

---

# DeST-h 理论验证文档

---

Document for DeST Analytical Validation

DeST 开发小组，清华大学

2003.03

---

<b>第 1 章 概述</b> .....	<b>2</b>
1.1 基本的验证方法 .....	2
1.2 对 DEST-H 的验证所采用的方法 .....	3
<b>第 2 章 理论计算方法</b> .....	<b>4</b>
2.1 单个房间的计算 .....	4
2.1.1 墙体内部温度分布与表面热流 .....	4
2.1.2 墙内外表面的热平衡关系式 .....	6
2.1.3 室内空气热平衡表达式 .....	8
2.1.4 外窗的处理 .....	9
2.2 多房间建筑的处理 .....	10
<b>第 3 章 DEST-H 的基本理论模型</b> .....	<b>11</b>
3.1 基本方程及其求解 .....	11
3.1.1 基本方程 .....	11
3.1.2 方程求解 .....	12
3.2 房间温度计算 .....	13
3.2.1 基础室温的概念 .....	13
3.2.2 基础室温的数学模型 .....	14
3.3 建筑模型的确定 .....	20
<b>第 4 章 验证实例</b> .....	<b>21</b>
4.1 SINGLE ROOM .....	21
4.1.1 Single room without windows .....	21
4.1.2 Single room with a window .....	24
4.2 DOUBLE ROOMS .....	26
4.3 FOUR ROOMS .....	29

# 第 1 章 概述

## 1.1 基本的验证方法

与实验研究方法不同，模拟分析方法能在很短的时间内得到很多的数据结果，因此，如何论证模拟结果的合理性和可信性(Quality Insurance)，就成为模拟分析方法中的一个重要课题。建筑热环境的模拟分析也是如此，而且由于建筑物的复杂性和不确定性，对建筑热环境模拟分析程序的验证是比较困难的。

通常，建筑热环境模拟分析程序的验证有三种方法：理论验证(Theoretical Validation)，程序间对比(Inter-program Comparison)和经验验证(Empirical Validation)。

理论验证是假设室外温度和太阳辐射均为谐波函数，用数学分析的手段求解其作用于某一简单房间时产生的理论热响应，同时用模拟程序计算相同条件下的房间热响应，比较两者，从而检验模拟程序的准确性。

程序间对比是在相同的建筑物、室外气象参数、室内热扰，以及相同的设备控制方案等前提下，分别用不同的模拟程序计算建筑物的热性能指标，如无任何人工供热、空调手段时的室内空气温度，或有供热、空调设备时的室温及设备负荷等，然后对比各程序的计算结果，以检验不同程序的一致性。

理论验证是最为严格的，但由于实际建筑物的复杂性和实际内外扰量变化的随机性，理论验证与实际情况相差很大，即使理论验证某程序的结果与理论计算可以很好的吻合，但程序在实用中的结果如何仍不能肯定，理论验证的说服力不强。而程序间对比在一定程度上可以判断一个程序是否在某方面存在问题，例如其给出的建筑物某种性能指标远远偏离于其它程序，但这种验证方法不能肯定该程序是错误的。即使所有的程序模拟的结果都是一致的，也不能肯定它们就是正确的，因为实际情况并未被准确的了解。

最有说服力也是最难进行的是经验验证，即把各程序的模拟结果与实测记录相比较，以评价各程序的准确性和可靠性。但实测过程不可避免的存在误差，

而实际建筑物在模拟计算时需要有个简化和模型化的过程，这一过程也存在误差，因此即使模拟结果和实测记录吻合也不能说该程序一定正确。另一方面，从哲学意义上讲，例证的正确性并不能保证事物的正确性，也就是说，即使某程序的模拟结果和某建筑的实测结果相吻合，也不能保证当建筑物改变类型、结构、规模等特性时，该程序还能给出符合实际的模拟结果。

因此上述三种方法各有优缺点，应统筹兼顾。在程序开发阶段，一般可先采用理论验证的方法，保证最基本的物理原理和简化模型不出现概念性错误，在开发到一定阶段时，可拿自己的程序与世界上应用较广泛的程序作程序间对比，找出一些较明显的错误或不足，进一步完善。程序编写完成并经一定的测试后，可参加有组织的经验验证，或自行组织经验验证，再进行不断的改进和提高。

## 1.2 对 DeST-h 的验证所采用的方法

在实际测试与验证的过程中，一种方法是设计相应的题目，如特定的建筑模型或特定规律的内外扰量，经理论推导和实际模拟计算，对比所得的结果；另一种方法是与实测结果进行对比。在目前对 DeST-h 的验证中，主要采用的是第一种方法，设计特定的建筑模型，以及特定规律的内外扰量，如按正弦规律波动的外温、太阳辐射和内扰等，推导出其理论解，然后利用 DeST-h 进行模拟计算，通过修改数据库中相应的数据，使其计算模型与理论解的模型一致，之后对比理论解的结果和实际模拟的结果，从而可以根据两者的一致程度来判断模拟结果的准确性。

## 第 2 章 理论计算方法

扰量可分为三类：恒定扰量（如室内有一恒定热源）、周期性的扰量和非周期性的扰量。

在这里，周期性扰量的定义为：扰量按某种特定的简单规律，如正弦、余弦等变化，而非周期性的扰量则是不按这种简单规律来变化的、随机的、不规则的扰量，其实，这种意义上的较复杂的非简谐运动的非周期性扰量还是可以用正弦（或余弦）函数项的级数表达，即可以将其变换为傅立叶展开式的。

在此验证中，主要研究的是前两种扰量，即恒定的扰量和有简单规律的扰量，对第三种扰量，由于它也可以展开为简单的正弦（或余弦）函数的表达式，而且如上所述，所研究的建筑热过程符合叠加原理，所以，前两种扰量处理的正确性就能够保证第三种扰量处理的正确性。

设定一个建筑模型，假定外温和辐射及各种热扰均是周期函数，则可由傅立叶变换得到室内温度随外扰变化的解析解，再与模拟程序 DeST-h 的计算结果相对比，进行验证。

下面介绍一下周期性扰量作用下理论计算的方法，恒定扰量可看作周期无穷大的周期性扰量。

### 2.1 单个房间的计算

#### 2.1.1 墙体内部温度分布与表面热流

对于某一板壁，由基本导热微分方程

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \quad (2.1.1-1)$$

取第一类边界条件，即构成一个定解问题

$$t(\tau, 0) = t_1 \quad t(\tau, l) = t_2 \quad (2.1.1-2)$$

由于温度在  $(-\infty, +\infty)$  时刻之间是周期性变化，故可将温度对时间进行傅立

叶变换:

$$T(\omega, x) = \int_{-\infty}^{+\infty} t(\tau, x) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (2.1.1-3)$$

代入(2.1.1-1)式, 即对(2.1.1-1)式在时间上进行傅立叶变换, 得到:

$$(j\omega)T(\omega, x) = a \frac{d^2 T(\omega, x)}{dx^2} \quad (2.1.1-4)$$

(2.1.1-4)式为一个二阶线性微分方程, 其解的形式为:

$$T(\omega, x) = C_1 e^{\sqrt{A}x} + C_2 e^{-\sqrt{A}x}, A = j\omega/a \quad (2.1.1-5)$$

将边界条件(2.1.1-2)式也进行傅立叶变换, 并代入(2.1.1-5)式, 得到:

$$\begin{cases} C_1 + C_2 = T_1 \\ C_1 e^{\sqrt{A}l} + C_2 e^{-\sqrt{A}l} = T_2 \end{cases} \quad (2.1.1-6)$$

(2.1.1-6)式为一线性方程, 解得 C 的表达式为

$$C_1 = \frac{1}{2sh(-\sqrt{A}l)} (T_1 e^{(-\sqrt{A}l)} - T_2)$$

$$C_2 = \frac{1}{2sh(-\sqrt{A}l)} (T_2 - T_1 e^{\sqrt{A}l})$$

即:

$$\begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{2sh(-\sqrt{A}l)} \begin{bmatrix} e^{-\sqrt{A}l} & -1 \\ -e^{\sqrt{A}l} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} \quad (2.1.1-7)$$

由以上的推导可以得到第一类边界条件下墙内温度的表达式, 并可求得通过内外两表面的热流:

$$q_1 = -\lambda \frac{dt}{dx} \Big|_{x=0} \quad (2.1.1-8) \text{外表面}$$

$$q_2 = -\lambda \frac{dt}{dx} \Big|_{x=l} \quad (2.1.1-9) \text{内表面}$$

对(2.1.1-8)、(2.1.1-9)两式也进行傅立叶变换, 并将(2.1.1-5)式代入, 得到:

$$Q_1 = \lambda\sqrt{A}(C_1 - C_2) \quad (2.1.1-10)\text{外表面}$$

$$Q_2 = \lambda\sqrt{A}(C_1 e^{\sqrt{Al}} - C_2 e^{-\sqrt{Al}}) \quad (2.1.1-11)\text{内表面}$$

将 C 的表达式(2.1.1-7)代入，重写上两式为

$$Q_1 = \frac{\lambda\sqrt{A}}{sh(-\sqrt{Al})}(ch(-\sqrt{Al})T_1 - T_2) \quad (2.1.1-12)\text{外表面}$$

$$Q_2 = \frac{\lambda\sqrt{A}}{sh(-\sqrt{Al})}(T_1 - ch(-\sqrt{Al})T_2) \quad (2.1.1-13)\text{内表面}$$

