

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.05.014

## 公共建筑节能改造节能量修正计算方法

朱能, 王朝霞, 赵靖

(天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072)

**摘要:**针对当前公共建筑节能改造节能量确定方法尚不完善的现状,提出了一种新的节能量修正计算方法,即以改造前建筑为基准的节能量修正模型,包括4个修正系数和3个计算式,4个修正系数分别为气象修正系数、室内热环境修正系数、内部负荷修正系数和运行时间修正系数,3个计算式为采暖节能量计算、空调节能量计算和总节能量计算。以天津市某大型办公建筑节能改造项目为例,采用节能量修正模型,得到修正节能量,此节能量保证了比较条件的一致性。通过比较修正节能量与改造前后能耗直接相减的节能量,修正节能量计算方法引起10.23%的节能量差别,从而证明了修正的必要性。通过与模拟软件计算结果的对比,差别为3.03%,在10%的可接受范围内,验证了该节能量修正计算方法的准确性。

**关键词:**公共建筑;节能改造;节能量;修正模型

中图分类号:TU111.19 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2014)05-0081-08

## An Energy Conservation Correction Method for Energy Efficiency Retrofit of Public Buildings

Zhu Neng, Wang Zhaoxia, Zhao Jing

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

**Abstract:** There exists imperfections of the methods for energy conservation verification of the energy efficiency retrofit projects. A new energy conservation verification method was developed by creating energy conversion correction model and four correction coefficients and three calculation formulas were involved. The four correction coefficients were outdoor weather correction coefficient, indoor environmental correction coefficient, internal load correction coefficient and performance period correction coefficient. The three calculation formulas were heating energy conversion calculation, air-conditioning energy conversion calculation and total energy conversion calculation. The energy conversion correction model was adopted to analysis the energy conservation of an office building located in Tianjin to demonstrate the reliability of the correction model and the feasibility of the verification method, and the corrected energy conversion based on consistent conditions before and after retrofit was obtained. 10.23% difference between the corrected energy conversion and the direct energy conversion exists indicating that the correction energy conversion is necessary. The energy conservation difference of 3.03% the calculation result of energy simulation software verified the accuracy of the new verification method.

**Key words:** public buildings; energy efficiency retrofit; energy conversion; correction model

收稿日期:2014-01-05

基金项目:国家自然科学基金(51338006)

作者简介:朱能(1960-),男,教授,博士生导师,主要从事建筑节能研究,(E-mail)nzhu@tju.edu.cn。

近年来,节能改造作为降低建筑能耗的有效手段被广泛实施<sup>[1]</sup>,改造完成后,需对改造项目进行节能量的核定。国际通用的节能量检测与验证标准有《国际性能节能效果的测量与验证协议》(IPMVP)<sup>[2]</sup>、Measurement & Verification for Federal Energy Projects (M&V)<sup>[3]</sup>和ASHRAE Guideline14-2002<sup>[4]</sup>。这些方法依赖于主观评价,被认为不准确<sup>[5]</sup>。在中国,节能量为改造前后能耗直接相减<sup>[6]</sup>。事实上,改造前后建筑所处条件不同,缺乏可比性。目前常见处理方法有两种:一是增加调整项<sup>[7]</sup>,调整量通过建立回归模型得出<sup>[8]</sup>,而回归模型的准确性取决于数据的完善程度;另一种方法是动态能耗模拟软件<sup>[9]</sup>,通过设置使改造前后建筑处于相同的内外条件<sup>[10]</sup>。但模型建筑需要根据实际情况设定,许多参数(如人员密度、设备工作时间等)的获得需要经过长时间的大量调研,且实际情况的随机性很强<sup>[11]</sup>,软件模拟值的真实性受限。改造建筑很多时,模拟工作量大时间长,因此模拟软件更适合单栋建筑节能改造的设计,不适合大规模改造建筑节能量确定。综上,需要提出更准确、更实用的节能量计算方法。

笔者通过总结建筑能耗的影响因素,提出了一种节能量修正计算方法,使改造前后的建筑处于相同条件下,并以天津市某大型办公建筑为例,论证了该方法的可行性和科学性。

## 1 节能量修正计算方法

### 1.1 能耗修正系数

随着建筑能耗的增加,国内外学者对建筑能耗影响因素进行了不懈研究。这些影响因素可以归纳为表1所示的5个方面,这5个方面的可改造程度及可改造项对建筑能耗的影响程度见表1。

