

# 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

王永龙, 潘毅群

(同济大学机械与能源工程学院, 上海 201804)

**摘要:** 简要概括了建筑能耗模拟的校验方法与步骤, 以及敏感性分析在校验模拟中的应用方法和意义。办公建筑的建筑和设备系统模型采用 eQUEST3-64 建立, 单因子敏感性分析涉及 3 个方面的模型输入参数, 包括建筑围护结构参数、建筑内部负荷参数以及空调系统参数。通过全年的动态模拟结果分析, 指出和比较各个输入参数的敏感性大小, 为已有办公类型建筑能耗模型的校验提供依据, 也相应的指出了新建建筑节能设计或既有建筑节能改造的重点, 为建筑节能设计和节能改造所需参数的选取提供依据。

**关键词:** 办公建筑; 能耗校验模拟; 单因子敏感性分析

**中图分类号:** TU201.5      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1673-7237(2014)02-0009-06

## Single-factor Sensitivity Analysis of Input Parameters in an Energy Model of Prototypical Office Building

WANG Yong-long, PAN Yi-qun

(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** The calibration methods and procedures of building energy simulation are briefly summarized, as well as the application and effect of sensitivity analysis during calibration. The software e-QUEST3-64 is utilized to establish an energy model of prototypical office building. A series of single factor sensitivity analysis is obtained about these input parameters from the envelope of the structure, internal loads and HVAC systems. Through analyzing the results of dynamic simulation for the whole year, the levels of sensitivity for all input parameters are compared, not only to provide a basis for calibration of existing office building energy simulation, but also to point out the emphasis of energy-saving designs of new buildings and retrofitting of existing buildings by selecting the parameters which are the most significant and suitable.

**Keywords:** office building; building energy calibration; single-factor sensitivity analysis

## 0 引言

校验模拟是将建筑的实际能耗数据和能源账单与采用建筑全能耗模拟软件根据建筑基本信息建立的模型的模拟输出的能耗结果进行比对, 经过多次调整和修正模型输入参数后, 使模拟结果与实际能耗的误差在相关标准规定的范围之内, 则可以确定能耗基准模型。该基准模型可以用来计算节能量。当出现下列情况中的一种或几种时, 就可能需要采用校验模拟<sup>[1]</sup>:

- (1) 缺少改造前或改造后全楼宇能耗数据;
- (2) 无法通过对对比测量改造前后的能耗来确定节

能量;

(3) 所改造部分与建筑物内其他用能系统相互影响, 无法隔离;

(4) 仅可得到楼宇建筑总的能耗数据, 但各系统对应的分项能耗数据缺失;

(5) 为了剔除与节能改造措施无关的因素的影响, 如出租率、气象参数和系统运行日程等, 这些因素本身会影响建筑能耗, 此时就需要对模型进行基准年能耗量的校验和调整。

具体步骤为<sup>[1]</sup>:

- (1) 制定校验模拟计划: 确定模拟软件、实测数据(逐月、逐时)、校验标准;

收稿日期 2013-11-14; 修回日期 2013-12-03

(2)收集建筑相关数据:建筑几何尺寸、围护结构的特性和参数、逐月/逐时的实际记录能耗数据、空调系统和其他系统设备的铭牌数据、运行时间表、现场测试的数据记录、气象参数等;

(3)输入对应数据,建立建筑模型:建筑几何外形尺寸、围护结构(屋面、墙体、窗户及其渗透率等)、空调分区、内部负荷及运行时间表等;

(4)将模型的模拟输出能耗结果与实际能耗数据进行对比:对比实际逐月能耗账单或逐时能耗数据,对比方法可采用统计和图示两种;

(5)调整模型的部分输入参数,使模拟输出结果与实际建筑能耗数据的误差达到相关标准的要求;

(6)建立基准模型和改造后模型;

(7)计算节能量;

(8)总结及报告。

敏感性分析是指模型输入参数对模拟结果影响力大小的研究,在校验模型的过程中,找出对模拟结果(逐月耗电、耗气)影响较大的输入参数进行修正,可以提高校验模拟的效率。

敏感性分析方法作为一种分析自变量变化对目标结果的影响强度的方法,十分适合于分析建筑节能的各因素对建筑能耗的影响,从而可以在建筑节能设计中很好地指导设计者认清节能设计的主导因素,抓住节能设计重点、避免不必要投资。该方法在国内外,特别是国外的研究中屡有提及并进行了较全面的实例分析,有的还在工程项目中得到应用并且取得了较好的节能指导效果。所以,敏感性分析方法是一种值得提倡并开展深入研究的建筑节能设计指导方法<sup>[2]</sup>。

