

考虑桩土相互作用下双塔悬索桥抗震性能研究

廖优斌

[同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要: 以河南省某双塔自锚式悬索桥为依托,系统研究了此类桥梁的抗震性能。所研究桥梁全长 985.5 m,主桥采用 82 m+145 m+82 m 跨径布置,中轴线与河道水流方向呈 70° 夹角。对桥梁动力特性及抗震性能进行分析的结果表明:在低抗震烈度地区,双塔自锚式悬索桥经合理选择结构体系和支座类型后,主缆及吊索在 E2 地震作用下可保持弹性工作状态,塔、墩、桩结构能满足弹塑性验算要求;研究时应重点关注桥梁动力特性,包括自振周期、频率及关键振型特征,除塔柱、墩柱、桩基等关键截面需重点验算外,还应特别重视短吊杆的动力响应及其受力性能。

关键词: 悬索桥;抗震设计;抗震措施;非线性时程分析;短吊杆

中图分类号: U448.25

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)08-0156-05

Study on Seismic Performance of Two-pylon Suspension Bridge Considering Pile-Soil Interaction

LIAO Youbin

[Tongji University Architectural Design and Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: Relying on a two-pylon self-anchored suspension bridge in Henan Province, the seismic performance of the bridge is systematically studied. The total length of the bridge is 985.5 m, the main bridge is arranged with the spans of 82 m+145 m+82 m, and its central axis forms a 70° angle with the river flow direction. Through the analysis on the dynamic characteristics and seismic performance of the bridge, the results show that in areas with low-seismic intensity, after reasonable selection of the structural system and bearing type for the two-pylon self-anchored suspension bridge, its main cables and slings can maintain an elastic working state under the action of E2 earthquake, and the pylon, pier and pile structure can meet the requirements of elastoplastic checking calculation. In the research, the special attention should be paid to the dynamic characteristics of the bridge, including natural vibration period, frequency and key vibration-type features. In addition to the key sections such as pylon columns, pier columns and pile foundations that need focus on checking calculation, the special emphasis should be also placed on the dynamic response and the stress performances of short suspenders.

Keywords: suspension bridge; seismic design; seismic measures; nonlinear time-history analysis; short suspender

0 引言

随着社会文明的进步,公众及政府对基础设施的安全关注度显著提高,而桥梁作为与民生息息相关的公共设施,其抗震韧性 with 民众的生命财产息息相关。社会舆论和公众意识推动政府、行业将桥梁抗震纳入重点工程考量,例如通过更严格的抗震规范^[1-3]、更高的设计标准(如提高设防水准、增加抗震措施)^[4-7]来保障桥梁安全性。与此同时,抗震理论(如性能化抗震设计^[8-9]、减隔震技术^[10])、分析方法

(如非线性时程分析、动力弹塑性模拟)和材料技术^[11-12](如高性能钢材、耗能减震装置)的不断进步,也为提升桥梁抗震性能提供了可能。这些技术的成熟使得“更安全、更经济、更可靠”的抗震设计成为现实,也激发了行业对桥梁抗震研究的热情。例如,双塔自锚式悬索桥体系的研究,减隔震支座、耗能装置等技术^[13-15]的应用,均可有效降低地震对桥梁主体结构的冲击,同时进一步凸显了抗震设计的重要性。

目前,国内对斜拉桥的抗震设计相对较多,但对悬索桥的抗震设计相对较少。主要原因是悬索桥工程基数小、结构相对复杂、振害驱动弱、研究门槛高,相应的机会就少,且部分悬索桥为简化计算,偏保守地采用承台底固结^[13]。本文以河南省某双塔自锚式

收稿日期: 2025-10-27

作者简介: 廖优斌(1991—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

悬索桥为依托,进行桩土相互作用下的抗震设计研究,以期对类似项目提供有效参照。

1 工程概况

项目沿线自西向东全长约 4.3 km,主桥和引桥总长 985.5 m,效果图见图 1。主桥跨越沙颍河主河道,根据通航净空要求进行跨径布置,跨径布置为 82 m+145 m+82 m=309 m,边中跨比值为 0.566。主桥立面、断面方案布置图见图 2、图 3。



