

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.205



箱梁与缆索承重桥梁理论 2020 年度研究进展

白伦华, 沈锐利, 苗如松, 张兴标, 王路

(西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

摘要:在以大跨、轻质、高强为标志的现代桥梁结构中,箱梁与缆索承重桥梁结构是两大重要的分支。笔者曾系统综述其相关理论的 2019 年研究进展,具体包括波形钢腹板箱梁理论、传统箱梁空间分析理论、多塔悬索桥缆鞍相互作用、缆索承重桥梁极限承载力及 UHPC 技术在缆索承重桥梁中的应用 5 个方面,为了及时掌握相关的研究动态,对 2020 年关于以上内容的相关研究进行梳理与总结,并增加了缆索承重桥梁体系的最新发展。研究结果表明,结构体系的持续创新为精细化箱梁与缆索承重桥梁理论的不断深化提供了契机。

关键词:桥梁结构分析理论;箱梁;缆索承重桥梁;非线性分析理论;研究进展

中图分类号:U441 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2022)01-0043-10

State-of-the-art review of box girder and cable-supported bridge analysis theories in 2020

BAI Lunhua, SHEN Ruili, MIAO Rusong, ZHANG Xingbiao, WANG Lu

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China)

Abstract: Modern bridges is symbolled by long-span, light-weight and high-strength, of which the box girder and cable-supported bridges are two important parts. To that point, the corresponding research progress in 2019 of the related theories is summarized by the authors, including the theory of the new box girder with corrugated steel webs and traditional box girder, the interaction between cable and saddle in multi-tower cable bridge, the ultimate load capacity of cable-supported bridges, and application of UHPC technology in cable-supported bridges. A review is made to further understand the research trends of the above five aspects in 2020. In addition, the recent development of the cable-supported bridges is discussed. It is concluded that as the emergency of the new structural forms the refined analysis theory of box girder and cable-supported bridges have new opportunities to extend.

Keywords: bridge structure analysis theories; box girder; cable-supported bridge; nonlinear analysis theory; research progress

在对箱梁与缆索承重桥梁理论 2019 年度研究进展进行总结后^[1],波形钢腹板箱梁理论、传统箱梁理论、多塔悬索桥中塔效应及桥梁极限承载力的研究和工程进展在 2020 年又取得了新的丰硕研究成果,从研究内容来看,也再次见证了结构体系的创新作为桥梁结构工程学科进步的根本源动力。随着一批新型桥梁结构体系的提出及实施,可能将桥梁结构分析理论的发展带到了新一轮“概念设计-精细化分析-工程应用”的研究模式。在形式上,它们维持了传统结构形式的基本构形,但在构思的传力体系及实际的空间维度方面取得

了进一步的发展,相应地,分析理论紧跟其发展。也有新的理论方法正在逐渐向桥梁工程方向推广和应用,例如,传递矩阵法应用与连续刚构桥的弹塑性分析^[2],近场动力学应用于桥面疲劳分析^[3]。

笔者搜集了 2020 年对箱梁与缆索承重桥梁理论的研究文献,对其进行系统回顾与总结,把握各分支问题的理论发展进程,探讨了后续研究需要努力的方向。

1 箱梁分析理论

从剪力滞行为、扭转性能、横向受力等方面综述波形钢

收稿日期:2021-07-05

基金项目:2019 年度交通运输行业重点科技项目清单(2019-MS1-011)

作者简介:白伦华(1990-),男,博士,助理研究员,主要从事大跨径桥梁理论研究,E-mail:bailunhua@163.com。

沈锐利(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:rlshen@163.com。

腹板箱梁及其他形式箱梁的理论研究进展。

1.1 波形钢腹板箱梁理论

Zhou 等^[4]提出了一种修正杆比拟模型,对变截面波形钢腹板箱梁的剪力滞进行了研究,将比拟杆法与精细化有限元模型进行了对比验证,随后采用该方法研究了宽跨比、梁端高度比、底板曲线及荷载形式对变截面波形钢腹板箱梁剪力滞的影响。秦翱翱等^[5]分别假定箱梁翘曲位移函数为二次抛物线与余弦函数,基于最小势能原理,求解单箱双室箱梁的剪力滞效应,并与试验和精细化有限元模型分析结果比较,验证了方法的可靠性。王力等^[6]考虑了钢-混接触面滑移变形和全截面高阶剪切变形效应,利用最小势能原理推导了波形钢腹板组合箱梁等参有限元行列式,单元为 8 自由度模型,通过与 1:5 实桥缩尺模型试验结果及有限元结果的对比,对理论模型进行了验证,并讨论了连接件剪切刚度、跨高比、波形钢腹板型号和子梁高度比等对波形钢腹板箱梁挠度的影响规律。Chen 等^[7]对桁式底板波形钢腹板箱梁的弯曲性能开展了试验研究与数值模拟,研究对象是两个缩尺比为 1:5 的实桥模型。赵虎等^[8]采用空间梁格模型研究了波形钢与混凝土混合多室斜拉桥的剪力滞效应,背景桥梁截面为单箱五室结构,仅中间箱室采用混凝土腹板,其余采用波形钢腹板,研究表明,剪力滞系数较常规截面偏小。

Zhang 等^[9]对两个单箱单室波形钢腹板箱梁进行了扭转试验研究。Zhu 等^[10]则对 4 个缩尺的单箱多室波形钢腹板箱梁的纯扭行为进行了试验研究与数值模拟,并探讨了箱室数量及波形钢腹板间距的影响。周聪等^[11]及魏娜等^[12]对波形钢腹板箱梁扭转行为的解析计算方法进行了研究。

赵品等^[13]以室内试验、有限元分析结合理论推导来探讨混凝土桥面板承托的设置对波形钢腹板箱梁桥面板横向受力的影响,结果表明,设置承托会适当降低横向应力。乔鹏等^[14]通过试验与有限元法对比研究了单箱单室、双室、三室波形钢腹板箱梁的横向应力和有效分布宽度的规律,并对一系列结构参数进行敏感性分析,提出了适用于单箱多室波形钢腹板箱梁横向受力的有效分布宽度计算公式,并通过实例进行了验证。

Zhou 等^[15-19]对考虑转移效应(Resal effect)的变截面波形钢腹板箱梁剪切行为进行了系列报道,它是指桥墩对主梁的竖向剪力部分会通过受压底板的轴力来抵抗,使截面需要抵抗的实际剪力降低,如图 1 所示。图 2、图 3 分别为不同底板曲线的变截面波形钢腹板箱梁剪切试验情况。研究表明,若不考虑这种转移效应,在计算剪力时会过于保守。值得一提的是,文献[18]受昆虫独角仙翅膀结构造型的启发(图 4),对传统波形钢腹板提出了改进策略,在波折拐点进行了局部加强(图 5),通过有限元模型的对比分析,表明改进型波形钢腹板具有更优越的受力性能。该改进型波形钢腹板经过了概念提出与理论分析,但在正式投入使用前仍需进行加工制造、成本效益比较及其他多项力学性能的研究。

