

引力波探测科学任务关键技术

吴树范, 王楠, 龚德仁

(上海交通大学 航空航天学院, 上海 200240)

摘要: 介绍了引力波的基本概念, 叙述了引力波产生的原因; 调研了国内外地面和空间引力波探测的典型任务, 并分析指出了地面与空间引力波探测任务的差别; 分析了空间引力波探测任务的相关关键技术, 阐释了空间引力波探测未来的技术发展方向; 指出引力波探测任务的实施, 对惯性导航、地球科学、高精度卫星平台建设等应用领域也将发挥积极的作用, 对提升我国空间科学和深空探测的技术水平具有重要意义。

关键词: 引力波; 科学探测任务; 无拖曳控制; 高精度测量; 长基线编队

中图分类号: V11

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2020)02-0118-10

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2020.20190402001

引用格式: 吴树范, 王楠, 龚德仁. 引力波探测科学任务关键技术[J]. 深空探测学报, 2020, 7(2): 118-127.

Reference format: WU S F, WANG N, GONG D R. Key technologies for space science gravitational wave detection[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(2): 118-127.

引言

引力是宇宙物质之间的一种基本作用力。引力波就是引力扰动在空间的传播, 像电磁波一样, 引力波携带能量在空间以真空光速传播^[1]。

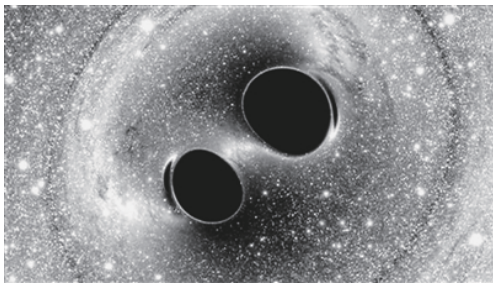


图1 黑洞碰撞想象图
Fig. 1 Image of black hole collision

引力波是时空弯曲中的涟漪, 通过波的形式从辐射源向外传播, 这种波以引力辐射的形式传输能量。正是引力作用支配着宇宙的形成和演化, 地球上冰山运动、板块漂移, 所引起地表质量变化揭示着地球演化信息, 认识宇宙、了解地球, 需要在漫长的时空中捕捉到引力波极其微弱的信号^[2]。

双星体系公转, 中子星自转, 超新星爆发及理论预言的黑洞的形成、碰撞和捕获物质等过程, 都能辐射较强的引力波^[3-4], 如图1所示。暗物质和暗能量的存在也都是通过引力效应被观测和发现的, 对暗物质属性和暗能量本质的理解离不开对引力本质的认识^[5]。引

力波探测还可以定量地检验广义相对论, 甚至有可能发现广义相对论的适用范围, 指引超越广义相对论引力理论的发展^[6]。

从2015年LIGO (the Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory) 探测到第1个引力波事件开始, 人类在引力波探测上取得了很大进展, 截至2018年11月, 人类已经探测到超过10个引力波事件。尤其是2017年由两颗中子星并合造成的引力波事件GW170817具有划时代的意义, 此次观测实现了引力波与电磁波的多信使观测, 其后续研究解决了一系列天文学问题。

引力波的精确测量将是未来基础科学领域最前沿和重大的研究课题, 将给相关技术领域带来革命性突破, 促使人类更好地认识量子引力、时空结构、物质起源和宇宙起源等基本问题。

1 引力波的探测范围

引力波承载了引力相互作用的基本自由度, 探测和研究引力波物理为揭示宇宙演化、基础物理学规律和相对论天体物理动力学提供了新的方法和手段。宇宙中存在大量的引力波源, 包括起源于宇宙早期暴胀、反弹的原初引力波、宇宙早期相变产生的相变引力波、到黑洞和中子星并合产生的引力波等, 覆盖了 $10^{-18} \sim 10^4$ Hz的宽阔频段, 如图2所示。不同频段的引力波起源不一样, 对应的科学目标也不同。

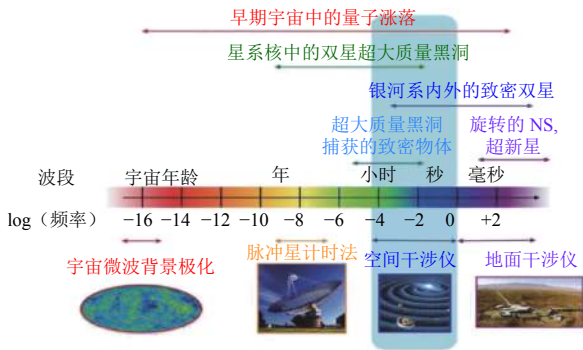


图 2 不同波段的引力波
Fig. 2 Different frequencies of Gravitational Waves

在高频段（约10 Hz以上），恒星级致密天体（如黑洞、中子星等）并合可产生周期在毫秒量级的引力波，可为检验广义相对论、研究黑洞性质、探索致密双星起源、研究极端条件下的物质性质、加深对星动力学及双星演化的理解^[7]。

在毫赫兹频段（ 10^{-3} Hz频段），大质量黑洞并合、大质量黑洞俘获其它致密天体、双致密天体绕转、早期宇宙相变和宇宙弦等潜在波源都能够产生较强的、可探测的引力波。毫赫兹频段引力波探测的研究对象囊括了由近到远、由小到大的极为丰富的引力波源，探测范围可以覆盖整个宇宙空间，对部分波源有各种引力波探测方式中最高的信噪比和最多的信号周期。毫赫兹频段引力波探测将为银河系内致密双星系统的形成与演化、恒星级双黑洞的天体物理过程、极端质量比旋近过程、大质量黑洞的演化过程、检验引力理论、研究宇宙演化、通过随机引力波背景研究早期宇宙、探测并研究未知引力波源等提供无法替代的关键信息，具有重大科学意义。

