

真空与空间研究

王康 侯丹中 译

1. 空间环境

星际环境条件首先是由极高真空(每厘米³仅有十个粒子左右),其次是由太阳电磁辐射宇宙电离粒子和太阳电离粒子、宇宙尘、磁场来表征的。

1.1 太阳电磁辐射

太阳所释放的能量产生于内部的热核聚变反应。在太阳表面,有时还会有极其猛烈的巨大的能量释放(产生的电磁射线从可见光到X射线)和粒子喷射(高能电子和质子)。在辐射能量中,99%的波长介于0.27~5微米之间。光谱分布与5900K时的黑体的光谱分布完全相同,但在短波内由于色球层和日冕,造成紫外辐射。春分时,太阳常数,或即地球表面(大气层以外)所接受到的总能量约为1370瓦/厘米²。比地面接收到的能量高的多,这是因为那里没有吸收紫外线的水汽、臭氧和二氧化碳,但却有较强的紫外辐射。此外,太阳光是平行的,不会有大气衍射。所以,太阳光和阴影部分的过渡带是非常清晰的(由约为32分立体角的太阳视在直径造成的阴影光除外)。

虽然太阳能是空间中可以利用的主要能源,但是紫外线对航天器的强烈辐射能使其外表面的涂层严重老化。高能光子的能量足以使分子联接处断裂或变形。

1.2 太阳风

通过发射,在太阳的外表层形成等离子体,到达地球上的主要是质子和 α 粒子流。其流量约为 2×10^8 个粒子/秒·厘米²,能量为几千伏。随着太阳活动的加剧,粒子流的能量增加了20倍。粒子流主要对航天器的外表层产生影响。

1.3 微流星和陨石

微流星是重量为 $10^{-12} \sim 10^{-6}$ 克、直径为0.1~100微米的粒子。陨石则是重量和直径均大于微流星的粒子。其速度为1~70公里/秒。这些粒子似乎很小,但却具有很大的能量。不过,一般情况下,它们仅对航天器的外壳造成磨损。但有时却能击穿航天器的外壁,这对载人航天器,加压箱或加压罐都是很危险的。

1.4 磁层

当太阳风的带电粒子(电子和质子)接近地球,并与地球磁场相互作用而产生了磁层。该磁场很像在地球的旋转轴上安放的一块磁铁。在日地轴线上,向阳面的磁层一直延展到距地球大约6万公里处,而在背阳面磁层则一直延展到30万公里以外(见图1)。

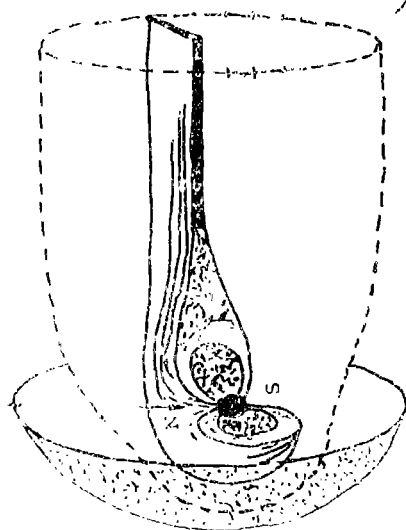


图 1

在已知轨道特性、数据、太阳活动性以及航天器类型、外层厚度和表面材料等情况下，可根据不同方法计算出撞击航天器的粒子流。

2. 热能传递

在这个方面，真空改变了地面通常所采用的热传递方式。在地面上，一般是采用自由或强制对流方式进行热交换，除特殊情况外，不单独进行辐射热交换。

在空间中，真空条件使对流热交换无法进行，所以只有热传导和热辐射。对于航天器来说，失去的能量只是向宇宙空间的辐射热。

不论是否采用空气和对流热交换，下面举两个例子可以说明所必须解决的问题的数量级和一些具体参数之间的灵敏度的差异。

例 1：

取两个直径为 15 厘米的圆球(体积约为 1.8 升)，其上各装有一个消耗电能的电阻器。

将其中一个辐射系数假定为零的球悬吊在一个气温调节在 25°C 的盒子里(没有强制对流)。另一个辐射系数为 1 的球置于壁温达 25°C 的真空盒中(压强低于 10^{-5} 托)。然后把两个电阻器接到同一个电源上，功率从零逐步增加到 300 瓦，每增加一次便测一下平衡温度(见图 2)。

