

# ASTROD空间引力波探测优化方案：ASTROD-GW\*

倪维斗<sup>1, 2†</sup> 门金瑞<sup>1</sup> 梅晓红<sup>1</sup> 雷成明<sup>1</sup> 董瑶<sup>1</sup> A. Pulido Patón<sup>1</sup> 董鹏<sup>1</sup> 王刚<sup>1</sup> 黄超光<sup>3</sup> 龚雪飞<sup>3</sup> 张杨<sup>4</sup>  
王海涛<sup>5</sup> 彭秋和<sup>6</sup> 曹军威<sup>7</sup> 王立<sup>8</sup> 侯欣宾<sup>8</sup> 张庆祥<sup>8</sup> 张晓敏<sup>9</sup> Hansjörg Dittus<sup>10</sup> Jian Guo<sup>11</sup>  
Claus Lämmerzahl<sup>12</sup> Diana Shaul<sup>13</sup> Timothy Sumner<sup>13</sup>

1. 中国科学院紫金山天文台, 江苏省南京市北京西路2号, 210008; 2. 中国科学院国家天文台, 北京市大屯路甲20号, 100012; 3. 中国科学院高能物理研究所, 北京市石景山区玉泉路19号, 100049; 4. 中国科技大学, 安徽省合肥市金寨路96号, 230026; 5. 南京航空航天大学测量与控制工程系, 江苏省南京市御道街29号, 210016; 6. 南京大学, 江苏省南京市汉口路22号, 210093; 7. 清华大学, 北京市海淀区, 100084; 8. 中国空间技术研究院, 北京市海淀区友谊路104号, 100094; 9. 航天东方红卫星有限公司, 北京市海淀区友谊路104号, 100094; 10. Institute of Space Systems, German Aerospace Center, Robert-Hooke-Strasse 7, 28359 Bremen, Germany; 11. Faculty of Aerospace Engineering, Technical University of Delft, Postbus 5, 2600 AA, Delft, The Netherlands; 12. Centre of Applied Space Technology and Microgravity (ZARM), University of Bremen, Am Fallturm, 28359 Bremen, Germany; 13. High Energy Physics Group, Blackett Laboratory, Imperial College, Prince Consort Road, London SW7 2AZ, UK

**摘要** 引力波的存在是广义相对论的直接结果, 也是所有具有有限传播速度的引力理论的必然结果, 1970年以前在引力波探测方面进展比较缓慢。1970年后探测灵敏度有了量级的改进, 陆续有多个地面激光干涉引力波探测方案相继实施, 如TAMA、GEO、LIGO、VIRGO等。正在筹划中的空间计划有LISA、ASTROD、DECIGO等。激光天文动力学引力波探测任务ASTROD-GW是ASTROD专注于探测引力波的计划。ASTROD-GW引力波探测计划的三个航天器选在地球与太阳的拉格朗日点L3、L4、L5附近, 采用连续激光进行相互干涉测距以探测引力波。干涉臂长2亿6千万公里, 探测的引力波波长可达LISA的52倍, 对范围较大、频率较低的天体运动产生的引力波较为敏感。ASTROD-GW的科学目标是探测超大质量黑洞 ( $10^5 - 10^9 M_{\odot}$ )、中等质量黑洞 ( $10^2 - 10^5 M_{\odot}$ )、极端质量比黑洞旋进 ( $10 - 10^3 M_{\odot}$ 黑洞旋进  $10^6 - 10^8 M_{\odot}$ 黑洞)、白矮星、中子星和恒星质量黑洞所组成的紧密双星产生的引力波以及元初引力波、弦和玻色星等。本文综述ASTROD-GW空间引力波探测计划的基本方案和科学目标。

**主题词** 激光天文动力学, 引力波探测, 深空探测

## 1. 引言

引力波在时空中传播形成时空涟漪。这些时空涟漪起源于宇宙间剧烈的天体活动过程。其探测与电磁波天体观测相辅, 是探讨紧致天体, 宇宙大范围的天体动、脉现象, 以及宇宙极早期现象的重要方法。爱因斯坦在1915年提出广义相对论后, 随即在两篇论文中预测引力波的存在和估计其强度。引力波的存在是广义相对论的直接结果, 也是所有具有有限传播速度的引力理论的必然结果。

