

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2023.03.008

# 面向典型信号控制场景的路段行人过街特性研究

徐新东<sup>1</sup>, 何广进<sup>2</sup>, 树爱兵<sup>2</sup>, 王运霞<sup>2</sup>

(1.无锡华通智能交通技术开发有限公司, 江苏 无锡 214151; 2.公安部交通管理科学研究所, 江苏 无锡 214151)

**摘要:** 目前对行人交通行为的研究通常是以信号控制交叉口为基础, 对典型信号控制场景下路段行人过街特性研究较少。文中通过对无锡市居民区、商业区及学校区路段行人过街场景下行人过街数据的分析, 研究不同场景下多层次行人过街等待时间、行人过街步速等可直接用于信号控制的关键参数, 为城市路段行人过街的信号精细化控制提供数据支撑。

**关键词:** 城市交通; 行人过街; 信号控制场景; 行人特性

中图分类号: U491.5

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2023)03-0033-07

据统计, 截至 2021 年, 中国交通信号控制路口约 30 万个, 26 座城市的市辖区交通信号控制路口超过 1 000 个<sup>[1]</sup>。根据公安部《中华人民共和国道路交通事故统计年报》, 2020 年由行人和非机动车闯红灯造成的死亡事故占信号交叉口总死亡事故的 25.7%<sup>[2]</sup>。其主要原因是信号控制路口不合理的信号控制方案使行人等待时间过长, 造成行人闯红灯现象频繁发生。合理的信号配时方案能有效减少行人在信号控制路口的闯红灯现象, 减少交通事故, 而行人不同场景下的过街特性是配置合理信号配时方案的基础。

在行人过街等待时间方面, 《美国道路通行能力手册》建议行人过街的等待时间不超过 30 s, 若等待时间太长, 行人延误累积到一定程度会自觉或不自觉地向机动车道逼近<sup>[3]</sup>; Sun D. 等通过对不同类型信号控制交叉口行人过街等待时间的调研, 发现 50% 行人的可容忍等待时间为 22~49 s, 且会受到与车辆冲突的频率、红灯时间长短及行人年龄的影响<sup>[4]</sup>; Roupail N. 等通过对有、无信号控制交叉口行人延误和强行穿越行为的研究, 得出行人可忍受等待时间为 45~60 s<sup>[5]</sup>; 郑明明等提出路段信号控制人行横道的行人可忍受等待时间在主干路为 50~60 s, 次干路为 40~50 s<sup>[6]</sup>; 张智勇等建立 Cox 风险回归模型, 研究信号交叉口行人过街忍耐时间, 结果表明信号交叉口行人过街的最大忍耐时间为 52.88 s<sup>[7]</sup>; 彭昕炜的调研结果显示, 湖南醴陵市 70% 居民的可接受红灯等待时间在 60 s 以内<sup>[8]</sup>。在行人过街步速方面, 《美国道路通行能力手册》建议行人中老年人比例为 0~20% 时行人平均步速为

1.2 m/s, 老年人比例超过 20% 时行人平均步速降至 1.0 m/s, 同时行人步速与空间有关, 平均行人空间低于 1.5 m<sup>2</sup>/人时行人步速无法达到他们的期望速度; 周小飞调查分析南京市信号交叉口行人过街数据, 得出男性行人的平均步速为 1.28 m/s, 15% 步速为 1.04 m/s, 女性行人的平均步速为 1.07 m/s, 15% 步速为 0.88 m/s<sup>[9]</sup>; 李昕等认为青年行人步速比老年行人快, 男性行人步速比女性行人快, 商务出行时行人步速比休闲出行时快, 人行横道长度越大, 行人步速越快, 步速范围为 1.0~1.4 m/s<sup>[10]</sup>。本文对信号控制路段行人过街典型场景下行人过街需求特性和交通特性进行分析, 通过对无锡市行人过街调查数据的分析, 研究不同场景下多层次行人过街等待时间、行人过街步速等可直接用于信号控制的关键参数, 为城市路段行人过街信号控制中合理、精细化配时方案设计提供数据支撑。