即

$$\begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} \quad (2.1.1-14)$$

其中

$$A = \frac{\lambda\sqrt{A}}{sh(-\sqrt{Al})}ch(-\sqrt{Al})$$

$$B = \frac{-\lambda\sqrt{A}}{sh(-\sqrt{Al})}$$

$$C = \frac{\lambda\sqrt{A}}{sh(-\sqrt{Al})}$$

$$D = \frac{-\lambda\sqrt{A}}{sh(-\sqrt{Al})}ch(-\sqrt{Al})$$

(2.1.1-14)式即为墙内外两表面热流与内外表面温度的关系式。

## 2.1.2 墙内外表面的热平衡关系式

设该房间有  $n$  面外墙，对每面外墙的内外表面均可以建立一个热平衡方程式。

对外表面，考虑其与室外空气的对流换热、墙内部导热、太阳辐射以及与周围环境之间的长波互辐射，若用文字表达其热平衡方程的通式，应为：

0=与室外空气的对流换热量+导热+接受的太阳辐射热量+与周围环境之间的长波互辐射热量

对于  $n$  时刻单位面积第  $i$  个外墙来说，其外表面热平衡方程式为：

$$0 = \alpha_{c,w}(t_w - t_{1,i}) + q_{1,i} + r_{solar} + \alpha_{r,w}(t_{env} - t_{1,i}) \quad (2.1.2-1)$$

式中：

$t_w$  ——室外空气温度 (°C)；

$t_{1,i}$  ——第  $i$  个外墙的外表面温度 (°C)；

$\alpha_{c,w}$  ——围护结构外表面与室外空气之间的对流换热系数 (W/m<sup>2</sup>°C)；

$q_{1,i}$  ——由于两侧温差，第  $i$  个外墙的外表面所获得的传热热流(W/m<sup>2</sup>)；

$r_{solar}$  ——第  $i$  个外墙的单位外表面积所接受的太阳辐射热量 (W/m<sup>2</sup>)；

$\alpha_{r,w}$  ——线性化的围护结构外表面与周围环境之间的辐射换热系数 (W/m<sup>2</sup>°C)；

$t_{env}$  ——周围环境的当量温度 (°C)。

经傅立叶变换后，方程形式为：

$$0 = \alpha_{c,w}(T_w - T_{1,i}) + Q_{1,i} + R_{solar} + \alpha_{r,w}(T_{env} - T_{1,i}) \quad (2.1.2-2)$$

对内表面，考虑其与室内空气的对流换热、墙内部导热、室内辐射热扰以及各板壁之间的长波互辐射，若用文字表达其热平衡方程的通式，应为：

0=与室内空气的对流换热量+导热+直接承受的辐射热量+各表面之间的互辐射热量

对于  $n$  时刻单位面积第  $i$  个外墙来说，其内表面热平衡方程式为：

$$0 = \alpha_{c,a,i}(t_a - t_{2,i}) + q_{2,i} + r_{hgs} + \sum_{j=1, j \neq i}^n \alpha_{r,i} \epsilon_{i,j} (t_{2,j} - t_{2,i}) \quad (2.1.2-3)$$

式中：

$t_a$  ——室内空气温度 (°C)；

$t_{2,i}$  ——第  $i$  个外墙的内表面温度 (°C)；



$\alpha_{c,a,i}$ ——第  $i$  个外墙内表面与室内空气之间的对流换热系数 ( $\text{W/m}^2\text{C}$ );

$q_{2,i}$ ——由于两侧温差,第  $i$  个外墙的内表面所获得的传热热流 ( $\text{W/m}^2$ );

$r_{hgs}$ ——第  $i$  个外墙的单位内表面积直接获得的太阳辐射热量和各种内扰的辐射热量 ( $\text{W/m}^2$ );

$\alpha_{r,i}$ ——线性化后的第  $i$  个外墙内表面和第  $j$  个外墙内表面之间的长波辐射换热系数 ( $\text{W/m}^2\text{C}$ );

$\varepsilon_{i,j}$ ——第  $i$  个外墙内表面至第  $j$  个外墙内表面的角系数 (*view factor*), 即表面  $j$  占表面  $i$  所可视范围中的百分比;

$t_{2,j}$ ——第  $j$  个外墙的内表面温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )。

经傅立叶变换后,方程形式为:

$$0 = \alpha_{c,a,i}(T_a - T_{2,i}) + Q_{2,i} + R_{hgs} + \sum_{j=1, j \neq i}^n \alpha_{r,i} \varepsilon_{i,j}(T_{2,j} - T_{2,i}) \quad (2.1.2-4)$$

### 2.1.3 室内空气热平衡表达式

对室内空气,考虑其与包围其的各内表面之间的对流换热,室内热扰以对流形式直接进入空气的部分,以及空气自身的蓄热,若用文字表达其热平衡方程的通式,应为:

单位时间内房间空气中显热量的增值=与各内表面之间的对流换热量+各种对流得热量

若用数学式表示则为:

$$\rho c V \frac{\partial t_a}{\partial \tau} = \sum_{i=1}^n \alpha_{c,a,i} F_i (t_{2,i} - t_a) + q C_{hgs} \quad (2.1.3-1)$$

式中:

$t_a$ ——室内空气温度 ( $^{\circ}\text{C}$ );

$t_{2,i}$ ——第  $i$  个外墙的内表面温度 ( $^{\circ}\text{C}$ );

$\alpha_{c,a,i}$ ——第  $i$  个外墙内表面与室内空气之间的对流换热系数 ( $\text{W/m}^2\text{C}$ );

$F_i$  ——第  $i$  个外墙的内表面积 ( $\text{m}^2$ );

$qC_{hgs}$  —— $n$  时刻来自照明、人体显热和设备显热等的对流散热量 ( $\text{W}/\text{m}^2$ );

$(\rho c)$  ——室内空气的单位热容 ( $\text{J}/\text{m}^3\text{C}$ );

$V$  ——房间体积 ( $\text{m}^3$ )。

经傅立叶变换, 得到的方程形式为:

$$\rho c V(j\omega)T_a = \sum_{i=1}^n \alpha_{c,a,i} F_i (T_{2,i} - T_a) + Q C_{hgs} \quad (2.1.3-2)$$

假设有  $n$  面外墙, 由(2.1.1-14)、(2.1.2-2)和(2.1.2-4)可知, 每面外墙可得到 4 个方程, 室内空气可得到 1 个方程, 所以共  $4n+1$  个方程; 而每面外墙的未知数也是 4 个 (内外表面温度和内外表面热流), 加上室内温度这个未知量, 共  $4n+1$  个未知量。所以方程组是封闭的, 可解。

## 2.1.4 外窗的处理

若房间有外窗, 对于外窗, 玻璃是有热容的非等温体, 考虑到其厚度极小, 导热热阻非常小, 导热系数较大, 可以把它看做是有热容的等温体, 即把它看作是一个计算节点, 考虑与室外空气之间的对流换热, 与室内空气之间的对流换热, 所吸收的太阳辐射热量, 以及玻璃自身的蓄热, 若用文字表达其热平衡方程的通式, 应为:

单位时间内外窗蓄热量的增值=与室外空气之间的对流换热量+与室内空气之间的对流换热量+吸收的太阳辐射热量

若用数学式表示则为:

$$(\rho c)_g V_g \frac{\partial}{\partial \tau} = \alpha_{c,a,g} F_g (t_a - t) + \alpha_{c,w} F_g (t_w - t) + q_{g,solar} \quad (2.1.4-1)$$

式中:

$t_a$  ——室内空气温度 ( $^{\circ}\text{C}$ );

$t$  ——玻璃的温度 ( $^{\circ}\text{C}$ );

$t_w$ ——室外空气温度 (°C);

$\alpha_{c,a,g}$ ——玻璃内表面与室内空气之间的对流换热系数 (W/m<sup>2</sup>°C);

$\alpha_{c,w}$ ——玻璃外表面与室外空气之间的对流换热系数 (W/m<sup>2</sup>°C);

$q_{g,solar}$ ——玻璃所吸收的太阳辐射热量 (W/m<sup>2</sup>);

$F_g$ ——玻璃表面积 (m<sup>2</sup>);

$(\rho c)_g$ ——玻璃的单位热容 (J/m<sup>3</sup>°C);

$V_g$ ——玻璃的体积 (m<sup>3</sup>)。

上式经傅立叶变换后, 方程形式为:

$$(\rho c)_g V_g (j\omega)T = \sum_{i=1}^n \alpha_{c,a,g} F_g (T_a - T) + \sum_{i=1}^n \alpha_{c,w} F_g (T_w - T) + Q_{g,solar} \quad (2.1.4-2)$$

增加了一个方程, 一个未知数。所以原来的方程组仍然封闭, 可解。

## 2.2 多房间建筑的处理

对多房间的处理与单个房间的方法是相似的, 唯一不同的是, 单个房间每面墙都是外墙, 外表面都跟外温作用, 而多个房间时, 每个房间都有内墙, 内墙的外表面是跟邻室温度作用的, 而邻室温度也是未知量。因此对多房间来说, 整个建筑每个房间通过室温互相作用而形成一个大方程组, 求解这个大方程组便可得到每个房间的室温。

## 第 3 章 DeST-h 的基本理论模型

本章介绍一下 DeST-h 的基本理论模型，并基于基本模型，设计合适的建筑模型来验证其主要脉络。

### 3.1 基本方程及其求解

#### 3.1.1 基本方程

假设组成建筑物的围护结构的各层材料各向均质同性，则墙体的导热可用偏微分方程描述：

$$\rho c \cdot c_p \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \quad 0 \leq x \leq l, \tau \geq 0 \quad (3.1.1-1)$$