图 2 的曲线表明：功率相同时，两个球的温度相差极大。还可以看出当球和盒壁的温度相同时，传热量也有所不同。把球放入壁温为 25°C 的真空盒内恰当地反映了部件在航天器内部的情况。一般来说，这些部件的温度均需低于 50°C 。图 2 的曲线表明，在空气中这个温度下，部件功耗为 100 瓦，但在真空条件下，在达到允许的极限温度前，功耗仅为 8 瓦。这个实验说明，当功耗约为 4 瓦/升时，电子部件可能出现过热的问题。在研制航天器的过程中，如果注意到功耗从 500 瓦变化到 5000 瓦这一问题，就会知道应该解决的问题是什么。

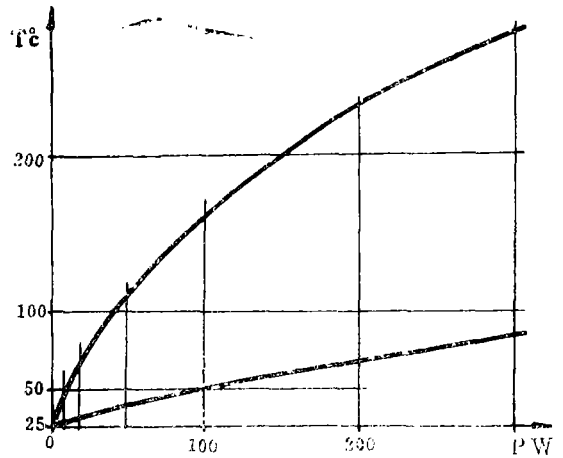


图 2

例 2：

例 2 将表明航天器外涂层的光热特性(红外发射和太阳能吸收率)的重要性。在外层空间，航天器的平衡温度与其吸收的能量和红外辐射能量的差值(外部吸收量和内耗功)有关。

吸收的能量：太阳能为 $\alpha_s \phi_s s_1$ ；反照能为 $\alpha_s \phi_a s_1$ ；地球红外辐射能为 $\epsilon \phi_e s_1$ 。其中 α_s 为太阳吸收率， ϕ_s 、 ϕ_a 、 ϕ_e 分别为太阳入射、反照和地球辐射量； s_1 为航天器的面积。

辐射能量为 $\epsilon \sigma s_a T^4$ 。其中： ϵ 为发射率； σ 为斯蒂芬-玻耳兹曼常数； T 为绝对温度； s_a 为外部辐射面积。

在这个计算中，空间好似一个温度约为 4K 的黑体。

用 3 个球代表 3 个不同的航天器。分别为白色、黑色和金黄色。

把它们放在大气下，地面的阴面，其温度为大气温度。如果移至阳光下，各自的温度变为：白色 20°C ；金黄色 40°C ；黑色 50°C 。如果把它们放至离地面 36000 公里处的阳光下

时,各自的温度又变为:白色 -80°C ;黑色 9°C ;金黄色 200°C 。

例2表明,航天器涂层的光热特性对预测航天器的温度是十分重要的。

考虑到外层光热特性的变化,为了使航天器内部的所有设备不论处在轨道的哪个位置、距离辐射源多远、内部有功耗(关闭或接通电子设备,改变电子组件输出等)发生什么变化都能具有合适的温度,热力学工程师必须为航天器选择一种外形结构。

下面给出一些设备的标准温度数据:太阳能电池 -170°C , $+80^{\circ}\text{C}$;电池 $+5^{\circ}\text{C}$, $+20^{\circ}\text{C}$;常用电子部件 -10°C , $+60^{\circ}\text{C}$;专用电子部件: $+10^{\circ}\text{C}$, $+35^{\circ}\text{C}$;燃料箱 $+15^{\circ}\text{C}$, $+60^{\circ}\text{C}$;红外探测器 -200°C , -150°C 。

