

文章编号: 1674—8247(2021)01—0075—05
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.01.016

铁路矮塔斜拉 T 构桥结构设计方法实例研究

黄 毅 刘 伟 胡玉珠

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要:本文以渝(重庆)黔(黔江)铁路长途河大桥为工程背景,综合考虑桥址地形地质、桥梁跨度、净空及受力特点等要素,提出了主桥采用(132+132)m 的矮塔斜拉 T 构桥型的总体设计方案,并采用数值模拟方法分析了拉索布置范围、索间距对梁部内力、刚度的影响规律。结果表明:(1)斜拉索靠近主塔布置、适当加密索间距有利于减小梁部负弯矩峰值,对梁体受力更为有利;(2)综合考虑拉索对结构受力和梁体刚度的影响,依托工程无索区梁端及塔根无索区分别取为 30 m 和 38 m、索间距按 8 m 设置。最后,通过开展斜拉索对矮塔斜拉 T 构桥结构受力影响的分析,探讨了矮塔斜拉 T 构桥型的适用性。

关键词:铁路桥梁;矮塔斜拉 T 构;数值计算;结构设计;适用性

中图分类号:U442.5 文献标志码:A

Case Study on Structural Design Method of Railway Short Tower Cable-stayed T-shaped Bridge

HUANG Yi LIU Wei HU Yuzhu

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: This paper takes Changtu River Bridge of Chongqing-Qianjiang Railway as a case, advances a scheme of short tower cable-stayed T-bridge with (132+132)m girder considering the topographical and geological conditions of the bridge site, bridge span, clearance, and mechanical characteristics, and analyzes the influence of cable arrangement range and cable spacing on the internal force and stiffness of the girder by numerical simulation. The results show that: (1) the arrangement of stay cables close to the main tower and the appropriately reduced cable spacing is beneficial to reduce the peak value of negative bending moment at the girder, which is more beneficial to the stress of the girder; (2) considering the influence of cables on structural stress and girder stiffness, the cable-free zone at the girder end and tower root of the supporting project is 30 m and 38 m respectively, and the cable spacing is set at 8 m. Finally, the applicability of the short tower cable-stayed T-shaped bridge is discussed by analyzing the influence of cable on the stress of the short tower cable-stayed T-shaped bridge.

Key words: railway bridge; short tower cable-stayed T-structure; numerical calculation; structural design; applicability

矮塔斜拉桥是一种采用斜拉索进行体外加劲的混凝土梁桥,通常认为该种桥型是介于预应力混凝土连续梁桥和预应力混凝土斜拉桥之间的一种组合体系桥

型,具有塔矮、梁刚、索集中的结构特点^[1]。1988 年,法国设计师 Jacques Mathivat 正式提出了矮塔斜拉桥的概念,并指出该类桥型的受力特点:以主梁为主要承

收稿日期:2020-08-09

作者简介:黄毅(1984-),男,高级工程师。

引文格式:黄毅,刘伟,胡玉珠.铁路矮塔斜拉 T 构桥结构设计方法实例研究[J].高速铁路技术,2021,12(1):75-79.

HUANG Yi, LIU Wei, HU Yuzhu. Case Study on Structural Design Method of Railway Short Tower Cable-stayed T-shaped Bridge[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(1):75-79.

载结构,分担大部分荷载,斜拉索对主梁起加劲作用且承担一部分荷载,相当于体外预应力索。自此之后,矮塔斜拉桥在世界范围内得到了推广应用。我国于2000年建成首座矮塔斜拉桥——芜湖长江大桥^[2](公铁两用桥)。随后,又相继建成了京沪高铁天津联络线大桥(64.6+115+115+64.6)m^[3]、怀邵衡铁路沅江特大桥(90+180+90)m^[4]、商合杭铁路颍上特大桥(94.2+220+94.2)m^[5]、蒙华铁路汉江特大桥(72.5+116+248+116+72.5)m^[6]等多座矮塔斜拉桥。

上述工程的顺利建成,极大地促进了矮塔斜拉桥设计施工技术的发展,逐步形成了较为完整的综合技术体系。但受工程建设环境等的限制,该类桥梁在设计技术上仍存在一定的个案性特征,实际设计过程中,仍需根据工程的实际条件开展有针对性的设计研究。本文以渝(重庆)黔(黔江)铁路长途河大桥工程为依托,针对矮塔斜拉桥设计过程中存在的梁部无索区长度、索间距等关键性参数的确定问题开展研究,以期进一步丰富该类桥梁的设计方法。