## 1 行人过街控制现状

当前随着行人检测手段的多样化、智能化, 路段行人过街信号控制从传统的定周期控制、行人按钮式请求控制转变为基于视频技术、红外热成像检测技术的信号控制。尽管行人检测技术和信号控制技术得到飞跃提升, 但与之配套的信号配时行人特征参数研究仍以信号控制交叉路口的行人调查数据为基础进行行人等待时间、行人步速分析, 而对信号控制下路段行人过街的行人需求特性及交通特性研究较少, 尤其是对路段两侧用地性质对行人过街需求的影响、不同行人数量与行人等待时间的关系、不同交通场景下行人过街交通特性、行人过街数量与行人

步速的关系等的研究较少。路段行人过街的需求特性和交通特性未能有效结合当前先进的行人检测技术和信号控制技术,这也是目前路段行人过街闯红灯现象导致的交通死亡事故居高不下的主要原因之一。

## 2 行人过街特性调查

### 2.1 调查内容

对城市主干道信号控制路段行人过街特性进行调查,调查内容如下:1)人行横道长度和宽度;2)过街行人类型、性别等;3)行人出现闯红灯时最大等待时间;4)行人达到最大等待时间时等待行人数量;5)单个行人过街时长;6)行人通行时斑马线上行人数量。

### 2.2 调查方法

将人工调查法和视频采集法相结合进行数据采集。人工调查法主要采集信号控制路段行人过街的静态信息,包括干道名称、交通场景、机动车车道数、人行横道宽度、行人红灯时长等。视频采集法主要采集信号控制路段行人过街的动态信息,包括行人闯红灯时最大等待时间、行人达到最大等待时间时等待行人数量、单个行人过街时长、行人通行时斑马线上行人数量等。

采用视频采集法进行实地调查时需注意:1)视频摄像时选择较隐蔽的位置,避免因视频采集对路段行人过街行为产生影响;2)视频摄像时尽量调整拍摄角度以覆盖到行人等待区、人行横道区域、行人信号灯,可在行人通行方向的对面进行拍摄;3)为

保证调查数据的连续,方便了解行人过街需求的全过程,每次至少连续拍摄1 h。

### 2.3 调查时间与地点

调查在天气良好的条件下进行,避开雨、雪、雾等影响行人过街特性的天气。调查时间为早高峰(7:00—9:00)、平峰(14:00—16:00)、晚高峰(17:00—19:00)。调查地点应满足以下条件:1)选择具有代表性的居民区、商业区、学校区等信号控制路段行人过街场景进行调查;2)调查地点应具备一定的行人过街需求,尤其是早晚高峰时段应有较大行人及机动车流量;3)由于道路较窄时行人预期的过街时间较短、过街欲望迫切、不遵守信号灯通行的行人比例较高,不利于行人过街等待时间及过街时长研究,尽量选择主干道或道路较宽的次干道作为调查地点。

### 2.4 调查样本

调查地点为无锡的通扬路—李巷、中山路一大成巷、五爱路通德桥小学3个信号控制路段行人过街路口,分别对应居民区、商业区、学校区3个典型场景,3条主干道均为双向六车道,人行横道宽度分别为5 m、4.5 m、6 m。每个场景的调查时间均覆盖早高峰、平峰、晚高峰3个时段。调查共采集1 259个行人过街样本(见表1)。

## 3 路段行人过街特性分析

### 3.1 行人过街宏观需求分析

#### 3.1.1 路段行人过街特征

现有研究大多以交叉口行人过街为研究对象,

表1 路段行人过街调查样本

路口	日期	调查时间	交通场景	机动车道数/条	人行横道长度/m	人行横道宽度/m	行人红灯时长/s	行人绿灯时长/s	行人样本/个
清扬路—李巷	4-27	7:30—8:30	居民	6	24	5.0	90	30	466
	4-27	16:00—17:00					80	30	
	4-27	17:00—18:00					92	28	
中山路一大成巷	4-28	7:50—8:50	商业	6	24	4.5	90	40	492
	4-28	16:00—17:00					90	40	
	4-28	17:00—18:00					90	40	
通德桥小学	4-28	7:30—8:30	学校	6	23	6.0	65	29	301
	4-28	14:00—15:00					65	29	
	4-28	15:00—16:00					50	34	

