



太空轮原理及其在深空运输中的应用构想

刘二中

中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 提出一种基于旋转缆绳结构的新型空间基础设施——“太空轮”系统, 并系统阐述其在近地轨道、地月空间、行星际航行及小天体开发等多场景下的应用构想。该方案利用数千米至数十千米长的回转缆绳将不同的空间装置(如动量站或动量承载体)与挂靠器相互连接并相互回旋形成太空轮, 允许其他途经的飞船与挂靠器短暂对接后借助旋转运动实现高效动量交换, 从而大幅降低深空任务对推进剂的依赖。具体而言, 可在近地空间构建回转式太空梯; 在火卫一或小行星上可构建固定式太空轮, 为火星或资源开发任务提供速度增量; 运行于地心高偏心轨道的“月球渡船”可周期性往返地球与月球; 而日心轨道上的“行星渡船”则有望形成覆盖水星至小行星带乃至木星轨道的行星际“公交网络”。此类系统具备数十年服役潜力, 其旋转结构不仅能提供可控的人造重力以保障乘员健康, 还可集成辐射防护层, 提升载人深空飞行的安全性。尽管在超长缆绳材料、自主交会对接、柔性多体控制及空间交通管理等方面仍面临工程挑战, 但随着先进材料与在轨服务技术的发展, 太空轮有望成为未来可持续太阳系探索与开发的关键支撑平台。

关键词: 太空轮; 动量交换; 空间运输系统; 行星际公交; 人造重力; 小天体开发; 深空基础设施

中图分类号: V57

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2026)01-0015-13

引言

自 20 世纪初康斯坦丁·齐奥尔科夫斯基(Константин Эдуардович Циолковский)提出以液体推进剂火箭为基础的宇航理论以来^[1], 人类对太空的探索已从理论构想逐步演进为系统性的工程实践。如今, 航天活动正经历一次深刻的范式转换: 从以科学探测为主导的“认知太空”阶段, 转向以资源开

发、基础设施建设和地外定居为目标的“利用太空”新纪元。2023 年, NASA 发射“灵神星”(Psyche)探测器^[2], 目标直指主小行星带中富含铁、镍及铂族稀有金属的金属型小行星 Psyche。该任务不仅具有科学价值, 更被视为未来太空资源商业化开采的关键前哨。而以 SpaceX 为代表的私营航天力量正推动更具雄心的星际愿景——埃隆·马斯克提出的“星舰”计划^[3], 旨在构建由上千艘可重复使用飞船组成的运输

收稿日期: 2024-12-23; **修回日期:** 2025-07-30

作者简介: 刘二中(1949—), 男, 教授, 研究方向为科学技术哲学、科学技术史。E-mail: liuerzhong@aliyun.com

引用格式: 刘二中. 太空轮原理及其在深空运输中的应用构想[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2026, 18(1): 15-27. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20240155. CSTR: 32282.14.JES.20240155

LIU E Z. Principle of Space Wheel and Its Application in Deep Space Transportation[J]. Journal of Engineering Studies, 2026, 18(1): 15-27. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20240155. CSTR: 32282.14.JES.20240155

体系, 最终实现将 10 万人及生存物资运送至火星, 开启人类多行星文明的序幕。

我国的航天专家并未袖手旁观, 近年来积极倡导星际航行和运输的“航班化”, 并宣布了“天工开物”计划^[4]。该计划初步规划我国将采取分步前进的方式, 逐步在月球、火星以及近地小行星上进行建设, 并从太空中开采各种必要的自然资源。借助探索太空和其他星球的活动, 人类世界将真正迎来全新的太空时代。

然而, 采用传统火箭技术将有效载荷送入近地轨道时, 其有效载荷质量通常仅占起飞总质量的百分之几^[1], 效率极低, 难以满足未来大规模空间经济开发对成本效益的要求。在星际航行过程中, 无论是加速或减速、改变飞船动量或运动方向, 还是调整轨道高度以脱离或接近天体, 均需消耗大量推进剂, 带来高昂的能源与经济代价。显然, 在出航阶段需大幅增加飞船的机械能, 而在返航阶段又不得不耗费大量能量将其机械能降低, 这种能量利用方式极为低效。因此, 发展更高效、更节省推进剂的空间推进技术已成为迫切需求。为此, 学界和工程界多次重新提出“太空电梯”构想^[5], 开展了“太阳帆”技术试验^[6], 并提出了基于地球磁场的“电动系绳助推”空间装置等新型方案^[7] (参见美国专利 US-6419191-B1), 以期实现空间推进技术的突破性进展。

受此启发, 笔者在过去二十年持续探索实现机械能可逆利用的空间系统架构, 并自 2023 年 8 月起在中国陆续提交系列专利申请, 正式提出“星旋系统” (亦称“太空轮系统”) 的基本原理及其若干衍生技术^[8-12]。该系统通过在轨动态存储、传递与再分配飞行器的机械能, 旨在构建轨道转移过程中的能量闭环, 显著降低对传统推进剂的依赖。本文将围绕太空轮系统的基本原理与核心工作机制展开阐述, 进而对若干可能的应用模式进行分类说明, 并结合典型场景初步分析其技术特点与适用边界。随后, 将针对近地轨道、月球、行星及小天体等不同空间环境, 探讨相应构型的可行性与潜在优势。在此基础上, 拟提出一种集成化的“星际高铁”联合运输方案作为示例, 用以初步展示该系统在复杂深空任务中实现多平台协同运行的一种可能路径及其工程潜力。同时, 也将指出

当前在高强度材料、高精度控制、非线性动力学建模等关键技术方面所面临的主要挑战。需要强调的是, 上述方案仅为探索性构想之一, 旨在为未来空间运输体系提供一种新的思路; 期望借此激发更多科研人员的关注与讨论, 共同推动下一代高效、可持续航天基础设施的前瞻性研究。

