

## 空间站环境污染分析及其仿真模式\*

任 兵 黄 琳 孙 斐

(国防科技大学航天技术系 长沙 410073)

**摘 要** 在确立正确的空间站环境污染概念的基础上, 依据污染成因可将其分为本体污染(分子污染)、羽流污染(操作污染)和粒子云污染三大污染源。针对各自不同的形成机理, 提出进行污染潜势预报的相应的分析模式, 作为研制环境污染分析的仿真软件的基础。对于最严重的污染源——羽流污染, 从建模、算法、流场模拟与效应分析出发, 作一体化处理, 构思模块式结构的仿真软件框架, 为防止污染, 研制和发展实用的污染控制系统提供依据。

**关键词** 空间站技术, 空间环境污染, 仿真软件

**分类号** V419.2

## The Analytical Study on Enviromental Contamina tion of the Space Station and Its Simulation Modulars

Ren bing Huang lin Sun fei

(Department of Aerospace Technology, NUDT, Changsha, 410073)

**Abstract** On the basis of defining the definite conception of enviromental contamination of the space Station, the contamination sources consist of self-contamination, plume contamination and partical cloud contamination according to the causes of contamination. The respective analytical modes for prediction of potential contamination that would be applied to developing simulation modular for external contamination analysis is presented with its own formation mechanism. For the more serious plume contamination, source overall disposal is suggested to construct a project of modular simulation together with modeling construction, alogrithm, numerical simulation of flowfields and the analysis of the effects of contamination to apply to space station design and to develop an applicable contamination control system.

**Key words** space station technology, contamination enviroment in space, simulation software

\* 1996 年 5 月 29 日收稿

# 1 空间站环境污染的概念

在空间站构筑及运行过程中，呈现两类污染问题。一类是站内宇航员生活和工作产生的内部环境污染；另一类是由空间环境——发动机尾焰——空间站表面气体逸散相互作用产生的外部环境污染。

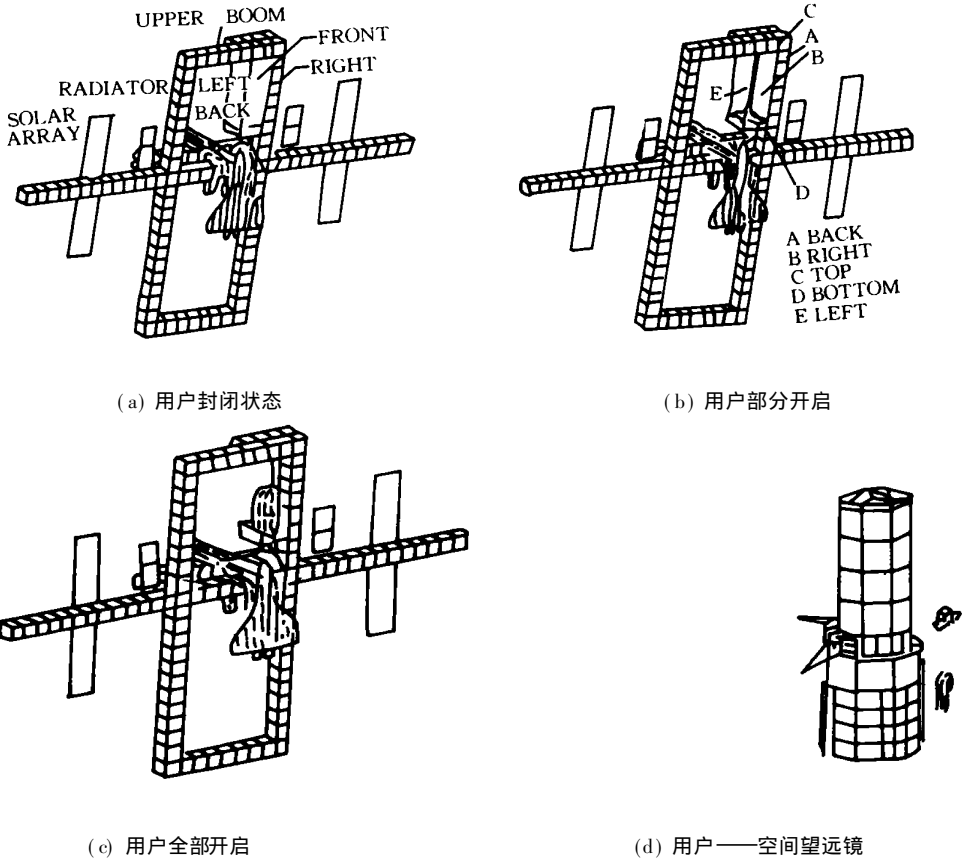


图1 空间站可能的运行操作和用户服务状态

外部环境污染问题又可依据空间站与空间站用户专用设施的工作环境、操作方案和生成环境不同，由图1知分为两种情况：一种是空间站用户专用设施受空间站各舱段的污染源的外部环境污染问题；另一种是空间站装有敏感元件处受来自空间站用户专用设施及轨道器进轨操作（包括交会对接、停泊和分离等），空间站姿态控制时的污染源的环境污染问题。