注:通德桥小学的放学时间是15:00,15:00—16:00是放学高峰,与普通的居民区和商业区的高峰时间不同。

分析行人步速、流量、行为、等待时间等特性,为交叉口及路段的行人过街信号控制提供依据。通过对实

际道路交通中行人过街的调查分析,发现路段行人过街特性和交叉口行人过街特性并不完全相同,主

要区别如下:

(1) 路段行人过街两侧的用地性质不同对行人过街的需求有影响,相比于交叉口,路段过街行人有着更明确的出行目的,如商业、学校、住宅、医院等,路段行人过街设施往往是这类特定的行人过街需求而设置,路段行人过街需求与交叉口行人过街不完全相同。

(2) 交叉口的行人对信号灯的最大等待时间受不同流向机动车信号相位的影响,最大等待时间较长。而路段过街行人仅与一个直行流向的机动车有冲突,行人的最大等待时间降低。

(3) 交叉口行人过街通常与同向的机动车信号相位一起放行,部分交叉口无右转渠化,行人过街与右转交通流有冲突,影响行人过街的速度及过街时间。而路段行人过街设置专门行人信号相位,受机动车影响较小,以行人自身影响为主。

### 3.1.2 行人过街宏观需求

通过对信号控制路段不同场景、不同时段行人过街现状的调查,描述行人集散特点及出行规律,根据居民区、商业区、学校区三类典型场景下行人调查数据,分析三类场景下行人过街需求特征。

居民区周边路段行人过街设施处,过街行人包括青少年、中年、老年全年龄层次人群,相比于学校区,居民区周边早晚高峰时段过街行人到达较离散,受周边土地性质的影响,行人过街需求也各不相同。总体而言,相比于学校区,居民区周边路段行人过街需求较低,出行时间分布跨度较大。调查数据显示,平峰时段过街行人流量比学校区多。

商业区周边路段行人过街设施处,过街行人主要以青少年和中年人为主。相比于学校区及居民区,商业区过街行人的高峰时段在工作日、周末及节假日有明显差异,工作日的过街行人早晚高峰时段比居民区推迟 1 h 以上,周末及节假日的过街行人高峰时段则不固定。商业区过街行人以成群结队为主,高出行需求时段较长,高峰期过街需求时间分布均匀,过街需求总量大。

学校区路段行人过街设施处,过街行人主要由学生及接送学生家长组成,上学时段及放学时段为主要高峰时段,高峰时段行人到达较集中。由于学校在固定时间点放学,放学时段过街行人短时间迅速集聚,与上学高峰时段相比,过街行人峰值更高。平峰时段过街行人较少,主要为附近居民日常性需求过街。

## 3.2 行人过街微观需求分析

### 3.2.1 生存分析法

生存分析是将事件的结果和出现该结果所经历的时间结合起来分析的统计方法。该方法有两个重要概念,即生存函数与删失数据。生存函数以时间为自变量,以对应时刻的生存率为函数值,能反映每个时刻事件的生存率;删失数据是指在研究时间结束时,该个体上还没有发生这个事件的数据<sup>[11]</sup>。

运用生存分析法研究信号交叉口行人过街等待时间,可以将事件的结果和出现该结果所经历的时间结合起来进行分析,考虑删失数据,在不知道路段行人过街等待时间的情况下,确定行人过街等待时间与各影响因素的定量关系。生存分析法非常适合用来研究信号控制下路段行人过街等待时间。

将信号控制路段过街行人等待过程看作生存分析过程,以行人超过其等待时间从而闯红灯的行为作为生存分析事件,未闯红灯的行人,由于不能确切知道其最大等待时间,记为删失数据。其中生存时间表示行人过街前的等待时间,用  $T$  表示,其分布函数为:

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_0^t f(u) du \quad (1)$$

式中: $T$  为生存时间即行人过街前的等待时间; $t$  为行人过街前的最大等待时间; $f(u)$  为行人过街前等待时间的密度函数。

生存函数表示行人在路段行人过街的最大等待时间大于  $t$  的概率,用  $S(t)$  表示,其数学表达式为:

$$S(t) = 1 - F(t) = P(T > t) = \int_t^{\infty} f(u) du \quad (2)$$

### 3.2.2 行人过街等待时间分析

运用生存分析法中 Kaplan-Meier 分析法建立路段行人过街信号控制路口行人等待时间函数,研究行人在路段行人过街信号控制路口红灯期间的等待时间,并基于实测数据运用非参数方法研究不同行人数量和不同出行时段时行人过街的最大等待时间阈值。据调查,当信号控制路口行人闯红灯率达到 75% 左右时,信号灯对行人已基本没有约束作用。因此,取 75% 百分位时间作为行人过街的最大等待时间,即以生存函数中 25% 百分位数点作为行人过街最大等待时间阈值。

#### 3.2.2.1 居民区路段行人过街等待时间分布规律

运用 Kaplan-Meier 分析法对居民区场景下行人过街数据进行分析,得到图 1 所示不同等待行人数量时行人过街等待时间的百分位数估计值及分

布。从图1可以看出:当路段行人过街中等待行人数量仅为1~2人时,生存函数显示行人可接受的最大等待时间整体陡峭,即25%百分位数的行人等待时间较少;当等待行人数量逐渐增加至5~6人时,25%百分位数的行人等待时间估计值增加,行人由于等待人数增加相互影响,行人等红灯的不耐烦情绪有一定降低,闯红灯行为受到相互约束;等待行人数量不断增加,由于行人的依赖心理和从众心理,行人将群体作为对自己的保护,等待行人达到一定数量时,行人的潜意识认为群体具备了优先过街的条件,极容易出现首个闯红灯的行人,进而带动群体闯红灯过街。

结合实地调查分析结果和生存分析法下生存函数的百分位数估计值,对居民区路段行人过街信号控制路口的不同数量、不同时段行人最大等待时间给出建议阈值,分为一般阈值和极限阈值(见表2)。

上限阈值表示当等待过街行人数量达到该阈值时行人容易出现群体闯红灯,可以将它作为直接发送行人过街信号请求的建议值。

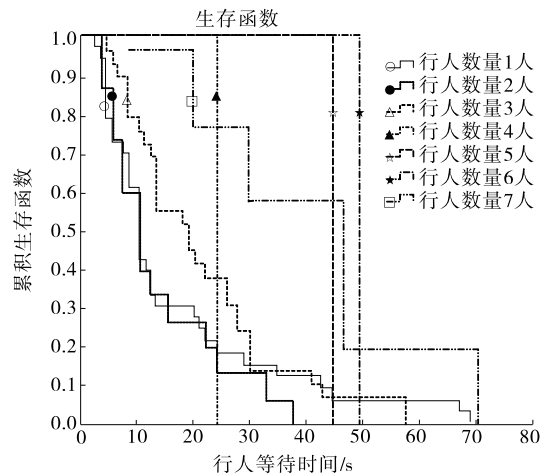


图1 居民区路段行人过街等待时间分布曲线

表2 居民区路段行人过街最大等待时间建议阈值

单位:s

时段	首个行人最大等待时间		初始阈值行人最大等待时间		上限阈值
	一般阈值	极限阈值	一般阈值	极限阈值	
早晚高峰	40	55	50	70	直接信号请求
平峰	29	45	40	55	直接信号请求

注:首个行人最大等待时间对应的行人数量为1人;初始阈值行人最大等待时间对应的行人数量为5~6人;上限阈值对应的行人数量为10~15人。

### 3.2.2.2 商业区路段行人过街等待时间分布规律

商业区场景下不同等待行人数量时行人过街等待时间的百分位数估计值及分布见图2。从图2可以看出:商业区行人等待时间分布规律与居民区类似,与居民区不同的是,商业区主干道机动车流量比居民区大,行人等待数量的上限阈值比居民区高;商业区平峰时段可接受等待时间整体上比早晚高峰时段高,这点与居民区刚好相反,这与居民区平峰时段车流量少和商业区平峰时段行人出行目的有很大关系。商业区路段行人最大等待时间阈值见表3。

