

# 基于冷原子干涉原理的机载绝对重力测量

赵远, 郭梅影, 许云鹏, 胡栋, 王宇, 杨永军\*

(航空工业北京长城计量测试技术研究所 计量与校准技术重点实验室, 北京 100095)

重力场测量在地质勘查、灾害预报、测绘与导航等领域均具有重要的意义, 其中, 航空重力测量因全地域、快速、成本低等优势而被广泛应用<sup>[1-8]</sup>。目前, 航空重力测量所采用的仪器均属于相对式重力仪<sup>[4, 6-7]</sup>, 而冷原子航空绝对重力仪具有无漂移、高精度等优势<sup>[9-11]</sup>, 因此成为未来航空重力测量的重要发展方向, 受到国际资源勘查与自主导航领域的高度关注。在国际上, 目前只有法国实现了基于冷原子干涉的机载重力测量实验验证, 国内尚未有相关实验研究报道<sup>[12-17]</sup>。

航空工业北京长城计量测试技术研究所针对航空重力测量的特殊要求完成系统性的技术攻关, 现已利用自主研制的冷原子干涉原理航空重力仪成功的开展了飞行距离超过 600 km 的机载重力测量实验研究, 首次飞行测量实验获得了原子干涉条纹, 初步评估单组干涉条纹的分辨力已经达到十毫伽量级, 本次飞行实验验证的成功为我国开展航空绝对重力测量研究跨出了重要的一步, 对我国的战略资源勘查保护、大地测绘、自主导航

等领域的发展具有重要意义。

航空工业北京长城计量测试技术研究所围绕航空绝对重力测量的特殊要求与技术挑战, 系统地梳理了其中的科学问题, 分解了相应的关键技术, 开展了长期的技术攻关<sup>[18-20]</sup>。针对航空重力测量高航速、强振动、高动态等特点, 解决了强振动条件下原子干涉失效规律与动态还原机理、高航速下原子重力仪运动效应分离方法等科学问题。针对特殊环境挑战与具体技术难点, 采用单激光器方案, 解决了传统空间光路复杂、可靠性低等问题; 研制快速跳频锁频系统, 大幅压缩频率再锁定时间, 极大提升了原子干涉仪在航空高速、高动态环境下的可靠性; 研制航空环境专用探测系统, 解决了航空大起伏、强振动环境下原子干涉信号起伏问题; 研制自适应快速学习和环境干扰补偿系统, 解决高动态环境干扰引入相位噪声的问题, 最终完成冷原子干涉航空绝对重力仪(如图 1 所示)的自主研制, 并成功开展试飞验证研究。

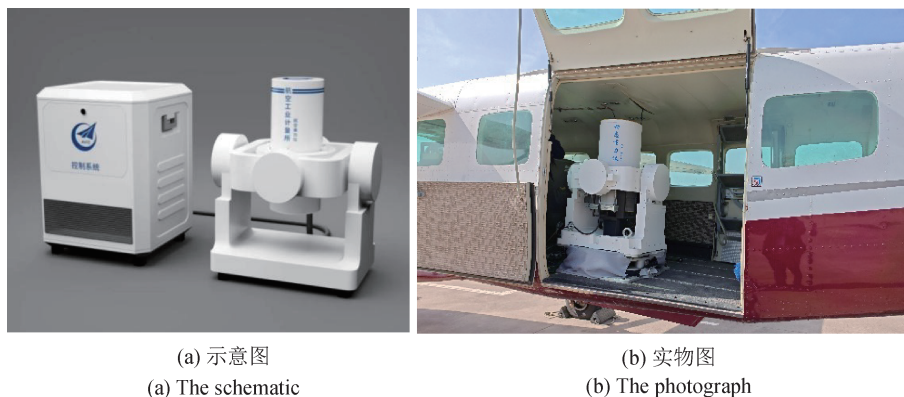


图 1 航空工业北京长城计量测试技术研究所自主研制的冷原子干涉航空绝对重力仪

Fig.1 The airborne cold atom absolute gravimeter developed by AVIC Changcheng Institute of Metrology & Measurement

引用格式: 赵远, 郭梅影, 许云鹏, 等. 基于冷原子干涉原理的机载绝对重力测量[J]. 计测技术, 2024, 44(1): 115-117.



