

空间液体润滑多孔储油器特性研究^{*}

汪 洋 刘秋生 阎嘉坪

(中国科学院力学研究所国家微重力实验室 北京 100190)

摘 要 液体润滑普遍存在于大多数空间运动部件中。然而,由于空间环境恶劣(低重力、高真空)所造成的润滑剂严重损失,许多液体润滑运动部件都不能达到其使用寿命的要求。因此,有必要采取措施对空间运动部件进行补油,利用多孔储油器补油便是其中的方法之一。由于其体积小、结构简单而广泛应用于小型航天仪器中,并在维持轴承腔内油膜厚度和油分布方面也能取得令人满意的效果,因此备受关注。离心作用和加热效应是使储油器溢油的两种方法,本文针对这两种方法,对空间多孔储油器的液体润滑剂储运规律进行理论分析,同时设计了离心供油和加热供油两套实验装置。

关键词 液体润滑; 储油器; 储运

中图分类号 V 524

Characteristic Study on the Porous Reservoir of Liquid Lubricant in Space

WANG Yang LIU Qiusheng YAN Jiaping

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190)

Abstract Many moving mechanical assemblies for space mechanisms rely on liquid lubricants to provide performance. However, the loss of lubricant due to space environment may results in some moving mechanical assemblies don't work before the end of mission. So lifetime, many methods are applied to supply lubricant, one of these is porous reservoir. Porous reservoirs are widely used in small space mechanisms for their small volume, simple structure and low cost. They are desirable to maintain film thickness levels and oil distribution, so many researchers paid more attention to them. Centrifuging and heating can come into being lubricant transportation in reservoir. In this paper, the rule of lubricant transportation is analyzed on the influence of centrifuging and heating. Two experimental fixtures are designed to study the rule of lubricant transportation in porous reservoir.

Key words Liquid lubricating, Porous reservoir, Transportation

1 引言

运动部件是实现空间任务长寿命的关键技术之一,也是薄弱环节之一。到目前为止,在航天遥感

仪器中,由于扫描机构的故障而导致整个系统失效的事例不乏其数。像美国这样有大量卫星在轨运行经验的国家,其星上遥感仪器的扫描运动部件也一再出现重复性故障。NOAA-11的AVHRR/2在轨

^{*} 国家自然科学基金项目(10772185,10372105)和中国科学院知识创新工程(KGCX-SW-409)共同资助
2007-08-22 收到原稿, 2008-04-25 收到修定稿

2 年半出现扫描电机抖动故障, NOAA-14 的 AVHRR/2 在轨 5 年出现同一故障. 时隔 10 年, 于 1998 年 5 月发射 NOAA-15 的 AVHRR/3 在入轨后 2 年半又出现相同的故障. HIRS/3 的滤光轮也频出电机故障. 中国航天仪器的运动部件, 在运行过程中也多次发生故障, 中国某型号卫星在发射一个月后, 扫描仪的 K 镜驱动机构发生时停时转现象; 另一型号卫星的天线消旋失锁. 这些故障的发生, 一方面使经济造成了巨大损失, 另一方面严重制约了卫星的实际工作寿命.

空间运动部件的失效在宏观上主要体现在系统润滑失效上, 因此, 长寿命润滑技术是实现运动部件长寿命的关键技术之一. 航天器中大多数运动部件都采用液体润滑剂即润滑油进行润滑. 空间液体润滑失效表现为两种形式: 一种是润滑油膜无法形成, 另一种就是润滑区缺油.

太空中润滑油可能会由于挥发、爬移而损耗, 不利于油膜的形成, 从而丧失润滑能力. 如果能够再次向接触区供给润滑油, 运动部件的寿命将延长. 对于较大的航天仪器, 可以采取储油箱及其泵辅系统进行润滑油的再供给, 但对于小的航天仪器, 例如卫星, 重量过大会给设计带来更大的麻烦, 因此这种再供油方式并不适合. 所以, 对于卫星等小型航天仪器的运动部件, 适宜的一种再次供给润滑油的方法就是利用多孔储油器补油.

