

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2024.10.009

旧路改造工程中缓和竖曲线和使用长度研究

杜永平

[同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要:为提升旧路改造工程纵断面线形质量,以及减少使用不必要的昂贵沥青下面层衬垫材料,对缓和竖曲线及其使用基础等开展了研究。首先,确定“人-车-路”动力学计算模型和缓和竖曲线评价标准,通过动力学计算分析确定以多次抛物线为缓和竖曲线研究方向,并采用待定系数法推导出 8 次抛物线缓和竖曲线方程族;其次,分类讨论不同工程条件下确定缓和竖曲线的方法,并经动力学计算确定 7 次抛物线为最小振动缓和竖曲线;第三,采用动力学计算分析确定各设计车速下不设缓和竖曲线的最小竖曲线半径;最后,在动力学计算基础上建立缓和竖曲线基本参数与车辆振动评价指标关系,并结合车辆振动感知标准,确定了缓和竖曲线最小长度。以上研究形成了缓和竖曲线设计使用基本条件和相关使用基础,可供旧路改造工程设计中选用。

关键词:道路工程;缓和竖曲线;动力学;车辆振动;行车舒适性

中图分类号: U412

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)10-0037-05

0 引言

经过几十年高速建设,国内建成了前所未有规模的公路网和城市道路网。随着经济结构转型升级,路网进入结构调整和升级时代,特别是国内首条超级高速公路“杭绍甬高速公路”的实施,为路网结构优化调整增加了新的改造类型——既有高速公路超级化改造^[1-2]。结合路网结构调整的旧路改扩建和日常维护大中修工程,这些改造工程将成为新时代道路建设的主要任务。

我国采用半刚性路面结构,路面结构残值高。若能充分利用旧路结构进行改造,无疑会减小对交通和社会的影响,且经济节约,因此是工程实施中的优先选项。通过收集近 30 a 全国各地旧路改造工程的数据可知,旧路改造工程中纵横断面的主要特征为:(1)纵断面测量数据虽符合原设计中有关纵断面的总体设计趋势,但远不能达到规范中设计速度要求的纵断面设计指标,在纵断面中存在折坡、纵向局部凹陷、纵向凹凸不平、竖曲线变形等各种缺陷。这些缺陷会使车辆产生纵向位移,从而直接影响乘坐的舒适性^[3]。(2)横坡均发生了不同程度的变化,与原设计值之间存在各种偏差,如横坡变大、变小,或出现反向横坡等不规则路面扭曲情况,使车辆产生侧

向位移,降低了道路的服务水平。

为解决上述问题,在“线形服从地形”的指导原则下,在现状旧路标高条件下应尽可能拟合现状路面^[4]。然而执行的规范不同,效果相差很大。比如在旧路改造工程设计中,受现行路线设计规范对于最小坡长、竖曲线长度等主要设计指标的制约,为处理纵断面沉降差和道路横向扭转问题,不得不垫衬填充大量价格昂贵的沥青下面层材料,致使经济代价高;另外,为满足线形标准而抬升路面局部标高时,一旦标高控制不当就会影响该路段周边排水,造成沿街建筑排水不畅、居民出行不便等诸多社会问题。还有,对于执行《高速公路改扩建设计细则》(JTG/TL11—2014)的旧路改扩建工程,还存在着影响行驶舒适性的问题^[4]。如果能够取消现行路线设计规范中对于最小坡长的制约,在竖曲线两侧增设缓和竖曲线,则既可解决改造工程中沥青下面层衬垫材料问题,又可提升改造工程中的行驶质量。

提升纵断面线形质量是研究者关注的对象。Easa 等^[5-6]在竖曲线两侧增设了 3 次抛物线形的缓和竖曲线,用渐变方式来调整离心力、降低离心力的突变冲击,以此提升行车舒适性;同时增加了道路美观、改善了视距。然而从线形连续性、行车舒适性角度分析^[7],3 次抛物线形缓和竖曲线的加速度渐变率是不连续的,而加速度渐变率指标十分重要,它对行车舒适性的影响远比加速度更重要^[8]。公路三维线形设计研究

收稿日期:2023-10-25

作者简介:杜永平(1968—),男,硕士,高级工程师,从事道路设计与研究工作。

成果表明,能保证视觉和行车舒适性的线形连续要求至少为7阶曲线^[9]。采用行车动力学对缓和竖曲线3、5、7、9次抛物线进行计算分析^[10],发现7次抛物线的降振效果最好,能基本消除线形与平整度的耦合效应。

