

# 既有民用建筑节能改造节能量计算与核定方法优化研究

刘晓君<sup>1</sup>, 王博俊<sup>1,2</sup>

(1. 西安建筑科技大学管理学院, 陕西 西安 710055; 2. 江苏科技大学张家港校区, 江苏 苏州 215600)

**摘要:** 针对当前既有民用建筑节能改造节能量计算与核定方法尚不完善的现状, 通过剖析影响能耗的因素和节能量计算的基本原理, 发现利用能耗账单和天气参数等独立变量的函数关系构建回归模型即可方便地计算节能量。经实证研究得知, 民用建筑能耗受室外干球温度、日照时间等独立变量影响大, 受入住率等独立变量影响较小, 由此提出了“追踪变量”的概念, 用以探索能耗变动的原因及路径, 对于制定节能改造方案及推广分户计量等都具有现实的指导意义; 节能计量的周期越长节能量累计误差越小, 很适于合同能源管理这种按年计量的节能改造模式。

**关键词:** 既有民用建筑; 节能改造; 节能量; 独立变量; 回归模型

**中图分类号:** TU111.195; TU119

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2016)06-0776-07

## Optimization research on calculation and verification method of energy conservation amount in energy conservation reconstruction of existing civil buildings

LIU Xiaojun<sup>1</sup>, WANG Bojun<sup>1,2</sup>

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

2. College of Zhangjiagang, Jiangsu University of Science and Technology, Suzhou 215600, China)

**Abstract:** In view of calculation and verification method of energy conservation amount is not thorough in energy conservation reconstruction of existing civil buildings, by analyzing the factors affecting the energy consumption and the basic principles of energy conservation calculation, it is found that the regression model can be used to calculate easily the energy conservation amount by using the functional relationship of main independent variables such as energy bills and weather parameters. Empirical research show: the energy consumption of civil building is influenced by independent variables such as the outdoor wet-dry bulb temperature and sunshine time, but independent variables such as the occupancy rate is less affected; this paper puts forward the concept of "tracing variable", to explore the reasons and ways of energy consumption change, and it has practical guiding significance for making energy conservation transformation scheme and generalizing household metering and so on, the longer the cycle of energy conservation measurement, the smaller the cumulative error of energy conservation amount, it is very suitable for energy conservation transformation model of annual measurement such as energy performance contracting.

**Key words:** existing civil building; energy conservation reconstruction; energy conservation amount; independent variables; regression model

节能量的计算,就是要剖析综合效益内在影响因素及其反馈关系的互动规律,达到改进节能技术、提高 ESCO 收益、提高公众参与积极性和降低能源消耗等目的,揭示综合效益的基本特征<sup>[1]</sup>。准确计算与核定节能量是既有建筑节能改造的重点和难点,包含有预测、计算、验证等环节。节能量的合理预测是改造前对方案进行可行性研究的经济分析基础,节能量的科学计算与验证是改造后对改造效果进行评价的主要依据。特别是对于合同能源管理模式,节能量不仅用来检验合同执行情况,也是 ESCO(Energy Services Company)公司与用能单位进行收益分配的主体。由于计算与核定过程复杂、专业性强,许多 ESCO 公司并不能完全掌握,而是常常依靠经验估算节能量并据此签订节能改

造合同,往往导致最终核定的实际节能量与合同目标偏差太大,容易引起纠纷,这也是导致合同能源管理模式在我国较难推广的主要原因之一。

目前,国际通用的节能量检测与验证标准有美国的《国际节能效果测量与认证规程》IPMVP-2002<sup>[2]</sup>、Measurement & Verification for Federal Energy Projects<sup>[3]</sup>和 ASHRAE Guideline14-2002<sup>[4]</sup>,尽管这些标准或规程对如何确定基准能耗做了比较科学的阐述,但其依赖于大量的能耗和相关变量历史数据,且操作过程复杂,难以掌握<sup>[5]</sup>,并且很多指标依赖于主观评价,准确性较差<sup>[6]</sup>。近年来,我国也开始尝试制定和编写节能量检测与验证的标准或指南,例如《节能量测量和验证技术通则》、《合同能源管理技术通则》等,由于这些标准