多孔储油器最早是在 20 世纪 60 年代应用于球轴承中^{[1],[2]}. 自此以后, 许多学者就浸油的多孔材料及其内部油的运动特性(蒸发作用、油溢出的毛细作用、油的循环等)进行了大量的研究. 本文在前人工作的基础上, 对多孔储油器内润滑油的储运规律进行了研究, 讨论和分析了润滑油适时定量供给空间运动部件摩擦区的控制方法, 以延长空间运动部件的使用寿命.

2 多孔储油器内液体润滑剂运输机理分析

多孔储油器内润滑油的运输有以下 4 种形式: 高真空引起的蒸发输运, 与多孔储油器相接触的表面粗糙度引起的毛细输运, 旋转引起的离心输运以及加热引起的热力输运. 本文只对后两种输运形式进行分析.

2.1 离心输运

油在多孔介质中, 由于毛细力作用, 不能自行溢出, 因此必须借助外力的作用. 首先考虑到了旋转产生的离心力. 使油溢出所需的最小离心力所对应的旋转角速度定义为临界转速 ω_c , 只有当旋转角速度 ω 大于 ω_c 时, 油才有可能溢出以供给轴承.

2.1.1 离心输运速度及所需的临界转速

利用文献 [3] 的物理模型(见图 1), 假设多孔储油器是由细长的毛细管组成. 取多孔储油器的轴向为 x , 环向为 λ , 径向为 r , 建立柱坐标系 (x, r, λ) , 如图 2 所示.

考虑重力时, 当按图 1 旋转多孔储油器时, 润滑油沿 r 方向的流速可用 Darcy 定律表示为

$$v_r = -K/\mu(\partial p/\partial r + \rho g \partial z/\partial r - \rho \omega^2 r/\phi). \quad (1)$$

式中, K 为渗透率, p 为毛细管内液体压力, ϕ 为体空隙率.

根据文献 [4] 可知, 存在于毛细管两头的压力差为

$$\Delta P_m = \frac{4\gamma_{LV}}{R_{po}}. \quad (2)$$

由于多孔储油器沿径向的长度较小(mm 级), 故假设压力 p 沿径向线性分布, 则有

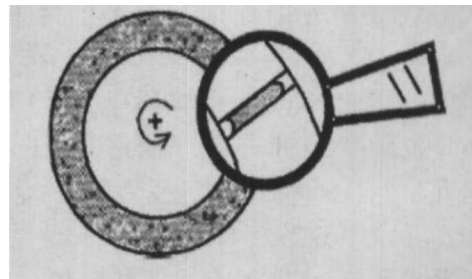


图 1 多孔储油器示意图

Fig.1 Schematic of porous reservoirs

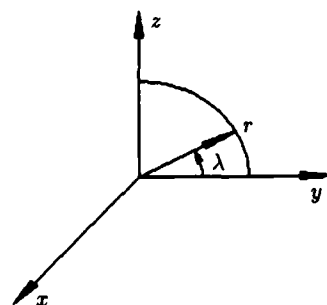


图 2 柱坐标系

Fig.2 Schematic of cylindrical coordinates

$$\frac{\partial p}{\partial r} \approx \frac{4\gamma_{LV}}{R_{po}(r_o - r_i)} \quad (3)$$

又 $\frac{\partial z}{\partial r} = \sin \lambda$, 故当 $v_r = 0$ 时,

$$\omega = \left[\frac{4\phi\gamma_{LV}}{\rho R_{po}r(r_o - r_i)} + \frac{g\phi \sin \lambda}{r} \right]^{1/2} \quad (4)$$

由式(4)可知, 使润滑油流出多孔储油器所需的最小转速即临界转速发生在多孔储油器外环的底部. 此时

$$\omega_c = \left[\frac{4\phi\gamma_{LV}}{\rho R_{po}r_o(r_o - r_i)} - \frac{g\phi}{r_o} \right]^{1/2} \quad (5)$$

