

文章编号: 1674—8247(2020)04—0060—05  
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2020.04.012

## 近断层地震区铁路钢桁拱桥抗震性能和对策研究

庞 林 曾永平 陈克坚 刘力维 董 俊

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘 要:**为给近断层地震区修建上承式铁路钢桁拱桥提供技术支撑,本文以列衣大桥拱桥方案为研究对象,分析了具有长周期、大脉冲及高竖向分量特性的近场地震动和地震行波效应对钢桁拱桥地震响应的影响规律,并据此开展了减隔震装置设计参数及结构抗震性能优化设计研究。结果表明:(1)相对于按照规范反应谱拟合的远场地震动,具有长周期、大脉冲特性的近断层地震动将显著增大钢桁拱桥的地震响应,可达40%以上,同时竖向与水平向地震峰值加速度比值由0.65增大至1.0倍时,拱顶杆件应力增加46.3MPa;(2)本例中地震行波效应仅对拱顶下弦杆和拱底上弦杆产生不利影响,对其余杆件影响小于10%或小于一致加载结果;(3)优化墩梁之间减隔震装置的设计参数,合理匹配由主梁传递至下部结构的地震力可起到显著的减隔震效果;(4)采取减隔震措施后,拱脚为地震最不利位置,为进一步提高钢桁拱桥的抗震性能,不宜仅增大拱脚构件截面尺寸,在拱脚处灌注混凝土和减小上部结构重量往往可起到更好的效果。

**关键词:**近断层地震区;上承式拱桥;地震响应;减震设计;设防措施

中图分类号:U442.5<sup>+</sup>5 文献标志码:A

60

## Study on Seismic Behavior and Countermeasures of Steel Truss Railway Arch Bridges in Near-fault Seismic Zone

PANG Lin ZENG Yongping CHEN Kejian LIU Liwei DONG Jun

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

**Abstract:** In order to provide technical support for the construction of deck railway steel truss arch bridge in near-fault seismic zone, this paper takes the arch bridge scheme of Lieyi Bridge as the research object, analyzes the influence law of near-field ground motion and seismic traveling wave effect with long period, large pulse and high vertical component on the seismic response of steel truss arch bridge, and carries out the optimization design research of seismic isolation device design parameters and structural seismic behavior. The results show that: (1) Compared with the far-field ground motion fitted according to the design response spectrum of Chinese code, the near-fault ground motion with a long period and large pulse will significantly increase the seismic response of steel truss arch bridge, which can reach more than 40%. Meanwhile, when the ratio of vertical and horizontal peak acceleration increases from 0.65 to 1.0 times, the stress of vault bar will increase by 46.3 MPa. (2) In this case, the seismic traveling wave effect only has an adverse effect on the lower chord member of the vault and the upper chord member of the arch bottom, and the influence on other members is less than 10% or less than the uniform loading result. (3) Optimizing of the design parameters of seismic isolation devices between piers and girders, and reasonable match of the seismic force transmitted from the main girder to

收稿日期:2020-03-23

作者简介:庞林(1989-),男,高级工程师,博士。

基金项目:四川省重点研发项目(2019YFG0001);中国铁路总公司系统性重大项目(P2018G007)

引文格式:庞林,曾永平,陈克坚,等.近断层地震区铁路钢桁拱桥抗震性能和对策研究[J].高速铁路技术,2020,11(4):60-64.

PANG Lin, ZENG Yongping, CHEN Kejian, et al. Study on Seismic Behavior and Countermeasures of Steel Truss Railway Arch Bridges in Near-fault Seismic Zone[J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(4): 60-64.

the substructure can achieve significant seismic isolation effects. (4) After seismic isolation measures are taken, the arch foot is the position with the highest risk during an earthquake. In order to further improve the seismic behavior of steel truss arch bridge, it is not advisable to increase the cross-section size of arch foot members only. It is always better to pour concrete at the arch foot and reduce the weight of superstructure.

