



引力参考传感器地面测试扭摆研究进展

李华东¹, 高志勇², 王智^{1,2*}

1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;

2. 国科大杭州高等研究院基础物理与数学科学学院, 杭州 310024

*联系人, E-mail: wz070611@126.com

收稿日期: 2024-03-08; 接受日期: 2024-05-15; 网络出版日期: 2024-06-26

国家重点研发计划(编号: 2021YFC2202404)资助项目

摘要 空间引力波探测已经成为国际宇宙学研究热点, 欧美合作的LISA空间引力波探测计划和中国的太极、天琴空间引力波探测计划在合作与竞争并存的良好态势下迅猛发展. 作为空间引力波探测的核心载荷, 引力参考传感器在发射入轨前必须做相应的地面测试. 为了解国内外利用扭摆对引力参考传感器进行地面测试的研究进展, 本文简要介绍了引力参考传感器和利用扭摆对引力参考传感器的测试方法, 总结了国内外扭摆的研究进展, 并对用扭摆对引力参考传感器进行地面测试的发展趋势提出了展望, 以为太极计划引力参考传感器的研制和地面测试提供参考.

关键词 空间引力波探测, 引力参考传感器, 扭摆, 地面测试

PACS: 04.80.Nn, 07.07.Df, 04.80.Cc

1 引言

引力波(Gravitational Waves)是爱因斯坦广义相对论预言的结果之一^[1-3], 爱因斯坦认为, 有质量的物体加速时改变了时空扭曲, 产生了以光速传播的引力波, 对于除引力外不受任何力作用的物体, 在扭曲的时空中做测地线运动(Geodesic Motion). 引力波探测将弥补电磁波和光学探测的不足, 可以探测宇宙更远更深入的情况, 由于引力波信号非常微弱, 引力波探测成为一项具有挑战性的工程. 1974年, Hulse和Taylor^[4]通过观测脉冲双星PSR 1913+16, 引力波第一次被间接证实存在. 2015年, 美国地面激光干涉引力波天文台

LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory)第一次直接观测到双黑洞合并的引力波信号(GW150914)^[5,6]. 此后, 美国LIGO与意大利处女座干涉仪VIRGO (Virgo Interferometer)合作, 相继发现双中子星合并^[7,8]和双黑洞合并引力波信号^[9,10], 开辟了引力波天文学的新窗口.

宇宙中存在大量的引力波源, 频率范围覆盖广泛, 但地面引力波探测会受到重力梯度、地球半径及地面震动的影 响, 探测波段主要集中在几赫兹到几千赫兹的频率. 为克服这一限制, 主要解决方案是将探测器深入到太空, 太空环境能够消除地面震动和重力梯度噪声并能提供足够的激光干涉臂长^[11]. 目前, 在建设

引用格式: 李华东, 高志勇, 王智. 引力参考传感器地面测试扭摆研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2024, 54: 270406

Li H D, Gao Z Y, Wang Z. Research progress on torsion pendulum in ground testing of gravitational reference sensor: a review (in Chinese). Sci Sin Phys Mech Astron, 2024, 54: 270406, doi: 10.1360/SSPMA-2024-0095

的空间引力波探测计划主要有欧空局和美国联合提出的LISA (Laser Interferometer Space Antenna)^[12]、中国的太极计划^[13]和天琴计划^[14]等.

在空间引力波探测太极计划中, 由三个相同的航天器组成近等边三角形的梯队, 每个航天器相距3百万公里, 位于近等边三角形的顶点进行激光传输. 每个航天器包含两个自由悬浮的测试质量(Test Mass, TM), 每个TM都被放置在引力参考传感器(也叫惯性传感器) (Gravitational Reference Sensor, GRS)内, TM既作为激光干涉仪的反射镜, 又作为测地线运动的测量基准. 当引力波经过时, 通过检测两个TM之间光程变化来反演引力波的信息. 为了达到探测引力波的灵敏度, 在0.1 mHz–0.1 Hz的带宽内, 要求TM在敏感轴的残余加速度保持在 $3 \times 10^{-15} \text{ m s}^{-2} \text{ Hz}^{-1/2}$ 以下^[15]. 保证TM几乎完美地做测地线运动是探测引力波的关键, GRS是保护TM使其不受外力干扰的重要保障^[16].

干扰TM做测地线运动的大部分杂散干扰力来自于GRS本身^[17], 为了在足够高的灵敏度下验证TM做测地线运动的可行性, 验证GRS的读出稳定性和可靠性, 描述干扰GRS的噪声源的性质, 确定GRS实际工作水平与模型估计的偏差以及其他未建模或者未预测的噪声源上限, 必须在GRS发射入轨前在地面进行测试. 为了真实地模拟空间的微重力环境, 在地面测试GRS, 必须“消除”重力的影响. 一般采用的方法有高压悬浮法^[18]、自由落体法^[19,20]和扭摆法^[21,22]. 由于地面震动和高压耦合噪声大, 对高压悬浮测试提出了很高的要求; 此外, 由于自由落体下落时间短, 无法对GRS进行

充分的测试. 相比而言, 扭摆法无电压耦合, 测试时间长, 广泛应用于各种静电加速度计、地面引力实验和精密测量的研究中^[23].

2 引力参考传感器

空间引力波探测的关键是测量两个相距甚远的TM的相对运动, 为保证TM能完美地做测地线运动, 需要GRS和无拖曳控制系统(Drag Free and Attitude Control System, DFACS)协同来降低各种干扰的影响^[24]. 如图1(a)所示, GRS的核心部件为敏感结构(由TM和电极笼构成)和电容传感与静电伺服控制电子学系统. 其他还包括用于TM残余电荷控制的电荷管理系统, 用于发射过程锁紧、入轨后释放TM的锁紧释放机构以及提供洁净真空环境的真空腔.

如图1(b)所示, 太极计划的GRS中的TM是边长为46 mm, 质量约为2 kg的铂金合金立方体, 电极笼内部相对TM周围布置有18块电极, 其中12块为传感电极, 6块为激励电极. 相对的传感电极与TM的表面形成差分电容传感器, 用于TM的姿态检测并通过驱动电压的施加实现对TM的控制. 通过激励电极施加频率为100 kHz的电压使TM表面电势保持在0.6 V左右, 并将该频率作为差分电容信号的提取的载波频率.

电容传感与静电伺服控制电子学系统通过对差分电容信号的提取获得TM相对于航天器的姿态和位移信息, 并将该姿态与位移信息反馈给无拖曳控制系统; 通过无拖曳控制系统和静电力保障TM在测量敏感方

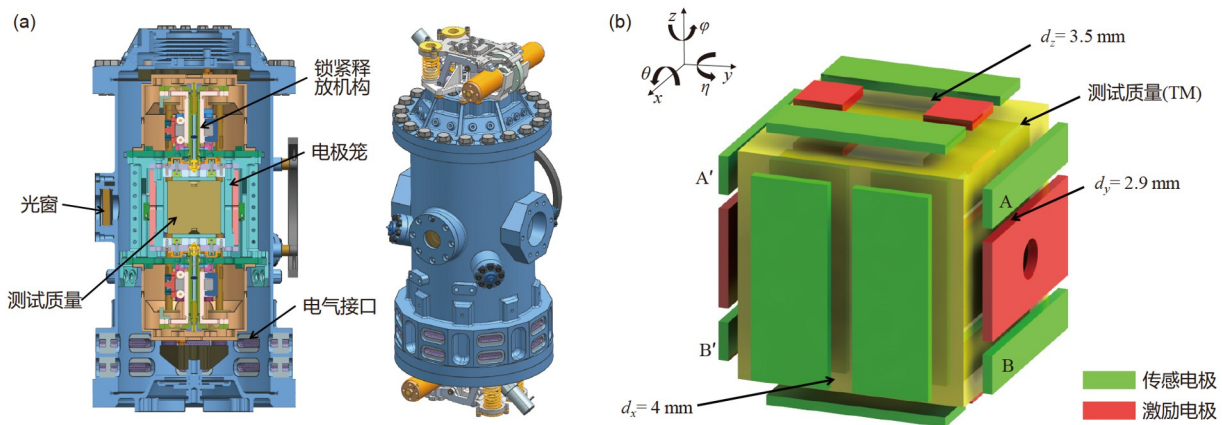


图 1 (网络版彩图)引力参考传感器与TM及周围电极分布示意图. (a) 引力参考传感器示意图; (b) TM及周围电极分布示意图
Figure 1 (Color online) Schematic diagram of GRS and TM with its surrounding electrodes. (a) Schematic diagram of GRS; (b) TM with its surrounding electrodes.

