DeST 的热物理模型中地下部分传热研究

清华大学 谢晓娜 江亿

摘要

本文讲述的是将地下传热问题结合到动态模拟软件 DeST 中的问题。在地下传热问题上 虽然已经有了很多研究,但在将其与整个建筑的模拟结合起来方面,做的研究还很少,存 在着很多困难,本文致力于寻找一种简单易行而又不失准确的方法来解决这个问题。文章 首先用频域法分析计算了独立的地下传热过程;然后根据计算结果,求得地下区域热响应 系数,利用这些热响应系数将地下区域的传热融入到整个建筑中;最后讲述了地下传热数 据库的形式、内容、使用方法、适用范围等。为研究地下部分对底层房间热环境和能耗的 影响提供了有力的工具。

关键词 地下传热 DeST 频域响应法

0 前言

从地下传入室内的热量或者通过地下从室内传出的热量也是围护结构传热量的一个重要方面,尤其对寒冷地区的建筑物或者其它围护为轻型的建筑物【1】。关于地下传热问题, 无论在解析解还是数值解方面,前人都已经做了很多的研究,但大多都是针对单独的地下 部分。地下部分只有与整个建筑联合计算,才能得到它对房间热环境和能耗的影响,因此 将这个问题与整个建筑的动态模拟结合起来很有必要。现在对这个问题的研究的还比较少, 在可以进行建筑全年逐时动态模拟的软件中,围护结构部分都是按照一维传热处理的,即 对三维传热部件作了简化处理,将其变为一维问题处理,这样做不能很好的反映出三维部 件在房间热环境中的作用。

地下传热问题的计算,所用方法基本上可归于解析解法和数值法两种。解析解法形式 简单,使用方便,但只可以处理材料单一、形状规则的问题。数值法理论上可以处理任意 复杂的问题,但计算工作量比较大;而且即使是对同一个系统,对应每一种边界条件变化 情况,都必须从头计算一遍。

在模拟工具中,地下传热系统并不是孤立存在的,必须跟建筑其它各部分联合进行计 算,因此需要做一些迭代,这样计算量将更加巨大。如果按照系统学的观点把所研究的域 看作是一个导热系统,则所求解的不稳定导热问题就是研究这个导热系统在各种随时间任 意变化的输入扰量作用下所产生的响应。这是相当于研究在各种时变扰量作用下系统的输 出【2】。

这样,要解决的应是两部分的问题【2】:

- 求解系统的固有特性。按照控制论的原理,也就是求解系统的传递函数,它反 应的是系统本身的传热特性,与系统的输入参数的变化情况无关。这相当于对 系统的求解。
- 根据系统的固有特性,计算各种输入参数作用下的系统输出,这相当于根据系统的传递函数对系统进行模拟计算,得到输出量与输入量的关系。
- 3. 根据上面得到的输出量与输入量的关系,将地下传热问题与建筑其它部分的热

平衡方程联立求解,即将地下传热问题融入到整个建筑的全年动态模拟中。 本文共分为三部分:

- 1. 分析独立的地下传热过程。在这部分中,将地下部分从整个建筑物中分离出来, 分析清楚其热物理模型,并用数值方法求解地下系统对输入量的响应。
- 地下区域与整个建筑物的连接。在这部分中,首先根据上部分的计算结果,得 到地下区域的传递函数,即得到其热响应系数;然后利用这些热响应系数将地 下区域的传热融入到整个建筑中。
- 3. 地下传热数据库:说明了数据库的形式、内容、使用方法、适用范围等。

1 地下系统对输入量的响应

1.1 地下传热过程热物理模型的分析

图 1-(a)和 1-(b)是两种最基本的建筑与大地连接的方式,图 1-(a)是地板式连接方式,图 1-(b)是地窖式连接方式,以虚线为界,把地下部分从整个建筑中分离出来。





以地板式连接方式为例,确定地下部分的计算区域,如图2阴影部分所示:



图 2 地下部分计算区域

下面介绍一下计算区域的边界条件。





图 3 地下计算区域边界条件的设定

如图 3-(a)所示, 土壤与室内地板相接的表面, 边界条件取为定温边界条件, 温度为T,

即地板外表面的温度;如图 3-(b)所示,与大气连接的表面的热流包括:从土壤中传入的热量,太阳得热,与空气的对流换热,与天空和周围环境的长波辐射换热,为简单起见,可以根据表面的热平衡关系,预先计算出表面的温度*T_e*,将这个表面也作为等温边界条件来处理;如图 3-(c)所示,距离建筑外墙足够远处,大地受建筑物的影响就可以忽略,因此地表的土壤切面的热流量为 0,即为绝热边界条件;如图 3-(d)所示,大地到一定深度下温度变化很小,可以认为是恒温,温度约等于当地的年平均温度,确定计算区域时,向下一定深度得到与地表面平行的表面作为底面,保证到达恒温层,底面的边界条件是定温边界条件。

