

G F G Y G B S

低轨道航天器空间环境手册

都亨 叶宗海 主编



国防工业出版社

V4-62
1003

V4-62
1003-1

低轨道航天器空间环境手册

都 亨 叶宗海 主编



国防工业出版社

·北京·

766943

低轨道航天器空间环境手册

图书在版编目(CIP)数据

低轨道航天器空间环境手册/都亨,叶宗海主编. —北京:国防工业出版社,1996. 11

ISBN 7-118-01670-5

I. 低… II. ①都… ②叶… III. 低轨道-航天器-航天器环境-手册 IV. V419-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 19435 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 35½ 824 千字

1996 年 11 月第 1 版 1996 年 11 月北京第 1 次印刷

印数:1—2 000 册 定价:48.80 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

低軌道航
天器空間
環境手冊

丁衛高

序

走向太空是人类开发自然的必然历程,1957年人类终于实现了这一理想。展现在我们面前的是完全陌生的、和地面条件迥然不同的环境,我们赖以生存的大气消失了,替代它的是稀薄的等离子体、贯穿能力极大的高能带电粒子、速度极快的微流星体。人们立即想到,这样恶劣的环境条件对航天器、对航天活动以至人进入太空会带来什么样的影响。40年来由于空间环境诱发出的大量航天器故障和异常证明这样的担心不是多余的,它是威胁航天安全的重要因素,我们必须十分重视环境的影响。

“863”高技术计划有关航天领域中,有由中国科学院、航天工业总公司等有关部门的科技工作者制定的我国的空间环境研究规划,并全面、系统地开展了研究工作,已经取得卓有成绩,开始在各航天计划中发挥作用。

书中有关模式研究的任务是为工程设计提供基本的设计参数。本书作者收集了大量模式,加上自己的研究成果,编辑出版的这本手册,将低轨道航天器遇到的环境参数集中在一起,供航天工程技术人员参照使用,是很有实际意义的。还应该看到,空间环境的变化是很剧烈的,是静态模式所不能反映的,还须要进一步发展动态模式,开展空间环境的预报,使我们能够选择发射时间,主动地避开恶劣的环境条件。环境研究的最终目的是克服环境的影响,在此基础上还必须研究环境与航天器以及航天活动的相互作用,探索并提出减少影响所须采取的对策和措施,以保证航天器的正常工作和航天活动的正常进行。总之,空间环境研究是一项长期的任务,随着航天事业的发展,还会不断出现新的问题需要我们去解决,我们一定要持之以恒,锲而不舍地做好这项工作。

王天琪

1996年8月13日

前 言

1957年,第一颗人造地球卫星进入太空,将人类活动和生活范围扩展到了浩瀚的宇宙空间,宣告了人类进入太空时代。近40年来,已经有数千个航天器在太空遨游,通信卫星、气象卫星、测地卫星等应用卫星和载人飞船、载人天空实验室改变了人类自身的生活方式;空间物理、空间天文、空间材料和生命科学等一批科学卫星的研究成果,也极大地改变了人们对宇宙空间的认识。在频繁的航天活动中,人们始终被空间环境对航天器的影响所困扰:60年代,担心流星体的碰撞、辐射带的剂量效应以及高层大气对航天器轨道的影响;70年代,发现等离子体对航天器的充电效应导致大量卫星发生故障甚至失效;进入80年代以后,随着微电子技术的发展和在航天器上广泛的应用,单个高能带电粒子即可造成航天器失效的事实,迫使人们花费极大的精力去研究单粒子效应。随着航天技术的日臻完善,设计和制造过程中的缺陷造成的航天器故障和异常越来越少,空间环境造成的故障和异常越来越多地成为人们关注的焦点。展望未来,以太空居民为目标的大规模的载人航天活动,以建立太空工厂为目标的长时间运行的大型空间站,以开发宇宙为目标的建立月球行宫和载人行星飞行的计划,无不首先需要克服空间环境的影响,并且已经提出了许多它们所特有的问题,等待人们研究解决。

近40年来在空间环境研究的最基本的问题,即建立空间环境模式方面取得了丰硕的成果。这一方面是因为人们对宇宙空间的物理状态知道得极少,迫切需要了解和掌握空间最基本的状态;更重要的是航天器的方案设计、工程设计、生产研制、在轨运行直到事后分析的全过程,都首先需要各个参数的空间分布,各种模式即应运而生。从60年代开始,在大量探测数据的基础上,陆续编制成流星体、高层大气、电离层、地磁场、辐射带、宇宙线等参数的空间分布模式,并且不断地修正改进,逐步完善,初步达到实用的水平。