向的自由悬浮. 如图2^[25,26]所示.

3 扭摆动力学方程

自卡文迪许用扭摆较准确的引力常量以来, 扭摆不仅是世界上公认的精密测量和引力物理实验主要的实验仪器, 也在电子科学、生物物理学、岩石学等各个领域都具有重要的作用^[21].

扭摆(Torsion Pendulum)是安装在竖直悬丝下端的物体以悬丝为轴做扭转振动的摆. 在扭转 φ 自由度下, 扭摆的运动学方程为

$$I_z \ddot{\varphi}(t) + \gamma \dot{\varphi}(t) + \Gamma \varphi(t) = N(t), \quad (1)$$

其中, I_z 为摆绕 z 轴(竖直悬线方向)的转动惯量, γ 为耗散系数, 假设 γ 仅取决于结构阻尼, 那么有 $\gamma(\omega) = \frac{\Gamma \delta}{\omega}$, Γ 为扭转弹性系数, $N(t)$ 为作用在摆上、方向为竖直悬丝方向的外力矩. 对式(1)进行傅里叶变换, 在频域上则有

$$-I_z \omega^2 \varphi(\omega) + \Gamma(1 + i\delta)\varphi(\omega) = N(\omega), \quad (2)$$

其中, $\delta = \frac{1}{Q}$, Q 为机械品质因子; I_z 可以用共振频率 ω_0 和扭转弹性系数表示 $I_z = \frac{\Gamma}{\omega_0^2}$. 式(2)可以被写为

$$\varphi(\omega) = \frac{N(\omega)}{\Gamma(1 + i\delta) - I_z \omega^2} = \frac{N(\omega)}{\Gamma \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 + \frac{i}{Q} \right]}. \quad (3)$$

引入传递函数 $H(\omega)$:

$$\varphi(\omega) = N(\omega)H(\omega), \quad (4)$$

$$H(\omega) = \frac{1}{\Gamma \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 + \frac{i}{Q} \right]}. \quad (5)$$

对于作用在摆上的外力, 可以通过合适的转化臂长来计算:

$$N(\omega) = F(\omega) \cdot R_\varphi, \quad (6)$$

其中, R_φ 为转化臂长.

忽略扭摆悬线的质量, 扭转弹性系数 Γ 为

$$\Gamma = \frac{\pi r^4 S}{2L}, \quad (7)$$

其中, r 为悬丝的半径, L 为悬丝的长度, S 为悬丝材料的剪切模量.

每一个作用在摆上频率为 ω 的外力或者外力矩都可以通过传递函数转化为摆在相应频率下的角位移. 由上述推导可知, 可以通过测量角位移计算作用在摆上的外力或者外力矩.

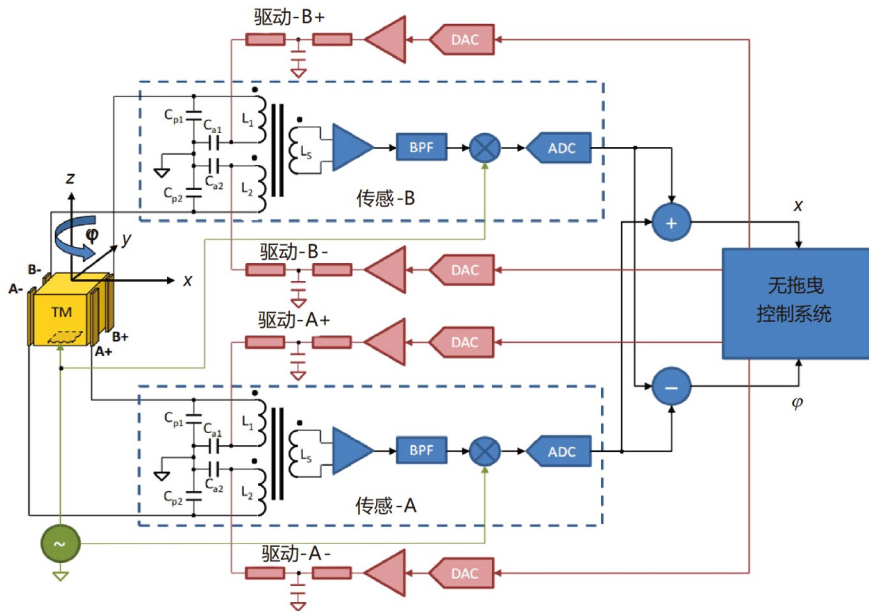


图 2 (网络版彩图) LISA计划中电容传感和静电伺服控制电路示意图^[25,26]

Figure 2 (Color online) Schematic diagram of the capacitive sensing and electrostatic servo control circuits in LISA program ^[25,26].

对于用于测试GRS的扭摆系统, 要求对非常弱的力或者力矩进行测量, 必须减小耗散系数(提高机械品质因子 Q)和扭转弹性系数, 以此来增加扭摆的灵敏度. 因此, 在针对GRS相关静电力、热辐射噪声等面力测量标定时, 采用悬挂同等大小、空心结构的等效TM进行测量, 以减小悬丝半径来达到较高的测量分辨率. 在用扭摆法进行GRS的地面测试时, 等效TM由钨丝或者熔融石英作悬挂^[27]. 由于需要在TM上固定反射镜来满足光学读出需求, 并且要求TM与其他部件绝缘, 一般地, 在TM上方安装支撑轴, TM与支撑轴通过绝缘体熔融石英环刚性连接, 再将支撑轴与悬丝机械连接. 由于结构的独特性并受到地面震动的原因, 使得

扭摆有四种运动: 扭转(Torsion)、摇摆(Swinging)、倾斜(Tilting)和弹振(Bouncing), 如图3所示. 表1列出了四种运动模式的模型和固有频率.

由于倾斜模式和弹振模式的固有频率远远大于测量频率, 在实际测量得到的数据中, 并没有发现两种模式的存在^[28].

