

# 600 m 级四线铁路新型桁架桥力学原理及性能

谢肖礼<sup>1,2</sup>, 欧阳平<sup>1</sup>, 安玉龙<sup>2</sup>, 欧仕惠<sup>2</sup>, 杨创捷<sup>1</sup>, 谢远忠<sup>2</sup>

(1. 广西大学土木建筑工程学院, 广西南宁 530004; 2. 富赢隆基科技(广西)有限公司 富赢新型桥梁科学研究院, 广西南宁 530200)

**摘要:** 对铁路桥梁来说, 随着跨度的增大会导致桥梁刚度下降及梁端转角超限等问题, 限制了超大跨径高速铁路桥梁的发展, 为突破此瓶颈, 提出了超大跨径新型桁架桥, 该结构体系具有良好的力学性能, 而且其刚度远超拱桥, 特别适用于铁路桥梁。新体系桁架桥在桁架角点处设置刚度很大的斜杆, 有效约束主梁线位移, 在中部设置双层桁架, 在两侧设置三角桁架, 从而增强了结构的抗弯能力、刚度及稳定性。此外, 该结构体系以钢结构为主, 可采用预制拼装的方法, 施工方便快捷。阐述了新型桁架桥的结构形式及其力学原理, 并利用有限元软件 Midas/Civil 对 650 m 新型桁架桥进行分析研究, 结果表明: 新型桁架桥强度、竖向刚度、梁端转角、稳定性、整体性及动力特性均满足要求, 且较传统拱桥具有更好的力学性能。

**关键词:** 高速铁路桥; 新型桁架桥; 有限元; 刚度; 梁端转角  
**中图分类号:** U24 **文献标志码:** A

## Mechanical Principle and Properties of a 600 m New Truss Bridge for Four Line Railway

XIE Xiaoli<sup>1,2</sup>, OUYANG Ping<sup>1</sup>, AN Yulong<sup>2</sup>, OU Shihui<sup>2</sup>, YANG Chuangjie<sup>1</sup>, XIE Yuanzhong<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Research Institute of Fuying New Bridge, Fuying Longji Technology (Guangxi) Co., Ltd., Nanning 530200, China)

**Abstract:** For railway bridges, the increase of span will lead to the decrease of bridge stiffness and the overrun of beam end angle, which limits the development of super long-span high-speed railway bridges. In order to break through this bottleneck, a super long-span new truss bridge is proposed. The structural system has good mechanical properties and its stiffness is much higher than that of the arch bridge, which is especially suitable

for railway bridges. In the new system truss bridge, inclined rods with a large stiffness are set at the angle of the truss to effectively restrain the line displacement of the main girder, and double trusses are set in the middle as well as triangular trusses are set on both sides, so that the structure has a better flexural capacity, stiffness, and stability. In addition, the bridge is mainly steel structure, which can be prefabricated and assembled. Therefore the construction is convenient and fast. The structural form and mechanics principle of the new truss bridge are described. By using the finite element software Midas/Civil, the structure of a 650 m half through span reduction truss bridge is analyzed and studied. The results show that the strength, vertical stiffness, beam end angle, stability, integrity, and dynamic characteristics of the half through span reduction truss bridge satisfy the requirements, and it has better mechanical properties and economy than the traditional arch bridge.

**Key words:** high speed railway bridge; new truss bridge; finite element; stiffness; beam end angle

钢桁架桥具有自重轻、强度高及结构高度较大等优点, 使其能获得更大的跨径<sup>[1-3]</sup>。钢桁架桥通过对杆件截面尺寸及连接位置的合理设计, 使杆件以承受轴力为主, 充分利用材料的强度, 且能安全有效传力<sup>[4-6]</sup>。相比实腹型构件, 其格构式构件能有效降低结构自重及控制材料用量, 达到节约材料的目的<sup>[7-8]</sup>。钢桁架桥梁的施工通常采用工厂或现场预制一定规模的钢构件, 之后在现场进行拼接的方法, 能很好地适用各种季节及施工环境, 降低施工成本及缩短施工周期<sup>[9-11]</sup>。因此, 钢桁架桥被广泛应用于高速铁路的建设中。

收稿日期: 2021-10-25

基金项目: 广西重点研发计划(桂科 AB18126047); 广西防灾减灾与工程安全重点实验室系统性研究项目(2016ZDX0001)

第一作者: 谢肖礼(1963—), 男, 研究员, 工学博士, 主要研究方向为桥梁结构新体系。E-mail: guxixiaoli@126.com

通信作者: 欧阳平(1973—), 男, 教授级高级工程师, 博士生, 主要研究方向为桥梁结构新体系。

E-mail: 270933087@qq.com



论文  
拓展  
介绍

随着铁路运输的高速发展,对高速铁路行车平顺性及稳定性的要求愈加严格,因此高速铁路桁架桥的刚度及梁端转角问题受到了广泛的关注。规范<sup>[12]</sup>对高速铁路桥梁的挠度及梁端转角容许值做出了严格的规定限制,并给出了列车运行安全性及舒适度指标评价标准;文献[13]针对拱梁固结拱桥应用于高速铁路时主梁刚度不足问题,提出了一种提高拱梁固结拱桥刚度的有效办法;文献[14]根据大跨度桥梁刚度、变形控制技术难点,依托工程实例研究梁端转角、结构徐变和桩基沉降控制措施;文献[15]着重研究了高速铁路桥梁梁端转角问题,提出了减小大跨度中承式铁路拱桥梁端转角的有效方法;文献[16]基于改善响应面法,计算分析了某一现有高速铁路桥梁梁端转角的可靠度。