在纳赫兹频段（ 10^{-9} Hz频段），星系中心几亿到

100亿倍太阳质量的超大质量黑洞合并、宇宙弦及残余引力波的高频部分对应纳赫兹频段的引力波。这部分引力波窗口具有丰富的天文学内容和极高的研究价值。由于星级黑洞的并合对于宇宙结构形成和演化起着主导的作用，这些引力波源的探测则直接打开了探索宇宙结构的引力波窗口^[8]。在基础物理方面，纳赫兹频段引力波探测可以获得其它引力波探测技术难以测量的引力波偏振和色散等重要信息，从而提供了进一步检验引力理论的可能性。

在阿赫兹到飞赫兹频段（ $10^{-18} \sim 10^{-15}$ Hz），宇宙极早期的时空量子涨落产生原初引力波，它与LIGO探测到的黑洞并合产生的引力波完全不同。原初引力波的发现将从另一方面验证爱因斯坦的引力波理论，更重要的是探测原初引力波是对宇宙起源理论，如暴涨理论、宇宙反弹、循环理论等最强有力的实验检验，对研究宇宙起源与演化的基本物理过程具有突破性意义，同时也是基础物理学（例如CPT对称性检验等核心课题）的重要研究手段^[9]。

不同频段的引力波可以为基础物理、天文学、宇宙学研究提供不可或缺的、且无法从其它手段获取的关键信息。通过掌握引力波探测第一手数据，将为我国在相关领域取得突破性贡献、占领引力波研究前沿奠定基础。

2 引力波探测任务与发展

1687年牛顿发现万有引力定律，1915年爱因斯坦建立相对论，20世纪50年代理查德·费曼和赫尔曼·邦迪证明引力波是可以测量的波。自此，人类开启了引力波探测的征程。不同类型的引力波探测任务的探测频段有所差异，如表1所示。

表 1 FEED和胶体推进器性能指标

Table 1 Performance of FEED and colloidal thrusters

类型	任务	发起者	探测频段	目前状态
地面引力波探测	GEO600	德国	5 Hz~1.5 kHz	正在建造中
	KAGRA	日本	10~103 Hz	正在建造中
	VIRGO	意大利	100~300 Hz	与LIGO共享数据，联合发布消息
	LIGO	美国	100~300 Hz	已探测到多次引力波事件
	LISA	欧洲航天局	$10^{-3} \sim 10^{-1}$ Hz	预计于2035年发射，已成功发射其先驱任务LISA Pathfinder
空间引力波探测	DECIGO	日本	0.1~10 Hz	预计于2027年发射升空
	天琴计划	中国	0.1 MHz~1 Hz	预期在2030年左右部署我国主导的空间引力波探测器编队
	太极计划	中国	$1 \times 10^{-4} \sim 1.0$ Hz	预计2033年发射探测星
脉冲星测时阵列引力波探测	IPTA	澳大利亚、美国、欧洲	$10^{-9} \sim 10^{-7}$ Hz	正在运行
原初引力波探测	BICEP2望远镜	美国	$10^{-18} \sim 10^{-15}$ Hz	正在运行
	阿里计划	中国	$10^{-18} \sim 10^{-15}$ Hz	预计于2020年完成望远镜研制

2.1 地面引力波探测任务

1) 德国GEO600

GEO600是位于德国汉诺威附近的地面干涉引力波

探测器，如图3（a）所示^[10]。GEO600项目旨在用长600 m的激光干涉仪直接探测5 Hz~1.5 kHz的引力波。目前，GEO600仍在建造中。

GEO600引力波探测器的特点在于其“双向循环”技术,即利用高反射镜,激光自身产生构造性叠加,从而增强激光的功率,称为“功率循环”;利用附加反射镜,信号自身产生叠加,实现“信号循环”。而在玻璃光纤中悬挂反射镜的技术也是GEO600引力波探测器的关键性技术突破之一。

2) 日本KAGRA

日本“神冈”(Kamioka Gravitational Wave Detector, KAGRA)引力波探测器是东京大学宇宙射线研究所发起的引力波探测项目^[11]。KAGRA是一个臂长为3 km的引力波探测器,如图3(b)所示,探测波段为 $10\sim 10^3$ Hz。其目标是以10倍的信噪比探测到240 Mpc远的双星合并产生的引力波^[12]。目前仍在建设中。

KAGRA探测器的前身是大型低温引力波望远镜,先后有TAMA300和CLIO100两个项目为该探测器的构建提供先行技术探索。

3) 意大利VIRGO

VIRGO是位于意大利比萨附近的臂长为3 km的激光干涉引力波天文台,如图3(c)所示^[13]。VIRGO的探测器与外界干扰隔绝,激光束在真空中工作,其探测波段为 $100\sim 300$ Hz。自2007年以来,VIRGO和LIGO已经同意共享并联合分析探测器记录的数据,并联合发布结果^[14]。

因为干涉仪不是定向的,并且所需要探测的信号是微弱的、罕见的、偶然性的,因此多个仪器同时检测一个引力波是必要的,以确认信号的有效性和推断其来源的角度方向。

4) 美国LIGO

LIGO是借助于激光干涉仪来探测来自宇宙深处引力波的大型研究仪器^[15]。2016年2月11日,LIGO团队宣布第一次成功探测到引力波,并因此获得2017年诺

贝尔物理学奖。LIGO的探测波段为 $100\sim 300$ Hz。LIGO由两个干涉仪组成,每一个都带有两个4 km长的臂并组成L型,分别位于相距3 000 km的南海岸Livingston和西北海岸Hanford^[16],如图3(d)所示^[17]。aLIGO是高级LIGO项目,将完全升级引力波干涉仪,使这些仪器具有应该使引力波探测成为常规事件的灵敏度。

