

文章编号:1671-6833(2024)06-0009-09

老年人对信号交叉口行人服务水平评价建模与分析

张惠玲, 王瑞浩, 张 睿

(重庆交通大学 交通运输学院, 重庆 400074)

摘 要: 为分析老年人在信号交叉口人行横道的过街需求,对老年行人在通行时的服务水平进行评估,建立了基于主观评价和交叉口交通特征的老年行人服务水平评价模型。首先,通过现场观测和视频分析获取了 33 条信号控制人行横道的交通特征参数,并采用截断式问卷调查得到同步情况下过街老年人对行人服务水平评价主观值,初步选用基于非线性、线性和模糊线性回归模型。其次,通过基于 30 条人行横道的数据分析,采用皮尔逊相关系数和斯皮尔曼相关系数识别出了影响老年人过街服务水平的关键因素。最后,以关键因素为输入,对比分析非线性、线性和模糊线性 3 种回归模型,结果表明:多元非线性回归的老年行人服务水平评价模型在拟合度和误差方面表现更优,且验证组的 3 条人行横道数据进一步证实了该模型的适用性。

关键词: 信号交叉口; 老年行人; 多元非线性回归模型; 行人服务水平; 建模与分析

中图分类号: U491

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2024.06.022

截至 2023 年底,我国 60 岁及以上的老年人口比重已达到 21.1%^[1],标志着我国已进入中度老龄化社会。老年人日常出行主要以短距离步行为主^[2],信号交叉口是机动车、非机动车以及行人的重要交汇点,也是交通事故的频发地点之一。在设置交叉口交通基础设施时,对老年人过街需求考虑不足会造成老年行人在交通中的事故频发,超过 50% 的老年人认为危险来源于交叉口^[3]。信号交叉口的各项设施设置对老年人在交叉口的安全性具有直接影响作用,行人服务水平 (pedestrian level of service, PLOS) 作为反映信号交叉口人行横道各项设施运行状况的重要评价体系,从使用者的角度对交叉口行人过街的情况做出评价^[4],因此,研究老年人对信号交叉口行人服务水平评价方法对老年人安全出行具有重要的现实意义。

自 HCM2000 首次提出了行人服务水平^[5]这一概念后,该领域的研究取得了显著进展。众多学者从安全性^[6]、便利性^[7]、舒适性^[8]等多个角度丰富和完善了服务水平评价指标体系。HCM2016 将行人延误及控制方案等作为信号交叉口行人服务水平评价的主要指标^[9]。也有学者分析了信号交叉口

的设施设置^[10]、冲突情况^[11]等对行人服务水平的影响。

在服务水平评价建模方法选取中,以多元线性回归分析模型应用最为广泛^[12-13]。此外,为了克服多元线性回归的局限性,累积 Logistic 回归、模糊线性回归、岭回归等多种方法也被应用于行人服务水平评价研究^[11,14-15]。

综上所述,行人服务水平评价的研究已逐渐从单一的指标评价发展成为多维度的综合评价,但鲜有考虑老年人感受的信号交叉口行人过街服务水平的评价研究。本文考虑老龄化的社会背景,综合信号交叉口的交通设施和交通流运行状况,选用多元非线性回归、多元线性回归和模糊线性回归模型构建了信号交叉口老年人对行人过街服务水平评价的模型,通过对建立的模型进行对比分析与验证,确定了各模型的精度和应用效果。

1 行人服务水平评价的影响因素

1.1 评价建模影响因素选取

考虑国内实际交通状况和相关研究^[16],结合项目前期获得的老年人对过街设施设置问卷调查情

收稿日期:2024-07-17;修订日期:2024-08-05

基金项目:重庆市自然科学基金资助项目 (cstc2020jcyj-msxmX0083)

作者简介:张惠玲(1980—),女,宁夏中宁人,重庆交通大学教授,博士,博士生导师,主要从事交通信息工程及控制研究, E-mail:huilingz@cqjtu.edu.cn。

引用本文:张惠玲,王瑞浩,张睿. 老年人对信号交叉口行人服务水平评价建模与分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2024,45(6):9-17. (ZHANG H L, WANG R H, ZHANG R. Comparison and analysis of pedestrian service level evaluation modeling for the elderly at signalized intersections[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2024,45(6):9-17.)

况,选取各种静态及动态交通情况对过街行人服务水平评价的影响因素。图 1 列出了有可能影响评价建模的因素,并将其归纳为反映信号交叉口安全、便利和效率 3 个维度的二级指标。

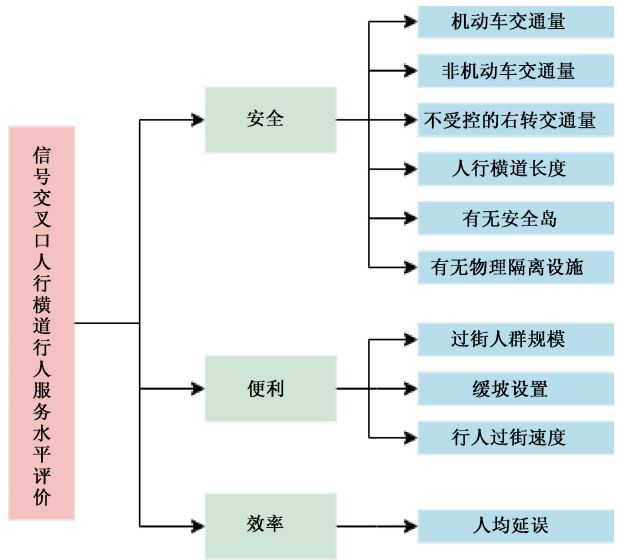


图 1 过街行人服务水平评价的影响因素

Figure 1 Influencing factors in the evaluation of level of service for pedestrians crossing the street