上述研究成果均是在四大基本桥型桥梁的基础上,探索刚度及梁端转角的改善方法及限制研究,而涉及桁架桥梁在此方面的相关研究很少。基于此,提出一种适合大跨径高速铁路的新型桁架桥(以下简称“本文桁架桥”)的结构方案,如图1所示,结构主要由:主梁、4根刚性斜杆(其中AB、A'B'为斜腿)、一根水平杆等组成。主梁中部、水平杆及腹杆等形成中间桁架BB'CC';斜腿、主梁两侧部分及立柱等组成三角桁架ABE及A'B'E';再通过连接桁架BFGH及B'F'G'H'连接,形成结构刚度大,整体性好的新型桁架桥。本文介绍了该结构的力学原理,并通过有限元软件Midas/Civil分析650 m新型桁架桥,研究其刚度、梁端转角、强度、动力特性及稳定性,并与同跨径、用钢量相近的传统中承式拱桥进行对比。

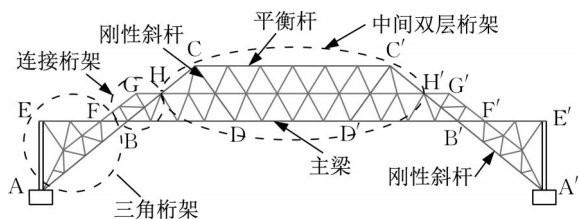


图1 本文桁架桥结构布置示意图

Fig. 1 Structural arrangement of proposed truss bridge

## 1 新型桁架桥力学原理

本文桁架桥基于几何不变构造原理来提高桥梁的整体性能,其特征及力学原理具体有以下4点:

### 1.1 设置刚性支撑,减少主梁等效受力跨度(径)

设置4根刚性斜杆AC、A'C'、CD、C'D'(其中AB、A'B'为斜腿)及刚性水平杆CC'。由于结构杆件受力上遵从刚度分配原则,因此可以通过增大CD、C'D'的截面使其刚度增大,从而使CD、C'D'分配到很大的轴力,对主梁起到了明显的分跨作用。此外,斜腿AB、A'B'也对主梁起到了分跨作用,从而将主梁划分为5段:即EB段、BD段、DD'段、D'B'段及B'E'段,如图2所示,可见主梁的等效受力跨度(径)明显减少。其受力示意如图3所示。

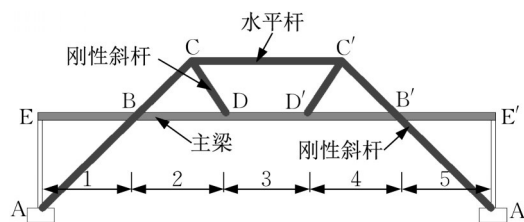


图2 跨度分段示意图

Fig. 2 Schematic diagram of span section

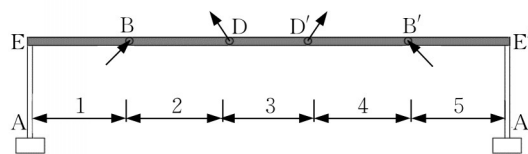


图3 受力示意图

Fig. 3 Schematic diagram of force

### 1.2 增加桁高,提高主梁中部抗弯能力

以主梁中段BB'作为下弦杆,水平杆CC'作为上弦杆,加入腹杆形成中间桁架BB'CC'(图4),从而使主梁中部抗弯能力得到明显提高。

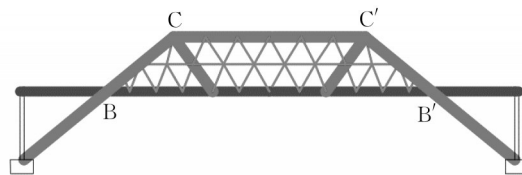


图4 双层桁架形成示意图

Fig. 4 Schematic diagram of double truss formation

### 1.3 在桥梁两侧增加腹杆,形成三角桁架,提高斜腿的抗弯能力

如图5所示,在斜腿AB、主梁BE及立柱AE之间加入腹杆,形成三角桁架ABE,同理形成三角桁架A'B'E',即在不减少桥下净空的前提下,可大幅增加斜腿抗弯能力。

### 1.4 中间桁架与三角桁架采用桁架结构连接,改善

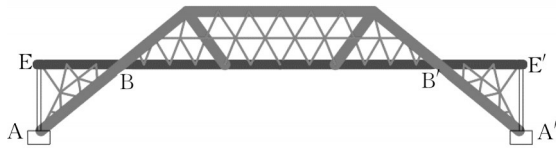


图5 两侧三角桁架形成示意图

Fig. 5 Schematic diagram of formation of triangular trusses on both sides

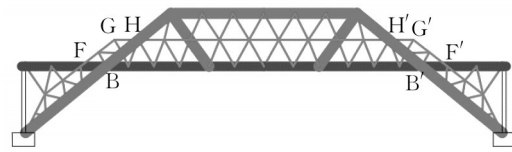


图6 点连接转为桁架连接示意图

Fig. 6 Schematic diagram of transforming point connection into truss connection

连接处的受力性能

由图5可知,如果BB'CC'与ABE及A'B'E'仅靠点连接,则连接处较为薄弱,容易出现应力集中现象,故采用桁架BFGH及B'F'G'H'加以连接(图6),大大改善连接处的受力性能。

2 结构性能分析

为进一步研究本文桁架桥的性能,以650 m新型桁架桥为例。通过有限元软件Midas/Civil建模分析其刚度、梁端转角、强度、动力特性及稳定性,并与同跨径、用钢量相近的传统中承式拱桥对比。