和规范缺乏操作细节和实际使用案例,实用性也不强<sup>[4]</sup>。因此,对现有节能量计算与核定方法进行改进研究,成为推进既有民用建筑节能改造工作面对的重要现实命题。文章在研究现有节能量计算方法及其基本原理基础上,利用能耗账单和天气参数等主要独立变量的函数关系构建回归模型对现有节能量计算方法进行优化改进,并结合案例分析证明了该方法的科学性、实用性和可行性。

## 1 节能量的内涵和计算方法

节能量的计算过程中涉及到诸多参数、变量以及影响因素,准确理解相关概念及其关系,确定各影响因素对能耗影响大小和影响机理,对于选择改造方案,确定适用的节能量计算方法至关重要。

### 1.1 节能量的内涵

#### (1) 相关术语及其关系

本文涉及的术语主要有改造范围、计算变量、相似日、改造前能耗  $E_b$ 、改造后能耗  $E_r$ 、基准能耗  $E_a$ 、节能量  $E_s$  等。改造范围是指进行节能改造所界定范围内的改造项目,可以是整个建筑物,也可以是被隔离开单独进行改造的设备或系统。计算变量是指用于计算建筑能耗的相关变量,包括独立变量和非独立变量。独立变量是指影响建筑能耗但独立于改造系统之外,与节能改造范围内系统无关的变量,典型的独立变量有天气参数、入住率、建筑用能设备运行时间等,在能耗模型中作为自变量;非独立变量是指直接涉及改造范围内建筑物或用能设备能耗的变量,比如围护结构的热工性能、设备的功率,制冷性能等功能参数;非独立变量在单项简单的节能改造方案中可以直接用来计算节能量,在综合性改造项目中也可以作为能耗模型中的自变量。相似日是指改造前后独立变量相似的日子,分别用于测量改造前后用能量的两个或多个测试日。

改造前能耗是指节能改造前独立变量条件下,改造前改造范围内的能耗;改造后能耗是指改造后独立变量条件下,改造后改造范围内的能耗;基准能耗是在改造后独立变量条件下,改造前改造范围内的能耗。由于改造前后天气、环境、运行方式等条件变化,被改造范围的系统或设备分别处在不同的独立变量条件下运行,设立基准能耗就是为了与节能改造后能耗进行对比而建立的一个独立变量相同的平台,避免了用改造前能耗与改造后能耗直接相减来计算节能量,使节能量的核定更客观准

确。几种能耗的形成过程及其与独立变量的关系,分别见图1和图2所示。

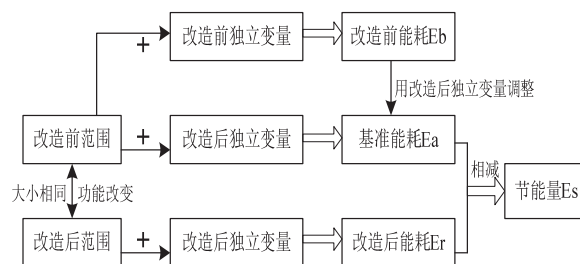


图1 几种能耗的形成及其相关关系  
Fig.1 The formation of several energy consumption and its correlation

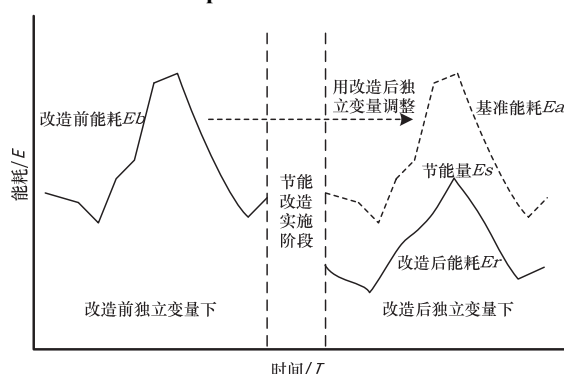


图2 几种能耗与独立变量的关系  
Fig.2 Relationship between energy consumption and independent variables

#### (2) 影响因素及其属性

在影响建筑能耗的诸多因素中(表1),一部分是自然因素,如气候变化、太阳辐射、围护结构的热传导、墙体的蓄热等;另一部分是人为因素,如运行管理模式的变化等<sup>[7]</sup>。

### 1.2 计算方法梳理

国内外有不少建筑能耗计算方法,梳理如下:

(1) 从计算结果的精度方面,可分为简化计算法和详细计算法。

简化计算法主要有度日法、温频法(BIN)等,这类方法虽在理论和操作上做了大量简化,但计算精度差。详细计算法主要有数理模型法和校验模拟验证法,数理模型法是利用能耗数据与相关变量之间关系建立回归模型来计算和预测节能量;校验模拟验证法是利用动态能耗模拟软件逐时进行模拟,如DOE-2、EnergyPlus等,但这类软件一般较为复杂,没有经过系统培训和使用经验的设计和运行管理人员很难掌握,且模拟参数需要根据实际情况设定,而实际情况随机性较强,从而导致结果的真实性受限<sup>[13]</sup>。

(2) 从节能改造的复杂程度方面划分,依照IPMVP的框架和ASHRAE Guideline14可以归纳

出表 2 中 A、B、C、D 四种节能量测量与验证方法.

表 1 建筑能耗影响因素分类  
Tab.1 Classification of building energy consumption influencing factors

影响因素	参数特征	影响程度	可改造程度
室外天气参数	干湿球温度、日照时间及强度、风力风向等	关键因素 <sup>[8]</sup> 、强相关 <sup>[9]</sup>	不可改造
建筑围护结构	导热系数、蓄热能力、遮阳、密封状况等	约 10%~30% <sup>[10]</sup>	可改造
用能设备、或系统	照明、新风系统、冷水机组、HVAC 等	照明 25%~35% <sup>[11]</sup> HVAC50%~60% <sup>[12]</sup>	照明和 HVAC 为主要改造目标
功能使用情况	空调面积、使用时间、室内温湿度等	相关	不可改造
运行条件变化	设备增减、使用功能改变	较强	较难改造
管理模式及水平	管理人员业务素养、使用者节能习惯、节能监控系统使用情况等	相关	弹性较大,改造潜力大

表 2 A、B、C、D 四种节能量测量与验证方法  
Tab.2 Four methods of measurement and verification of energy saving

方法分类	适用范围	典型应用	节能量算法	使用说明
方法 A:部分变量测量,改造部分隔离	单项节能措施,计算变量一部分测量,另一部分可以约定	照明项目升级、定荷电机更换	通过改造前后设备性能及运行时间变化直接对比得到	将改造的节能设备与其他用能部分隔离开,单独计算节能量
方法 B:全部变量测量,改造部分隔离	单项节能措施,计算变量必须全部测量确定,不可约定	空调、水泵、电梯等用能设备的变频改造	能耗数据完整,可用对比分析计算,数据不完整用相似日法计算	相似日法适用于被改造范围能复原到改造前状态
方法 C:整体能耗验证 采用对比整幢建筑改造前后的能耗,结合计算来确定节能效果	同时进行多项节能改造,各节能措施之间相互影响,不能隔离开单独计算	外围护改造、多种用能设备同时进行改造	一般采用数理模型方法计算基准能耗	改造前后能耗数据较完整、独立变量容易获取
方法 D:校验模拟验证 建立能耗模型利用计算机进行模拟计算并用实际能耗数据验证	同时进行多项改造措施,因相关能耗和独立变量数据不完整或无法获得	外围护改造、多种用能设备同时进行改造.	计算机模拟并利用实际能耗进行验证	基准模型和改造后模型所采用的人员密度、运行时间、天气参数、建筑模型等计算变量必须相同.

1.3 回归模型法及其应用

将已知的能耗账单或表记数据作为因变量,计算变量(包括独立变量和非独立变量)作为自变量,用回归分析的方法,建立起因变量关于自变量的具体依赖关系,用以预测符合函数关系的未知变量,这就是回归模型法.典型的回归模型是利用改造前的能耗账单和改造前相关计算变量建立能耗函数,代入改造后的计算变量,得到基准能耗.

基准能耗是一个关于计算变量的动态函数值,快速准确选择计算变量是回归模型法的关键.在计算变量中由于功能参数这些非独立变量数目繁多且关系复杂、相互影响,导致测定难度大,而独立变量与改造内容无关,其数据较容易获得,因此,如何只利用独立变量和能耗账单之间的依赖关系建立回归模型来计算节能量成为本文研究的主要目标.为此,仅考虑使用独立变量作为自变量,并将其再细分为常规独立变量和专属独立变量,以方

便进行组合使用.室外干湿球温度等天气参数属于常规独立变量,而日照时间、入住率等会因不同的建筑物形态及使用功能而有所差别,称之为专属独立变量.对两种独立变量进行动态组合,可以快速准确的选定模型中的主要独立变量,实现对回归模型法的优化.进行组合时常规独立变量为必选项,专属独立变量要根据不同改造对象的功能特征由实际经验和现场观测来确定,属于待选项.

