

基于实际案例的既有建筑节能改造节能量检测与验证*

潘毅群¹ 吴刚² 黄治钟¹ 魏玉剑³ 莫争春⁴ 左明明² 田柏秋¹

(1.同济大学, 上海 200092; 2.益浩科技有限公司, 上海 200135; 3.上海合同能源管理指导委员会办公室, 上海 200083; 4.能源基金会(美国)北京办事处建筑节能项目, 北京 100004)

摘要: 首先讨论了国内既有建筑节能改造与合同能源管理的现状, 对既有建筑节能量检测与验证的国内和国外的相关标准与规范做了总结和评价。再结合国内合同能源管理国情和实际的合同能源管理项目, 提出了基于实际案例的既有建筑综合改造节能量检测与验证导则, 然后详细介绍了导则内容, 包括导则特色、关键词、4种方法、案例。导则提出了适应国内国情的相似日测量法, 并且基于 ESCO 公司真实项目和实际数据, 强调方法及原理, 步骤性强, 不仅是技术准则, 更是贴近市场和实际操作的规范和标准。

关键词: 实际案例; 既有建筑; 节能改造; 节能量检测与验证

0 引言

我国既有建筑存量基数庞大, 且仍持续较快增长, 既有建筑能耗已经占据我国全社会能耗的相当比例。合同能源管理模式是大规模推广既有建筑节能改造、有效降低建筑能耗、实现节能减排目标的主要方式之一。

如何科学合理、公平客观地验证改造所产生的节能量是我国合同能源管理推广困难的核心问题之一; 从技术角度看, 如何在外界条件改变时确定合理的基准能耗是节能量验证的核心问题。这些都是当前 ESCO (Energy Services Company) 公司和用能单位就合同能源管理项目沟通、谈判、和实施过程中最耗费时间、精力且最容易引起纷争的环节之一。目前, 建筑物用能定额和建筑节能碳交易正引起越来越多人的关注。国家相关部门也正在积极研究相关政策的可行性和可操作性。无论建筑用能定额还是碳交易, 正确的节能量检测与验证始终是它们的前提和基础。

1 既有建筑节能量检测与验证相关标准与规范

在美国, 通用的节能量检测与验证(M&V)标准或指南有 IPMVP-2002^[1]、

*美国能源基金会资助项目

Measurement & Verification for Federal Energy Projects^[2]和 ASHRAE Guideline 14-2002^[3], 这些标准或指南对如何确定基准能耗做了科学和详尽的阐述, 但它们在合同能源管理项目中却无法广泛应用, 基准能耗是节能量验证中的根本和核心, 上述 3 本美国标准或指南对于基准能耗的建立均依赖于大量的能耗和影响能耗的历史运行数据, 尤其是分表计量的能耗数据。而我国的既有建筑, 由于过去建造和管理的原因, 往往缺失甚至没有有效的能耗和运行数据。分表计量也只是近年来开始实施, 绝大多数既有建筑不具备分表计量历史记录。其次, 上述美国标准, 过于理论和技术化, 缺少案例支撑, 这使我国合同能源管理的从业者们在实际项目中很难理解和操作检测与验证的必要步骤和详细过程。

近年来, 我国也开始尝试制定和编写节能量的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》、《公共建筑节能改造技术规范》等^[4-7]。但是由于这些标准和规范缺乏合同能源管理项目的实际经验和案例, 缺乏操作细节, 实际可操作性不强。

2 既有建筑节能改造中的节能量检测与验证导则

本文提出的《既有建筑节能改造中的节能量检测与验证导则》(以下简称“导则”), 在借鉴 IPMVP 的框架和 ASHRAE Guideline 14 的技术基础上, 规定了 A、B、C、D4 种节能量检测与验证方法及其适用场合, 并融入 ESCO 公司的实际合同能源管理项目经验, 从而使导则具备以下特色: 1、引入相似日测量法, 以运用于缺乏历史能耗数据的场合。2、加入了大量来源于 ESCO 公司的实际案例, 基于实际数据, 强调原理和步骤, 更具有操作性。

2.1 导则核心概念

本导则中的核心概念有独立变量、基准能耗、回归模型方法、相似日。

独立变量表示建筑用能系统中影响能耗但与改造范围内系统无关的变量。典型的独立变量见表 1。

表 1 改造项目和独立变量举例

改造项目	独立变量
空调系统整体 (包括风系统、水系统)	天气参数、出租率、建筑空调系统运行小时数、空调面积等
排风机 (车库)	车辆停放量、开放时间等
空调水泵变频	天气参数、出租率、空调面积等
电梯	人流量、商场营业额、运行时间等
工艺	产值、产量、运行时间等

