

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.086



# 办公建筑内部负荷扰量特性与计算方法

丁研, 王朝霞, 朱能, 杨钊

(天津大学 环境科学与工程学院, 天津 300072)

**摘要:**随着建筑围护结构保温性能的逐步提高,以室内人员为代表的内部因素已成为影响建筑负荷的重要不确定性因素,内部负荷扰量(简称内扰)在空调负荷设计中的重要性需要被强调。通过对两栋办公建筑的实地测试发现,办公建筑中人员在室率普遍只有设计人数的40%~60%,设备的实际功率也远低于 $20\text{ W/m}^2$ 的概算指标,过大的经验值是造成机组选型偏大的重要原因。重新思考标准中的人员密度系数和设备使用密度系数,以人为核心将建筑内扰负荷结合起来,提出“代表人”的内扰负荷计算方法,并对案例建筑的负荷设计进行修正。相比最大实测冷负荷,修正后的设计冷负荷富余率均在10%以内。

**关键词:**办公建筑;负荷扰量;空调设计负荷;人行为

**中图分类号:**TU111.19 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2019)04-0174-11

## Calculation method and characteristics of interior load disturbances for office buildings

Ding Yan, Wang Zhaoxia, Zhu Neng, Yang Fan

(School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, P. R. China)

**Abstract:** With the improvement of the thermal insulation performance of building envelop, the influence of internal factors represented by occupant behavior have become the most important uncertain factors that impact cooling loads and energy consumption. With field test, it was found that the practical occupancy rate in the office buildings was only 40%~60% of that the cooling design condition and the power intensity of office equipment was also lower than  $20\text{ W/m}^2$ . Oversized chillers were also related with over-estimated occupancy rate and equipment power intensity. With reconsideration of these coefficients, the “representative cooling load” was proposed to replace the separated occupant and equipment cooling loads, and modified the cooling results of the case buildings. Comparing with the maximum measured cooling load during testing period, assurance rate of modified cooling load were more than 90%.

**Keywords:** office building; load disturbances; building design cooling loads; occupant behavior

**收稿日期:**2018-10-08

**基金项目:**国家自然科学基金(51678396)

**作者简介:**丁研(1984-),男,博士,副教授,主要从事建筑能源系统设计与运行研究, E-mail: jensxing@163.com。

王朝霞(通信作者),女,博士, E-mail: zhaoyiwang@tju.edu.cn。

**Received:**2018-10-08

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 51678396)

**Author brief:** Ding Yan (1984-), PhD, associate professor, main research interests: building energy system design and management, E-mail: jensxing@163.com.

Wang Zhaoxia (corresponding author), PhD, E-mail: zhaoyiwang@tju.edu.cn.

随着经济水平的不断提高和城镇化的不断发展,建筑能耗逐步成为全社会能耗的重要组成部分<sup>[1]</sup>。近年来,随着建筑设计标准不断提高,具有高性能围护结构的公共建筑日趋普遍。在办公建筑中,超低能耗建筑、被动式建筑逐步受到青睐。影响办公建筑能耗的因素主要有3个方面:外部因素、内部因素、供冷系统。其中,外部因素主要包括室外气象条件、围护结构、保温等<sup>[2]</sup>,内部因素包括人员、设备、照明、室内环境参数等,供冷系统相关量主要包括机组能耗、水泵能耗、流体系数等<sup>[3-4]</sup>。随着建筑围护结构保温性能的逐步提高,室外温度、太阳辐射等外部环境因素对建筑负荷的影响逐步减弱,而以室内人员行为为代表的内部因素已成为影响建筑负荷和建筑能耗最重要的不确定性因素<sup>[5]</sup>。随着对系统的运行调节和优化控制研究的深入,发现由于使用者生活习惯、生理、心理需要的差异,使得建筑内部因素变得更加复杂,更加难以测量、难以分析、难以预测<sup>[6]</sup>。

为探讨建筑内部因素对建筑能耗和负荷的影响,研究人员开展了关于建筑人行为的研究。主要包括两个方面,一是为了提升建筑能耗和负荷模拟计算的准确性,精细化考虑内部因素的设置。Yan等<sup>[7]</sup>针对人行为在建筑能耗和负荷模拟计算的现状和问题进行了综述,提出了在模拟中考虑人行为的4个步骤,分别是获取数据、建立模型、人行为描写、耦合和评价。Kwok等<sup>[8]</sup>采用人工神经网络,针对香港某办公建筑,建立了内部负荷的计算方法,指出精确计算内扰是提高机组选型准确性的关键。二是理解和优化建筑能源系统的运行,提出按需供给的思路<sup>[9-10]</sup>。López-Rodríguez等<sup>[11]</sup>基于Time Use Survey数据,针对西班牙某居住建筑,研究典型人行为,并建立人员在室率的随机模型。Wang等<sup>[12]</sup>利用调查问卷等方式,获得人员、设备、照明等信息,建立负荷模型,预测天津某办公建筑的能耗情况。

以上两方面均是在建筑投入运行的前提下进行研究,而忽略了建筑的人员、设备、照明等内部因素对空调负荷设计的影响。事实上,负荷设计是空调机组选型的依据,也是实现空调系统节能的前提,准确的负荷设计直接决定空调机组的选型和系统运行管理的有效性。目前,关于内部负荷的考虑还主要着眼于建筑冷负荷<sup>[13]</sup>,它是影响建筑夏季能耗的根源。目前的设计指标中,内扰是按照建筑类型来划分<sup>[14]</sup>,但实际上各建筑的使用情况不尽相同,由此带来的内扰负荷也不尽相同<sup>[15-16]</sup>,一概而论会导致普遍的机组选型过大问题。同时,人行为是引起其

他内扰的核心和主要原因<sup>[17]</sup>,但目前的内扰计算中,仍采用分别给定照明、设备的经验值,此种方式依据性不强,容易造成错误的结果。

为分析内部负荷扰量特性和其对建筑空调负荷的影响,本文以案例建筑的实地调研测试数据为基础,对办公建筑内部负荷扰量特性进行初步探索,定量计算人员、设备、照明等室内热源散热形成的冷负荷时序值,并提出以人为核心的“代表人”内部负荷扰量的概念和计算方法,旨在为冷负荷的精细化设计提供思路和参考。