我国航天事业的发展,对空间环境的研究也提出了很高的要求,空间环境对航天器及航天活动的影响也是我国航天工程技术人员在设计中十分关心的问题。70年代初,在当时的数据、模式和计算条件下,曾编辑出版了《人造地球卫星环境手册》,此后的二十余年来,大量新的、高质量数据的获得,以及计算能力的增强,使空间环境模式的质量有了很大的提高,有可能为工程设计提供更多更好的环境参数。中国科学院空间科学与应用研究中心空间环境研究室在“863”高技术计划和其它航天计划的支持下,近年来广泛收集了国外发表的各种环境模式,正在进行集成和加工,使之更便于无暇对空间环境进行深度研究的航天工程技术人员使用。考虑到我国目前主要的航天器集中在1000 km以下的低地球轨道和地球同步轨道,这一区域的环境更为人们所关心,我们首先编制了这一本《低轨道航天器空间环境手册》,希望能给各有关部门的领导干部、各级机关工作人员和航天工程技术人员提供一个更方便地了解空间环境概貌、获得具体参数的途径。地球同步轨道是另一个应用卫星比较密集的区域,我们将继续编辑出版《地球同步轨道航天器空间环境手册》以满足这方面的需要。

需要说明的是我们只收入了高层大气、电离层、地磁场、地球辐射带、银河宇宙线、太阳宇宙线、太阳电磁辐射、流星体等自然环境参数,而没有给出航天器放气污染、电磁辐射污染、空间碎片等人造的环境参数,这决不是因为它们不重要,相反,它们都是目前人们极其关心的。没有收入的原因是它们与人为的因素有密切的关系,很难给出一个普遍适用的环境模式,或者模式在不断更新,一个具体的模式的适用期太短,以书本的形式给出的模式无法适应迅速变化的情况,勉强给出的参数值会偏离实际数值太远。

人类进入太空,说明人类的伟大和技术的进步,但在广阔的宇宙空间之中,人类又显得如此渺小,面对复杂多样而又变化无常的空间环境,40年的顽强努力,也只是有了一个粗浅的了解。相对于环境参数数倍乃至数十倍以上的变化幅度,一个典型模式,尽管努力包含了现在已知的各种规律性的变化,仍然有可能与实际的参数值有较大的偏离,何况现有的模式还存在这样那样的问题,所有模式仍在不断改进之中,需要我们辩证地对待。目前正在兴起的“空间环境预报”(又称“宇象预报”——Space Weather Forecast)正是为了在静态模式的基础上,更精确地、实时地给出空间环境各参数的数值,这也是我们下一步需要为之奋斗的目标。另外,本书篇幅有限,给出的数据在空间覆盖、时间覆盖、反映各种变化规律和精度等方面都受到限制,如需要得到更详尽的环境数据,请和我们联系。

我们的宗旨是尽量从实际需要出发,考虑航天工程技术人员需要和特点,尽量收集最新的模式,尽量采用便于查阅的编排形式,以利读者。但限于我们的学识和经验,肯定有许多不足之处,甚至错误,请批评指正。

在我们收集和加工各种模式的过程中,得到了许多同行的支持和帮助,特别是世界数据中心美国中心(WDC-A)下属的日地物理数据中心(Solar-Terrestrial Physics)和火箭与卫星中心(Rockets and Satellites)给予了很大的帮助,在此表示衷心的感谢。

在本书的编写和出版过程中,得到了国防科学技术工业委员会、国防工业出版社、中国科学院空间科学与应用研究中心领导的关心、支持和鼓励,在此表示衷心的感谢。

参加本书各章编写的人员如下:

第一章:都 亨、叶宗海

第二章:田剑华、徐国良、刘 静

第三章:古士芬、师立勤、臧振群、吴中华

第四章:都 亨、刘其俊

第五章:叶宗海、薛丙森、龚建村

第六章:叶宗海、薛丙森

第七章:叶宗海、乐贵明、薛丙森

第八章:王英鉴

第九章:刘 静、都 亨

此外,刘其俊同志参与了各章文字和图表的统一工作,黄采英同志参与了部分文字的处理和编排工作。

都 亨、叶宗海于北京

1996年7月

目 录

第一章 概述	1
一、航天器主要轨道类别的环境特征	1
二、低轨道航天器空间环境特点	2
三、近地空间环境对航天器的影响	5
四、航天器研制中对空间环境的需求.....	10
五、空间环境模式.....	10
第二章 高层大气	12
一、定义.....	12
二、术语和单位.....	12
三、特征和变化规律简述.....	17
四、效应简述.....	17
五、图表解释.....	18
第三章 电离层环境	98
一、定义.....	98
二、术语和单位.....	99
三、特征和变化规律简述	101
四、效应简述	103
五、图表解释	104
第四章 地磁场	177
一、定义	177
二、术语和单位	177
三、特征和变化规律简述	179
四、效应简述	182
五、图表解释	182
第五章 银河宇宙线	298
一、定义	298
二、术语和单位	298
三、特征和变化规律简述	299
四、效应简述	302

五、图表解释	302
第六章 太阳宇宙线	340
一、定义	340
二、特征和变化规律简述	340
三、效应简述	344
四、图表解释	344
第七章 地球辐射带	397
一、定义	397
二、术语和单位	398
三、特征和变化规律简述	399
四、效应简述	402
五、图表解释	404
第八章 太阳电磁辐射和地气辐射	516
一、定义	516
二、术语和单位	516
三、特征和变化规律简述	517
四、效应简述	519
五、图表解释	520
第九章 流星体	542
一、定义	542
二、术语和单位	542
三、特征和变化规律简述	542
四、效应简述	543
五、图表解释	546

第一章 概 述

近四十年的航天实践经验证明,空间环境是诱发航天器异常和故障的主要原因之一,必须给予极大关注。

一、航天器主要轨道类别的环境特征

宇宙空间充满了各种形态的物质:中性气体、电离气体、等离子体和各种能量的带电粒子;有引力场、磁场和电场;有各种波长的电磁辐射:从能量极高的 γ 射线到频率极低的电磁波。并且它们都具有十分复杂的空间结构和随时间变化的特征,在近地空间可以划分为高层大气、电离层、磁层、等离子体层、辐射带等主要区域。在磁层以外更远的空间则是由太阳风和行星际磁场构成的日层,以及在其中运行的行星、小行星、彗星等。

航天器因其负担的任务不同而在不同的轨道上运行,它们所面临的环境也极不相同。以探测行星际空间和太阳系以外的空间为目的,人造行星和宇宙飞船将在远离地球的宇宙空间中运行,它所遇到的主要是太阳风、行星际磁场、宇宙线、流星体等环境;如要探测木星或土星,则会遭遇木星辐射带或土星辐射带的由高能带电粒子组成的强辐射环境;以通信、数据传输、气象观测为目的的航天器,以及拟议中的空间电站均在地球同步轨道上运行,使这一轨道成为航天器比较密集的区域,在这里除了来自外空的宇宙线和流星体对航天器构成一定威胁外,地球磁层扰动时从磁尾注入的高温等离子体是此轨道上特有的恶劣环境,对航天器构成严重威胁,曾经造成许多航天器工作失常甚至完全毁坏,是首先需要注意防护的环境因素;在数千公里高度上飞行的航天器的主要威胁来自辐射带中的高能质子和重离子诱发的单粒子事件,和主要由高能电子造成的剂量效应;在1000 km以下运行的主要是对地观测卫星、气象卫星、载人飞船和航天飞机等,这个区域的环境条件与其它轨道环境有许多不同之处,最主要特点是地球高层大气的影响十分严重,它对航天器的阻力是航天器轨道最主要的摄动,是航天器陨落的主要原因;大气中的氧原子成分又是航天器表面化学腐蚀、剥离的主要原因。此外,由于这一区域内的地磁场的强度较大,它对卫星的姿态会产生较大的干扰力矩,同时也为姿态控制提供新的途径;地磁场对高能带电粒子的偏转作用,成为航天器的天然屏障,使得低纬度区宇宙线强度大大低于上述其它区域。因为在这一区域中运行的航天器最多,遗弃在轨道上的“碎片”也最多,它正在成为威胁航天器安全的新的环境因素。表1-1对四种主要应用卫星轨道上各种环境参数的影响作一简要的比较。

鉴于各个区域的环境状态差异很大,而我国的应用卫星目前集中在地球同步轨道和低轨道两个区域,这两个区域的环境条件自然是航天工程界最为关心的,本书将根据已有的各种模式,以图、表的形式集中介绍低轨道上空间环境各参数的空间分布和它对航天器