基准能耗指在节能改造后独立变量条件下，节能改造前改造范围内的能耗。基准能耗不等于改造前能耗，也不是一个绝对数值。而是关于天气参数、运行时间、运行负荷等独立变量的函数，如图 1 所示。基准能耗的确定方法可归纳为两种，一是回归模型方法，当改造部分的改造前历史能耗数据和运行记录完整，可利用改造前能耗数据和改造前相关独立变量建立能耗关于独立变量的基准能耗模型，代入改造后的独立变量，得到基准能耗。二是相似日测量法，适用于改造前能耗数据不完整且改造部分可恢复至改造前运行状态时，相似日测量法要求在节能改造项目验收运行后若干月中，逐月一天或数天以系统设备改造前的模式运行，其余时间以系统设备改造后的模式运行，然后寻找改造后的运行模式下独立变量与改造前运行模式下独立变量相似的一天。这两天的能耗（能效）分别作为基准能耗（能效）和当前能耗（能效）。

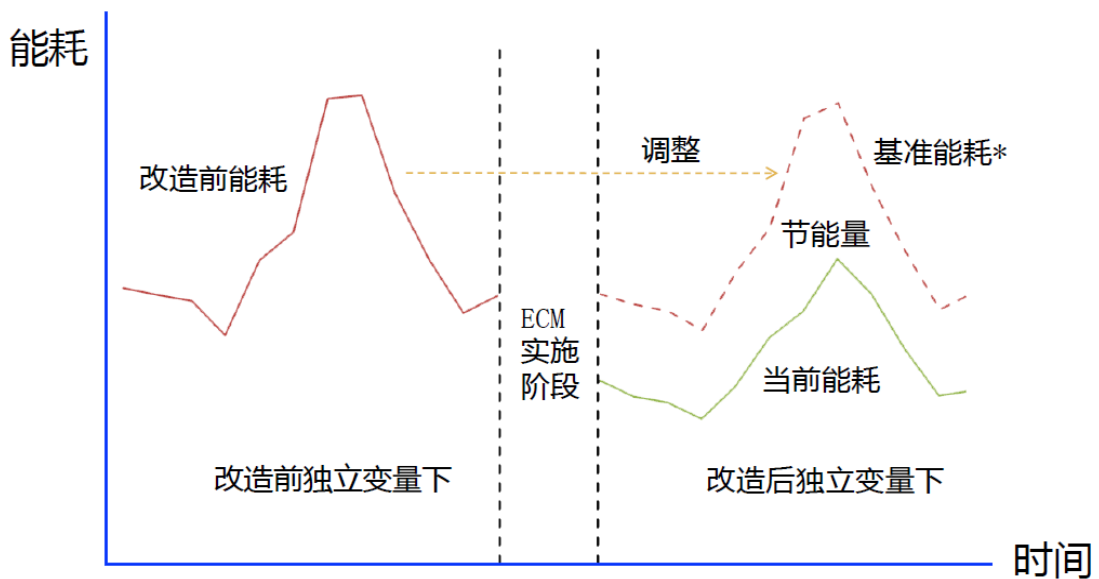


图 1 基准能耗和节能量

2.2 节能量检测与验证方法 A、B、C、D

测量与验证方法	节能量计算	典型应用	说明
<p>方法 A: 部分变量测量，改造部分隔离 它规定单项节能措施的节能量必须单独计算和评估，并将该单项节能改造的系统或设备与其他部分的能源使用隔离开来。</p>	<p>可通过改造前后设备性能变化和运行时间计算得到。</p>	<p>照明设备改造、更换、定荷载电动机的更换。</p>	<p>如要评价两项以上节能措施的综合节能效果，或者改造项目中改造隔离外的设备或系统在改造后的能耗有较大变化，合同能源管理双方要求同时评价和计算改造隔离外的设备或系统能耗变化时，得采用其他方法。</p>

