

文章编号: 1001-4632 (2026) 02-0061-15

引用格式: 徐光兴, 刘志轩, 李朝红. 伸缩斜腹杆可展式铁路抢修梁技术方案与行车安全[J]. 中国铁道科学, 2026, 47(2): 61-75.

Citation: XU Guangxing, LIU Zhixuan, LI Chaohong. Technical Scheme and Train Operation Safety of Deployable Railway Emergency Repair Girder with Telescopic Diagonal Web Members [J]. China Railway Science, 2026, 47 (2): 61-75.

伸缩斜腹杆可展式铁路抢修梁技术方案与行车安全

徐光兴^{1,2,3}, 刘志轩^{1,2}, 李朝红⁴

(1. 石家庄铁道大学 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 河北 石家庄 050043;

2. 石家庄铁道大学 安全工程与应急管理学院, 河北 石家庄 050043;

3. 石家庄铁道大学 河北省交通应急保障技术创新中心, 河北 石家庄 050043;

4. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要: 为适应现代铁路桥梁抢修的需求, 提出一种基于可伸缩斜腹杆的可展式铁路中等跨度抢修梁技术方案。该抢修梁以可展构架单元为基本单元, 可通过斜腹杆的伸缩实现折叠与展开, 解决既有抢修梁拼组效率和储运空间不能兼顾的技术问题, 同时适应普铁、高铁桥梁的抢修要求。建立有限元分析模型和多体动力学模型, 对可展铁路抢修梁进行静力学分析和车桥耦合动力响应分析。结果表明: 可展铁路抢修梁的应力水平、位移能满足《铁路桥涵设计规范》限值要求, 客货共线铁路列车 (ZKH) 荷载作用下抢修梁各杆件应力最大; 斜腹杆布置方式对可展铁路抢修梁的极限承载力具有显著的影响, 斜腹杆倒“八”字形布置时极限承载力较高; 32 m 跨 3 种桁架配置类型中, 重型桁架抢修梁各项动力响应指标较优; 轮重减载率是控制列车运行速度的关键因素, 高铁列车通过 32 m 跨度可展铁路抢修梁的限速可控制在 $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

关键词: 铁路抢修梁; 可展结构; 静力分析; 极限承载力; 车桥耦合; 动力响应

中图分类号: U445.7 **文献标识码:** A

doi: 10.3969/j.issn.1001-4632.2026.02.06

截至 2025 年底, 我国铁路运营里程达到 16.2 万 km, 其中高铁营业里程 4.8 万 km, 铁路桥梁总数超过 9.5 万座。中国是世界上遭受自然灾害最严重的国家之一, 桥梁平时可能遭受地震、滑坡、洪水、泥石流等自然灾害的影响, 战时则是敌方重点打击目标, 对损毁的桥梁进行快速抢修历来是交通应急保障领域的重点研究课题。

我国既有铁路抢修梁从结构形式上可以分为 2 大类: 线性杆件式抢修梁包括八七型铁路应急抢修钢梁 (八七梁)、拆装式桁梁 (拆装梁) 等; 构架式抢修梁以六四式铁路军用梁 (六四梁) 为代表^[1-3]。线性杆件式抢修梁构件种类多, 拼组作业繁琐; 构架式抢修梁储运空间大, 投送运输难度高。我国目前储备的桥梁抢修器材多为 20 世纪六七十年代根据当时的技战术条件设计研发的产品^[4-5],

随着现代铁路车辆轴重及运行速度的提高, 原有抢修器材已不能完全适应现代铁路桥梁的抢修需求, 更无法满足高铁桥梁抢修的要求。

国外新型抢修梁的研究, 已经摒弃了传统装配式桥梁的设计思想, 采用一体化设计理念, 1 个桥节就是 1 个构件, 拼架速度快, 但其构件尺寸大, 限制了单车载运和空运投送能力^[6]。因此, 创新抢修梁的结构形式, 研发一种兼顾储运便利性与拼架效率、适应普铁及高铁抢修需求的抢修梁, 对于提升我国桥梁应急保障技术水平, 促进桥梁抢修器材更新换代, 具有十分重要的意义。

可展结构的概念由 Buckminster Fuller 在 1960 年率先提出^[7]。近年来, 可展结构因其具有形态可变、便于携带、容易组装等特点而被广泛应用于航空航天领域^[8-11], 同时也有学者将可展结构应

收稿日期: 2025-02-18; 修订日期: 2026-01-05

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0802207); 石家庄铁道大学研究生创新资助项目 (YC202452)

第一作者: 徐光兴 (1974—), 男, 江西上饶人, 教授, 博士。E-mail: xugx@stdu.edu.cn

用于桥梁设计。熊海贝等^[12]提出了一种新型可展拱桥方案,并通过线性与非线性屈曲分析验证了其承载能力。廖伟等^[13]提出了一种弦支剪式可展桥梁结构,对杆件的数量、截面尺寸、剪叉角等因素进行了优化设计。徐伟炜等^[14]建立了铰支剪式可展桥梁力学模型,在保证轻质量的基础上,获得了标准单元数、剪叉杆件形状系数之间的最优关系。Yu等^[15]提出了一种基于钢索加强的剪式结构可展开桥梁,与传统的无钢索剪式结构相比,所提出的可展结构承载能力和刚度得到了显著提高。Del Ama等^[16]对一座由可折叠结构的40 m跨度人行桥进行设计分析,表明其挠度及刚度满足要求。Li等^[17]设计了一种以剪切铰链单元为基本要素的可展桥梁,利用仿真软件ADAMS对可展开桥梁的展开过程进行了仿真,同时在设计荷载作用下对其承载力进行了分析。

目前关于可展桥梁的研究主要集中于永久桥梁及其承载能力分析方面,针对可展铁路抢修梁及其行车安全性的研究尚不多见。可展铁路抢修梁的结构形式、连接方式及承受荷载的方式与普通桥梁存在较大差异,为探讨其行车安全性,本文首先提出一种基于伸缩斜腹杆的可展铁路抢修梁技术方案,然后建立有限元模型和车桥耦合模型,研究其静力学性能和车桥耦合动力响应,确定抢修梁的最大通车速度。

1 可展铁路抢修梁技术方案

1.1 主要构件及连接方式

伸缩斜腹杆式可展铁路抢修梁主要包括2榀桁架结构,连接2榀桁架结构的上下平纵联及横联等,其端立面及立体图如图1所示。

与常见钢桁梁不同,本文抢修梁的桁架采用可展结构,可展构架单元为本文抢修梁的基本构件单元,每榀桁架结构由多个可展构架单元拼组而成。可展构架单元包括上弦杆、下弦杆、竖杆及斜腹杆内伸缩套、斜腹杆外伸缩套等,各杆件通过销轴连接,如图2所示。上、下弦杆为相同的杆件,采用H型断面,弦杆连接腹杆的一侧加设2道纵肋板。在节点处,两侧立板和2道纵肋板上开设销孔与竖杆连接,2道纵肋板上开设销孔与斜腹杆连接。竖杆采用箱型截面,上下分别与上、下弦杆通过钢销铰接,每个节点处均布置有内外2根竖杆。斜腹杆

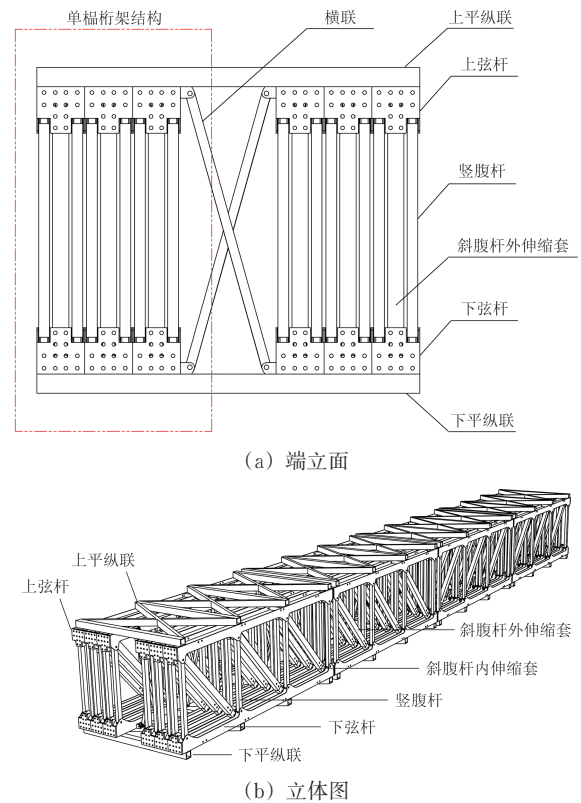


图1 伸缩斜腹杆式可展铁路抢修梁

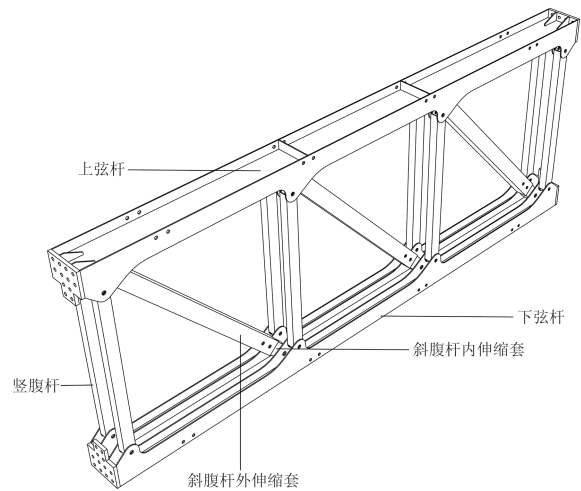


图2 可展构架单元及其组成杆件

也采用箱型截面,斜腹杆内、外伸缩套相互套设,斜腹杆内伸缩套可沿外伸缩套内壁滑动,斜腹杆内、外伸缩套分别与下弦杆、上弦杆通过钢销铰接。在同一节点处,竖杆、斜腹杆轴线的延长线交于上、下弦杆截面中心处。

