

文章信息	研究背景、目的、结论
<p><b>题目：</b></p> <p>太阳极轨天文台</p> <p><b>作者：</b></p> <p>邓元勇,周桂萍,代树武,王颖,等</p> <p><b>单位：</b></p> <p>中国科学院国家天文台, 中国空间技术研究院, 背景空间飞行器总体设计部, 中国科学院国家空间科学中心, 等</p> <p><b>关键词：</b></p> <p><b>来源：</b></p> <p>《科学通报》第 68 卷 第 4期，2023 年</p>	<p><b>现存问题：</b></p> <p>对太阳观测局限于黄道面附近，缺少对极区的直接光谱和成像观测，无法观测和诊断极区在诸多科学问题中的作用</p> <p><b>已有研究：</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>- 1990 ESA尤利西斯飞船（飞行轨道与黄道面成80°高倾角，但没有携带成像探测设备）</li><li>- 2020 ESA 太阳轨道飞行器（可直接对太阳风进行探测和成像，但最多为34°倾角）</li><li>- 2004 国家空间科学中心 太阳极轨探测计划 SPORT（提出）</li><li>- 2011 国家天文台 太阳极轨探测项目（提出）</li><li>- 2013 美国国家科学院 太阳极轨探测项目 SPI（考虑与欧洲合作, 也称为POLARIS）</li><li>- 2019 美国Solaris卫星为POLARIS探路者（将在高纬度区域持续观测一个月）</li><li>- 4π项目 太阳全景探测</li></ul> <p><b>探测核心科学目标：</b></p> <p>揭示两个起源：太阳活动周起源、高速太阳风起源</p> <p>创建一个模型：为理解日球层整体结构的数值模型提供边界条件</p> <p><b>探测方案：</b></p> <ol style="list-style-type: none"><li>1. 飞行器轨道：高轨道倾角（<math>\geq 80^\circ</math>）、小椭偏率太阳轨道</li><li>2. 太阳极轨飞行器：三轴稳定对日定向、姿态指向精度优于21”，</li><li>3. 有效载荷：飞行器承载有效载荷200kg以上，功率不低于300W，科学探测数据下行最大速率为5Mbit/s</li><li>4. 飞行路径：行星际飞行进入太阳极轨轨道，近日点0.9AU，远日点1.15AU</li><li>5. 在轨时长：15年（轨道周期约1年），覆盖一个完整的太阳极大年和极小年，飞越太阳极区15次</li></ol> <ul style="list-style-type: none"><li>- 太阳全日面观测（极区矢量磁场/多普勒速度场）</li><li>- 太阳多个波段观测（紫外波段/X射线波段/射电波段）</li><li>- 原位探测（太阳风等离子体/行星际磁场/高能粒子）</li></ul> <p><b>探测意义：</b></p> <ol style="list-style-type: none"><li>1. 完成科学任务：核心科学目标可推动太阳物理领域取得极大进步</li><li>2. 获取实践经验：为我国轨道器的高水平发射积累宝贵经验</li></ol>

