

文章编号: 1000-8055(2008)02-0320-06

低温推进剂贮箱增压系统分布参数数值仿真 ($\tilde{N}$)贮箱的有限体积模型

陈 阳¹, 高 芳¹, 张振鹏¹, 杨思锋²

(1. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100083; 2. 北京航天试验技术研究所, 北京 100074)

摘 要: 从准一维可压缩瞬变管流的有限体积模型出发, 通过数值拓展和集成建立了一种考虑流体与箱壁传热的低温推进剂贮箱分布参数模型. 流场采用一维交错网格的有限体积模型, 可考虑变物性、轴向热传导、重力场、壁面传热影响; 壁面温度场采用圆柱坐标系下的轴对称二维有限体积模型, 可处理对流换热和辐射换热两种边界情况, 可处理具有包覆层或真空夹层结构的变物性管壁传热. 模型全面考虑了贮箱内的分布参数效应, 适用于贮箱增压计算领域.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 低温推进剂贮箱; 准一维瞬变管流; 二维瞬变传热; 有限体积方法; 数值仿真

中图分类号: V434

文献标识码: A

Distributed parameter numerical simulation for the transients of cryogenic propellant tank pressurization system ($\tilde{N}$) Finite volume model of tank

CHEN Yang¹, GAO Fang¹, ZHANG Zhenpeng¹, YANG Sifeng²

(1. School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,
Beijing 100083, China;

2. Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing 100074, China)

Abstract: Based on the finite volume model of quasi one-dimensional compressible transient pipe flow, a distributed parameter numerical model of cryogenic propellant tank was established by numerical development and integration in which the heat transfer between fluid and tank wall was considered. Two kinds of finite volume grids, which are interlaced in discrete space, were employed to establish the flow field model which can consider actions derived from variable fluid properties, axial heat conductivity, gravity and wall heat transfer. Two-dimensional finite control volume grids in axisymmetric cylindrical coordinates were employed to establish the temperature field model which could deal with two boundary heat transfer conditions including convection and radiation. Variable thermophysical properties of wall material and multilayer or vacuum sandwich structure of tank wall were also considered. The model comprehensively describes the distributed parameter effect in tank and is valuable in tank pressurization simulation field.

Key words: aerospace propulsion system; cryogenic propellant tank; quasi one-dimensional transient pipe flow; two-dimensional transient heat transfer; finite volume method; numerical simulation

收稿日期: 200701215; 修订日期: 200705215

作者简介: 陈阳(1972), 男, 河南漯河人, 博士后, 主要从事液体火箭发动机系统动力学与仿真研究.

作为液体火箭发动机能量的来源,低温推进剂贮箱是推进剂输送系统的核心组件,由于存在复杂的流-固、气-液两相瞬态传热传质现象,在低重力环境下还要考虑表面张力的影响,因此也是输送系统中研究难度最大的组件,对推进剂输送系统的研究不可避免地侧重于对贮箱的研究,反过来说,贮箱结构设计和数学建模的好坏程度也直接决定了推进剂输送系统设计和数学模型的可靠程度. Van Dresar^[1]对以往的贮箱增压计算技术进行了综述,范围涵盖常重力、低重力、无搅动、有搅动等情况,综合得到的许多观点为贮箱增压的数值研究提供了有价值的思路或方向. 通过把 Epstein2Anderson 关联式对液氢贮箱增压气体需求量的计算结果与试验结果进行的比较^[2],发现 E2A 关联式仅在某些特定情况下是可信的,当初始气枕体积超过贮箱体积的 20%、液体没有完全排空或者气枕部分贮箱壁面初始温度高于液体饱和温度时, E2A 关联式需要进行修正. Van Dresar 的结论实际上说明低温贮箱增压不仅与推进剂的消耗量有关,还与气枕、箱壁以及推进剂之间的传热传质有关,在某些情况下,后者所产生的影响是不能忽略的,同时也显示出经验关联式在增压估算方面的不足. 此后的许多文献针对贮箱建立了相应的数值模型,许多模型对贮箱中各种传热传质关系已经考虑得很全面^[34],不足之处是或多或少地采用了集中参数建模方法^[37],无法全面描述贮箱中气、液流场和壁面温度场的分层现象. SINDA/FLUINT 建立的贮箱模型^[8]可以考虑气枕和推进剂的热分层,只是该文侧重于软件介绍,未给出实际应用效果.

