

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2022.256

基于主动红外入侵探测的在室人数测试方法

徐文璐, 刘 猛, 刘 欢

(重庆大学 a. 土木工程学院; b. 国家级低碳绿色建筑国际联合研究中心; c. 绿色建筑与人居环境营造国际合作联合实验室; d. 风工程及风资源利用重庆市重点实验室, 重庆 400045)

摘要: 在室人数与建筑用能系统紧密相关, 实时在室人数的监测是建筑用能行为方向的热点问题之一。红外传感是现有研究方法中应用较广泛的方法, 其测试精度与安装高度、人员通过速度及人员体型等因素有关, 选取主动红外入侵探测器, 依据建筑室内人员活动情况, 研究了安装高度、通过速度及人员体型对在室人数测试精度的影响。研究表明, 考虑各种人员体型及通过速度时, 测试精度随安装高度的降低先升高后降低。通过速度越慢, 测试精度越高, 当 $v \geq 1.4$ m/s 时, 测试精度低于 60%; 当 1.0 m/s $\leq v < 1.4$ m/s 时, 测试精度为 70%~81%; 当 $v < 1.0$ m/s 时, 测试精度高于 95%, 当 $v < 0.8$ m/s 时, 测试精度达到 100% 等。被测人员的身高和体重指数 (BMI) 均与测试精度呈强正线性相关。通过不同工况分析, 提出了应用于实际场景的综合精度估算方法。

关键词: 主动红外入侵探测; 在室人数; 安装高度; 通过速度; 人员体型; 精度

中图分类号: TU831

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2023)06-051-10

A measurement method of occupancy based on active infrared intrusion detection

XU Wenlu, LIU Meng, LIU Huan

(a. School of Civil Engineering; b. National Center for International Research of Low-carbon and Green Building; c. Joint International Research Laboratory of Green Building and Built Environment; d. Chongqing Key Laboratory of Wind Engineering and Wind Energy Utilization, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: Occupancy is closely related to the building energy consumption system and real-time monitoring occupancy is one of the hot issues in the study of building energy consumption behavior. Infrared sensing is a widely used method in existing research methods. Its measurement precision is related to installation height, personnel passing speed, personnel somatotype and other factors. In this study, the active infrared intrusion detector was selected to investigate the effects of installation height, passing speed and personnel somatotype on the measurement precision of occupancy according to the indoor occupants' activities. The results show that the measurement precision first increased and then decreased with the decrease of the installation height when considering various personnel somatotype and passing speed. The slower the passing speed, the higher the

收稿日期: 2021-12-14 网络出版日期: 2022-03-08

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFD1100704)。

Supported by the National Key R&D Program of China (2018YFD1100704).

作者简介: 徐文璐 (1997—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为暖通空调理论与技术, (E-mail) xuwenlu251@163.com。

通信作者: 刘猛, 男, 教授, 博士生导师, (E-mail) liumeng2033@126.com。

measurement precision. When $v \geq 1.4$ m/s, the precision was less than 60%; when $1.0 \text{ m/s} \leq v < 1.4$ m/s, the precision was 70%~81%; when $v < 1.0$ m/s, the precision was higher than 95%; When $v < 0.8$ m/s, the precision was 100%. The height and body mass index(BMI) of the tested people were positively correlated with the measurement precision. Through the analysis of different operating conditions, an estimation method of comprehensive precision applied to actual scenes was proposed.

Keywords: active infrared intrusion detection; occupancy; installation height; passing speed; personnel somatotype; precision

近年来, 由于能源的日益枯竭, 节能问题引起了可持续发展的高度关注。建筑能耗占全球能源消耗总量的30%以上^[1]。建筑节能的关键是只在需要的时间和地点提供所需数量的建筑服务^[2], 而人员是建筑服务的主要对象, 因此实时在室人数的获取是实现更有效的控制和管理策略以节约能源这一目标的关键问题。

由于居住者行为的随机性、室内现有条件及测量工具的局限性, 特定时间特定空间的在室人数的动态数据获取仍然是一个繁琐、易错且昂贵的过程^[3]。获取在室人数最基本的方法是实地调研和问卷^[4-5], 但是这种方法通常需要耗费较多人力成本, 人工数据录入和处理存在不便, 同时调查结果易受被访问者的主观因素影响^[6]。近年来, 随着传感、通信及计算机技术的飞快发展, 利用传感器收集人员在室信息成为挖掘室内人员移动行为规律的有效手段^[7]。现有在室人数监测方法可分为直接法和间接法, 直接法主要包括视频监控、红外线、无线信号及接触传感等, 而间接法主要包括环境传感器、能耗计量仪器等。视频监控可以获取非常全面的人员信息, 但是由于其数据存储量大、费用高昂、涉及隐私和人员相关信息提取技术对非专业人士来说比较困难^[8-9]等问题, 视频监控在人员在室的研究应用中受到了极大的限制。无线信号感知一般通过WIFI^[10-11]、射频识别^[12]及Zigbee无线^[13]等技术来实现在室人数的探测, 但是由于存在用户携带移动设备但WIFI未开启、用户未携带移动设备及一位用户携带多部设备的现象, 所以无线信号感知的方法存在一定误差。也有研究^[14-15]通过在人员座椅上安装压力传感器来估计在室人数, 利用安装在鼠标和键盘上的传感器来感应是否有人在使用电脑办公, 从而判断人员在室的时间段和人员数量, 但这种方法无法判断人员在室内却不在座位上或不使用电脑的情况。近年来, 有研究推荐使用环境参数^[3,16-18], 比如光、温度、湿度和CO₂浓度来估计室内人数, 此方法不涉及隐私问题, 但门窗位置、新风量、传感器响应时间, 以及人员与传感器的距离等都会给估计带来误差^[19]。而基于能耗计量仪器(智能电表^[20]、功率表^[21]等)的在室人数监测方法也只能识别到使用特定设备时的人员活动^[22]。