2.1 结构主要参数指标

650 m新型桁架桥结构布置如图7所示,桥面宽度35 m,两片桁片中心间距35 m,桥面以上两桁片之间采用一字型及X形横撑连接,桥面以下两桁片之间采用K形横撑连接。其材料用量见表1,下构斜腿采用外包混凝土钢箱截面,如图8a所示;上构刚性斜杆采用钢箱截面,如图8b所示;主梁采用格子梁形式,纵横梁均为带肋箱型截面,其类型及尺寸如图9所示;腹杆采用带肋箱形截面,如图10a所示,腹杆之间连接节点采用整体式节点设计,如图10b所示。

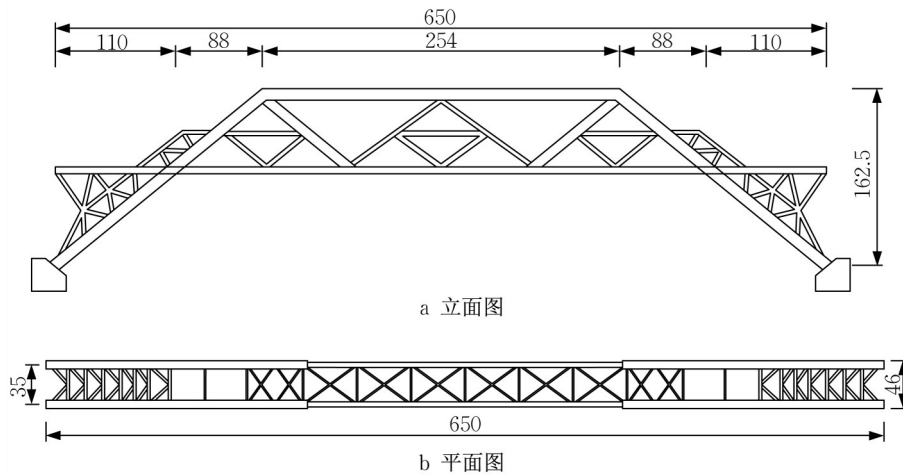


图7 本文桁架桥总体布置(单位:m)

Fig. 7 Layout of proposed truss bridge(unit: m)

表1 本文桁架桥构件参数及用量

Tab. 1 Member parameter and usage of proposed truss bridge

构件	截面形式	材料	截面惯性矩/m <sup>4</sup>	扭转惯性矩/m <sup>4</sup>	截面积/m <sup>2</sup>	用量/t
下构斜腿	箱形截面	Q345	42.886	43.038	2.524	3760.000
		C50				18260.000
上构刚性斜杆	箱形截面	Q345	20.494	17.331	1.206	4392.000
水平杆	箱形截面	Q345	8.998	5.478	0.999	4063.000
三角网	箱形截面	Q345	0.155~1.911	0.135~1.269	0.161~0.558	14157.300
三角网横撑	箱形截面	Q345	0.058~0.103	0.045~0.906	0.067~0.112	926.500
主梁	纵梁	箱形截面	0.195~3.727	0.152~2.753	0.197~0.634	9546.300
	横梁	箱形截面	0.260~0.639	0.176~0.382	0.215~0.318	4083.000
桥面混凝土	矩形截面	C50	—	—	9.800	14380.000
合计用钢量:40928.100 t(1.799 t·m <sup>-2</sup> ), 混凝土用量:12810.047 m <sup>3</sup> (0.563 m <sup>3</sup> ·m <sup>-2</sup> )						

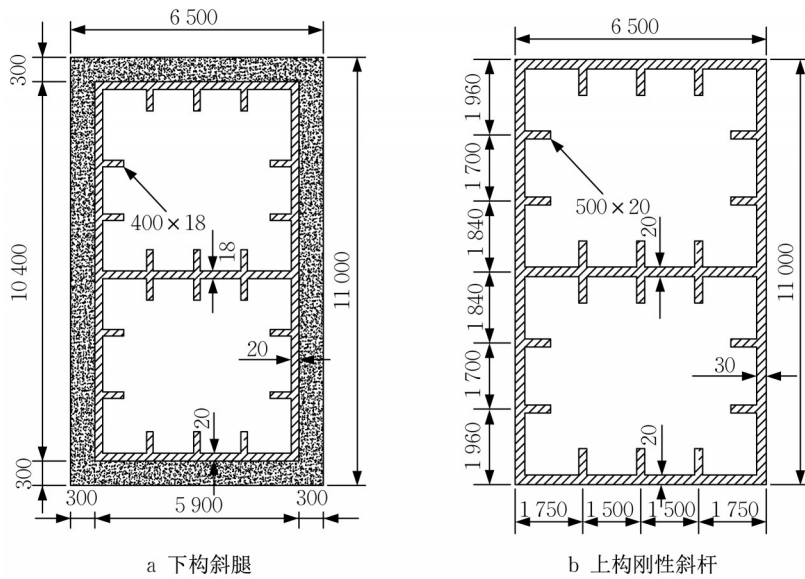


图 8 下构斜腿及上构刚性斜杆截面(单位:m)

Fig. 8 Cross section of lower inclined leg and upper rigid inclined rod (unit: m)