1 工程概况

渝(重庆)黔(黔江)铁路长途河大桥位于重庆市武隆县巷口镇凉水村长途河附近,大桥跨越河谷及两岸道路,线路主要设计技术标准如表1所示。

表1 主要技术标准表

线路等级	客运专线	轨道类型	无砟轨道
正线数目	双线	曲线半径/m	8 000
牵引类型	电力	桥上坡度/‰	-8.5
设计荷载	ZK活载	设计流量(1/100)/(m³/s)	2 590
设计最高速度/(km/h)	350	设计使用年限/a	100

经多方案比选和论证,同时综合考虑桥址地形地质、桥梁跨度、净空及受力特点等影响因素,提出了矮塔斜拉T构桥型的设计方案。

2 总体设计方案

参考类似工程,初步拟定长途河大桥设计方案为:主桥采用(132+132)m预应力混凝土矮塔斜拉T构,塔—墩—梁固结,墩高79m;主墩基础采用直径2.5m钻孔灌注桩,其余桥墩基础采用直径1.50m或1.25m钻孔灌注桩;引桥简支梁采用支架现浇施工。全桥总布置图如图1所示。

2.1 主梁构造

主梁设计为单箱双室变高度直腹板截面,等高段横断面,如图2所示。箱梁顶宽14.1m,箱宽11.3m,

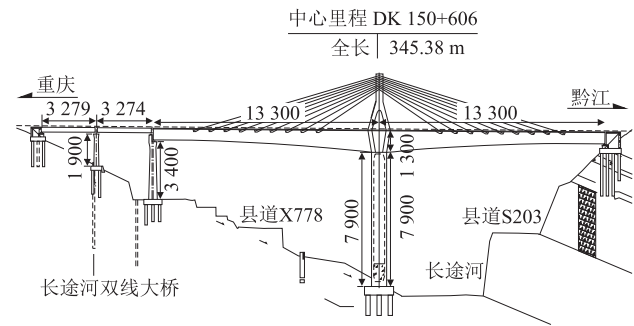


图1 全桥总布置图(cm)

主墩顶支点截面梁高13m,边支点截面高7m,截面高度按二次抛物线变化。箱梁顶板厚42cm,腹板厚40~90cm,底板厚52~110cm。由于塔—梁—墩固结且根据改善局部受力的需要,桥塔位置箱梁底宽两侧各加宽210cm,墩梁固结下腋处和箱体内部设置倒角^[7]。斜拉索与主梁之间采用箱外混凝土齿块锚固,锚固处对应设置箱内横梁。

