

## 二维稳态传热问题的计算机仿真

占惊春<sup>1</sup>, 汪继文<sup>1</sup>, 赵国智<sup>2</sup>

- (1. 安徽大学 计算智能与信号处理教育部重点实验室, 安徽 合肥 230039;
2. 中国科学技术大学 精密测控及智能信息处理实验室, 安徽 合肥 230027)

**摘要:** 热量传输现象在工程技术领域中广泛存在, 对二维稳态传热情形下温度场分布的研究有重要现实意义。对于复杂几何形状的物体和非线性的边界条件, 分析解法显得无能为力; 相比之下, 建立在有限元基础上的数值计算是有效和准确的。在传热和流体流动问题的数值计算方面, SIMPLE 算法被广泛采用。通过 VC 和 Matlab 的混合编程用 SIMPLE 算法实现了对二维稳态传热问题的计算仿真, 描述了温度场的分布。

**关键词:** 传热; 二维稳态; SIMPLE 算法; 计算机仿真

**中图分类号:** TP391.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-629X(2007)09-0237-03

### Computer Simulation of Two-Dimensional Steady-State Heat-Transfer Problems

ZHAN Jing-chun<sup>1</sup>, WANG Ji-wen<sup>1</sup>, ZHAO Guo-zhi<sup>2</sup>

- (1. Key Lab. of Intelligent Computing & Signal Processing, Anhui University, Hefei 230039, China;
2. Measuring & Controlling and Information Processing Lab., University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract:** Because heat transfer phenomena are widespread in the field of engineering technology, the researches on two-dimensional steady-state heat-transfer temperature field distribution have important practical significance. For objects with complex geometry and nonlinear boundary conditions, the analysis method is powerless; In contrast, the numerical calculation based on the finite element is valid and accurate. The SIMPLE algorithm is widely used in the numerical calculation of heat transfer and fluid flow problems. The mixed programming with Visual C++ and Matlab through SIMPLE algorithm make a computerized simulation for the two-dimensional steady-state heat-transfer problem, and the temperature field distribution is described in detail.

**Key words:** heat-transfer; two-dimensional steady-state; SIMPLE algorithm; computerized simulation

## 0 引言

热力学第二定律指出: 无论是气体、液体还是固体, 凡是存在着温度的差异, 就必然导致热量自发地从高温处向低温处传递, 这一过程被称为热量传递过程, 简称传热。

传热学是研究由温差引起的热量传递规律的科学。凡是有温度差的地方, 就有热量自发地从高温物体传向低温物体, 或从物体的高温部分传向低温部分。由于自然界和生产技术中到处存在着温度差, 所以传热就成为自然界和生产技术中的重要现象和值得关注的技术问题。

热量传输现象在工程技术领域中的应用十分广

泛, 特别是在热能动力工程、机械制造工程、制冷与空调工程、建筑、化工、新能源和宇航等工程中占有重要地位。在这些部门中, 许多设备的设计和运行大量地应用着传热学所总结出来的规律和研究成果。传热学的工程应用对于节约能源、节省原材料、控制生产过程, 甚至对新技术、新工艺的实现都将起着重大的作用。

传热现象是在一定的空间和时间中进行的。温差是热量传递的推动力, 是传热现象发生的根本原因。因此, 对传热现象的研究, 首要分析的是物体内部的温度分布。

对于温度场的计算问题, 分析解法是非常繁琐和复杂的, 在工程计算中最有效的是基于有限元理论的数值解法。1972年 S. V. Patankar 和 D. B. Spalding 提出的 SIMPLE 算法, 已经成为求解传热和流体流动的

收稿日期: 2006-11-21

作者简介: 占惊春(1983-), 女, 硕士研究生, 研究方向为智能计算;  
汪继文, 博士后, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能计算。

最重要方法<sup>[1]</sup>。文中在 SIMPLE 算法的基础上,通过 VC 和 Matlab 的混合编程,实现二维稳态传热问题的计算机仿真。

## 1 二维稳态传热

通常将某一瞬时物体内的温度分布称为该物体的温度场。一般来说,温度场是时间和空间的函数,其数学表达式如下:

$$t = f(x, y, z, \tau) \quad (1)$$

式中,  $x, y, z$  为空间坐标;  $\tau$  为时间坐标。

温度场分为两类,即稳态温度场和非稳态温度场。当温度场中各点的温度值随时间而变化时,这种温度场称为非稳态温度场。在非稳态温度场中的传热称为非稳态传热。例如,各种热力设备在起动、停车等变工况运行时的传热过程均属于非稳态传热过程。如果温度场中各点的温度值不随时间而变化,这种温度场则称为稳态温度场。在稳态温度场中的传热,相应地称为稳态传热。例如,各种热力设备在恒定工况下运行时的传热过程,均可看作是稳态传热过程。

