1.项目名称：**太阳帆航天器轨道动力学与控制理论**

2.候选单位（含排序）：**1清华大学，2北京理工大学**

3.候选人（含排序）：**龚胜平，曾祥远，李俊峰、沐俊山**

4.提名意见：

项目课题组一直从事航天动力学与控制理论和应用研究，注重理工结合、理论结合应用，围绕航天中的动力学正反问题，结合光压力-引力叠加的特殊情况（太阳帆航天器）开展研究，取得了一系列具有原创性、新颖性、实用性的成果。太阳帆是一类无需消耗燃料的航天器，在很多任务中具有独特的优势，由于在强引力环境中叠加了受控光压力，传统的航天器动力学分析和控制方法不再适用，项目组结合传统动力学、优化、控制等理论，发现了多种光压力-引力叠加作用下的非开普勒周期轨道，可用于探测传统航天器无法长期运行的空间区域，拓展了人类未来空间探测的范围；太阳帆航天器的轨道和姿态是强耦合的，给航天器长期在轨稳定运行带来新的挑战，项目提出了姿态轨道结构一体化被动稳定控制方法，实现了太阳帆轨道姿态在轨自主稳定；提出了反射率调节的光压力调节方法实现了轨道姿态耦合主动控制，突破了大型太阳帆无附加机构的姿态轨道耦合控制难题；提出了太阳帆编队的思想和构型设计、维持方法，建立了太阳帆编队的理论体系；在理论研究的基础上，开展了多小行星探测任务的总体方案设计和地面展开实验，验证了太阳帆技术的可行性。

提名该项目为北京市科学技术奖自然科学奖（一等奖和二等奖）。

项目主要成果如下：

**1、引力-光压力叠加作用下非开普勒轨道动力学**

研究太阳帆航天器在引力-光压力叠加作用下的动力学规律，更好的利用光压力实现不同轨道之间的星际转移；设计新型非开普轨道并研究其稳定性，为新的空间探测任务提供支撑。首先利用摄动法结合平均化思想发现了太阳帆同步冻结轨道：轨道的其他轨道根数不变，只有升交点赤经保持与太阳光线同步。利用优化方法发现了角动量翻转周期太阳逆行轨道,通过动量矩的逆转实现了轨道倾角直接从0°变为180°。

**2、太阳帆非开普勒轨道编队**

项目组提出了太阳帆编队的思想，利用多颗小型太阳帆实现大太阳帆的功能，系统地研究了太阳帆周期编队的条件、队形设计和控制方法，形成了一套完整的太阳帆编队理论。

3、引力-光压力叠加作用下航天器姿轨控制

太阳帆姿态和轨道是强耦合的，项目组提出了两种新的控制方法，被动稳定控制方法和可变发射率调节的主动控制方法。首先，提出了轨道姿态结构一体化思想，通过设计太阳帆的参数，使得太阳帆的轨道姿态在没有主动控制的情况下自主稳定，给出了被动稳定的一般性条件。其次，提出利用可变反射率调节实现轨道和姿态联合控制，首先建立包含可变反射率太阳帆的耦合动力学模型，证明了该系统姿态轨道的可控性，利用模型预测法设计了新的控制律，用日本IKAROS 的参数验证了该方法的有效性。最后，针对自旋不规则小天体附近的轨道控制问题，开展了小天体特定区域上空静止轨道的主动控制研究，将惯性系中的静止轨道求解问题转化为自旋引力场中的有效势梯度零解问题，在此动力学反问题中求得本体悬停受控轨道。

**4、开展太阳帆地面实验**

申请团队和航天科技集团、中科院一起合作研究了太阳帆实现多小天体探测任务的总体方案，设计并完成了地面缩比的太阳帆折叠展开原理样机，开展了太阳帆地面试验。原理样机尺寸为8m×8m，质量约15kg。由帆面、充气臂、中心体、滑块、姿态控制机构等部分组成。对原理样机在不同帆膜厚度情况的振动频率、不同预应力下的挠度和帆膜的褶皱率进行了测量，与数值建模结果进行了对比，验证了充气展开技术和利用滑块进行姿态控制技术。基于该地面试验结果建立了高可信度的结构姿态轨道耦合动力学模型，可用于大尺寸帆的任务设计。