2.2 空间引力波探测任务

空间引力波探测器对中低频段较敏感,面对的波源特征所对应的天体质量和尺度远大于地面探测器,视野也更宽广。

1) 欧洲航天局LISA

LISA(The Laser Interferometer Space Antenna)是由美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)和欧洲航天局(European Space Agency, ESA)合作的引力波探测计划。LISA将探测来自宇宙遥远引力波源的低频 $10^{-3}\sim 10^{-1}$ Hz且微弱的引力波^[17]。LISA由3个相同的航天器构成为边长为 5×10^6 km的等边三角形,每颗卫星分别有2个立方体质量块。LISA对光束长度的测量精度必须达到微米级,而且高精度测量的同时还必须保持3颗卫星的构型,如图4(a)所示。

考虑到LISA计划涉及平台和载荷技术难度大,ESA启动了LISA技术验证计划,即LISA Pathfinder(LPF),如图4(b)所示。LISA Pathfinder是LISA的先驱任务,即要保证它内部的两个金铂立方体处于自由落体状态,并用激光干涉测量期间距离的微小变化,以验证未来eLISA将要用到的技术是否切实可行。这些技术包括微推进器和无拖曳控制技术等,同时还要检验激光器和光学元器件等在空间环境中的寿命和可靠性。

ESA于2015年12月3日成功发射了LPF技术验证卫星,LPF是目前世界上唯一在轨验证过引力波关键技术的项目。

2) 日本DECIGO

DECIGO(DECi-hertz Interferometer Gravitational wave Observatory)是日本发起的空间引力波探测计划^[18],主要目标是探测中频引力波,预计于2027年完成。DECIGO由3颗相距1 000 km的卫星组成,如图4(c)所示。DECIGO通过激光干涉仪精确测量引力波,探测频段介于LISA和地面探测器之间($0.1\sim 10$ Hz)。DECIGO的关键技术有:激光干涉仪精确测量和长基线编队飞行。

类似于LISA,DECIGO也有一个里程碑式的先驱任务DECIGO Pathfinder(DPF)。DPF只有一颗卫

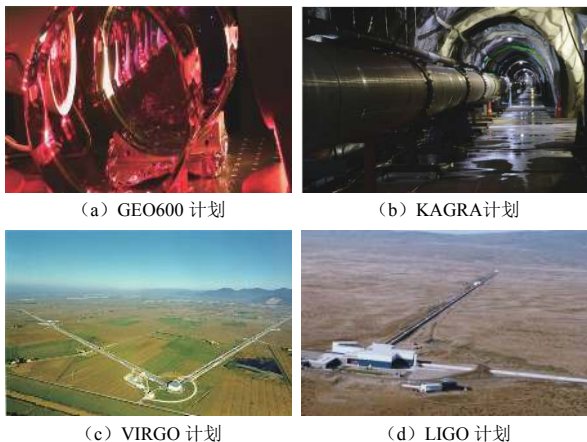


图3 地面引力波探测计划

Fig. 3 Ground detection project of gravitational wave

星，位于高度为500 km的轨道上，臂长为30 cm。

3) 中山大学“天琴计划”

“天琴计划”是由中山大学发起的空间激光干涉引力波探测项目，于2015年7月开始启动。该项目计划在距离地球表面 10^5 km高度的同一近圆轨道面内放置3颗航天器，探测0.1 mHz~1 Hz频段范围的引力波，各个航天器之间相位角相差 120° ，形成等边三角形^[19]，如图4 (d) 所示。

4) 中科院“太极计划”

中国科学院引力波“空间太极计划”的初步规划是以中欧合作模式发射二组卫星作为引力波探测激光干涉空间天线阵，在科学目标各自有所侧重的同时，进行相互验证^[20,28]。“太极计划”预计在2033年前后将发射由位于等边三角形顶端三颗卫星组成的引力波探测星组，用激光干涉方法进行中低频波段 ($1 \times 10^{-4} \sim 1.0$ Hz) 引力波的直接探测，如图4 (e) 所示。