若干个可展构架单元通过弦杆端部法兰板进行纵向相连,形成单片桁架,纵向连接如图3(a)所示;若干片桁架通过弦杆两侧立板进行横向相连,形成单榀桁架结构,横向连接如图3(b)所

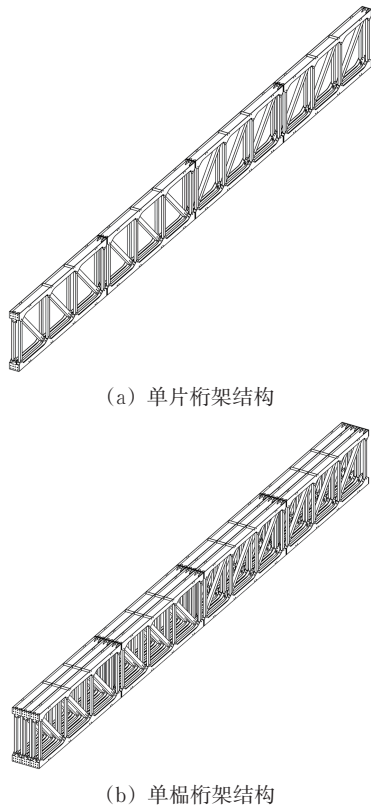


图 3 可展构架单元的拼组连接

示。通过改变纵向的可展构件单元数量、横向的桁架片数，可适应不同跨度桥梁的抢修需求。

1.2 展开方式

图 4 所示为可展构架单元的展开过程。展开时，上弦杆向上运动，斜腹杆内收缩套滑入斜腹杆外伸缩套，通过预留销孔进行固定完成展开；折叠时，解除斜腹杆销孔间的钢销连接，上弦杆向下运动完成折叠。销孔采用鸭蛋形构造，确保孔壁承压面与钢销密贴，安装时又有较大的间隙。

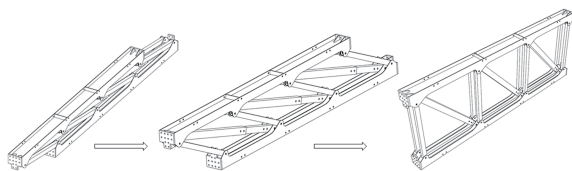


图 4 可展构架单元展开过程

图 5 所示为单片桁架结构的折叠与展开状态。若干可展构架单元沿纵向拼组成折叠方向相反的 2 部分，通过对拉机构的牵引，可完成单片桁架的展开。

1.3 技术战术特点

1) 构件种类少、拼组效率高

可展铁路抢修梁基本构件只有 2 种可展构架单元，即重型构架单元和轻型构架单元，二者外轮廓

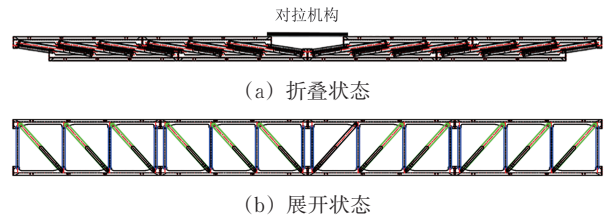


图 5 单片桁架折叠状态及展开状态

尺寸完全相同，区别在于重型构架单元弦杆断面尺寸较大。可展铁路抢修梁对比六四梁、八七梁、拆装梁的基本构件种类分别为 11，20 和 47 种，极大地减少了抢修器材编配时构件的种类数量。可展构架单元的腹杆与弦杆预先铰连在一起，通过固定斜腹杆内、外伸缩套即完成抢修梁展开，结构形式简单，需连接构件非常少，节省了拼组时间。

2) 储存运输空间小、成本低

可展铁路抢修梁有 2 种结构状态，即折叠状态和展开状态。在折叠状态下，抢修梁的斜腹杆伸长，整体竖向尺寸缩小，节省了储存空间，便于运输和存放。单个可展构架单元折叠状态占用空间 3.5 m³，而同等跨度六四梁标准三角构架占用空间 12.48 m³，采用可展铁路抢修梁可极大提高储运空间利用率。

3) 跨度适应性好、普铁高铁兼顾

我国铁路桥梁主要为中等跨度桥梁，其中标准梁跨占高铁桥梁线路长度的 95%，并且以 32 m 跨度简支梁为主^[18-19]。可展铁路抢修梁通过增减可展构架单元数量，能够适应跨度为 24，32 和 40 m 铁路桥梁的抢修。可展构架单元中各杆件通过钢销-销孔以间隙配合的方式预先连接，构架单元中间通过拉力螺栓连接，很大程度上避免了传统抢修梁普遍存在的销栓孔间隙问题，有效提高了抢修梁的刚度，进而提高了抢修梁的通车速度。抢修梁设计荷载除了抢修规范要求的东风 4 内燃机车单机随挂 70 kN·m⁻¹活载，还包括常见的高速铁路列车 (ZK) 活载与客货共线铁路列车 (ZKH) 活载。本文可展抢修梁通车速度快，承载能力强，可兼顾普铁、高铁桥梁抢修要求。

桥梁抢修器材的拼组架设效率，直接决定了应急交通保障的响应速度与整体效能，存储运输空间关系到抢修器材储备、运输成本，本文可展抢修梁兼具线性杆件式抢修梁储运空间小、构架式抢修梁拼组速度快的优点，实现了拼组效率和储运的完美统一。抢修梁主桁仅由 1 种或 2 种可展构架单元组

成, 无需端构架及其他辅助构架, 极大地减少了抢修器材编配时构件的种类。

2 抢修梁力学性能

2.1 有限元模型

可展构架单元分为重型构架单元和轻型构架单元2种, 外轮廓尺寸完全相同, 区别在于弦杆截面尺寸不同, 重型弦杆两侧立板及内部纵肋板较厚。弦杆采用H型断面, 其余杆件均采用箱型截面。各杆件截面如图6所示。杆件截面尺寸见表1。其中, 轻型弦杆与竖腹杆、斜腹杆配套组成轻型可展构架单元, 重型弦杆与竖腹杆、斜腹杆组成重型可展构架单元。以2种可展构架单元为基础拼组成为轻型桁架、重型桁架或混合型桁架, 经横联、平纵联连接成为整孔抢修梁。

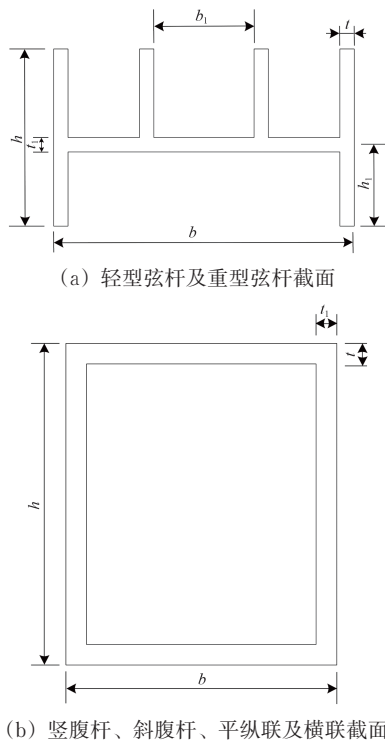


图6 杆件截面

表1 杆件截面尺寸

杆件类型	h	h_1	b	b_1	t	t_1
轻型弦杆	370	170	600	228	12	12
重型弦杆	370	170	600	210	30	30
竖腹杆	250	150			12	12
斜腹杆	250	210			12	12
平纵联、横联	100	100			12	12

为分析可展铁路抢修梁的承载能力, 探讨不同跨度下抢修梁中可展构架单元的配置方式, 采用

ANSYS软件建立了不同跨度抢修梁有限元模型。其中, 24 m跨度采用4片轻型桁架; 40 m跨度采用6片重型桁架; 32 m跨度分别采用6片轻型桁架、4片重型桁架、4片轻重混合型桁架3种类型, 32 m混合型桁架抢修梁中间2个可展构架单元采用重型, 端部2个采用轻型。不同跨度抢修梁有限元模型如图7所示, 模型参数见表2。

