

空调办公建筑能耗预测回归模型

杨 柳¹, 侯立强¹, 李红莲^{1,2}, 许馨尹², 刘加平¹

(1. 西安建筑科技大学建筑学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学信息与控制工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 建筑能耗预测模型是进行建筑节能设计及节能改造的有力工具, 而建筑能耗分析是建立建筑能耗预测模型的基础. 本文建立了重庆地区的空调办公建筑模型, 采用EnergyPlus软件模拟分析了该城市建筑各设计参数对暖通空调系统及建筑年总能耗的影响, 选取对建筑能耗影响较大的9项设计参数, 建立了重庆地区暖通空调系统及建筑年总能耗的预测回归模型, 随机选取20组数据来评价预测回归模型的准确性. 结果表明: 各设计参数中窗墙比、设备功率密度、照明功率密度等对暖通空调系统及建筑年总能耗影响较大, 重庆建筑暖通空调系统及年总能耗预测回归模型 R^2 分别为0.960和0.966, 估计标准偏差都为1.122 W/m²; 能耗预测值与模拟值的最大偏差分别为-12.813%和-7.063%.

关键词: 建筑能耗; 办公建筑; EnergyPlus模拟; 敏感性分析; 预测回归模型

中图分类号: TU111.3

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2015)05-0707-05

Regression models for energy consumption prediction in air-conditioned office building

YANG Liu¹, HOU Liqiang¹, LI Honglian^{1,2}, XU Xinyin², LIU Jiaping¹

(1. School of Architecture, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. School of Information and Control Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: Building energy consumption prediction model is a powerful tool for energy-saving design and reformation, and building energy analysis is the basis for the establishment of building energy consumption prediction model. In this paper, air-conditioned office building models was established in Chongqing. Impact of the city building design parameters on HVAC and building energy consumption was analyzed using the simulation tool EnergyPlus. And it established Chongqing building HVAC and annual energy use predicted regression model using 9 design parameters which have a great impact on building energy consumption, then evaluated the predictive accuracy of the regression model with 20 sets of data which were selected randomly. The results showed that: Window to wall ratio, device power density, lighting power density and so on of all design parameters have greater impact on building energy consumption; R^2 of Chongqing building HVAC and annual energy predicted regression model were 0.960 and 0.966, estimated standard deviation both were 1.122 W/m²; the maximum deviation building annual energy consumption predicted values and simulated values were -12.813% and -7.063%.

Keywords: building energy consumption; office buildings; EnergyPlus simulation; sensitivity analysis; predictive regression model

自从改革开放以来, 中国的能源消耗呈现稳步增长, 其中2001年建筑能耗占全国总能耗的27.5%, 预计2020年, 建筑能耗将达到35%^[1-2]. 建筑能耗中公共建筑能耗是重要组成部分, 平均单位面积能耗从2001年的17.9 kgce/m²增加到2011年的21.4 kgce/m², 在所有建筑中增长最为迅速^[3]. 其中大型公共建筑的能耗较大, 单位建筑面积折合电耗指标为70~300 kWh/(m²·a), 是居住建筑的10~20倍^[4-5]. 因此, 针对公共建筑的节能设计及能耗研究十分紧迫. 建筑节能设计及节能改造较为复杂, 而建筑能耗预测为其提供了便捷的途径. 建筑能耗的预测按其原理可分为: 工程方法、统计方法、神经网络和支持向量机. 工程方法是根据物理原理计算建筑能耗, 它又分为详细的综合方法和简化方法, 综合方法由于其高复杂性实际中很难进行. 统计模型相对容易研发, 但缺乏一定的灵活性. 神经网络和支持

向量机善于解决非线性问题, 但其准确性依赖于模型的选择和参数的设定, 缺点是需要足够多的历史性数据及极度复杂性^[6]. 本文采用较为简单的统计方法建立重庆办公建筑的能耗预测回归模型. 建筑能耗预测回归模型的建立首先需要了解影响建筑能耗的主要设计参数, 即建筑能耗分析. 国外学者 Joseph C. Lam等采用敏感性分析对影响建筑能耗的材料性质、围护结构设计、暖通空调系统的选择及运行控制进行了研究^[7-10], 国内学者王丽娟、詹翔、王永龙、梁珍等也采用此方法研究了建筑各设计参数对建筑能耗的影响^[11-14]. 敏感性分析是用来评估建筑的热响应及其热特性和负荷特性的常用方法^[15-18], 其目的是研究由于设计参数的改变系统响应的变化规律. 本文对重庆地区的空调办公建筑进行了建筑能耗的敏感性分析, 采用了多元线性回归建立了建筑能耗的预测回归模型.

