

文章编号: 1673-9469 (2017) 03-0074-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2017.03.016

## 基于邯郸商场人员密度及空调负荷特性研究

石凯波, 王景刚, 鲍玲玲, 侯松宝, 赵旭, 曹辉  
(河北工程大学 能源与环境工程学院, 河北邯郸 056000)

**摘要:** 运用黑箱理论模型对邯郸的两个大型商场进行人流量调研, 分析两个商场的人员流动规律, 并采用数理统计学相关知识, 建立商场人员密度计算模型。结合两个商场实例的调研数据, 得出商场人员密度、每天不同时段的人员密度分布规律以及休息日和工作日的平均人员密度比值。并对邯郸两个商场进行空调冷负荷计算和分析, 研究两个商场的冷负荷特点, 根据不同的负荷特性, 采取相应的措施来减少空调负荷。建议两个商场的空调系统应在提高新风品质, 提高新风利用率等方面进行优化。

**关键词:** 黑箱理论; 商场; 人员密度; 冷负荷; 优化建议; 新风  
**中图分类号:** TU83 **文献标志码:** A

### Research on personnel density and air conditioning load characteristic in Handan shopping malls

SHI Kai bo, WANG Jinggang, BAO Lingling, HOU Songbao, ZHAO Xu, CAO Hui  
(School of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Engineering, 056000, Handan, Hebei, China)

**Abstract:** By investigating the visitors flow rate of two shopping malls in Handan with the black box theory, there is the explanation of rules of personnel movement in two shopping malls, the calculation model of personnel density in shopping malls has been built via the correlative knowledge of applied mathematical statistics. Combined with the survey data of the two shopping malls, the personnel densities, the laws of personnel density distribution at different times of the day, as well as the ratio of average personnel density on working day and rest day are obtained. By calculating the air conditioning cooling load of two shopping malls in Handan and analyzing the characteristics of cooling load of two shopping malls, optimizing suggestions of air conditioning system are put forward to reduce air conditioning load according to the different cooling load characters. We suggest that the air conditioning system of two shopping malls should be optimized by improving outdoor air quality and improving the utilization rate of outdoor air.

**Key words:** black box theory; shopping mall; personnel density; cooling load; optimizing suggestion; outdoor air

随着我国经济的持续发展, 人们对物品的需求不断增大, 也加速了的商场发展。目前我国商场出现了流动人口密度大、能耗大, 室内空气品质较低等问题。由人流量引起的人体负荷和新风负荷是空调负荷的重要组成部分。所以有必要对商场的人员密度进行调查和空调冷负荷进行研究。迄今为止, 国内学者对商场的人员密度虽有所研究, 但是把调

研的人员密度和空调冷负荷二者结合起来研究的很少<sup>[1-3]</sup>。从某些地区商场的实际运行中发现, 商场内某些区域的实际人员密度高于设计值, 但对商场整体来讲, 商场的实际人员密度低于设计值。最终导致实际通风需求量与设计通风量存在偏差, 大大影响了室内环境质量。本文结合商场的人员密度值, 从不同的负荷特点采取相应的措施降低空调系统负

收稿日期: 2017-05-09

特约专稿

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51408182)

作者简介: 石凯波 (1990-), 男, 河北邯郸人, 硕士, 主要从事建筑节能、地源热泵理论技术方面研究。

荷,并从新风角度对商场的空调系统提出优化思路。

### 1 研究方法

在空调系统设计中,人流量是确定新风量、计算人体显热、潜热和新风负荷的基础数据。为此,笔者实地调研了邯郸两家商场,得出其人员密度的变化规律。

总体人流量和人员密度:统计时间为09:30—17:30,根据应用数理统计原理,在商场的所有出入口,即使用15 min的样本人流量来估算1 h的人流量。由商场的人数和有效面积得到人员密度值。