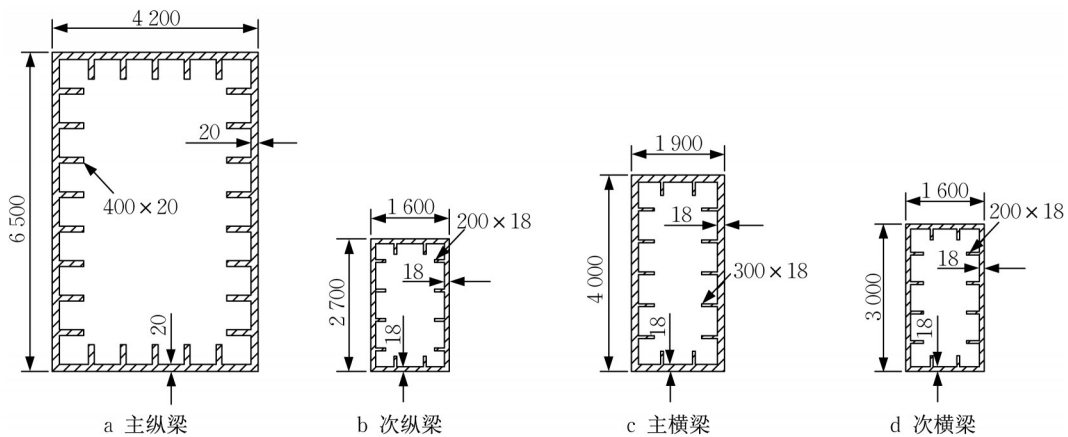


图 9 本文桁架桥主梁构件截面(单位:mm)

Fig. 9 Cross section of main component of beam of proposed truss bridge (unit: mm)

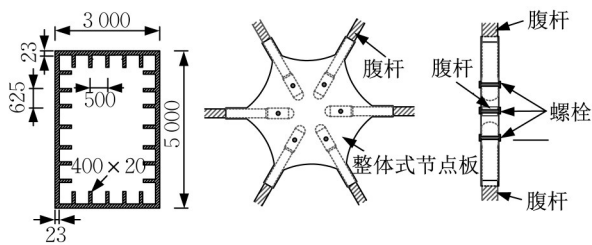


图 10 腹杆截面及整体式节点板示意图(单位:mm)

Fig. 10 Cross section of web member and integral gusset plate (unit: mm)

650 m 传统中承式拱桥结构布置如图 11 所示, 桥面宽度 35 m, 拱肋中心间距 35 m, 拱肋矢跨比为 1/4, 矢高为 162.5 m, 采用悬链线作为拱轴线, 拱轴

系数  $m$  取 1.8。拱肋之间采用 K 型横撑连接。其材料用量见表 2, 拱肋采用变截面钢箱, 如图 12 所示; 主梁采用格子梁形式, 纵横梁均为带肋箱型截面, 其类型及尺寸如图 13 所示; 共设置 33 对吊杆, 吊杆间距 13 m, 吊杆采用高强钢丝束, 吊杆截面直径为 0.12 m。

## 2.2 有限元分析结果

采用有限元软件 Midas/Civil 分别建立本文桁架桥方案及传统拱桥方案的有限元模型, 本文桁架桥全桥共划分为 5 497 个单元, 3 516 个节点, 除桥面板采用板单元模拟, 其余均采用梁单元模拟, 有限元模型如图 14 所示; 传统拱桥全桥共划分为 3 448 个单元, 2 114 个节点。除桥面板采用板单元模拟, 吊



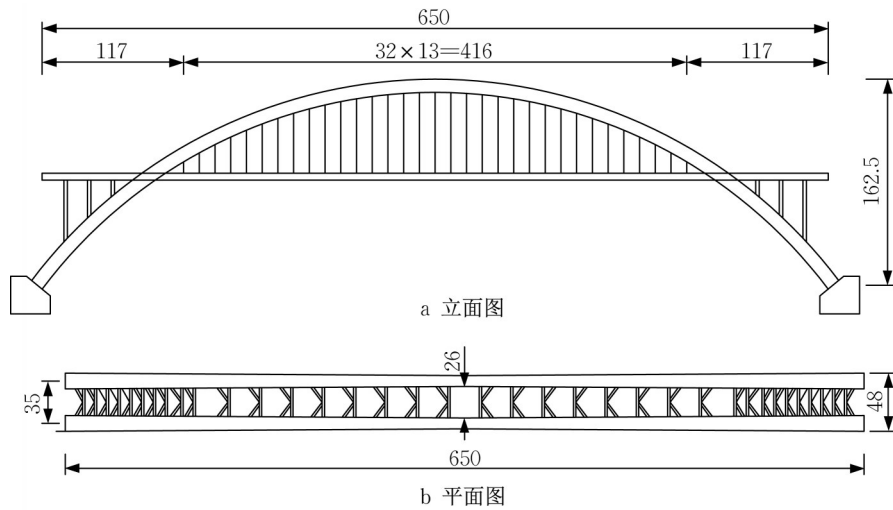


图11 传统拱桥结构布置(单位:m)

Fig. 11 Layout of traditional arch bridge (unit: m)

表2 传统拱桥构件参数及用量

Tab. 2 Component parameter and usage of traditional arch bridge

构件	截面形式	材料	截面惯性矩/m <sup>4</sup>	扭转惯性矩/m <sup>4</sup>	截面积/m <sup>2</sup>	用量/t
拱肋	箱形截面	Q345	29.713~85.201	30.321~93.552	1.356~2.083	20 120.000
拱肋横撑	箱形截面	Q345	0.104	0.155	0.158	3 470.000
主梁	纵梁	箱形截面	0.430~2.431	0.529~1.557	0.310~0.514	9 997.000
	横梁	箱形截面	0.862	0.808	0.374	4 629.000
立柱	箱形截面	Q345	4.257	9.518	3.016	1 598.000
吊杆	圆截面	高强钢丝	$1.018 \times 10^{-5}$	$2.036 \times 10^{-5}$	0.011	304.000
桥面混凝土	矩形截面	C50	—	—	9.800	14 380.000

合计用钢量:40 118.000 t( $1.763 \text{ t} \cdot \text{m}^{-2}$ ),混凝土用量:5 642.000 m<sup>3</sup>( $0.248 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$ )