在过街安全性方面,主要考虑交通量和交通环境特征对行人服务水平的影响,交通量主要包括机动车交通量、沿人行横道过街的非机动车交通量以及不受信号控制的右转交通量;交通环境特征考虑了人行横道的长度、过街安全岛和隔离桩等物理隔离设施的设置。在便利性方面,考虑了过街人群规模、人行横道两端是否设置缓坡以及行人过街速度。在效率方面,主要考虑信号交叉口的人均延误。

在老年人主观对交叉口服务水平评价方面,也主要从安全、便利和效率方面进行了数据采集。本次研究采用路边截断式问卷调查法同步获取过街老年人对人行横道行人服务水平的主观评价情况,为

了方便参与者回答,同时确保评价更为全面,调查问卷仅包含性别、年龄等个体基本特征信息,以及行人对人行横道在过街安全、便利、效率方面的 3 个感知评价问题,并在问卷中通过 5 点正向量表(即“非常满意”的得分为 5 分)进行记录。

1.2 数据采集

考虑老年人的出行选择情况,本次数据采集选择天气情况较好且老年人出行时段较多的时间点,通过现场调查、视频录像和问卷调查实现数据采集。为体现研究对象的普遍性和多样性,调查地点涉及山地、平原等多种地形的信号交叉口,选取位于重庆市南岸区中心区域、重庆市秀山县、山东省济宁市兖州区、山东省淄博市张店区、四川省成都市青羊区的 30 条信号交叉口人行横道作为调查点。选取的调查点基本涵盖了常见的信号交叉口人行横道行人过街场景,各调查点的交通参数具有不同的参数水平且均具有一定比例的老年人通行。表 1 所示为各条人行横道的编号及位置信息,所有人行横道所在的交叉口均对直行和左转车辆实施信号控制。

对于选取的人行横道,现场记录交叉口渠化、设施设置等信息,每条人行横道均采用高清摄像机拍摄了不少于 2 h 的视频,并通过人工提取的方式获取机动车流量、过街行人流量、过街行人延误等动态参数。

1.3 数据描述性统计分析

1.3.1 交通数据

根据现场调查和人工提取数据的方式得到建模组 30 条人行横道的静态和动态交通数据,采用高清摄像机拍摄 30 条人行横道的行人过街特征,通过人工提取的方式得到行人交通参数,建模组人行横道的交通参数统计性描述如表 2 所示。

根据现场调查数据,调查的 30 条人行横道中长度最短的南岸区金紫街与南湖路西进口为 9 m,最

表 1 调查地点位置信息

Table 1 Survey location information					
编号 人行横道位置		编号 人行横道位置		编号 人行横道位置	
1	南岸区青龙路-南湖路东	11	张店区世纪路-中润大道西	21	南岸区回龙路-青龙路西
2	南岸区青龙路-南湖路南	12	张店区世纪路-中润大道南	22	南岸区回龙路-青龙路南
3	南岸区回龙路-青龙路东	13	青羊区纬七路-经一路北	23	南岸区二塘路-汇龙路东
4	南岸区回龙路-青龙路北	14	秀山县朝阳路-黄杨大道东	24	南岸区二塘路-汇龙路南
5	南岸区二塘路-汇龙路西	15	秀山县朝阳路-黄杨大道南	25	南岸区大石路-青龙路西
6	南岸区二塘路-汇龙路北	16	秀山县朝阳路-黄杨大道北	26	南岸区大石路-青龙路南
7	南岸区大石路-青龙路东	17	兖州区建设路-龙桥路北	27	南岸区兰花路-回龙路西
8	南岸区兰花路-回龙路东	18	兖州区大禹路-丰兖路北	28	南岸区兰花路-回龙路南
9	南岸区兰花路-回龙路北	19	南岸区青龙路-南湖路西	29	南岸区金紫街-南湖路西
10	南岸区金紫街-南湖路北	20	南岸区青龙路-南湖路北	30	南岸区金紫街-南湖路南

表 2 建模组人行横道交通参数统计性描述

Table 2 Statistical description of crosswalk traffic parameters

编号	人行横道 长度/m	安全岛 设置	隔离设 施设置	缓坡 设置	人群规模/ (ped·h ⁻¹)	过街速度/ (m·s ⁻¹)	人均延误/ (s·ped ⁻¹ ·cycle ⁻¹)	机动车 交通量/ (辆·h ⁻¹)	非机动车 交通量/ (辆·h ⁻¹)	不受信号控制的 右转交通量/ (辆·h ⁻¹)
1	16		√	√	195	1.02	21	1 520	0	0
2	20		√	√	169	1.04	32	2 084	1	189
3	26		√	√	142	1.06	36	983	3	272
4	14				230	1.09	17	933	0	410
5	24				162	1.08	30	1 333	2	228
6	38	√	√	√	326	1.13	26	2 164	11	583
7	16		√		447	1.15	32	1 083	1	0
8	27		√		138	1.09	18	699	4	0
9	24		√	√	698	1.06	30	1 153	2	0
10	16		√	√	343	1.02	19	1 641	0	0
11	38				320	1.13	26	1 378	24	576
12	30				340	1.12	36	1 385	6	331
13	24			√	180	1.06	26	1 480	1	255
14	26				143	1.08	34	1 359	3	296
15	20			√	189	1.04	22	1 394	0	89
16	18			√	348	1.04	22	1 410	0	89
17	40				30	1.21	39	1 367	36	628
18	34				92	1.14	40	1 397	8	0
19	18			√	421	0.99	18	811	1	74
20	16			√	197	1.02	38	1 806	0	0
21	26				771	1.07	32	1 397	3	258
22	24		√	√	166	1.07	32	1 183	2	0
23	30		√		94	1.10	36	1 465	6	328
24	38	√			328	1.13	17	2 624	8	535
25	18		√		202	1.04	24	1 139	0	0
26	22	√	√	√	248	1.05	17	3 897	2	0
27	30		√	√	134	1.04	24	1 056	6	343
28	20		√		566	1.18	32	981	2	91
29	10		√	√	287	1.13	15	243	0	0
30	16		√	√	221	1.00	23	1 585	0	0