## 1 典型办公建筑模型的建立

### 1.1 模型建立

本文结合上海市实际使用较多的情况设定办公建筑模型为25层,层高为4.2m,标准层面积为1750m<sup>2</sup>,长宽比为1.43。采用建筑全能耗模拟分析软件eQUEST3-64进行建模,典型模型的围护结构参数、内部负荷参数和设备系统参数以及对应运行时间

表的设置参照《公共建筑节能设计标准》和ASHRAE Standard 90.1-2007(见表1),图1为建筑模型3D图。

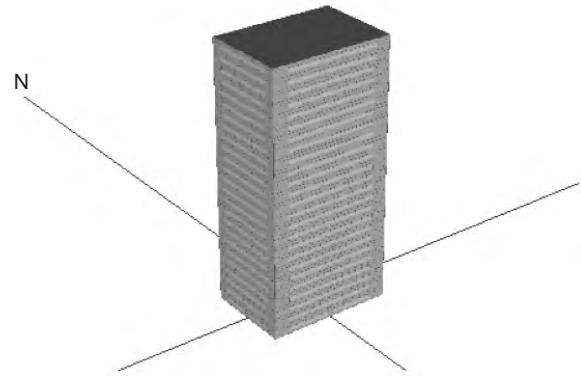


图1 建筑模型3D外形

Fig.1 3-D architectural model

为了方便分析数据,本文在符合相关标准和实际情况的条件下,对典型模型做出以下简化:

(1)各层均为标准层,长宽比、层高均相同,空调分区对应外区、内区及核心区,内、外区大都为办公室、会议室等,核心区则是电梯间及前室、楼梯间和卫生间等,属于服务性空间,不设置空调。

(2)建筑朝向为正南,四面窗户材质相同,窗墙比均匀分布,忽略门的影响。

(3)建筑使用时间严格按照国家规定的节假日安排并符合公建标准要求。

(4)建筑的能源为电力和燃气,电力包括照明用电、插座设备用电和空调系统设备用电等,燃气主要供应冬季采暖和生活热水系统。

本文为了分析的方便,建筑能耗主要针对电力,及重点考虑夏季工况,忽略了冬季采暖的燃气耗量,但考虑了供热和生活热水系统的输送电力能耗。

### 1.2 典型办公建筑能耗模拟结果与分析

根据建筑相关参数的确定和模型简化,输入上海地区典型气象参数,采用建筑全能耗模拟分析软件eQUEST3-64进行建模并运行计算,得到典型办公建筑的全年能耗如图2所示。

表1 模型输入参数表

Table 1 Input parameters of model

围护结构传热系数	屋顶/[W/(m <sup>2</sup> ·K)]	外墙/[W/(m <sup>2</sup> ·K)]	外窗/[W/(m <sup>2</sup> ·K)]	窗墙比	备注	
	0.70	1.00	3.00	0.40		
内部负荷	照明密度/(W/m <sup>2</sup> )	设备密度/(W/m <sup>2</sup> )	人员密度/(m <sup>2</sup> /人)			
	15.0	10.0	6.0			
空调系统	室内设计温度/℃	新风量/[m <sup>3</sup> /(人·h)]	送风温度/℃	冷机 COP	风机效率	水泵效率
	24.0	30.0	14.0	5.50	0.70	0.70

