

文章编号:1000-5013(2015)05-0575-06

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.05.0575

厦门市公共建筑能耗影响因素与节能潜力分析

秦旋, 刘倩昆

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 从建筑形态、围护结构、用能设备及能源管理的角度识别出 14 项客观因素和 15 项节能技术,对厦门市 130 栋公共建筑的能耗数据进行推论性统计分析.对 14 项客观因素进行一维组间方差分析,结果表明,对建筑能耗具有显著影响的因素有 10 项,其中 7 项属于设计环节的关键参数,3 项属于运行阶段的影响因素.对 15 项节能改造技术进行独立样本 T 检验,结果表明,11 项具有显著节能效果,其中 9 项属于用能设备,2 项属于围护结构,建筑用能设备具有较大的节能潜力,且用能设备的节能效果优于围护结构.

关键词: 建筑能耗; 公共建筑; 节能技术; 厦门市

中图分类号: TU 111.195(257)

文献标志码: A

据前瞻产业研究院《2013—2017 年中国智能建筑行业市场前景与投资战略规划分析报告》数据^[1]显示:我国建筑能耗的总量逐年上升,在能源总消费量中所占的比例已从 20 世纪 70 年代末的 10%,上升到 27.45%,逐渐接近三成.随着城市化进程的加快和人民生活质量的改善,我国建筑耗能比例最终还将上升至 35%左右.建筑耗能的快速上涨已经成为我国经济发展的软肋,而公共建筑又是我国建筑能源消耗的主体.因此,在资源枯竭和环境日益恶化的今天,探究公共建筑能耗影响因素与节能潜力,对实现节能减排的发展目标具有一定的现实意义.目前,已有学者针对办公建筑将能耗影响因素归类为气候条件、建筑形态、维护结构、设备系统调节和人员行为等方面^[2-4].厦门市公共建筑能耗的研究情况仅初步分析了各类公共建筑能耗规律^[5-6],对能耗影响因素与节能潜力进一步深入研究.因此,本文将基于实证调研,从微观层面上分析厦门地区公共建筑能耗的影响因素,寻求有显著节能效果的节能技术.

1 研究方法

以已建成的厦门市公共建筑为样本进行数据采集,收集 2008—2013 年厦门市国家机关办公建筑和大型公共建筑能源审计公示数据^[7],并持单位介绍信走访厦门市建设与管理局,获取研究所需的进一步数据;同时,跟随厦门市建科院走访物业单位,展开现场调研和发放问卷,历时半年共获得 130 栋公共建筑的能源审计账单(即 130 份有效问卷).

1.1 公共建筑能耗数据统计分析

分析 130 栋建筑物的样本数据,从建筑物类型来看,政府办公建筑 27 栋,占样本数量的 21%;非政府办公建筑 58 栋,占 45%;商场建筑 16 栋,占 12%;酒店建筑 17 栋,占 13%;医疗、科教文卫等其他类型 12 栋,占 9%.从建筑面积来看,大型公共建筑(建筑面积大于 2 万 m^2)占总数的 75%,占样本总体的绝大部分.从年能耗来看(由于厦门地区公共建筑的能耗主要表现为电能,其他形式能源所占比例非常小,故不予考虑),年能耗超过 500 万 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 的建筑有 28 栋,所占比重为 22%;年能耗在 200~500 万 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 的建筑有 50 栋,占样本数量 38%;年能耗在 100~200 万 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 的建筑有 37 栋,占 28%.由此

收稿日期: 2015-06-17

通信作者: 秦旋(1969-),女,教授,博士,主要从事绿色建筑、节能建筑的评价与管理的研究. E-mail: hdwq@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2013J01195);福建省泉州市科技计划资助项目(2012Z94)

可知:调研的样本数据具有较好的代表性,并且数据真实可靠.

1.2 公共建筑能耗影响因素分类

以住建部印发的建筑能源审计账单为依据,参考相关文献将公共建筑影响因素分成建筑形态、围护结构、用能设备及能源管理 4 个类别. 每个类别包含的子因素,如表 1 所示.