1.2 其他形式箱梁空间分析理论

樊健生等^[20]对钢-超高性能混凝土组合箱梁弹性弯曲性

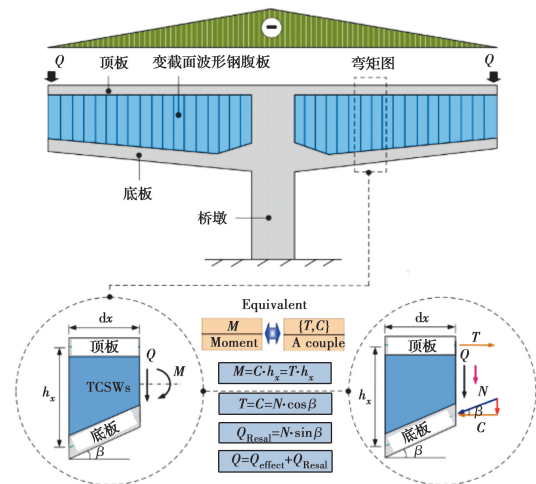


图 1 变截面波形钢腹板箱梁刚构桥抗剪转移效应

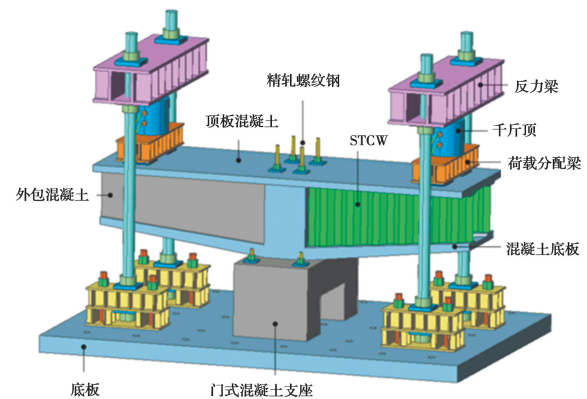


图 2 变截面波形钢腹板箱梁(底板曲线按直线变化)受剪试验

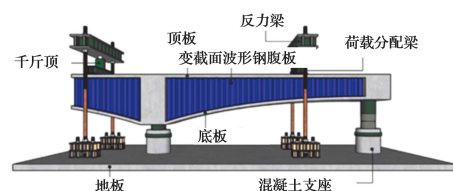


图 3 变截面波形钢腹板箱梁(底板曲线按抛物线变化)受剪试验

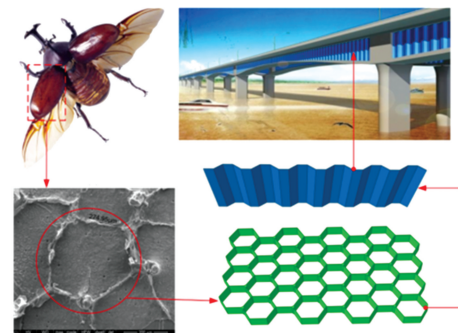


图 4 昆虫独角仙翅膀微观结构与波形钢腹板结构的相似性^[18]能进行了试验研究及解析推导,所研究的组合箱梁为钢槽梁+UHPC 桥面板的新型组合梁。解析模型中考虑剪力滞后、

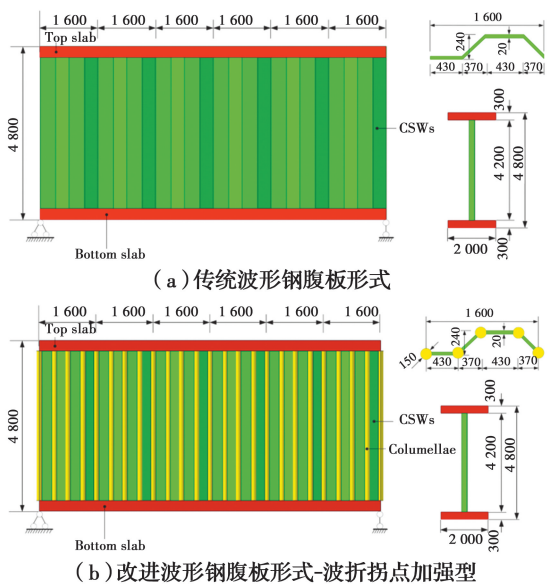


图5 基于独角仙翅膀结构的改进型波形钢腹板^[18]

滑移效应及钢板剪切变形的影响,通过与试验及有限元结果对比,表明对钢板剪切变形的考虑可以提高解析模型的计算精度。He等^[21]基于虚功原理建立了可考虑轴向平衡及剪切变形的箱梁剪力滞计算方法。潘旦光等^[22]基于结构动力学中的Ritz向量叠加法基本原理,建立了求解静力学中变高度简支箱梁剪力滞效应半解析解的分析方法,该法的优点在于将动力方法用于求解静力问题,并且该法在计算上是微分方程转化为代数方程进行求解的。张玉元等^[23]为了分析梗腋对箱梁剪力滞效应的影响,选取剪力滞效应引起的挠度变化为广义位移,在引入梗腋特性参数的基础上,运用能量变分法建立了考虑梗腋影响的箱梁剪力滞效应控制微分方程,结合边界条件导出了集中、均布荷载作用下考虑梗腋影响的简支箱梁剪力滞效应解析解。安平和等^[24]对箱梁剪力滞翘曲位移函数理论进行了研究。Yan等^[25]对预制节段混凝土箱梁的弯曲行为进行研究,推导了10自由度的可考虑剪力滞的梁单元模型。

马驰等^[26]考虑了剪切变形的影响,对传统计算横向分布系数的偏心压力法、修正偏心压力法及刚接梁法进行了改进,并对一座多梁式波形钢腹板组合箱梁桥的挠曲变形进行了测试,验证了所提模型的准确性,并提出改进偏心压力法及刚接梁法的适用范围。虞子楠等^[27]建立了考虑抗扭性能影响的多梁式矮箱梁荷载横向分布计算方法,并通过某实际桥跨中偏载、中载测试结果及有限元梁格模型结果得到验证,结果表明,考虑抗扭性能的刚接梁法比传统刚接梁法更接近实际情况。邬晓光等^[28]提出了弹性支撑无推力框架计算方法,以提高宽幅装配式箱梁桥荷载横向分布系数计算的准确性与适用性。Kong等^[29]对多箱梁组合桥的横向分布系数进行了研究,采用刚性铰接法研究了横向分布系数影响线,并在AASHTO推荐的横向分布系数计算公式的基础上做了进一步改进,改进后对120座桥梁进行计算,发现改进公式的误差更小。