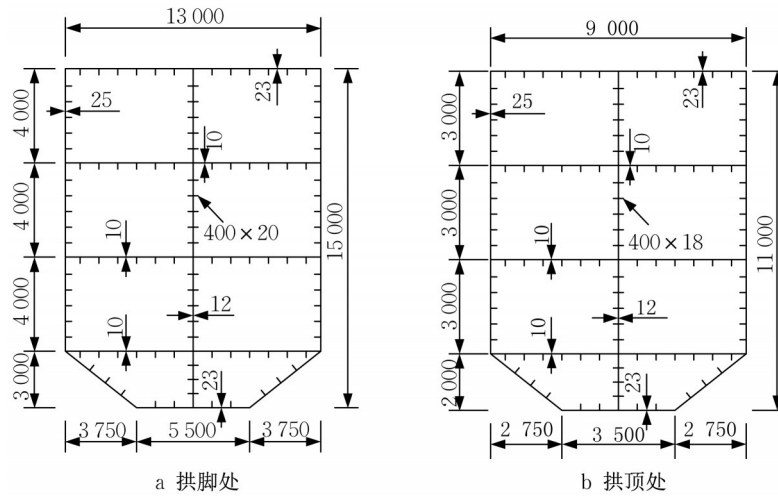


图12 拱肋截面(单位:mm)

Fig. 12 Cross section of arch (unit: mm)

杆采用桁架单元模拟,其余均采用梁单元模拟,有限元模型分别如图15所示。

本文桁架桥边界条件设置为:主梁与桥台之间采用支座连接,用弹性支撑进行模拟,斜腿与基础固结;传统拱桥边界条件设置为:主梁与桥台之间采用

支座连接,用弹性支撑进行模拟,拱脚与拱座基础固结。

### 2.2.1 结构强度及温度响应分析

考虑4个荷载组合对结构进行强度及温度响应分析:①工况Ⅰ,恒载;②工况Ⅱ,恒载+列车荷载;

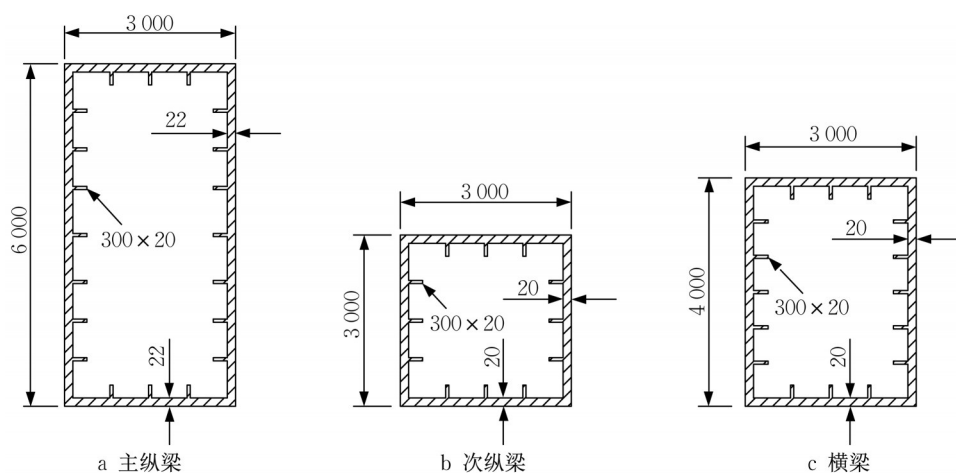


图13 传统拱桥主梁构件截面(单位:mm)

Fig. 13 Cross section of main component of beam of traditional arch bridge (unit: mm)

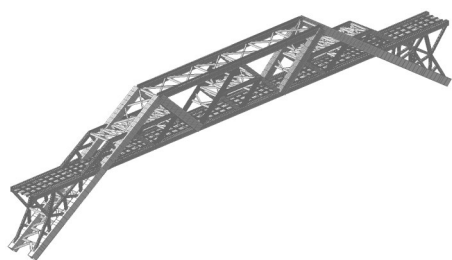


图14 本文桁架桥有限元模型

Fig. 14 Finite element model of proposed truss bridge

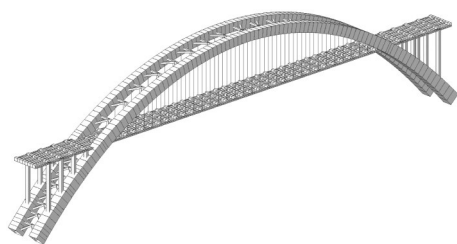


图15 传统拱桥有限元模型

Fig. 15 Finite element model of traditional arch bridge

③工况Ⅲ:恒载+列车荷载+整体升温;④工况Ⅳ:整体升温。其中,列车荷载等级为四线铁路荷载;二期恒载为 $8 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ 的压力荷载;考虑整体升温 $30^\circ\text{C}$ 。计算结果见表3及表4。

在工况Ⅰ作用下,传统拱桥中,拱肋作为主要受力构件,其最大应力为 $-165.06 \text{ MPa}$ ;本文桁架桥中,斜腿、刚性杆及水平杆组成的框架作为主要受力构件,其最大应力为 $-185.62 \text{ MPa}$ 。说明传统拱桥在恒载作用下受力性能略优于本文桁架桥。

但在工况Ⅱ作用下,传统拱桥拱肋最大应力为 $-203.07 \text{ MPa}$ ,本文桁架桥主要受力构件最大应力为 $-212.36 \text{ MPa}$ ,对比工况Ⅰ应力可知,本文桁架

桥在移动荷载作用下的应力增幅远小于传统拱桥,可见本文桁架桥的刚度大,能更好地抵抗移动荷载作用下引起的变形。

在工况Ⅳ作用下,由于本文桁架桥增加了超静定次数,使其在温度作用下引的温度应力较传统拱桥高。但在工况Ⅲ作用下,两者最大应力差值不大,且均在Q345钢材强度设计限值( $245 \text{ MPa}$ )以内。