4 一级扭摆

4.1 单质量一级扭摆

依托于LISA计划, 意大利特伦托大学及意大利国家核物理研究所(INFN)首先开展GRS的研发并利用扭

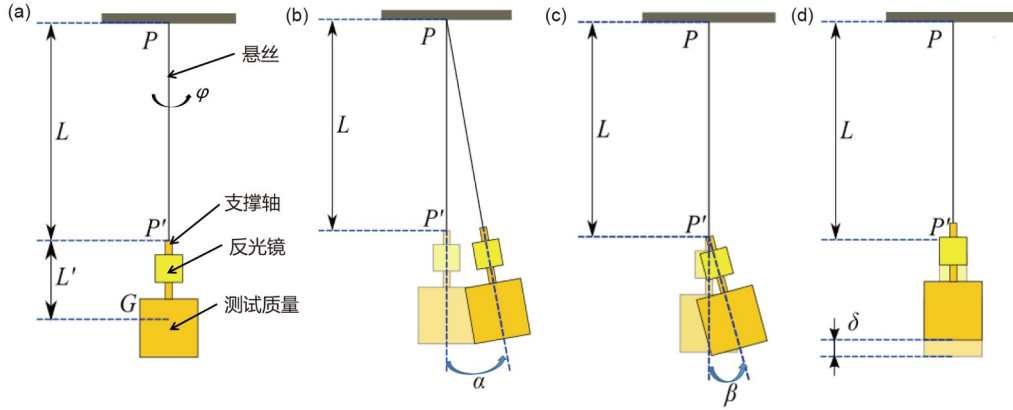


图3 (网络版彩图)扭摆四种运动示意图. (a) 扭转模式; (b) 摇摆模式; (c) 倾斜模式; (d) 弹振模式. P 点为悬丝悬挂点, P' 点为支撑轴与悬丝连接点, G 点为TM与支撑轴的质心, L 为悬丝长度, L' 为 G 点到 P' 点的长度

Figure 3 (Color online) Schematic diagram of the four movements of the torsion pendulum. (a) Torsion; (b) swing; (c) tilting; (d) bouncing. Point P is the suspension point of the suspension fiber, and point P' is the connection point between the support shaft and the suspension fiber. Point G is the center of mass of TM and the support shaft, L is the length of the suspension fiber, and L' is the length from point G to point P' .

表1 扭摆四种运动模式模型及固有频率^{a)}

Table 1 Four motion modes of torsion pendulum and natural frequencies^{a)}

模式	物理模型	参数	固有频率计算公式
扭转(Torsion)	扭摆模型	r, L, S, I_z	$f_{to} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi r^4 S}{2I_z L}}$
摇摆(Swinging)	单摆模型	L, L', g	$f_{sw} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{L+L'}}$
倾斜(Tilting)	复摆模型	I_y, L', m, g	$f_{ti} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{mgL'}{I_y + mL'^2}}$
弹振(Bouncing)	弹簧振子模型	E, r, L, m	$f_{bo} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E\pi r^2}{mL}}$

a) r 为悬丝半径, L 为悬丝长度, L' 为TM与支撑轴质心到支撑轴与悬丝连接点的距离, S 为悬丝材料的剪切模量, E 为悬丝材料的弹性模量, m 为TM与支撑轴的质量, I_z 为TM与支撑轴绕 z 轴的转动惯量, I_y 为TM与支撑轴经过质心绕 y 轴方向的转动惯量, g 为重力加速度.

摆法进行地面测试试验, 目前扭摆力矩灵敏度在1 mHz水平达到了 $8 \times 10^{-16} \text{ N m Hz}^{-1/2}$, 对应TM等效加速度 $4 \times 10^{-14} \text{ m s}^{-2} \text{ Hz}^{-1/2}$, 在LISA探路者(LISA Pathfinder)要求的一个数量级之内^[22].

如图4^[29,30]所示, 单质量一级扭摆由TM, 悬丝和用于自准直仪反射的反射镜等核心组件构成. 由上述分析可知, $\Gamma \propto \frac{r^4}{L} S$, 为了测量更弱的力或者力矩, 扭转系数越小越好. 但是悬丝半径不能一味减小, 必须满足

$$r \geq \sqrt{\frac{mg}{\pi\sigma}}, \quad (8)$$

其中, m 为悬挂摆的质量, σ 为悬丝材料的屈服强度. 因此, 测试用TM为边长为46 mm的6块厚度为2.5 mm的镀金铝板粘接而成^[27], 以减小悬挂摆的总质量.

TM上方安装有支撑轴, 通过熔融石英环连接TM, 支撑轴上方安装有十字架以及镀金玻璃平面镜, 十字架可以提高整个装置的对称性, 减少重力四极矩, 并且也可以作为限位装置, 防止TM与电极碰撞^[30]. 平面镜作为自准直仪的反射镜, 用于检验扭摆的倾斜并独立地光学读出纤维的扭转角度.

整个装置安装在高真空室内, 如图5^[29]所示, TM处于悬挂状态, 周围分布的电极及电极笼固定在5自由度微定位装置中, 以保证准确调整传感电极与TM的相对位置, 为后续测量做准备. 此外, 在主悬丝上部安装有磁阻尼, 磁阻尼由较粗的上级纤维与导电圆盘构成, 以抑制由地面震动和悬丝悬挂点倾斜导致的摆的振动.

为了减少环境的扰动, 获得更精密的数据, 整个真空室被悬挂起来用于隔振, 并消除地面倾斜的影响. 此外, 在实验仪器附近分布有温度和磁场强度传感器, 实时监测外部环境变化.

特伦托大学研制的单质量扭摆已经取得了一系列成果^[27]: 测得了噪声水平上限; 在1 mV水平下进行直流偏置电压测量并验证补偿的可能性; 验证了电容传感器的静电模型并测量了TM与GRS的耦合噪声; 在总误差1%内排除了TM与GRS的其他刚度耦合噪声; 在不确定性度25%的范围内验证了热梯度模型和辐射计效应; 验证了利用紫外线对TM放电的可能性; 在没有增加力噪声的前提下验证了对TM的电荷测量和连续放电的可能性; 在测地线运动和直流驱动的情况下, 通过数据拟合测得频率为0.5 mHz的扭矩信号^[22].

国内华中科技大学引力中心最早研究空间引力参

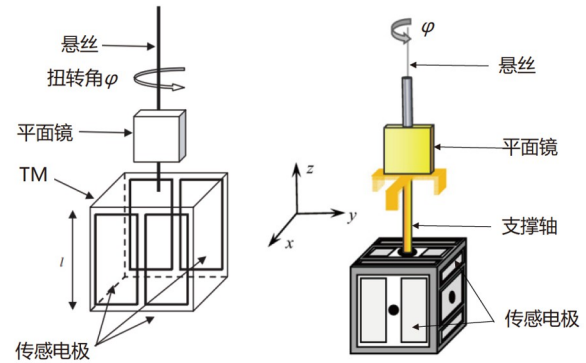


图4 (网络版彩图)单质量一级扭摆示意图^[29,30]

Figure 4 (Color online) Schematic diagram of single-mass one-level torsion pendulum [29,30].

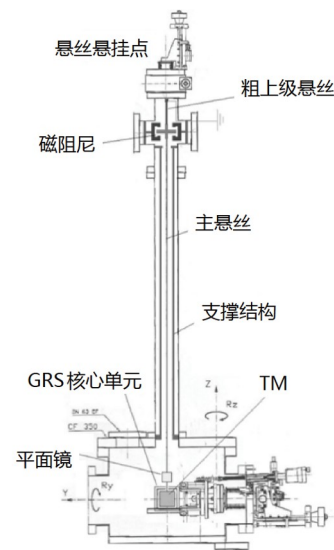


图5 单质量一级扭摆总装配示意图^[29]

Figure 5 Schematic diagram of single-mass one-level torsion pendulum assembly [29].