目前,对于缓和竖曲线的研究尚处于起始探索阶段。为了开展旧路改造工程中缓和竖曲线及其使用基础的系统性研究,本文基于上述研究成果,开展了以下研究:首先建立“人-车-路”动力学分析模型和评价标准;然后采用运动学与动力学分析相结合的方式,从纵断面基础条件出发,推导适应旧路改造工程各种控制条件的缓和竖曲线族,并进行验证和完善;第三,利用动力学分析模型和评价标准,通过动力学计算分析,确定不设缓和竖曲线的最小竖曲线半径;最后,研究缓和竖曲线降振的关键因素,在此基础上确定各设计车速下的缓和竖曲线最小长度,形成适合旧路改造工程的缓和竖曲线应用基础。

1 “人-车-路”动力学模型和评价标准

1.1 模型建立

建立三维立体“人-车-路”动力学模型,模型中有关力学分析相关公式、参数参见文献^[10]。

1.2 评价标准

对行车舒适性的客观定量评价有两类。一类是交通行业内部形成的评价标准,它以运动学为基础,采用加速度、加速度渐变率为指标,其阈值见文献^[7]。在旧路改造工程中,以线形参数为考查目标有较大的参考价值。另一类是从振动角度引入的ISO2631评价标准,它从驾乘人员角度进行评价,并进行了验证^[11-12],其应用已越来越广泛^[3,13]。旧路在改造前后存在着各种振动源,且汽车又是一个多质点的复杂振动系统,因此该评价标准相对要求更为严格。鉴于此,本文采用此评价体系,以振动指标为控制标准,同时以加速度、加速度渐变率阈值为辅助性指标。参考文献^[14]的研究成果,确定以加速度均方根 0.01 m/s^2 作为控制标准。

2 缓和竖曲线

2.1 缓和竖曲线选形

缓和曲线类型较多,主要有回旋线、抛物线、正弦型、双纽线等。在平面设计中,公路采用回旋线形,铁路采用3次抛物线^[15-16],因此,对这2种缓和竖曲线进行动力学计算,设计车速取 120 km/h ,竖曲线半

径取 7000 m ,缓和竖曲线长度取 100 m 。计算得到的缓和竖曲线加速度见图1。由图1可知,在竖曲线两侧增设缓和竖曲线后,虽然车辆共振峰值和均方根均有大幅降低,然而产生的冲击和振动效应还是明显存在。其中,3次抛物线形缓和竖曲线在与竖曲线两侧衔接处均发生了冲击振动,而回旋线在曲线衔接处产生了较强烈的冲击振动。这充分表明纵断面缓和竖曲线两端衔接处的线形处理十分重要。由于竖曲线为2次抛物线,因此选择多次抛物线作为缓和竖曲线选形研究方向。

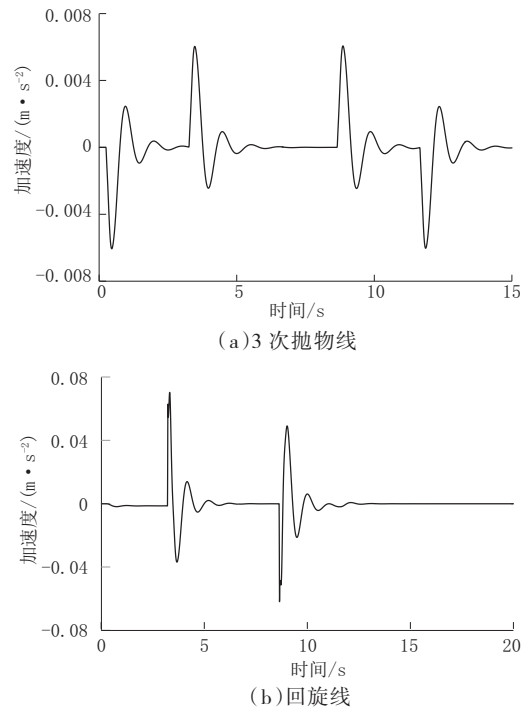


图1 增设缓和竖曲线后的人体加速度

2.2 缓和竖曲线公式

以在直坡、竖曲线之间增设缓和竖曲线为例。设: L_0 为缓和竖曲线长度; 0 为缓和竖曲线起点标高; y_0 为缓和竖曲线终点标高; φ_0 为角度; R 为竖曲线半径; P 为竖向偏移值。可作出这些参数的关系图,见图2。

