

## “神舟”号飞船的微重力测量\*

薛大同<sup>†</sup> 雷军刚 程玉峰 孙健 张廷虎 邓平科 贺玲 唐富荣

(中国空间技术研究院兰州物理研究所 兰州 730000)

**摘要** 航天器在太空自由漂移时出现失重状态,当存在各种干扰力时,呈现微重力状态.失重状态使得物体各部分之间不产生压力作用或者形变作用,对此开展的研究称之为微重力科学.微重力用微重力加速度的值度量.准稳态加速度来自大气阻力、潮汐力、太阳辐射压等,分析得到“神舟”号飞船的准稳态加速度在 $10^{-7}g_0$ 以下.瞬变加速度和振动加速度可用石英挠性加速度计检测.“神舟”号飞船的微重力测量仪器具有三轴检测、守时、统计分析、依照预先注入的指令准实时传送微重力统计数据或原始数据的能力.该仪器带宽为(0.06—100)Hz,分辨率 $5\mu g_0$ ,量程(-10—+10) $mg_0$ ,沿飞行轴线还有一个放大为(-150—+150) $mg_0$ 的量程.该仪器对“神舟一号”到“神舟五号”各艘飞船轨道运行段实施全过程连续监测,准实时提供了飞船各种动作发生的时刻及引起的加速度量值,为飞船飞行控制、有效载荷动作监测和空间微重力科学实验分析提供了有效服务.

**关键词** 微重力 失重 加速度,飞船 测量

## Microgravity measurement of spaceships “Shenzhou”

XUE Da-Tong<sup>†</sup> LEI Jun-Gang CHENG Yu-Feng SUN Jian  
ZHANG Ting-Hu DENG Ping-Ke HE Ling TANG Fu-Rong

(Lanzhou Institute of Physics, Chinese Academy of Space Technology, Lanzhou 730000, China)

**Abstract** A free flying spacecraft is in a state of weightlessness, but when there are various disturbing forces it experiences microgravity. In the weightless state there is no pressure or deformation action between the parts of an object, and the study of this state is known as microgravity science. Microgravity is quantified by the level of the micro-gravitational acceleration. Quasi-steady acceleration arises due to the atmospheric drag, tide forces, solar radiation pressure, etc. The quasi-steady acceleration on the “Shenzhou” series of spaceships is analyzed to be below  $10^{-7}g_0$ . The transient and vibrational acceleration can be detected by a quartz flexible accelerometer. The microgravity measurement instruments in “Shenzhou” have the following functions: triaxial measurement, timekeeping, statistics, and transmission of microgravity statistical or original data in quasi-real-time according to pre-programmed commands. The relevant parameters are: (0.06—100) Hz bandwidth,  $5\mu g_0$  resolution and (-10—+10)  $mg_0$  measurement range, with an additional amplification range of (-150—+150)  $mg_0$  along the flight axis. The instruments have continuously monitored the acceleration throughout the complete orbital flights of the spaceships “Shenzhou” 1 to 5, so the time at which the various maneuvers occurred and the acceleration values caused by these maneuvers were provided in quasi-real-time. The measurement data were employed for flight control of the spaceships, maneuver monitoring of the payloads and data analysis of the microgravity science experiments in space.

**Key words** microgravity, weightlessness, acceleration, spaceship, measurement

\* 2004-01-18 收到

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: zltxue@sohu.com

## 1 引言

空间微重力加速度测量系统可用于监测航天器各种动作的发生时刻及引起的加速度量值,检测这些动作引起的航天器结构动力学响应及其频谱,为航天器飞行控制、有效载荷动作监测和空间微重力科学实验提供辅助数据.美国1991年6月在航天飞机STS-40任务中首次使用并沿用至今的SAMS加速度测量系统<sup>[1,2]</sup>,传感器配用Sundstrand数据控制公司的QA-2000型石英挠性加速度计,可测量瞬态加速度和振动加速度,分辨率 $1\mu g_0$ ,系统总精度 $10\mu g_0$ .SAMS也支持Bell XI-79固态加速度计,分辨率 $0.01\mu g_0$ ,系统总精度 $1\mu g_0$ .低通上限频率从2.5Hz到100Hz分六档.采用16bit A/D转换器,用硬盘和光盘存储数据,结果以三种图谱表示:以10s为周期的平均值图、方均根峰值图(以1s为周期求方均根,然后在10s内选最大值)和频谱图.近年为国际空间站研制的SAMS-II型改为24 bit A/D转换器,低通上限扩展到408.5Hz<sup>[3]</sup>.中国从20世纪80年代中期开始发展自己的空间微重力加速度测量系统,第一代产品于1990年10月检测了FSW-1型返回式卫星的微重力水平,第二代产品于1994年7月检测了FSW-2型返回式卫星各个典型工况微重力加速度随时间的变化及其频谱.为满足“神舟”号飞船的需要,又研制出第三代产品,对轨道运行段实施全过程连续监测,准实时提供了飞船各种动作发生的时刻及引起的加速度量值,为飞船飞行控制、有效载荷动作监测和空间微重力科学实验提供了有效服务<sup>[4]</sup>.