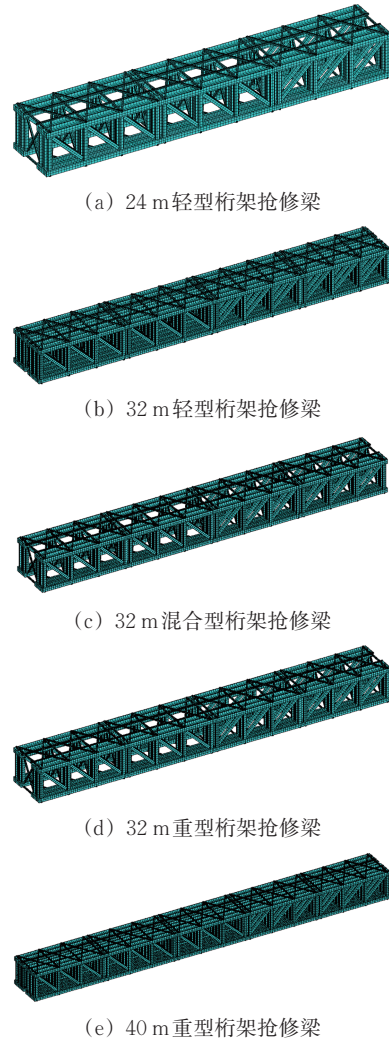


图7 不同跨度抢修梁有限元模型

表2 不同跨度有限元模型参数

跨度/m	可展构架单元数量/个	桁架数量/片	桁架类型
24	12	4	轻型
32	24	6	轻型
32	16	4	重型
32	16	4	混合型
40	30	6	重型

可展铁路抢修梁主桁架高3 m, 宽4 m, 材质为Q355D钢材, 销轴使用42CrMo钢材, 其屈服强度为930 MPa。材料参数见表3。

表 3 材料参数

钢材种类	轴向应力/MPa	弯曲应力/MPa	剪应力/MPa
Q355	240	250	145
42CrMo	558~651	558	336

利用壳单元建立上下弦杆，利用梁单元建立竖腹杆、斜腹杆、平纵联及横联，对模型进行合理的简化设计，斜腹杆内外伸缩套之间、可展构架单元之间、桁架片间的连接按刚接处理。在抢修梁两端下方各设置 1 根支座横梁，与每片桁架刚接。静力学分析计算时，一端的支座横梁约束竖向、纵桥

向、横桥向平动自由度，另一端的支座横梁约束竖向、横桥向平动自由度。

2.2 抢修梁静力学性能

进行静力学分析时，按照《铁路桥涵设计规范》^[20]（简称《规范》）规定，依据《铁路列车荷载图示》^[21]分别施加东风 4 型内燃机车单机随挂 70 kN·m⁻¹活载（简称东风 4 活载）、ZK 活载和 ZKH 活载，荷载图式如图 8 所示。列车横向摇摆力按 1 个集中荷载作用于最不利位置，以水平方向垂直线路中心线作用于抢修梁顶面，其中高速铁路取 80 kN，客货共线铁路取 100 kN。

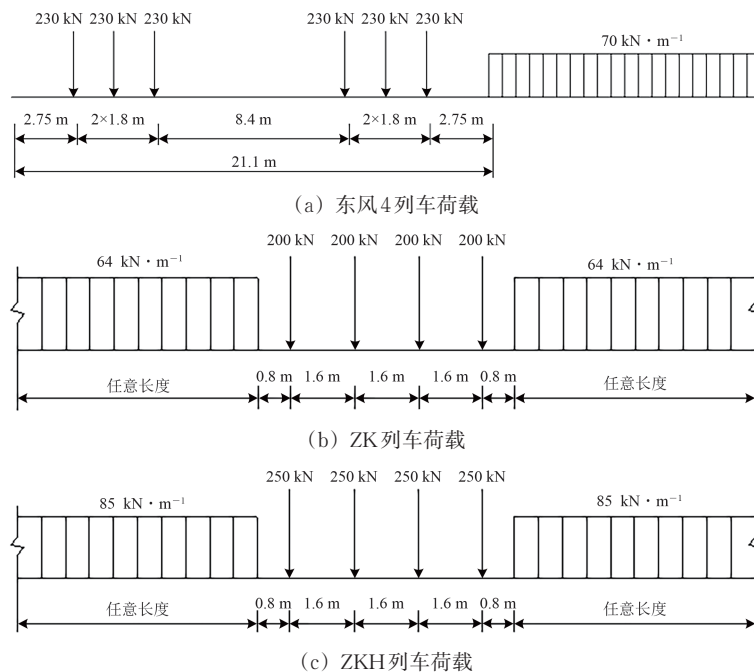
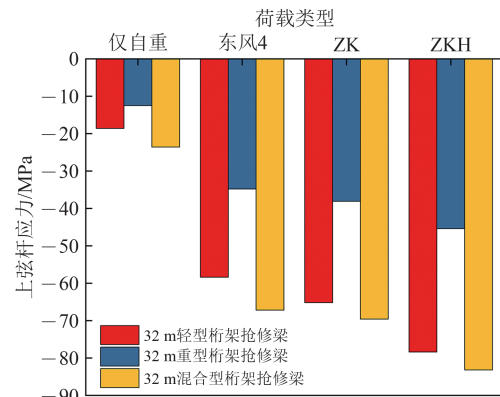


图 8 铁路列车荷载图式

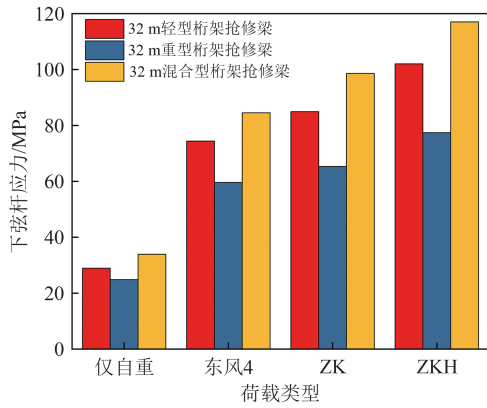
图 9 给出了不同荷载作用下，32 m 跨度抢修梁的各杆件最大应力，拉应力为正。从图 9 可以看出，自重状态下，抢修梁各杆件应力较小，依次施加东风 4，ZK 及 ZKH 活载，各杆件应力随之增大。抢修梁的下弦杆及斜腹杆整体表现为受拉状态，上弦杆及竖腹杆整体表现为受压状态。通过对比相同杆件应力可知，重型桁架抢修梁的上弦杆和下弦杆及轻型桁架抢修梁的竖腹杆和斜腹杆应力较低，而混合型桁架抢修梁的各杆件应力均较高，在 ZKH 荷载作用下，其下弦杆应力值最大，为 117 MPa，但低于 Q355D 钢材的容许应力 200 MPa。

作用下，24 m 跨度轻型桁架抢修梁的下弦杆应力达到 73.9 MPa，40 m 跨度重型桁架抢修梁的下弦杆应力达到 91.6 MPa，均低于 Q355D 钢材的容许应力。

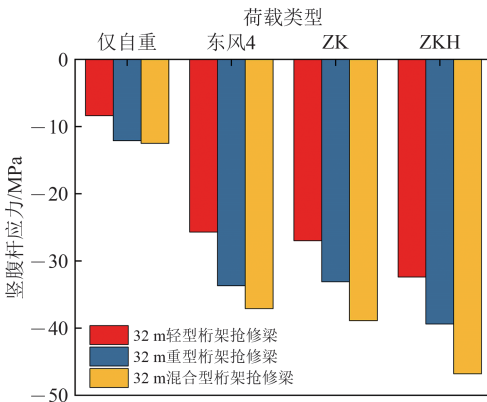
图 10 给出了不同荷载作用下，24 和 40 m 跨度抢修梁的各杆件最大应力。从图 10 可以看出，荷载类型变化时，24 和 40 m 跨度抢修梁的各杆件应力变化规律与 32 m 跨度抢修梁相同。在 ZKH 荷载