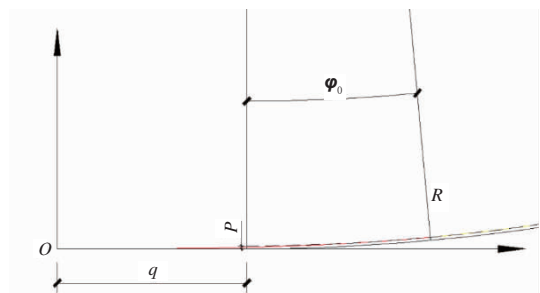


图2 缓和竖曲线参数关系图

为保证缓和竖曲线具有良好的衔接性能,在缓和竖曲线起终点处,应做到:(1)线形标高连续、车辆

运动位移连续、函数连续;(2)线形斜率连续、车辆运动速度连续、函数1阶导数连续;(3)线形曲率连续、车辆运动加速度连续、函数2阶导数连续;(4)线形曲率变化率连续、车辆运动加速度渐变率连续、函数3阶导数连续。同时考虑汽车运动以及人适应汽车运动的特性^[13],要求曲率2次导数连续、函数4阶导数连续。

根据上述条件,可推导出缓和竖曲线方程为:

$$y = \left(\frac{1\ 200}{RL_0^2} - \frac{8\ 400\ y_0}{L_0^4} \right) \frac{L_0^4}{1\ 680} \left(\frac{x}{L_0} \right)^8 + \frac{L_0^4}{840} \left(\frac{16\ 800\ y_0}{L_0^4} - \frac{2\ 280}{RL_0^2} \right) \left(\frac{x}{L_0} \right)^7 + \frac{L_0^4}{360} \left(\frac{1\ 260}{RL_0^2} - \frac{10\ 080\ y_0}{L_0^4} \right) \left(\frac{x}{L_0} \right)^6 + \frac{L_0^4}{120} \left(\frac{2\ y_0}{L_0^2} - \frac{3}{14R} \right) \frac{840}{L_0^2} \left(\frac{x}{L_0} \right)^5 \quad (1)$$

式(1)中含有变量 y_0 , 通过调节 y_0 的大小, 可形成适用于旧路改造工程中不同使用条件的缓和竖曲线族。

2.3 缓和竖曲线使用条件

对式(1)所示的缓和竖曲线族, 按下列3类条件进行讨论。

(1)当竖向偏移值 P 确定时。可按式(2)求得 y_0 , 再代入式(1), 即可得该条件下的缓和竖曲线。

$$P = y_0 - R(1 - \cos \varphi_0) \quad (2)$$

(2)缓和竖曲线终点标高 y_0 确定时。此时可直接将 y_0 代入式(1), 即可得该条件下的缓和竖曲线。

(3)无严格限制条件下。如现场工况条件十分宽松, 则按最小振动原则确定缓和竖曲线。

2.4 缓和竖曲线车辆振动分析

设计车速取 120 km/h, 竖曲线半径取 7 000 m, 缓和竖曲线长度取 100 m; 调整 y_0 与竖曲线半径 R 的关系, 进行相应的动力学计算。所计算的车辆振动指标随缓和竖曲线终点参数变化表见表 1。

表 1 车辆振动指标随缓和竖曲线终点参数变化表

y_0 /m	正加速 度峰值 / ($m \cdot s^{-2}$)	负加速 度峰值 / ($m \cdot s^{-2}$)	加速度 均方根 / ($m \cdot s^{-2}$)	负加速度最 大变化率 / ($m \cdot s^{-3}$)	正加速度最 大变化率 / ($m \cdot s^{-3}$)
$L_0^2/6R$	0.002 5	0.004 0	0.001 5	0.010 83	0.008 16
$L_0^2/6.5R$	0.002 5	0.003 4	0.001 4	0.009 04	0.005 99
$L_0^2/6.75R$	0.002 5	0.003 3	0.001 4	0.008 25	0.005 06
$L_0^2/6.875R$	0.002 6	0.003 1	0.001 3	0.007 89	0.004 64
$L_0^2/7R$	0.002 6	0.003 0	0.001 3	0.007 54	0.004 31
$L_0^2/7.125R$	0.002 7	0.002 9	0.001 3	0.007 69	0.004 42
$L_0^2/7.25R$	0.002 8	0.002 8	0.001 4	0.008 10	0.004 54
$L_0^2/7.5R$	0.002 9	0.002 7	0.001 4	0.008 90	0.004 79
$L_0^2/8R$	0.003 2	0.002 6	0.001 4	0.010 36	0.005 34