综上, 由于工作原理的不同, 不同传感器评估和监测在室人数时有着各自的特性和局限性^[8]。因此, 需要为读者提供清晰且详尽的在室人数测试方法。

1 研究方法

1.1 基本原理

相比于现有的其他在室人数监测技术, 主动红外入侵探测器有体积小、寿命长、灵敏度高、安装方便、价格低廉且不涉及隐私等优势^[23]。主动红外入侵探测器主要包括投光器和受光器两部分, 在电源的驱动下, 投光器中的发光二极管发射红外光束, 红外光束通过光学系统被聚焦成细长的平行光束发送给受光器, 受光器经光学系统接收红外光束之后, 光信号通过光电传感器后转换为电信号, 当光束被遮挡, 控制器通过对信号适当处理之后进行计数^[23]。而主动红外入侵探测器的测试精度主要由红外光束被遮挡的持续时间决定^[24], 当被遮挡的持续时间超过某一值时, 探测器就会进行计数, 当被遮挡的持续时间低于某一值时, 探测器就不会进行计数。其中, 红外光束被遮挡的持续时间主要由遮挡物体的厚度以及运动速度决定^[25-26]。对于遮挡物体为人的应用场景, 将主动红外入侵探测器安装在外门的不同高度, 对应的则是人

体不同厚度的身体部位对红外光束进行遮挡。所以主动红外入侵探测器的安装高度、被测人员的通过速度以及体型都将作为影响探测器测试精度的因素,而现有研究并没有对影响主动红外入侵探测器的测试精度的因素进行详细分析,因此这便成为了本研究的重点。

1.2 实测情况

选取主动红外入侵探测器作为实验仪器,该探测器可对进出房间的人员实现方向自动识别与自动计数,适合人员依次进出或人流密度不大的场所使用,例如普通住宅、小型办公室、宿舍等。探测器在房间出入口处形成由两束平行红外线组成的无形屏障,并对人员进入或离开房间时造成的每一次遮挡进行计数,可以实现以5 min为时间间隔对数据进行记录。

考虑探测器的安装高度、被测人员的通过速度及体型为工况参数。其中,在对被测人员体型进行筛选时主要考虑身高和体重这2个参数,由于单纯地对比不同身高的人之间的体重是没有意义的,因此选取BMI (body mass index, 体重指数)来表征人员身体的厚度^[27], BMI (kg/m^2)可以根据人员的身高(h/m)和体重(m/kg)通过公式 $\text{BMI} = m/h^2$ 计算得出。根据BMI中国标准划分, $\text{BMI} < 18.5 \text{ kg}/\text{m}^2$ 为偏瘦, $18.5 \sim 23.9 \text{ kg}/\text{m}^2$ 为正常, $24.0 \sim 27.9 \text{ kg}/\text{m}^2$ 为超重, $\text{BMI} \geq 28.0 \text{ kg}/\text{m}^2$ 为肥胖^[28]。本次测试一共选取了10位被测人员进行反复测试,他们的体型信息见表1。

表1 测试具体工况

Table 1 Specific operating conditions of the measurement

身高 h/cm	BMI分类	人员编号	通过速度 $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	探测器的安装高度/ m
$h \geq 170$	超重/肥胖	1号		1.30、1.20、1.10、1.00、0.65、0.30
	正常	2号、3号		
	偏瘦	4号	稍快($v \geq 1.4$)	
$h < 170$	超重/肥胖	5号、8号	正常($1.0 \leq v < 1.4$)	
	正常	7号、10号	稍慢($v < 1.0$)	
	偏瘦	6号、9号		

测试时将探测器安装在房间外门上,外门尺寸(宽 \times 高)为 $0.9 \text{ m} \times 2.0 \text{ m}$,安装时需注意将探测器安装牢固且投光器和受光器必须对齐。本次测试通过在门框的6种高度处逐一安装探测器,观察人员通过红外光束时,探测器的指示灯是否闪烁来判断探测器是否探测到人员的进出,指示灯闪烁代表探测到人员通过,记为1,指示灯不闪烁代表没有探测到人员通过,记为0。值得说明的是本研究中人员的行走速度值是根据人员匀速行走6 m所需的时间计算出来的。使用秒表来测量行走速度的方法仍然在临床环境中广泛应用,因为这种由秒表进行的测量快捷、重复性好、价格便宜、可行,而且不需要专业培训^[29]。如图1所示,本次测试的行走区域共10 m长,启动过渡区(2 m)和停止过渡区(2 m)的设置是为了减小由于被测人员在启动或停止行走时的反应时间带来的误差,保证被测人员在进入和离开计时区时都处于行走状态^[30]。当被测人员的前腿完全进入计时区时,计时人员使用秒表开始计时,当前腿完全离开计时区时停止计时,同时为了避免由于不同计时人员的反应时间不同带来的误差,本次测试的计时工作均由同一名训练有素的计时人员在视野良好的地方完成。每位被测人员在每种安装高度下首先以个人的正常行走速度行走50次,然后再以稍快和稍慢的行走速度分别行走30次,稍快要求 $v \geq 1.4 \text{ m}/\text{s}$,即6 m的通过时间 $t < 4.29 \text{ s}$,稍慢要求 $v < 1.0 \text{ m}/\text{s}$,即6 m的通过时间 $t > 6 \text{ s}$,被测人员在正式测试前均反复练习,以控制通过时间和速度的均匀性,每2次测试间有10 s休息时间,总测试次数为6 600次,本次测试的具体工况情况见表1。