**题目：**  
太阳极轨天文台

**作者：**  
邓元勇,周桂萍,代树武,王颖,等

**单位：**  
中国科学院国家天文台, 中国空间技术研究院, 背景空间飞行器总体设计部, 中国科学院国家空间科学中心, 等

**关键词：**

**来源：**  
《科学通报》第 68 卷  
第 4期，2023 年

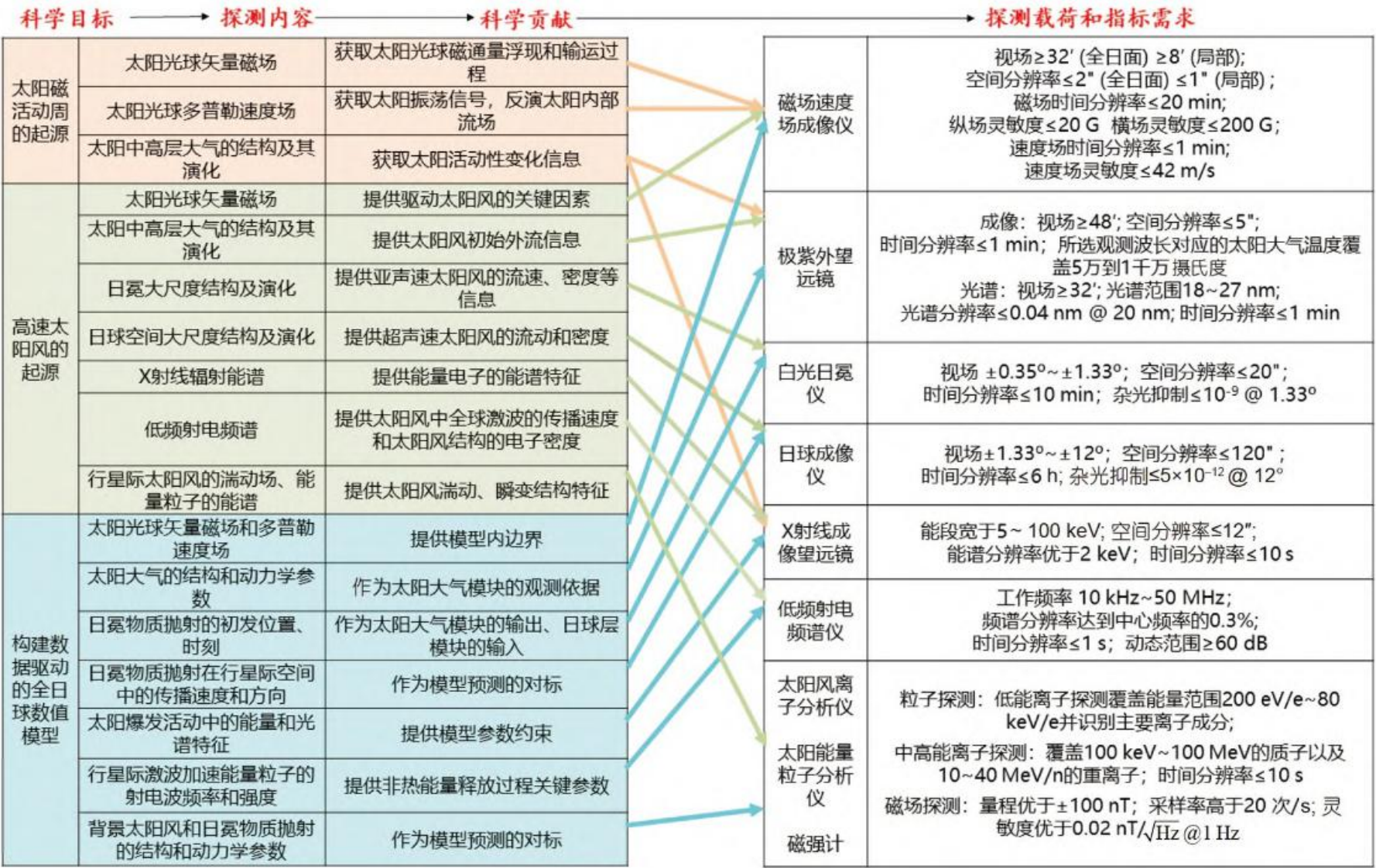


图 7 (网络版彩色)太阳极轨飞行器的科学目标和初步的载荷配置

Figure 7 (Color online) Scientific objectives and preliminary configurations of payloads on the Solar Polar-orbit Observatory