### 3.2.2.3 学校区路段行人过街等待时间分布规律

学校区场景下不同等待行人数量时行人过街等待时间的百分位数估计值及分布见图3。从图3可

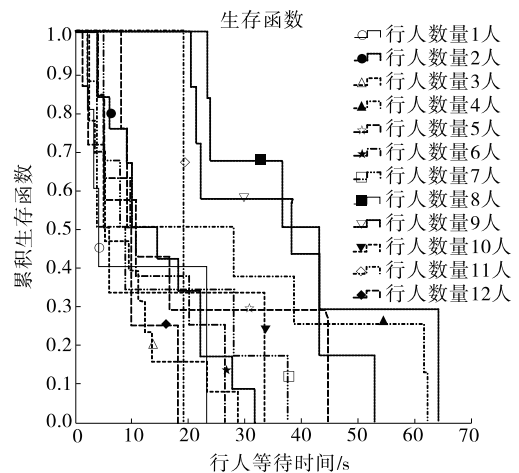


图2 商业区路段行人过街等待时间分布曲线

表3 商业区路段行人过街最大等待时间建议阈值

单位:s

商业区场景	首个行人最大等待时间		初始阈值行人最大等待时间		上限阈值
	一般阈值	极限阈值	一般阈值	极限阈值	
早晚高峰	45	60	55	78	直接信号请求
平峰	50	65	70	90	直接信号请求

注:首个行人最大等待时间对应的行人数量为1人;初始阈值行人最大等待时间对应的行人数量为4~5人;上限阈值对应的行人数量为20~25人。

可以看出:学校区路段行人过街闯红灯率远低于居民区和商业区路段,这是由于学校区过街行人主要由学生及接送学生家长组成,相比于居民区和商业区路段行人,上下学高峰的最大容忍等待时间均较长,平峰时段主要过街行人与居民区路段类似,行人等待数量上限阈值略低于商业区路段。学校区路段行人过街行人最大等待时间阈值见表 4。

### 3.3 行人过街交通特性分析

一般从行人流量、步速、密度 3 个要素分析路段行人过街中行人交通特性,鉴于数据采集的便利性及可直接用于信号控制的需求,主要以不同场景下行人步速、密度要素转化的斑马线上行人数量为研究对象,分析不同行人过街场景下性别、年龄段、出行时段及行人数量对行人步速的影响,同时拟合步速与行人数量的关系。

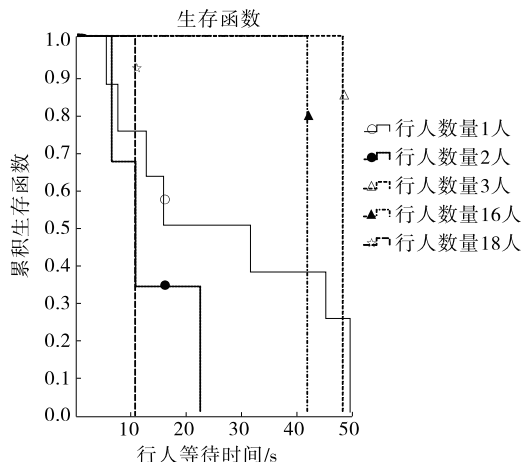


图 3 学校区路段行人过街等待时间分布曲线

#### 3.3.1 不同性别行人的过街步速

调查采集的 1 259 个行人过街样本中,绿灯期

表 4 学校区路段行人过街最大等待时间建议阈值

单位:s

学校区场景	首个行人最大等待时间		初始阈值行人最大等待时间		上限阈值
	一般阈值	极限阈值	一般阈值	极限阈值	
早晚高峰	47	65	60	80	直接信号请求
平峰	29	43	40	55	直接信号请求