1.2 地下系统对其输入量的响应

在本文中,用频率响应方法来分析地下系统对各输入量的。

在自动控制理论中,存在着一种广泛应用的分析研究控制系统的方法,就是频域响应 的分析方法、又称频域法。该法对系统输入的信号是不同频率的正弦信号,并以输入信号 的频率作为自变量,来分析研究系统的各种性能。频域法中一个重要的概念就是频率特性。 对一个确定的线性定常稳态系统(或环节),在输出信号与输入信号达到同频率振荡时(即 系统已达稳态时),输出信号的振荡幅值与输入信号的振荡幅值之比,称为幅值比,用 A(*w*)

或*M*(*ω*)表示,且称之为系统(或环节)的幅频特性。输出信号的相位与输入信号的相位

之差,称为相角,以 $\varphi(\omega)$ 表示,称为该系统(或环节)的相频特性。综合系统的幅频特性和相频特性,称为系统的频率特性。对数频率特性曲线,即 Bode 图,是一种频率特性的图象表示法。它是把对数幅频 $L(\omega) = lg(A(\omega))$ 和相频 $\varphi(\omega)$ 分别画在同一个半对数坐标系

中的曲线【3】。

建筑围护各部分都是一个热力系统,也可以用频域方法对其进行分析。 对任意频率 *ω*,建筑各部分的动态热传导方程如下【4】:

$$a\Delta \tilde{T} = j\omega \tilde{T} \tag{1}$$

以上方程是在两个简化的基础上得到的:1、必须是一个线性系统,即系统内材料的热物性不随时间而改变;2、边界上作用的热扰是正弦波,频率为*ω*。

求解方程(1.1-1)最直接的方法是差分法,将计算区域进行离散,并在各离散区域的中心点建立热平衡方程:

$$s_{1}(\tilde{T}_{1} - \tilde{T}_{0}) + s_{2}(\tilde{T}_{2} - \tilde{T}_{0}) + s_{3}(\tilde{T}_{3} - \tilde{T}_{0}) + s_{4}(\tilde{T}_{4} - \tilde{T}_{0}) = dydx\rho c \frac{\partial T_{0}}{\partial \tau}$$
(2)

其中,
$$s_j = \frac{dy_0}{(\frac{dx_j}{2\lambda_j} + \frac{dx_0}{2\lambda_0})}, (j = 1, 3), \quad s_j = \frac{dx_0}{(\frac{dy_j}{2\lambda_j} + \frac{dy_0}{2\lambda_0})}, (j = 2, 4)$$

在式(1)中, \tilde{T} 是复数,在这里称它为复数温度。它的模和幅角等于相应点呈正弦波变化的温度的振幅和相位。

用上述方法求解,便可以得到整个计算区域的温度场。

定义 A_e 为当室内土壤表面温度 $ilde{T}_i$ 为0时,在单位室外土壤表面温度 $ilde{T}_e$ 的作用下,传入室内土壤表面的热量 $ilde{Q}_i$ 。

$$A_e = \frac{\tilde{Q}_i}{\tilde{T}_e} (\tilde{T}_i = 0) \tag{3}$$

定义 A_i 为当室外土壤表面温度 $ilde{T}_e$ 为0时,在单位室内土壤表面温度 $ilde{T}_i$ 的作用下,传入室内土壤表面的热量 $ilde{Q}_i$ 。

$$A_i = \frac{\tilde{Q}_i}{\tilde{T}_i} (\tilde{T}_e = 0) \tag{4}$$

这样,对于给定的表面,在每一个频率 ω 下, $ilde{Q}_i$ 都可以表示成边界温度 $ilde{T}_e$ 和 $ilde{T}_i$ 的响应之和:

 γ_e 、 ϕ_e 表示地下系统对频率为 ω 的单位室外地表温度的响应,分别为幅值比和相位差; γ_i 、 ϕ_i 表示地下系统对频率为 ω 的单位室内地表温度的响应,分别为幅值比和相位差。 A_e 和 A_i 的幅值比和相位差随频率的变化可以用自动控制理论中的 Bode 图来表示清楚,见下 面的图 5、图 6。





图 4 地下传热系统计算区域示意图

土壤为均匀介质, 热物性: $\lambda = 1.5$ W/m.K, $a = 0.75 \times 10^{-6}$ m²/s 计算得到的 Bode 图如下:



2. 地下区域传热问题与 DeST 中建筑其它部分的连接

地下区域传热问题与建筑其它部分的连接的主要着眼点有两方面:一是从土壤传入室 内部分土壤表面的热流用地下区域的热响应系数及输入热扰来表示,二是室内部分土壤表 面的温度和热流与地板外表面的温度和热流相同。根据上面数值计算得到的地下区域 Bode 图,计算出地下区域的热响应系数;然后根据室内部分土壤表面的温度和热流与地板外表 面的温度和热流相等的关系,将地下部分的热模型与整个建筑的热模型结合起来。

2.1 地下区域热响应系数的求解

上面已经得到地下传热系统的 Bode 图,用有理多项式来拟合 Bode 图,即得到系统的 相应传递函数【5】,进而求得可用于状态空间法计算的热响应系数。求解系统热响应系数 的流程图如下:



图 7 求解系统热响应系数的流程图

以图 5 中的 Bode 图为例,按照上面的流程图,得到对应的地下区域的热响应系数如下: 表1 地下传热系统热响应系数

gλ	$g arphi_e$	$g arphi_i$
-8.8860E-02	5.0860E-02	-3.2507E-01
-4.7047E-03	6.7535E-04	9.0525E-03
-1.4699E-03	1.2464E-04	7.3784E-04
-5.0744E-04	5.6623E-05	1.5475E-05
-1.1619E-04	1.9226E-05	2.7742E-06
-5.7378E-13	-6.9726E-18	-3.8871E-17

下面列出了用这些热响应系数求得的 Bode 图与原 Bode 图的比较:



图 8 Ae 的振幅和相位随 @ 的变化关系



图 9 Ai 的振幅和相位随 @ 的变化关系

结果分析:

从图 8-(a)中可以看出,当^{*ω*}<10⁻⁶时,拟合后的曲线和原曲线符合的很好,当^{*ω*}>10⁻⁶时,拟合后的曲线与原曲线有了一定的偏离,但偏离量并不大。图 10 是北京地区室外温度的谐波分析图,从图中可以看出,振幅比较大的谐波分量主要集中在^{*ω*}<10⁻⁶的范围内, *ω*>10⁻⁶的谐波分量,除了周期为 24 小时的部分,其它的振幅都很小,接近于 0;这样用 热响应系数进行计算时,周期为 24 小时的部分会有很小的误差,但周期为 24 小时部分的 振幅与稳态和频率小于 10⁻⁶的相比,只占其中的一小部分,所以这个频率下的计算误差相 对于整体的计算结果,将进一步减少。



图 10 北京地区室外温度的谐波分析图

从图 9-(a)中可以看出,当[@]<10⁶时,拟合后的曲线和原曲线符合的比较好,当[@]>10⁶时,拟合后的曲线与原曲线有了一定的偏离,并且在[@]>10⁻⁵时,偏离量比较大。室内温度的波动比室外温度小,因此高频部分的谐波分量的振幅更小,如图 11 所示。并且室内土壤 表面的温度是室内温度经过了地板的衰减,高频部分的谐波分量进一步减小。所以虽然拟 合后的曲线在高频部分跟原曲线有不少的偏差,但对整体计算结果的影响很小。



图 11 北京地区办公室室温的谐波分析图

2.2 地下区域传热模型与整个建筑的结合

DeST 中的热模型首先对房间各部分(墙体、楼板、屋顶、窗户等)进行离散,然后对 离散后的各节点列出热平衡方程【6】。求解房间的热平衡方程组,得到房间的热响应特性, 在此基础上进行一系列其它的计算。

对底层的房间,也按照上面的思路对房间各部分进行离散,因为地板与土壤相接,因 此需要特别处理一下。



图 12 地板离散示意图

如图 12 所示,地板外表面节点的温度等于与其相连的土壤表面的温度*T_i*,进入这个节 点的热流也等于从地下传入土壤表面的热流*Q_i*,所以这个节点的热平衡方程为:

$$c_p \rho \frac{\partial T_i}{\partial \tau} \cdot \frac{\Delta x}{2} = Q_i(\tau) + \frac{\lambda}{\Delta x} (T_2 - T_i)$$
(6)

