

机载激光雷达双光楔扫描系统设计与实现

朱精果¹, 李 锋¹, 黄启泰², 李孟麟¹, 蒋 衍¹, 刘汝卿¹, 姜成昊¹, 孟 柘¹

(1. 中国科学院光电研究院, 北京 100094; 2. 苏州大学 现代光学研究所, 江苏 苏州 215006)

摘 要: 介绍了作为大型机载激光雷达关键部件的双光楔扫描系统的模型建立、设计实现以及实验验证。为实现双光楔扫描系统的大尺寸、宽视场和高精度指向, 设计了 16° 楔角、320 mm 直径的成对光楔, 以及对应的高精度 PID 双轴扫描控制模块, 分析了系统误差来源和误差控制方法。在 45 m 距离的地面测试中, 通过每个 3.6° 转动楔镜, 累计 100 次与真值测量比对进行检校和验证, 扫描指向误差小于 50 μrad , 通过搭载集成后的机载激光雷达飞行实验, 实测扫描视场为 32.03°, 进一步验证了双光楔扫描系统的有效性。

关键词: 激光扫描系统; 双光楔; PID 控制算法; 机载激光雷达

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0502001

Design and realization of an airborne LiDAR dual-wedge scanning system

Zhu Jingguo¹, Li Feng¹, Huang Qitai², Li Menglin¹, Jiang Yan¹, Liu Ruqing¹, Jiang Chenghao¹, Meng Zhe¹

(1. Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. Institute of Modern Optics, Soochow University, Suzhou 215006, China)

Abstract: The modeling, design, implementation and experimental verification of dual-wedge scanning system was introduced, which as the key components of the large airborne LiDAR. In order to achieve large size, wide field of view and high precision pointing of dual-wedge scanner system, the dual-wedge which was 16° wedge angle and 320 mm diameter and corresponding PID biaxial scanning control module were designed, and the sources of system error and error control method were analyzed. In the ground test of 45 m away, rotating wedge mirror every 3.6°, for 100 times, companed with the measurement true value, and through calibration and validation, the scanning point error was less than 50 μrad . The flight experiments are carried loading with the integrated airborne LiDAR, the measured scanning field of view is 32.03°, verifies the validity of dual-wedge scanning system in further.

Key words: laser scanning system; dual-wedge; PID control algorithm; airborne LiDAR

收稿日期: 2016-05-05; 修订日期: 2016-05-13

基金项目: 国家重大专项资助

作者简介: 朱精果(1977-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事激光成像探测方面的研究。Email: zhujg@aoe.ac.cn

0 引言

激光雷达是一种基于激光空间点阵扫描技术、激光测距技术和高精度定位测姿技术发展而产生的测量技术,得到了广泛关注和快速发展^[1],机载激光雷达中的光束扫描指向系统,其主要作用是控制激光器发射激光光束在探测视场内进行有规律的偏转,形成对地物的扫描,以得到一定区域内均匀的激光脚点数据^[2-3]。国际上实用化的机载激光雷达,多采用高重复频率激光器配合光机扫描的结构,目前激光雷达光机扫描指向系统主要包括:摆镜扫描、旋转平面镜扫描、旋转多面体扫描、光楔扫描^[3],其中,光楔扫描是透射式扫描,其扫描图样多^[4],不存在摆镜方式的加减速换向、多面体旋转棱边损耗问题,光学利用率可达到 100%。基于双光楔扫描,美国 Sigma Space 公司已开发出了小型机载激光雷达^[5],麻省理工实验室与美国国防部开展了七巧板计划的机载激光雷达研制^[6]。对中远距离激光雷达应用而言,楔镜扫描更是一种较理想的光机扫描方式,NASA 戈达德航天飞行中心对楔镜扫描应用于空间激光雷达方面已开展了长期的研究^[7]。中国科学院光电研究院在承担国家级科研任务时,需设计扫描角度不低于 30°、扫描频率 1~3 Hz、有效光学口径不小于 280 mm、扫描指向精度优于 50 μrad 的光机扫描机构,围绕应用需求,文中提出了大尺寸、宽视角、高扫描指向精度的双光楔扫描方案,并研制了基于双光楔扫描的新型机载激光雷达,获取了大量外场飞行数据,验证了双光楔扫描的设计效果。

1 系统设计

针对中高空机载激光雷达的研制要求,设计扫描角度不低于 30°、扫描频率 1~3 Hz、有效光学口径不小于 280 mm、扫描指向精度优于 50 μrad、激光波长 532 nm 的光机扫描机构。在中远距离应用中,激光点的利用率是实现高网格密度的重要环节,采用 100% 光学利用率、运行平稳的透射式双光楔扫描较为合适,当前,光楔扫描视场一般在几度到十几度范围,且楔镜尺寸一般在 200 mm 以内^[5-7],如何保证大尺寸、宽视场和高精度指向,是文中系统设计需要重点考虑的问题。