在工况不变情况下运行的发动机以及稳定飞行状态下的飞行器结构中发生的传热现象,基本上是稳态传热。房间墙角的传热量,热网地下埋设管道的热损失和短肋片的传热等问题都是二维稳态传热问题,有些情况下甚至是三维稳态传热。在实际工程问题中,某一个或二个坐标方向上的温度差异可以忽略,而只需研究两个或一个坐标方向上的温度变化规律,则分别称为二维传热问题和一维传热问题,其温度场相应地称为二维温度场和一维温度场。文中主要是对二维稳态传热问题的研究,其应用更为广泛。

在二维稳态传热过程中,物体的温度不随时间发生变化,即

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0 \quad (2)$$

在没有内热源即  $q_v = 0$  的情况下二维稳态传热问题的微分方程式为:

$$\text{div}(\Gamma \text{grad } t) = 0 \quad (3)$$

其中  $\Gamma$  为扩散系数。

对于简单几何形状物体,给定线性边界条件下,上述传热微分方程式可以得到分析解<sup>[2]</sup>,但依然是相当繁琐和复杂的;对于复杂几何形状的物体和非线性边界条件下的传热问题,应用分析法几乎是是不可能的。在这种情况下,建立在有限差分法、有限元法和边界元法基础上的数值计算法是求解传热问题的十分有效的、具有足够准确性的近似方法<sup>[3,4]</sup>。计算机的应用给数值计算法带来了新的推动力。现在,许多复杂的传热

问题都可以得到满意的数值解。基于有限元理论的 SIMPLE 算法作为求解传热和流体流动的重要的方法,同样适用于对二维稳态传热问题的求解。

## 2 SIMPLE 算法的计算流程

SIMPLE 算法基于交错网格进行微分方程的求解,对于一个交错网格的控制容积(流体微元)如图 1 所示。

这种控制体覆盖整个计算域,构成二维直角坐标系的结构网络。经过这种离散化可以将微分方程转化为形如下式的差分方程进行求解。

$$a_P \phi_P = a_N \phi_N + a_S \phi_S + a_W \phi_W + a_E \phi_E + b \quad (4)$$

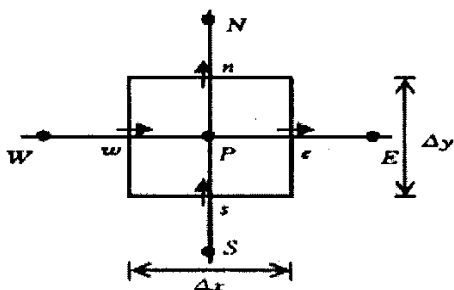


图 1 交错网格控制体

$N, S, W, E$  是四个节点,  $n, s, w, e$  是四个控制面。 $\phi_P, \phi_N, \phi_S, \phi_W, \phi_E$  是控制体节点和四个相邻节点上的通用变量值。

SIMPLE 算法对于传热和流体流动问题的求解策略是对于给定的压力场(它可以是假定值或是上一次迭代计算所得到的结果),求解离散形式的动量方程,得出速度场。因为压力场是假定的或不精确的,这样得到的速度场一般不满足连续方程,因此,必须对给定的压力场加以修正。其原则是与修正后的压力场相对应的速度场能满足这一迭代层次上的连续方程离散形式。据此原则,把由动量方程的离散形式所规定的压力与速度的关系代入连续方程的离散形式,从而得到压力修正方程,由压力修正方程得出压力修正值。接着,根据修正后的压力场,求得新的速度场。然后检查速度场是否收敛。若不收敛,用修正后的压力值作为给定的压力场,开始下一层次的计算,直至收敛为止<sup>[5]</sup>。

使用 VC++ 编写的 SIMPLE 算法的流程图,如图 2 所示。

## 3 VC 和 Matlab 的混合编程

VC++ 是 Windows 平台下强有力的高级编程语言,能够方便快速地开发出界面友好、执行速度快、易

于维护升级的软件系统,但是其数值运算能力低下。相比之下,美国 MathWorks 公司的 Matlab 具有强大的符号、数值运算、矩阵计算能力以及计算结果可视化能力,然而程序编写能力欠缺。因此 VC++ 与 Matlab 的混合编程前景广阔。

