Bo, HUA Huichun, et al. Reliability evaluation method of DC circuit breaker based on Markov model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34 (S1): 126.

- [6] 李海英, 冯冬, 宋建成. 中压真空断路器状态的雷达图法评

估模型[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 2053.

LI Haiying, FENG Dong, SONG Jiancheng. Condition-based assessment model of MV vacuum circuit breaker with radar chart method[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 2053.

- 收稿日期:2023-08-09 修回日期:2023-11-20 出版日期:2024-03-10
Received:2023-08-09 Revised:2023-11-20 Published:2024-03-10
· 通信作者:郭德龙,高级工程师, gdl2088@126.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 164 页)

China Railway Shanghai Design Institute Group Corporation Limited. Research report on reasonable design value of dynamic parameter and reasonable stiffness for shanghai suburban railway beam bridge[R]. Shanghai: China Railway Shanghai Design Institute Group Corporation Limited, 2022.

- [7] 张军. 高速铁路简支梁动力系数影响因素分析及合理取值研究[D]. 长沙:中南大学, 2012.

ZHANG Jun. Study on influencing factors and suggestive value for high-speed railway simple supported beam bridge[D]. Changsha: Central South University, 2012.

- [8] 胡所亭, 王丽, 蔡超勋. 铁路桥梁设计动力系数研究进展

[J]. 铁道建筑, 2019, 59(12): 1.

HU Suoting, WANG Li, CAI Chaoxun. Research progress on dynamic coefficient of railway bridge design[J]. Railway Engineering, 2019, 59(12): 1.

- 收稿日期:2023-03-16 修回日期:2023-05-20 出版日期:2024-03-10
Received:2023-03-16 Revised:2023-05-20 Published:2024-03-10
· 第一作者:朱永兵,高级工程师, zhuyb@sty.sh.cn
通信作者:吴定俊,教授, Tjwdj@tongji.edu.cn
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 170 页)

- [5] 江伟, 黄玉萍. 一种智能挡板防淹系统设计[J]. 广东交通职业技术学院学报, 2020, 19(4): 21.

JIANG Wei, HUANG Yuping. A Kind of Smart Damper Flood Prevention System Design[J]. Journal of Guangdong Communication Polytechnic, 2020, 19(4): 21.

- [6] 曾国保, 王聪, 姚建华. 城市轨道交通防洪工程建设思路探讨[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(4): 89.

ZENG Guobao, WANG Cong, YAO Jianhua. Discussion on flood control project construction of urban rail transit[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2022, 39(4): 89.

- [7] 郑建春. 地铁车辆基地出入段线内涝灾害数据采集与模拟分析: 以北京易涝地铁车辆基地为例[J]. 安全, 2022, 43 (7): 1.

ZHENG Jianchun. Data acquisition and simulation analysis of waterlogging disaster in inlet/outlet line of subway vehicle base taking subway vehicle bases prone to waterlogging in Beijing[J]. Safety, 2022, 43(7): 1.

- [8] 邵鹏飞, 赵燕伟, 杨明霞. 城市内涝监测预警信息系统研究[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(2): 49.

SHAO Pengfei, ZHAO Yanwei, YANG Mingxia. Research on ur-

ban waterlogging monitoring and pre-warning system[J]. Computer Measurement & Control, 2016, 24(2): 49.

- [9] 秦兆明. 水利工程河道防洪堤光纤式智能监测研究[J]. 水利技术监督, 2022, 30(6): 60.

QIN Zhaoming. Study on optical fiber intelligent monitoring of river flood dike in water conservancy project[J]. Technical Supervision in Water Resources, 2022, 30(6): 60.

- [10] 吴建松, 许声弟, 张辉. 城市地下空间水灾试验与数值模拟研究综述[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(9): 1.

WU Jiansong, XU Shengdi, ZHANG Hui. A review of experimental and numerical simulation studies on flooding in urban underground spaces[J]. China Safety Science Journal, 2016, 26 (9): 1.

- 收稿日期:2023-09-01 修回日期:2023-11-25 出版日期:2024-03-10
Received:2023-09-01 Revised:2023-11-25 Published:2024-03-10
· 作者:胡立翔,高级工程师, 670740975@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728 转 821