

卫星表面原子氧通量和遭遇量的计算及讨论

范权福 田剑华

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

摘 要

建立了一个较为理想情况下卫星表面原子氧通量和遭遇量的计算模式. 在此基础上, 着重讨论了轨道高度、太阳活动、飞行攻角及轨道倾角等因素对原子氧通量和遭遇量的影响.

关键词 原子氧通量和遭遇量—轨道倾角—飞行攻角

1 引 言

在低地球轨道高度(200—1000 km)上, 大气中的主要成分为原子氧. 尽管这时大气很稀薄, 但当航天器表面以7—8 km/s的速度与原子氧相碰撞时, 原子氧的碰撞动能可达4—5 eV, 这相当于将航天器浸泡于高温(6000 K)的原子氧气体中^[1]. 由于氧原子的氧化性很强, 它很容易与航天器表面发生复杂的物理和化学反应, 导致表面材料腐蚀、变性和剥蚀等. 对于需要长期在低轨道上运行和工作的航天器, 例如空间站, 这种负面效应是十分严重的. 正因如此, 在制定航天计划时, 如何选择航天器表面材料及如何防止和减少原子氧对表面材料的影响是必须考虑的问题. 美国1984年4月发射的LDEF(Long Duration Exposure Facility)飞行器上, 有一项内容是专门研究原子氧对航天器表面的影响^[2].

在我国, 原子氧效应的问题已逐渐引起重视, 并且也有一些地面实验开展, 但相应的理论研究还较少. 本文论述了卫星表面原子氧通量和遭遇量的计算及应当注意的一些问题, 并对影响原子氧通量和遭遇量的主要因素进行了讨论.

2 原子氧通量和遭遇量的计算

在具体讨论原子氧通量和遭遇量的计算问题之前, 我们先对其作一个简单的定义. 原子氧通量指当原子氧按Maxwell分布的热运动速度, 在叠加了定向速度的情况下, 单位时间内, 原子氧入射到飞行器材料表面单位面积上的数目. 而原子氧遭遇量, 也即原子氧积分通量, 指原子氧通量沿轨道的时间积分.

在卫星轨道高度上, 尽管大气分子很稀少, 但温度却很高. 在太阳活动中等情况下, 300 km以上的大气温度即可达到1000 K左右^[1]. 这时, 大气分子的热运动速度可达1.15 km/s, 相对于7—8 km/s左右的卫星速度而言, 这显然不能忽略. 在后面的讨论中我们可以看到, 分子热运动对卫星背风面的原子氧遭遇量影响很大.

考虑分子热运动后, 计算原子氧通量公式为

$$F = \frac{1}{4} N c \{ \exp(-U^2) + U \pi^{1/2} [1 + \operatorname{erf}(U)] \}, \quad (1)$$

其中, $c = (8RT/\pi M)^{1/2}$, 为分子平均热运动速度. U 为一无量纲量, $U = (2\pi^{1/2})(v/c) \cos \alpha$. N 为原子氧数密度, R 为气体常数, T 为大气温度, M 为原子氧的摩尔质量, v 为大气相对于卫星表面的运动速度, α 为 v 与卫星表面法线的夹角. 上式中, 若 $v = 0$, 则 $F = Nc/4$; 若 $c = 0$, 则 $F = Nv \cos \alpha/4$.

公式 (1) 中原子氧数密度的计算采用 MSIS90 模式. 为了求出原子氧的数密度, 必须先确定卫星的位置 (高度、纬度和经度). 由于卫星绕地球运行一般是无动力飞行, 所以其轨道近似为椭圆. 为了计算方便起见, 我们在下面的讨论中都只考虑圆轨道或近圆轨道. 另外, 我们还忽略了由大气阻力引起的轨道高度的衰减.

在计算原子氧通量时, 另一个不能忽略的因素是地球的自转. 在考虑地球自转的情况下, (1) 式中的 v 应为大气自转速度矢量与卫星速度矢量之差. 由于大气自转速度大小随纬度变化, 而且其与卫星速度矢量的夹角也在不断变化, 所以在轨道上, v 的大小和方向都不是恒定不变. 通过计算后, 我们得到, 在太阳同步轨道高度 (600 km 左右) 的赤道上空, 由大气自转运动引起 $\Delta|v|$ 和 $\Delta\alpha$ 分别为 86.7 m/s 和 3.8°.