注:首个行人最大等待时间对应的行人数量为 1 人;初始阈值行人最大等待时间对应的行人数量为 4~6 人;上限阈值对应的行人数量为 18~23 人。

间过街的行人数量为 981 个,其中男性样本 426 个、占绿灯过街总样本量的 43.4%,女性样本 555 个、占绿灯过街总样本量的 56.6%。利用 SPSS 软件对上

述样本数据进行统计分析,输出的观测累积频率与期望值的吻合度较高,样本符合正态分布。不同性别行人步速统计结果见表 5。

表 5 不同性别行人的步速分布

场景	性别	样本/个	步速/(m · s <sup>-1</sup> )						偏度	峰度
			15%百分位数	85%百分位数	极小值	极大值	均值	标准差		
居民区	男性	157	1.14	1.47	0.91	1.76	1.30	0.159	0.263	0.435
	女性	153	1.10	1.45	0.82	1.69	1.27	0.160	0.016	0.047
商业区	男性	146	1.06	1.47	0.85	1.68	1.25	0.189	0.410	-0.705
	女性	241	1.04	1.45	0.92	1.83	1.23	0.185	0.685	-0.089
学校区	男性	123	1.17	1.46	1.02	1.74	1.32	0.144	0.402	0.428
	女性	161	1.14	1.48	0.99	1.84	1.29	0.153	0.651	0.334

从表 5 可以看出:男性步速略高于女性;总体上,学校区路段行人步速最高,商业区路段行人步速最低。

#### 3.3.2 不同年龄段行人的过街步速

调查样本中,青少年样本 158 个,占绿灯过街总样本量的 16.1%;中年样本 767 个,占绿灯过街总样本量的 78.2%;老年样本 56 个,占绿灯过街总样本量的 5.7%。根据 SPSS 软件统计分析结果,输出的

观测累积频率与期望值的吻合度较高,样本符合正态分布。不同年龄段行人步速统计结果见表 6。

根据表 6,在老年人过街群体比例较大时,建议采用老年行人 15%百分位步数作为信号配时的基础设计步速参数。

#### 3.3.3 不同出行时段行人的过街步速

在调查样本中,早高峰样本 332 个,占绿灯过街总样本量的 33.84%;平峰样本 217 个,占绿灯过街

样本量的 22.12%；晚高峰样本 432 个，占绿灯过街样本量的 44.04%。SPSS 软件输出的观测累积频

率与期望值具有较高的吻合度，样本符合正态分布。不同出行时段行人步速统计结果见表 7。

表 6 不同年龄段行人的步速分布

场景	年龄段	样本/个	步速/(m·s <sup>-1</sup> )				均值	标准差	偏度	峰度
			15%百分位数	85%百分位数	极小值	极大值				
居民区	青少年	51	1.22	1.52	0.96	1.73	1.39	0.155	-0.268	0.262
	中年	229	1.15	1.43	0.99	1.76	1.29	0.139	0.451	0.696
	老年	30	0.92	1.15	0.82	1.34	1.08	0.118	0.033	0.362
商业区	青少年	15	0.98	1.20	0.96	1.30	1.09	0.097	0.630	-0.260
	中年	359	1.06	1.47	0.94	1.83	1.25	0.185	0.543	-0.426
	老年	13	0.93	1.18	0.85	1.40	1.06	0.132	1.210	3.322
学校区	青少年	92	1.13	1.41	1.01	1.67	1.27	0.131	0.374	0.261
	中年	179	1.18	1.50	0.99	1.84	1.33	0.154	0.523	0.172
	老年	13	1.06	1.36	1.04	1.44	1.21	0.128	0.394	-1.104