**Key words:** near-fault seismic zone; deck arch bridge; seismic response; seismic design; fortification measures

巴塘站附近的列衣大桥,处于Ⅷ度区,地震动峰值加速度 0.20 g,段内无明显断裂通过,最近的断裂距离桥址约 500 m。区内地面标高 3 473 ~ 3 663 m,跨越德曲河,相对高差 190 m,自然坡度  $22^{\circ} \sim 59^{\circ}$ ,两岸局部可见基岩出露,交通条件一般。在该区域建桥主要面临高海拔和超高烈度地震的挑战,由于地震之后检查及修复极度困难,因此对拟建桥梁抗震性能要求较高。

钢桁拱桥具有以下特点:(1)技术成熟,跨径 300 m 的钢桁拱桥国内已实施了几十座,施工技术非常成熟;(2)竖向刚度大,对高速铁路具有很强的适应性;(3)杆件相对较轻,制造、运输、架设和后期维修相对容易;(4)抗震性能较好,跨度 490 m 的怒江大桥亦采用该桥式,基本地震烈度Ⅷ,但为远场地震。

根据陈丽军等人<sup>[1]</sup>的研究结果,上承式钢桁拱桥在高烈度地震区具有良好的适应性,故推荐列衣大桥采用上承式钢桁拱桥方案。目前,针对钢桁拱桥抗震性能的相关研究主要集中在不同减隔震措施的减震效果、参数优化设计和行波效应影响等方面<sup>[2-5]</sup>。赵灿辉等人<sup>[6]</sup>的研究表明,拱脚是上承式钢桁拱桥的危险部位,行波效应显著增大了拱肋应力,支座布置方式显著影响拱肋内力。李程等人<sup>[7]</sup>采用 ANSYS 中的零阶优化方法对武广客运专线 1 座钢桁拱桥的铅芯橡胶支座进行优化设计,指出支座的屈后刚度比对结构地震响应有重要影响。杨华平等人<sup>[8]</sup>研究了行波效应对上承式钢桁拱桥的影响,研究结果表明,行波效应对大跨度拱桥地震响应影响很大,但行波地震响应与波速间不存在单调变化关系,为保证设计安全性,应根据工程场地情况选取多种剪切波速计算行波效应对结构的

影响。张永亮等人<sup>[9]</sup>针对有推力钢桁拱桥,对比研究了速度锁定装置、粘滞液体阻尼器以及 BRB 防屈曲支撑的减隔震效果。田玉玲<sup>[10]</sup>对采用摩擦摆支座的都市大跨度钢桁拱桥的抗震体系和抗震性能评价进行了研究,结果显示摩擦摆支座具有良好的减隔震效果。

本文以列衣上承式钢桁拱桥方案为分析对象,对近断层地震区钢桁拱桥的地震响应规律和抗震设防措施进行研究。

## 1 工程概况及动力分析模型

列衣大桥位于直线上,平坡。推荐采用主跨 280 m 钢桁拱桥,矢跨比 4.29。拱肋采用 Q420 耐候钢,联结系采用 Q345qD。拱上立柱采用钢桁架,立柱间距 37.5 m,交界墩采用混凝土桥墩。桥面采用结合梁,混凝土板厚 35 cm。拱顶桁高 6 m,横向间距 9 m,拱脚桁高 10 m,横向间距 20 m。拱肋截面尺寸 1.8 m × 2.0 m。主桥跨径为 (8 × 37.5) m 连续梁布置,在主梁和钢立柱接处布有 4 个支座,用于支撑主梁重量。主桥左侧引桥布置形式为 (24.7 × 2 + 32.7) m 简支结合梁,右侧引桥布置形式为 (2 × 32.7) m 简支叠合梁形式,立面示意如图 1 所示。按照地震区划,本桥设计地震峰值加速度 0.20 g,周期 0.45 s,属近场地震。