其中， $\rho$ 、 $c_p$  和  $\lambda$  分别代表材料的密度、比热和导热系数， $t$ 、 $\tau$  和  $x$  分别代表温度、时间和距离。该方程加上墙体两侧的边界条件和整个墙体的初始条件构成一个定解问题，采用空间上离散而时间上保持连续的半离散化技术，处理该方程得到一个常微分方程组，由于建筑物有一系列围护结构，可以得到一系列常微分方程组。各围护结构表面之间的长波辐射以及各房间之间的空气对流渗透，使上述方程组相互关联成一个矩阵微分方程，描述了整个建筑物的热平衡：

$$C \cdot \dot{T}(\tau) = A \cdot T(\tau) + B \cdot Q(\tau) \quad (3.1.1-2)$$

其中  $C$  是由各状态点的热容组成的对角矩阵， $A$  是描述各状态点的导热、对流和辐射关系的方阵， $B$  是描述室外气象和室内热源对各状态点温度影响的矩阵， $T$  是由各状态点温度组成的列向量， $Q$  是室外气象、室内热源和供热空调设备供热供冷量组成的列向量，它包括室外空气温度、太阳辐射和室内各种热源， $\tau$  代表时间， $T$  上方的点代表  $T$  对时间的导数。

所以，在 DeST-h 的理论体系中，有 3 个要素：未知节点的温度，已知的建

筑模型的物性，已知的热扰。DeST-h 理论模型的基本思想就是用已知的建筑模型的物性和已知的热扰相互作用，得到未知的节点的温度。

### 3.1.2 方程求解

将(3.1.1-2)式简写为  $C\dot{T} = AT + BQ$ ， $C$  是由节点热容构成的  $n$  维对角阵， $A$  是描写节点相互影响的对称阵( $n*n$ )， $B$  反映了各种扰量作用在节点上的情况( $n*m$ )， $T = [t_1, t_2, \dots, t_n]^T$ 。因为  $C$  为对角阵，故对(3.1.1-2)式可作如下变换：

$$\sqrt{C}\dot{T} = \sqrt{C}^{-1}AT + \sqrt{C}^{-1}BQ \quad (3.1.2-1)$$

再将其变换为

$$\sqrt{C}\dot{T} = \sqrt{C}^{-1}A\sqrt{C}^{-1}\sqrt{C}T + \sqrt{C}^{-1}BQ \quad (3.1.2-2)$$

令  $\sqrt{C}T = T^\circ$ ， $\sqrt{C}^{-1}A\sqrt{C}^{-1} = A^\circ$ ， $\sqrt{C}^{-1}B = B^\circ$ ，则(3.1.2-2)式可写作

$$\dot{T}^\circ = A^\circ T^\circ + B^\circ Q \quad (3.1.2-3)$$

因为  $A$  矩阵是对角占优的对称阵， $C$  是对角阵，故可证明  $A^\circ$  是对称正定阵，并可写作  $A^\circ = P\Lambda P^{-1}$ ，其中  $\Lambda$  是由  $A^\circ$  的特征值构成的对角阵  $\Lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n]$ ，则有

$$\dot{T}^\circ = P\Lambda P^{-1}T^\circ + B^\circ Q \quad (3.1.2-4)$$

对其左乘  $P^{-1}$ ，则可将其变形为

$$P^{-1}\dot{T}^\circ = \Lambda P^{-1}T^\circ + P^{-1}B^\circ Q \quad (3.1.2-5)$$

若令  $P^{-1}T^\circ = T^*$ ， $P^{-1}B^\circ = B^*$ ，又可进一步写作

$$\dot{T}^* = \Lambda T^* + B^* Q \quad (3.1.2-6)$$

(3.1.2-6)式可以直接积分求解，其解的型式为

$$T^* = \int_{-\infty}^{\tau} \exp[\Lambda(\tau - \eta)] B^* Q(\eta) d\eta \quad (3.1.2-7)$$

由于有  $T^{\circ} = PT^*$ ,  $T = \sqrt{C}^{-1}T^{\circ}$ , 故由(3.1.2-7)式可推出

$$T = \sqrt{C}^{-1}P \int_{-\infty}^{\tau} \exp[\Lambda(\tau - \eta)]B^*Q(\eta)d\eta \quad (3.1.2-8)$$

由于用户关心的输出量  $y$  可能是  $T$  中各项的某种组合, 故可将  $y$  写作  $y = DT$ , 只考虑  $y$  是  $T$  的线性组合, 其中  $D = [d_1, d_2, \dots, d_n]$ , 则

$$y = DT = D\sqrt{C}^{-1}P \int_{-\infty}^{\tau} \exp[\Lambda(\tau - \eta)]B^*Q(\eta)d\eta \quad (3.1.2-9)$$

令  $\sqrt{C}^{-1}P = P^*$ ,  $DP^* = D^*$ , 则(3.1.2-9)可写成

$$y = D^* \int_{-\infty}^{\tau} \exp[\Lambda(\tau - \eta)]B^*Q(\eta)d\eta \quad (3.1.2-10)$$

将矩阵展开,  $Q = [q_1, q_2, \dots, q_m]^T$ , 重写(3.1.2-10)为

$$y = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \varphi_{ij} \int_{-\infty}^{\tau} \exp[\lambda_i(\tau - \eta)]q_j(\eta)d\eta \quad (3.1.2-11)$$

其中  $\varphi_{ij} = \sum_{k=1}^n d_k p_{ki}^* b_{ij}^*$ , 系数系列  $\{\lambda_i\}, \{\varphi_{ij}\}$  为所求。

改变采样矩阵  $D$  可以得到不同的输出, 进而研究更广泛的问题, 比如筛选出各个房间空气节点的温度值。

式(3.1.2-11)即为已知的建筑模型的物性与已知热扰相互作用的关系式。其中  $y$  是采样矩阵得到的输出,  $q_j$  表示第  $j$  个热扰, 在系数系列  $\{\lambda_i\}, \{\varphi_{ij}\}$  的作用下得到所需的输出量  $y$  (在 DeST-h 中, 这个输出量就是室内温度)。

## 3.2 房间温度计算

### 3.2.1 基础室温的概念

对于一个建筑物而言, 诸如室内人员设备发热量、太阳辐射等这类不加以控制的热扰, 可以认为是该建筑物的属性, 它们不随着设计的改变而变化, 因

此在不加以控制热扰作用下房间的温度，体现了建筑物各房间固有热特性，我们定义它为**基础室温**。**基础室温**只与建筑物本身的属性有关，与空调系统无关。

在进行建筑物评价时，只关心非空调热扰下房间的热状况，因此只要求出全年各房间的基础室温即可。当基础室温在舒适区内时，该房间不需要供热或者制冷；当基础室温超出舒适区范围时，出超的部分即是需要通过供热或制冷克服的温差。不同的建筑参数下、不同的内外扰下房间的基础室温是不同的，由此可以通过基础室温全年的分布对概念设计中的各参数进行评价。结合房间的设定值范围，可以求出房间负荷。从评估建筑热特性的角度看，基础室温和房间负荷是一致的，它们都可以作为概念设计阶段的建筑分析指标。但房间负荷因为以下的缺陷，不适用于后续的系统设计。

- 1) 房间负荷是在某一设定值范围下求出的房间的冷热需求量，在系统模拟时，各房间的设定值会根据需求进行调整，导致计算负荷也跟着发生变化。
- 2) 房间负荷是对每个房间单独计算的，必然根据房间温度设定值的上限或者下限计算出来，而系统往往包含多个房间，当采用统一的空气系统时，由于送风温度是统一的，很难保证所有房间温度都能等于其上下限，因此根据各房间的负荷很难准确地计算出空调机组的负荷。

所以，房间负荷无法满足研究建筑和系统分析两种需求，而基础室温则没有类似的问题。在系统设计时，建筑设计参数都已确定，基础室温也随之确定。由于基础室温包括了各种已知的扰量（太阳辐射、内部发热量等）的作用，因此系统模拟时只需在其基础上叠加空调系统的扰量即可。这样做一方面避免了大量的重复计算，另一方面因为基础室温不含有对于设定值、送风参数的假设，因此在进行系统计算时是精确的。与 RC 网络等简单模型相比，采用基础室温可以具有同样简单的形式，但无近似假设，是严格准确的模型。

### 3.2.2 基础室温的数学模型

基础室温就是求解建筑物在不加以控制热扰下房间的热状况，下面将给出基

于增强的状态空间法的基础室温的模型。

所谓增强的状态空间法，就是对每一个房间采用状态空间法进行求解，充分考虑包括太阳辐射、外温、各种内扰（人员、灯光、设备）、各墙面之间的长波互辐射以及室外、相邻房间的空气渗透等各种因素的影响，通过状态空间法求出各个热扰对本房间温度的影响。当考虑多个相邻的房间时，对本房间而言，相邻房间的室温也是一种热扰，由此建立起各个房间的关联，在此基础上通过联立求解求出所有房间的基础室温。

通过状态空间法，房间温度可表述成以下形式：

$$t_k(\tau) = \int_{-\infty}^{\tau} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \varphi_{ij} \cdot e^{\lambda_i(\tau-\eta)} \cdot q_j(\eta) \cdot d\eta \quad (3.2.2-1)$$