根据上述分析在微重力条件下, 在离心力作用下润滑油延多孔储油器径向流速 v_r 可表示为

$$v_r = -K/\mu(\partial p/\partial r - \rho\omega^2 r/\phi) \quad (6)$$

使润滑油溢出多孔储油器所需的临界转速 ω_c 可表示为

$$\omega_c = \left[\frac{4\phi\gamma_{LV}}{\rho R_{po}r_o(r_o - r_i)} \right]^{1/2} \quad (7)$$

2.1.2 实例分析

以夹布胶木浸润 114 硅油为例, 分别计算有重力场和无重力场时的临界转速. 储油器尺寸及孔隙率与中国航天卫星所用储油器尺寸及孔隙率相当.

其中, $\phi = 14\%$, $r_o = 20 \text{ mm}$, $r_o - r_i = 3 \text{ mm}$, $\gamma_{LV} = 20.6 \times 10^{-3} \text{ N/m}$, $\rho = 1.0139 \text{ g/cm}^3$, R_{po} 为 $1 \sim 2 \mu\text{m}$. 根据式(5)和式(7)算得结果如下.

当 $R_{po} = 1 \mu\text{m}$ 时, 有无重力场的 ω_c 都为 435.5 rad/s 化为转速约为 4160 r/min .

当 $R_{po} = 2 \mu\text{m}$ 时, 有无重力场的 ω_c 都为 307.8 rad/s , 化为转速约为 2940 r/min .

另将式(5)括号中第一项和第二项大小进行比较发现, 第二项的值不到第一项的千分之一.

由此可以得出这样的结论: 首先, 只要多孔储油器尺寸和润滑油选择合适, 重力场的存在并不影响离心输运过程中流速以及使油溢出所需要的临界转速 ω_c 的大小; 其次, 改变润滑剂的物性或多孔储油器的结构尺寸可改变离心输运所需的临界转速以及内部流动速度. 另外, 在轨的航天卫星其运动部件的旋转速度一般在 $60 \sim 360 \text{ r/min}$ 远远小于储油器溢油所需的临界转速, 因此, 卫星不可能通过自身旋转产生的离心力使润滑油溢出而给自身旋转部件供油. 所以须借助另外的外力, 这就是加热.

2.2 加热引起的热力输运

油从多孔介质溢出的另一种方法是提高它们的温度, 由此产生了三种不同的现象, 从不同方面对储油器的供油产生影响.

第一种现象是润滑油和多孔基体材料的热膨胀不同. 当受热时液态的润滑油比固态的多孔材料膨胀大, 膨胀后的微孔体积已不能装下膨胀后的润滑油, 致使油将从微孔中向外延伸. 同时受热的多孔介质极力要恢复到原来的体积状态, 从而在多孔介质内部形成内压力, 这种压力将油从多孔介质中挤出^[5]. 从孔中溢出的油的体积可由下列公式得出:

$$V_f = V_s\phi(1 + \alpha_f\Delta T) \quad (8)$$

$$V_{po} = V_s(1 + \alpha_s\Delta T)^3 - m_s/\rho_s \quad (9)$$

$$\Delta V_T = V_f - V_{po} \quad (10)$$

其中, V_f 为油膨胀后的体积, V_s 为多孔储油器的整个体积(多孔介质的体积和孔隙的体积之和), V_{po} 为多孔介质中孔隙的体积, m_s 为未浸润的干燥多孔介质质量, ρ_s 为未浸润的干燥多孔介质密度, ΔT 为油和多孔介质之间的温度差.

第二种现象是 Marangoni 作用, 温度的变化可使液体表面的张力发生改变. 温度梯度可引起相应的表面张力梯度, 产生一个相关应力. 液体由高温区流向低温区.

