

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2020.06.03

原子干涉重力仪隔振方法的研究现状及展望

王吉鹏, 胡栋, 白金海, 贡昊

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 原子干涉重力仪是一种测量重力加速度的新型仪器。振动噪声会在很大程度上影响原子干涉重力仪的测量精度。为实现高精度的重力加速度测量, 在使用原子干涉重力仪测量重力加速度时, 必须对振动噪声进行控制。分析了原子干涉重力仪的隔振需求, 阐述了原子干涉重力仪隔振系统的研究进展, 介绍了以音圈电机为驱动的隔振方法、以压电陶瓷为驱动的隔振方法、振动补偿法三种应用于原子干涉重力仪的隔振方法, 总结每种隔振方法的特点及适用场景, 并展望原子干涉重力仪隔振技术未来的发展方向。

关键词: 原子干涉重力仪; 低频振动; 主动反馈隔振; 振动补偿

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2020)06-0015-06

Review on Vibration Isolation Method of Atom-interferometric Gravimeter

WANG Jipeng, HU Dong, BAI Jinhai, GONG Hao

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: Atomic interference gravimeter is a new instrument to measure the acceleration of gravity. Vibration noise will affect the measurement accuracy of atomic interference gravimeter to a great extent. In order to realize high precision measurement of gravity acceleration, vibration and noise must be controlled. The vibration isolation requirements of atomic interference gravimeter are analyzed, and the research progress of vibration isolation system of atomic interference gravimeter is described. Three vibration isolation methods applied to atomic interference gravimeter, which are driven by voice coil motor, piezoelectric ceramic and the vibration compensation method, are introduced. The characteristics and applicable scenarios of each vibration isolation method are summarized, and the future development direction of vibration isolation technology for atomic interference gravimeter is proposed.

Key words: atom-interferometric gravimeter; low frequency vibration; active feedback isolation; vibration compensation

0 引言

基于冷原子干涉的重力加速度测量仪因其超高的测量灵敏度以及优秀的工作性能, 已经逐渐被认可并成为重点研究内容。目前, 得到较广泛应用的原子干涉重力仪的测量准确度可达 $10^{-9} g$ 量级。

在测量过程中, 原子干涉重力仪采用选定的激光脉冲照射真空腔内的原子团, 使原子团发生分裂、偏移、重新汇合, 进而产生干涉^[1]。在干涉过程中, 重力作用使原子能态产生差异, 通过测量相干原子的相位差即可获得当地的重力加速度。在原子干涉测量重力加速度的过程中, 很多因素都会影响测量精度, 其中拉曼光反射镜的振动对原子干涉重力仪的测量精度影响较大, 因此高精度的原子干涉重力仪需要隔绝振动来提升测量精度。本文对原子干涉重力仪隔振技术进行总结和归纳, 为原子干涉重力仪的准确测量提供

技术借鉴。

1 原子干涉重力仪的隔振需求

利用原子干涉测量重力加速度时, 可通过式(1)计算出重力加速度 g 的值

$$\Delta\phi = k_{\text{eff}} g T^2 \quad (1)$$

式中: $\Delta\phi$ 为测量到的干涉条纹相位的相对变化; k_{eff} 为拉曼激光的有效波矢; T 为拉曼干涉脉冲间隔时间^[2-3]。

照射原子团的激光称为拉曼光, 拉曼光通过扩束镜后经反射镜反射, 形成两束对射的拉曼光。拉曼光反射镜的振动位移 δz 会使拉曼激光中引入相位噪声 $k_{\text{eff}} \delta z$, 如图1所示。

通过构建重力加速度测量值与反射镜振动噪声之间的传递函数, 可以发现在 $0.1 \sim 10 \text{ Hz}$ 之间的低频振动对重力加速度测量结果的影响最大, 因此应用于原

子干涉重力仪的隔振系统需要重点关注低频段的振动^[4]。

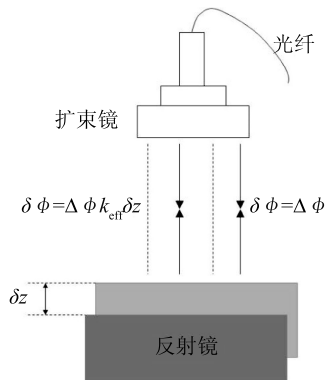


图1 振动引起的相位噪声

2 原子干涉重力仪隔振方法研究进展

1999 年，美国斯坦福大学设计了一套应用于原子干涉重力仪的隔振装置，如图 2 所示。该装置可将原子干涉重力仪与地面隔离，能够把系统噪声降低为原来的 1/300，重力仪的不确定度为 3×10^{-9} [5-6]。

