

国外空间液体剩余量测量技术*

雷 雯

(兰州物理研究所, 兰州, 730000)

摘 要: 掌握卫星运行期间剩余推进剂的贮量是掌握卫星活动的重要一环。为了精确测量空间液体, 欧空局推出两种测量方法——定期容量激励法和外来质量注入法。介绍了这两种空间液体测量方法; 描述了 G-22 搭载实验; 给出了实验结果。

主题词: 人造卫星, 液体推进剂, 余量, 测试技术

分类号: V417.2

TECHNOLOGIES OF LIQUID GAUGING IN SPACE

Lei Wen

(Lanzhou Inst. of Physics, Lanzhou, 730000)

Abstract: This paper introduces two methods of liquid gauging in space——periodic volume stimulating method and foreign mass injection method; describes G-22 experiment carried on shuttle STS-57 mission in June, 1993; and gives the testing results.

Subject terms: Artificial satellite, Liquid propellant, Allowance, Measuring technique

1 空间液体剩余量测量的意义

航天器上携带的液体用于推进、环境控制和航天员生命保障, 但主要用于推进。因为卫星在整个运行过程中要不断地对卫星进行姿态和轨道控制。一般来说, 当卫星携带的推进剂消耗殆尽时, 卫星的寿命就结束了。因此定期精确测量航天器上剩余推进剂的贮量非常重要, 特别是推进剂即将耗尽时。但是贮量越少, 测量就越困难。为了找到精确测量空间液体的方法, 欧空局率先发起了研究活动, 意大利技术系统部研制出两种空间液体测量的热力学方法——定期容量激励法和外来质量注入法。1993年6月在航天飞机 STS-57 飞行中搭载的 G-22 实验对这两种方法依次进行了验证。验证结果表明, 定期容量激励法是一种可以反复应用的精确方法; 外来质量注入法则因温度和压力影响而精度较差。

在空间, 液体量的精确计算十分困难, 因为空间环境是接近失重的微重力环境。目前采用三种不同方法完成空间液体管理: 人为加入体力法、液体密封隔离法和液体收集定位法。

2 空间液体测量方法

2.1 定期容量激励法

这是一种根据贮罐空余体积周期性变化测量空间液体的方法。设一只贮罐体积为 V_0 , 装入的液体容积为 V_L , 内部液体量呈周期性变化。根据活塞运动定律, 占据贮罐空余体积 (V_0

* 本文 1995 年 3 月 13 日收到

$-V_L$) 的气体体积变化为:

$$V(t) = (V_0 - V_L) + \Delta V \sin(\omega t) \quad (1)$$

对此激励的反应是贮罐压力呈周期性变化:

$$p(t) = p + \Delta p \sin(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

由于 $\Delta V/V$ 值非常小, 多方指数可以用下列公式计算:

$$\frac{\Delta p}{p} = n \frac{\Delta V}{V} \quad (3)$$

下列式子是计算填充比 B 的关系式:

$$B = \frac{V_L}{V_0} = \frac{V_0 - V}{V_0} = 1 - n \frac{\Delta V}{V_0} \frac{p}{\Delta p} \quad (4)$$

空贮罐可以根据等式 (3) 计算: $\left[\frac{\Delta p}{p}\right]_0 = \frac{n_0}{V_0} \Delta V$ 。通过正确选择抽气频率 (ω) 和被抽出量 (ΔV), 使 n 值很接近 n_0 值。最后导出:

$$B = 1 - \left(\frac{p}{p_0}\right) \left(\frac{\Delta p_0}{\Delta p}\right) \quad (5)$$

该式用计算两个无因次压力比的方法计算贮罐的填充因子。

2.2 外来质量注入法

外来质量注入法通过注入一种已知质量的增压气体产生的刺激来测量空间液体。将较高压力贮罐中的小质量气体注入到贮罐中, 贮罐容纳液体积为 V_L 。结果, 压力 (Δp) 上升与空余体积成反比。

假设被注入气体是一种理想气体, 在较短时间内其温度达到液体温度, 根据道尔顿定律, 导出下列关系式:

$$V_1 = V_0 - \frac{R_1 T}{\Delta p M_1} \quad (6)$$

已知气体常数 R_1 和注入的质量 M_1 , 测出质量增加后贮罐内压力上升值 (Δp), 则可以测量出液体量。测出注入贮罐的压力下降值后即可测出 M_1 值。

3 空间液体测量方法的验证

3.1 G-22 实验

G-22 实验是 1993 年 6 月搭载在航天飞机 STS-57 上的一次实验, 旨在验证空间液体测量方法。实验硬件置放在搭载容器中。搭载容器是一个圆柱形贮罐, 贮存能力为 $14.16 \times 10^{-2} \text{ m}^3$ 。实验硬件由 NASA 提供。搭载容器安在航天飞机轨道器货仓中。

实验设备全部自动化操作, 一旦达到微重力环境, 航天员发出活动指令即可自动操作。

飞行硬件由下列分系统组成: (1) 将实验用品固定在搭载容器中的机械支架; (2) 一组液体管理贮罐; (3) 周期性激励贮罐的量激励器; (4) 外来质量注入法注入贮罐; (5) 收集、处理、记录实验数据的测量设备; (6) 按程序自动控制所有实验操作的设备; (7) 由电池、电