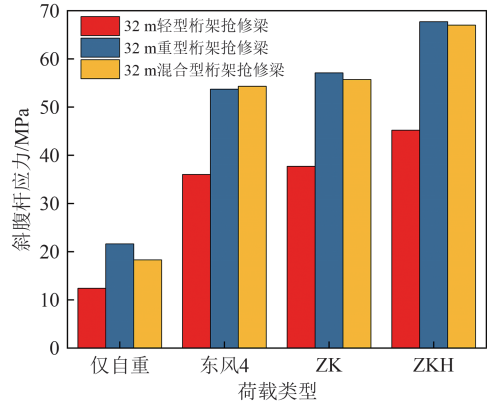
(a) 上弦杆



(b) 下弦杆

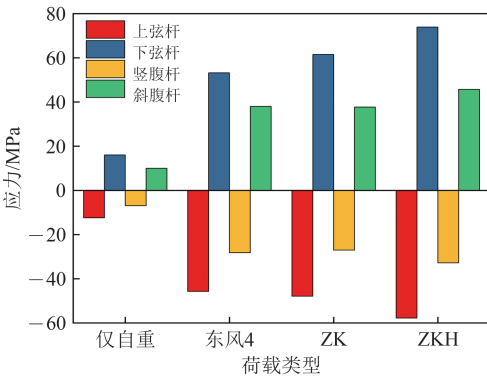


(c) 竖腹杆

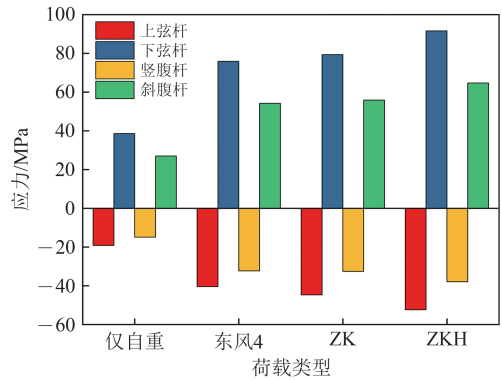


(d) 斜腹杆

图9 32 m 跨度抢修梁各杆件应力



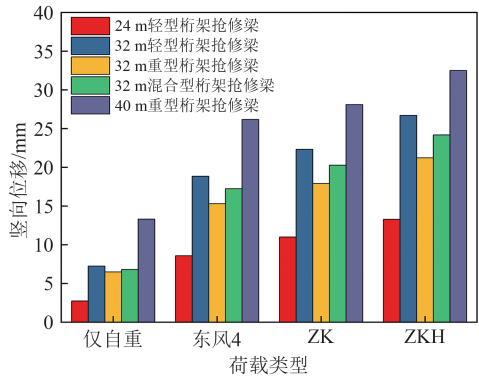
(a) 24 m 轻型桁架抢修梁



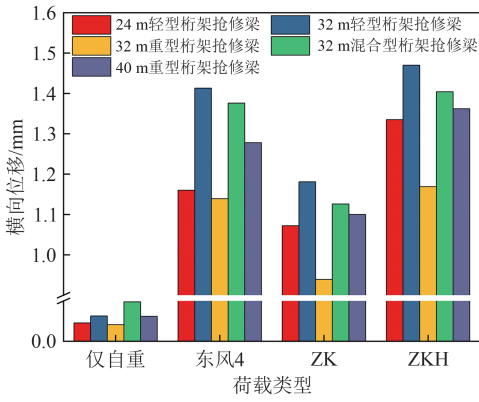
(b) 40 m 重型桁架抢修梁

图10 24和40 m 跨度抢修梁各杆件应力

图11给出了不同荷载作用下,不同跨度抢修梁的跨中竖向位移及横向位移。



(a) 竖向位移



(b) 横向位移

图11 不同跨度抢修梁位移

从图11(a)可以看出:ZKH荷载作用下抢修梁竖向位移最大,ZK荷载次之,东风4荷载最小;32 m 跨度抢修梁中,轻型桁架抢修梁竖向位移最大,混合型桁架次之,重型桁架最小;轻型桁架抢修梁在ZK荷载作用下竖向位移达到22.32 mm,在ZKH荷载作用下竖向位移达到26.70 mm,满足《规范》规定的高速铁路限值(22.85 mm)及客货

共线铁路限值 (32 mm) 要求; 24 m 轻型桁架抢修梁在 ZK 荷载作用下竖向位移达到 10.99 mm, 在 ZKH 荷载作用下竖向位移达到 13.28 mm, 满足《规范》规定的高速铁路限值 (17.14 mm) 及客货共线铁路限值 (24 mm) 要求; 40 m 跨度重型桁架抢修梁在 ZK 荷载作用下竖向位移达到 28.1 mm, 在 ZKH 荷载作用下竖向位移达到 32.5 mm, 满足《规范》规定的高速铁路限值 (28.57 mm) 及客货共线铁路限值 (40 mm) 要求。

从图 11 (b) 可以看出: ZKH 荷载作用下抢修梁横向位移最大, 东风 4 荷载次之, ZK 荷载最小; 32 m 跨度抢修梁中, 轻型桁架抢修梁横向位移最大, 混合型桁架次之, 重型桁架最小; 轻型桁架抢修梁在 ZKH 荷载作用下横向位移达到 1.47 mm, 满足《规范》规定的限值 (8 mm) 要求; 24 m 轻型桁架抢修梁与 40 m 重型桁架抢修梁横向位移在 ZKH 荷载作用下分别达到 1.34 和 1.36 mm, 均满足《规范》限值 (8 mm) 要求。

经上述分析可知, 在东风 4, ZK 和 ZKH 活载作用下, 24, 32 及 40 m 跨度 5 种桁架配置类型的可展铁路抢修梁, 其应力水平、位移均满足《规范》限值要求。下文选取 32 m 跨度抢修梁为代表进行分析研究。

2.3 不同腹杆布置方式下抢修梁的极限承载力

结构的极限荷载是指结构失效前所能承受的最大外荷载, 结构失效形式通常表现为 2 种: ①个别构件应力达到材料屈服强度的失效, 属于强度破坏; ②结构整体失稳或个别构件失稳, 属于稳定破坏。在研究桥梁极限荷载时, 将恒载视为常量, 施加的外荷载与设计活载的相对比值定义为活载系数 λ_L , 结构破坏时的活载系数即为极限荷载系数 $\lambda^{[22]}$ 。

抢修梁在临时通车时的具体荷载状况有时难以明确, 为进一步确定可展铁路抢修梁的承载能力, 同时考察不同斜腹杆布置方式对承载力的影响, 应对其极限承载能力进行分析计算。文献 [23] 验证了东风 4 随挂 $70 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 列车荷载位于不同位置的极限荷载系数, 最不利荷载工况为车头驶离钢桁梁, 随挂均载满布钢桁梁。因此本文在考虑抢修梁自重的基础上, 以此荷载工况作为基本荷载, 考虑材料非线性的影响进行极限承载力分析。

以 32 m 跨度轻型桁架抢修梁为对象, 分别建立 3 种斜腹杆布置方式的抢修梁有限元模型, 即斜腹杆呈倒“八”字形、“M”形和“八”字形。采

用理想弹塑性本构模型和 Mises 屈服准则进行力学分析, 3 种斜腹杆布置的极限荷载分别为: 倒“八”字形极限荷载系数 $\lambda=13.1$, “M”形极限荷载系数 $\lambda=12.7$, “八”字形极限荷载系数 $\lambda=12.5$ 。倒“八”字形斜腹杆抢修梁极限荷载系数较大, 其原因在于这种布置方式的斜腹杆主要承受拉力作用。

图 12 和图 13 分别给出了极限荷载下可展抢修梁和斜腹杆的等效应力云图。从图 12 和图 13 可以看出, 斜腹杆呈倒“八”字形时其等效应力达到 283 MPa, 斜腹杆呈“M”形时其等效应力达到 299 MPa, 斜腹杆呈“八”字形时其等效应力达到屈服应力 355 MPa。可见, 斜腹杆布置方式对抢修梁结构的应力分布和承载能力有直接的影响, 斜腹杆呈倒“八”字形时极限承载力较高, 腹杆应力较小, 实际应用时斜腹杆宜呈倒“八”字形布置。

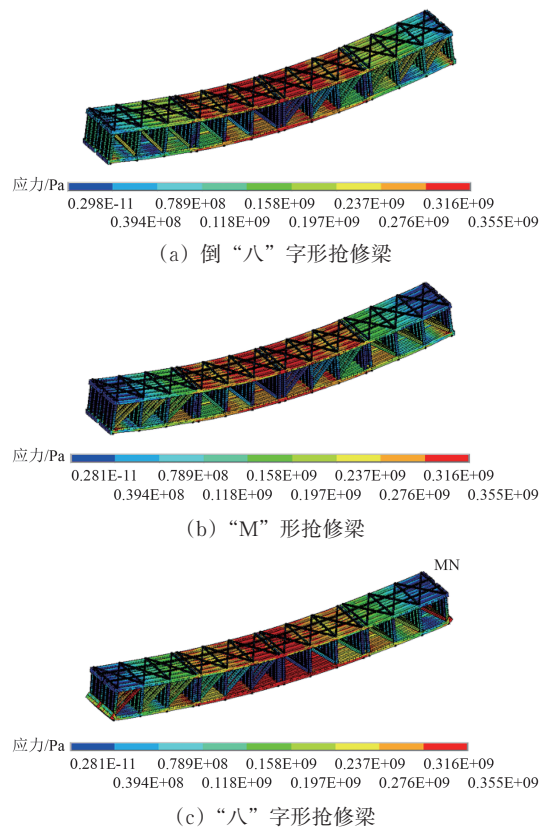
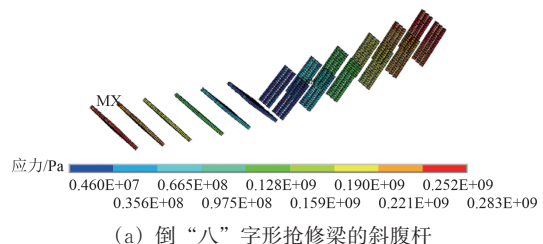