采用有限元软件 Midas/Civil 建立分析模型。对于近断层桥梁,本文在 3 组贴合规范反应谱的远场地震波基础上,又根据桥址场地类型及与断层的距离等在实测地震动数据库中选择了 7 组近断层地震波进行研究,近断层地震波剪切波速 278 ~ 487 m/s,断层距 0.3 ~ 19.8 km,均为Ⅱ类场地波。考虑到大跨度桥梁的重要性及近断层地震的危险性,建议近断层地震区

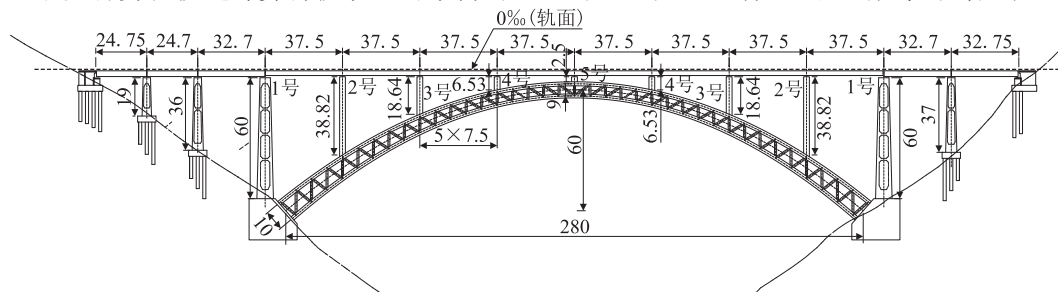


图1 列衣上承式钢桁拱桥示意图(m)

大跨度铁路钢桁拱桥按两阶段设计方法,在我国 GB 50111-2006《铁路工程抗震设计规范》的基础上将设防目标提高一级,即“中震不坏、大震可修”。

## 2 上承式钢桁拱桥地震响应规律

### 2.1 近场地震动影响

近断层地震动卓越周期大,且通常具有速度大脉冲,对桥梁结构地震响应影响较大。对比采用远场地震动的分析结果(如图2所示),近场地震动作用下,钢桁拱桥主要构件应力增加40%~60%,对钢立柱及拱肋弦杆影响大。次要构件增加40%~80%,其中对拱肋平联横杆影响最大。拱脚弦杆、拱顶弦杆和跨中钢立柱等多处发生屈服,最大应力需求达790 MPa,需采取减隔震措施。

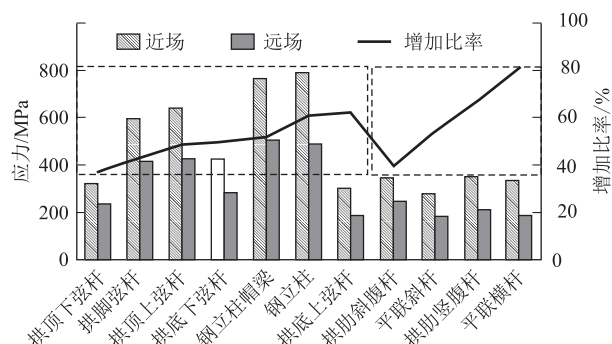


图2 近/远场地震响应对比图(罕遇)

### 2.2 竖向地震动影响

近断层地震动竖向分量较大,为研究其对钢桁拱桥的影响,将竖向地震动峰值加速度由水平向的0.65倍调整至1.0倍,即取罕遇地震动峰值加速度为0.38 g。对比各构件应力的增大比率发现,拱顶下弦杆应力增加幅度最大,为46.3 MPa,应力增大比率为9.5%。应力增大比率最大值出现在斜腹杆处,最高达69.5%。绝大多数杆件应力变化比率在20%以内,拱桥最大应力仍出现在拱脚处,最大应力增大约26 MPa。

