

大跨薄型连续梁桥技术创新和应用

朱立锋, 苏 斌, 戴建国

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 依托贵阳市金溪大道花溪河大桥, 分析了大跨非对称连续钢箱梁桥在桥型方案、生态保护和景观效果方面的特点, 得到了轻盈、通透和美观的结构设计方案; 通过建立结构的 MIDAS Civil 总体计算模型, 对小边跨结构的内力分布和边支点负反力进行研究, 并提出了结构设计优化和改进措施; 针对主梁的节段模型风洞试验结果, 提出气动优化措施, 使结构涡激振动和颤振性能满足规范要求; 通过 STC 组合钢桥面板设计, 降低了钢桥面的疲劳应力, 提高了铺装层的使用寿命。

关键词: 大跨径; 小高跨比; 支点锚索; 涡激振动; STC 组合桥面

中图分类号: U448; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)04-0054-05

Technical Innovation and Application of Long-span Thin Continuous Beam Bridge

ZHU Lifeng, SU Bin, DAI Jianguo

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: Based on Huaxi River Bridge in Jinxi Avenue in Guiyang City, the characteristics of long-span asymmetric continuous steel box girder bridge in bridge type scheme, ecological protection and landscape effect are analyzed to obtain a lightweight, transparent and aesthetically pleasing structural design scheme. By establishing the MIDAS Civil overall calculation model of the structure, the internal force distribution and the negative reaction force at the edge fulcrums of the small-span structure are studied, and the design optimization and improvement measures of the structure are put forward. According to the wind tunnel test results of the segmental model of the girder, the aerodynamic optimization measures are proposed to make the vortex-induced vibration and flutter performance of the structure meet the requirements of the specification. By using the design of STC composite steel bridge deck, the fatigue stress of steel bridge deck is reduced and the service life of pavement layer is improved.

Keywords: long span; small height-span ratio; fulcrum anchor cable; vortex-induced vibration; STC composite bridge deck

0 引 言

连续梁桥因其结构简洁、施工方便被广泛使用, 桥跨布置除了受地形、河流、道路、管线等因素限制外, 还应考虑景观因素^[1], 以达到受力合理和景观协调的效果。大跨连续梁通常采用变高设计, 混凝土梁中支点截面高跨比为 1/15~1/20, 跨中截面高跨比为 1/40~1/60^[2]; 钢箱梁中支点截面高跨比为 1/20~1/25, 跨中截面高跨比为 1/40~1/50。相比而言, 钢箱梁结构更加轻盈^[3]。

边中跨比作为连续梁设计的重要参数, 对结构受力特性影响较大。悬浇预应力混凝土连续梁桥的边中跨比宜为 0.52~0.65; 1 次落架连续梁的边中跨比一般为 0.5~0.8。过小的边中跨比将导致中跨过度下挠、中支点应力控制困难和边支点负反力等问题, 但因实际需要设计较小的边中跨比, 此时就需采取特殊措施来调整结构内力分布, 以满足其受力需要。常见的解决方式有中跨混合梁、边跨压重、边跨与中支点等高^[4]、设置边支点锚索、大小 T 构、采用组合结构增大中跨刚度等。上述措施中, 采用边跨与中支点等高、中跨组合结构方案将增加结构高度; 采用混合梁施工工艺复杂; 大小 T 构方案只能在墩高有一定的高度下使用, 因此均有一定的局限性。本文将贵阳市金溪大道花溪河大桥为例, 探讨采用小边中跨比的大跨度连续梁桥的技术创新及应用。

收稿日期: 2024-12-04

作者简介: 朱立锋(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁工程设计、咨询工作。

通信作者: 苏斌(1992—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁工程设计、咨询工作。电子邮箱: 820746069@qq.com

1 薄型梁桥背景

1.1 桥梁设计

花溪河大桥方案演变和景观设计效果图见图 1。

贵阳市金溪大道起点西接花溪大道上层道路,跨越国家城市公园——贵阳十里河滩湿地公园后接大将山隧道。桥梁方案应满足景观需求,具有通透性与周边环境及建筑协调。斜拉桥、悬索桥及拱桥等结构体量大,会遮挡视线,故推荐梁桥结构,采用 130 m 主跨跨越花溪河及湿地区域。桥底距地面高约 13 m,采用一般连续梁结构支点较厚,考虑到 Pm1 中支点距离道路路口近,边跨只能做到 46 m,故对连续钢梁进行优化,采用了桥梁布置为 46 m +130 m + 72 m 的大跨径非对称钢箱连续梁桥结构;同时,为进一步降低结构厚度,将靠近山体侧 Pm2 中支点梁高优化为与跨中梁高一致,至此形成薄型连续梁方案。

