

运载火箭高空羽流对卫星的污染分析

褚洪杰*, 吴彦森, 王国辉, 李凰立, 苏虹

北京宇航系统工程研究所, 北京 100076

* E-mail: numenchj@126.com

收稿日期: 2008-09-26; 接受日期: 2008-11-03

摘要 运载火箭执行不同的姿态调整动作时, 贮箱内剩余推进剂的排放、反推火箭或其他姿控发动机工作而产生的排气羽流场都会对卫星表面形成一定的污染作用. 通过 CFD 技术和工程分析手段, 本文模拟了以上几种情况产生的羽流流场, 并给出了对卫星产生污染的几种主要排放气体的浓度.

关键词

运载火箭
羽流
卫星
污染量

航天器往往对表面的污染物浓度有着一定的要求, 微量的污染物在功能表面上沉积可能会引起航天器功能的退化和失效. 目前, 美国航天局和欧洲航天局规定^[1]光学卫星表面通常可允许的最大污染量为 $2 \times 10^{-7} \text{ g/cm}^2$. 运载火箭发射卫星时, 羽流环境主要受到 2 部分影响: 星箭分离后, 为减少空间碎片的产生或是末级离轨需要, 需在轨排放火箭末级贮箱内的剩余推进剂, 排放出的推进剂进入太空后, 在高真空环境下立即失稳破碎为大量液滴, 很快在箭体周围形成由液滴和蒸气组成的气液羽流场. 另外, 箭体上的固体起旋、反推火箭发动机工作时也会产生含有少量固体颗粒的喷射羽流. 此外, 因发射任务需求, 有的火箭还带有上面级, 而上面级在和卫星分离后, 其减速或离轨时的姿控发动机喷流也会对卫星产生污染作用. 国外研究指出, 羽流场中包含的一些燃烧产物会对卫星形成污染, 其主要形式为: 羽流中的燃烧产物碰撞卫星后形成凝结或附着, 污染沉积物使太阳能电池矩阵功率降低, 使卫星光学系统图像失真变形, 使热控涂层表面反射率和发射率降低等. 为评估卫星受到的可能污染程度, 本文对各种情况作用下的羽流流场进行了分析.

真空羽流场包括复杂的连续介质流(羽流核心区)、过渡领域流和自由分子流(羽流外围区)几种流动状态. 对过渡领域的流动目前尚无完善的理论, 真空下的实验复杂且费用昂贵, 用数值模拟的方法研究真空羽流便成为人们所期望的途径. DSMC(直接蒙特卡洛模拟)方法是较为有效的真空羽流数值模拟方法, 但是喷管内部的高密度流动特征以及羽流流场中存在的大物理量梯度, 给 DSMC 仿真造成困难^[2]. 文献^[3]中指出, 剩余推进剂排放这种物理过程, 其时间相对较长, 且排放推进剂的影响域较大, 其浓度在场内呈大梯度变化. 而对于固体发动机, 喷管内及出口附近区域存在较强的有粘-无粘、有粘-有粘的相互作用^[4]. 从以上 2 处观点可以判断, 就流动本身来说, 在喷管内和出口核心区域还是呈现了较为显著的连续介质流特性. 本文首先应用 CFD(计算流体力学)方法对喷管内的燃气流动进行数值模拟, 以其出口截面参数作为羽流区评估的入口条件, 最终通过工程分析手段获得作用在卫星表面单位面积上的污染量.

1 数值分析方法

1.1 控制方程

将 N-S 守恒方程表示成如下通用形式

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\mathbf{u}\phi) = \text{div}(\Gamma\text{grad}\phi) + S, \quad (1)$$

其展开形式为

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v\phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w\phi)}{\partial z} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial z} \right) + S, \end{aligned} \quad (2)$$

(1)式中各项依次为瞬态项、对流项、扩散项和源项。(2)式中, ϕ 为通用变量, 可以代表 u, v, w, T 等求解变量; Γ 为广义扩散系数; S 为广义源项。对于特定的方程, ϕ, Γ 和 S 具有特定的形式。