从表1可以看出,节能改造项目主要针对围护结构、采暖空调系统及运行管理进行改造。改造完成后要进行节能量的核定,当前通用的节能量计算方法为改造前后能耗相减。实际节能效果除了与改造前后的实际能耗数据直接相关以外,还与外部气象条件、室内热环境、室内人员及设备使用情况、运行管理状况等因素密切相关,由于改造前后情况的不同,使得改造前后的能耗没有处于相同的比较条件下。

表1 建筑能耗影响因素分类

影响因素	描述参数	影响程度	改造程度
室外气象参数	温湿度、太阳辐射强度等		不可改造
建筑围护结构	窗墙面积比、传热系数、遮阳性能等	约10%~30% <sup>[12-13]</sup>	窗墙比较少改造;窗墙传热系数和遮阳性能较多改造
建筑设备系统	HVAC、热水、照明等系统	HVAC系统: 50%~60% <sup>[14]</sup> , 照明: 25%~35% <sup>[15]</sup>	主要改造 HVAC系统
运行调节及管理	业主的节能意识、管理人员专业水平、自动控制系统		较多改造
内部因素	使用面积、人数、使用时间、室内环境等		不可改造

采用修正系数的方法,以改造前某年的实际情况为基准,对改造后的能耗进行修正,具体包括以下4个修正系数:气象修正系数、室内热环境修正系数、内部负荷修正系数和运行时间修正系数。

在4个修正系数中,气象修正系数是外界环境决定的,室内热环境修正系数是由改造后建筑的热物理性质和系统运行状况等决定的,这些属于物理因素。内部负荷修正系数和运行时间修正系数由使用者的需求决定,属于人为因素。对于物理因素,不是人力能够改变的,因此必须进行修正。对于人为因素,虽然是由使用者决定的,但建筑是为人服务的,建筑能耗的产生也是由于使用者需求,因此,当实际使用情况改变时,也必须进行修正。

1.1.1 气象修正 建筑能耗可以分为两个部分:一部分是室内照明、办公设备等的使用,这部分能耗由室内人员需求决定;另一部分是用于去除室内外温湿度不同引起的热湿传递,这部分能耗与室外气象条件相关。由于改造前后所处的年份不同,气象条件不同,因此需要对其进行修正。

国际通用的采暖空调能耗估算方法包括度日数法、温频法等<sup>[16]</sup>,这些方法都基于一种假设,即采暖空调系统能耗与室外温度成线性关系。笔者采用中国节能设计标准中定义的采暖度日数(HDD)<sup>[17]</sup>和空调度日数(CDD)<sup>[18]</sup>对气象条件进行修正。定义气象修正系数 $\eta_w$ :

采暖度日数以18℃为界限,对于采暖能耗

$$\eta_{w,h} = \frac{HDD18_a}{HDD18_b} \quad (1)$$

式中:  $HDD18_a$  为当地改造后某年的采暖度日数,  $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ ;  $HDD18_b$  为当地改造前某年的采暖度日数,  $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 。

空调度日数以  $26^{\circ}\text{C}$  为界限, 对于空调能耗

$$\eta_{w,c} = \frac{CDD26_a}{CDD26_b} \quad (2)$$

式中:  $CDD26_a$  为当地改造后某年的空调度日数,  $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ ;  $CDD26_b$  为当地改造前某年的空调度日数,  $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 。

由于度日数法计算空调能耗误差较大, 在有逐时气象数据的情况下, 优先采用度小时数(CDH)来对空调能耗进行修正, 即

$$\eta_{w,c} = \frac{CDH26_a}{CDH26_b} \quad (2^*)$$

式中:  $CDH26_a$  为当地改造后某年的空调度小时数,  $^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$ ;  $CDH26_b$  为当地改造前某年的空调度小时数,  $^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$ 。

1.1.2 室内热环境修正 节能改造前后, 由于围护结构、系统等发生变化, 一定伴随着室内热环境的变化, 因而需要消除由于室内热环境不同对能耗的影响。室内热环境的描述参数有空气温度、湿度、平均辐射强度和空气流速<sup>[19]</sup>, 其中与能耗直接相关的是空气干球温度。定义室内热环境修正系数  $\eta_e$

对于采暖能耗

$$\eta_{e,h} = \frac{t_{ia} - t_o}{t_{ib} - t_o} \quad (3)$$

式中:  $t_{ia}$  为改造后的室内平均温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{ib}$  为改造前的室内平均温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_o$  为当地采暖室外计算温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

