可重部署钠激光雷达接收系统减震设计

程永强1.2,胡 雄1,闫召爱1,郭商勇1,孙逸桥3,张 旭4

(1. 中国科学院国家空间科学中心,北京 100190; 2. 中国科学院大学,北京 100049;

3. 中国科学院南京天文仪器有限公司,江苏南京 210042;

4. 江苏捷诚车载电子信息工程有限公司,江苏 镇江 212143)

摘 要:为了防止中国科学院临近空间环境野外综合探测站(廊坊,39°N,116°E)的钠荧光多普勒激 光雷达在可重新部署运输过程中震动对激光雷达系统的不良影响,保证系统测量的稳定性和精度,文 中主要对钠激光雷达接收系统进行了减震设计。首先选用了空气悬挂车载底盘和对望远镜的主镜运 输以及望远镜安装运输平台等进行了三级减震设计,通过仿真模拟表明通过减震设计的望远镜安装 运输平台冲击位移小于望远镜的主镜运输减震设计要求;其次通过跑车实验表明通过减震设计主镜 室的最大振动加速度满足望远镜运输条件设计输入要求;最后通过钠荧光多普勒激光雷达系统的观 测实验进一步验证了在长途运输中减震设计的可靠性。

关键词:钠荧光多普勒激光雷达; 接收系统; 减震设计; 可重部署 中图分类号:TN958.98 文献标志码:A DOI:10.3788/IRLA201645.S130005

Shock absorption design of the receiving system for re deployment of sodium lidar

Cheng Yongqiang^{1,2}, Hu Xiong¹, Yan Zhaoai¹, Guo Shangyong¹, Sun Yiqiao³, Zhang Xu⁴

(1. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Nanjing Astronomical Instrument Co., Ltd, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China;

4. Jiangsu Jiecheng Vehicle Mounted Electronic Information Engineering Co. Ltd., Zhenjiang 212143, China)

Abstract: In the process of the re deployment, in order to prevent the adverse effects and assure the stability and accuracy of the sodium Doppler fluorescence lidar in the near space environment of the Chinese Academy of Sciences (Langfang, 39° N, 116° E), the shock absorption design of the receiving system in sodium lidar was mainly carried out. Firstly, the three-level shock absorber design was carried out by selecting the air suspension chassis, the main mirror of the telescope, and the platform for the installation of the telescope. Through simulation, it was found that the impact displacement of the telescope. Secondly, by the sports truck experiment, the maximum vibration acceleration of the main mirror chamber was

基金项目:国家自然科学基金(41104100);中国科学院科研装备研制项目(YZ201130)

收稿日期:2016-01-11; 修订日期:2016-02-03

作者简介:程永强(1981-),男,博士生,主要从事临近空间环境探测和激光雷达技术研究。Email:chengyq@nssc.ac.cn

导师简介:胡雄(1967-),男,研究员,博士生导师,博士,主要从事临近空间环境的研究。Email:xhu@nssc.ac.cn

found to meet the requirements of the design input of the telescope. In the end, the reliability of shock absorption design of the long distance transportation is further verified by the observation experiment of the sodium doppler fluorescence lidar.

Key words: sodium fluorescence Doppler lidar; receiving system; shock absorption design; re deployment

0 引 言

在距离地面大约 75~105 km 高度范围内存在着 钠原子层,其处于中间层顶大气和低电离层的交汇 区,其间充满着极其复杂的光化学过程和动力过程, 因其难以探测,有许多现象一直是研究的热点和难 点。地基激光雷达对钠层的探测可以追溯到 20 世纪 60年代,并且积累了大量关于钠层形态特征的观测 结果口。由中国科学院国家空间科学中心自主研制 了我国第一部可重部署钠荧光多普勒激光雷达,主 要用于监测 75~105 km 高度范围内的大气温度、风 场以及钠原子数密度等。钠荧光多普勒激光雷达在 运输时需要保证系统的物理安全和系统稳定;在常 规测量时,需要调平和固定车载平台,并在测量过程 中车载平台需保持稳定。而在运输过程中,汽车发动 机转动和运动测量中路面颠簸产生的震动与冲击会 传递给激光雷达系统,引起光路失调、光学和电子部 件损坏等故障, 使测量精度下降甚至系统无法正常 工作,尤其是激光雷达接收系统主要由三台大口径 望远镜和后续光路等组成,运输中如无减震措施容 易损坏和光路失调。因此要保证它具有较高的机械 稳定性, 在到达观测场地后能迅速进入测量工作状 态,必须对系统进行减震设计,以提高钠荧光多普勒 激光雷达的测量精度、工作效率和应用范围。