## 2 空间微重力原理

我们知道,重力是地球对物体的引力和地球自转产生的惯性离心力的矢量和.而物体的重量是物体与其支持物(或悬挂物)固定在一个运动参考系上,除引力、惯性力、支持力之外,物体受到其他作用力的合力为零时,物体作用在其支持物(或悬挂物)上的力,其值等于地球对该物体的引力和运动参考系引起的输运惯性力的矢量和<sup>[5]</sup>.

地面上的物体感受到的重力主要是地球引力.与重力平均值相比,最大的离心力值也只是重力平均值的1/289.由此可知,地球质量的引力是组成重力的主要部分.对于绕地球作轨道运行的航天器而

言,重力仅指地球的引力,因为地球自转对此已无贡献.

绕地球作轨道运行的航天器由于具有约8km/s的第一宇宙速度,由此产生的惯性离心力与地球引力相抗衡,因此不会因地球引力而坠落地面.为了克服地球引力并获得第一宇宙速度,航天器发射升空需要很大的推力,但是一旦到达预定轨道,主推进器即行关闭,航天器进入在轨运行阶段.这时,航天器只在调整姿态时启动姿态发动机,在机动飞行(变轨、轨道维持)时启动轨控发动机,即航天器基本处于自由漂移状态.所谓自由漂移状态,指的是质点的绝对加速度仅由引力场的强度决定时的状态,就此而言,自由漂移也包括自由落体.

航天器在太空自由漂移时出现失重(weightlessness)状态,即失去重量,而不是失去重力.只有在赤道上空距地面高度为35786 km的地球静止卫星上,从相对地球静止的角度,可以看作该处地球的引力和地球自转产生的惯性离心力正好相消(理想状态下),因而处于零重力(zero gravity)状态,失重等同于零重力.而对于其他航天器,失重并不等同于零重力.

失重状态与广义相对论有密切的关系.对失重状态的认识与分析推断出等效原理,而等效原理是广义相对论的基础之一.换个角度说,对“广义相对论·等效原理”的理解有助于深化对失重状态的认识.为此我们引用著名物理学家泡利(因发现“泡利不相容原理”而获得诺贝尔物理学奖)在受到爱因斯坦高度赞许的长篇综述文章《相对论》第IV编“广义相对论”中对等效原理所作的一般表述作为失重状态的经典总结<sup>[6]</sup>(黑体字是原有的):

“等效原理原来只是在均匀引力场的情况下提出的.对于一般的情形,等效原理可以作如下的表述:对于每一个无限小的世界区域(在这样一个世界区域中,引力随空间和时间的变化可以忽略不计),总存在一个坐标系 $K_0(x_1, x_2, x_3, x_4)$ ,在这个坐标系中,引力既不影响粒子的运动,也不影响任何其他物理过程.简言之,在一个无限小的世界区域中,每一个引力场可以被变换掉.我们可以设想用一个自由地飘浮的、充分小的匣子来作为定域坐标系 $K_0$ 的物理体现,这个匣子除受重力作用外,不受任何外力,并且在重力的作用下自由落下.

显然这种‘变换掉’之所以可能是由于重力场具有这样的基本性质:它对所有物体都赋予相同的加速度,或者换一种说法,是由于引力质量总等于惯

性质量的原故. ....”

失重并不等同于引力为零. 根据牛顿的万有引力定律, 在地球静止卫星所处的高度上, 地球的引力为地面的 2.3%; 而在“神舟”号飞船变轨后所处的 343km 高度, 地球的引力仅比地面减少 10%.

航天器在太空飞行时还受到<sup>[7]</sup> (1) 偏离质心处, 由重力梯度和惯性离心力引起的潮汐力 (2) 偏离质心处由于航天器绕质心旋转, 引起附加的离心力和切向力 (3) 物体相对航天器的运动要诱导出科里奥利力 (4) 大气阻力和较小程度上的太阳辐射压产生质心的准定常加速度 (5) 姿态控制和轨道机动时推进器点火等操作活动引起附加的瞬变外力 (6) 机械部件运动、宇航员活动等引起航天器内部质量分布的变化, 产生内力. 所以, 航天器不是处于完全的失重状态, 而是处于微重力状态. 由此我们可以看到, 航天器中的微重力环境并不是空间的自然环境, 而是航天器在轨运行时产生的诱发环境. 需要说明的是, 微重力是对失重的偏离, 理应称为微量 (micro-weight), 只是遵从习惯, 才称为微重力 (micro-gravity).

微重力不是引力与离心力相抵消后的残余部分. 以下事实可以说明这一点: 对于一个沿椭圆轨道运行的航天器而言, 如果不存在以上各种干扰力, 则始终处于完全的失重状态. 然而, 该航天器近地点的飞行速度较高, 此时离心力大于引力, 而远地点的飞行速度较低, 此时离心力小于引力.

我们知道, 引力的根源在于物体存在引力质量, 因而引力是体积力. 地面上的物体感受到的重力主要是地球引力, 因而我们也常说重力是体积力. 然而, 上述各种干扰力基本上都是外力, 只有偏离质心处的潮汐力与重力梯度有关, 但也与航天器公转和自转造成的离心加速度有关, 不能含盖在重力范畴. 所以, 由干扰引起的微重力并不具有重力的固有特征, “微重力”恰恰是“非重力” (non-gravitational forces).

### 3 空间微重力的作用

如前所述, 微重力是对失重的偏离. 所以, 微重力的作用其实是失重的作用, 而微重力作为对失重的干扰, 一定程度上降低了失重的作用.