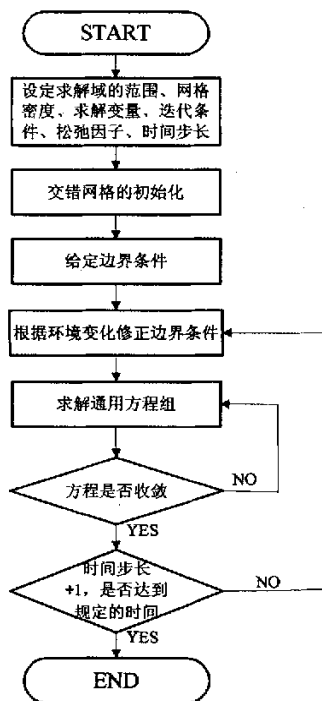


图2 基于 SIMPLE 算法的 VC 程序流程

VC++ 与 Matlab 的结合途径有多种,笔者将借助 Matlab 计算引擎函数库。所谓 Matlab 引擎(Matlab Engine),是一组 Matlab 提供的接口函数(Engine API 函数),它采用客户机/服务器计算模式,并且支持 C 语言。C++ 客户端通过调用 Matlab 引擎与 Matlab 服务器建立连接,从而实现动态通信<sup>[6]</sup>。

引擎程序如下:

engOpen:打开一个 Matlab 计算引擎

engClose:关闭一个 Matlab 计算引擎

engGetArray:从 Matlab 计算引擎得到一个 Matlab 矩阵

engPutArray:输送一个 Matlab 矩阵到 Matlab 计算引擎

engPutVariable:输送一个 Matlab 矩阵到 Matlab 计算引擎,并对该矩阵命名

engEvalString:执行一条 Matlab 命令

engOutputBuffer:创建一个缓冲区来存储 Matlab 文本输出

同时应该在 SIMPLE 算法的 VC 项目中,加入对

Matlab 的支持。

## 4 计算机仿真

对于二维稳态传热的微分方程,可采用 SIMPLE 算法,通过 VC 和 Matlab 的混合编程,进行数值求解,程序流程见图 2。

下面通过一个实例给出对二维稳态传热问题的数值模拟结果。

在一个二维区域, $x, y$  方向宽度为 20m,边壁上的温度(单位:℃)为:

$$T = x^2 + y^2 + x * y$$

扩散系数  $\Gamma = 1$ 。

在稳态温度场的情形下,其传热微分方程如(3)式:

$$\text{div}(\Gamma \text{grad } T) = 0$$

在 SIMPLE 算法中,设定  $x, y$  方向主控制体节点数为 7;最大迭代次数为 100;每次迭代的扫描次数为 10;计算结果如图 3 所示。

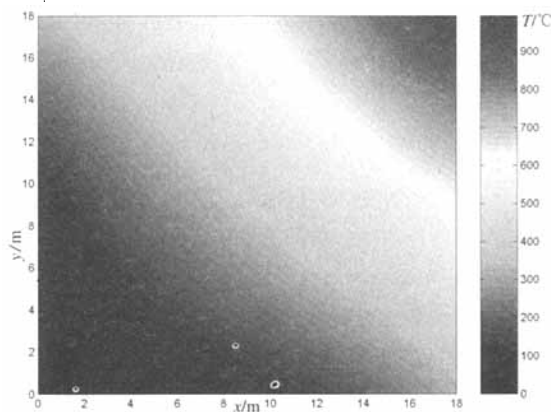


图3 二维稳态温度场的分布

图 3 中以不同的颜色代表通道区域内流体的温度。在计算域内对 0~1000℃ 范围的流体热量传输情形做了精确描述,实现了对二维稳态传热问题的计算机仿真。

应该指出,通过对基于 SIMPLE 算法的 VC 程序流程,第二步求解域、求解变量、网格密度、迭代条件、松弛因子的设定,第三步交错网格计算规则的设定,针对不同问题灵活处理,该程序具有扩展性。对于二维稳态传热之外其它传热和流体流动的问题依然具有应用价值。

## 5 结束语

由于热量传输现象在工程技术领域中广泛存在,

(下转第 243 页)

