

含有细小孔洞结构上的瞬态传热分析

周枫林*, 张见明

湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南长沙, 410082

Email: zhoufl@hnu.edu.cn

摘要

本文首次使用边界面法^[1-3]求解瞬态传热问题。本文利用时间相关的基本解, 得到瞬态传热问题的边界积分方程^[4]如下:

$$c(y)u(y,t) + K \int_{t_0}^t \int_{\Gamma} u(x,\tau) q^*(y,x,t,\tau) d\Gamma(x) d\tau = K \int_{t_0}^t \int_{\Gamma} q(x,\tau) u^*(y,x,t,\tau) d\Gamma(x) d\tau \quad (1)$$

为避免体积积分, 本文采用了时间步卷积法求解该边界积分方程。在时间步卷积法中间, 假定每个时间步内的温度和流量都是不变的, 每一步未知量的计算都需要使用到前面所有时间步的计算结果, 即考虑前序所有时间步上温度和流量对当前时间步的影响。这样一来就不需要考虑每个时间步的初始条件, 从而避免对初始条件的体积积分。

对于含有大量细小孔洞特征的结构, 本文使用一种曲线小管单元^[5]用于孔洞表面上的变量拟合。在这种单元中采用的形函数是三角函数与拉格朗日插值函数的乘积, 在圆周方向采用三角函数做为形函数, 在长度方向则使用一般的拉格朗日形函数。同时, 在与小孔表面相交的其他面上, 构造了一种带有负部分的非连续三角形单元。在边界离散时, 不需要考虑小孔特征, 将圆形小孔的圆心做为边界面网格的一个顶点, 在与该顶点相关联的网格上定义该特殊单元。在计算边界积分时, 首先对完整的三角形单元进行积分, 最后再将三角形积分单元中负部分上的积分从总的积分中减去。这种特殊单元的构造使得边界面方法在对含有细小圆孔的结构进行分析时, 避免了复杂的网格尺寸过渡, 从而减小了计算规模。

值得注意的是, 在边界面法中, 所有边界表面上的变量插值与积分都是在面的参数空间中进行的, 因此小管单元中的形函数以及带负部分的三角形单元都是定义在参数空间中。而计算边界积分所需要的几何信息都是直接从几何模型上获得, 避免了由于几何模型与分析模型不一致所带来的积分误差。

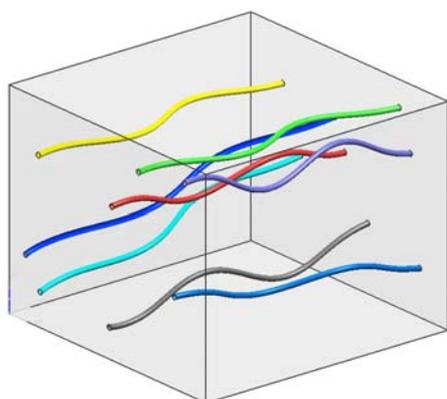


图1: 带有8个弯管小孔的方块

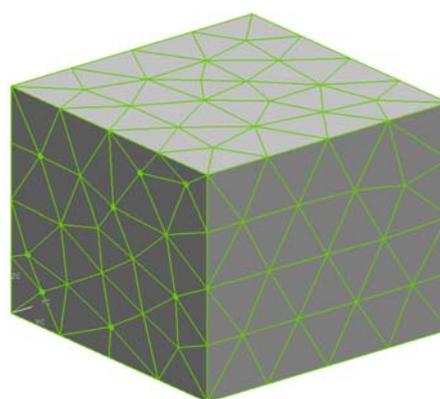


图2: 边界面网格

为验证算法的成立及计算精度，分析了一个带有 8 个弯管小孔的方块上的瞬态传热问题。模型如图 1 所示。方块尺寸为 $10 \times 10 \times 8$ ，小管孔洞半径为 0.05，扩散系数 $K = 0.125$ ， $x = 10$ 表面边界温度条件为 50，小孔面上的温度为 10，其他各边界表面上绝热。在不考虑初始条件和热源的情况下，我们分析 100 秒内温度随时间的变化。在 100 秒中，前 10 秒的分析采用 10 个分析步，在后面 90 秒中采用 18 个分析步。在边界面程序中，表面网格如下图 2 所示。一共使用了 268 个二次单元包括 18 个曲线小管单元，66 个带负部分的三角形单元以及 184 个正常的三角形单元。由于该问题的解析解不存在，因此我们使用商用有限元软件 ABAQUS 对该问题进行了分析，两种方法做了对比。在 ABAQUS 中我们采用了 87231 个二次四面体单元共 129594 个节点。为做比较，我们选定 8 个有限单元节点（如表 1 列出）做为观察点，分析温度随时间的变化，分析对比曲线如图 3 所示。图 3 中 F1 表示第 1 个观察点上有限元软件分析的结果曲线，B1 则表示边界面分析的结果曲线。图 3 显示出边界面方法分析结果跟有限元软件分析结果一致，但边界面方法的计算量要比有限元软件计算量小。该结果验证了边界面方法求解瞬态传热问题是可行的。

关键词： 边界面法，瞬态传热问题，时间相关基本解，时间步卷积法，具有小孔洞特征结构。

参考文献

1. Zhang JM, Qin XY, Han X, Li GY. A boundary face method for potential problems in three dimensions. *Int. J. Num. Meth. Eng.*, 2008; **80**: 320-337.
2. Qin XY, Zhang JM, Li GY, Sheng XM, Song Q. A finite element implementation of the boundary face method for potential problems in three dimensions. *Engng. Anal. Bound. Elemt.* 2010; **34**: 934-943.
3. 覃先云、张见明、庄超，基于参数曲面三维势问题的边界面法，*计算力学学报*，2011; **28**: 326-331.
4. Brebbia CA. *The Boundary Element Method for Engineers*. London Pentech Press, 1978.
5. Dargush GF, Banerjee PK. Application of the boundary element method to transient heat conduction. *Int. J. Num. Meth. Eng.*, 1991; **31**: 1231-1247.

1	2	3	4
(9.38,10,3.991)	(8.626,10,4.167)	(8.059,10,4.222)	(7.372,10,4.29)
5	6	7	8
(6.783,10,4.386)	(6.21,10,4.416)	(5.637,10,4.542)	(4.42,10,4.701)

表1: 8个观察点的位置

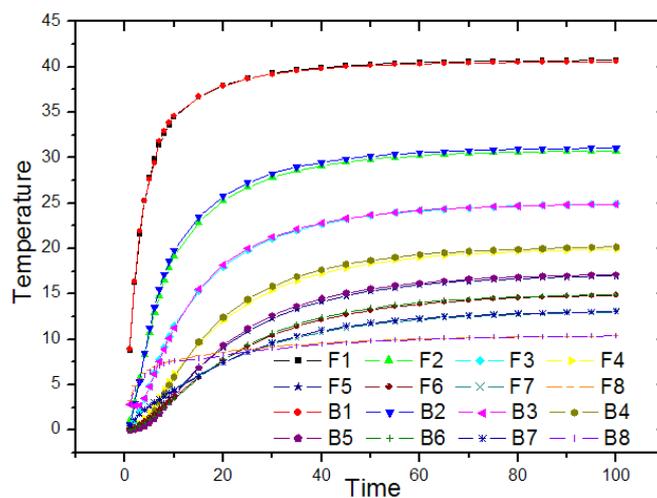


图3: 取样点上温度变化曲线