注:安全岛设置、隔离设施设置、缓坡设置 3 项指标为虚拟变量;√表示有该项设置;人均延误指信号周期内行人的平均等待时间。

长的兖州区建设路与龙桥路北进口为 42 m;设置安全岛的人行横道有 6 条,人行横道两端设置物理隔离设施的人行横道有 23 条,设置缓坡的人行横道有 18 条,4 项调查指标的不同情形在涉及的信号交叉口调查中均占有一定比例。行人过街速度均值为 0.99~1.21 m/s,过街速度总体均值约为 1.08 m/s;人均延误最大值为兖州区大禹路-丰兖路北进口的 40 s/(ped·cycle),最小值为南岸区金紫街-南湖路西进口,仅有 15 s/(ped·cycle)。建模组 30 条人行横道中有 20 条人行横道的机动车交通量为 1 000~2 000 辆/h,非机动车交通量为 0~36 辆/h,30 条人行横道中有 18 条人行横道右转机动车不受信号控制。

1.3.2 样本数据

对过街老年行人开展行人服务水平感知问卷调查,30 个地点共调查问卷 939 份,每条人行横道筛选并保留熟悉该条人行横道的 30 份有效问卷数据,3 个维度评价值加权分别得出 30 条人行横道老年人服务水平评价价值,行人服务水平实际评价价值如表 3 所示。

由问卷调查数据可知,30 条人行横道老年行人整体评价均值为 10.02,各人行横道老年行人主观评价值为 8.54~12.60。对行人评价数据进行独立样本 T 检验,检验结果表明不同人行横道的老年人对交通场景行人过街服务水平主观评价存在显著差

表 3 行人服务水平评价价值统计性描述

Table 3 Statistical description of pedestrian service level evaluation value

level evaluation value			
人行横道编号	老年人评价价值	人行横道编号	老年人评价价值
1	12.00	16	11.52
2	10.95	17	8.54
3	9.11	18	8.74
4	8.73	19	12.60
5	10.38	20	12.09
6	8.66	21	9.13
7	9.10	22	9.21
8	8.97	23	8.89
9	9.36	24	8.71
10	12.03	25	11.94
11	8.69	26	10.68
12	8.88	27	8.74
13	10.23	28	11.13
14	9.10	29	8.71
15	11.34	30	12.39

异,问卷数据差异符合对老年人服务水平评价的研究要求。

由于调查者可能在短时间内无法完全理解问卷问题,并因此造成调查结果存在偏差,故采用克隆巴赫系数 α 对得到的行人评价数据进行信度分析,计算得出老年行人服务水平评价总量表的克隆巴赫系数为 $0.862>0.8$,表明测量结果均达到了高信度水平^[17]。

1.4 老年行人对服务水平评价重要变量识别

为从初选影响因素中识别出老年行人群体感知的信号交叉口行人服务水平重要影响变量,根据表 2 所列出的初选指标,对老年行人的综合感知评价结果与变量数据进行相关性分析。皮尔逊(Pear-

son)相关系数是目前使用最广泛的相关性统计量,用于测量连续变量之间的线性关系,而对于 2 个变量之间存在非线性关系的相关性检验,常使用斯皮尔曼(Spearman)相关系数,其不需要对 2 个变量的频率分布和 2 个变量之间的线性关系做出任何假设,也不需要区间尺度上进行测量,具有更为广泛的适用性^[18]。为分析变量与行人服务水平评价之间的线性与非线性相关性,进而解释并选取最适合的服务水平评价模型,同时采用皮尔逊相关系数与斯皮尔曼相关系数对行人服务水平评价和变量数据进行相关性检验,皮尔逊相关系数和斯皮尔曼相关系数可由以下公式计算:

$$\rho_p = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})(Q_i - \bar{Q})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2}}; \quad (1)$$

$$\rho_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^N (R_i - S_i)^2}{N(N^2 - 1)}。 \quad (2)$$

式中: ρ_p 表示皮尔逊相关系数; ρ_s 表示斯皮尔曼相关系数; P_i 、 Q_i 均为皮尔逊相关系数的待检验变量; \bar{P} 、 \bar{Q} 为变量 P_i 、 Q_i 的平均值; R_i 、 S_i 均为斯皮尔曼相关系数的待检验变量; N 为数据总量。 ρ_p 、 ρ_s 取值范围均为 $[-1,1]$,其绝对值越接近 1 时,变量的相关性越强^[19]。相关性检验结果如图 2 所示。

图 2 中, Y 表示老年行人服务水平评价价值; Q_v 表示机动车交通量; Q_{nv} 表示非机动车交通量; Q_{nrt} 表示不受控的右转交通量; L_c 表示人行横道长度; I_s 表示是否设置安全岛; F_i 表示人行横道两端是否设施隔离设施; Q_p 表示过街人群规模; R_c 表示人行横道两端是否设置缓坡; V_p 表示行人过街速度; D_p