图 12 极限荷载下可展抢修梁的等效应力云图



(a) 倒“八”字形抢修梁的斜腹杆

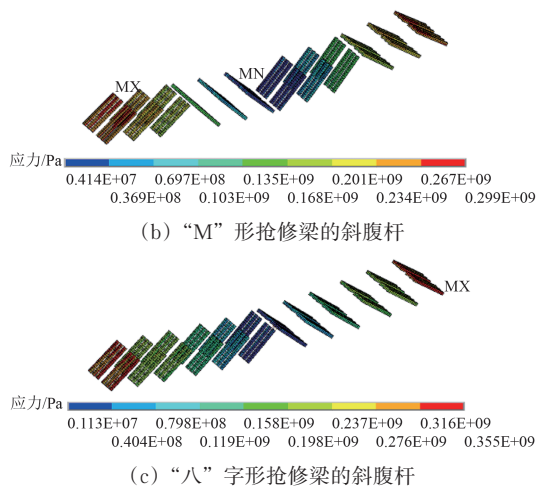


图13 极限荷载下斜腹杆的等效应力云图

2.4 抢修梁的模态分析

在桥梁工程领域，模态分析是一种评估结构动力特性的重要手段。对于抢修梁这类特殊结构，通常在紧急情况下迅速部署，承受不同于常规桥梁的列车荷载，对其进行模态分析尤为关键。

表4给出了32 m跨度3种抢修梁的前6阶自振频率。从表4可以看出，32 m跨度的轻型桁架抢修梁、重型桁架抢修梁和混合型桁架抢修梁的1阶自振频率分别为6.387、6.493和6.011 Hz，均满足《铁路桥梁检定规范》^[24]（简称《检规》）不低于3.20 Hz的限值要求。此外，表4表明重型桁架抢修梁拥有较强刚度，而混合型桁架抢修梁刚度较弱。

表4 不同截面形式抢修梁前6阶自振频率 Hz

阶数	轻型桁架抢修梁	重型桁架抢修梁	混合型桁架抢修梁
1	6.387	6.493	6.011
2	6.472	6.860	6.521
3	11.429	9.727	9.246
4	14.228	15.273	15.222
5	18.563	17.894	17.777
6	22.441	20.499	19.237

可展铁路抢修梁的静力学性能、极限承载力和模态分析结果表明，不同截面尺寸的抢修梁在不同荷载下表现出不同的应力和位移响应，其中ZKH荷载作用下抢修梁的应力及竖向位移较大。在极限承载力分析中，考虑了材料非线性和斜腹杆布置方式的影响，斜腹杆呈倒“八”字形时，抢修梁的承载能力更强，且在极限荷载下腹杆等效应力最小。模态分析显示，32 m跨度抢修梁的前6阶自振频率均满足相关要求，表明本文抢修梁刚度较好，稳定性达到要求。

3 车桥耦合性能

3.1 车桥耦合模型

采用多体动力学软件UM建立CRH380A高铁车辆模型，车体、构架、轮对均考虑为刚体，车体和转向架、转向架和轮对连接的一系、二系弹簧悬挂装置由不同力学元件相互作用来模拟。CRH380A高铁车轮踏面采用LMA踏面，车辆主要参数见表5，其他参数见文献[25]。简化的力学模型如图14所示。

表5 CRH380A列车参数

参数名称	参数取值
车辆定距(s)	17.5 m
固定轴距(d)	2.5 m
车体质量	3.4×10^4 kg
转向架质量	7.3×10^3 kg
轮对质量	1.9×10^3 kg
车轮滚动圆直径	0.86 m
轮对侧滚转动惯量(J_{wr})	6.85×10^2 kg·m ²
轮对摇头转动惯量(J_{wz})	6.85×10^2 kg·m ²
构架侧滚转动惯量(J_{br})	1.847×10^3 kg·m ²
构架点头转动惯量(J_{by})	1.249×10^3 kg·m ²
构架摇头转动惯量(J_{bz})	2.28×10^3 kg·m ²
车体侧滚转动惯量(J_{vr})	1.102×10^5 kg·m ²
车体点头转动惯量(J_{vy})	1.666×10^6 kg·m ²
车体摇头转动惯量(J_{vz})	1.572×10^6 kg·m ²
一系悬挂纵向刚度(K_{1r})	1.471×10^4 kN·m ⁻¹
一系悬挂横向刚度(K_{1y})	6.5×10^3 kN·m ⁻¹
一系悬挂垂向刚度(K_{1z})	1.735×10^4 kN·m ⁻¹
一系悬挂纵向阻尼(C_{1r})	0 kN·s·m ⁻¹
一系悬挂横向阻尼(C_{1y})	0 kN·s·m ⁻¹
一系悬挂垂向阻尼(C_{1z})	19.6 kN·s·m ⁻¹
二系悬挂纵向刚度(K_{2r})	4.58×10^3 kN·m ⁻¹
二系悬挂横向刚度(K_{2y})	8.74×10^3 kN·m ⁻¹
二系悬挂垂向刚度(K_{2z})	2.4×10^2 kN·m ⁻¹
二系悬挂纵向阻尼(C_{2r})	2.45×10^3 kN·s·m ⁻¹
二系悬挂横向阻尼(C_{2y})	59 kN·s·m ⁻¹
二系悬挂垂向阻尼(C_{2z})	10 kN·s·m ⁻¹

以32 m跨度的3种类型抢修梁为基础，斜腹杆按倒“八”字形布置，分别建立128 m共4跨简支梁模型。将桥梁作为柔性体导入UM中，通过Bushing力元与支座横梁相连模拟桥梁的简支约束，支座横梁与地面进行固定连接。采用60 kg·m⁻¹钢轨参数，将轨道视为无质量的黏弹性力元件。采用FASTSIM蠕变力模型，PARK积分算法对可展式铁路抢修梁进行动力学分析。车桥耦合模型如图15所示。

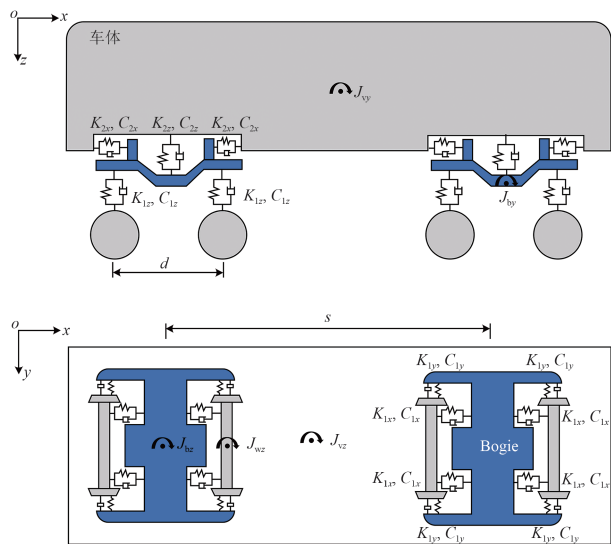


图 14 简化的力学模型示意图

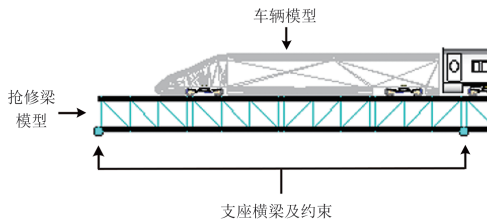


图 15 车桥耦合模型

为接近抢修梁实际轨面条件，采用美国五级轨道不平顺谱生成轨道不平顺数据。据式 (1) 一式 (4) 所给不平顺谱，拟合生成长度为 128 m 的轨道垂向及横向不平顺样本。

$$Z_L = (Z_+ + 0.5Z_-) \tag{1}$$

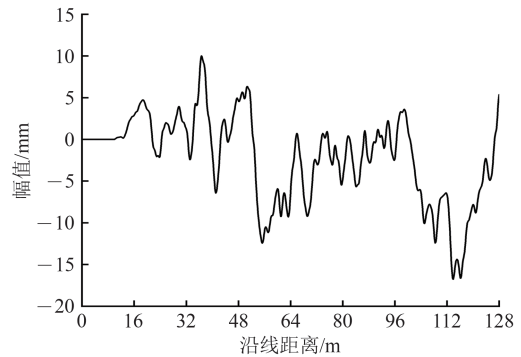
$$Z_R = (Z_+ - 0.5Z_-) \tag{2}$$

$$Y_L = (Y_+ + 0.5Y_-) \tag{3}$$

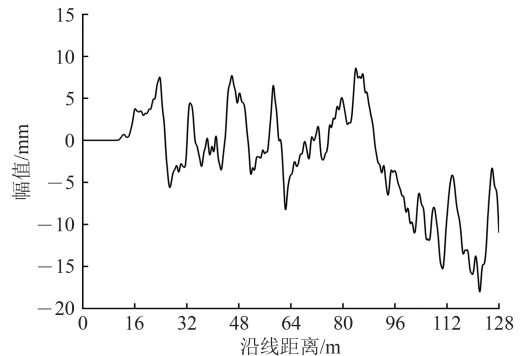
$$Y_R = (Y_+ - 0.5Y_-) \tag{4}$$

式中： Z_L 为左轨垂向不平顺； Z_R 为右轨垂向不平顺； Y_L 为左轨横向不平顺； Y_R 为右轨横向不平顺； Z_+ 为高低不平顺； Z_- 为水平不平顺； Y_+ 为方向不平顺； Y_- 为轨距不平顺。