1.2 离散格式

动量方程分3部分来离散。对流项为 $\text{div}(\mathbf{u}\phi)$ 的形式, 由高斯定理

$$\begin{aligned} I^C &= \int_{\partial V} \text{div}(\mathbf{U}\phi) \, dv = \oint_S \mathbf{U}\phi \cdot \mathbf{ds} \\ &= \sum_L (\mathbf{U}\phi \cdot \mathbf{ds})_L = \sum_L (\phi_L F_L), \end{aligned} \quad (3)$$

上式中的 L 为有限体积单元的界面。

本文在计算时采用了迎风型差分格式, (1)式中的扩散项移到左边后成为 $\text{div}(-\Gamma_\phi \nabla \phi)$, 由高斯定理, 积分此式得

$$\begin{aligned} I^D &= \int_{\partial V} \text{div}(-\Gamma_\phi \nabla \phi) \, dv = \oint_S -\Gamma_\phi \nabla \phi \cdot \mathbf{ds} \\ &= -\sum_L (\Gamma_\phi \nabla \phi \cdot \mathbf{ds})_L, \end{aligned} \quad (4)$$

(4)式中的 $\nabla \phi$ 用中心差分格式来离散后可化为: $I_e^D =$

$$I_{e1}^D + I_{e2}^D.$$

设源项可写为 $S_\phi = S_\phi^u + \phi \cdot S_\phi^p$ 的形式, 则积分后为

$$\int_{\partial V} S_\phi \, dv = \left[(S_\phi^p)_P \delta V \right] \cdot \phi_P + (S_\phi^u)_P \delta V. \quad (5)$$

因此, 动量方程可最终离散为五对角代数方程

$$A_P \phi_P - A_E \phi_E - A_W \phi_W - A_N \phi_N - A_S \phi_S = S. \quad (6)$$

1.3 湍流模式

本文选择了由 Craft 等人^[5]联合研究的三阶湍流模式, 模式系数由基准流动校核得到。该模式普适性较强, 模拟含有强流线弯曲和驻点的流动, 如撞击射流、弯曲槽流和燃烧室旋转流动等, 效果良好。模式

系数表达式如下

$$C_\mu = \frac{0.3\{1 - \exp[-0.36 / \exp(-0.75\eta)]\}}{1 + 0.35\eta^{3/2}}, \quad \eta = \max(\bar{s}, \bar{w}),$$

$$\beta_1 = -0.4C_\mu f_\mu, \quad \beta_2 = 0.4C_\mu f_\mu, \quad \beta_3 = -1.04C_\mu f_\mu,$$

$$\gamma_1 = \gamma_2 = 40C_\mu^3 f_\mu, \quad \gamma_3 = 0, \quad \gamma_4 = -80C_\mu^3 f_\mu,$$

$$f_\mu = 1 - \exp[-\sqrt{R_t/90} - (R_t/400)^2],$$

$$\text{当 } R_t \leq 250 \text{ 时, } S_\varepsilon = 0.0022 \frac{\bar{s} v_t k^2}{\varepsilon} \left(\frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_k} \right)^2; \text{ 否则, } S_\varepsilon = 0.$$

1.4 组分计算

在太空环境下, 考虑到化学组分的变化和羽流场的多相性, 采取组分模型对流动中化学组分的输运和燃烧等化学反应进行模拟。

通过第 i 种物质的对流扩散方程预估每种物质的摩尔分数 Y_i , 化学物质的守恒方程采用以下的通用形式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} Y_i) = -\nabla \cdot \mathbf{J}_i + R_i + S_i, \quad (8)$$

其中, R_i 是化学反应的净产生速率, S_i 为离散相及用户定义的源项导致的额外产生速率。对于反应速率, 使用涡耗散模型进行计算。第 r 个反应中物质 i 的产生速率 $R_{i,r}$ 由下面 2 个表达式中较小的一个给出

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left(\frac{Y_R}{v'_{R,r} M_{w,R}} \right), \quad (9)$$

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A B \rho \frac{\varepsilon}{k} \frac{\sum_p Y_p}{\sum_j v'_{j,r} M_{w,j}}, \quad (10)$$

式中, Y_p 表示产物质量组分, Y_R 表示反应物质量组分, A 和 B 均为经验系数, 分别取 4.0 和 0.5。

根据喷管燃气秒流量和上式得到的化学计量常数, 经计算可以获得燃气产物的燃气组分, 并通过流场计算获得分布在远场的燃气产物单位面积的污染程度。

2 边界条件

远场采用压力出口边界; 入口边界按照压力入口处理, 其余为固体壁面, 采用无滑移边界条件。在压力入口处, 所有变量的值都要给出, 包括速度、标量场、湍动能、及其耗散率。湍动能耗散率可以由下式求得

$$\varepsilon = C_{\mu}^{3/4} k^{3/2} / L, \tag{11}$$

其中, L 是与湍流特征涡大小相关的长度尺度. 对于本文, L 等于火箭箭体直径.