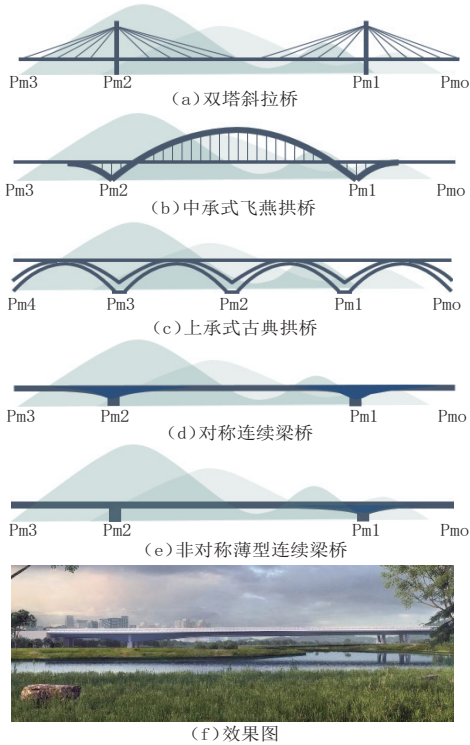


图 1 花溪河大桥方案演变和景观设计效果图

1.2 桥梁总体设计

花溪河大桥跨径布置为 46 m +130 m +72 m,桥梁全长 248 m,主梁为变高度“薄型”连续钢箱梁,梁高 2.8~5.5 m。桥梁分幅布置,单幅桥宽 18.0 m,桥梁横断面布置为 0.5 m 防撞护栏+15.0 m 车行道+2.5 m 人行道=18.0 m。其中 Pm1 支点采用变高设计,Pm2 支点采用等高设计,Pm0 梁端结合桥台设置锚索设计,桥墩采用具有景观造型的双柱墩,基础采用直径

1.8 m 钻孔灌注桩。

花溪河大桥总体布置立面图见图 2;Pm1 中支点断面见图 3。

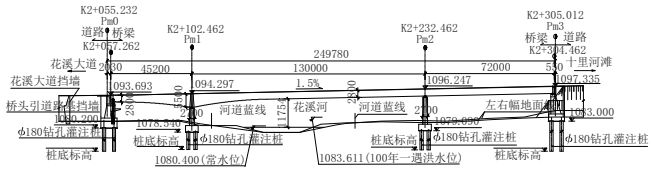


图 2 花溪河大桥总体布置立面图(单位:mm)

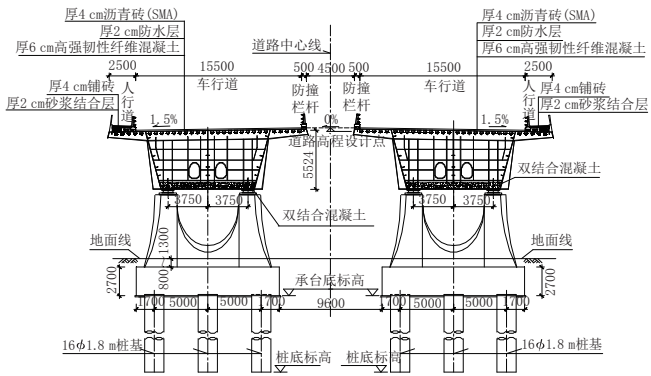


图 3 Pm1 中支点断面(单位:mm)

2 受力特征和技术难点

花溪河大桥结构计算采用 MIDAS Civil 有限元程序,主梁采用空间梁单元模拟。其中跨河段钢梁采用顶推施工,其余位置钢梁采用支架支撑吊装施工。施工及运营期间,支座均采用可承受拉压的刚性支撑;结构有限元模型如图 4 所示。桥梁施工共考虑 5 个施工阶段,如表 1 所示。为更清晰地了解原始结构受力特性和调整措施(设置 Pm0 锚索、压重等)对结构受力的影响,以下施工阶段中暂未考虑以上调整措施。