前面已经谈到,航天器内部的能耗最终必须向空间辐射,以防温度持续升高。

将一个涂成白色的新的航天辐射器,放在 65° 入射角的阳光下,在 310K 时,能够辐射 $310\text{瓦}/\text{米}^2$,在同步轨道上运行7年之后,由于太阳能吸收率从 0.09 增加到 0.21 ,只能辐射 $260\text{瓦}/\text{米}^2$ 。一个在向阳面为 310K 的辐射器,寿命结束时,其温度在向阳面将为 323K ,阴面将为 300K 。这意味着辐射器 23K 的温度变化仅仅是由曝光变化或外表涂层变化引起的。

在航天器上,一个功耗为 30瓦 的设备是同面积约为 1500厘米^2 的辐射器装在一起的。首先是把内耗功从它发热的点传到辐射器上。为此,一般使用由良好的传热材料制成的再分离器。为了减小温差,比较容易的解决办法是采用很厚的金属块。可是传热好的金属一般都很重。而发射重物到空间则要付出很大的代价,因此必须解决下列问题:

给设备一个假定温度。如果它和辐射器之间出现传热不良的问题,这个问题容易解决。但是热温差越大,辐射器将越冷。如果使辐射器温度降低 10° ,则必须将其面积增加 15% 。这样温差将是 25K ,而不是 23K 。在组件和辐射器之间的传热板将更大一些。

3. 出气和污染

所有材料在真空状态下都会出气。这意味着材料放出所吸收的气态生成物、吸收的气体或材料本身的分解物。与非金属材料(聚合物等)的出气相比金属材料的出气一般是可以忽略的。但是一些金属有很高的蒸汽压,因而不能应用于空间工程。例如,通常不使用锌和镉。

实际上,聚合物的出气速率高于金属(10 到 1000 倍以上)。例如,清洁的不锈钢的出气速率约为 10^{-9} 托·升/秒·厘米 2 ,解吸物主要是不能够凝聚在航天器器壁上的 N_2 、 CO 、 CO_2 、 H_2 、 H_2O 等。但是聚合物出气速率约为 10^{-6} 或 10^{-7} 托·升/秒·厘米 2 ,有时,放出的气体又会重新凝聚在航天器的低温部件上。

航天器的低温部件一般是指光学部件(镜片、镜头、传感器等)或具有光学选择特性的特殊的温控涂层(耐氧化树脂、固态材料等)。这些聚合物的沉积可产生能干扰设备运转的光吸收谱线。还能够直接地或在辐射(紫外线、电子、质子等)的作用下一起起反应,或一种生成物,对其它生成物起催化作用。如果生成物的颜色最初很淡,一般是透明的(某些波长除外),但由于沉积常常变得不透明,从而使光学设备失去透射本领,或使涂层的光热特性下降。在许多情况中,飞行期间光学系统的性能下降常常是污染造成的。污染还导致了航天器平均温度的增加,这是由于太阳能吸收率发生了变化。航天器在同步轨道上运行7年之后,新的耐氧化树脂的吸收率由 0.08 增加到 0.21 或者更多。

为了尽量减少污染的影响,美国和欧洲已经广泛地对这些污染机理进行了研究。减少污

染的一种方法是使用经提纯的聚合物，即出气量极低的特殊材料。另一种解决方法是研究分子怎样从污染源运动到航天器的敏感部件的。通过这种方法，就能找出一种保护敏感部件的特殊结构。

发动机的尾流是另一个污染源。其污染程度随真空度的增加而增加。在真空中，发动机向四周排气，其中一些粒子又返回到发动机的前部。例如，对于一台远地点推进发动机来说，有 0.5% 的气体从排气口排出后，又重新回到发动机的前部。这意味着 2.5 公斤的气体，因此，必须认识到约 2 毫克/米² 的沉积物的危险性。