图 1 双塔自锚式悬索桥效果图

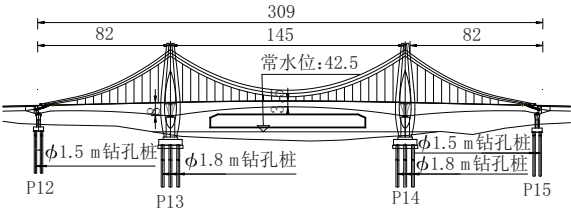


图 2 主桥立面方案布置图(单位:m)

主桥横断面标准宽度为 45 m,最宽处位于索塔位置,若考虑在主桥两侧外挑观景平台,则其宽度可达 66.8 m。其中梁体采用变高度预应力混凝土箱梁,跨中最高梁高 3.5 m,为跨径的 1/40;支点最高梁高 8.0 m,为跨径的 1/18.125。主索采用平行钢丝,线形为 2 次抛物线,其中主跨处主索的矢高为 25 m,高跨比为 1/5.8。

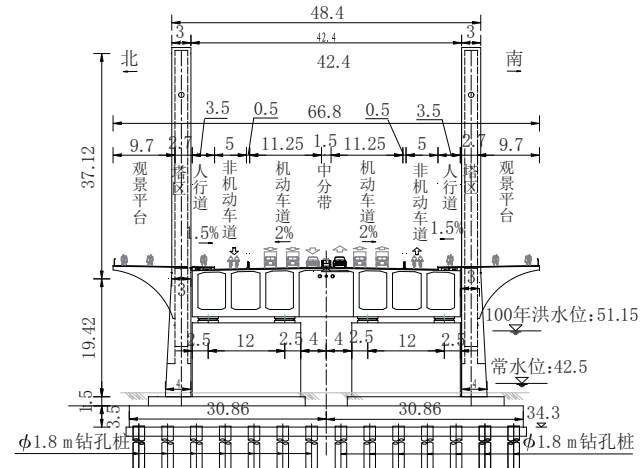


图 3 主桥断面方案布置图(单位:m)

索塔采用 C50 混凝土,桥面以上为上塔柱,塔高 34.6 m,上塔柱在主索鞍以下采用实心截面,在主索

鞍以上采用空心截面;桥面以下为下塔柱,塔高 20.5 m,采用实心截面。

主桥主墩下部结构采用钻孔桩承台基础,桥墩采用实心矩形墩,在横桥向宽度为 16 m,在顺桥向宽度为 4.8 m。每幅桥按照双支座布置。承台基础采用 21 根直径 1.8 m 的钻孔摩擦桩,顺桥向分 3 排,每排 6 根,在外侧索塔位置再增加 3 根,呈梅花形布置。每个承台共布设 21 根桩,对应承台平面尺寸横桥向、顺桥向分别为 30.3、12.8 m。

2 地质条件及地震动参数

2.1 地质条件

主桥范围内,地基岩土可分为 8 个大层,其主要地层信息见表 1。

表 1 主桥范围的地层信息

序号	岩土名称	承载力基本容许值 f_{a0} /kPa	灌注桩极限侧阻力标准值 q_{sik} /kPa
①	杂填土		
②	粉质黏土	170	50
③	粉细砂	190	35
④	粉质黏土	200	55
④ ₋₁	粉土	170	40
④ ₋₂	粉土	170	42
④ ₋₃	粉细砂	180	40
④ ₋₄	粉土	170	42
④ ₋₅	粉细砂	200	40
⑤	粉土	180	50
⑤ ₋₁	粉细砂	200	42
⑥	粉质黏土	250	75
⑥ ₋₁	粉细砂	220	45
⑦	粉土	210	60
⑦ ₋₁	粉细砂	220	45
⑧	粉质黏土	280	95
⑧ ₋₁	粉细砂	250	55
⑧ ₋₂	粉土	220	62

该地区抗震设防烈度为 6 度,峰值加速度为 0.05g。该双塔自锚式悬索桥为甲类设防,按城市桥梁抗震设计规范^[1]要求进行了专项地震安评。

2.2 地震动参数

依据地震安评报告,该拟建场地抗震设防烈度为 6 度,对应的设计地震分组为第二组,其建筑场地类别归属为Ⅲ类。场地地基土不液化,不会产生软土震陷。工程场地自由地表对应于 50 年超越概率 10%、50 年超越概率 2% 的水平向加速度设计地震动参数(阻尼比 0.05)如表 2 所示。表中: A_{max} 为水平向最大加速度, m/s^2 ; T_1 、 T_g 为反应谱的拐点周期,其中

