

文章编号: 1671-6612 (2019) 02-135-08

基于实测数据的夏热冬暖地区校园建筑负荷分析

杜前洲¹ 姜梅² 刚文杰¹ 张冲¹ 王劲柏¹

(1. 华中科技大学环境科学与工程学院 武汉 430074;

2. 电力规划设计总院 北京 100120)

【摘要】 建筑的负荷特征是建筑以及区域能源系统规划和设计的基础,也是建筑节能的关键所在。建筑的冷、热、电负荷变化很大,即使是同一区域同一类型的建筑,其负荷特征也不尽相同,从而影响到供能系统的配置和经济性。现有研究借助能耗模拟软件,分析过建筑的负荷特征,以及负荷变化规律对系统配置的影响,然而针对具体的实测数据,进行全年逐时冷负荷与电负荷分析的研究还比较少。本文采集了夏热冬暖地区某校园建筑的实时冷/电负荷,以该实测数据为基础,深入分析建筑群及各栋建筑的负荷特征,比较各栋建筑负荷的差异性,最后将实测负荷与传统单位面积负荷指标法进行对比分析。结果表明,同一类型的不同建筑,其负荷特征也存在较大差异,在系统设计阶段,应充分考虑不同建筑的差异,使得建筑能源系统的设计更为合理。

【关键词】 负荷分析; 校园建筑; 负荷特征; 冷电比; 区域能源

中图分类号 TU831.2 文献标识码 A

Characteristics and Analysis of the Cooling and Electricity Loads of Institutional Buildings in a University Located in Hot Summer and Warm Winter Areas Based on Measured Data

Du Qianzhou¹ Jiang Mei² Gang Wenjie¹ Zhang Chong¹ Wang Jinbo¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074;

2. Electric Power Planning and Engineering Institute, Beijing, 100120)

【Abstract】 The load characteristics of buildings are the basis of energy planning and energy supply system design. The cooling, heating and electricity loads of buildings change significantly. Even for buildings in the same area and with the same function, the load profiles for each building can be very different. It will affect the configuration and economy of the energy supply system. Existing studies have analyzed the load characteristics of buildings, and the influence of load variation on the system configuration by the means of energy simulation software, but few studies have analyzed annual hourly cooling load and electricity load based on measured data. In this paper, the real-time cooling/electricity loads of buildings on a campus located in hot summer and warm winter areas are collected. The load characteristics of buildings and the whole campus are analyzed in detail based on measured data. Finally, the measured loads are compared with that calculated using the load index method. Results show that the load characteristics of buildings with similar functions vary significantly. To obtain an appropriate design of building energy systems, it is recommended to conduct detail load evaluation and consider uncertainties for different buildings.

【Keywords】 Load analysis; campus building; load characteristics; cooling-to-electricity ratio; district energy

基金项目: 华中科技大学人才引进基金 (NO: 3004261108)

作者简介: 杜前洲 (1994.08-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: qianzhou_du@hust.edu.cn

通信作者: 刚文杰 (1988.05-), 女, 博士, 副教授, 博士生导师, E-mail: gangwenjie@hust.edu.cn

收稿日期: 2018-05-28

0 引言

建筑物的负荷是能源系统设计的基础。准确预测和分析建筑物冷、热、电负荷的大小以及变化规律,不仅是进行设备选型的基础,而且也是对系统配置进行优化以及对系统的节能性、经济性进行分析评价的前提条件。尤其是近年来,在国家政策鼓励之下,分布式能源系统得到极大发展。在分布式系统中,冷、热、电负荷需求被联合在一起考虑,需将供能设备、输配系统、末端设备与建筑各类负荷相匹配后方能进行能耗计算。因此建筑负荷的预测和分析显得尤为重要。

目前,国内外关于冷热电负荷预测方法的研究有很多^[1-4],概括而言,主要有单位面积指标法、统计回归分析法、计算软件模拟法和情景分析法等^[5]。单位面积指标法被认为是一种简单有效的方法,在工程中经常使用,一般是按某个单位面积负荷指标乘以总的建筑面积^[6]。此方法是一种静态的估算方法,能够简单快速的估算负荷,从而确定空调设备的容量,然而该方法可能会造成系统容量设计过大的问题。文献[6]指出,在区域级别上,区域内所有建筑同时出现多个影响因素的概率很小,采用负荷指标法必定会高估区域总负荷。文献[7]把设计手册中规定的负荷指标与通过调研得到的负荷指标进行对比,发现设计负荷指标比实际负荷指标都要大,有的甚至大 1 倍以上。统计回归分析法以大量能耗数据为基础,利用统计学手段分析负荷与影响因素之间的关系从而建立负荷预测模型^[8]。该方法需要充足的能耗数据储备,难以大规模使用。计算软件模拟法发展较为成熟,自 20 世纪 60 年代美国电力公司开始用计算机模拟建筑冷负荷以来,先后出现了大量模拟软件,如美国的 DOE-2、BLAST、EnergyPlus,英国的 ESP-r,日本的 HASP 和清华大学的 DeST 等^[9]。这些计算软件能够动态模拟建筑的全年能耗,从而得到了广泛应用^[10,11]。计算软件模拟法需要以典型气象年参数、详细的建筑信息等参数为输入,在规划阶段,建筑的详细信息难以确定,所以该方法也存在一定的局限性。情景分析法通过设定不同的情景,分析各情景负荷出现的概率,最终确定典型的负荷曲线^[6]。但是该方法仍然需要借助能耗分析软件以得出不同的情景负荷,总体过程较为复杂。