表 7 不同出行时段行人的步速分布

场景	出行时段	样本/个	步速/(m·s <sup>-1</sup> )				均值	标准差	偏度	峰度
			15%百分位数	85%百分位数	极小值	极大值				
居民区	早高峰	95	1.09	1.46	0.91	1.59	1.27	0.168	-0.311	-0.603
	平峰	81	1.15	1.44	1.02	1.73	1.31	0.142	0.546	0.676
	晚高峰	134	1.13	1.45	0.82	1.76	1.29	0.163	0.396	0.537
商业区	早高峰	119	1.23	1.58	1.02	1.83	1.40	0.166	-0.262	-0.188
	平峰	127	1.03	1.31	0.85	1.66	1.17	0.147	0.781	0.717
	晚高峰	141	1.03	1.31	0.92	1.78	1.17	0.142	1.169	2.718
学校区	早高峰	118	1.19	1.49	1.06	1.84	1.33	0.144	0.520	0.234
	平峰	9	1.22	1.65	1.18	1.67	1.43	0.182	0.142	-1.760
	晚高峰	157	1.14	1.42	0.99	1.74	1.28	0.146	0.576	0.620

从表 7 可以看出：总体上，居民区和学校区的平峰时段行人步速高于早晚高峰，而商业区由于平峰和晚高峰时段逛街购物行人人居多，行人步速明显低于早高峰时段。

3.3.4 不同数量行人的过街步速

行人密度较小时，行人可占用空间大，行人步速较快。随着行人流量及密度的不断增加，行人运动空间减小，步速逐渐降低，直至密度增大到一定数值时，步速为零。由于行人平均占有空间数据在实际中较难获取，行人数量决定行人的占有空间，通过分析行人数量与行人步速数据，利用 SPSS 软件对各场景进行线性回归分析，分析结果见表 8，行人步速与行人数量的关系拟合曲线见图 4~6。

从图 4~6 可以看出：由于居民区路段一个周期内行人通行数量较少，且行人构成差异较大，在行人数量 0~10 人范围内，行人步速波动较大，而当行人数量达到 15 人时，行人步速的波动范围明显降低；

表 8 各场景下行人数量与行人步速的回归分析结果

场景	方程	R <sup>2</sup>	显著性	参数估计值	
				常数	b <sub>1</sub>
居民区	线性	0.043	0.000	1.338	-0.010
商业区	线性	0.568	0.000	1.523	-0.016
学校区	线性	0.111	0.000	1.383	-0.008