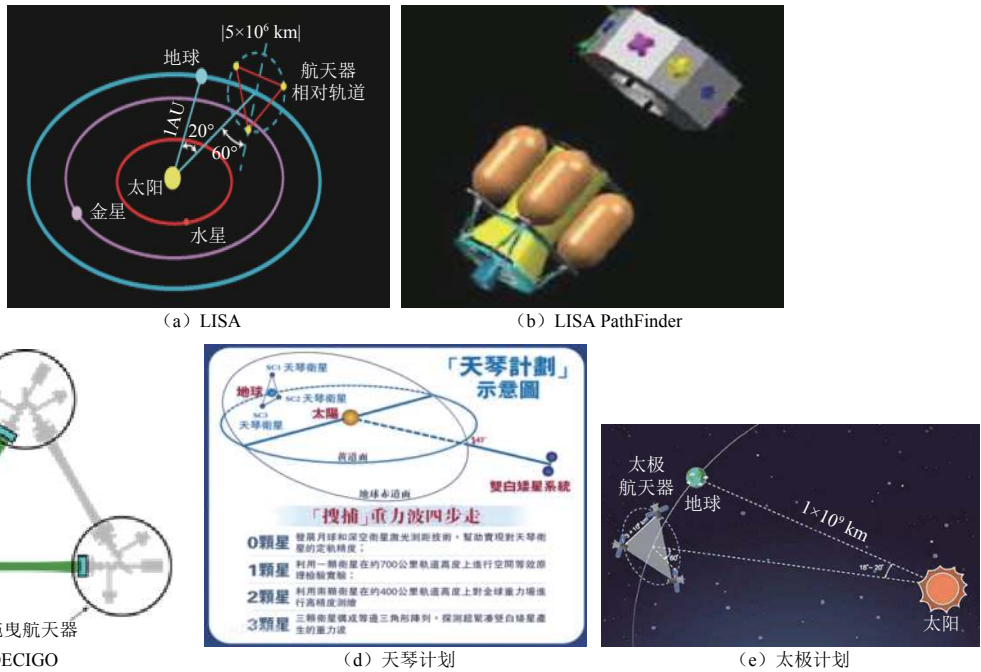


图 4 空间引力波探测计划
Fig. 4 Space detection project of gravitational wave

2.3 脉冲星测时阵列引力波探测任务

脉冲星测时阵列探测引力波始于20世纪80年代，但由于当时毫秒脉冲星尚未发现，而且仪器设备性能还不能达到要求，长期以来这个领域相对较冷。2005年Jenet等证明如果提高电子学设备的性能，并增加对脉冲星的观测时间，有望在5年之内直接探测到来源于星系质量黑洞并合的引力波。该工作让相关研究人员意识到了脉冲星测时阵列探测引力波的可行性和重要性。传统射电天文的“强国”迅速成立了相应的工作组来追求这一科学目标。澳大利亚团队依托于帕克斯望远镜成立了PPTA，美国团队依托于Greenbank和Arecibo成立了Nanograv，而欧洲团队则依托于5个100 m口径的望远镜成立了EPTA。这3个团队又一起组成了国际脉冲星测时阵列合作组 (IPTA)。经过20余年发展，目前脉冲星测时阵列的探测能力在逐渐提高，已经逼近了探测极限。

2.4 原初引力波探测任务

国际上，目前正在进行的地面CMB (Cosmic Microwave Background) 实验包括：位于南极的BICEP系列望远镜、SPTPol望远镜，以及位于智利Atacama沙漠的POLARBEAR系列望远镜、CLASS、ACTPol项目等。空间CMB实验方面，最近的Planck卫星已经于2013年正式结束运行。2014年，美国能源部和自然科学基金委员会“粒子物理学项目优化小组”发布了未来10~15年美国高能物理学发展规划报告，提出5个未来高能物理学的核心课题，其中4个都与CMB的研究直接相关。美国能源部和自然科学基金委计划投入约2亿美元，为完成这些目标开发新的技术，建设下一代CMB望远镜，并培养下一代科学家。目前为止CMB观测实验尚未探测到原初引力波产生的B模式偏振，但给出了张标比 (描述原初引力波大小的物理量) 的上限值。2014年3月，美国BICEP2合作组通过

对CMB偏振B模式的测量宣称发现了原初引力波，但进一步的研究表明，该测量结果主要来自于银河系本身“前景”辐射。进一步提高仪器的灵敏度，扩大可观测天区，实现南、北天区CMB的协同观测迫在眉睫。

3 空间引力波探测中的关键技术

空间引力波探测通常是由卫星编队内部自由漂浮的测试质量之间的激光干涉测量来实现。因此所涉及的关键技术与地面引力波实验有所不同，空间探测原理所需的探测技术涉及面更广泛，比如，在mHz频段处，惯性传感器残余扰动力要优于 $10^{-15} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$ 量级，星间激光测距精度要达到 $1 \text{ pm} \cdot \text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$ 量级，控制航天器位移控制精度要优于 $1 \text{ nm} \cdot \text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$ ，微牛顿推进系统推力精度要达到 $0.1 \text{ } \mu\text{N} \cdot \text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$ 。下面对空间引力波探测关键技术进行详细说明。

3.1 无拖曳控制技术

无拖曳是指在卫星腔体内放置若干个自由运动的测试质量（Test Mass, TM），测试质量不受大气阻力、太阳辐射压力等外界干扰，几乎运行在纯重力轨道上，通过推进器产生推力来使卫星跟随测试质量运动，即通过控制作用抵消太空环境对卫星运动的影响^[21]，如图5所示。超高精度卫星无拖曳控制可以降低航天器平台的残余扰动，消减卫星系统扰动对测量的影响，给卫星提供极低的干扰环境^[22]。无拖曳控制系统为引力波探测卫星提供了超静超精超稳平台，屏蔽了来自太阳风或太阳光压等细微等非引力扰动，提高了探测器系统的信噪比，保障了探测器系统灵敏度。

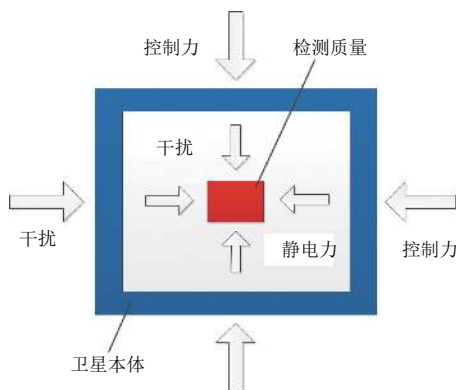


图5 无拖曳控制系统示意图

Fig. 5 Diagram chart of drag-free control system

由于无拖曳卫星在空间基础科学和重力场测量等领域的重要应用，无拖曳控制技术吸引了越来越多学者们的关注，国内外众多学者采用了PID、最优控制、模型预测控制、内嵌模型控制、鲁棒控制和定量反馈

控制等方法对无拖曳控制技术进行研究。

以卫星内含两个测试质量的LISA Pathfinder为例，其无拖曳基本要求是在1~30 MHz测量带宽下，TM沿敏感轴的残余差分加速度小于 $3 \times 10^{-15} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$ 。LISA Pathfinder无拖曳控制系统的动力学和运动学由3个相互连接的物体决定：测试质量1、测试质量2和航天器本体，如图6所示。