在贮箱的建模中,考虑贮箱内低温液体与气体之间复杂的传热传质关系,可以获得与试验数据符合较好的结果^[34],但是 Van Dresar^[1]曾经指出,地面增压试验中,在大多数无搅动的容器中,箱壁的传热作用是主要的,气-液界面上的传热作用则不明显. 根据这一事实,本文从准一维可压缩瞬变管流的有限体积模型^[921]出发,借鉴有限元状态变量模型体系^[12]对充填吹除过程的处理思想,通过数值拓展和集成建立了一种考虑流体与箱壁传热的低温推进剂贮箱分布参数数值模型,全面考虑贮箱中的分布参数效应.

1 贮箱一维流场模型

图 1 所示为发动机地面试车时常用的具有双筒真空夹层结构的低温推进剂贮箱. 由于贮箱流

场在结构上是一个气、液挤压式结构,因此可以借鉴吹除管道、容积的数学模型^[9, 12]进行分布参数建模. 流场建模时简化为一进一出贮箱,入口管道边界的半个单元以及贮箱上部椭圆封头部分组成贮箱的第零网格状态单元 V_0 , 可视作吹除容积; 出口液体管道边界的半个单元以及贮箱下部椭圆封头部分组成贮箱的第 $n+1$ 网格状态单元 V_{n+1} , 可视作吹除容积; 中间的直筒段可视作吹除管道, 划分为 n 个网格, 其中实线单元为状态单元, 虚线单元为速度单元. 在各状态单元内, 压强、密度、单位体积总能量等状态参数是瞬时一致和均匀的, 在各速度单元内, 速度是瞬时一致和均匀的. 设第 k 个状态单元为当前吹除单元, 其压强为 p_{k-1} , 气体部分的质量、体积、密度和温度分别为 M_g, V_g, Q, T_g , 液体部分的质量、体积、密度和温度分别为 M_L, V_L, Q, T_L . 第零和第 $n+1$ 网格单元忽略沿程和局部损失. 假设:

- 1) 气体为一维理想气体流动, 忽略重力场对

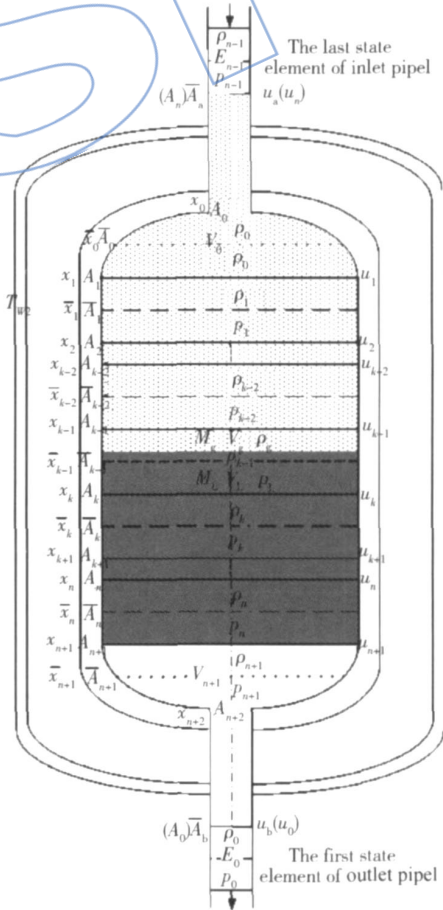


图 1 低温推进剂贮箱流场的有限控制体积单元
Fig. 1 Finite control volume grids of cryogenic propellant tank flow field

气体流动的影响;

2) 壁面为刚性壁,忽略壁面的弹性变形,壁面摩擦按准稳态计算;

3) 增压气体与推进剂不相溶,气体与推进剂之间有着明确的分界面,分界面处两者压强、速度相等;

4) 不考虑流体介质的传质作用,贮箱壁面与流体之间为对流换热;

5) 不直接考虑贮箱中气体与推进剂的传热作用. 方案一(等熵关系式假设):气液交界面(吹除单元)处增压气体密度由等熵关系式确定,温度由理想气体状态方程确定. 方案二(饱和温度假设):气液交界面处气体与液体温度等于当地压强下的推进剂饱和温度,气体密度由状态方程确定,液体密度等于饱和液体密度;

6) 不考虑推进剂的相变潜热,其状态由守恒方程和拟合的状态方程决定.

