

电离层中释放六氟化硫的流场及试验效应模拟

谢守志 赵海生 薛 昆 许正文

(中国电波传播研究所 电波环境特性及模化技术重点实验室 青岛 266107)

摘 要 在电离层中释放六氟化硫时, 释放初期的六氟化硫流速及流量等条件是影响释放效应仿真的重要因素, 对仿真结果的准确性具有一定的影响. 传统的六氟化硫释放引起的电离层效应仿真中并未讨论. 基于 Fluent 流场仿真软件, 针对不同释放初始条件并结合六氟化硫容器的结构, 对六氟化硫释放过程中温度、压强以及喷口流速、流量等参数变化情况进行仿真计算, 得到了以上参量在释放过程中的变化情况, 并将其作为电离层化学物质释放三维动力学模型的初始参数, 获得了更加精确的六氟化硫电离层释放效应仿真结果.

关键词 流场仿真, 六氟化硫, 电离层, 化学物质释放

中图分类号 P 352

Flow Field and Effects of SF₆ Released in Ionosphere

XIE Shouzhi ZHAO Haisheng XUE Kun XU Zhengwen

(National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao 266107)

Abstract The initial velocity and mass flow rate of sulfur hexafluoride (SF₆) released in the ionosphere are key factors for the release effects research. They are not involved in traditional simulation models. In order to realize high precision simulation, the flow field in the storage vessel during SF₆ release is studied. According to the structural size of the SF₆ storage vessel, the geometric model is established, and the grid model uses structured grid and unstructured grid to discretize the computational area of the geometric model. Using the standard $k-\varepsilon$ model and SIMPLE algorithm in the professional software Fluent, the temperature, pressure, velocity of flow and mass flow rate in the storage vessel during SF₆ ionosphere release are simulated under different initial conditions, including initial temperature, pressure and filling mass. The flow field simulation results are taken as initial parameters in the three-dimensional refined model of SF₆ ionosphere release, and the refined effects of SF₆ ionosphere release are obtained.

Key words Flow field simulation, Sulfur hexafluoride, Ionosphere, Chemical release

0 引言

电离层中存在大量自由电子,其对无线电波的传播具有重要影响^[1]. 电离层化学物质释放是人工改变电离层的有效手段之一^[2]. 按照作用效果,化学物质可分为两类:一类是增加电子密度的物质,例如钡、锂等碱金属原子;另一类是降低电子密度的物质,如六氟化硫(SF₆)、二氧化碳等中性气体分子.

按照一定的充装密度将SF₆充装到容器中,通过运载火箭或卫星带入电离层空间完成释放. 在释放过程中,受充装密度、温度、释放喷口形状及口径等影响,SF₆的温度、压强、流速及流量等并不相同. 这些因素都会对释放引起的电离层效应产生影响. 根据SF₆气体的理化特性,在释放容器端口打开瞬间,释放物在内外压力差作用下快速喷出. 在惯性作用下,释放物云团在背景大气中缓慢减速,直至与背景大气相对静止.

由于释放物喷口速度等参数影响,在求解释放物扩散方程过程中,扩散过程不能简单地看作点源扩散,而是多个不同初始位置、释放时间及初始速度的点源在空间和时间上的叠加. 传统的SF₆释放效应研究^[3-8]并未考虑SF₆释放过程中这些因素的变化,仅采用简单的初始模型,从而无法获得较为精准的电离层效应仿真结果.

本文通过建立SF₆容器的几何模型和网格模型,利用标准 $k-\varepsilon$ 模型和SIMPLE算法,根据释放时刻不同的初始条件(温度、压强、充装密度等),运用Fluent软件对容器内部流场进行数值计算,模拟SF₆释放过程中容器内部压强、速度及温度等分布情况,获得喷口处的SF₆流量和流速变化,并将这些参数输入电离层SF₆释放三维动力学模型^[9]中,计算得到更加精确的SF₆电离层释放效应仿真结果.

1 SF₆容器内部流场数值模拟

1.1 流场仿真模型

利用Fluent预处理软件Gambit,对SF₆容器的几何模型和网格模型进行建模,采用结构化网格和非结构化网格对容器整个计算区域进行离散化处理,如图1所示.

