

长焦距全景式航空遥感器稳定系统的设计

Design of stabilization system of long focus panoramic aerial sensor

(1.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所;2.中国科学院研究生院) 陈黎¹ 刘志明^{1,2} 黄浦^{1,2} 李军^{1,2}
CHEN Li LIU Zhi-ming HUANG Pu LI Jun

摘要: 为了使长焦距全景式航空遥感器在高空恶劣的环境下获得高分辨率且清晰的图像,不但要克服飞机各种姿态变化引起的像移,而且要尽量消除振动带来的像移。根据地面分辨率的性能指标,并以此作为稳定系统设计的目标,选择相关的主动及被动减振方法。文中,以一长焦距全景式航空遥感器为例,通过分析地面分辨率以及相对振动残留误差的关系,讨论如何使用主动、被动减振技术得到满意的性能指标。最后由试验得出结论在随机振动环境下,利用主、被动减振技术可以很好的克服振动对地面分辨率所造成的影响。

关键词: 长焦距;航空遥感器;像移;主动减振;被动减振

中图分类号: TP311

文献标识码: A

Abstract: To attain the best optimum resolution under adverse environmental conditions, the long focus panoramic sensors not only overcome the image motion arose by the change of the aero posture, but also eliminate the image motion caused by vibration. By the performance of GRD, which is the aim of stabilization system, initiative and passive vibration isolation are chose. In this article, a long focus panoramic sensor is used as a example to analyze the relationship between GRD and rudimental vibration error and how to attain the best performance by using initiative and passive vibration isolation. Finally, the conclusion is gained that using initiative and passive vibration isolation may well overcome the bad effect to GDR shook in random vibration.

Key words: long focus; aerial sensor; image motion; initiative and passive vibration isolation

1 引言

随着对长焦距、大视场、大纵深航空遥感器的需求,出现了长焦距、高分辨率、宽幅面的航空遥感器。为了提高长焦距全景式航空遥感器系统的性能,提高分辨率,识别更小目标,在设计各个系统时,必须给以充分的论证及大量试验,如光学系统设计、稳定系统构建的平台在振动试验中所达到的理想效果。

2 相对振动残留误差对地面分辨率的影响

航空遥感器的功能是在尽可能远离目标点的地方观察目标点的情况,在最远的距离所能分辨出最小的物体即该遥感器的地面分辨率 GRD。

用公式表示为:

$$GRD = \frac{R}{N \cdot f'} \quad (1)$$

式中, R—遥感器与目标间的距离

N—空间频率(线对/毫米)

f'—光学系统的焦距

由公式 1 可知 N 越大,地面分辨率越高。所以为了获得更大的地面分辨率,则需要辨别出更高的空间频率。

在一定空间频率下,系统的信噪比 SNR_N 等于系统的调制传递函数 MTF_N 与 $SNR_0(N=0)$ 的乘积。 SNR_0 取决于太阳高度角,能见度,目标于环境反射系数,焦距及光圈,以及探测器参数等。在任何空间频率下都应满足 SNR_N 大于 3:1。系统的调制传递函

数 MTF_N 为各独立系统调制传递函数的乘积。

$$MTF_N = \prod_{n=1}^k MTF_n(N) = MTF_1(N) MTF_2(N) MTF_3(N) MTF_4(N) \quad (2)$$

式中, k—系统中独立 MTF 的个数

N—空间频率(线对/毫米)

$MTF_1(N)$ —光学系统的 MTF

$MTF_2(N)$ —光电探测器的 MTF

$MTF_3(N)$ —稳定系统的 MTF

$MTF_4(N)$ —大气扰动的 MTF

本文只讨论稳定系统的调制传递函数:

$$MTF_3(N) = \text{SINC} \left[\frac{2N}{\pi \varepsilon f' T} \right] \quad (3)$$

式中, SINC— $\sin x/x$

ε —稳定系统相对振动残留误差

f'—光学系统的焦距

T—光电探测器积分时间

N—空间频率(线对/毫米)

空间频率 N 与 MTF 的关系图 1 可知。

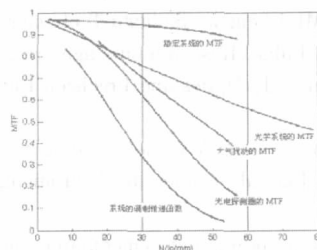


图 1 系统传递函数

如果系统的信噪比 SNR_N 在一定空间频率下都有较大的值,那么相应空间频率就要有较高的调制传递函数,由式 3 我们

陈黎:硕士

基金项目:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所创新工程资助项目(N0.ZJ99130B)