3 计算结果和讨论

在考虑了上述各种因素后, 我们建立了一个较为理想情况下原子氧通量和遭遇量的计算模式, 并用该模式计算了某些特定情况下卫星表面的原子氧通量和遭遇量. 在此基础上, 讨论了轨道高度、太阳活动、轨道倾角及飞行攻角等因素对卫星原子氧通量和遭遇量的影响. 需要说明的是, 我们选取太阳活动第 20 周的上半周 (1977—1981 年) 作为卫星运行期, 所有太阳和地磁活动的数据都来自 NGDC. 在讨论轨道倾角影响时, 卫星的高度取为 600 km; 在讨论飞行攻角影响时, 我们选用了太阳同步轨道卫星 (高度: ~632 km, 倾角: ~99°). 下文图表中涉及的原子氧遭遇量指的都是 1977—1981 年间的累积遭遇量.

3.1 轨道高度的影响

由于原子氧数密度随高度增加而呈指数衰减, 再加之卫星速度随高度增加而减小, 所以卫星的轨道高度是影响原子氧通量的最重要的因素之一. 美国的 LDEF 航天器实验表明, 飞行器的轨道高度的降低和太阳活动的加剧, 使得在最后 6 个月内, 飞行器表面的原子氧遭遇量占整个飞行期间总量的 50% 之多 [2]. 图 1 为不同太阳活动情况下平均原子氧通量随高度的变化. 可以看出, 随着轨道高度的增加, 原子氧通量急剧下降.

3.2 太阳活动的影响

尽管在 200 km 以下, 原子氧数密度的变化在一个太阳周内变化不大, 但在更高的高度 (500—800 km), 这种变化可达 10^3 量级 [3], 所以太阳活动也是影响原子氧通量的另一个重要因素. 从图 1 可知, 太阳活动越强, 原子氧通量越大. 图 2 则表明反映太阳活动高低的 10.7 cm 太阳射电流量 ($F_{10.7}$) 和原子氧通量有很好的对应关系. 图 3 为卫星运行期间

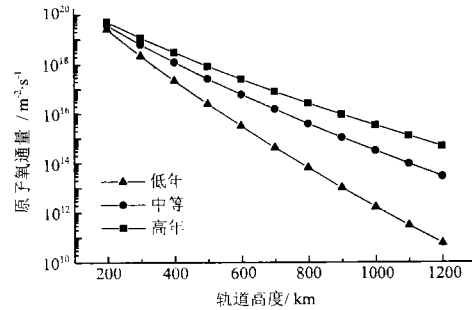


图 1 不同太阳活动条件下原子氧通量随高度的变化

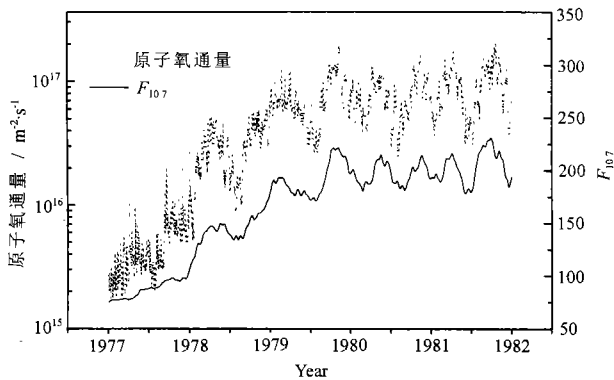
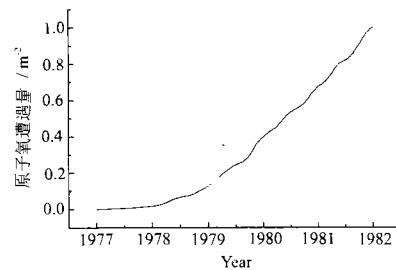
Fig.1 Effects of solar activity and altitude change
on atomic oxygen flux

在各个时间的原子氧遭遇量占整个时期的比例。可见, 1979 年下半年, 随着太阳活动进入峰值期, 原子氧遭遇量随时间的变化率明显增加, 这以后卫星表面遭受的原子氧占了整个期间的大部分。

太阳活动影响原子氧通量的另一个方面还体现在随着太阳活动的加剧, 大气密度增加, 导致卫星轨道衰减, 从而使卫星运行于一个原子氧数密度更大的环境中。

3.3 飞行攻角的影响

飞行攻角指的是卫星表面法线与卫星速度矢量之间的夹角(表面法线绕速度矢量逆时针旋转为正, 顺时针为负), 这里我们规定攻角在 $-90^\circ-90^\circ$ 间的表面为迎风面, 其它表面为背风面, 0° 攻角为正迎风面, 180° 攻角为正背风面。从图 4 可以看出, 在卫星的迎风面, 原子氧遭遇量变化不大, 而在背风面, 遭遇量则急剧下降, 在 180° 攻角处达到最小值。图中虚线为未考虑大气自转运动后原子氧遭遇量的变化, 可见, 在迎风面, 大气的自转效应很小, 而在背风面, 这种作用则变得较为明显。