能分配器和调节器构成的电源设备。

各实验阶段全部按程序操作：

- (1) 用氮气将液体主贮罐 1 和 2 的压力增加到 $5 \times 10^5 \text{ Pa}$;
- (2) 用激励器, 以不同压力水平和填充因子对主贮罐 1 和 2 施加量激励;
- (3) 振幅恒定时, 改变周期性激励频率;
- (4) 填充注入贮罐, 将氮气装入主贮罐 1;
- (5) 将主贮罐 1 和 2 中的液体输送到副贮罐中, 改变填充因子;
- (6) 用微处理机控制设备控制所有操作;
- (7) 用微处理机测量、收集、处理和记录数据。

3.2 数据处理

在航天飞机 STS-57 飞行之后, G-22 实验数据被送到肯尼迪中心“技术系统部”处理。1993 年 7 月 2 日第一次回收了贮存在电可擦除可编程序只读存贮器和 CMOS 静态随机存取存贮器中的所有数据。检查结果发现空间结果与地面结果一致。

3.3 实验液体回收

在肯尼迪中心进行了实验硬件中的 FC75 氟化物的回收, 结果发现 115 cm^3 氟化物丢失了。搜寻步骤如下:

(1) 进行系统调查, 首先确定可能被实验系统捕获的液体量, 然后确定哪个物理过程可能引起液体量回收误差。

(2) 进一步回收被捕获的液体, 结果发现, 在与主贮罐内联的管道中有另外 30 cm^3 液体, 同时主贮罐 2 中找到了 20 cm^3 液体。

(3) 通过填充和抽空贮罐、称量收集到的液体的质量、用纤维镜观察贮罐内丢失液体的部位等手段进行测试, 发现每只贮罐内还有 20 cm^3 的残余液体。这些残液无法回收, 主要因为所有液体都具有高度浸润性, 还因为与主贮罐配接的表面张力型液体容器构形奇特。

(4) 进行蒸发速率试验, 结果表明, 在液体收集过程中, 蒸汽以每小时 11 cm^3 的蒸发损失率通过贮罐入口处排往大气中。这一汽化损失可用来解释 45 cm^3 液体丢失的原因。

4 验证结果

4.1 定期容量激励法的结果

定期容量激励法是在 0.25、0.75 和 1 Hz 3 个不同频率下进行的。每个测量操作都反复 20 次, 这是为了达到更高精度和可靠性。主贮罐 1 最初注入氟化物 FC75 液体, 填充比 B_{11} 为 0.369。将部分液体排放到副贮罐 11 和 12 中, 然后填充比因子达到下值:

$$B_{12} = 0.346 \quad B_{13} = 0.330$$

同样, 主贮罐 2 可得出下值:

$$B_{21} = 0.248 \quad B_{22} = 0.214 \quad B_{23} = 0.199$$

在几次测量中发现, 主贮罐 1 和 2 的测量数据有差异。第一次测量中, 低频率时主贮罐 1 的测量结果最差; 1 Hz 时测量结果最佳。所以激励频率不能太低。在各种试验条件下, 高频率时的填充因子误差小于 0.6%。低频率时主贮罐的数据较为分散。主贮罐 1 上装有压力和温

度测量仪, 测量数据比主贮罐 2 的数据更为分散。对于航天器测量设备来说, 主贮罐 2 的结构更具优越性, 因为它不需要在贮罐壁上安装外接仪器出入口。

4.2 外来质量注入法的结果

外来质量注入法的测量误差主要是设备各部件温度影响的结果。

填充因子主要取决于两个假设: ①主贮罐和注入贮罐(此时进行压力测量)的温度与初始温度(气体迁移之前)相等。②不同差压传感器的参考压力在整个测量期间为常数。两个假设之间有矛盾。第一假设要求在注入之后留出几分钟的时间让气体及恒温贮罐发热; 第二假设要求参考压力管为恒温。温度变化 1°C , 压力变化达 $20 \times 10^2 \text{ Pa}$ (标准压力为 $80 \times 10^2 \text{ Pa}$), 这会产生一个不容许的误差源。

5 结 论

G-22 实验是在微重力环境中进行的液体测量实验, 其结果与地面实验结果非常一致。实验数据分析表明, 定期量激励法是一项非常精确可靠且重复性高的技术; 而外来质量注入法是一种重复性差的测量技术。

利用精度较高的差压传感器并减少量激励, 可以进一步提高定期容量激励法的精度。另外, 在地面上获得的校准数据可以用于液体量的计算。外来质量注入法也可以得到改进。现已找到了几种改进方法, 而且已在理论上对其测量精度进行了评价。

参 考 文 献

- 1 Monti R. Assessment study of liquid content measurement methods applicable to space missions. Techno System Report, 1984 (9)
- 2 Monti R et al. Results of the G-22 experiment. Techno System Report, 1994 (1)
- 3 Monti R. Liquid Gauging in Space; G-22 experiment. ESA Journal, 1994, 18
- 4 Monti R. Liquid gauging technology: G-22 detail design. Techno System Report, 1988 (7)