此外,对箱梁约束扭转及混凝土桥梁失效也有相关研究

报道。杨霞林等^[30]推导了钢桁腹式混凝土组合箱梁的约束扭转控制微分方程。Li等^[31]建立了用于单室或多室箱梁扭转分析的有限梁单元模型。Wang等^[32]对一座混凝土连续刚构桥底板失效进行了实测与三维精细化数值模拟研究,并提出了钢板加固方法。

箱梁理论的研究表明:1)波形钢腹板箱梁理论在进一步完善中,较2019年的变截面波形钢腹板箱梁及单箱多室波形钢腹板箱梁而言有更多的研究内容,但仍然侧重于剪力滞后、约束扭转及横向内力三个方面,且研究对象较多集中在梁式桥;2)另外有变截面波形钢腹板连续刚构桥的剪切行为研究,比较细致地探讨了底板轴力对剪力的补偿效应,对波形钢腹板在连续刚构桥中的剪切行为有更深入的认识;3)基于仿生结构的改进型波形钢腹板,进一步发展了波形钢腹板的形式,由此开展多样组合结构再创新是能预测的,一系列涉及加工制造、分析理论及试验技术的新课题会被提上日程;4)对组合箱梁分析理论再考虑剪切变形、扭转效应及钢-混截面的滑移效应,进一步细化了组合箱梁精细化分析方法,一些研究也开发了相应的多自由度、高精度的有限元梁单元模型;5)研究中所涉及的试验试件较多地取材于实际工程,各研究彼此独立开展,缺乏试验操作统一性,一些同类型试验可以参照文献^[29]的介绍,形成专用的桥梁数据库,以备后续研究使用,便于形成理论校核的统一数据来源。

2 缆索承重桥梁分析理论

多塔悬索桥理论、极限承载力理论、UHPC加固技术及应用、缆索承重桥梁体系的研究是缆索承重桥梁分析理论的热点问题,以下对其进行回顾与讨论。

2.1 多塔悬索桥理论

高文丽^[33]对悬索桥主缆钢丝动态接触与滑移行为开展了研究,其研究角度更微观。首先从微动滑移的观点出发,对主缆与鞍槽的相互作用认识到在主缆出现不平衡力时,内部钢丝、钢丝与鞍槽底部及钢丝与鞍槽侧面隔板之间会出现微滑移状态,通过调整后寻找整个缆鞍系统新的平衡状态。在方法上,首先对索股及鞍槽整体进行三维实体有限元模型(图6)分析,确定出钢丝与鞍槽底板及侧隔板的接触作用力范围,从而设计出试验荷载,然后以高精密的试验装置(图7)来测试钢丝与钢丝、侧隔板及鞍槽底部之间的动态滑移行为。在一系列钢丝间、钢丝与侧隔板及鞍槽底部间的滑移曲线、变形的测试结果方面,量级均以 μm 计。研究成果不仅考虑了实际桥梁的工程应用,更重要的是获得了大量的钢丝摩擦基本性能。

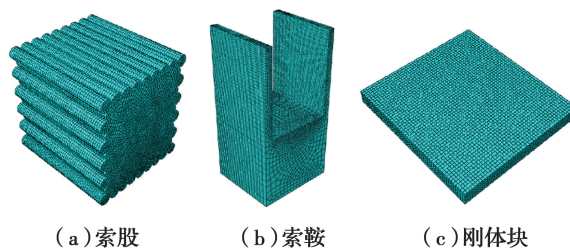


图6 索股与鞍槽相互作用有限元模型^[33]

针对双缆多塔悬索桥,Zhang等^[34]提出了一种新型鞍槽

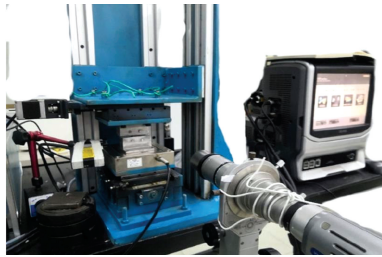


图 7 钢丝动态接触与滑移试验装置^[33]

系统,如图 8 所示,并基于理论公式与数值模拟研究了主缆抗滑安全性。在研究结论中,强调了主缆的抗滑安全性随中塔刚度的增加而增加,致使双缆多塔悬索桥不再有中塔效应的制约。

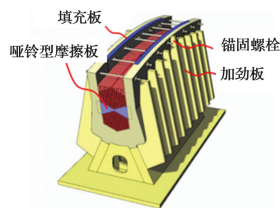


图 8 带哑铃型摩擦板的双主缆鞍槽

Zhang 等^[35]基于钢丝层面研究了单根索股的摩擦特性,索股为 37 丝规格。在数值模型中,采用梁单元模拟钢丝、实体单元模拟鞍槽,钢丝与钢丝之间按线线接触,而钢丝与鞍槽之间采用线面接触,如图 9 所示。计算模型经试验验证后,分别研究了侧板与底板抗滑配比及摩擦系数与滑移量的关系。另一方面,Zhang 等^[36]采用推导的理论模型研究了鞍槽内的主缆分层滑移,结果表明,竖向摩擦板的设置可能加剧单根索股抗滑力分布的不均匀性。张清华等^[37]提出了主缆与鞍座间摩擦抗力评估的混合解析数值法,该方法考虑了主缆力沿鞍槽弧长的变化,并按缆鞍平面有限元模型计算主缆与鞍槽的压力,并反推某一平面内的摩擦抗力,最后沿鞍槽弧长进行积分(累加计算)。所采用的缆鞍平面有限元模型为平面应变模型。

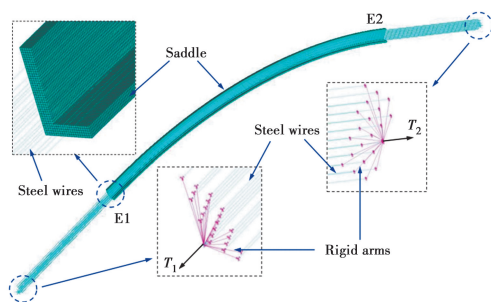
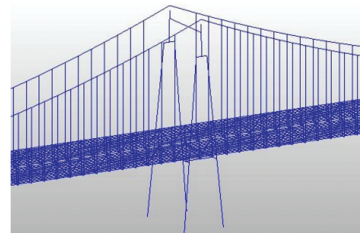