3 网格建模

各种污染工况下的三维几何模型如图 1~4 所示. 由于箭体和发动机结构尺度跨越较大, 计算域通常采用非结构化网格.



图 1 二级箭体三维模型



图 2 起旋火箭三维模型

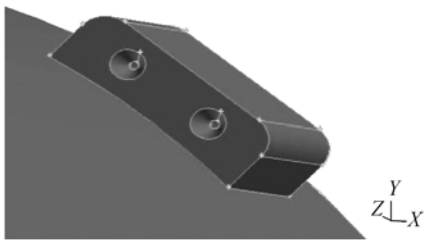


图 3 反推火箭三维模型



图 4 上面级姿控机组模型

4 羽流场分析

参考各发动机相应的推进剂贮备量和性能参数, 通过对喷管内流场的 CFD 计算和排气羽流速度场和污染物沉积的工程分析, 可以得到如图 5~11 的主要污染物摩尔分数分布云图和沉积在卫星上的污染浓度.

4.1 起旋火箭工作时对卫星污染分析

起旋火箭工作时刻, 箭体和卫星沿着各自的飞行姿态并已拉开一段距离, 图 5 和 6 分别给出了对卫星造成污染的 2 种主要成分 H_2O 和 N_2 在空间的扩散摩尔分数云图. 对分布于远场边界的 H_2O 和 N_2 摩尔浓度进行积分平均, 由于燃气产物占主要比重, 对卫星可能造成的总污染量在单位面积上的最大分布值为 $9.7 \times 10^{-9} \text{ g/cm}^2$, 低于卫星要求值.

4.2 主发动机排出物对卫星污染分析

图 7 和 8 分别给出了二级主发动机剩余推进剂排放对卫星造成污染的 2 种主要成分在空间的扩散摩尔

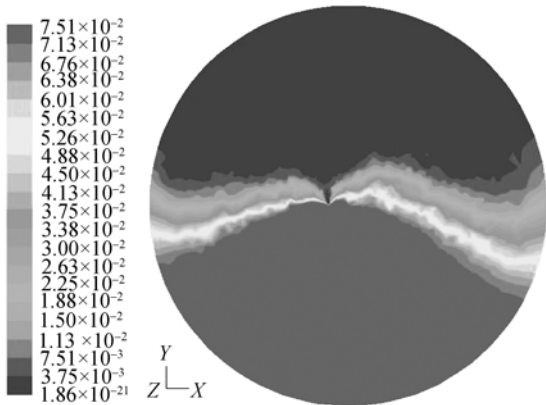


图 5 起旋火箭羽流场 H_2O 摩尔分数云图

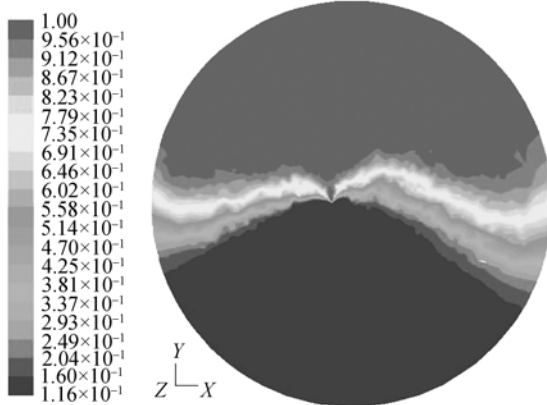
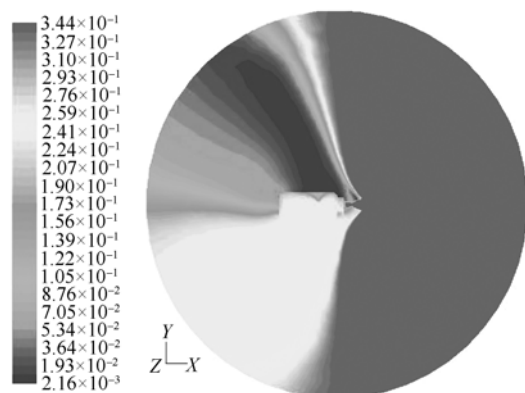
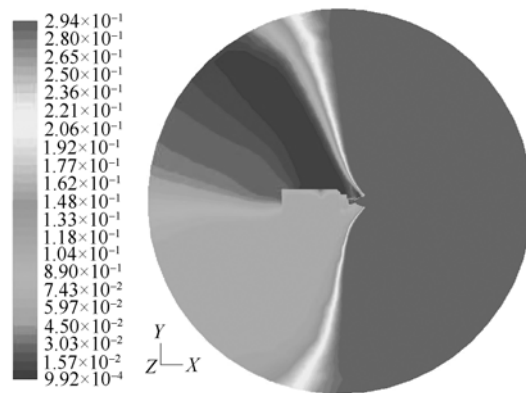