文章信息	研究背景、目的、结论
<p><b>题目：</b></p> <p>太阳立体探测任务设想</p> <p><b>作者：</b></p> <p>杨孟飞,汪景琇,王赤,等</p> <p><b>单位：</b></p> <p>中国空间技术研究院, 中国科学院国家天文台, 中国科学院国家空间科学中心, 等</p> <p><b>关键词：</b></p> <p>太阳物理, 太阳立体探测, 太阳活动, 空间天气</p> <p><b>来源：</b></p> <p>《科学通报》第 68 卷 第 8 期，2023</p>	<p><b>现存问题：</b></p> <ol style="list-style-type: none"><li>单视角观测局限：现有太阳探测器多数位于黄道面附近，无法实现全球磁场同步探测和太阳活动区全生命周期观测</li><li>预报精度不足：空间天气事件（如CME）的三维结构传播演化复杂，单视角或双视角无法满足精确建模和预报的需求</li></ol> <p><b>已有研究：</b></p> <p>文章在表1中系统梳理了1960年至今约50颗太阳探测任务（如SOHO, STEREO, SDO, Parker Solar Probe等），指出其虽取得丰硕成果，但仍存在上述大量待解决问题</p> <p><b>探测核心科学目标：</b></p> <ol style="list-style-type: none"><li>揭示太阳内部结构和磁场起源（通过全球日震学和磁场观测）</li><li>太阳活动机理研究（立体监测活动全生命周期）</li><li>太阳活动的全日球空间天气效应（理解高速太阳风、CME、CIR、高能粒子事件的全球分布和传播）</li><li>空间天气预报模式研究（为预报模型提供完整的初边值条件）</li></ol> <p><b>探测方案：</b></p> <ol style="list-style-type: none"><li>空间布局：两组共5颗探测器的星座系统（第一组3颗位于黄道面，第二组2颗位于极区）</li><li>系统组成：一箭多星，探测器平台为有效载荷提供稳定的对日定向姿态</li><li>探测器总体设计：供配电/天线/数管/热控/推进/结构与机构/热控/测控数传/有效载荷</li><li>有效载荷配置：10种（遥感成像载荷5台；原位探测载荷5台）</li></ol> <p><b>探测意义：</b></p> <ol style="list-style-type: none"><li>科学上：实现人类首次对太阳的全方位立体探测。有望再太阳物理前沿科学问题上取得突破性进展</li><li>应用上：为建立准确的空间天气预报模型提供关键数据，提升预报能力</li><li>技术上：是我国具备太阳全方位立体探测能力，实现跨越式发展</li></ol>

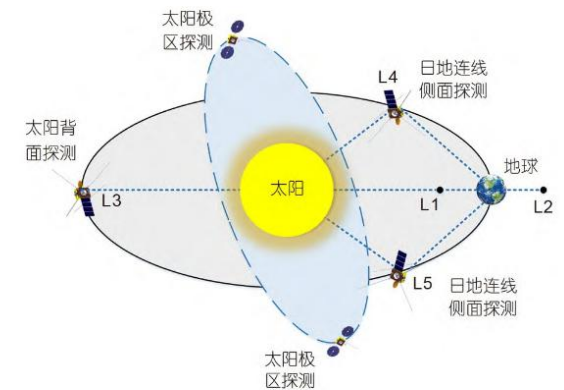


图 2 (网络版彩色)太阳全方位立体探测系统组成和空间布局  
Figure 2 (Color online) Composition and space layout of the solar omnidirectional stereo exploration system