对于空调能耗

$$\eta_{e,c} = \frac{t_o - t_{ia}}{t_o - t_{ib}} \quad (4)$$

式中:  $t_{ia}$  为改造后的室内平均温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{ib}$  为改造前的室内平均温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_o$  为当地空调室外计算逐时温度的最高值,  $^{\circ}\text{C}$ 。

1.1.3 内部负荷修正 由于室内人员、设备等的变化, 会引起采暖空调能耗的变化。室内照明、设备等的使用情况基本由室内人员的工作需求和使用习惯决定。在暖通空调设计时采用面积指标, 因而以采暖空调面积为基础修正。由于实际供热空调面积可能产生变化, 因此内部负荷修正系数包括三方面: 一是采暖空调面积修正, 二是平均单位面积人数、照明和设备的散热量, 三是工作时间。人员散热量由劳动强度决定, 照明和设备的散热量与功率相等。

定义内部负荷修正系数

$$\eta_i = \frac{q_a \cdot A_a \cdot T_{la}}{q_b \cdot A_b \cdot T_{lb}} \quad (5)$$

式中:  $q_a$  为改造后某年的平均单位面积散热量,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $A_a$  为改造后某年采暖或空调面积,  $\text{m}^2$ ;  $T_{la}$  为改造后某年人员、照明、设备的总工作时间,  $\text{h}$ ;  $q_b$  为改造前某年的平均单位面积散热量,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $A_b$  为改造前的采暖或空调面积,  $\text{m}^2$ ;  $T_{lb}$  为改造前的人员、照明、设备的总工作时间,  $\text{h}$ 。

1.1.4 运行时间修正 由于改造前后, 不同年份的节假日及工作休息制度不同, 暖通空调系统的运行时间可能发生变化, 相应产生能耗变化。

若采暖采用市政管网集中供热, 则每年 24 h 运行, 且供暖季天数是一定的, 则采暖运行时间是不变的。若采暖和空调都采用中央空调, 则只在工作日的工作时间开机, 非工作日关机。由于每年的工休制度可能不同, 每天的工作时间也可能不同, 导致系统工作时间可能产生较大的变化。对于分体式空调, 使用灵活, 运行时间的变化更大。因此定义运行时间修正系数

$$\eta_p = \frac{T_a}{T_b} \quad (6)$$

式中:  $T_a$  为改造后某年采暖或空调运行时间,  $\text{h}$ ;  $T_b$  为改造前某年采暖或空调运行时间,  $\text{h}$ ;

## 1.2 节能量修正模型

由于改造前后气象条件、室内热环境、内部负荷情况和设备运行时间 4 个客观条件的不同, 使得直接以改造前后能耗相减的数据作为节能量是不科学的, 因而, 以改造前的基本情况为基准, 对改造后的能耗用上述 4 个修正系数进行修正, 即采暖能耗和空调能耗修正模型的通式为

$$\Delta EC = EC_b - EC_a \cdot \eta \quad (7)$$

式中:  $\Delta EC$  为修正节能量, 包括采暖修正节能量  $\Delta EC_h$  和空调修正节能量  $\Delta EC_c$ ,  $\text{kWh}$ ;  $EC_b$  为改造前的能耗, 包括改造前的采暖能耗  $EC_{b,h}$  和空调能耗  $EC_{b,c}$ ,  $\text{kWh}$ ;  $EC_a$  为改造后的能耗, 包括改造后的采暖能耗  $EC_{a,h}$  和空调能耗  $EC_{a,c}$ ,  $\text{kWh}$ ;  $\eta$  为能耗修正系数。

能耗修正系数  $\eta$  由气象修正系数、室内热环境修正系数、内部负荷修正系数和运行时间修正系数 4 个修正系数组合而成。由于以上 4 个修正系数都以能耗为基准, 且数量级相同, 因此对 4 个参数进行乘除的组合即可。在以上 4 个修正系数中, 室内人员、照明和设备的散热量在空调期需要从室内除去, 对于空调能耗不利, 但在采暖期, 这部分散热量可以

提高室内温度,是有利的。因而采暖能耗和空调能耗的修正模型不同,需将采暖能耗和空调能耗分别进行修正。

定义采暖能耗修正系数

$$\eta_h = \frac{\eta_{w,h} \cdot \eta_{e,h} \cdot \eta_{p,h}}{\eta_{i,h}} \quad (8)$$

式中:  $\eta_{w,h}$  为采暖气象修正系数;  $\eta_{e,h}$  为采暖室内热环境修正系数;  $\eta_{p,h}$  为采暖系统运行修正系数;  $\eta_{i,h}$  为采暖内部负荷修正系数。

