

微重力振动隔离系统原理及示例简介

于 强 金大荣

(中国科学院空间科学与应用研究中心)

摘 要 微重力振动隔离系统主要用于减小空间科学实验环境的振动水平。振动隔离系统通过主动抑制实验过程中环境的加速度,实现空间科学实验所需要的低加速度环境。介绍微重力隔振系统的基本原理,以及国外几种已有的和正在研制的微重力隔振系统,为自行开发研制微重力振动隔离系统提供参考依据。

关键词 微重力振动隔离 主动隔振

1 前 言

科学实验之所以要在空间进行,重要的原因之一就是利用空间的微重力环境。地面上蛋白质晶体生长、燃烧、流体力学和材料科学实验中的许多现象,在重力减小到一定程度(处于微重力环境下)之后会发生变化。然而,空间科学实验的微重力环境并不尽如人意,往往难以满足微重力科学实验对微重力水平的要求。特别是在空间站上,由于诸多振动因素的存在,例如电机、泵、风扇的运行,以及航天员的走动,都会对微重力环境造成影响,从而导致微重力水平达不到空间科学实验的要求。以国际空间站为例,图 1 给出了科学实验对微重力水平的需求和实际的微重力水平。由此可以看出,科学实验往往对低频加速度很敏感,而实际的微重力环境未能满足科学实验的要求。

国际空间站的主要振动源以频率来划分可分为三类。第一类是小于 10^{-3} Hz 的低频段,这一范围内的加速度是由重力梯度和大气拖曳产生的。这种低频振动与国际空间站的结构和轨道有关。第二类是大于 1 Hz 的高频段,这一范围内的加速度由泵、压缩机、电机和风扇等正弦稳态源,以及航天员的运动和推进器等瞬态源产生。这一类振动源由于是在相对高频段,因此可以用比较简单的(被动)隔振系统来隔离。第三类振动的频段是 10^{-3} Hz~1 Hz 的中频段,这一频率范围内的振动主要是由航天员的走动、推进器动作等原因造成的。因为这些振动源是瞬态的,因

此其振动效果很难分析^[1]。

我国载人航天的步伐很快就要进入空间站阶段。在我国自己的空间站上将要开展大量的科学实验。为了能够达到微重力科学实验的目的,需要给科学实验设备创造一个良好的微重力环境,即需要对空间科学实验设备进行振动隔离。高频段的振动可通过较为简单的被动隔离方式将其隔离。而中低频段的振动则需要使用主动隔振系统来隔离。

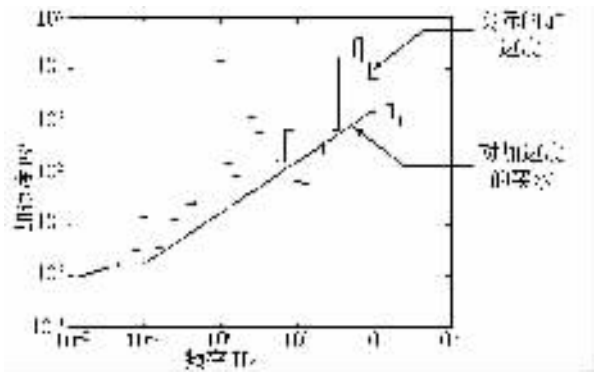


图 1 微重力加速度需求^[1]

2 振动隔离的目标和基本原理

振动是相对的运动。我们以加速度传感器作为参照系,加速度传感器安装在平台之上,能够感受到平台所受惯性力的变化。如图 2 所示。科学实验平台悬浮在基座之上,通过电缆与基座相连。当飞行器上产生振动时,振动通过电缆传递给科学实验平台。传感器感受到振动之后,振动隔离系统中的控制器控制科学实验平台保持与基座之间的相对位置不变,

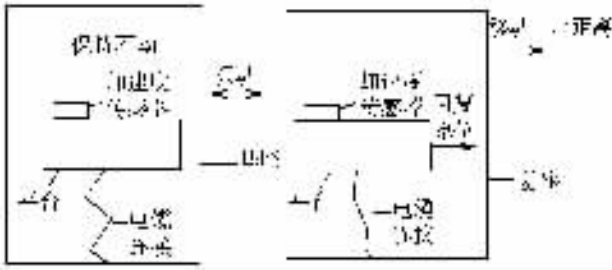


图 2 隔振系统框图

以此减小振动的水平。

隔振系统的目标是衰减通过电缆传给科学实验平台的加速度。如图 3 所示,用一个刚度为 k 的线性弹簧, 阻尼系数为 d 的阻尼器来表示图 2 中的隔振系统。基座的惯性位移为 x_0 , 平台的惯性位移为 x 。基座的运动受航天员运动、飞行器姿态控制等多种因素的影响。由电缆直接传递到平台的干扰力在图 3 中为 f_{dist} 。用于主动控制的激励器的控制力为 f_{act} 。需要的衰减水平可由图 1 所示的干扰和需要的加速度水平计算出。