## 太阳空间探测 - 已有研究

表1 太阳空间探测典型任务

Table 1 Typical missions of solar space exploration

探测器名称	科学任务描述	任务发射时间	总体参数 <sup>a)</sup>
先驱者号探测器 (Pioneer-5、6、7、8、9)	探测太阳风、磁场、宇宙尘埃、等离子体波、宇宙γ射线、太阳紫外谱等	1960年3月~1968年11月(共发射5颗)	日心轨道, 半长轴与地球相近, 自旋稳定 每颗星重量200~1064 kg不等;
OSO(Orbiting Solar Observatory)	对太阳远紫外线、X射线和γ射线辐射、日冕、耀斑等进行综合性观测, 同时获取太阳单色像, 系统而连续地研究太阳的结构、动力学过程、化学成分、黑子周期, 太阳活动的长期变化和快速变化以及太阳对地球的影响, 预测太阳质子事件等	1962年3月~1975年6月(共发射8颗)	轨道高度为550 km、倾角为33°的近圆形轨道; 自旋稳定, 对日定向, 平台通过消旋机构稳定指向太阳
太阳神号(Helios)	研究太阳、太阳-行星关系和水星轨道以内的近日行星际空间, 探测太阳风、行星际磁场、宇宙线、微流星体等	1974年12月10日(太阳神1号); 1976年1月15日(太阳神2号)	太阳神1号为近日点0.309 AU的日心轨道; 太阳神2号为近日点0.29 AU的日心轨道, 均为自旋稳定
太阳极大年探测器(Solar-Max)	研究太阳极大年活动现象, 特别是太阳耀斑	1980年2月14日	低地球轨道(low Earth orbit, LEO)
尤利西斯探测器(Ulysses)	从高纬度空间对太阳风及其扰动结构进行探测	1990年10月6日	日心轨道1.34 AU×5.4 AU, 轨道倾角为79.1°
阳光卫星(Yohkoh)	观测太阳X射线及其光谱	1991年8月30日	LEO, 三轴稳定对日定向
SOHO	研究太阳的内部结构, 利用成像和光谱诊断方法, 研究日冕加热和太阳风加速的物理过程等	1995年12月2日	日地L1点Halo轨道(晕轨道), 三轴稳定对日定向
RHESSI(the Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager)	研究日冕中脉动能量释放的频率、位置和演变规律; 研究太阳耀斑中电子、质子和重离子的加速机制; 研究等离子体加热及其与粒子加速的关系; 研究太阳耀斑中高能粒子的传播和演变等	2002年2月5日	490 km×505 km的近圆轨道, 轨道倾角为38°, 自旋稳定对日定向
Hinode	研究太阳磁场的产生与扩散、太阳光度的磁调制、光球层和日冕的结构及加热机制, 以及太阳大气的膨胀和扩散机制等	2006年9月23日	680 km的太阳同步轨道; 三轴稳定对日定向
STEREO(Solar Terrestrial Relations Observatory)	研究日冕物质抛射(coronal mass ejection, CME)的触发机制; 研究CME在日球层的传播特点; 研究能量粒子在低日冕区和行星际介质中的加速机制; 研究太阳磁场的三维结构、时间演化模型以及太阳风的局地密度、温度和速度结构等	2007年5月30日	地球共转轨道, 三轴稳定对日定向
SDO(Solar Dynamics Observatory)	研究太阳内部结构, 认识太阳的周期变化; 研究磁场在太阳大气和各层之间传递的作用; 研究太阳大气外部区域的时间和空间变化; 监测太阳的辐射水平, 特别是紫外和极紫外辐射等	2010年2月11日	倾斜地球同步轨道(inclined geosynchronous orbit, IGSO), 三轴稳定对日定向
IRIS(Interface Region Imaging Spectrograph)	主要观测太阳的过渡区和色球层的物理状态, 理解日冕和太阳风能量的传输, 跟踪能量、等离子体在日冕地区的传输过程等	2013年6月27日	LEO, 三轴稳定对日定向
帕克太阳探测器 (Parker Solar Probe, PSP)	追踪日冕加热和太阳风加速的能量流; 理解能量如何从低层太阳大气传输并耗散在日冕和太阳风; 测定和研究太阳风起源处等离子体和磁场的结构与动力学模型, 理解太阳源区的磁场如何与光球层和日球层联系; 探索能量粒子加速和传输机制等	2018年8月12日	0.044 AU×0.73 AU的近日轨道, 倾角为3.4°, 三轴稳定对日定向
太阳轨道器 (Solar Orbiter)	研究太阳风等离子体和磁场起源; 太阳的短时标活动现象怎样驱动太阳变化; 太阳爆发怎样产生能量粒子辐射; 太阳发电机怎么工作等	2020年2月10日	日心轨道0.28 AU×1.4 AU, 最高轨道倾角为34°, 三轴稳定对日定向