其中：

表 3.2.2-1：公式 3.2.2-1 中各字符的含义

$t_k(\tau)$	房间 k 的空气温度
$q_j$	房间 k 内热扰，包括太阳辐射、相邻房间、空调系统、照明、人员及设备等各种扰量
$\{\lambda_i\}$	状态空间法中各个建筑物空间特征值向量
$\{\varphi_{ij}\}$	采样后各种扰量对房间温度的影响系数
$n$	各种热扰的特征值的维数
$m$	热扰数

对于每个房间，其热扰可以划分成两个集合：

$Z_S$ ：空调系统热扰的集合；

$Z_P$ ：非空调系统热扰（被动热扰）的集合。

根据基础室温的定义，可以得到房间的基础室温的表达式：

$$t_{k,base}(\tau) = \int_{-\infty}^{\tau} \sum_{j \in Z_p} \sum_{i=1}^n \varphi_{ij} \cdot e^{\lambda_i(\tau-\eta)} \cdot q_j(\eta) \cdot d\eta \quad (3.2.2-2)$$



式(3.2.2-2)是求解房间基础室温的基本公式。对于一个房间的情形，由于所有的内扰都是已知的，将公式(3.2.2-2)写成直接计算的式子，推导如下：

### 1) 考虑只有一个房间的情况

$$t_{k,base}(\tau) = \int_{-\infty}^{\tau} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \varphi_{ij} \cdot e^{\lambda_i(\tau-\eta)} \cdot q_j(\eta) \cdot d\eta$$

在计算基础室温时，由于不考虑空调系统的影响，所有的内扰都是已知的，在相邻的计算时间步长内，采用一阶差值的方式表示内扰的变化，即：

当  $\eta \in [\tau - 2\Delta\tau, \tau - \Delta\tau]$  时，

$$q_j(\eta) = \frac{\eta - \tau + 2\Delta\tau}{\Delta\tau} q_j(\tau - \Delta\tau) + \frac{\tau - \Delta\tau - \eta}{\Delta\tau} q_j(\tau - 2\Delta\tau)$$

当  $\eta \in [\tau - \Delta\tau, \tau]$  时，

$$q_j(\eta) = \frac{\tau - \eta}{\Delta\tau} q_j(\tau - \Delta\tau) + \frac{\eta - \tau - \Delta\tau}{\Delta\tau} q_j(\tau)$$

公式 1-2-2 可以表示成两部分之和：历史项+当前项，即：

$$t_k(\tau) = \int_{-\infty}^{\tau - \Delta\tau} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \varphi_{ij} e^{\lambda_i(\tau-\eta)} q_j(\eta) d\eta + \int_{\tau - \Delta\tau}^{\tau} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \varphi_{ij} e^{\lambda_i(\tau-\eta)} q_j(\eta) d\eta$$

### 1) 历史部分

$$\text{记 } W(\tau - \Delta\tau) = \int_{-\infty}^{\tau - \Delta\tau} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \varphi_{ij} e^{\lambda_i(\tau-\eta)} q_j(\eta) d\eta$$

$W(\tau - \Delta\tau)$  反映了的热扰对于房间 k 历史上的影响（从开始到当前时刻的前一时间步长）

相应的，有：

$$W(\tau - 2\Delta\tau) = \int_{-\infty}^{\tau - 2\Delta\tau} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \varphi_{ij} e^{\lambda_i(\tau-\Delta\tau-\eta)} q_j(\eta) d\eta$$

而

$$\begin{aligned}
W(\tau - \Delta\tau) &= \int_{-\infty}^{\tau-2\Delta\tau} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \varphi_{ij} e^{\lambda_i(\tau-\eta)} q_j(\eta) d\eta + \int_{\tau-2\Delta\tau}^{\tau-\Delta\tau} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \varphi_{ij} e^{\lambda_i(\tau-\eta)} q_j(\eta) d\eta \\
&= W(\tau - 2\Delta\tau) + \int_{\tau-2\Delta\tau}^{\tau-\Delta\tau} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \varphi_{ij} e^{\lambda_i(\tau-\eta)} q_j(\eta) d\eta
\end{aligned}$$

有:

$$\begin{aligned}
&\int_{\tau-2\Delta\tau}^{\tau-\Delta\tau} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \varphi_{ij} e^{\lambda_i(\tau-\eta)} q_j(\eta) d\eta \\
&= \int_{\tau-2\Delta\tau}^{\tau-\Delta\tau} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \varphi_{ij} e^{\lambda_i(\tau-\eta)} \frac{\eta - \tau + 2\Delta\tau}{\Delta\tau} q_j(\tau - \Delta\tau) d\eta \quad \dots(\text{p1})
\end{aligned}$$

$$+ \int_{\tau-2\Delta\tau}^{\tau-\Delta\tau} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \varphi_{ij} e^{\lambda_i(\tau-\eta)} \frac{\tau - \Delta\tau - \eta}{\Delta\tau} q_j(\tau - 2\Delta\tau) d\eta \quad \dots(\text{p2})$$

$$(\text{p1}) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \frac{q_j(\tau - \Delta\tau)}{\Delta\tau} \varphi_{ij} \int_{\tau-2\Delta\tau}^{\tau-\Delta\tau} (\eta - \tau + 2\Delta\tau) e^{\lambda_i(\tau-\eta)} d\eta$$

$$= \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n e^{\Delta\tau \cdot \lambda_i} \frac{\Delta\tau \cdot \varphi_{ij}}{(\Delta\tau \cdot \lambda_i)^2} (e^{\lambda_i \Delta\tau} - \lambda_i \Delta\tau - 1) \cdot q_j(\tau - \Delta\tau)$$

$$(\text{p2}) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \frac{q_j(\tau - 2\Delta\tau)}{\Delta\tau} \varphi_{ij} \int_{\tau-2\Delta\tau}^{\tau-\Delta\tau} (\tau - \Delta\tau - \eta) e^{\lambda_i(\tau-\eta)} d\eta$$

$$= \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n e^{\Delta\tau \cdot \lambda_i} \frac{\Delta\tau \cdot \varphi_{ij}}{(\Delta\tau \cdot \lambda_i)^2} ((\lambda_i \Delta\tau - 1) e^{\lambda_i \Delta\tau} + 1) \cdot q_j(\tau - 2\Delta\tau)$$

记

$$\varphi_{0ij} = \frac{\Delta\tau \cdot \varphi_{ij}}{(\Delta\tau \cdot \lambda_i)^2} (e^{\lambda_i \Delta\tau} - \lambda_i \Delta\tau - 1)$$

$$\varphi_{1ij} = \frac{\Delta\tau \cdot \varphi_{ij}}{(\Delta\tau \cdot \lambda_i)^2} ((\lambda_i \Delta\tau - 1) e^{\lambda_i \Delta\tau} + 1)$$

则有:

$$w_{ij}(\tau - \Delta\tau) = e^{\lambda_i \Delta\tau} \cdot (w_{ij}(\tau - 2\Delta\tau) + \varphi_{0ij} q_j(\tau - \Delta\tau) + \varphi_{1ij} q_j(\tau - 2\Delta\tau))$$

$$W(\tau - \Delta\tau) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n w_{ij}(\tau - \Delta\tau)$$

至此建立起了“历史项”的递推关系。

## 2) 当前部分

$$\int_{\tau-\Delta\tau}^{\tau} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \varphi_{ij} e^{\lambda_i(\tau-\eta)} q_j(\eta) d\eta = \sum_j \psi_{oj} q_j(\tau) + \sum_j \psi_{1j} q_j(\tau - \Delta\tau)$$

$$(\eta \in [\tau - \Delta\tau, \tau])$$

其中：

$$\psi_{oj} = \sum_{i=1}^n \varphi_{0ij} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta\tau \cdot \varphi_{ij}}{(\Delta\tau \cdot \lambda_i)^2} (e^{\lambda_i \Delta\tau} - \lambda_i \Delta\tau - 1)$$

$$\psi_{1j} = \sum_{i=1}^n \varphi_{1ij} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta\tau \cdot \varphi_{ij}}{(\Delta\tau \cdot \lambda_i)^2} ((\lambda_i \Delta\tau - 1) e^{\lambda_i \Delta\tau} + 1)$$

所以，房间 k 的基础室温

$$t_{k,base}(\tau) = W(\tau - \Delta\tau) + \sum_j \psi_{1j} q_j(\tau - \Delta\tau) + \sum_j \psi_{oj} q_j(\tau)$$

$$= H_k + \sum_j \psi_{oj} q_j(\tau)$$

$$H_k = W(\tau - \Delta\tau) + \sum_j \psi_{1j} q_j(\tau - \Delta\tau)$$

当考虑多房间时，需要考虑当前时刻相邻房间的影响（通过墙体导热和串风），而该扰量与相邻房间的基础室温有关，因此需要根据房间的相邻关系，通过联立求解计算出各房间的基础室温。

## 2) 多个房间的情况

进行多个房间求解时，需要考虑相邻房间对本房间的影响，记属于相邻房间的热扰为集合 ADJ，进一步可将这些热扰分成有两类，一类是相邻房间的温度通过墙体传热对本房间的影响，与相邻房间的温度有关，记其集合为 ADJTran；另一类是与相邻房间的通风换气，与相邻房间的温度和换气量有关，记其集合为 ADJInf。房间的基础室温表达式变为：

$$t_{k,base}(\tau) = H_k + \sum_{\substack{j \neq \text{inf} \\ j \in ADJ}} \psi_{oj} q_j(\tau) + \psi_{0\text{inf}} G_{k,\text{inf}}(t_{\text{out}} - t_{k,base}(\tau)) + \sum_{j \in ADJ\text{Tran}} \psi_{oj} t_{j,base}(\tau) + \sum_{j \in ADJ\text{Inf}} \psi_{0\text{inf}} G_{jk,\text{inf}}(t_{j,base}(\tau) - t_{k,base}(\tau))$$