在确定了各项独立变量后,再将其各自的平方、两两相乘形成一组自变量,通过对这些自变量进行多元线性回归及偏F检验后选择对能耗影响大的主要变量,剔除影响力小的次要变量,最终获得回归方程.在回归方程里独立变量会出现两种情况,一种在方程里出现,表示该独立变量对能耗变化敏感,本文将其定义为显性追踪变量;另一种按照常理对能耗变化影响较大的独立变量,应该出现在方程里却没有出现,也就是对能耗变化反而不敏

感,在此将其定义为隐性追踪变量。所谓的“追踪变量”是指根据该变量对能耗变化的影响力以及在回归方程里出现的情况,来追踪能耗变化的原因或流失路径,进而指导节能改造方案的制定等,实现对回归模型功能的改进。追踪变量的相关特性及含义见案例分析。

由于数据采样误差、模型误差、偶然误差等因素,会导致回归模型具有不确定性,即对测量或计算值不能肯定的程度,该不确定性判断标准如下:

当为单个独立变量时,应满足  $R^2 \geq 0.8$ ; 当为多个独立变量时,必须同时满足  $R^2 \geq 0.8$ ,  $Sig < 0.05$ , 且用于计算  $R^2$  的各独立变量必须通过  $F$  检验,要求  $F \geq 30$ ; 当改造前样本数据  $24M \leq N \leq 60$  月时,  $CV(RMSE) < 0.25$ , 当  $N \geq 60$  月时,  $CV(RMSE) < 0.3$ 。

### 1.3.1 回归模型的表达方法

#### (1) 函数式表达法

$$E_b = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (1)$$

式中:  $E_b$  为改造前能耗,  $x_i (i=1, 2, \dots, n)$  为改造前独立变量。

$$E_a = f(y_1, y_2, y_3, \dots, y_n) + A_m \quad (2)$$

式中:  $E_a$  为基准能耗,  $y_i (i=1, 2, \dots, n)$  为改造后独立变量,  $A_m$  为基准能耗调整值。对于  $A_m$  仅当原本设计的功能参数发生影响基准能耗数值的重大偶然性变化时,可以通过设定合理的  $A_m$  值进行调整,设定的功能参数与式中的独立变量参数相互独立,一般情况下  $A_m$  值为 0。

#### (2) 多变量线性方程式表达法

$$ME_b = C + B_1 V_{1b} + B_2 V_{2b} + B_3 V_{3b} + \dots + B_n V_{nb} \quad (3)$$

式中:  $ME_b$  为利用改造前能耗数据和独立变量所建立起来的回归模型估算的能耗值,  $C$  为常数项,  $V_{nb}$  为改造前独立变量,  $B_n$  为独立变量系数。

$$ME_a = C + B_1 V_{1a} + B_2 V_{2a} + B_3 V_{3a} + \dots + B_n V_{na} + A_m \quad (4)$$

$ME_a$  是将改造后的独立变量代入回归模型并考虑基准能耗调整值(如果需要调整)所得到的基准能耗,  $V_{na}$  改造后的独立变量, 其他符号含义同上。

$$\text{节能量 } E_s = E_a - E_r \quad (5)$$

### 1.3.2 利用回归模型计算能耗的步骤和规定

#### (1) 收集数据

① 选择比较容易获得的历史数据,比如用电、用气缴费账单。为了使回归模型具有可靠性,至少要收集改造前连续 24 个月的整幢建筑的逐月能耗数据,该数据作为回归方程的因变量。

② 收集并选择独立变量。至少要收集改造前

连续 24 个月与能耗数据同期对应的独立变量,作为回归方程的自变量。选择与能耗相关度高又容易获得数据的独立变量是建立回归模型的关键,这样才能使回归分析具有可行性,比如室外天气参数,其他独立变量,比如宾馆入住率都可以从平时记录中归集,不易收集的独立变量,比如室内温度等可以回避。

③ 至少要收集节能改造后连续 9 个月以上的能耗数据用于计算节能量。

(2) 建立回归模型。建立的改造前能耗数据与独立变量数据之间联系的回归方程,并进行相关数理统计检验。

(3) 验证回归模型。将改造前独立变量作为自变量代入回归模型,反求出回归模型的能耗值后与改造前能耗实际值对比,进行误差检验;按前述不确定性的判断标准规定的指标进行数理统计检验,检验合格后计算基准能耗。