失重是一种极端环境, 极端环境还有极低温、极高真空、超高温、超高压、强磁场、强激光等. 物质在极端条件下的结构、形态与行为往往不同于常规条

件, 变化的原因多数是原子间相互作用力、电子态等发生改变. 为此, 近代出现了极端条件科学, 专门研究极端条件下物质的行为. 然而, 引力本身是弱作用力, 不改变原子和电子的能态, 因此, 失重状态下运动参考系引起的输运惯性力与地球的引力相消, 更不会改变原子和电子的能态. 这就决定了失重研究 (或按通常的说法称之为微重力科学研究) 的内容、手段与其他极端环境科学有很大不同<sup>[8]</sup>.

失重状态的外部特征是处于自由漂移状态. 内部特征是各部分之间不产生压力作用或者形变作用. 失重的特征也就是失重的作用.

自由漂移是失重状态最直观的表现. 例如, 航天员不能用水杯喝水, 否则水滴会在太空舱中自由漂浮; 咀嚼食物时必须抿紧嘴唇, 以免碎渣在空中飞扬; 航天员活动时要减轻用力, 以免过冲和磕碰; 搬运大质量物体不再费劲, 但想获取大加速度却非易事.....

由于物体各部分之间不产生压力作用或者形变作用, 在太空中可以用轻型结构拼装庞大的空间站; 但想利用一摞书自身的重量压平揉皱的纸团也就不可能了.

失重状态下各部分之间不产生压力作用或者形变作用, 对流体的影响可以归结为静水压消失、不同密度物质沉浮和分层现象消失、温度梯度或浓度梯度引起的浮力对流消失. 沉浮分层、浮力对流都是浮力造成的, 而浮力的本质是静水压.

我们知道, 非失重条件下如果物体的密度大于液体的密度, 物体将下沉, 反之则上浮; 而失重条件下由于运动参考系引起的输运惯性力与地球引力相消, 因此浮力消失.

非失重条件下流体中固体颗粒、气泡、不溶性液滴的沉浮是浮力的一种表现, 其运动速度与浮力及液体的粘度有关, 被称为斯托克斯速度. 非失重条件下固体颗粒、气泡、不溶性液滴的半径越小, 斯托克斯速度越小. 当斯托克斯速度被布朗运动掩盖时, 粒子成为悬浮状态, 不再分离, 而失重状态下不论粒径大小, 都将悬浮, 因此, 失重状态下脱泡必须另想办法<sup>[9]</sup>.

非失重条件下流体内部如果存在温度梯度, 会出现浮力对流. 温升如果导致膨胀, 则上浮; 反之, 如果导致收缩, 则下沉. 溶液中如存在浓度差也会出现浮力对流. 例如, 从溶液中生长晶体的场合, 在籽晶的近旁参加晶体生长的溶液比其上方的溶液浓度小, 从而产生“瑞利不稳定”的对流<sup>[9]</sup>. 浮力对流使

溶液混合均匀,但浮力对流使得晶体生长的各种参数难以控制,且掩盖了某些次级过程,而在失重状态下浮力对流消失,可望改善晶体生长条件,表现出来的次级现象为科学研究开辟了新的领域<sup>[8]</sup>。

利用微重力状态下流体中的浮力对流、静水压和沉降现象大为减弱,可以进行晶体生长、合金凝固、生物分离、三维组织培养等研究,以加深对材料科学、生物科学和流体科学相关规律的认识和理解,发现可适用于指导地面材料、生物加工过程的新工艺、新方法,为形成新的高技术产业提供依据,同时为人类在太空的活动和生活奠定基础。

#### 4 空间微重力的表征

我们知道,人们一般把重力加速度的测量简称为重力测量,把重力加速度值简称为重力值,这意味着“重力用重力加速度的值度量”。与此类似,我们把微重力加速度的测量简称为微重力测量,把微重力加速度值简称为微重力值,即“微重力用微重力加速度的值度量”。

由于“自由地飘浮的、充分小的匣子”中“引力既不影响粒子的运动,也不影响任何其他物理过程”,所以,在引力场中自由漂移的微加速度仪表测出的加速度数值为零,而微重力状态下微加速度仪表实际测出的正是其对引力场中自由漂移的运动参考系的相对加速度,即微重力加速度,而不论引力场中自由漂移的运动参考系是否真实存在。

换句话说,我们只要把微加速度仪表安置在航天器上,当航天器在轨运行时,该微加速度仪表的输出,就是微重力加速度。

由于干扰力的来源和性质不同,航天器上的微重力加速度具有不同的类型<sup>[10]</sup>:

(1)准稳态加速度:变化频率不大于0.01Hz的微重力加速度。准稳态加速度的量值可依理论估算,一般不超过 $10^{-6}g_0$ 量级。它们也是引起航天器扰动的因素。产生准稳态加速度的力由大气阻力、潮汐力、太阳辐射压等与航天器绕地球飞行有关的外部作用力构成;

(2)瞬变加速度:发生跳变( $g$ -jitter)的微重力加速度。瞬变加速度的量值一般在 $10^{-4}g_0$ 以上,持续时间从 $10^{-2}$ — $10^2$ s不等。产生瞬变加速度的力由变轨推力、轨控和姿控推力、航天器辅助设备和有效载荷动作、宇航员活动等构成;