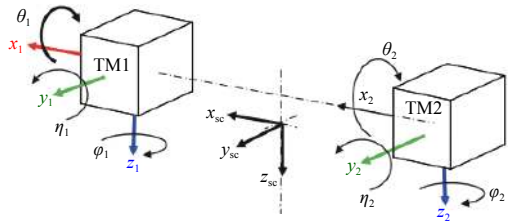


图6 测试质量与航天器之间的几何关系

Fig. 6 Geometry between TM and spacecraft

对于这样复杂的力学系统，其动力学关系中有18个耦合的状态向量，需要采取合适的方法进行分解。首先按照控制对象将控制分为两部分：6维无拖曳控制和6维悬浮控制（针对测试质量）；3维姿态控制和3维轨道控制（针对卫星）。其次，使用频率分离思想对控制系统进行分解，对于姿态控制系统，无拖曳控制回路具有快响应，可以近似认为不存在；对于无拖曳控制系统，姿态回路变化很慢，所以其动力学对于闭环回路影响很小，因此两个系统可以解耦。最后，在控制时选取输入解耦的控制策略，通过控制将内部动力学解耦，从而动力学方程解耦为多个单输入单输出控制通道。

Wu等^[23]针对LPF的无拖曳控制问题设计了基于定量反馈理论的控制方法，提出了不同性能指标，考虑系统的不确定性，在Nichols图表中表示性能指标，并将其转化成一组设计准则。设计准则表示为每个单独控制轴的控制器的灵敏度和互补灵敏度传递函数的约束，再使用定量反馈技术设计和调整控制器以保证响应有界，在执行性能和稳定性之间的权衡，并根据可用设计余量来满足不同的性能规范。

3.2 测量技术

引力波探测对星间测量提出了严苛的要求，包括超高精度星间激光干涉测量、超高灵敏度惯性传感器测量等。

1) 超高精度星间激光干涉测量技术

激光干涉系统是引力波探测器的核心设备，如图7所示。引力波信号对干涉腔内的光调制，使多个光腔输出信号的相互“迫频”改变，从而探测出引力波信号^[24]。

在空间中进行引力波探测时，由于航天器之间的距离非常远（如LISA计划中的3颗航天器相距500万km），因此需要更加精密的激光干涉系统，以满足探测需要。

空间引力波探测要求在间距为十万到百万km的超长基线上实现激光干涉测量噪声达到 $1 \text{ pm} \cdot \text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$ 量级。星间激光干涉测量研究包括超长基线-超高精度激光干涉测量总体方案设计、干涉仪、激光器及其稳频、望远镜、指向与控制、弱光锁相、超稳时钟、星间激光测距系统集成与性能测试研究等^[25]。

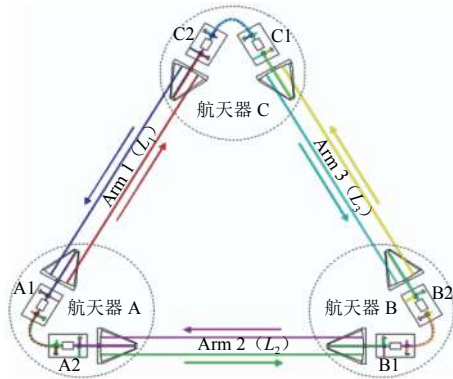


图7 星间激光干涉测示意图

Fig. 7 Flowchart of trajectory generation algorithm

具体包括针对空间引力波探测目标完成超长基线星间激光干涉测量的总体方案设计、论证与研制；空间引力波探测中的星间激光干涉测距系统总体方案设计与指标论证；激光干涉测量数值与半物理仿真，开展激光干涉测量在轨实验方案以及评估技术研究；干涉仪关键技术研究，包括高精度激光干涉仪研制与测试，一体化粘结工艺与性能测试，光束位置空间精密测量与多自由度高精度定位控制技术，纳弧度/皮米级多自由度角度/位移干涉仪光读取技术，干涉仪性能测试与评估等。

例如，在频段 $1 \text{ mHz} \sim 0.1 \text{ Hz}$ 内，一体化超稳干涉仪光学平台满足空间应用需求，通过典型卫星环境模拟试验，光束位移定位精度优于 $30 \mu\text{m}$ 、角度定位精度优于 $30 \mu\text{rad}$ ，位移测量噪声小于 $10 \text{ pm} \cdot \text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$ ，角度测量噪声小于 $10 \text{ nrad} \cdot \text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$ 。

2) 超高灵敏度惯性传感器技术

超高灵敏度惯性传感器可以检测卫星平台与检测质量之间的位置信息，在经过算法处理后产生微推进器的执行指令，实现无拖曳控制。在高精度静电惯性传感器中，检验质量充电会引入额外的加速度噪声，对高精度的无拖曳控制产生不利影响。为了发展更高精度的惯性传感器，需要研究检验质量上所带电荷对惯性传感器的影响，并且通过一定的手段将检验质量

上积累的电荷去除，使检验质量充电所引入的加速度噪声控制在可接受水平内^[26]。惯性传感器研究包括惯性传感器设计理论与测试评估、敏感探头、电容位移传感与静电控制、电荷管理、锁紧与释放、真空维持、性能测试与评估技术等。

具体包括针对空间引力波探测目标完成惯性传感器的设计、指标分析与论证、测试方法和技术，完成惯性传感器各项扰动力的测试与评估。主要研究包括：空间引力波探测中的惯性传感器扰动力建模和分析，惯性传感器系统指标体系构建、论证与优化；空间引力波探测中惯性传感器在轨运行的数值模拟与半物理仿真，开展惯性传感器在轨功能测试与性能评估方法研究；高精度惯性传感器地面测试方法、技术与地面测试系统研制；空间引力波探测中环境因素对惯性传感器的各项扰动，如残余气体分子及宇宙射线粒子碰撞、温度以及其梯度、电场和磁场及其涨落、航天器梯度耦合等效应的测试与评估等。