空调能耗修正系数

$$\eta_c = \eta_{w,c} \cdot \eta_{e,c} \cdot \eta_{p,c} \cdot \eta_{i,c} \quad (9)$$

式中:  $\eta_{w,c}$  为空调气象修正系数;  $\eta_{e,c}$  为空调室内热环境修正系数;  $\eta_{p,c}$  为空调系统运行修正系数;  $\eta_{i,c}$  为空调内部负荷修正系数。

建立总的节能量计算方法,即节能量修正模型。

对于采暖能耗

$$\Delta EC_h = EC_{b,h} - EC_{a,h} \cdot \eta_h \quad (10)$$

式中:  $\Delta EC_h$  为采暖修正节能量, kWh;  $EC_{b,h}$  为改造前的采暖能耗, kWh;  $EC_{a,h}$  为改造后的采暖能耗, kWh。

对于空调能耗

$$\Delta EC_c = EC_{b,c} - EC_{a,c} \cdot \eta_c \quad (11)$$

式中:  $\Delta EC_c$  为空调修正节能量, kWh;  $EC_{b,c}$  为改造前的空调能耗, kWh;  $EC_{a,c}$  为改造后的空调能耗, kWh。

若不只是一套采暖空调系统,可以将各个系统分别进行修正计算,然后相加,即为修正后的采暖或空调能耗。采暖空调系统的总节能量

$$\Delta EC = \Delta EC_h + \Delta EC_c \quad (12)$$

## 2 实例研究

### 2.1 建筑概况

以天津市某大型办公建筑的节能改造项目为例来分析节能量修正计算方法。该建筑是纯商务办公写字楼,建于1997年,建筑面积约6.0万 $m^2$ ,建筑总高度约为115m,地下2层,地上29层。该建筑冬季热源由市政外网提供,经地下层及17层换热机组换成60~50 $^{\circ}C$ 热水供高低区空调系统冬季使用。空调系统为冷水机组采用美国原装DUNHAM-BUSH冷水机组,共3台,总额定制冷量为5300kW。水系统采用两管制,共设置7台冷冻水泵,总扬程为229.6 $mH_2O$ ,流量为2268 $m^3/h$ ,共设置5台冷却水泵,总扬程为160 $mH_2O$ ,流量为1620 $m^3/h$ 。高区系统经设备层3台换热器换热,3台55kW的变频水泵为换热器二次侧提供动力。

室内末端为风机盘管系统。

该建筑于2008年10月进行节能改造。根据2007年的能耗帐单,该建筑改造前单位面积耗电量为75.82 $kWh/(m^2 \cdot a)$ ,其中以暖通空调(HVAC)系统能耗占的比例最大,单位面积耗电量为49.68 $kWh/(m^2 \cdot a)$ ,占总耗电量的65.52%。因此将节能诊断重点放在采暖空调系统上。通过节能诊断,发现该建筑能耗偏高的主要问题出现在水泵方面,因而改造时更换全部水泵,并安装变频装置,机组台数调节和水泵变频调节相结合。

节能改造完成后第一年的暖通空调系统运行能耗为1151024.60kWh,直接计算节能量为1829507.40kWh,节能率为61.38%。2008—2009年采暖季的供热能耗采为340512.30kWh,直接计算的节能量为481567.64kWh,节能率为58.58%。2009年空调季的空调能耗为810512.30kWh,直接计算的节能量为1347939.96kWh,节能率为62.45%(表2)。

### 2.2 修正节能量计算

2.2.1 气象修正系数 根据2007—2009共3a的实测逐时室外干球温度,在2007年11月15日至2008年3月15日之间,室外日平均温度低于18 $^{\circ}C$ 的天数为119d,采暖度日数为2662.475 $^{\circ}C \cdot d$ 。同样的方法得到2008—2009年采暖季的采暖度日数为2712.925 $^{\circ}C \cdot d$ ,则采暖气象修正系数为

$$\eta_{w,h} = \frac{HDD18_a}{HDD18_b} = \frac{2712.925}{2662.475} = 1.02$$

根据2007—2009年共3a的实测逐时室外干球温度,以26 $^{\circ}C$ 为同样的方法可以得到2008年和2009年空调季的度小时数分别为3909.774 $^{\circ}C \cdot h$ 和4153.312 $^{\circ}C \cdot h$ ,则空调气象修正系数为