收稿日期: 2015-05-08

修改稿日期: 2015-10-07

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划课题项目(2014BAJ01B01); 国家自然科学基金项目(51308435); 国家杰出青年科学基金项目(51325803)

作者简介: 杨柳(1970-), 女, 博士, 教授, 建筑气候与建筑节能. E-mail: yangliu@xauat.edu.cn

1 研究内容

选取重庆作为代表城市，其属于夏热冬冷地区，既有夏季制冷的需要同时又有冬季采暖的需求。采暖、制冷能耗是建筑能耗的重要组成部分且较易受建筑设计参数的影响。本文分析了建筑设计参数对暖通空调系统及总能耗的影响，并建立了两者的预测回归模型，具体内容如下：

(1) 选取重庆地区的典型空调办公建筑；采用EnergyPlus及其自带典型年气象数据模拟办公建筑暖通空调系统能耗及总能耗，确保符合真实情况，并作为基准。

(2) 改变设计参数进行能耗模拟，对由此引起的暖通空调系统能耗及建筑总能耗变化进行敏感性分析，确定设计参数对各部分的影响因子及影响建筑能耗的主要设计参数。

(3) 利用多元线性回归技术，建立重庆空调办公建筑能耗的预测回归模型。

(4) 评估该城市空调办公建筑能耗预测回归模

型的准确性。

2 办公建筑模型及逐时气象数据

采用EnergyPlus软件进行建筑能耗模拟^[19]，所用的逐时气象数据库为EnergyPlus自带的典型年气象数据库(CSWD)。选取重庆典型空调办公建筑作为基准建筑，基准建筑为一栋20层的办公建筑，北轴夹角为0°。标准层为37.8 m×31.5 m平面，层高3.8 m，总建筑面积为23 814 m²，其中空调区域面积为21 609 m²，分布在建筑周围的四个区。为了建筑能耗分析研究，办公建筑的内部负荷、室内设计工况及暖通空调系统设置符合相应的建筑设计、节能设计标准^[20]。表1为基准建筑基本概况。表2为基准建筑基本参数设置。

表1 基准建筑基本概况

Tab.1 The basic overview of basic building

城市	气候	体形系数	渗透率/ach	传热系数/W·(m ² ·K) ⁻¹		
				外墙	屋顶	窗户
重庆	夏热冬冷	0.15	0.5	1.0	0.7	3.0

表2 基准建筑基本参数设置

Tab.2 The basic parameter settings of basic building

室内设计工况		室内负荷密度			暖通空调		
夏季/℃	冬季/℃	人员密度/m ² ·人 ⁻¹	照明密度/W·m ⁻²	设备密度/W·m ⁻²	空气处理机组	制冷	采暖
26	20	8	11	13	变风量再热	离心式COP=4.7	燃气锅炉BE=0.89

3 基准模型模拟结果

基准模型模拟时间为全年1月1日至12月31日。重庆空调办公建筑全年建筑能耗组成如图1所示。

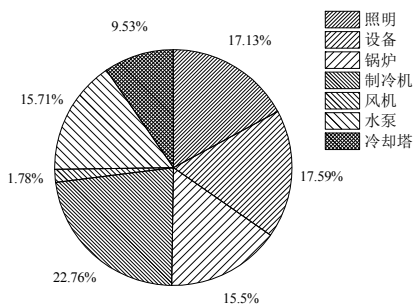


图1 重庆办公建筑全年建筑能耗组成

Fig.1 Annual building energy composition of office building in Chongqing

重庆地区空调办公建筑全年耗电量强度为645.64 MJ/m²，天然气耗量强度为118.44 MJ/m²，全年能耗组成比例分别为：照明17.13%，设备17.59%，锅炉15.5%，制冷机22.76%，风机1.78%，水泵15.71%，冷却塔9.53%。而暖通空调能耗大约占建筑总能耗的三分之二，由以上分析可知，基准建筑能耗与实际建筑能耗情况基本符合。