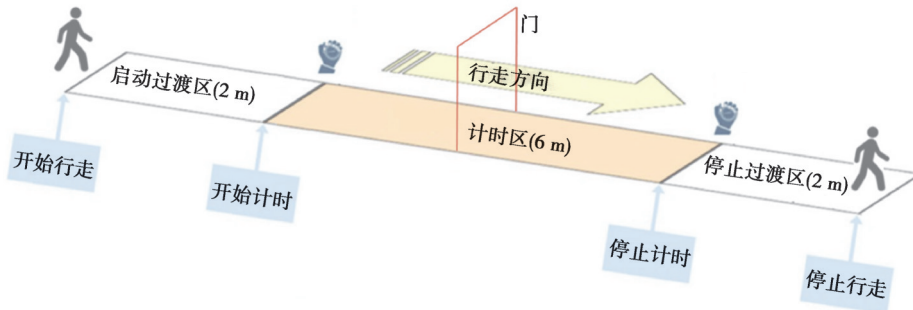


图1 测试场景示意图

Fig. 1 The schematic diagram of test scenario

2 研究结果

2.1 安装高度对测试精度的影响

分别统计6种不同安装高度下，当总测试次数为 m 时，探测器准确探测到人员通过的次数 n ，并按照式(1)计算出相应的测试精度 P ，得出如图2所示的柱状图，可以看出测试精度随安装高度的降低先升高后降低，当安装高度为1.10 m时，测试精度达到最大值72.2%，但是72.2%的测试精度的实际应用价值并不高，现有研究中的人员探测器的测试精度一般在90%^[14,23]以上，因此只考虑探测器的安装高度这一个影响因素还不够，还需进一步分析其他因素对测试精度的影响。

$$P = \frac{n}{m} \times 100\% \quad (1)$$

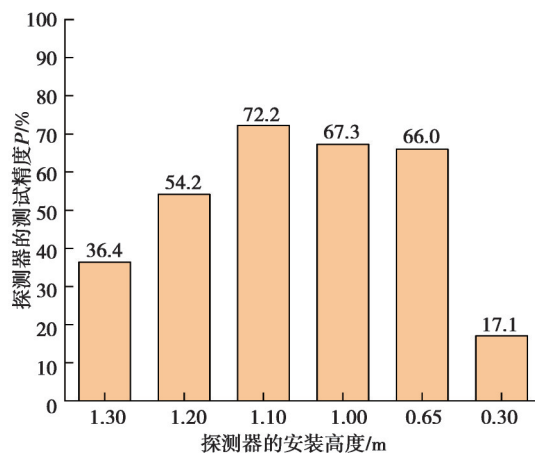


图2 探测器的安装高度对其测试精度的影响

Fig. 2 The effect of detector installation height on its measurement precision

2.2 通过速度对测试精度的影响

在测试每一种安装高度时，安排10名被测人员按照正常行走速度通过外门各50次，实际共记录2 910个正常行走速度的数据，由这些数据得出的人员正常行走速度的分布直方图如图3所示，经计算得出84.4%的速度都在区间[1.0, 1.4)之内，只有1.4%的速度值大于或等于1.4 m/s。故接下来针对通过速度对测试精度的影响进行分析时选取的速度分界值为1.0 m/s和1.4 m/s，这与Keijsers等^[31]的研究结果（慢速行走速度为1.0 m/s，正常行走速度小于1.38 m/s）非常接近。

图4为6种安装高度下通过速度位于不同速度区间时测试精度的柱形图，可以看出当通过速度超过人正常行走的速度上限1.4 m/s时，测试精度明显降低，其范围为26.0%~58.6%。当通过速度位于人正常行走的区间[1, 1.4)之内时，测试精度相比于快速通过时的测试精度明显升高，其中1.10 m、1.00 m和0.65 m

的测试精度分别为78.7%、76.7%和79.2%，这3种安装高度对应的测试精度比其他3种安装高度对应的测试精度高很多。当通过速度低于1.0 m/s时，1.10 m、1.00 m和0.65 m这3种安装高度对应的测试精度均达到95%以上，其中安装高度为1.10 m时，测试精度达到98.6%。