表 1-1 四种轨道上各种环境参数对航天器的影响

	低轨道 100 km~1000 km	中轨道 1000 km~10000 km	地球同步轨道 36000 km	行星际飞行轨道
中性大气	阻力对轨道影响严重,原子氧对表面腐蚀严重	没有影响	没有影响	没有影响
等离子体	影响通信,电源泄漏	影响微弱	充电问题严重	影响微弱
高能带电粒子	辐射带南大西洋异常区和高纬地区宇宙线诱发单粒子事件	辐射带和宇宙线的剂量效应和单粒子事件效应严重	宇宙线的剂量效应和单粒子事件效应严重	宇宙线的剂量效应和单粒子事件效应严重
磁场	磁力矩对姿态影响严重,磁场可作姿态测量参考系	磁力矩对姿态有影响	影响微弱	没有影响
太阳电磁辐射	对表面材料性能有影响	对表面材料性能有影响	对表面材料性能有影响	对表面材料性能有影响
地球大气辐射	对航天器辐射收支有影响	影响微弱	没有影响	没有影响
流星体	有低碰撞概率	有低碰撞概率	有低碰撞概率	有低碰撞概率

的影响。

二、低轨道航天器空间环境特点

1. 中性大气

中性大气是低轨道航天器遇到的特有的环境,100 km~1000 km 高度范围正处于大气的热层和外层大气之中。太阳是决定高层大气性质的最主要的因素:太阳的电磁辐射进入大气以后,其中的紫外辐射和波长更短的 X 射线即被吸收,来自外空的高能带电粒子(主要在极区)也在这里被吸收,吸收的能量加热了大气,使其达到摄氏一二千度的高温。因此当太阳紫外辐射、X 射线的强度发生剧烈的变化时,高层大气的温度和密度也随之发生剧烈的变化,它导致在太阳活动高年和低年时,高层大气密度有很大的差别,高度越高,差别越大,200 km 高度上可相差 3~4 倍,500 km 高度上相差 20~30 倍,1000 km 高度上可达 100 倍。太阳发生耀斑等短期变化时也同样会导致大气密度类似的变化。太阳光投射的角度不同则造成了高层大气具有季节变化、地方时变化以及随纬度的变化。中性大气的成分随高度而不同:在 80 km 以下大气成分基本和海平面的成分相同,平均分子量为 28.96。从 120 km 开始大气各成分开始扩散分离,大气主要成分的原子量(分子量)和平均分子量随高度的增加而逐渐减小。大气主要成分由低到高依次为氮分子、氧原子、氮原子和氢原子。

在 200 km~1000 km 的高度范围内氧原子是含量最多的成分,大约占 80%左右。氧原子是太阳光中紫外光部分与氧分子相互作用并使其分解而形成的。在同一高度上,太阳活动高年时氧原子的密度要比太阳活动低年时高。

中性大气对航天器的影响有两个:一是对航天器的阻力,改变其轨道并使其陨落;二是高层大气中的氧原子对航天器表面的化学作用。

2. 等离子体和低能带电粒子

低轨道上的等离子体主要是组成电离层的电子和离子。电离层是指高层大气中的电离部分。它是由太阳电磁辐射使高层大气的原子和分子电离而成。电子密度(单位体积中电子的数目)是其最主要的参数。由于白天和晚上电离源(太阳电磁辐射)不同,电离层也有不同的结构,太阳电磁辐射的差异(太阳活动高年和低年)也导致电子密度有很大的差别。共同的特点是在 200 km~400 km 高度之间电子密度有一个明显的峰,这是因为在更高的高度上,虽然太阳电磁辐射很强,但大气较为稀薄,所以电子密度较低。在更低的高度上,大气原子和分子的数目虽然多了,但太阳电磁辐射由于高层大气的吸收而降低了,大气密度的增加也导致电离成分与中性成分的碰撞概率增加,使电子密度降低。电离层的上部和等离子体层相连。

沉降粒子是低轨道航天器遇到的低能带电粒子,它是在地球磁场发生扰动时,原来被地磁场捕获的辐射带粒子的捕获条件被破坏,沿磁力线注入到高层大气,在低轨道上运行的航天器会受到它的轰击。它出现的区域很小,厚度往往只有几公里到几十公里,在极光带和极盖区出现的概率最高。因为它是伴随磁场扰动而发生的,所以在太阳活动高年遇到的机会较多。