考传感器, 并参与“天琴”计划引力参考传感器的研制^[14]. 罗俊等人^[31]发明了一种惯性传感器地面测试装置, 能够实现对静电悬浮加速度计三个自由度上的性能测试, 如图6所示. 由于TM与电极之间电势差随时间波动会通过静电力的形式直接引入噪声. 华中科技大学尹航^[32]创新地提出一种研究导体表面电势的方法, 通过单质量一级扭摆系统, 在0.02–0.06 Hz频段内, 测量导体表面电势精度达 $15 \mu\text{V Hz}^{-1/2}$. 此外, 为了使TM的残余加速度噪声在 $3 \times 10^{-15} \text{ m s}^{-2} \text{ Hz}^{-1/2}$ 以下, TM表面电荷需要保持在 10^7 个电子以下^[33], 因此需要对

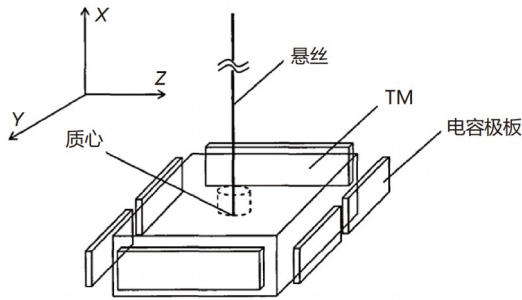


图6 罗俊等人^[31]发明的空间惯性传感器地面测试装置
Figure 6 Space inertial sensor ground testing device invented by Luo et al. [31].

TM进行电荷管理. Yang等人^[34]利用扭摆对“天琴”计划的GRS进行电荷管理评估, 结果显示作用在TM上的噪声力矩谱密度约为 $2 \times 10^{-14} \text{ N m Hz}^{-1/2}$, 在1 mA的驱动电流下充放电率约为 10^5 e/s , 符合“天琴”的预期, 如图7所示.

4.2 四质量一级扭摆

如上述, 单质量一级扭摆只对GRS内部引起的扭矩敏感, 但是对GRS内部引起的力, 特别是作用线经过TM质心的力不敏感, 对于随机力的特征只能利用等效臂长将力转化为力矩进行转换^[35,36], 等效臂长因干扰源模型的不同而不同, 因此, 需要一种直接测量作用在TM上的力(特别是沿x轴的力)敏感的装置, 如图8(a)和(b)所示.

四质量一级扭摆类似于卡文迪许扭摆, 主要由悬丝、平面镜、十字横杆和4个TM构成核心结构, 如图8(c)所示. 四质量一级扭摆转换模型简单, 可以测量单质量扭摆无法测到的噪声力扰动, 可直接测量作用在TM上的力. 但环境重力梯度的敏感度会随TM之间的距离增大而增大, 因此保证四质量一级扭摆的高对称性可以减少重力四极矩, 抑制扭摆对环境重力梯度的影响.

在四质量一级扭摆中, 与TM及GRS原型相对的是刚度补偿配重及简化的GRS, 通过简化的GRS产生与TM相同的静电力梯度来平衡, 并且可以提供扭转角度的差分读出^[37]. 简化的GRS中, 每个与TM表面相对的面只有一块电极, 并且TM表面与电极之间的距离较大, 光学自准直仪用于两个GRS的读出校准, 并且提供独立的扭转角度读出.

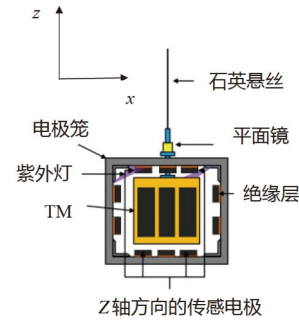


图7 (网络版彩图)用于电荷管理系统评估的扭摆^[34]
Figure 7 (Color online) Torsion pendulum for charge management system evaluation [34].

与单质量一级扭摆相同, 四质量一级扭摆的测量环境也极为苛刻. 如图9^[38]所示.

四质量一级扭摆通过直接测量作用在TM上的力而不是力矩, 可以评估更严格的力噪声上限. 此外, 作用在TM上的力噪声源模型将会更直接地被评估和建立, 为在轨噪声模型提供更精确地验证. 此类扭摆的噪声力灵敏度在0.1 mHz水平达到了 $1 \times 10^{-15} \text{ N Hz}^{-1/2}$ ^[38].

除了特伦托大学研制的四质量一级扭摆, Ciani等人^[39]和Chilton等人^[40]根据特伦托大学的扭摆装置研制出了新一代四质量一级扭摆, 如图10^[41]所示.

区别于特伦托大学研制的扭摆, 上述扭摆装置的惯性元件(摆)由相对的完全相同的简化GRS与配重组成. 简化GRS由镀金铝TM和6块电极板组成. 此外, 佛罗里达大学利用两个配重作为反射镜, 搭建激光干涉光路来检测两个TM的相对位移, 代替了自准直仪的独立读出. 该设计理论上的激光干涉测距的精度为 $\text{pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 量级, 但由于装配误差、配重的表面粗糙度及其他干扰因素, 在10 Hz水平, 实际的位移精度约为 $0.5 \text{ nm Hz}^{-1/2}$. 目前, 该扭摆的噪声力灵敏度在2 mHz水平达到 $2 \times 10^{-13} \text{ N Hz}^{-1/2}$ ^[39], 该团队正在改善装置, 以进一步提高激光干涉测距精度和扭摆噪声灵敏度.

5 二级扭摆

对于上述一级扭摆, 只有扭转一个自由度, 无法测量评估同时作用于TM上的力和力矩, 并且对环境噪声(例如由地面震动引起的倾斜模式)特别敏感^[42]. 二级扭摆由两级悬丝构成, 保留了TM平动和转动自由度, 能够同时测量作用在TM上的力或者力矩. 此外, 二级