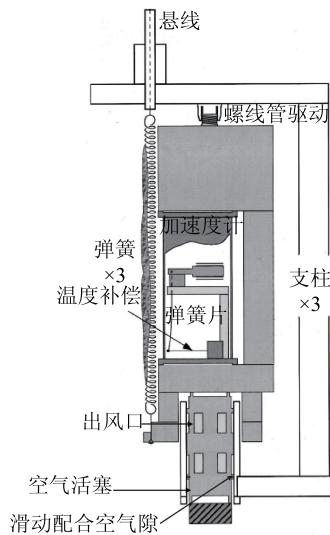


图2 美国斯坦福大学的隔振系统

2010 年，德国洪堡大学的 Freier 将原子干涉重力仪的隔振系统进行了简化，采用被动隔振和主动反馈结合的方式实现隔振，如图 3 所示。该系统可将 0.03 ~ 5 Hz 范围内的噪声抑制到原来的 1/200^[7]。

2012 年，华中科技大学的周敏康团队设计了主动反馈隔振系统，将 0.1 ~ 10 Hz 范围内的振动降低为 1/100，并在 2016 年又进行了改进，实现了三维主动

反馈隔振，将 0.2 ~ 2 Hz 范围内的竖直方向振动噪声降低为 1/50，同频段的水平噪声降低为 1/5，并且分析了水平方向振动噪声对重力仪的影响^[8]。三维主动隔振系统结构如图 4 所示。

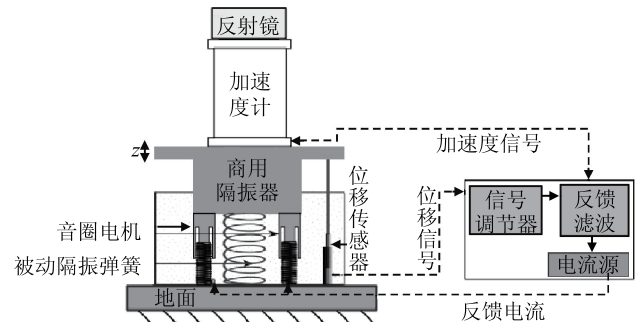


图3 德国洪堡大学 Freier 改进的隔振系统

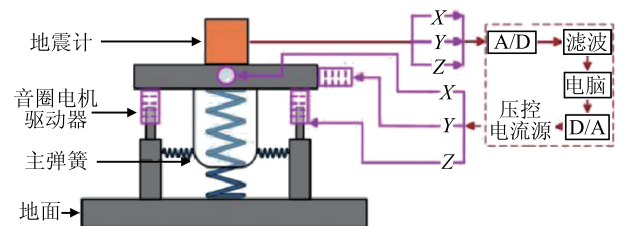


图4 华中科技大学周敏康团队设计的三维主动隔振系统

2015 年，中国科学院大学的汤彪对洪堡大学 Freier 的隔振系统进行简化，降低了系统的固有频率，并且将 1 Hz 附近的振动降低至 $10^{-9} \text{ g/Hz}^{1/2}$ 量级^[9]。改进后的主动隔振系统如图 5 所示。

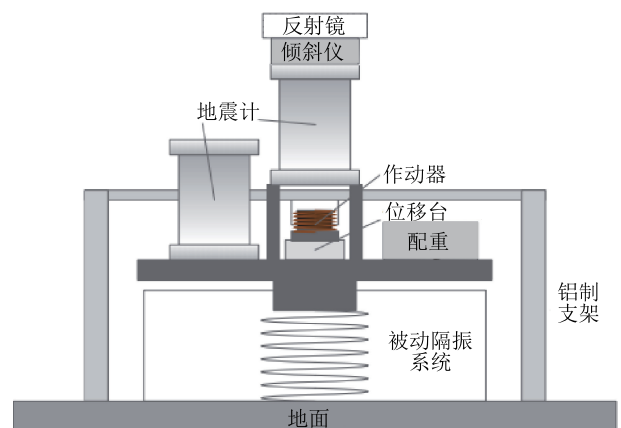


图5 中国科学院大学改进后的主动隔振系统

此外，2008 年法国巴黎天文台的重力仪小组计算并分析了振动噪声对原子干涉条纹的影响，通过对振动进行补偿，使原子干涉重力仪的灵敏度达到了 $1.4 \times 10^{-8} \text{ g}^{[10]}$ 。