图 9 基于梁-实体单元的缆鞍系统有限元模型

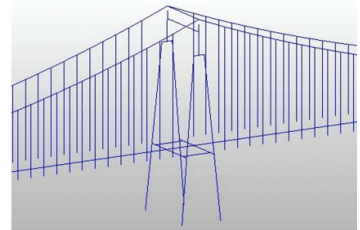
为研究主缆与鞍槽间的侧压力特征,Wang 等^[38]从钢丝离散体的新视角提出了用于分析缆-鞍系统侧向力的离散化分析模型,并对摩擦系数、附加压力、排列方式和钢丝直径等进行了详细的敏感性分析,明确了实际中可能存在的鞍槽横向间隙对侧向力的影响有限,侧向力与摩擦系数呈负相关关系,附加压力可以对侧压力的分布具有很大且规律的影响。最后以泰州长江大桥为例,利用所提分析模型开展了案例研

究,分析表明,侧面摩阻对于提高缆-鞍系统的抗滑能力具有显著作用,而在鞍座内增设竖向摩擦板是进一步发挥侧阻抗滑效力的有效途径。

Cheng 等^[39]基于有限元模型导出了多塔悬索桥中塔刚度对抗滑系数及挠跨比的影响曲线,并给出了摩擦系数 $\mu = 0.28 \sim 0.3$ 时中塔的合理刚度取值范围。选取的背景桥梁为温州瓯江北口桥,建立的有限元模型分别为主梁全桁架模拟的全桥模型及主梁按单梁模拟的全桥模型,如图 10 所示,模型之间相互对比验证,并用后者完成了主梁刚度变化的相关讨论。Zhang 等^[40]提出了非等跨多塔悬索桥主缆找形算法,并研究了热效应对主缆线形的影响。



(a) 桁架主梁的全桥模型



(b) 简化主梁为单梁的全桥模型

图 10 多塔悬索桥杆系有限元模型

以上研究表明,2020 年关于多塔悬索桥中塔效应问题的研究内容十分丰富,研究视角较广,涵盖了基于体系、索股的宏观尺度、钢丝细观尺度及钢丝表面微摩擦的微观尺度,呈现出多维、多尺度、多学科交叉的研究特征,但仍需在一些方面继续深化:1) 缆鞍系统的有限元分析方法还不够完善,分析中一般是对模型取定单元类型与单元尺寸,对数值稳定性的讨论不充分,在求解方法上也未形成统一的认识;2) 应从机械微观的尺度来认识缆鞍相互作用,注重于不同材料之间的基础摩擦特性,而更多的学者则是以桥梁工程中极限滑移平衡状态来研究的,成果落脚于抗滑能力方面的评估,因此可以进行一些交叉性探讨;3) 将缆鞍系统简化为平面应变或应力问题,尚有待进一步精细化模拟,根据文献[41],其断面真实应力状态是否还需考虑钢丝间的弹性约束,以及如何考虑及实现,这些问题值得继续探索;4) 在探讨中塔刚度的影响中,全桥杆系模型可否直接考虑主缆与鞍槽的接触滑动,以提高 Cheng 等^[39]提出的杆系有限元模型的精细程度。

2.2 极限承载力研究

黄侨等^[42]对地锚式悬索桥混凝土桥塔的极限承载力进行了研究,分别建立了以桥塔为实体有限元模型而其余构件采用梁杆单元模拟的多尺度有限元模型及独立桥塔模型,如图 11 所示。在计算中引入了混凝土塑性损伤本构模型,比较清楚地展示了桥塔破坏时混凝土节段的应力、损伤情况及钢筋应力状态等。通过模型计算结果的差异对比,为大跨度

悬索桥混凝土桥塔模型的选取提供了借鉴,同时指出了全桥多尺度模型的线性稳定系数略大于独塔模型,而全桥多尺度模型的非线性荷载系数则相反。

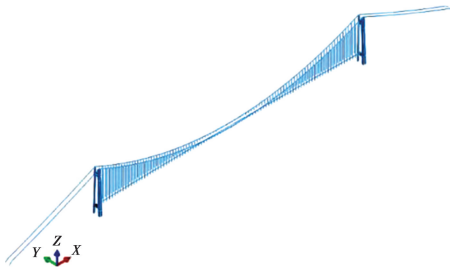


图 11 含桥塔为实体单元模型的全桥多尺度有限元模型^[42]

张兴标等^[43]对多塔悬索桥中间钢桥塔的极限承载力进行了研究,探究了塔段连接对钢桥塔极限承载力的影响,计算中使用了包含中间钢桥塔为壳单元而其他区域使用杆系单元的多尺度有限元模型(图 12)及全杆系有限元模型,中间钢桥塔的建立包含了桥塔壁板的对接与拼接接触关系,分析过程涉及几何非线性、材料非线性及接触非线性。其认为,考虑一道拼接缝对桥塔极限承载力的影响较小。

Cui 等^[44]提出了一种考虑油罐车火灾的三塔悬索桥稳定性分析方法,并以泰州大桥为背景展开了实例分析,得到了不同火灾程度下桥塔的全过程受力行为及不同燃烧时间对应的桥梁稳定系数。该项研究属于热-结构耦合分析,由于传热过程也是非线性变化的,不妨称为“荷载非线性”,因此该分析类型也属于三重非线性分析。

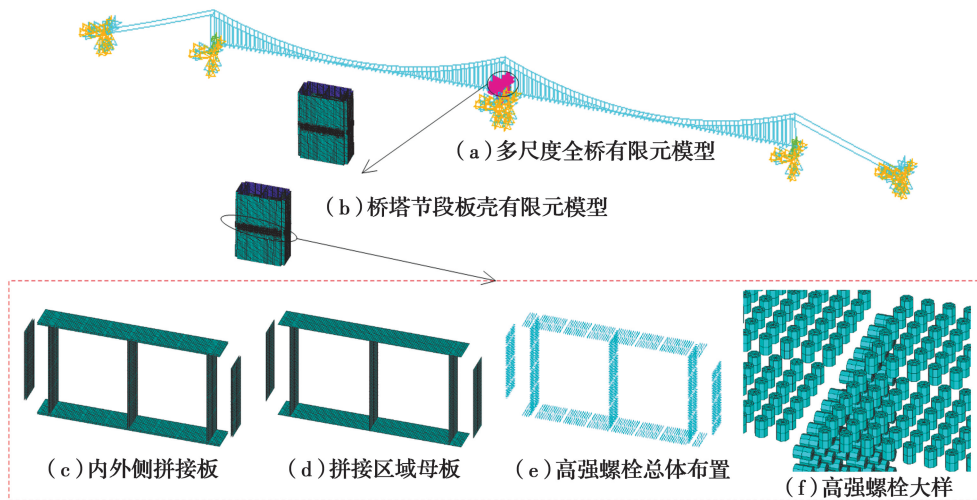


图 12 含钢桥塔节段为板壳模型的多塔悬索桥多尺度有限元模型^[43]