这样，整个建筑物内所有房间的基础室温可以通过求解联立方程组  $PT=U$  得出，其中，当建筑物房间个数为  $r$  时， $P$  为  $r \times r$  的矩阵， $T$  为  $r \times 1$  的向量， $U$  为  $r \times 1$  的向量，矩阵和向量定义如下：

$$P_{k,k} = 1 + \psi_{0\text{inf}} (G_{k,\text{inf}} + \sum_{j \in ADJ\text{Inf}} G_{jk,\text{inf}}) \quad (k=1..r)$$

$$P_{k,j} = \begin{cases} -\psi_{0j} - \psi_{0\text{inf}} G_{jk,\text{inf}}, & j \in ADJ, j \neq k \\ 0, & j \notin ADJ, j \neq k \end{cases} \quad (k,j=1..r)$$

$$T = \begin{bmatrix} t_{1,base} \\ \cdot \\ \cdot \\ t_{r,base} \end{bmatrix}, \quad U = \begin{bmatrix} u_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ u_r \end{bmatrix}$$

$$u_k = H_k + \sum_{\substack{j \neq \text{inf} \\ j \in ADJ}} \psi_{oj} q_j(\tau) + \psi_{0\text{inf}} G_{k,\text{inf}} t_{\text{out}}$$

在每一时间步长，求解上述方程组， $T=P^{-1}U$ ，即可求出每个房间的基础室温。

通过以上推导，基础室温可表达成较简单的形式：

$$t_{k,base}(\tau) = W(\tau - \Delta\tau) + \sum_j \psi_{1j} q_j(\tau - \Delta\tau) + \sum_j \psi_{oj} q_j(\tau) \quad (3.2.2-3)$$

其中， $W(\tau - \Delta\tau) + \sum_j \psi_{1j} q_j(\tau - \Delta\tau)$  为历史上各种热扰的影响，反映了房间的热惯性，记为  $H_k$ ， $\psi_{1j}$  和  $\psi_{oj}$  为第  $j$  个热扰单位量值前一时刻和本时刻对房间温度的影响。

$$\text{即, } H_k = W(\tau - \Delta\tau) + \sum_j \psi_{1j} q_j(\tau - \Delta\tau) \quad (3.2.2-4)$$

$$\text{则有: } t_{k,base}(\tau) = H_k + \sum_j \psi_{oj} q_j(\tau) \quad (j \in Z_p) \quad (3.2.2-5)$$

即当前时刻的基础室温等于历史上热扰的影响与当前各种热扰影响的叠加。

由于考虑了各种非空调热扰的影响,因此在概念设计阶段,通过公式(3.2.2-5)可以全面评价建筑物的热特性。不同的建筑参数,或者影响热扰的量值的大小,或者影响方程中的系数 ( $\{\lambda_i\}$ ,  $\{\varphi_{ij}\}$  或者  $\psi_{oj}$ ,  $\psi_{1j}$ ), 从而最终影响房间的基础室温。

### 3.3 建筑模型的确定

- ☆ 单个房间, 无通风, 在只有外温的作用下, 房间内的温度。
- ☆ 单个房间, 有通风, 在只有外温的作用下, 房间内的温度。通风作为一个热扰的特殊性在于: 它是跟室内温度有关的。所以对它的处理要单独拿出来进行验证。
- ☆ 单个房间, 无通风, 有一个窗户, 在只有外温的作用下, 房间内的温度。这个模型是为了验证对窗户的处理。
- ☆ 两个房间, 无通风, 在只有外温的作用下, 房间内的温度。
- ☆ 四个房间, 无通风, 在只有外温的作用下, 房间内的温度。这个建筑模型和上面的建筑模型都是为了验证对多个房间的处理。
- ☆ 四个房间, 互相之间有互通风, 在只有外温的作用下, 房间的温度。这个建筑模型主要是为了验证对房间之间互通风的处理。

## 第 4 章 验证实例

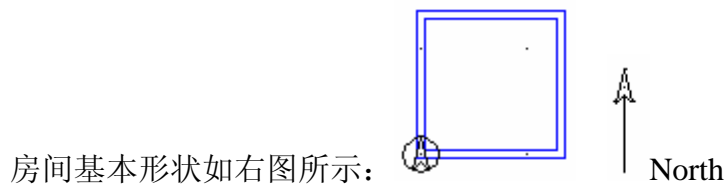
### 4.1 Single room

#### 4.1.1 Single room without windows

##### 背景

1. 单房间(4m\*4m\*4m)，无外门和外窗，六面围护结构均为 24 墙；
2. 房间悬空，即不考虑楼地的影响；
3. 只有外温作用，室外温度为振幅 50°C 的正弦波；
4. 无太阳辐射的影响；
5. 室内外无换气；
6. 室内没有任何热扰；
7. 室内家具系数取为 1。

##### 结果与分析：



本案例考虑的是单房间在仅有周期性外温作用下的情形。

*Fig.1* 是外温为振幅 50，周期 24 小时的正弦波时理论计算与 *DeST-h* 模拟计算的结果比较；

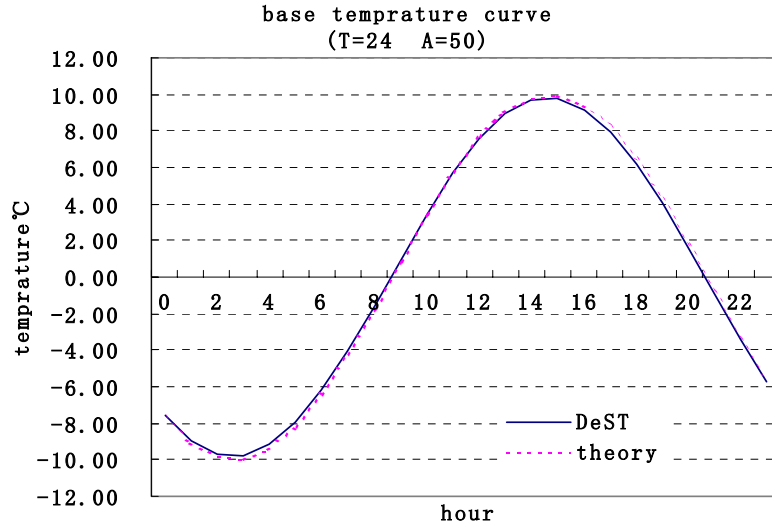


Fig.1 外温为振幅 50，周期 24 小时的正弦波时理论计算与 DeST-h 模拟计算结果比较

Fig.2 为此时模拟计算与理论计算结果的差别：

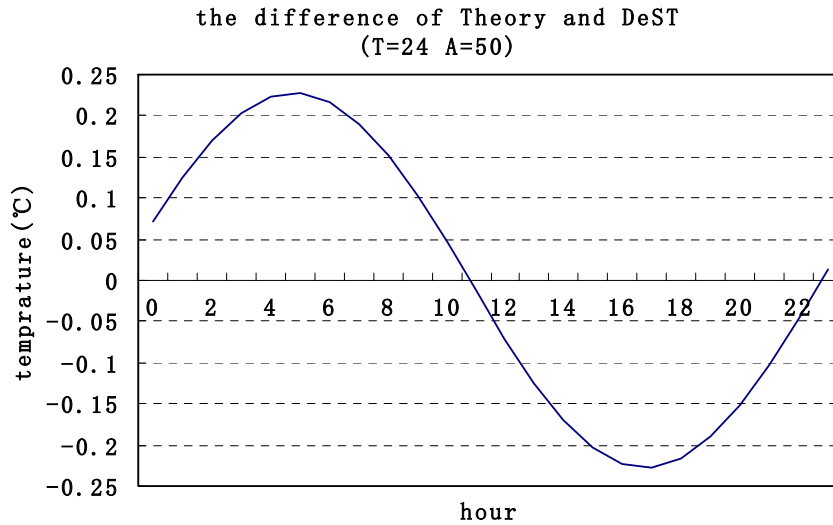
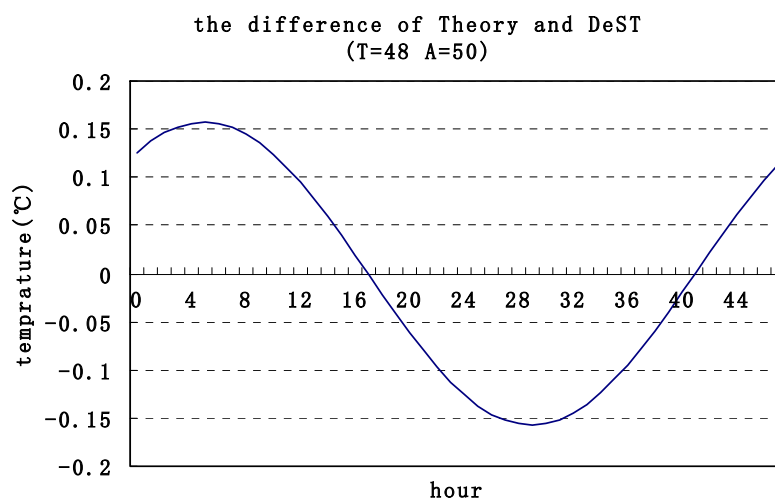