\*自然科学基金(批准号:10778710, 10875171)资助项目

†倪维斗(1944-), 男, 研究员, 专业方向: 基础天文、基础物理与深空探测, [wtmi@pmo.ac.cn](mailto:wtni@pmo.ac.cn), 025-83332098, (Fax) 025-83332200

宇宙空间传播至太阳系的引力波是极微弱的。在相对论中，对两个质量为 $M$ 和 $M_2$ 、即其 Schwarzschild 半径为 $R_1$ 和 $R_2$ 的双星，其引力波传播到观测者位置所产生的应变的数量级为

$$h \approx R_1 R_2 / dD$$

其中  $d$  为双星之间的距离、 $D$  为双星至观测者的距离。对于中子星、或黑洞， $d$  可以是 Schwarzschild 半径的数量级，因此估计可更简便：

$$h \leq R/D$$

对于  $2M_\odot$  的黑洞  $R = 3$  km，在 Virgo 超星系集团范围的距离下， $D = 10^8$  l. y.，传至太阳系的应变约为  $h = 3 \times 10^{-21}$ ，需要极灵敏的引力波探测器始能探测到。达到如此或更好的精度需要多重的努力。现今地面引力波探测器的灵敏度已达到如此的精度，然而在 Virgo 超星系集团范围所发生的短脉冲或高频引力波次数较少，至今尚未探测到。下一阶段的地面引力波探测器，将改善灵敏度 10 倍，可以探测 10 倍距离的引力波，能探测的体积大 1000 倍，因而发生机率增加 1000 倍。届时，将会探测到引力波，引起世界的注目。对较大质量、较大范围、较低频率的天体和宇宙现象所产生的引力波以及基本物理的探究，则需等待空间引力波探测器的实现。

引力波对天体的影响已间接观测到，如 PSR1913+16 脉冲双星因引力波辐射产生的轨道伸缩，被 Hulse 和 Taylor 观测到并于 1993 年获得诺贝尔奖，其重要性不言而喻。引力波探测，虽然难度极大，然而因其在天体物理和宇宙论中的重要性和不可取代性，现今是世界上聚焦的热点。

近年，中国积极发展深空探测，并规划在 2025-2030 年进行深空引力波探测任务。在本文中介绍与综述具有中国特色的 ASTROD 空间引力波探测优化方案 ASTROD-GW 的科学目标和基本方案 [1]。第二节介绍引力波类别、引力波探测器分类和可能的引力波波源。第三节叙述现今世界上深空引力波探测方案。第四节阐述 ASTROD-GW 基本方案。第五节说明 ASTROD-GW 的具体科学目标。第六节讨论预研究进展。第七节对未来做出展望。

## 2. 引力波类别[2]

电磁波按照频率的不同可分为射电波、微波、红外线、光波、紫外线、X 射线和  $\gamma$  射线等。引力波亦可按照频率的不同分为下列各频带：

- (i) 甚高频带 (10 kHz - 1 THz)：这是地面上探测引力波的高频共振腔最敏感的频带。
- (ii) 高频带 (10 Hz - 10 kHz)：这是地面上探测引力波的低温共振器和激光干涉仪最敏感的频带。
- (iii) 中频带 (0.1 Hz - 10 Hz)：这是短臂长 ( $10^3 - 10^5$  km) 空间引力波探测激光干涉仪最敏感的频带。
- (iv) 低频带 (100 nHz - 0.1 Hz)：这是深空探测引力波的激光干涉仪 ( $10^6 - 10^9$  km) 最敏感的频带。
- (v) 甚低频带 (300 pHz - 100 nHz)：这是脉冲星定时实验最敏感的频带。
- (vi) 亚极低频带 (10 fHz - 300 pHz)：这是介于甚低频带和极低频带之间的频带，是类星体及射电源自行精密测量实验最敏感的频带。
- (vii) 极低频带 (1 aHz - 10 fHz)：这是宇宙背景辐射不等向性和偏振实验最敏感的频带。

### 引力波探测器可分为两类

- (i) 共振式探测：探测器（金属棒、金属球、共振腔……）受到引力波，引起共振，以增加灵敏度。低温共振棒、低温共振球、微波共振腔等属于此类。
- (ii) 在两个自由悬浮（吊）的测试体之间（微波、激光、X射线……）测距探测。地面悬吊干涉仪、空间悬浮干涉仪等属于此类。