图 2 原子氧通量和 $F_{10.7}$ (81 天平均)
的对应关系Fig.2 Daily atomic oxygen flux
vs 81-day mean $F_{10.7}$ 图 3 卫星飞行期间表面原子氧
遭遇量占总量的比例Fig.3 Atomic oxygen fluence as
a percent of total exposure

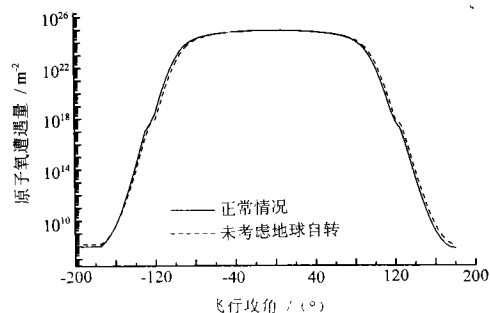


图 4 实际情况和未考虑地球自转时
原子氧遭遇量随攻角的变化

Fig.4 Effects of earth rotation on atomic
oxygen fluence at various incident angels

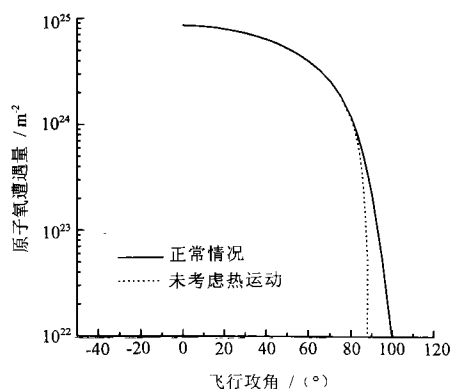


图 5 实际情况和未考虑热运动时
原子氧遭遇量随攻角的变化

Fig.5 Effects of thermal molecular velocity
on atomic oxygen at various incident angels

在背风面,若不考虑大气自转运动的影响,卫星表面的原子氧遭遇量主要是氧原子热运动的贡献.图 5 将未考虑分子热运动和实际情况作了对比,可以看出,在攻角小于 80° 时,分子热运动几乎可以完全忽略,而在大于 80° 时,热运动所占的比例则逐渐加大,在 88° 攻角时热运动的贡献已达 85%(表 1).从表 1 还可得知,攻角 90° 的表面,即平行于卫星速度矢量的表面的遭遇量大约为正迎风面的 3% 左右,而攻角为 100° 时则只有 0.1%.

表 1 不同飞行攻角下实际情况和未考虑分子热运动时的原子氧遭遇量

飞行攻角 ($^\circ$)	原子氧遭遇量 ($/\text{m}^2$)		热运动所占 比例 (%)
	实际情况	未考虑热运动	
0	8.615×10^{24}	8.615×10^{24}	0
20	7.971×10^{24}	7.971×10^{24}	0
40	6.367×10^{24}	6.367×10^{24}	0
60	3.994×10^{24}	3.994×10^{24}	0
80	1.190×10^{24}	1.140×10^{24}	4.2
82	9.344×10^{23}	8.409×10^{23}	10.0
84	7.035×10^{23}	5.409×10^{23}	23.0
86	5.048×10^{23}	2.402×10^{23}	52.0
88	3.432×10^{23}	5.188×10^{22}	85.0
90	2.200×10^{23}	0.000	100
100	8.962×10^{21}	0.000	100
120	4.978×10^{17}	0.000	100
140	1.794×10^{13}	0.000	100
160	1.439×10^9	0.000	100
180	6.793×10^7	0.000	100

3.4 卫星倾角的影响

卫星倾角不同, 其所经过的纬度范围也不同. 倾角小的卫星只在赤道附近的上空运行, 而倾角大的卫星则可以覆盖大部分纬度地区. 由于高空原子氧数密度具有一定的纬度效应, 因而倾角不同的卫星所遭受的原子氧遭遇量也必然不同.

图 6 为 600 km 高度卫星正迎风面的原子氧遭遇量随倾角的变化. 从图可知, 当倾角小于 90° 时, 原子氧遭遇量先随倾角的增加而缓慢增加, 随后又很缓慢地减少, 当倾角大于 90° 后, 原子氧遭遇量迅速增大, 一直到 150° 左右才又缓慢地下降. 图 6 中虚线为不考虑地球自转的情况, 应该说, 这条曲线才真正地反映了原子氧数密度的纬度效应对卫星表面遭遇量的影响. 显然, 虚线具有以 90° 为中心的对称性, 这是因为倾角之和为 180° 的两颗卫星经历了同样的纬度范围, 不同的只是运行方向相反. 对于长期飞行器, 在不考虑大气自转的影响及其它条件相同时, 同一表面的原子氧遭遇量当然应该相差很小.