关于车载多普勒测风激光雷达系统的减震设 计,因车载激光雷达系统在国内外刚开始进行研究, 公开报道的并不多。Chen 和 Song 等为了防止车载 多普勒测风激光雷达运动过程中振动对系统的不良 影响,保证系统测量的稳定性和精度,主要对车载测 风激光雷达中的机柜和光学平台进行隔振设计^[2]。 Gan 等为了实现在喷气机上用光电吊舱观测导弹发 射全程的动态状况,设计了光电吊舱内框架减振系 统^[3]。文中首先简要介绍了可重部署钠荧光多普勒激 光雷达系统,并进行了系统减震分析;其次主要对接 收望远镜系统和车载平台进行了减震设计,并利用 ANSYS 软件对接收望远镜安装面变形情况进行了 有限元分析;最后通过跑车实验发现主镜室的最大 振动加速度满足望远镜运输条件设计输入要求,并 通过钠荧光多普勒激光雷达系统的观测实验进一步 验证了在长途运输中减震设计的可靠性。

1 激光雷达系统简介

中国科学院国家空间科学中心自主研制了我国 第一台可重部署钠荧光多普勒激光雷达系统,该设 备利用窄线宽高功率的 589 nm 激光激发中间层顶 区域的钠原子发射共振荧光,通过分析荧光的多普 勒谱线展宽与频移获得该区域的大气温度、风场以 及钠原子数密度等。该激光雷达系统主要包括发射 系统、接收系统、数据采集与控制系统以及数据处理 与分析系统等,分别如图 1 中 1、2、3、4 所示,钠荧光 多普勒激光雷达系统技术参数见表 1^[4-6]。

激光雷达方程一般可以写为:

 $N = N_L \frac{A}{R^2} G\beta(\theta) \Delta R \eta_s \eta_E T_{\rm UP} T_{\rm DOWN} + N_B \tag{1}$

式中:N为探测器记录的光子数; N_L 为发射的光子数;A 为接收望远镜的面积;R 为探测的距离;G 为 接收望远镜几何因子; $\beta(\theta)$ 为散射系数,在散射角 θ 方向上单位距离单位立体角内落入到波长 λ 的概 率; ΔR 为距离间隔; η_s 为接收望远镜系统的效率; η_E 为光电探测器的转换效率; $T_{\rm LP}$ 为光子在向上传播过 程中的透过率; $T_{\rm DOWN}$ 为光子在向下传播过程中的透 过率; N_B 为背景噪声。

根据以上激光方程(1)可以看出激光雷达测量的 信号(光子数)除了和发射激光功率有关外,主要还 与接收望远镜的口径和接收系统效率等有关,因此 为了实现激光雷达的可重部署性,钠荧光多普勒激 光雷达接收系统的减震设计具有重要意义。



图1钠荧光多普勒激光雷达系统结构图

Fig.1 Schematic diagram of the sodium fluorescence Doppler lidar system

表1钠荧光多普勒激光雷系统参数

Tab.1 Parameter of the sodium fluorescence

Doppler lidar system	
Parameters	Value
Laser wavelength/nm	589.158
Shifted frequency/MHz	±630
Laser power/W	~1
Repetition rate/Hz	30
Pulse length/ns	~7
Beam divergence/mrad	~1
Telescope aperture/mm	1 000

为了实现钠荧光多普勒激光雷达系统的可重新 部署,文中将其安装于两台车载平台上,分别为发射 车载平台和接收车载平台,其中发射车载平台包括 激光雷达的发射系统、数据采集与控制系统以及数 据处理与分析系统等;接收车载平台包括接收系统, 主要安装了三台1m口径的望远镜及其后续光路接 收系统。因发射车载平台的机柜和光学平台等减震 设计国内外已做过很多研究,比较成熟;而三台大口 径的望远镜及其车载平台减震设计国内外研究较 少,因此文中主要研究三台1m口径望远镜及其车 载平台的减震设计。