T_g 也称为反应谱的特征周期, s ; β_m 为放大系数谱的最大值; r 为衰减系数。

表 2 工程场地的水平向加速度设计参数						
50 年超越 概率/%	$A_{\max}/$ ($m \cdot s^{-2}$)	T_1/s	T_g/s	$5T_g/s$	β_m	r
10	0.698	0.1	0.45	2.25	2.5	0.90
2	1.167	0.1	0.50	2.50	2.5	0.90

水平地震影响系数 $\alpha(T)$ 的表达式为:

$$\alpha(T) = K\beta(T) \tag{1}$$
$$\beta(T) = \begin{cases} 1 + (\beta_m - 1.0)T/T_1, & 0.04 < T \leq T_1 \\ \beta_m, & T_1 < T \leq T_g \\ \beta_m(T_g/T)^r, & T_g < T \leq 5T_g \\ \beta_m[0.2^r - 0.02(T - 5T_g)], & 5T_g < T \leq 6 \end{cases} \tag{2}$$

式中: T 为周期; K 为地震系数, $K = A_{\max}/980$ (见表 3)。

表 3 工程场地的峰值加速度及地震系数		
50 年超越概率/%	峰值加速度/($m \cdot s^{-2}$)	地震系数 K
10	0.698	0.071
2	1.167	0.119

竖向设计加速度由水平向加速度乘以系数 0.65 获得。依据城市桥梁抗震设计规范^[1], 可得桥梁的设计加速度反应谱, 见图 4。

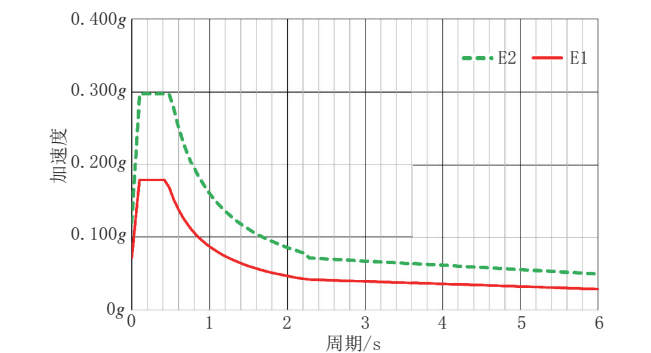


图 4 水平向加速度反应谱

3 结构空间动力分析

从静力计算模型中提取主桥模型, 补充桥墩+承台+桩基+地层信息资料。抗震计算中, 桩、土结构的相互作用一直是研究重点。国内外学者提出了许多模型与方法, 目前主要有集中质量模型、在冲刷线以下达到一定深度的嵌固模型和六弹簧模型这 3 种。其中六弹簧模型能够利用承台底的弹性约束来实现群桩效应。为考虑弯剪耦合效应, 采用了经典的 Pile 计算软件(坐标 Z 轴向下), 基于“ m 法”计算出 6 个自由度方向的土弹簧刚度; 在输入 MIDAS 模型(坐标 Z 轴向上)时, 要特别注意一般弹性支撑中施加 6×6 的弹性约束矩阵需要异号处理, 如果刚度矩阵是对角

的, 那么所有刚度值在转换后保持不变, 但非对角刚度矩阵(耦合情况)或者完整的刚度矩阵, 须严格使用变换公式进行计算。

主桥减震球钢支座平面布置方案见图 5。

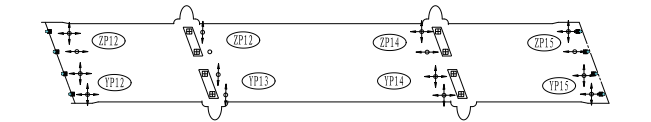


图 5 主桥减震球钢支座平面布置方案

桥梁抗震计算模型需要考虑相邻桥梁结构以及边界条件的影响, 对于共同参与地震力分配的引桥模型, 也要真实还原作为计算联的边界条件, 故补充两侧引桥的模型。主桥为 U05 联, 小桩号接 U04 联(43 m+65 m=108 m)钢箱梁, 大桩号接 U06 联(68 m+43.2 m=111.2 m)钢箱梁; 下部基础均采用承台桩基础。由此建立的全桥和两侧引桥动力分析模型见图 6。