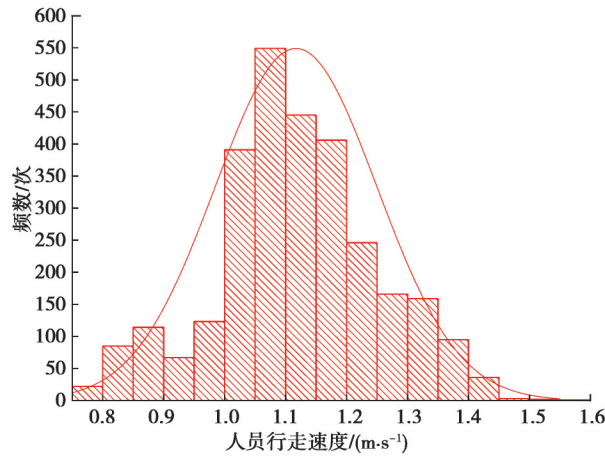


图3 人员正常行走速度直方图

Fig. 3 Personnel normal walking speed histogram

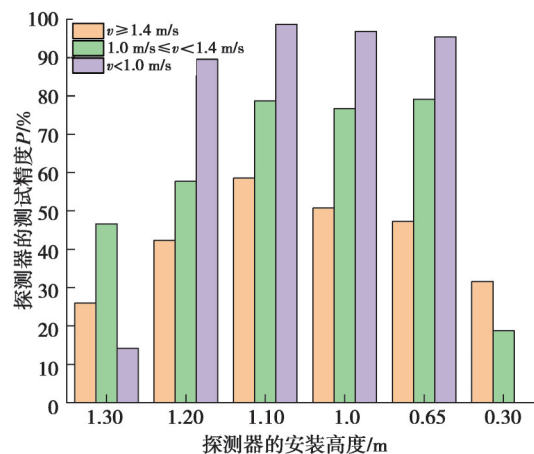


图4 通过速度对探测器的测试精度的影响

Fig. 4 The effect of passing speed on measurement precision of detector

由于本次测试中人员进出房间时外门始终处于开启状态，人员在通过红外屏障时没有阻碍，而平时大家进出外门时会有开/关门动作，也就是说人员在进出外门时通常会有一段停顿的时间，而前面的研究表明，通过速度越慢，测试精度越高，由此可推测当人员在外门的红外线处有停顿时，测试精度将会明显升高，甚至可能达到100%。为了证明这一推论，将探测器安装在门框的1.10 m高度处，邀请6名受试者一共进行了120次反复测试，且每次通过外门时都有开/关门的动作，最终统计发现每次人员通过均被探测器准确探测到，即当人员通过且有开/关门动作时探测器的测试精度为100%。

为了对通过速度对测试精度的影响进行深入的分析，将1.10 m、1.00 m和0.65 m这3种测试精度较高的安装高度对应的3 320组数据合并起来分析，将速度以0.1 m/s为间隔划分为16个速度区间，并计算出每个速度区间对应的测试精度，最后绘制出如图5所示的折线图。分析该折线图可知，通过速度对测试精度有较大的影响，当 $v \geq 1.4$ m/s时，测试精度低于60%，如图5中的黑色圆圈所示，除 $2.1 \text{ m/s} \leq v < 2.2 \text{ m/s}$ 对应的测试精度之外，因为该区间的的数据大多来源于BMI分类为超重/肥胖的人员；当 $1.0 \text{ m/s} \leq v < 1.4 \text{ m/s}$ 时，测试精度为70%~81%，如图5中的绿色圆圈所示；当 $v < 1.0$ m/s时，测试精度高于95%，如图5中的红色圆圈所示，且通过速度越慢，测试精度越高，当 $v < 0.8$ m/s时，测试精度达到100%。