2 减震设计及结果

2.1 接收望远镜减震设计

可重部署钠激光雷达接收望远镜系统要求能够 在同一时间段内对天顶、正东/西(天顶距 30°)和正 南/北(天顶距 30°)的三个方向进行同时观测接收信 号。所以该雷达接收望远镜系统要求共有三台 1 m 口径激光接收望远镜:1 台望远镜指向天顶,另外 2 台望远镜要求能够单轴(俯仰)扫描(电动),扫描范 围-20°~30°。

为了能够实现可重部署钠激光雷达接收望远镜 系统的快速重新部署性(能够在不同地域进行观测), 所以三台钠激光雷达接收望远镜系统安装在改装车 厢内,便于车辆运输和可重新部署。根据设计条件, 可重部署钠激光雷达接收望远镜的三维视图如图 2 所示。



图 2 可重部署钠激光雷达接收望远镜总体三维示意图 Fig.2 Overall three-dimensional diagram of the telescope of the re deployed sodium lidar

由于车载条件限制,三台1m级接收望远镜安 装在同一个车厢内,重量、尺寸受限,综合考虑多方 因素后,接收望远镜光学系统选用较短焦比来满足 总系统要求:望远镜光学系统为卡塞格林系统,主焦 点为耐氏焦点:为了避免在运输中由于路面不平和 发动机振动造成每台望远镜的安装平台变形量过 大,从而对望远镜系统造成破坏,所以要求望远镜安 装平台变形量小于±20 mm,望远镜主镜室的最大振 动加速度小于1G(9.8 m/s²);另外为了保证接收望远 镜主镜在运输过程中的安全性,要求将望远镜主镜 室(含主镜)拆除后悬挂在中间块下方,采用悬挂减 振的方案对其进行单独减振,同时可以降低望远镜 系统在运输过程中的重心高度,也避免在拆除主镜 室后镜筒旋转轴上方部分重量过重。因此第一级减 震设计望远镜主镜减震方式为: 主镜室上均布安装 三个减振导向杆、减振弹簧及阻尼器,如图3所示。



图 3 望远镜主镜运输减振示意图 Fig.3 Schematic diagram of the vibration reduction of the telescope main mirror

2.2 车载平台减震设计

车载平台主要由汽车底盘和望远镜运载平台组 成。第二级减震设计汽车底盘的减震形式采用减震 效果较好且应用比较成熟的空气悬挂;第三级减震 设计望远镜运载平台的减震形式采用副车架(含纵梁、 横梁、边梁)和3个望远镜安装平台等组焊成框架形 式,运载平台外形尺寸为:长8100mm、宽2500mm、 高1034mm,其中副车架高310mm,望远镜安装平 台高724mm,可满足轮胎跳动空间的需要。横梁采 用200mm钢方管制作,纵梁采用6mm钢板折弯成 形制作成矩形结构,通过焊接成整体,使运载平台具 有足够的刚性强度。运载平台上平面铺设镀锌钢板, 与平台采用电焊连接,并在镀锌钢板与平台的接缝处 均匀涂覆密封胶,这样可以防止底部泥水和灰尘侵入 舱内。望远镜安装平台由斜撑、支柱和安装板组成, 斜撑、支柱均采用矩形钢管制作,安装板采用30mm 厚钢板。望远镜运载平台结构示意图如图4所示。



图 4 望远镜运载平台结构示意图 Fig.4 Schematic diagram of the telescope platform

为了验证望远镜运载平台的可靠性,利用 ANSYS软件分别在三种工况下(①刹车状态;②垂直 3G冲击加速度;③汽车大梁前端单边翘起40mm) 对接收望远镜安装面变形情况进行了有限元分析, 冲击模拟结果表明:①刹车状态下安装面最大变形情 况为0.639mm;②垂直3G冲击加速度状态下安装 面最大变形情况为1.851mm;③汽车大梁前端单边翘 起40mm状态下安装面最大变形情况为4.748mm; 这三种情况均小于望远镜运输条件设计输入要求 的±20mm的变形上限,因此望远镜运载平台的刚性 强度满足设计要求。有线元分析结果如图 5~7 所示。



0.639 mm 0.497 mm 0.365 mm 0.213 mm 0.071 mm

图 5 刹车状态运输平台变形情况

Fig.5 Transportation platform deformation in braking state condition



1.851 mm 1.439 mm 1.028 mm 0.617 mm 0.206 mm

图 6 垂直 3G 冲击加速度运输平台变形情况

Fig.6 Transportation platform deformation in vertical 3G shock acceleration condition