建筑的冷、热、电负荷逐时变化,负荷特征根

据建筑的大小、结构、使用功能等不同有很大的区别。即使是同一地区同一类型的建筑,其负荷特征也不尽相同,从而影响到供能系统的配置和经济性,因此对负荷特征的分析也很重要。文献[12]从平均值、不确定性和历史极大值 3 个方面对负荷进行描述,并进行灵敏度分析,结果表明平均负荷和历史极大负荷会不同程度的影响到各设备容量和系统年总费用。文献[13]分析了不同用途和区域的建筑物的负荷及时间分布的差异,表明负荷差异使得供能系统的实际年运行时间随地域和功能而变化。文献[14]总结了公共建筑冷热电负荷日变化、月变化以及热(冷)电比等负荷匹配特征,指导冷热电联供系统设计选型。

中国的夏热冬暖地区包括广东大部、广西大部、福建南部、海南、香港、澳门、台湾全部。这个地区是中国建筑与住宅产业发展最快的区域之一,同时也是建筑能耗最多的地区之一^[15]。以夏热冬暖地区的典型城市广州和香港为例,有部分文献对该地区的建筑负荷和能耗特征进行过分析。文献[7]对广州的商场、写字楼和酒店 3 种不同用途商业建筑在夏季、过渡季和冬季各选取 1 天作为典型日对其冷、热、电逐时负荷进行了测量,总结出了 3 类建筑负荷分时段和季节性变化的规律。文献[15]通过 eQUEST 模拟和分析了夏热冬暖地区办公建筑不同建筑围护结构的能耗性能。文献[16]介绍了广州市住宅建筑的空调使用情况,并以实测数据为基础,分析了能耗影响因素。在香港地区,文献[17]分析了 16 家酒店在 1995 年的能耗实测数据,得到了酒店类建筑各部分用能的结构,并对酒店建筑能耗与酒店建成年份、室外温度变化、酒店等级、建筑面积以及入住率等之间的关系进行了分析。此外,香港城市大学的 Joseph C Lam 先后对香港的住宅、办公和商业建筑的能耗进行监测,以多年的实测数据(主要是电负荷)对用电特点、单位面积用电指标等进行了统计分析^[18-20]。

据我们所知,在现有文献中较少有以全年实测数据为基础,同时分析建筑电负荷与空调负荷特征的研究^[16,17],尤其缺少校园建筑方面的实测负荷数据分析。因此本文以香港一所大学的 12 幢楼的实测逐时负荷为基础,深入分析夏热冬暖地区校园建筑的负荷特征,比较不同建筑的负荷差异性,为建筑负荷预测与能耗评估提供数据支持。

1 建筑及系统简介



图 1 建筑布局图

Fig.1 Architectural layout

本文所研究的建筑群位于香港理工大学校园内, 建筑布局如图 1 所示。图中有颜色标记的楼栋组成的建筑群为分析对象。该建筑群中有相对独立

的单一楼栋, 如 VA、VS、Y 等, 也有相互连通的建筑, 如 CD、DE、EF 等, 这些楼栋的连接处为走道和电梯, 相互之间可以串通。根据建成时间, 该建筑群被划分为 12 幢楼, 每幢楼配有单独的空调系统。每幢楼所包括的楼栋、建筑面积及对应楼栋空调机组配置如表 1 所示。该建筑群总面积为 26 万 m^2 , 各栋楼中建筑面积最大的是 Phase 1-2, 为 55 250 m^2 , 面积最小的是 JCA, 为 4800 m^2 。Phase 1-2 和 Phase 2AB 的冷源分别为 5 台制冷量为 313 冷吨的冷水机组。Phase 3A 和 Phase 3B 的冷源分别为 3 台制冷量为 400 冷吨的冷水机组。Phase 4、Phase 7、Phase 8 以及 JCIT 采用大小机组组合的配置原则以满足负荷需求。其中 Phase 3A、Phases 3B、Phase 5 以及 Phases 6 的水系统为一次泵系统, 其余楼栋为二次泵系统。