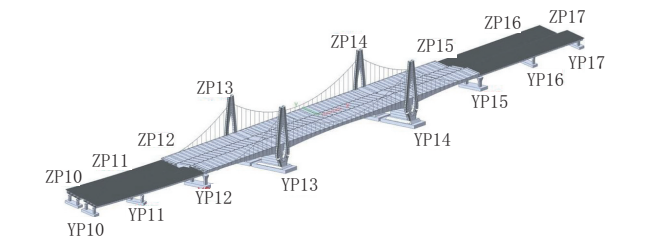


图 6 主桥和两侧引桥动力分析模型

根据建立的动力计算模型, 对该桥进行结构动力特性的分析研究, 以了解结构的动力响应特性。结构动力特性分析中的特征方程求解采用 Ritz 向量法, 悬索桥的阻尼比取 0.02。该桥的动力特性主要涉及竖弯振动、横向振动、纵向摆动, 如表 4 所示。

表 4 结构动力特性			
振型阶数	周期/s	频率/Hz	关键振型特征描述
1	1.908	0.524	主桥 U05 联竖弯振动
2	1.414	0.707	主桥 U05 联横向振动
3	1.401	0.714	主桥 U05 联横向振动
4	1.394	0.718	主桥 U05 联横向振动
5	1.386	0.722	主桥 U05 联横向振动
6	1.224	0.817	主桥 U05 联纵向摆动
7	1.064	0.940	引桥 U06 联纵向振动
8	1.056	0.947	引桥 U06 联纵向振动
9	1.033	0.967	引桥 U04 联纵向振动
10	1.021	0.980	引桥 U04 联纵向振动

主桥 U05 联纵向振动和横向振动振型图见图 7。

根据现行《公路悬索桥设计规范》(JTG/T D65-05—2015), 悬索桥的抗震性能目标明确: E1 地震作用下, 主缆、吊索、基础、索塔、支座等各类构件需保持

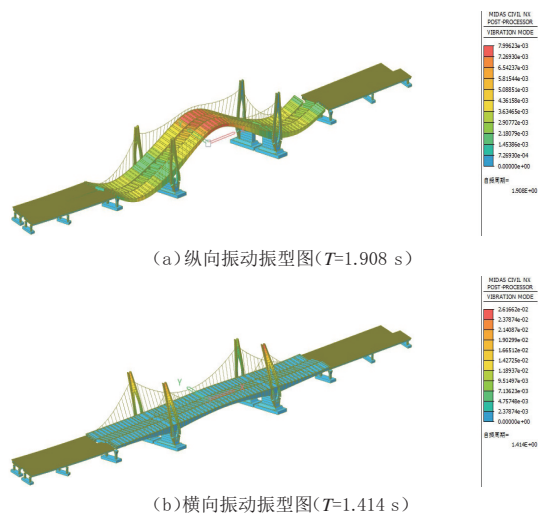


图7 主桥U05联纵向振动和横向振动振型图

无损伤状态,结构整体处于弹性工作阶段;E2 地震作用下,主缆和吊索应维持弹性性能,主塔和基础作为核心构件,允许在结构总体基本保持弹性的前提下出现局部开裂,且地震结束后可借助结构自身重力实现复位。

4 主墩、过渡墩及基础验算

地震输入包含横桥向、顺桥向以及竖向,采用 Ritz 向量法取前 300 阶进行非线性时程分析计算。计算得到其方向质量参与系数超过 99.9%,远超城市桥梁抗震设计规范^[1]中要达到规范值 90% 的要求。分析方法为振型叠加法,振型优先采用 CQC 法。

主墩桥墩桩基础采用 21 根 1.8 m 桩,每根桩配筋为 27 根直径 32 mm 的 HRB400 钢筋。主墩单桩抗弯强度计算值见表 5,校核结果表明主墩的单桩强度满足受力需求。

表 5 主桥主墩单桩抗弯强度校核

截面位置	动轴力+恒载/kN	弯矩/(kN·m)	能力值/kN	检验
P14 墩	7 037.0	2 088.0	26 100	√

主引桥过渡墩基础采用 8 根 1.5 m 桩,每根桩配筋为 30 根直径 25 mm 的 HRB400 钢筋。过渡墩单桩抗弯强度计算值见表 6,校核结果表明主引桥过渡墩的单桩强度满足受力需求。