图 7 汽车大梁前端单边翘起 40 mm 运输平台变形情况 Fig.7 Transportation platform deformation in truck girder front-end unilateral cocking 40 mm condition

2.3 跑车实验结果

在 2010 年 7 月的跑车实验中(路面为普通公路), 对加装主镜阻尼缓冲机构状态下的主镜室进行了跑 车测试。经过对比加速度计记录结果(图 8),在路面 为普通公路、加装主镜阻尼缓冲机构状态下望远镜 主镜室的最大振动加速度为 0.25 m/s²@2.93 Hz,此 加速度能满足望远镜运输条件设计输入要求。



3 实验结果

可重部署钠荧光多普勒激光雷达接收系统安装 减震系统后,接收车载平台于 2011 年经过长途运输 后,在中国科学院临近空间环境野外综合探测站与 发射车载平台进行了重新部署和联合调试,开始了 长期的观测实验。

选取了钠荧光多普勒激光雷达观测到廊坊上空 一个典型的偶发钠层事件^[7],实验结果所得到钠原子 密度、纬向风、径向风、大气温度和垂直风分别如图9 所示,其中图 9(a)显示了 2011 年 3 月 28 日夜间廊 坊钠荧光多普勒激光雷达观测到了一次偶发钠层事 件。偶发从 17:39UT 持续到 18:29UT,约 50 min,突 发强度约为 2.5 倍。这次偶发钠层达到峰值的时间 为 18:05UT,峰值高度为 94.97 km,半高全宽(FMHW) 为 1.55 km,密度最大值为 10 095.6 cm^{-3[8]}。实验结果 表明可重部署钠激光雷达接收系统的减震设计达到 了预期的效果,为激光雷达系统稳定的工作和精确 的测量提供了有力的科学保障。



Fig.9 Observation results of the Langfang lidar on Mar.28,2011

4 小 结

从激光雷达长期顺利得到实验结果可以看出文 中采用的空气悬挂车载底盘和对望远镜的主镜运输 以及望远镜安装运输平台等三级减震设计,达到了 预期的效果,进一步验证了减震系统对激光雷达接 收系统在运动测量过程中的有效减振,降低了汽车 运动中振动和冲击对系统的影响,防止了在运输过 程中振动对激光雷达接收系统的破坏,保证了激光 雷达接收系统运输过程中系统的安全、稳定,为激光 雷达系统稳定的工作和精确的测量提供了有力的科 学保障,从而使激光雷达系统可以顺利获得实验数 据;另外廊坊站钠荧光多普勒激光雷达系统的可重新 部署性,可以扩大激光雷达的测量范围和应用领域。

由于可重部署激光雷达系统的减震牵涉到光学 和机械设计等方面的研究,在今后的工作中随着廊 坊站激光雷达外出探测实验工作的积累,对可重部 署激光雷达系统减震的改进和完善将会更加深入。

参考文献:

- Bowman M R, Gibson A J, Sandford M C W. Observation of mesospheric Na atoms by tuner laser radar [J]. *Nature*, 1969, 221: 456–458.
- [2] Chen C, Song X Q, Xia J B. Vibration isolation design for mobile Doppler wind lidar [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2012, 7(3): 227–234. (in Chinese)

- [3] Gan Z H. Design of inner frame vibration absorbing system for optoelectronic pod[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(9): 2036–2043. (in Chinese)
- [4] Cheng Y Q, Hu X, Xu L, et al. Advances of Na Lidar in near space detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(9): 28–31. (in Chinese)
- [5] Xu L, Hu X, Yan Z A, et al. Retrieval method of atmospheric parameters for a sodium Doppler lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(1): 140–143. (in Chinese)
- [6] Hu X, Yan Z A, Guo S Y, et al. Sodium fluorescence Doppler lidar to measure atmospheric temperature in the mesopause region[J]. *Chinese Sci Bull*, 2011, 56: 417–423. (in Chinese)
- [7] Dou X K, Xue X H, Li T. Possible relations between meteors, enhanced electron density layers, and sporadic sodium layers[J]. J Geophys Res, 2010(115): A06311
- [8] Cheng Y Q, Hu X, Yan Z A, et al. Study of sporadic sodium layers guided by gravity waves over Langfang [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015: Received. (in Chinese)