注:空调系统为办公室常用的变风量空调系统(VAV),冷源为水冷离心式冷水机组,热源为燃气锅炉。

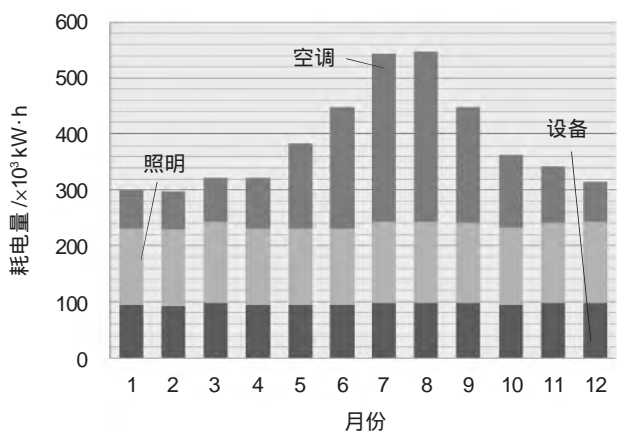


图2 全年各月份分项耗电量

Fig.2 Monthly itemized electricity consumption

如图2所示,建筑空调系统耗电量全年各月变化十分显著,夏季空调系统制冷开启,用电量明显高于其他各个月份,而冬季耗电量最低,这是由于冬季供热的能源是燃气,反映在耗电量上的只有风机和水泵的能耗,故相对较小,照明用电和设备用电全年都比较稳定,各个月的差别不大。由模拟计算结果可知,建筑全年耗电量为4 634 655 kW·h,以整个建筑面积43 750 m<sup>2</sup>计算,单位建筑面积年耗电量为105.94 kW·h/(m<sup>2</sup>·a),其中空调耗电量41.04 kW·h/(m<sup>2</sup>·a),占38.7%;照明耗电38.81 kW·h/(m<sup>2</sup>·a),占36.6%;室内设备耗电26.08 kW·h/(m<sup>2</sup>·a),占24.7%。从以上数据可以得出,上述典型办公建筑模型的建立方式、参数的选取都是符合相关标准的,模拟输出结果也比较合理,可以为本文后续的研究提供基础。

## 2 典型办公建筑能耗模型输入参数单因子敏感性的分析研究

本文对上海地区典型办公建筑能耗模型的建立和能耗分析,以及对该模型输入参数单因子的敏感性分析研究仅针对确定的空调形式,以及现今大型办公建筑中比较常用的VAV空调系统形式,研究了围护结构参数、内部负荷参数、空调系统参数等的设置对建筑总能耗和分项能耗的敏感性。根据T. Agami Reddy和J.C. Lam等人<sup>[3-4]</sup>针对典型办公建筑能耗模型校验模拟的研究结论,再结合实际的可操作性及对工程项目的可指导性,选取了5个围护结构参数因子、3个内部负荷参数因子和6个空调系统参数因子,分别对应是屋顶传热系数、外墙传热系数、外窗传热系数、遮阳系数SC值和窗墙比,照明功率密度、设备功率密度和人员密度3个因子,以及室内设计温度、新风量、送风温度、制冷机组COP、风机效率和水泵效率。

为量化各因子对总能耗和分项能耗的影响程度,本文引入平均单位面积能耗变化值和平均单位面积能耗变化率的概念,目的是衡量各个因子对总能耗及分项能耗(空调能耗、照明能耗和设备能耗)的敏感性,

具体定义如下:

单位面积总能耗变化值:

$$P_{A_j} = \frac{A_j - A_1}{X_j - X_1}$$

对所有 $P_{A_j}$ 值求和后取平均值,可得到 $\overline{P_{A_j}}$ ,定义为平均单位面积总能耗变化值。

单位面积总能耗变化率:

$$Q_{A_j} = \frac{A_j - A_1}{A_1} / (X_j - X_1)$$

对所有 $Q_{A_j}$ 值求和后取平均值,可得到 $\overline{Q_{A_j}}$ ,定义为平均单位面积总能耗变化率。

式中 $X_j$ 为单因子输入参数的值;

$A_1$ 为取此值时的总能耗。

分项能耗的敏感性评价指标,即空调能耗、照明能耗、设备能耗所对应的单位面积变化值和变化率及其对应的平均值设为:单位面积空调能耗变化值 $P_{B_j}$ ,单位面积空调能耗变化率 $Q_{B_j}$ ;单位面积照明能耗变化值 $P_{C_j}$ ,单位面积照明能耗变化率 $Q_{C_j}$ ;单位面积设备能耗变化值 $P_{D_j}$ ,单位面积设备能耗变化率 $Q_{D_j}$ ,以及对应的平均值设为: $\overline{P_{B_j}}$ 、 $\overline{Q_{B_j}}$ 、 $\overline{P_{C_j}}$ 、 $\overline{Q_{C_j}}$ 、 $\overline{P_{D_j}}$ 、 $\overline{Q_{D_j}}$ 。