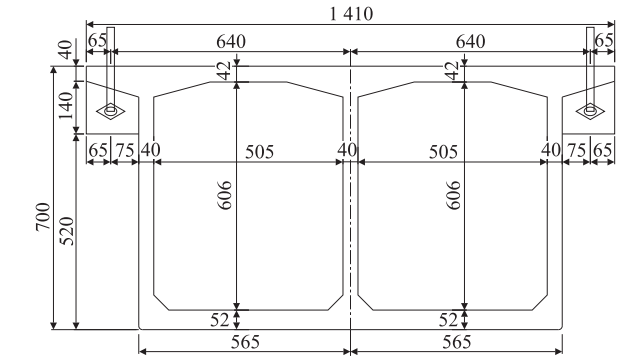


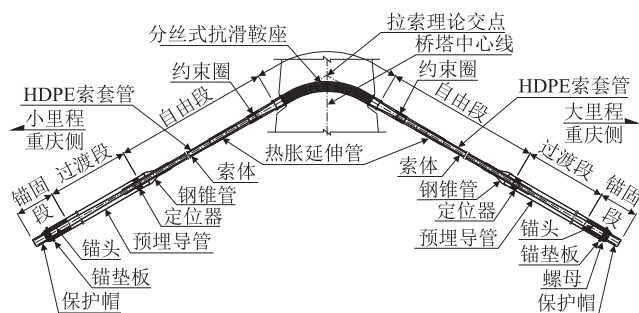
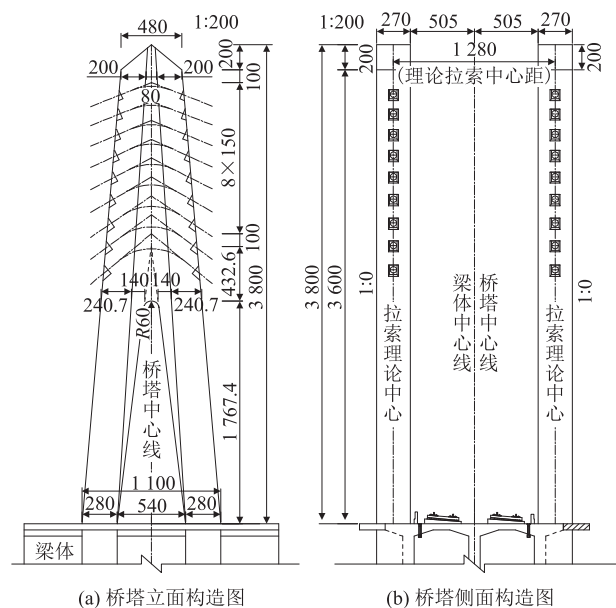
图2 主梁等高段横断面图(cm)

2.2 塔墩构造

本桥墩—梁—塔固结,塔柱纵向为人字形,塔高38m。上塔柱采用矩形实体截面,距离梁顶面17.5m至塔底段顺桥向分肢,单肢截面顺桥向宽2.4~2.8m,横向桥等宽2.7m,构造如图3所示。主墩采用矩形空心墩,墩高79m,墩顶截面尺寸11×15.5m(纵×横),墩身纵向直坡,横向坡比1:25。塔柱采用C50钢筋混凝土,桥墩梁底以下8m范围墩身采用C55钢筋混凝土,其余墩身采用C40钢筋混凝土。

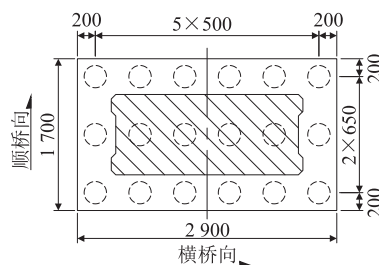
2.3 斜拉索

斜拉索采用61-15.2mm及73-15.2mm的无粘结钢绞线,斜拉索在上塔柱采用分丝式抗滑鞍座穿过^[8]。斜拉索关于索塔对称布置,全桥初拟设计共18对斜拉索,最内侧索距离塔中心38m,索在梁上的纵向间距为8m,在塔上的竖向间距为1.5m,最外侧索的水平夹角为19.8°,如图4所示。



2.4 基础

主墩基础采用 18 根 2.5 m 钻孔灌注桩,按照柱桩设计,行列式布置,桩长 12 m,承台尺寸为(29 × 17 × 5) m,基础布置如图 5 所示。



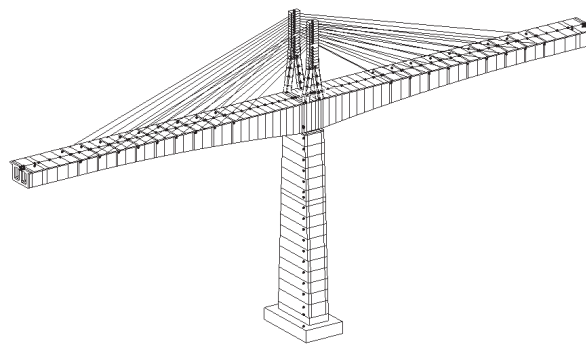
3 斜拉索布置范围及间距优化设计

矮塔斜拉桥与常规预应力混凝土梁桥相比,最大区别就在于斜拉索的体外加劲作用,斜拉索的布置范围、角度等参数直接影响其工作效率及材料用量。因

此在实际设计过程中,需对矮塔斜拉 T 构桥型的无索区长度、索间距两个主要的结构参数进行多工况对比分析,以确定其较优取值。

3.1 计算模型

采用 Midas civil 有限元软件,建立矮塔斜拉 T 构主梁的模型并计算。模型中,主梁按全预应力混凝土结构设计,主梁共分为 127 个单元,其中主梁、塔、墩设置为梁单元,斜拉索采用仅受拉的桁架单元模拟。整体计算模型如图 6 所示。



