

文章编号: 1000-6893(2004)03-0222-04

自适应直角坐标网格方法在耦合传热数值模拟中的应用

孙纪宁, 陶 智, 徐国强, 丁水汀

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

The Application of Autoadaptive Cartesian Grid Approach on
Numerical Simulating Conjugated Heat Transfer

SUN Jǐning, TAO Zhi, XU Guoqiang, DING Shuǐting

(Department of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics & Astronautics, Beijing 100083, China)

摘 要: 首先介绍了耦合传热计算区别于一般的导热和对流换热过程的特点, 然后介绍了常用的计算方法应用于耦合传热计算遇到的困难及自适应直角坐标网格方法在耦合传热计算中的优势。最后用两个算例证明了采用自适应直角坐标网格方法数值模拟耦合传热问题是适用的。

关键词: 自适应; 直角坐标网格; 耦合传热; 数值模拟

中图分类号: V231.1 **文献标识码:** A

Abstract: The need for numerical simulating conjugated heat transfer with complex interface is recognized. Because of the complex interface, the normal approaches have difficulties in solving such problems. An autoadaptive Cartesian grid method approach to tackle the complex interface is developed. An autoadaptive Cartesian grid generator and 3D viscous convection flow solver have been developed and applied to solve two flow problems.

Key words: autoadaptive; Cartesian grid; conjugated heat transfer; numerical simulation

换热器、带肋通道等换热结构中都存在耦合传热问题。而复杂工程传热计算中, 耦合传热问题更是难以回避。目前, 传热数值计算主要应用贴体网格法、块结构化网格法及非结构化网格法^[1]。这些方法在处理不规则计算域方面发挥了巨大的作用。但耦合传热问题同一般的导热和对流换热问题的最大区别在于: 导热和对流换热问题一般只有外界面(包括多连通域), 而耦合传热问题不但有外部界面, 还有内部的耦合界面。这就给处理该类问题带来了很大的困难。最主要的困难就是需要根据耦合界面的分布, 把整个计算区域人工划分成多个子区域, 在不同的子区域中分别生成网格, 再把这些网格连接起来, 形成整个网格系统。这种处理模式需要大量的人工干预, 生成网格的质量很大程度上取决于计算人员的经验和水平。在求解过程中, 还要考虑各个网格块间参数传递等问题, 更增加了处理问题的难度。因此迫切需要一种便于处理耦合界面的计算方法。

自适应直角坐标网格方法是近年来发展起来的一种能较好处理复杂外形和便于内部加密的计算方法^[2]。它是在原始的均匀直角坐标网格基础上, 根据物面外形和物理量梯度场的特点, 在边界附近及物理量梯度较大的局部区域不断进行网

格细化, 用足够细密的阶梯形边界来逼近曲线边界并在物理量梯度较大处用较细密网格获得较高精度。只要不断进行网格细化, 该方法可以以任意精度模拟边界曲线, 且网格建立简单省时、网格加密容易。它不但可以处理单连通的区域, 而且适合更加复杂的多连通域, 并已成功用于一些复杂流场计算^[3-6]。但目前自适应直角坐标网格方法还主要限于单流体的流动计算, 对于传热问题乃至耦合传热问题的自适应直角坐标网格方法的研究还罕见文献报道。如果把该方法用于求解耦合传热问题, 则该方法可以方便地进行内部加密这一特点将为处理复杂的耦合传热计算提供其他方法无法相比的便利: 只要在耦合界面处不断进行网格细化, 该方法可以以任意精度模拟耦合界面, 方便地解决其他方法需要划分子区域分别生成网格的困难(如图 1 中, 在内部 V 形耦合界面处把网格不断加密, 以足够细密的阶梯形界面来模拟耦合界面)。另外, 由于整个网格不需要区分子区域, 不存在网格子系统间参数传递的问题, 大大简化了方程的求解。

1 应用于耦合传热问题的自适应直角坐标网格的建立

自适应直角坐标网格方法利用直角坐标系中

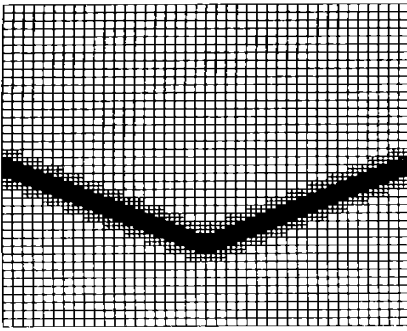


图1 应用于耦合传热问题的自适应直角坐标网格

Fig1 Adaptive cartesian grid

网格生成的最大优点))) 概念上的简便, 通过局部加密网格及边界上的一些特殊处理来适应不规则区域。这种直角坐标系的网格, 由粗网格以 1:4(二维)的方式不断细分而生成, 直到逼近曲线边界处的网格密度能满足要求为止。耦合传热计算由于要处理耦合界面, 相比一般导热和对流换热计算, 其网格系统的生成过程需要增加有关耦合界面的处理过程。