商场具有建筑结构复杂、建筑面积和体量庞大、人员流动随机性较大以及安全出口分散等特点,使用普通的统计和计算方法对其内人员数量进行统计将面临很大困难。因此,笔者采用黑箱理论<sup>[4-6]</sup>建立数学模型,如图1所示,把商场看作一个黑箱,其中各出入口作为连接黑箱与外界的连接通道,对各出入口人流量实时观测和统计,可获得商场工作日以及休息日在不同时间段内的人流量变化情况,进而根据商场的有效面积计算实时人员密度。

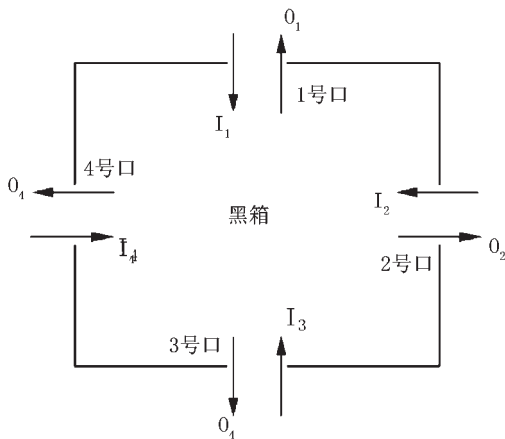


图1 商场黑箱理论模型

Fig.1 The model of black box theory for shopping malls

根据现场实际调研,获得商场每个出入口不同时间段进出人数,从而计算商场某时刻人员滞留量。

$$R_i = R_{i-1} + (\sum_j E_{ij} - \sum_j G_{ij}) = \sum_j (\sum_j E_{ij} - \sum_j G_{ij}) \quad (1)$$

$$D_i = \frac{R_i}{\bar{A}}, \quad \bar{A} = A \cdot K \quad (2)$$

式中,  $R_i$  为  $i$  时刻商场内人流量;  $R_{i-1}$  为  $i-1$  时刻商场的人流量;  $E_{ij}$  为商场  $i$  时刻  $j$  出入口人员进入数量;  $G_{ij}$  为商场  $i$  时刻  $j$  出入口人员出去数量;  $D_i$  为人员密度, 人 /  $m^2$ ,  $\bar{A}$  为有效建筑面积,  $m^2$ ;  $A$  为建筑面积,

$m^2$ ;  $K$  为建筑有效面积折算系数。

合理有效地确定商场内的人流量,对于确定商场内人员负荷十分重要。选择人流量最多进行设计,可能造成能耗的浪费;选择最小人流量进行设计,则不能保证人员的舒适度。张树平等<sup>[2]</sup>研究得出,商场内人流量的分布服从正态分布。根据应用数理统计<sup>[7]</sup>为

$$T = \frac{\bar{R} - R}{\frac{S}{\sqrt{n-1}}} \sim t(n-1) \quad (3)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

用95%为置信度进行估计,可以得到每天任意时刻商场内人流量  $R$  的  $1 - \alpha$  的置信区间为

$$R \sim \left\{ \bar{R} \pm \frac{S}{\sqrt{n-1}} t_{1-\alpha/2}(n-1) \right\} \quad (5)$$

式中,  $R$  为任意时刻商场人流量;  $\bar{R}$  为任意时刻商场人流量平均值;  $S$  为任意时刻商场人流量样本标准差;  $n$  为样本数。

### 2 实例验证

#### 2.1 调查过程

调查时间选取2016年6月—8月的几个日期,不间断地调研统计获得邯郸两个商场在不同日期和时段的人员进出商场的的数据,从上午9:30开始一直持续至下午5:30。最后将所有调查员的调查结果整理并汇总,得到商场的人流量和人员密度。

#### 2.2 人流量和人员密度

经过数据整理,并利用公式(1)计算出相应时段内两个商场的人流量分布曲线,见图2。

从图2中可以看出,邯郸两个商场工作日的人流量明显低于休息日的人流量,在休息日,A商场在下午13:30左右,每天的人流量达到了最大值;B商场在下午14:30左右,每天人流量达到了最大值。在星期六和星期日中午,两个商场内的人流量基本持平。而在工作日,每个商场内每天的人流量较为接近。