3 原子干涉重力仪隔振方法

3.1 以音圈电机为驱动的隔振方法

基于音圈电机的隔振方法是原子干涉重力仪所有隔振方法中最成熟完备的,已成为应用最为广泛的原子干涉重力仪隔振系统。音圈电机隔振系统结构如图6所示,由被动隔振平台、地震计、数据处理系统以及音圈电机组成。

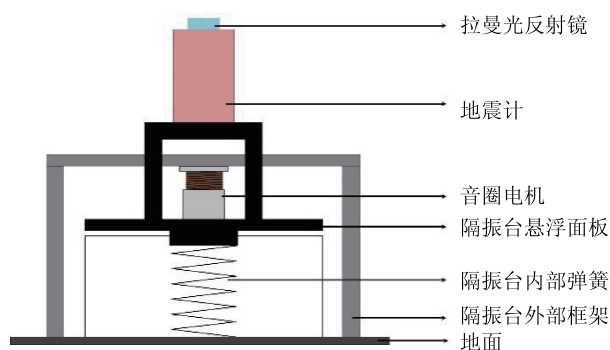


图6 音圈电机隔振系统示意图

被动隔振平台选择 Minus K 公司的商用被动隔振平台,该平台不仅可以隔离高频振动,而且为地震计、传感器提供了支撑。该平台能够实现负刚度系数,可使系统的弹性系数变得很小。同时,该被动隔振平台还能够调节固有频率,从而控制整个系统的自振频率,保证在 0.1 ~ 10 Hz 的低频区内主动反馈隔振时不会出现共振。

良好的振动传感器可以提供更高的测量精度和更低的本底噪声,所以设计音圈电机驱动的主隔振系统时选择地震计 3ESPC (Guralp, UK)。该地震计由摆锤(无摩擦摆动的弹簧片)、一对电容极板、一个传导线圈构成,可以同时检测竖直、东西、南北方向的振动噪声,振动会使摆锤相对电容极板的位置发生改变,进而改变电容大小产生电压信号,电压信号在线圈内产生磁场,磁场向摆锤施加的磁力与外力相反,使摆锤的相对位置不发生改变。由此一来,电磁力和振动产生的力绝对平衡,实现了高精度的振动测量^[11]。

主动隔振系统的驱动件是音圈电机。音圈电机由永磁体和线圈构成,在通入电流后产生输出力,其振动频率和振幅会根据输入电流改变。使用电流源向音圈电机输入一个自定频率和大小的电流,音圈电机可以按照预设的频率产生振动,当振动信号由地面经过被动隔振台后,剩余的振动信号通过地震计采集,经

放大电路放大后,驱动音圈电机产生振动,抵消被动隔振台无法隔绝的低频振动。

以音圈电机为驱动器的主动隔振系统,具有以下优点:被动隔振平台能够实现对高频振动的有效隔离,并且可以控制硬件结构的固有频率避免共振;地震计能够高精度地测量振动信号,同时其本底电子噪声在 30 s-16 Hz 的频段内低于地震模型,不会对隔振后的重力加速度测量结果产生影响;音圈电机体积小,迟滞力和摩擦阻力都极低,能够将振动信号高效反馈。美国斯坦福大学、德国洪堡大学、华中科技大学、中国科学院大学等多个研究机构都采用了这种隔振方法^[12]。

音圈电机驱动的隔振系统也存在一些问题:首先系统装配难度较高,必须保证音圈电机、被动隔振台、地震计、反射镜在同一中轴线上,此外被动隔振台的面板必须保持悬浮,这样一来很容易产生水平方向的倾斜和扭转,而倾斜和扭转会改变隔振台内部弹簧的刚度,对隔振效果影响较大。除了系统装配问题外,电子仪器的本底噪声、电路噪声、磁场干扰也会给测量结果引入误差。

3.2 以压电陶瓷为驱动的隔振方法

浙江大学干涉仪小组设计了以压电陶瓷堆栈作为驱动器的三点支撑纯主动隔振系统^[13],该系统利用了压电陶瓷的逆电压效应原理,虽然压电陶瓷的逆电压效应较为复杂,但是当只考虑一个方向的位移时,可以将压电陶瓷作为一个可以单方向伸缩且具有高灵敏度的作动器如图7所示。