SF₆的释放过程是非稳态过程,其流动为有黏湍

流. 因此,这里对容器内部流场的模拟采用非稳态单一相可压缩流处理. 湍流模型选用标准 $k-\varepsilon$ 模型,该模型具有较高的稳定性、经济性及计算精度,适合模拟高雷诺数湍流. 标准 $k-\varepsilon$ 模型的输运方程如下:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - p\varepsilon - Y_M + S_k, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon. \quad (2)$$

其中: k 为湍动能; ε 为湍动耗散率; G_k 为平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项; G_b 为浮力引起的湍动能 k 的产生项; Y_M 为可压湍流中脉动扩张的贡献; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 及 $C_{3\varepsilon}$ 为经验常数, $C_{1\varepsilon}$ 及 $C_{2\varepsilon}$ 一般取值为1.44及1.92,主流方向与重力方向平行时 $C_{3\varepsilon}$ 取值为1,主流方向与重力方向垂直时 $C_{3\varepsilon}$ 取值为0; σ_k 和 σ_ε 分别为与湍动能 k 和耗散率 ε 对应的Prandtl数,一般取值为1.0和1.3; S_k 和 S_ε 是用户定义的原项^[10]. 利用压力速度耦合的SIMPLE算法对非定常流场进行求解.

1.2 初始条件和边界条件

图1中最下方的圆柱状喷管用于释放SF₆. 初始状态时,容器内部充满一定质量、温度及压强的SF₆,假设喷口外部的电离层环境为真空环境,数值模拟的初始条件列于表1. 可以根据质量和压强并参考文献[11]~[13]确定SF₆温度. 喷口处的边界条件设置为压力出口.

1.3 仿真结果分析

针对表1中的不同初始条件,利用Fluent软件

表1 数值模拟初始条件

Table 1 Initial conditions of the numerical simulation

温度/K	压强/MPa	质量/kg
319.15	6	30
323.15	7	30
327.15	8	30
331.15	9	30

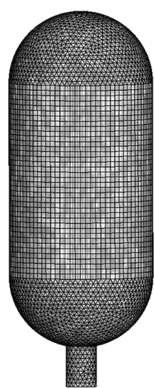
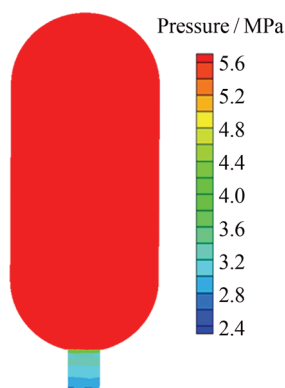
图1 SF₆ 容器三维模型网格划分Fig. 1 Element mesh of SF₆ storage vessel 3D model