1 太空轮系统 (Space Wheel, 星旋系统) 基本原理

太空轮系统可以被定义为一个为空间飞行器提供挂靠、变速和变轨服务的远距离绳索互旋系统^[8-10, 12]。具体来说, 这种系统是在近地或近星体空间中, 设置两个或多个空间装置 (包括挂靠站或挂靠器), 利用高强度绳索在数千米至数百千米的远距离范围内相互牵拉, 提供向心加速度, 使这些装置能够彼此绕行回旋, 从而构成太空轮系统 (或称为星旋系统)。同时, 该系统的重心或质量中心在地球或星体引力场中会进行公转或移动。显然, 其中绳端空间装置 (例如挂靠站或挂靠器) 的轨道高度及运动方向会随着回旋运行而不断发生大幅变化。若其他飞船能够以顺行方式平稳对接至系绳末端的挂靠站, 并在适当时机安全脱离, 则其轨道高度或速度矢量可实现显著改变, 而整个过程仅需在交会阶段短暂启用, 甚至无须启动飞船自身的推进系统。在飞船利用太空轮加速时, 实际上是利用了太空轮的机械能, 而在飞船需要减速回归时, 则可以将机械能回馈给太空轮。在这个过程中, 太空轮的回旋速度可以基本保持不变, 但是其公转轨道会相应降低或升高, 或者升降相抵。

实际挂靠时, 飞船需要沿着挂靠站的环形轨道的切向方向接近, 并与挂靠站同时同速到达切点, 以进行挂靠操作。为了适应交会时挂靠站的回转移动, 飞船可能需要短暂开动喷射发动机, 提供向心推力, 在挂靠操作完成前保持其与挂靠站同样的向心运动。飞船与挂靠站之间的接触连接, 可以通过使用钩连装置、挂靠装置或机械手装置来实现。这些装置可以类似于列车车厢端部的车钩, 如詹氏车钩^①或缓冲装置, 或利用挂靠台架、专用接头, 以便在尽量短的时

① 詹氏车钩 (Janney coupler) 是一种广泛应用于铁路车辆端部的自动连接装置, 其通过钩锁机构实现无须人工干预的快速咬合与锁定。借鉴其机械原理, 可设计一种适用于飞船与挂靠站之间的触碰式对接机构: 当两者接触时, 该机构能在瞬间自动完成捕获与锁定, 从而在极短时间内实现高效、可靠的连接。

段内完成触碰连接。当飞船随着挂靠站回转, 移动到期望的轨道高度、转动到期望的运动方向或相对于星体的速度时, 可以脱离挂靠站继续独自飞行, 从而实现改变高度或加减速的效果。

齐奥尔科夫斯基在推导液体火箭发动机的动力公式时, 运用了牛顿力学的第三定律和动量守恒定律。同样, 解释太空轮系统的运作原理也离不开这些定律所导出的机械能守恒定律。忽略飞船在挂靠时短暂开动发动机所带来的影响, 飞船与太空轮相对于星体的总机械能基本保持不变。在需要的情况下, 太空轮既能帮助飞船脱离星体时加速或增加机械能, 又能在飞船趋近星体时帮助其减速或减少机械能。其机械能有可能保持基本平衡, 从而维持其环绕星体轨道的平均高度, 实现长期稳定的运行。这恰好满足了往返式或航班式宇航的需求。

2 太空轮系统原理利用的基本类型

太空轮系统对飞船轨道与动力学状态的调控主要通过以下几类机制实现: 轨道升降模式、速度增减模式、兼具轨道与速度调节功能的混合模式、与小型天体耦合运行模式, 以及远距离搭载(即“渡船”)模式。

2.1 轨道升降模式

轨道升降模式^[9-10]的主要特点是其牵拉绳索较长, 需要时可达到数十、数百千米甚至更长。然而, 被牵拉的挂靠站或挂靠器的回旋切向速度却较低, 通常低于 100 m/s, 这有助于减轻绳索所受的离心张力负担。在此模式下运行的太空轮可使挂靠飞船的轨道高度实现接近绳索长度 2 倍的提升或降低。制约该模式最大升降幅度的主要因素包括绳索材料的抗拉强度与密度、回旋角速度、允许的最大离心张力以及所在引力场的梯度。

典型的近地空间升降太空轮系统的牵拉绳索延伸距离通常在几十到几百千米之间, 绳端向心加速度一般不明显高于 0.1g, 只需保持回旋运转即可。举例来说, 当飞船的载荷质量为 10 t, 向心加速度为 0.1g 时, 所需的向心力为 9.81 kN。在太空轮系统中, 质

心至绳端的距离为 100 km, 回旋方向与质心的公转方向一致。绳端切向速度为 100 m/s, 与向心加速度 0.1g 相对应。搭载飞船的升降幅度最大可达 200 km。采用超高强度弹簧钢丝绳(抗拉强度约为 3000~4000 MPa, 密度为 7.81 g/cm³), 其截面积为 100 mm², 对应的极限抗拉载荷约为 300~400 kN。对于长度为 100 km 的绳索, 其自重约为 78.1 t。假设该绳索绕系统质心以平均半径 50 km 作匀速回旋, 则在典型运行工况下所产生的离心力小于 38.5 kN。若所牵拉的挂靠站及小型飞船总质量不超过 50 t, 在平稳轨道运行状态下所需的向心力仅约 49 kN。在此条件下, 绳索的剩余承载裕度可达 196~294 kN, 远高于实际需求, 完全满足结构安全与功能要求。为进一步提升长期运行的可靠性与载荷适应能力, 还可通过适度增大绳索直径以提供更高的安全裕度。

2.2 速度增减模式和混合模式

速度增减模式^[9-10]的主要特点是太空轮系统的牵拉绳索长度相对较短, 一般为数千米至数十千米。被牵拉的挂靠站的回旋切向速度较高, 可超过数百米每秒。多数情况下, 回旋方向和质心公转方向应与地球或星体自转方向一致。具体来说, 当飞船需要加速时, 其前进速度低于太空轮, 但运行方向相同, 使飞船从前方按照挂靠站后向回转圆周切线方向接近挂靠站并挂靠上, 然后向后进行圆周运动。当转到向前的瞬时方向时, 挂靠站释放该飞船, 令其以比太空轮更快的速度向前运动。这样, 飞船就借用了太空轮的动量。相反, 如果飞船需要减速, 其前进速度快于太空轮, 可以令飞船从后方按照挂靠站前向回转圆周切线方向接近挂靠站并挂靠上, 然后向前进行圆周运动。当运动转到向后的瞬时方向时, 挂靠站释放该飞船, 令其以比太空轮更慢的速度向前运动。这样, 飞船就将一定的动量返还给了太空轮。