由于商场内人员从上午10:30开始到下午13:30处于增长期和稳定期,直至14:00点左右达到最大值。然后商城内人流量逐渐递减,该时间段包含了一天的稳定期、增长期和衰退期。故选择工作日6月13日和休息日8月14日11:30至

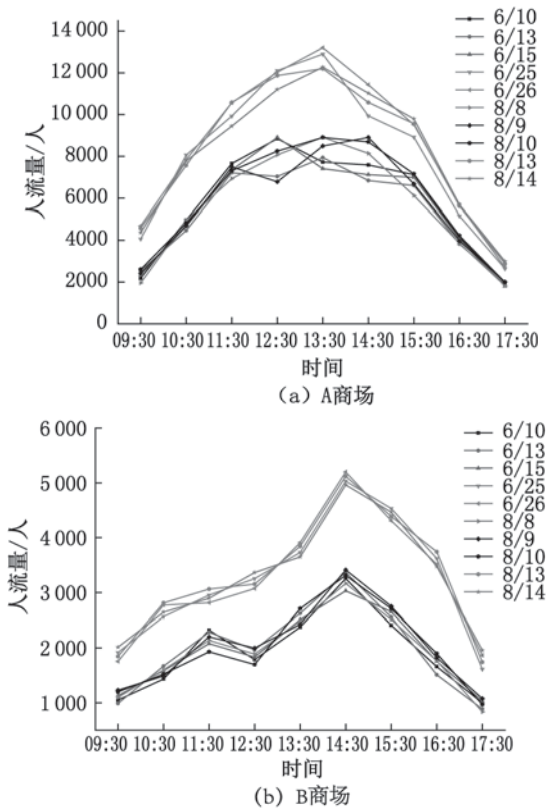


图2 邯郸商场人流量分布

Fig.2 Distribution of human flow in Handan shopping mall

16: 30 的人流量数据作为有效数据, 共 6 个样本, 则  $n=6$ 。并按照公式 (3) ~ (5) 进行计算, 其中,  $1-\alpha = 0.95$  查表得  $t_{0.025}(5)=2.571$ 。计算结果见表 1。

表 1 商场人流量  
Tab. 1 Visitors flow rate of shopping mall

商场名称	日期	11: 30	12: 30	13: 30	14: 30	15: 30	16: 30	$n$	$S$	置信区间	
A 商场	6 月 13 日	7 212	7 031	7 933	6 841	6 601	3 821	6	6 573	1 422	4 938 ~ 8 208
	8 月 14 日	9 445	11 200	12 272	11 023	9 792	5 689	6	9 904	2 303	7 256 ~ 12 552
B 商场	6 月 13 日	2 284	1 964	2 623	3 367	2 557	1 512	6	2 385	632	1 658 ~ 3 112
	8 月 14 日	2 898	3 365	3 652	4 965	4 465	3 476	6	3 804	765	2 924 ~ 4 684