表 1 公共建筑能耗影响因素分类
Tab. 1 Classification of influence factors in energy consumption in public building

总体分类	序号	影响因素	因素分类	总体分类	序号	影响因素	因素分类
建筑形态	1	建筑年代	客观因素	用能设备	17	空调末端形式	客观因素
	2	建筑类型	客观因素		18	冷源设备形式	客观因素
	3	建筑朝向	客观因素		19	空调功率密度	—
	4	建筑面积	—		20	热水回收技术	节能技术
	5	建筑层数	客观因素		21	采用变风量系统	节能技术
	6	建筑高度	—		22	冷水机组变频技术	节能技术
围护结构	7	建筑结构形式	客观因素		23	冷却塔安装变速风机	节能技术
	8	外墙类型	客观因素		24	照明功率密度	—
	9	外窗类型	客观因素		25	室内照明使用 LED 灯	节能技术
	10	窗框材料	客观因素		26	采用节能镇流器	节能技术
	11	玻璃类型	客观因素		27	设置照明自动控制	节能技术
	12	外墙保温措施	节能技术		28	设置电梯联动	节能技术
	13	屋面保温措施	节能技术		29	水泵设置全效率 80%	节能技术
	14	有无外遮阳措施	节能技术		30	屋面安装太阳能集热器	节能技术
	15	使用 Low-e 玻璃	节能技术	能源管理	31	建筑运行时间	—
	16	建筑立面使用玻璃幕墙	节能技术		32	常驻人口	—
					33	能源管理组织	客观因素
					34	能源系统计量	客观因素
					35	能源管理实践	客观因素

在 35 项能耗影响因素中,29 项为定性影响因素,6 项为定量影响因素,节能不是该类因素的主要出发点. 为降低建筑能耗而专门采用的先进设备或特殊设计即为节能技术^[4],29 项定性影响因素分成 14 项客观因素和 15 项节能技术,定量影响因素暂不研究.

2 客观因素的统计分析

2.1 一维组间方差分析

对 14 项客观因素进行初步的描述分析,如表 2 所示. 但目前并不清楚哪些因素对公共建筑能耗有影响及影响程度有多大,为了进一步探究这个问题,利用 SPSS(statistical product and service solutions)一维组间方差分析的方法寻求对公共建筑能耗具有显著性影响的因素^[4]. 一维组间方差分析常用来研究不同水平的控制变量是否对观测变量产生显著影响^[8]. 如果 ANOVA 不显著(Sig. >0.05),表明各因素组间无明显差异;如果 ANOVA 显著(Sig. ≤0.05),表明各因素组间差异不具有统计学意义. 表 2 中: \bar{x} 为各水平能耗均值;A,B,C,D 是能源管理水平的分级.

由表 2 可知:变量建筑类型、建筑朝向、建筑层数、建筑面积、外墙材料、窗框类型、空调末端形式、冷源设备形式、能源管理组织、能源系统分项计量及能源管理实践等因素的 Sig. 值均小于 0.05,表明这 10 个因素对建筑能耗差异具有统计学意义. 按照各因素对能耗的影响程度排序为:建筑类型>能源管理组织>冷源设备形式>空调末端形式>能源管理实施>能源系统分项计量>窗框材料>建筑层数>外墙材料>建筑朝向.

假定 1985 年以前的建筑共有 n 栋,每栋的能耗值为 x_1, \cdots, x_n ,那么,这 n 栋建筑的能耗均值为 $\bar{x} = \sum_{i=1}^n (x_i/n)$. 10 项显著影响因素中有 7 项发生在建筑设计阶段,表明设计阶段是影响建筑节能的重要阶段,其中,建筑类型、冷源设备及空调末端形式的影响非常明显;其次,窗框材料、建筑层数、外墙材料和

建筑朝向等影响明显. 在建筑运行阶段,对能耗具有显著影响的因素有能源管理组织、能源管理的实施和能源系统分项计量 3 项. 由此可知,科学的管理体系、有效的能源管理制度和措施可以有效降低建筑物运营期间的能耗^[9].