考察浸有润滑油的薄多孔块, 令 x 为温度梯度施加的方向, 温度梯度大小为 dT/dx , 产生表面张力梯度 $d\gamma/dx$, 在油膜表面产生相应的应力, 其大小为

$$\tau = \frac{d\gamma}{dx} = \frac{d\gamma}{dT} \frac{dT}{dx} \quad (11)$$

由于润滑油存在于多孔介质中, 必须对润滑油的表面张力 γ_{LV} 采用平均化的方法, 并采取 Dupit 假设, 认为多孔均匀同相, 表孔隙率与体空隙率相等. 此时

$$\gamma_m = \phi\gamma_{LV} + (1 - \phi)\gamma_{sv} \quad (12)$$

相比于 γ_{LV} , γ_{sv} 非常小可以忽略不计, 故

$$\gamma_m \approx \phi\gamma_{LV} \quad (13)$$

此时

$$\tau = \frac{d\gamma_m}{dx} = \phi \frac{d\gamma_{LV}}{dT} \frac{dT}{dx} \quad (14)$$

根据文献[6], 应力 τ 又在液体内部产生相应的速度

梯度, 有

$$\frac{dv(x, z)}{dz} = \frac{\tau}{\mu(T)} = \phi \frac{1}{\mu(T)} \frac{d\gamma_{LV}}{dT} \frac{dT}{dx}. \quad (15)$$

其中, z 为垂直于油膜表面的方向分量, $\mu(T)$ 为润滑油随温度变化的动力粘性系数, $v(x, z)$ 为不同点油膜的输运速度. 取无滑移的边界条件, 即令 $v(x, 0) = 0$, 可得多孔储油器表面油膜的输运速度

$$v(x, z) = \phi \frac{z}{\mu(T)} \frac{d\gamma_{LV}}{dT} \frac{dT}{dx}. \quad (16)$$

由式(16)不难看出, 油膜的输运速度与孔隙率 ϕ 、润滑油粘度 $\mu(T)$ 、表面张力 γ_{LV} 以及温度梯度 dT/dx 的值有关, 因此可以通过控制这几个参数的值来改变输运速度.

最后一种现象是润滑油的蒸发作用, 润滑油的蒸气压随着温度的升高而增大, 随着蒸气压的增大, 将有更多的润滑油从多孔储油器中挥发出来.

3 实验方案设计

3.1 离心输运实验

由前面的分析可知, 选择合适结构的多孔储油器和润滑油, 有无重力并不影响离心输运的速度及临界转速. 因此在地面上, 在高真空环境下旋转多孔储油器可以在一定程度上模拟多孔储油器在太空中的离心输运状况.

本实验机构主要装置包括: 可控的步进电机, 磁流体密封装置, 提供高真空环境的镀膜机, 冷却

水系统, 精度为 0.1 mg 的天平. 实验机构的主体如图 3 所示.

实验主要是模拟卫星在轨工况, 即高真空正反转旋转操作条件下, 多孔储油器内润滑油的溢出状况. 并与单方向旋转操作条件进行比较. 为了观察润滑油是否溢出, 在玻璃柱内壁贴一层白纸, 通过试验后观察其是否有油迹来判断润滑油是否溢出.

在 10^{-5} Pa 的高真空环境下, 利用步进电机驱动, 对浸有润滑油的夹布胶木储油器进行旋转, 转速为 600 r/min, 旋转时间为 8 h. 多次实验结果发现, 该旋转速度下润滑油并不能溢出, 原因是该旋转速度小于临界转速. 储油器内润滑油的质量有所减少, 这主要是由于高真空下的挥发及安装拆卸多孔储油器引起的; 另外, 正反转旋转与单项旋转所减少的润滑油量基本相同, 这也证明旋转方式对润滑油的溢出影响不大.

3.2 加热输运实验

加热引起三种不同的现象, 产生三种不同的输运形式, 三者相互耦合, 但共同作用的结果是使储油器内润滑油量改变. 为此设计了如图 4 所示的简易方案, 其内容是考察润滑油溢出量与温度梯度以及加热方向的关系.