表 6 主引桥过渡墩单桩抗弯强度校核

截面位置	动轴力+恒载/kN	弯矩/(kN·m)	能力值/kN	检验
ZP15 墩	3 937	444.0	24 500	√

主墩采用 17.7 m×5.0 m 平行四边形墩柱,顺桥向配筋为单侧双排 φ32@150 的 HRB400 钢筋,横桥向配筋为双排 φ32@150 的 HRB400 钢筋。主墩桥墩抗弯

强度计算值见表 7,校核结果表明主桥主墩在 E2 纵向和 E2 横向地震下强度满足要求。

表 7 主桥主墩桥墩抗弯强度校核

截面位置	地震工况	动轴力+恒载/kN	弯矩/(kN·m)	能力值/kN	检验
P14 桥墩	E2 纵	136 579	76 952	1 330 000	√
P14 桥墩	E2 横	135 021	129 808	1 310 000	√

过渡墩采用 2.3 m×2.3 m 墩柱,顺桥向配筋为单侧双排 φ28@150 的 HRB400 钢筋,横桥向配筋为双排 φ32@150 的 HRB400 钢筋。过渡墩桥墩抗弯强度计算值见表 8,校核结果表明主引桥过渡墩在 E2 纵向和 E2 横向地震下强度满足要求。

表 8 主引桥过渡墩抗弯强度校核

截面位置	地震工况	动轴力+恒载/kN	弯矩/(kN·m)	能力值/kN	检验
ZP15 桥墩	E2 纵	17 680	7 765	76 600	√
ZP15 桥墩	E2 横	17 981	2 349	97 200	√

5 主缆、吊杆、主塔以及支座验算

成桥阶段吊杆最大应力为 647.7 MPa。E2 顺桥向、横桥向地震工况下,主缆和吊杆的动力响应见图 8。由图 8 可知,2 种工况所引起的吊杆应力分别为 12.9、6.8 MPa。

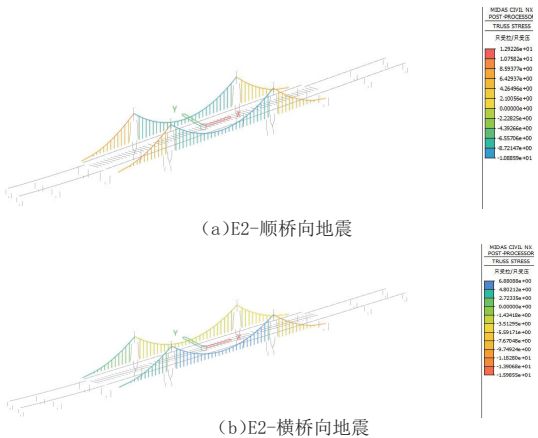


图8 地震主缆及吊杆动力响应(单位:MPa)

成桥阶段+地震时的最大吊杆力、主塔截面验算见表 9、表 10。

表 9 成桥阶段+地震时最大吊杆力

阶段	动轴力+恒载/kN	抗拉强度标准值/MPa	容许值/MPa
E2 纵桥向	660.6	1 670	668
E2 横桥向	654.5	1 670	668

根据计算结果,本次悬索桥相对易损的部位中,吊杆(短吊索尤为突出)应力最大且最接近容许值,是风险最高的部位;其次为主缆连接节点,该部位因

表 10 成桥阶段+地震时主塔截面验算

截面位置	地震 工况	竖向力/ kN	弯矩/ (kN·m)	能力值/ kN	检验
塔底截面	E2纵	30 751	62 254	345 000	√
塔底截面	E2横	30 707	37 434	252 000	√

刚度较低、振动幅度较大,易发生疲劳损伤或连接失效。这一结论也从侧面印证了悬索桥“柔性构件易出现动态失稳”的结构特性。应对措施为对短吊杆采用抗疲劳性能更优的材料,以及采用减震装置来降低地震应力增幅。

E2纵向地震作用下,塔底截面竖向力最大变化111.5 kN,顺桥向弯矩变化15 475 kN·m;E2横向地震作用下,竖向力最大变化155.7 kN,横桥向弯矩变化14 935 kN·m。塔底截面高度7.39 m,宽度3.8 m,截面纵向配置4排32@120的HRB400钢筋,横向配置1排32@120的HRB400钢筋,承载能力极限状态验算满足城市桥梁抗震设计规范^[1]要求。