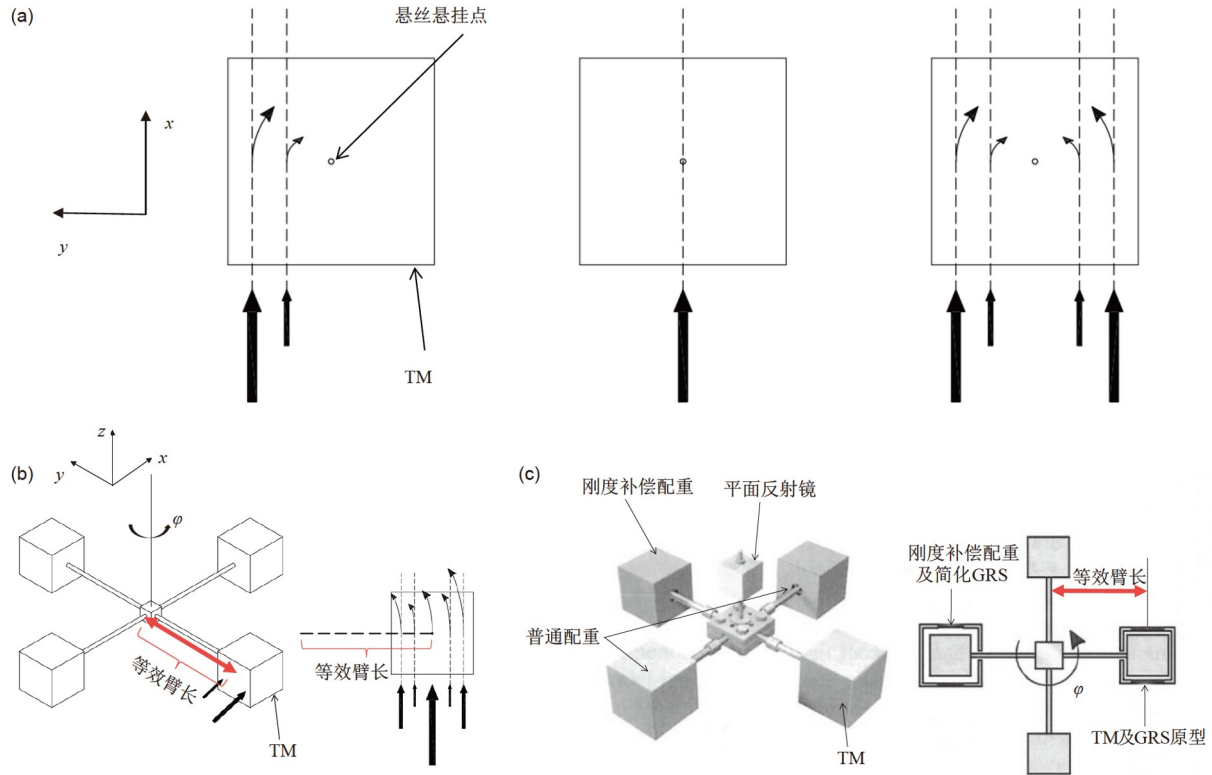


图 8 (网络版彩图) (a) 单质量一级扭摆扭矩转化示意图; (b) 四质量一级扭摆扭矩转化示意图; (c) 四质量一级扭摆示意图^[35]
Figure 8 (Color online) (a) Schematic diagram of the torsional torque conversion of a single-mass one-level torsion pendulum; (b) schematic diagram of the torsional torque conversion of a four-mass one-level torsion pendulum; (c) schematic diagram of four-mass one-level torsion pendulum [35].

扭摆能够测量非敏感轴(y 轴和 z 轴)耦合到敏感轴(x 轴)的噪声力, 能够更好地评价影响TM的噪声力。

华中科技大学在扭摆测量实验中发现反常模式(摇摆模式)并率先进行理论分析, 提出利用磁阻尼可以抑制摇摆模式^[43,44], 并使用磁阻尼二级扭摆进行引力常数 G 的测量^[45], 这种理论分析方法被运用到二级扭摆的动力学方程中^[46], 为GRS的扭摆地面测试提供了理论基础。

5.1 双质量二级扭摆

如图11^[47]所示, 华中科技大学研制的双质量二级扭摆主要由一二级悬丝、平衡杆、配重、TM、电极板(电极笼)和自准直仪组成。自准直仪分别用于检测平衡杆和TM的扭转, 6块镀金玻璃陶瓷电极板组成电极笼, 电极笼被固定在6自由度操作器上用于调整电极笼相对于TM的位置。3对电极板不仅分别测量 x 轴和 y 轴的平动位移和TM的扭转, 并且还可以用于控制TM

的扭转, 检测TM的平动和转动耦合。由于平动和转动的耦合和电容传感器对TM的反作用, 该扭摆的噪声力矩灵敏度在 $2\text{ mHz}-0.1\text{ Hz}$ 水平达到 $6\times 10^{-13}\text{ N m Hz}^{-1/2}$ ^[48]。

此外, 华中科技大学研究了地面震动对扭摆灵敏度的影响, 并提出将电极笼用另一悬丝悬挂来抑制地面震动噪声^[49,50], 理论分析这种悬挂电极笼的做法将抑制地面震动噪声一个量级以下。目前, 悬挂电极笼式扭摆在 30 mHz 水平下的噪声力灵敏度达到 $1.1\times 10^{-11}\text{ N Hz}^{-1/2}$, 噪声力矩灵敏度达到 $1.4\times 10^{-14}\text{ N m Hz}^{-1/2}$ ^[47]。

5.2 四质量二级扭摆

为了克服一级扭摆对环境扰动特别敏感的缺点, 意大利国家核物理研究所(INFN)联合意大利佛罗伦萨大学、罗马大学、乌尔比诺大学等开发研制了四质量二级扭摆装置, 并在意大利的地下物理研究中心格兰萨索实验室搭建实验平台进行对GRS的地面测试^[51]。

区别于华中科技大学的双质量二级扭摆, INFN 团队研制的四质量二级扭摆由一个 TM 和三个配重悬挂在十字横杆构成, 这样提高了装置对称性, 抑制了重力

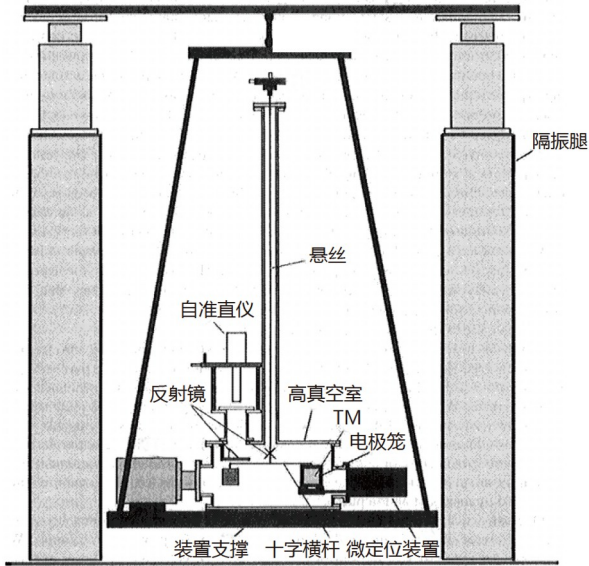


图 9 四质量一级扭摆总装配示意图^[38]
Figure 9 Schematic diagram of four-mass one-level torsion pendulum assembly ^[38].

四极矩的影响^[52]. 如图12^[53]所示, 他们称这个装置为 PETER (PEndulum Translational and Rotational)^[54,55]. 整个装置安装在高真空环境中, 一级悬丝上端被固定在操控器上, 允许一级悬丝绕 z 轴(图12中的 u_z 轴)旋转

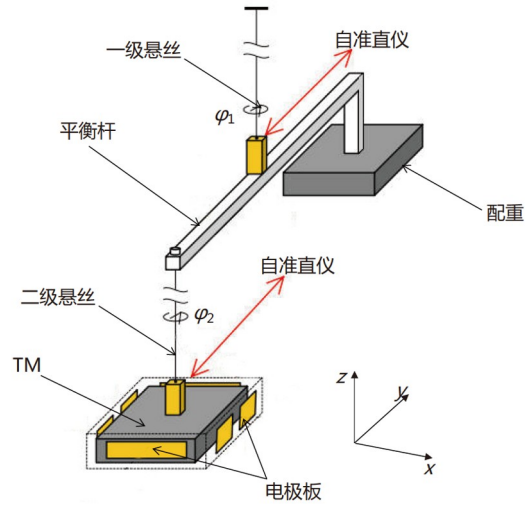


图 11 (网络版彩图)华中科技大学研制的双质量二级扭摆示意图^[47]
Figure 11 (Color online) Schematic diagram of the two-mass two-level torsion pendulum developed by HUST ^[47].