4. 机械装置

在超高真空中，首先遇到的问题就是金属的冷焊。由于没有空气有利于金属之间的相互扩散和微冷焊的形成。当金属部件相对移动时，就不得不将微冷焊部分切割掉。

有两种主要的方法可避免上述问题的发生：

(1) 选用互不扩散的金属，以减少微冷焊现象的发生。

(2) 在两种金属之间加一层起无油润滑作用的固态薄层。例如，可以使用二硫化钼这样的材料。放置润滑剂的方法取决于预先知道运动形式：间断或是连续；低速或是高速等等。

如果必须用油润滑机械装置，应尽可能做到密封。用可以再生的阱来防止或降低油出气。然而，制造密封机械装置是非常困难的，因为需要很复杂的波纹管装置。而且，重力在航天器上不明显，所以必须控制油位，以确保良好的润滑。这需要通过特殊的毛细管装置，把油加到恰当位置。由于重力，在地面上进行试验是非常困难的。一滴漏油会对航天器产生严重的污染。对于小振动引起的漏油，将使用活动转轴。

5. 电子学问题

在火箭上升期间，航天器内部和电子组件内部压强的变化，使得某些高压设备发生电击穿现象。因此，在这一阶段，必须对这些组件采用一些特殊的工艺处理。

由航天器某些部件的静电积累造成的问题最为严重。在粒子流或辐射流中，电负荷主要在绝缘外表面上产生(如外层的涂料、聚四氟乙烯、特氟隆等)。这些电负荷能达到几千伏并产生应变。这类放电将产生以下几种结果：

引起外层涂料老化并改变航天器内部的热状态；

引起电干扰。这类放电在航天器内外产生电磁脉冲、并在导线中或直接在电子组件内部产生电流。有时，这些电流能自动启闭设备。主要是在同步轨道上进行的许多航天器都曾遇到过这些问题。现已知道的随机指令有：使放大器误开误关、或改变航天器的姿态以及发动机的点火等。

为了避免出现这些问题，同时由于不能精确预报太阳表面的活动周期，所以必须对航天器的某些设计进行严格限制。如：外部涂层必须导电，并且必须和航天器的所有金属部件接通。对于导线(屏蔽)和通过导线的电流值也要进行限制，以降低放电的灵敏度。

6. 飞行力学

某些情况下，空间真空也有积极的一面。航天器之所以能在轨道上运行，是因为那里没有空气，因而也就没有阻力。然而，航天器在轨道上的运动没有加速度，因此非常小的力或者力矩就能改变航天器的路线。这些干扰来自内部或外部。外部干扰源有：

6.1 空气动力学力矩

离地面 170 公里处的气体分子的平均自由程为 100 米，可以认为分子是自由移动的，所有的空气动力学计算都是建立在这种假设之上的，空气动力会导致不可忽视的力矩。这与航天器的高速（3 ~ 8 公里/秒）和某些部件的尺寸（某些太阳帆板大于 100 米²）有关。例如经计算，作用在法国 SPOT 航天器上的最大力矩是 8×10^{-5} 牛顿·米。因为太阳帆板是旋转的，所以该力矩在轨道上是连续变化的。

6.2 辐射压强

作用在航天器上的辐射源主要有三个：太阳辐射通量、地球反射的太阳辐射通量（反照）、地球的红外辐射通量。

这些力矩是由作用于航天器及其附件的外表面积上的所有辐射压强之和计算的。计算应考虑到航天器外形和涂层的面积，以及航天器的轨迹等因素。已计算出作用在 SPOT 航天器上的最大力矩约为 1.5×10^{-4} 牛顿·米。

6.3 磁矩

这个力矩产生于磁性材料或航天器内部的电流回路与地球磁场的相互作用。

很难精确地计算航天器的磁矩，但是，首先要尽量避免使用磁性材料和电流回路，其次要尽可能平衡残余的磁矩。

6.4 引力

在轨道上运行的航天器，仍然受到来自地球、月亮、太阳的引力作用。由于引力大小不均，因而使引力场发生变化，于是便产生改变轨道参数和力矩的力。作用在 SPOT 航天器上的最大力矩是 8×10^{-4} 牛顿·米。