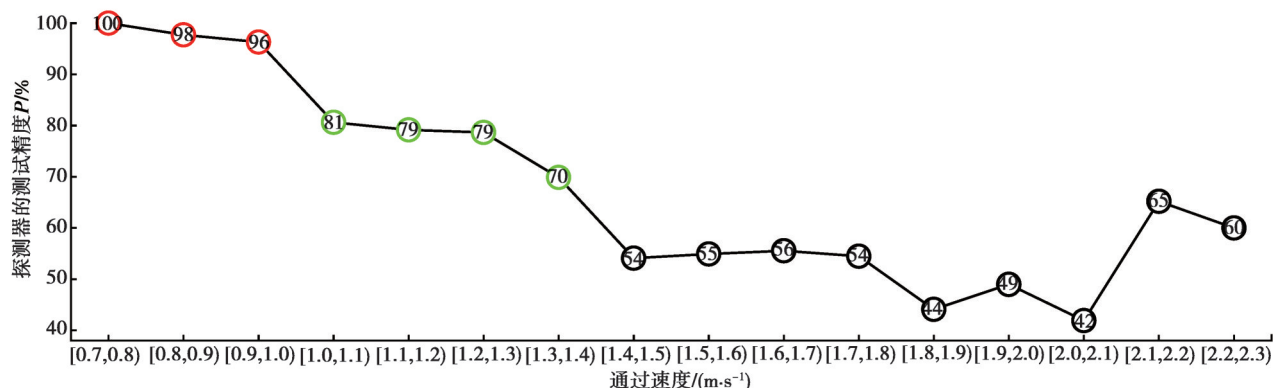


图5 通过速度对探测器的测试精度的影响

Fig. 5 The effect of passing speed on measurement precision of detector

2.3 人员体型对测试精度的影响

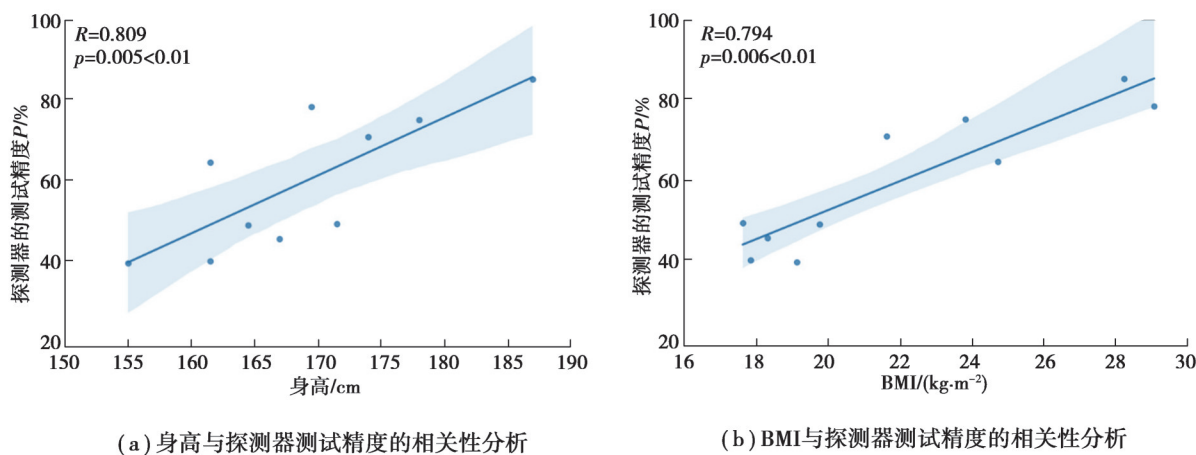
此部分分析时,选取的数据是除安装高度为0.30 m以外的所有数据,因为安装高度为0.30 m时,测试精度低于20%,而且对于每种体型的被测人员都是如此,究其原因是在该安装高度下,人员通过时从红外线上方跨过的情况比较多,导致漏检的次数比较多。

将人员身高和BMI分别与测试精度进行斯皮尔曼(Spearman)相关性分析,分析结果如图6所示。根据经验,变量之间的相关性强度分为4种类型,如表2所示^[32],其中 R 表示斯皮尔曼相关系数。

表2 相关性强度判断标准

Table 2 The judgment standard of the strength of correlation	
R 值	相关性强度
(0.5, 1]	强
(0.3, 0.5]	中等
(0.1, 0.3]	弱
[0, 0.1]	无或非常弱

如图6所示,身高和BMI与测试精度的斯皮尔曼相关系数 R 分别为0.809和0.794,且显著性水平 p 值均小于0.01,根据表2可知,相关系数 $|R|>0.5$ 表明2个变量间的相关性等级为强相关,所以身高和BMI均与测试精度呈强正线性相关,其中身高与测试精度的线性相关性更强。



(a) 身高与探测器测试精度的相关性分析

(b) BMI与探测器测试精度的相关性分析

图6 人员体型与探测器测试精度的相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis between personnel somatotype and measurement precision of detector

3 讨 论

上述研究结果中主要分析了探测器的安装高度、被测人员的通过速度以及体型这 3 种因素分别对测试精度的影响,本小节将把这 3 种因素综合起来进行讨论分析,旨在为人们使用主动红外入侵探测器进行在室人数的监测时提供比较可靠的测试方法。首先,将所有数据根据被测人员的身高和 BMI 分类划分为 6 类:1) 身高 $h \geq 170$ cm, BMI 分类:超重/肥胖;2) 身高 $h \geq 170$ cm, BMI 分类:正常;3) 身高 $h \geq 170$ cm, BMI 分类:偏瘦;4) 身高 $h < 170$ cm, BMI 分类:超重/肥胖;5) 身高 $h < 170$ cm, BMI 分类:正常;6) 身高 $h < 170$ cm, BMI 分类:偏瘦。然后计算出每一类的不同安装高度、不同通过速度下的测试精度,并绘制出如图 7 所示的柱状图。