## 1 内部负荷扰量理念

### 1.1 负荷扰量的划分

建筑室内热湿环境形成的最主要原因是各种外扰和内扰的影响,以围护结构为界,将室外气象参数归为外部扰量(简称外扰),将室内设备、照明、人员等热湿源归为内部扰量(简称内扰)。而开窗通风、开启遮阳等行为造成的室内热湿环境变化,受内外因素共同影响,但这些动作都是使用建筑的人造成的,因此,以建筑中的使用人为核心,界定影响建筑负荷的内部因素,不仅包括人员、设备、照明等,还包括由人员行为引起的开窗换气、遮阳等对建筑负荷产生扰动的行为,上述两方面统一定义为“内扰”。设计负荷分为3部分,一部分是通过围护结构传热和透过玻璃窗的日射得热形成的冷负荷,记为外扰负荷;一部分是室内热源散热形成的冷负荷,记为内扰负荷;另一部分是新风负荷,这部分负荷用于新风系统的设计,常与其他冷负荷分开考虑<sup>[18]</sup>,将其单独列为一部分。

室内热源散热在空调季形成的冷负荷是空调负荷设计中重点考虑的部分,在采暖季,室内散热同样会影响供暖负荷,带来室内温度偏高的情况,但由于室内热源散热属于有利于保证室内温度的因素,目前在设计计算时不做考虑。因此,研究仅以冷负荷计算中的相关项为研究对象,探讨内扰负荷的特点。

### 1.2 室内热源散热形成的冷负荷

1.2.1 人员散热形成的冷负荷 人员散热形成的冷负荷如式(1)所示。

$$Q_P = Q_{PS} + Q_{PL} = \phi n (q_n C_{pq} + q_2) \quad (1)$$

式中: $Q_P$ 为人员散热形成的冷负荷,W; $Q_{PS}$ 和 $Q_{PL}$ 分别为人员显热散热、潜热散热形成的冷负荷,W; $C_{pq}$ 为人体显热散热的冷负荷系数; $q_1$ 和 $q_2$ 分别为不同室温和劳动强度下成年男子的显热散热量与潜热散热量,W; $n$ 为在室人数; $\phi$ 为群集系数。

由于办公建筑中室内温度变化较小,人员活动

以静坐为主,虽有一些站立和轻微走动,但带来的散热变化非常有限,因此,在室人数就成为决定人员负荷的关键参数。

1.2.2 设备散热形成的冷负荷 室内设备散热形成的冷负荷如式(2)、式(3)所示。

$$Q_e = q_e = n_{1e} \cdot n_{2e} \cdot n_{3e} \cdot N_e \cdot C_{EQ} \quad (2)$$

$$Q_e = q_e \cdot C_{EQ} = \sum_{i=1}^p s_i \cdot q_{ai} \cdot C_{EQ} \quad (3)$$

式中: $Q_e$ 为设备散热形成的冷负荷,W; $q_e$ 为设备的散热量,W; $C_{EQ}$ 为设备散热的冷负荷系数; $N_e$ 为电热设备的总安装功率,W; $n_{1e}$ 、 $n_{2e}$ 、 $n_{3e}$ 分别为设备的同时使用系数、安装系数和负荷系数; $p$ 为设备的种类数; $s_i$ 为第*i*类设备的台数; $q_{ai}$ 为第*i*类设备的单台散热量,W。

在办公建筑中,电热设备通常指电热水器,办公电器主要包括电脑、打印机等。无论是电热设备的计算,如式(2),还是办公电器设备的计算,如式(3),均根据人员的需求而设置,因此,设备的台数或总安

装功率必然随着设计人员数量的增加而增加。

1.2.3 灯具散热形成的冷负荷 使用灯具散热形成的冷负荷如式(4)所示。

$$Q_l = q_l \cdot C_{LQ} = n_{l1} \cdot N_l \cdot C_{LQ} \quad (4)$$

式中: $Q_l$ 为灯具散热形成的冷负荷,W; $q_l$ 为灯具的散热量,W; $C_{LQ}$ 为灯具散热的冷负荷系数; $N_l$ 为灯具的总安装功率,W; $n_{l1}$ 为灯具的同时使用系数,即使用率。

## 2 案例建筑与测试

选择位于天津市的两栋办公建筑作为案例,进行针对空调负荷扰量因素的实地调研。其中,A建筑是超低能耗办公建筑示范项目,是某大型建设集团的投资发展公司,该建筑于2012年竣工,并申报天津市低能耗示范项目。B建筑为一栋普通办公建筑,于2010年建成,并于2012年完全投入使用。两栋建筑的基本信息如表1所示。