(4) 计算基准能耗。将改造后各独立变量作为自变量代入回归模型,计算基准能耗。

(5) 计算节能量,按式(5)计算。

## 2 实证分析

### 2.1 工程背景

苏州某宾馆建于 1999 年,地下 3 层地上 26 层共 29 层,建筑面积 42 060  $\text{m}^2$ ,共有客房 312 套,空调面积占 72.6%,建筑内部用能系统采用电力和天然气。2014 年进行节能改造,合同约定工期为 6 个月,从 2014 年 4 月 10 日到 10 月 10 日,2014 年 12 月正式营业。根据业主要求及对整幢建筑用能情况的现场分析,准备采取如下改造措施:

(1) 由于用电量为该宾馆的主要能耗,因此主要改造用电设备,对冷冻机房系统进行设备升级,同时增加冷水机组的水泵变频系统,对中央空调机组加装运行优化控制系统,对空调箱风机进行变频改造。

(2) 照明系统全部更换为 LED 灯具,并采用智能照明技术。

(3) 对客房窗户玻璃贴膜。

因改造系统之间能耗相互影响,无法隔离,且改造前后能耗数据完整,独立变量记录容易获取,所以采用回归分析方法。根据宾馆的运营特点以及改造经验,经 ESCO 公司与业主协商后进行变量组合,确定采用的独立变量组合为:常规独立变量为室外月平均干球温度  $DT$ 、室外月平均湿球温度

WT; 专属独立变量为月累计日照时数 ST、月累计无日照时数 NS、月平均入住率 OR。

2.2 数据收集

改造涉及到的范围内能耗都与用电有关, 因此, 收集的能耗数据界定为往年的用电账单。考虑时间上的就近原则, 选取改造前从 2010 年 1 月到 2013 年 12 月连续 48 个月的用电账单, 选取改造后 2015 年 1 月到 2015 年 12 月连续 12 个月的用电账单, 用电量可直接从账单中提取, 无需调整。

还需收集及现场调查的其他与能耗相关的独立变量或运行数据包括:

- (1) 苏州市 2010 年 1 月到 2013 年 12 月及 2015 年室外干湿球温度、日照时数。
- (2) 改造前后空调面积及运行模式、运行时间。
- (3) 改造前后照明灯具装备数量、使用情况。

- (4) 改造前后入住率等。

以上数据中天气参数来自苏州市气象局历史气象资料, 其他数据由业主提供以及现场调查测定获得。

2.3 计算与验证

(1) 建立回归模型

以改造前 48 个月用电量为因变量, 室外月平均干球温度 DT、室外月平均湿球温度 WT、月累计日照时数 ST、月累计无日照时数 NS、月平均入住率 OR 这五项作为独立变量。将该五项独立变量及其各自的平方、两两相乘共 20 个组合参数为自变量, 通过对这些自变量进行偏 F 检验后选择对能耗影响大的主要变量, 剔除影响力小的次要变量, 然后进行多元二次多项线性回归, 得到表 3 所示的回归结果。

表 3 回归模型计算表  
Tab.3 Regression model calculation table

因变量	自变量	回归模型	$R^2$	CV(RMSE)	F 值	Sig
月能耗 ME	月累计日照时数 ST	$ME=2 \times 10^8 - 1.39 \times 10^6 \times DT + 1212 \times WT + 2420 \times DT^2 + 2.32 \times ST \times NS$	0.95	0.054	193	0.00
	月累计无日照时数 NS					
	月平均干球温度 DT					
	月平均湿球温度 WT					
	月平均入住率 OR					
	$ST^2, NS^2, DT^2, WT^2, OR^2$					
	$ST \times OR, NS \times DT, NS \times WT,$					
	$ST \times NS, ST \times DT, ST \times WT,$					
	$NS \times OR, DT \times WT, DT \times OR,$					
	$WT \times OR$					

(2) 分析与验证

通过回归分析, 计算出  $R^2=0.95 \geq 0.8$ ,  $CV(RMSE)=0.054 \leq 0.1$ , F 检验,  $F=193 \geq 30$ ,  $Sig=0.00 \leq 0.05$ , 上述各指标均满足不确定性判断标准规定的限值要求, 从统计学的角度可以确定该回归模型是有效的。另外, 从相对误差角度, 将回归模型预测的月能耗与改造前月实际能耗进行对比, 再将二者的年累计能耗进行对比, 分别得出月相对误差和年累计相对误差分析如下:

月相对误差, 最大误差=(回归预测值-实际值)/实际值=13.21%, 最小误差 0.15%, 误差在±5%以内的有 30 个月, 占 62.5%, 误差在±10%以内的共有 45 个月, 占 93.75%, 误差超过±10%的有 3 个月, 占 6.25%。2010 年 1 月到 2013 年 12 月期间各年的年累计相对误差分别为 -1.17%, -0.08%, 1.30%, -0.02%; 四年的总累计误差为 0.03%。月误差情况分布以及年累计误差分布情况见图 3、图 4。

由上述分析可知, 回归模型法完全可以准确的预测该宾馆的耗电量, 而且时间越长累计误差越小, 尤其对于合同能源管理这种节能改造模式, 节

能量大多是按年计量的, 采用回归分析的准确度完全能够满足节能核定要求。

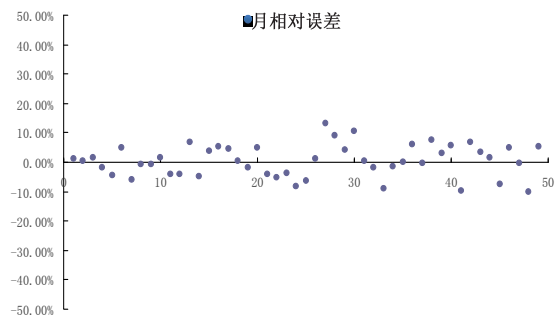


图 3 月能耗误差情况分布

Fig.3 Monthly energy consumption error distribution

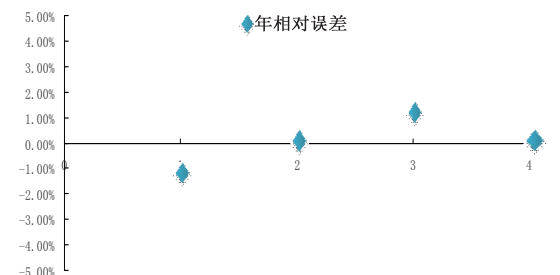


图 4 年累计能耗误差分布

Fig.4 Cumulative annual energy consumption error distribution



该回归方程中, 保留了独立变量室外温度  $DT$ 、 $WT$  以及日照时间  $ST \times NS$ , 而入住率  $OR$  没有出现. 根据本文定义, 室外温度、日照时间属于显性追踪变量, 入住率按常理对能耗有影响, 应该在方程里出现却没有出现, 属于隐性追踪变量. 据此, 可进行能耗追踪如下: 能耗和室外温度相关是由于室内外温差引起空调开启强度的变化所致, 与日照时间有关是因为该宾馆墙体没有外保温和遮阳措施, 日光照射后墙体蓄热、传热以及阳光透过窗户辐射使室内热量增加; 与入住率关系不大, 是因为

室内温度平衡效应引起的房间之间“串热(冷)”, 促使室内各房间温度趋于相同导致的.

(3) 节能量计算

将改造后独立变量代入“回归模型”得到 2015 年各月的基准能耗值(计算数据见表 4), 合计为 11 928 540 kwh, 2015 年 12 个月的改造后实际用电量账单合计为 7 520 779 kwh, 改造过程中没有发生影响基准能耗数值的功能参数重大偶然性变化, 所以不考虑调整值, 则节能量为  $11\,928\,540\text{ kwh} - 7\,520\,779\text{ kwh} = 4\,407\,761\text{ kwh}$ , 节能率为 36.95%.