### 2.1 围护结构因子敏感性

#### 2.1.1 外墙传热系数敏感性

外墙是建筑外围护机构的主体部分之一,其传热系数的大小直接影响建筑室内外环境的传热特性,进而直接影响空调系统能耗和建筑总能耗。本文中,上海地区典型办公建筑模型外墙传热系数为1.0 W/(m<sup>2</sup>·K),为了研究分析外墙传热系数对建筑总电耗和空调电耗的敏感性,将外墙传热系数依次设置为0.5 W/(m<sup>2</sup>·K)、1.0 W/(m<sup>2</sup>·K)、1.5 W/(m<sup>2</sup>·K)、2.0 W/(m<sup>2</sup>·K)、2.5 W/(m<sup>2</sup>·K),模型中其他输入参数设置保持不变,运行模型进行能耗计算,结果见表2。

由表2可知,随着外墙传热系数的增大,总电耗和空调系统电耗都有所增加。具体数字分析可以看出,平均单位面积总电耗变化值达到0.67,即当外墙传热系数变化1 W/(m<sup>2</sup>·K)时,平均单位面积总电耗变化0.67 W/(m<sup>2</sup>·K),平均变化率为0.64%;平均单位面积空调电耗变化值为0.67,即当外墙传热系数变化1 W/(m<sup>2</sup>·K)时,平均单位面积空调电耗变化0.67 W/(m<sup>2</sup>·K),平均变化率为1.63%。外墙传热系数对空调系统和总电耗的影响较为明显,这也是为什么需要对外墙进行保温,减小外墙传热系数,从而达到建筑节能目标的原因。

#### 2.1.2 其他围护结构因子敏感性

参照以上单因子敏感性分析方法,对屋顶传热系数、窗户传热系数、遮阳系数SC值和窗墙比分别取不同数值,建模计算,数据分析如表3。

由上述分析数据可知,在所取的5个围护结构因子中,屋顶传热系数的敏感性最小,这主要是因为典



表2 外墙传热系数对典型建筑电耗敏感性分析数据

Table 2 The data of sensitivity of out-wall U-value to electricity consumption

单因子变量	取值 j=1	取值 j=2	取值 j=3	取值 j=4	取值 j=5
外墙传热系数 $X/[W/(m^2 \cdot K)]$	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
$A/[kW \cdot h/(m^2 \cdot a)]$	105.65	105.94	106.31	106.70	107.14
$B/[kW \cdot h/(m^2 \cdot a)]$	40.76	41.04	41.42	41.81	42.24
$P_A/[kW \cdot h/(m^2 \cdot a)]$	—	0.58	0.66	0.70	0.74
$\bar{P}_A/[kW \cdot h/(m^2 \cdot a)]$			0.67		
$P_B/[kW \cdot h/(m^2 \cdot a)]$	—	0.56	0.66	0.70	0.74
$\bar{P}_B/[kW \cdot h/(m^2 \cdot a)]$			0.67		
$Q_A/\%$	—	0.55	0.62	0.66	0.71
$\bar{Q}_A/\%$			0.64		
$Q_B/\%$	—	1.37	1.62	1.72	1.82
$\bar{Q}_B/\%$			1.63		

表3 其他围护结构因子对典型建筑电耗敏感性分析数据

Table 3 The data of sensitivity of other envelope parameters to electricity consumption

单因子变量 X	取值 j=1	取值 j=2	取值 j=3	取值 j=4	取值 j=5
屋顶传热系数 $[W/(m^2 \cdot K)]$	0.30	0.70	1.20	1.70	2.20
窗户传热系数 $[W/(m^2 \cdot K)]$	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
遮阳系数 SC 值/%	30	40	50	60	70
窗墙比系数%	30	40	50	60	70
	屋顶传热系数	窗户传热系数	遮阳系数 SC 值	窗墙比系数	
$\bar{P}_A/[kW \cdot h/(m^2 \cdot a)]$	0.022	0.24	0.17	0.14	
$\bar{P}_B/[kW \cdot h/(m^2 \cdot a)]$	0.022	0.24	0.17	0.14	
$\bar{Q}_A/\%$	0.02	0.22	0.16	0.14	
$\bar{Q}_B/\%$	0.05	0.58	0.45	0.36	

型模型为高层建筑,屋顶的面积相对建筑的总表面积很小,故影响甚微。其他4个围护结构因子的变化都会引起空调系统电耗的变化,从而影响总电耗,且这4个因子的敏感性基本相当(窗墙比系数对于既有建筑模型是确定的值,在进行既有建筑能耗模型校验模拟时一般是不能改变其值的,但此处的分析可以为新建建筑窗墙比的节能设计提供基础依据)。