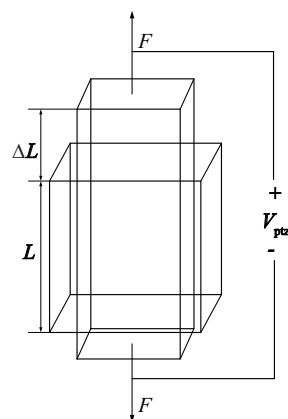


图7 单方向考虑压电陶瓷的拉伸效应

利用压电陶瓷作为驱动器的主动隔振系统^[14]。首先,采用加速度采集芯片收集振动信号,将可以探测竖直方向振动信号的加速度传感芯片紧密粘贴在

反射镜上, 加速度芯片在 $0.1 \sim 100 \text{ Hz}$ 范围内的振动噪声必须小于实验室的本征振动噪声, 故其噪声在 $2 \times 10^{-7} \sim 4 \times 10^{-7} \text{ g/Hz}^{1/2}$; 之后, 通过模拟电路对信号进行采集和放大, 再经比例微分处理后输入压电陶瓷, 使压电陶瓷产生驱动执行反馈, 从而稳定拉曼反射镜。压电陶瓷驱动隔振原理图如图 8 所示。

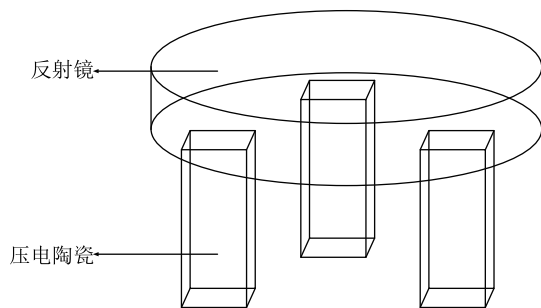


图 8 压电陶瓷驱动隔振原理图

基于以上的硬件选择, 浙江大学干涉仪小组提出了数字电路和模拟电路两种思路, 但是在后续的实验中, 并没有取得良好的隔振效果。尽管压电陶瓷隔振系统在其他应用场合具有可行性, 但应用于原子干涉重力仪还存在以下问题: ①整个隔振系统的驱动器为三块压电陶瓷, 由于压电陶瓷会在施加电压后伸长, 三块压电陶瓷在拉伸时产生的倾斜度误差会影响重力加速度测量精度; ②压电陶瓷拉伸时会产生线性误差, 进而影响最终的测量结果; ③振动信号的采集装置是加速度芯片, 将加速度转换为位移时需要进行二次积分, 采用模拟电路会带来相位变化, 导致部分频段的负反馈变为正反馈, 无法起到隔振效果^[15]。压电陶瓷的主要优点是: 随着频率的升高, 位移幅度值会以频率平方的倒数减小。因此, 压电陶瓷在隔振时往往更适用于高频隔振, 而原子干涉重力仪则更多地需要实现低频区的隔振, 这也是使用压电陶瓷隔振实验结果不理想的原因之一。

不同于其他机械驱动器, 压电陶瓷能够有效减小隔振系统的体积。除此之外, 压电陶瓷适用的频率范围很大, 能够在多个频段内实现有效隔振, 如果可以在隔振系统上施加被动隔振, 并且合理设计滤波算法参数, 就有可能实现在全频范围内有效降低振动。目前, 原子干涉重力仪的小型化已经成为一个热点研究方向, 浙江大学干涉仪小组的压电陶瓷隔振方法是小型化隔振系统的一种全新思路, 为小型化重力仪的隔

振选择提供了新的设计理念。

3.3 振动补偿法

振动补偿法是一种无需机械结构即可实现振动噪声抑制的方法。该方法根据原子干涉重力仪的测量原理计算得出振动信号引入干涉条纹的误差, 并且设计修正算法进行误差补偿, 最终获得没有振动噪声的干涉条纹。振动补偿法在不同机构的研究中有不同的实施方案:

军事科学院国防创新研究院采用迈克尔逊型零差激光干涉仪的四通道移相探测器采集反射镜振动引起的干涉条纹的相移, 将相移实时整形转化为正交方波信号, 通过数字鉴相条纹细分对方波信号辨向, 确定正余弦信号的相位小数, 根据相位小数跳变的方向, 确定拉曼光作用过程中相位整数的变化量和方向, 同时记录拉曼光作用后干涉条纹的相位小数, 即可得到拉曼光作用过程中振动引起的相移, 最后根据原子跃迁概率和拉曼光脉冲相位的关系, 去除振动带来的相位误差, 得到去除振动噪声后的原子跃迁概率, 达到隔振的效果^[16]。