表 1 建筑划分及空调配置

Table 1 Buildings and air conditioning configurations

楼栋	颜色	具体楼栋	建筑面积/ m^2	制冷量/ton
Phase 1-2	粉	Library; CD; DE; EF; CF; FJ; VA; VS	55250	313×5
Phase 2AB	棕	HJ; FG; GH	24420	313×5
Phase 3A	黄	AG; BC	16780	400×3
Phase 3B	橙	QT; TS; Communal building	23400	400×3
Phase 4	绿	Industrial center (U; W)	19330	400×3+100×1
Phase 5	蓝	P; PQ	10080	
Phase 6	紫	M; N; MN	12310	
Phase 7	深蓝	Y	25000	430×4+200×1
Phase 8	浅蓝	Z	44000	800×4+300×1
PCD	黄	QR; R	10200	
JCA	红	JCA	4800	
JCIT	浅蓝	JCIT (V)	15320	550×3+300×1

2 数据采集

该建筑群配备了完备的能耗数据采集系统。由于香港处于亚热带地区, 需要全年供冷, 而几乎没有热负荷, 所以能耗数据只有冷负荷与电负荷。其中冷负荷由 Building Management Systems (BMSs) 监控, 电负荷由电力公司的电表自动记录。监测得到数据作为实测数据, 反映了实际运行过程中的建筑负荷与能耗的真实情况, 为负荷分析提供了可靠依据。

但是监测得到的原始数据需要进一步处理。因为 BMSs 数据采集的时间间隔并不完全一致, 有的间

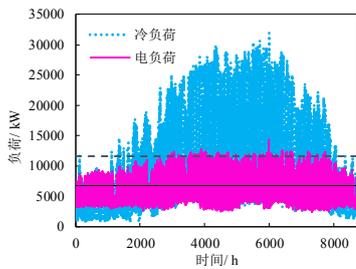
隔 15min, 有的间隔 30min, 而且在系统运行过程中存在不确定性, 这会导致数据的遗失或异常。所以进一步处理原始数据以统一时间间隔, 同时去掉这些异常数据, 将最终得到的数据作为分析依据。

本文采集了 2015 年该建筑群全年逐时的冷负荷和电负荷。值得注意的是, 电表监测得到的电负荷是空调系统、照明系统、电梯系统等所有用电设备耗电量的总和。如果该建筑群使用分布式能源系统, 冷负荷将由吸收式机组提供, 那么总电负荷需要除去空调系统用电, 尤其是电制冷式冷水机组的用电量。因此, 本文在数据处理时, 通过空调系统配置情况, 依据制

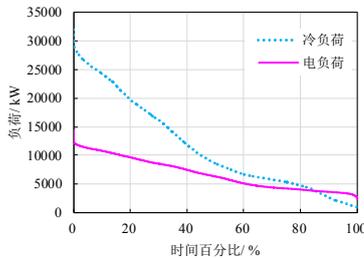
冷机组额定 COP，冷负荷部分负荷率，水泵的流量、扬程和效率，以及冷却塔的运行情况，计算出单独的空调系统用电，将这一部分的电量从总电负荷扣除。

3 负荷分析

3.1 冷、电负荷基本特征



(a) 全年冷负荷与电负荷逐时曲线



(b) 冷负荷与电负荷延时曲线

图 2 冷/电负荷曲线

Fig.2 The cooling/electricity load profile

图 2 展示了该建筑群的全年逐时负荷曲线和延时曲线，其中逐时冷负荷与电负荷分布情况如图 2 (a) 所示。由图可知，该建筑群全年均有冷负荷，需要全年供冷。冷负荷全年变化幅度较大，在夏季冷负荷明显增大，最大值为 31996kW，出现在 9 月 15 日 10:00。逐时冷负荷的平均值为 11525kW，如图中虚直线所示。电负荷也是全年存在的，其分布较为均匀，没有出现季节性的波动。逐时电负荷

的平均值为 6750kW，如图中的实直线所示。

通过简单计算还可以得到该建筑群的以下负荷数据：全年累计冷负荷值为 100959877kWh，累计冷负荷指标为 387.0kWh/m²，平均小时冷负荷指标为 44.2W/m²，最大冷负荷指标为 122.6W/m²；全年累计电负荷值为 59129756kWh，累计电负荷指标为 226.6kWh/m²，平均小时电负荷指标为 25.9W/m²。