表 4 节能量计算表  
Tab.4 Energy saving calculation table

时间	耗电量 /kwh	月累计日 照时数/h	月累计无 日照时数/h	月平均干 球温度/k	月平均湿 球温度/k	月平均 入率/%	将改造后独立变量 代入回归方程得到 基准能耗值/kwh	节能量 /kwh
2015-01	750 427	178	566	278	274	75.4	922 894	22 467
2015-02	693 682	134	538	282	277	56.9	780 046	16 364
2015-03	617 458	146	598	284	281	79.7	750 284	32 826
2015-04	448 821	145	575	293	289	82.4	834 073	35 252
2015-05	444 540	153	591	295	292	75.8	917 303	172 763
2015-06	564 739	164	556	298	295	76.6	1 053 126	88 387
2015-07	788 632	209	535	302	298	69.8	1 340 740	352 108
2015-08	814 904	256	488	304	299	65.3	1 518 827	603 923
2015-09	668 695	184	536	298	295	78.6	1 075 104	206 409
2015-10	496 648	209	535	294	290	84.8	889 057	192 409
2015-11	514 675	165	555	284	281	82.6	743 639	28 964
2015-12	717 558	132	612	275	273	67.5	1 103 447	115 889
合计	7 520 779						11 928 540	4 407 761

3 结论

文章基本完成了三个主要任务: 一是仔细分析影响建筑能耗的主要因素, 探究节能量计算与核定的基本原理; 二是根据能耗账单和独立变量之间的内在联系优化了回归模型, 找到简单实用又能满足准确度要求的节能量计算方法; 三是通过实证分析, 验证了该方法的科学性, 也为设计节能改造方案提供了有益的参考.

(1) 民用建筑能耗是建筑物及用能设备本身的功能参数这些非独立变量以及天气参数等独立变量共同作用的结果. 研究发现, 只需利用独立变量和能耗账单之间的依赖关系建立的回归方程即可方便的计算节能量, 此方法比传统的度日法、BIN 法准确, 比能耗模拟法简单, 易操作. 因此, 正确选择独立变量是建立回归模型的关键, 这需要经验的积累和检验方法熟练; 另外还需要 ESCO 公司与用能单位加强现场考察以及沟通协商, 确定双方都认可的独立变量, 以避免合同纠纷的产生.

(2) 建筑能耗总账单和独立变量历史数据容易获得也为该方法的推广提供了可行性, 尤其适用于

我国这种缺乏分户计量历史数据的情况. 另外, 能耗账单和独立变量历史数据周期越长, 回归模型计算出的能耗与实际能耗之间的误差就越小, 这也符合合同能源管理这种以年为计量周期的节能改造模式, 在实践上为既有民用建筑节能改造以及合同能源管理在我国的推广提供了有用的工具.

(3) 从案例研究结果发现该改造项目建筑能耗与室外温度、日照时间这几个独立变量强相关, 根据热追踪分析, 就需要考虑加强外围护保温隔热以及遮阳措施; 受入住率等影响并不明显, 也启发我们在推行分户热计量时需要采取措施避免采暖住户的热量传递给不采暖或温度较低的住户而引起的“串热”现象, 该现象这也是推广和普及分户计量的主要障碍之一.

(4) 若将改造前后的建筑外围护功能参数、用能设备功能参数等非独立变量与独立变量一起作为自变量建立回归模型, 则可以代替能耗模拟软件来预测改造后的节能量, 不仅能为选择改造方案提供重要的经济评价指标, 也可为 ESCO 公司与业主签订节能改造合同时确定节能率提供科学的依据, 这是本课题下一步的研究方向.