吹除单元移动的判别准则是:

1) $M_L < 0$, 当前吹除单元被正流气体所充满,下一单元变为新的吹除单元;

2) $M_g < 0$, 当前吹除单元被倒流液体所充满,上一单元重新变为吹除单元.

以下各式中, $C_{k-1} = \frac{M_g}{Q} \frac{1}{C_{p_{k-1}}} + \frac{M_L}{Q a_L^2}$, 声速

$a_L = \sqrt{\left(\frac{5e_L}{5Q} \right)_p \left(\frac{5e_L}{5p_{k-1}} \right)_Q}$, E 为单位体积总能量, e 为单位质量的内能, u 为流速, C 为气体的比热比, $\epsilon_p = Q \frac{5e}{5p}$, $\epsilon_Q = e + Q \frac{5e}{5Q}$ K 为流体导热系数, $\hat{q}$ 为流体对管壁的单位面积上的热流密度(按对流换热计算), S 为控制体所在位置管壁的内表面积, 气体常数 $R = R_0/M$, M 为分子摩尔质量, 普适气体常数 $R_0 = 8.3144 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$. 下标 a 和 b 表示贮箱边界参数; 上标 in 和 out 表示状态单元边界参数, 采用迎风格式.

1.1 第零网格状态单元 V_0 (视为吹除容积)

1) 当 $k=1$ 时, 第零网格状态单元开始吹除

a) 连续方程

$$\frac{dM_g}{dt} = \dot{Q} u_a \bar{A}_a, \frac{dM_L}{dt} = -\dot{Q} u_L \bar{A}_L \quad (1)$$

b) 能量方程

$$\frac{dp_0}{dt} = \frac{1}{C_0} \left[\frac{1}{Q} \frac{dM_g}{dt} + \frac{1}{Q} \frac{dM_L}{dt} \right] - \frac{(C-1)\hat{q}_g S_g}{V_0} - \frac{\hat{q}_L S_L}{V_0 \epsilon_{p_0}} +$$

$$\frac{C-1}{V_0} \frac{K(T_a - T_g)}{\$ X_a} \bar{A}_a - \frac{1}{V_0 \epsilon_{p_0}} \frac{K(T_L - T_1)}{X_1 - X_0} \bar{A}_L \quad (2)$$

c) 代数方程

方案一(等熵关系式假设)

$$\text{液相密度 } Q = Q \quad (3)$$

$$\text{气相密度 } Q = (p_0 / \text{CON}_0)^{\frac{1}{C}} \quad (4)$$

式中, 等熵过程常数 CON_0 由上一时层的气体压强、密度值确定.

方案二(饱和温度假设)

气相温度、密度

$$T_g = T_{L,\text{Sat}}(p_0), Q = p_0 / (RT_g) \quad (5)$$

$$\text{液相密度 } Q = Q_{\text{Sat}}(p_0) \quad (6)$$

液、气相体积

$$V_L = M_L / Q, V_g = V_0 - V_L \quad (7)$$

2) 当 $k > 1$ 时, 第零网格状态单元吹除过程完毕

a) 连续方程

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{1}{V_0} (\dot{Q} u_a \bar{A}_a - \dot{Q} u_L \bar{A}_L) \quad (8)$$

b) 能量方程

$$\frac{dp_0}{dt} = \frac{1}{V_0} \left[Q p_0^{\text{in}} u_a \bar{A}_a - p_0^{\text{out}} u_L \bar{A}_L + \frac{1}{2} (C-1) (\dot{Q} u_a^3 \bar{A}_a - \dot{Q} u_L^3 \bar{A}_L) + (C-1) \# \left[K^{\text{in}} \frac{T_a - T_0}{\$ X_a} \bar{A}_a - K^{\text{out}} \frac{T_0 - T_1}{X_1 - X_0} \bar{A}_L - \hat{q}_0 S_0 \right] \right] \quad (9)$$

$$\text{c) 温度计算公式 } T_0 = p_0 / (QR) \quad (10)$$

1.2 中间直筒段(视为吹除管道)

