空间仪器设计作业

**一、引力波空间探测是当前国际前沿研究热点领域之一，也是我校点研究方向。目前国内外有LISA、天琴、太极、Grace follow-on等引力波探测计划。请你谈谈这些引力波空间探测计划的理论意义、探测方法的理解？还有没有其它不同的空间引力波探测方法，谈谈你的想法。**

80多年前，爱因斯坦曾预言，加速的物质会发出引力波，造成时空结构的扭曲。引力波频谱的已知和预期来源涵盖了几十年的频率。在1Hz以上声频范围内的声源可以被地面探测器探测到，而在低频范围内的声源由于牛顿引力噪声的不可屏蔽背景，只能在太空中观测到。LISA是一种空间激光干涉引力波探测器，用于观测来自银河系和宇宙源的引力波信号，频率范围从0.1 mHz到1Hz。LISA由三个航天器组成，在5百万公里宽的等边三角形的拐角处。该星系团位于一个类似地球的日心轨道上，与地球的距离为20度。每个航天器携带激光和自由飞行的测试质量，并保持在一个纯粹的惯性轨道上的技术使用场发射电力推进。

根据狭义相对论，两个物体之间的引力相互作用不可能是瞬时的，因为光速代表了所有相互作用的极限速度。早在1805年，拉普拉斯就在他著名的著作《论引力》中指出，如果万有引力以有限的速度传播，那么双星系统中的力就不应该指向连接两颗恒星的直线，而且系统的角动量必须随着时间的推移而逐渐减小。用现代语言来表达，双星通过发射引力波而失去能量和角动量。1993年，赫尔斯和泰勒利用对双星PSR 1913+16的观测间接证明了引力波的存在，从而获得了诺贝尔物理学奖。

爱因斯坦关于引力波的论文发表于1916年。在20世纪50年代，一些相对论理论家，特别是H.邦迪，严格地证明了引力辐射实际上是一种物理上可以观察到的现象，引力波携带能量。因此，一个发出引力波的系统应该失去能量。大质量物体在时空结构中产生“凹痕”，其他物体在这个弯曲的时空中以最短的路径运动，很像一个弹性表面上的球系统。事实上，爱因斯坦场方程把质量(能量)和曲率联系起来，就像胡克定律把力和弹簧变形联系起来一样，或者说:时空是弹性介质。

如果我们愿意接受这样一个事实，即空间和时间不是独立存在的，而是与物理世界有强烈的相互作用，那么广义相对论就会用一种非常直观的几何图形来取代牛顿引力理论。如果一个质量分布以一种不对称的方式运动，那么时空的缩进就会以时空涟漪的形式向外运动，这就是所谓的引力波。引力波与我们熟悉的电磁波有根本的不同。而由电荷的加速度产生的电磁波，在时空框架中传播，而由质量的加速度产生的引力波是时空本身。

与存在于两个极性中的电荷不同，质量都是正质量。这就是为什么产生电磁辐射的最低阶不对称是电荷分布的偶极矩，而对于引力波，则是质量分布的四极矩的变化。因此，球对称的引力效应不会产生引力辐射。一个完全对称的超新星坍缩不会产生波，一个非球面的超新星会发出引力辐射。双星系统总是呈辐射状。

引力波扭曲了时空，换句话说，它们改变了宏观物体之间的距离。穿过太阳系的引力波在空间中产生时变应变，周期性地改变太阳系中所有物体之间的距离，使之垂直于波的传播方向。这些可能是航天器和地球之间的距离,如ULYSSES太空任务的情况下或CASSINI(尝试并将定做这些距离的波动)或航天器内部测试质量之间的距离,由一个大的距离,在LISA的情况下。主要的问题是，由于引力波通过而引起的相对长度变化非常小。这并不意味着引力波是弱的，因为它们携带的能量很少。相反，在不太遥远的星系里的超新星会以几千瓦的引力辐射强度把地球上的每一平方米都淹没。然而，产生的长度变化是非常小的，因为时空是一种非常坚硬的弹性介质，所以它需要非常大的能量才能产生微小的扭曲。