a) AU, 日地平均距离单位, 1 AU约为1.496亿千米

## 太阳立体探测任务 - 有效载荷和技术指标

表2 有效载荷技术指标汇总

Table 2 A summary of payload technical indicators

载荷名称		技术指标 <sup>a)</sup>	
全日面磁场和速度场 成像仪	视场	33°(全日面) 8°(局部视场)	
	像元分辨率	2°(全日面) 0.5°(局部视场)	
	工作波段 磁谱精度	FeI 532.42 nm 纵场5G、横场150G	
多谱段极紫外成像仪	视场	41'	
	空间分辨率	1.5"	
	探测光谱	304、193、171、131 Å	
日冕仪	视场	日冕仪1: 1.1~3 Rs; 日冕仪2: 2.5~15 Rs	
	观测波段 杂散光抑制 像元分辨率	日冕仪1: 窄带Fe XIV 530.3 nm, 宽带 535~555 nm; 日冕仪2: 宽带650~750 nm 日冕仪1: $\leq 5 \times 10^{-4}$ ; 日冕仪2: $\leq 10^{-9}$ 日冕仪1: $\leq 4''$ ; 日冕仪2: $\leq 15''$	
	视场中心指向到日冕仪光轴的 角距	相机1: 13.5°; 相机2: 53.7°	
日球层成像仪	视场角	相机1: 20°; 相机2: 70°	
	角分辨率	相机1: 70.4'; 相机2: 4.2'	
	探测波段 杂光抑制( $B_{90}$ (视场边缘)) 亮度灵敏度( $B_{90}$ )	相机1: 630~730 nm; 相机2: 400~1000 nm 相机1: 优于 $3 \times 10^{-12}$ ; 相机2: 优于 $10^{-14}$ 相机1: 优于 $3 \times 10^{-14}$ ; 相机2: 优于 $3 \times 10^{-14}$	
高能X射线谱仪	能量范围	0.5~100 keV	
	能量分辨率	约1 keV@6 keV	
	空间分辨率	优于10"	
数字磁强计	量程范围	$\pm 128$ nT, $\pm 64000$ nT	
	分辨率	24 bit	
	噪声 采样频率	<0.1 nT(均方根) 40 Hz	
三维能量粒子谱仪	能量范围	电子: 30~1000 keV; 质子: 30~12000 keV; 氦离子: 1500~10000 keV	
	能谱分辨率( $\Delta E/E$ )	电子: <0.3; 质子: <0.3; 氦离子: <0.3	
	时间分辨率 角度分辨率	电子: 1 s; 质子: 1 s; 氦离子: 10 s 电子: <25°; 质子: <25°; 氦离子: <25°	
太阳风等离子体分析仪	离子能量范围 电子能量范围 离子流量范围	100~8000 eV 100~1500 eV 0.1 pA~1 μA	
	流量分辨率 时间分辨率	0.1 pA 1 s(区分成分), 1/1000 s(不区分成分)	
	视场范围 粒子分辨 工作频率	120° H <sup>+</sup> , He <sup>2+</sup> , e <sup>-</sup> 10 kHz~50 MHz	
甚低频射电探测仪	频率分辨率	$\leq 1$ kHz(10 kHz~2.0 MHz) $\leq 10$ kHz(1.0~50 MHz)	
	动态范围	$\geq 70$ dB	
太阳活动行星际响应 分析仪	测量范围	耀斑XUV辐射	太阳风
		光谱: 0.05~10 nm	电磁场波动
		低能离子能量: 1 eV~30 keV 中能离子能量: 50 keV/n~300 MeV/n 中性原子能量: 1~200 keV 低能离子视场: 360°×(±45°) 中能离子质量分辨率 ( $\Delta M/M$ ): 0.3@He 中性原子能量分辨率: 10%@50 keV	磁场频率: 10 Hz~100 kHz 电场强度: 1~700 mV/m 电场频率: DC~100 kHz 磁场灵敏度: 50 fT Hz <sup>-1/2</sup> @1 kHz 电场分辨率: 0.05 mV/m