此外,王春江等^[45]对鹅公岩轨道交通专用桥的施工过程稳定性进行了研究,该桥在施工过程中会经历斜拉桥到自锚式悬索桥的体系转换。孙亮^[46]对斜拉桥使用的异形曲线钢桥塔的极限承载力进行了研究,模型采用了全板壳有限元模型和杆系有限元模型。毛勇等^[47]探讨了大跨径缆索承重桥梁静力稳定性分析方法,再次论证了非线性稳定计算的必要性。

上述研究均以实际桥梁为背景而展开,可知 2020 年度在缆索承重桥梁极限承载力方面,对材料行为、构件非线性连接的模拟有更精细的考虑,对以往不曾出现的火灾下的影响情况有所涉及。桥梁极限承载力分析方法的精细化程度有所提高,并开始出现了多场耦合分析的迹象。同时,根据黄侨等^[42]模型对比的研究,极限承载力分析模型的规范化有待进一步加速发展。

2.3 UHPC 加固技术在正交异性钢桥面板大跨度桥中的应用

2020 年年初,孙航行等^[48]报道了 UHPC 加固技术在桥梁工程中的进展,主要阐述了材料、界面连接、试验及其在梁桥应用方面的研究进展。然而,大跨径桥梁的钢桥面板在服役多年后,可能出现不同程度的疲劳开裂。在中国日益增长的交通量影响下,该问题的突出性更加显著,已出现了利用

UHPC 技术对大跨径桥梁进行加固的实例研究。王洋等^[49]报道了采用 UHPC 技术对武汉军山长江大桥进行加固的研究,提出了新型加强版的轻型组合桥面结构,如图 13 所示,通过在传统钢-UHPC 桥面板中置入钢筋网和带栓钉的横向钢板条来实现。实际应用中,在原桥面系上通过布置钢板条、钢筋网及施工 UHPC 面板几个关键环节完成加固。其中,钢筋网和带栓钉的横向钢板条的主要作用是强化 UHPC 底面的横向抗裂性能。文献^[50-51]也做了相关报道。闫燕红等^[52]采用 30 mm SMA10+45 mm UHPC 层的铺装结

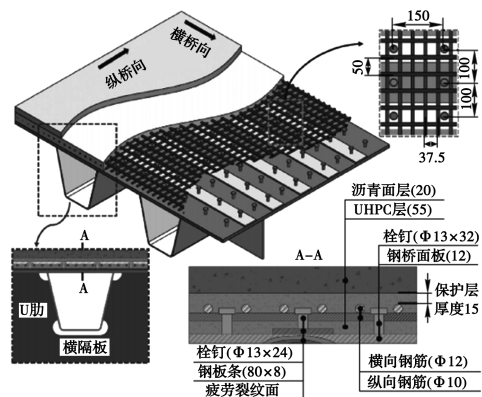


图 13 新型加强版的轻型组合桥面结构^[49]

构层对海河大桥钢桥面板进行加固,之后进行了连续 4 年多的跟踪检测,发现加固区域未出现新的病害。此外,McMullen 等^[53]报道了采用 UHPC 技术加固腐蚀钢板桥梁的研究;李彬瑜等^[54]研究了纵向弯曲作用下 UHPC 加固钢桥面板焊接节点的疲劳性能;王立国等^[55]探讨了超短栓钉的钢-超薄 UHPC 组合桥面应用于大跨径悬索桥的可行性,使用该方案的目的之一也是为了满足后期加固的需求。上述研究表明,通过 UHPC 技术加固桥面板后,桥面系的综合力学性能有显著的提高,其在桥梁加固中具有较好的推广应用前景。

2.4 缆索承重桥梁体系

崔明珠等^[56]分别研究了变截面梁与悬索组合桥梁的静力计算方法和体系参数设计。该桥型是在连续梁或连续刚构桥跨中区域设置悬索部分,如图 14 所示。悬索对连续梁式桥跨

中有支承作用,可有效解决连续梁式桥跨中下挠严重的问题。王雨威等^[57]则对变截面梁与自锚式悬索组合桥梁的体系参数进行了分析,包括垂跨比、边中跨比及主缆抗拉刚度。

肖汝诚等^[58]提出了一种新型悬索桥-部分地锚式悬索桥,如图 15 所示。在受力特征、施工方法、挠度理论、静动力性能及锚碇设计等方面进行了分析,认为其适用于净空受限、基岩埋藏深等特殊建设条件的桥位。该桥型是在自锚式悬索桥形式的基础上设置一个较小的锚碇,主梁端部与锚碇之间用锚索连接,可以调整索力。

吴月星等^[59]对空间异形索面悬索桥主缆成桥线形计算方法进行了研究,并以韩国永宗大桥和洛河大桥为背景进行了算例验证。洛河大桥主梁为曲线梁,索面为空间索面,如图 16 所示。

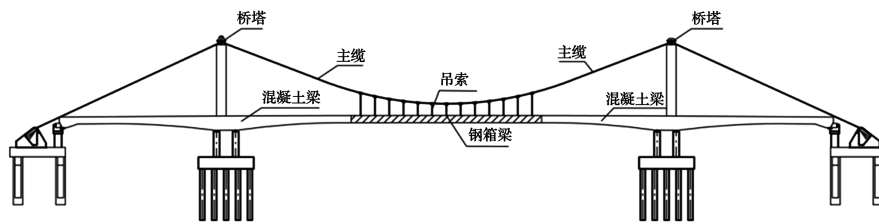
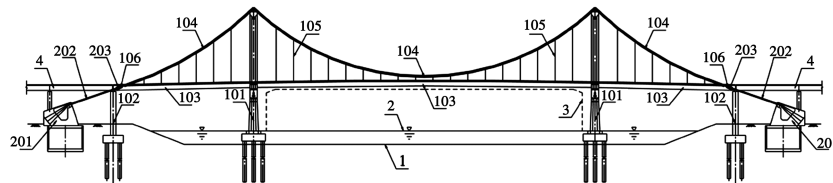


图 14 连续梁与悬索组合桥梁结构体系示意图^[56]



1-河床线或地面线; 2-水面线; 3-桥下通航净空界限; 4-引桥; 101-主塔; 102-边墩; 103-主缆; 104-主缆; 105-吊杆; 106-主梁上主缆锚固端; 201-地锚; 202-锚索; 203-主梁上锚索锚固端

图 15 部分地锚式悬索桥结构^[58]