人类观测宇宙的手段, 几乎都是接受来自天体的电磁辐射，包括射电、微波、红外、光学、紫外、伽玛射线和 X 射线等（电磁波的某个频段），靠“看”观测宇宙。对于那些缺乏电磁辐射的暗物质和暗能量，人们就会视而不见, 引力波探测却可弥补这一缺陷，从“听”这一完全不同的角度进行天文观测，形成引力波天文学学科，开启了宇宙观测的全新窗口。引力波的成功探测证实了黑洞奇点的存在，暗示着广义相对论不会是终极的引力理论。暗物质和暗能量也许只是广义相对论框架下的引力异常。解释这些引力异常的引力理论是什么?一定是超越广义相对论的引力理论。广义相对论与万有引力理论的交界处在弱引力场和低运动速度，人们相信广义相对论与超越它的引力理论的交界处应该在极端强引力场处，通过引力波实验可以洞察这样的物理系统。引力相互作用弱，引力波几乎不会受到传播过程中物质分布的影响，会携带着最有效、最原始、最可靠的天体物理信号，从遥远的宇宙中传来，相比于电磁波天文学，这是引力波天文学的一大优点。所以利用原初引力波，可以探究138亿年前创生宇宙的“大爆炸”，看到宇宙大爆炸之后的10-38方秒的时间里开始的宇宙形成过程。所以引力波是了解宇宙形成的最好工具，有助于人类了解宇宙的起源和运行机制。

60年代中期 , Weber开始在美国Maryland 大学的实验室内建成了世界上第一个引力辐射探测器。它的主体是一个长2m、直径1 m、质量1 000 kg的铝质实心圆柱，人们称其为韦伯棒。韦伯棒的固有频率在500至1 500 Hz的范围内，如果引力波的频率跟铝筒的共振频率一致，便会引起它的收缩和拉伸效应，将这种效应通过固定在铝棒上的压电陶瓷传感器检测出来，转换成电信号并使用电子线路进行放大后输出，便可得到相应的引力波的图像。由于共振机制的限制，韦伯棒的敏感频宽只有几 Hz。为了避免地震和其它振动的干扰，韦伯在相距1 000 km的Maryland 大学和Argonne 实验室内放置了两个相同的韦伯棒，只有当两个探测器都同时检测到振动的时候，信号才被记录下来。灵敏度仅为h～2×10-15的两台探测器在近3个月的工作中, 平均每天可以观察到3次符合信号。由于找不到合适的理论模型来解释Weber 所观察到的、频数如此大、强度如此高的引力辐射信号, 并且世界上至今已经建成的引力辐射探测器, 其灵敏度已比Weber当时的探测器高出几个量级, 但始终未能重复Weber 的实验结果, 所以科学家一般认为, Weber得到的信号并非来自宇宙中的引力波, 而仅是噪声而已。

只有引力波波长约等于等效干涉臂长的引力波才可以最有效的被探测器探测。要对频率为 1Hz 的引力波产生最佳耦合, 激光干涉仪的臂长就得有7.5×104km , 这长度大约相当于地球直径的6倍。由此，中低频的引力波信号探测，通常均考虑在空间中实施。

20世纪90年代，欧洲空间局( European Space Agency， ESA)和美国国家航空航天局( National Aeronautic and Space Administration， NASA)合作，开始发展空间激光干涉引力波探测项目—Laser Interferometer Space Antenna ( LISA) 计划。LISA 是为了测量由时空引力波引起的时变应力而设计的，预计可探测到超致密双星、超大质量黑洞并合等引力波源。LISA 的工作频段为 10-3～1Hz，是地基干涉系统的直接补充。

空间引力波探测的基本原理是利用空间自由悬浮测试质量的间距作为传感器， 将引力波信号转化为测试质量间距变化的信号。然后利用迈克尔逊形式的高精度激光干涉仪对这个距离变化进行读出。要达到引力波探测所需要的灵敏度， 依靠 3 个主要因素:

(1) 干涉仪臂长;

(2) 精确测量两测试质量间距变化的能力;

(3) 测量和抑制除引力波外的其他非保守力的能力， 保证激光干涉测距系统对引力波信号进行有效检测。

LISA 的设计主要集中在这 3 个方面。首要考虑的是，尽管引力波探测灵敏度要求给定的是天体引力波源位置和偏振的平均，显而易见，给定干涉仪臂长L为5×106 km，LISA 单臂的干涉测距系统精度必须达到几十个pm Hz－1 /2。

LISA Pathfinder是一项验证LISA关键技术的项目。由于LISA所需的技术非常需要挑战性，而且因为地球的噪声影响，许多技术无法在地面上验证。所以需要把技术设备放置在太空中进行测试，这是LISA Pathfinder的初衷。它并不需要探测引力波，而是把所有的技术放在卫星上，把LISA所需的数百万公里的臂长缩小到数十厘米的距离，使用激光干涉测量测试质量的距离。其科学目标可以表述为进行一次空间飞行中低频引力波探测计量测试。更具体地说，LISA Pathfinder的目标包括三部分：内部传感器的性能、激光干涉仪的性能和成功完成LISA任务的关键的飞行准备技术。

**其它的探测计划：**

航天器测距。引力波会影响星际航天器通信信号的返回时间。比如对于正在土星和木星之间的航天器，其返回时间在s的数量级。引力波会导致信号时间的变化，一次是经过航天器，一次是经过地面接收器，一次是引力波经过地面的发射器。搜寻这样的引力波信号需要在数据分析中采用模式匹配算法。利用两个不同的发射频率和很稳定的原子钟，灵敏度的量级估计可以达到，并有可能进一步提高到.