### 2.3 地震行波效应影响

列衣桥钢桁拱方案主跨280 m,剪切波速范围为250~500 m/s。为分析行波效应对桥梁结构响应的影响,采用相对运动法(RMM)对列衣大桥进行多点激励线性时程分析。两桥墩(或拱脚)的地震波“到达时间”差设置为0.3 s、0.6 s、0.9 s和1.2 s,行波效应影响如图3所示。由图3可以看出,除拱顶下弦杆、拱底上弦杆的最大应力高于一致加载结果(大于10%)外,其余位置杆件的最大应力均增加不大。在多点激励抗

震分析中,相位差效应的影响同结构自振周期与地震波卓越周期的大小关系以及场地剪切波速有一定的相关性。若桥址场地条件较好,多点激励对结构地震响应的影响并不十分显著。此外,非同步激励使大跨度拱桥地震响应显著变化的主要影响因素并不是拟静力作用,而是对称振型,这是造成拱顶应力变化的主要原因。

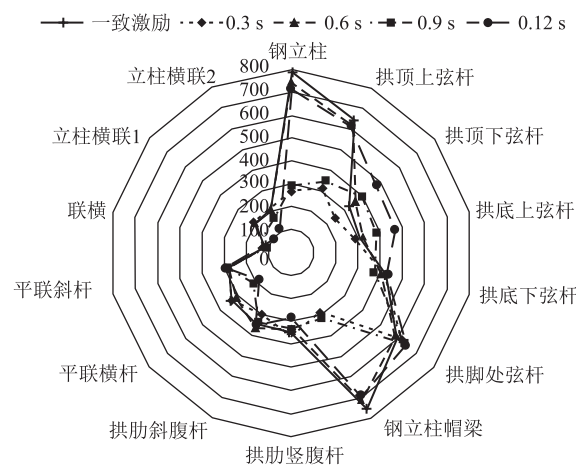


图3 行波效应影响图

## 3 上承式钢桁拱桥抗震对策研究

### 3.1 减震限位装置优化设计

在不采取减隔震措施时,拱桥最大应力出现在拱顶处且部分杆件出现严重应力屈服。这主要是由主梁地震力传递到下部结构时分配不合理所致,为此合理设计减震限位装置参数就显得尤为重要。考虑铁路耐久性要求,拟采用球型钢支座配合减震限位装置(钢阻尼器)<sup>[11]</sup>的减隔震方式,布置方式如图4所示。在罕遇地震作用下,支座固定约束方向的销钉剪断后成为活动支座。

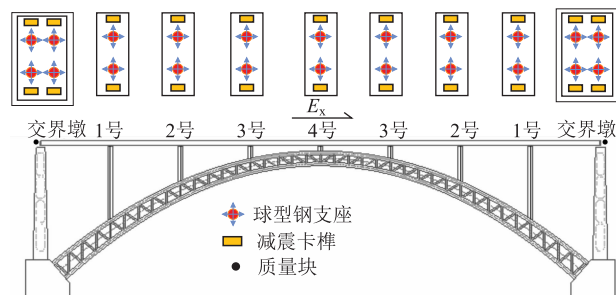


图4 减隔震措施布置图

建立简化模型,如图5所示。主梁为连续梁,假定为刚体,交界墩两侧为简支梁,假定为质量块。支座摩擦系数取0.02,并考虑减震限位装置间隙和弹性刚

度,钢立柱与减震限位装置及支座串联组成联合抗侧推体系。

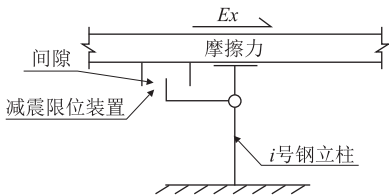


图 5 简化计算模型图

根据抗震设计规范,主梁地震力:

$$E_x = 1.5A_g \times m_d - \sum \mu R_a \tag{1}$$

式中: $E_x$ ——顺桥向固定端的水平地震力(kN);  
 $A_g$ ——地震动峰值加速度( $\text{m/s}^2$ );  
 $m_d$ ——梁和桥面的质量(t);  
 $u$ ——活动支座的摩擦系数;  
 $R_a$ ——活动支座反力(kN)。