以负荷值大小为纵坐标，以全年 8760h 实际负荷值大于该负荷值的总时长所占百分比为横坐标作图，可以得到图 2b 所示的负荷延时曲线。从图中可以直观看出，冷负荷延时曲线比较陡峭，电负荷延时曲线比较平缓，说明冷负荷变化比较大，而电负荷较为稳定。

全年的负荷分布关系到能源系统的运行率匹配，从而影响到系统的经济效益。从负荷延时曲线图中可以看出负荷分布情况。从冷负荷来看，该建筑群最低负荷为 649kW，需要全年 100%时间满足；基本负荷为 4754kW，需要全年 80%的时间满足；高峰负荷为 19748kW，需要全年 20%的时间满足；最大负荷为 31996kW，是全年出现时间很短的冲击性负荷。而对于电负荷来说，最低电负荷为 2319kW，远大于最低冷负荷值；基本电负荷为 4037kW，与基本冷负荷值比较接近；高峰电负荷为 9667kW，只有高峰冷负荷的一半左右；最大电负荷为 14431kW，远小于最大冷负荷值。

以上将建筑群作为一个整体，分析其负荷基本特征。负荷值为各楼栋实测负荷值的加和，总负荷的变化一定程度上反映了建筑在区域尺度上负荷变化情况。但是能源系统最终的具体服务对象是每一幢单独的楼栋甚至每一个房间，虽然所有楼栋均属于同一类型建筑，但每幢楼的功能、作息等并不完全一致，所以整体的负荷特征与单独楼栋的负荷特征可能还存在差异。下面以第 1 节中介绍的每幢楼为单位，分析建筑群中各楼栋的负荷差异情况。

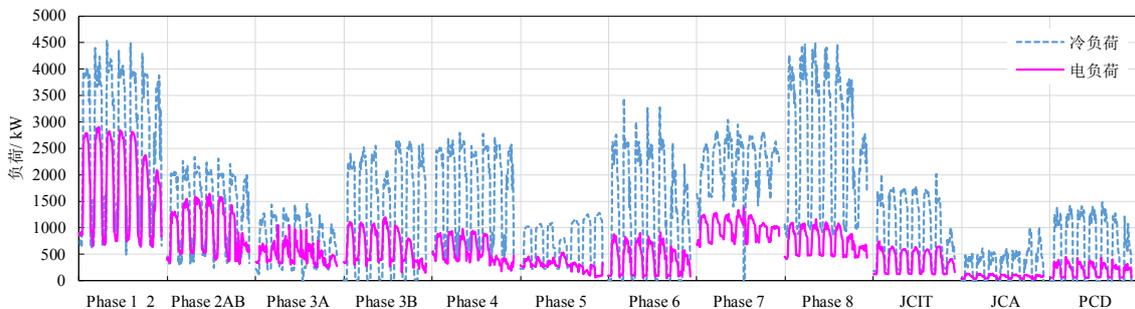


图 3 各楼栋典型周逐时负荷

Fig.3 The hourly load profile in a typical week for different buildings

图 3 为每幢楼夏季典型周的逐时负荷曲线图。从图中可以看出, 各楼栋的冷负荷和电负荷都以一天 24h 为单位呈现周期性的变化。白天工作时间, 冷负荷和电负荷维持在一个较高的值, 夜间无人时负荷急剧减小。大部分楼栋夜间依然存在一定的冷/电负荷, 但有的楼栋夜间冷负荷减小到零, 如 Phase 3B、Phase 6、JCA 和 PCD 等, 这是在前文总负荷分析中看不出来的。此外, 各楼栋的冷负荷变化相比于电负荷变化都更为剧烈, 与总负荷分析结论相同。

从图 3 中还可以看出, 各楼栋的负荷变化并不完全一致, 体现在: 各楼栋间白天的最大负荷值和夜间的最小负荷值互不相同; 各楼栋工作日和周末的负荷值大小与变化趋势不相同等。这些建筑的负荷各有特征, 不能一概而论。

在评价负荷均匀性方面, 有学者引进了经济学领域的 Lorenz 曲线和 Gini 系数对负荷分布特征进行量化分析^[21,22]。负荷的 Lorenz 曲线如图 4 所示。图中 x 轴为从低到高排列的负荷值对应的累计百分比, y 轴为负荷需求的累计百分比。图中阴影部分面积为 A, 右下方曲边三角形的面积为 B, $A/(A+B)$ 的值即为 Gini 系数值。文献[22]指出, 负荷的 Lorenz 曲线可以反映负荷分布在时间和空间上的均匀性, 而 Gini 系数可以量化其不均匀程度, Gini 系数越小, 负荷分布越均匀。在 Gini 系数较小的情况下, 冷热源系统能够获得更高的 COP。