在上述技术储备基础上,航空工业北京长城计量测试技术研究所研制的冷原子干涉航空绝对重力仪的静态稳定度可达0.05毫伽,在某场地使用小型测绘飞机进行了原子干涉重力仪的机载重力测量验证实验,测量过程中飞机的飞行高度约3000 m,飞行速度约240 km/h,实际飞行测量的航线如图2所示。为了克服高动态、强振动的影响,采用自适应补偿方法,实际测量补偿前后的干涉条纹曲线如图3所示,初步评估单组干涉条纹的分辨力已经达到十毫伽量级。



图2 飞行测量航线图

Fig.2 Flight routes of the gravity campaign

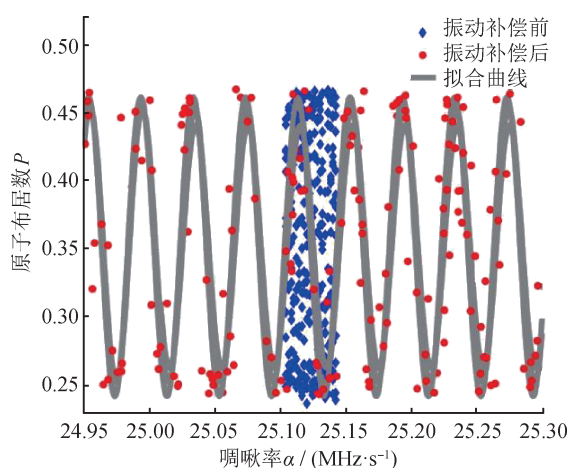


图3 振动补偿前后原子干涉条纹曲线图

Fig.3 The atom interference fringes without and with vibration correction

现有相对式航空重力测量仪器在航空物探、地质调查等领域发挥了重要作用<sup>[8, 21]</sup>,而航空绝对

重力测量不依赖固定参考点,能够独立给出绝对重力值,避免引点工作带来的各种问题,例如可以随时随地开展或终止航空绝对重力测量作业,而数据的有效性不受测线回路安排的影响。因此,航空绝对重力测量倍受国际重力测量领域关注。目前,基于冷原子干涉的绝对重力测量技术是国际公认最有潜力实现航空绝对重力测量应用的方案,但是高航速、高动态、强振动等航空测量环境特点给冷原子干涉测量带来巨大挑战,所以目前国际上只有法国的冷原子干涉航空重力仪实现了机载测量验证实验。现在,通过系统性的关键技术攻关,航空工业北京长城计量测试技术研究所自主研发的冷原子干涉航空重力仪在国内首次成功实现了机载重力测量实验验证,为冷原子干涉航空绝对重力测量技术在国家战略资源勘查保护、大地测绘、自主导航等领域的应用奠定重要基础。

### 参考文献

- [1] 管泽霖, 宁津生. 地球重力场在工程测量中的应用[M]. 北京: 测绘出版社, 1992.  
GUAN Z, NING J. Application of the earth's gravity field in engineering surveying [M]. Beijing: SinoMaps. 1992.
- [2] 李世峰, 金瞰昆, 周俊杰. 资源与工程地球物理勘探[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.  
LIS, JIN K, ZHOU J. Geophysical exploration of resources and engineering [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.
- [3] 曾华霖. 重力场与重力勘探[M]. 北京: 地质出版社, 2005.  
ZENG H. Gravity field and gravity exploration [M]. Beijing: Geological Publishing Press, 2005.
- [4] 王静波, 熊盛青, 周锡华, 等. 航空重力测量系统研究进展[J]. 物探与化探, 2009, 33(4): 368-373.  
WANG J, XIONG S, ZHOU X, et al. The advances in the study of the airborne gravimetry system [J]. Geophysical & Geophysical Exploration, 2009, 33(4): 368-373.
- [5] 刘站科. 航空重力测量技术及应用研究[J]. 测绘学报, 2021, 50(20): 284.  
LIU Z. Research on airborne gravity survey technology and application [J]. Journal of Geodesy and Geoinformation Science, 2021, 50(20): 284.
- [6] 张虹, 周能, 邓肖丹, 等. 国外航空重力测量与数据处理技术最新进展[J]. 物探与化探, 2019, 43(5): 1015-1022.  
ZHANG H, ZHOU N, DENG X, et al. The latest progress