表3 传统拱桥各工况下构件的最大应力

Tab. 3 Maximum stress of components under different working conditions of traditional arch bridge

工况	主拱肋	吊杆	主梁		立柱
			拉	压	
工况Ⅰ	-165.06	440.40	127.71	-93.27	-138.53
工况Ⅱ	-203.07	566.39	163.00	-147.28	-179.36
工况Ⅲ	-217.51	566.06	162.50	-177.24	-172.36
工况Ⅳ	-16.37	0.01	19.62	-29.96	-14.04

注:“-”表示受压(下同)。

### 2.2.2 结构刚度分析

传统拱桥最大下挠发生于主梁 $1/4$ 点处,该点位移影响线如图16所示,下挠峰值为 $-1.389 \times 10^{-5} \text{ mm}$ ,上挠峰值为 $6.876 \times 10^{-6} \text{ mm}$ ;本文桁架桥最大下挠发生于主梁 $1/2$ 点处,该点位移影响线如图17所示,下挠峰值为 $-1.288 \times 10^{-5} \text{ mm}$ ,相比前者减少了 $7.271\%$ ,上挠峰值为 $3.512 \times 10^{-7} \text{ mm}$ ,相比前者减少了 $94.892\%$ 。此外,从两者位移影响线与坐标轴围成面积还可看出,本文桁架桥面积明显小于传统拱桥,初步可见本文桁架桥刚度的优越性。

根据规范<sup>[12]</sup>考虑以下荷载组合,对结构进行刚度分析:①活载;②活载+ $0.5$ 温度荷载;③ $0.65$ 活载+温度荷载。计算结果见表5。传统拱桥在活载

表4 本文桁架桥各工况下构件的最大应力

Tab.4 Maximum stress of components under different working conditions of proposed truss bridge

工况	斜腿	刚性杆		水平杆	主梁		三角网	
		拉	压		拉	压	拉	压
		工况 I	-165.58		151.68	-171.54	-185.62	116.35
工况 II	-205.62	177.89	-200.58	-212.36	168.92	-177.52	178.26	-200.14
工况 III	-180.36	185.45	-206.46	-216.35	160.89	-190.56	185.59	-195.36
工况 IV	-21.35	29.58	-34.87	7.98	3.45	-35.89	33.65	-32.56

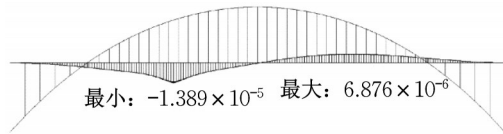


图16 传统拱桥主梁1/4点位移影响线(单位:mm)

Fig.16 Displacement influence line of main girder in 1/4 point of traditional arch bridge (unit: mm)

+0.5温度荷载工况作用下,主梁上、下挠绝对值之和达到最大,为590.307 mm,本文桁架桥则在活载工况下达到最大,为206.120 mm,后者较前者减小了65.083%。此外,两者主梁在活载作用下位移包络图如图18所示,传统拱桥的位移包络图呈“W”型,峰值较大,而本文桁架桥则呈“扁平波浪”型,峰值相对较小。

由此可见,在列车荷载及温度荷载的共同作用下,本文桁架桥的主梁最大上、下挠绝对值之和远小于规范限制要求的  $L/1500=433.333$  mm(设计时速  $>350\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,跨度  $L>80$  m),而传统拱桥主梁最大上、下挠绝对值之和远超规范限值要求。因此,本文桁架桥具有很大的刚度,特别适用于大跨度高速铁路桥。

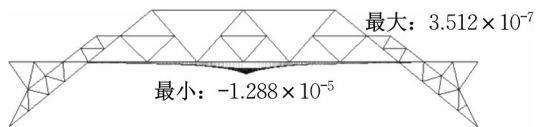


图17 本文桁架桥主梁1/2点位移影响线(单位:mm)

Fig.17 Displacement influence line of main girder in 1/2 point of proposed truss bridge (unit: mm)

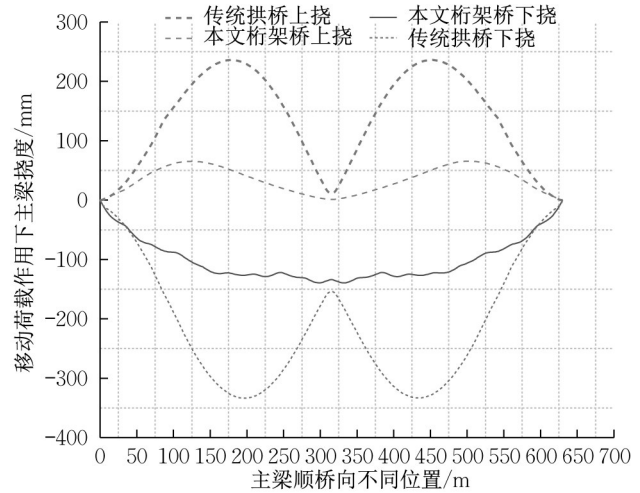


图18 主梁的位移包络图

Fig.18 Displacement envelope of main beam

### 2.2.3 结构自振模态分析

考虑结构自重质量及二期恒载质量,计算结构的固有频率,结果见表6,振型图见图19、图20。传统拱桥自振频率为0.2160,本文桁架桥为0.2367,均为面外正对称振动,可见后者基频较前者提高了9.5833%。传统拱桥首次发生面内振动的频率为0.2545,本文桁架桥为0.3715,后者较前者提高了45.9725%。可见,相比传统拱桥,本文桁架桥面外及面内刚度均得到了有效提高。