可知对于一定的空间频率,相对振动残留误差 ε 越小,那么调制传递函数就越大,反过来说,传递函数不变的情况下,空间频率 N 与相对残留误差 ε 成反比。再由式 1 可知,地面分辨率 GRD 也与相对振动残留误差 ε 成反比,即相对振动残留误差 ε 越小,地面分辨率 GRD 越高。

3 主动、被动减振系统

系统处于振动环境中,如果系统减振越好,那么相对振动残留误差 ε 就越小。因此,提高减振性能便显得尤为重要。主动减振是指由控制系统的执行机构产生阻尼力,吸收振动系统的振动能量,以抑制振动,或将控制系统与动力减振器相结合,对减振器进行自动调谐,以达到减振的目的。被动减振是指为防止地基的振动通过支座传至需保护的精密设备或仪器仪表,在支座上固定减振器,以减小振动的传递。两种减振方法各有其优缺点,主动减振一般解决低频和宽频带振动抑制问题,但其结构复杂,成本较高,维护较难;被动减振成本较低,结构简单,易于维护和更换,但其减振性能受带宽限制较大,低频和高频减振性能较差。所以我们采用主动、被动减振相结合的控制方法应用到系统中,以减小相对振动残留误差,从而提高遥感器的地面分辨率。

主动减振系统的力学模型如图 2 所示, $m-k-c$ 构成单自由度振动系统,其中 m 为精密设备(航空遥感器),为减小由地基的振动 $y(t)$ 到传感器 A 振动的传递率,装上一主动控制系统,它由传感器 A、控制器 B 与执行机构 E 组成。传感器 A 测出响应信号,反馈给控制器 B,经变换和放大后,驱动执行机构 E,那么振动系统的运动方程

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = c\dot{y}(t) + ky(t) + f(t) \quad (4)$$

取拉斯变换得到

$$(ms^2 + cs + k)X(s) = (cs + k)Y(s) + F(s) \quad (5)$$

控制力 $f(t)$ 对 m 响应的传递函数

$$H(s) = \frac{F(s)}{X(s)} = -\frac{KD_1(s)}{D_2(s)} \quad (6)$$

式中, $D_1(s)$ 、 $D_2(s)$ 均为正系数多项式, K 为放大系数。将式(6)代入式(5)中得到

$$H_A(s) = \frac{X(s)}{Y(s)} = \frac{(cs + k)D_2(s)}{(ms^2 + cs + k)D_2(s) + KD_1(s)} \quad (7)$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} H_A(s) = \frac{k}{k + K} \quad (8)$$

由式(8)可见,如果控制系统的放大系数 K 远大于刚度系数 k ,那么系统的传递率会很小。

执行机构施加的控制力方程为:

$$f(t) = -c\dot{x}(t) - kx(t) \quad (9)$$

式中, c 、 k 为正实数。

系统的运动方程:

$$m\ddot{x}(t) + (c+c')\dot{x}(t) + (k+k')x(t) = c\dot{y}(t) + ky(t) \quad (10)$$

由式(10)可知,加入主动减振控制系统后,系统的阻尼系数和刚度系数都增大了,阻尼增加,则其散耗的动能增大,从而抑制振动,产生阻尼减振的效果;而刚度增大,若设计合理,也可抑制振动。

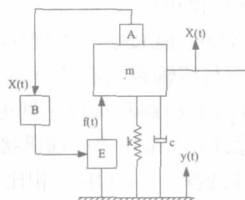


图2 主动减振系统的力学模型

主动减振系统所使用反馈传感器元件为低漂移、噪声非常低的光纤陀螺,陀螺带宽可达 1kHz。控制系统采用 DSPTMS320F2812 作为中央处理单元,遥感器驱动执行机构平台应用气浮轴承以载动遥感器运动。该陀螺在闭环系统中在带宽 150Hz 下给伺服系统提供角速率信息。陀螺这么大的带宽可使得惯性控制器在扫描镜控制中有 80Hz 的带宽,在镜筒滚动控制中有 30Hz 的带宽,同时还可控制环的稳定保证足够的增益和相角裕量。伺服系统采用高阶校正策略计算速度。伺服系统由直流力矩电机、电子补偿器、功率放大器和反馈陀螺组成。系统组成框图如图 3 所示。