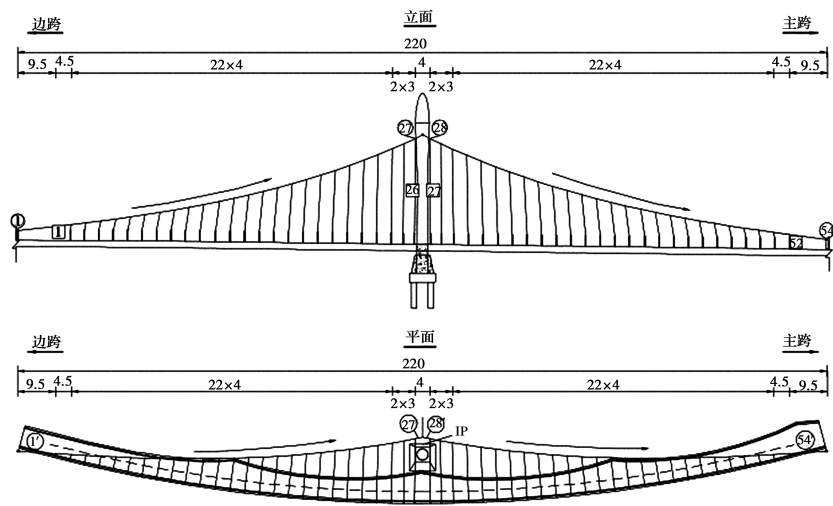


图 16 洛河大桥^[59]

杨晖柱等^[60]研究了空间整体张拉式悬索桥的结构设计与分析。背景桥梁为跨度 165 m 的三跨连续悬索桥,采用外倾的空间索面及桥塔。索塔由倾斜的桅杆与背索组成,属于柔性桥塔,具有摇摆功能,如图 17 所示。

张清华等^[61]认为双缆悬索桥体系是一种适用于大跨度

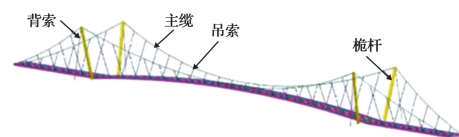


图 17 空间整体张拉式悬索桥的结构^[60]

多塔悬索桥的结构体系,如图 18 所示。为了对该类悬索桥体系的受力特性开展深入研究,基于有限元方法对其静力特性以及关键设计参数的影响效应进行了对比分析。

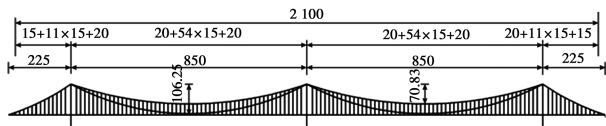


图 18 双缆悬索桥^[61]

秦顺全等^[62]以常泰长江大桥主航道桥公铁两用斜拉桥(主跨 1 176 m)为背景,提出了纵向设置碳纤维复合材料(CFRP)水平索的“温度自适应塔梁约束体系”,如图 19 所示,

以降低桥塔弯矩和梁端位移量。

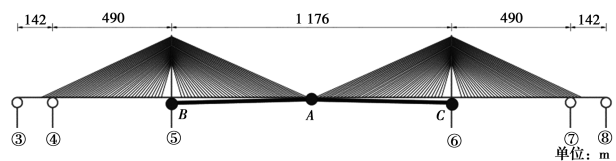


图 19 温度自适应塔梁约束体系示意^[62]

以西墩门公铁两用大桥为背景,如图 20 所示,何东升等^[63]、肖海珠等^[64-65]对大跨径斜拉-悬索协作体系桥的结构参数设计及静动力特性进行了研究。

万田保等^[66]研究了跨度为 1 060 m 的大跨度公铁两用

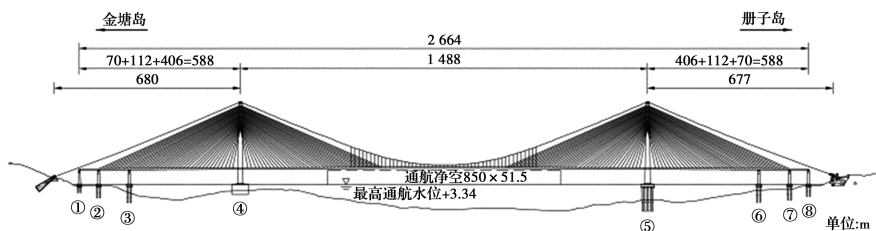


图 20 西墩门公铁两用大桥^[64]

悬索桥的纵向位移特征。刘家兵^[67]研究了跨度为 1 092 m 的大跨度公铁两用悬索桥的静动力性能。

以武汉青山长江公路大桥为背景,张燕飞等^[68]、张建强等^[69]对大跨重载公路斜拉桥的静动力性能进行了研究,该桥桥面宽度达到 48 m。

根据文献[70]的总结,体系组合协作、受力构件的分合变化及构件尺寸与约束连接的改变是桥梁结构体系创新的方法。基于这几种主要方法的综合应用,对缆索承重桥梁体系进行研究,2020 年演化出一批新的缆索承重桥梁结构形式。根据相关研究可见:1)总体而言,组合协作桥梁体系涵盖了不同桥型、不同跨径及不同交通荷载的桥梁,在技术上进一步融合了梁、拱、斜拉及悬索四种基本体系的组合方式。在各种创新方案提出后,可能会形成系统的类型桥梁理论与技术,一方面完善和丰富了桥梁结构体系的内涵,另一方面也为更多更复杂条件下的造桥提供了新的桥梁方案与思路,缆索承重桥梁体系创新仍是未来桥梁工程学科发展创新的重要源动力之一;2)桥梁结构体系的创新会在静力、动力、耐久性等多方面给桥梁结构带来不同程度的性能改善,但这种改善尤其离不开“索”,如部分地锚式悬索桥中的锚索、连续梁与悬索组合桥梁结构体系中的吊索、空间张拉悬索桥中的背索及温度自适应塔梁约束体系中的 CFRP 拉索等,在缆索承重桥梁体系创新的发展中,索可能以更多形式出现在不同的桥梁结构中。

3 结论与展望

2020 年,箱梁与缆索承重桥梁理论得到了持续的发展,对此的总结及展望如下:

1)波形钢腹板箱梁的研究受结构形式创新的影响,具有广阔的研究空间。

2)传统箱梁理论关注了一些构造细节对箱梁受力性能的影响,且有发展多自由度、高精细化的有限梁元理论模型。

3)多塔悬索桥缆鞍相互作用是大跨径桥梁被持续关注的重要课题,这一问题在分析方法和维度上有较大的扩展,在钢丝表面微观摩擦机理、缆鞍相互作用及宏观结构抗滑方法等方面基本形成多尺度研究体系;可进一步深度挖掘缆鞍相互作用机理,提出悬索桥主缆安全服役的多尺度评估方法。

4)缆索承重桥梁极限承载力的分析仍有报道,比较突出三重非线性及耦合场的分析,也需要发展数值模型标准规范化的对比研究。

5)UHPC 技术在对两座斜拉桥桥面板加固中的良好收效表明了 UHPC 加固技术将来还有更广泛的应用面。

6)缆索承重桥梁体系创新仍是未来桥梁工程学科发展创新的重要源动力之一,而“索”的创新应用将是驱动缆索承重桥梁体系创新的主要引擎,预测会以更多的形式出现在不同的桥梁结构中。

参考文献:

- [1] 白伦华,沈锐利. 箱梁与缆索承重桥梁理论 2019 年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(5): 67-75.
- [2] 孙建鹏,刘银涛,周鹏,等. 连续刚构桥弹塑性力学行为分析的传递矩阵法[J]. 振动与冲击, 2020, 39(22): 234-242.
- [3] LIU Y K, DENG L, ZHONG W J, et al. A new fatigue reliability analysis method for steel bridges based on peridynamic theory [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2020, 236: 107214.