a) Rs: 太阳半径, 1 Rs约等于696,000千米



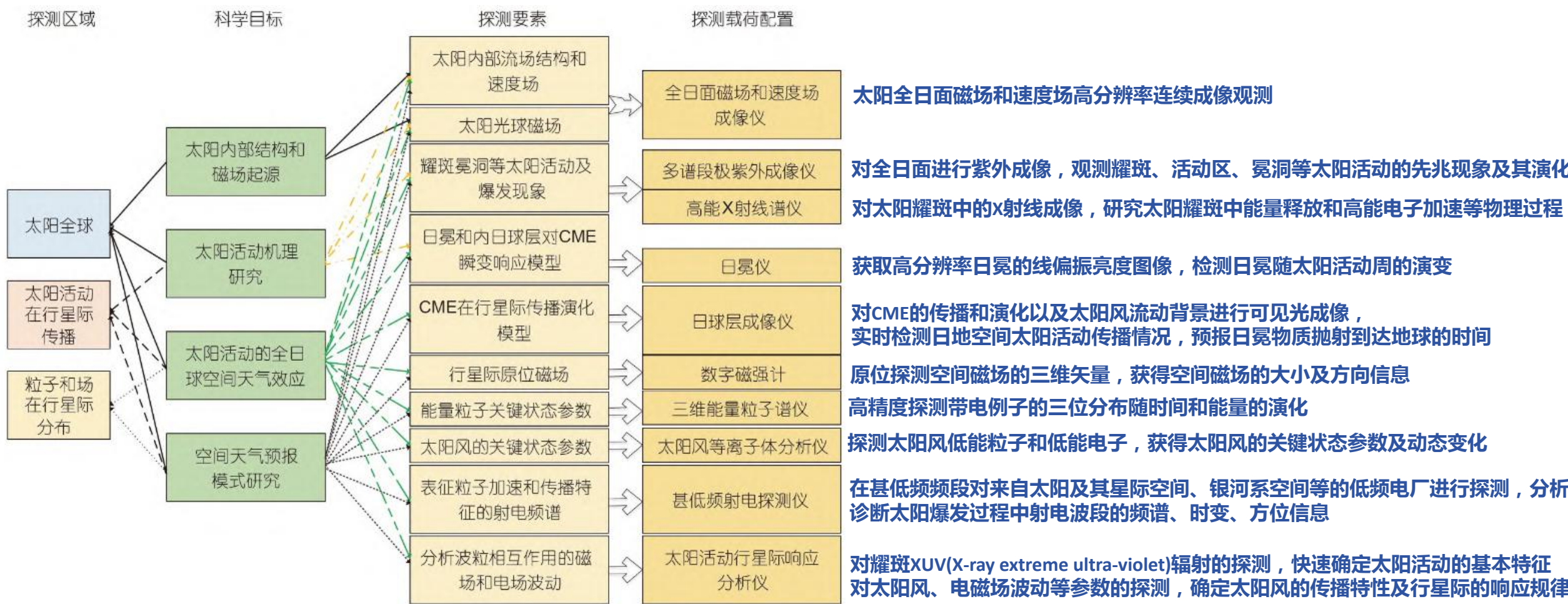


图 1 (网络版彩色)太阳全方位立体探测科学目标、探测要素、载荷配置与探测区域之间的关系

**题目：**  
多模型联合仿真方法综述

**作者：**  
杜焕超,周越,陈志宇,侯坤,周灿

**单位：**  
西安邮电大学自动化学院

**关键词：**  
数字孪生；多源异构模型；FMI协议；  
统一建模语言；联合仿真

**来源：**  
航空电子技术 2024年9月 第55卷 第3期

**数字孪生：**

- 定义：通过数字化技术构建现现实物理世界的虚拟数字模型  
并实现与真实系统的实时数据交互与状态同步，以实现对真实系统的仿真、监测和优化
- 关键组成部分：实时数据对接、数据整合与分析、数据可视化展示等
- **多数字孪生：多个数字孪生模型相互连接协同工作，实现更全面的系统级理解、监控和优化**  
(多物理、多尺度、多学科属性)

**数字模型：**

- 定义：数字孪生的基础，用于模拟系统的物理特性和行为
- 主要组成部分：物理实体的数字表示、实时数据采集和传输、基于模型的仿真和分析
- **仿真是数字孪生的核心，数字孪生本质上是在线数字仿真的一种高级形式**

**多模型联合仿真现存问题：**

1. 技术层面：互操作性（数据交换与接口标准化）；可信度（仿真结果验证）
2. 管理层面：模型所有权（知识产权保护）
3. 用户层面：易用性（UI直观性）；系统调度与兼容性（多模型统一调度管理）

**主要模型仿真方式：**

- 根据模型的连续/离散性质划分：连续仿真（微分方程描述）；离散事件仿真（事件驱动）；混合仿真（
- 根据模型的时空位置划分：分布式仿真（多节点并行）；集中式仿真（单节点处理）

