

空间等离子体对空间拦截器飞行可靠性影响分析

冯博鑫, 谭守林, 仇小博

(第二炮兵工程大学 4504 分队, 西安 710025)

摘要:分析了等离子体空间分布规律,介绍了2种会对空间拦截器造成损伤的环境效应,利用电离层等离子体对空间拦截器信号传输衰减的公式,分析了电离层等离子体对电磁波的衰减常数与电子密度的关系,得出了电磁波的衰减常数与电子密度成线性正比关系的结论。

关键词:拦截器;等离子体;环境效应;信号衰减

本文引用格式:冯博鑫,谭守林,仇小博.空间等离子体对空间拦截器飞行可靠性影响分析[J].四川兵工学报,2015(3):53-55.

Citation format:FENG Bo-xin, TAN Shou-lin, ZHANG Xiao-bo. Analysis on Influence of Space Plasma on Flight Reliability of Space Interceptor[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2015(3):53-55.

中图分类号:V448;TJ86

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2015)03-0053-03

Analysis on Influence of Space Plasma on Flight Reliability of Space Interceptor

FENG Bo-xin, TAN Shou-lin, ZHANG Xiao-bo

(No. 4504th Contingent, the Second Artillery Engineering University, Xi'an 700025, China)

Abstract: This paper analyzed the principle of space plasma distribution, and introduced two kinds of environment effects which can cause damage to space interceptors. Using the equation of space interceptors signal transmission attenuation caused by ionosphere plasma, this paper analyzed the relationship between the attenuation constant and electron density thus came up with the conclusion that the attenuation and electron density are of direct ratio relationship.

Key words: interceptors; plasma; environment effect; signal attenuation

近年来,国内外在轨运行的航天器由于空间环境引起的异常和故障现象频频出现。随着集成度较高的大规模/超大规模微电子器件在航天器上频繁使用,电子系统性能提高的同时也对空间环境更为敏感,因此由于空间环境引起的航天器故障日益增多。

对早期6颗卫星的故障原因进行统计,结果表明空间环境引起的故障占总数的40%,如表1所示。美国环境中心从1965年起,对多个卫星的300个故障进行分析评价,结果表明,大约33%左右的故障是由于变化的空间环境造成的^[1]。

目前,在轨拦截器在空间的作用越来越明显,利用其对敌方卫星进行拦截是破坏敌空间力量的一个重要手段,随着在轨拦截器空间数目的增多和空间地位的提高,它的空间环

境问题也受到广泛关注,对拦截器所处的空间环境进行研究,对于提高拦截器的抗干扰能力,确保拦截器安全运行,充分发挥拦截器在空间的重要作用都具有重要意义。

空间拦截器在各种轨道运行,面临着多种空间环境要素,其中对拦截器有较大影响的重要包括太阳电磁辐射、空间等离子体地球磁场、中性大气地球电离层、空间带电粒子辐射、空间碎片与微流星体等等。这些空间要素与运行在轨道中的拦截器相互作用、相互影响,与拦截器材料和电子元器件产生各种空间环境效应,进而会对拦截器的飞行可靠性产生影响,其中,对拦截器表面影响较大的主要是空间等离子体环境,例如,等离子体引起的拦截器表面充电效应是导致拦截器异常和故障的重要原因,在空间环境引起的拦截器

异常和故障中约占 1/3。鉴于此,主要分析等离子体环境对拦截器飞行可靠性的影响^[2]。

表 1 国内早期卫星故障原因统计

故障原因	故障次数	故障百分率/%
设计和工艺原因	5	16.7
空间环境引起	12	40.0
元器件质量	5	16.7
其他未确定因素	8	26.6
总计	30	100

1 等离子体空间分布分析

通常认为,等离子层分布区域从距离地面约 60 km 处算起,直至与星际空间相接的广大区域,随着高度的变化,等离子体的密度、组分、能量发生变化。表 2 给出了 60 ~ 3 000 km 范围内,典型电子浓度、电子能量随高度变化的情况。