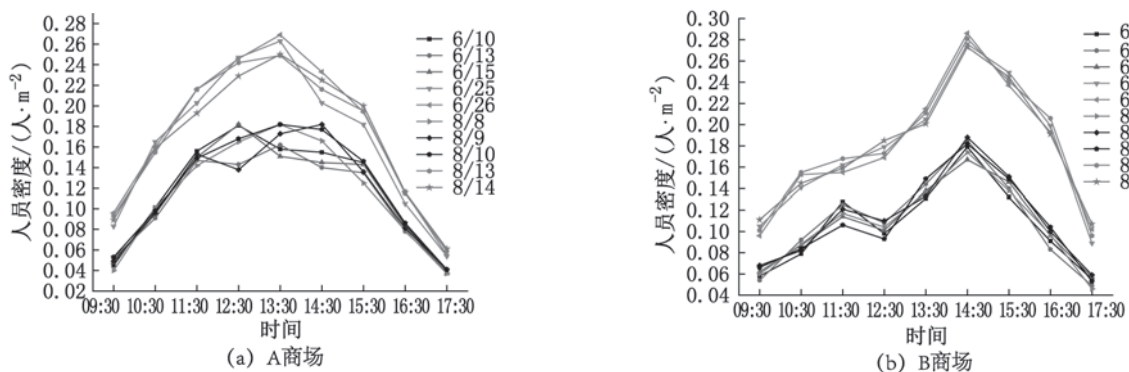


图3 邯郸商场人员密度分布

Fig.3 Personnel density distribution in Handan shopping malls

选择工作日人流量的最大估算值作为人数下限, 休息日人流量的最大估算值作为人数上限。则 A 商场人流量 8 208 ~ 12 552 人, B 商场人流量为 3 112 ~ 4 684 人。

### 2.3 有效建筑面积和商场的人员密度

规范<sup>[8]</sup>规定的商场的面积折算系数为 50% ~ 70%, 在走访两个商场物业基础上, 并对两个商场粗略估算, 故决定使用两个商场有效建筑面积的换算系数为 0.7, 得到 A 商场商场建筑面积为 70 000 m<sup>2</sup>, 商场有效面积 49 000 m<sup>2</sup>; B 商场商场建筑面积为 26 000 m<sup>2</sup>, 商场有效面积 18 200 m<sup>2</sup>。

根据公式 (2), 获得 A 商场和 B 商场的人员密度随时段的分布曲线, 如图 3 表示。

对比 A 商场和 B 商场每天各时段的人员密度可以发现, 每天商场不同时段的人员密度分布具有一定的规律。在工作日, 两个商场的人员密度在一天内波动不大, 处于稳定状态。但是在休息日, 两个商场人口密度波动较大。在 13: 30 之前, A 商场一直处于增长期, 而 B 商场在该时间段基本处于平稳期。在 13: 30 左右, A 商场人员密度达到当天的最高水平。这是因为 A 商场距离火车站和汽车站较近, 地理位置优越, 交通便利, 并且商场内有餐饮区域, 人们由于就近原则的心理, 先去 A 商场购物。在 13: 30 到 14: 30 期间, B 商场处于增长期, 而 A

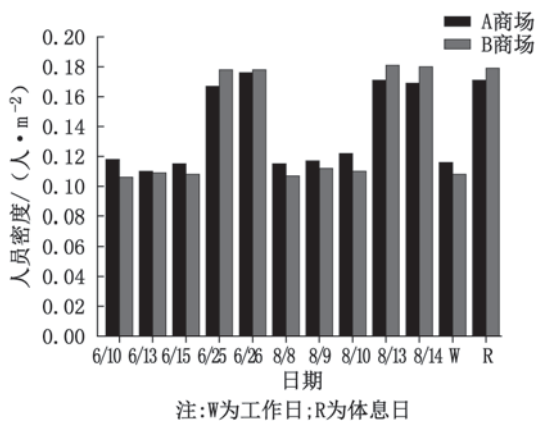


图4 商场平均人员密度

Fig.4 Average personnel density in shopping mall

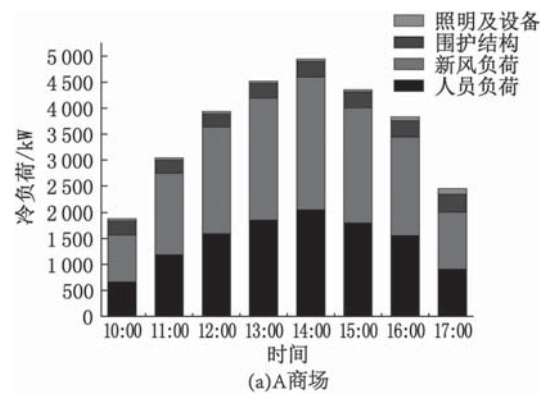
商场处于衰退期，这是因为人们基本就餐完毕，在A商场的大部分顾客开始转向B商场购物。14:30之后，两个商场都处于衰退期，顾客将陆续离开商场。可见，商场的人员密度影响因素很多，如地理位置、顾客消费水平、商场的服务区域等等。