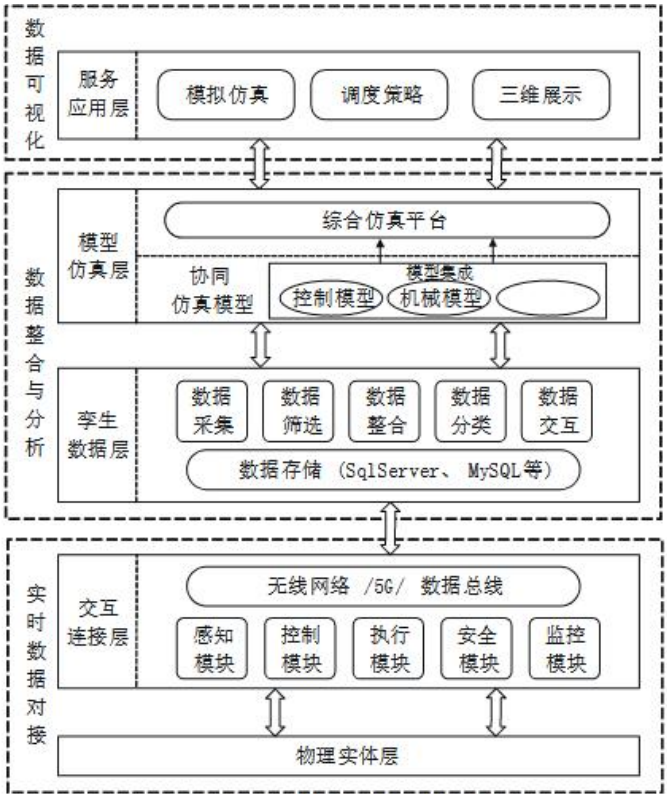


图 1 数字孪生系统的整体框架

**当前主流的多模型联合仿真方法：**

- **基于接口的软件联合仿真方法**  
(接口通常包括API、数据交换格式、通信协议和中间件)
- **基于统一建模语言的仿真方法**  
(使用Modelica跨学科建模语言，和基于Modelica的商用仿真工具Dymola和MWorks)
- **基于功能模型接口的仿真方法**  
(将各模型封装成各自的FMU，使用FMI协议进行模型交互)