3.2 斜拉索布置范围

保持梁上索间距($L_2 = 64$ m)不变,调整无索区梁端 L_1 及塔根无索区 L_3 长度(如图7所示),设置3种分析方案:① $L_1 = 36$ m, $L_3 = 32$ m;② $L_1 = 30$ m, $L_3 = 38$ m;③ $L_1 = 24$ m, $L_3 = 44$ m。

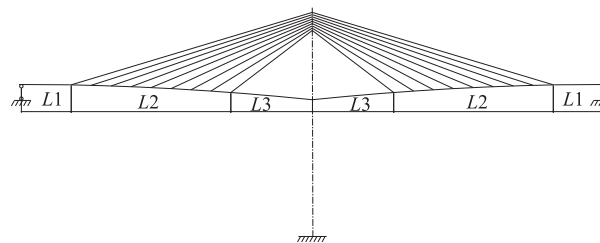


图7 有、无索区参数示意图

采用上述计算模型,分别计算得到不同工况下桥梁结构的刚度、内力变化的情况,如表 2 所示。

表2 无索区长度对比表

方案	方案①	方案②	方案③
梁端转角/ $^{\circ}$	1.03	1.00	0.98
活载挠度/mm	-35.3	-34.2	-33.0
恒载最大弯矩/($\text{kN} \cdot \text{m}$)	127 275	113 644	101 842
恒载最小弯矩/($\text{kN} \cdot \text{m}$)	-2 666 125	-2 821 357	-2 994 893

由表 2 可以看出:

(1)拉索布置越靠近梁端,梁端转角越小,跨中活载挠度也越小。其原因在于梁部为变高度箱梁,越靠

近边支点梁体刚度越小,斜拉索对结构刚度贡献则越大。

(2)对梁部内力,拉索布置越靠近主塔,塔根主梁负弯矩越小,有利于减小中支点梁高,但同时边支点附近无索区正弯矩相应增大,需配置更多的底板预应力钢束。

综上所述,本桥设计为兼顾结构刚度与内力,选择方案②作为设计选型结论,梁端无索区长 30 m,塔根无索区长 38 m。

3.3 梁上索间距

保持斜拉索组数及规格一致,且主塔根部无索区长度不变,对索间距分别为 7 m、8 m、9 m 时进行分析,结果如表 3 所示。

表 3 索间距对比表

方案	索距 7 m	索距 8 m	索距 9 m
梁端转角/‰	1.04	1.00	0.98
活载挠度/mm	-35.7	-34.2	-32.6
恒载最大弯矩/(kN·m)	124 079	113 644	115 394
恒载最小弯矩/(kN·m)	-2 642 718	-2 821 357	-3 011 439

由表 3 可以看出:

(1)索间距越大,梁端转角越小,跨中活载挠度也越小,即增大拉索覆盖梁部范围有利于提高梁体刚度。

(2)对梁部内力而言,索间距越小,主梁塔根处负弯矩越小,边支点无索区正弯矩越大。索间距从 9 m 变至 7 m 时,主梁塔根处负弯矩降低 12.2%,无索区正弯矩增大 7.5%,负弯矩降低效应更显著。适当加密索间距有利于控制 T 构根部梁体负弯矩,降低主梁高度。因此,结合工程实际条件,本桥设计索间距采用 8 m。

4 矮塔斜拉 T 构桥型适应性探讨

对于铁路矮塔斜拉 T 构桥,主梁刚度较大,斜拉索起体外加劲作用。相比于其他同规模的桥型桥式,该类桥型的竞争力在于斜拉索的作用大小。本节通过分析斜拉索对改善梁体结构内力及刚度的贡献,来进一步探讨该桥型的适用性。

4.1 斜拉索对主梁内力的影响

以本工程为例,统计得到典型施工工况下斜拉索对梁部荷载的分摊比例,如表 4 所示。

从表 4 可以看出,主梁施工过程中,结构荷载以恒载为主,斜拉索竖向分力占上部结构总质量的 27% 以上。而在 ZK 活载作用下,由于主梁刚度远大于拉索刚度,斜拉索仅占活载比例的 6.5%。二者叠加后,由于外荷载中恒载比例较大,主力工况下斜拉索对梁部