(3)振动加速度:表现为稳态正弦响应、随机涨

落或衰减振荡的微重力加速度。振动加速度的量值(一般在 $10^{-6}g_0$ 以上)和频谱(0.1—100Hz)因干扰源及航天器结构而异。振动加速度来自仪器设备的振动干扰及各种扰动因素引起的航天器结构的动力学响应。

#### 5 “神舟”号飞船准稳态加速度剖析

引起准稳态加速度的原因主要是大气阻力、潮汐力、太阳辐射压。

大气阻力与大气密度、航天器的运动速度及其迎风面的横截面积等因素有关,而大气密度则随轨道高度变化并受太阳辐射强度、地磁活动指数、季节、昼夜等因素影响。图1给出了根据飞船实测的大气密度、实际的飞行速度和迎风面的横截面积计算出来的大气阻力引起的微重力加速度。可以明显看到,在每个轨道周期,大气阻力引起的微重力加速度在( $-10^{-8}$ — $-10^{-7}$ ) $g_0$ 范围内呈双周期变化。这是由于太阳帆板为尽量朝向太阳,每个轨道周期要旋转一周,以及进入地球阴影后大气密度较低的缘故。

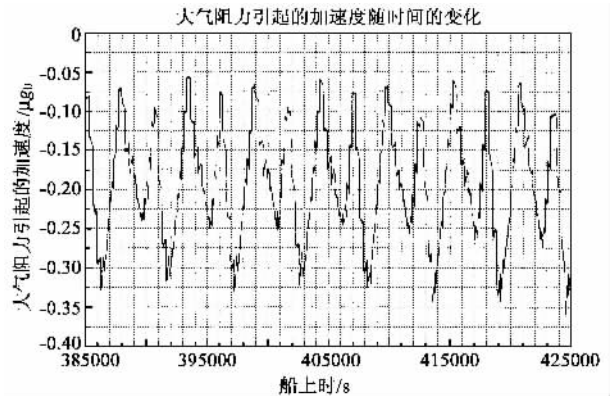


图1 飞船大气阻力引起的加速度的计算结果

潮汐加速度与航天器公转、自转的角速度,以及质点偏离航天器质心的距离有关。“神舟”号飞船采用三轴稳定对地定向,自转角速度等于公转角速度,对于变轨后所处的343km高度,如有一物体在飞船前进方向、天顶方向、右舷方向均偏离飞船质心0.5m,则在上述三方向上受到的潮汐加速度分别为 $1.5 \times 10^{-14}g_0$ 、 $2.0 \times 10^{-7}g_0$ 和 $6.7 \times 10^{-8}g_0$ 。

太阳辐射压引起的加速度是光子照射到航天器表面引起动量交换造成的。在距离太阳等于太阳与地球之间的平均距离(即一个天文单位)处,在地球大气层外垂直于太阳光线的单位面积上,单位时间接收到的来自太阳的总电磁辐射能(即一个太阳常

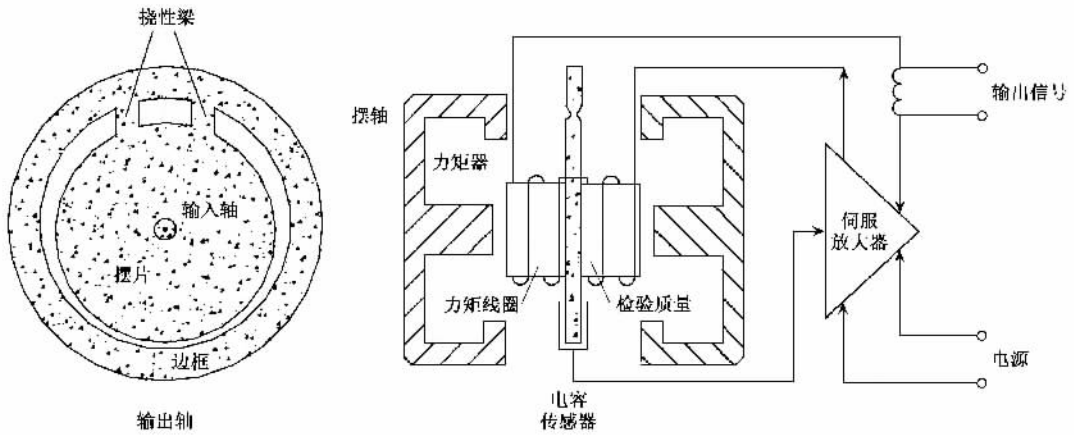


图2 石英挠性加速度计原理图

数)为  $1371 \text{ W/m}^2$ <sup>[11]</sup>。如果太阳正好从天顶垂直照射“神舟”号飞船,这时照射到的面积最大,若太阳光全部被吸收,计算得到太阳辐射压引起的加速度为  $2.0 \times 10^{-9} g_0$ 。若太阳光全部被反射,引起的加速度也不会超过上述值的两倍。