<p>方法 B: 全部变量测量, 改造部分隔离。</p>	<p>如果改造前能耗数据和运行条件记录数据完整, 可通过建立能耗和独立变量之间的函数关系计算得到基准能耗, 当前能耗为改造后分表计量数据。如果改造前分表计量能耗数据完全或部分缺失时, 可采用相似日测量法得到基准能耗和当前能耗。</p>	<p>空调水泵变频、生活给水泵、电梯变频、厨房或车库排风、风机变频等。</p>	<p>评价单项节能措施, 计算节能量的变量必须全部通过测量来确定, 而不得通过约定的方式。</p>
<p>方法 C: 全楼宇验证 该方法采用对比整幢大楼的能源表计(如电能表、燃气表等)或分表在改造前后的读数并结合计算来确定全年节能效果。</p>	<p>节能量通过回归模型或改造前后的帐单、能源表计读数来计算。</p>	<p>多项节能措施, 改造前后能耗数据和运行记录完善。</p>	<p>一般采用回归模型方法计算基准能耗。</p>
<p>方法 D: 校验模拟验证 它是指建立能耗模型模拟建筑能耗状况、并采用电力公司逐时或逐月收费单据或终端用户的计量数据对模型进行校验的方法。</p>	<p>计算节能量的基准能耗和当前能耗分别为改造前后能耗模型输出的能耗值。</p>	<p>多项节能措施, 改造前后能耗数据不完善。</p>	<p>基准模型和改造后模型所采用的天气参数、运行时间、建筑模型、人员密度等变量必须相同。</p>