项目团队在太阳帆领域的成果在航天动力学与控制领域国际顶级期刊JGCD，IEEE等系列期刊上发表SCI论文50余篇，获得来自太阳帆领域的英国工程院院士McInnes，中国科学院院士胡海岩、航天动力学领域的美国工程院院士Alfriend、Junkins、Scheeres，以及意大利太阳帆领域知名教授Mengali，世界首颗太阳帆IKAROS任务副总指挥日本宇航局Tsuda教授、日本京都大学Kojima教授，西北工业大学袁建平教授与和兴锁教授，哈尔滨工业大学崔乃刚教授，上海交通大学陈立群教授等国内外同行专家的肯定与引用，施引文献来自于AIAA系列期刊，IEEE汇刊，AA，AST, ASR,CMDA等著名期刊。项目成果推动了我国太阳帆动力学与控制方向的发展，支撑了太阳帆航天器动力学与控制领域的关键核心技术创新，为我国未来发展太阳帆航天器奠定了理论基础。

5.相关证明材料：

（1）自然科学类：申报推荐书中“五、六、七目录”所有内容；

**五、第三方评价与学术应用情况**

引文1：《Journal of Guidance, Control, and Dynamics》中美国科学院院士，科罗拉多大学教授Scheeres团队文章指出：太阳帆在小天体附近动力学的研究尚不充分，我们集中研究了小天体的极轨和悬停平衡位置，通过太阳帆或者小推力可以产生这些悬停平衡点。原文：The dynamics of a solar sail in close proximity to an asteroid have not yet been investigated in great detail. Previous work has mainly focused on terminator orbits [16] and the existence of hovering points at an asteroid [16–20]. These hovering points originate when adding a solar sail.

引文2：《Journal of Guidance, Control, and Dynamics》中美国科罗拉多大学的冠名教授，AIAA和AAS双会士，Hanspeter Schaub教授团队文章中指出：龚等提出了太阳帆编队进行地磁尾探测（实际上就是申请人提出太阳同步冻结轨道附近的编队），沐等进一步拓展了该工作，研究了编队的轨道姿态耦合控制，结果显示利用反射率调节可以同时实现姿态轨道控制。原文：Gong et al. [5] propose solar sail formation flying for exploring the geomagnetic tail. Mu et al. [6] expand the work in [5]…. The coupled control of a reflectivity modulated solar sail formation is discussed by Mu et al. in [7].（[5-7]为申请人工作，沐为申请人指导的博士生）。

引文3：《Journal of Guidance, Control, and Dynamics》中日本首都大学东京Hirohisa Kojima教授（Ikaros 任务轨道设计者）团队文章中引用申请团队7篇文章，文章中指出现有大部分文献研究了利用可变反射率进行轨道或姿态的控制…一些学者研究了利用可变反射率实现了Geosail编队任务的轨道姿态耦合控制[21,22]。原文：Most of the existing literature about a solar sail and RCDs discusses the orbital control and attitude control independently… Some researchers presented the coupled attitude–orbit control for a solar sail equipped with RCDs and discussed it for GeoSail formation flying [21,22] and a solar sail in a Venus rendezvous [23].

引文4：《Journal of Guidance, Control, and Dynamics》中JGCD副主编Gurfil教授团队文章指出沐等用反射率调制技术方法实现了太阳帆编队的轨道和姿态轨道耦合控制，在此基础上他们利用反射率调制实现了光压力进行月球轨道卫星编队保持问题。原文：Mu et al. [20] used a reflectivity modulation technology to control a solar sail formation and extended this method to simultaneously control the orbit and attitude of the GeoSail satellite [21].

引文5：《Aerospace Science and Technology》中科院院士李东旭院士团队的论文指出：申请团队提出的通过分布可变反射率材料可以产生可控的光压力矩[21,22]，可变反射率装置是一种通过改变光学特性来产生可控光压力力矩的有效方法[23-35]。原文：By the cooperation among the distributed devices, controllable SRP torque can be generated when exposed to the Sun[21,22]. The reflectivity control device (RCD) is an efficient device to generate controllable SRP torque by switching its optical features[23–25].（文献 [22], [25] 为申请团队的工作）

部分其他第三方评价与学术应用情况：

1、英国皇家科学院院士Colin McInnes教授团队的文章中7处直接引用申请团队的成果，指出：“龚等给了太阳同步冻结轨道的解析条件，并在多处直接使用申请人推导的解析条件来设计相应的轨道。”原文：Work presented by Gong et al. on orbital dynamics using solar sails obtains analytical expressions for the SRPF components…; …control the Keplerian elements to follow their desired values and achieve a Sun-synchronous orbit as suggested by Gong.