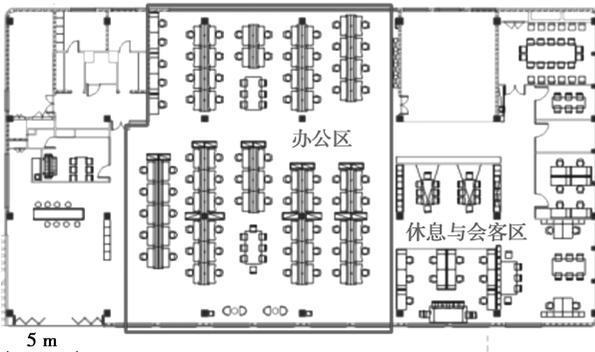
表1 案例建筑基本信息

Table 1 Basic information of case buildings

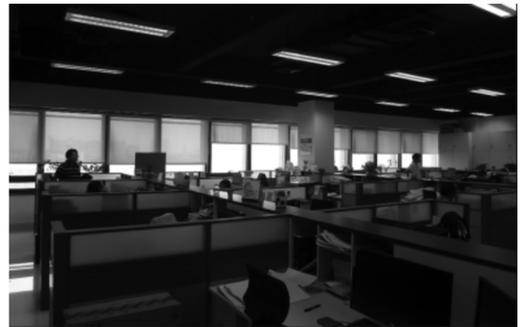
基本信息			围护结构参数/(W·(m <sup>2</sup> ·K) <sup>-1</sup> )			内扰因素				空调系统					
项目	面积/ m <sup>2</sup>	竣工 层数 时间	外墙	外窗	屋顶	设计人 员密度/ (人·m <sup>-2</sup> )	设计设备 功率密度/ (W·m <sup>-2</sup> )	设备 控制 方式	设计灯具 安装密度/ (W·m <sup>-2</sup> )	灯具 控制 方式	空调 机组 类型	运行 时间	末端 形式	室内设 计温度/ ℃	设计最小新 风量/(m <sup>3</sup> · (人·h) <sup>-1</sup> )
A	5 700	5 2012年	0.26	1.9	0.32	0.1	20	使用人 控制	9	一个开 关控制 多组 灯具	地源热泵 机组溴化 锂直燃机 组	每年6.15— 9.15,工作日 8:00—18:00	风机 盘管	26	30
B	31 200	10 2010年	0.52	2.3	0.46	0.2	20		11						

分别在2015年7月(B建筑)和2016年8月(A建筑)对选定的两栋办公建筑进行为期1个月的测试。首先,获取了设计负荷计算书与施工的相关图纸,通过走访和分析案例建筑的使用情况后,两栋建筑一层均为大厅和走廊,A建筑每层为一个开敞办公区,顶层为单人办公室,但基本不用。B建筑二层为休息区和会议室,顶层为设备用房,其他层主

要为办公区。B建筑的南侧为几个开敞办公室,北侧为会议室、休息室、会客室等。测试中,选择典型层的典型房间,获取使用数据,A建筑选择3层的办公区,B建筑选择7层的3个开敞办公区中东侧的一个,两栋案例建筑的典型层平面示意图和典型房间的照片见图1和图2。



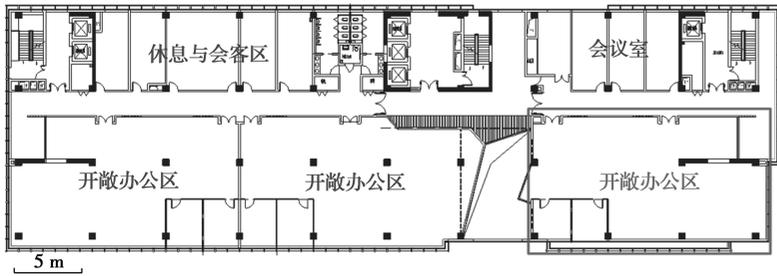
(a) 典型层平面图



(b) 测试区域照片

图1 A建筑测试区域

Fig. 1 Testing zone of building A



(a) 典型层平面图



(b) 测试区域照片

图 2 B 建筑测试区域

Fig. 2 Testing zone of building B

针对选定的典型房间,在办公室内测量了室内温度、CO<sub>2</sub> 浓度,同时,现场记录了在室人数、使用办公设备数量和输入功率、使用灯具数量,并同步测试

建筑供冷机房内机组供冷量情况,测试步长为 1 h。具体测试变量和所用仪器见表 2。

表 2 测试方法

Table 2 Testing method

测试变量	仪器型号及名称	测量范围	精度	仪器样图
冷冻水供回水温度	HOBO U12-012 扩展式温湿度记录仪;T 型热电偶探头	-200~100 °C	±0.35 °C	
冷冻水流量	UDM 500/ FluxusF601 便携式超声波流量计	0.01~25 m/s	±1.6%	
室内外温湿度	HOBO U10-003 温湿度自记仪	-40~70 °C 相对湿度 10%~90%	±0.2 °C ±2.5%	
室内外 CO <sub>2</sub> 浓度	AB-T 手持式 CO <sub>2</sub> 测试仪	3 900 mg/m <sup>3</sup>	±5%	
设备功率	UT-230A 多功能功率计插座	0.5~2 200 W	±1%	
在室人数				
使用的设备种类和数量			现场观察记录	
灯具开启数量				

注:样图摘自产品公开宣传页。

虽然,建筑的围护结构性能指标满足国家节能标准的要求<sup>[19]</sup>,甚至达到优秀水平,但是,这两栋建筑依然存在空调机组设计容量偏大的问题。A 建筑共配置两台热泵机组,供冷的装机容量为 210 kW/台,B 建筑采用两台溴化锂直燃机组,供冷的装机容量分别为 1 407、1 579 kW。A 建筑的两台热泵机组在设计负荷下为同时工作,而实际情况仅为单台运

行,B 建筑的两台机组同时运行。测试时间段内机组实际运行的部分负荷率如图 3 所示。

由图 3 可知,B 建筑机组长期处于部分负荷率低于 50%的运行状态,A 建筑机组虽然单机负荷率多数时间在 60%~90%之间,但从未有过两台机组同时运行的情况,实际运行时采用两台机组每周轮换开启的方式。机组的部分负荷率过低会导致机组效

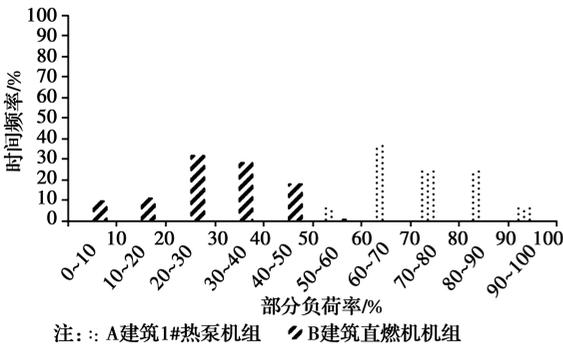


图3 测试目标建筑中制冷机组的实际运行负荷率

Fig. 3 The actual load ratio of chillers in case buildings

率(COP)下降,极端情况下,还将造成停机保护现象。A建筑单台机组即可满足要求,但闲置的另一台机组证明设计负荷的富余率已多达1倍,不仅带来加倍的初投资,同时,需要大量的维护费用。因此,有必要对其设计负荷进行追溯和分析,找出设计负荷估计过高的部分,并加以修正。