所需完成残余扰动达到 $10^{-15} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$ 量级；惯性传感器地面综合测试平台，性能测试评估能力达到 $10^{-14} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$ ；完成温度及其梯度、电场、磁场及其梯度、残余气体、航天器引力梯度等对惯性传感器影响的测试与评估，评估精度达到 $10^{-15} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$ 量级（频段为 $1 \text{ mHz} \sim 0.1 \text{ Hz}$ ）。

由于篇幅有限，更多有关每一部分测量技术的细节本文不展开。

3.3 精密编队技术

精密编队是无拖曳控制的基础，为科学目标深化论证、任务分析及数据处理提供支撑。引力波的空间探测需要多颗卫星通过空间长基线（通常百万km量级）的编队飞行协同工作来实现，目前提出的各引力波探测计划基本都是利用3颗卫星组成编队通过协同工作来实现的。如，LISA任务的3颗编队卫星运行于距离太阳约1 AU的地球轨道上，滞后于地球 20° 左右，如图8(a)所示。卫星入轨后，卫星编队需在指定空间内形成一定构型，编队中的每颗卫星通过接收来自其它两颗卫星的激光来进行通信与测量，如图8(b)所示。其中涉及到的关键问题有：

1) 编队构型建立与维护

执行引力波探测任务的卫星编队在轨道上始终受着空间环境的各种摄动力作用，如：地球形状非球形和质量不均匀产生的附加引力以及太阳光照射压力等。在摄动力的作用下，其周期、偏心率、升交点赤经和倾角等不断地变化。在考虑太阳、地球对引力波探测卫星的综合引力作用，对3颗卫星之间的相对运动

几何关系进行建模后,其次要考虑编队构型的建立与维持,确保卫星之间相对位置维持在特定的空间平面内。根据空间引力波探测需求,开展航天器科学轨道及其编队构型的设计、优化研究;开展航天器系统的发射、转移、构形初始化等全周期轨道设计与优化;完成在轨复杂空间环境分析以及对空间引力波探测任务影响的评估。

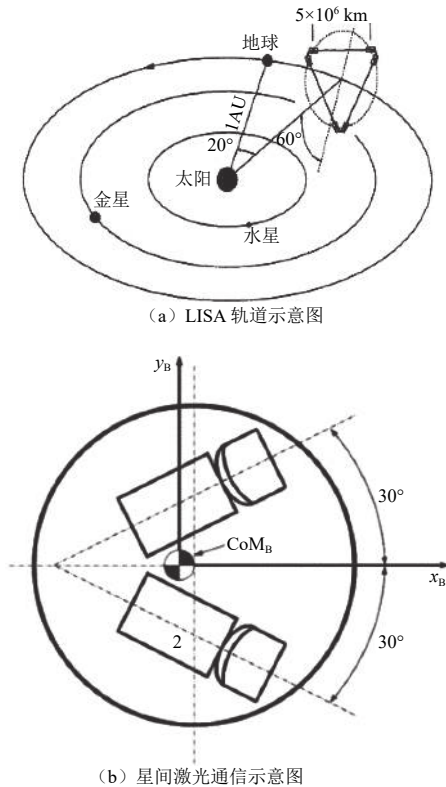


图8 LISA编队与星间通信示意图

Fig. 8 LISA satellite formation and laser communication

精密编队控制的航天器位移控制精度优于 $1 \text{ nm} \cdot \text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$, 频率范围 $1 \text{ mHz} \sim 0.1 \text{ Hz}$; 建立航天器无拖曳与编队耦合控制仿真平台,臂长变化范围优于1%,航天器姿态控制精度优于 $1 \times 10^{-7} \text{ rad} \cdot \text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$ 。

2) 激光链路捕获与跟踪

在建立星间激光链路时,要考虑超前指向角预报。因为百万km级别的星间距离下,激光传输存在延时(10 s左右)影响,所以需要综合当前入射角和预报未来时刻的卫星方位,计算超前指向角。并综合考虑导航定位误差、轨道预报误差、指向误差等对链路对准的影响。在进行链路捕获与保持时,综合考虑卫星平台姿态控制与激光链路指向控制的耦合,为引力波探测提供稳定的测量控制基础综合考虑激光传播延时的影响,在链路捕获后,采用合适的控制方法,设计使激光链路的稳定跟踪卫星姿态与望远镜镜筒指向控

制器。保证星间光束捕获范围不小于 1 mrad ,角度测量噪声小于 $5 \text{ nrad} \cdot \text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$,精度优于 $10 \text{ nrad} \cdot \text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$ 。

3.4 微推技术

引力波探测需要亚微牛级分辨率推进器来提供极低的干扰环境,需要小且精的推力。微推进器喷气产生这样的推力和力矩以抵消外界环境干扰在卫星平台上产生的影响,从而获得引力波探测实验要求的低扰动水平,其推力精度可以达到微牛顿量级水平。目前国内外正在大力开展研究的微推进系统有如下几种:微型冷气推进器、场发射电推进器(Field Emission Electric Propulsion, FEPE)、胶体推进器、离子微推进器。微推进器需要提供具有严格低推力、低噪音、低功耗等要求的性能,来达到探测需求。

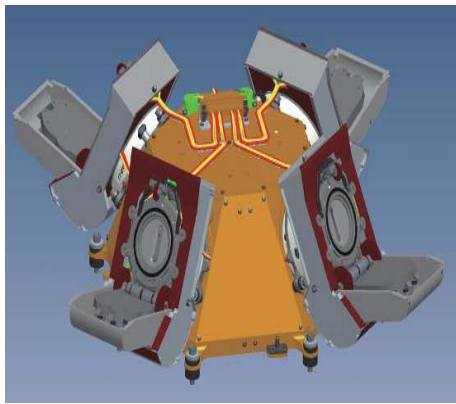
LISA的先驱任务——LISA Pathfinder在初期研发阶段就采用了FEPE和胶体推进器来实现微推的目标,相关参数如表2所示。其中FEPE被用作AOCS(Attitude Orbit Control System)的标称执行机构,只有在该系统发生双重故障时,胶体推进器才会工作。