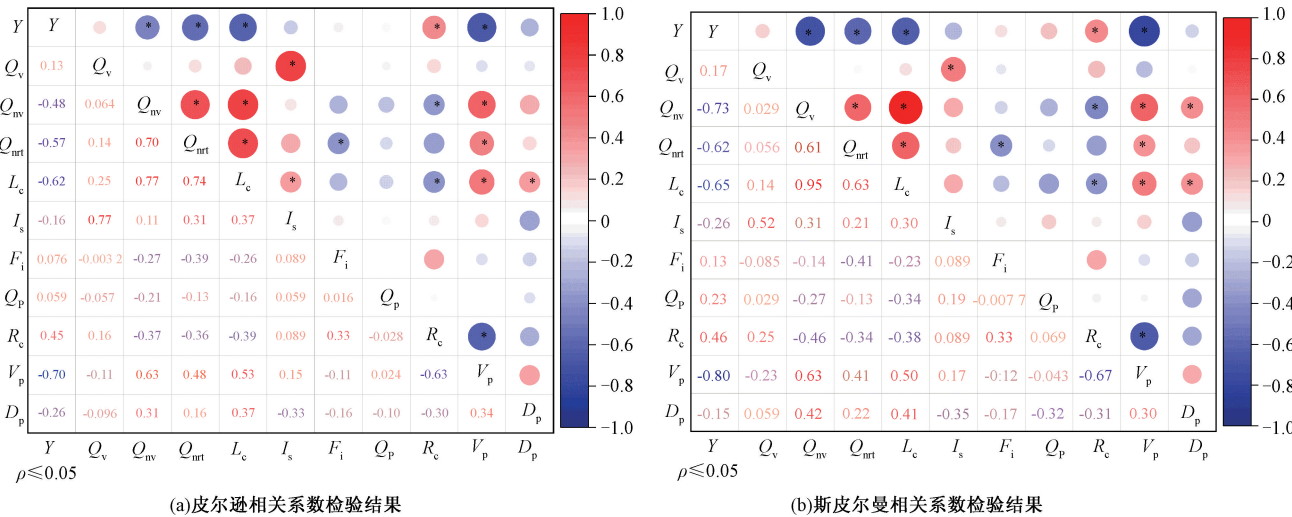


图 2 老年行人服务水平评价影响因素相关性检验热图

Figure 2 Heat map of correlation test of factors influencing elderly pedestrian service level evaluation value

表示人均延误。

由相关性检验结果可知,使用皮尔逊相关系数和斯皮尔曼相关系数确定的影响老年行人服务水平评价的重要影响因素相同,老年行人服务水平评价与人行横道两端是否设置缓坡、人行横道长度、不受控的右转交通量、过街速度、非机动车交通量 5 项指标之间存在相关关系。使用皮尔逊相关系数和斯皮尔曼相关系数确定的重要影响因素与行人服务水平评价之间的相关程度存在差异:老年行人服务水平评价与人行横道长度、不受控的右转交通量、过街速度的相关系数均为 $-1.0\sim-0.5$,且 $\rho\leq 0.05$,故老年行人服务水平评价与 3 项指标存在强相关关系;老年行人服务水平评价与人行横道两端是否设置缓坡之间的相关系数为 $0.4\sim0.5$,且 $\rho\leq 0.05$,故老年行人服务水平评价与人行横道两端是否设置缓坡之间存在中等程度相关关系。通过皮尔逊相关系数确定的老年行人服务水平评价与非机动车交通量存在中等程度相关关系,使用斯皮尔曼相关系数确定的老年行人服务水平评价与非机动车交通量存在强相关关系^[19]。此外,行人服务水平评价与重要变量之间的皮尔逊相关系数值均低于斯皮尔曼相关系数值,表明行人服务水平评价与重要变量之间的非线性相关程度明显强于两者之间的线性相关程度。

2 老年人对信号交叉口服务水平评价建模

2.1 老年人对信号交叉服务水平评价模型选择

2.1.1 基于非线性的评价模型建立

考虑通过调查获取的行人感知评价与信号交叉口交通参数之间可能存在的非线性关系,本文选用多元非线性回归分析方法构建信号交叉口老年行人服务水平评价模型。多元非线性回归分析(multivariate nonlinear regression analysis, MNR)是处理涉及 2 个或 2 个以上自变量非线性问题的常用手段,可用于解决变量之间可能存在非线性关系的实际问题^[20]。

在求解非线性问题时,往往结合曲线估算回归分析,其目的是针对具体数据选取最优的模型以及参数初估值,从而提高收敛速度并避免模型失拟,主要适用于利用一个变量对另一个变量进行预测的情况,能够在众多回归模型中确定并建立一个简单且合适的最佳模型,用于曲线估计的主要数学模型如表 4 所示。

选用样本判定系数 R^2 和 F 统计量检验备选曲线方程的拟合优度,拟合优度检验公式和回归方程显著性检验公式分别为

表 4 曲线估计模型形式

Table 4 Form of curve estimation model

模型	模型表达式
二次函数	$y = b_0 + b_1x + b_2x^2$
复合函数	$y = b_0(b_1)^x$
增长函数	$y = e^{(b_0+b_1x)}$
对数函数	$y = b_0 + b_1\ln x$
三次函数	$y = b_0 + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3$
S 型曲线	$y = e^{(b_0+b_1/x)}$
指数函数	$y = b_0e^{b_1x}$
逆函数	$y = b_0 + b_1/x$
幂函数	$y = b_0x^{b_1}$
逻辑函数	$y = (1/u + b_0b_1x)^{-1}$