1.1 系统组成

双光楔扫描系统由双光楔、楔镜支撑机构、驱动电机、读出头及扫描控制模块组成,如图 1 所示。激光经双光楔实现扫描指向及同轴收发,楔镜支撑机构实现对双光楔的可靠平稳支撑,驱动电机、读出头及扫描控制模块实现对两个楔镜转速、转动方向的高精度控制,同时带时间戳记录转动角度。

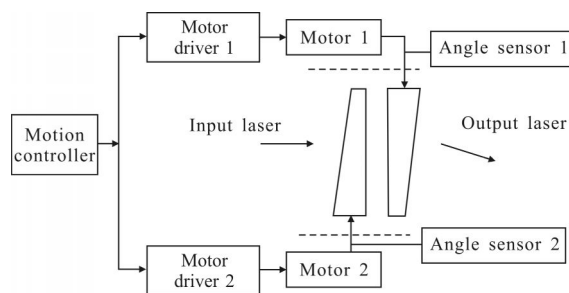


图 1 双光楔扫描系统结构示意图

Fig.1 Structure schematic of dual-wedge scanner system

通过由计算机组成的控制模块控制电机的精确旋转,并通过角度传感器对楔镜的旋转情况进行跟踪和显示,便于确定楔镜的旋转角速度是否符合设计要求。同时,根据设计指标的要求计算出传动部分的最大误差,合理选择伺服电机,要求伺服电机的控制精度在所要求的误差范围之内。

1.2 光楔模型及设计

激光光束通过单个楔形镜后的光束偏转示意图如图 2 所示。

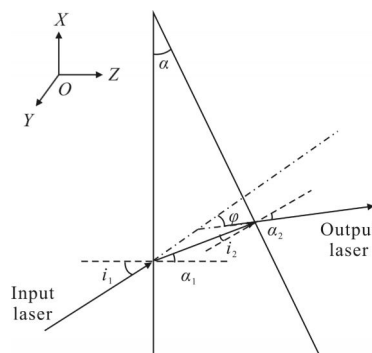


图 2 光楔光束偏转示意图

Fig.2 Schematic of optical wedge beam deflection

其中, i_1 为光束的入射角, α_1 为光束通过单楔镜第一面后的折射角, i_2 为光束经过单楔镜第二面的

入射角, α_2 为光束经过单楔镜第二面后的折射角, 光束经过单楔镜后的偏转角 φ 即为入射光线与出射光线之间的夹角。设楔镜的折射率为 n , 单楔镜的楔角为 α , 则根据折射定律以及图中各个入射光线、折射光线、出射光线以及楔角之间的几何关系, 可以推导出光束经过单楔镜之后的光束偏转角度。

光束经过双光楔的偏转角度近似计算公式为:

$$\varphi=2(n-1)\alpha \quad (1)$$

双光楔扫描的过程实际上就是光束分别经过两个单楔镜的组合, 光束经过双光楔之后的光束偏转角, 可采用向量的形式, 根据向量折射定理进行分析, 旋转双光楔采用背靠背安装, 其安装关系及扫描示意图如图 3 所示。

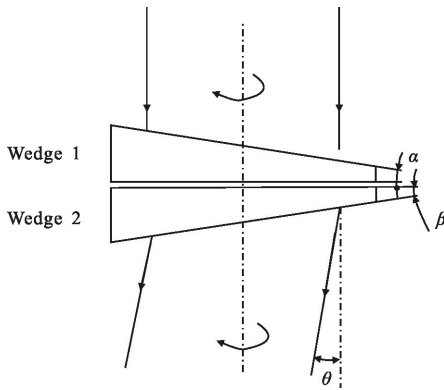


图 3 双光楔安装关系及扫描示意图

Fig.3 Installation relation and scanning mechanism of dule-wedge

扫描视场角 φ 与双光楔的单楔角 α 的关系如下式所示:

$$n \cdot \sin(\arcsin(\varphi/2 + \alpha)/n - \alpha) = \sin(\alpha) \quad (2)$$

考虑到机载作业环境, 结合透过率和热膨胀系数, 熔石英的热膨胀系数为 $0.55 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, 较其他材料高出一个数量级以上, 且其密度为 2.2 g/cm^3 较小, 其平均折射率 $1.46@532 \text{ nm}$, 选取熔石英作为扫描光楔材料。