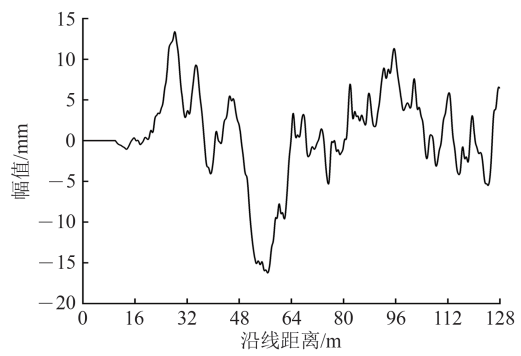
拟合得到的左右轨不平顺谱如图 16 所示。从图 16 可以看出，右轨横向不平顺最大值为 11.42 mm，左轨横向不平顺最大值为 16.23 mm，右轨垂向不平顺最大值为 18.02 mm，左轨垂向不平顺最大值为 16.67 mm。



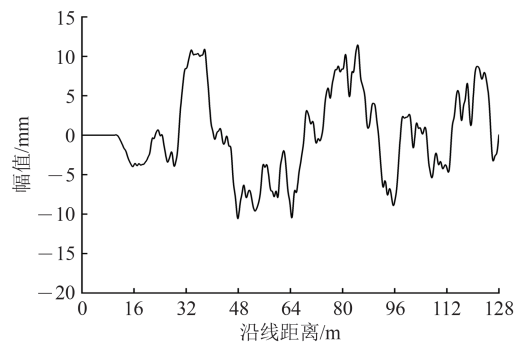
(a) 左轨垂向不平顺



(b) 右轨垂向不平顺



(c) 左轨横向不平顺

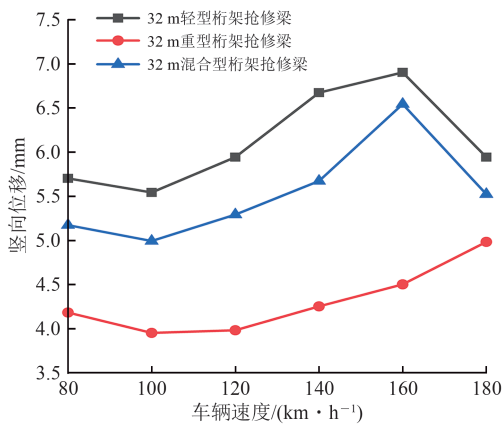


(d) 右轨横向不平顺

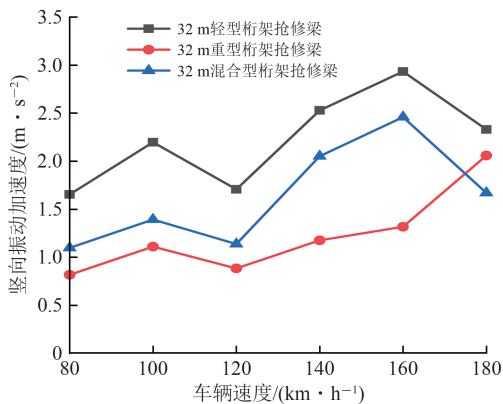
图 16 美国 5 级轨道不平顺

3.2 车桥耦合分析

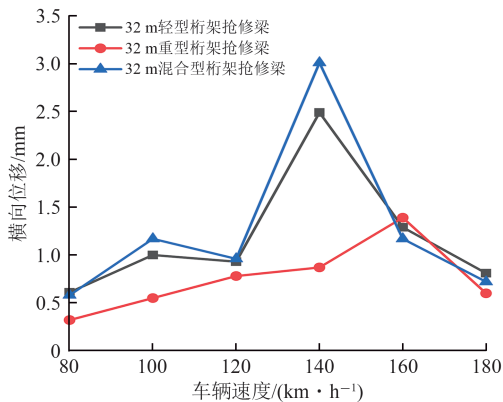
图17给出了车辆以不同速度通过抢修梁时,抢修梁跨中动力响应最大值。从图17(a)和图17(b)可以看出,随着车辆速度的增加,重型桁架抢修梁的竖向位移和竖向振动加速度呈现出逐渐增大的趋势,而轻型桁架抢修梁和混合型桁架抢修梁的竖向响应则呈先增大后减小的趋势,在车速达到 $160\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时达到峰值。在3种抢修梁中,轻型桁架抢修梁的竖向响应最大,而重型桁架抢修梁的竖向响应最小。



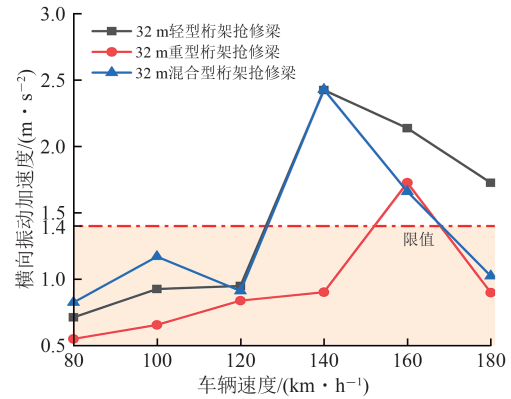
(a) 竖向位移



(b) 竖向振动加速度



(c) 横向位移

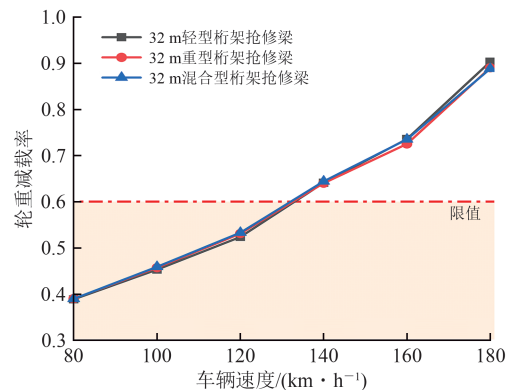


(d) 横向振动加速度

图17 抢修梁跨中动力响应最大值

从图17(c)和图17(d)可以看出,随着车辆速度的提升,3种抢修梁的横向位移和横向振动加速度先增大后减小,其中重型桁架抢修梁在 $160\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的车速下横向响应达到峰值,横向振动加速度为 $1.72\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,轻型桁架抢修梁和混合型桁架抢修梁在 $140\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的车速下横向响应达到峰值,横向振动加速度分别为 2.42 和 $2.43\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,均超出了《检规》中规定的桥面横向振动加速度不超过 $1.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 的要求。在3种抢修梁中,混合型桁架抢修梁的横向响应最大,而重型桁架抢修梁的横向响应最小。

图18给出了车辆以不同速度通过抢修梁时的安全指标最大值。从图18可以看出,抢修梁的桁架配置类型对车辆3项安全指标影响较小。随着车辆速度的提高,车辆轮重减载率、脱轨系数及轮对横向力不断增大。在车速达到 $140\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时轮重减载率超过《规范》限值,车速达到 $160\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时车辆轮对横向力超过《规范》限值。车辆轮重减载率是控制列车运行速度的关键因素,对车辆通过32 m跨度抢修梁限速 $120\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。