1) 非吹除单元单相模型

a) 连续方程 $1 \leq i \leq n$ 且 $i \neq k-1$

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{1}{V_i} (\dot{Q} u_i \bar{A}_i - \dot{Q} u_{i+1} \bar{A}_{i+1}) \quad (11)$$

b) 能量方程

气体单元 $i = 1, 2, \dots, k-2$

$$\frac{dp_i}{dt} = \frac{1}{V_i} \left[Q p_i^{\text{in}} u_i \bar{A}_i - p_i^{\text{out}} u_{i+1} \bar{A}_{i+1} + (C-1) \# \left[K^{\text{in}} \frac{T_{i-1} - T_i}{X_i - X_{i-1}} \bar{A}_i - K^{\text{out}} \frac{T_i - T_{i+1}}{X_{i+1} - X_i} \bar{A}_{i+1} - \hat{q}_i S_i \right] \right] \quad (12)$$

采用内能热力状态拟合公式^[12] 计算低温推进剂的内能, 则对液体单元 $i = k, k+1, \dots, n$

$$\frac{dp_i}{dt} = - \frac{\epsilon_Q}{\epsilon_{p_i}} \frac{dQ}{dt} + \frac{1}{V_i \epsilon_{p_i}} \left[(Q + p) u_i \bar{A}_i - \right]$$

$$\begin{aligned} & (Q + p)_i^{\text{out}} u_{i+1} A_{i+1} + K \frac{T_{i+1} - T_i}{X_{i+1} - X_i} A_i - \\ & K \frac{T_i - T_{i+1}}{X_{i+1} - X_i} A_{i+1} + Q f_{x_i} V_i \frac{u_i + u_{i+1}}{2} - \hat{q}_i S_i \end{aligned} \quad (13)$$

内能状态方程拟合公式 $e = e(p_i, Q)$ (14)

温度状态方程拟合公式 $T_i = T(p_i, Q)$ (15)

式中, 状态单元边界参数采用迎风格式, 即

$$\text{Var}_i^{\text{in}} = \begin{cases} \text{Var}_{i-1} & \text{if } u_i \geq 0 \\ \text{Var}_i & \text{if } u_i < 0 \end{cases}, \text{Var}_i^{\text{out}} = \begin{cases} \text{Var}_i & \text{if } u_{i+1} \geq 0 \\ \text{Var}_{i+1} & \text{if } u_{i+1} < 0 \end{cases}$$

$\text{Var}_i \in \{Q, p, K, e\}$, K 也可采用两边网格导热系数的调和平均值。

c) 动量方程 $j \in \{1, \dots, n+1\}$ 且 $j \neq k-1, k$

由于贮箱中直筒段轴向流速一般很小(对于本文研究的系统, $< 0.1 \text{ m/s}$), 因此速度单元作用力项中的惯性力项 $Q u^2 A$ 量级远小于压力项, 可以忽略, 则动量方程简化为

$$\frac{du_j}{dt} = \frac{2}{Q_1 V_{j-1} + Q V_j} (p_{j-1} A_j - p_j A_j + \frac{Q_1 f_{x_{j-1}} V_{j-1} + Q f_{x_j} V_j}{2}) - f_{R_j} \quad (16)$$

式中, $j=1$ 时 V_{j-1} 采用 V_1 , $j=n+1$ 时 V_j 采用 V_n ; $f_{x_j} = g \cos H$, H 为一维管流流动方向至重力加速度方向的旋转角, 贮箱直筒段一般为竖直放置的等截面圆筒, 因此 $H=0$, 从而 $f_{x_j} = g$, g 为重力加速度; $f_{R_j} = \frac{f_K |u_j| |u_j|}{2D_j}$, f_K 为准稳态的摩擦损失系数^[9210], D 为内筒内径。