图 6 固体火箭羽流场 N_2 摩尔分数云图

图 7 推进剂排放流场 H_2O 摩尔分数云图图 8 推进剂排放流场 N_2 摩尔分数云图

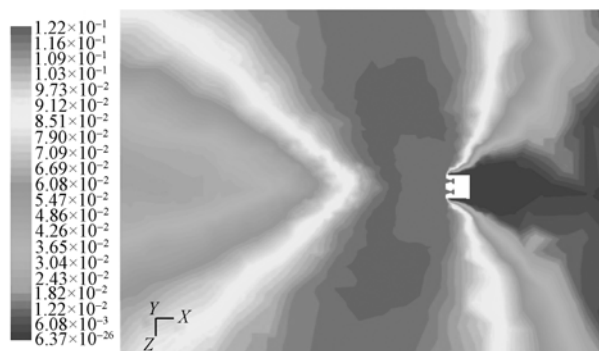
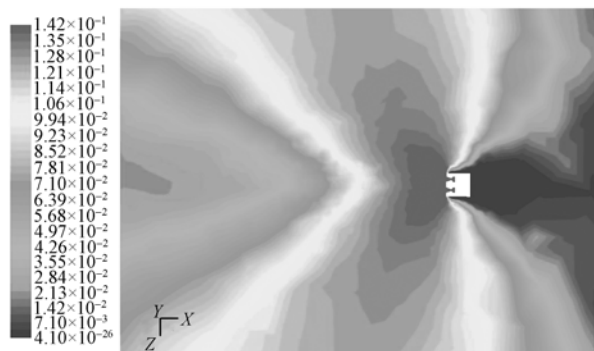
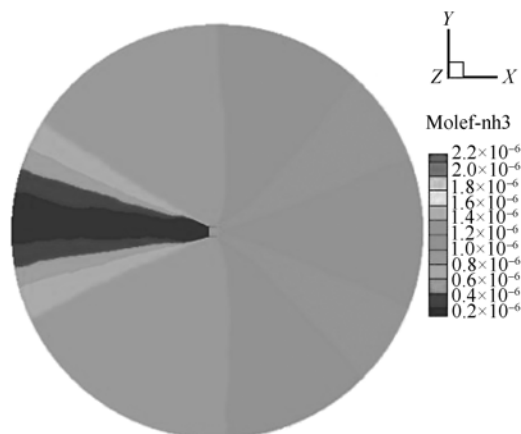
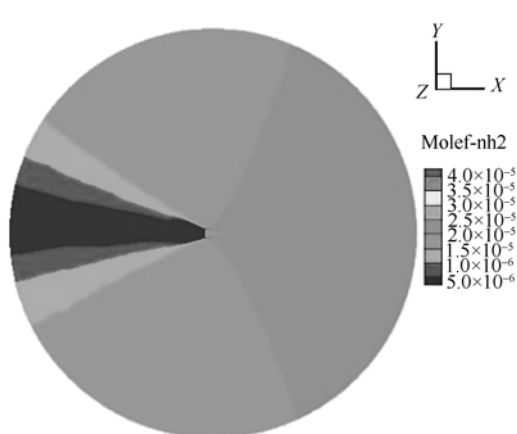
分数云图. 对分布于远场边界的 H_2O 和 N_2 摩尔浓度进行积分得到对卫星可能造成的总污染量在单位面积上的最大分布值为 $1.81 \times 10^{-9} \text{ g/cm}^2$, 低于卫星要求值.