$$\eta_{w,c} = \frac{CDH26_a}{CDH26_b} = \frac{4153.312}{3909.774} = 1.06$$

2.2.2 室内热环境修正系数 改造前,采暖季室内平均温度为16.78 $^{\circ}C$ ,未达到舒适温度,改造后的室内温度约为21.91 $^{\circ}C$ ,比改造前提高了5.12 $^{\circ}C$ 。图1所示为采暖季某工作日某办公室改造前后室内温度对比,可以发现改造后比改造前室内温度提高了大约5 $^{\circ}C$ ,改造后的室内最低温度为19.79 $^{\circ}C$ ,而改造前室内最高温度为19.51 $^{\circ}C$ ,热舒适性有了明显提高,且全天温度波动变小。天津地区采暖室外设计温度为-7 $^{\circ}C$ [20],则采暖室内热环境修正系数为

$$\eta_{e,h} = \frac{t_{ia} - t_o}{t_{ib} - t_o} = \frac{21.91 - (-7)}{16.78 - (-7)} = 1.22$$

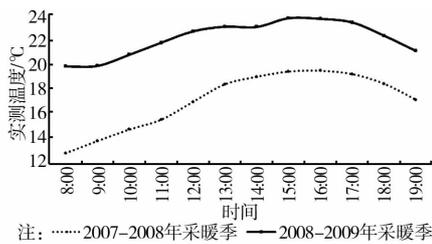


图1 采暖季某正常工作日改造前后室内温度对比

改造前,空调季的室内平均温度约为  $27.09\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,略高于舒适温度,改造后空调区平均温度降低到  $25.22\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,平均降低了  $1.87\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。图2所示为空调季正常工作日的某房间改造前后空调季室内温度对比,从图中可以看出,即使没有改变室内空调的末端和控制方式,改造后比改造前温度有了约  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  稳定的降低。天津地区空调室外计算温度最高值为  $33.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[20]</sup>,则空调室内热环境修正系数为

$$\eta_{e,c} = \frac{t_o - t_{ia}}{t_o - t_{ib}} = \frac{33.9 - 25.22}{33.9 - 27.09} = 1.27$$

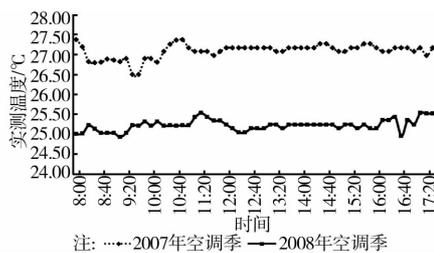


图2 空调季某正常工作日改造前后室内温度对比

2.2.3 内部负荷修正系数 由于使用者行为习惯、工作要求等原因,室内人数、劳动强度、对设备和灯具的使用情况会产生变化。但由于改造前后该建筑的使用者及工作性质没有发生变化,各房间使用性质也没有发生变化,而且2007—2009年共3a都处于正常工作状态,因此,从全年的角度来看,采暖空调面积不变,单位面积上的人数、照明和设备的散热量基本不变,工作时间也没有变化。因此,内部负荷修正系数  $\eta_{i,h} = \eta_{i,c} = \frac{q_a \cdot A_a \cdot T_{ia}}{q_b \cdot A_b \cdot T_{ib}} = 1.00$ 。

2.2.4 运行时间修正系数 该建筑采暖热源为市政热网,经板换换热后通过夏季的冷冻水系统向室内供热,在采暖季,室内只把风机盘管关闭,但冷冻水泵和高区循环泵24h连续运行,由于风机盘管能耗仅占总能耗的2%~3%,因此忽略这部分运行时间的变化,认为采暖季24h运行,即采暖运行时间修正系数  $\eta_{p,h} = 1.00$ 。

对于空调系统,2008年空调季和2009年空调

季运行时间如图3所示。在2007年6月至9月共运行1340h,2009年空调季共运行1121h,所以空调运行时间修正系数为

$$\eta_{p,c} = \frac{T_a}{T_b} = \frac{1121}{1340} = 0.84$$

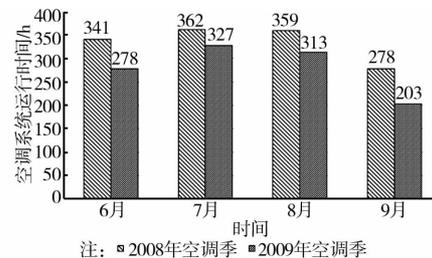


图3 改造前后空调系统运行时间

2.2.5 修正节能量 根据以上4个修正系数的计算,据式(7)可分别得到该办公建筑的采暖修正系数为

$$\eta_h = \frac{\eta_{w,h} \cdot \eta_{e,h} \cdot \eta_{p,h}}{\eta_{i,h}} = \frac{1.02 \times 1.22 \times 1.00}{1.00} =$$