### 3 内部负荷扰量理论分析

内扰主要包括人员、设备、灯具、室内外通风换气、室内温湿度等,各扰量的作用机理并不相同。作为室内热源,人员、设备、灯具通过自身散热形成冷负荷,而开窗等行为是通过改变环境参数而影响建筑负荷。为了明确不同扰量与内扰冷负荷的相关程度,在实测典型房间的数据基础上,进行相关性分析,得到影响内扰冷负荷的最主要因素,并对各因素进行特性分析。

#### 3.1 相关性分析

利用样本数据计算的样本偏相关系数,反映了两个变量间净相关的强弱程度。在分析变量 $x_1$ 和 $y$ 之间的净相关时,当控制了变量 $x_2$ 后, $x_1$ 和 $y$ 之间的一阶偏相关系数定义为

$$r_{yx_1 \cdot x_2} = \frac{r_{y_1} - r_{y_2} r_{12}}{(1 - r_{y_2}^2)(r_{12}^2)} \quad (5)$$

式中: $r_{y_1}$ 、 $r_{y_2}$ 、 $r_{12}$ 分别表示 $y$ 和 $x_1$ 的偏相关系数、 $y$ 和 $x_2$ 的偏相关系数、 $x_1$ 和 $x_2$ 的偏相关系数。

利用对建筑A和建筑B两间典型开敞办公区的实测数据,进行内部负荷扰量与单位面积的室内热源散热形成负荷之间的偏相关分析。在室人数、设备数量、灯具数量和室内温度均直接采用时序测试值,通风量通过室内外 $\text{CO}_2$ 浓度和在室人数,根据式(6)计算得到。

$$V_\tau = \frac{c_{in} V_r - 7.2 \times v_p n_\tau}{c_o} \quad (6)$$

式中: $V_\tau$ 为 $\tau$ 时刻的通风量, $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $c_{in}$ 为实测室内 $\text{CO}_2$ 浓度, $\text{mg}/\text{m}^3$ ;  $V_r$ 为房间体积, $\text{m}^3$ ;  $v_p$ 为 $\text{CO}_2$ 人员呼出量, $\text{L}/\text{s}$ ,与运动强度的代谢率有关,本文取静坐和轻微走动的平均值 $0.0044 \text{ L}/\text{s}$ <sup>[18]</sup>;  $n_\tau$ 为 $\tau$ 时刻的在室人数,人;  $c_o$ 为实测室外 $\text{CO}_2$ 浓度, $\text{mg}/\text{m}^3$ 。

相关性分析结果如表3和表4所示。

表3 建筑A典型开敞办公区各扰量与内扰负荷的偏相关分析结果

Table 3 Partial correlation analysis of interior load and disturbances of open office zone of case building A

扰量	相关性系数	显著性
在室人数	0.926	0.000
设备数量	0.828	0.000
使用灯具数量	0.425	0.000
室内温度	0.460	0.000
通风量	0.211	0.118

表4 建筑B典型开敞办公室各扰量与其内扰冷负荷的偏相关分析结果

Table 4 Partial correlation analysis of interior load and disturbances of open office zone of case building B

扰量	相关性系数	显著性
在室人数	0.925	0.000
设备数量	0.790	0.000
使用灯具数量	0.349	0.008
室内温度	0.383	0.004
通风量	0.287	0.032

从表3和表4可以看出,对于这两间办公室,各扰量与内扰负荷的相关性系数和显著性程度排序基本相同,均为在室人数>设备个数>室内温度>灯具个数>通风量。从相关性来看,在室人数和设备数量与内扰的相关性最大,相关性系数大于0.8<sup>[20]</sup>,而其他参数的相关性不足0.5,即基本不相关,说明在室人数和设备数量与内扰的一致性最强。但从显著性来看,除通风量外,其他参数的显著性均在0.01以下,即均呈现较强的显著性<sup>[20]</sup>,其中,在室人数和设备数量最显著,使用灯具数量和室内温度次之。因此,在内扰计算时,需考虑在室人数、设备数量、室内温度和使用灯具数量,但室内温度作为室内环境的一个重要参数,主要是通过人员调节空调系统和遮阳进行控制,设计时常视为定值,因此,不再考虑。故以人员为核心,重点研究人员、设备、照明3个内扰变量。

### 3.2 在室人数特性分析

两栋办公建筑均依照最新《公共建筑节能设计标准》(GB 50189—2015)中有关人员在室率、照明开关控制规律以及设备使用率的规定设计,采用了如图 4 所示的数据对人员、照明、设备负荷进行相关计算<sup>[17]</sup>。

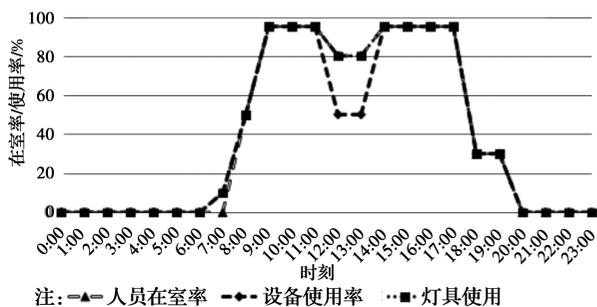


图 4 节能标准中的人员逐时在室率与设备逐时使用率

Fig. 4 Occupancy rate and chiller part load ratio in energy saving standard

节能标准中的人员在室率变化为:从工作时间开始,人员在室率剧增至 95%,午餐时段下降到 80%,下午上班时间又增加至 95%,下班时间又迅速减少至 30%,20:00 后变为 0;设备和灯具的使用率和人员在室率基本一致,但设备使用率在午餐时间降至 50%。然而,建筑中实际的人员、设备、照明情况却与设计标准中的推荐修正值存在较大差异。

调研的两栋建筑均为办公类建筑,人员的作息时间与制度规定。工作日最晚上班时间为 9:00,B 建筑和 A 建筑人员下班时间分别为最早 16:00 和 17:00,午餐时间一般在 1 h 以内。由于休息日或节假日的加班情况与相关人员的具体工作内容有关,因此,研究只针对工作日的正常工作情况进行分析。以人员实际在室数量与办公室内设置工位数量的比例为人员在室率,两栋建筑的具体人员在室率如图 5 所示。