2) 吹除单元均相模型

a) 连续方程

$$\text{气体单元} \quad \frac{dM_g}{dt} = Q_{i-1} u_{k-1} A_{k-1} \quad (17)$$

$$\text{液体单元} \quad \frac{dM_L}{dt} = -Q_{i-1}^{\text{out}} u_k A_k \quad (18)$$

式中, 状态单元边界参数采用迎风格式, 即

$$Q_{i-1} = \begin{cases} Q_{i-1} & \text{if } u_{k-1} \geq 0 \\ Q & \text{if } u_{k-1} < 0 \end{cases}, Q_i^{\text{out}} = \begin{cases} Q & \text{if } u_k \geq 0 \\ Q & \text{if } u_k < 0 \end{cases}$$

b) 能量方程

$$\begin{aligned} \frac{dp_{k-1}}{dt} &= \frac{1}{C_{k-1}} \left[\frac{1}{Q} \frac{dM_g}{dt} + \frac{1}{Q} \frac{dM_L}{dt} \right] - \\ & \frac{(C-1)\hat{q}_g S_g}{V_{k-1}} + \frac{C-1}{V_{k-1}} \frac{K_g(T_{k-2} - T_g)}{X_{k-1} - X_{k-2}} A_{k-1} - \\ & \frac{\hat{q}_L S_L}{V_{k-1} \epsilon_{p_{k-1}}} - \frac{1}{V_{k-1} \epsilon_{p_{k-1}}} \frac{K_L(T_L - T_k)}{X_k - X_{k-1}} A_k \end{aligned} \quad (19)$$

c) 动量方程

气体单元

$$\frac{du_{k-1}}{dt} = \frac{p_{k-2} A_{k-1} - p_{k-1} A_{k-1}}{\frac{1}{2} Q_{i-2} V_{k-2} + M_g} - f_{R_{k-1}} \quad (20)$$

液体单元

$$\begin{aligned} \frac{du_k}{dt} &= \frac{1}{M_L + \frac{1}{2} Q V_k} \left(p_{k-1} A_k - p_k A_k + \right. \\ & \left. \frac{f_{x_L} M_L + Q f_{x_k} V_k}{2} \right) - f_{R_k} \end{aligned} \quad (21)$$

d) 代数方程

方案一(等熵关系式假设)

$$\text{液相密度} \quad Q = Q \quad (22)$$

$$\text{气相密度} \quad Q = (p_{k-1} / \text{CON}_{k-1})^{\frac{1}{\gamma}} \quad (23)$$

式中, 等熵过程常数 $\text{CON}_{k-1} = p_{k-1} / Q$ 在进行吹除单元转换时从上一个吹除单元继承过来。在流场网格划分足够细的情况下, 也可近似由吹除单元上游临近气体单元的压强、密度值确定, 即 $\text{CON}_{k-1} = p_{k-2} / Q_{i-2}$ 。

方案二(饱和温度假设)

气相温度、密度

$$T_g = T_{\text{LSat}}(p_{k-1}), Q = p_{k-1} / (RT_g) \quad (24)$$

液相密度

$$Q = Q_{\text{Sat}}(p_{k-1}) \quad (25)$$

液、气相体积

$$V_L = \frac{M_L}{Q}, V_g = V_{k-1} - V_L \quad (26)$$

1.3 第 $n+1$ 网格状态单元 V_{n+1} (视为吹除容积)

1) 当 $k < n+2$ 时, 第 $n+1$ 网格状态单元尚未吹除

a) 连续方程

$$\frac{dQ_{i-1}}{dt} = \frac{1}{V_{n+1}} (Q_{i-1}^{\text{in}} u_{n+1} A_{n+1} - Q_{i-1}^{\text{out}} u_b \bar{A}_b) \quad (27)$$