图 4 结构有限元模型

表 1 桥梁施工阶段表

阶段	施工内容
1	施工主桥桩基、承台、桥墩、桥台;钢厂加工钢梁节段
2	搭设支架,在支架上安装跨河顶推段钢梁,顶推钢梁到位
3	在其余陆域范围搭设支架,依次吊装其余钢梁节段并连接
4	依次拆除边跨和中跨钢梁支撑,钢梁主体结构落架
5	完成桥面系及其附属设施施工

结构有限元模型中,荷载主要考虑恒载(自重+二期+支座沉降)、活载(汽车荷载+人群荷载)、整体升降温、主梁升降温梯度,取上述荷载单项及最不利组合包络作用。

2.1 结构内力分布

通过计算,图5至图8分别列出了恒载和汽车+人群荷载作用下结构弯矩及剪力的内力分布。

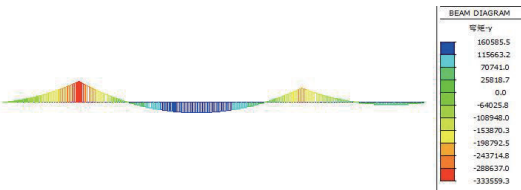


图5 恒载作用下结构弯矩图(单位:kN·m)

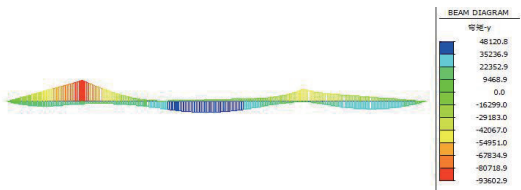


图6 汽车+人群荷载作用下结构弯矩图(单位:kN·m)

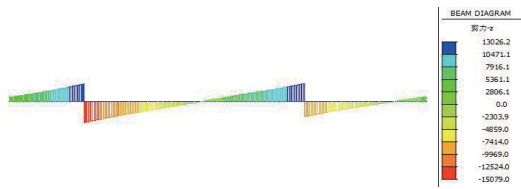


图7 恒载作用下结构剪力图(单位:kN)

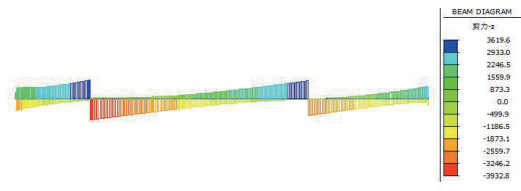


图8 汽车+人群荷载作用下结构剪力图(单位:kN)

分析可知,Pm1和Pm2墩顶截面恒载弯矩比值为1.46,活载弯矩比值为1.76,基本组合下这2个墩顶的弯矩比值为1.5;通过对这2个墩顶截面的抗弯模量分析可知,二者比值为2.0。因此,宜采用相应的结构设计调整措施,适当增加Pm1墩顶恒载弯矩,减小Pm2墩顶弯矩,使基本组合下二者比值接近抗弯模量比值,以得到合理的正应力设计。

Pm1和Pm2墩顶截面恒载剪力比值为1.16,活载最大剪力比值为1.13,基本组合下这2个墩顶剪力比值为1.14。因此宜合理调整这2个墩顶的剪力数值和腹板板厚,以获得合理的剪应力设计。

2.2 负反力分析

不同工况下的结构反力见表2,其中汽车+人群荷载作用及抗倾覆组合均仅列出最大负反力,抗倾覆组合按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土结构设计规范》(JTG 3362—2018)第4.1.8条及条文说明计算。

由表2可知,Pm1~Pm3支点在最不利工况下均

未出现负反力;Pm0支点在恒载及汽车+人群荷载作用下均产生较大负反力,抗倾覆组合下该支点负反力合计达到-7 086 kN。同时,Pm0支座在标准组合下也存在受压的工况,最大反力为1 677 kN。为控制Pm0支座及伸缩缝的疲劳受力,宜通过调整措施使Pm0支座处于全过程受压状态。

表2 不同工况下的结构反力 单位:kN

荷载	Pm0	Pm1	Pm2	Pm3
恒载	-3 042	27 880	23 708	3 474
汽车+人群	-2 518	-1 751	-1 950	-1 582
抗倾覆组合	-7 086	24 252	20 457	998