方法 A、B、C、D 有各自的适用范围, 总结如图 2。

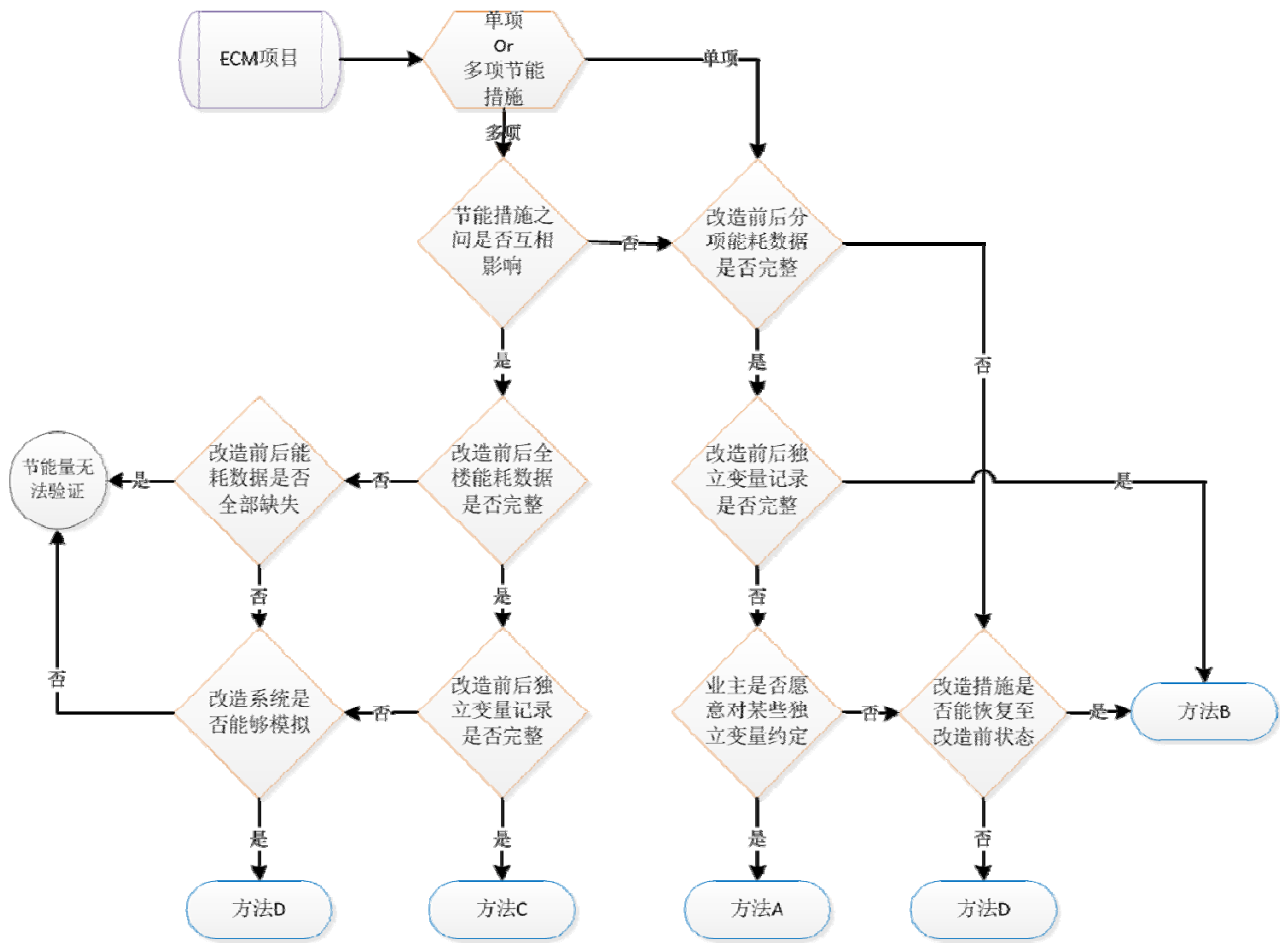


图 2 方法 ABCD 的选择

2.3 案例

2.3.1 方法 A：空调箱风机变频改造

对上海的某商场内一台空调箱进行风机变频改造，为单项节能改造，改造前无独立的计量电表和运行记录，且改造前风机功率需约定不变，故采用方法 A。改造前风机功率通过短期测量改造后空调箱工频运行时的功率得到，乘以变频器累计运行时间，得到基准能耗，当前能耗通过改造后安装的三相功率表测量。节能量通过下式计算：

$$\text{节电量}(E) = Q_{\text{工频}} - Q_{\text{实际}} = P_{\text{AHU}} \times t_{\text{AHU}} - Q_{\text{实际}} = 770\text{kWh} \quad (3)$$

表 3 案例 1 —空调箱风机变频改造

项目(当月)	表记数据	单位	来源
空调箱风机的测量功率 (P _{AHU})	9	kW	短期测量确定
空调箱风机使用时间 (T _{AHU})	360	h	来自变频器读数
空调箱工频工况用电量(Q _{工频})	3240	kWh	Q _{工频} =P _{AHU} ×t _{AHU}
空调箱实际用电量(Q _{实际})	2470	kWh	来自变频器读数

空调箱节电量 (E)	770	kWh	$E=Q_{\text{工频}}-Q_{\text{实际}}$
空调箱节能率	23.8	%	$E/Q_{\text{工频}}$

2.4.2 方法 B: 空调冷冻机房整体改造

对北京的某酒店的冷冻机房进行实现自动运行基础上的整体优化改造。此项目为整体节能改造, 由于缺乏改造前能耗记录, 且系统能恢复至改造前状态运行, 故采用方法 B 中相似日测量方法确定节能量。每月挑选三天按照改造前方式运行, 其余时间以改造后的方式运行, 从改造后运行记录中找出与改造前运行测试工况独立变量相似的日子, 计算各自三天冷冻机房耗电量的平均值, 代表当月的基准能耗。节能量计算如表 4。

表 4 案例 2 — 空调冷冻机房整体改造

工况	项目	入住率 (%)	室外干球温度(°C)	室外湿球温度(°C)	日用电量(kWh)
工况 1	基准	41	27.8	22.7	15306
	优化	43	27.8	22.3	10420
	参数偏差	2 %	±0	-0.4	
工况 2	基准	55	27.8	21.7	14321
	优化	55	27.0	21.3	10740
	参数偏差	0%	-0.8	-0.4	
工况 3	基准	40	28.1	24.5	16260
	优化	42	28.2	24.0	12962
	参数偏差	2%	0.1	-0.5	
基准日平均用电量: 15,296 kWh; 优化日平均用电量: 11,374 kWh 节能率: 25.6%; 当月用电量: 387,100 KWh; 节能量: $(387,100 - 15,296 \times 3) \times \frac{25.6\%}{(100\% - 25.6\%)} = 117,406 \text{KWh}$					

2.4.3 方法 C: 照明+空调系统改造

上海某酒店同时进行照明系统及空调系统改造, 因无法简单地将两者的节能效果分别验证, 且此项目改造前后能耗数据及独立变量记录较完整, 所以采用方法 C。建立改造前月能耗与独立变量的多元线性回归模型, 代入改造后独立变量, 计算得到基准能耗 7,489,096KWh, 当前能耗由能源账单获取为 5,464,070 KWh, 节能量 2,025,026 KWh, 节能率 27%。