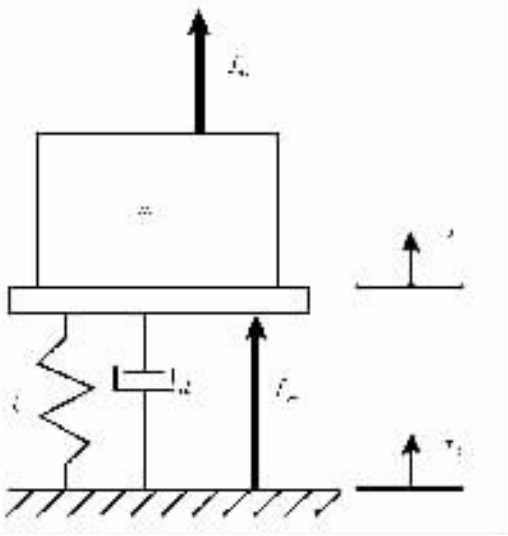


图 3 单自由度振动系统

图 3 所示的单自由度弹簧质量阻尼系统表示出了隔振系统的基本原理。相对于基座运动,并且受到直接惯性干扰的平台的响应为:

$$m\ddot{x} + d(\dot{x} - \dot{x}_0) + k(x - x_0) = f_{dist} + f_{act}$$

对上述方程进行拉普拉斯变换, 得到平台加速度与基座加速度之比为:

$$\frac{X(s)}{X_0(s)} = \frac{2\zeta\omega s + \omega^2}{s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2}$$

其中固有频率 $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$, $\zeta = \frac{d}{2\sqrt{km}}$ 是阻尼比。

通过控制激励器控制力 f_{act} 的大小, 可以达到主动隔振的目的。

3 国外几种微重力隔振系统^[2]

目前国际上已有四种微重力振动隔离系统被用于空间科学实验, 分别是悬浮瞬态加速度抑制器 (STABLE); 实验柜主动隔振系统 (ARIS); 微重力隔振系统 (MIM); 手套箱集成微重力隔振系统 (g-LIMIT)。下面对这四个系统进行简单的介绍。

3.1 悬浮瞬态加速度抑制 (STABLE)

该振动隔离系统由 NASA MSFC 和波音公司共同开发, 1995 年在 STS-73/USML-02 上支持了流体物理实验。

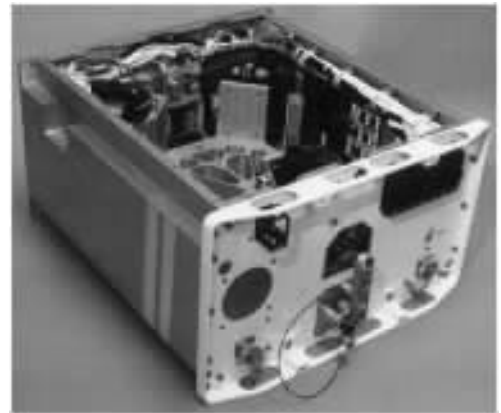


图 4 STABLE

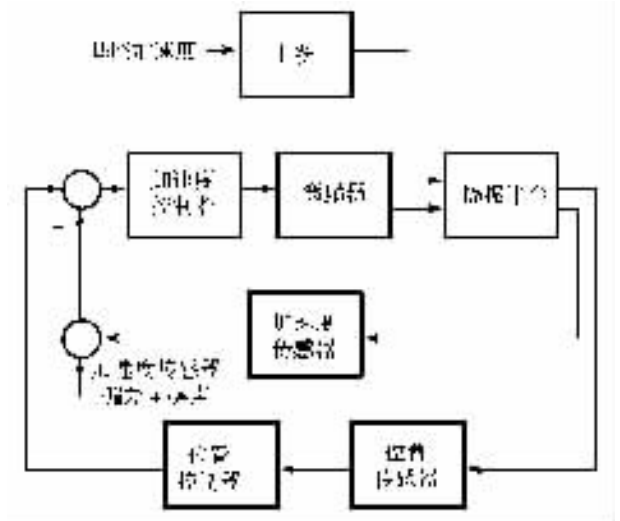


图 5 STABLE 控制系统的框图

STABLE 有六个独立的位置和加速度控制环, 提供了高带宽加速度反馈控制。低带宽数字位置控制

器使用位置传感器的信号来测量悬浮平台 6 个自由度的位移, 并保持悬浮平台长时间处于悬浮空间的中间位置。加速度环是一个 0~50Hz 带宽的模拟控制器, 它使平台感受到的加速度接近于 0。其控制系统框图如图 5 所示。