2.3 结构刚度分析

分别计算汽车荷载作用下单支点(小边跨侧)和双中支点均设置变高段的主梁最小位移,结果见图9。

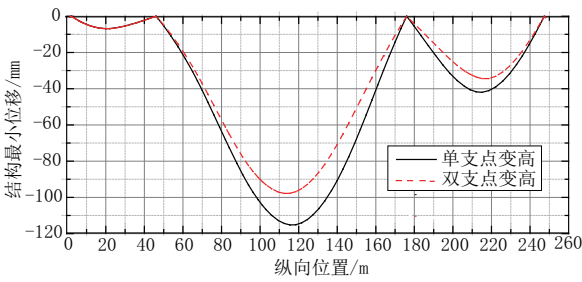


图9 汽车活载作用下结构最小位移

由图9可知,中跨中位移最大值分别为-115.2、-97.8 mm,均小于规范限值260 mm($L/500$)。由单支点变高梁变为双支点均设置变高段后,中跨中结构竖向刚度增加15%。这与结构竖弯基频自0.83 Hz变为0.89 Hz所对应的结构刚度具有一致性。

2.4 抗风性能分析

由于本桥主跨跨度为130 m,中跨跨中梁高仅为2.8 m,高跨比为1/46.4,主梁较轻薄。结构布置为双幅断面,结构净距2.5 m,双幅箱梁的净间距 D 与单幅箱梁宽 B 之比 D/B 为0.24;文献[5]、[6]表明,并列双钝体箱梁在涡激共振响应影响下表现为放大效应,并能降低结构的颤振临界风速。为保证桥梁设计满足抗风要求,针对本桥进行了主梁节段模型风洞试验研究。

涡激振动检验试验表明,上、下游主梁断面在成桥状态具有明显的涡激振动现象。在-3°风攻角下,涡激振动起振风速较低,风速区间为18.3~25.3 m/s,涡振最大振幅是规范限值的3.4倍。在原设计方案的基础上,将人行道栏杆沿顶部封闭40 cm后,在对应实桥风速27 m/s之前,上、下游主梁均具有优良的涡振性能,可作为推荐的气动优化措施。

主梁节段模型颤振试验研究表明,气动优化后的成桥状态具有良好的颤振稳定性,成桥状态颤振稳定性满足《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T 3360—01—2018)的要求。

3 技术创新及应用

3.1 创新型结构布置

花溪河大桥采用 46 m+130 m+72 m 非对称变高钢箱连续梁结构,边中跨比仅为 0.35,远小于常规连续梁设计,跨径布置为场地限制、生态保护条件下的合理布置。结构采用钢箱连续结构,相比于预应力混凝土连续梁结构采用等梁高或调整构造等造型,前者具有更加优美的景观性;相比于采用混合梁等结构,钢箱连续梁具有施工工艺成熟、连接及构造简易的优势。结构布置采用 Pm1 墩顶变高,Pm2 墩顶等高的非对称设计,在结构设计上富于韵律和延伸感,可最大程度地与周围山水环境相融合;采用较小的梁高设计,可有效保证结构轻盈感、空间通透性。

3.2 结构内力优化

梁式桥结构内力调整措施有限,考虑成桥后桥梁结构体系不再改变,因此在活载作用下结构内力分布为常量。结构内力调整 and 优化的最佳时期为施工阶段,通过设置合理的施工阶段和施工顺序,可以达到合理的成桥状态受力目标。对于钢结构连续梁而言,调整结构内力的措施主要为配重荷载和施加支点强迫位移。

根据结构受力特性分析结论,调整结构内力分布的目标为在基本组合下使 Pm1、Pm2 墩顶主梁弯矩效应接近 2:1,即施工阶段下应增加 Pm1 墩顶弯矩,同时减小 Pm2 墩顶弯矩。Pm0 支点的向下强迫位移和 Pm1 支点的向上顶升位移均为达到上述成桥目标的有效措施。