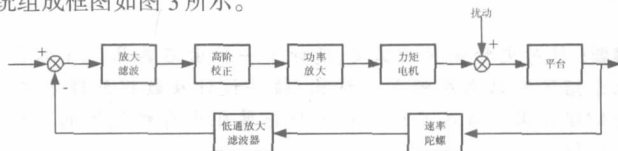


图3 主动减振控制系统组成框图

被动减振系统的力学模型如图 4 所示,遥感器通过阻尼系数为 c 、刚度为 k 的弹性支撑与地基连接,以使振源即地基的扰动 $y(t) = |Y|\sin\omega t$ 不会完全传递给遥感器,此时仪器的运动方程为

$$m\ddot{x}(t) + c[\dot{x}(t) - \dot{y}(t)] + k[x(t) - y(t)] = 0 \quad (11)$$

设 $y(t) = |Y|e^{j\omega t}$ $x(t) = |X|e^{j\omega t}$

代入式(11)中得

$$x(t) = Xe^{j\omega t} = \frac{k + j\omega c}{k - m\omega^2 + j\omega c} |Y| e^{j\omega t} = H'_A(\omega) \cdot y(t) = |H'_A(\omega)| e^{-\psi_A} \cdot y(t) \quad (12)$$

$$|H'_A(\omega)| = \sqrt{\frac{1 + [2\xi(\omega/\omega_n)]^2}{[1 - (\omega/\omega_n)^2]^2 + [2\xi(\omega/\omega_n)]^2}} \quad (13)$$

$$\psi_A = \arctan \frac{[2\xi(\omega/\omega_n)]^3}{[1 - (\omega/\omega_n)^2]^2 + [2\xi(\omega/\omega_n)]^2} \quad (14)$$

式中 ξ —阻尼率

ω/ω_n —激励频率与自然频率比

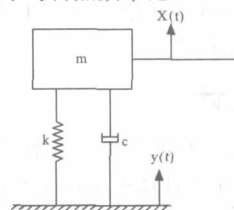


图4 被动减振系统的力学模型

各种阻尼率 ξ 情况下隔振传递率 $|H'_A(\omega)|$ 随 ω/ω_n 变化曲线如图 5 所示。通常 $\xi = 0.05 \sim 0.2$, $\omega/\omega_n = 2.5 \sim 5$, 且不宜过大,这是由于过小的 ω_n 要求弹簧的刚度 k 很小,会使弹簧难于支撑遥感器的重量,会带来稳定性问题。

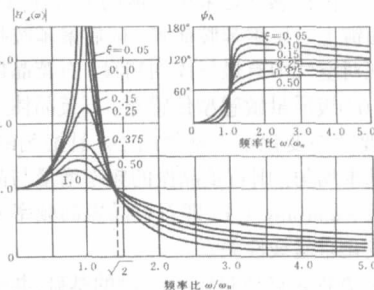


图5 隔振传递率随 ω/ω_n 变化曲线

(下转第 117 页)

误差都很小,达到了一定的技术指标。

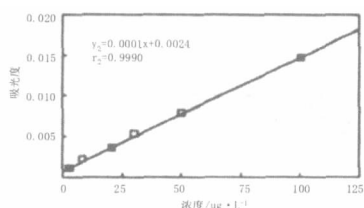


图3 瓦斯浓度线性图

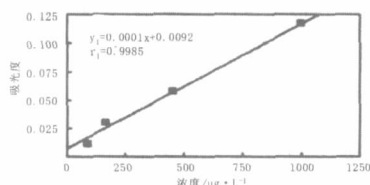


图4 瓦斯浓度线性图

5 结束语

在矿井开采难度逐步加大、安全形式日益严峻的今天,一套稳定可靠、技术先进的矿井监测监控系统的应用也显得日益迫切,采用光纤技术的瓦斯传感器的提出及在井下的应用,必将大大提升矿井安全监测监控的效率和稳定性,因而,系统的推广具有极其重大的现实意义,相信不久的将来,它的推广必然成为煤矿安全生产史上的一次革命。

创新点:采用双纤结构的自聚焦透镜设计了一种气体室,并且由于产生窄带光源的反馈式激光器造价很高,本文采用普通发光二极管 LED 产生的宽带光源,通过光纤 Bragg 光栅和压电陶瓷对其进行波长调制,获得窄带出射光。