4 建筑能耗模拟及参数敏感性分析

进行建筑能耗模拟及分析前，需要了解建筑能耗的影响因素。依据EnergyPlus输入的建筑描述信息，将其大致分为三类：建筑负荷、暖通空调系统、暖通空调设备^[14]。三个主要部分又细分为以下几个部分：

- (1) 建筑负荷：建筑形体、围护结构、室内工况及负荷、室内热物质；
- (2) 暖通空调系统：空气处理机组、系统的运行方案、系统的控制、风机；
- (3) 暖通空调设备：冷水机组、冷冻水环路、水泵等。

研究了建筑的13项设计参数对于办公建筑的暖通空调及建筑总能耗的影响，13项设计参数分别是：外墙、屋顶传热系数，窗墙比，照明、设备功率密度，人员密度，渗透率，采暖、制冷室内设定温度，风机、水泵效率，制冷机COP，锅炉BE。确定了研究的设计参数，还需要确定每项参数的变化范围及步长。表3为办公建筑设计参数的参照值，变化范围及步长。

表3 办公建筑设计参数的参照值,变动范围及步长

Tab.3 Reference values, scope changes and step-length of office building design parameters

参数	单位	参照值	变化范围	步长
<u>建筑负荷</u>				
外墙传热系数		1.0	0.7~1.3	0.1
屋顶传热系数	$W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$	0.7	0.4~1.0	0.1
窗墙比	—	0.4	0.25~0.55	0.05
设备功率密度	$W \cdot m^{-2}$	13	9~17	2
照明功率密度	$W \cdot m^{-2}$	11	7~15	2
人员密度	$m^2 \cdot 人^{-1}$	8	6~16	2
渗透率	ach	0.5	0.3~0.8	0.1
<u>暖通空调系统</u>				
制冷室内设定温度	$^{\circ}C$	26	24~28	1
采暖室内设定温度	$^{\circ}C$	20	18~22	1
风机效率	%	55	25~85	10
<u>暖通空调设备</u>				
水泵效率	%	90	70~85	5
制冷机COP	—	4.7	4.1~5.3	0.2
锅炉BE	%	89	74~99	5

重庆地区办公建筑共进行了66次模拟,模拟的结果供进行敏感性分析.本文用影响因子来进行衡量各个因素对采暖、制冷及建筑能耗的影响程度大小,其定义式为:

$$IC = \frac{OP - OP_{bc}}{OP_{bc}} \bigg/ \frac{IP - IP_{bc}}{IP_{bc}} \quad (1)$$

式中: IC 为影响因子; OP 为建筑的模拟输出参数结果,即采暖、制冷及建筑能耗; OP_{bc} 为基准建筑的模拟输出参数结果; IP 为建筑的模拟输入参数值; IP_{bc} 为基准建筑的模拟输入参数值.

表4显示了空调办公建筑13项参数在其变化范围内对暖通空调系统及总建筑能耗的平均影响因子.

不同的设计参数对空调办公建筑的暖通空调系统及年总能耗的影响因子不同.影响因子绝对值的大小反映了该项设计参数对相应输出结果的影响程度,值越大,对其影响越大.影响因子为正,表示随着设计参数值的增大相应的输出值将增大,反之则减小.例如,设备功率密度对重庆空调办公建筑暖通空调系统及年总能耗的影响因子分别是0.068、0.044,表示设备功率密度增大时,其暖通空调系统能耗、年总能耗将增大,且设备功率密度对建筑年总能耗影响较大.

由重庆地区建筑能耗的敏感性分析知,建筑负荷设计参数中的窗墙比、设备功率密度、照明功率密度和渗透率,暖通空调系统设计参数中的制冷室内设定温度、采暖室内设定温度,暖通空调设备设计参数中的水泵效率、制冷机COP、锅炉BE对建筑暖通空调系统及年总能耗影响较大.