由图 5 可见,相比于设计标准中的人员在室率,实际的人员在室率情况在具体数值上有较大差别。人员在室率呈现较明显的双峰分布,峰值分别出现在上午 10:00—11:00 和下午 15:00 左右,两峰值间的低谷为午餐时段。平均人员在室率一般低于 50%,即使是人员在室率高峰时段,两栋建筑的最大平均人员在室率分别只有 59.26% 和 60.13%。说明在办公建筑中,设计的人员密度达到标准中的估算值、人员全部坐满设计工位、全部人员均在工位这 3 种最大值出现的概率均较小,倘若按照设计标准中的面积指标对人员数量进行估算,则仅由于人员密

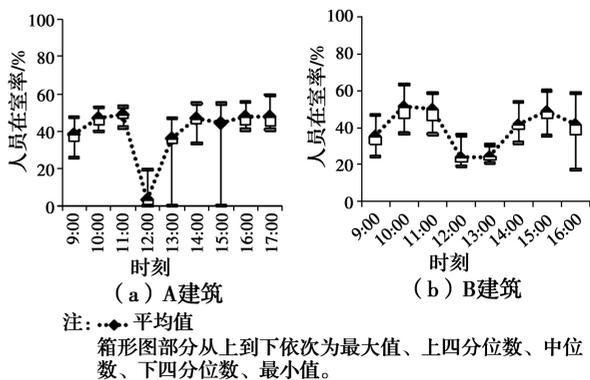


图 5 实测人员在室率

Fig. 5 The actual occupancy ratio in two buildings

度的设计差别,将导致人员负荷估计过大。

### 3.3 办公设备使用特性分析

设备使用情况的信息通过两种手段获得,一是测试人员的现场观察和记录,二是通过功率计等设备的现场测试。对于测试对象的办公设备来说,同样可分为两类,一类是样本量较大且频繁使用的设备,如台式机、笔记本等,采用抽样测试方法,在工作时间每 10 min 记录 1 次功率表读数,以平均功率作为此类设备的代表功率。另一类属于间歇使用且数量有限、同一区域内共享的设备,如打印机、饮水机等,对其工作、待机两种状态分别记录功率与使用时间,以时间加权的折合功率作为此类设备的代表功率,计算式为

$$E_t = \frac{E_{op}t_{op} + E_{st}t_{st}}{t_{op} + t_{st}} \quad (7)$$

式中: $E_{op}$ 、 $E_{st}$ 分别为设备使用的运行功率和设备待机的待机功率,W; $t_{op}$ 、 $t_{st}$ 分别为一天中设备使用时间与设备待机时间,min; $E_t$ 为设备平均折合功率值,W。

计算得到典型办公区的设备功率密度如表 5 所示。

表 5 单台设备折合功率计算

Table 5 Converted power of each office equipment

设备名称	使用状态	每天使用时间/min	功率/W	折合功率/W
打印机	打印	51	845	134
	开机不工作	489	60	
饮水机	烧水	108	465	93
	保温	432	0	
碎纸机	使用	1	150	0.28
	待机	539	0	
热水壶	烧水	8	1 500	22
	不烧水	532	0	

根据式(2)、式(3)可计算出设备的总功率,其中,单台设备的功率采用表5的计算值,将总功率除以房间的面积,可以计算出房间的功率密度,计算结果分别如表6、表7所示。

表6 A建筑典型房间设备功率密度计算

Table 6 Power density of equipment in the typical office of building A

设备	数量/ 个	单台功 率/W	总功率/ W	功率 总计	房间 面积	最大使用功率 密度/(W·m <sup>-2</sup> )
台式机	58	30	1 440			
饮水机	2	93	93	2 590	600	4.32
打印机	4	134	134			
空气净化器	4	32	128			

表7 B建筑典型房间设备功率密度计算

Table 7 Power density of equipment in the typical office of building B

设备	数量/ 个	单台功 率/W	总功率/ W	功率 总计	房间 面积	最大使用功率 密度/(W·m <sup>-2</sup> )
笔记本电脑	55	20	1 100			
台式机	4	30	120			
热水壶	14	22	308			
饮水机	1	93	93	2 184	291.76	7.49
打印机	3	134	402			
空气净化器	5	32	160			
碎纸机	2	0.28	0.56			

由于设备并不是全天均按额定功率运行,而是存在使用时的稳态功率,由表6、表7可见,相比于设计标准中的功率密度,实际的设备散热量明显偏低。即使在设备全部正常使用时,两栋建筑的最大功率只有7.49 W/m<sup>2</sup>。

在办公室,每人使用一台电脑,其他为公用设备,正常工作时间共同使用,午餐时间也保持开启,但全部为待机状态,下班后关闭,由此计算A建筑和B建筑每人对应的设备功率,最大分别为57.42、54.95 W/人。

### 3.4 灯具使用特性分析

灯具的使用通过现场测试得到,通过实地数开启的灯具数量,问询得到安装灯具的额定功率,计算使用灯具的逐时瞬时散热量。两个案例建筑的测试区域均有多个灯具开关,分别控制一定区域的灯具,但观察发现,早上上班时,灯具基本全部打开,而午

饭时会逐步关闭一些灯具,下午正常工作时再开启,晚上下班时间也会逐步关闭灯具,由于案例建筑少有加班的情况,因此,19:00后灯具全部关闭。根据以上特点,量化式(4)中的灯具同时使用系数为

$$n_{11} = \begin{cases} 0 & \tau \in 00:00-17:00 \\ 1 & \tau \in 08:00-11:00 \\ P_{\text{lunch}} & \tau \in 12:00-13:00 \\ 1 & \tau \in 14:00-16:00 \\ P_{\text{off-owrk}} & \tau \in 17:00-18:00 \\ 0 & \tau \in 19:00-23:00 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $P_{\text{lunch}}$ 为午餐时段(12:00—13:00)使用灯具的比例,%; $P_{\text{off-owrk}}$ 为下班时段(17:00—18:00)使用灯具的比例,%; $\tau$ 为时刻。