荷载的分摊占比达 26%。

表 4 主要工况下斜拉索荷载占比表

工况	斜拉索竖向分力/kN	梁部荷载质量/kN	斜拉索荷载占比/%
全桥挂索完毕	57 053	207 495	27.5
最大悬臂	72 155	231 228	31.2
主梁合龙	70 692	245 021	28.9
二恒施工	78 716	288 846	27.3
全桥运营恒载	78 478	288 846	27.2
主力	79 622	306 314	26.0
ZK 活载	2 286	34 934	6.5

注:计算过程中,考虑主梁按悬臂浇筑法施工,各斜拉索在对应节段纵向预应力钢束张拉完成后随即挂索并张拉

4.2 斜拉索对主梁刚度的影响

通过调整斜拉索刚度或梁体高度,分析拉索对主梁刚度的影响,结果如表 5、表 6 所示。

表 5 拉索刚度影响效应表

拉索刚度	拉索 15-55	拉索 15-61	拉索 15-73
梁端转角/‰	1.009	1.006	0.999
活载挠度/mm	-34.3	-34.2	-33.9

表 6 主梁刚度影响效应表

分析工况	梁高 6~12 m		梁高 7~13 m		梁高 8~14 m	
	有索	无索	有索	无索	有索	无索
梁端转角/‰	1.34	1.40	1.00	1.04	0.78	0.8
活载挠度/mm	-44.1	-46.5	-34.1	-35.6	-27.0	-28.1

从表 5、表 6 可以看出:(1)拉索自身刚度变化对主梁刚度影响甚微;(2)成桥运营工况下,斜拉索对梁体刚度的贡献很小,结构刚度主要由主梁提供,梁高对梁体刚度有着决定性作用。

4.3 矮塔斜拉 T 构桥型适应性分析

(1)铁路梁桥上部结构自重较大,采用矮塔斜拉加劲可有效调整结构内力。斜拉索实质作用相当于体外预应力,利用大偏心距的优势充分发挥拉索作用,降低主梁 0 号块负弯矩峰值,从而降低梁高,节省梁部圬工,提高结构的跨越能力。

(2)矮塔斜拉 T 构与矮塔斜拉三跨连续结构受力特点有所不同。

①结构内力方面:从外部边界条件看,T 构桥型为静定结构,结构荷载决定其内力分布;而三跨连续结构为超静定结构,可通过边跨配跨将恒载下的主跨跨中正弯矩转化为支点负弯矩,充分发挥变高度梁的截面效率。可见,无论是 T 构还是三跨连续结构,均可以通过矮塔斜拉加劲改善梁体弯矩分布,优化钢束配置,降低截面高度。

②结构刚度方面:三跨连续结构通常由主跨控制结构设计,边跨跨度一般为主跨的 0.5~0.7 倍,能有

效降低主跨跨中活载挠度,采用矮塔斜拉加劲亦能有效增加主跨刚度,因此具有较大的跨越能力,桥型适应性更强。而T构两个边跨完全相同,上部结构刚度主要靠梁体自身提供,跨度越大矮塔斜拉加劲效率越低,斜拉索功效显著降低,因此,铁路桥梁采用矮塔斜拉T构不宜将跨度做得过大。

(3)高速铁路桥梁铺设无砟轨道,对静活载作用下梁端转角要求严格(桥台与桥梁之间 $\theta \leq 1\%$,相邻两孔梁之间 $\theta_1 + \theta_2 \leq 2\%$)^[9],采用大跨度T型刚构桥型,容易出现梁端转角控制结构设计的情况,导致转角刚度控制截面梁高,造成梁部材料强度未充分利用。在此情况下再采用矮塔斜拉进行加劲,一是对梁部刚度提高十分有限;二是拉索加劲对梁体内力改善主要体现在降低0号块负弯矩、优化体内束用量方面,其作用功效相对有限。因此,矮塔斜拉T构桥型在无砟轨道桥梁上的适用性相对有限,可采用梁端设置过渡短梁等方式解决转角问题,方能发挥此种桥型的优势。而对梁端转角要求相对宽松的有砟轨道铁路(200 km/h客货共线铁路及城际铁路要求桥台与桥梁之间 $\theta \leq 3\%$,相邻两孔梁之间 $\theta_1 + \theta_2 \leq 6\%$;高速铁路要求桥台与桥梁之间 $\theta \leq 2\%$,相邻两孔梁之间 $\theta_1 + \theta_2 \leq 4\%$)^[10],采用此种桥型能够充分发挥矮塔斜拉加劲改善梁体内力的特点^[11],降低体内预应力钢束用量指标,减小截面高度,以提升结构跨越能力。