飞船速度改变的幅度最大可接近原来飞船与太空轮重心相对速度的两倍。显然, 如果原来的飞船是与太空轮迎面而来, 挂靠并回转 180°后, 其速度会得到进一步的提高。如果太空轮设置在围绕月球的轨道上, 它还可以帮助逆向而来的探测器加速, 使其向外行星方向飞行。然而, 制约这种模式下最大速度变化

幅度的主要因素包括绳索的抗拉强度和材料密度、最大离心张力以及飞船或乘员所能承受的最大向心加速度。

以变速型太空轮系统为例, 若需对用户飞船实施约 1 km/s 的速度增量, 则绳端挂靠站的切向速度宜设定为 500 m/s 。当系统质心至挂靠站的回旋半径为 25 km 时, 挂靠站所受向心加速度为 10 m/s^2 , 略高于标准重力加速度 ($g \approx 9.81\text{ m/s}^2$)。假设挂靠飞船质量为数吨量级 (例如 5 t), 其在该工况下产生的离心拉力约为 50 kN 。此外, 还需计入挂靠站自身质量及绳索自重所引起的附加张力。考虑一段长 25 km 、截面积 200 mm^2 的超高强度钢丝绳 (抗拉强度约 3500 MPa , 密度 7.81 g/cm^3), 其极限抗拉载荷约为 700 kN , 自重约为 39.2 t 。在 500 m/s 回转条件下, 若按线性分布近似处理, 整段绳索因自重产生的等效离心张力约为 192 kN , 此值对应于绳段平均向心加速度 (约为绳端加速度的一半, 即 5 m/s^2)。扣除上述张力后, 该绳索仍可为挂靠站及飞船提供约 490 kN 的剩余承载能力, 满足典型任务需求。若采用高强型碳纤维复合材料 (抗拉强度 $2500\sim 4500\text{ MPa}$, 密度 $1.78\sim 1.96\text{ g/cm}^3$), 其自重产生的离心张力可降至钢丝绳的约 $1/4$, 显著提升有效载荷裕度。当然, 需充分评估其在长期空间环境中 (尤其是高能粒子辐射与原子氧侵蚀) 的力学性能退化问题, 确保结构可靠性。

在实际应用场景中, 多数太空轮会运用混合模式对飞船的运行产生影响, 也就是同时采用轨道升降模式与速度增减模式, 其设计参数会综合考量两种模式, 以获取更优的综合成效。

2.3 与小型天体结合模式

与小型天体结合模式^[12]是将太空轮-星旋系统中绳索一端的空间装置刚性锚定于某一较小自然天体 (如小行星或天然卫星) 的自转极点, 并通过轴承机构将该装置的突出结构与牵引绳索相连接。这样, 绳索及其另一端所连接的挂靠站将以该轴承为轴心, 围绕该小型天体进行轨道运动。此种构型不仅显著提升了整个太空轮系统的总质量, 从而增强其动力学稳定性, 亦大幅拓展了系统在调控飞船运行模式方面的灵活性与潜力。

2.4 远距离搭载 (渡船) 模式

若将太空轮系统的质心置于高偏心率的公转轨道上, 使其周期性地往返于地球近地空间与月球轨道之间, 或运行于地球与某一行星轨道之间, 则可利用该系统作为轨道转移平台, 顺带将挂靠其上的飞船运送至月球附近, 并将其释放至与月球轨道相匹配的转移轨道; 或类似地, 将飞船从近地轨道携带至目标行星邻近区域。在回程阶段, 该系统亦可搭载其他飞船执行逆向轨道转移任务, 从而实现定期、双向的“轨道渡船”功能。此种运行模式可显著降低多艘飞船在地月系统或地-行星间周期性往返任务中的推进剂消耗与总体任务成本, 提升深空运输系统的经济性与可持续性。

3 应用形式举例

上述利用模式可进一步细化, 以下举例予以说明。

3.1 近地太空轮

近地太空轮的一个典型构想是升降式太空轮, 亦可称为“回旋太空梯” (rotating space ladder)。

太空电梯 (space elevator) 的概念最早由齐奥尔科夫斯基于 100 多年前提出, 其基本构想是从地球同步轨道 (约 35786 km 高度) 部署一条高强度缆绳延伸至地面基站, 并通过电力驱动的运载舱沿缆绳实现天地间的物资运输。尽管该设想在后续一个多世纪中被反复探讨与完善, 但受限于现有材料科学的发展水平——尤其是缺乏兼具超高强度、低密度与长期空间环境稳定性的缆绳材料——其实现仍面临根本性技术障碍。现在可借助太空轮系统原理构建一种无须电力驱动的旋转太空梯, 以长期为不同飞船在近地空间实现数百 km 的升降提供助力。

图 1 所示为一个为空间站服务的太空轮。其公转轨道及周期与空间站相同, 同步运行, 从而能够反复在低点 A 与空间站之间往返接送飞船。具体方法是: 当太空轮带着回程飞船到达低点 A 时, 回程飞船脱离挂靠, 同时另一艘去程飞船与其挂靠; 且两艘飞船质

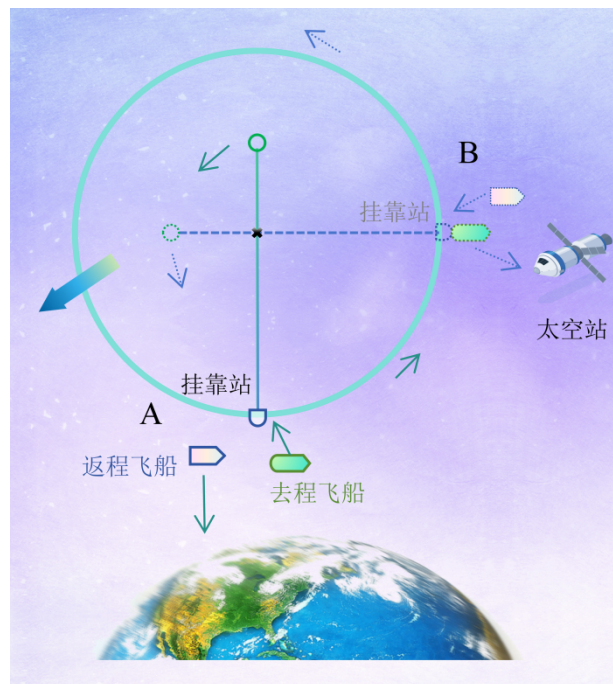


图1 为空间站服务的升降太空轮运行示意图

Figure 1 Schematic diagram of the space wheel operation for servicing the space station