表 2 电子浓度、电子能量随高度的变化值

高度/km	电子浓度/cm ⁻³	电子能量/keV
60	2 × 10 ²	0.05
85	1 × 10 ⁴	0.05
140	2 × 10 ⁵	0.05
200	5 × 10 ⁵	0.08
300	2 × 10 ⁶	0.19
400	1.5 × 10 ⁶	0.22
500	1 × 10 ⁶	0.23
600	6 × 10 ⁵	0.24
700	4 × 10 ⁵	0.25
800	3 × 10 ⁵	0.26
900	2 × 10 ⁵	0.27
1 000	1 × 10 ⁵	0.28
2 000	2.5 × 10 ⁴	0.30
3 000	1.5 × 10 ⁴	0.35

由表 2 可以看出,电子能量随着高度的增加持续增加,而在距离地球 300 ~ 500 km 高度区域是等离子体分布最集中区域,会对一些低轨道的拦截器造成损伤。

2 等离子体环境效应对空间拦截器可靠性影响

地球周围大多数的轨道环境都处于等离子体状态,进入等离子体环境的拦截器由于表面材料导电性的差别,导体和绝缘体有不同的电位,会导致拦截器在飞行过程中出现静电电

荷转移现象,拦截器表面可能形成巨大的电位差,由其产生的环境效应对拦截器的电子元器件以及电子控制分系统产生破坏,对拦截器安全飞行可靠性产生影响^[3]。

2.1 绝缘体故障影响

如果绝缘体的电位差超出了其承受范围,就可能发生绝缘体击穿故障,当物体的电位差在绝缘体内形成了一条气体通道时,其产生的相关能量可以导致气体脱离物体表面的控制。绝大多数绝缘体故障的发生,一定会诱发整个物体表面性质的明显变化,局部发生的单一绝缘体故障,也会导致拦截器飞行任务失败。

2.2 气态电弧放电影响

如果电位差达到足够大时,物体表面会发生电弧放电,电弧放电产生的能量脉冲可能对拦截器造成物理性损坏,会使拦截器的电子控制分系统遭到永久性的破坏,乃至产生电路故障,还可能产生电磁干扰,影响灵敏电子设备的正常运行。由于电弧放电可能产生的灾难性后果,所以在分析拦截器飞行可靠性影响时,必须考虑电弧放电现象。

电弧放电产生的能量脉冲可能会损坏拦截器,电弧放电的能力虽然是 mJ 量级或更小一些,但足以损坏一些特殊的部件,即使放电没有对放电区造成物理性的损坏,但同时形成的 EMI 也会在系统中扩散,并导致拦截器的供电系统或电子控制分系统出现混乱^[4]。

3 电离层等离子体对空间拦截器信号传输衰减的分析

电离层等离子体是一种与太阳活动密切相关的湍动剧烈的不均匀等离子体,其高度在 600 km 以下,主要反应机理是光电离过程。当有无线电波通过时,它会引起电波的衰减、反射、相位变化,并产生噪声,使拦截器的制导系统、遥测系统和雷达测量受到影响,甚至引起信号中断,给测量带来较大的误差,会导致拦截器在执行任务时出现精度下降甚至机动失败的后果。

电离层等离子体的结构较为复杂,很难用精确的理论描述。假设它是无界的,各向同性的、均匀等离子体,通过它的电磁波为平面波,则运用麦克斯韦方程组和经典气动力学理论,得到电磁波的衰减常数 α 和相位常数 β 的表达式为^[5]:

$$\alpha = \frac{\omega}{c} \left\{ \frac{1}{2} \sqrt{\left[1 - \frac{4\pi N e^2}{m(\omega^2 + \nu^2)} \right]^2 + \left[\frac{4\pi N e^2}{m(\omega^2 + \nu^2)} \cdot \frac{\nu}{\omega} \right]^2} - \left[1 - \frac{4\pi N e^2}{m(\omega^2 + \nu^2)} \right] \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$\beta = \frac{\omega}{c} \left\{ \frac{1}{2} \sqrt{\left[1 - \frac{4\pi N e^2}{m(\omega^2 + \nu^2)} \right]^2 + \left[\frac{4\pi N e^2}{m(\omega^2 + \nu^2)} \cdot \frac{\nu}{\omega} \right]^2} + \left[1 - \frac{4\pi N e^2}{m(\omega^2 + \nu^2)} \right] \right\}^{\frac{1}{2}}$$