如取 30° 扫描视场, 代入上式可计算出单楔角值为 $15^{\circ}46'16''$, 则设计楔角为 16° , 可满足双光楔扫描时实现大于 30° 扫描视场。

1.3 扫描控制设计

双光楔扫描系统需实现 $1\sim 3 \text{ Hz}$ 扫描, 且扫描指向精度优于 $50 \mu\text{rad}$, 需对两套背靠背安装的楔镜做同步控制, 且可实现往复扫描, 要求楔镜等速同步正

转、反转, 采用双轴控制器实现对两套楔镜组件进行同步控制, 控制策略见图 4。

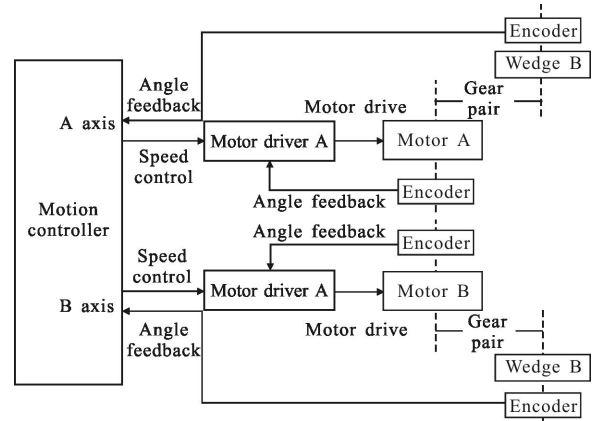


图 4 双光楔扫描控制方案图

Fig.4 Dule-wedge scanning control scheme

双光楔扫描系统的运动控制器具有两轴同步运动功能, 使用 A、B 轴各控制一个电机驱动器, 设定 A、B 轴之间为相位同步关系。A、B 轴之间的同步关系可以设置为电子齿轮关系, 上下楔镜运动速度相同, 方向相反。运动控制器通过位置反馈装置获取两个楔镜的实时位置, 通过 $\pm 10 \text{ V}$ 模拟量, 控制电机驱动器速度, 最终达到两轴同步运动。运动控制器采用 PID 控制策略控制两轴同步。通过适当调整 PID 参数, 可以使两轴运动平稳, 并达到相位严格同步。

位置反馈装置安装于两个楔镜, 实现楔镜运动位置的反馈。位置反馈装置包括码盘、读数头、细分盒、双读数头接口盒。为了提高位置反馈精度, 每个码盘配置两个读数头, 有效消除了偏心误差。细分盒为 40 细分, 提高了位置反馈分辨率。

其中, 每套楔镜对应的电机驱动器采用加固式电机伺服驱动器, 电机驱动器具有电流环、速度环和位置环三个闭环, 可实现电流、速度和位置的闭环控制。电机驱动器电流环和速度环都采用 PID 控制策略。为了使系统运动可靠, 并满足控制精度需求, 要选取适当的 PID 参数。增益系数为 P , 选取较大的增益系数, 有利于减小闭环误差, 但如果增益系数过大, 将导致系统出现振荡。微分常数为 D , 需要增大阻尼时, 可以适当增加 D 的值。积分常数为 I , 对调速系统而言, 积分器可以消除位置误差, 但如果积分器过大, 会导致系统振荡。

电机驱动双闭环如图 5 所示。

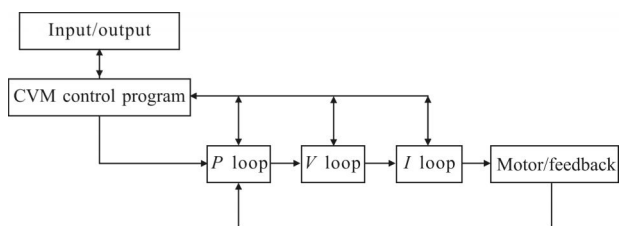


图 5 电机驱动双闭环控制

Fig.5 Double closed loop control of motor driver

1.4 系统误差控制

双光楔扫描系统负责改变激光光束指向，是实现宽视场、高精度扫描的基本保障。扫描光楔主要为满足扫描视场以及光学接收口径的要求。

对整个系统进行误差分析，分解对整体精度影响较大的误差因素，通过迭代优化设计方案。双光楔扫描系统的误差分析主要来源于三个方面，通过每次只改变一个变量，即只有一个影响因素变化的情况下，分别对两个楔镜进行逐个分析，从而得出各个因素对整体扫描精度的影响，确定主要影响因素和次要影响因素，其误差影响因素框图如图 6 所示。