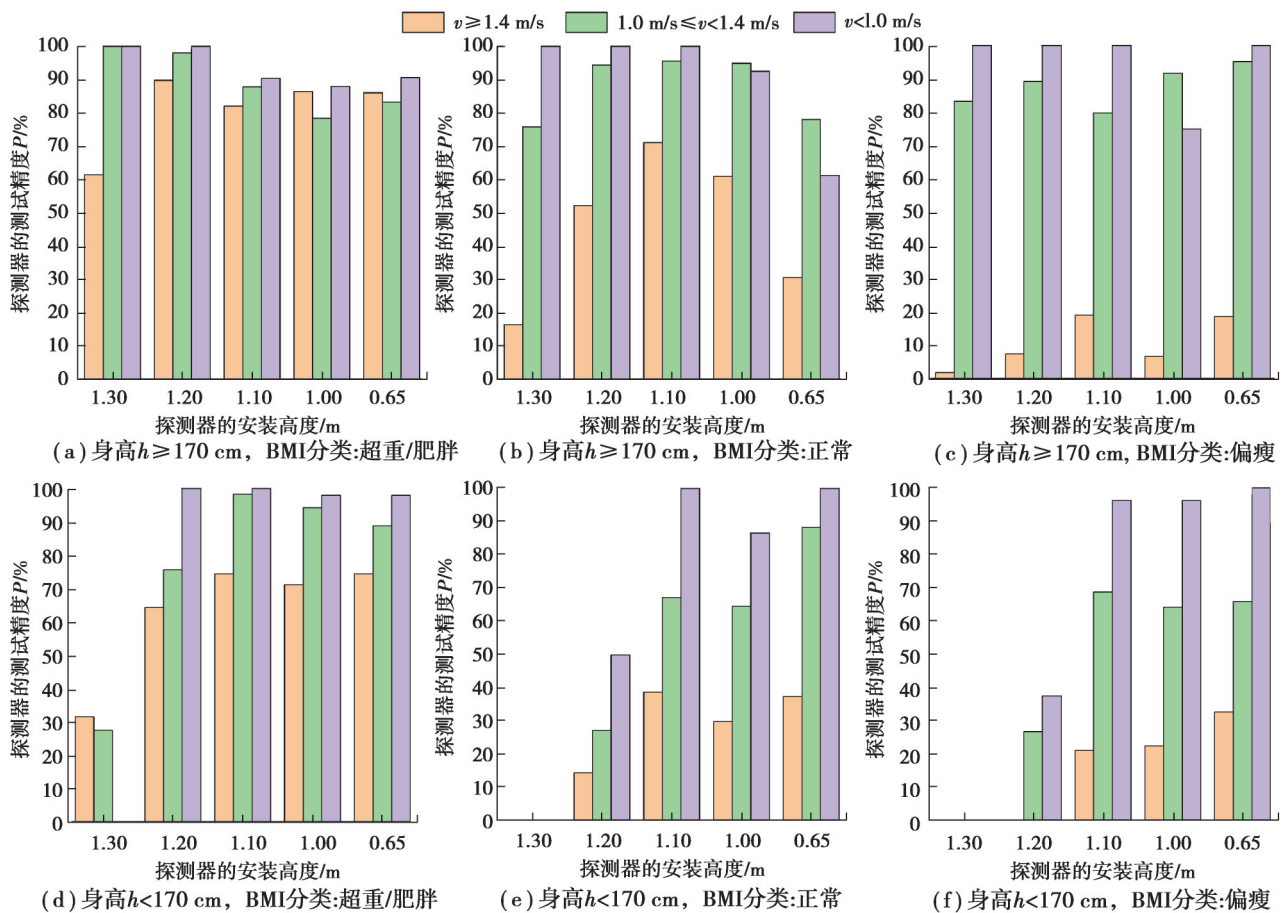


图 7 3 种因素对探测器测试精度的综合影响

Fig. 7 Comprehensive influence of three factors on measurement precision of detector

每一类被测人员不同的通过速度都会对应一个或多个最佳安装高度,比如对于身高 $h \geq 170$ cm, BMI 分类为超重/肥胖的被测人员(图 7 (a))在慢速通过 ($v < 1.0$ m/s) 时,探测器的最佳安装高度为 1.20 m 和 1.30 m,对应的测试精度均为 100%,而快速通过 ($v \geq 1.4$ m/s) 时,探测器的最佳安装高度为 1.20 m,对应的测试精度为 89.8%。不同体型的被测人员在同一安装高度下以相同速度通过时对应的测试精度不一样,比如当被测人员在安装高度为 1.30 m,慢速通过 ($v < 1.0$ m/s) 时,对于身高 $h \geq 170$ cm 的 3 类(图 7 (a) ~ (c))的测试精度均为 100%,而对于 $h < 170$ cm 的 3 类(图 7 (d) ~ (f))的测试精度均为 0%,这是由于 1.30 m 对应身高 $h \geq 170$ cm 的被测人员的胸部位置,1.30 m 对应身高 $h < 170$ cm 的被测人员的肩部或颈部的位置,后者的厚度太小,导致探测器探测不到人员通过,精度为 0%。而且同一体型的被测人员不同通过速度对应的测试精度随探测器的安装高度的降低而变化的趋势也不一样,比如对于身高 $h \geq 170$ cm, BMI 分类为正常的被测人员(图 7 (b)),通过速度 $v \geq 1.4$ m/s 和 $1.0 \text{ m/s} \leq v < 1.4$ m/s 对应的测

试精度随探测器的安装高度的降低先升高后降低, 而通过速度 $v < 1.0$ m/s 对应的测试精度随探测器的安装高度的降低先不变后降低。

为了便于查询和选择, 表3中列出了不同人员体型、通过速度和安装高度对应的探测器测试精度范围。对于单人使用的房间, 可根据人员体型特征及平时的行走速度直接查询表3得到不同安装高度对应的测试精度范围。然而面向更广的实际应用场景时, 某一房间的人员体型一般是由多种体型组合而成的, 此时需要结合表3和式(2)来得出当主动红外入侵探测器的被测对象为某种人员体型组合, 并在某种通过速度场景下应用时的不同安装高度对应的综合精度 P_{com} 的范围, 以使用户根据需要选取安装高度。

表3 不同体型、通过速度和安装高度对应的探测器测试精度

Table 3 The measurement precision of detector corresponding to different personnel somatotypes, passing speeds and installation heights

身高 h/cm	BMI 分类	通过速度 $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	测试精度/%	
			安装高度 1.20~1.30 m	安装高度 0.65~1.10 m
$h \geq 170$	超重/肥胖	$v \geq 1.4$	61.4~89.8	82.0~86.4
		$1.0 \leq v < 1.4$	98.0~100.0	78.4~87.8
		$v < 1.0$	100.0	88.0~90.6
		有开关门动作时	100.0	100.0
	正常	$v \geq 1.4$	16.4~52.2	30.5~71.1
		$1.0 \leq v < 1.4$	75.8~94.4	78.0~95.6
		$v < 1.0$	100.0	61.2~100.0
		有开关门动作时	100.0	100.0
	偏瘦	$v \geq 1.4$	1.7~7.4	6.7~19.0
		$1.0 \leq v < 1.4$	83.3~89.3	79.7~95.2
		$v < 1.0$	100.0	75.0~100.0
		有开关门动作时	100.0	100.0
$h < 170$	超重/肥胖	$v \geq 1.4$	31.5~64.3	71.2~74.4
		$1.0 \leq v < 1.4$	27.5~75.6	88.9~98.3
		$v < 1.0$	0.0~100.0	98.0~100.0
		有开关门动作时	100.0	100.0
	正常	$v \geq 1.4$	0.0~14.6	30.0~38.9
		$1.0 \leq v < 1.4$	0.0~27.4	64.7~88.3
		$v < 1.0$	0.0~50.0	86.7~100.0
		有开关门动作时	100.0	100.0
	偏瘦	$v \geq 1.4$	0.0	21.2~32.7
		$1.0 \leq v < 1.4$	0.0~26.8	64.2~68.7
		$v < 1.0$	0.0~37.5	96.2~100.0
		有开关门动作时	100.0	100.0

$$P_{\text{com}} = \sum_{i=1}^n x_i [\eta P_i + (1 - \eta) \times 100\%], \quad (2)$$