由表 1 可知, 在缓和竖曲线范围内, 当 y_0 从 $L_0^2/6R$ 向 $L_0^2/8R$ 变化时, 车辆振动强度由前段强逐渐向后段强转变, 但总体变化范围很小, 加速度均方根变化范围小于 9%; 当 $y_0=L_0^2/7R$ 时, 车辆振动强度基本达到前后均衡, 加速度均方根、正负加速度最大变化率这 3 个振动指标均为最小。

因此, 当 $y_0=L_0^2/7R$ 时, 适用于上节使用条件(3)。此时式(1)化简为:

$$y = \frac{L_0^2}{7R} \left(\frac{x}{L_0} \right)^7 - \frac{L_0^2}{2R} \left(\frac{x}{L_0} \right)^6 + \frac{L_0^2}{2R} \left(\frac{x}{L_0} \right)^5 \quad (3)$$

式(3)为 7 次代数式缓和曲线表达式。当增设缓和竖曲线无限制条件时, 可按式(3)确定缓和竖曲线。

3 不设缓和竖曲线的最小竖曲线半径

竖曲线产生的离心力是线形引起车辆振动的主导因素^[10]。在设计车速确定后, 竖曲线半径越大, 离心加速度越小, 车辆振动也越小。根据车辆振动感知标准, 通过动力学计算来确定各设计车速下不设缓和竖曲线的最小竖曲线半径, 并按照专业习惯取整。不设缓和竖曲线的最小竖曲线半径 R_{min} 动力学计算结果见表 2; R_{min} 与设计车速 V 的关系图见图 4。由图 4 可见, R_{min} 与 V 这两者基本呈 2 次幂函数关系, 其相关系数达 0.999 4。

表 2 不设缓和竖曲线的最小竖曲线半径动力学计算结果

V /($km \cdot h^{-1}$)	R_{min} /m	加速度均方根 /($m \cdot s^{-2}$)
120	25 000	0.009 6
100	17 000	0.009 7
80	11 000	0.009 6
60	6 200	0.009 5
50	4 700	0.008 7
40	2 800	0.009 3
30	1 600	0.009 4
20	700	0.010 0

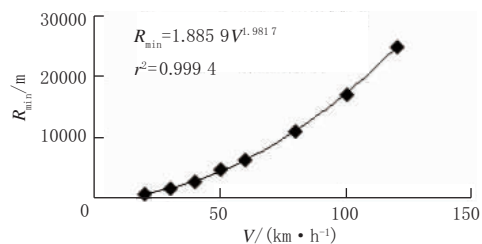


图 4 不设缓和竖曲线的竖曲线最小半径与设计车速关系图

4 缓和竖曲线最小长度

4.1 缓和竖曲线基本参数与车辆振动关系

以 120 km/h 为代表车速, 研究缓和竖曲线主要

参数与车辆振动评价指标的基本关系。首先,固定竖曲线半径为 7 000 m,通过动力学计算可得缓和竖曲线长度 L_0 与加速度均方根 α_w 的关系曲线,见图 5。由图 5 可见, L_0 与 α_w 两者基本呈 2 次幂函数关系(相关系数达 0.999 3),随着 L_0 的增加, α_w ,也就是车辆振动强度急速下降。其次,固定 L_0 为 40 m,通过动力学计算可得竖曲线半径 R 与加速度均方根 α_w 的关系曲线,见图 6。由图 6 可见, R 与 α_w 两者呈接近 1 次幂函数关系(相关系数达 0.999 9),随着 R 的增加, α_w ,也就是车辆振动强度逐渐降低。

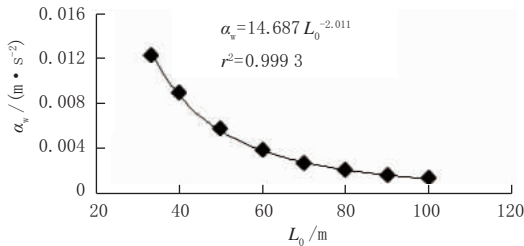


图 5 缓和竖曲线长度与加速度均方根关系图(车速 120 km/h)

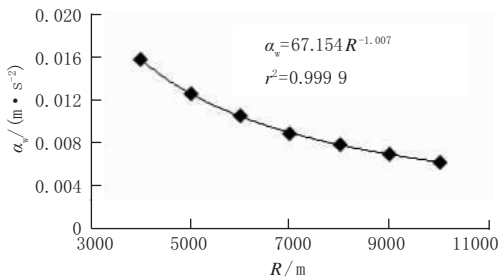


图 6 竖曲线半径与加速度均方根关系图(车速 120 km/h)