文献 [9-10] 中分别对成都、西安等城市的商场进行人员密度调查，其调查结果中工作日和休息日的人员流动特性与笔者采用“黑箱原理法”得到的调查结果基本一致。

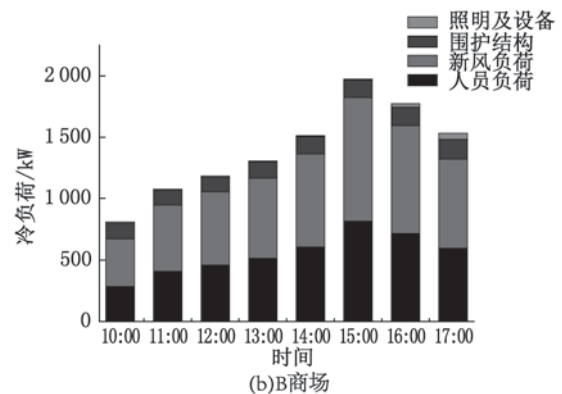
根据公式 (2) 分别计算两个商场工作日、休息日的人员密度，获得 A 商场休息日及工作日的平均人员密度分别为 0.171 人 /m<sup>2</sup>、0.116 人 /m<sup>2</sup>，而 B 商场休息日及工作日的平均人员密度分别为 0.179 人 /m<sup>2</sup>、0.108 人 /m<sup>2</sup>。如图 4 所示。对比休息日以及工作日的平均人员密度，可以发现休息日人员密度约是工作日的 1.55 倍左右。

根据公式 (2) 计算，获得 A 商场和 B 商场的人员密度，如表 2 所示。

从表 2 中可知，A 商场的总体人员密度为 0.168 ~ 0.256 人 /m<sup>2</sup>，B 商场的总体人员密度为 0.171 ~ 0.257 人 /m<sup>2</sup>。而《民用建筑空调设计》<sup>[11]</sup> 中也规定了大型商场的最小人员密度取值范围为 0.30 ~ 0.70 人 /m<sup>2</sup>，明显高于商业综合体的实际人员密度。因此，在进行商场空调系统设计时，如果完全利用规范的推荐值，将会造成不必要的浪费。



(a)A商场



(b)B商场

图5 两个商场全天冷负荷构成变化

Fig.5 Cold weather load changes in two shopping malls

### 3 邯郸商场空调冷负荷的分析

商场内冷负荷由人体、新风、围护结构、照明及设备几个部分组成。其中新风负荷是空调负荷最重要构成部分，而新风负荷由人流量和新风量标准所决定。根据调研结果的统计分析，可得两个商场的实时人流量。GB50189-2015《公共建筑节能设计标准》<sup>[12]</sup> 中规定：商场内集中空调系统的新风量每人不低于 20 m<sup>3</sup>/h，或新风换气次数不应小于 5 次 /h。但现在对新风量取值没有明确的标准，需根据实际工程中的卫生和节能的要求适量的取值。根据大量的调查研究和计算，两个商场的人均新风量取值均为 20 m<sup>3</sup>/h。

根据调研获得的人员密度和规范中关于新风量取值的规定，对 A 商场 (面积约 7 万 m<sup>2</sup>) 和 B 商场 (面积约 2.6 万 m<sup>2</sup>) 用冷负荷系数法分别进行空调冷负