图2 0.1 s 时容器内部压强分布

Fig. 2 Pressure distribution inside the vessel at 0.1 s

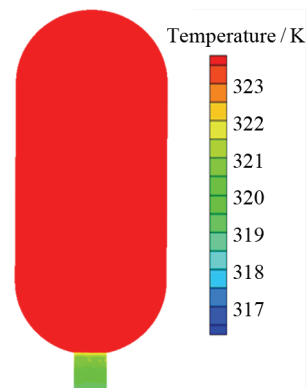


图3 0.1 s 时容器内部温度分布

Fig. 3 Temperature distribution inside the vessel at 0.1 s

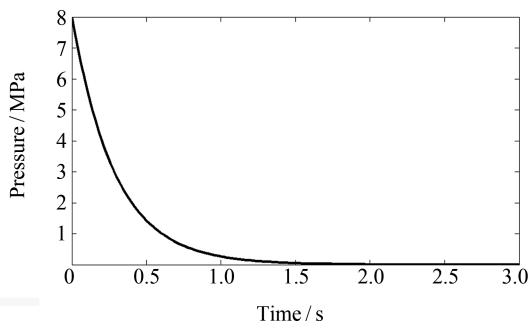
图4 SF₆ 容器泄压过程中内部压强变化

Fig. 4 Pressure inside the vessel from 0 s to 3 s

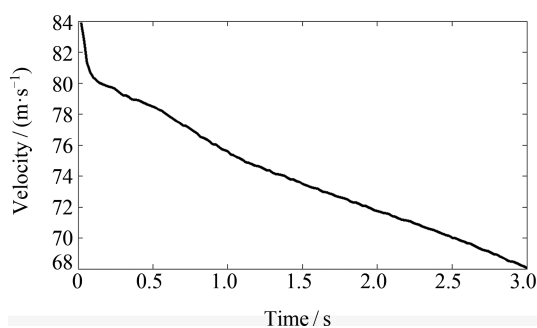
图5 SF₆ 释放过程中的喷嘴流速

Fig. 5 Velocity in the nozzle from 0 s to 3 s

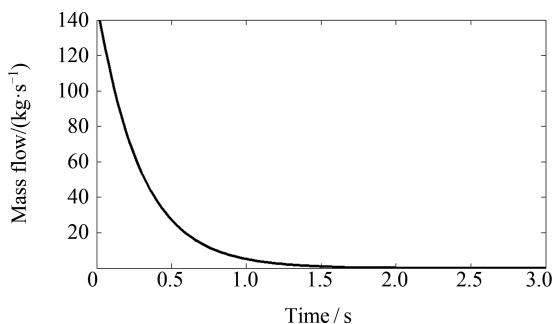
图6 SF₆ 释放过程中喷嘴流量

Fig. 6 Mass flow in the nozzle from 0 s to 3 s

对 SF₆ 容器释放过程中的内部流场变化进行仿真计算. 以初始压强 8 MPa、初始温度 327.15 K 条件为例, 图 2 给出了仿真得到的 0.1 s 时刻容器内部压强的分布情况. 由图 2 可以看出, 此时容器内部压强已由初始的 8 MPa 下降到 5.6 MPa. 泄压过程中, 整个容器的压力梯度主要存在于喷管内, 容器内的压力梯度不大. 同样, 容器内部的温度梯度也主要位于喷管内, 如图 3 所示.

图 4 给出了 SF₆ 容器整个泄压过程中, 容器内部的压强变化情况. 由图 4 可以看出, 释放初期容器内部压力下降非常迅速, 随后逐渐变缓, 至 1.5 s 时压强已下降至 0.1 MPa 以下, 此时可认为容器内部的 SF₆ 已全部释放.

对 SF₆ 释放过程中容器喷口处的流速及流量变化进行了仿真计算. 从计算结果可以看出, 喷口处的最大速度达到了近 84 m·s⁻¹, 在 0.2 s 前均保持在 80 m·s⁻¹ 以上, 随后逐渐减缓, 如图 5 所示. 喷口

处的最大流量达到 140 kg·s⁻¹, 释放初期流量下降速度很快, 0.4 s 时已经降到 40 kg·s⁻¹ 以下, 随后下降趋势放缓, 约 1.5 s 时流量已接近 0, 此时可以认为容器内部的 SF₆ 已基本完成释放, 如图 6 所示.

对表 1 中不同初始条件下 SF₆ 释放过程中的喷口流速及流量进行对比分析. 不同初始条件下, 容器喷口流速随时间变化如图 7 所示. 由图 7 可以看出,

初始温度和压强越高, 喷口流速越快, 即初始温度和压强越高, 泄压过程越快. 图 8 给出了容器喷口流量随时间的变化. 由图 8 可以看出, 初始压强及温度越高, 喷口流量初始值越大, 并且下降越快. 这与初始温度和压强高, 泄压过程更快是一致的. 因此, 容器内部 SF₆ 初始压强及温度越高, 释放速度越快, 越有利于 SF₆ 的释放.

2 SF₆ 电离层释放效应

传统的 SF₆ 电离层释放效应研究未考虑 SF₆ 释放的初始状态, 或仅预估了 SF₆ 释放时的流速及流量等相关参数, 因此仿真结果的精度有限. 在 SF₆ 释放流场仿真的基础上, 这里将 SF₆ 释放过程中喷口流速及流量的计算结果作为初始参数, 加入 SF₆ 电离层释放效应研究中进行仿真计算, 从而得到更加精确的 SF₆ 效应仿真结果.