量相近。如果去程飞船脱离挂靠前往空间站或回程飞船挂靠进入，均尽可能在点B进行（点B是太空轮公转轨道上接近其质心的一个点），这有利于保持太空轮公转轨道和运转状态基本不变，或维持其与空间站的较近距离。

在挂靠升高的过程中，飞船通过与太空轮系统的机械耦合，有效利用其旋转动能，将部分机械能转化为自身的引力势能；而在回程下降阶段，飞船又可将其部分势能反向回馈至太空轮系统，从而在不消耗额外推进剂的前提下，恢复太空轮原有的轨道高度与能量状态。

基于相似的能量交换机制，可在特定地球轨道高度部署长期运行的环地转运型太空轮系统——“洲际太空轮”。该系统可捕获已进入近地空间但尚未达到第一宇宙速度（约7.9 km/s）的空天飞行器，在完成对接后，借助太空轮的旋转运动将其携带至上万km外的目标洲际区域上空，并以低于第一宇宙速度的状态将其释放。随后，飞行器可依靠气动滑翔能力完成末端进场与着陆，从而实现高效率、低能耗的洲际空

天运输。这一构想契合包为民院士所倡导的“航班式空天飞行”理念，为未来可重复使用空天运输系统提供了潜在的技术路径^[13]。

此外，近地轨道中还可部署一类专门用于轨道速度调节的“近地变速太空轮”。如2.2节所述，在“速度增减模式”下，此类系统可通过动量交换对航天器实施加速或减速操作。然而需指出的是，受限于当前绳索材料的强度，单级变速太空轮所能提供的速度增量要超过2 km/s需要克服更多困难，这构成了其工程应用中的关键制约因素。

3.2 月球太空轮

月球太空轮的一个典型构想是近月空间转运与变速系统，其轨道高度距月表约50~500 km，由一条长约25 km的系绳连接月球观测站与转运挂靠站构成，可同时挂靠两艘飞船。该转运挂靠站的回转方向与其绕月公转方向一致，切向速度约为500 m/s，产生的向心加速度接近1g，可为乘员提供类地人工重力环境，显著提升长期驻留的舒适性与可行性。该系统可使停靠的观光飞船周期性地接近或远离月球表面，便于乘客对月面进行俯瞰观测。观光任务结束后，飞船可以入泊太空轮前相近的速度脱离太空轮返回地球，亦可调整航向前往其他目的地。

此外，还可以利用该挂靠站让外侧前来挂靠的飞船回转180°到内侧脱离，减速近1000 m/s，使其速度接近或低于1.68 km/s的月球环绕速度，从而便于在月表降落。利用该挂靠站同样可以使在内侧停靠的飞船回转至外侧脱离，加速近1000 m/s，使其速度接近2.38 km/s，以便于其离开月球引力范围。

月球太空轮亦可为途经的行星际飞船提供变速支持，显著降低地球-行星间航行所需的能量消耗，提升深空运输的效率与经济性。

3.3 行星或小行星太空轮

行星太空轮的运作方式与近地太空轮相似。小行星太空轮的运作方式与月球太空轮类似，类似月球观测转运太空轮系统也可以被安排在环绕小行星的轨道上。然而，对于小行星太空轮而言，其绳索长度及挂靠站的切向速度可能会相对较小。

图2所示的是一个三体太空轮系统，它围绕一个小行星运转，拥有三个挂靠子站，可以同时容纳三艘飞船。这个太空轮的自转方向与围绕星体的公转方向一致，自转速度略快于公转速度，这使得飞船上的乘客可以周期性地靠近或远离小行星的表面。这种三角形的结构使得回旋系统的运动态势更加稳定。此外，小行星太空轮还可以为停靠的飞船提供加速或减速的服务。飞船在降落或远离该小行星时，可以利用这个转运站，从而节省燃料消耗。

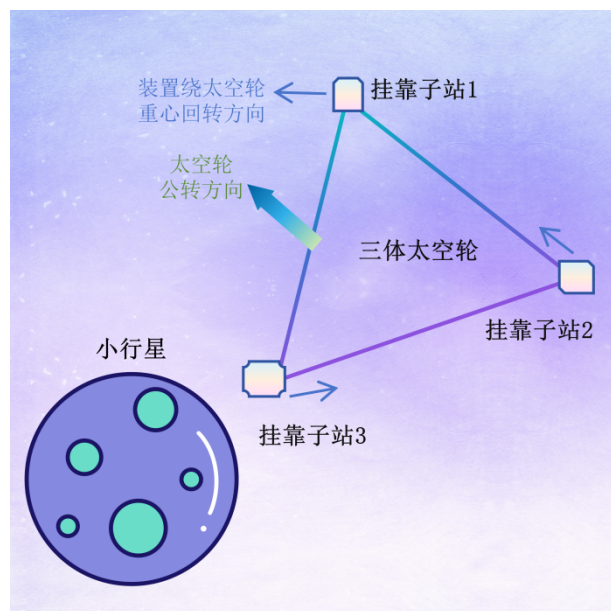


图2 小行星三体太空轮运行示意图

Figure 2 Schematic diagram of the asteroid three-body space wheel

由于小行星的质量较小，其表面脱离速度较低，太空轮能以较低的速度围绕其公转。若使太空轮的自旋线速度与其公转速度相近——特别是在逆行至轨道近点时，使其自旋速度与公转速度大致抵消——则可显著降低其绳端装置相对于小行星表面的速度，从而有望利用该系统实现小行星表面的高效运输。图3更清晰地展示了双体太空轮系统在小天体表面卸载或运出货物的工作机制。在该系统中，太空轮的自转方向与公转方向均与小行星的自转方向一致。通过合理设置轨道高度、回转角速度，以及子站（即货物运送装