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} = 1 - \frac{\sum (y - \hat{y})^2}{\sum (y - \bar{y})^2}; \quad (3)$$

$$F = \frac{\frac{SSR}{k}}{\frac{SSE}{(m-k-1)}} = \frac{\frac{\sum (\hat{y} - \bar{y})^2}{k}}{\frac{\sum (y - \hat{y})^2}{(m-k-1)}}。 \quad (4)$$

式中: SSR 为回归平方和; SSE 为残差平方和; SST 为总离差平方和; y 为样本实际值; \bar{y} 为样本实际均值; \hat{y} 为预测值; m 为样本数; k 为自变量个数; F 为统计量, $F \sim (k, n - k - 1)$ 。判定系数 R^2 是对回归模型拟合程度的综合度量, R^2 越大,说明模型拟合程度越高。 F 统计量是平均回归平方和与平均残差平方和之比, F 值越大,说明自变量造成的因变量的变化越大于随机因素对因变量造成的影响,回归方程的拟合优度也越高。

基于上述分析,多元非线性回归模型的一般表达式可以表示为

$$Y = \alpha + \sum_{i=1}^n f_i(x_i) + \varepsilon_1。 \quad (5)$$

式中: $f_i(x_i)$ 为关于第 i 个解释变量 x_i 的最优曲线估计模型, $i = 1, 2, \dots, n$, $f_i(x_i)$ 的具体形式由变量间的实际关系决定; α 为常数截距项; ε_1 为不可观测的随机变量; Y 为非线性回归模型中以解释变量 x_i 表示的综合得分。

2.1.2 基于多元线性回归的模型

多元线性回归模型^[21]是 HCM 模型中对于行人服务水平评价和因素间建模选用的方法,在行人服务水平评价研究中应用较为广泛。因此,本文基于 HCM2010^[12]的建模思路,建立老年人对信号交叉口行人服务水平评价的多元线性回归模

型,表示为

$$Y' = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_n x_n + \varepsilon_2 \circ \quad (6)$$
式中: n 为解释变量即重要影响因素的数目; x_i 为第 i 个解释变量, $i = 1, 2, \cdots, n$; β_i 为回归系数; ε_2 为不可观测的随机变量; Y' 为多元线性回归模型中以解释变量 x_i 表示的综合得分。

2.1.3 基于模型线性回归模型

由于通过问卷调查得到的老年行人服务水平感知评价数据是老年行人通过个人判断得到的主观数据,具有一定的模糊性,同时为了将定性的语义变量的表达形式进行数学上的定量描述及表达以便于对比不同模型基础下的行人服务水平评价价值,因此选用基于模糊线性回归的方法构建老年行人服务水平评价模型。模糊线性回归模型(fuzzy linear regression, FLR)将回归系数看成具有某种隶属度函数的模糊数^[22],其表达式为

$$\widetilde{Y} = \widetilde{\gamma}_0 + \widetilde{\gamma}_1 x_1 + \widetilde{\gamma}_2 x_2 + \cdots + \widetilde{\gamma}_n x_n = (\gamma_0, \eta_0, \zeta_0)_{\text{LR}} + (\gamma_1, \eta_1, \zeta_1)_{\text{LR}} x_1 + \cdots + (\gamma_n, \eta_n, \zeta_n)_{\text{LR}} x_n \circ \quad (7)$$

式中: x_n 为第 n 个解释变量; $\widetilde{\gamma}_n$ 为 FLR 模型中以 LR-型模糊数表示的第 n 个解释变量的回归系数; \widetilde{Y} 为模糊线性回归模型中以 LR-型模糊数表示的综合得分。

2.2 模型拟合结果

2.2.1 基于非线性回归的评价模型

根据老年行人的重要变量检验结果,分别对选定的交通场景指标与老年行人服务水平评价价值进行曲线估计。结合非线性拟合函数判定指标 R^2 和回归方程显著性检验 F 值,综合选取各影响因素的最佳一元非线性拟合模型,各影响因素确定的老年行人服务水平评价的最佳一元非线性拟合函数方程如表 5 所示。

通过上述曲线估计得到了各自变量相对于因变量的表达式,可知 5 项指标与老年行人服务水平评价之间均具有较强的非线性关系。以老年行人主观评价的服务水平评价价值为因变量,交通场景指标为

自变量,构建多元非线性回归模型:

$$Y_{\text{plos}} = a + b_1 L_c + b_2 L_c^2 + b_3 L_c^3 + c_1 Q_{\text{nrt}} + c_2 Q_{\text{nrt}}^2 + c_3 Q_{\text{nrt}}^3 + d_1 V_p + d_2 V_p^2 + f_1 e^{f_2 R_c} + g_1 Q_{\text{nv}} + g_2 Q_{\text{nv}}^2 + g_3 Q_{\text{nv}}^3 \circ \quad (8)$$

式中: Y_{plos} 为基于非线性回归的老年行人服务水平评价价值; L_c 为人行横道长度; Q_{nrt} 为不受控的右转交通量; V_p 为过街速度; R_c 为人行横道两端是否设置缓坡; Q_{nv} 为非机动车交通量; a 为常数项; b, c, d, f, g 为自变量的系数。