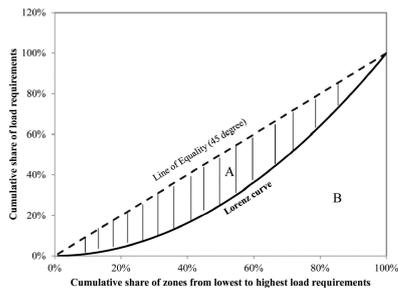


图 4 负荷分布 Lorenz 曲线

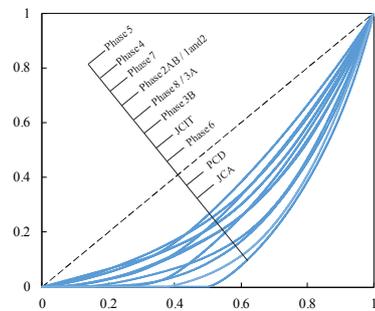
Fig.4 Application of Lorenz curve in load distribution

根据实测得到的全年负荷数据, 分别作出每幢楼的冷负荷分布和电负荷分布的 Lorenz 曲线, 如图 5 所示, 由 Lorenz 曲线图得到的 Gini 系数值如表 2 所示, 由此分析冷/电负荷分布的时间均匀性。

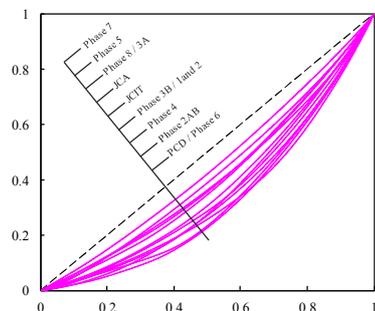
首先可以发现, 各楼栋相互之间的冷/电负荷均匀性各有差异, 12 幢楼的冷负荷 Gini 系数值分布在 0.30~0.65 之间, 电负荷 Gini 系数分布在 0.11~0.36 之间, 从 Lorenz 曲线图中可以直观看出

差异性。文献[22]研究了北京地区一种典型制冷机模型下, 负荷分布 Gini 系数对机组 COP 的影响, 指出在冷负荷 Gini 系数小于 0.2 时, 机组 COP 可以达到 5.8 左右, 当 Gini 系数增大到 0.4 时, 机组 COP 降至 4 左右, 当 Gini 系数达到 0.6 以上时, 机组 COP 降至 2 以下。由此可以推断, 本文中 12 幢楼之间冷负荷 Gini 系数的差异较为显著。

其次, 冷负荷分布的时间不均匀程度较大。分布最不均匀的楼栋是 JCA, 其 Gini 系数值最大, 达到 0.65, 在图 5a 中表现为最远离 45° 斜线。JCA 为剧院, 用作举办文艺活动、演讲或者毕业典礼, 有活动的时候负荷比较大, 不用的时候就闭馆, 负荷为零, 因此负荷分布不均匀。Gini 系数最小的楼栋是 Phase 5, 其冷负荷分布相对均匀一些 (Phase 5 为工业中心, 其中的电脑机房以及实验室, 全年都在运行)。另一方面, 各个楼栋的电负荷分布都比较均匀, Gini 系数最大值为 0.36; Gini 系数最小的楼栋是 Phase 7, 其值仅为 0.11, 图 5b 中最逼近 45° 斜线的曲线即为 Phase 7 电负荷分布的 Lorenz 曲线。Phase 7 为生物、医学实验室, 存放实验样本需要持续低温, 经常耗电, 且全年都是这样, 所以电负荷分布均匀。



(a) 各楼栋冷负荷分布的 Lorenz 曲线



(b) 各楼栋电负荷分布的 Lorenz 曲线

图 5 各楼栋冷/电负荷分布的 Lorenz 曲线

Fig.5 The application of Lorenz curve in

cooling/electricity load distribution for different buildings

表 2 各楼栋冷负荷分布与电负荷分布的 Gini 系数值

Table 2 The Gini indexes in cooling/electricity load for different buildings

	Phase land2	phase 2AB	Phase 3A	Phase 3B	Phase 4	Phase 5	Phase 6	Phase 7	Phase 8	JCIT	JCA	PCD
冷负荷 Gini 系数值	0.38	0.38	0.44	0.48	0.35	0.30	0.57	0.37	0.44	0.54	0.65	0.62
电负荷 Gini 系数值	0.29	0.35	0.20	0.29	0.33	0.17	0.36	0.11	0.19	0.25	0.21	0.34