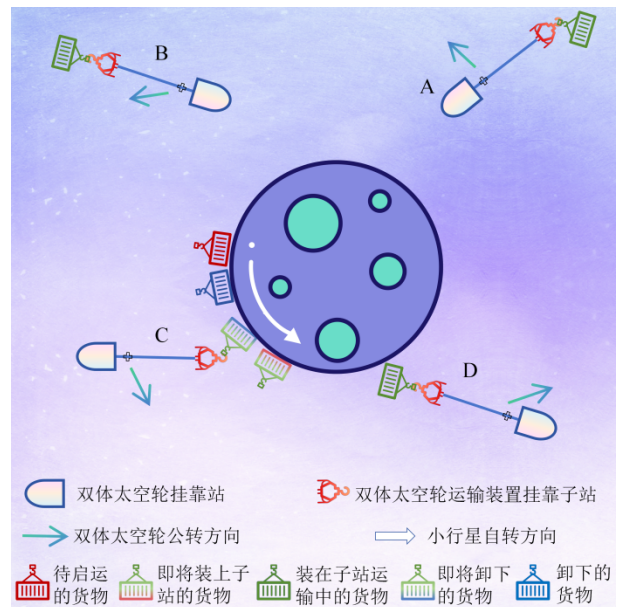


图3 太空轮向小行星表面运输方法示意图：双体太空轮围绕小行星，在公转过程中的四个不同位置（A、B、C、D）的姿态

Figure 3 Schematic diagram of the space wheel transportation method to the asteroid surface: The two-body space wheel orbits the asteroid and its attitude at four different positions (A, B, C, D) during the orbital process

置）与系统质心之间的距离，可使子站在运行至特定位置（标记为C）时接近小行星表面或其附近区域。此时，子站与小行星表面之间的相对速度极小，有利于平稳地卸载货物或接收货舱。随着时间推移，回旋系统及其货舱依次经历A→B→C→D的位置变化，这种周期性布局为小行星矿产资源的开发提供了高度协同且高效的作业模式。

3.4 火卫太空轮

太空轮自身的质量很难超过数百吨，这意味着在为飞船增速或减速的同时，其动量或机械能会明显变化，从而导致质心轨道发生较大的改变。当面对飞船质量较大或数量众多的情况，如大批量移民飞船需要往返火星，单个变速太空轮可能难以胜任。此时，采用小天体太空轮，也就是火卫太空轮^①，则更为有效。

图4所示的“火卫太空轮”为一种适用于小天体

① 火星卫星是火星的两颗天然卫星，由美国天文学家阿萨夫·霍尔于1877年发现，分为火卫一（Phobos）和火卫二（Deimos）。火卫一距火星约9378 km，火卫二距火星为23459 km，均为太阳系最小卫星之一。

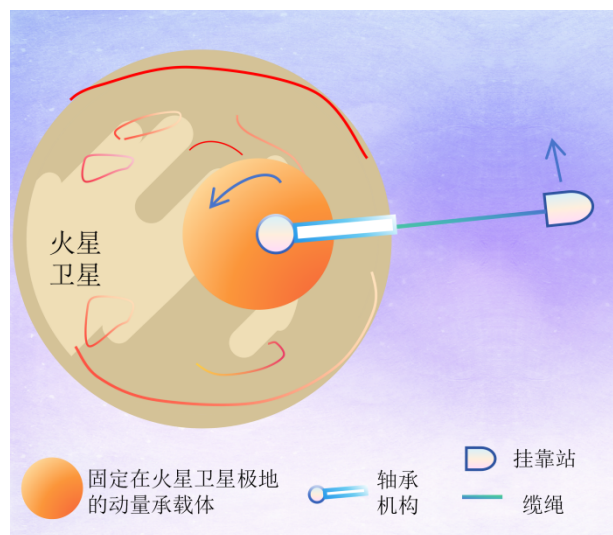


图4 火卫太空轮系统运行示意图

Figure 4 Schematic diagram of the operation of the Mars satellite system

的太空轮系统，其基本构型与常规太空轮具有一定相似性。但火卫太空轮需要至少一端的空间装置作为动量载体，牢固锚定于火卫一（直径约22 km）或火卫二（直径约7.3 km）的南极或北极表面。该动量载体通过轴承机构与环绕其回转的牵拉绳索及远端的挂靠器（或挂靠站）相连；牵拉绳索可为单根或多根，长度通常为数千米至数十千米（远大于图4中示意的比例）。

途经的飞船可与绕火卫一或火卫二运行的挂靠器对接，并借助系统的回转运动实现与火星相对速度的加速或减速。由于火卫太空轮与其所附着的火卫整体质量极大，在动量交换过程中轨道几乎不受扰动，能够满足天文量级的动量输入/输出需求。具体而言，若飞船需加速且其初始速度低于火卫，但运行方向相同，可令飞船从前方向后方沿切线接近正在向后回转的挂靠器并完成对接，随后随挂靠器一同做圆周运动；当运动方向转为向前时，挂靠器释放飞船，使其获得高于火卫的速度，从而更易脱离火星引力场。反之，若飞船需减速且其初始速度高于火卫，则可从后方沿切线接近向前回转的挂靠器并挂靠，随其向前做圆周运动；当运动方向转为向后时释放飞船，使其以低于火卫及附属太空轮的速度继续前行，有利于进入火星大气并着陆。理论上，飞船速度变化的最大幅度

可接近其与火卫原始相对速度的两倍。显然，若飞船初始与火卫迎面而行，经挂靠与回转后所能实现的速度改变将更为显著。

一个火卫太空轮系统可配备多根长度不等的牵拉绳索，分别连接不同的挂靠器，可提供多种瞬时线速度，以适应不同飞船对速度增量或航向调整的多样化需求。此外，该系统无须在短期内维持动量输入与输出的严格平衡，使用效率更高。考虑到埃隆·马斯克提出的火星移民计划可能涉及数百艘大型飞船频繁往返火星，火卫太空轮或可为此类大规模深空运输任务提供关键技术支撑。

3.5 月球渡船——地-月太空轮

作为月球渡船的太空轮系统可配备多个挂靠站，由数十km长的绳索牵引并持续回旋。该渡船运行于高偏心率的绕地轨道，其近地点可降至近地空间，远地点则接近月球轨道。若其公转周期约为半个月，则每公转2圈可接近月球1次、接近地球2次。

需要搭乘渡船的飞船可在低地球轨道择机对接：当渡船的挂靠器处于后向回转阶段时，飞船可沿切线方向挂靠；随后随渡船一同飞向月球轨道，并在适当时机脱离挂靠器。若在挂靠器向前回转时脱离，有助于飞船接近月球运行轨道；若在向后回转时脱离，则更利于进入绕月轨道。此后，飞船可依靠自身推进系统或借助其他太空轮系统继续后续任务。同样，飞船也可反向搭乘该渡船返回，并在近地点附近脱离以进入低地球轨道。此类月球渡船可长期稳定运行，多年内多次为往返地月系统的航天器提供运输服务。