- [4] ZHOU C, LI L F, WANG J Q. Modified bar simulation method for shear lag analysis of non-prismatic composite box girders with corrugated steel webs [J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 155: 106957.
- [5] 秦翱翔, 刘世忠, 马驰, 等. 单箱双室波形钢腹板-钢底板-混凝土顶板组合箱梁剪力滞效应研究[J]. *公路交通科技*, 2020, 37(10): 98-106.
- [6] 王力, 刘世忠, 路韡, 等. 基于 Reddy 理论的新型波形钢腹板组合箱梁挠度计算[J]. *西南交通大学学报*, 2021, 56(4): 752-759.
- [7] CHEN Y Y, DONG J C, TONG Z J, et al. Flexural behavior of composite box girders with corrugated steel webs and trusses [J]. *Engineering Structures*, 2020, 209: 110275.
- [8] 赵虎, 勾红叶, 尼颖升. 波形钢与混凝土混合多箱室斜拉桥的剪力滞效应[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(7): 93-103.
- [9] ZHANG Z, TANG Y, LI J, et al. Torsional behavior of box-girder with corrugated web and steel bottom flange [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 167: 105855.
- [10] ZHU Y B, WAN S, SHEN K J, et al. Experimental and numerical study on the nonlinear performance of single-box multi-cell composite box-girder with corrugated steel webs under pure torsion [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 168: 106005.
- [11] 周聪, 李立峰. 波形钢腹板 PC 组合箱梁纯扭全过程分析模型[J/OL]. *西南交通大学学报*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.u.20200930.1137.006.html>.
- [12] 魏娜, 张元海, 姚晓东. 波形钢腹板箱梁的约束扭转剪应力分析[J]. *应用数学和力学*, 2020, 41(4): 386-395.
- [13] 赵品, 荣学亮, 叶见曙. 承托设置对波形钢腹板箱梁桥面板横向内力的影响[J]. *公路交通科技*, 2020, 37(8): 41-47.
- [14] 乔朋, 钟承星, 狄谨, 等. 单箱多室波形钢腹板箱梁的横向受力分析[J]. *工程力学*, 2020, 37(9): 161-172.
- [15] ZHOU M, LIAO J C, AN L. Shear properties of tapered box girders with steel trapezoidally corrugated webs considering resal effect [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2020, 25(1): 04019126.
- [16] ZHOU M, FU H Y, SU X L, et al. Shear performance analysis of a tapered beam with trapezoidally corrugated steel webs considering the Resal effect [J]. *Engineering Structures*, 2019, 196: 109295.
- [17] ZHOU M, SHANG X N, HASSANEIN M F, et al. The differences in the mechanical performance of prismatic and non-prismatic beams with corrugated steel webs: A comparative research [J]. *Thin-Walled Structures*, 2019, 141: 402-410.
- [18] ZHOU M, CHEN Y Y, SU X L, et al. Mechanical performance of a beam with corrugated steel webs inspired by the forewing of *Allomyrina dichotoma* [J]. *Structures*, 2021, 29: 741-750.
- [19] ZHOU M, LIAO J C, ZHONG J T, et al. Unified calculation formula for predicting the shear stresses in prismatic and non-prismatic beams with corrugated steel webs [J]. *Structures*, 2021, 29: 507-518.
- [20] 樊健生, 王哲, 杨松, 等. 钢-超高性能混凝土组合箱梁弹性弯曲性能试验研究及解析解[J]. *工程力学*, 2020, 37(11): 36-46.
- [21] HE X Y, XIANG Y Q, CHEN Z Y. Improved method for shear lag analysis of thin-walled box girders considering axial equilibrium and shear deformation [J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 151: 106732.
- [22] 潘旦光, 韦杉杉, LU Pan, 等. 变高度简支箱梁剪力滞半解析解[J]. *力学季刊*, 2019, 40(4): 796-806.
- [23] 张玉元, 余剑搏, 张元海. 考虑梗腋影响的箱形梁剪力滞效应分析[J]. *铁道学报*, 2020, 42(11): 155-160.
- [24] 安平和, 邬晓光, 时元绪, 等. 箱梁剪力滞翘曲位移函数理论分析[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2020, 53(8): 692-697.
- [25] YAN W T, HAN B, XIE H B, et al. Research on numerical model for flexural behaviors analysis of precast concrete segmental box girders [J]. *Engineering Structures*, 2020, 219: 110733.
- [26] 马驰, 刘世忠. 考虑剪切变形的多梁式改进型波形钢腹板组合小箱梁桥荷载横向分布系数计算[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(7): 104-114.
- [27] 虞子楠, 贺拴海, 任乐平, 等. 考虑抗扭性能影响的多梁式矮箱梁桥荷载横向分布计算[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(7): 104-113.
- [28] 邬晓光, 魏俊杰. 宽幅装配式箱梁桥荷载横向分布系数计算[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2020, 36(1): 76-85.
- [29] KONG S Y, ZHUANG L D, TAO M X, et al. Load distribution factor for moment of composite bridges with multi-box girders [J]. *Engineering Structures*, 2020, 215: 110716.
- [30] 杨霞林, 于小芹, 张元海. 钢桁腹式混凝土组合箱梁的扭转效应分析[J]. *计算力学学报*, 2021, 38(2): 230-238.
- [31] LI X Y, WAN S, SHEN K J, et al. Finite beam