浙江大学将拉曼光反射镜紧贴在地震计 3ESPC 上以获取振动信号, 将得到的振动信号进行滤波、积分补偿后, 与原始干涉条纹相加修正, 最终得到修正后的重力加速度值。具体的修正方法是: 利用商用软件, 将地震计到反射镜的传递函数进行反演以重构模拟波形, 对采集的波形进行傅里叶变换, 对频谱进行修正后再利用逆傅里叶变换反演回时域波形。这种振动补偿的方法可以达到与被动隔振相同的效果^[17]。

德国洪堡大学将地震计和反射镜置于被动隔振平台上, 测得原子跃迁概率和振动信号的关系, 对测得的数据进行条纹拟合以获得相位误差, 最终计算相位差的 allan 标准差以得到最终的测量结果^[18-19]。

振动补偿法的技术难点在于: 计算工作量极大, 在考虑传递函数时, 地震计自身的传递函数反演较为容易, 但地震计到反射镜的传递函数难以确定; 除此之外, 对信号进行滤波处理时采用的逆傅里叶变换过程较为复杂, 实现难度大^[20]。

单纯的振动补偿法可以起到与被动隔振一样的隔振效果。相较于基于机械结构的隔振方法, 振动补偿法的最大优势在于当外界扰动较大时, 可以更好地实现较高精度的重力加速度测量。除此之外, 振动补偿法对全频段内的振动都有很好的优化, 对野外

恶劣环境下的重力加速度测量具有重要实际应用意义。

4 总结与展望

以上介绍的三种应用于原子干涉重力仪的隔振方法各有特点，表 1 列出了每种方法的优缺点以及适用场景。

表 1 三种原子干涉重力仪隔振方法的对比

隔振方法	优点	缺点	适用场景
以音圈电机为驱动的隔振方法	反馈隔振效率较高、原理简单	系统设计复杂、仪器噪声大	超高精度原子干涉重力仪
以压电陶瓷为驱动的隔振方法	执行元件精度高、体积小	执行元件引入的误差大、低频隔振效果差	小型化、便携式原子干涉重力仪
振动补偿法	全频段有效隔振、抗干扰能力强	难以实现高精度隔振、计算复杂	野外作业、恶劣环境用原子干涉重力仪

基于音圈电机的主动隔振法是目前主流的应用于高精度原子干涉重力仪的隔振方法，大部分准确度能够达到 $10^{-9} g$ 的原子干涉重力仪都采用了这种隔振方法，尽管使用该方法时控制系统需要调节的参数较多，但是当参数调整合适时，可以使原子干涉重力仪达到很高的测量精度，是大多数研究团队采用的隔振方案。这种方法的局限性在于仪器自身噪声引入的误差，绝大多数测量低频振动信号的传感器都是 Guralp 公司生产的地震计，这款仪器本身的噪声会成为测量结果不准确的主要影响因素。若想向更高的测量精度推进，提升传感器本身的性能是一个很重要的方式，同时还应对振动信号进行更好的处理，目前简单的超前滞后补偿控制带来的效果十分有限，未来需要进一步完善。

压电陶瓷驱动的隔振方法在实验中暂时还没有取得很好的效果，技术成熟度不高，主要原因是压电陶瓷的物理特性导致振动低频区的隔振效果较差、电路的积分微分环节会带来更多不确定因素。但压电陶瓷和集成电路的微小体积正是小型化原子干涉重力所需的。如果可以对现有的问题进行深入研究和完善，例如改进振动采集芯片的性能、合理设计电路，压电陶瓷驱动的隔振方法未来将有更大的发展空间。

振动补偿法直接对振动信号计算出的干涉条纹进行补偿处理，当外界振动较为明显，剧烈扰动较多时，振动补偿法的效果优于其他隔振方法。在重力加速度的现场测量工作中，重力仪在所处的环境中可能会遇到许多不确定性因素的干扰，因此对于突发扰动的隔离就显得尤为重要。在原子干涉重力仪应用于现场测量时，振动补偿法相比其他手段较易取得更好的效果。

参 考 文 献

[1] 王义遒. 原子的激光冷却与陷俘[M]. 北京: 北京大学出版社, 2007.

[2] 周敏康. 原子干涉重力测量原理性实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.

[3] 孙步梁. 高分辨率原子干涉重力测量实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.