**引力波源** 在高频带的引力波波源有超新星生成，双黑洞、中子星啣频（chirp）互绕等。在低频的引力波波源有大质量黑洞合生、白矮星双星、中子星双星，黑洞双星和随机基底，这些都是引力波天文学研究的标的。至于宇宙元初（残余、遗迹）引力波，则涵盖所有的波段，是高频段，低频段和中频段探测引力波的激光干涉仪，以及高频共振腔所探测的目标。

## 3. 空间引力波探测器

现今世界上探测引力波的焦点在激光干涉探测，第一代大型的地面激光干涉仪均已完成，空间激光干涉仪阵列正积极规划、研发中。现将世界上探测引力波的地面和空间激光干涉仪列表于下：

表一 已完成和规划、研发中探测引力波的激光干涉仪

		名称	国家与机关	地点与臂长	开始规划日期	完成日期
已 完 成	地 面	LIGO	美国 Caltech-MIT	Hanford: 4 km、2 km Livingston: 4 km	1982	2002
		VIRGO	意大利-法国 INFN-CNRS	Pisa: 3 km	1986	2003
		GEO 600	德国-英国 MPQ-Glasgow	Hannover: 600 m	1994	2002
		TAMA 300	日本 NAO U-Tokyo, ICRR	Mitaka: 300 m	1994	2001
规 划	地 面	Advanced LIGO	美国	Hanford: 4 km Livingston: 4 km	1995	2014 (预定)
		ACIGA	澳洲	Perth: 4 km	1997	待定
		LCGT	日本(寻求国际合作)	Kamioka: 2.7 km	1998	2014 (待定)
		EGO	欧洲	Europe: 3 km	1999	待定
发 中	空 间	LISA	欧洲、美国	绕日轨道: $5 \times 10^6$ km	1989	> 2018 (待定)
		ASTROD	中国、欧洲	绕日轨道: $0.1 - 3 \times 10^8$ km	1993	待定
		DECIGO	日本	地球轨道: 1000 km	2001	待定

地面上探测引力波的激光干涉仪的应变灵敏度已优于  $10^{-22} \text{ Hz}^{-1/2}$ ，然而尚未探测到引力波。一般认为，灵敏度提高 1 个量级的下一代探测仪将有足够的机会探测到引力波。广泛地研究引力波源和基本物理，则可能需等待空间引力波探测器之完成。现今空间引力波探测任务概念主要有 LISA (Laser Interferometer Space Antenna)、激光天文动力学空间计划 (ASTROD) 和 DECIGO。

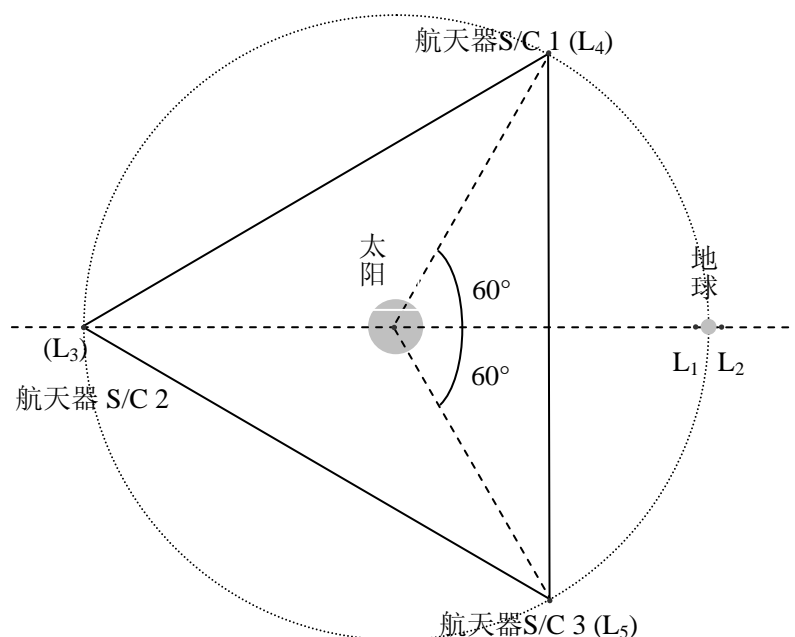
LISA 引力波探测任务概念是于 1980 年代提出，为欧洲空间局 (ESA) 和美国宇航局 (NASA) 所采纳，并在 2000 年立项，其技术演示卫星 LISA Pathfinder 已进行测试组装，将于 2011 年发射。LISA 的发射，将在 2018 年之后，其确实日程将取决于 NASA 的日程。