表 2 客观因素统计分析及 one-way ANOVA 检验
Tab. 2 Statistical analysis and one-way ANOVA test of objective factors

因素分类	序号	客观因素	$\bar{x}/\text{kW}\cdot\text{h}$						F	Sig.
建筑形态	1	年代	493 351.11 (1985 年以前)	3 035 989.83 (1985—1995 年)	3 243 893.13 (1996—2005 年)	3 298 391.14 (2006 年—至今)	—	—	1.195	0.315
	2	类型	2 003 074.07 (政府办公建筑)	2 957 175.12 (非政府办公建筑)	4 810 772.88 (商场建筑)	6 073 160.18 (酒店建筑)	2 522 330.83 (其他建筑)	—	10.51	0
	3	朝向	4 405 917.24 (东西朝向)	2 836 148.07 (南北朝向)	4 185 078.64 (东南朝向)	3 175 879.78 (西南朝向)	—	—	2.957	0.035
	4	层数	3 100 267.29 (10 层以下)	2 773 435.16 (10~20 层)	3 442 738.44 (20~30 层)	5 051 142.80 (30 层以上)	—	—	3.480	0.018
围护结构	5	结构形式	1 575 161.33 (砖混结构)	3 456 447.81 (钢混结构)	32 105 376.8 (钢结构)	—	—	—	1.472	0.233
	6	外墙材料	3 853 197.50 (灰砂砖材料)	2 928 993.28 (混凝土砌块)	4 330 725.24 (粘土砖材料)	—	—	—	3.083	0.049
	7	外窗类型	3 136 235.30 (单玻单层窗)	4 235 537.74 (单玻双层窗)	3 372 442.27 (中空玻璃窗)	—	—	—	1.197	0.305
	8	窗框材料	3 859 974.00 (钢窗材料)	3 564 507.04 (铝合金材料)	2 069 119.80 (木窗材料)	—	—	—	3.564	0.031
	9	玻璃类型	2 955 817.13	4 002 260.28 (普通玻璃镀膜玻璃)	2 816 425.81 (Low-e 玻璃)	3 009 105.60 (钢化玻璃)	—	—	1.976	0.121
用能设备	10	空调末端形式	2 005 395.97 (分体式或 VRV 的局部式机组系统)	3 769 027.35 (风机盘管加新风系统)	3 900 080.82 (新风系统加分体式或 VRV 局部空调机组)	3 688 238.63 (集中式全空气系统)	6 229 617.00 (新风系统加集中式全空气系统)	—	4.842	0.001
	11	冷源设备形式	1 900 645.76 (分体式空调或 VRV 的局部式机组)	2 536 254.88 (风冷式机组)	4 009 604.86 (离心式机组加风冷式)	4 570 485.64 (离心式机组加螺杆式)	4 251 812.82 (离心式机组)	3 201 147.16 (螺杆机组)	4.852	0
能源管理	12	能源管理组织	2 186 057.61 (A)	3 216 205.25 (B)	3 455 527.64 (C)	6 291 852.88 (D)	—	—	5.277	0.002
	13	能源系统分项计量	2 535 048.90 (A)	3 321 419.55 (B)	3 186 768.23 (C)	5 484 744.71 (D)	—	—	4.196	0.007
	14	能源管理实施	1 931 628.62 (A)	3 686 762.33 (B)	3 103 999.80 (C)	6 720 635.40 (D)	—	—	4.811	0.003

2.2 显著性差异的进一步检验

10 项显著影响因素尽管对原假设拒绝,但是对立假设并不明确(各客观因素的哪个类型和其他类型具有显著性差异暂不明确). 因此,为了进一步找出差异,采用检验配对比较 Tukey’s Post Hoc 方法对数据做进一步的处理,结果如表 3 所示.

2.3 结论分析

如果在 Tukey HSD 表中组间共享一列,表明这些组间的差异结果不显著;如果表中组间不共享同一列,则表明这些组间的差异显著. 仅以建筑类型差异分析为例,由表 3 可知:建筑类型各水平被分成了 3 列,“alpha=0.05 的子集”的第 1 列包括非政府办公建筑、其他建筑、政府办公建筑,建筑能耗量最小;第 2 列分别由非政府办公建筑、商场建筑组成,能耗依次增高;第 3 列由酒店建筑、商场建筑组成,能耗量最高. 由此可知:酒店建筑能耗最高,其次是商场建筑,政府办公建筑的能耗最低.