## 2.2 内部负荷因子敏感性

内部负荷因子有照明功率密度、设备功率密度和人员密度,分别将不同的取值输入模型后计算,可以得出相关耗电量的变化值和变化率,详见表4。

由表4可知,随着照明功率密度、设备功率密度和人员密度的增大,对应的能耗都增大。照明功率密度和设备功率密度除了分别对照明电耗和设备电耗有直接的敏感性之外,还会对空调系统的电耗产生影响,这是因为照明和设备都会在室内散热,影响空调系统的运行。从数据中可以看出,内部负荷因子对空调系统电耗和总电耗都有较为显著的影响。

## 2.3 空调系统因子敏感性

空调系统因子有室内设计温度、新风量、送风温度、制冷机组 COP、风机效率和水泵效率,分别将不同的取值输入模型后计算,可以得出相关耗电量的变化

表4 内部负荷因子对典型建筑电耗敏感性分析数据

Table 4 The data of sensitivity of internal load parameters to electricity consumption

单因子变量 X	取值 j=1	取值 j=2	取值 j=3	取值 j=4	取值 j=5
照明功率密度/(W/m <sup>2</sup> )	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0
设备功率密度/(W/m <sup>2</sup> )	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0
人员密度/(m <sup>2</sup> /人)	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0
	照明功率密度		设备功率密度		人员密度
$\bar{P}_A$ /[kW·h/(m <sup>2</sup> ·a)]	3.10		3.21		-2.50
$\bar{P}_B$ /[kW·h/(m <sup>2</sup> ·a)]	0.58		0.61		-2.50
$\bar{P}_C$ /[kW·h/(m <sup>2</sup> ·a)]	2.54		0		0
$\bar{P}_D$ /[kW·h/(m <sup>2</sup> ·a)]	0		2.60		0
$\bar{Q}_A$ /%	3.42		3.03		-2.22
$\bar{Q}_B$ /%	1.51		1.49		-5.21
$\bar{Q}_C$ /%	9.67		0		0
$\bar{Q}_D$ /%	0		9.96		0

值和变化率,详见表5。

由表5可知,空调系统电耗和总电耗会随着新风量的提高而增大,但室内设计温度、制冷机组 COP、送风温度、风机效率、水泵效率的提高都会使空调系统耗电量减小。对比分析所选取的6个空调系统因子,制冷机组 COP的敏感性最为显著;其次是室内设计温度、送风温度和新风量的大小,风机效率和水泵效

率的影响相对较小,敏感性相当,当然,这和模型所设置的空调系统(VAV系统)有一定关系。

### 3 结论

本文采用 E-quest 建立了上海地区办公建筑的典型建筑能耗模型,并从围护结构参数、建筑内部负荷参数、空调系统参数3个方面选取多个对应输入参数进行了单因子敏感性分析。通过全年的动态模拟结果

表5 空调系统因子对典型建筑电耗敏感性分析数据

Table 5 The data of sensitivity of HVAC system parameters to electricity consumption

单因子变量 X	取值 j=1	取值 j=2	取值 j=3	取值 j=4	取值 j=5	
室内设计温度/℃	23.0	24.0	25.0	26.0	27.0	
新风量/[m <sup>3</sup> /(h·人)]	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	
送风温度/℃	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	
制冷机组 COP	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	
风机效率/%	60	65	70	75	80	
水泵效率/%	60	65	70	75	80	
	室内设计温度	新风量	送风温度	制冷机组 COP	风机效率	水泵效率
$\bar{P}_A$ /[kW·h/(m <sup>2</sup> ·a)]	-2.07	0.23	-0.59	-5.99	-0.13	-0.21
$\bar{P}_B$ /[kW·h/(m <sup>2</sup> ·a)]	-2.07	0.23	-0.59	-5.99	-0.13	-0.21
$\bar{Q}_A$ /%	-1.90	0.22	-0.55	-5.23	-0.12	-0.19
$\bar{Q}_B$ /%	-4.74	0.60	-1.40	-12.10	-0.30	-0.48

分析,指出和比较各个输入参数的敏感性大小,为既有办公类型建筑能耗模型的校验提供依据,也相应地指出了新建建筑或既有建筑节能改造的重点,为建筑节能设计和节能改造所需参数的选取提供依据。

(1)本文中所有的数据和分析只是针对此处特定的办公建筑典型模型,定性地分析各个输入参数对于能耗的敏感性,对于不同的建筑和设备系统形式,计算结果和数据上肯定会有所变化,但是整体的趋势是具有一致的导向的。