3.2 冷电比分析

冷电比是负荷特征的重要参数,它对能源系统设计和运行的节能性、经济性和环保性有显著影响,因此对冷电比的分析显得尤为重要。通过实测数据可以得到全年整个建筑群和各幢楼的逐时冷电比,以及月平均、年平均冷电比等,如图 6 所示。

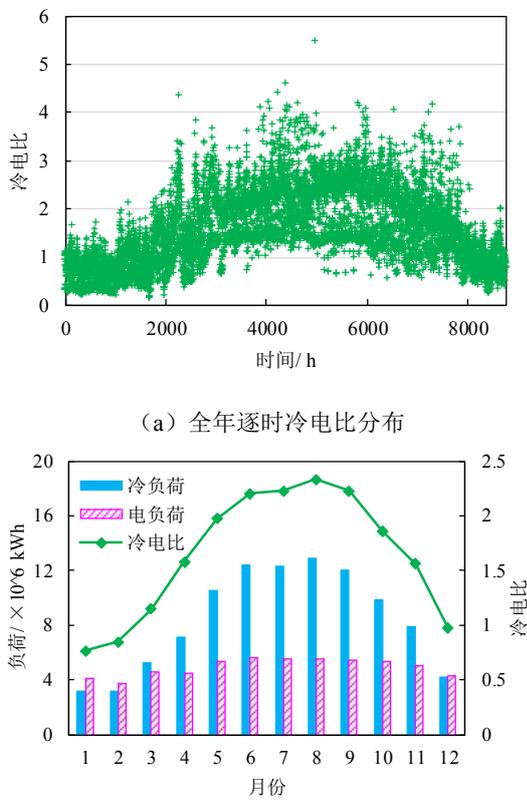


图 6 冷电比变化曲线

Fig.6 Cooling-to-electricity ratio profile

图 6 (a) 展示了整个建筑群的全年逐时冷电比分布。从中可以看出冷电比随着时间变化的趋势明显,在夏季时冷电比很高。图 6 (b) 为各月份冷/电负荷及冷电比变化图。由图可知,由于全年电负荷分布较为均匀而冷负荷变化较大,所以冷电比变化趋势与冷负荷变化趋势基本一致。8 月的冷负荷最大,冷电比也最高,其值为 2.33; 1 月的冷

电比最低,其值为 0.76。冷电比小于 1 的月份还有 2 月和 12 月,冷电比分别为 0.85 和 0.97,因为这段时期涉及圣诞节假期以及寒假,学生人数较少。还可以通过计算得到,全年的平均冷电比为 1.71。

各楼栋冷电比的特征也不尽相同,如图 7 所示。图 7 为各楼栋冷电比的箱线图,根据各楼栋冷电比的最大值、最小值、中位数、上四分位数和下四分位数这五个特征值绘制而成。图中把超过四分位差(上四分位值与下四分位值之差)1.5 倍距离的数值定义为离群点,在图中用“o”表示;把超过四分位差 3 倍距离的数值定义为极 endpoint,用“*”表示。

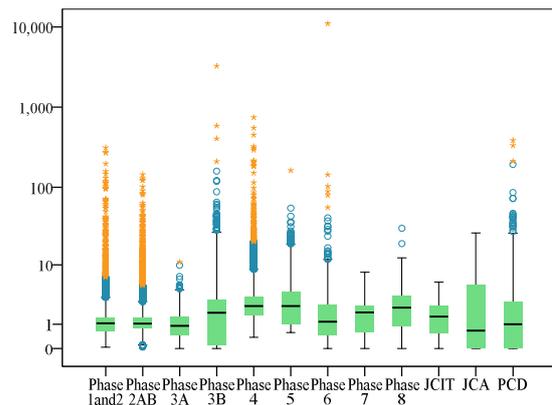


图 7 各楼栋冷电比的箱线图

Fig.7 Box plot of the cooling-to-electricity ratio for different buildings

从图中可以看出,各楼栋的冷电比分布差异很大。12 幢楼中,平均冷电比值较高的是 phase 4、phase 5 以及 phase 7 (中位数比较高,分别为 2.37、2.38 和 2.21),较低的是 phase 3A、JCA 和 PCD (中位数分别为 0.92、0.68 和 1.00); 从冷电比的离散程度来看, phase 1and2、phase 2AB、phase 3A 以及 phase 4 比较集中(箱子较短,多为办公楼),而 phase 3B、JCA 和 PCD 比较分散(多为课室、餐厅、举办文艺活动地方); 从分布形状来看, phase 3B、phase 7 和 JCA 冷电比的中位数明显偏离箱子中间位置,而其他楼栋的冷电比基本上对称分布。图中