20 世纪 70 年代中期, Fote^{[7]~[9]} 利用荧光摄影法对金属表面上的油膜在温度梯度作用下产生的运动进行了研究, 鉴于此设计了如图 5 所示的实验装置, 利用相同的方法考察润滑油油膜在多孔介质中由温度梯度引起的输运状况. 图 5 两侧是贴有加

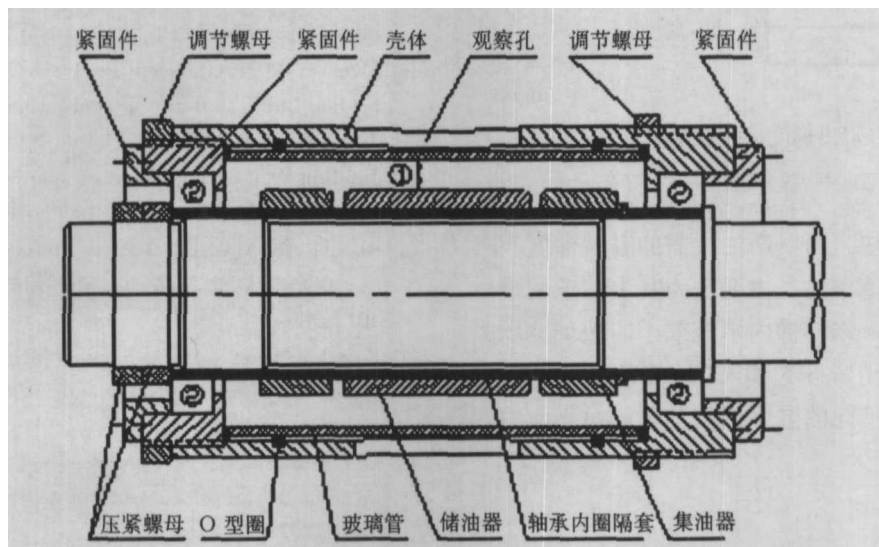


图 3 离心力输运实验机构主体

Fig.3 Schematic of machine for centrifugation

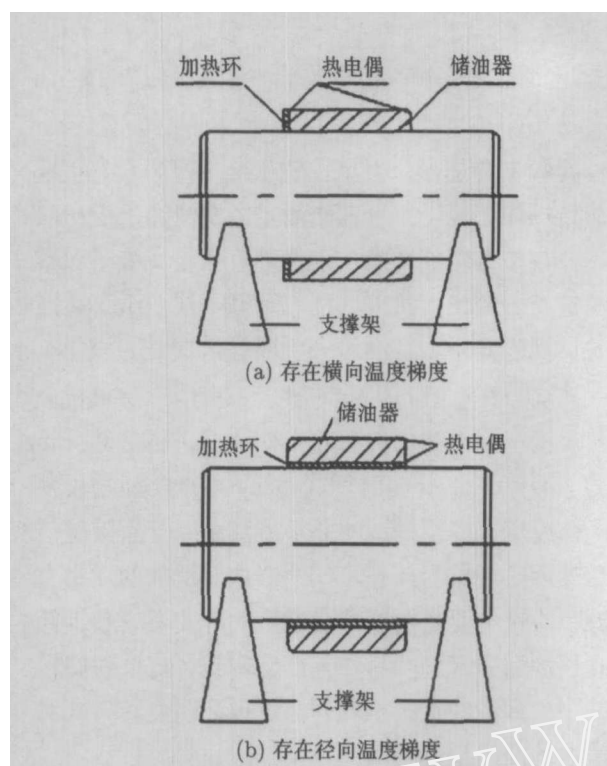


图4 加热运输实验装置
Fig.4 Schematic of machine for heating

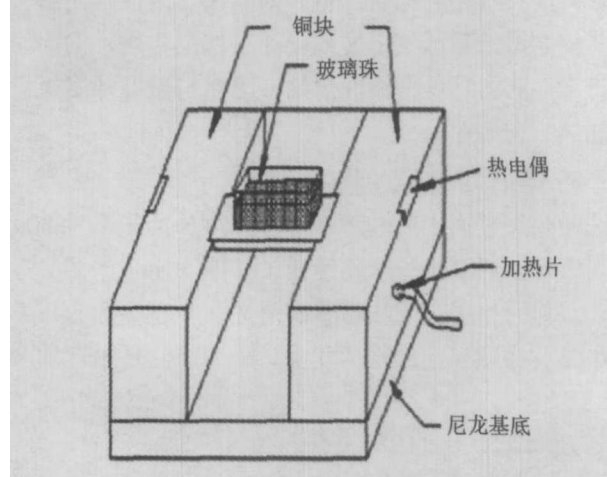


图5 温度梯度实验装置
Fig.5 Temperature gradient fixture

热片和热电偶的铜块,用以产生所需的温度梯度.连接两铜块的是一薄铜片,主要是为其上的玻璃槽加热产生温度梯度,玻璃槽内填充细小的玻璃珠以构成多孔结构.利用紫外光和 CCD 对表面油的运动进行观察,考察不同的温度梯度及时间对表面油膜运输的影响.

4 结论

本文对多孔储油器内液体润滑剂的两种外力作

用下(离心和加热)的运输进行了分析,并对离心运输和加热运输进行了实验设计,得出如下结论.

在离心运输时,选择合适的多孔储油器结构尺寸和合适的润滑油,有无重力并不影响运输的速度以及使油溢出所需的临界转速.同时可以通过改变多孔储油器的结构尺寸和润滑油来控制润滑油离心运输的速度.

在加热运输时,运输速度不仅与加热温度及温度梯度有关,而且与储油器的孔隙率、液体的表面张力和动力粘性系数有关.改变这些影响因素,可以控制加热运输的速度.

多孔储油器内润滑油的运输是离心力与温度梯度等多种力耦合作用的结果,现在的理论还无法对其做更详细的分析,因此必须以实验为基础,以期得到更多的数据,为空间液体润滑工程设计提供参考依据,并不断探索新的运动部件供油及储油方法.

致谢 中国科学院上海技术物理研究所和兰州化学物理研究所的合作研究者提供了相关工程参数及数据.

参考文献

- [1] Roberts M. A study of Oil Circulation in the R-4 Spin-Axis Bearings with Sintered Nylon Ball Retainer, Cambridge (Massachusetts), The Charles Stark Draper Laboratory, 1966. Report MIT E-2082