该项目由于地震烈度较小,悬索桥的位移也相对较小。双塔悬索桥为柔性体系结构,在地震荷载作用下,极易引发梁体产生超出允许范围的位移变形。如高烈度计算过程中位移值过大,可以考虑增加黏滞或弹塑性阻尼器来控制位移。

6 结 语

(1)构建桥梁三维空间抗震分析模型,考虑桩土相互作用下桩基础模拟等关键影响因素,以精准体现结构自身特性,以及支座连接形式的耦合效应;随后采用非线性时程分析方法,对主桥开展地震反应计算,校验其在E2设防水准地震作用下的抗震性能表现,并明确结构的易损部位分布。

(2)在E2纵桥向和横桥向地震作用下,主桥桥墩、主桥桩基础、主引桥桥墩、主引桥桩基础、主塔及索的抗震性能均满足规范要求。

(3)在悬索桥抗震设计时,需要重点关注桥梁动力特性(周期、频率、关键振型特征),墩台、桩基的力学响应及受力分析,并验算吊杆力、主塔关键截面以及支座位移。

参考文献:

[1] CJJ 166—2011 城市桥梁抗震设计规范[S].
[2] JTG B02—2013 公路工程抗震规范[S].
[3] JTG/T 2231-01—2020 公路桥梁抗震设计规范[S].
[4] JTG/T 2231-02—2021 公路桥梁抗震性能评价细则[S].
[5] GB 55002—2021 建筑与市政工程抗震通用规范[S].
[6] T/CECS G:C23-01—2024 公路在用桥梁抗震性能评价技术规范[S].
[7] T/CECS G:C23-02—2024 公路在用桥梁抗震性能提升技术规范[S].
[8] 程利鹏.大挑臂桩柱式桥墩抗震性能分析[J].城市道桥与防洪,2021(6):5.
[9] 孙丽明.高烈度震区某独塔斜拉桥抗震性能优化[J].城市道桥与防洪,2019(12):8.
[10] 陈绍波,何颖,季申增.高地震烈度区大跨径悬索桥索塔设计[J].工程技术研究,2025,10(15):208-210.
[11] 马军伟.独塔斜拉桥的抗震分析及减隔震措施研究[J].城市道桥与防洪,2023(7):82-86.
[12] 燕斌,杜修力,韩强,等.减隔震混合装置在独塔斜拉桥抗震设计中的应用[J].桥梁建设,2014,44(6):6.
[13] 唐术熙.主跨370 m双塔自锚式悬索桥下部结构设计[J].城市道桥与防洪,2020(7):102-104;111.
[14] 曲慧.大跨度双塔空间缆索面自锚式悬索桥合理抗震体系研究[J].城市道桥与防洪,2025(9):203-207.
[15] 吴晶.限位吊索对双塔双跨悬索桥的受力影响[J].广东公路交通,2021,47(4):140-143.

(上接第144页)

[7] 许紫阳.无障碍设计在市政道路设计中的体现[J].建筑工程技术与设计,2020(5):3663.
[8] 曹满强.市政道路设计中的无障碍设计浅析[J].建筑工程技术与设计,2015(21):447.
[9] 汪托,黎明,席晓波.无障碍盲道设计优化研究[J].市政技术,2017,35(4):38-40.
[10] GB/T 31015—2014 公共信息导向系统 基于无障碍需求的设计与设置原则[S].
[11] 刘珩,赵健淳.基于可持续城市发展视角的市政道路设计优化

研究[J].人民公交,2025(18):158-160.
[12] 赵林,张薇,段铁铮.城市道路无障碍环境服务水平评价体系研究[J].城市道桥与防洪,2011(10):18-21.
[13] 肖书影,刘超,谷桂丽,等.基于韧性城市建设的市政道路无障碍设计[J].市政技术,2022,40(7):101-106;113.
[14] 冯建栋,王昊.城市公共交通无障碍环境现状及改善策略[C]//2018年中国城市交通规划年会论文集.北京:中国城市交通规划学会城市交通规划学术委员会,2018.
[15] 谭蓓.城市公共空间无障碍设计研究[D].长沙:湖南大学,2013.