## 参考文献 References

- [1] 崔斯文, 郭汉丁, 刘继仁, 等. 基于增值寿命的节能改造项目综合效益影响因素动态反馈分析[J]. 科技进步与对策, 2014, 31(11): 147-151.  
CUI Siwen, GUO Handing, LIU Jiren, et al. Dynamic feedback analysis on the influencing factors of comprehensive benefit of energy saving reconstruction project based on value added life[J]. Scientific & technological progress and Policy, 2014, 31(11): 147-151.
  - [2] International Performance Measurement and Verification Protocol Committee. International performance measurement and verification protocol (IPMVP)[R]. San Francisco: Journal of the Surveying and Mapping Division, 2001.
  - [3] U.S. Department of Energy Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. M&V Guidelines: Measurement and verification for federal energy projects[R]. Washington: Office of Scientific and Technical Information Technical Reports, 2000.
  - [4] ASHRAE Standards Committee. ASHRAE Guideline: 14-2002[S]. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineer, 2002.
  - [5] 潘毅群. ESCO 与建筑节能改造—节能量核验方法与案例研究[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.  
PAN Yiqun. ESCO and building energy-saving reconstruction: verification method of energy conservation amount and case study[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.
  - [6] XIA Xiaohua, ZHANG Jiangfang. Mathematical description for the measurement and verification of energy efficiency improvement[J]. Applied Energy, 2013, 111(11): 247-256.
  - [7] 廖袖锋, 原艺昕, 董孟能, 等. 公共建筑节能改造节能量核定思路[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(S1): 212-214.  
LIAO Xiufeng, YUAN Yuanxi, DONG Mengneng, et al. Study on calculation method of energy savings for public buildings[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013, 35(S1): 212-214.
  - [8] 刘大龙, 刘加平, 杨柳, 等. 气候变化下建筑能耗模拟气象数据研究[J]. 土工建筑与环境工程, 2012, 34(2): 110-114.  
LIU Dalong, LIU Jiaping, YANG Liu, et al. Analysis on simulation meteorological data under climate change[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2012, 34(2): 110-114.
  - [9] 王志刚, 鄢涛. 居住建筑能耗与各建筑因素关系分析[C]//深圳: 第二届国际智能、绿色建筑与建筑节能大会论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006: 535-539.  
WANG Zhigang, YAN Tao. Relationship analysis between energy consumption of residential building and building factors[C]//Shenzhen: Proceedings of the second International Conference on intelligent, green building and building energy conservation. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006.
  - [10] ZHOU S, ZHAO J. Optimum combinations of building envelop energy-saving technologies for office buildings in different climatic regions of China[J]. Energy and Buildings, 2013, 57: 103-109.
  - [11] NAPOLEON E, KUNIO M. The role of the thermally activated desiccant cooling technologies and environment[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15: 2095-2122.
  - [12] GEUN Y Y, HYOIN K, JEONG T K. Effects of occupancy and lighting use patterns on lighting energy consumption[J]. Energy and Buildings, 2012, 46: 152-158.
  - [13] 朱能, 王朝霞, 赵靖. 公共建筑节能改造节能量修正计算方法[J]. 土工建筑与环境工程, 2014, 36(5): 81-88.  
ZHU Neng, WANG Zhaoxia, ZHAO Jing. Study on modified calculation method of energy savings for public buildings[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2014, 36(5): 81-88.
- (编辑 吴海西)
- 
- (上接第 775 页)
- REN Jilin, WANG Dongsheng, SONG Kai, et al. Influence of stress state on magnetic memory signal[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2007, 28(3): 724-728.
  - [7] LENG Jiancheng, LIU Yang, ZHOU Guoqiang, et al. Metal magnetic memory signal response to plastic deformation of low carbon steel[J]. Ndt & E International, 2013, 55(3): 42-46.
  - [8] XU Mingxiu, XU Minqiang, LI Jianwei et al. Metal magnetic memory field characterization at early fatigue damage based on modified Jiles-Atherton model[J]. Journal of Central South University, 2012, 19(6): 1488-1496.
  - [9] 杨理践, 刘斌, 高松巍, 等. 金属磁记忆效应的第一性原理计算与实验研究[J]. 物理学报, 2013, 62(8): 086201-086207.  
YANG Lijian, LIU Bin, GAO Songwei, et al. First-principles calculation and experimental study of metal magnetic memory effects[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(8): 086201-086207.
  - [10] 姚凯, 王正道, 邓博, 等. 金属磁记忆技术的数值研究[J]. 工程力学, 2011(9): 218-222.  
YAO Kai, WANG Zhengdao, DENG Bo, et al. Numerical study on metal magnetic memory technique[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(9): 218-222.
  - [11] 王社良, 王威, 苏三庆, 等. 铁磁材料相对磁导率变化与应力关系的磁力学模型[J]. 西安科技大学学报, 2005, 25(3): 288-291.  
WANG Sheliang, WANG Wei, SU Sanqing, et al. Magneto-mechanical model on differential permeability and stress of ferromagnetic material[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2005, 25(3): 288-291.
  - [12] 阎照文. ANSYS10.0 工程电磁分析技术与实例详解[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.  
YAN Zhaowen. ANSYS10.0 Engineering electromagnetic analysis technique and detailed examples[M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Publishing House, 2006.
  - [13] 胡仁喜. ANSYS13.0 多物理耦合场有限元分析从入门到精通[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.  
HU Renxi. ANSYS 13.0 multi-physics coupling finite element analysis (From entry to the master)[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2012.
  - [14] 任吉林, 林俊明, 池永滨, 等. 金属磁记忆检测技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.  
REN Jilin, LIN Junming, CHI Yongbin, et al. Metal magnetic memory testing technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000.
- (编辑 吴海西)