4.3 反推火箭工作时对卫星污染分析

反推火箭工作时刻, 箭体和卫星刚刚分开不久, 污染相对严重一些, 扩散摩尔分数云图如图9和10所示.

经积分计算, 分离时刻散布在卫星表面的最大 H_2O 浓度约为 $1.17 \times 10^{-7} \text{ g/cm}^2$, 最大 N_2 浓度约为 $1.83 \times 10^{-7} \text{ g/cm}^2$.

上面级姿控发动机工作时对卫星的主要污染源为 NH_3 和 N_2 两种燃烧产物, 扩散摩尔分数云图如图11和12所示. 积分得到单位面积上 NH_3 的污染量为 $2.3 \times 10^{-10} \text{ g/cm}^2$, N_2 的污染量为 $5.9 \times 10^{-9} \text{ g/cm}^2$. 可以看出, 总污染

图 9 H_2O 扩散过程摩尔分数云图图 10 N_2 扩散过程摩尔分数云图图 11 NH_3 扩散过程摩尔分数云图图 12 N_2 扩散过程摩尔分数云图

量仅为 $6.13 \times 10^{-9} \text{ g/cm}^2$, 满足卫星对污染浓度的要求。

5 结论

本文运用 CFD 方法结合工程理论分析, 得到了

运载火箭由于执行不同的姿态控制动作时发动机工作产生的羽流场对卫星的污染情况。经飞行试验实测表明, 在工程设计中, 通过实践经验总结的这套方法获得的结果是合理和有效的^[6]。

参考文献

1 柯受全. 卫星环境工程和模拟试验. 导弹与航天丛书. 北京: 中国宇航出版社, 1993

2 蔡国飙, 王慧玉, 庄逢甘. 真空羽流场的 N-S 和 DSMC 耦合数值模拟. 推进技术, 1998, 19(4): 57—61

3 黄琳, 陈伟芳, 吴其芬, 等. 姿控发动机内流场及高空羽流流场的 DSMC 一体化数值模拟. 空气动力学学报, 2001, 19(4): 383—387

4 程晓丽, 毛铭芳, 阎喜勤. 运载火箭剩余推进剂羽流污染量计算. 计算物理, 2001, 18(1): 7—9

5 Craft T J, Launder B E, Suga K. Development and application of a cubic eddy-viscosity model of turbulence. Int J Heat Fluid Flow, 1996, 17: 108—115^[DOI]

6 于胜春, 汤龙生. 固体火箭发动机喷管及羽流流场的数值分析. 固体火箭技术, 2004, 27(2): 95—97

2009 低碳技术国际学术会议征稿通知

时间地点: 2009年9月15~18 日, 北京

网址: www.ISLCT2009.com

会议主席: 徐建中院士 (中国)

合作主席: 佐藤幹夫博士 (日本)
송진수博士 (韩国)

主办单位:
中国工程热物理学会
日本机械工程学会能源系统分会
韩国新能源和可再生能源学会

会议主题
大气中二氧化碳含量的提高造成全球气候变暖, 导致干旱、海平面上升和更多的灾害。低碳技术可以防止灾难性的气候变化, 并可以减少全球有限能源的消耗率。低碳经济和绿色能源的发展不但可以保护环境, 还可以造成新的经济增长。

会议内容

- (1) 制造业、农业、交通、工业过程和能源开发等方面的高效节能技术。
- (2) 二氧化碳减排技术, 包括清洁煤燃烧, 低排量烃燃料、氢和混合燃料动力技术, 以及碳捕获和存储技术。
- (3) 新能源和可再生能源技术, 例如: 生物质能、地热能、水能、太阳能、潮汐能、波浪能和风能。
- (4) 化石燃料和二氧化碳排放造成环境污染的控制技术及环境保护技术。

重要日期

提交 800 字英文摘要: 2009 年 3 月 31 日

论文接收函: 2009 年 4 月 30 日

提交论文全文: 2009 年 7 月 1 日