电离层对航天器的直接影响有充电效应、电源泄漏和阻力效应。间接影响是通过影响电磁波的传播而发生的,包括影响天地间的通信、测量和控制。

3. 磁场

低轨道上的磁场主要是起源于地球内部的地磁场,起源于高空电流体系的外源磁场只占很小的份额。存在于空间的物质以电离形态为主,因而磁场对空间物质的运动和分布起决定作用。地磁场的分布近似于偶极场,随离地心的距离以 r^{-3} 向外递减,在低轨道上运行的航天器遇到的磁场比其它轨道更强。磁场对航天器的直接影响主要是作用在航天器上的力矩,改变航天器的姿态。

地磁场中起源于地球内部的基本磁场变化比较缓慢,在空间的磁场分布作为位势场通常以勒让德级数的形式来描述,而地磁场模式即以给定级数系数的方式提供。国际地磁和高空大气协会(IAGA)每五年发布一次系数,即“国际参照磁场”(IGRF),这是目前被广泛采用的地磁场模式。

地磁场中起源于空间电流体系的变化磁场部分,在 100 km~1000 km 高度范围内虽然只占总强度的十分之一以下,对作用在航天器上的磁力矩的贡献也可忽略,但是因为它对空间等离子体和高能带电粒子的分布有很大影响,也是空间环境研究中的重要参数。到目前为止还没有一个可供实际应用的变化磁场模式,通常只用一个简单的数字来表征地磁场扰动的程度,即地磁指数。在大气模式、电离层模式中都包含了地磁指数。

4. 高能带电粒子

高能带电粒子是影响航天器的重要环境参数,主要由来自太阳的太阳宇宙线,来自银

河系的银河宇宙线,以及被地磁场捕获的辐射带粒子组成。在低轨道上,由于地磁场的偏转作用,能量较低的宇宙线粒子被“反射”而无法到达,能量较高的粒子在地磁场的引导作用下集中到高纬度地区表现出很强的区域特征,其强度也低于高轨道。由于辐射带强度最大的核心区域在数千至数万公里的高度上,低轨道区域处于辐射带的下边缘,强度也比高轨道低。

银河宇宙线起源于太阳系以外,在进入日层以前尚未受太阳风影响时,其强度可认为是均匀的和恒定的,即不随空间和时间变化。但在进入日层以后,它们会受到随太阳风向外运动的行星际磁场的排斥作用,在日层边缘的强度最大,向内逐渐降低。在太阳活动高年时,行星际磁场的排斥作用增强,使得在内日层(包括离太阳一个天文单位的地球轨道上)的银河宇宙线强度比太阳活动低年时弱。银河宇宙线的成分除了质子以外还有重元素的核或离子。

太阳表面平静时不发射太阳宇宙线,通常只是在太阳表面发生剧烈扰动时才发射出大量高能粒子,其成分主要是质子,因此又称太阳质子事件。太阳质子事件的发生带有很大的随机性,高能粒子的源又局限于太阳表面局部区域,从太阳到地球的传播过程又受到太阳风和行星际磁场的强烈的调制作用,因此表现出很强的空间分布不均匀性和突发性。目前对太阳宇宙线的加速过程和传播过程的了解均不十分清楚,也还没有掌握它发生的规律,预报地球附近的太阳宇宙线强度是空间环境研究中的重要课题。

辐射带是由被地磁场捕获的带电粒子组成的,它们长时间地围绕地球运动,对航天器构成严重威胁。由于高层大气的吸收作用,辐射带的下部强度随高度降低而急剧下降,由于实际地磁场偏离偶极子磁场,在磁场强度低于偶极子磁场的负磁异常区,例如位于南大西洋的异常区,辐射带下边缘的高度比较低,在一二百公里高度上即出现辐射带粒子。而在磁场强度高于偶极子磁场强度的正异常区,例如我国上空,辐射带下边缘在 1500 km 以上。因此低轨道航天器正是在辐射带下边缘飞行,每一圈轨道上遇到的辐射带强度会有很大的差异。

5. 电磁辐射

低轨道上的电磁辐射环境包括太阳电磁辐射、地球和大气对太阳电磁辐射的反射、地球大气本身的电磁辐射。其中,太阳电磁辐射和其它轨道上是一样的,总辐射即为太阳常数,光谱接近 6000 K 的黑体辐射的能谱,能量主要集中在可见光(40%)和红外区(51%),变化很小,对空间环境的直接影响也比较小。紫外辐射、X 射线和 γ 射线则相反,它们所占能量份额虽然较小,但强度变化大,对空间环境的直接影响大。在太阳表面发生剧烈扰动时,近紫外辐射的强度增加不到一倍,远紫外辐射强度可增加数倍,X 射线则可能增加数十倍或更高。这些波长很短的电磁辐射对低轨道上的空间环境有很大的影响,因为它们在数十公里以上的高层大气中即被吸收,是高层大气的主要热源。当它们发生变化时,会引起高层大气温度和密度随之变化。