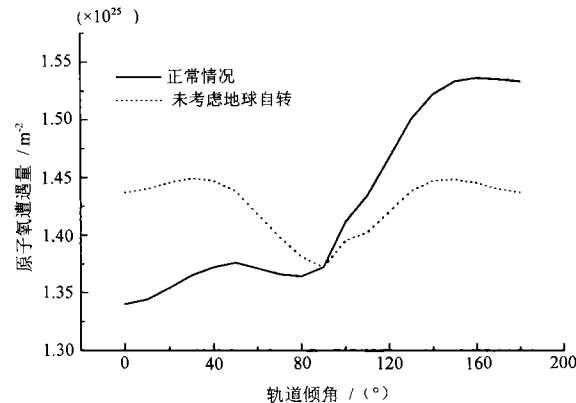


图 6 实际情况和未考虑地球自转时
原子氧遭遇量随轨道倾角的变化
Fig.6 Effects of earth rotation on atomic oxygen
at various orbit inclinations

表 2 不同轨道倾角下实际情况和未考虑地球自转时的原子氧遭遇量

轨道倾角 ($^\circ$)	遭遇量 ($\times 10^{25} / \text{m}^2$)		自转效应 (%)
	实际情况	未考虑自转	
0	1.340	1.437	-7.2
20	1.354	1.445	-6.7
40	1.365	1.447	-5.4
60	1.371	1.418	-3.4
80	1.364	1.381	-1.2
90	1.372	1.372	0
100	1.411	1.395	1.1
120	1.467	1.420	3.2
140	1.522	1.447	4.9
160	1.536	1.445	5.9
180	1.533	1.437	6.3

表 2 列出了实际情况和未考虑地球自转时不同轨道倾角的卫星表面原子氧遭遇量. 可见, 运行在低纬地区的卫星其表面的遭遇量受地球自转影响最大, 最大可达 6%—7%, 而对于倾角较高的卫星或极轨卫星, 自转效应较小. 另外, 考虑地球自转的情况下, 卫星表面遭遇量最大值和最小值之间的差别可达 13% 左右, 反之, 这种差别则只有 4.5%, 说

明倾角对遭遇量的影响主要由地球自转造成, 原子氧数密度的纬度效应是次要的.

4 小 结

由以上讨论我们可以得到, 除了轨道高度和太阳活动这两个能引起卫星表面原子氧遭遇量剧烈变化的因素之外, 轨道倾角和飞行攻角也能对遭遇量造成一定的影响. 地球自转作用是轨道倾角影响卫星表面原子氧遭遇量的主要原因, 相对来说, 纬度效应是次要的; 在飞行攻角小于 80° 的迎风面, 原子氧热运动可以完全忽略, 地球自转的影响也比较小; 而在背风面, 飞行攻角影响原子氧遭遇量是卫星速度、地球自转和原子氧热运动三者共同作用的结果.

在原子氧通量和遭遇量计算过程中, 我们只考虑了圆轨道和近圆轨道, 并且忽略了轨道的衰减, 这是一种较为理想的情况. 为了使结果更符合事实, 在下一步的工作中, 我们拟将用卫星轨道预报模式来确定卫星的位置, 结合现有的原子氧通量模式, 我们就能实现一个完整的原子氧效应预报模式. 另外, 还有一些问题, 如卫星表面的遮蔽、原子氧的反射等, 也是我们进一步研究中需要考虑的.

参 考 文 献

- [1] 都亨, 叶宗海. 低轨道航天器空间环境手册. 北京: 国防工业出版社, 1996, 8—9
- [2] Bourassa R J, Gillis J R. Atomic oxygen exposure of LDEF experiment trays. NASA Contractor Report 189627
- [3] Gorney D J. Solar cycle effects on the Near-Earth space environment. *Rev. Geophys.*, 1990, **28**(3):335—336

THE COMPUTATION OF ATOMIC OXYGEN FLUX AND FLUENCE ON THE SURFACES OF ARTIFICIAL SATELLITES AND ITS DISCUSSION

FAN Quanfu TIAN Jianhua

(Center for Space Science and Applied Research, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract

In this paper, a model for computing Atomic Oxygen (AO) flux and fluence is developed under relatively ideal conditions. The effects of some factors (orbit altitude, solar activity, incident angle and inclination) on AO flux and fluence are mainly discussed.

Key words Atomic Oxygen flux and fluence, Inclination, Incident angle