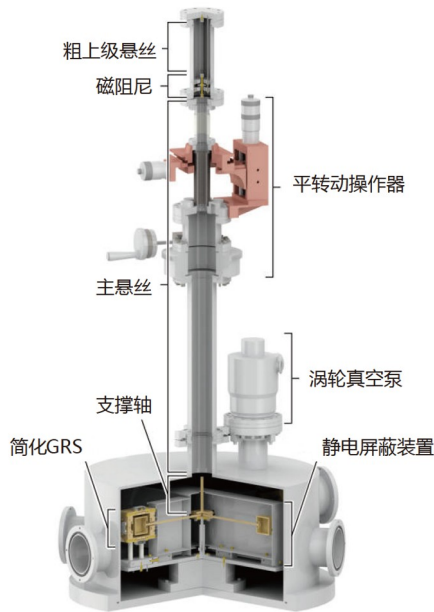


图 10 (网络版彩图)佛罗里达大学研制的四质量一级扭摆总装配示意图^[41]
Figure 10 (Color online) Schematic diagram of the four-mass one-level torsion pendulum assembly developed by the University of Florida ^[41].

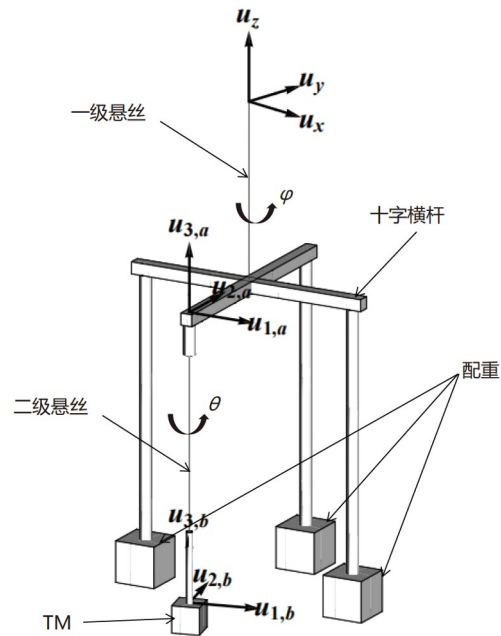


图 12 INFN 团队研制的四质量二级扭摆示意图^[53]
Figure 12 Schematic diagram of the four-mass two-level torsion pendulum developed by INFN ^[53].

并控制悬挂点的高度, 一级悬丝悬挂着长度约为30 cm 的十字横杆, 在十字横杆一条臂的一端连接有二级悬丝, 悬挂着TM, 其他三条臂刚性连接三个配重. 对于TM沿x轴(图12中的 $u_{1,b}$ 轴)的小平动位移, 可以近似认为一级悬丝扭转角乘以转化臂长. TM外的电极笼固定在6自由度微定位装置, 以调整TM相对于电极笼的位置. 受机械设置及经典噪声限制, 此装置TM的目标等效加速度为 $10^{-13} \text{ m s}^{-2} \text{ Hz}^{-1/2}$ 以下^[54,56].

此外, 该团队参考华中科技大学团队对扭摆反常模式的分析, 构建了二级扭摆的动力学模型, 分析了第2节所述的4种运动模式, 并发现只需8个自由度数据即可描述摆的运动, 该动力学模型提供了作用在TM上噪声力或者力矩的可靠估计, 特别对低频地面震动引起的倾斜模式进行了分析, 对GRS的地面测试提供了有意义的指导^[53]. 应用构建的动力学方程, 该装置测量评估了传感驱动串扰——非敏感轴(y轴和z轴)耦合到敏感轴(x轴)的噪声力, 已经实现了消除一个由TM质心偏移悬挂轴产生的读出串扰, 并提出将扭矩到力的串扰降低到0.23%以下所需TM相对于电极笼居中的位置精度^[57].

图12所示的四质量二级扭摆装置通过“刚性腿”固定配重, 增加了整个装置的重量, 降低了力敏感度. 此外, 由于不对称性, 导致有由地面震动引起的上悬丝悬挂点运动与十字横杆的直接耦合. 为了提高力灵敏度, 如图13^[58]所示, INFN团队对PETER进行了改进: 将“刚性腿”换为悬丝, 与TM相对的配重用细悬丝悬挂, 其他两个配重用较粗的悬丝悬挂以保证共振频率在测量频段以上. 增加两个光学读出传感器, 一个固定在十字横杆上直接测量一级悬丝的扭转角度, 一个固定在TM上用于测量TM的转动和平动. 经过改进, 在10 mHz水平, 该装置的力灵敏度达到 $6 \times 10^{-11} \text{ N Hz}^{-1/2}$, 力矩灵敏度达到 $10^{-14} \text{ N m Hz}^{-1/2}$ ^[58].

表 2 现有文献中各类扭摆测得极限数据对比^{a)}

Table 2 Comparisons of limit data measured by 4 types torsion pendulums in existing literatures^{a)}

类型	频点 (mHz)	力 ($\text{N Hz}^{-1/2}$)	力矩 ($\text{N m Hz}^{-1/2}$)	加速度 ($\text{m s}^{-2} \text{ Hz}^{-1/2}$)	数据来源
单质量一级扭摆	1	—	6×10^{-16}	3×10^{-14}	[22]
四质量一级扭摆	2	8×10^{-13}	—	3×10^{-13}	[41]
双质量二级扭摆	30	1.1×10^{-11}	1.4×10^{-13}	5.5×10^{-12}	[47]
四质量二级扭摆	10	6×10^{-11}	1×10^{-14}	3×10^{-11}	[58]

a) 部分数据经过等效计算.

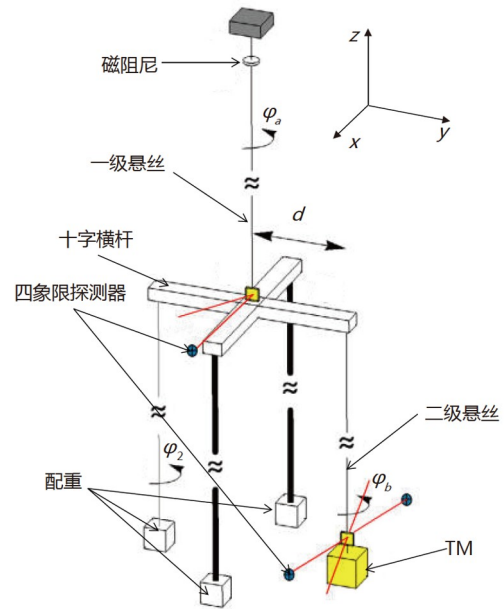


图 13 (网络版彩图) INFN团队改进的四质量二级扭摆示意图^[58]

Figure 13 (Color online) Schematic diagram of the four-mass two-level torsion pendulum improved by INFN [58].

6 GRS与无拖曳在轨等效测试方案

上述测试方案及扭摆装置主要针对GRS核心电子学系统性能及GRS内部噪声所产生的噪声力及力矩开展测试, 对比如表2^[22,41,47,58]所示, 但未能联合无拖曳控制系统开展地面测试.

本研究团队依托国家重点研发计划项目, 提出了多物理场综合弱力测量系统建设方案, 依据引力波探测有效载荷配置方案悬挂双TM, 搭建航天器在轨运动学模拟平台, 并集成温度、磁场、引力场、电荷管理等多物理场监测控制, 实现在轨环境的等效复现. 为实现平动及转动多自由度的无拖曳耦合, 单个TM悬挂采用二级悬挂形式, 如图14所示. 为进一步提高

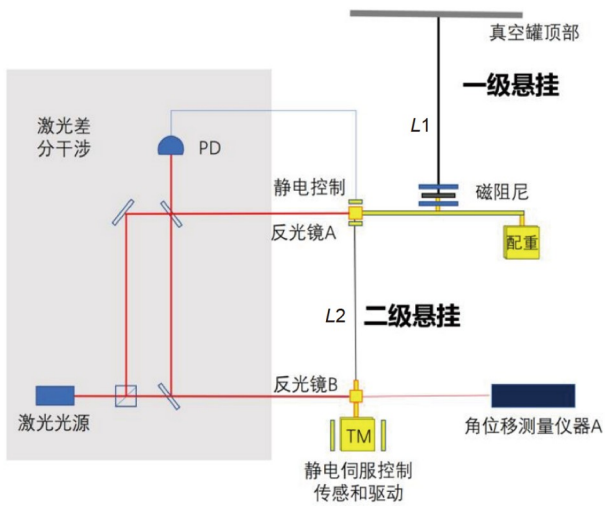


图 14 (网络版彩图)长春光机所设计的单质量二级扭摆示意图

Figure 14 (Color online) Schematic diagram of a single-TM two-level torsion pendulum designed by CIOMP.