类似地，亦可设计并部署高轨太空轮渡船，运行于近地轨道与地球同步轨道之间，用于高效运送飞船至高轨道，以部署、回收或维护地球同步卫星，从而显著降低同步轨道任务的发射与运维成本。

3.6 行星渡船——地球-火星-小行星带轨道太空轮

作为行星渡船的太空轮运行于绕日轨道，其近日点通常位于地球轨道附近，必要时亦可调整至金星轨道甚至水星轨道附近；远日点则可延伸至火星轨道，乃至木星轨道附近。图5展示了火星渡船与其轨道的示意图。此类行星渡船可具有不同的公转周期，众多

运行于不同轨道的渡船可构成一个覆盖广泛行星际的“公交系统”，满足从水星到小行星带、甚至土星轨道附近各类星际飞行任务的多样化需求。

例如，主要服务于地-火轨道交通的渡船，其公转周期可设计为约1.5或2个地球年，每公转2圈或1圈即可与地球交会一次（图5）。多艘地-火交通渡船的远日点可分布于火星轨道的不同黄经位置，以适配不同发射窗口出发的飞船需求。面向小行星带任务的星际渡船，其轨道周期可优先选择接近3~12个整地球年。

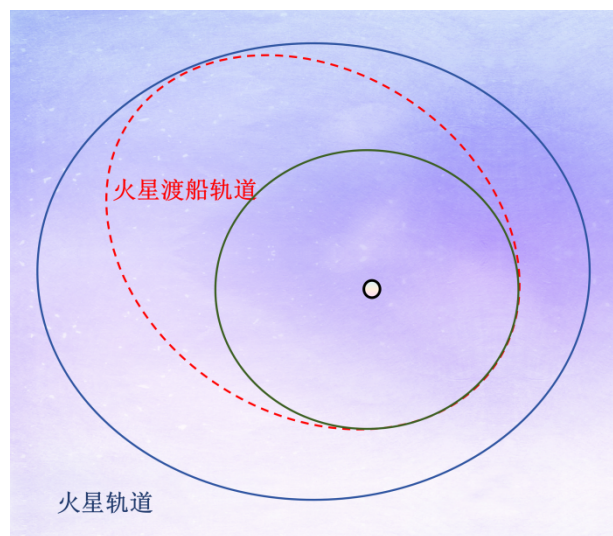


图5 火星渡船轨道与火星轨道位置示意图

Figure 5 Schematic diagram of Mars ferry orbit and Mars orbit position

与月球渡船类似，行星渡船在绕日公转的同时，其上多个挂靠站亦通过长绳持续回旋。飞船可在地球低轨道择机对接：当渡船挂靠器处于后向回转阶段时，飞船沿切线方向挂靠，并随渡船一同飞向目标行星轨道，在适当时机脱离挂靠器。若在挂靠器向前回转时脱离，有助于飞船接近目标行星进入其运行轨道；若在向后回转时脱离，则更利于进入环绕该行星的稳定轨道。此后，飞船可依靠自身推进系统或借助其他太空轮系统继续后续机动。同样，飞船也可反向搭乘该渡船返回，并在近地点附近减速脱离，进入近地轨道或环绕地球轨道。

一艘行星渡船一旦部署就绪，可连续运行数十年

以上。这一长期服役特性在经济上允许其采用较高的建造成本，例如在挂靠器上配置辐射防护层，有效保障乘员免受深空高能粒子辐射危害。此外，渡船太空轮的持续回旋可提供充足的人造重力，缓解长期失重对乘员健康的不利影响。

4 “星际高铁”——太空轮联合运输方案示例

实现行星之间的超级节能的“星际高铁”运输，可能需要上述多种太空轮系统的支持。下面以灵神星之旅、火星之旅和小行星带之旅为例进行说明。

4.1 地球往返灵神星

灵神星是一颗蕴藏着丰富稀珍金属和重金属资源的星球，其开采离不开先进的航班式航天运输技术。图6所示的是通往灵神星的星际高铁旅程示意图，这一旅程由以下几个飞行阶段组成：

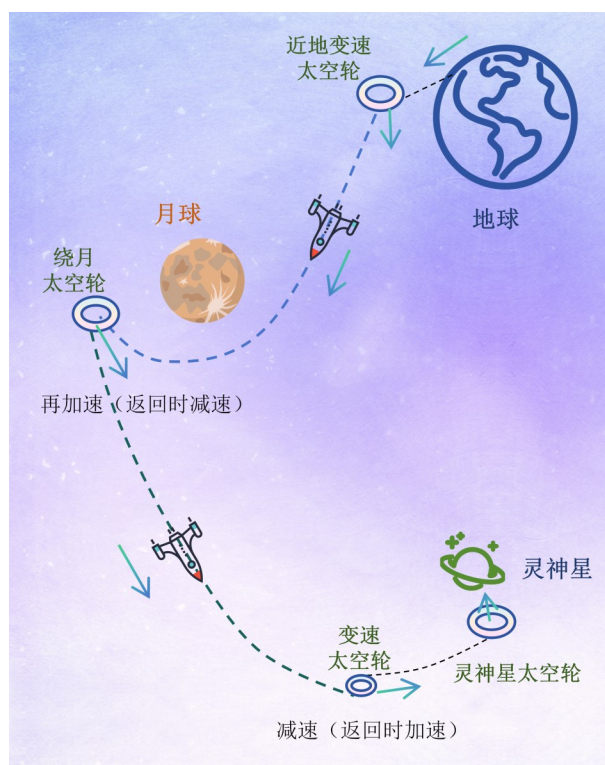


图6 地球通往灵神星的星际高铁旅程示意图

Figure 6 Schematic diagram of the interstellar high-speed rail journey from Earth to Psyche