b) 能量方程

$$\begin{aligned} \frac{dp_{n+1}}{dt} &= \left[\left(Q_{i-1} \epsilon_{n+1}^{\text{in}} + \frac{Q_{i-1} u_{n+1}^2}{2} + p_{n+1}^{\text{in}} \right) u_{n+1} A_{n+1} - \right. \\ & \left. \left(Q_{i-1}^{\text{out}} \epsilon_{n+1}^{\text{out}} + \frac{1}{2} Q_{i-1}^{\text{out}} u_b^2 + p_{n+1}^{\text{out}} \right) u_b \bar{A}_b + \right. \\ & K_{i-1} \frac{T_n - T_{n+1}}{X_{n+1} - X_n} A_{n+1} - K_{i-1} \frac{T_{n+1} - T_b}{X_b} \bar{A}_b - \hat{q}_{n+1} S_{n+1} + \\ & Q_{i-1} f_{x_{n+1}} V_{n+1} \frac{u_{n+1} + u_b}{2} \left. \right] \frac{1}{V_{n+1} \epsilon_{p_{n+1}}} - \frac{\epsilon_{n+1}^{\text{out}}}{\epsilon_{p_{n+1}}} \frac{dQ_{i-1}}{dt} \end{aligned} \quad (28)$$

2) 当 $k = n+2$ 时, 第 $n+1$ 网格状态单元开始吹除

a) 连续方程

$$\frac{dM_g}{dt} = Q_{i-1} u_{n+1} A_{n+1}, \frac{dM_L}{dt} = -Q_{i-1}^{\text{out}} u_b \bar{A}_b \quad (29)$$

b) 能量方程

$$\frac{dp_{n+1}}{dt} = \frac{1}{C_{n+1}} \left(\frac{1}{Q} \frac{dM_g}{dt} + \frac{1}{Q} \frac{dM_L}{dt} \right) - \frac{(C-1)\hat{q}_g S_g}{V_{n+1}} + \frac{C-1}{V_{n+1}} \frac{K_g(T_n - T_g)}{X_{n+1} - X_n} A_{n+1} - \frac{\hat{q}_L S_L}{V_{n+1} \hat{c}_{p,n+1}} - \frac{1}{V_{n+1} \hat{c}_{p,n+1}} \frac{K_L(T_L - T_b)}{X_{nb}} A_b \quad (30)$$

c) 代数方程: 与第零网格状态单元的类似.

2 壁面二维轴对称传热模型

圆柱形管道壁面的二维轴对称传热模型在文献[9, 11]中已经建立起来, 贮箱由于流场网格与一般管道略有不同, 其温度场网格也略有不同, 以下作简要说明. 假设:

- 1) 贮箱内筒管壁为长圆柱管, 最多为二层壁, 壁内热传导为轴对称的;
- 2) 如果为真空夹层结构, 内筒管壁与外筒管壁之间只存在辐射换热, 且外筒管壁温度恒定为环境温度;
- 3) 如果非真空夹层结构(例如单筒包覆层结构), 贮箱外环境介质温度为当地环境温度, 与管壁之间只存在对流换热;
- 4) 贮箱上部和下部的两个椭圆封头的传热可以等效为展开的圆柱壁面传热, 展开后的等效轴向长度等于封头部分在轴向的投影长度, 等效直径等于中间直筒段内径;

5) 根据轴对称假设, 椭圆封头展开后形成的圆柱轴向边界热流密度为零.

壁面轴向采用与流场状态单元相同的有限体积网格划分, 壁面径向采用一维非交错网格, 格心的布置方式如图 2 所示.

对轴对称圆柱坐标系下的非稳态导热微分方程在有限体积网格上进行空间离散后就得到常微分方程形式的轴对称二维传热模型, 贮箱壁面与管道壁面的传热模型^[9, 11]类似, 只是各方程适用的轴向网格范围变为 $i=0, 1, \dots, n+1$. 此外, 根据轴向边界热流密度为零的假设, 两个椭圆封头部分的传热模型如下:

$$\frac{dT_{0,k}}{dt} = \frac{1}{Q_p} \left\{ \left[\frac{K}{r_s r_s} - \frac{K}{r_{0,k}(r_s + r_n)} \right] T_{0,k+1} + \left[\frac{K}{r_s r_n} + \frac{K}{r_{0,k}(r_s + r_n)} \right] T_{0,k-1} + \frac{K}{s_x s_{x_e}} T_{1,k} - \left[\frac{1}{s_x} \frac{K}{s_{x_e}} + \frac{1}{r_s} \left(\frac{K}{r_s} + \frac{K}{r_n} \right) \right] T_{0,k} \right\},$$
$$\frac{dT_{n+1,k}}{dt} = \frac{1}{Q_p} \left\{ \frac{K_w}{s_x s_{x_w}} T_{n,k} - \left[\frac{1}{s_x} \frac{K_w}{s_{x_w}} + \frac{1}{r_s} \left(\frac{K}{r_s} + \frac{K}{r_n} \right) \right] T_{n+1,k} + \left[\frac{K}{r_s r_s} - \frac{K}{r_{n+1,k}(r_s + r_n)} \right] T_{n+1,k+1} + \left[\frac{K}{r_s r_n} + \frac{K}{r_{n+1,k}(r_s + r_n)} \right] T_{n+1,k-1} \right\}$$

$k=1, 2, \dots, n_w-1$ 且 $k \neq k_d$

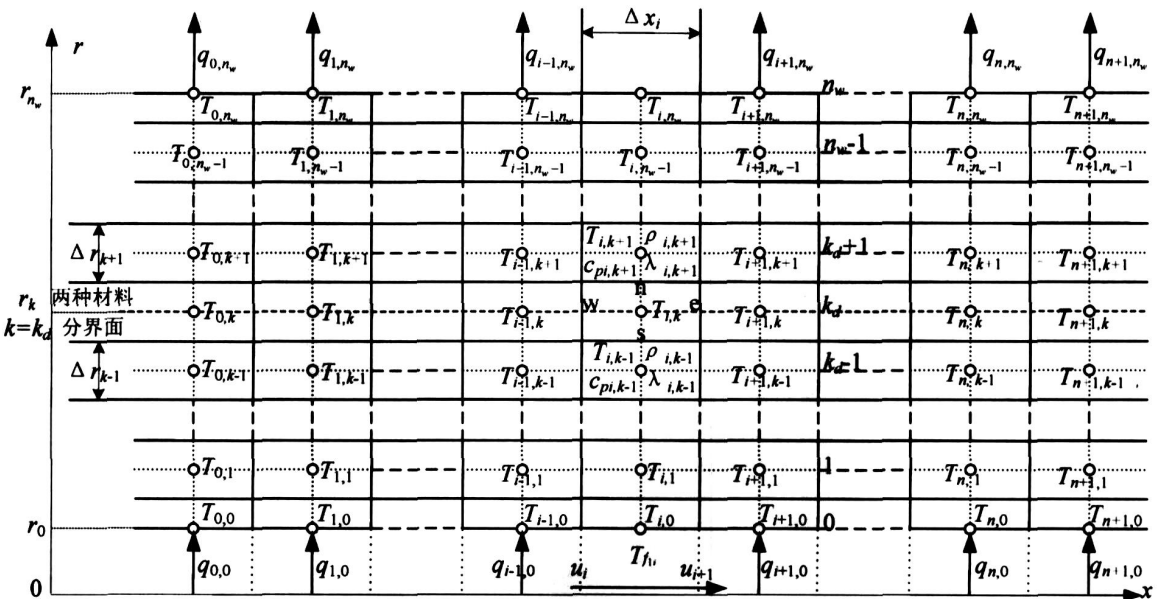


图 2 轴对称二维贮箱壁面温度场的有限控制体积单元

Fig. 2 Finite control volume grids of two dimensional asymmetric temperature field for tank wall

事实上,管道壁面非边界单元传热方程^[9,11]在轴向边界按 $T_{i,k} = T_{0,k}$, $T_{n+2,k} = T_{n+1,k}$ 处理即可得到上述两式,对流换热内边界处($k=0$)、辐射换热外边界处($k=n_w$)、两种材料分界面处($k=k_a$) 在椭圆封头部分方程的变化与上述两式类似,差分模型以及稳定性准则也与管道壁面传热模型^[9,11]类似.