基于图 5、图 6 加速度均方根与缓和竖曲线参数的关系,整理了各设计车速 V 条件下, L_0^2R 与加速度均方根 α_w 的关系,见图 7 和表 3。结果表明:设计车速对车辆振动强度影响很大;在设计车速确定条件下,缓和竖曲线参数与加速度均方根的关系稳定。

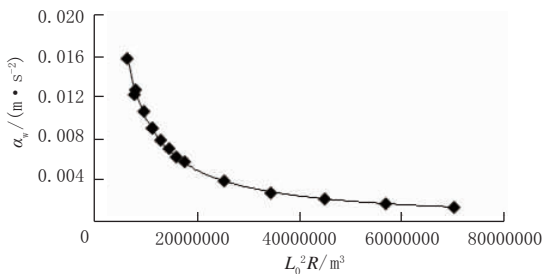


图 7 缓和竖曲线参数与加速度均方根关系图

4.2 缓和竖曲线最小长度

根据图 7 和表 3,结合车辆振动感知标准,确定竖曲线半径最小时的缓和竖曲线最小长度,结果见表 4。

由表 4 可知:缓和竖曲线最小长度约为各设计车速下 1.5 s 的行程长度;所计算的加速度渐变率远小于 ISO2631 评价标准中的加速度渐变率阈值,显

表 3 缓和竖曲线参数与加速度均方根回归关系表

$V/(km \cdot h^{-1})$	回归方程	相关系数
120	$\alpha_w=130\ 718(L_0^2R)^{-1.016}$	0.999 4
100	$\alpha_w=57\ 785(L_0^2R)^{-1.011}$	0.998 4
80	$\alpha_w=16\ 463(L_0^2R)^{-0.99}$	0.999 9
60	$\alpha_w=5\ 243.4(L_0^2R)^{-0.989}$	0.999 9
50	$\alpha_w=2\ 599(L_0^2R)^{-0.991}$	0.999 9
40	$\alpha_w=1\ 017.7(L_0^2R)^{-0.987}$	0.999 0
30	$\alpha_w=324.64(L_0^2R)^{-0.987}$	0.999 8
20	$\alpha_w=90.784(L_0^2R)^{-1.008}$	0.999 7

表 4 缓和竖曲线最小长度动力学计算结果

$V/(km \cdot h^{-1})$	缓和竖曲线最小长度/m	竖曲线半径/m	加速度均方根/ $(m \cdot s^{-2})$	加速度渐变率/ $(m \cdot s^{-3})$
120	50	4 000	0.010 1	0.005 6
100	42	3 000	0.009 2	0.006 1
80	34	1 800	0.009 5	0.008 1
60	25	1 000	0.010 0	0.011 1
50	21	700	0.009 7	0.013 1
40	17	450	0.009 4	0.016 1
30	13	250	0.009 0	0.021 4
20	9	100	0.009 7	0.034 3

然振动标准要求较高;回归加速度渐变率 J 与设计车速 V 的关系可知两者呈幂函数关系(见图 8),车速越高,要求的缓和竖曲线越长,加速度渐变率要求越高。缓和竖曲线最小长度 L_0 与设计车速 V 的关系图见图 9。由图 9 可见, L_0 与 V 两者呈线性函数关系;设计车速越高,对线形要求越高,符合专业常识。