作为上述问题的深入研究，必须解决的问题依次为：(1) 对可能出现的污染源作分析，建立相应的污染源数据库；(2) 对各种污染源进行分类，就其可能产生污染的机理及传播方式作研究；(3) 通过对不同污染源的污染效应分析，建立能反映其主要物理化学特征的潜势预报的分析模式；(4) 研制相应的模块化仿真软件，针对所拟定的空间站可能构型，用户服务及操作运行方案进行环境污染的仿真计算；(5) 依据仿真计算结果，

提出相应的防止及控制污染的判据和对策。

## 2 空间站环境污染的污染源分析

依据污染源的生成及传播机理的不同, 空间站环境污染大致可分为下述三类:

### 2.1 本体污染

由逸散气源以分子流的直射、反射、再次汽化及分子间相互碰撞的形式扩散, 用分子通量输运变化来计及用户专用设施内或对空间站其它设备表面产生的污染。对此类污染源以计算分子入射及反向散射的输运过程的通量大小来度量。虽说其形成机理较为简单, 只要给出了产生逸散气体的气源的数据库信息, 即可运用自由分子流理论作输运特性计算, 进而对其可能形成的污染作出预报。但由于对逸出气源的特性、气固界面的作用特性、裸露时间等缺乏认识, 难于建立相应的完整的分析模式。

本体污染以通量形式作用于空间站或用户专用设施构件的表面, 污染效应通常又可转化为粒子云式的光学污染与界面污染, 会直接影响敏感元件的清洁度和光学观察环境。这对装有观察天体的用户设施的空间站运行操作, 不仅必须早预报, 而且还必须为此提供必要的污染控制系统。

### 2.2 羽流污染

由轨道运行器反作用控制系统(RCS)在进站操作中产生的羽流污染是空间站环境污染中最受关注的污染源<sup>[1]</sup>。一是因为发动机羽流污染是空间站的最大污染源; 二是羽流污染的生成、扩散以及污染的机理复杂, 流场计算困难; 三是污染效应与反作用控制系统的工作状况及其与空间站的相对位置密切相关, 对这类动态的潜势预报难度更大。

在高空, 飞行器的轨道转移和姿态控制、交会对接都得使用小推力发动机进行。发动机点火后必然会在其喷管的下游形成一股喷流, 向外扩散即形成所谓的羽流。这股羽流的流场会因其操作和工作环境及发动机所处的空间位置的不同而呈现明显的不同。低空点火时所产生的羽流基本上限制在一个略显膨胀的细长的圆筒形区域内; 而高空点火时, 随着环境大气的骤减, 羽流的弥散区域出现中低空羽流所不具有的倒流区, 使得羽流对航天器的污染影响更为突出, 其作用可危及航天器的正常工作, 影响使用寿命和交会对接的成功。

羽流污染的效应有: (1) 羽流对航天器表面的撞击作用, 产生附加转动力矩, 将对姿态控制产生不良影响, 同时又会增加燃料消耗而影响其使用寿命; (2) 高温尾焰热流将可能导致航天器热过载而致使元件受损; (3) 污染物的沉积侵蚀作用, 既会严重损害观察环境, 又会导致太阳能帆板等敏感元件的损坏; (4) 物理污染导致红外辐射及表面充电, 致使机载仪器工作失常。

### 2.3 粒子云污染

粒子云污染指的是由附近生成源放射出的扩散粒子在敏感元件区域内的积聚, 以粒子云或沿一定运动方式沉积在其表面上的污染方式。究其污染来源, 一是来自上述两类污染(本体污染和羽流污染)生成的粒子; 二是来自空间尘埃的积聚而成。究其形成的机理, 需要以粒子的大小分布、数密度及粒子云特性来计量其污染效应。

粒子云的污染效应分析的过程, 首先要对它的积聚成因作综合分析; 其次再对其积聚

的数量、漫淹的区域及可能部位作出估算; 然后对其可能引起的粒子诱导的光散射, 物面粒子的光屏蔽作用及其它物理污染效应作出预报。对该类污染的预报因不确定因素太多, 目前只是用轨道动力学模型定性分析<sup>[2]</sup>, 尚无很完善的预报方法。