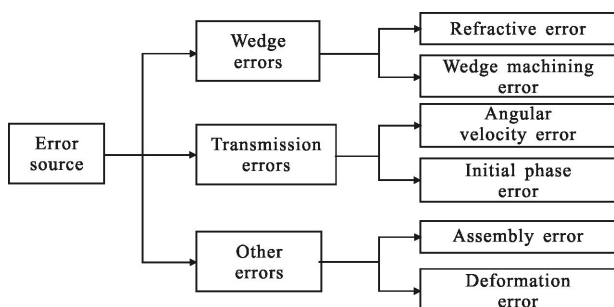


图 6 双光楔扫描系统误差影响因素框图

Fig.6 Diagram of error factors in dule-wedge scanning system

双光楔扫描系统通过控制楔镜误差、传动误差和装配及楔镜应力变形等误差，实现激光的高精度扫描指向。

2 系统实现

光楔的楔角将直接影响发射激光的指向精度和接收视场的对准精度，而楔形镜的面形精度将影响最终的成像质量和成像位置，考虑到机械支撑、装夹和楔镜偏折边沿去除量，有效通光口径 280 mm 对应的楔镜口径需达到 320 mm，同时，为保证系统的扫描视场需加工 16°楔角楔形镜，大楔角、大尺寸的成

对楔镜是一个加工难题。

通过制定详细的光楔加工方案，及遵循由粗到精对楔角误差逐步收敛到最终实现楔角误差 15 μrad 的检测精度，通过下料、粗磨、细磨、精磨到精抛一系列工序逐步实现，最终所能够达到的楔角检测精度取决于楔角的精密检测方法和检测设备精度。

完成加工后的楔镜采用 450 mm 口径 Zygo 平面干涉仪进行楔镜的楔面面形检测，检测过程和结果如图 7 所示，经检测，光楔楔面和平面 RMS 值均优于 λ/10，满足设计要求。

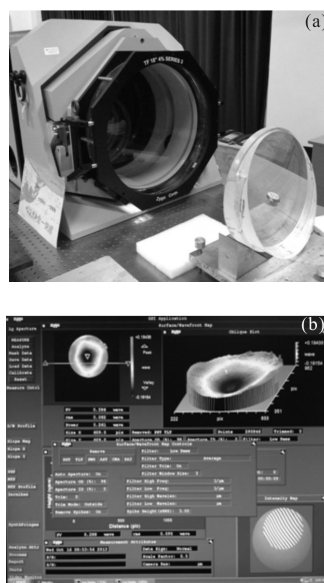


图 7 光楔面型检测过程及结果

Fig.7 Wedge surface detection process and results

楔镜镀膜完成后，与基座和传动系统完成总体装配，再与双轴运动控制器组合完成扫描调试，装配完成的双光楔扫描系统实物如图 8 所示。

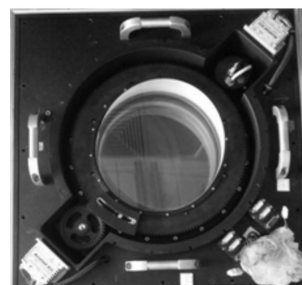


图 8 装配完成的双光楔扫描系统实物图

Fig.8 Physical diagram of the dule-wedge scanning system

双光楔扫描调试时，运动控制器采用 PID 控制策略控制两个轴的位置并进行双轴的运动同步。通

过精细调整 PID 参数可以提高两个轴的定位精度和双轴同步精度。A、B 轴电机在光楔运动速度为 1 rps、3 rps 时的速度精度均优于 0.1%，图 9 是在 3 rps 情况下的实测转速精度。

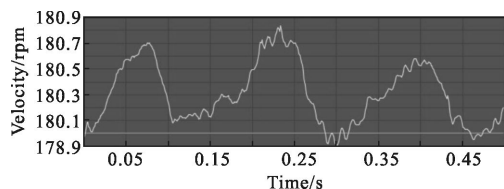


图 9 光楔 3 rps 旋转时 A 轴匀速精度

Fig.9 Uniform precision of A axis in optical wedge 3 rps rotation

3 精度评估与实验

3.1 地面精度验证

通过建立检校和验证场景，在地面对激光指向精度进行检校和评估。双光楔立式放置，激光从楔镜的前方入射，通过双光楔打到平整的墙面上，楔镜旋转 360°采样 100 个点，并使用全站仪测量点位，全站仪测量值与楔镜扫描理论模型计算值的匹配如图 10 所示，实线为理论值，点线为实测值，可以看出，测试的 100 个角度点处测试值与理论值均基本重合，偏差很小。