STABLE 的实际使用结果如图 6 所示。由图 6 我们可以看出, 它对 0.01Hz~100Hz 频率范围内的振动都有很好的衰减效果。

八个位置传感器和八个激励驱动器。该系统只通过位置的改变来对振动环境进行控制。

3.3 微重力隔振系统(MIM)

微重力隔振系统(MIM)由加拿大航天局开发研制, 有两种型号的产品, 分别是 MIM-1 和 MIM-2。MIM-1 从 1996 年 5 月起在苏联“和平”号空间站上运行了两年, 累计工作 3000h。MIM-2 在 STS-85 任务中使用, 总共工作了 100h 以上。

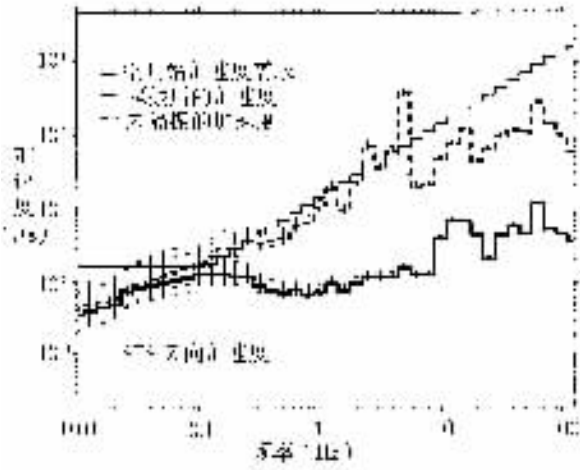


图 6 STABLE 的实际使用结果

3.2 实验柜主动隔振系统(ARIS)

实验柜主动隔振系统由波音公司开发研制, 并于 1996 年 8 月在 RME1313/MIR 空间站上使用。

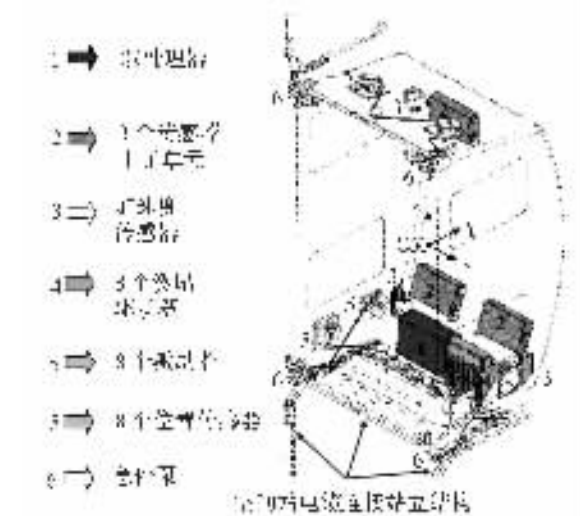


图 7 实验柜主动隔振系统(ARIS)

该系统隔振的质量比较大, 它主要对实验柜整体的振动进行隔离。ARIS 主要用于隔离 0.01Hz 以上频段的振动, 且对 0.05~300Hz 范围最敏感。ARIS 有

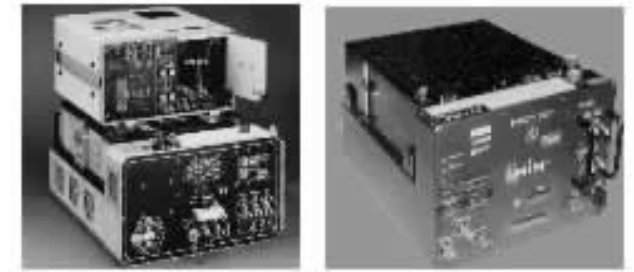


图 8 MIM-1 和 MIM-2 的设备外观

MIM 有 8 个宽间隙洛仑兹力激励器; 3 个发光二极管安装在 3 个位置敏感设备上, 以图像方式来测量因振动而产生的位移。它有 6 个加速度传感器, 分别用来测量基座和悬浮平台的加速度。MIM 可对 0.01Hz 以上的振动进行隔离。MIM-2 可以把 $10^3\mu\text{g}$ 量级的振动衰减到 $10\mu\text{g}$ 量级。

3.4 手套箱集成微重力隔振系统(g-LIMIT)