式中: x_i 表示测试时间段内第 i 位被测人员进出房间总次数占所有人员进出房间总次数的比例, η 代表测试时间段内房间外门处于开启状态的时长与总测试时长的比例, P_i 代表根据第 i 位被测人员身高、BMI 分类、通过速度及探测器的安装高度范围, 查表3所得的测试精度。

最后, 为了验证该估算方法的有效性, 以某小型科研办公室为例, 其长期在室人数为4人, 他们的体型及某天进出房间的次数见表4。以摄像头的记录作为真实值, 对比安装高度为1.10 m 时根据表3和式(2)计算出的综合测试精度与实际测试精度的差异。该办公室会有将外门开启进行自然通风的习惯, 办公时间中约有一半的时间外门处于开启状态, 因此 $\eta = 0.5$, 外门开启时间段内, 人员以正常的速度通过

外门, 即 $1.0 \text{ m/s} \leq v < 1.4 \text{ m/s}$, 查表3得, $P_1 = 79.7\% \sim 95.2\%$, $P_2 = 78.0\% \sim 95.6\%$, $P_3 = 78.4\% \sim 87.8\%$, $P_4 = 64.2\% \sim 68.7\%$, 根据表4, 此例中 $x_1 = \frac{12}{32}$, $x_2 = \frac{2}{32}$, $x_3 = \frac{4}{32}$, $x_4 = \frac{14}{32}$, 将上述所有值代入式(2)中, 计算得到综合测试精度 $P_{\text{com}} = 86.3\% \sim 91.4\%$, 而以摄像头为真实值的实际测试精度为 90.6% , 说明本研究提出的综合精度估算方法是可行的。

表4 被测人员基本信息

Table 4 Basic information of persons under test

被测人员 序号	身高 h/cm	BMI分类	进入房间 次数/次	离开房间 次数/次	查表3所得安装高度 为0.65~1.10 m时测试精度/%
1	$h \geq 170$	偏瘦	6	6	79.7~95.2
2	$h \geq 170$	正常	1	1	78.0~95.6
3	$h \geq 170$	超重	2	2	78.4~87.8
4	$h < 170$	偏瘦	7	7	64.2~68.7

4 结 论

选取主动红外入侵探测器, 研究了探测器的安装高度和人员通过速度对探测器测试精度的影响, 还将人员体型与测试精度进行了斯皮尔曼相关性分析, 并提出了在实际场景中应用主动红外入侵探测器进行在室人数监测时的综合精度估算方法。

主要结论为以下几点:

1)考虑各种人员体型及通过速度时, 测试精度随安装高度的降低先升高后降低, 当安装高度为 1.10 m 时, 测试精度达到最大值;

2)通过速度对测试精度有较大的影响, 通过速度越慢, 测试精度越高, 当 $v \geq 1.4 \text{ m/s}$ 时, 测试精度低于 60% ; 当 $1.0 \text{ m/s} \leq v < 1.4 \text{ m/s}$ 时, 测试精度为 $70\% \sim 81\%$; 当 $v < 1.0 \text{ m/s}$ 时, 测试精度高于 95% , 当 $v < 0.8 \text{ m/s}$ 时, 测试精度达到 100% ; 当人员通过且有开/关门的动作或在门口有停留时, 测试精度为 100% 。

3)被测人员的身高和BMI均与测试精度呈强正线性相关;

4)通过不同工况分析, 提出了应用于实际场景的综合精度估算方法, 可以很好地为用户提供选择特定应用场景下探测器最佳安装高度的方法。

参考文献

- [1] BP p l c. BP energy outlook: 2020 edition[EB/OL]. [2021-11-30]. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2020.pdf>.
- [2] Newsham G R, Xue H, Arsenault C, et al. Testing the accuracy of low-cost data streams for determining single-person office occupancy and their use for energy reduction of building services[J]. Energy and Buildings, 2017, 135: 137-147.
- [3] Szczurek A, Maciejewska M, Pietrucha T. Occupancy determination based on time series of CO2 concentration, temperature and relative humidity[J]. Energy and Buildings, 2017, 147: 142-154.
- [4] Chen J, Wang X H, Steemers K. A statistical analysis of a residential energy consumption survey study in Hangzhou, China[J]. Energy and Buildings, 2013, 66: 193-202.
- [5] Hu M M, Xiao F. Quantifying uncertainty in the aggregate energy flexibility of high-rise residential building clusters considering stochastic occupancy and occupant behavior[J]. Energy, 2020, 194: 116838.
- [6] 周亚苹, 俞准, 李郡, 等. 建筑用户在室行为测量方法及预测模型综述[J]. 暖通空调, 2017, 47(9): 11-18.
Zhou Y P, Yu Z, Li J, et al. Review of measuring methods and prediction models of building occupant behavior[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2017, 47(9): 11-18. (in Chinese)
- [7] Saha H, Florita A R, Henze G P, et al. Occupancy sensing in buildings: a review of data analytics approaches[J]. Energy and Buildings, 2019, 188/189: 278-285.
- [8] Chen Z H, Jiang C Y, Xie L H. Building occupancy estimation and detection: a review[J]. Energy and Buildings, 2018, 169: 260-270.
- [9] Jin M. Data-efficient analytics for optimal human-cyber-physical systems[D]. Berkeley: University of California, Berkeley, 2017.