输入相应的网址或 IP 就可以进入服务器提供的网页,软件的具体实现框图如图 4 所示。

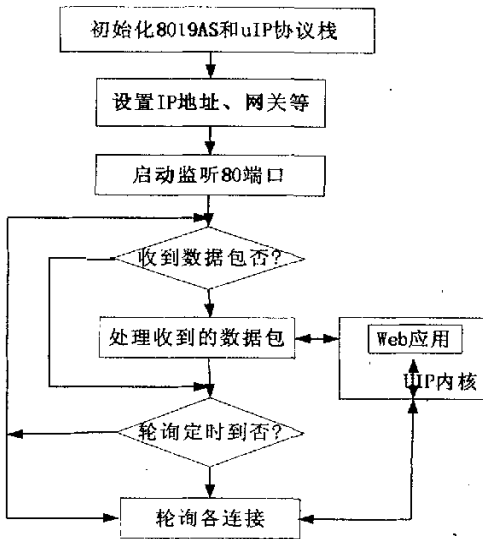


图4 软件具体实现框图

## 4 结束语

采用 uIP 嵌入式 TCP/IP 协议栈实现单片机上的 Web Server 功能,有着广泛的应用前景,可以用于实现远程水位<sup>[5]</sup>、温度等的控制系统中。为用户提供方便,同时该协议由开源源码的 C 语言编写,任何人都可以在网络上下载其源码,是将嵌入式系统接入网络的有效途径。

### 参考文献:

- [1] 温阳东,何 瑄,邓 簪.基于 RTL8019AS 的以太网接口单元研究[J].仪器仪表用户,2006(3):83-85.
- [2] 周明天,汪文勇.TCP/IP 网络原理与技术[M].北京:清华大学出版社,1999.
- [3] Dunkels A. uIP - A Free Small TCP/IP Stack[EB/OL]. 2002-01-15. <http://www.sics.se/adam/uip>.
- [4] 孙 林,钱 峰,将 青.TCP/IP 协议在嵌入式操作系统 UCOS-II 中的实现[J].山西电子技术,2006(3):31-33.
- [5] 张懿慧,陈泉林.源码公开的 TCP/IP 协议在远程监测中的应用[J].应用天地,2004(11):61-64.

(上接第 236 页)

Services[EB/OL]. IBM, version 1.1, 2nd public draft release. 2003-05. [www.ibm.com/developerworks/webservices/library/](http://www.ibm.com/developerworks/webservices/library/).

- [6] BPEL4WS: Business Process Execution Language for Web Services (version 1) [EB/OL]. 2003-05-01. [http://www-106.ibm.com/developerworks/web\\_services/li2brary/ws-bpel/2003](http://www-106.ibm.com/developerworks/web_services/li2brary/ws-bpel/2003).

(上接第 239 页)

因此对传热问题的研究是生产技术中值得关注的问题,在整个工艺流程中起重大作用。温度场的分布是传热学的主要研究对象。文中是对二维稳态传热问题的分析,其在工程实际中非常普遍,有重要研究意义。

对于复杂几何形状的物体和非线性边界条件下的温度场求解而言,分析解法显得无能为力;相比之下,由于现代计算机技术的发展,建立在有限元基础上的数值计算是十分有效和足够准确的。S. V. Patankar 和 D. B. Spalding 提出的 SIMPLE 算法是工程技术领域求解传热和流体流动问题最重要的方法。

在程序开发方面 VC 具有独特优势,在数值计算方面 Matlab 有着强大能力,因此选择结合 VC 和 Matlab 的优点编写 SIMPLE 算法,程序流程如图 2 所示。

文中对一个二维稳态传热问题做了计算仿真,描述了指定计算域一定温度范围内的热量传输情形,内部温度场的分布直观明了,对于传热和流体流动其它

问题的计算机仿真也有指导意义。

### 参考文献:

- [1] Patankar S V, Spalding D B. A calculation procedure for heat, mass, and momentum transfer in three-dimensional flows[J]. Int J Heat Mass Transfer, 1972, 15:1787-1806.
- [2] Hahne E, Grigull U. Formfactor und Formwiderstand der stationären ehrtdimen-sionalen Wärmeleitung[J]. Int J of Heat and Mass Transfer, 1975, 18(6): 751-767.
- [3] Logan D L. A First Course in the Finite Element Method [M]. third edition. [s. l.]: Thomson Learning, 2002.
- [4] 孔祥谦.有限单元法在传热学中的应用[M].北京:科学出版社,1986.
- [5] Bloesch E, Shyy W, Smith R. The role of mass conversation in pressure-based algorithms[J]. Numerical Heat Transfer, 1993, 24:415-429.
- [6] 谢佩军,计时明,张 力.VC++与 MATLAB 混合编程的探讨[J].计算机应用与软件, 2006, 23(2):128-130.