手套箱集成微重力隔振系统是由加拿大航天局开发研制的, 用于国际空间站上的手套箱中科学实验的振动隔离。

g-LIMIT 有三个合成的隔振模块(IM), 每一个模块是由一个二维驱动器、两个一维加速度传感器、二维位置传感器和控制电路组成。IM 是这一系统的核心部分, 它也通过加速度和位置两个变量对系统进行控制。g-LIMIT 可将 $10^4\mu\text{g}$ 量级的振动衰减到 $1\mu\text{g}$ 量级。



图 9 g-LIMIT 系统

(下转第 34 页)

规则,对中心软件的调度事件基于预先制定的计算需求规则,对测控网的控制事件基于测控网的使用约定规则。

分别定义飞行状态向量、飞行控制规则,维护状态向量数据集合和冲突规则库的松耦合结构非常利于单项升级,利于不同任务复用,易于维护,提高了多个航天任务并行完成的能力。

举一例说明改进型计划工作模式的冲突规则库、状态反馈、冲突检测和自动修正机制。

冲突规则库里,某一航天器载荷断电指令 K_{xxx} 属性为:出阳照区时刻和至少在唯一测控站仰角 5° , K_{xxx} 属于断电指令,时间前后沿标识布尔量为 1。

航天器状态反馈,实际轨道出阳照区时刻只有一个测控站跟踪,且该时刻仰角为 2° 。

冲突检测,如果按照出阳照区时刻,测站发送 K_{xxx} 指令,那么此仰角很低,测控站无法保证发送 K_{xxx} ,存在冲突;自动修正,借助冲突规则库, K_{xxx} 属于载荷断电指令,时间前后沿标识布尔量为 1,取两个时刻的前者-仰角 5° 时刻发送 K_{xxx} 指令,获得局部最优控制,冲突消解,TimeLine 更新并在实际任务中实施。

通过示例说明改进的计划工作模式具备闭环反

馈、冲突检测和自动修正功能,基于状态和飞行控制规则运行,适应性强、自动化程度高,解决了航天任务期间过重的人工依赖问题,可以确保多航天任务、多目标下状态变化频繁、持续时间很长的飞控需求可靠、有序、有效实施。

4 结束语

本文总结分析了现有的计划工作模式,深入探讨了改进计划工作模式理论模型及具体实施策略。改进型计划工作模式自适应性强、具有一定智能性、自动化程度高,和现有计划工作模式一脉相承,具备在后续航天任务应用的可操作性。

随着我国航天事业又好又快发展,现有计划工作模式改进势在必行。本文只是在具体改进方面做了一点探索,期望能够减少航天任务期间人工干预的操作,实现自动化飞行控制,圆满实施各类航天任务的飞行控制。 ◇

参 考 文 献

- [1] 席政.载人航天飞行控制计划的自动生成.载人航天,1998(1)
- [2] 周彬等.航天任务计划工作模式研究.测控学报,2006(第 25 卷第 1 期)

(上接第 18 页)

图 10 是 g-LIMIT 的幅频特性图。从图中我们可以看出, g-LIMIT 对 0.01Hz~1000Hz 频率范围内振动的衰减均可满足设计要求。

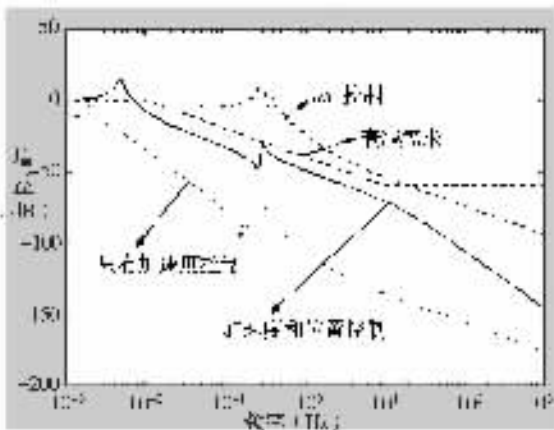


图 10 g-LIMIT 的幅频特性

4 结 论

我国的空间站会在不久的将来遨游在太空之中,大量的空间科学实验是和平开发利用太空资源最直接的体现。为了能够在空间站上获得更具价值的科学实验成果,对科学实验设备进行振动隔离是非常必要的^[3]。本文旨在为我国开发研制具有中国特色的空间科学实验振动隔离系统提供一些参考,使我们在开发研制过程中少走弯路,并能够在短时间内在这一领域赶上或者超过国际先进水平。 ◇

参 考 资 料

- [1] M S Whorton, J T Eldridge, R C Ferebee, J O Lassiter, J W Redmon, Jr. Damping Mechanisms for Microgravity Vibration Isolation. NASA/TM-1998-206953. 1998.1
- [2] Mark Whorton. Survey of Microgravity Vibration Isolation. MEIT-2001, Section18.
- [3] 于强.空间材料科学实验中的几个关键技术.载人航天,2007. 3