参考文献

- [1]刘明光.我国煤矿瓦斯安全监控系统综述[J].安全生产与监督,2007(3) 38~39.
- [2]李文植.光纤传感器的发展及其应用综述.科技创业,2005(7) 152~154.
- [3]肖韶荣.大气监测光纤气体传感器的研究.南京理工大学,2006.
- [4]郭增军.基于光谱吸收光纤甲烷气体传感系统的研究.秦皇岛,燕山大学,2002.
- [5]刘明光.我国煤矿瓦斯安全监控系统综述[J].安全生产与监督,2007(3) 38~39.
- [6]蒋继平.光纤瓦斯气体传感器的发展.常州信息职业技术学院学报,2003,1(2) 48~50.
- [7]秦建新,路林吉.基于单片机的无线传感器网络设计.微计算机信息,2008,7~1.
- [8]王书涛,刘瑾,车仁生.一种基于谐波检测技术的光纤甲烷气体传感器[J].应用光学,2004,25(2) 44~47.
- [9]王侠,宋东草,尚明.光纤甲烷气体传感器可行性研究[J].烟台大学学报(自然科学与工程版),2004,2(17) 101~105.
- [10]林枫,蔡海文,翟荣辉.红外吸收型瓦斯传感器的研究[J].激光与光电子学进展,2004,41(7) 40~42.

作者简介:李长青,(1957-),男,硕士生导师。河南理工大学教授,主要研究方向:无线电和计算机测控技术;殷振振(1984-),男,河南省周口人,在读硕士研究生,主要研究方向:计算机测控。

Biography:LI Chang-qing(1957-),Male, Master Instructor. Henan Polytechnic University, Professor, The direction of research domain is radio and Computer Measurement and Control Technology.

(454000 河南焦作 河南理工大学计算机科学与技术学院) 李长青 殷振振

(School of Computer Science & Technology, Henan Polytechnic University, Jiaozuo Henan 454000, China) LI Chang-qing
YIN Zhen-zhen

通讯地址:(454000 河南省焦作市高新区世纪大道 2001 号河南理工大学 1243 信箱) 李长青

(收稿日期:2009.09.03)(修稿日期:2009.12.03)

(上接第 99 页)

通过以上分析对主动减振和被动减振系统参数进行设计选择,将相对振动残留误差控制在 5% 以内,达到很好的减振效果。

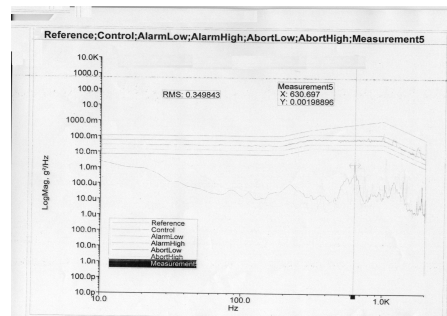


图6 振动频率与功率谱关系曲线

4 试验结论

在试验室中,将遥感器固定在振动台上,并进行加速度 $a = 9.15 \text{ m/s}^2$ 随机频率扫描振动,采用主动振动减振和被动减振相结合的方法,振动频率与功率谱关系曲线如图 6 所示,在扫描频率为 600 多赫兹时出现功率峰值点,在该点采样功率谱峰值,再由计算机折算出扫描频率 1k 范围内传递到遥感器上的峰值加速度由 $a = 9.15 \text{ m/s}^2$ 衰减到 $a_1 = 0.35 \text{ m/s}^2$,相对振动残留误差约为 4%,从而满足设计指标要求。

参考文献

- [1]师汉民.机械振动系统.[M].华中科技大学出版社,2003.
- [2]N.S.Kopeika. Image Resolution limits resulting from mechanical vibrations. SPIE Vol.561.1985
- [3]P.N.Slater. Effects of atmosphere on oblique reconnaissance. SPIE Vol.561.1985
- [4]孙辉等.航空光电成像电子稳像技术.光学精密工程.2007.
- [5]赵红颖等.电子稳像技术概述.光学精密工程.2001.

作者简介:陈黎(1981-),女,吉林长春人,硕士。主要研究方向控制系统研究。

Biography:CHEN Li, female, Ji Lin Province, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Research area: control system.

(130033 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所) 陈黎 刘志明 黄浦 李军

(130039 中国科学院研究生院) 刘志明 黄浦 李军

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China) CHEN Li LIU Zhi-ming HUANG Pu LI Jun

(Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China) LIU Zhi-ming HUANG Pu LI Jun

通讯地址:(130033 长春市东南湖大路 3888 号长春光机所航测部) 陈黎

(收稿日期:2009.09.18)(修稿日期:2009.12.18)