表 2 商场人员密度取值范围

Tab. 2 Personnel density range in shopping mall

商场名称	最小人流量 / 人	最大人流量 / 人	有效建筑面积 /m <sup>2</sup>	人员密度下限 / (人·m <sup>-2</sup> )	人员密度上限 / (人·m <sup>-2</sup> )
A 商场	8 208	12 552	49 000	0.168	0.256
B 商场	3 112	4 684	18 200	0.171	0.257

荷计算,分析各分项冷负荷特点。A商场和B商场的全天冷负荷分布如图5所示。

从图5可以看出:在两个商场冷负荷中,新风负荷所占比例最大,高达49%~50%左右,其次为人员负荷,约占40%~41%;人员负荷和新风负荷共占商场总负荷的89%~91%,围护结构约占7%~8%,而照明及设备引起的负荷所占比例不到3%。A、B两个商场的全天冷负荷变化趋势均呈“单峰型”,A商场一天中最大负荷出现在14:00左右。而B商场一天中最大负荷出现在15:00左右,两个商场的负荷波动均较大,且峰谷比均约为5:2。

结合两个商场的人流量变化特点,在进行商场空调系统节能设计时应注意:两个商场中人员负荷和新风负荷过大,空调系统的节能设计主要取决于空调区域人员密度的合理确定、采取有效措施来减少新风负荷这两个方面着手。而围护结构具有一定的节能潜力,可以改善围护结构的热工性能来减少空调负荷。可以通过墙体保温和墙体隔热技术等措施来实现。

#### 4 结论

1) 在工作日,两个商场从上午10:30到下午16:30左右这个时间段人员密度存在较小波动。在休息日,A商场在13:30左右人员密度到达当天的最高水平。而B商场在下午14:30左右人员密度到达当天的最高水平。

2) 通过实例计算,获得A商场的总体人员密度为0.168~0.256人/m<sup>2</sup>,B商场的总体人员密度为0.171~0.257人/m<sup>2</sup>。验证了这两个商场的实际总体人员密度小于规范的推荐值。两个商场的休息日人员密度约是工作日的1.55倍左右。

3) 在商场冷负荷构成中,人员负荷和新风负荷比例很大,共占89%~91%,而照明及设备引起的负荷所占比例不到3%。两个商场全天负荷波动较大,峰谷比均约为5:2。

#### 参考文献:

- [1] SANCTISA G D, KOHLER B J, FONTANA A M. Probabilistic assessment of the occupant load density in retail buildings [J]. Fire Safety Journal, 2014, 69 (7): 1-11.
- [2] 张树平, 景亚杰. 大型商场建筑营业厅疏散人数的调查研究 [J]. 消防科学与技术, 2004, 23 (2): 133-136.
- [3] 高甫生, 赵建成, 高鹏. 大中型商场空调冷负荷问题 [J]. 暖通空调, 1995, 24 (4): 46-49.
- [4] HAITNER I, ISHAI Y, KUSHILEVITZ E. Black-box constructions of protocols for secure computation [J]. Siam journal on Computing, 2011, 2 (40): 225-266.
- [5] 张媛媛, 朱国庆, 韩如适. 基于黑箱理论研究大型超市人流规律 [J]. 消防理论研究, 2013, 32 (10): 1076-1078.
- [6] 刘勇, 徐志胜, 赵望达. 商业综合体人员密度调查与分析 [J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11 (5): 175-180.
- [7] 庄楚强, 何春雄. 应用数理统计基础 [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2013: 45-46.
- [8] GB 50016-2014, 建筑设计防火规范 [S].
- [9] 杜宝玲, 房琳. 大型商场人员密度调查与分析 [J]. 武警学院学报, 2008, 24 (4): 41-45.
- [10] 祁晓霞, 潘京. 对大型专业商场疏散人数的调查研究 [J]. 消防科学与技术, 2005, 24 (1): 60-64.
- [11] 马最良, 姚良. 民用建筑空调设计 [M]. 3版. 北京: 化学工业出版社, 2015.
- [12] GB50189-2015, 公共建筑节能设计标准 [S].