测试时间段的平均使用灯具数量和人数对照如图6所示。

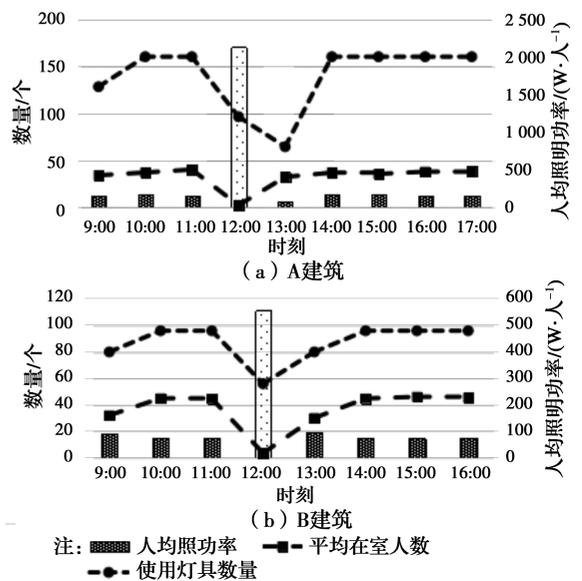


图6 使用灯具数量与在室人数对照

Fig. 6 Comparison of used lamp number and indoor occupant number

从图6中可以看出,使用灯具数量与人数变化有一定关联,但并不完全正相关,各个时刻的人均照明功率是变化的。最大值出现在午饭时间,但由于室内人数很少,对空调系统的要求不高,故而舍去。在正常工作时间,人均最大照明功率出现在9:00和14:00—15:00,而14:00—15:00通常会出现负荷的最大值,此时,对应的人均照明功率分别为164.57、95.60 W/人。

### 3.5 内扰负荷随时间的分布

根据实测值计算案例建筑的人员、设备和照明

负荷如图7所示。

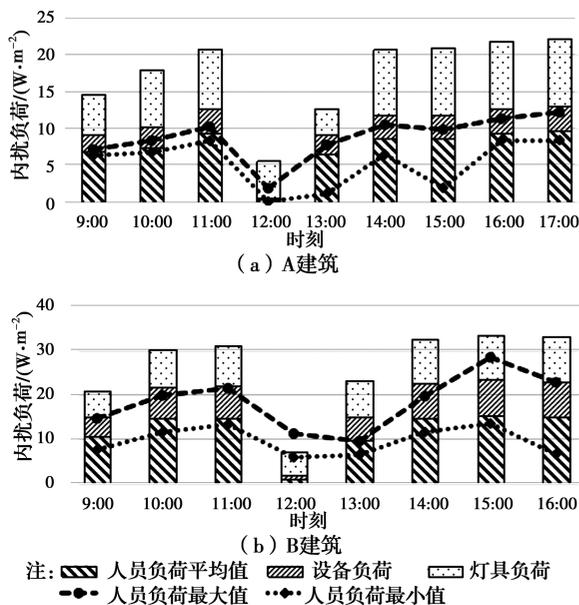


图7 内扰负荷时序变化曲线

Fig. 7 Time series of interior cooling load

从图6、图7可以看出,人员负荷与人员在室率的变化基本一致,而设备和灯具的负荷变化范围较小。人员负荷不仅与在室人数有关,还受人员动作、性别、穿着等因素的影响,从图6、图7还可以看出,上、下班时刻和午休时间人员负荷波动较大,工作时间内(除午休、开会等时间)人员负荷在一定范围内随机波动。说明人员负荷虽然是随机变化的,但总体上随在室人数呈现“双峰”分布的规律,峰值出现时间与持续时间的长短与室内人员作息紧密相关。

从设备负荷上看,虽然单台设备功率波动性大,但是多台设备同时运行时,设备之间的功率差异可以相互抵消,使设备散热量处于相对稳定状态,因此,整个房间的设备负荷除上、下班时刻出现短暂递增或递减外,只在午休时间下降,其余工作时间内基本处于较稳定的状态。

由于测试建筑办公室灯具控制采用“一开全开”的模式,在正常工作时间内,形成的照明负荷仅由于冷负荷系数不同而有所不同,但由于其关闭是阶跃的,因此,在午饭时段会有所降低。

## 4 负荷修正

### 4.1 冷负荷特性分析

上述以典型层的典型房间为研究对象,重点分析了内扰特性。本节利用其特性,计算整个建筑的冷负荷。首先,统计同样性质房间的数量,并考虑不常用的

休息室、会议室、走廊等情况,将内扰负荷扩大到整个建筑,并分析案例建筑的各项冷负荷所占比例。

人员作为内扰负荷的核心,首先定义人员在室率为

$$OR_{\max} = \max \sum_{\tau}^m (OR_{\tau}) \quad (9)$$

$$n = n_p \cdot OP_{\max} \quad (10)$$

式中: $OR_{\max}$ 为最大人员在室率,%; $n_p$ 为设计人员密度,人/ $m^2$ ; $m$ 为房间数。将 $OR_{\max}$ 作为修正系数, $n$ 为修正后的设计人员密度,人/ $m^2$ 。

外扰负荷由两部分组成:通过导热传入热量和通过辐射传入热量,计算式为

$$Q_t = Q_{tr} + Q_{ts} \quad (11)$$

$$Q_{ts} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{suf}} (t_{\tau} - t_n) (AU_i)}{A} \quad (12)$$

$$Q_{tr} = \sum_{i=1}^{n_{exp}} (X_g X_a X_z) J_{ri} \quad (13)$$

式中: $Q_t$ 、 $Q_{tr}$ 、 $Q_{ts}$ 分别为外扰负荷、围护结构传热形成的冷负荷、辐射得热形成的冷负荷, $W/m^2$ ; $X_g$ 、 $X_a$ 、 $X_z$ 分别为窗户的构造修正系数、地点修正系数、遮挡系数; $t_n$ 、 $t_{\tau}$ 分别为室外空气温度、室内设计温度, $^{\circ}C$ ; $U$ 为围护结构传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$ ; $J_{ri}$ 为太阳辐射强度, $W/m^2$ ; $n_{exp}$ 为窗户数量; $n_{suf}$ 为围护结构种类。