6. 流星体和空间碎片

流星体是宇宙空间中在太阳引力场的作用下高速飞行的固体颗粒,相对地球的速度最高可达 72 km/s。地球对流星体通量的影响有两方面:一方面是地球引力场的汇聚作用,它使近地空间的流星体通量略高于其它区域;另一方面的影响是地球本身的遮蔽作用,在低轨道区域它使流星体通量减少将近一半。流星体可分为两部分:一部分比较均匀

地分布在宇宙空间之中,航天器与之发生碰撞的概率相对稳定;另一部分密集在某颗彗星的轨道附近,当地球携带航天器通过这些轨道区域时,在地面上可以观测到大量的流星,并称之为流星雨,这时航天器与它们碰撞的概率增加。

空间碎片,又称空间垃圾,是指废弃的航天器残骸和它们因爆炸或碰撞而产生的碎片。随着人类航天活动日益频繁,空间碎片的数量将逐渐增多。它们和航天器一样围绕地球高速运动,与航天器的相对速度稍低于流星体的相对速度,其数值与各自的轨道根数有关,从相对静止到 16 km/s,平均相对速度为 11 km/s 左右。它与流星体一次性地掠过地球不同,始终和航天器一同在地球周围运动,因此碰撞的机会很多。它的空间分布与人类空间活动的区域有关,低轨道区域和地球同步轨道区域是空间碎片比较密集的两个区域。在低轨道区,高层大气的阻力作用是使空间碎片消失的主要原因,特别是较小的空间碎片,由于其面积与质量比同尺度 L 成反比,故越小的空间碎片陨落得越快。测量结果表明在 300 km~1500 km 的高度范围内的密度都很高。

三、近地空间环境对航天器的影响

空间环境对航天器的影响是综合效应,即一个环境参数可以对航天器产生多方面的影响,一个航天器状态也会受多种环境因素的作用。表 1-2 归纳了各种空间环境因素对航天器各方面的影响(注:★表示有严重影响;☆表示有一般影响)。

表 1-2 空间环境对航天器影响

温度	☆									★	★	★	
通信测控						★							
计算机软错误				★	★	★							
充电				☆	☆	☆		★		★			
化学损伤			★										
辐射损伤				★	★	★					☆		
机械损伤									★	★			
姿态	☆	☆		★							☆		
轨道	☆	★						☆			☆		
地引场	高原	子氧	磁	宇	宇	地	电	磁	流	空	太	地	地
	层大	气	场	宙	宙	球	离	层	星	间	阳	球	气
	气			宙	宙	辐	层	等	体	碎	电	反	辐
				宙	宙	射	离			片	磁	射	射
				线	线	带					辐		
											射		

1. 对轨道的影响

(1) 高层大气对轨道的影响

高层大气对航天器轨道的阻力,是低轨道航天器主要的轨道摄动力。航天器在高层大气中运动时,大气的阻力和航天器的运动速度的方向相反,它使航天器动能减少,而能量的减少使卫星的高度下降,轨道收缩,进入大气密度更稠密的区域,导致航天器所受阻力进一步增加,加速航天器下降的速度,直至陨落。在低轨道上各种环境影响中,高层大气的影 响是唯一导致航天器陨落的因素。

当航天器沿椭圆轨道运动时,在近地点附近受到的阻力最大。这一方面是因为在近地点的高度最低,遇到的大气密度最大;另一方面是因为航天器的轨道速度,即相对于高层大气的速度在近地点最快。而大气的阻力与大气密度成正比,与相对速度的平方成正比,因此航天器主要在近地点附近损失动能。但其结果并不直接影响近地点的高度,而是在航天器运行到远地点时,由于它的总能量降低,不能达到原有的高度而造成远地点下降。轨道形状通过一系列的收缩椭圆逐渐变成圆形。在圆形轨道上航天器受到的阻力比较均衡,进一步均衡收缩直至陨落。