根据最小二乘 L-M 算法原理^[23],得到满足最小误差的模型参数解,将老年行人服务水平相关重要变量的模型系数估计值代入式(8),得到基于非线性回归的老年行人服务水平的评价模型为

$$Y_{\text{plos}} = 104.6658 + 1.5574L_c - 0.0720L_c^2 + 0.0010L_c^3 + 0.0075Q_{\text{nrt}} - 0.0004Q_{\text{nrt}}^2 + 3.37 \times 10^{-8}Q_{\text{nrt}}^3 - 323.6659V_p + 143.0684V_p^2 + 77.9138e^{-0.0037R_c} - 0.1592Q_{\text{nv}} + 0.0126Q_{\text{nv}}^2 - 0.0003Q_{\text{nv}}^3 \circ \quad (9)$$

2.2.2 基于线性回归的评价模型

利用建模组 30 条人行横道的数据,即老年行人服务水平主观评价价值与交通场景中的人行横道长度、不受控的右转交通量、过街速度、人行横道两侧是否设置缓坡、非机动车交通量 5 项指标,对模型采用最小二乘法估算其参数,得到基于多元线性回归的老年行人服务水平评价模型的回归方程为

$$Y'_{\text{plos}} = 29.797 - 0.078L_c - 0.002Q_{\text{nrt}} - 16.518V_p - 0.164R_c + 0.075Q_{\text{nv}} \circ \quad (10)$$

式中: Y'_{plos} 为基于多元线性回归的老年行人服务水平评价价值; L_c 为人行横道长度; Q_{nrt} 为不受控的右转交通量; V_p 为过街速度; R_c 为人行横道两端是否设置缓坡; Q_{nv} 为非机动车交通量。

2.2.3 基于模糊线性回归的评价模型

应用建模组 30 条人行横道数据,计算 FLR 模型的参数估计,得到基于模糊线性回归的老年行人服务水平的评价模型为

表 5 重要因素最佳一元非线性模型拟合结果

Table 5 Best unitary nonlinear model fitting results for important factors

影响因素	最佳一元非线性模型	最佳一元非线性拟合函数方程	R^2	F	ρ
人行横道长度 L_c	三次函数	$y_{L_c} = -7.376 + 2.568L_c - 0.111L_c^2 + 0.001L_c^3$	0.673	17.834	0
不受控的右转交通量 Q_{nrt}	三次函数	$y_{Q_{\text{nrt}}} = 10.522 + 0.015Q_{\text{nrt}} - 0.00095Q_{\text{nrt}}^2 + 1.081 \times 10^{-7}Q_{\text{nrt}}^3$	0.446	6.989	0.001
过街速度 V_p	二次函数	$y_{V_p} = 261.065 - 442.897V_p + 194.382d_2V_p^2$	0.690	30.027	0.010
缓坡设置 R_c	指数函数	$y_{R_c} = 9.304e^{0.122R_c}$	0.205	7.218	0.012
非机动车交通量 Q_{nv}	三次函数	$y_{Q_{\text{nv}}} = 11.123 - 0.557Q_{\text{nv}} + 0.032Q_{\text{nv}}^2 - 0.001Q_{\text{nv}}^3$	0.516	9.232	0

$$\begin{aligned}\widetilde{Y} = & (29.882\ 0, 5.263\ 7, 1.743\ 8)_{\text{LR}} + \\ & (-0.076\ 7, 0.017\ 5, -0.027\ 9)_{\text{LR}} L_e + \\ & (-0.001\ 7, -0.000\ 2, 0.000\ 3)_{\text{LR}} Q_{\text{nr}} + \\ & (-16.628\ 7, -2.749\ 3, 0.940\ 4)_{\text{LR}} V_p + \\ & (-0.165\ 1, 0.018\ 6, -0.022\ 9)_{\text{LR}} R_e + \\ & (0.074\ 1, 0.003\ 6, 0.011\ 7)_{\text{LR}} Q_{\text{nv}} \circ\end{aligned}\quad (11)$$

由于行人服务水平评价为一维数据,可利用质心法对求解结果进行解模糊:

$$\widehat{Y}_i = \frac{1}{3}(\widetilde{Y}_{i(\text{L})} + \widetilde{Y}_{i(\text{M})} + \widetilde{Y}_{i(\text{U})})。$$

(12)

式中: $\widetilde{Y}_{i(\text{L})}$ 、 $\widetilde{Y}_{i(\text{M})}$ 、 $\widetilde{Y}_{i(\text{U})}$ 分别表示第 i 条人行横道老年行人服务水平评价得分的下限值、中间值和上限值。

3 模型验证与对比

为进一步分析前文构建的老年人对行人服务水

平评价模型预测的准确性和稳定性,同时验证研究结果对常见的人行横道具有广泛的适用性,本文综合考虑人行横道长度、人行横道两端是否设置缓坡等评价指标的数据参数差异性,选取了山东省济南市商河县青年路兴隆街南进口(验证组 1)、山东省济南市商河县青年路兴隆街东进口(验证组 2)、重庆市南岸区青龙路南湖支路东进口(验证组 3)的调查数据和老年行人服务水平评价数据对老年行人服务水平评价模型进行验证。

验证组的 3 条人行横道中,验证组 1 具有人行横道长度相对较短、不受控的右转交通量相对较少且人行横道两端设置有缓坡等特征;验证组 2 具有人行横道长度相对较短、非机动车交通量相对较多、行人过街速度较慢且人行横道两端没有设置缓坡等特征;验证组 3 具有人行横道长度适中、非机动车交通量相对较少且人行横道两端设置有缓坡等特征。验证组的静态和动态交通数据如表 6 所示。