式中, $r_k = r_0 + \sum_{j=0}^{k-1} \Delta r_j + \frac{\Delta r_k}{2}$, 注意 Δr_0 , Δr_{n_w} 为一般网格径向长度的一半. i, k 分别表示壁面轴向和径向单元网格点, n_w 表示沿壁面径向划分的网格数, T, Q 分别为壁面网格单元的温度、密度, c_p, K 分别为壁面材料的定压比热、导热系数. 除 n_w 之外, 变量的下标 w, e, s, n 分别表示温度场网格单元的东、西、南、北边界, 各网格单元边界处导热系数采用两边网格导热系数的调和平均值.

3 结 论

从低温推进剂贮箱分布参数数值模型的出发点和建立过程可以得出如下结论:

(1) 本文工作是适用于准一维可压缩瞬变管流的有限体积模型体系的数值拓展和应用之一, 由于该体系是从适用于连续介质控制体的 Euler 型积分形式的流动守恒方程出发经过合理模化推导得到的, 因此物理意义明确, 对流动和传热等物理现象的刻画比较全面.

(2) 通过贮箱流场和壁面温度场划分的网格可以看出, 该模型可以全面描述地面试验中常用低温贮箱内的流动和热分层现象.

(3) 流场采用一维交错网格的有限体积模型, 可考虑变物性、轴向热传导、重力场、壁面传热影响; 壁面温度场采用圆柱坐标系下的轴对称二维有限体积模型, 可处理对流换热和辐射换热两种边界情况, 可处理具有包覆层或真空夹层结构的变物性管壁传热.

(4) 低温贮箱的成功建模表明准一维可压缩瞬变管流的有限体积模型是一个物理意义明确、适用范围广泛、逻辑自洽的体系, 在管路系统仿真领域具有好的应用前景.

参考文献:

[1] Van Dresar N T. Pressurization of cryogen: a review of

current technology and its applicability to low gravity condition[R]. AIAA923061, 1992.

[2] Van Dresar N T. Prediction of pressurant mass requirements for axisymmetric liquid hydrogen tanks [R]. AIAA922964, 1995.

[3] Ziliac G, Karabeyoglu M A. Modeling of propellant tank pressurization[R]. AIAA200523549, 2005.

[4] 张超, 鲁雪生, 田丽亭. 火箭低温液体推进剂增压系统数学模型[J]. 低温与超导, 2005, 33(2): 35238.

ZHANG Chao, LU Xuesheng, TIAN Liting. The numerical model of rocket cryogenic liquid propellant pressurization system[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2005, 32(2): 3238.

[5] Majumdar A, Steadman T. Numerical modeling of pressurization of a propellant tank[R]. AIAA920879, 1999.

[6] Tarafder A, Sarangi S. CRESPLP: a dynamic simulator for liquid propellant rocket engines [R]. AIAA20003768, 2000.

[7] Peukert M, Simon R. ATVSIm the ATV propulsion system simulation software[R]. AIAA20023828, 2001.

[8] Cullimore B A, Beer C M, Johnson D A. Propulsion applications of the NASA standard general purpose thermal hydraulic analyzer[R]. AIAA200023723, 2000.

[9] 陈阳. 液体火箭发动机试验台气路系统通用模块化建模与仿真研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2006.

CHEN Yang. Study on generalized modularization modeling and simulation for liquid propellant rocket engine test bed gas systems[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006.

[10] 陈阳, 高芳, 张振鹏, 等. 准一维可压缩瞬变管流的有限体积模型(Ⅱ) 流场的有限体积模型[J]. 航空动力学报, 2008, 23(2): 3112316.

CHEN Yang, GAO Fang, ZHANG Zhenpeng, et al. Finite volume model for quasi one-dimensional compressible transient pipe flow (Ⅱ) Finite volume model of flow field [J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(2): 312316.

[11] 陈阳, 高芳, 张振鹏, 等. 准一维可压缩瞬变管流的有限体积模型(Ⅰ) 管壁温度场的有限体积模型[J]. 航空动力学报, 2008, 23(2): 312322.

CHEN Yang, GAO Fang, ZHANG Zhenpeng, et al. Finite volume model for quasi one-dimensional compressible transient pipe flow (Ⅰ) Finite volume model of temperature field[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(2): 312322.

[12] 张育林, 刘昆, 程谋森. 液体火箭发动机动力学理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.