但是，引力也有好的一面，如果航天器的一个轴确实垂直于地球表面，那么就能利用引力的影响。象法国的 EOLE 航天器那样，沿这个轴安放一个另一端具有较小质量的伞形天线以用于稳定航天器。

6.5 陨石

陨石的质量很小，但却有很高的速度，其动能是很大的。如果击中航天器，将会使它运动。其后果难以预料，有关陨石问题的报导寥寥无几。

在内部引起的干扰中，只注意由液相摆动引起的干扰。

这种干扰力矩似乎很小，但由于持续时间很长，所以可以完全改变航天器的状态。为了抵消这些力和力矩的作用，必须设计出特殊装置并消耗航天器的能量，使其具有理想的轨道和姿态。

例如，一个在轨道中运行 7 年之久，重约 500 千克的通讯卫星，用于修正轨道和姿态控制，大约要消耗 115 千克肼。而 SPOT 航天器（重 1700 千克，寿命为两年），需要 150 千克肼。为此，不得不增加容器、管道、发动机、稳定饱和和电控设备。

7. 人在空间

人类要想在空间生活，必须解决许多由真空产生的问题。首先必须给密封舱充满供人呼吸的空气。其次还要对航天器进行限制：

（1）热量调节

因为人类只能在很小的温度范围（16 ~ 27℃）内舒适的生活，所以需要一套复杂的设备以适应空间环境条件。

这个系统包括热交换器、流体回路以及泵等等。

(2) 空调

座舱内的空气必须保持供人呼吸的良好状态。为此必须检查和调节空气中的有毒气体比率、温度、氧含量、尘埃以及解决由于失重而处于悬浮状态的微粒子的过滤等问题。

(3) 特殊装置

为饮食和其它一切生理需要而专门设置的装置。

(4) 保护

为防止紫外线、电子、质子和所有其它粒子的辐射和陨石的击伤而采取的防护措施。

(5) 需要具有上述防护功能的特殊的太空服,以便使宇航员在舱外能够工作、观测和活动。

8. 结束语

本文所讨论的问题与实际真空有直接或间接的关系,这些问题是空间研究和航天器发展方面必须解决的问题中的一小部分。在探空火箭发射之前,人们进行了大量的研究工作,此外,还用特殊的真空试验、设备检验了所有计算结果。这些设备将由其它文章加以介绍。

(译自 Proc. 9th Intern. Vac. Cong. (1983) 258,

原文作者 H. Curien 等人, 陈隆智 郭晓玲校)

(上接50页)

这些职能的每一种工作情况,都是由控制板上的指示灯来显示的。另外还备有一种所有的输入和输出信号的显示器,倘若故障出现它能够进行快速故障判断。计算器自动显示出通过检漏试验的产品件数,大漏故障次数及微漏次数。在这样复杂的系统中,可靠性是极端重要的。大约几个月内就能轻而易举地完成一百万个阀门的检验工作。尽管这样大的需要量,该系统仍能照常运转达到预定时间的 95% 以上。

6. 结论

介绍的四种工业应用表明了氮质谱检漏技术日益增长的重要性。它曾认为极其复杂,不可靠且使用费用昂贵,而现在已得到充分肯定。10 年来所发生的这种变化的原因在于工资不断增加,更为可靠和经济的真空设备,以及日趋强大的电子仪器设备。如果需要,可把系统设计为全自动的,还可照常编入故障判断程序。由于带有完全一致效果的重复性工作变得越来越难于找到承包镗削加工的工人,所以自动氮检漏仪肯定会在连续生产高性能产品的广阔领域中继续发挥重要的作用。

(译自 Proc. 9th Intern. Vac. Cong. (1983) 227,

原文作者 A. E. Holme, 邵惠民 荣耀明校)