2.1 仿真参数

在 SF₆ 电离层效应仿真模型的基础上, 将 SF₆

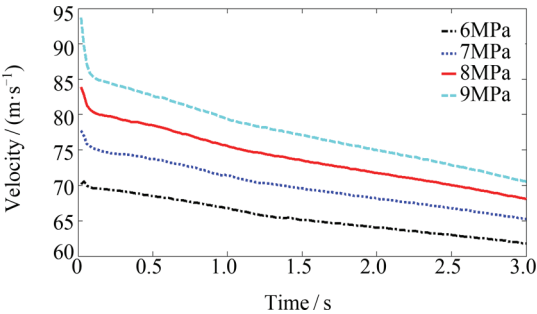


图 7 不同初始条件下容器喷口流速
Fig. 7 Velocity in the nozzle at different initial conditions

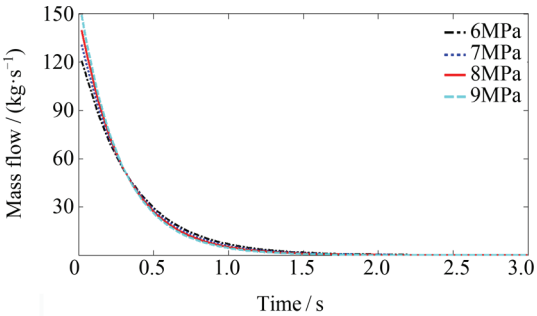


图 8 不同初始条件下容器喷口流量
Fig. 8 Mass flow in the nozzle at different initial conditions

容器释放流场仿真得到的喷口流速及流量作为初始参数, 开展数值仿真研究. 仿真参数设置列于表 2, 其中喷口流速及喷口流量是在初始压强 8 MPa、初始温度 327.15 K 的条件下通过流场仿真得到的.

2.2 仿真结果

采用电离层 SF₆ 释放三维动力学模型^[9], 以正北方向为 x 轴、正西方向为 y 轴、竖直向上为 z 轴建立平面直角坐标系, 仿真在 300 km 高度释放 30 kg SF₆ 产生的电离层三维扰动结构的时空演化过程.

图 9 给出了 30 kg 的 SF₆ 在 300 km 高度释放产生的电子密度扰动沿 z 向剖面. 可以看出, 在释放之初, 由于释放物的密度高, 释放物与电子快速反应形成电子密度空洞. 释放后 30 s 形成的电子密度空洞

表 2 主要仿真参数
Table 2 Simulation parameters

参数	取值 (来源)
释放时间	2015-09-30 18:00 LT
释放位置	(19.3°N, 109.8°E)
释放高度/km	300
释放物	SF ₆
释放量/kg	30
释放压强/MPa	8
释放温度/K	327.15
喷口流速	流场仿真结果
喷口流量	流场仿真结果

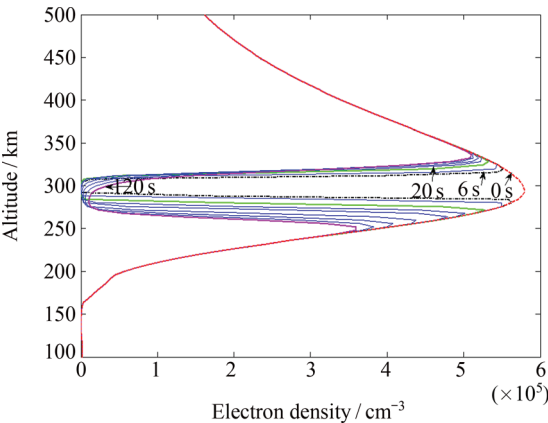


图 9 30 kg SF₆ 在 300 km 高度释放产生的
电子密度扰动沿 z 向剖面
Fig. 9 Temporally serial z slices of the electron density after 30 kg SF₆ releasing at 300 km