上述分析表明,“神舟”号飞船的准稳态加速度在  $10^{-7} g_0$  以下。

准稳态加速度量值微弱、变化缓慢,因而对测量技术的要求很高。国外通常采用静电悬浮加速度计进行测量,并且需要在轨标校。“神舟”号飞船上尚未开展此项测试。

## 6 “神舟”号飞船的微重力测量技术

“神舟”号飞船的微重力测量仪器只用于监测瞬变加速度和振动加速度。

加速度传感器采用国产石英挠性加速度计,原理如图2所示。左部为摆片结构,系采用整片熔融石英,腐蚀出摆片、边框和挠性梁。为提高灵敏度,挠性梁腐蚀得特别薄。右部为工作原理:当沿输入轴出现加速度时,边框随之加速,而摆片因惯性不被加速,从而偏离平衡位置。在摆片上蒸镀有金电极,与支撑件(未画出)上的固定电极构成差分电容,用以检测摆片位置的变化。摆片上还粘有力矩线圈,当检测出差分电容发生变化,即经伺服反馈电路放大后将电流加到力矩线圈上,通过电磁力将摆片拉回到平衡位置。反馈电流即与加速度成正比。

加速度传感器的标度因数为  $(1.1 \sim 1.4) \text{ mA}/g_0$ ,而仪器的整机分辨率为  $5 \mu g_0$ ,即需要分辨传感器  $5.5 \sim 7.0 \text{ nA}$  的输出差异,这靠专门的检测电路来实现。该检测电路同时具有偏值纠正、放大、限幅的功能。

仪器具有三轴检测能力,天地方向和左右舷方向的量程为  $(-10 \sim +10) \text{ mg}_0$ ,沿飞行轴线除上述量程外,还有一个放大为  $(-150 \sim +150) \text{ mg}_0$  的量程。

仪器的通频带为  $(0.06 \sim 100) \text{ Hz}$ 。为此,仪器每隔  $1 \text{ ms}$  巡检一路,即每路的采样间隔为  $4 \text{ ms}$ 。与此相配合,仪器设置了截止频率为  $108.5 \text{ Hz}$  的三级六阶 Chebyshev 低通滤波器。

仪器具有软时钟,并定期接受飞船校时。

仪器对飞船轨道运行段实施全过程连续监测。由于采样率高,数据量非常庞大。为了压缩数据量,仪器设置了统计功能,即每路每  $4096$  个数据作一次统计,给出平均值、方均根值、负向极值和正向极值。多数时间仪器只传送统计数据,只在需要时才传送密集的原始采集数据。什么时候传送原始采集数据是根据预先注入的指令进行控制的。

仪器具有准实时传送微重力数据的功能,即采集的数据先存储起来,飞船通过测控区时可反复读取。读取数据时仍可继续存储新的数据,且读取的速度比存储的速度快。

仪器传送的微重力数据被各个测控站、测控船接收后汇集起来,最终传送到飞船应用中心,实行现场处理,实现微重力数据的准实时监测。

飞船微重力数据相当杂乱,因而准实时处理是比较困难的任务。数据杂乱表现为:出测控区后飞船数传复接器仍继续向微重力采编器取数,却不下行,造成大片丢帧;各测控站传输的数据中夹杂有测试用空帧、重帧、非微重力数据帧等无效帧;存储器尚未填满时出现无效帧;天地传输不可避免存在丢帧、错帧;复读造成新、老数据交替;校时造成时间跳变;帧计数存在错码;时间码存在错码等等。飞船微重力测量数据准实时处理软件不仅适应实际飞行数据可

能出现的各种杂乱现象,能从中提取有用信息,正确处理,并能充分利用各次复读数据,包括不同测控区下行的复读数据,以便尽量填补由于出测控区、丢帧、错码等原因丢失的数据,获得可靠的结果。

飞船微重力测量数据准实时处理软件对每一次传送的原始采集数据分别进行  $0g_0$  漂移修正。考虑到“神舟”号飞船的准稳态加速度在仪器的分辨率以下,修正程序认为无瞬变加速度时实际加速度的平均值应为零。

## 7 “神舟”号飞船的微重力测量结果

由于仪器的分辨率高,采样又非常密集,且与飞船统一走时,因而,飞船上任何预先安排的动作都可以准确地监测到,包括发生的时刻是否准确,引起的加速度有多少,从而成为飞行控制的有效监测手段。图3给出了变轨时发动机工作情况,可以看到,变轨的同时有姿控动作。图4给出了轨道维持引起的速度增量。图5展现了轨道舱的气体向舱外排放会形成微推力这一情况。图6展现的是一次调姿动作。

仪器的统计量功能适合长期连续观察加速度起伏和结构动力学响应。图8反映的是风机动作引起的结构动力学响应。图9给出了在轨运行全过程飞船动作和航天员活动在飞船天地方向引起的加速度起伏和结构动力学响应。

仪器可以监测飞船各种动作引起的飞船自由振荡过程和相应的频谱,这是地面无法测试到的,对今后开展交会对接有一定参考价值,图10展现的是轨道舱和返回舱分离后衰减振荡的频谱。图11给出了