- element with exact shape functions for torsional analysis in thin-walled single- or multi-cell box girders [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 172: 106189.
- [32] WANG D, WANG L, LIU Y M, et al. Failure mechanism investigation of bottom plate in concrete box girder bridges [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2020, 116: 104711.
- [33] 高文丽. 悬索桥主缆钢丝动态接触与滑移行为研究[D]. 江苏 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- [34] ZHANG Q H, GUO H L, BAO Y, et al. Antislip safety of double-cable multispan suspension bridges with innovative saddles [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2020, 25(5): 04020021.
- [35] ZHANG Q H, HAN S H, BAO Y, et al. Frictional resistance between main cable and saddle for suspension bridges. I: Friction characteristic of single strand [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2020, 25(8): 04020042.
- [36] HAN S H, ZHANG Q H, BAO Y, et al. Frictional resistance between main cable and saddle for suspension bridges. II: Interlayer slip of strands [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2020, 25(8): 04020043.
- [37] 张清华, 王玉威, 程震宇, 等. 主缆与鞍座间摩擦抗力评估的混合解析数值法[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(11): 158-168.
- [38] WANG L, SHEN R L, MA N J, et al. Discrete analytical model for lateral mechanical behavior of cable-saddle system in suspension bridges [J]. *Engineering Structures*, 2020, 221: 111087.
- [39] CHENG J, XU H, XU M S. Study on mid-tower longitudinal stiffness of three-tower four-span suspension bridges with steel truss girders [J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2020, 73(6): 641-649.
- [40] ZHANG W M, YANG C Y, TIAN G M, et al. Analytical assessment of main cable shape for three-pylon suspension bridge with unequal main-span lengths: Thermal effect consideration [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2020, 25(1): 04019136.
- [41] 燕海蛟. 斜拉索内钢丝间弯曲滑移数值模拟及分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
- [42] 黄侨, 单彧诗, 宋晓东, 等. 特大跨径地锚式悬索桥静力稳定性分析[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2020, 52(6): 140-148.
- [43] 白伦华, 张兴标, 沈锐利, 等. 塔段连接对多塔悬索桥中间钢桥塔极限承载力的影响[J]. *防灾减灾工程学报*, 2020, 40(2): 214-221.
- [44] CUI C J, CHEN A R, MA R J. Stability assessment of a suspension bridge considering the tanker fire nearby steel-pylon [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 172: 106186.
- [45] 王春江, 苏帆, 戴建国, 等. 重庆鹅公岩轨道专用桥施工阶段稳定分析[J]. *应用力学学报*, 2020, 37(6): 2605-2610, 2708.
- [46] 孙亮. 斜拉桥曲线钢桥塔稳定性能研究[J]. *钢结构(中英文)*, 2021, 36(2): 47-55.
- [47] 毛勇, 单彧诗, 黄侨, 等. 大跨径缆索承重桥梁静力稳定性分析方法探讨[J]. *中外公路*, 2020, 40(2): 115-118.
- [48] 孙航行, 周建庭, 徐安祺, 等. UHPC加固技术在桥梁工程中的研究进展[J]. *混凝土*, 2020(1): 136-143.
- [49] 王洋, 邵旭东, 陈杰, 等. 重度疲劳开裂钢桥桥面的UHPC加固技术[J]. *土木工程学报*, 2020, 53(11): 92-101, 115.
- [50] 陈杰, 要荆荆. 某正交异性板钢箱梁斜拉桥 UHPC 组合桥面改造方案研究[J]. *世界桥梁*, 2020, 48(3): 80-85.
- [51] 周立兵, 张刚, 王敏. 军山长江大桥钢-UHPC组合桥面改造效果研究[J]. *桥梁建设*, 2020, 50(2): 49-54.
- [52] 闫燕红, 孙运国, 何立忠. 重载交通下钢混混合梁独塔斜拉桥加固评估研究[C]//中国土木工程学会 2019 年学术年会论文集. 上海, 2019: 60-74.
- [53] MCMULLEN K F, ZAGHI A E. Experimental evaluation of full-scale corroded steel plate girders repaired with UHPC [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2020, 25(4): 04020011.
- [54] 李彬瑜, 田亮, 程斌, 等. 纵向弯曲作用下 UHPC 加固钢桥面板焊接节点疲劳性能研究[J]. *中国科技论文*, 2020, 15(8): 869-873.
- [55] 王立国, 邵旭东, 曹君辉, 等. 基于超短栓钉的钢-超薄 UHPC 组合桥面性能[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2020, 54(10): 2027-2037.
- [56] 崔明珠, 殷永高, 任伟新. 基于挠度理论连续梁与悬索组合桥梁结构静力计算[J]. *土木工程学报*, 2020, 53(12): 106-113.
- [57] 王雨威, 殷永高, 任伟新. 变截面梁与自锚式悬索组合体系桥梁参数分析[J]. *中外公路*, 2020, 40(5): 54-57.
- [58] 肖汝诚, 庄冬利, 杨乐, 等. 部分地锚式悬索桥的基本结构性能[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(11): 1545-1551, 1587.
- [59] 吴月星, 周建庭, 孙马, 等. 空间异形索面悬索桥主缆成桥线形计算方法[J]. *桥梁建设*, 2020, 50(5): 37-43.

- [60] 杨晖柱, 吴水根, 代崇民. 空间整体张拉式悬索桥的结构设计与分析[J]. 建筑结构, 2020, 50(22): 119-124.
- [61] 张清华, 张莹, 程震宇, 等. 双缆悬索桥的静力特性及其关键影响因素[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(2): 238-246.
- [62] 秦顺全, 苑仁安, 郑清刚, 等. 超大跨度公铁两用斜拉桥结构体系研究[J]. 桥梁建设, 2020, 50(4): 1-8.
- [63] 何东升, 肖海珠. 中央扣对斜拉-悬索协作体系桥力学性能的影响研究[J]. 桥梁建设, 2020, 50(Sup2): 23-28.
- [64] 肖海珠, 高宗余, 何东升, 等. 公铁两用斜拉-悬索协作体系桥结构参数研究[J]. 桥梁建设, 2020, 50(4): 17-22.
- [65] 肖海珠, 高宗余, 刘俊锋. 西堠门公铁两用大桥主桥结构设计[J]. 桥梁建设, 2020, 50(Sup2): 1-8.
- [66] 万田保, 李松林. 大跨度铁路悬索桥纵向位移特征及纵向支承要求[J]. 桥梁建设, 2020, 50(4): 29-35.
- [67] 刘家兵. 大跨度公铁两用钢桁梁悬索桥整体静动力特性分析[J]. 桥梁建设, 2020, 50(4): 23-28.
- [68] 张建强, 孙立山, 胡辉跃, 等. 武汉青山长江公路大桥主桥主梁受力特性分析[J]. 桥梁建设, 2020, 50(Sup1): 26-31.
- [69] 张燕飞, 徐恭义, 胡辉跃. 大跨宽幅重载斜拉桥设计关键技术[J]. 桥梁建设, 2020, 50(Sup1): 1-7.
- [70] 肖汝诚, 等. 桥梁结构体系[M]. 北京: 人民交通出版社, 2013.

(编辑 黄廷)