表4 重庆空调办公建筑13项参数在其变化范围内对暖通空调系统及总建筑能耗的平均影响因子

Tab.4 The average impact factor of HVAC and total building energy consumption of Chongqing air-conditioned office building with 13 parameters within its range

参数	单位	重庆	
		暖通空调	总能耗
建筑负荷			
外墙传热系数	$W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$	0.068	0.044
屋顶传热系数	$W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$	0.038	0.025
窗墙比	—	0.323	0.211
设备功率密度	$W \cdot m^{-2}$	0.053	0.210
照明功率密度	$W \cdot m^{-2}$	0.039	0.184
人员密度	$m^2 \cdot 人^{-1}$	-0.009	-0.006
渗透率	ach	0.170	0.071
暖通空调系统			
制冷室内设定温度	℃	-3.318	-2.166
采暖室内设定温度	℃	1.782	1.163
风机效率	%	-0.048	-0.031
暖通空调设备			
水泵效率	%	-0.366	-0.493
制冷机COP	—	-0.424	-0.277
锅炉BE	%	-0.247	-0.193

5 多元回归分析

影响建筑能耗的设计参数较多,该文选取对建筑暖通空调系统及年总能耗影响均较大的窗墙比、设备功率密度、照明功率密度、渗透率、制冷室内设定温度、采暖室内设定温度、水泵效率、制冷机COP、锅炉BE共9项参数作为研究对象.每项设计参数进行3次不同输入,则可产生 $19\ 683(3^9)$ 个模拟结果.影响建筑能耗的主要设计参数及不同输入值如表5所示.

表5 影响建筑能耗的主要设计参数及不同输入值

Tab.5 The main design parameters that affect building energy consumption and different input values

参数	单位	不同输入值		
		1	2	3
<u>建筑负荷</u>				
窗墙比	—	0.25	0.4	0.55
设备功率密度	W·m ⁻²	9	13	17
照明功率密度	W·m ⁻²	7	11	15
渗透率	ach	0.3	0.5	0.8
<u>暖通空调系统</u>				
制冷室内设定温度	℃	24	26	28
采暖室内设定温度	℃	18	20	22
<u>暖通空调设备</u>				
水泵效率	%	70	90	85
制冷机COP	—	4.1	4.7	5.3
锅炉BE	%	74	89	99

随机选取300组进行了建筑能耗模拟。基于以上300次模拟的数据和结果,采用多元线性回归技术^[21-23]建立了重庆地区办公建筑暖通空调系统及建筑年总能耗的预测模型,其综合表达式分别如式(2)~(3)所示。重庆空调办公建筑暖通空调系统及建筑年总能耗预测模型的多元回归系数及估计标准偏差如表6所示。

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \beta_6 X_6 + \beta_7 X_7 + \beta_8 X_8 + \beta_9 X_9$$

(2)

$$Y' = \beta'_0 + \beta'_1 X_1 + \beta'_2 X_2 + \beta'_3 X_3 + \beta'_4 X_4 + \beta'_5 X_5 + \beta'_6 X_6 + \beta'_7 X_7 + \beta'_8 X_8 + \beta'_9 X_9$$

(3)

表6 建筑能耗预测模型的多元回归系数及估计标准偏差

Tab. 6 Multiple regression coefficients and the estimated standard deviation of building energy prediction models

重庆	回归系数										R^2	估计标准差/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7	β_8	β_9		
暖通空调系统能耗	42.711	11.108	0.037	0.113	5.857	-2.036	1.670	-4.290	-1.380	-5.292	0.960	1.122
总能耗	43.012	11.108	0.365	0.463	5.857	-2.036	1.670	-4.290	-1.380	-5.292	0.966	1.122

6 随机输入和模型评价

为了评估建筑能耗预测回归模型的准确性,针对影响建筑能耗的主要因素进行了建筑能耗模拟。对重庆办公建筑随机选取了20组进行了能耗模拟,并与建筑能耗预测回归模型的预测值进行了比较。重庆办公建筑基于20组随机输入回归模型预测与模拟建筑能耗比较如图2所示。