2、科罗拉多大学Hanspeter Schaub，AIAA会士Schaub和皇家科学院院士McInnes团队文章分别指出：“我们团队提出的太阳帆编队引力拖车是一种有效和强大的引力拖车；提出的太阳帆编队引力拖车的研究，推进了太阳帆的应用和推进技术。”

原文：Alternatively, Gong proved the reliability of solar-sail formations in displaced orbits as effective and powerful gravity tractors.4

原文：More recently displaced orbits have been investigated for a range of applications and propulsion technologies (Mengali and Quarta 2009; Gong et al. 2009).

3、原西北工业大学副校长袁建平教授团队文章指出：“我们团队的工作证实了通过切换每个电致变色板的状态调整帆膜光学特性可以维持一种椭圆悬浮开普勒轨道，为研究椭圆悬浮轨道中航天器相对距离的极值提供理论依据。”原文：This is possible by exploiting the fact that the mean optical properties of the sail’s film can be adjusted, within some limits, by switching on or off the state of each electrochromic panel (Gong and Li, 2014; Mu et al., 2015a,b; Hu et al., 2016). （三篇文章均为申请团队的工作）

4、哈尔滨工业大学的齐乃明教授团队文章指出：“哈尔滨工业大学的齐乃明教授团队文章指出：申请团队针对位移轨道上太阳帆的姿态-轨道耦合动力学和控制方面做了大量有意义的研究，提出了围绕位移轨道飞行的太阳帆编队概念。”原文：Gong did a lot of work on the coupled attitude-orbit dynamics and control of a solar sail in displaced orbits [5 ,6] and proposed the solar sail formation flying around displaced orbits [7–10].

5、米兰理工大学的James D. Biggs教授团队文章指出：“申请团队提出的通过改变反射率特性实现太阳帆航天器的控制，论证了使用RCD在镜面反射和吸收状态之间切换可以提供更大范围的控制力矩，验证了RCD进行深空轨道控制概念的可行性。”原文： The concept of using RCDs has been demonstrated for deep-space orbit control in Refs. [4–7] and for orbit-attitude control in the vicinity of libration points in Refs. [6,7]. The RCDs are assumed to switch between a specular and an absorptive state, offering a wider range of torque magnitudes as compared to diffusive-to-specular switching [4,6].

6、东京大学Junichiro Kawaguchi研究员（多个型号总师）团队文章指出：“申请团队提出了利用RCD反射调制在地球轨道编队飞行任务中的应用，他们在此基础上设计了一种利用RCD实现旋转三维太阳帆膜上横向振动的控制方法。”原文：The application of reflectivity modulation to the GeoSail formation flying mission was proposed in Ref. [15].

7、中山大学吴志刚教授团队文章指出：“关于地球轨道编队飞行中反射调制太阳帆的耦合控制的研究表明，除了姿态操纵外，太阳帆航天器的轨道运动也受到可调节RCDs的重要影响。龚等研究运行在椭圆轨道上的小天体附近的平衡点”原文：Besides for attitude manipulation of a sailcraft, the orbital motion is also deeply influenced by the modulatable SRP force by the RCDs and the control of the orbit/attitude motion was explored simultaneously (Hu et. al., 2016; Mu et. al., 2015). Gong et. al. focused on equilibria of solar sail with RCDs near asteroids within the framework of elliptical Sun-asteroid restricted three-body system and body-fixed reference frame. The feasible equilibria determined by the lightness number and reflectivity coefficient were investigated numerically (Gong and Li, 2015).（三篇文章均为申请团队的工作）。

8、日本航空航天局的Yuya Mimasu研究员团队工作指出：“申请团队研究了小行星附近的悬停问题，他们的研究工作将申请团队的太阳帆在小行星固连坐标系中的悬停问题进行延伸，运用于隼鸟二号小行星探测器相对小行星表面的低空悬停技术研发。”