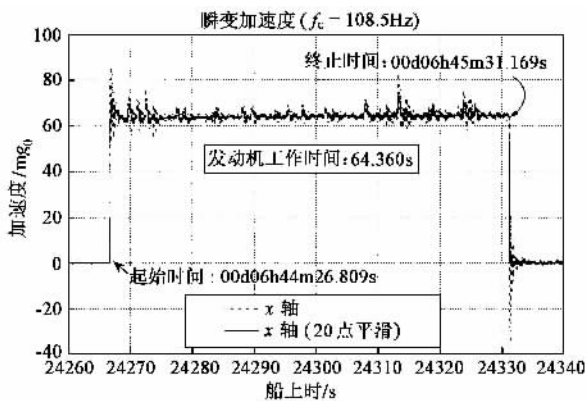


图3 变轨时发动机工作情况

相对平静时 16.388s 间隔的频谱。

仪器监测了微重力科学实验装置本身造成的微重力干扰,为各有效载荷分析实验结果、改进装置、避开有害干扰,提供了准确的背景资料,图12展现晶体

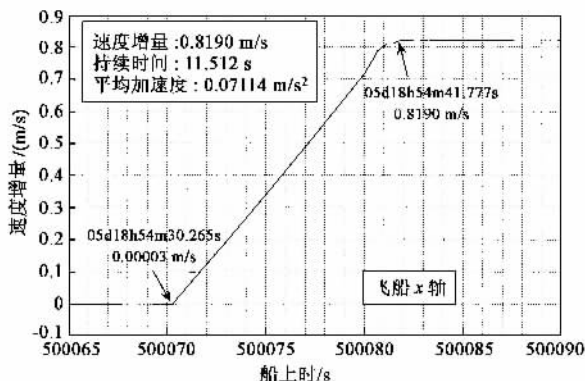


图4 轨道维持引起的速度增量

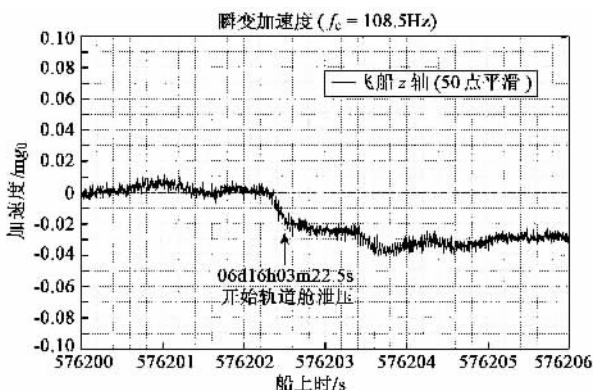


图5 轨道舱的气体向舱外排放形成微推力

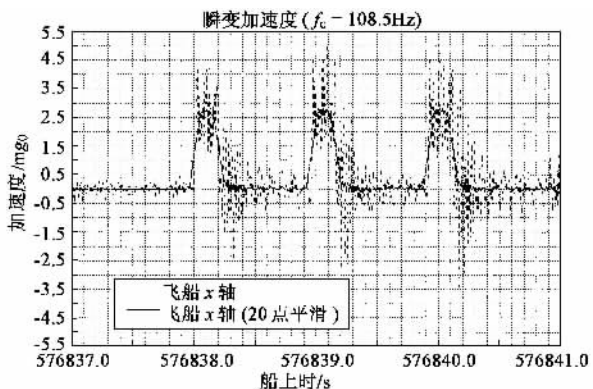


图6 一次调姿动作

生长观察装置对焦时出现的低频干扰,20点平滑数据可以准确得到晶体生长观察装置电机工作的开始时刻和结束时刻,还可以看到,晶体生长观察装置电机开始工作后 1min02.536s 有一次状态切换。