表2 FEPE和胶体推进器性能指标

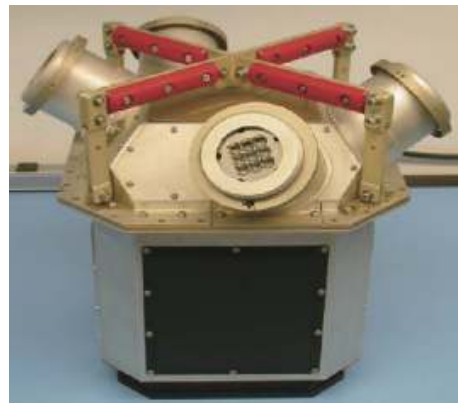
Table 2 Performance of FEPE and colloidal thrusters

推进参数	FEPE推进器	胶体推进器
推力范围/ μN	0.1 ~ 100	5 ~ 30
推力精度/ μN	≤ 0.1	≤ 0.1
推力噪声/ $(\mu\text{N} \cdot \text{Hz}^{-\frac{1}{2}})$	≤ 0.1	≤ 0.1
推力响应时间	$\leq 340 \text{ ms}$	$\leq 100 \text{ s}$
比冲量/比推力/s	≥ 4000	≥ 150
推进器组功耗/W	55	25
推进器组质量/kg	13.7	14.6
生命周期/d	250	90
总冲量/(Ns)	2000	300

LPF配置有12个FEPE推进器,分成3组,每组4个,按指定的几何形状安装,如图9(a)所示。FEPE作为一种以液体为推进剂的场发射离子推进器,通过将由场发射产生的金属离子加速到很高的速度(约为 $100 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$)来产生推力。在场发射电力推进中,直接从液态金属中提取正离子,在高真空条件下利用静电力对其加速。对于每组推进器,有2个中和器和1个功率控制单元冷冗余,所以总共有3个功率控制单元和6个中和器^[6]。整个微推进系统的质量约为32 kg,功率200 W。FEPE输出推力范围规定为 $0.1 \sim 100 \mu\text{N}$,但是,对于AOCS设计和调整,功率限制和性能裕度限制为 $4 \sim 75 \mu\text{N}$ 。



(a) FEED 推进器



(b) 胶体推进器

图9 LISA-Pathfinder推力器

Fig. 9 LISA-Pathfinder thrusters

LPF配置有8个FEED推进器, 分成2组, 每组4个, 如图9(b)所示。胶体推进器是一种新型的微型离子发动机, 它由胶体流体驱动, 胶体流体通过加压系统通过针头注入。在针尖处施加高电场, 这使得液滴形成并从针尖喷出^[27]。液滴自发地被高压电离并加速, 以在所需范围内产生可变推力。通过改变加速电压实现推力的精确变化。胶体推进器的输出推力范围规定为 $0\sim 30\ \mu\text{N}$, 然而, 当推进器工作时, 其最小推力水平为 $5\ \mu\text{N}$, 每个推进器的可用推力范围限制在 $5\sim 30\ \mu\text{N}$ 。

4 结束语

引力波研究可以带来对于未知宇宙的很多新认识、新发现, 比如研究超大质量黑洞的形成, 为统一广义相对论和量子理论提供线索。引力波的测量综合了物理学、天文学、精密测量、导航、材料科学和空间工程等多个学科的技术, 通过积极参与引力波研究, 可以促进相关学科技术的发展。引力波探测任务的实施, 对惯性导航、地球科学、高精度卫星平台建设等应用领域也将发挥积极的作用, 对提升我国空间科学和深空探测的技术水平具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 郭宗宽, 蔡荣根, 张元仲. 引力波探测: 引力波天文学的新时代[J]. 科技导报, 2016, 34(3): 30-33.
GUO Z K, CAI R G, ZHANG Y Z. Gravitational wave detection: a new era in gravitational wave astronomy[J]. *Journal of Science and Technology*, 2016, 34(3): 30-33.
- [2] 张永合. 面向星星跟踪测量系统的无拖曳航天器编队技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 2016.
ZHANG Y H. Research on drag-free spacecrafts formation flying Technique applied for spacecraft to spacecraft tracking measurement system[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Microsystems and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [3] SHIBATA M, TANIGUCHI K, OKAWA H, et al. Coalescence of binary neutron stars in a scalar-tensor theory of gravity[J]. *Physical Review D*, 2014, 89(8): 084005-084022.
- [4] BARAUSSE E, PALENZUELA C, PONCE M, et al. Neutron-star mergers in scalar-tensor theories of gravity[J]. *Physical Review D*, 2013, 87(8): 081506-081511.
- [5] THORNE K. The science of interstellar[M]. New York, London: W. W. Norton & Company, 2014.
- [6] 罗子人, 白珊, 边星, 等. 空间激光干涉引力波探测[J]. 力学进展, 2010, 43(4): 415-447.
LUO Z R, BAI S, BIAN X, et al. Space laser interference detection of gravitational waves[J]. *Progress in Mechanics*, 2010, 43(4): 415-447.
- [7] RILES K. Gravitational waves: sources, detectors and searches[J]. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 2013(68): 1-54.
- [8] FOIT V F, KLEBAN M. Testing quantum black holes with gravitational waves[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2019, 36(3): 035006.
- [9] CHIARA C, FIGUEROA D G. Cosmological backgrounds of gravitational waves[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2018, 35(16): 163001.
- [10] DOOLEY K L. GEO 600 and the GEO-HF upgrade program: successes and challenges[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2016, 33(7): 075009.
- [11] SOMIYA K, COLLABORATION L. Detector configuration of LCGT—the Japanese Cryogenic Gravitational-wave Detector[J]. *Classical & Quantum Gravity*, 2011, 29(12): 124007-124018.
- [12] ASO Y, MICHIMURA Y, SOMIYA K, et al. Interferometer design of the KAGRA gravitational wave detector[J]. *Phys Rev D*, 2013, 88: 043007.
- [13] ACERNESE F. Virgo collaboration[J]. *Class. Quantum Grav.*, 2015, 32: 024001.
- [14] ABBOTT B P. LIGO Scientific collaboration and virgo collaboration[J]. *Phys. Rev. Letters*, 2017, 119: 161101.
- [15] ABBOTT B P, ABBOTT R, ABBOTT T D, et al. Gravitational waves and gamma-rays from a binary neutron star merger: GW170817 and GRB 170817A[J]. *The Astrophysical Journal*, 2017, 848(2): L13.