1.24

据式(8)可得空调修正系数为

$$\eta_c = \eta_{w,c} \cdot \eta_{e,c} \cdot \eta_{p,c} \cdot \eta_{i,c} = 1.06 \times 1.27 \times 1.00 \times 0.84 = 1.13$$

该建筑改造前后的采暖能耗分别为822079.94和340512.30kWh,空调能耗分别为2158452.26和810512.30kWh。据式(9),可得修正采暖能耗为

$$\Delta EC_h = EC_{b,h} - EC_{a,h} \cdot \eta_h = 822079.94 - 1.24 \times 340512.30 = 399844.69 \text{ (kWh)}$$

据式(10),可得修正空调能耗为

$$\Delta EC_c = EC_{b,c} - EC_{a,c} \cdot \eta_c = 2158452.26 - 1.13 \times 810512.30 = 1242573.36 \text{ (kWh)}$$

据式(11),可得修正总节能量为

$$\Delta EC = \Delta EC_h + \Delta EC_c = 399844.69 + 1242573.36 = 1642418.05 \text{ (kWh)}$$

## 2.3 结果及讨论

2.3.1 修正节能量计算结果 根据1.2节所述修正节能量计算模型,得修正节能量如表2所示。总修正节能量为1642418.05kWh,节能率为55.10%,修正采暖空调节能量较直接计算采暖空调节能量小10.23%。其中,修正采暖节能率为48.64%,修正采暖节能量比直接计算采暖节能量小16.97%,修正空调节能率为57.57%,修正空调节能量较直接计算空调节能量小7.82%。

表 2 直接计算节能量与修正节能量对比

项 目	暖通空调系统 耗电量/kWh	采暖 耗电量/kWh	空调 耗电量/kWh	采暖单位面积 耗电量/(kWh·m <sup>-2</sup> )	空调单位面积 耗电量/(kWh·m <sup>-2</sup> )
改造前耗电量	2 980 532.20	822 079.94	2 158 452.26	15.28	21.62
改造后耗电量	1 151 024.60	340 512.30	810 512.30	5.68	13.51
直接计算节能量	1 829 507.40	481 567.64	1 347 939.96	9.61	8.11
直接计算节能率	61.38%	58.58%	62.45%		
修正节能量	1 642 418.05	399 844.69	1 242 573.36	6.66	20.71
修正节能率	55.10%	48.64%	57.57%		
差别	10.23%	16.97%	7.82%		

通过计算发现,由修正模型计算出的节能量比直接计算的节能量小,且总能耗差别在 10% 以上,是不容忽视的,说明节能量计算时,通过修正的方法来消除改造前后比较条件的不同是十分必要的。

2.3.2 方法验证 为说明节能量修正模型的准确性和可信度,需对其进行验证。中国现行的《节能量测量和验证技术通则》(GB/T 28750—2012)<sup>[21]</sup>中提出了 3 种节能量测量、计算和验证方法,分别为“基期能耗-影响因素”模型法、直接比较法和模拟软件法。笔者提出的节能量修正模型与“基期能耗-影响因素”模型法思想基本一致,且上文已经论证了直接比较法的不科学性,因此用软件模拟法分别对其进行验证。

由于案例建筑主要通过改换水泵并增加变频装置,因此选用 TRNSYS 进行模拟。TRNSYS 的全称为 Transient System Simulation Program,即瞬态系统模拟程序,该系统的最大的特色在于其模块化的分析方式,只要调用实现特定功能的模块,给定输入条件,这些模块程序就可以对某种特定热传输现

象进行模拟,最后汇总就可对整个系统进行瞬时模拟分析,特别适合用于系统的动态能耗模拟。首先根据建筑基本信息进行建模,室内环境参数为设计情况下的参数,外部气象条件通过实测室外温湿度,利用气象模块、太阳辐射模块、焓湿图模块和有效温度模块得到天空有效温度以及不同朝向和水平面上的太阳辐射强度,并将上述气象参数导入建筑模块,从而建立冷热负荷计算模型。由于改造后加装了变频装置,因此需要编写变频水泵模型,模型输入参数为管网特性曲线、厂家提供的水泵工频下的  $H-Q$  曲线、 $\eta-Q$  曲线和水泵实际运行频率,输出参数为水泵瞬时输入功率<sup>[22]</sup>。从而建立改造前后建筑采暖空调能耗计算模型。