## 8 结束语

“神舟”号飞船微重力测量仪器对导致飞船轨道变化的各种加速度实施准实时监测,为最终保证飞船落点控制的准确性,作出了一份贡献,对今后飞

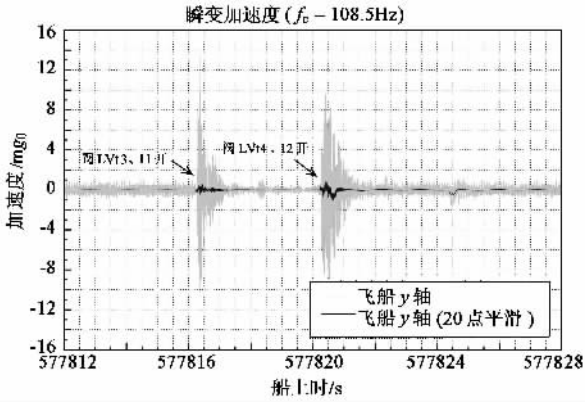


图7 一次阀门动作引起的衰减振荡

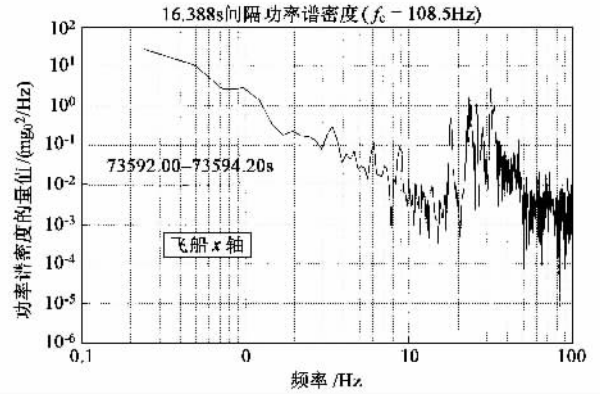


图10 轨道舱和返回舱分离后衰减振荡的频谱

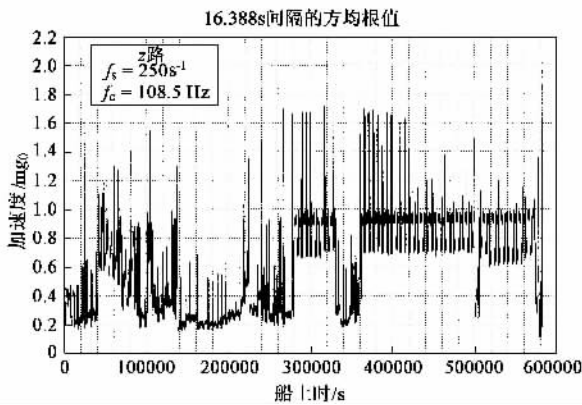


图8 风机动作引起的微重力干扰方均根值随时间的变化

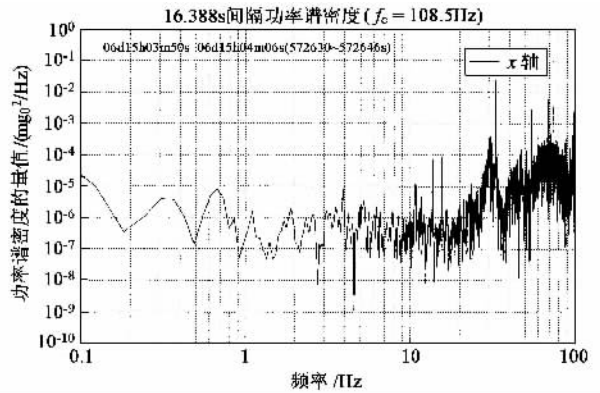


图11 飞船相对平静时 16.388s 间隔的功率谱密度

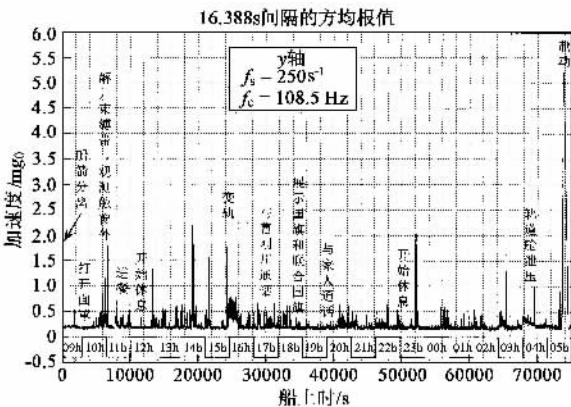


图9 飞船动作和航天员活动在飞船天地方向引起的微重力干扰的方均根值

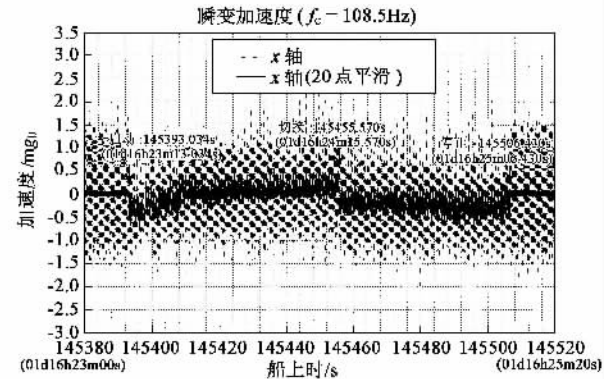


图12 晶体生长观察装置对焦时出现的低频干扰

船交会对接有重要参考价值;对影响飞船微重力水平的各种干扰实施准实时监测,为最终保证微重力科学实验取得成功,作出了一份贡献.对今后空间实验室微重力科学实验的安排有重要参考价值.

参考文献

[ 1 ] DeLombard R, Finley B D, Baugher C R. AIAA 92-0354

[ 2 ] Rogers M J B, Moskowitz M E *et al.* NASA Contractor Report 202325, 1997  
 [ 3 ] Chmiel A, Kacpura T. AIAA 2003-1003  
 [ 4 ] Xue D T, Cheng Y F, Lei J G *et al.* The Development of Chinese Space Micro-Gravitational Acceleration Measurement System. In: Proceedings of 2nd China-Germany Workshop on Microgravity Science. Dunhuang China, 2002. 256  
 [ 5 ] 亚沃尔斯基 B M, 杰特拉夫 A A 编著. 现代物理学手册. 北京: 科学出版社, 1992 [ Yaworsky B M, Jetlav A A eds. Handbook of Modern Physics. Beijing: Science Press, 1992 (in Chinese) ]

[ 6 ] 泡利著. 凌德洪, 周万生译. 相对论. 上海: 上海科学技术出版社, 1979. 197 [ Pauli W. Ling D H, Zhou W S trans. Theory of Relativity. Shanghai: Science and Technology of Shanghai Press, 1979. 197 ( in Chinese ) ]

[ 7 ] 瓦尔特 H U 主编. 空间流体科学与空间材料科学. 北京: 中国科学技术出版社, 1991 [ Walter H U ed. Fluid sciences and Materials Science in Space. Beijing: Science and Technology of China Press, 1991 ( in Chinese ) ]

[ 8 ] 姜景山主编. 空间科学与应用. 北京: 科学出版社, 2001 [ Jiang J S ed. Science and Application in Space. Beijing: Science Press, 2001 ( in Chinese ) ]