(2) 电离气体对轨道的影响

电离层高度上的电离气体的密度比中性成分密度低得多,它对航天器的直接阻力一般可以忽略不计。但是当航天器的结构中有大面积的网状结构时,它对中性气体的作用力比较小(有效截面小),而对于电离气体,在网状结构带电时,它的有效截面将大大增加,必须考虑对航天器的阻力影响。

(3) 太阳辐射压力对轨道的影响

太阳辐射压力的方向始终沿背向太阳的方向,与航天器运动的方向是周期性的变化,所以它引起的轨道参数的变化也是周期性的。在 800 km 以下的高度上高层大气的阻力一般比太阳辐射压力大,在 800 km 以上的高度上,太阳辐射压力超过高层大气阻力。

(4) 日月摄动对轨道的影响

太阳和月亮的引力也会造成轨道参数的周期性变化,并且会引起升交点赤经、近地点幅角和近地点角持续单调变化。升交点赤经的变化率与轨道倾角的余弦和周期成正比,近地点幅角的变化率与周期成正比。因此,太阳和月亮对低轨道的影响比对高轨道的影响小。

(5) 地球非球形对轨道的影响

地球的质量分布不均匀,形状也不是球形,使得航天器在距地心相同的距离但处于不同方位时受到的地球引力是不同的,因此在地球实际引力的作用下,航天器的运行轨道也不会是质心作用下的开普勒轨道,而会造成所有参数发生周期性变化,以及升交点赤经和近地点幅角的持续单调变化。升交点赤经的变化率为

$$\dot{\Omega} \approx -10 \left(\frac{R_{eq}}{a} \right)^2 \frac{\cos i}{(1-e)^2}$$

式中 $\dot{\Omega}$ ——升交点赤经变化率(°/d);

R_{eq} ——地球的赤道半径;

i ——倾角;

a——半长轴。

轨道平面的后退运动导致星下点轨迹向西移动。近地点幅角变化率 $\dot{\omega}$ (°/d)为

$$\dot{\omega} \approx 5 \left(\frac{R_{eq}}{a} \right)^{\frac{7}{2}} \frac{(5\cos^2 i - 1)}{(1 - e^2)}$$

显然,在低轨道上运行的航天器由于半长轴小而受到的影响更大。

2. 对姿态的影响

(1) 地球磁场对姿态的影响

地球磁场对航天器姿态的影响是低轨道航天器特有的环境问题,因为地球磁场的强度大约以 r^{-3} 向外迅速减弱,低轨道上的磁场强度要比高轨道强得多。航天器受到的磁力矩和磁场强度成正比,也和航天器的磁矩成正比。为了减少磁力矩的干扰,在航天器设计和研制过程中需要通过减少磁性物质,或合理配置磁性物质以减少总磁矩;航天器上的强直流电流形成回路,在磁场中也会产生磁力矩,在安排电缆时也需尽量减少由此而产生的磁力矩。在航天器的姿态采用自旋稳定时,磁力矩会使自旋轴发生进动,在航天器结构中产生的感应电流会导致自旋速率降低。为减少磁场的影响,在发射前常常需要进行航天器磁矩的测量。另一方面,低轨道上的磁场强度比较稳定,磁场也广泛地被用来作为测定航天器姿态的一个参考系,利用安装在航天器上的磁强计来测定航天器相对于磁场的姿态,再根据已知的磁场在空间的方向计算航天器在空间的姿态。地磁场还可作为控制姿态的力矩的来源,在航天器上安装的相互垂直的三组线圈中通以一定的电流,即可产生大小和方向满足预定要求的力矩。

(2) 高层大气对姿态的影响

当航天器相对于运动方向的外形不对称时,高层大气的阻力也会产生力矩,阻力和航天器的截面,即航天器特征长度 L 的平方成正比,它所产生的力矩则和 L 的立方成正比,因此在设计大型航天器的外形时需要考虑大气对姿态的影响。

3. 对表面材料的机械损伤

造成航天器表面机械损伤的是天然的流星体和人为的空间碎片。流星体相对于航天器的平均速度为 20 km/s ,空间碎片的相对速度为 11 km/s 左右,如此高的速度使它们具有极高的能量,每一克流星体具有 $2 \times 10^5 \text{ J}$,空间碎片具有 $6 \times 10^4 \text{ J}$ 。在它们与航天器相撞的瞬间形成压力很高的冲击波,其压力超过表面材料的强度,使撞击点附近的物质像流体一样流动。随后的压力释放过程又使撞击的和被撞击的物质加热,温度升高到足以使物质熔化和蒸发。其结果是在航天器表面留下撞击坑或形成穿孔。