表 4 案例 3 —照明+空调系统改造

	能耗	独立变量
	冷冻机房月耗电量 (ME)	月平均入住率 OR、月平均干球温度 DT、月平均湿球温度 WT、月工作日天数 WD、月休假日天数 HD
时间间隔	改造前：2006-2009 年共计 48 个月；改造后：2012 年 3 月-12 月	
回归模型	$ME = 1.48 \times 10^6 - 1.04 \times 10^4 \times DT + 1816 \times DT^2 + 764.5 \times WD \times HD + 4985 \times WT$	
不确定性	$R^2=0.93$	F 检验, $F=149.3$, $Sig=1.27E-24$
导则规定值	$R^2 \geq 0.8$	$F \geq 30$, $Sig < 0.05$

2.4.4 方法 D：照明+窗户贴膜+风机变频改造

天津某酒店同时进行了 1、LED 灯具更换；2、窗户贴膜；3、空调箱风机变频改造。因改造系统之间能耗相互影响，无法隔离，且改造前能耗数据完整，改造后能耗数据缺乏(实施节能措施后不久)，但业主要求得到节能量，所以采用方法 D。利用 eQuest 建立改造前模型，计算并用改造前月能耗数据进行校正满足不确定性规定后，得到基准模型；再采用改造后天气参数文件计算，得到基准能耗。在基准模型的基础上，将节能改造措施在模型中体现，并采用改造后天气参数文件计算，得到当前能耗。节能量计算见表 5。

表 5 案例 4 —照明+贴膜+风机变频改造

	基准能耗	当前能耗	节能量	节能率
电量 (kWh)	5,873,952	5,323,566	550,386	9.4%
天然气 (M ³)	573,588	535,673	37,915	6.6%

3 结论与展望

3.1 导则提出了适应国内国情的相似日测量法，相似日测量法针对国内绝大多数既有建筑没有分表计量历史数据提出的简便方法，有助于大力推动我国既有建筑节能改造的发展。

3.2 导则基于丰富的合同能源管理案例，案例来源 ESCO 公司真实项目和实际数据，并且具有详细操作细节，更易于 ESCO 公司和用能单位理解和实施。

3.3 导则强调方法及原理，步骤性强，案例丰富，不仅是技术准则，更是贴近市场和实际操作的规范和标准。

参考文献:

- [1] International Performance Measurement and Verification Protocol Committee. International performance measurement and verification protocol (IPMVP). 2002
- [2] U.S. Department Of Energy Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. M&V Guidelines: Measurement and Verification for Federal Energy Projects. Version 2.2. 2000. DOE/GO-102000-0960
- [3] ASHRAE Standards Committee. ASHRAE Guideline 14-2002. Measurement of Energy and Demand Savings. 2002
- [4] 《既有采暖居住建筑节能改造技术规程》. JGJ129-2000
- [5] 《公共建筑节能改造技术规范》. JGJ176—2009
- [6] 徐伟, 邹瑜, 冯晓梅. 《公共建筑节能改造技术规范》解读. 建筑科技. 2010(8): 20-25
- [7] 《节能量测量和验证技术通则》. GB/T 28750-2012

MEASUREMENT AND VERIFICATION FOR ENERGY SAVES OF EXISTING BUILDING RETROFITTING BASED ON CASE STUDIES

PAN Yiqun¹, WU Gang², HUANG Zhizhong¹, WEI Yujian³, MO Zhengchun⁴,
ZUO Mingming², TIAN Baiqiu¹

(1.Tongji University, Shanghai 200092; 2.Weldtech Technology, Ltd., Shanghai200135; 3.Shanghai Energy Management Contract Steering Committee Office, Shanghai200083; 4.Energy Foundation, Beijing100004)

Abstract: This paper first discusses the status quo of existing building retrofitting and EMC (Energy Management Contracting) in China and summarizes relative standards/codes for existing building retrofitting measurement and verification (M&V) in China and abroad. Then it presents Measurement and Verification Guideline for Energy Saves of Existing Building Retrofitting, which is based on real cases. Moreover, the contents of the guide are introduced in detail, including its features, frame, methods, key words and cases. The guide proposes the “similar day” method, which is applicable to China's actual conditions. It emphasizes methodology and operability and is based on real project and actual data, therefore it is not only a technical standard, but also a guideline close to EMC market and real projects.

Keywords: Case Studies; Existing Building; Energy Retrofit; Measurement and Verification