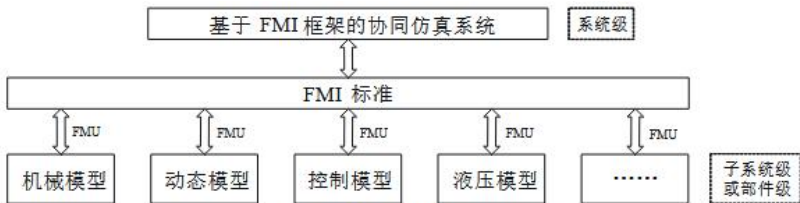


图 5 FMI 模型集成框架

文章信息	当前主流的多模型联合仿真方法对比		
<p><b>题目：</b> 多模型联合仿真方法综述</p> <p><b>作者：</b> 杜焕超,周越,陈志宇,侯坤,周灿</p> <p><b>单位：</b> 西安邮电大学自动化学院</p> <p><b>关键词：</b> 数字孪生；多源异构模型；FMI协议；统一建模语言；联合仿真</p> <p><b>来源：</b> 航空电子技术 2024年9月 第55卷 第3期</p>	<p><b>1. 基于接口的软件联合仿真方法</b></p> <p><b>核心思想：</b> 通过API、数据交换格式、中间件等接口集成不同专业软件平台（如MATLAB、COMSOL、ADAMS等）。</p> <p><b>优点：</b> 模块化强，支持多工具集成 便于分阶段开发与测试</p> <p><b>不足：</b> 模型解耦可能降低逼真度 依赖商用软件，接口多为私有，兼容性差 对开发人员的设计和编码能力要求高</p> <p><b>适用于中小型系统</b></p>	<p><b>2. 基于统一建模语言的仿真方法</b></p> <p><b>代表语言：</b>Modelica</p> <p><b>核心思想：</b>通过统一的数学方程描述多领域系统行为，实现模型的高度抽象与复用。</p> <p><b>优点：</b> 模型可重用、支持分层与参数化建模 易于实现多领域统一建模与数据整合</p> <p><b>不足：</b> 大规模系统仿真性能受限 工具支持在某些专业领域不足</p> <p><b>适用于中小型系统</b></p>	<p><b>3. 基于FMI协议的仿真方法</b></p> <p>- <b>FMI</b>：功能模型接口，是一种开放标准，支持模型交换与协同仿真。</p> <p>- <b>FMU</b>：功能模型单元，是符合FMI标准的模型封装文件。</p> <p><b>两种模式：</b></p> <p>- <b>Model Exchange</b>：由主机工具统一求解，适合简单系统</p> <p>- <b>Co-Simulation</b>：多工具并行求解子模型，适合复杂系统</p> <p><b>优点：</b> 开放标准、模型独立、支持多领域协同 适用于大型复杂系统，具备良好的互操作性与扩展性</p> <p><b>不足：</b> FMU封装与导出需要额外技术成本</p> <p><b>适用于大型复杂系统，多工具协同仿真</b></p>

题目：  
基于FMI的卫星数字仿真平台设计及实现

作者：  
陈欢欢,桑毅,张鹏,吴洪成,王吉旭

单位：  
中国空问技术研究院杭州中心,  
北京控制工程研究所

关键词：  
FMI；模块化；卫星数字仿真平台；场  
景可视化

来源：  
空间控制技术与应用  
2024年2月 第50卷 第1期

现存问题：  
卫星设计涉及多学科仿真模型集成，由于各模型产自不同工具，工具间接口不统一，使模型无法有效集成到统一的工具中进行联合仿真，模型复用性不高、仿真开发和验证效率低

解决方法：

- 使用标准的数据交换接口：2010年10月Modelisar协会 一种独立于仿真工具的接口标准 FMI (Functional mock-up interface)
- **提出多源异构模型联合仿真架构**：模型封装→组态设计→仿真引擎(发布者)→数据推送→事件触发（通知）→可视化更新(订阅者)
- 部件模型模块化，分类管理
- “发布—订阅”模式，系统低耦合、功能高内聚

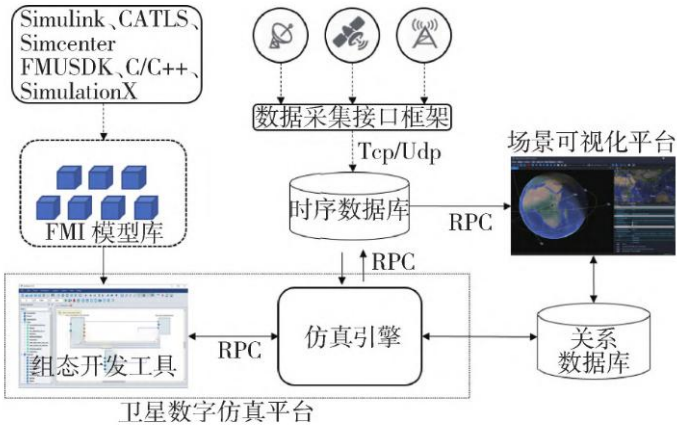


图1 卫星仿真软件整体架构图

Fig.1 Architecture of satellite simulation software

FMI模型封装流程：

- **数据转换**：用于从仿真结果中抽取目标对象的实时数据，然后通过量纲转换和内置数学运算算法，将对象数据转换为三维模型的空间坐标数据或系统的运行数据等
- **事件推送**：用于将数据转换后的信息通过 GPRC（google remote procedure call）接口推送到时序数据库中，随后时序数据库监测到订阅的位号有更新事件时，立即将更新后的数据推送给可视化软件中，达到驱动三维模型运动模拟和过程监控的目的

数据-事件-可视化关系：

仿真引擎完成运算后，将新数据发布到数据库。

数据库随即主动将新数据（或更新通知）推送给所有订阅了该数据的可视化平台。

可视化平台在收到后，直接使用这些新数据驱动三维场景更新