### 3 空间站环境污染的模式分析

#### 3.1 本体污染的模式分析

依据本体污染的形成和扩散机理, 可将问题归结为分子输运问题, 分两步进行处理:

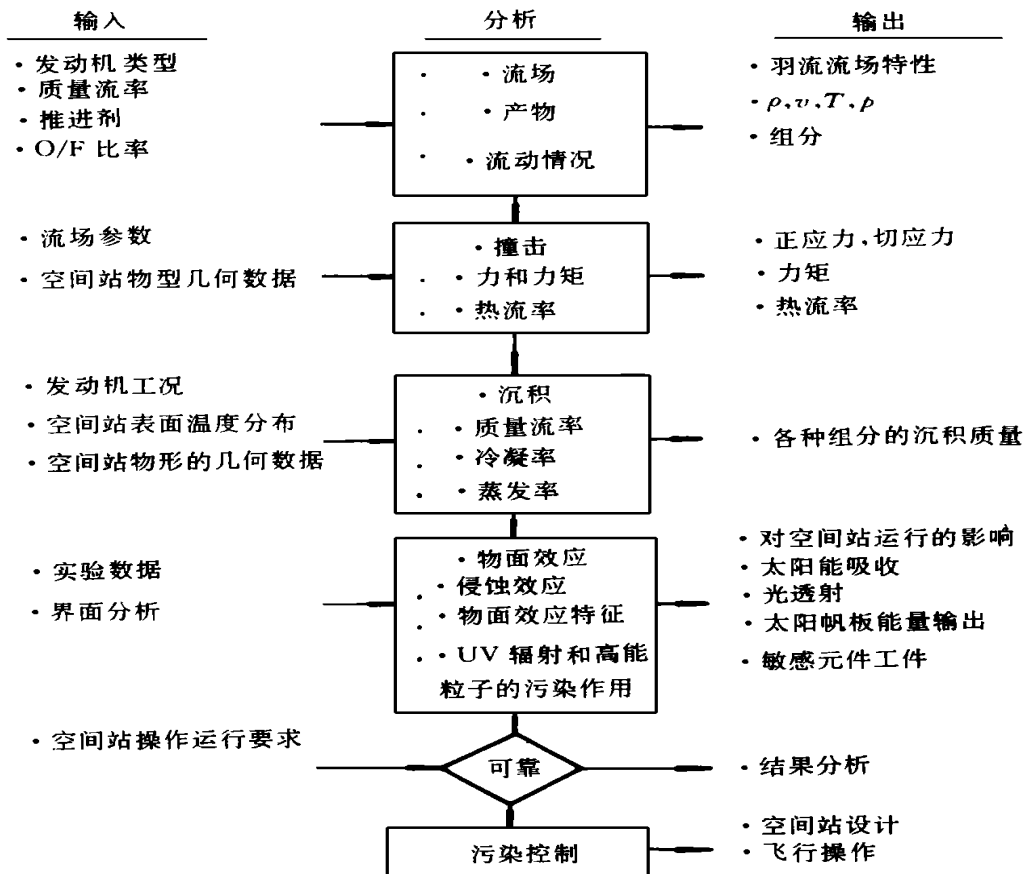
(1) 分子流的直射、反射和再次汽化引起的输运问题, 采用文 [3] 提出的分子输运动力学方法, 运用 Gebhart 逆矩阵热辐射理论解决计及气体与表面相互作用的质量输运问题。

(2) 分子间碰撞引起的输运问题, 将采用 BGK 两组分模型 (环境大气分子与逸散分子) 求解由于分子间碰撞产生的回流量, 由此确定在给定排气源位置及排气流量后, 由于分子间碰撞作用而返回撞击表面的通量。

上述计算都是在建立了本体污染源数据库的基础上进行的。

#### 3.2 羽流污染的模式分析

具体工作过程如下:



### 3.3 航天器表面（下垫面）环境的模式化处理

所有关于污染源的处理最终要落实到对空间站构件及用户服务设施表面的污染，即与空间站表面单元的下垫面环境特征相关。鉴于下垫面形状的复杂性，将其视为由若干简单形状的单位组成，通过单元特征分类的模式识别对其进行模块式处理，然后应用识别软件对其可能产生的污染进行分析。

## 4 羽流污染的一体化模块式仿真软件

依据羽流污染的模式分析的过程，运用“污染物生成方式 扩散模式 污染环境”的过程仿真形式进行软件设计。由过程模式化的要求，从建模、算法、流场模拟与效应分析一体化处理出发采用模式分析与数值模拟相结合的方法设计软件，便于软件研制的模块化，达到既能充分发挥各子过程的功能，又能随问题研究的深入而进行功能扩展的目的。羽流污染分析的一体化模块式仿真软件框架由下述软件模块组成：（1）污染源成分的数据库生成软件；（2）高空羽流流场的模式分析与特性计算软件；（3）污染边界的预报软件；（4）环境资料的数据库生成软件；（5）潜势污染的分析预报软件；（6）动画显示输出软件；