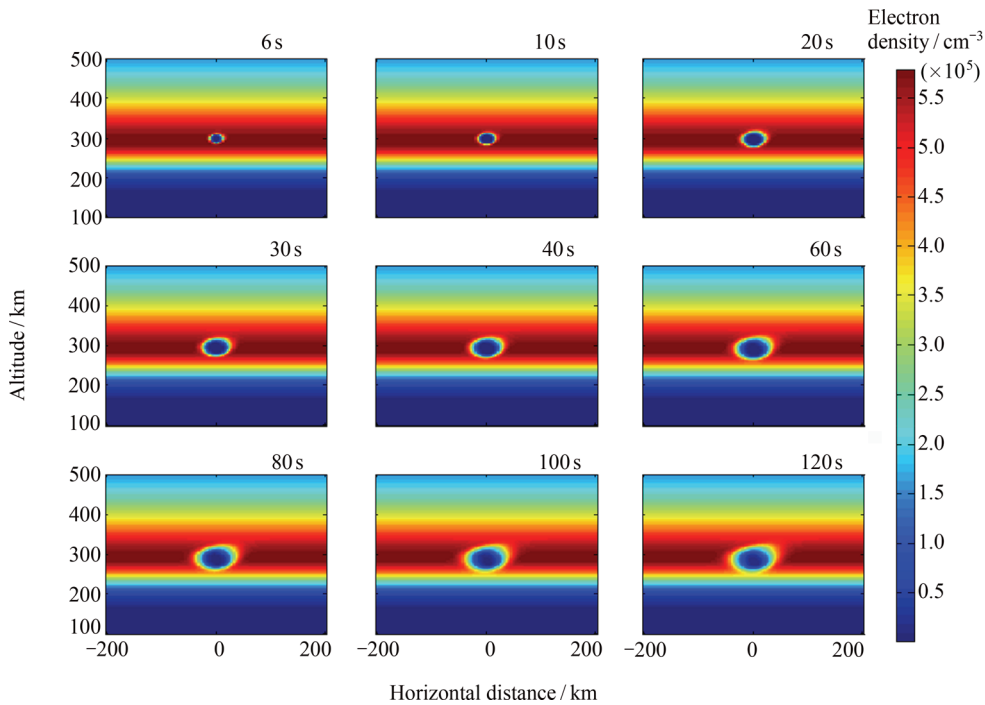


图 10 30 kg SF₆ 在 300 km 高度释放产生的电子密度扰动沿 xz 方向切面

Fig. 10 Temporally serial xz slices of the electron density evolution after 30 kg SF₆ releasing at 300 km

深度最深, 电子密度耗空达 100%, 随着时间的增加电离层洞的最大耗空深度逐渐减小, 从释放后 6s 的 100% 下降到释放后 120s 的 96%。同时, 电离层扰动中心高度出现了明显的下降趋势, 从释放之初的约 300 km 逐渐下降为释放后 120s 的约 280 km。

图 10 给出了 30 kg SF₆ 在 300 km 高度释放产生的电子密度扰动沿 xz 方向切面。由图 10 可以看出, 在 SF₆ 释放初期, 电离层扰动区的形态接近球体; 随后地磁场对电子密度扰动的控制作用逐渐显现, 电子沿磁场方向回填到原来的电离层耗空区, 电离层扰动沿磁场延伸形成椭球状, 长轴与短轴之比逐渐增大。

图 11 给出了 30 kg SF₆ 在 300 km 高度释放产生的三维电子密度扰动结构。由图 11 可以看出, 在 SF₆ 释放后约 6s 时, 产生的电离层扰动区尺度约为 20 km, 随后扰动尺度逐渐增大, 形态也逐渐由球体转变为椭球体。该仿真结果与前面一致。

3 结论

传统的 SF₆ 电离层释放效应模型并未考虑 SF₆ 释放过程中流速及流量等参数, 或仅对其数值进行粗

略近似, 这对仿真过程具有一定程度的影响。本文开展了 SF₆ 容器释放流场仿真, 根据容器的结构建立了几何模型及网格模型, 采用标准 $k-\varepsilon$ 模型, 利用 Fluent 对不同初始压强及温度的 SF₆ 释放过程中容器内部的流场进行仿真, 得到了释放过程中容器内部的压强、温度、喷口流速及喷口流量等变化情况, 对喷口流速及喷口流量进行了对比分析, 并将其带入 SF₆ 电离层释放效应仿真模型进行计算, 得到了更精确的 SF₆ 电离层释放效应仿真结果。研究结果有助于准确预估试验效果及进行试验现象的物理解释。

参考文献

- [1] KELLEY M C. The Earth's ionosphere: plasma physics and electrodynamics [M]. San Diego: Academic Press, 2009
- [2] HUANG Wengeng, GU Shifen. Ionospheric disturbances produced by artificially chemical releases [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2005, **25**(4): 254-258
- [3] BERNHARDT P A. Chemistry and dynamics of SF₆ injections into the F region [J]. *J. Geophys. Res.*, 1984, **89**: 3929-3937
- [4] BERNHARDT P A. High-altitude gas release: transition from collisionless flow to diffusive flow in a nonuniform