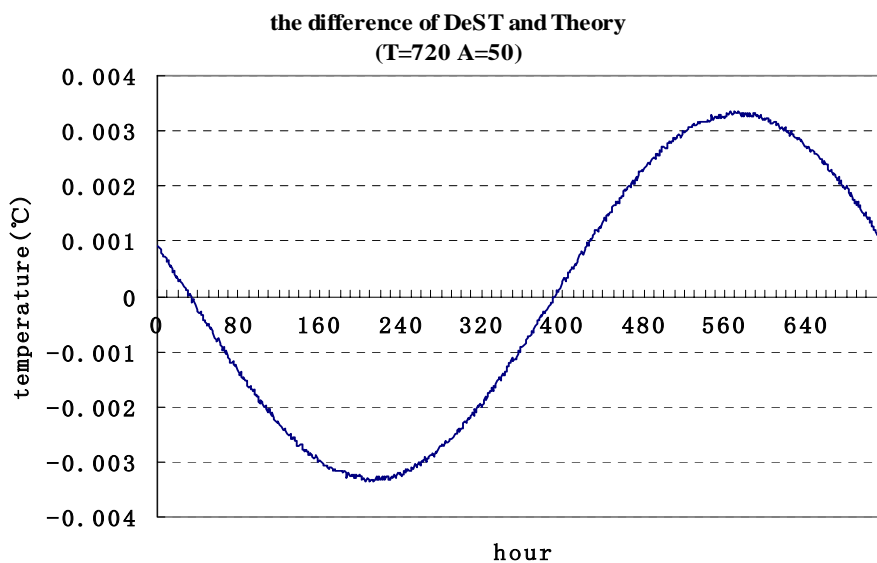
Fig.2 外温为振幅 50，周期 24 小时的正弦波，模拟计算与理论计算结果的差别

Fig.3 是外温为振幅 50，周期 48 小时的正弦波时模拟计算与理论计算结果的差别：



**Fig.3** 外温为振幅 50，周期 48 小时的正弦波，模拟计算与理论计算结果的差别

Fig.4 是外温为振幅 50，周期 720 小时的正弦波时模拟计算与理论计算结果的差别：



**Fig.4** 外温为振幅 50，周期 720 小时的正弦波，模拟计算与理论计算结果的差别

由 Fig.2、Fig.3 和 Fig.4 可以看出，随着外温周期的变大，模拟计算与理论计算的差别逐渐变小，外温周期为无穷大（即恒定外温）时，差别为 0。

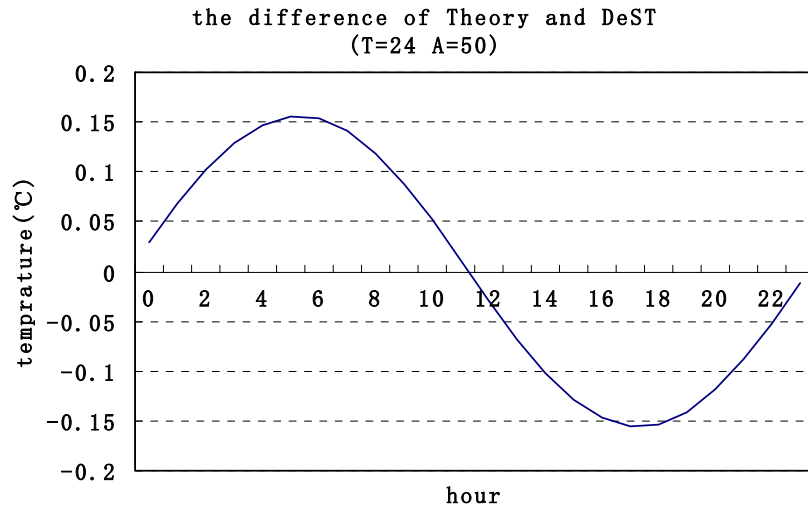
误差引起的原因有二：其一是在对围护结构传热的计算时，模拟程序是基于



时间上连续，而空间上离散的状态空间法，不同的分份得到的结果是有差别的，如果分为无穷多份，结果便等于理论解。因为实际处理中不可能做到，由此带来一定的误差；另一个原因是计算步长的问题，理论计算中扰量是按正弦波变化的，而模拟程序中给出的扰量是在每小时的时间段内，用直线段来近似的，这也带来一定的误差。

通过计算结果的比较可以看出，*DeST-h* 的计算温度和理论解相当接近，由此可以说明 *DeST-h* 对本案例的计算具有极高的可信度。

*Fig.5* 是外温为振幅 50，周期 24 小时的正弦波，加了一次外通风时，模拟计算与理论计算结果的差别。



**Fig.5** 外温为振幅 50，周期 24 小时的正弦波，模拟计算与理论计算结果的差别

从图上可以看出，*DeST-h* 对本案例的计算具有极高的可信度。

### 4.1.2 Single room with a window

#### 背景

1. 单房间(4m\*4m\*4m)，无外门— 3.6m\*3.6m 的外窗，六面围护结构均为 24 墙；
2. 房间悬空，即不考虑楼地的影响；
3. 只有外温作用，室外温度为振幅 50°C 的正弦波；

4. 无太阳辐射的影响;
5. 室内外无换气;
6. 室内没有任何热扰;
7. 室内家具系数取为 1。

结果与分析:

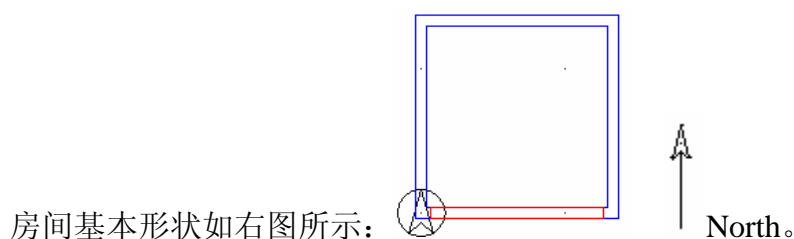


Fig.6 是外温为振幅 50, 周期 24 小时的正弦波, 加了一个窗户后, 模拟计算与理论计算结果的差别:

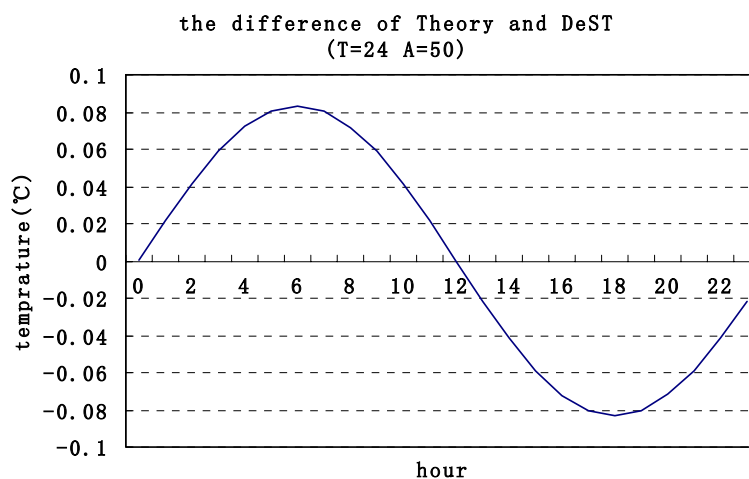
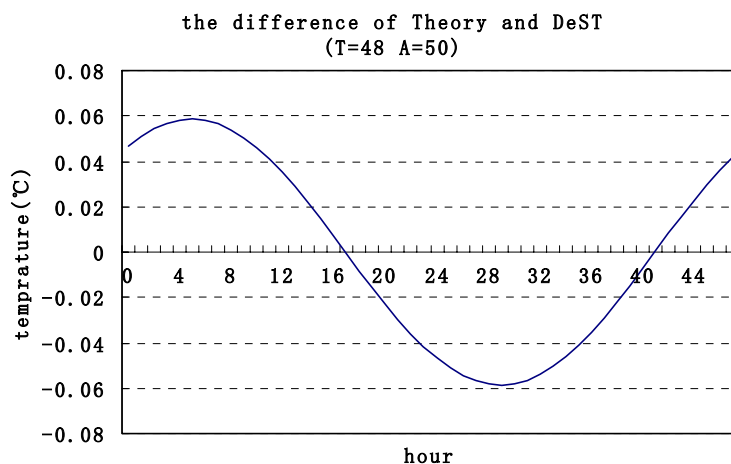


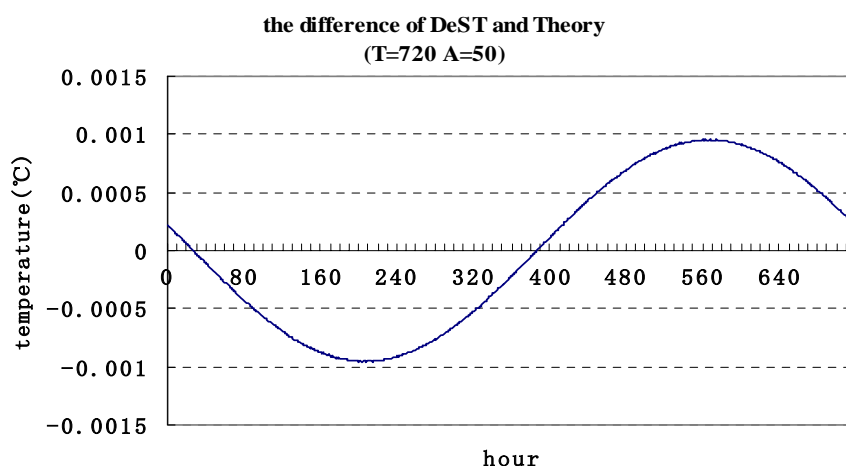
Fig.6 外温为振幅 50, 周期 24 小时的正弦波, 模拟计算与理论计算结果的差别