ASTROD (Astrodynamical Space Test of Relativity using Optical Devices) 任务概念是于 1993 年提出，其科学目标是 (i) 检测相对论时空基本定律；(ii) 精密测量太阳系天体参数 (测绘太阳系引力分布)；(iii) 探测引力波。ASTROD 任务概念是使用三个航天器相互干涉测距而成：一个航天器在地球绕日的内轨道；一个在地球绕日的外轨道；一个在地日拉格朗日点 L1 (或 L2) 附件。ASTROD 已从事了起始的预研究和实验研究[3-5]。在 1996 年提出了单航天器的 Mini-ASTROD 空间任务概念和多航天器的 Super-ASTROD 空间任务概念。Mini-ASTROD 于 2002 年后改称为 ASTROD I，使用在绕日轨道 (地球绕日轨道之内) 上的无拖曳航天器和地面深空激光站精确的进行双向激光测距，可达成部分 ASTROD 之科学目标。Super-ASTROD 使用多个约 5 AU 轨道之航天器，进行引力波探测以及外太阳系引力测绘和宇宙模型引力理论测试[6]。

DECIGO 任务概念是于 2001 年提出，主要目标是探测中频引力波，近年已开始预研究工作，并在积极争取 DECIGO Pathfinder 的立项与发射。

#### 4. ASTROD-GW 基本方案

考虑激光天文动力学空间任务对探测引力波优化的需求，任务以接近等臂长方式实施。三个航天器分别在日地拉格朗日 L3、L4、L5，构成一个接近等边三角形的阵列，如图一所示，其臂长为 2 亿 6 千万公里 (1.732 天文单位)。三个航天器相互之间进行激光干涉测距。



图一 ASTROD 引力波探测任务轨道优化图

对于以探测引力波为专注目标的 ASTROD，其轨道设计和方案可以优化：三个太空船可选在地球与太阳的 L3、L4、L5 拉格朗日点。L4、L5 拉格朗日点是稳定的，L3 拉格朗日点是不稳定的，可以用执行无拖曳航天的微推动器修正轨道。如此的选择，两太空船相距 2 亿 6 千万公里，可探测的引力波频率比 LISA 低 52 倍。ASTROD-GW 将在 LISA 之后发射，对于加速度噪声的要求，现今简单的规划是和其相同，对于三个太空船之间的多普勒频移的要求是小于 LISA 频移的要求。

## 5. ASTROD-GW 的具体科学目标

本项目具体科学目标是探测低频(100 nHz - 0.1 Hz)引力波。在此波段的波源有：

(i) 超大质量黑洞 ( $10^5 - 10^9 M_{\odot}$ )：在元初星系结构和星系中产生。可追踪黑洞合生历史及星系形成，测试极强引力的动力学现象。探测范围的红移  $z$  可大于 10。估计每年可发生几十到几百次。

(ii) 中等质量黑洞 ( $10^2 - 10^5 M_{\odot}$ )：在星团或小的暗物质晕。可追踪大质量黑洞的递进形成过程及星系结构的形成。ASTROD-GW 直接探测到红移在 10-20 之间的早期暗物质晕中的中质量黑洞并合的引力波的可能性比较小，对于局域宇宙的星团中的质量大于  $10^3$  太阳质量的中质量黑洞应是可能的[6]。

(iii) 极端质量比黑洞旋进 ( $10 - 10^3 M_{\odot}$  黑洞旋进  $10^6 - 10^8 M_{\odot}$  黑洞)：在接近超大质量黑洞中心的稠密星系核中。可取样探讨星系核中的恒星分布和密度。探测范围的红移  $z$  约在 1 左右。估计每年可发生数十次或更多。

(iv) 白矮星、中子星、恒星质量黑洞所组成的紧密双星：在本银河系或更远。可探测和描绘银河系中致密天体的分布。已知的引力波源可验证仪器灵敏度。探测范围为本银河系和外星系。本银河系超过一万个引力波源，和不可分辨的背景引力波源（包括外星系的）。