由计算可知,温度变形引起的支座相对位移最大为 10.5 mm,故初步拟定减震限位装置间隙为20 mm,以满足正常使用时,减震限位装置不产生温度次内力的要求。将各钢立柱上的减震限位装置刚度设为优化变量,初始值取 20.2 kN/mm。将最小化各钢立柱柱底弯矩方差作为优化目标。迭代优化变量,结果如表 1 所示。

表 1 减隔震装置优化设计

项目	中立柱						
	1 号	2 号	3 号	4 号	3 号	2 号	1 号
优化前墩底弯矩/( $10^4 \text{ kN} \cdot \text{m}$ )	12.1	13.2	5.9	2.2	5.9	13.2	12.1
优化的减隔震装置刚度/(kN/mm)	3.24	16.9	32.4	97.2	32.4	16.9	32.4
优化后柱底弯矩/( $10^4 \text{ kN} \cdot \text{m}$ )	5.2	5.8	5.2	5.6	5.2	5.8	5.2

采用优化后的减隔震设计方案进行全桥非线性动力时程分析,结果如表 2 所示。

表 2 减隔震效果(罕遇地震)表

项目	非减隔震工况应力包络值/MPa	减隔震工况应力包络值/MPa	减震率/%
钢立柱	778	222	71
拱顶上弦杆	580	214	63
拱顶下弦杆	300	249	17
近拱脚上弦杆	354	279	21
近拱脚下弦杆	431	357	17
拱脚下弦杆	613	497	19
拱肋竖腹杆	366	252	31
拱肋斜腹杆	331	232	30
平联横杆	319	290	9
平联斜杆	279	264	5
钢立柱帽梁	737	140	81

由表 2 可以看出,采取减震限位装置后,几乎所有构件的应力包络值均有所降低。其中,钢立柱、拱顶上弦杆和钢立柱帽梁的减震效果明显,罕遇地震动作用下,减震率可达 63% ~ 81%。此时,最大支座位移为 296 mm,且减震限位装置未达到其极限承载能力,满足抗震设防目标要求。

3.2 拱脚应力优化设计

经减隔震设计后,拱脚杆件应力仍然较大,不满足抗震设计要求,增加拱脚杆件尺寸是最常见的解决方案之一。然而拱脚杆件尺寸增大后,其刚度也相应增大,其临近弦杆的应力又会超出限值,如此恶性循环会导致截面过大,经济性不高。拱脚优化设计方案如表 3 所示,优化后拱脚处应力如表 4 所示。

表 3 拱脚优化设计方案表

构件尺寸	原方案(高×宽×板厚)/m	增大尺寸方案(高×宽×板厚)/m	灌注混凝土方案(高×宽×板厚)/m
拱脚下弦 1 号杆	2.0×1.8×0.05 (杆长 2.34)	2.2×2.0×0.08 (杆长 1.17)	2.1×1.9×0.05 (灌注 C60 混凝土)
近拱脚下弦 2 号杆	2.0×1.8×0.05	2.2×2.0×0.06	2.1×1.9×0.05 (灌注 C60 混凝土)
近拱脚下弦 3 号杆	2.0×1.8×0.048	2.2×2.0×0.05	2.1×1.9×0.05
其余弦杆	2.0×1.8× <i>t</i>		2.1×1.9× <i>t</i>
钢立柱	2.8×1.8×0.036		2.6×1.8×0.036
近拱脚拱肋竖腹杆	1.8×1.0×0.036	1.8×1.0×0.040	1.9×1.0×0.040
拱肋平联横撑	1.5×1.0×0.026	1.8×1.0×0.030	1.9×1.0×0.040