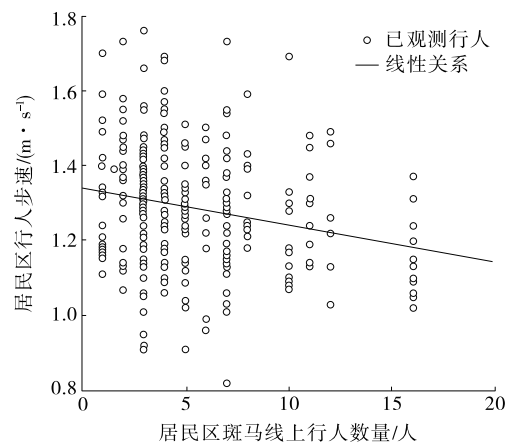


图 4 居民区路段行人步速与行人数量的关系

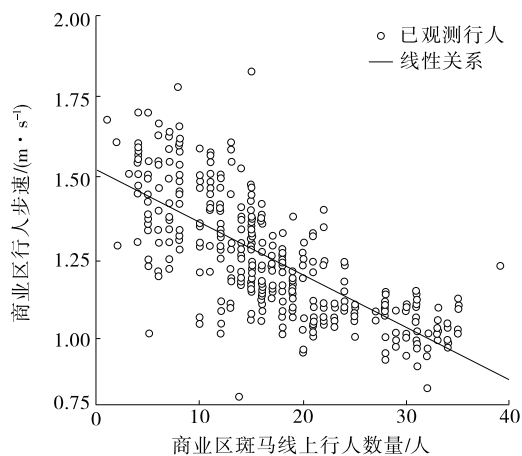


图5 商业区路段行人步速与行人数量的关系

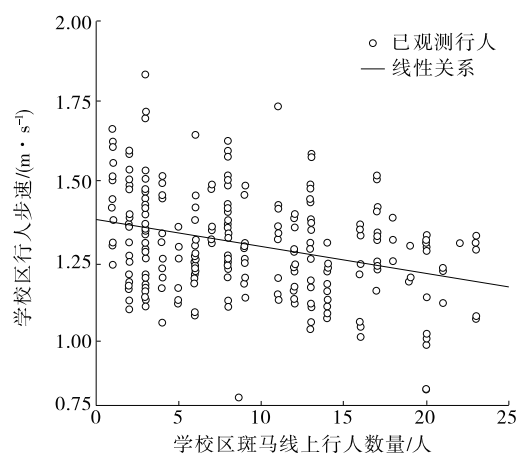


图6 学校区路段行人步速与行人数量的关系

商业区路段行人数量低于10人时,行人步速主要在1.2 m/s以上波动,行人数量达到30人时,行人步速在1.0 m/s左右波动;学校区路段行人步速与行人数量的拟合曲线与居民区类似,行人数量大于15人时步速波动范围明显降低,由于行人总数量比商业区路段小,学校区路段行人步速低于1 m/s的较少。

SPSS软件回归分析得到的行人步速与行人数量的关系式为:

$$\bar{v}_{P_{居}} = -0.010P_{居} + 1.338 \quad (3)$$

$$\bar{v}_{P_{商}} = -0.016P_{商} + 1.523 \quad (4)$$

$$\bar{v}_{P_{学}} = -0.008P_{学} + 1.383 \quad (5)$$

式中: $\bar{v}_{P_{居}}$ 、 $\bar{v}_{P_{商}}$ 、 $\bar{v}_{P_{学}}$ 分别为居民区、商业区、学校区路段行人平均步速(m/s); $P_{居}$ 、 $P_{商}$ 、 $P_{学}$ 分别为居民区、商业区、学校区路段行人通行数量(人)。

## 4 结语

本文通过调查信号控制下路段行人过街样本数据,分析路段行人过街与交叉口行人过街的区别,研究路段行人过街典型场景下不同行人数量时过街等待时间推荐阈值和不同影响因素下行人过街步速推荐阈值。根据上述研究结果,结合目前广泛应用的基于行人检测的感应式信号控制系统,可实现城市路段行人过街场景中基于不同行人数量的精细化信号感应控制,有效减少行人过街闯红灯现象,保障行人过街安全。

## 参考文献:

- [1] 顾金刚,付强,树爱兵.《关于进一步加强城市道路交通信号控制应用工作的指导意见》解读[J].道路与交通科学技术,2021(1):50-55.
- [2] 公安部交通管理局.中华人民共和国道路交通事故统计年报[R].北京:公安部交通管理局,2021.
- [3] 美国交通研究委员会.美国道路通行能力手册[M].任福田,译.北京:人民交通出版社,2010.
- [4] SUN D, SATISH V S, BENEKOHAL R F, et al. Modeling of motorist-pedestrian interaction at uncontrolled mid-block crosswalks[C]//The 82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board (CD-ROM).2003.
- [5] ROUPHAIL N, HUMMER J, MILAZZO J. Capacity analysis of pedestrian and for pedestrians' chapter of the highway capacity manual[R].North Carolina State University Department of Civil Engineering,1998.
- [6] 郑明明,徐洪峰.路段信号控制人行横道的控制方案设计与分析[J].交通与计算机,2006(2):137-141.
- [7] 张智勇,郝晓云,王东,等.北京市信号交叉口行人过街忍耐时间研究[J].交通信息与安全,2015(4):9-17.
- [8] 彭昕炜.醴陵市城区行人过街特征调查与分析[J].公路与汽运,2016(2):56-58.
- [9] 周小飞.信号交叉口行人过街速度分析[J].山西建筑,2011,37(34):140-141.
- [10] 李昕,唐海波,刘兆强.信号交叉口人行横道行人过街服务水平研究[J].公路与汽运,2017(3):40-43.
- [11] 王海婵.基于生存分析方法的步行行人闯红灯行为研究[J].华东交通大学学报,2015,32(2):54-58.

收稿日期:2022-05-24