其悬挂稳定性, 基于负反馈扰动主动抑制思路, 利用二级悬挂系统作为参考基准稳定一级悬挂系统形成闭环控制, 高效隔离测量平台微振动等关键噪声, 预期实现在mHz频段等效加速度测量分辨率达 $10^{-14} \text{ m s}^{-2} \text{ Hz}^{-1/2}$, 以支撑太极计划引力参考传感器的地面测试。

整套测试系统放置于长春光机所地下十米超温超净实验室内, 具备良好的微振动环境, 项目整体处于系统搭建阶段, 目前已完成真空系统等关键部组件研制, 如图15所示。未来, 将实现GRS及无拖曳在轨工作模式的等效测试。

7 总结与展望

本文从引力波探测器核心载荷引力参考传感器地面测试出发, 以引力参考传感器核心单元地面测试的必要性和重要性为动机, 综述了国内外用于引力参考传感器地面测试扭摆的研制和目前取得的成果。由特伦托大学研究团队研制的单质量一级扭摆达到了目前地面测试最低的等效TM加速度噪声水平, 但由于单质量一级扭摆的局限性, 四质量一级扭摆和二级扭摆将测量到更加具有代表性的加速度噪声。但是由于结构的复杂性和对外界环境的影响的敏感性, 目前还没有达到较低的等效TM加速度噪声水平。特提出以下几



图 15 (网络版彩图)长春光机所在建多物理场综合弱力测量系统及地下十米实验室

Figure 15 (Color online) Multi-physics comprehensive weak force measurement system and an underground ten-meter laboratory built by CIOMP.

点展望:

(1) 研制高 Q 值, 长时间的机械和热稳定性的扭摆将会成为未来扭摆研制的重点。提高机械加工和装配的精密性, 提高装置的对称性以进一步抑制重力四极矩并且减少对测试环境的敏感性有利于提高装置测量作用力或者力矩的敏感性。

(2) 测验环境更加严格和平稳有利于提高装置的敏感性。在测验装置的周围安装温度、磁场强度等传感器检测影响因素的波动性以进一步抑制较大的波动, 进一步抑制地面震动的影响, 如佛罗里达大学将测试装置安装在3 m深的混凝土坑中, INFN将测试装置安装到山洞中等措施都进一步抑制了地面震动的影响。

(3) 在地面测试中, 采用与空中探测器相同的电极分布方式及间距、加入电荷管理系统等模拟空间真实的工作环境将进一步提高测量噪声水平的代表性和真实性。

参考文献

- 1 Misner C W, Thorne K S, Wheeler J A. *Gravitation*. New York: W. H. Freeman and Company, 1973
- 2 Schutz B. *A First Course in General Relativity*. 3rd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2022
- 3 Weinberg S. *Gravitation and Cosmology: Principles and Applications of the General Theory of Relativity*. New York: John Wiley & Sons, 1972
- 4 Hulse R A, Taylor J H. Discovery of a pulsar in a binary system. *Astrophys J*, 1975, 195: L51
- 5 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. *Phys Rev Lett*, 2016, 116: 061102
- 6 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Astrophysical implications of the binary black hole merger GW150914. *Astrophys J Lett*, 2016, 818: L22
- 7 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. GW170817: Observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral. *Phys Rev Lett*, 2017, 119: 161101
- 8 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. GW190425: Observation of a compact binary coalescence with total mass $\sim 3.4 M$. *Astrophys J Lett*, 2020, 892: L3
- 9 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. GW170104: Observation of a 50-solar-mass binary black hole coalescence at redshift 0.2. *Phys Rev Lett*, 2017, 118: 221101
- 10 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. GW170814: A three-detector observation of gravitational waves from a binary black hole coalescence. *Phys Rev Lett*, 2017, 119: 141101
- 11 Danzmann K, Rüdiger A. LISA technology concept, status, prospects. *Class Quantum Grav*, 2003, 20: S1–S9
- 12 Danzmann K, LISA Study Team. LISA: Laser interferometer space antenna for gravitational wave measurements. *Class Quantum Grav*, 1996, 13: A247–A250
- 13 Hu W R, Wu Y L. The Taiji program in space for gravitational wave physics and the nature of gravity. *Natl Sci Rev*, 2017, 4: 685–686
- 14 Luo J, Chen L S, Duan H Z, et al. TianQin: A space-borne gravitational wave detector. *Class Quantum Grav*, 2016, 33: 035010
- 15 Gerndt R, Team L. LTP-LISA technology package: Development challenges of a spaceborne fundamental physics experiment. *J Phys-Conf Ser*, 2009, 154: 012007
- 16 Dolesi R, Bortoluzzi D, Bosetti P, et al. Gravitational sensor for LISA and its technology demonstration mission. *Class Quantum Grav*, 2003, 20: S99–S108
- 17 Cavalleri A, Dolesi R, Fontana G, et al. Progress in the development of a position sensor for LISA drag-free control. *Class Quantum Grav*, 2001, 18: 4133–4144
- 18 Touboul P, Foulon B, Willemenot E. Electrostatic space accelerometers for present and future missions. *Acta Astronaut*, 1999, 45: 605–617
- 19 Min J, Wang Z L, Li Y P, et al. Drop tower tests of Taiji-I inertial sensor substitute. *npj Microgravity*, 2021, 7: 25
- 20 Liu T Y, Wu Q P, Sun B Q, et al. Microgravity level measurement of the Beijing Drop Tower using a sensitive accelerometer. *Sci Rep*, 2016, 6: 31632
- 21 Gillies G T, Ritter R C. Torsion balances, torsion pendulums, and related devices. *Rev Sci Instrum*, 1993, 64: 283–309
- 22 Russano G. A torsion pendulum ground test of the LISA Pathfinder Free-fall mode. arXiv: 1609.00002
- 23 Bai Y, Li Z, Hu M, et al. Research and development of electrostatic accelerometers for space science missions at HUST. *Sensors*, 2017, 17: 1943
- 24 Luo Z R, Bai S, Bian X, et al. Gravitational wave detection by space laser interferometry (in Chinese). *Adv Mech*, 2013, 43: 415–447 [罗子人, 白嫻, 边星, 等. 空间激光干涉引力波探测. *力学进展*, 2013, 43: 415–447]
- 25 Team L I S. LISA Assessment Study Report. Technical Report, ESA. 2001
- 26 Meshksar N, Ferraioli L, Mance D, et al. Gravitational reference sensor front-end electronics simulator for LISA. *J Phys-Conf Ser*, 2017, 840: 012041
- 27 Nicolodi D. Toward a Third Generation Torsion Pendulum for the Femto Newton Level Testing of Free Fall in the Laboratory. Dissertation for Doctoral Degree. Trento: University of Trento, 2007.
- 28 Bassan M, De Marchi F, Marconi L, et al. Torsion pendulum revisited. *Phys Lett A*, 2013, 377: 1555–1562
- 29 Hueller M, Cavalleri A, Dolesi R, et al. Torsion pendulum facility for ground testing of gravitational sensors for LISA. *Class Quantum Grav*, 2002, 19: 1757–1765