注:拱脚下弦杆按距离拱脚由近至远编号

表 4 优化后拱脚处应力比较表

项目	最大应力/MPa			容许应力/MPa
	原方案	增大尺寸方案	灌注混凝土方案	
拱脚下弦 1 号杆	497.3	385.2	331.8	361.5
近拱脚下弦 2 号杆	356.8	387.1	341.2	361.5
近拱脚下弦 3 号杆	339.6	391.5	320.2	375

由表 3、表 4 可以看出,拱脚弦杆板厚由 5 cm 增大至 8 cm,近拱脚杆件截面尺寸由 2.0 m×1.8 m 增大至 2.2 m×2.0 m,结构最大应力位置由拱脚下弦 1 号杆转移至近拱脚下弦 3 号杆,最大应力由 497 MPa 降低至 391 MPa,但仍不能满足抗震设计要求。因此,调整设计思路,首先在拱脚处下弦杆钢箱内灌注混凝土,以期能显著降低拱脚处应力水平。其次考虑到钢立柱的应力水平较低,部分立柱最大应力仅 121 MPa,具有较大富余度,可通过减小钢立柱截面尺寸来减轻上部结构质量,进而起到降低地震响应的效果。增大拱脚处构件尺寸和灌注混凝土对结构自振特性的影响如表 5 所示。



表 5 增大构件尺寸及灌注混凝土对结构自振特性的影响表

振型	自振周期/s		
	原方案	增大尺寸方案	灌注混凝土方案
1	2.164	2.123	2.058
2	1.945	1.942	1.934
3	1.196	1.184	1.158
4	1.174	1.158	1.139
5	0.832	0.831	0.819
6	0.788	0.786	0.782
7	0.627	0.627	0.627
8	0.625	0.625	0.625
9	0.616	0.608	0.592
10	0.567	0.566	0.565

由表 5 可以看出,调整局部构件尺寸对结构整体

表 6 钢管混凝土承载力检算表

内力		承载能力		检算	
最大轴力/(10 <sup>5</sup> kN)	1.95	抗压轴力 $N_{un}/(10^5 \text{ kN})$	3.13	面内压弯 $N/N_{un} + (1 - \alpha_c)M_y/M_{uny}$	0.98
最小轴力/(10 <sup>5</sup> kN)	-0.34	抗拉轴力 $N_{ut}/(10^5 \text{ kN})$	2.10	面外压弯 $N/N_{un} + (1 - \alpha_c)M_y/M_{uny}$	0.79
面内最大弯矩 $M_y/(10^5 \text{ kN} \cdot \text{m})$	0.67	面内抵抗弯矩 $M_{uny}/(10^5 \text{ kN})$	1.31	面内拉弯 $N/N_{ut} + M_y/M_{uny}$	0.67
面外最大弯矩 $M_z/(10^5 \text{ kN} \cdot \text{m})$	0.29	面外抵抗弯矩 $M_{unz}/(10^5 \text{ kN})$	1.22	面外拉弯 $N/N_{ut} + M_y/M_{uny}$	0.40

地震响应规律和抗震设防对策进行了研究。首先分析了具有长周期及大脉冲特性的近场地震动、高竖向地震动分量和地震行波效应对钢桁拱桥地震响应的影响;然后结合列衣大桥抗震特点,考虑温度变形影响和摩擦力作用,针对选用的减震限位装置提出优化设计方法和参数,并分析了所达到的减震限位效果;最后对仍不能满足抗震设计要求的杆件进行截面优化设计,提出在拱脚位置灌注混凝土的解决方案,得出主要结论如下:

(1)具有长周期、大脉冲的近场地震动显著增大了大跨钢桁拱桥的地震响应,本例中应力增大比率达 40% 以上。竖向地震动对拱顶下弦杆和斜腹杆影响较大,拱桥最大应力增大约 26 MPa。受桥址场地条件较好等因素影响,地震行波效应对结构地震响应的影响并不十分显著。