### 2.2.4 稳定性分析

考虑所有恒载(自重荷载及二期荷载)及最不利工况活载作用,进行稳定性分析,其结果见表7。结果表明,传统拱桥的整体失稳临界系数为8.89,为面内失稳;本文桁架桥的整体失稳临界系数为13.56,为面外失稳,后者较前者提高了52.53%,且仅当失

表5 结构位移

Tab.5 Vertical displacement of structure

挠度类型	活载		活载+0.5温度荷载		0.65活载+温度荷载	
	传统拱桥	本文桁架桥	传统拱桥	本文桁架桥	传统拱桥	本文桁架桥
主梁最大下挠/mm	332.903	140.344	263.264	66.510	77.829	2.019
主梁最大上挠/mm	236.525	65.776	327.043	137.578	334.778	197.565
主梁最大上、下挠(绝对值)之和/mm	569.428	206.120	590.307	204.088	412.607	199.584

表 6 动力特性计算结果

Tab. 6 Results of dynamic characteristics

阶数	传统拱桥频率	传统拱桥模态	Hz	
			本文桁架桥频率	本文桁架桥模态
1	0.216 0	面外正对称	0.236 7	面外正对称
2	0.254 5	面内反对称	0.371 5	面内反对称
3	0.411 3	面外反对称	0.399 4	面外反对称
4	0.486 0	面外正对称	0.443 7	面外正对称

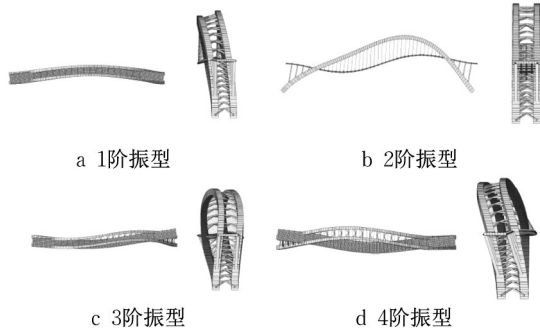


图 19 传统拱桥典型模态

Fig. 19 Calculated mode shapes of ordinary arch bridge

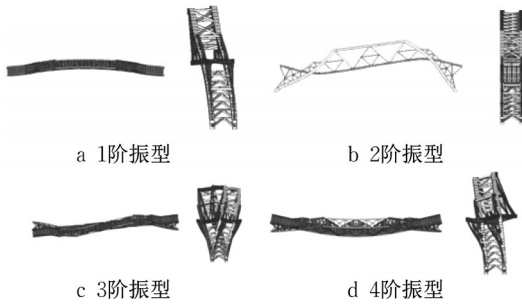


图 20 本文桁架桥典型模态

Fig. 20 Calculated mode shapes of proposed truss bridge

稳系数达到 17.53 时,本文桁架桥才发生面内失稳。可见,相比传统拱桥方案,本文桁架桥方案不仅提高了整体结构的面外稳定性,还大幅提高了面内稳定性。

表 7 稳定性计算结果

Tab.7 Calculated results of stability

阶次	传统拱桥失稳模态	传统拱桥失稳系数	本文桁架桥失稳模态	本文桁架桥失稳系数
1	面内反对称	8.89	面外反对称	13.56
2	面外正对称	14.44	面外正对称	14.12
3	面外反对称	16.28	面外正对称	16.11
4	面内正对称	20.61	面内局部失稳	17.53

2.2.5 梁端转角计算分析

计算结构在列车竖向静活载作用下的梁端转

角,结果见表 8。传统拱桥梁端转角为  $0.804 \times 10^{-3}$  rad,本文桁架桥梁端转角为  $0.667 \times 10^{-3}$  rad,后者相比前者减少了 17.04 %。根据规范<sup>[12]</sup>要求,高速铁路在列车竖向静活载作用下,应满足桥台与桥梁之间的桥梁梁端竖向转角小于  $1.5 \times 10^{-3}$  rad(梁端悬出长度  $\leq 0.55$  m)。因此,本文桁架桥梁端处转角满足规范要求。

表 8 梁端转角计算结果

Tab.8 Calculated results of rotation angle at beam ends

位置	梁端转角/ $10^{-3}$ rad		变化率/%
	传统拱桥	本文桁架桥	
左端桥台与桥梁之间	0.804	0.667	17.040
右端桥台与桥梁之间	0.804	0.667	17.040

3 结论

提出新型桁架桥,对 650 m 跨径有限元模型进行分析研究,并与同跨径、用钢量相近的传统中承式拱桥对比,得出以下结论:

(1)强度承载力满足要求。在最不利荷载工况(恒载+列车荷载+整体升温)作用下,本文桁架桥最大应力为  $-216.35$  MPa,满足规范要求。

(2)结构整体刚度提高。在最不利活载及温度荷载组合工况(活载)作用下,本文桁架桥主梁上下挠度绝对值之和为 206.120 mm,相比传统拱桥(590.307 mm)减少了 65.083 %。此外,由两者主梁的位移包络图可知,传统拱桥上下挠包络图呈“W”型,峰值较大,而本文桁架桥则呈“扁平多波浪”型,峰值相对较小。

(3)结构自振频率提高。本文桁架桥自振频率为 0.236 7,为面外正对称振动,相比传统拱桥(0.216 0)提高了 9.583 3 %。此外,本文桁架桥首次发生面内振动的频率为 0.371 5,相比传统拱桥(0.254 5)提高了 45.972 5 %。

(4)结构稳定性良好。本文桁架桥整体失稳临界系数为 13.56,为面外失稳,相比传统拱桥(8.89,面内失稳)提高了 52.53 %,且仅当失稳系数达到 17.53 时,该桁架桥才发生面内失稳,可见本文桁架桥稳定性良好。