新风负荷是新风进入建筑物所造成的冷负荷,可以分为显热负荷与潜热负荷,其计算式为

$$Q_t = Q_{ts} + Q_{ft} \quad (14)$$

$$Q_{ts} = \frac{C_p n V \rho (t_o - t_n)}{A} \quad (15)$$

$$Q_{ft} = \frac{r_t n V \rho (d_o - d_n)}{A} \quad (16)$$

式中: $Q_t$ 、 $Q_{ts}$ 、 $Q_{ft}$ 分别为新风负荷、显热负荷、潜热负荷, $W/m^2$ ; $t_o$ 为室外逐时温度, $^{\circ}C$ ; $d_o$ 、 $d_n$ 分别为室外空气相对湿度、室内空气相对湿度, $kg/kg$ ; $C_p$ 为空气比热容, $1.01 kJ/kg$ ; $\rho$ 为空气密度, $g/m^3$ ; $V$ 为新风量, $m^3/h$ ; $r_t$ 为水的汽化潜热, $1718 kJ/kg$ 。

A、B两栋建筑使用功能虽然都为办公类型,但由于在室人数、设备型号略有不同,加之围护结构性能差异,导致内扰负荷所占的比例并不相同。通过对调研基础数据进行计算分析,得到A、B两栋建筑各项负荷所占的比例,如图8所示。

从图8可以看出,不同围护结构性能情况下各项负荷占比不同,对于A建筑,由于其围护结构性能达到了低能耗水平,使得室内热源散热形成的内扰

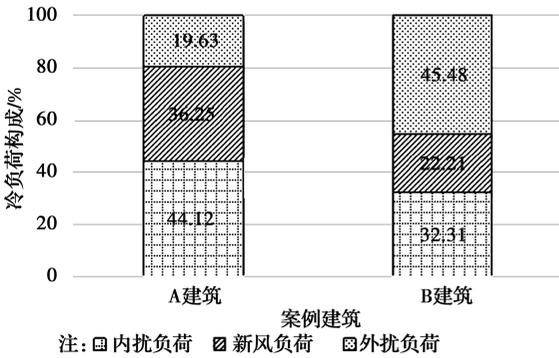


图8 内扰负荷分布比例

Fig. 8 The ratio of cooling loads disturbances

冷负荷所占的比重最大,为44.12%;其次为新风负荷,占36.25%,这是由于新风量的计算方法也需要依照人员数量来判定,而围护结构为代表的外扰冷负荷所占比重最小,不足20%。对于B建筑,仍然是外扰负荷所占比例最大,接近50%,但内扰负荷也占30%以上。据此判断,随着围护结构保温性能的进一步提高,以人员为中心的内扰负荷占比还将进一步增加。

基于以上分析,由于设备和灯具的使用与人相关,因此,通过假设“代表人”负荷来简便计算内扰,即通过人员数量来反映人员负荷与设备、灯具负荷之和。设备功率与人数直接相关,在案例建筑中,分别约为57 W/人和55 W/人。由于目前照明控制方式的原因,导致灯具负荷与人员相关性差,无法折合到“代表人”负荷中,但从原理上,灯具的使用也是由人为产生的,A、B建筑中,人均照明功率分别约为165 W/人和96 W/人,但此值与具体案例建筑有关。目前标准中,照明功率取值在11 W/m<sup>2</sup>左右,与实际情况比较接近,根据3.4节的分析,采用人均最大

照明功率折合到“代表人”冷负荷中。由此,做出定义

$$Q_r = (Q_{ro} + Q_{re} + Q_{rl}) \cdot n_\tau \quad (17)$$

$$Q_{ro} = \frac{\sum_{i=1}^{\tau} Q_{Pi}}{n_\tau} \quad (18)$$

$$Q_{re} = \frac{\sum_{i=1}^{\tau} Q_{Pe}}{n_\tau} \quad (19)$$

$$Q_{rl} = \frac{11A}{n_\tau} \quad (20)$$

式中: $Q_r$ 为“代表人”冷负荷,W/人; $Q_{ro}$ 为“代表人”人员部分所产生的冷负荷,W/人; $Q_{re}$ 为“代表人”设备部分所产生的冷负荷,W/人; $Q_{rl}$ 为“代表人”灯具部分所产生的冷负荷,W/人; $A$ 为建筑面积,m<sup>2</sup>; $n_\tau$ 为 $\tau$ 时刻的在室人数,人。

#### 4.2 验证与讨论

以上分别采用“代表人”的方式计算两栋案例建筑的冷负荷,下面采用富余率分析修正的有效性。富余率定义为

$$\theta_d = \frac{(Q_{m,max} - Q_{o,max})}{Q_{m,max}} \times 100\% \quad (21)$$

式中: $\theta_d$ 为修正后的设计负荷富余率,%; $Q_{m,max}$ 为修正后的设计冷负荷,W/m<sup>2</sup>; $Q_{o,max}$ 为测试中的最大实际负荷,W/m<sup>2</sup>。

富余率越小,说明修正后的设计负荷与实际负荷越接近。倘若富余率为负值,说明将可能出现依据修正后的设计负荷选型得到的机组不能保证实际负荷的情况,因此,定义富余率为正值,即修正后的冷负荷比实测最大负荷高出部分在10%以内为有效修正,即考虑10%以内的富余量<sup>[18,21-22]</sup>。具体结果如表8所示。

表8 修正设计负荷验证

Table 8 Verification of modified design loads

A 建筑			B 建筑		
原设计冷负荷 指标/(W·m <sup>-2</sup> )	修正后冷负荷 指标/(W·m <sup>-2</sup> )	最大实测负荷 指标/(W·m <sup>-2</sup> )	原设计冷负荷 指标/(W·m <sup>-2</sup> )	修正后冷负荷 指标/(W·m <sup>-2</sup> )	最大实测负荷 指标/(W·m <sup>-2</sup> )
62.9	59.8	47.3	43.5	85.6	67.6
富余率/%		8.76	富余率/%		7.47

根据表8的冷负荷数据,修正后的富余率分别达到8.76%和7.47%,满足要求。基于实际案例分析,认为“代表人”的概念是针对采用负荷面积指标法的有效修正措施,不仅可为建筑负荷模拟的设定参数提