- [10] Zou H, Zhou Y X, Yang J F, et al. Device-free occupancy detection and crowd counting in smart buildings with WiFi-enabled IoT[J]. *Energy and Buildings*, 2018, 174: 309-322.
- [11] Alishahi N, Nik-Bakht M, Ouf M M. A framework to identify key occupancy indicators for optimizing building operation using WiFi connection count data[J]. *Building and Environment*, 2021, 200: 107936.
- [12] Li N, Calis G, Becerik-Gerber B. Measuring and monitoring occupancy with an RFID based system for demand-driven HVAC operations[J]. *Automation in Construction*, 2012, 24: 89-99.
- [13] Fadhullah S Y, Ismail W. A statistical approach in designing an rf-based human crowd density estimation system[J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2016, 12(2): 8351017.
- [14] Zhao Y, Zeiler W, Boxem G, et al. Virtual occupancy sensors for real-time occupancy information in buildings[J]. *Building and Environment*, 2015, 93: 9-20.
- [15] Labeodan T, Zeiler W, Boxem G, et al. Occupancy measurement in commercial office buildings for demand-driven control applications: a survey and detection system evaluation[J]. *Energy and Buildings*, 2015, 93: 303-314.
- [16] Candanedo L M, Feldheim V, Deramaix D. A methodology based on Hidden Markov Models for occupancy detection and a case study in a low energy residential building[J]. *Energy and Buildings*, 2017, 148: 327-341.
- [17] Jiang C Y, Chen Z H, Su R, et al. Bayesian filtering for building occupancy estimation from carbon dioxide concentration[J]. *Energy and Buildings*, 2020, 206: 109566.
- [18] Jin M, Bekiaris-Liberis N, Weekly K, et al. Occupancy detection via environmental sensing[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2018, 15(2): 443-455.
- [19] Yang J J, Santamouris M, Lee S E. Review of occupancy sensing systems and occupancy modeling methodologies for the application in institutional buildings[J]. *Energy and Buildings*, 2016, 121: 344-349.
- [20] Becker V, Kleiminger W. Exploring zero-training algorithms for occupancy detection based on smart meter measurements[J]. *Computer Science - Research and Development*, 2018, 33(1/2): 25-36.
- [21] Wang Z X, Ding Y. An occupant-based energy consumption prediction model for office equipment[J]. *Energy and Buildings*, 2015, 109: 12-22.
- [22] Chen Z H, Zhu Q C, Masood M K, et al. Environmental sensors-based occupancy estimation in buildings via IHMM-MLR[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 13(5): 2184-2193.
- [23] 聂芹芹. 基于主动红外入侵探测器的室内人员计数方法研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2020.
Nie Q Q. Research on indoor occupant counting method based on active infrared intrusion detector[D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2020. (in Chinese)
- [24] 刘越. 主动红外探测监控器的有效性验证[J]. *网络与信息*, 2009, 23(8): 38.
Liu Y. Validation of active infrared detection monitor [J]. *Network & Information*, 2009, 23(8): 38.(in Chinese)
- [25] 蒋静. 关于主动红外入侵探测器原理与应用探析[J]. *中国公共安全*, 2019(S1): 105-106.
Jiang J. Principle and application of active infrared intrusion detector[J]. *China Public Security*, 2019(S1): 105-106.(in Chinese)
- [26] 黄文理, 叶晨. 智能车辆计数器的设计[J]. *电子世界*, 2018(13): 115-117.
Huang W L, Ye C. Design of intelligent vehicle counter [J]. *Electronics World*, 2018(13): 115-117.(in Chinese)
- [27] Mukkamala N, Patel P, Shankar G, et al. Relationship between body mass index and skin fold thickness in young females[J]. *Journal of Pharmaceutical Research International*, 2021: 188-193.
- [28] 刘勇, 刘桂娜, 龚佳祺, 等. 结直肠癌患者的BMI会影响术后住院时间: 基于DACCA的真实世界数据研究[J]. *中国普外基础与临床杂志*, 2021, 28(11): 1486-1493.
Liu Y, Liu G N, Gong J Q, et al. BMI of colorectal cancer patients will affect post-operative hospital stay: a real world study based on DACCA[J]. *Chinese Journal of Bases and Clinics in General Surgery*, 2021, 28(11): 1486-1493.(in Chinese)
- [29] Maggio M, Ceda G P, Ticinesi A, et al. Instrumental and non-instrumental evaluation of 4-meter walking speed in older individuals[J]. *PLoS One*, 2016, 11(4): e0153583.
- [30] Karpman C, Lebrasseur N K, Depew Z S, et al. Measuring gait speed in the out-patient clinic: methodology and feasibility[J]. *Respiratory Care*, 2014, 59(4): 531-537.
- [31] Keijsers N L W, Stolwijk N M, Renzenbrink G J, et al. Prediction of walking speed using single stance force or pressure measurements in healthy subjects[J]. *Gait & Posture*, 2016, 43: 93-95.
- [32] 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.