5 结论

本文以渝(重庆)黔(黔江)铁路长途河大桥为工程背景,开展了矮塔斜拉T构桥拉索布置范围及索间距对梁体受力及刚度的影响规律分析,探讨了矮塔斜拉T构桥型的适用性,得到以下主要结论:

(1)斜拉索靠近主塔布置、适当加密索间距、提高塔高有利于减小梁部负弯矩峰值。

(2)矮塔斜拉T构桥的斜拉索相当于主梁体外预应力束,其主要作用在于调整结构内力,对结构刚度贡献较小,主梁刚度主要由梁体自身提供。

(3)铁路矮塔斜拉T构桥设计时应综合考虑地形地质、跨度、净空及桥型受力特点等条件,把握好结构刚度与主梁截面强度的平衡点。

(4)矮塔斜拉T构桥结构较适于有砟轨道铁路桥梁。

参考文献:

[1] 陈亨锦,王凯,李承根. 浅谈部分斜拉桥[J]. 桥梁建设, 2002,

(1): 44-47.

CHEN Hengjin, WANG Kai, LI Chenggen. Preliminary Analysis of Partial Cable-Stayed Bridge[J]. Bridge Construction, 2002, (1): 44-47.

[2] 陈进昌,方京,孟庆标. 芜湖长江大桥正桥上部结构设计[J]. 桥梁建设, 2001, (2): 26-30.

CHEN Jinchang, FANG Jing, MENG Qingbiao. The Design of the Superstructure of Wuhu Changjiang River Bridge [J]. Bridge Construction, 2001, (2): 26-30.

[3] 张雷. 京沪高速铁路津沪联络线矮塔斜拉桥设计[J]. 桥梁建设, 2012, 42(4): 69-74.

ZHANG Lei. Design of an Extradosed Bridge on Tianjin-Shanghai Link Line of Beijing-Shanghai High-Speed Railway [J]. Bridge Construction, 2012, 42(4): 69-74.

[4] 宋子威,李喜平,刘智春. 怀邵衡铁路(90+180+90)m矮塔斜拉桥总体设计[J]. 铁道建筑, 2016, (9): 6-9.

SONG Ziwei, LI Xiping, LIU Zhichun. Overall Design of (90+180+90) m Cable-Stayed Bridge with Low Tower on Huaihua-Shaoyang-Hengyang Railway[J]. Railway Engineering, 2016, (9): 6-9.

[5] 季伟强. 高速铁路矮塔斜拉桥主梁局部受力行为分析[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(2): 63-67.

JI Weiqiang. Local Analysis of the Main Girder of High-Speed Railway Low-Pylon Cable-Stayed Bridge [J]. Railway Standard Design, 2017, 61(2): 63-67.

[6] 许三平. 蒙华铁路汉江特大桥总体设计[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(12): 59-63.

XU Sanping. Overall Design of Hanjiang River Super Large Bridge of Mengxi-Central China Railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(12): 59-63.

[7] 杨银庆. 客运专线大跨度T构墩梁固结处优化措施研究[J]. 高速铁路技术, 2016, 7(3): 87-90.

YANG Yinqing. Study on Optimization Measures for Consolidation of Large Span T-Frame Pier Beam on Passenger Dedicated Line [J]. High Speed Railway Technology, 2016, 7(3): 87-90.

[8] 王勇. 怀邵衡铁路矮塔斜拉桥斜拉索施工技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2017 (8): 32-36.

WANG Yong. Research on Construction Technology for Stay Cable of Low Tower Cable-Stayed Bridge on Huaihua-Hengyang Railway[J]. Railway Construction Technology, 2017 (8): 32-36.

[9] TB 10621-2014 高速铁路设计规范[S].

TB 10621-2014 Code for Design of High Speed Railway [S].

[10] TB 10002-2017 铁路桥涵设计规范[S].

TB 10002-2017 Code for Design on Railway Bridge and Culvert [S].

[11] 陈平. 铁路高墩大跨T构矮塔斜拉桥设计研究[J]. 铁道建筑, 2018, 58(12): 26-28.

CHEN Ping. Design and Research of T-Frame Cable-Stayed Bridge Featuring High Piers Long Span and Low Pylons on Railway [J]. Railway Engineering, 2018, 58(12): 26-28.