式中: c 为光速; N 为电子密度; ω 为无线电角频率(rad/s); e 为电子电荷; m 为电子质量; ν 为碰撞频率(次/s)。

在选择适当 ω 的情况下, N 、 ν 和 α 的关系式简化为

$$\alpha = \frac{2\pi N e^2}{mc} \left(\frac{\nu}{\omega^2 + \nu^2} \right) \quad (2)$$

假定在 ω, ν 已知的情况下, α 和 N 的关系式可以表示为

$$\begin{cases} \alpha = l_0 N \\ l_0 = \frac{2me^2}{mc} \left(\frac{\nu}{\omega^2 + \nu^2} \right) \end{cases} \quad (3)$$

从式(3)可以看出 N 和 α 呈线性比例关系,其中 l_0 是该线性关系的比率。即随着电子密度的增大,电离层等离子体对电磁波的衰减严重。

4 结论

通过分析等离子体空间分布规律和2种会对拦截器造成损伤的环境效应,可以得出,等离子体在地球低轨道环境中会对拦截器造成不同程度的破坏,甚至还可能会使拦截器出现重大故障,尤其是在等离子体浓度最大的300~500 km高度区域,其对拦截器的影响是最为严重的。

利用电离层等离子体对拦截器信号传输衰减的公式,分析了电离层等离子体对电磁波的衰减常数与电子密度的关系,得出了电磁波的衰减常数与电子密度成线性正比关系的

(责任编辑 周江川)

结论,所以为减少等离子体对拦截器的影响,加强拦截器空间飞行的可靠性,在拦截器飞行过程中应设法避开等离子体电子密度高的区域。

参考文献:

- [1] 许滨,武占成,郝永峰,等.拦截器在轨空间环境研究[J].河北科技大学学报,2011(4):45-47.
- [2] 黄本诚,马有礼.拦截器轨道动力学与控制[M].北京:国防工业出版社,2002.
- [3] 冯伟泉,徐森林.归因于空间环境的拦截器故障与异常[J].拦截器环境工程,2011(4):23-25.
- [4] 唐贤明.空间环境[M].北京:中国宇航出版社,2009.
- [5] 叶宗海.空间环境对航天活动的影响[J].载人航天,1997(2):19-21.

(上接第44页)随盘面转动,单个气斗将经历射流影响范围-大气压影响范围-射流影响范围的循环过程,一个周期需要单个气斗旋转180°。观察者随斜切喷管静止不动,一个斜切喷管射流的影响范围是冲击区附近的相邻的3个气斗,由于有两个斜切喷管,即任意时刻总共有6个气斗瞬间处在射流影响范围,4个气斗处在大气压影响范围。盘面总扭矩随时间成周期性震荡变化,变化周期为盘面转36°所用的时间。在总扭矩变化的特定的周期内(以24°为起点,依次每隔36°进行划分,得到24°至60°,60°至96°等等区间),有且仅有6个端齿受到了燃气持续的冲击。驱动转子旋转的盘面总扭矩的大小约为0.5 N·m。此结论描述了涡轮盘面受到的冲击载荷的作用机制。

3) 斜切喷管未切管壁反射出斜激波,造成自由射流区存在两个超音速膨胀波区。 $\varphi = 67.5^\circ$ 角度位置流场,在端齿3,4上方的脱体激波直接分别影响到两个超音速膨胀波区。为了了解不同角度位置,流场结构的差异,需要进行更多的研究。

参考文献:

- [1] 谭汉清.国外微型涡喷发动机应用现状及未来发展趋势[J].飞航导弹,2013(3):76-80.
- [2] 郑严,庞重义.弹用涡喷(涡扇)发动机技术[J].飞航导弹,2001(12):43-52.
- [3] 刘建国.弹用涡喷发动机快速启动涡轮结构设计与分析[D].长沙:国防科学技术大学,2011.5.
- [4] Walker D W. Navy Development of Low Cost Supersonic Turbojet Engine [J]. Naval Weapons Center, SAE 730362,1973(4):101-107.
- [5] 秦能,汪亮,王宁飞.低燃速低燃温双基推进剂燃烧性能的调节[J].火炸药学报,2003,26(3):16-19.
- [6] 王娟.对统计中相关分析与回归分析的论述[J].现代经济信息,2014(8):115.

(责任编辑 周江川)