同样分析,可得以下 8 点结果.

1) 建筑朝向差异主要体现在东西朝向与其他朝向之间,对各水平建筑能耗均值进行比较可得出,东西朝向>东南朝向>西南朝向>南北朝向,因此,南北朝向的建筑能耗最小.

表 3 5 项显著客观因素 Tukey's Post Hoc 检验
Tab. 3 Tukey's Post Hoc on five objective factors

序号	客观因素	Tukey HSD ^{a,b} 分类	N	$\bar{x}/\text{kW}\cdot\text{h}$ alpha=0.05 的子集		
				1	2	3
1	建筑类型	政府办公建筑	27	2 003 074.07	—	—
		其他建筑	12	2 522 330.83	—	—
		非政府办公建筑	58	2 957 175.12	2 957 175.12	
		商场建筑	16	—	4 810 772.88	4 810 772.88
		酒店建筑	17	—	—	6 073 160.18
		Sig. 值	—	0.705	0.101	0.443
2	建筑朝向	南北朝向	71	2 836 148.07	—	—
		西南朝向	18	3 175 879.78	—	—
		东南朝向	14	4 185 078.64	—	—
		东西朝向	27	—	4 405 917.24	—
		Sig. 值	—	1.000	0.180	—
5	空调 末端形式	分体式或 VRV 局部空调	38	2 005 395.97	—	—
		风机盘管加新风系统	8	3 688 238.63	3 688 238.63	—
		新风系统加分体式或 VRV 局部空调机组	50	3 769 027.35	3 769 027.35	
		集中式全空气系统	30	3 900 080.82	3 900 080.82	—
		新风系统加集中式全空气系统	4	—	6 229 617.00	—
		Sig. 值	—	0.390	0.125	—
6	冷源设 备形式	分体式或 VRV 局部空调	37	1 900 645.76	—	—
		风冷式机组	8	2 536 254.88	2 536 254.88	—
		螺杆式机组	19	3 201 147.16	3 201 147.16	—
		离心式机组	11	4 009 604.86	4 009 604.86	—
		离心式+风冷机组	34	4 251 812.82	4 251 812.82	—
		离心式+螺杆机组	21	—	4 570 485.64	—
		Sig. 值	—	0.081	0.185	—
10	能源管理 实施	A	13	1 931 628.62	—	—
		B	61	3 103 999.80	—	—
		C	51	3 686 762.33	—	—
		D	5	—	6 720 635.40	—
		Sig. 值	—	0.301	1.000	—

2) 建筑层数差异主要体现在 20 层以下与 30 层以上之间,由于层数的增加使建筑垂直交通系统、给排水系统以及通风系统的能耗越大,同时,造成潜在的空调冷冻水、冷却水系统的输配能耗增加。

3) 外墙材料差异主要体现在混凝土砌块与粘土砖之间,混凝土砌块的耗能最小,是替代粘土砖的理想材料。

4) 窗框材料差异主要体现在钢窗材料与木窗材料之间,对各水平建筑能耗大致是钢窗材料>铝合金材料>木窗材料,铝合金与钢窗材料的能耗相差不大,木窗的耗能最小。

5) 空调末端形式显著差异主要体现在分体式或局部 VRV 空调与新风系统加集中式全空气系统之间,对各水平建筑能耗均值进行比较可得出,新风系统加集中式全空气系统>集中式全空气系统>新风系统加分体式或 VRV 局部空调机组>风机盘管加新风系统>分体式或局部 VRV 空调,这表明集中式空调系统能耗高于分体空调系统能耗。