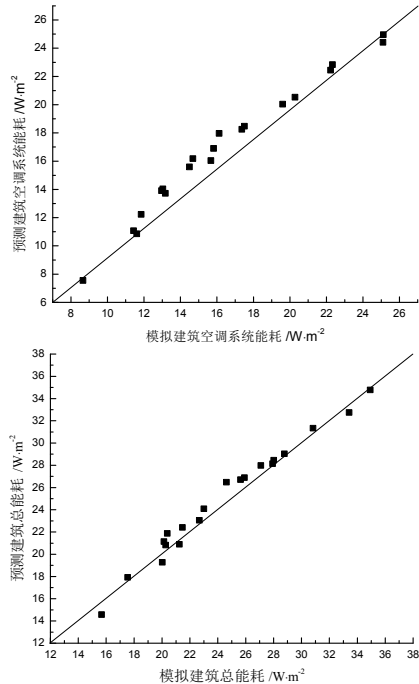


图2 重庆办公建筑基于20组随机输入回归模型预测与模拟建筑能耗比较

Fig.2 The contrast of Chongqing building annual energy consumption between regression model predicted values with simulated values based on 20 sets of random input

式中: Y 为建筑暖通空调系统能耗, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$; Y' 为建筑年总能耗, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$; X_1 为窗墙面积比; X_2 为设备功率密度, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$; X_3 为照明功率密度, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$; X_4 为渗透率, ach; X_5 为制冷室内设定温度, $^{\circ}\text{C}$; X_6 为采暖室内设定温度, $^{\circ}\text{C}$; X_7 为水泵效率; X_8 为制冷机COP; X_9 为锅炉BE; $\beta_1\sim\beta_9$ 为回归系数。

重庆办公建筑暖通空调系统及年总能耗预测模型的 R^2 分别为0.960和0.966,表示该城市办公建筑暖通空调系统能耗的96%和建筑年总能耗的96.6%可由预测模型解释,两者的估计标准偏差均为 $1.122\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,表明重庆办公建筑暖通空调系统能耗及年总能耗预测回归模型较为准确。回归系数为负值表示该项设计参数与建筑年能耗呈负相关。

重庆地区办公建筑回归模型预测的暖通空调能耗、建筑总能耗与模拟建筑能耗相比存在偏大和偏小,但总体两者较一致,模拟值均匀分布在预测回归线性模型的附近。暖通空调系统能耗预测值与模拟值的最大偏差为-12.813%,建筑年能耗预测值与模拟值的最大偏差为-7.063%。建筑年总能耗的预测回归模型优于暖通空调系统能耗的预测回归模型。建筑能耗预测回归模型能够较好地预测由于窗墙比、设备功率密度、照明功率密度等9项主要设计参数的改变而产生的建筑能耗,从而为建筑节能设计及节能改造提供了便捷的工具。

7 结论

对重庆地区办公建筑能耗进行了敏感性分析,并建立、评价了该城市空调办公建筑暖通空调系统能耗及年总能耗预测回归模型,经过分析表明:

(1) 不同设计参数对建筑的暖通空调系统能耗及总能耗影响不同,其中对两者影响较大的设计参数主要为窗墙比、设备功率密度、照明功率密度、渗透率、制冷室内设定温度、采暖室内设定温度、水泵效率、制冷机COP、锅炉BE。

(2) 重庆空调办公建筑暖通空调系统能耗及年总能耗预测模型的 R^2 分别为0.960和0.966,估计标准偏差均为 $1.122\text{ W}/\text{m}^2$,建筑能耗预测回归模型较为准确。

(3) 建筑能耗预测回归模型能够较准确地预测由于9项设计参数改变而产生的建筑能耗,空调系统能耗与年总能耗预测值与模拟值的最大偏差分别为-12.813%和-7.063%。