(v) 元初引力波、弦、玻色星等：宇宙初期和各种环境中产生。可以探测宇宙极早期的现象（如宇宙暴涨时期所产生的引力波）[7]以及新天体现象、新物理现象[8]。探测范围为整个宇宙。探测范围的红移  $z$  可达  $10^{30}$ 。

超大质量黑洞所产生的引力波，可作为精确无阶梯式宇宙距离定标之用，对暗能量问题的贡献将可和超新星及伽玛暴三足鼎立；对此问题和残余引力波的研究是本计划的重点科学目标之一[9]。

## 6. 预研究进展

**6.1 任务轨道设计：**采用 CGC2.5 历表框架和 JPL DE405 的行星历数据，我们初步设计的任务轨道，其臂长差在十年之内小于正负万分之一点五，其相对的多普勒速度小于  $\pm 4$  m/s。相对多普勒速度是 LISA 的 40%，已达成第四节中的要求。任务轨道仔细的设计请见[10]。

**6.2 测试质量电荷控制：**将采用紫外线发光二极管进行测试质量电荷控制设计。

**6.3 光路设计：**将参照 LISA 光路，进行适合 ASTROD-GW 的设计。

**6.4 航天器电系统：**ASTROD I 空间任务的航天器电系统包括一般子系统和一些具 ASTROD-GW 特定功能要求的子系统。ASTROD-GW 电组态基本概念是由科学模块的各个电（子）系统所构成：(i) 航天电子子系统，(ii) 电源子系统和太阳能板，(iii) 射电通讯子系统，(iv) 热控 (T/C) 装置，(v) 专属外在和内在的功能/电介面。

ASTROD-GW 使用 Ka 波段远距通讯系统提供追踪、遥测和指令 (TT&C) 功能, 包括应答器、发射器、射频分配单元 (RFDU) 和天线。应答器子系统包括两个基本应答单元, 每单元具有其固态功率放大器。每一应答器和接收器均在热冗余 (备用) 状态。发射器在冷冗余 (备用) 状态, 可随时由远距指令开/关。射频分配单元的功能是控制远距指令和遥测数据在两个应答器和天线之间的路由。信号路由对远距指令和遥测功能提供有效的冗余。

在工作状态, 使用在航天器上方的两个可指向高增益天线。高增益天线的直径为 30 cm, 其标称视轴增益 (nominal boresight gain) 为 25 dBi。其 3 dB 天线束宽约为  $8^\circ$ , 需要方位角为  $360^\circ$  的驱动装置, 无需升降驱动。

定义和可靠、有效设计满足所有空间任务和有效载荷要求的电系统是下一阶段预研究所必须仔细探讨的。

**6.5 任务分析:** ASTROD-GW 的三个航天器可以由长征四乙运载火箭分别发射升空或由大型深空运载火箭进入绕行地球的转移轨道, 在转移轨道适当的位置启动远地点发动机 (apogee motor), 脱离地球进入预设轨道。第二阶段喷火进入脱离地球预设轨道的误差可在 1%, 速度差应小于 10 m/s。此后的一段时间中可以由离子推进器推动经过年余准确进入任务轨道, 开始科学观测, 任务寿命三年, 延展寿命十年。

**6.6 科学运作:** 包括 (i) 和航天器运作的关系、(ii) 科学实验试运行、(iii) 科学数据摄取三部分, 是下一阶段预研究所必须仔细探讨的。

**6.7 任务运作:** 发展深空探测是中国的既定目标, 深空地面站的建立已在规划中。地面系统和任务运作可由将建立的深空地面站承担。除了任务操作的设计外, 深空地面站的多任务航天服务部门将可承担所有航天任务。

设计、开发、整合和测试的部分或全部人员将成为运作团组的一部分。有效载荷例行数据和科学数据将传至 ASTROD-GW 科学中心 (ASTROD-GW Science Center [ASC]), 对有效载荷进行监控。有效载荷将由各个首席科学家和其所在机关负责。ASC 将公开征求, 在以上所在机关选取成立。ASC 将会校准干涉数据, 并传至其它各个首席科学家处。

**6.8 国际合作:** 本计划现在的国际合作单位有 (i) 德国不来梅大学空间中心; (ii) 德国航空航天中心; (iii) 英国帝国大学; (iv) 荷兰代尔夫特 (Delft) 理工大学。我们将积极争取合作者, 希能最终达成和欧洲航天局的合作。