过程模式化通过建立数据库方式作一体化处理达到。模块相互独立，便于灵活调用，功能扩展，联网接口，而使功能得到充分发挥。

## 5 结束语

空间站环境污染分析是空间站设计与空间环境研究的重要课题，涉及学科面广，地面实验模拟困难，构系复杂（见图 2），这些使得问题的解决有很大难度。

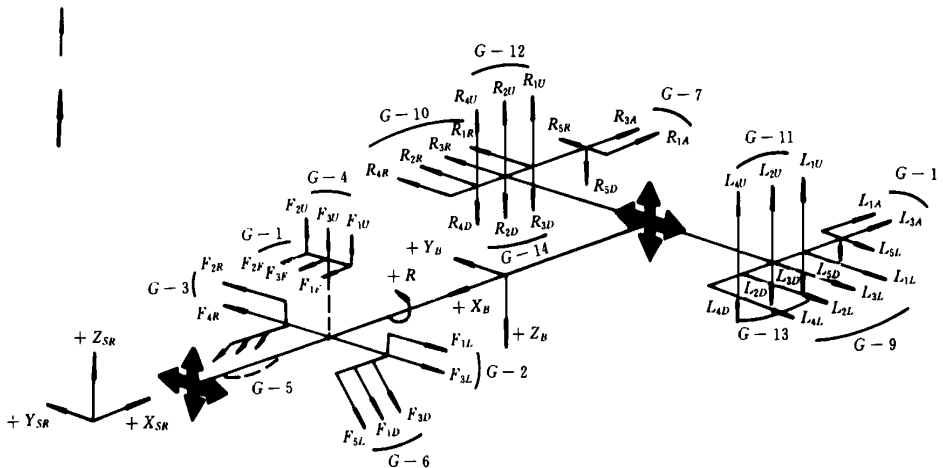


图 2 某空间站 RCS 喷管位置与羽流方向示意图

作为解决空间站环境污染分析的有效途径，本文提出的污染过程的仿真研究模式，立足于污染模式分析、数值模拟算法和软件框架设计一体化模块式处理，在很大的程度上（下转第 30 页）

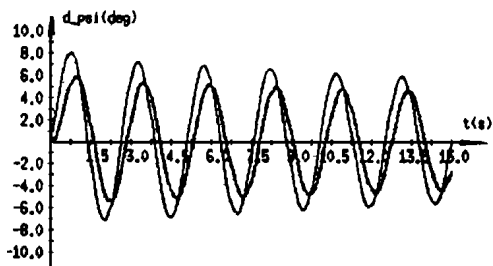


图 9

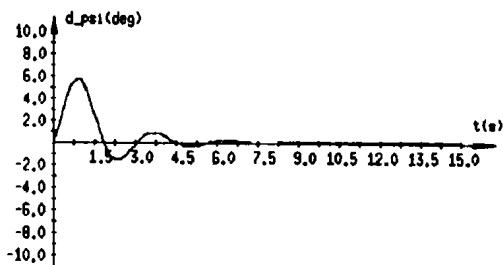


图 10

## 参 考 文 献

- 1 Jubert M, Raviv D. Vision- Based M obility Control for AVCS, 1993
- 2 Sandor Szabo Hany etc. High- Level Mobility Controller for a Remotely Operated Unmanned Land Vehicle. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 1992, (5): 63 ~ 77
- 3 朱华勇. 自主式移动机器人运动规划及集成技术: [学位论文]. 长沙: 国防科技大学自动控制系, 1996

(责任编辑 张 静)

(上接第 19 页)

缓解了问题的难点过于集中, 很难起步的状况。通过过程模式化处理, 可先逐个进行子模块的研制, 进行积木式组合, 而最终达到对各类污染进行潜势预报的目的。

## 参 考 文 献

- 1 Lumpkin F, LeBeau G, Stuart P. A CFD/DSMC Analysis of Plumes and Plume Impingement During Shuttle/Mir Docking. AIAA 95- 2034, 1995
- 2 Wang F C. A Molecular Scattering Model for Spacecraft Self- Contamination studies. AIAA 86- 1620, 1987
- 3 Wang F C. A BGK Model Study of Spacecraft Self- Contamination. LM SC- HREC TR- D697965, 1980
- 4 张莉. 高空羽流流场计算与算法研究: [学位论文]. 长沙: 国防科技大学, 1996

(责任编辑 石少平)