6) 冷源设备形式显著差异主要体现在离心式加螺杆式机组与分体式或局部 VRV 空调,这表明冷水机组的能耗最大,其次是风冷式模块机组,而分体式空调的能耗最低。

7) 能源管理包括能源管理的组织、能源系统分项计量及能源管理的实施。

8) 显著差异均集中在 D 与 A,B,C 等级之间,即能源管理水平越高,意味着建筑物运营环节拥有科学和有效的能源管理体系,因而建筑物的能耗将越低。

3 节能技术的统计分析

3.1 独立样本 T 检验分析

对 130 栋公共建筑样本中 15 项节能技术按有无采取该项节能技术进行分类,但是对于厦门市公共建筑而言,哪些节能技术具有显著的节能效果,是推广的重点目前尚不清楚.利用 SPSS 独立样本 T 检验分析的方法寻求具有显著节能效果的节能技术^[10].独立样本 T 检验常用来检验一个样本平均数与一个已知的总体平均数的差异是否显著^[8].公共建筑能耗量的 T 检验结果,如表 4 所示.表 4 中:T 表示有无某项节能技术对厦门市公共建筑能耗的差异程度,T 的绝对值越接近于 0,表示有无实施该项节能技术对建筑能耗的影响差异性越小;Sig. 值表示有无实施节能技术对建筑能耗影响的差异显著性水平.从表 4 可知:各项技术均有一定的节能效果,其中有显著节能效果的技术 11 项,变风量系统>冷水机组变频技术>冷却塔采用变速风机>照明自动控制>设置电梯联动>热水回收技术>采用节能镇流器>室内照明采用 LED 灯>采用 Low-e 玻璃>外遮阳措施>屋面安装太阳能集热器.

表 4 实施各项节能技术的能耗均值数据 T 检验

Tab. 4 T-test of energy consumption for the group with and without energy-saving technology								
分类	序号	节能技术	$\bar{x}/\text{kW}\cdot\text{h}$		能耗降低率/%	T	Sig.	
			有	无				
围护结构	1	外墙保温技术	2 748 105.00	3 569 246.31	23	-1.567	0.120	
	2	屋面保温技术	2 873 015.64	3 486 654.68	18	-1.090	0.278	
	3	外遮阳措施	2 433 204.18	3 630 870.90	33	-2.527	0.014	
	4	采用玻璃幕墙	3 258 013.14	3 571 550.83	9	-0.623	0.534	
	5	采用 Low-e 玻璃	2 539 844.85	3 897 580.56	35	-2.974	0.004	
用能设备	6	室内照明采用 LED 灯	3 081 619.09	4 948 605.11	38	-2.931	0.004	
	7	采用节能镇流器	2 861 540.74	5 326 268.40	46	-3.327	0.002	
	8	照明自动控制	2 424 053.48	4 623 258.27	48	-4.852	0	
	9	热水回收技术	5 072 399.21	2 925 008.04	-73	3.403	0.002	
	10	变风量系统	1 904 236.81	4 760 788.79	60	-7.408	0	
	11	冷水机组变频技术	2 054 188.52	4 871 500.32	58	-6.783	0	
	12	冷却塔采用变速风机	2 390 921.19	4 710 614.92	49	-5.011	0	
	13	设置电梯联动	2 633 279.00	5 312 048.88	50	-4.484	0	
	14	水泵全效率 80%	2 744 854.49	3 597 027.96	24	-1.938	0.056	
	15	屋面安装太阳能集热器	2 633 761.27	3 762 607.67	30	-2.470	0.015	

3.2 结论分析

在 11 项具有显著效果的节能技术中,有 9 项属于用能设备节能技术,说明建筑用能设备具有较大的节能潜力.空调系统的能耗主要为冷水机组能耗、水泵和冷却塔风机能耗及空调末端能耗.将空调末端定风量系统更换为变风量系统、使用冷水机组变频技术和冷却塔,以及用变速风机可使能耗平均下降 50%,照明自动控制、采用节能镇流器和室内照明采用 LED 灯可使能耗降低约 40%,可见对照明系统进行节能改造的效果仅次于空调系统.动力系统方面节能效果最显著的是设置联动电梯.维护结构方面由于门窗的能耗占围护结构总能耗比重较大,因而门窗是围护结构的节能重点^[11].