- 30 Cavalleri A, Ciani G, Dolesi R, et al. A new torsion pendulum for testing the limits of free-fall for LISA test masses. *Class Quantum Grav*, 2009, 26: 094017
- 31 Luo J, Bai Y Z, Zhou Z B, et al. A ground testing device for space inertial sensors (in Chinese). PRC Patent CN200910061184.1, 2011-08-10 [罗俊, 白彦峥, 周泽兵, 等. 一种空间惯性传感器地面测试装置: 中国 CN200910061184.1, 2011-08-10]
- 32 Yin H. Investigation of the Surface Potential on the Conductor Base on an Electrostatic-controlled Torsion Pendulum (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015 [尹航. 基于静电控制扭摆方案的导体表面电势测量研究. 博士学位论文. 武汉: 华中科技大学, 2015]
- 33 Shaul D N A, Araújo H M, Rochester G K, et al. Charge management for LISA and LISA pathfinder. *Int J Mod Phys D*, 2008, 17: 993–1003
- 34 Yang F, Bai Y, Hong W, et al. Investigation of charge management using UV LED device with a torsion pendulum for TianQin. *Class Quantum Grav*, 2020, 37: 115005
- 35 Carbone L, Cavalleri A, Ciani G, et al. Torsion pendulum facility for direct force measurements of LISA GRS related disturbances. AIP Conf Proc, 2006, 873: 561–565
- 36 Carbone L, Cavalleri A, Dolesi R, et al. Improved torsion pendulum for ground testing of LISA displacement sensors. arXiv: [gr-qc/0411049](https://arxiv.org/abs/gr-qc/0411049)
- 37 Cavalleri A, Ciani G, Dolesi R, et al. Direct force measurements for testing the LISA Pathfinder gravitational reference sensor. *Class Quantum Grav*, 2009, 26: 094012
- 38 Vitale S, Dolesi R. Technology of free fall for LISA. AIP Conf Proc, 2000, 523: 231–237
- 39 Ciani G, Chilton A, Apple S, et al. A new torsion pendulum for gravitational reference sensor technology development. *Rev Sci Instrum*, 2017, 88: 064502
- 40 Chilton A, Shelley R, Olatunde T, et al. The UF torsion pendulum, a LISA technology testbed: Sensing system and initial results. *J Phys-Conf Ser*, 2015, 610: 012038
- 41 Apple S M, Chilton A, Olatunde T, et al. University of Florida torsion pendulum for testing key LISA technology. In: Proceedings of AIAA SPACE and Astronautics Forum and Exposition. Orlando, 2017
- 42 Carbone L, Cavalleri A, Dolesi R, et al. Achieving geodetic motion for LISA test masses: Ground testing results. *Phys Rev Lett*, 2003, 91: 151101
- 43 Tu Y, Zhao L, Liu Q, et al. An abnormal mode of torsion pendulum and its suppression. *Phys Lett A*, 2004, 331: 354–360
- 44 Fan X D, Liu Q, Liu L X, et al. Coupled modes of the torsion pendulum. *Phys Lett A*, 2008, 372: 547–552
- 45 Hu Z K, Luo J, Wang W M. Optimum configuration of determining the gravitational constant G with four attracting masses. *Int J Mod Phys D*, 2002, 11: 913–920
- 46 De Marchi F, Bassan M, Pucacco G, et al. Analytic model for the rototranslational torsion pendulum. In: Proceedings of the 9th LISA Symposium. Paris, 2013
- 47 Tu H B, Bai Y Z, Zhou Z B, et al. Performance measurements of an inertial sensor with a two-stage controlled torsion pendulum. *Class Quantum Grav*, 2010, 27: 205016
- 48 Tu H B, Bai Y Z, Zhou Z B, et al. Electrostatic-control performance measurement of the inertial sensor with a torsion pendulum. *J Phys-Conf Ser*, 2009, 154: 012036
- 49 Zhou Z B, Liu L, Tu H B, et al. Seismic noise limit for ground-based performance measurements of an inertial sensor using a torsion balance. *Class Quantum Grav*, 2010, 27: 175012
- 50 Tan D Y, Yin H, Zhou Z B. Seismic noise suppression for ground-based investigation of an inertial sensor by suspending the electrode cage. *Chin Phys Lett*, 2015, 32: 090401
- 51 Stanga R, Marconi L, Bagni G, et al. Ground based 2DoF test for LISA and LISA PF. *J Phys-Conf Ser*, 2006, 32: 180–185
- 52 Su Y, Heckel B R, Adelberger E G, et al. New tests of the universality of free fall. *Phys Rev D*, 1994, 50: 3614–3636
- 53 De Marchi F, Pucacco G, Bassan M, et al. “Quasi-complete” mechanical model for a double torsion pendulum. *Phys Rev D*, 2013, 87: 122006
- 54 Marconi L, Stanga R, Bassan M. A double torsion pendulum with two cascade soft degrees of freedom. *J Phys-Conf Ser*, 2012, 363: 012049
- 55 Marconi L, Stanga R, Bassan M, et al. PETER: A hardware simulator for the test mass-GRS system of LISA pathfinder. In: Proceedings of the 9th LISA Symposium. Paris, 2013
- 56 Stanga R, Marconi L, Grimani C, et al. Double degree of freedom pendulum facility for the study of weak forces. *J Phys-Conf Ser*, 2009, 154: 012032

- 57 Bassan M, Cavalleri A, De Laurentis M, et al. Actuation crosstalk in free-falling systems: Torsion pendulum results for the engineering model of the LISA pathfinder gravitational reference sensor. *Astropart Phys*, 2018, 97: 19–26
- 58 Bassan M, De Laurentis M, De Rosa R, et al. Improving sensitivity and duty-cycle of a double torsion pendulum. *Class Quantum Grav*, 2019, 36: 125004

Research progress on torsion pendulum in ground testing of gravitational reference sensor: a review

LI HuaDong¹, GAO ZhiYong² & WANG Zhi^{1,2*}

¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China

² School of Fundamental Physics and Mathematical Sciences, Hangzhou Institute for Advanced Study, University of Chinese Academy of Sciences (UCAS), Hangzhou 310024, China

*Corresponding author (email: wz070611@126.com)

Space gravitational wave detection has become a hotspot in international cosmological research. The European and American Laser Interferometer Space Antenna space gravitational wave detection program and China's Taiji and Tianqin space gravitational wave detection programs are rapidly developing with simultaneous cooperation and competition. As the core load for space gravitational wave detection, gravitational reference sensors must undergo corresponding ground testing before being launched into orbits. To understand the research progress of ground testing of gravitational reference sensors using a torsion pendulum at home and abroad, this article briefly introduces gravitational reference sensors and their torsion pendulum-based test methods, summarizes the research progress of the use of torsion pendulums at home and abroad, and provides a review of the use of torsion pendulums to test gravitational reference sensors. The development trend of gravitational reference sensors for ground testing is proposed to provide a reference for their development and ground testing for the Taiji space gravitational wave detection program.

space gravitational wave detection, gravitational reference sensor, torsion pendulum, ground testing

PACS: 04.80.Nn, 07.07.Df, 04.80.Cc

doi: [10.1360/SSPMA-2024-0095](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2024-0095)