供依据,同时也对负荷设计方法的修正提供参考。

## 5 结论

人员行为的随机性,直接导致了建筑负荷分布

的差异,通过对实测数据的分析得到以下结论:

1)考虑人行为对建筑空调负荷的影响,将建筑空调负荷分为内扰负荷、外扰负荷和新风负荷,发现内扰负荷占总冷负荷比例超过30%,正确衡量内扰负荷对于提高设计负荷的准确性,以及减小制冷机组设计体量具有重要意义。

2)当前标准中给定的内部负荷扰量经验取值普遍偏大,实际中的人员在室率和设备功率配置低于设计值。案例建筑的最大人员在室率约为60%,设备功率密度比设计指标小50%以上,普遍低于设计指标(20 W/m<sup>2</sup>)。以上取值是造成空调系统装机功率偏大的原因,亟需进行修正。

3)办公建筑室内人员的作息方式呈明显的“双峰”分布,而非标准中的作息方式,交通、工作需求等多种因素都会影响人员在室率。办公建筑内的人员、设备和照明负荷在一天内呈现小幅度的随机波动,但均与人员在室率相关,采用“代表人”的方法,可有效综合各项内扰负荷,提高负荷设计的准确性。

#### 参考文献:

[1] WANG Z X, ZHU H, DING Y, et al. Energy efficiency evaluation of key energy consumption sectors in China based on a macro-evaluating system [J]. *Energy*, 2018, 153: 65-79.

[2] WANG Z X, ZHAO J. Optimization of passive envelop energy efficient measures for office buildings in different climate regions of China based on modified sensitivity analysis [J]. *Sustainability*, 2018, 10 (4): 907.

[3] PÉREZ-LOMBARD L, ORTIZ J, POUT C. A review on buildings energy consumption information [J]. *Energy and Buildings*, 2008, 40(3): 394-398.

[4] 王焯,孙鹏宝,付银安,等.不同建筑热工分区办公建筑外围护结构负荷指标影响因素权重[J].*土木建筑与环境工程*,2017,39(1):7-12.  
WANG Y, SUN P B, FU Y A, et al. Analysis on the weight of the indices of factors affecting the heat and cold load for office buildings in different climate zones [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2017, 39(1): 7-12. (in Chinese)

[5] DING Y, WANG Z X, FENG W, et al. Influence of occupancy-oriented interior cooling load on building cooling load design [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 96: 411-420.

[6] ZHAO H X, MAGOULÈS F. A review on the prediction of building energy consumption [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16 (6): 3586-3592.

[7] YAN D, O'BRIEN W, HONG T Z, et al. Occupant behavior modeling for building performance simulation: Current state and future challenges [J]. *Energy and Buildings*, 2015, 107: 264-278.

[8] KWOK S S K, LEE E W M. A study of the importance of occupancy to building cooling load in prediction by intelligent approach [J]. *Energy Conversion and Management*, 2011, 52(7): 2555-2564.

[9] JIA M D, SRINIVASAN R S, RAHEEM A A. From occupancy to occupant behavior: An analytical survey of data acquisition technologies, modeling methodologies and simulation coupling mechanisms for building energy efficiency [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 68: 525-540.

[10] NGUYEN T A, AIELLO M. Energy intelligent buildings based on user activity: A survey [J]. *Energy and Buildings*, 2013, 56: 244-257.

[11] LÓPEZ-RODRÍGUEZ M A, SANTIAGO I, TRILLO-MONTERO D, et al. Analysis and modeling of active occupancy of the residential sector in Spain: An indicator of residential electricity consumption [J]. *Energy Policy*, 2013, 62: 742-751.

[12] WANG Z X, DING Y. An occupant-based energy consumption prediction model for office equipment [J]. *Energy and Buildings*, 2015, 109: 12-22.

[13] VIROTE J, NEVES-SILVA R. Stochastic models for building energy prediction based on occupant behavior assessment [J]. *Energy and Buildings*, 2012, 53: 183-193.

[14] CASTILLO L, ENRÍQUEZ R, JIMÉNEZ M J, et al. Dynamic integrated method based on regression and averages, applied to estimate the thermal parameters of a room in an occupied office building in Madrid [J]. *Energy and Buildings*, 2014, 81: 337-362.

[15] DING Y, ZHANG Q, WANG Z X, et al. A simplified model of dynamic interior cooling load evaluation for office buildings [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 108: 1190-1199.

[16] WANG Z X, DING Y, DENG H Y, et al. An occupant-oriented calculation method of building interior cooling load design [J]. *Sustainability*, 2018, 10: 1821; doi: 10.3390/su10061821.

- [17] DING Y, ZHANG Q, YUAN T H. Research on short-term and ultra-short-term cooling load prediction models for office buildings [J]. *Energy and Buildings*, 2017, 154: 254-267.
- [18] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册 [M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007: 1560-1561.
- LU Y Q. Handbook of heating and air-conditioning design [M]. 2nd edition. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007: 1560-1561. (in Chinese)
- [19] 住房和城乡建设部, 国家质量监督检验检疫总局. 公共建筑节能设计标准: GB 50189 — 2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development, Administration for Quality Supervision and Inspection and Quarantine. Design standard for energy efficiency of public buildings GB 50189-2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [20] 王朝霞. 办公建筑内部负荷扰量的特性分析与能耗预测 [D]. 天津: 天津大学, 2014.
- WANG Z X. Research on interior load characteristics and energy consumption prediction of office buildings [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese)
- [21] 陈友明. 空调冷负荷计算方法的发展现状与挑战 [J]. *暖通空调*, 2017, 47(3): 1-7, 47.
- CHEN Y M. Development and challenges of cooling load calculation method for air conditioning systems [J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2017, 47(3): 1-7, 47. (in Chinese)
- [22] 田胜元, 李百战. 空调负荷的动态分析与设计负荷 [J]. *重庆建筑工程学院学报*, 1988, 10(3): 27-35.
- TIAN S Y, LI B Z. Air-conditioning load dynamic analysis and design load [J]. *Journal of Chongqing Architecture University*, 1988, 10 (3): 27-35. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)