- in air gravity measurement and data processing technology abroad[J]. Geophysical & Geophysical Exploration, 2019, 43(5): 1015-1022.
- [7] 孙中苗, 翟振和, 李迎春. 航空重力仪发展现状和趋势[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(1): 1-8.
- SUN Z, ZHAI Z, LI Y. Status and development of airborne gravimeter[J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(1): 1-8.
- [8] 周坚鑫, 刘浩军, 王守坦. 航空重力测量在我国地球物理勘探中的应用展望[J]. 中国地球物理. 2003——中国地球物理学会第十九届年会论文集2003, 2003: 224.
- ZHOU J, LIU H, WANG S. Application prospect of airborne gravimetry in geophysical exploration in China[J]. Chinese Geophysical Society. Proceedings of the 19th Annual Meeting of the Chinese Geophysical Society, 2003: 224.
- [9] KASEVICH M, CHU S. Atomic interferometry using stimulated raman transitions [J]. Physical Review Letters, 1991, 67(2): 181-184.
- [10] SCHMIDT M. A mobile high-precision gravimeter based on atom interferometry[D]. Humboldt-Universität zu Berlin, 2011.
- [11] SCHMIDT M, SENGEL A, HAUTH M, et al. A mobile high-precision absolute gravimeter based on atom interferometry [J]. Gyroscopy and Navigation, 2011, 2(3): 170-177.
- [12] BIDEI Y, ZAHZAM N, BRESSON A, et al. Absolute airborne gravimetry with a cold atom sensor[J]. Journal of Geodesy, 2020, 94(2).
- [13] BIDEI Y, ZAHZAM N, BLANCHARD C, et al. Absolute marine gravimetry with matter-wave interferometry [J]. Nat Commun, 2018, 9(1): 627.
- [14] 程冰, 陈佩军, 周寅, 等. 基于冷原子重力仪的绝对重力动态移动测量实验[J]. 物理学报, 2022, 71(2).
- CHENG B, CHEN P, ZHOU Y, et al. Experiment on dynamic absolute gravity measurement based on cold atom gravimeter[J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(2).
- [15] 程冰, 周寅, 陈佩军, 等. 船载系泊状态下基于原子重力仪的绝对重力测量[J]. 物理学报, 2021, 70(4).
- CHENG B, ZHOU Y, CHEN P, et al. Absolute gravity measurement based on atomic gravimeter under mooring state of a ship[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(4).
- [16] 朱栋, 徐晗, 周寅, 等. 基于扩展卡尔曼滤波算法的船载绝对重力测量数据处理[J]. 物理学报, 2022, 71(13).
- ZHU D, XU H, ZHOU Y, et al. Data processing of shipborne absolute gravity measurement based on extended Kalman filter algorithm [J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(13).
- [17] 车浩, 李安, 方杰, 等. 基于冷原子重力仪的船载动态绝对重力测量实验研究[J]. 物理学报, 2022, 71(11).
- CHE H, LI A, FANG J, et al. Ship-borne dynamic absolute gravity measurement based on cold atom gravimeter [J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(11).
- [18] 白金海, 胡栋, 贡昊, 等. 用于原子干涉仪的光学锁相环系统[J]. 计测技术, 2020, 20(4): 26-30.
- BAI J, HU D, GONG H, et al. An optical phase-lock loop system for atom interferometers[J]. Metrology & Measurement Technology, 2020, 20(4): 26-30.
- [19] GUO M, BAI J, HU D, et al. A vibration correction system for cold atom gravimeter [J]. Measurement Science and Technology, 2023, 35(3).
- [20] 王吉鹏, 胡栋, 白金海, 等. 原子干涉重力仪隔振方法的研究现状及展望[J]. 计测技术, 2020, 40(6): 15-20.
- WANG J, HU D, BAI J, et al. Review on vibration isolation method of atom-interferometric gravimeter[J]. Metrology & Measurement Technology, 2020, 40(6): 15-20.
- [21] 周坚鑫, 刘浩军, 王守坦, 等. 国外航空重力测量在地球学中的应用[J]. 物探与化探, 2004, 28(2): 119-122.
- ZHOU J, LIU H, WANG S, et al. The application of airborne gravity survey to earth science in foreign countries [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2004, 28(2): 119-122.



**第一作者:** 赵远(1990—), 男, 山东潍坊人, 工程师, 博士, 入选航空工业“育鹰”人才计划, 主要从事动态原子重力仪和重力梯度仪等相关方向研究, 参与多个渠道量子精密测量项目研究, 发表SCI、EI论文4篇, 授权、申请发明和实用新型专利4项。



**通讯作者:** 杨永军(1973—), 研究员, 博士, 航空工业集团首席专家, 总工程师, 中国计量测试学会常务理事, 国家一级计量考评员。长期从事先进计量测试方法技术研究、量子精密测量仪器研发等工作。主持的多个项目获得中国航空工业集团科技进步奖、国防科学技术进步奖等, 发表多本专业论著、多篇论文及多个发明专利。