Fig.7 是外温为振幅 50, 周期 48 小时的正弦波, 加了一个窗户后, 模拟计算与理论计算结果的差别:



**Fig.7** 外温为振幅 50，周期 48 小时的正弦波，模拟计算与理论计算结果的差别

Fig.8 是外温为振幅 50，周期 720 小时的正弦波，加了一个窗户后，模拟计算与理论计算结果的差别：



**Fig.8** 外温为振幅 50，周期 720 小时的正弦波，模拟计算与理论计算结果的差别

从图上可以看出，*DeST-h* 对本案例的计算具有极高的可信度。

## 4.2 Double rooms

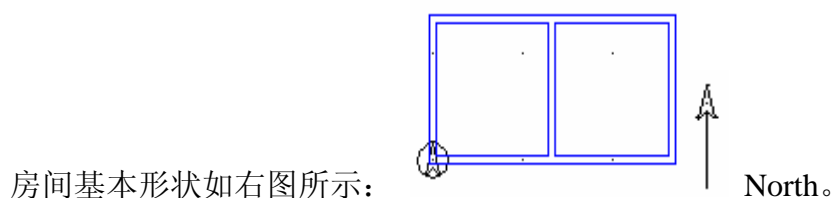
### 背景

1. 两个并列房间(4m\*4m\*4m)，无外门和外窗，每个房间六面围护结构均为 24

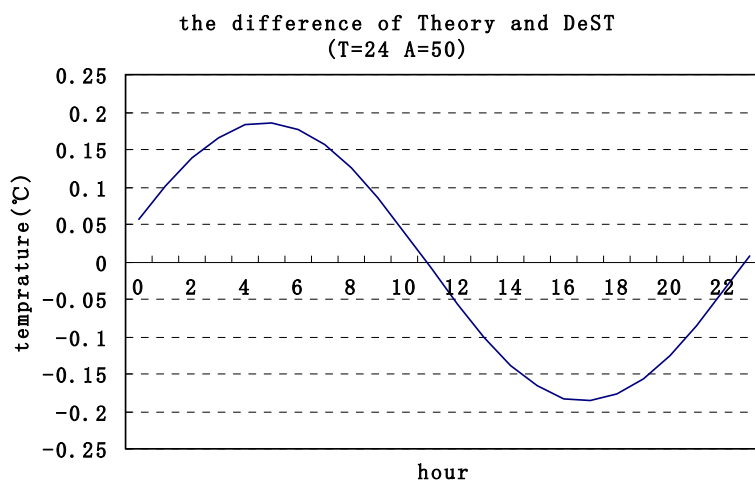
墙；

2. 房间悬空，即不考虑楼地的影响；
3. 只有外温作用，室外温度为振幅  $50^{\circ}\text{C}$  的正弦波；
4. 无太阳辐射的影响；
5. 室内外无换气；
6. 室内没有任何热扰；
7. 室内家具系数取为 1。

结果与分析：



*Fig.9* 是外温为振幅 50，周期 24 小时的正弦波时模拟计算与理论计算结果的差别：



**Fig.9** 外温为振幅 50，周期 24 小时的正弦波，模拟计算与理论计算结果的差别

*Fig.10* 是外温为振幅 50，周期 48 小时的正弦波时模拟计算与理论计算结果的差别：

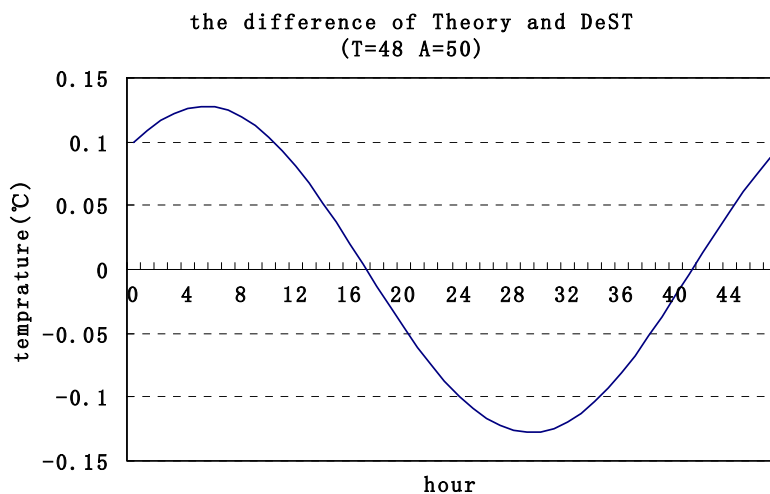


Fig.10 外温为振幅 50，周期 48 小时的正弦波，模拟计算与理论计算结果的差别

Fig.11 是外温为振幅 50，周期 720 小时的正弦波时模拟计算与理论计算结果的差别：

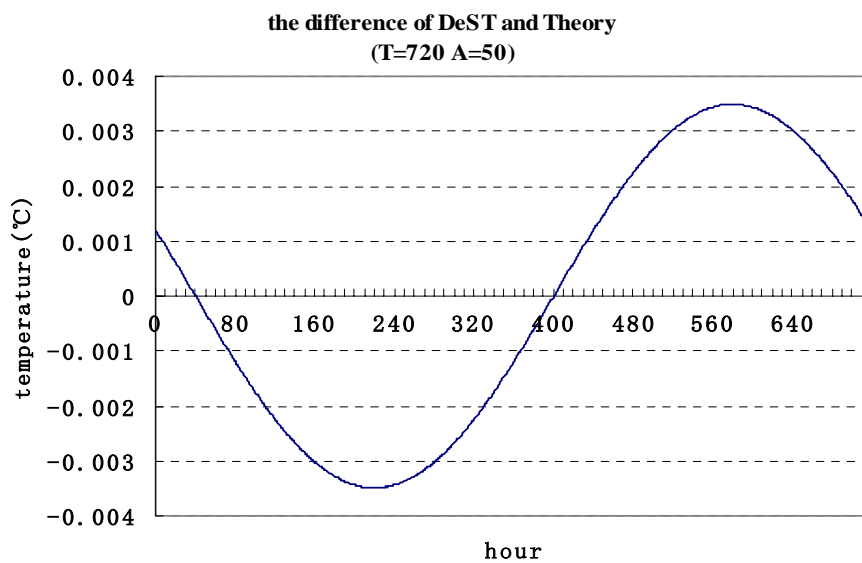


Fig.11 外温为振幅 50，周期 720 小时的正弦波，模拟计算与理论计算结果的差别

从图上可以看出， DeST-h 对本案例的计算具有极高的可信度。

### 4.3 Four rooms

#### 背景

1. 四个房间(4m\*4m\*4m)成田字形排列，无外门和外窗，每个房间六面围护结构均为 24 墙；
2. 房间悬空，即不考虑楼地的影响；
3. 只有外温作用，室外温度为振幅 50°C 的正弦波；
4. 无太阳辐射的影响；
5. 室内外无换气；
6. 室内没有任何热扰；
7. 室内家具系数取为 1。

#### 结果与分析：

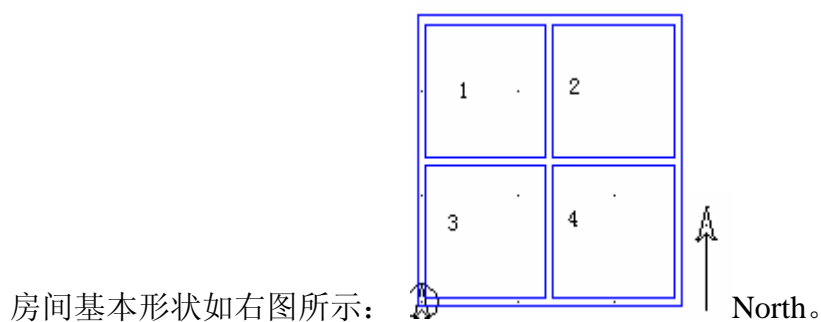
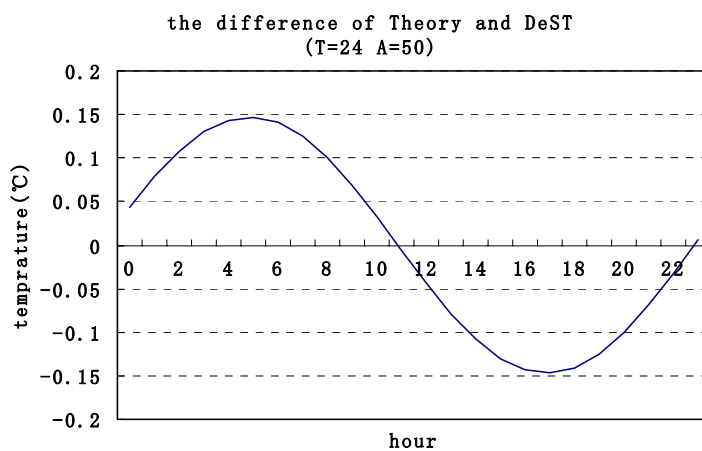
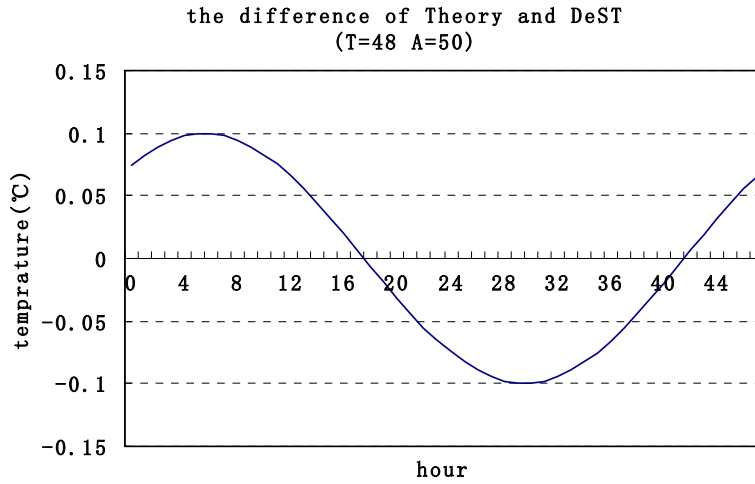