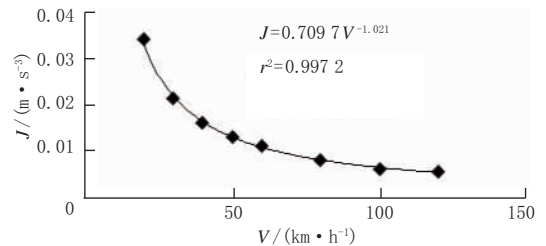


图 8 加速度渐变率与设计车速的关系图

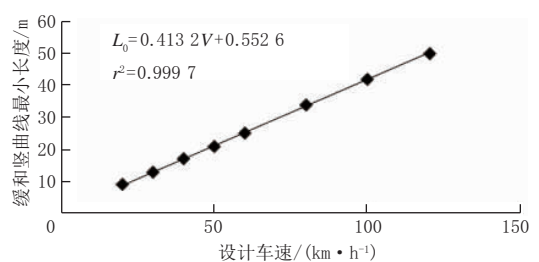


图 9 缓和竖曲线最小长度与设计车速的关系图

在工程中使用缓和竖曲线时还应考虑如下制约条件:(1)缓和竖曲线偏移距离应大于施工控制标

准;(2)满足旧路改造工程限制条件,消除或减少因标高因素而产生的无效衬垫。

5 结 语

(1)设置缓和竖曲线的目标是确保行驶质量条件下使设计线形最大程度贴近旧路改造工程现状路面,因此,在使用过程中要根据工程约束条件来确定缓和竖曲线线形。如无严格限制条件,采用7次抛物线为缓和竖曲线线形。

(2)本文初步探索了在直坡和竖曲线间设置缓和竖曲线的使用基本条件和使用基础。但旧路改造工程限制条件多,工况复杂,在反向竖曲线、同向竖曲线间设置缓和竖曲线及其使用条件的相关研究尚待开展;对于设计车速超过120 km/h的超级高速公路改造工程,因相关设计标准没有公布,需待设计标准确定后再展开相关研究。

参考文献:

[1] 何永明,裴玉龙.超高速公路发展可行性论证与必要性研究[J].公路,2016(1):158-161.

[2] 何永明,裴玉龙.基于出行费用的超高速公路经济性评价[J].公路,2018(1):117-123.

[3] 陈仁朋,贾瑞雨,姜正晖,等.不均匀沉降条件下车-路相互作用及道路纵面设计分析[J].中国公路学报,2017,30(4):1-8,23.

[4] 杜永平,王鹏.旧路改造工程中线形变形和修复研究[J].中国市政工

程,2023(2):21-25.

[5] EASA S M, HASSAN Y. Development of transitioned vertical curve I : Properties[J].Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2000, 34(6):481-496.

[6] EASA S M, HASSAN Y. Development of transitioned vertical curve II :Sight distance[J].Transportation Research Part A:Policy and Practice, 2000, 34(6):565-584.

[7] 李运胜.高速环道几何线形的运动学评价[J].中国公路学报,2002, 15(3): 23-27, 32.

[8] CHIU liu, WANG Zhongren. 行驶质量评价指标的回顾和展望[J].上海公路, 2006(1): 7-9.

[9] 葛婷,符铎,李海峰,等.公路三维线形设计及约束建模[J].华南理工大学学报(自然科学版),2016,44(8): 91-97.

[10] 杜永平,张逸,鲁雯卓.同向竖曲线车线共振及降振措施[J].上海公路,2023(3):14-22,45.

[11] 冯光乐,许志鸿,凌天清.基于道路使用功能的桥头引道沉降标准研究[J].公路交通科技, 2005, 22(2): 35-38.

[12] 郑木莲,孟建党,张世铎,等.路桥过渡段上车内人体舒适性评价方法[J].长安大学学报(自然科学版),2012,32(3):1-6.

[13] 王鹏,孔庆伟,杜永平.基于舒适性指标的道路纵断面设计指标研究[J].上海公路,2013(2): 5-8.

[14] 杨宜谦.人体全身振动的感知阈值[J].土木建筑与环境工程, 2013, 34(增刊2): 54-60.

[15] 赵嘉行.公路缓和曲线线型的探讨[J].重庆交通学院学报,1985(4): 86-97.

[16] 贺国宏.公路六次代数式缓和曲线及其应用[J].长沙交通学院学报,1987,3(3):37-46.

(上接第 27 页)

求极高的旧城功能更新片区。基于智能化技术的机械式立体停车库将会以其对土地空间十分节约的优势逐步成为旧城更新主流解决方案,根据具体城市空间的特点选择合适的智能机械停车方式是解决旧城更新区停车难问题的核心与关键。

参考文献:

[1] 武汉市自然资源和城乡建设局.武汉市停车设施建设管理暂行办法

(武汉市人民政府令第 302 号)[Z].武汉:武汉市自然资源和城乡建设局,2020.

[2] 于今.城市更新:城市发展的新里程[M].北京:国家行政学院出版社,2020.

[3] 李爽,邓建华.历史街区停车问题改善对策研究——以苏州市观前街为例[J].黑龙江交通科技,2023(2): 149-151.

[4] 许明金.浅谈机械式立体停车库顺畅性[C]// 第二十四届机械式停车设备技术研讨会论文集.贵阳:中国重型机械工业协会停车设备工作委员会,2023: 120-127.