(2)拱上结构墩梁之间采用合理的减震限位装置或支座与减震限位装置匹配设置,能有效改善墩梁的地震力传递,使钢立柱和拱圈应力分布更为合理。优化后中间钢立柱(含帽梁)和拱顶弦杆应力的减震效果最为明显,减震率为 48% ~ 81%,这也体现了减震限位装置的隔震和滞回耗能效果。

(3)采用墩梁减隔震措施后,拱脚杆件应力仍然较大,不能满足抗震设计要求。通过对比分析增大杆件尺寸和在拱脚灌注混凝土两种解决方案来降低杆件应力,结果表明在拱脚钢箱内灌注混凝土是最为有效的措施。

自振特性的影响并不明显。采用拱脚灌注混凝土方案后,拱脚应力由 497.3 MPa 降低至 331.8 MPa,近拱脚下弦杆应力由 356.8 MPa 降低至 341.2 MPa,均满足容许应力要求。根据 CECS 159 - 2004《矩形钢管混凝土结构技术规程》,对拱脚钢管混凝土承载力进行验算,结果如表 6 所示。

可见拱脚钢管混凝土截面承载也能满足规范要求。

4 结论

本文针对列衣大桥上承式钢桁拱桥方案的近断层

综上所述,在上承式大跨度钢桁拱桥抗震设计时,应充分重视近断层长周期、大脉冲和高竖向地震动分量等特性对桥梁地震响应的影响,并结合场地地震安评结果,充分考虑行波效应可能产生的不利影响。通过合理设计减隔震措施能有效降低桥梁的地震响应,但应注意仅通过增大截面尺寸降低拱脚应力既不经济也不合理,合理采用降低上部结构质量并在拱脚灌注混凝土的方式可达到更优效果。

参考文献:

[1] 陈丽军,贺金龙,孙福维,等.罕遇地震作用下某大跨度钢桁架拱桥抗震分析[J].特种结构,2014,31(3):61-64.  
CHEN Lijun, HE Jinlong, SUN Fuwei, et al. Seismic Analysis of a Large Span Steel Truss Arch Bridge under Rare Earthquake[J]. Special Structures, 2014, 31(3): 61-64.

[2] 蔡德强. (100+400+100)m 大跨连续钢桁拱桥抗震设计及约束体系研究[J]. 中外建筑, 2015(5): 154-158.  
CAI Deqiang. Long-span Continuous Steel Truss Arch Bridge Aseismic Design and Constraint System Research[J]. Chinese & Overseas Architecture, 2015(5): 154-158.

[3] 瞿国钊. 大跨度钢桁拱桥的创新设计[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(12): 64-67.  
QU Guozhao. Innovative Design of Long-span Steel Truss Arch Bridge[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(12): 64-67.

[4] 刘斌,王琼. 大跨度钢桁拱桥地震反应分析[J]. 交通科技, 2016(3): 29-32.  
LIU Bin, WANG Qiong. Seismic Response Analysis of Long-span Steel Truss Arch Bridge[J]. Transportation Science & Technology, 2016(3): 29-32.

参考文献:

[1] 王争鸣. 兰新高铁穿越大风区线路选线及防风措施设计[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(1): 1-6.  
WANG Zhengming. Design of Route Selection and Windproof Measures for Strong Wind-hit Section of Second Double Line of Lanzhou-Urumqi Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32(1): 1-6.

[2] 王旭芳. 高速铁路桥梁支座设计要求及应用技术[J]. 高速铁路技术, 2011, 2(5): 51-54.  
WANG Xufang. Application Technology and Design Requirement of High Speed Railway Bridge Bearing [J]. High Speed Railway Technology, 2011, 2(5): 51-54.

[3] TB/T 3320-2013 铁路桥梁球型支座[S].  
TB/T 3320-2013 Spherical Bearings for Railway Bridges[S].

[4] JTG/T 3360-01-2018 公路桥梁抗风设计规范[S].  
JTG/T 3360-01-2018 Wind-resistent Design Specification for Highway Bridges[S].