(2)围护结构因子中,屋顶的面积所占典型模型总体表面积很小,故对能耗的敏感性很小。内部负荷因子中,照明功率密度和设备功率密度除了分别对照明能耗和设备能耗有直接的敏感性外,还对空调系统的能耗有一定的影响,而室内人员密度对空调系统能耗的影响更大,这是因为室内人员除通过散热散湿影响空调系统外,还要求系统提供足够的新风量以满足卫生要求。空调系统因子中,制冷机组 COP 的敏感性最为显著,其次是室内设计温度、送风温度和新风量的大小,风机效率和水泵效率的影响相对较小,敏感性相当。

(3)在建筑能耗模型的校验中,建筑的设计参数、系统运行和能耗记录的相关数据是有限的,要结合现场测试和建筑的实际情况,优先调整模型中敏感性较大的参数,提高检验模拟工作的效率。

(4)在既有建筑的节能改造和新建建筑的节能设计中,可以利用模型输入参数的敏感性进行建模分

析,通过能耗的比较客观地分析各项节能措施及设计方案的可行性和经济性,找出最佳的节能措施和设计方

参考文献:

- [1]ASHRAE Standards Committee. ASHRAE Guideline 14-2002. Measurement of Energy and Demand Savings[J].2002.
- [2]闫利.建筑节能设计的敏感性分析方法[J].制冷与空调,2010,24(4):49-52.
- [3]Reddy T A, Maor I, Jian S. Procedures for reconciling computer-calculated results with measured energy data [J]. ASHRAE Research Project 1051-RP. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.2006.
- [4]Lam J C, Hui S C M. Sensitivity analysis of energy performance of office Buildings[J]. Building and Environment,1996,31(1):27-39.
- [5]GB50189—2005,公共建筑节能设计标准[S].
- [6]Stein J. Calibrated simulation: an improved method for analyzing building energy use [J]. E-Source Tech Update TU-97-10. Boulder, CO, USA, 1997.
- [7]李玉明,潘毅群,陈晨.上海市既有公共建筑节能改造适用技术研究[J].建筑热能通风空调,2009,28(2):33-37.

作者简介:王永龙(1988),男,安徽人,供热、供燃气、通风与空调工程专业,从事建筑节能、建筑能耗模拟、校验模拟等方向的研究(alenwangtj@126.com)。

指导教师:潘毅群,同济大学教授、博导。



## 河北建筑保温与结构一体化工作全面启动

近日,为促进全省建设领域节能减排工作,提升建筑节能工程质量和安全性能,河北省决定在全省推行建筑保温与结构一体化技术,并提出了具体的工作目标和要求。凡具备一体化技术推广应用条件的市、县(市),2014年主城区的新建工程应全面推行一体化技术;其他县(市)2014年底前在主城区启动一体化技术试点示范。保障性住房、绿色建筑项目、政府投资的公共建筑和公共机构办公建筑,要率先采用一体化技术。2015年,全省采用一体化技术的新建建筑,力争达到城镇建设工程总量的60%,2020年,力争达到80%以上。

为了做好此项工作,河北省住建厅进行了大量的前期筹备调研工作,摸清了全省推进此项工作的基础条件,澄清了建筑保温与结构一体化技术的模糊概念,制订了一体化技术的准入条件。重要的是,明确了一体化技术是实现建筑保温功能与墙体围护功能于一体,有较长的耐久性且满足消防防火要求的技

术,凡可满足此条件并通过认定的技术即视为一体化技术。

由于人们对一体化的误解,多年以来,普遍认为只要保温材料的保护层与主体结构连在一起就是一体化技术(其实从未出现过不连在一起的情况,观其结果只是连接方式、连接构件的材料有所不同)。新政策明确了对保温系统与主体结构连接方式和连接构件的可靠性、耐久性等指标的考量。不再沿用“墙体不需要另行保温措施即可满足现行建筑节能标准要求”和“同步施工”等不科学的约束条件。这种宽泛的一体化技术概念有助于技术创新和企业发展,有助于科学地统筹考虑保温系统的性能与安全、防火性能等问题,有助于在全面发展的多种保温系统中好中取优、优胜劣汰,起到在推行一体化技术的过程中全社会共同探索和实践的引导作用,最终实现解决在建筑保温领域中,好的保温材料与建筑无法同寿命和防火的行业难题。(2014-02-10 河北省墙材革新和建筑节能管理办公室 周卫国)