[4] 熊鑫. 原子干涉重力测量中的三维主动隔振研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.

[5] 周向阳, 刘炜. 航空遥感惯性稳定平台振动特性分析与隔振系统设计[J]. 中国惯性技术学报, 2012(3): 266 - 272.

[6] Hensley J M, Peters A, Chu S. Active low frequency vertical vibration isolation[J]. Review of scientific Instruments, 1999, 70(6): 2735 - 2741.

[7] Freier C. Measurement of local gravity using atom interferometry[D]. Diploma thesis, Humboldt-Universität zu Berlin, 2010.

[8] Zhou M K, Xiong X, Chen L L, et al. Note: A three-dimension active vibration isolator for precision atom gravimeters[J]. Review of scientific Instruments, 2015, 86(4): 1591.

[9] Tang Biao, Zhou Lin, Xiong Zongyuan, et al. A programmable broadband low frequency active vibration isolation system for atom interferometry[J]. 2014.

[10] Gouet J L, Mehlstaubler T E, Kim J, et al. Limits to the sensitivity of a low noise compact atomic gravimeter[J]. Applied Physics B, 2008, 92(2): 133 - 144.

[11] 罗东云, 程冰, 周寅, 等. 基于滑模鲁棒算法的超低频主动隔振系统[J]. 物理学报, 2018, 67(2): 76 - 81.

[12] T M Niebauer, G S Sasagawa, J E Faller, et al. A new generation of absolute gravimeters[J]. Metrologia, 2005, 32(3): 159.

[13] 楚立. 应用于冷原子干涉仪的主动隔振设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.

[14] 谭平, 姜炳森. 以压电陶瓷为作动器的主动隔振研究[J]. 振动. 测试与诊断, 1994, 14(1): 44 - 48.

[15] 杜忠. 模拟电路实现给定传递函数中的实际问题及解决办法[J]. 控制工程(北京), 1989(4): 9 - 12.

- [16] 胡青青, 徐馥芳, 魏荣, 等. 一种适用于原子干涉重力仪的振动噪声修正补偿方法及便携式装置[P]. 北京: CN110596785B.
- [17] 许翊鹏. 原子干涉型重力仪的共模噪声抑制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [18] Sébastien Merlet, Gout J L, Bodart Q, et al. Operating an atom interferometer beyond its linear range[J]. Metrologia, 2009, 46(1): 87.
- [19] Peters A, Chung K Y, Chu S. High-precision gravity measurements using atom interferometry[J]. Metrologia, 2001, 38(1): 25-61.
- [20] Julien Le Gouët. Étude des performances d'un gravimètre atomique absolu; sensibilité limite et exactitude préliminaire[D]. Université Paris Sud-Paris XI, 2008.

收稿日期: 2020-09-18; 修回日期: 2020-09-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(61727819); 国家“十三五”技术基础科研项目(JSJL2019205C002); 航空基金项目(201956044001)

作者简介



王吉鹏(1995-), 男, 新疆乌鲁木齐人, 主要研究方向为原子干涉重力仪的噪声控制。2017年毕业于北京科学技术大学机械工程专业, 获得学士学位, 2018年至今于中航工业北京长城计量测试技术研究所攻读仪器科学与技术专业硕士学位。

智能传感技术发展论坛暨中国计量协会智能传感器专业委员会成立大会在京召开

2020年10月29日, 智能传感技术发展论坛暨中国计量协会智能传感器专业委员会成立大会在京召开, 论坛由中国计量协会、航空工业北京长城计量测试技术研究所联合主办, 中国计量协会智能传感器专业委员会承办。来自市场监管总局计量司、中国计量协会、航空工业计量所、中国计量协会智能传感器专业委员会会员单位代表, 以及来自智能制造、芯片研发、智能通讯、汽车制造、物联网、智慧医疗等智能传感器产业链相关单位共200余名代表出席会议。

论坛围绕“探讨产业发展新趋势, 交流智能传感新技术”这一主题, 通过领导致辞、主题报告等相关环节, 进行了信息分享和深入研讨。

中国计量协会适时成立智能传感器专业委员会, 是在智能传感领域更好发挥协会作用的具体举措。在中国计量协会智能传感器的平台上, 全体行业从业者共同努力, 探索智能传感器产业创新模式和机制, 推进智能传感器创新发展, 助推传统产业升级, 推动智能传感产业成为我国制造业转型发展的重要引擎。

(摘自 计量测控)