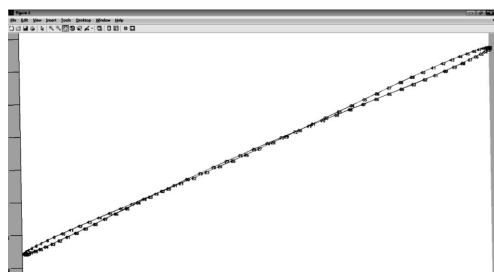


图 10 全站仪测量值与模型计算值对比图

Fig.10 Comparison of measured values between total station instrument and model calculated

在地面验证实验时，采用低功率的指示激光器进行扫描指向精度测试，测量距离约 45 m，统计得出，X 方向最大误差为 0.008 407 m，标准差 0.003 265 m；Y 方向最大误差为 0.007 731 m，标准差 0.003 679 m；Z 方向最大误差为 0.002 260 m，标准差 0.000 781 m；距离最大误差为 0.010 767 m，标准差 0.002 298 m。

双光楔在 X 和 Y 方向的指向精度换算为：

X 方向指向精度： $\text{actan}(0.435/6\ 000)/2=36.25\ \mu\text{rad}$

Y 方向指向精度： $\text{actan}(0.499/6\ 000)/2=41.58\ \mu\text{rad}$
实现了优于 50 μrad 的设计需求。

3.2 外场试验验证

集成双光楔扫描系统的机载激光雷达于 2014 年开展了外场飞行试验，获得了试验区大量的精确点云，实测扫描视场为 32.03°，其中飞行相对航高大于 3 000 m 获取的有效航摄照片和点云数据，如图 11 所示，经校正后可满足 1:5 000 成图精度要求，说明所研制的双光楔扫描系统可满足机载激光雷达的预定要求。



(a) 飞行试验航拍照片

(a) Flight test aerial photographs



(b) 飞行试验三维点云

(b) Flight test 3D point cloud

图 11 外场飞行试验效果

Fig.11 Field flight experiment effect

4 结束语

文中介绍了一套国产中高空机载激光雷达中关键部件之一的双光楔扫描系统设计和实现过程以及实验验证，双光楔扫描系统由双光楔、楔镜支撑机构、驱动电机、读出头及扫描控制模块组成，通过系统误差来源分析、对光楔的严格计算、加工工艺规划，以及对双轴高精度转动控制的设计和 PID 控制，实现了扫描角度不低于 30°、扫描频率 1~3 Hz、有效光学口径不小于 280 mm、扫描指向精度优于 50 μrad 、激光波长 532 nm 的光机扫描机构，该双光楔扫描系统在地面测试和中高空机载激光雷达集成后多次飞行试验中获取了大量有效数据，实测扫描视场为 32.03°，测试精度达到设计指标。

5 致谢

在双光楔扫描系统设计及研制过程中，张珂殊、余景池、袁艳、王宇、张林、邵永社、徐斌、杜志贵、任建峰、肖芳、张冰、胡家录等老师也贡献了各自的智

慧和力量,在此,表示衷心感谢!

参考文献:

- [1] Zheng Yongchao, Zhao Mingjun, Zhang Wenping, et al. Trend of laser radar technology development[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S): 240–246. (in Chinese)
郑永超, 赵铭军, 张文平, 等. 激光雷达技术及其发展动向[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(S): 240–246.
- [2] Li Menglin, Zhu Jingguo, Meng Zhe, et al. The design of lightweight and small sized airborne laser scanner [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44 (5): 1426–1431. (in Chinese)
李孟麟, 朱精果, 孟栢, 等. 轻小型机载激光扫描仪设计[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(5): 1426–1431.
- [3] Shan Jie, Charles K. Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing [M]. London: Taylor & Francis Group, 2008.
- [4] Zhang Yong, Cao Xibin, Wu Long, et al. Experimental research on small scale risley prism scanning imaging laser radar system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(8): 0814001–1–7. (in Chinese)
张勇, 曹喜滨, 吴龙, 等. 小面阵块扫描激光成像系统实验研究[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 814001–1–7.
- [5] Degnan J, Machan R, Leventhal E, et al. Inflight performance of a second generation: photon-counting 3D imaging LADAR [C]//SPIE, 2008, 6950: 695007–1–9.
- [6] Richard M M, William R D. Jigsaw: A foliage-penetrating 3D imaging laser radar system [J]. *Lincon Laboratory Journal*, 2005, 15(1): 23–36.
- [7] Degnan J J. A conceptual design for a spaceborne 3D imaging lidar [J]. *E & I Elektrotechnik Und Informationstechnik*, 2002, 119(4): 99–106.