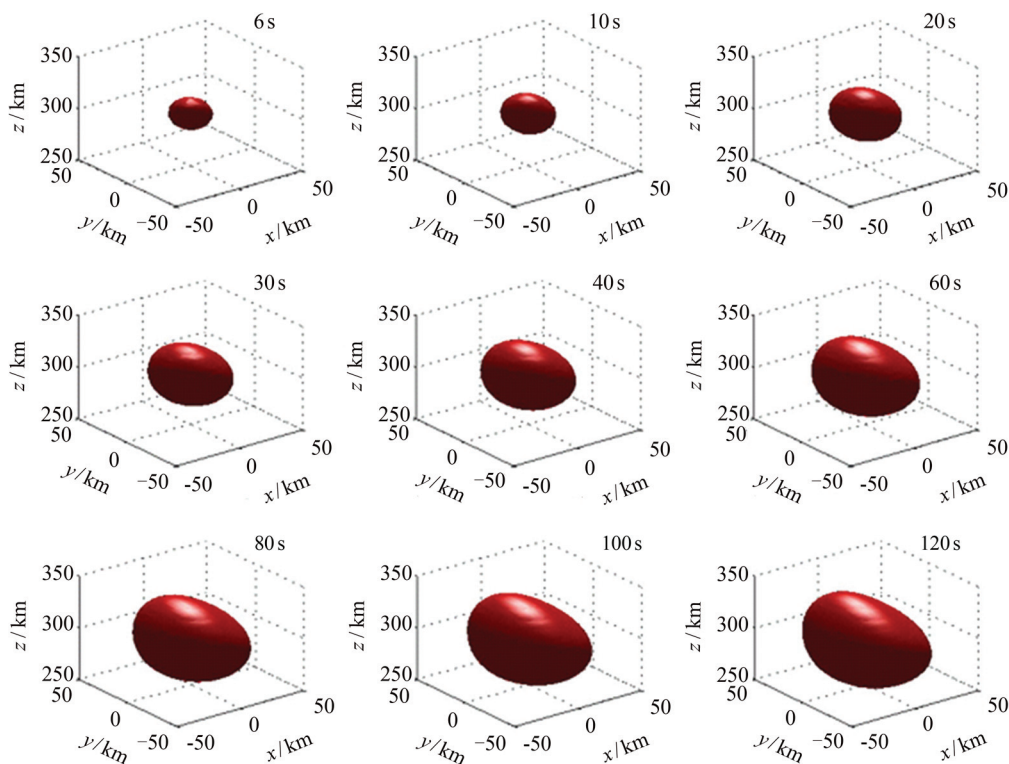


图 11 30 kg SF_6 在 300 km 高度释放产生的三维电子密度扰动结构

Fig. 11 Temporally serial 3D shapes of the electron density after 30 kg SF_6 releasing at 300 km

- atmosphere[J]. *J. Geophys. Res.*, 1979, **84**: 4341-4354
- [5] BERNHARDT P A. Plasm fluid instabilities in ionospheric hole[J]. *J. Geophys. Res.*, 1982, **87**: 7539-7549
- [6] MENDILLO M, SEMETER J, NOTO J. Finite element simulation: a computer modeling technique for studies of chemical modification of the ionosphere[J]. *Adv. Space Res.*, 1993, **13**(10): 55-64
- [7] HU Yaogai, ZHAO Zhengyu, ZHANG Yuannong. Disturbance effects of some representative chemical releases in ionosphere[J]. *Acta Phys. Sin.*, 2010, **59**(11): 8293-8303 (胡耀垓, 赵正予, 张援农. 几种典型化学物质的电离层释放效应研究[J]. *物理学报*, 2010, **59**(11): 8293-8303)
- [8] HUANG Yong, SHI Jiaming, YUAN Zhongcai. Ionosphere electron density depletion caused by chemical release[J]. *Chin. J. Geophys.*, 2011, **54**(1): 1-5 (黄勇, 时家明, 袁忠才. 释放化学物质耗空电离层电子密度的研究[J]. *地球物理学报*, 2011, **54**(1): 1-5
- [9] ZHAO Haisheng, XU Zhengwen, WU Zhensen, *et al.* A three-dimensional refined modeling for the effects of SF_6 release in ionosphere[J]. *Acta Phys. Sin.*, 2016, **65**(20): 209401 (赵海生, 许正文, 吴振森, 等. 电离层中释放六氟化硫效应的三维精细模拟研究[J]. *物理学报*, 2016, **65**(20): 209401)
- [10] WANG Fujun. Computational Fluid Dynamics Analysis-CFD Software Principles and Applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004 (王福军. 计算流体动力学分析 — CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004)
- [11] FUNKE M, KLEINRAHM R, WAGNER W. Measurement and correlation of the (p, ρ, T) relation of sulphur hexafluoride (SF_6). I. The homogeneous gas and liquid region in the temperature range from 225 K to 340 K at pressures up to 12 MPa[J]. *J. Chem. Thermodyn.*, 2002, **34**: 717-734
- [12] SCALABRIN G, BETTIO L, MARCHI P. A fundamental equation of state for sulfur hexafluoride (SF_6) in extended equation of state format[J]. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 2007, **36**(2): 617-662
- [13] GUDER C, WAGNER W. A reference equation of state for the thermodynamic properties of sulfur hexafluoride (SF_6) for temperatures from the melting line to 625 K and pressures up to 150 MPa[J]. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 2009, **38**(1): 33-94