表 6 验证组交通数据统计性描述

Table 6 Statistical description of traffic data of the verification group

验证组	人行横道 长度/m	缓坡 设置	人群规模/ (ped·h ⁻¹)	过街速度/ (m·s ⁻¹)	人均延误/ (s·ped ⁻¹ ·cycle ⁻¹)	机动车 交通量/ (辆·h ⁻¹)	非机动车 交通量/ (辆·h ⁻¹)	不受信号控制 的右转交通 量/(辆·h ⁻¹)
1	14	√	187	1.04	21.22	510	13	97
2	16		276	1.02	42.12	665	27	327
3	26	√	212	1.11	38.79	733	1	276

注:√表示有该项设置。

根据表 6 老年行人服务水平重要影响因素数据得到基于 3 种模型的老年行人服务水平评价预测值,老年人对 3 个交叉口行人服务水平得分实际值与各模型计算得到的预测值结果对比如图 3 所示。

根据验证组人行横道的老年人对行人服务水平得分实测值和预测值得到误差分析,如表 7 所示。

表 7 验证组行人服务水平预测值误差分析

Table 7 Error analysis of the predicted value of pedestrian service level in the verification group

预测模型	MAPE/%	MAE
多元非线性回归	4.39	0.48
多元线性回归	8.74	0.96
模糊线性回归	8.97	0.98

由表 7 可知,多元非线性回归模型的平均绝对百分比误差(MAPE)为 4.39%,多元线性回归和模糊线性回归模型的 MAPE 分别为 8.74%和 8.97%,明显低于其他 2 个模型。同时,多元非线性建模的 MAE 也比其他 2 个模型小,表明基于多元非线性回归的老年行人服务水平评价模型的准确度更高、误差更小,在应用于新调查地点时具有较好的适应性,能够根据较少的交通参数值较为准确地预测出老年行人对当前信号交叉口对应的交通情况下行人服务水平的感知情况。

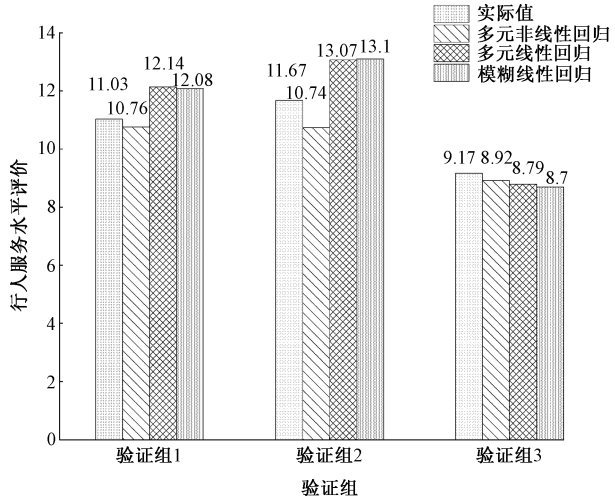


图 3 验证组行人服务水平实际值与预测值对比
Figure 3 Comparison of actual and predicted pedestrian service level in the verification group

4 结论

本文基于多元非线性回归模型对老年人在信号交叉口人行横道的过街需求进行分析,对老年人感受的信号交叉口行人服务水平进行评价建模,得出以下结论。

(1)将行人服务水平看作由多个因素共同影响的因变量,通过相关性检验,确定人行横道长度、不受控的右转交通量、行人过街速度、人行横道两侧是否设置缓坡以及非机动车交通量是影响老年行人服务水平的显著因素;同时认为老年行人服务水平与各项影响因素的非线性相关关系更强。

(2)利用采集的不同地点的 30 组人行横道的交通特征数据和同步调查的老年人主观评价赋值,建立了基于多元非线性、多元线性和模糊线性回归的老年人信号交叉口行人服务水平评价模型,应用该数据分别拟合了相同交通特征影响因素作用下的 3 种回归模型。结合验证组 3 条人行横道的数据,并对比 3 种回归模型的应用情况可知,基于多元非线性回归的老年行人服务水平评价模型在预测精度和稳定性方面效果最优。在实际应用中,通过考虑评价指标的非线性关系来建立服务水平评价模型,对研究与提升人行横道行人服务水平更具参考价值。

本文将老年行人作为主要研究对象,基于老年人的主观评分和交叉口的交通特征建立了信号交叉口老年行人服务水平评价模型,后续的研究将考虑不同年龄行人群体混行情况下信号交叉口行人服务水平评价模型,提升模型的实用化水平。

参考文献:

[1] 国家统计局. 中华人民共和国 2023 年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. (2024-02-29)[2024-03-20]. https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202402/t20240228_1947915.html.
National Bureau of Statistics. Statistical bulletin of the People's Republic of China on the 2023 national economic and social development[EB/OL]. (2024-02-29)[2024-03-20]. https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202402/t20240228_1947915.html.

[2] 黄建中, 张芮琪, 胡刚钰. 基于时空行为的老年人日常生活圈研究: 空间识别与特征分析[J]. 城市规划学刊, 2019(3): 87-95.
HUANG J Z, ZHANG R Q, HU G Y. A research of the elderly's daily life circle based on spatial-temporal behaviors—analysis of place recognition and spatial features

[J]. Urban Planning Forum, 2019(3): 87-95.

[3] 潘义勇, 吴静婷, 施颖. 交叉口处老年人碰撞事故伤害严重程度分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2022, 41(9): 39-44.
PAN Y Y, WU J T, SHI Y. Injury severity analysis of the elderly in collision accidents at intersections[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2022, 41(9): 39-44.