应用于耦合传热问题的自适应直角坐标网格的生成过程如下:

1 描述边界和耦合界面 用曲线(二维)或曲面(三维)描述计算边界和耦合界面。

° 生成初始网格 初始网格是一个给定的满足一定精度要求的直角坐标网格系统, 它是一个包含整个求解域在内的长方体。

» 判断网格同边界和耦合界面的关系 判断各网格在边界内、边界外或是同边界相交, 并判断网格同耦合界面是否相交。

¼ 判断需要进行细化的网格 同边界和耦合界面相交的网格为需要细化的网格。为了使粗细网格有一定的过渡, 对细化范围进行一定的扩展, 因此同上述网格相邻的一层网格也为需要细化的网格。

½ 将需要细化的网格细化。

¾ 删除无效网格, 并对网格重新排序。无效网格是指在计算域边界外的网格。

ı 重复° ~ ½步, 直到达到要求的精度。

À 把中心点在边界外的网格删除。

Á 判断各网格所属的几何区域, 标记不同介质, 为耦合计算做准备。

2 控制方程的离散及求解

(1) 连续方程、动量方程和能量方程分别为

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u w)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + L \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] + F_x \quad (2a21)$$

$$\frac{\partial(\rho v u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v w)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + L \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] + F_y \quad (2b21)$$

$$\frac{\partial(\rho w u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w w)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + L \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] + F_z \quad (2c21)$$

$$\frac{\partial(\rho_p u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_p v T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_p w T)}{\partial z} = k \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + Q \quad (3)$$

(2) 离散格式

应用有限体积法对控制方程组进行空间离散。

对流项离散格式: 一阶迎风格式;

扩散项离散格式: 中心差分格式;

源项离散格式: 局部线性化。

(3) 耦合速度场和压力场

应用 SIMPLE 算法建立压力修正方程, 使速度场和压力场同步得到改进并最终收敛。原有的 SIMPLE 算法在求解过程中存在无法检测出不合理棋盘压力场的缺点, 传统上应用交错网格的方法加以克服。考虑到自适应直角坐标网格属于非结构化网格, 所以应用动量插值方法建立同位网格, 在网格的同一节点上存储速度、压力、温度等变量。

(4) 边界条件

入口边界条件: 给定速度、压力、温度;

出口边界条件: 假设局部单向化;

壁面边界条件: 无滑移边界;

对称边界条件: 法向速度和各物理量法向梯度均为零。

(5) 求解线性代数方程组

应用 GS 迭代法求解离散化后的线性代数方程组。

3 算例

(1) 带不规则肋直通道

直通道加肋是耦合换热中最常见的一种强化换热结构, 其中不规则肋的应用越来越广泛。本文计算了一个带梯形截面肋的直通道(如图2)。

通道入口高度为 L , 通道全长 $516L$, 通道壁

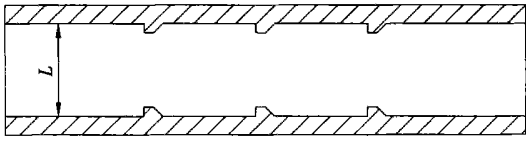


图 2 带梯形截面肋的直通道

Fig 2 A duct with trapeziform ribs

厚 0.12L; 肋高 0.11L; 肋宽 0.12L; 肋后部为 45° 斜角; 肋间距 L; 第一肋距入口 0.15L。

流体入口速度为 u_0 ; 入口温度为 T_0 ; 固体通道两端绝热, 固体通道外壁面温度为 T_w 。计算中流体为空气, 密度为 ρ 固体材料为钢。取雷诺数 $Re = 110 \times 10^3$ 。

由于耦合界面存在不规则的斜角, 因此在倾斜的耦合界面上进行了 3 层细化, 生成的网格如图 3 所示, 其中流体节点 6100 个, 固体节点 3556 个, 共 9656 个计算节点。

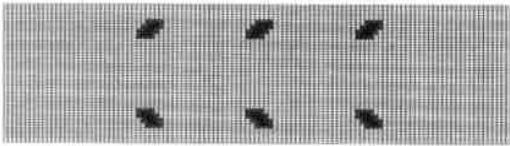


图 3 本程序所用的带梯形截面肋直通道计算网格

Fig 3 The mesh of the duct used by the program in this paper

为了对比, 用商用 CFD 软件 STAR2CD 计算了相同条件的耦合传热过程, 所用的计算网格如图 4 所示, 其中流体节点 4384 个, 固体节点 1888 个, 共 6272 个计算节点。