(a) 轮重减载率

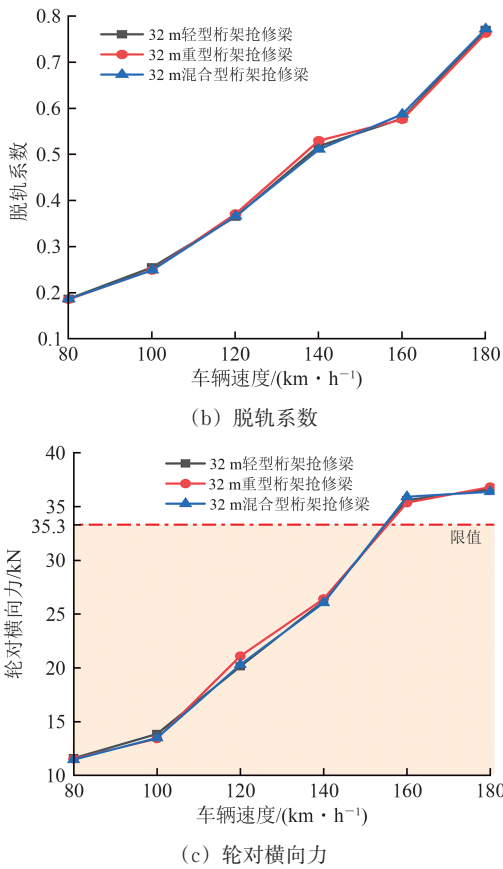


图 18 车辆安全指标最大值

图 19 给出了车辆通过轻型桁架抢修梁时，其轮重减载率随沿线距离的变化。从图 19 可以看出，在不同车速下，车辆轮重减载率均在 103 m 处达到

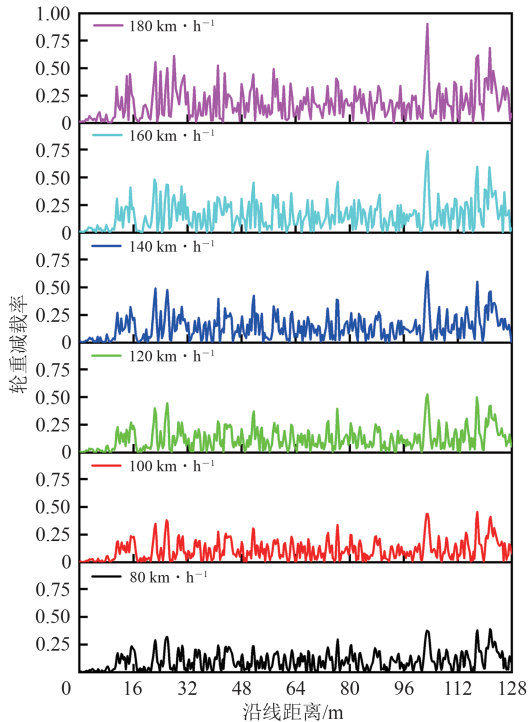


图 19 轮重减载率随沿线距离变化

峰值，车辆速度的提高对轮重减载率的峰值起到放大作用。

图 20 给出了车辆以不同速度通过抢修梁时的竖向振动加速度及横向振动加速度。从图 20 可以看出，随着车辆速度的提高，车体竖向振动加速度先增大后降低，在 140 km·h⁻¹ 时达到峰值，其中重型桁架抢修梁对车体竖向振动加速度的控制较优。随着车辆速度的提高，车体横向振动加速度不断增大，但抢修梁的桁架配置类型对车体横向振动加速度影响较小。

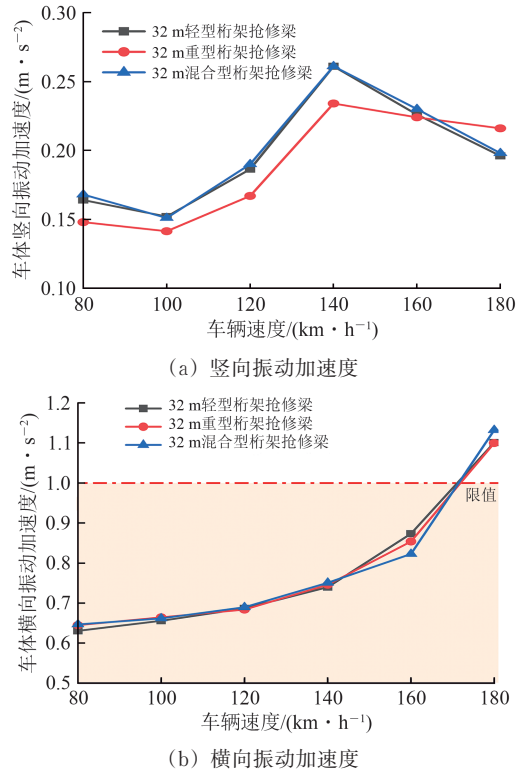


图 20 车体振动加速度响应

对比图 17 和图 20 可以发现，车体振动加速度响应小于抢修梁的振动加速度响应，并且车体竖向振动加速度减小幅度较横向振动加速度减小幅度更大。车体和抢修梁振动加速度的频域响应同样反映出这一规律，图 21 给出了车辆以 140 km·h⁻¹ 通过抢修梁时，车辆振动加速度响应及抢修梁振动加速度响应的频域曲线。从图 21 可以看出，抢修梁振动加速度响应的频域幅值明显大于车体频域幅值，出现这一现象的原因，是车辆悬挂系统减振装置发挥了减振缓冲作用。

经上述分析可知，车辆以不同速度通过时，32 m 跨度重型桁架抢修梁各项动力响应均较小。随着车速的不断提高，车辆 3 项安全指标数值不断

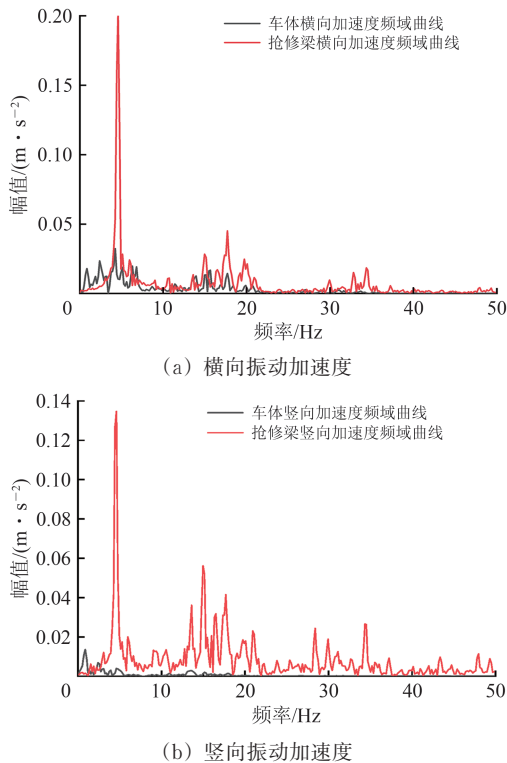


图21 车辆及抢修梁加速度频域曲线

增大,轮重减载率的限值决定了列车的最大通行速度。抢修梁的桁架配置类型对车辆3项安全指标影响较小,但重型桁架抢修梁对车体竖向振动加速度的控制较优。

4 结论

(1) 将可展结构应用于铁路桥梁抢修领域,提出的基于可伸缩斜腹杆的可展式铁路中等跨度抢修

梁,解决了既有抢修梁拼组效率和储运空间不能兼顾的技术问题。本文抢修梁构件种类少,拼组效率高,承载能力强,通车速度快,可兼顾普铁、高铁桥梁抢修要求。

(2) 静力分析结果表明,可展铁路抢修梁的应力水平、位移值均满足《规范》限值要求。ZKH荷载作用下抢修梁各杆件应力最大,ZK荷载次之,东风4荷载最小;在32 m跨度不同抢修梁桁架配置类型中,混合型桁架抢修梁的各杆件应力较高,轻型桁架抢修梁的位移响应较大。

(3) 斜腹杆布置方式对可展铁路抢修梁的极限承载力具有显著的影响。斜腹杆倒“八”字形布置时,斜腹杆主要承受拉力作用,其极限承载力较高,腹杆应力较小,实际应用时斜腹杆宜呈倒“八”字形布置。

(4) 32 m跨度不同桁架配置类型的抢修梁车桥耦合分析结果表明,随着车速的提高,轻型桁架抢修梁与混合型桁架抢修梁的各项响应呈先增长后降低的趋势。重型桁架抢修梁的竖向位移和竖向振动加速度呈现出逐渐增大的趋势,而横向位移和横向振动加速度呈先增大后减小的趋势。重型桁架抢修梁各项响应较优,轻型桁架抢修梁竖向响应较差,混合型桁架抢修梁横向响应较差。

(5) 抢修梁的桁架配置类型对车辆3项安全指标影响较小。车辆轮对横向力、脱轨系数及轮重减载率随着列车速度的提高不断增大,轮重减载率是控制列车运行速度的关键因素,CRH380A高铁列车通过32 m跨度可展铁路抢修梁的限速可以控制在 $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 及以下。

参 考 文 献

- [1] 韩金秀,郭薇薇,夏禾,等.八七型铁路应急抢修钢梁的自振特性分析[J].铁道标准设计,2010(10):71-73.
(HAN Jinxiu, GUO Weiwei, XIA He, et al. Analysis of Natural Vibration Characteristics of Steel Beams in Emergency Repair of 87 Railway [J]. Railway Standard Design, 2010 (10): 71-73. in Chinese)
- [2] 孙志星,陈士通,赵曼,等.拆装式桁梁新型钢枕桥面竖向荷载分配机制[J].吉林大学学报(工学版),2023,53(6):1669-1676.
(SUN Zhixing, CHEN Shitong, ZHAO Man, et al. Vertical Load Distribution Mechanism of New Steel Sleeper Bridge Deck Used for Assembled Truss Beam [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53 (6): 1669-1676. in Chinese)
- [3] 马遥,陈士通,赵曼,等.六四式铁路军用梁预应力加固影响因素分析[J].铁道建筑,2019,59(8):57-60.
(MA Yao, CHEN Shitong, ZHAO Man, et al. Influential Factor Analysis of Prestressing Reinforcement for 64-Type Military Railway Beam [J]. Railway Engineering, 2019, 59 (8): 57-60. in Chinese)
- [4] 徐光兴,张非凡,李朝红,等.主桁整体可展铁路抢修梁研究[J].中国铁道科学,2023,44(5):69-80.