[5] 王伟, 方宗义. 沙尘暴天气及其研究进展综述[J]. 应用气象学报, 2004, 15(3): 366-381.  
WANG Wei, FANG Zongyi. Review of Duststorm Weather and Research Progress [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 2004, 15(3): 366-381.

[6] 万本太, 康晓风, 张建辉, 等. 基于颗粒物浓度的沙尘天气分级标准研究[J]. 中国环境监测, 2004, 20(3): 8-11.  
WAN Bentai, KANG Xiaofeng, ZHANG Jianhui, et al. Research on Classification of Dust and Sand Storm Basic on Particular Concentration [J]. Environmental Monitoring in China, 2004, 20(3): 8-11.

[7] 陶健红. 西北地区沙尘天气的气候特征及其影响研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2007.  
TAO Jianhong. Study on the Climatic Characteristics and Influence of Sand-dust Weather in Northwest China [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2007.

[8] 郑广芬, 冯建民, 赵光平, 等. 中国西北地区东部沙尘暴区划研究[J]. 自然资源学报, 2010, 25(10): 1676-1688.  
ZHENG Guangfen, FENG Jianmin, ZHAO Guangping, et al. Study on Sandstorm Climatic Regionalization in Eastern Part of Northwest China[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(10): 1676-1688.

(上接第64页)

[5] 刘爱荣, 张俊平, 孙卓, 等. 大跨度连续刚架钢桁拱桥的动力特性及行波效应分析[J]. 中南公路工程, 2007, 32(3): 50-54, 63.  
LIU Airong, ZHANG Junping, SUN Zhuo, et al. Dynamic Characteristics and Traveling Wave Effect Analysis of Long-span Continuous Steel-Truss Arch Bridge [J]. Journal of Central South Highway Engineering, 2007, 32(3): 50-54.

[6] 赵灿晖, 周志祥. 大跨度上承式钢桁拱桥的地震响应分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2006, 3(5): 6-11.  
ZHAO Canhui, ZHOU Zhixiang. Seismic Response Analysis of Long-span Steel Braced Deck-type Arch Bridge [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2006, 3(5): 6-11.

[7] 李程, 张念来. 铁路钢桁拱桥减隔震支座设计参数的优化研究[J]. 公路工程, 2009, 34(3): 89-93.  
LI Cheng, ZHANG Nianlai. The Research on Parameters Optimization of Seismic-isolated Bearings of Railway Steel Truss Arch Bridge [J]. Highway Engineering, 2009, 34(3): 89-93.

[8] 杨华平, 钱永久, 邵长江, 等. 行波效应对大跨度上承式钢桁拱桥地震响应的影响[J]. 铁道建筑, 2014, 54(2): 8-10.  
YANG Huaping, QIAN Yongjiu, SHAO Changjiang, et al. Influence of Traveling Wave Effect on Seismic Response of Long-span Deck Steel Truss Arch Bridge [J]. Railway Engineering, 2014, 54(2): 8-10.

[9] 张永亮, 董阳, 朱尚清, 等. 大跨上承式铁路钢桁拱桥减震性能研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(1): 75-79.  
ZHANG Yongliang, DONG Yang, ZHU Shangqing, et al. Research on the Damping Performance of the Long-span Deck Type Steel Truss Railway Arch Bridge [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(1): 75-79.

[10] 田玉玲. 城市大跨度钢桁拱桥抗震体系对比分析[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(3): 88-91.  
TIAN Yuling. Comparative Analysis of Seismic System for Urban Long-span Steel Truss Arch Bridge [J]. Railway Standard Design, 2017, 61(3): 88-91.

[11] 董俊, 曾永平, 陈克坚, 等. 大跨度中承式铁路拱桥缓冲限位耗能装置研究[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(12): 85-90.  
DONG Jun, ZENG Yongping, CHEN Kejian, et al. Study on Displacement Restriction and Shock Mitigating Device for Long Span Half-through Railway Arch Bridge [J]. Railway Standard Design, 2019, 63(12): 85-90.