(1) 去程时, 飞船从地球表面起飞, 进入亚空间。

(2) 飞船的速度低于近地变速太空轮的速度, 与其挂靠器进行挂靠, 随后进行约 180° 的回转并加速脱离(此时, 变速太空轮的动量相应减少)。

(3) 当飞船进入月球的引力范围, 与绕月高轨道的太空轮迎面接近, 并与挂靠器成功挂靠, 随后进行回转加速, 飞船的速度逐渐提高, 直至完全脱离该太空轮(此时, 该太空轮的动量相应减少)。

(4) 飞船进入灵神星的引力范围, 与绕星变速太空轮逐渐接近, 并与挂靠器成功挂靠, 之后进行回转减速并脱离(此时, 变速太空轮的动量会有所增加), 再靠近灵神星的太空轮。

(5) 飞船经灵神星太空轮降低高度, 着陆至灵神星表面。

(6) 回程时, 飞船利用灵神星太空轮从灵神星表面升空。

(7) 当飞船与绕星变速太空轮逐渐靠近, 并成功与挂靠器完成挂靠, 随后进行回转加速, 直至达到脱离灵神星的速度(此时, 变速太空轮的动量逐渐减少), 接着朝向月球进发。

(8) 当飞船进入月球的引力范围, 它开始与绕月太空轮同向接近, 并与挂靠器成功挂靠。在回转减速脱离的过程中(此时, 变速太空轮的动量会增加), 飞船开始朝向地球进发。

(9) 飞船以高于绕地变速太空轮的速度, 与其挂靠器同向挂靠, 随后进行约 180° 的回转, 并减速脱离(此时变速太空轮的动量会增加), 降低高度后进入地球大气层进行着陆。

4.2 地球往返火星

(1)(2)(3) 飞行阶段与去往灵神星相同。

(4) 飞船进入火星引力范围, 与设在火卫二上的太空轮接近, 并与挂靠器完成挂靠, 实施回转减速脱离。在需要时, 可再次靠近火卫一, 与上面的太空轮进行挂靠, 实施回转再减速, 直至达到或低于火星环绕速度。

(5) 飞船利用大气阻力和喷气发动机的动力进行减速, 降落到火星的表面。

(6) 回程时, 飞船利用火箭动力从火星表面升空。

(7) 飞船与火卫一上的太空轮靠近并与其挂靠, 随后进行回转加速。如有必要, 可利用火卫二上的太空轮进行加速, 使其达到脱离火星引力场的速度(此时太空轮的动量应相应减少), 随后继续朝向月球进发。

(8) 飞船进入月球的引力范围, 与绕月太空轮同向接近, 并与挂靠器成功挂靠, 进行回转减速后脱离, 随后朝向地球方向飞去。

(9) 飞船与近地变速太空轮挂靠器成功对接, 随后进行了约 180° 的回转, 并减速脱离(此时太空轮动量增加), 之后降低高度进入地球大气层进行着陆。

4.3 利用渡船地球往返小行星带

(1)(2) 飞行阶段与去往灵神星相同。

(3) 飞船接近行星渡船, 与挂靠器挂靠, 在渡船不断回转中接近小行星轨道带。

(4) 飞船在太空轮向前回转时脱离挂靠器, 进入小行星轨道, 利用惯性和自身动力接近小行星或小行星太空轮。

(5) 回程时, 按照相反顺序, 搭乘合适的行星渡船返回地球。

5 太空轮系统实施面临的主要挑战

半个多世纪以来, 齐奥尔科夫斯基的宇航理论为人们的航天探索带来了无数奇迹。然而, 面对航天工程化、航班化、平民化甚至殖民化的要求, 需要更大胆的技术飞跃。太空轮概念就是众多探讨中的一种。由该概念派生的各类系统, 可以广泛助力飞船在近地空间、地月空间及行星际空间的航行。该概念的实现, 可以将未来星际旅行最大的成本——推进剂及其容器运载能耗, 降低到原来的零头, 使得艰难的航程变得容易得多。显然, 从纸面的力学计算到工程实施, 会面临一系列难题或挑战。

其一是关于绳索负荷与材料强度的问题。在太空轮技术的各种利用模式中, 绳索的长距离牵拉是必不可少的, 因此, 对绳索的负荷能力、自重、耐辐射能

力和寿命都有一定要求。其中, 太空轮变速站对材料抗拉强度的要求最苛刻。如果采用抗拉能力非均匀绳索的概念, 可以有效减少由绳索自身质量产生的离心张力, 从而帮助太空轮系统扩展其加减速及升降功能, 或提高安全系数。然而, 一座太空轮对大质量飞船速度的一次改变是有明显限制的。为了解决这一问题, 可以采用多级太空轮变速站对飞船进行多次变速, 以适应各种空间飞行的需求。

其二是精准交会与快速挂靠的问题。太空轮的利用需要实现太空轮-飞船之间的精准对接, 因此, 调配指挥系统与精准飞行时刻表是不可或缺的。每个太空轮的正常运转和它们轨道、位置、能量及动量平衡状况, 也是调配指挥系统的核心关注点。此外, 操作简便、坚固可靠的挂靠器具也是必不可少的, 太空轮挂靠站与飞船上的挂靠机构需要互相配合。同时, 飞船在挂靠时也必须具备位置与姿态的精准调控能力。

其三是分布密度、优先权与国际合作的问题。每个太空轮都需要使用不断回旋的、长达几十千米甚至更长的悬拉绳索, 因此在近星空间设置时, 必须避免设置不当或过密, 否则它们可能会互相干扰甚至发生碰撞。这将对近星空间的资源利用和安全产生不良影响。例如, 近月太空轮的设置总数量不宜超过 100 架。火卫一及火卫二上只宜架设太空轮各 2 架。月球渡船和行星渡船也需要占用一定的空间资源。显然, 率先设置者会处于更有利的地位。在相关国际约定出台之前, 通常都是先行者先得。先行者也可以率先制定规则和标准。

6 结论与展望

本文围绕“太空轮”这一创新性空间基础设施构想, 系统提出了其在近地空间、地月系统、行星际航行以及小天体开发等多个场景下的应用方案。该构想的核心在于利用旋转缆绳结构与轨道动力学的耦合效应, 在无须或仅需少量推进剂的情况下, 实现航天器与太空轮动量载体之间的高效动量交换, 从而为深空运输提供一种低能耗、高复用、可持续的新范式。