Fig.12 是外温为振幅 50，周期 24 小时的正弦波时模拟计算与理论计算结果的差别：



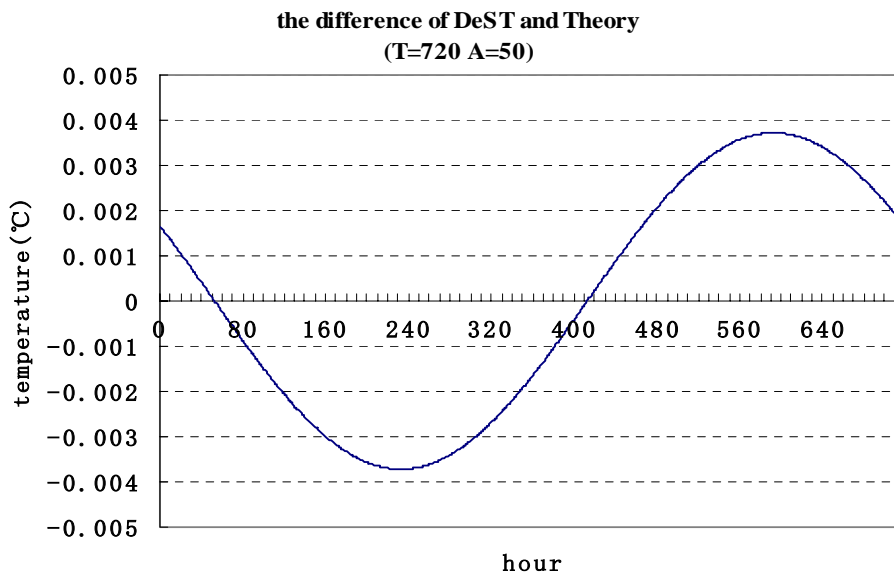
**Fig.12** 外温为振幅 50，周期 24 小时的正弦波，模拟计算与理论计算结果的差别

Fig.13 是外温为振幅 50，周期 48 小时的正弦波时模拟计算与理论计算结果的差别：



**Fig.13** 外温为振幅 50，周期 48 小时的正弦波，模拟计算与理论计算结果的差别

Fig.14 是外温为振幅 50，周期 720 小时的正弦波时模拟计算与理论计算结果的差别：

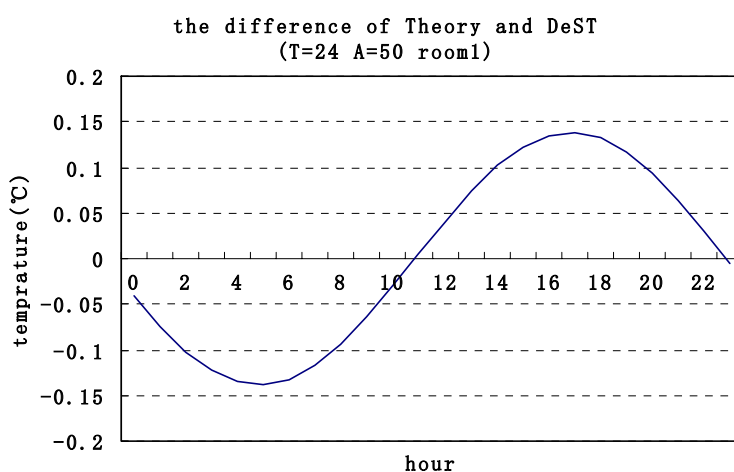


**Fig.14** 外温为振幅 50，周期 720 小时的正弦波，模拟计算与理论计算结果的差别

从图上可以看出，*DeST-h* 对本案例的计算具有极高的可信度。

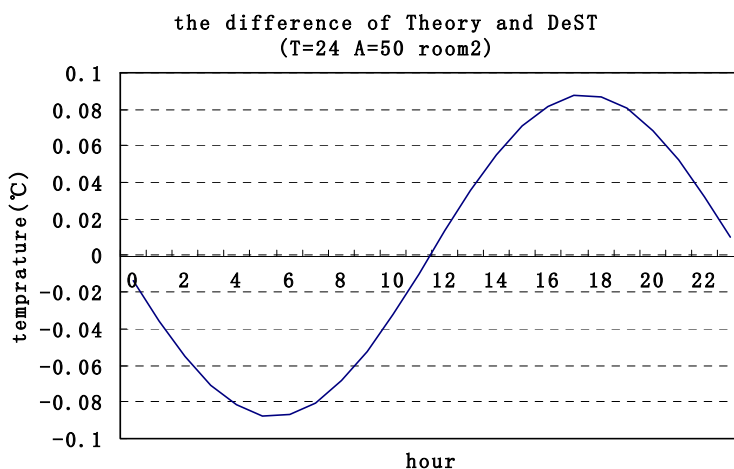
为了验证互通风的准确性，在上面模型的基础上，加入了房间互通风。房间 2 向房间 1 和房间 3 分别有 0.5 次的通风，房间 2 有一次的互通风。

*Fig.15* 是外温为振幅 50，周期 24 小时的正弦波时房间 1 模拟计算与理论计算结果的差别：



**Fig.15** 外温为振幅 50，周期 24 小时的正弦波，模拟计算与理论计算结果的差别

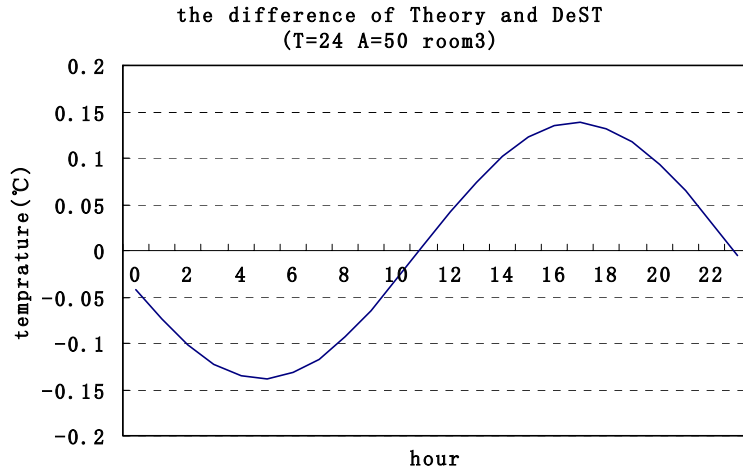
*Fig.16* 是外温为振幅 50，周期 24 小时的正弦波时房间 2 模拟结果与理论计算结果的差别：





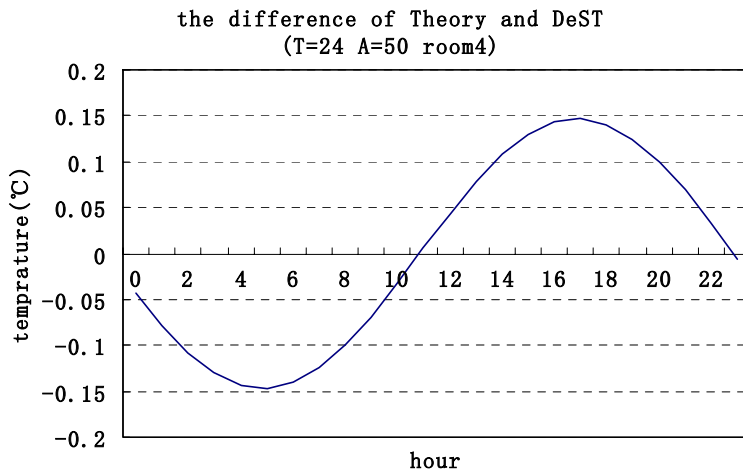
**Fig.16** 外温为振幅 50，周期 24 小时的正弦波，模拟计算与理论计算结果的差别

Fig.17 是外温为振幅 50，周期 24 小时的正弦波时房间 3 模拟结果与理论计算结果的差别：



**Fig.17** 外温为振幅 50，周期 24 小时的正弦波，模拟计算与理论计算结果的差别

Fig18 是外温为振幅 50，周期 24 小时的正弦波时房间 4 模拟结果与理论计算结果的差别：



**Fig.18** 外温为振幅 50，周期 24 小时的正弦波，模拟计算与理论计算结果的差别

从图上可以看出， DeST-h 对本案例的计算具有极高的可信度。