为验证提出的节能量修正计算模型的可信度,分别对改造后的建筑模型在实际情况下和修正情况下进行模拟,模拟结果见表 3。假设系统最优化运行,输入 2008—2009 年采暖季和 2009 年空调季的气象参数、人员、照明、设备等的实际使用情况和系统运行时间,得到改造前后实际情况下的模拟能耗

表 3 节能量修正计算方法模拟验证

项 目	描述	暖通空调系统	采暖系统	空调系统
实测能耗/kWh	改造前	2 980 532.20	822 079.94	2 158 452.26
	改造后	1 151 024.60	340 512.30	810 512.30
	改造前,实际情况	3 095 637.60	790 923.56	2 304 714.04
模拟能耗/kWh	改造后,实际情况	1 079 244.48	315 675.23	763 569.25
	改造后,修正	1 501 534.69	375 628.31	1 125 906.38
	直接计算	1 829 507.60	481 567.64	1 347 939.96
节能量/kWh	模拟计算	1 594 102.91	415 295.25	1 178 807.66
	修正计算方法计算	1 642 418.05	399 844.69	1 242 573.36
	模拟计算与直接计算	12.87	13.76	12.55
差别/%	修正计算与直接计算	10.23	16.97	7.82
	模拟计算与修正计算	-3.03	3.72	-5.41

分别为 3 095 637.60 kWh (合 51.59 kWh/m<sup>2</sup>) 和 1 076 244.48 kWh (合 17.99 kWh/m<sup>2</sup>), 与实测能耗差异分别为 3.86% 和 6.24%, 差别在 10% 以内, 即可认为模型可靠<sup>[3]</sup>。将 2008—2009 年采暖季和 2009 年空调季的气象参数改为 2007—2008 年采暖季和 2008 年空调季的气象参数, 将改造后的运行时间改变为改造前的运行时间, 由于改造前后内部负荷基本没有变化, 从而得到修正气象条件、内部负荷和运行时间后的采暖空调系统能耗为 1 501 534.69 kWh (合 26.61 kWh/m<sup>2</sup>), 模拟修正节能量为 1 594 102.91 kWh (合 26.57 kWh/m<sup>2</sup>), 其中采暖和空调系统单位面积节能量分别为 6.92 kWh/m<sup>2</sup>, 19.65 kWh/m<sup>2</sup>, 见表 3。与提出的节能量计算方法计算得到的总节能量差别为 3.03%, 采暖和空调系统节能量差别分别为 3.72% 和 5.41%, 均在 10% 以内, 从而验证了提出的节能量修正计算方法是准确的。

从表 3 还可以看出, 采用模拟软件法得到的模拟计算修正节能量与直接计算节能量有 12.87% 的差别, 其中采暖系统为 13.76%, 空调系统为 12.55%, 再次说明, 改造前后内外部条件不同引起的节能量的差别是不可忽视的, 计算节能量时, 需将建筑放在相同的内外部条件下。

利用软件模拟的方法得到的节能量, 无法消除室内热环境变化引起的能耗差别。从上述计算过程可以看出, 两种方法的共同点在于, 若要结果真实可靠, 在计算前都需要进行调研和测试, 获得建筑基本信息、使用情况、能耗状况等数据, 不同之处在于, 提出的节能量修正计算模型是根据公式直接计算的, 而软件模拟法需要进行建模、模型有效性验证等复杂的过程。综上所述, 所提出的节能量修正计算模型不仅保证了准确性, 而且应用方便, 若要进行大量建筑的节能量修正计算, 可以提高效率, 节省大量人力物力。

值得注意的是, 节能量修正模型是以改造前的建筑为基准, 对改造后的能耗数据进行修正。事实上, 为了达到将改造前后的建筑放在相同的比较条件下的目的, 也可以以改造后的建筑为基准, 对改造前的建筑能耗进行修正。但是两种修正方法得到的修正节能量是不同的, 所以一定要统一规定基准建筑。对于没有改造前能耗数据的建筑, 《公共建筑节能设计标准》(GB 50189—2005) 中提供了基准建

筑, 即以 20 世纪 80 年代改革开放初期的公共建筑为比较基准<sup>[19]</sup>。因此, 笔者认为节能量的计算应该是向前比较, 即以改造前的建筑为基准, 对改造后的建筑能耗进行修正。