图 10 为 Pm0 向下 0.1 m 和 Pm1 向上 0.1 m 强迫位移引起的结构弯矩图。

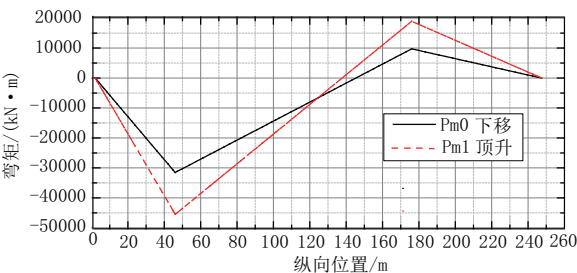


图 10 Pm0 和 Pm1 支点单位强迫位移下结构弯矩图

考虑支座安装的便捷和简化施工,Pm0 支点结合桥台设置锚索,该构造措施对结构内力调整和

Pm0 支座负反力的控制作用明显。

截面抗弯模量比的表达式为:

截面抗弯模量比=
$$\frac{(M_1+g_0g_GM_{sk1}x)}{(M_2+g_0g_GM_{sk2}x)}=2.0 \tag{1}$$

式中: $M_1=\gamma_0(\sum_{i=1}^m\gamma_{Gi}G_{ik1}+\gamma_{Q1}\gamma_LQ_{1k1})$, $M_2=\gamma_0(\sum_{i=1}^m\gamma_{Gi}G_{ik2}+\gamma_{Q1}\gamma_LQ_{1k2})$,分别为调整前 Pm1 和 Pm2 支点基本组合下主梁弯矩; γ_0 、 γ_{Gi} 、 γ_L 等参数含义见《公路桥涵通用设计规范》(JTG D60—2004)第 4.1.5 节; M_{sk1} 、 M_{sk2} 分别为 Pm0 支点单位位移作用下 Pm1 和 Pm2 墩顶产生的弯矩值。

根据式(1)可以求得 Pm0 支点位置需要下移的位移量 x 。

3.3 负反力控制

根据 2.2 节分析结果,本桥 Pm0 支点在恒载及活载下具有较大负反力,且存在拉压交替的工况;Pm0 支座反力的调整宜使得抗倾覆组合下支座处于受压状态,并有一定的储备压力,以每支座 200 kN 控制。

恒载及部分活载作用下 Pm0 支座的负反力采用锚索张拉进行控制;同时为控制锚索型号不宜过大,少量的活载负反力及支座压力储备采用施加压重混凝土的形式。从施工方式而言,Pm1 支座顶升涉及墩顶设备安装及顶升后支座垫石后浇筑等较复杂的工序;Pm0 位置向下的强迫位移可通过在桥台内张拉锚索进行。Pm0 位置负反力控制使得抗拉支座或锚索等成为必要构造,同时合理设置 Pm0 支点钢梁的预拱度,可避免对 Pm1 墩顶进行顶升调整。

Pm0 支点锚索布置断面图见图 11。

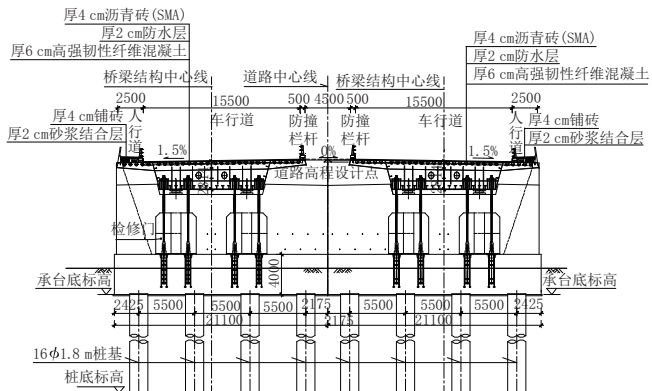


图 11 Pm0 支点锚索布置断面图(单位:mm)

对施工阶段的调整,主要涉及锚索的张拉及配重的施加。锚索的张拉分为 2 次。第 1 次为主梁落架前,对锚索进行初张拉(5 t 或 10 t),使拉索处于受力状态;第 2 次为主梁落架后,为调整主梁受力至合理状态,同时使支座储备一定压力的张拉,可采用具