(5)梁端转角减小。本文桁架桥梁端转角为  $0.667 \times 10^{-3}$  rad,满足规范要求,且较传统拱桥( $0.804 \times 10^{-3}$  rad)减少了 17.04 %。

综上所述,本文桁架桥特别适用于超大跨径高速铁路。但目前提出的新型桁架桥方案需结合下一阶段的室内模型实验予以检验。



## 作者贡献声明:

谢肖礼:主要构思者,指导数据分析及论文写作。  
 欧阳平:指导数据分析及论文写作,完成论文修改。  
 安玉龙:建模分析及文献资料收集与整理。  
 欧仕惠:数据整理与分析,参与论文表格及图片绘制。  
 杨创捷:初稿写作,参与建模研究及论文修改。  
 谢远忠:表格及图片绘制,参与建模。

## 参考文献:

- [1] 肖汝诚. 桥梁结构体系[M]. 北京:人民交通出版社,2013.  
 XIAO Rucheng. Bridge structural systems[M]. Beijing: China Communications Press, 2013.
- [2] 尹国安,王海波. 一种钢-混组合桁架桥下弦杆节点极限承载力研究[J]. 土木工程学报,2016,49(4):88.  
 YIN Guoan, WANG Haibo. Study on ultimate bearing capacity of steel-concrete composite truss bridge bottom-chord joints[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(4): 88.
- [3] 李志强,王伟,陈以一. 方钢管混凝土柱-钢桁架结构破坏模式分析[J]. 同济大学学报(自然科学版),2015,43(4):513.  
 LI Zhiqiang, WANG Wei, CHEN Yiyi. Analysis on failure modes of the structure of steel truss-square concrete filled tubular column [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(4):513.
- [4] CHENG Jin, JIN Hui. Reliability-based optimization of steel truss truss bridges[J]. International Journal of Steel Structures, 2017, 17(4): 1415.
- [5] 张氢,霍佳雨,孙文斌,等. 包容式节点桁架多目标分层优化设计[J]. 同济大学学报(自然科学版),2019,47(2):248.  
 ZHANG Qing, HUO Jiayu, SUN Wenbin, *et al.* Multi-objective hierarchical optimization of truss girder structure with bulge formed joint[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(2): 248.
- [6] WANG Gaoxin, ZHOU Xin, DING Youliang, *et al.* Long-term monitoring of temperature differences in a steel truss bridge with two-layer decks compared with bridge codes: Case study [J]. Journal of Bridge Engineering, 2021, 26(3): 05020013
- [7] 颜海,陈亮,邵长宇,等. 公铁两用钢桁架桥原位拓宽改建设计关键技术[J]. 桥梁建设,2019,49(3):91.  
 YAN Hai, CHEN Liang, SHAO Changyu, *et al.* Key techniques of for design of in-situ widening and reconstruction of rail-cum-road steel truss bridge[J]. Bridge Construction, 2019, 49(3): 91.
- [8] 魏庆. 全焊接钢桁架桥次应力分析[J]. 铁道工程学报,2012,29(12):72.  
 WEI Qin. Analysis of secondary stress of fully welded steel truss bridges [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2012, 29(12): 72.
- [9] 刘盼,陈雁云. 钢桁架拱桥主拱提升系统的设计[J]. 公路交通科技,2018,35(S1):110.  
 LIU Pan, CHEN Yanyun. Designing of lifting system for main truss of steel truss truss bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Resetruss and Development, 2018, 35(S1): 110.
- [10] CHEN Qiang, ZHANG Yun, XIANG Huawei, *et al.* Construction control techniques of long-span steel truss truss bridges[J]. Journal of Highway and Transportation Resetruss and Development, 2015, 9(1): 35.
- [11] HAO Jinxin, SONG Yumin, ZHANG Taiyuan. Study on incremental launching construction technology of long-span continuous steel truss bridge [M]//Resilience and Sustainable Transportation Systems. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2020: 63-70.
- [12] 国家铁路局. 铁路桥梁钢结构设计规范: TB 10091—2017[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.  
 National Railway Administration of the People's Republic of China. Code for design on steel structure of railway bridge: TB 10091—2017 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017.
- [13] 谢肖礼,覃霞,欧阳平,等. 提高拱梁固结拱桥刚度的有效方法[J]. 同济大学学报(自然科学版),2019,47(6):747.  
 XIE Xiaoli, QIN Xia, OUYANG Ping, *et al.* An effective method to improve the stiffness of truss-beam fixed truss bridges [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(6): 747.
- [14] 柏华军,文望青,许三平. 基于刚度变形要求的高速铁路桥梁设计研究[J]. 世界桥梁,2020,48(S1):27.  
 BO Huajun, WEN Wangqing, XU Sanping. High speed railway bridge design based on stiffness and deformation requirements [J]. World Bridges, 2020, 48(S1): 27.
- [15] 谢肖礼,庞木林,邱辰,等. 减小大跨上承式铁路拱桥梁端转角的有效方法[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2020,43(11):1529.  
 XIE Xiaoli, PANG Mulin, QIU Chen, *et al.* An effective method for reducing rotation angle at beam ends of long-span railway deck arch bridge [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2020, 43(11): 1529.
- [16] 张坤,雷俊卿,段志. 基于改善响应面法钢箱叠合拱桥梁端转角的可靠度分析[J]. 北京交通大学学报,2013,37(4):30.  
 ZHANG Kun, LEI Junqing, DUAN Zhi. Reliability analysis on rotation angle at beam end of steel box stacked arch high-speed railway bridge based on improved response surface method [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2013, 37(4): 30.