### 3 结 论

通过分析公共建筑节能改造项目及能耗影响因素, 提出了一种新的节能量修正计算方法, 即节能量修正模型, 包括 4 个修正系数和 3 个计算式, 4 个修正系数分别为气象修正系数、室内热环境修正系数、内部负荷修正系数和运行时间修正系数, 3 个计算式为采暖节能量计算、空调节能量计算和总节能量计算。以天津市某大型办公建筑为例, 通过节能量的计算说明了该修正模型的适用性, 并验证了方法的可靠性。根据以上分析, 得出如下结论:

1) 能耗修正系数是根据改造前后建筑所处的内外部条件的不同提出的, 通过修正可以消除比较前后所处条件不一致而带来的节能量的误差。由于采暖和空调系统不同的特点, 需要分别对采暖和空调系统能耗进行修正。同时, 在使用修正模型时, 一定要先确定基准能耗, 建议采用改造前能耗为基准。

2) 在案例建筑中, 修正采暖节能量比改造前后采暖能耗直接相减的节能量小 16.97%, 修正空调节能量比改造前后空调能耗直接相减的节能量小 7.82%, 修正总能耗比改造前后总能耗直接相减的节能量小 10.23%, 可见修正引起的节能量的差异显著的, 改造前后不同的内外部条件引起的节能量差异不可忽视。因此, 对节能量进行气象、室内热环境、内部负荷和运行时间的修正十分必要。

3) 通过与软件模拟法进行比较, 能量修正计算方法与软件动态模拟结果相差 3.03% (小于 10%), 说明提出的节能量修正计算方法是可信的, 将该方法用于计算大量建筑的节能量时, 可在保证准确性的同时提高效率。

#### 参考文献:

- [1] Zhao J, Zhu N, Wu Y. Technology line and case analysis of heat metering and energy efficiency retrofit of existing residential buildings in northern heating areas of China [J]. Energy Policy, 2009, 37: 2106-2112.
- [2] International Performance Measurement and Verification Protocol Committee. International performance measurement

- and verification protocol (IPMVP) [M]. 2002.
- [3] U. S. Department of Energy Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. DOE/GO-102000-0960 M & V Guidelines; Measurement and Verification for Federal Energy Projects [S]. 2. 2 ed. 2000.
- [4] ASHRAE Standards Committee. ASHRAE Guideline 14-2002 Measurement of Energy and Demand Savings [S]. 2002
- [5] Xia X H, Zhang J F. Mathematical description for the measurement and verification of energy efficiency improvement [J]. Applied Energy, 2013, 111: 247-256.
- [6] Ding Y, Tian Z, Zhu N. The retrofit of industrial air-conditioning system on energy efficiency and emission reduction [J]. Energy and Buildings, 2010, 42: 955-958.
- [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 X F, Yuan Y X, Dong M N, 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] Heo Y, Zavla V. Gaussian process modeling for measurement and verification of building energy savings [J]. Energy and Buildings, 2012, 53: 7-18.
- [9] Ke M, Yeha C, Jian J. Analysis of building energy consumption parameters and energy savings measurement and verification by applying eQUEST software [J]. Energy and Buildings, 2013, 61: 100-107.
- [10] 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]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(2): 110-114.
- Liu D L, Liu J P, Yang L, et al. Analysis on simulation meteorological data under climate change [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2012, 34(2): 110-114.
- [11] Virotea J, Rui N S. Stochastic models for building energy prediction based on occupant behavior assessment [J]. Energy and Buildings, 2012, 53: 183-193.
- [12] 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.
- [13] 周思宇. 不同气候区围护结构节能技术对办公建筑能耗的影响[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [14] Napoleon E, Kunio M. The role of the thermally activated desiccant cooling technologies in the issue of energy and environment [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15: 2095-2122.
- [15] 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.
- [16] Wang Z, Ding Y, Geng G, et al. Analysis of energy efficiency retrofit schemes for heating, ventilating and air-conditioning systems in existing office buildings based on the modified bin method [J]. Energy Conversion and Management, 2014, 77: 233-242.
- [17] JGJ 26-95 民用建筑节能设计标准(采暖居住建筑部分)[S]. 北京: 中华人民共和国建设部, 1995.
- [18] JGJ 134-2010 夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [19] GB 50019-2003 采暖通风与空气调节设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
- [20] 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.
- [21] GB/T 28750-2012. 节能量测量和验证技术通则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [22] 李峰. 复合能源供热系统运行控制策略研究[D]. 天津: 天津大学. 2012.

(编辑 胡英奎)