流星体的数量随其质量的增加而迅速减少,大的流星体会造成灾难性后果,但碰撞概率比较低。小的流星体(常称为微流星体)碰撞概率很高,它们的单次碰撞虽然只会形成很小的撞击坑,不会造成严重的后果,但因为其数量很大,大量的小撞击坑会改变表面的性质,称为“沙蚀”。特别是光学系统的表面,如透镜、反射镜面等会因此而无法成像。有特殊要求的温控涂层也会因辐射特性改变而不能实现设计的要求。

4. 对表面材料的化学损伤

对航天器表面的化学损伤主要来自高层大气中的氧原子。氧原子是一种强氧化剂,具有很强的腐蚀作用,航天器以 8 km/s 左右的高速度在其中运动,相当于将航天器浸泡于高温的氧原子气体中(60000 K),其表面将被强烈地腐蚀,对需要长期在低轨道上运行和工作的航天器,例如空间站,这种腐蚀效应是十分严重的。高速氧原子和表面材料相互作用的物理化学过程是很复杂和多样的,不同的航天器表面材料过程也很不一样。它和聚合物、碳等形成挥发性的氧化物,和银相互作用生成不粘合的氧化物,造成表面被逐渐剥蚀;和铝、硅等材料相互作用形成粘合的氧化物,附着在航天器表面,它将改变航天器表面的光学特性(发射系数、吸收系数、反射系数等)和力学特性。

为减轻氧原子的剥蚀效应,采用在表面覆盖一层抗氧化物质的方法是比较有效的,但保护层一般很薄,很容易被流星体或空间碎片击穿,失去保护作用,氧原子在击穿的小孔后面会剥蚀出面积远远大于小孔的深洞,使防护工作增加了难度。

5. 高能带电粒子的辐射损伤

高能电子、质子和重离子损伤航天器表面材料和电子元器件有两种方式:一种是电离作用,即入射粒子的能量通过使被照射物质的原子电离而被吸收,高能电子几乎完全通过电离作用使航天器受到损伤;另一种是原子位移作用,即使被高能粒子击中的原子的位置移动而脱离原来所处的晶格中的位置,造成晶格缺陷。高能质子和重离子既能产生电离作用,也能产生位移作用。吸收剂量是单位质量内吸收的带电粒子能量,被用来衡量物体被照射的程度。由于低轨道上航天器遇到的带电粒子强度比其它轨道低,吸收剂量较低,所受到的辐射损伤相对较轻,但剂量随高度迅速增加。

在半导体器件中电离作用的破坏性在于使二氧化硅绝缘层中的电子-空穴对增加,它会导致 MOS 晶体管的阈值电压漂移,双极型晶体管的增益下降,以及普遍地使漏电流增加,造成器件性能下降,使单元电路不能完成原定的功能。位移作用的后果是硅中少数载流子的寿命不断缩短,造成晶体管的电流增益下降和漏电流增加。

6. 单粒子事件

单粒子事件是指单个的高能质子或重离子导致的微电子器件状态改变,从而使航天器发生异常或故障的事件。它包括逻辑状态改变的单粒子翻转事件,使 CMOS 组件发生可控硅效应的单粒子锁定事件等。

单粒子翻转事件本身虽然并不发生硬件损伤,是状态可以恢复的“软”错误,但它导致航天器控制系统的逻辑状态紊乱时就可能产生灾难性后果。发生单粒子锁定事件时通过器件的电流过大即可将器件烧毁,如果还没有使器件烧毁,可以通过外加指令切断电源等措施来恢复。我国“实践四号”探测卫星平均每天测到 3.4 次单粒子翻转事件,卫星上的一台测量单粒子事件的探测器平均每一个月发生一次单粒子锁定事件,通过地面发出的遥控指令切断电源使其恢复。

在低轨道上,虽然宇宙线和辐射带中的高能质子和重离子的数量要比其它轨道上的数量小,欧洲、日本等国家实际测量的结果表明,低轨道上的单粒子事件仍是影响航天器安全的重要因素,发生的区域则集中在极区(主要由太阳宇宙线和银河宇宙线诱发)和辐射带的南大西洋异常区。因为航天器设计要求电子器件的体积小、功耗低、存储量大、运行速度快,这就必然促使微电子器件的集成度提高,内部的单元电路体积缩小,每一次状态改变所需的能量和电荷下降,其结果是抗单粒子事件的能力下降。因此,随着航天事业的