在式(6)中,引入了扰量 $Q_i(\tau)$,是地下传热的计算结果。根据已经求得的地下区域的 热响应系数 $g\lambda_j$, $g\varphi_{ej}$, $g\varphi_{ij}$ (j=1,2...n),由状态空间法理论,从地下传入室内的热量都可以 用这些系数对 T_i 和 T_e 的响应表示出来:

$$Q_{i} = \int_{-\infty}^{\tau} \sum_{j} g\varphi_{ej} e^{-g\lambda_{j}(\tau-\xi)} T_{e}(\xi) d\xi + \int_{-\infty}^{\tau} \sum_{j} g\varphi_{ij} e^{-g\lambda_{j}(\tau-\xi)} T_{i}(\xi) d\xi$$
(7)

对式(1.2-2)进行积分变换可以得到当前时刻土壤表面温度和热流的关系:

$$Q_{i}(\tau) = his _g_disturb + t_{i}(\tau) \sum_{j} g\varphi_{ij,0}$$
(8)

其中 his _g _ disturb 是只与历史项、已知热扰项和系统热物性有关的量, 对 τ 时刻来

说,是一个已知量;
$$\sum g arphi_{10}$$
是只与系统热物性有关的量,是一个常数。

将式(8)代入式(6),则式(6)变为:

$$c_{p}\rho \frac{\partial T_{i}}{\partial \tau} \cdot \frac{\Delta x}{2} = his g - disturb + t_{i}(\tau) \sum_{j} g\varphi_{ij,0} + \frac{2\lambda}{\Delta x} (T_{2} - T_{i})$$
(9)

这样,地板外表面节点的热平衡方程就与房间其它节点的热平衡方程一样,其中的未 知量只包含自己本身的温度和房间其它节点的温度。处理完这个特殊的节点,就可以把地 下传热问题与建筑其它部分结合起来了,而且避免了复杂的迭代过程。

3 地下传热数据库

使得地下传热问题复杂化的因素还有一个,就是建筑几何形状的复杂性,利用本文上 面讲述的处理方法,可以处理任意复杂的情况。但是对地下土壤物性均匀,地板为矩形或 者地窖为长方体的建筑,利用无因次化方法【7】,可以归为两个很简单的数据库,方便了 DeST 的输入及数据库管理。

若建筑物地板是矩形的,土壤热物性是均匀的,以地板的宽度 B 为特征长度,对坐标进行无量纲化,则

$$\overline{x} = \frac{x}{B}, \, \overline{y} = \frac{y}{B}, \, \overline{z} = \frac{z}{B}$$
(10)

将(1.1-4)代入(1.1-3),得到新坐标下周期性边界作用下的传热方程:

$$i\frac{\hat{T}}{Fo} = \frac{\partial^2 \hat{T}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \hat{T}}{\partial \bar{y}^2} + \frac{\partial^2 \hat{T}}{\partial \bar{z}^2}$$
(11)

其中 $Fo = \frac{a}{\omega B^2}$

从上面的分析中可以看出,地板的长宽比相同的建筑物,具有相似性,其传热方程的 形式相同,因此可以采用同一组数据。任取一符合上述条件的建筑物,根据其宽长比 L/B 的值,从表中取出对应的系数 $g\lambda$ 、 $g\varphi_e$ 、 $g\varphi_i$; 然后根据定性尺寸 B、土壤导温系数 a 对上述系数进行修正,得到这个建筑物地下区域的热响应系数 $g\lambda$ 、 $g\varphi_e$ 、 $g\varphi_i$ 。然后用这 些热响应系数进行相应的模拟计算。

对地窖型问题,也可以建起相似的数据库。

4 结论

本文用频域响应法分析求解了地下传热问题,并将其很好的融入建筑模拟软件 DeST 对整个建筑的模拟计算中,避免了复杂的迭代运算;相似理论的运用,大大简化了数据库, 使计算变得简单。为研究地下传热部分在底层房间热环境计算和能耗模拟中的作用,提供 了有力工具。

参考文献:

- 1. P. G. RICHARDS, E. H. MATHEWS. A Thermal Design Tool for Buildings in Ground Contact. Building and Environment, Vol .29, No.1, pp73~82, 1994
- 江亿.地下空间自然环境温差利用的热物理基础研究.博士论文,清华大学热能工程 系,1985
- 3. 俞眉芳. 自动控制原理与系统. 高等教育出版社, 2000
- 4. Guofeng Mao. Thermal Bridges. PhD Thesis. Division of Building Technology, Department of Building Sciences Kungliga Tekniska Hogskölan, 1997.
- 5. 陈友明, 王盛卫. 湖南大学学报(自然科学版), 2000, 5 (27): 71~77
- 6. DeST 专业技术文档
- 7. JOHN CLAESSON, CARL-ERIC HAGENTOFT. Heat Loss to the Ground from a Building-I. General Theory. Building and Environment, Vol.26, No.2, pp. 195-208, 1991