此外, 关于航天器的需求分析与初步设计、有效载荷设计、无拖曳航天控制方案研究、加速度噪声分析以及相关有效载荷与航天器配置研究、测试质量电荷充电模拟 (和英国帝国大学高能研究组合作)、加速度计/惯性感测器方案研究 (和德国航空航天中心及不来梅大学空间中心合作)、微推进器方案研究、深空激光测距技术方案研究、低频引力波天体与宇宙波源理论研究等, 均是进一步预研究的课题。

## 7. 展望

具有中国特色的 ASTROD-GW 引力波探测优化方案, 已经和德、英、荷展开合作, 对于大质量、大范围产生的引力波源及宇宙早期产生的引力波背景的探测, 可进一步探测 LISA 未能探测的波源, 和 LISA 有一定的互补性, 其所需技术开发的要求是 LISA 的水准, 是探测引力波的一个有意

义的方案。

## 参考文献

1. 倪维斗, ASTROD 空间引力波探测优化方案与实验室研究项目建议书 (中国科学院空间科学预先研究项目之项目建议书, 研究方向: 天体号脉), 2009年2月26日.
2. 中国天文学会, 2007-2008 天文学学科发展报告, pp. 100-104, 引力波部分 (撰稿人: 倪维斗), 中国科学技术出版社, 2008.
3. W.-T. Ni, ASTROD and ASTROD I-Overview and Progress, *International Journal of Modern Physics D* **17**, 921-940 (2008); and references therein.
4. T. Appourchaux, R. Burston, Y. Chen, M. Cruise, H. Dittus, B. Foulon, P. Gill, L. Gizon, H. Klein, S. Klioner, S. Kopeikin, H. Krueger, C. Laemmerzahl, A. Lobo, X. Luo, H. Margolis, W.-T. Ni, A. Pulido Paton, Q. Peng, A. Peters, E. Rasel, A. Ruediger, E. Samain, H. Selig, D. Shaul, T. Sumner, S. Theil, P. Touboul, S. Turyshev, H. Wang, L. Wang, L. Wen, A. Wicht, J. Wu, X. Zhang, C. Zhao, Astrodynamical Space Test of Relativity using Optical Devices I (ASTROD I) - A class-M fundamental physics mission proposal for Cosmic Vision 2015-2025, *Experimental Astronomy* **23**, 491-527 (2009); and references therein.
5. 严俊, 倪维斗, 李广宇, 陶金河, 马月华, 包纲, 夏炎, 柳磊, 赵海斌, 潮见幸江, 包芸, 黄超光, 黄天衣, 罗俊, 周泽兵, 汤俊雄, 聂玉昕, 魏志义, 王海涛, 吴季, 吴雪君, 须重明, 熊耀恒, 张书练, 张杨, 张元仲, 叶贤基, H. Dittus, C. Lämmerzahl, J.-F. Mangin, A. Peters, A. Rüdiger, É. Samain, S. Schiller, D. Shaul, T. Sumner, P. Touboul, A. Wicht, 单航天器激光天文动力学空间计划 (ASTROD I), 中国宇航学会深空探测技术专业委员会第一届学术年会论文集, 第 450-457 页, 2005 年 1 月 12-14 日, 哈尔滨.
6. 龚雪飞, 博士论文, 指导教授: 刘润球, 中国科学院数学与系统科学研究院应用数学研究所 (2009).
7. Wei-Tou Ni, Super-ASTROD: probing primordial gravitational waves and mapping the outer solar system, *Class. Quantum Grav.* **26**, 075021 (2009).
8. C.-G. Huang, H.-Q. Zhang, and H.-Y. Guo, Cosmological solutions with torsion in a model of de Sitter gauge theory of gravity, *JCAP* **10**, 010 (2008); A new gravitational model of dark energy, *Chin. Phys. C (High Energ. Phys. Nucl. Phys.)* **32**, 687 (2008).
9. M. L. Tong, W.-T. Ni, Y. Zhang, Distinguishing the Yang-Mills Dark Energy Models from Distance Observations of Space Gravitational-Wave Detectors (2009).
10. 门金瑞, 倪维斗, 王刚, ASTROD-GW 任务轨道设计, 中国宇航学会深空探测技术专业委员会第六届学术年会论文集, 第 000-000 页 (2009).