- (XU Guangxing, ZHANG Feifan, LI Chaohong, et al. Research on Railway Emergency Repair Beam with Integral Deployable Main Truss [J]. *China Railway Science*, 2023, 44 (5): 69-80. in Chinese)
- [5] 张曷熹. 铁路桥梁抢修器材应急保障能力现状与思考[J]. *国防交通工程与技术*, 2020, 18(6):30-33.
(ZHANG Zhuxi. My Reflection on the Current Situation of the Emergency Support Capability of Rush-Repair Equipment of Railway Bridges [J]. *Traffic Engineering and Technology for National Defence*, 2020, 18 (6): 30-33. in Chinese)
- [6] RUSSELL B R, THRALL A P. Portable and Rapidly Deployable Bridges: Historical Perspective and Recent Technology Developments [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2013, 18 (10): 1074-1085.
- [7] 蔡建国,王玉涛. 新型可展与折叠结构研究进展[J]. *工程力学*, 2022, 39(增1):1-8.
(CAI Jianguo, WANG Yutao. Novel Developable and Foldable Structures [J]. *Engineering Mechanics*, 2022, 39 (Supplement 1): 1-8. in Chinese)
- [8] 李博,王三民, TAN U-Xuan. 太空中平面线性均匀剪式单元可展结构受压状况下的屈曲分析[J]. *中国科学:技术科学*, 2020, 50(11):1529-1530.
(LI Bo, WANG Sanmin, TAN U-Xuan. Buckling Analysis of Planar Linear Uniform Deployable Structures Consisting of Scissor-Like Element in Space under Compression [J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2020, 50 (11): 1529-1530. in Chinese)
- [9] 田大可,郭振伟,金路,等. 模块化可展天线机构展开动力学建模与运动规划[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(17):56-66.
(TIAN Dake, GUO Zhenwei, JIN Lu, et al. Deployment Dynamics Modeling and Motion Planning of Modular Deployable Antenna Mechanism [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59 (17): 56-66. in Chinese)
- [10] 金路,李勃衡,田大可. 大口径网面空间可展开天线结构撞击动力响应研究[J]. *工程力学*, 2023, 40(增1):276-282.
(JIN Lu, LI Boheng, TIAN Dake. Impact Dynamic Response Research on Large Aperture Space Deployable Antenna with Cable-Mesh [J]. *Engineering Mechanics*, 2023, 40 (Supplement 1): 276-282. in Chinese)
- [11] 王晓情,杨天洋,张祎贝,等. 重复折叠后 SMPC 可展桁架阵面天线模态试验与分析[J]. *振动与冲击*, 2023, 42(4): 306-311.
(WANG Xiaoqing, YANG Tianyang, ZHANG Yibei, et al. Modal Tests and Analysis of SMPC Deployable Truss Array Antenna after Repeated Folding [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42 (4): 306-311. in Chinese)
- [12] 熊海贝,宋依洁. 一种新型可展拱桥的探索[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2018, 45(1):19-25.
(XIONG Haibei, SONG Yijie. Design and Application of New Deployable Bridge [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2018, 45 (1): 19-25. in Chinese)
- [13] 廖伟,徐伟伟. 弦支剪式可展桥参数化分析及优化设计[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2022, 43(11):1623-1629.
(LIAO Wei, XU Weiwei. Parametric Analysis and Optimization Design of Cable Supported Scissor-Like Deployable Bridge [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2022, 43 (11): 1623-1629. in Chinese)
- [14] 徐伟伟. 集中荷载下固定铰支剪式可展桥梁结构分析与参数优化[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2022, 52(6):1063-1070.
(XU Weiwei. Structural Analysis and Parameter Optimization of Fixed Hinged Scissor Deployable Bridges under Point Load [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2022, 52 (6): 1063-1070. in Chinese)
- [15] YU X M, YANG Y H, JI Y X, et al. Experimental Study on Static Performance of Deployable Bridge Based on Cable-Strengthened Scissor Structures [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021 (1): 4373486.
- [16] DEL AMA F, MOLINA M, CASTILLA M I, et al. Numerical Simulation and Experimental Study of a Deployable Footbridge [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 603 (2): 022101.
- [17] LI Q Y, YUAN J H, SUN H T, et al. Design of a New Type of Deployable Bridge [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 926 (1): 012026.
- [18] 廖立坚,杨新安,苏伟,等. 基于标准跨径的铁路桥梁孔跨匹配与条件优化方法[J]. *铁道学报*, 2023, 45(11):164-172.
(LIAO Lijian, YANG Xin'an, SU Wei, et al. Span Matching and Condition Optimization Method for Railway Bridges Based on Standard Spans [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2023, 45 (11): 164-172. in Chinese)

- [19] 魏剑峰, 嵯一, 邢雨, 等. 高速铁路调跨简支箱梁足尺破坏试验与数值模拟研究[J]. 铁道学报, 2023, 45(3): 1-8.
(WEI Jianfeng, ZHUO Yi, XING Yu, et al. Destructive Experiment and Numerical Simulation of Full Scale Span Adjusting Simply Supported Box Girder of High-Speed Railway [J]. Journal of the China Railway Society, 2023, 45 (3): 1-8. in Chinese)
- [20] 国家铁路局. TB 10002—2017 铁路桥涵设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
(National Railway Administration of the People's Republic of China. TB 10002—2017 Code for Design on Railway Bridge and Culvert [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017. in Chinese)
- [21] 胡所亭, 魏峰, 王丽, 等. 《铁路列车荷载图式》制定研究[J]. 中国铁路, 2017(4): 1-7.
(HU Suoting, WEI Feng, WANG Li, et al. Development and Research of Train Load Schema [J]. Chinese Railways, 2017 (4): 1-7. in Chinese)
- [22] 赵曼, 陈士通, 孙志星, 等. 128 m大跨度铁路应急钢桁梁极限荷载[J]. 中国铁道科学, 2021, 42(5): 85-93.
(ZHAO Man, CHEN Shitong, SUN Zhixing, et al. Ultimate Load of 128 m Large Span Railway Emergency Steel Truss Girder [J]. China Railway Science, 2021, 42 (5): 85-93. in Chinese)
- [23] 赵曼, 陈士通, 孙志星, 等. 新型大跨铁路应急钢桁梁稳定性研究[J]. 铁道学报, 2022, 44(1): 119-127.
(ZHAO Man, CHEN Shitong, SUN Zhixing, et al. Study on Stability of New Long-Span Railway Emergency Steel Truss Girder [J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44 (1): 119-127. in Chinese)
- [24] 中华人民共和国铁道部. 铁运函[2004]120号 铁路桥梁鉴定规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.
(Ministry of Railways of the People's Republic of China. Letter of Railway Transportation [2004] No.120 Code for Rating Existing Railway Bridges [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2004. in Chinese)
- [25] ZHANG F F, XU G X, LI Z H, et al. Vehicle-Bridge Interaction Analysis and Maximum Allowable Speed of a Deployable Emergency Repair Beam [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2023, 27 (10): 4332-4351.

Technical Scheme and Train Operation Safety of Deployable Railway Emergency Repair Girder with Telescopic Diagonal Web Members

XU Guangxing^{1,2,3}, LIU Zhixuan^{1,2}, LI Chaohong⁴

(1. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang Hebei 050043, China;

2. School of Safety Engineering and Emergency Management, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang Hebei 050043, China;

3. Hebei Engineering Innovation Center for Traffic Emergency and Guarantee, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang Hebei 050043, China;

4. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang Hebei 050043, China)

Abstract: To meet the requirements of modern railway bridge emergency repair, a technical scheme for a deployable medium-span emergency repair girder based on telescopic diagonal web members is proposed. The girder utilizes deployable frame units as its basic components, enabling folding and deployment through the extension and retraction of the diagonal web members. This design resolves the technical challenge of balancing assembly efficiency with storage and transportation space in existing repair girders, while also meeting the emergency repair demands of both conventional-speed and high-speed railway bridges. Finite element analysis models and multi-body dynamics models are established to conduct static analysis and vehicle-bridge coupled

dynamic response analysis on the deployable railway emergency repair girder. The results indicate that the stress levels and displacements of the deployable repair girder meet the limit requirements of the “Code for Design on Railway Bridge and Culvert”. The member stresses are highest under the loading of mixed passenger and freight railway traffic. The arrangement of the diagonal web members significantly influences the ultimate bearing capacity of the deployable girder, with the inverted V-shaped configuration yielding a higher ultimate bearing capacity. Among the three truss configurations for the 32 m span, the heavy truss emergency repair girder exhibits superior dynamic response indices. The wheel load reduction rate is identified as the key factor controlling train speed, and the speed limit for high-speed trains crossing the 32 m span deployable railway emergency repair girder can be controlled at $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

Key words: Railway emergency repair girder; Deployable structure; Static analysis; Ultimate bearing capacity; Vehicle-bridge coupling; Dynamic response

(责任编辑 王蕴嘉)