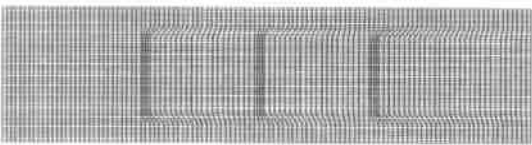


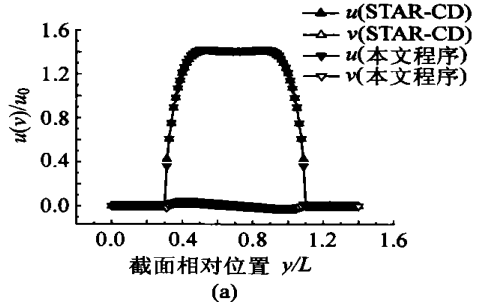
图 4 STAR2CD 所用的带梯形截面肋直通道计算网格

Fig 4 The mesh of the duct used by STAR2CD

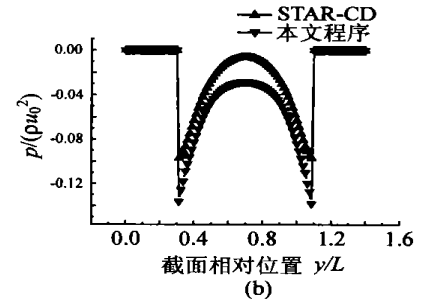
对比本程序和商用软件 STAR2CD 的计算结果, 得到通道 218L 截面位置的无量纲速度 $u/u_0, v/u_0$, 无量纲压力 $p/(Q_0^2)$ 和无量纲温度 $(T - T_0)/(T_w - T_0)$ 的对比图如图 5 所示, 其中无量纲速度平均偏差为 0.194%, 无量纲压力平均偏差为 2.173%, 无量纲温度平均偏差为 0.175%。

(2) 带内热源的顶盖驱动方腔流

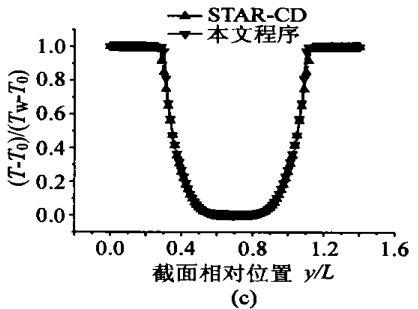
顶盖驱动方腔流是计算流体力学和计算传热学中验证算法和程序的一个经典问题。为了验证耦合传热, 在方腔中心位置增加了一个发热固体内热源(如图 6)。方腔边长为 L; 内热源对角线长为 0.15L; 顶壁拖动速度为 u_0 ; 方腔各壁为固定壁温 T_0 ; 内热源体加热率为 Q。计算中流体为空气, 密度为 ρ 固体材料为钢。



(a)



(b)



(c)

图 5 STAR2CD 和本程序对带梯形界面肋的直通道计算结果对比图

Fig 5 The results of a duct with trapeziform ribs by STAR2CD and the program in this paper

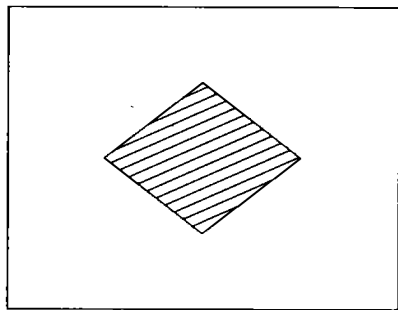


图 6 带内热源的顶盖驱动方腔流

Fig 6 A topdriving flow in a square cavity with a heat source

同耦合界面相交的网格细化了 3 层, 生成的网格如图 7 所示, 其中流体节点 4324 个, 固体节点 3084 个, 共 7408 个计算节点。

为了对比, 仍用 STAR2CD 进行了相同边界条件的计算。STAR2CD 所用的计算网格如图 8 所示, 其中流体节点 2400 个; 固体节点 400 个; 共 2800 个计算节点。