[ 9 ] 熊延龄编译. 未来空间工业化中的材料制造技术. 空间站系列文集第三集·空间站的应用. 北京: 航天工业部五一二

所出版, 1987. 20 [ Xiong Y L ed. & trans. Manufacture Technology of Materials in Future Space Industrialisation. In: Application of Space Station, The Series of Space Station Corpus No. 3. Beijing: The No. 512 Institute of Ministry of Space Industry press, 1987. 20 ( in Chinese ) ]

[ 10 ] Arrott A P, Nijhawan V, Lichtenberg B K. Acceleration Measurement System for Materials Science Experiments in Space. In: IAF - 88 - 342

[ 11 ] 都亨, 叶宗海主编. 低轨道航天器空间环境手册. 北京: 国防工业出版社, 1996 [ Du H, Ye Z H eds. Handbook of Space Environment Around Spacecrafts Flying Along Lower Orbet. Beijing: Defense Industry Press, 1996 ( in Chinese ) ]



· 物理新闻和动态 ·

### 一种热膨胀系数为零的导体

大部分材料具有热胀冷缩的热物性, 极少数材料具有负的热胀系数——表现出冷胀热缩行为. 如果将上述两种类型的材料结合在一起, 制成复合材料, 有可能达到零热膨胀系数的效果. 然而, 已经制成的这类材料通常是绝缘体, 从而限制了它们的应用范围.

殷钢 (invar) 是一种合金, 含有 65% Fe 和 35% Ni, 在室温附近的一个很宽的温度范围内, 无论温度怎样变化, 它的尺度都不发生变化. 这种合金是瑞士物理学家纪尧姆 (Guillaume C E) 于 1897 年发现的. 历史上, 殷钢的发现满足了物理学和测地学中精密测量的需求. 今天, 殷钢仍被广泛用于制造各种精密机械, 如手表. 纪尧姆由于上述贡献获得了 1920 年度诺贝尔物理学奖.

最近, 来自美国密歇根州立大学的 Kanatzidis 等发现了

(中国科学院理化技术研究所 戴闻 编译自 Nature, 2003, 425: 702)

一种新合金. 它由镱 - 镓 - 锗 (Yb-Ga-Ge) 构成, 在宽温区内展示出零热膨胀特性. 进而, 该合金是导体而非绝缘体, 因而有望在温度剧烈变化的环境中获得应用, 如马达、执行机构以及空间飞行器部件等.

研究者认为, Yb-Ga-Ge 合金的体积在温度变化时保持不变, 其机理在于: 晶格单胞的三个晶向之间膨胀与收缩效应的补偿或抵消. 当温度降低, Ga 价带中的电子转移到 Yb 原子上, Yb 原子由于接收上述退局域电子而膨胀, Ga 原子则收缩. 结果在一个晶向上, 晶格尺寸表现为遇冷收缩. 这是因为 Ga 收缩的量稍稍大于 Yb 膨胀的量. 这个收缩量是很小的, 它对于整个体积的影响可因另外两个晶向的微小膨胀而消除. 实现零热膨胀的关键在于材料的制备工艺.

### 量子光学相干层析扫描显微镜

迈克耳孙干涉仪在历史上曾被用于研究光速问题. 光源发出的光被分成两路, 在其中一路上安放样品. 由于光程差与样品有关, 当检测两束光重新相遇时的相干状态, 即可导出样品的光学性质. 几年前, 在上述技术基础上发展起来的量子光学相干层析装置, 已经成为人体器官三维结构成像的有力工具.

在经典相干层析装置中, 相干的二束光 (A 路和 B 路) 最终会聚到探测器. A 路光作为参考光束, 途经可移动平面镜的反射, 因此它的光程 (或延时) 是可调的; B 路光从样品的内部反射. 探测器显示的是样品内部特定层 (该层所相应的 B 路光程等于预设的 A 路光程) 的反射光与参考光束的相干叠加. 横向扫描可以给出样品内部特定层的图像, 而改变参考光束预设的光程, 可以实现对样品内部不同深度层的探测. 但是, 在这样的经典装置中, 光源频带内的不同成分在样品内会发生色散, 从而减小了纵向分辨率 (不同频率的光

在样品中波速不同, 结果光程不同).

最近, 来自美国波士顿大学的 Nasr 等发展了一种量子相干层析扫描显微镜. 由于量子对称的基本属性, 该装置对样品材料的色散不敏感. 因此, 这台显微镜获得了分辨率比经典装置高 5 倍的三维图像. 在 Nasr 的装置中, 光源发射蓝色光子, 经过非线性光学晶体, 它被劈裂成一对全同的 (频率和偏振全同) 红色光子 (通过所谓参数下翻转过程). 红光子之一途经参考光路中可移动平面镜的反射, 红光子之二被样品内部特定层反射, 然后二者在一块半反半透镜面上相会 (从镜面的两侧对称地入射). 按照量子力学, 这样两个红光子, 但它们同时到达半反半透镜面时, 二者总是“选择”进入到同一束光, 即两个可能的前进方向之一. 这样一来, 设置在光路前方的一对对称的探测器将不可能获得复合计数. 于是, 探测复合计数产生的速率, 便可导出样品内部被测位置的反射率 (反射率擦越高, 复合计数越少).

(中国科学院理化技术研究所 戴闻 编译自 Phys. Rev. Lett., 2003, 91: 083601)