有测力装置的支座对其压力进行复核。配重的施加采用C30铁砂混凝土(容重35 kN/m³),在Pm0边支点附近进行施加。

3.4 桥面铺装设计

本桥结构较薄,正交异性钢桥面疲劳问题突出。采用传统钢桥面铺装如双层SMA结构、浇筑式+SMA结构、浇筑式+环氧沥青混凝土结构等对提高结构刚度和降低桥面板应力的作用有限^[7]。本桥采用高韧性混凝土+SMA桥面铺装方案,钢桥面顶面设置厚6 cm低收缩高强韧性纤维混凝土(其性能见表3);其上设置厚4 cm SMA。焊钉采用 $\phi 13\times 40$ mm,纵横向间距均为300 mm,同时布置 $\phi 10$ mm、间距100 mm钢筋网。

表3 高韧性混凝土材料性能	
材料性能	指标
抗压强度/MPa	≥ 80
抗折强度/MPa	≥ 20
弹性模量/GPa	≥ 40
材料断裂韧性/(kg·m ⁻²)	≥ 20
混凝土限制膨胀率/% (水中7 d转空气中28 d)	≥ -0.01
坍落度/mm	40~70

计算表明,增高高韧性混凝土层后,钢桥面中的活载应力幅显著下降,钢桥面与U肋纵向焊缝位置

细节疲劳应力幅自64.8 MPa降低至46.2 MPa;U肋与横隔板间细节疲劳应力幅自57.4 MPa降低至37.0 MPa。桥面板疲劳应力幅大幅降低,提高了桥面铺装的使用寿命。

4 结 语

本文依托贵阳市金溪大道花溪河大桥,结合地形和景观要求,提出了小边中跨比大跨薄型连续钢梁桥型,并对该种结构的内力分布、边支点负反力、刚度、抗风性能进行了分析。通过结构布置、内力优化、负反力控制和桥面铺装等创新设计来实现该种桥型合理受力性能,过程可供同类工程参考。

参考文献:

[1] 盛洪飞. 桥梁建筑美学[M]. 北京:人民交通出版社,1999.
[2] 马保林. 高墩大跨连续刚构桥[M]. 北京:人民交通出版社,2001.
[3] 赵秋,陈美忠,陈友杰. 中国连续钢箱梁桥发展现状调查与分析[J]. 中外公路,2015,218(1):98-102.
[4] 杨兴,武电坤. 短边跨连续梁设计理论与创新技术研究[J]. 中外公路,2017,231(1):144-147.
[5] 杨群,张胜斌,刘小兵,等. 并列双钝体箱梁间距对涡激共振特性的影响[J]. 工程力学,2019(增刊1):255-260.
[6] 谭彪,操金鑫,杨詠昕,等. 大跨度平行双幅桥面颤振性能干扰效应[J]. 同济大学学报(自然科学版),2020,48(4):490-497.
[7] 蔡昊. 既有正交异性板STC连接机理及设计理论研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.

(上接第35页)

[7] 张博,范祥,蒋少武,等. 城市地下环路集约建设模式存在的问题及解决思路[J]. 建筑经济,2023,44(增刊1):42-45.
[8] 王维. 某大型城市地下空间结构抗震设计[J]. 建筑结构,2020,50(增刊1):473-477.
[9] 刘荆,邹亮,羊娅萍. 城市地下空间综合管理关键问题研究[J]. 地下空间与工程学报,2020,16(3):656-664.
[10] 孙镇鄂. 城市更新视角下存量地下空间再利用适应性评价研究[D]. 南京:南京工业大学,2022.
[11] 胡潇帆. 深埋地下环路结构方案对经济性的影响[J]. 城市道桥与防洪,2023(10):268-271.
[12] 程光华,王睿,赵牧华,等. 国内城市地下空间开发利用现状与发

展趋势[J]. 地学前缘,2019,26(3):39-47.
[13] 王浩. 城市既有地下工程的结构处置问题研究[J]. 地下空间与工程学报,2011,7(增刊2):1731-1734.
[14] 曾国华,汤志立. 城市地下空间一体化发展的内涵、路径及建议[J]. 地下空间与工程学报,2022,18(3):701-713.
[15] 赵力佳,王颖斌. 低空经济助推绿色低碳发展:价值逻辑、现实梗阻与疏解策略[J]. 技术经济与管理研究,2025(7):64-69.
[16] 郭辰阳,敖万忠,吕宜宏. 充分把握发展机遇,加快推进低空经济高质量发展[J]. 财经界,2022(25):36-38.
[17] 张晓兰,黄伟熔. 低空经济发展的全球态势、我国现状及促进策略[J]. 经济纵横,2024(8):53-62.