脉冲星计时：脉冲星是宇宙的计时器，其中，毫秒脉冲星的计时功能最为规律。毫秒脉冲星所发射的电磁辐射抵达地球的时间，可以被预测至纳秒精确度。由于脉冲星所发射的信号具有极高的规律性，所以可以从观察到在计时方面的不规律性，估算出随机背景引力波的上限。

脉冲星计时阵列用一组脉冲星的脉冲讯号抵达时间来寻找任何有关联的信息。在地球与脉冲星之间的时空会被通过的引力波弯曲，从而导致脉冲星所发射的脉冲讯号传播至地球的时间有所改变。由毫秒脉冲星组成的脉冲星计时阵列可以用来寻找有关联的改变，从而探测出引力波。

当今，主要有三个实验正在进行：北美纳赫引力波天文台、欧洲脉冲星计时阵列与帕克斯脉冲星计时阵列。为了共同分享实验数据，这三个实验团队又组成国际脉冲星计时阵列。未来，会有更多更具功能的实验陆续参与探测引力波，例如，平方千米阵与位于荷兰的低频阵列。

**二、从国际国内引力波空间探测技术的发展可以看出，引力波空间探测技术指标高、系统复杂、实现难度大。请你谈一谈对空间引力波探测航天器的技术特征、实现难度的认识？如果你是负责人，如何组织推进空间引力波探测航天器的任务分析、方案设计、技术攻关。**

航天器由不同功能的若干分系统组成，一般分为专用系统和保障系统。专用系统为有效载荷，用于执行特定的航天任务，天琴的专用系统为超稳光学平台，搭载了激光干涉系统和无拖曳控制系统，用于验证一些关键技术在太空的表现。保障系统又称通用载荷，用于保障专用系统工作。由于天琴计划的探测指标非常高，这对保障系统的要求也非常高。

结构系统：由于支撑和固定航天器的各种仪器设备，使它们构成一个整体，以承受地面运输、航天器发射和空间运行时的各种力和空间环境。天琴计划对机械结构的要求非常高，因为太阳和空间环境不能影响到卫星内部的工作。载荷在工作时，机械结构产生的噪声要非常小，这大大增加了设计难度与制造难度。

热控制系统：也称温度控制系统，用来保证各种仪器设备在复杂环境中处于允许得温度范围内。航天器的热控制系统一般使用多层隔热材料、热控百叶窗和电加热管。在天琴卫星上，温控的要求非常高，达到了10-4量级，目前还没有卫星的温控能达到这个要求。所以天琴的温控要做到世界第一才能满足要求。

电源系统：用来为航天器所有仪器设备提供所需的电能。人造地球卫星大多采样蓄电池和太阳电池阵电源系统，空间探测器采用太阳电池阵电源系统。

姿态控制系统：用来保持或改变航天器的运行姿态。常用的姿态控制方式有三轴姿态控制、自旋稳定、重力梯度稳定和磁力控制等。天琴的姿态控制要求非常高，在17万公里的臂长形成等边三角形，激光要准确入射到另一个卫星上。

轨道控制系统：用来保持或改变航天器的运行轨道。轨道发动机为轨道控制提供动力，由程序控制装置控制或地面航天测控站遥控。轨道控制往往与姿态控制配合，构成航天器控制系统。

无线电测控系统：包括无线电追踪、遥测和遥控3个部分。跟踪部分主要由信标机和应答机。它们不断发出信号，以便地面测控站跟踪航天器并测量其轨道。遥测部分主要由传感器、调制器和发射机组成，用于测量并向地面发送航天器的各种仪器设备的工程参数（工作电压、温度等）和其他参数（探测仪器测量到的环境数据、敏感器测量到的航天器姿态数据等）。遥控部分一般由接收机和译码器组成，用于接收地面测控站发来的遥控指令，传送给有关系统执行。

为了尽可能简化工程设计，减少工程难度，天琴的敏感度被设计为正好能探测多数易观测的引力源，这样的源必须比较强且持续可观测，周期更短就更好了。

设计卫星可以大概分为五个步骤：

根据总体技术要求进行概念设计——利用机械CAD、光学CAD的软件设计出空间光学仪器的样机。

在样机的基础上建立FEM模型——有限元模型。进行结构静、动力学分析，修改结构设计，修正样机和有限元模型。

在有限元模型上进行温度分析，根据结构的温度分布情况形成热控方案，修改结构，修正样机和有限元模型，重新分析温度场，求出热变形。

根据光学系统零件的热变形情况，修正光学CAD平台求解热变形引起的各种象差。比照总体指标要求，修改总体设计参数，重复上述步骤，迭代寻优。