参考文献 References

- [1] 郎四维. 我国建筑节能设计标准的现状与进展[J]. 制冷空调与电力机械, 2002, 23(87): 1-6.
LANG Siwei. Current Situation and Progress of Energy Efficiency Design Standards in Buildings in China[J]. Refrigeration Air Conditioning & Electric Power Machinery, 2002, 23(87): 1-6.
- [2] YAO R, LI B, STEEMERS K. Energy policy and standard for built environment in China[J]. Renew Energy, 2005, 30: 1973-88.
- [3] 住房和城乡建设部标准定额研究所. 公共建筑能耗标准研究[R]. 2014.
Ministry of Housing and Urban Research Institute standard quota. Research on energy consumption standards for public buildings[R]. 2014.
- [4] 江亿. 我国建筑耗能状况及有效的节能途径[J]. 暖通空调, 2005, 35(5): 30-40.
JIANG Yi. Current building energy consumption in China and effective energy efficiency measures[J]. HVAC, 2005, 35(5): 30-40.
- [5] 江亿. 我国建筑能耗趋势与节能重点[J]. 绿色建筑, 2006, 7: 10-15.
JIANG Yi. China's building energy consumption trends and energy-focused[J]. Green Building, 2006, 7: 10-15.
- [6] 袁景玉, 吴克, 关高庆. 建筑能耗预测方法综述[J]. 科技视野, 2014(31): 291.
YUAN Jingyu, WU Ke, GUAN Gaoqing. Methods of building energy consumption prediction[J]. Science & Technology Vision, 2014(31): 291.
- [7] LAM J C, HUI S C. M. Sensitivity analysis of energy performance of office buildings[J]. Build Environ, 1996, 31: 27-39.
- [8] LAM J C. Energy analysis of commercial buildings in subtropical climates[J]. Build Environ 2000, 35: 19-26.
- [9] LAM J C, WAN K K. W, YANG L. Sensitivity analysis and energy conservation measures implications[J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49: 3170-7.
- [10] LAM J C, WAN K K. W, LIU D L, TSANG C L. Multiple regression models for energy use in air-conditioned office buildings in different climates[J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51: 2692-7.
- [11] 王丽娟. 寒冷地区办公建筑节能设计参数研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.
WANG Lijuan. The energy-saving design parameters about office building in cold region[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology master's degree thesis, 2007.
- [12] 詹翔, 李文龙, 胡铁军. 重庆地区建筑围护结构形式对能耗的影响[J]. 建筑技术, 2012, 43(6): 554-556.
ZHAN Xiang, LI Wenlong, HU Tiejun. Influence of building enclosure structure on building energy consumption in Chongqing[J]. Building Technology, 2012, 43(6): 554-556.
- [13] 王永龙, 潘毅群. 典型办公建筑能耗模型中输入参数单因子敏感性的分析研究[J]. 建筑节能, 2014, 42(276): 9-14.
WANG Yonglong, PAN Yiqun. Single-factor sensitivity analysis of input parameters in an energy model of proto-typical office building[J]. Building Energy Efficiency, 2014, 42(276): 9-14.
- [14] 梁珍, 赵加宁, 路军. 公共建筑能耗主要影响因素的分析[J]. 低温建筑技术, 2001(3): 52-54.
LIANG Zhen, ZHAO Jianing, LU Jun. Analysis of the main factors of energy consumption public building[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2001(3): 52-54.
- [15] ATHIENTIS A K. A computer method for systematic sensitivity analysis of building thermal networks[J]. Build Environ, 1989, 24: 163-8.
- [16] BUCHBERG H. Sensitivity of the thermal response of buildings to perturbations in the climate[J]. Build Sci, 1969, 4: 43-61.
- [17] BUCHBERG H. Sensitivity of room thermal response to inside radiation exchange and surface conductance[J]. Build Sci, 1971, 6: 133-49.
- [18] LOMAS KJ, EPPEL H. Sensitivity analysis techniques for building thermal simulation programs[J]. Energ Build, 1992, 19: 21-44.
- [19] EnergyPlus supplement, version 8. 1[CP]. Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, 2013.
- [20] 中华人民共和国建设部. GB50189-2005 公共建筑节能设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
People's Republic of China Ministry of Construction. GB50189-2005 Design standard for energy efficiency of public buildings[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2005.
- [21] 于义良, 罗蕴玲, 安建业. 概率统计与SPSS应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2009.
YU Yiliang, LUO Yunling, AN Jianye. Probability and Statistics with SPSS application[M]. Xi'an, Xi'an Jiaotong University Press, 2009.
- [22] 袁志发, 宋世德. 多元统计分析[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2009.
YUAN Zhifa, SONG Shide. Multivariate Statistical Analysis[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2009.
- [23] 党耀国, 米传民, 钱吴永. 应用多元统计分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
DANG Yaoguo, MI Chuanmin, QIAN Wuyong. Application of Multivariate Statistical Analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012.

(编辑 桂智刚)