[4] ZHANG H L, ZHANG D K, WANG R H. Evaluation of pedestrian level of service at signalised intersections from the elderly perspective[J]. Promet-Traffic & Transportation, 2023, 35(3): 434-445.

[5] TRANSPORTATION R B. Highway capacity manual 2000[M]. Washington: Transportation Research Board, 2000.

[6] 刘孟歆, 秦华, 岳晨, 等. 右转车辆与过街行人交互过程的影响因素研究[J]. 包装工程, 2023, 44(12): 118-125.
LIU M X, QIN H, YUE C, et al. Influencing factors of interaction process between right-turning vehicles and pedestrians crossing the street[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(12): 118-125.

[7] LI W F, HE J W, YU Q, et al. Using POI data to identify the demand for pedestrian crossing facilities at mid-block[J]. Sustainability, 2021, 13(23): 13256.

[8] JIA X L, FELICIANI C, MURAKAMI H, et al. Revisiting the level-of-service framework for pedestrian comfort-ability: velocity depicts more accurate perceived congestion than local density[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2022, 87: 403-425.

[9] TRANSPORTATION R B. Highway capacity manual 2016 [M]. Washington: Transportation Research Board, 2016.

[10] AHMED T, MOEINADDINI M, ALMOSHAOGHEH M, et al. A new pedestrian crossing level of service (PCLOS) method for promoting safe pedestrian crossing in urban areas[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(16): 8813.

[11] SAHANI R, BHUYAN P K. Modelling pedestrian perspectives in evaluating satisfaction levels of urban roadway walking facilities[J]. Transportation Research Procedia, 2020, 48: 2262-2279.

[12] DIVISION T A, BOARD T R. Innovative Applications of the Highway Capacity Manual 2010[M]. Washington: Transportation Research Board, 2014.

[13] 边扬, 王伟, 陆建. 人行道行人服务水平评价方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2007, 37(4): 695-699.

BIAN Y, WANG W, LU J. Pedestrian level of service for sidewalks[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2007, 37(4): 695–699.

[14] YE X F, CHEN J, JIANG G Y, et al. Modeling pedestrian level of service at signalized intersection crosswalks under mixed traffic conditions[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2015, 2512(1): 46–55.

[15] MARISAMYNATHAN S, VEDAGIRI P. Modeling pedestrian level of service at signalized intersection under mixed traffic conditions[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2017, 2634(1): 86–94.

[16] RAAD N, BURKE M I. What are the most important factors for pedestrian level-of-service estimation? A systematic review of the literature[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2018, 2672(35): 101–117.

[17] 景鹏, 王伟, 吴麟麟. 老年人对自动驾驶汽车接受度研究[J]. 中国公路学报, 2021, 34(6): 158–171.

JING P, WANG W, WU L L. Acceptance of autonomous vehicles for the elderly [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(6): 158–171.

[18] SACCENTI E, HENDRIKS M H W B, SMILDE A K. Corruption of the Pearson correlation coefficient by measurement error and its estimation, bias, and correction under different error models[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 438.

[19] XIAO C W, YE J Q, ESTEVES R M, et al. Using Spearman’s correlation coefficients for exploratory data analysis on big dataset[J]. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 2016, 28(14): 3866–3878.

[20] MIROSHNICHENKO V, MAIBORODA R. Asymptotic normality of modified LS estimator for mixture of nonlinear regressions[J]. Modern Stochastics: Theory and Applications, 2020: 435–448.

[21] 郝翠萍. 基于多元线性回归模型的考试评价与预测研究[J]. 电子设计工程, 2021, 29(15): 142–145.

HAO C P. Research on examination evaluation and prediction based on multiple linear regression model[J]. Electronic Design Engineering, 2021, 29(15): 142–145.

[22] LI Y F, HE X X, LIU X Q. Fuzzy multiple linear least squares regression analysis[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2023, 459: 118–143.

[23] 武继刚, 李妙君, 赵淑平. 基于低秩稀疏表达的弹性最小二乘回归学习[J]. 郑州大学学报(工学版), 2023, 44(6): 25–32.

WU J G, LI M J, ZHAO S P. Low-rank sparse representation based on elastic least squares regression learning [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2023, 44(6): 25–32.

Comparison and Analysis of Pedestrian Service Level Evaluation Modeling for the Elderly at Signalized Intersections

ZHANG Huiling, WANG Ruihao, ZHANG Rui

(College of Traffic & Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: In order to analyze the needs of the elderly at the signalized intersection and evaluate the service level of the elderly pedestrians, a service level evaluation model based on subjective evaluation and intersection traffic characteristics was established. The traffic characteristic parameters of 33 signal-controlled crosswalks were obtained through field observation and video analysis. A truncated questionnaire was used to obtain the subjective value of pedestrian service level evaluation of the elderly crossing the street with synchronous conditions. The initial selection was based on nonlinear, linear and fuzzy linear regression models. Based on the data analysis of 30 crosswalks, Pearson correlation coefficient and Spearman correlation coefficient were used to identify the key factors affecting the service level of the elderly crossing the street. Taking the key factors as input, comparing the nonlinear, linear and fuzzy linear regression models, the results showed that the multivariate nonlinear regression model of elderly pedestrian service level evaluation was better in terms of fit and error, and the data of 3 crosswalks in the verification group further confirm the applicability of the model. The research results could provide some reference for the study of traffic safety improvement strategies in the aging trend.

Keywords: signalized intersection; the elderly pedestrian; multivariate nonlinear regression model; pedestrian service level; modeling and analysis