用“o”和“*”标出了离群点和极端点,可以发现,所有楼栋中,除 phase 7、phase 8、JCIT 和 PCD 之外的 8 幢楼的冷电比存在较多的离群点和极端点,这些值(处于 10~10000 之间)远大于冷电比正常值,这可能是在数据采集过程中电表读数很小的情况下产生的,可以将这些值作为异常值。

从图中还可以看出, Phase 4、Phase 5 冷电比的最小值不为零,说明这两幢楼全年所有时刻(即便是在夜晚)都存在冷负荷。而 JCA 和 PCD 冷电比的下四分位点和最小值都为零,说明这两栋建筑

在全年中有超过四分之一的时间冷负荷为零。

3.3 单位面积负荷指标法

在实际工程中,一般采用单位面积负荷指标法估算建筑群的负荷,具体做法是用单位面积负荷指标乘上单体建筑的面积,得到各单体建筑的负荷,再把各单体建筑的负荷简单叠加,然后乘以同时使用系数。单位面积负荷指标一般根据规范和工程经验取定。从前文对建筑群及各单体建筑的分析可知,各单体建筑间的负荷特征存在差异,用单一指标来预测负荷可能会导致较大误差。

表 3 各楼栋冷/电负荷指标

Table 3 The cooling/electricity load indexes for different buildings

楼栋	冷负荷指标			电负荷指标		
	全年累计 kWh/m ²	全年最大 W/m ²	全年平均 W/m ²	全年累计 kWh/m ²	全年最大 W/m ²	全年平均 W/m ²
Phase 1and2	284.6	91.6	32.5	257.4	66.8	29.4
phase 2AB	333.8	107.0	38.1	283.6	89.7	32.4
Phase 3A	245.0	108.5	28.0	225.0	81.7	25.7
Phase 3B	405.5	129.0	46.3	194.2	60.5	22.2
Phase 4	562.1	160.6	64.2	218.6	74.5	25.0
Phase 5	590.4	130.9	67.4	225.1	60.0	25.7
Phase 6	563.5	334.8	64.3	291.8	109.0	33.3
Phase 7	538.7	144.1	61.5	323.2	78.5	36.9
Phase 8	344.7	138.0	39.3	138.8	41.4	15.8
JCIT	541.3	235.6	61.8	313.9	80.8	35.8
JCA	421.0	266.5	48.1	128.8	32.5	14.7
PCD	232.3	113.9	26.5	102.3	34.2	11.7

表 3 为基于实测数据,根据面积折算的各楼栋冷/电负荷指标。由表可知,楼栋间的负荷指标各有差异。对于冷负荷指标,全年累计冷负荷指标最小值为 232.3kWh/m²,楼栋为寒暑假都不用的教学楼 PCD,最大值为 590.4kWh/m²,出现在有一些数据机房、电力实验室的 phase 5;最大冷负荷指标最小值为 91.6W/m²,最大值为 334.8W/m²;而平均冷负荷指标最小值为 26.5W/m²,最大值为 67.4W/m²。各个冷负荷指标中最大值比最小值大一倍以上。电负荷指标的差异也很大,以平均电负荷指标为例,其最大值为 35.8W/m²,最小值为 11.7W/m²,相差两倍以上。

此外,前文 3.1 节得出整个建筑群的全年累计冷负荷指标为 387.0kWh/m²,全年最大冷负荷指标为 122.6W/m²,平均小时冷负荷指标为 44.2 W/m²;全年

累计电负荷指标为 226.6kWh/m²,平均小时电负荷指标为 25.9W/m²。这些指标与各楼栋的对应数据不相等。

所以整个建筑群及各楼栋之间的实际负荷指标差别很大,不能简单用同一个指标概括。如果用单位面积负荷指标法估算建筑的负荷,则其结果与实际负荷之间必然会存在较大误差。

4 结论

本文基于实测数据对建筑的负荷特征进行的分析,总结了夏热冬暖地区学校建筑冷负荷、电负荷及冷电比的基本特征,并对建筑群中各楼栋负荷特征的差异性进行了比较,最后对比了基于实测数据得到的实际负荷指标,得出以下结论。

(1) 夏热冬暖地区的校园建筑基本上全年存

在冷负荷与电负荷,在全年范围内冷负荷波动较大,在夏季冷负荷明显增大,而全年电负荷分布较为均匀,波动幅度小。冷电比变化趋势与冷负荷的变化趋势一致,月平均冷电比最大值为 2.33,出现在 8 月,最小值为 0.76,出现在 1 月。

(2) Gini 系数用以量化评价负荷分布的均匀程度,该校园建筑中各楼栋的冷/电负荷分布均匀性有较大差别。在 12 幢楼栋中,不定期举行活动的剧院 JCA 的冷负荷 Gini 系数值最大,为 0.65;而需要全年运行的工业中心 Phase 5 的冷负荷 Gini 系数值最小,为 0.30。此外,各楼栋的电负荷 Gini 系数值分布在 0.11~0.36 之间,相较于冷负荷,各楼栋电负荷的分布都比较均匀。