- [2] Zaretsky E V. Liquid lubrication in space. *Tribol. Int.*, 1990, **23**(2):75~93
- [3] Marchetti M, Meurisse M H, Vergne P, Sicre J, Durand M. Analysis of oil supply phenomena by sintered porous reservoirs. *Tribol. Lett.*, 2001, **10**(3):163~170
- [4] Meurisse M H, Giudicelli B. A 3D Conservative Model for Self-Lubricated porous journal bearings in a hydrodynamic steady state. *J. Tribol.*, 1999, **121**(3):529~537
- [5] Jamison W E. Applications of microporous polymer lubricants. *Lubr. Eng.*, 1982, **38**(12):758~761
- [6] Sears F W. *Mechanics, Wave Motion and Heat*. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Co. Inc, 1958. 401
- [7] Fote A A, Leon M D, Feuerstein S. Migration of hydrocarbon oil on metal substrates under the influence of temperature gradients. *Lubr. Eng.*, 1976, **32**(10):542~545
- [8] Fote A A, Slade R A, Feuerstein S. The behavior of thin oil films in the presence of porous lubricant reservoirs. *Wear*, 1978, **46**:377~385
- [9] Fote A A, Slade R A, Feuerstein S. Thermally induced migration of hydrocarbon oil. *J. Lubr. Tech.*, 1977, **99**:158~162