原文：Hovering around an asteroid has been studied previously. For example, hovering in an asteroid body-fixed frame has been studied in Ref. [8] the hovering operation in an inertial frame is well explained in Ref. [9]. (文献[8],[9]均为申请团队的工作)。

9、南京大学侯熙云侯锡云教授团队的文章指出：“航天器在光压力作用下在小行星附近的悬停、极轨已经被申请团队进行充分的研究，他们的工作将申请团队的工作扩展到双小行星系统。”

原文：The role of the SRP for spacecraft around a single asteroid has been extensively studied, from hovering orbits [32,33] to the well-known terminator orbits and heliotropic orbits [34–36], but much less for the BAS [37].

10、国防科技大学的李海阳教授团队的工作指出：“曾等人研究了太阳帆在细长型小行星表面定体本体悬停问题，在无燃料消耗的情况下大大的延长了悬停时间，他们将该方法应用于非合作航天器目标上的定体本体悬停控制。”

原文： Zeng proposed the solar sail spacecraft’s hover over an asteroid, which greatly extended the hover time and hover range without fuel consumption [12].

**六、代表作发表情况（限5篇）**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **检索机构：** | | | | **检索数据库** | | | | | | |
| **序号** | **代表作名称** | **刊名/出版社** | **发表时间**  **(年月日)** | | **通讯**  **作者** | **第一**  **作者** | **全部作者** | **第一署名单位** | **年卷期页码** | **他引次数** |
| 1 | Solar sail body-fixed hovering over elongated asteroids | Journal of Guidance, Control, and Dynamics | 2016-02-24 | | 曾祥远 | 曾祥远 | 龚胜平，李俊峰，Kyle T. Alfriend | 北京理工大学 | 39（6），1223-1231 | 46 |
| 2 | Coupled control of reflectivity modulated solar sail for GeoSail formation flying | Journal of Guidance, Control, and Dynamics | 2014-04-02 | | 沐俊山 | 沐俊山 | 龚胜平，李俊峰 | 清华大学 | 38 (4), 740-751 | 44 |
| 3 | Formation flying solar-sail gravity tractors in displaced orbit for towing near-Earth asteroids | Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy | 2009-06-02 | | 龚胜平 | 宝音贺西 | 李俊峰，宝音贺西 | 清华大学 | 105 (1), 159-177 | 29 |
| 4 | Solar sail formation flying around displaced solar orbits | Journal of Guidance, Control, and Dynamics | 2007-07-01 | | 龚胜平 | 龚胜平 | 宝音贺西，李俊峰 | 清华大学 | 30 (4), 1148-1152 | 22 |
| 5 | Solar Sail Planar Multireversal Periodic Orbits | Journal of Guidance, Control, and Dynamics | 2014-02-21 | | 曾祥远 | 曾祥远 | K. T. Alfriend and S. R. Vadali | 清华大学 | 37（2）：674-681 | 29 |
| 合　　计 | | | | | | | | | | 170 |

七、代表作被他人引用、应用情况（限5篇）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **被引代表作序号** | **引文名称/引文作者** | **引文刊名** | **引文发表时间**  **（年 月 日）** |
| 1 | Solar-Sail Orbital Motion About Asteroids and Binary Asteroid Systems/ Heiligers J, Daniel J S | Journal of Guidance, Control, and Dynamics | 2018-04-30 |
| 2 | Establishment of Natural Solar Sail Formation Using Solar Electric Propulsion/ Parsay K， Schaub H | Journal of Guidance, Control, and Dynamics | 2015-12-29 |
| 3 | Solar Sail Orbital Control Using Reflectivity Variations near the Earth–Moon L2 Point/ Tamakoshi D, Kojima H | Journal of Guidance, Control, and Dynamics | 2017-09-06 |
| 4 | Lunar Satellite Formation Keeping Using Differential  Solar Radiation Pressure/Nie T, Gurfil P, Zhang S J | Journal of Guidance, Control, and Dynamics | 2020-04-01 |
| 5 | A novel reaction wheel unloading method with stability analysis for solar sails utilizing liquid crystal devices/ Ji H R, Li D X | Aerospace Science and Technology | 2021-12-01 |