(3) 各楼栋的逐时冷电比分布有较大差异。在全年范围内,办公室类型楼栋的冷电比集中在中位数附近,而课室、餐厅和文艺活动中心等楼栋的冷电比分布较为分散,主要是因为这些楼栋的逐时冷负荷波动大。

(4) 即使是同一地区同一类型建筑,由于具体功能、使用情况和人员作息等差异造成各楼栋的负荷指标各有不同,该校园建筑中各楼栋的负荷指标最大值与最小值相差 2 倍以上。如果使用单位面积负荷指标法预测负荷,将会造成很大的误差。因此,在设计阶段应考虑同类型建筑的个性化差异,通过详细的建筑热过程模拟计算,提高建筑峰值负荷及全年用能密度的预测准确性,进而改善系统的优化设计。

参考文献:

- [1] 徐伟,孙德宇,乔鏖,等.基于建筑特性的冷热电动态负荷预测方法研究[J].暖通空调,2016,(9):64-69,83.
- [2] 刘廷章,郇敏,李占培,等.建筑空间负荷预测方法[J].暖通空调,2016,(10):45-54.
- [3] JI Y, XU P, DUAN P, et al. Estimating hourly cooling load in commercial buildings using a thermal network model and electricity submetering data[J]. Applied Energy, 2016,169:309-323.
- [4] 潘毅群,郁丛,龙惟定,等.区域建筑负荷与能耗预测研究综述[J].暖通空调,2015,(3):33-40.
- [5] 欧科敏,韩杰,周晋,等.区域建筑冷热负荷预测方法及其研究进展[J].暖通空调,2014,(10):94-100.
- [6] 龙惟定.建筑节能管理的重要环节——区域建筑能源规划[J].暖通空调,2008,(3):31-38.
- [7] 梁哲诚,陈颖,肖小清,等.广州市 3 栋商业建筑冷、热、电负荷特性分析[J].建筑科学,2012,(8):13-20.
- [8] 姚晔,连之伟,侯志坚,等.基于 AHP 的空调负荷组合预测研究[J].哈尔滨工业大学学报,2004,(9):1269-1271,1275.
- [9] 杨木和,阮应君,李志英,等.三联供系统中逐时冷热电负荷的模拟计算[J].制冷空调与电力机械,2009,(4):85-88,95.
- [10] 韩传忠,端木琳,舒海文,等.区域供冷负荷预测模型的建立[J].建筑热能通风空调,2012,(1):9-11,85.
- [11] 张杰,李德英.典型办公楼负荷预测[J].建筑节能,2012,(5):58-60.
- [12] 李朝振,石玉美,顾建明.三联供系统优化中负荷的描述与分析[J].中南大学学报(自然科学版),2009,(4):891-896.
- [13] 华贲,龚婕.分布式冷热电联供能源系统经济性分析[J].天然气工业,2007,(7):118-120,146.
- [14] 李春蝶,王亮.区域型冷热电联供系统负荷特征及匹配分析[J].制冷与空调,2016,(1):5-8,14.
- [15] 李志生,李冬梅,梅胜,等.夏热冬暖地区办公建筑能耗模拟与分析[J].节能技术,2006,(6):483-486.
- [16] 任俊,刘加平.广州居住建筑空调能耗实测研究[J].暖通空调,2004,(5):18-22,58.
- [17] DENG S M, BURNETT J. A study of energy performance of hotel buildings in Hong Kong[J]. Energy and Buildings, 2000,31(1):7-12.
- [18] LAM TNT, WAN KKW, WONG SL, et al. Impact of climate change on commercial sector air conditioning energy consumption in subtropical Hong Kong[J]. Applied Energy, 2010,87(7):2321-2327.
- [19] LAM JC, Li DHW, CHEUNG SO. An analysis of electricity end-use in air-conditioned office buildings in Hong Kong[J]. Building and Environment, 2003,38(3):493-498.
- [20] LAM JC. Residential sector air conditioning loads and electricity use in Hong Kong[J]. Energy Conversion and Management, 2000,41(16):1757-1768.
- [21] ZHOU X, YAN D. Influence of load feature on the water distribution system in a centralized air-conditioning system[J]. Science and Technology for the Built Environment, 2016,23(2):277-284.
- [22] ZHOU X, YAN D, JIANG Y. Application of Lorenz Curve and Gini Index in the Analysis of Load Feature in HVAC Systems[J]. Procedia Engineering, 2015, 121:11-18.