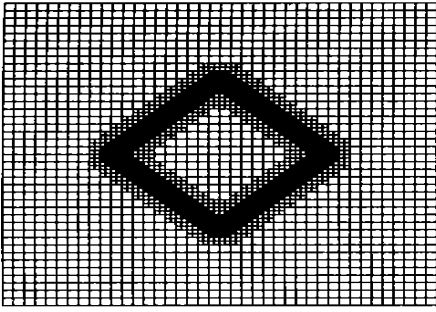


图7 本程序所用的计算网格

Fig 7 The mesh used by the program in this paper

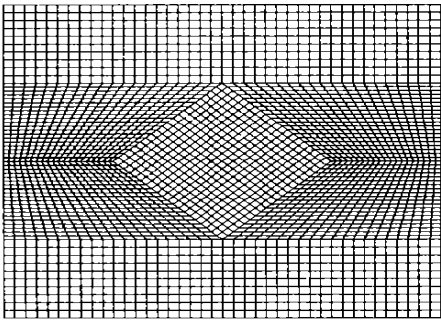
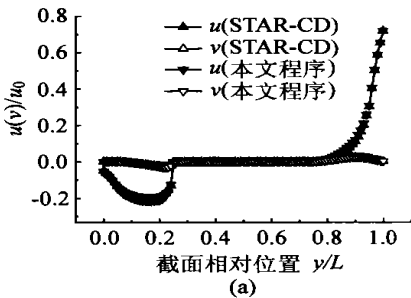


图8 STAR2CD所用的计算网格

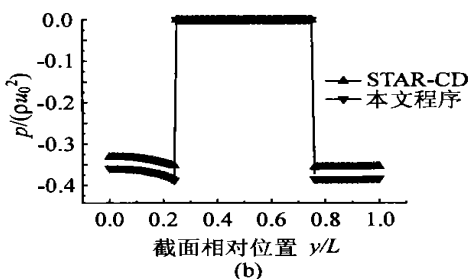
Fig 8 The mesh used by STAR2CD

图9为本程序和STAR2CD的计算结果在铅垂中心线剖面处的无量纲速度 u/u_0 、 v/u_0 、无量纲压力 $p/(Q_0^2)$ 和无量纲温度 $(T - T_w)/T$ ($T = QL^2/k_0$, 其中 k_0 为空气导热系数) 的对比曲线。

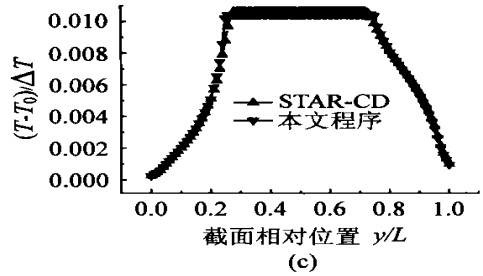
从两个结果的对比可以看出, 本程序得到了和STAR2CD基本相同的结果, 其中无量纲速度平均偏差为0.157%, 无量纲压力平均偏差为6.16%, 无量纲温度平均偏差为1.165%。



(a)



(b)



(c)

图9 STAR2CD和本程序对带内热源的顶盖驱动方腔流的计算结果对比图

Fig 9 The results of the square by STAR2CD and the program in this paper

4 结论

自适应直角坐标网格计算方法用于耦合传热数值模拟时, 体现出了网格生成和方程求解的便利性, 初步的验证性计算也得到了令人满意的结果, 说明该方法在耦合传热计算领域中是适用的。但对更复杂的耦合传热问题的适用能力还有待更进一步的研究。

参考文献

- [1] 陶文铨. 数值传热学[M]. 第2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
(Tao W Q. Numerical heat transfer [M]. 2nd Edition. Xi'an: Xi'an Jiao tong University Press, 2001.)
- [2] 朱自强, 张正科, 李津, 等. 网格生成和数值模拟的讨论[J]. 空气动力学报, 1998, 16(1): 64- 69.
(Zhu Z Q, Zhang Z K, Li J, et al. The investigation of grid generation and numerical simulation [J]. ACTA Aerodynamica Sinica, 1998, 16(1): 64- 69.)
- [3] Wang Z J. A quadtree-based adaptive Cartesian/quad grid flow solver for Navier-Stokes equations [J]. Computers & Fluids, 1998, 27(4): 529- 549.
- [4] Cumber P S, Fairweather M, Falle S A E G, et al. Body capturing in impacting supersonic flows [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 1998, 19: 23- 30.
- [5] Coirier W J, Powell K G. Solution of adaptive Cartesian cell approach for viscous and inviscid flow [J]. AIAA Journal, 1996, 34(5): 938- 945.
- [6] Pember R B, Bell J B, Eolella P, et al. An adaptive Cartesian grid method for unsteady compressible flow in irregular regions [J]. Journal of Computational Physics, 1995, 120(2): 278- 304.
- [7] 陶文铨. 计算传热学的近代进展 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.
(Tao W Q. Modern development in numerical heat transfer [M]. Beijing: Science Press, 2000.)

作者简介:

孙纪宁(1975-) 男, 辽宁辽阳人, 博士生, 1998年清华大学热能工程专业毕业, 同年进入北京航空航天大学动力工程系攻读博士学位, 专业方向为工程热物理, 主要从事涡轮高温旋转部件换热研究, E-mail: sunjning0422@sina.com.cn, 联系电话: (010) 82314545

(责任编辑: 刘振国)