- [16] PINARD L, MICHEL C, SASSOLAS B, et al. Mirrors used in the LIGO interferometers for first detection of gravitational waves[J]. *Appl Opt*, 2017, 56(4): C11.
- [17] GIULICCHI L, WU S F, FENAL T. Attitude and orbit control systems for the LISA pathfinder mission[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2013, 24: 283-294.
- [18] MITSURU M. Space gravitational wave detector DECIGO/pre-DECIGO[C]//International Conference on Space Optics. Biarritz, France: [s.n.], 2016.
- [19] 刘志远. “天琴计划”太空中捕捉宇宙涟漪[J]. *科技导报*, 2016, 34(3): 53-54.
LIU Z Y. Tianqin project captures cosmic ripples in space[J]. *Science and Technology Herald*, 2016, 34(3): 53-54.
- [20] 闫蓓, 安瑞, 邹文娟. 对话吴岳良: 从时空的涟漪到太极计划[J]. *科学通报*, 2016(14): 1499-1501.
YAN B, AN R, ZOU W J. Dialogue wu yueliang: from space-time ripples to taiji project[J]. *Science Bulletin*, 2016(14): 1499-1501.
- [21] WALTER F, ALEXANDER S, SAMIR B, et al. Closed loop performance and limitations of the LISA pathfinder drag-free control system[C]//AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit. Hilton Head, South Carolina: AIAA, 2007.
- [22] WU S F, LUISELLA G. Attitude stabilization of lisa pathfinder spacecraft using colloidal micro-newton thrusters[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 2011.
- [23] WU S F, DENIS F. Spacecraft drag-free attitude control system design with quantitative feedback theory[J]. *Acta Astronautica*, 2008(62): 668-682.
- [24] 李永贵, 张晓莉, 李英民. 激光干涉仪引力波探测器中的光学技术进展[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2017(1): 23-37.
LI Y G, ZHANG X L, LI Y M. Advances in optical techniques for gravitational wave detectors with laser interferometers[J]. *Science in China: Physics, Mechanics and Astronomy*, 2017(1): 23-37.
- [25] LI Y Q, LUO Z R, LIU H S, et al. Laser interferometer for space gravitational waves detection[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2018(30): 817-829.
- [26] 方乐. 静电扭摆系统的实验验证及其在电荷管理应用中的初步研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
FANG L. The experiment verification of electrostatic torsion pendulum and its primary investigation of the application in charge management[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- [27] WU S F, LUISELLA G. Attitude control of LISA pathfinder spacecraft with micro-newton FEEP thrusters under multiple failures American[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. [S.l.]: AIAA, 2010.
- [28] 罗子人, 张敏, 靳刚, 等. 中国空间引力波探测“太极计划”及“太极1号”在轨测试[J]. *深空探测学报*, 2020, 7(1): 3-10.
LUO Z R, ZHANG M, JIN G, et al. Introduction of Chinese spaceborne gravitational wave detection program “Taiji” and “Taiji-1” satellite mission[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, 7(1): 3-10.

作者简介:

吴树范(1964-), 男, 讲席教授, 主要研究方向: 卫星总体设计、无拖曳控制、航天器导航制导与控制。

通讯地址: 上海交通大学航空航天学院(200240)

电话: (021)34208597

E-mail: shufan.wu@sjtu.edu.cn

王楠(1996-), 女, 硕士, 主要研究方向: 无拖曳控制、航天器姿态轨道控制。

通讯地址: 上海交通大学航空航天学院(200240)

电话: (021)34208255

E-mail: wangn@sjtu.edu.cn

龚德仁(1982-), 男, 副研究员, 主要研究方向: 航天器编队飞行、航天系统工程与数字仿真。

通讯地址: 上海交通大学航空航天学院(200240)

电话: (021)34207704

E-mail: drgong@sjtu.edu.cn

Key Technologies for Space Science Gravitational Wave Detection

WU Shufan, WANG Nan, GONG Deren

(School of Aeronautics and Astronautics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The concept of gravitational waves is first introduced, describing the causes of gravitational waves. Typical science missions of ground and space gravitational wave detections are summarized, elaborating their major differences. Then the key technologies for space science gravitational wave detection are investigated, and its future development trends are analyzed. Finally, it is pointed out that the implementation of the gravitational wave detection task will also play an active role in the fields of inertial navigation, earth science, high-precision satellite platform construction and other applications, and it is of great significance to improve the technical level of space science and deep space exploration in China.

Keywords: gravitational waves; scientific exploration missions; drag free control; high precision measurement; long baseline formation

Highlights:

- The gravitational wave detection is of great importance, which covers a wide frequency.
- It has high technical requirements for measurement, control, propulsion and other indicators.
- Breakthroughs in related technologies can boost development in other fields.

[责任编辑：高莎，英文审校：朱恬]