由表 4 可知:外窗使用 Low-e 玻璃和外遮阳措施均有显著的节能效果;外墙保温技术、屋面保温技术、玻璃幕墙和水泵节能效果一般.就外墙保温技术而言,厦门市冬季供暖能耗非常低,外墙的保温隔热和屋面保温层对降低厦门地区公共建筑能耗的作用十分有限.目前常见的一些外围护结构,如多孔砖、混凝土砌块等做成自保温体系已基本能够满足节能需求.

另外,外遮阳措施采用 Low-e 玻璃、变风量系统、冷却塔采用变速风机及屋面安装太阳能集热器这几项具有显著节能效果的节能技术,目前尚未得到广泛应用.样本数据调研中发现仅有 23% 的建筑做了外遮阳措施.因此,努力推广这些节能效果显著的技术在厦门公共建筑节能改造中的应用,将会实现事半功倍的效果.

4 结 束 语

基于能源审计账单识别出 35 项能耗影响因素,并划分为 29 项定性影响因素和 6 项定量影响因素,进一步将 29 项定性影响因素分成 14 项客观因素和 15 项节能技术.对 14 项客观因素进行一维组间方差分析发现:建筑类型、能源管理组织、冷源设备形式、空调末端形式、能源管理实施等因素对厦门地区公共建筑的能耗影响显著;对 15 项节能改造技术进行独立样本 *T* 检验发现变风量系统、冷水机组变频技术、冷却塔采用变速风机、照明自动控制和设置电梯联动等用能设备方面的节能技术具有良好的节能效果,维护结构中采用 Low-e 玻璃和外遮阳措施也有明显的节能效果.

参考文献:

[1] 前瞻产业研究院. 2013~2017 年中国智能建筑行业市场前景与投资战略规划分析报告[R]. 北京:清华大学,2013: 2-3.

[2] 梁传志. 夏热冬暖地区办公建筑能耗特性研究[D]. 天津:天津大学,2011:3.

[3] 肖贺. 办公建筑能耗统计分布特征与影响因素研究[D]. 北京:清华大学,2011:11.

[4] 王春雷. 夏热冬暖地区大型办公建筑能耗影响因素研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010:4.

[5] 彭军芝,桂苗苗,陈清己,等. 厦门市大型公共建筑能耗统计分析[J]. 煤气与热力,2011(4):19-23.

[6] 王建飞. 厦门市公共建筑能耗特征分析[J]. 墙材革新与建筑节能,2012(12):48-51.

[7] 厦门市建设管理局. 厦门市国家机关办公建筑和大型公共建筑能效公示[EB/OL]. [2012-12-11]. http://www.xmjs.gov.cn/gsgg/201212/t20121211_71388.htm.

[8] 邱皓政. 量化研究与统计分析: SPSS 中文视窗版数据分析范例[M]. 重庆:重庆大学出版社,2009:54-62.

[9] 龙惟定. 建筑节能与建筑能效管理[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005:88-95.

[10] 张剑. 基于使用者主观评价的办公建筑最优窗墙面积比研究[J]. 建筑学报,2010(增刊 1):36.

[11] 张凌云,黄亮. 节能建筑的寿命周期成本评价实证分析[J]. 建筑经济,2006(8):81-83.

Study on the Influencing Factors and Energy-Saving Potential of
Energy Consumption of Public Building in Xiamen City

QIN Xuan, LIU Qian-kun

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: The study of influencing factors of energy consumption of public buildings is an important prerequisite and basis for energy saving, which is a great significance to realize the goal of energy saving and emission reduction in china. 14 objective factors and 15 energy-saving technologies were identified from four types of influence factors, namely architectural form, building enclosure, energy-using equipment and energy management, 130 public buildings energy consumption data wereinferentially analyzed by the SPSS (statistical product and service solutions) software. Analysis through one-way ANOVA on 14 objective factors discovers that there are 10 significant influencing factors, in which 7 factors belong to design stage and 3 factors belong to operation stage. Through independent two-sample T-test on 15 energy-saving technologies, it is found there are 11 factors with obvious energy-saving effects, in which 9 technologies belong to the energy-using equipment and 2 technologies belong to building enclosure, the energy-using equipment has more obvious energy-saving potential than the building enclosure.

Keywords: building energy consumption; public building; energy-saving technology;Xiamen City

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)