在星际航行任务中, 可将太空轮的动量承载体锚定于火卫一、火卫二或近地小行星的极区表面, 通过

数千至数十千米长的回转缆绳连接挂靠器。飞船通过短暂对接并随挂靠器完成半周或适度旋转后释放, 即可获得接近两倍于挂靠器旋转速度的增量(或减量), 显著提升进入绕火星轨道或逃逸的效率。由于火卫或小行星本身质量较大, 此类系统在频繁动量交换过程中轨道扰动极小, 具备长期稳定运行能力。

在地月尺度上, 设计偏心率极高的绕地“月球渡船”轨道, 使其近地点覆盖低地球轨道, 远地点延伸至月球附近。配合周期性回转的多挂靠站, 该渡船可在每 1~2 个轨道周期内分别交会地球与月球, 为往返任务提供定时、定点的运输服务。类似思路可拓展至日心轨道, 构建“行星渡船”系统——其近日点位于地球甚至金星轨道, 远日点可达火星、木星乃至小行星带。通过合理配置公转周期与远日点黄经分布, 可形成覆盖内外太阳系主要目的地的“行星际公交网络”, 满足不同发射窗口下飞船的轨道转移需求。

尤为值得强调的是, 此类系统一旦部署, 预期服役寿命可达数十年。这一长期在轨特性使其在经济上可承受更高的初始建造成本, 例如在载人挂靠舱段集成多层辐射屏蔽结构, 有效防护银河宇宙射线与太阳粒子事件, 显著提升深空载人飞行的安全裕度。同时, 太空轮的持续旋转天然提供可控的人造重力环境, 从根本上缓解长期失重导致的健康风险, 为未来大规模、长时间的星际移民或科考任务提供关键生命保障支持。

当然, 该构想的工程实现仍面临若干关键技术瓶颈: 包括但不限于适用于数十千米级长度、兼具超高强度与抗辐照性能的轻质缆绳材料, 高动态、高精度的自主交会与快速锁紧/释放机构, 超大尺度柔性多体系统的姿态与振动控制, 以及未来若大规模部署后可能出现的空间交通密度管理与轨道安全协调问题。然而, 随着碳纳米管、石墨烯复合纤维等新型材料的逐步成熟, 人工智能驱动的自主操作技术的进步, 以及国际社会对可持续空间基础设施共识的增强, 上述挑战会逐步具备可解性。

展望未来, 太空轮的发展路径可采取“分阶段、渐进式”策略: 初期可在近地轨道开展百米至千米级原理验证任务, 测试旋转动力学、对接机制与人工重力模拟效果; 中期拓展至地月空间, 部署首代月球渡

船原型; 远期则结合火星探测与小行星资源开发计划, 构建跨行星际的动量交换及渡船网络。此外, 太空轮还可与轨道燃料工厂、在轨组装平台、深空中继站等其他新兴空间设施协同布局, 共同构成面向 21 世纪下半叶的太阳系交通与资源利用基础设施体系。

综上所述, 太空轮虽仍处于概念探索阶段, 但其在降低深空运输成本、提升任务灵活性、支持载人长期驻留等方面的独特优势, 使其成为值得深入论证与持续推动的前瞻性空间系统方案。

参考文献

- [1] ЦИОЛКОВСКИЙ К Э. Исследование мировых пространств реактивными приборами[J]. Научное обозрение, 1903(5): 46-72.
TSIOLKOVSKII K E. Investigation of cosmic space by means of reaction devices[J]. Nauchnoe Obozrenie, 1903(5): 46 - 72.
- [2] 新华网. 美"灵神星"号探测器启程探索金属小行星[EB/OL]. (2023-10-14)[2024-12-20]. https://www.news.cn/2023-10/14/c_1129915773.htm.
Xinhua Net. NASA's Psyche spacecraft sets off to explore a metal asteroid[EB/OL]. (2023-10-14)[2024-12-20]. https://www.news.cn/2023-10/14/c_1129915773.htm.
- [3] 新华网. 马斯克称"星舰"将于 2026 年前往火星[EB/OL]. (2025-03-17) [2025-05-07]. <http://usa.people.com.cn/n1/2025/0317/c241376-40440258.html>.
Xinhua Net. Musk stated that Starship will head to Mars in 2026[EB/OL]. (2025-03-17)[2025-05-07]. <http://usa.people.com.cn/n1/2025/0317/c241376-40440258.html>.
- [4] 国家国防科技工业局. "勘、采、用"三步走,当"天工开物"走向太空[EB/OL].(2023-09-01)[2025-05-07]. <https://www.sastind.gov.cn/n10086205/n10086408/n10104265/c10386337/content.html>.
State Administration of Science, Technology and Industry for National Defense. "Exploration, mining and use" take three steps, when "Tiangong Kaiwu" goes to space[EB/OL]. (2023-09-01) [2025-05-07]. <https://www.sastind.gov.cn/n10086205/n10086408/n10104265/c10386337/content.html>.
- [5] 余惠敏. 太空电梯能否成真[N/OL]. 经济日报, 2023-03-19(12). http://paper.ce.cn/pad/content/202303/19/content_271082.html.
She H M. Can a space elevator ever become a reality[N/OL]. Economic Daily, 2023-03-19(12). http://paper.ce.cn/pad/content/202303/19/content_271082.html.
- [6] 科技日报. 我国首次完成太阳帆在轨关键技术试验[N/OL]. 2019-12-27(01). https://epaper.stdaily.com/statics/technology-site/index.html#/home_isDetail=1¤tNewsId=cbeac443a9a545259f845745b8ea6347¤tVersionName=%E7%AC%AC01%E7%89%88%E7%BC%9A%E4%BB%8A%E6%97%A5%E8%A6%81%E9%97%BB¤tVersion=1&timeValue=2019-12-27.
Science and Technology Daily. China has successfully completed the country's first in-orbit key technology test of a solar sail[N/OL]. 2019-12-27(01). https://epaper.stdaily.com/statics/technology-site/index.html#/home_isDetail=1¤tNewsId=cbeac443a9a545259f845745b8ea6347¤tVersionName=%E7%AC%AC01%E7%89%88%E7%BC%9A%E4%BB%8A%E6%97%A5%E8%A6%81%E9%97%BB¤tVersion=1&timeValue=2019-12-27.
- [7] Hoyt R P, Forward R L. Electrodynamic tether control: US6419191B1[P/OL]. 2002. <https://ppubs.uspto.gov/api/pdf/downloadPdf/6419191equestToken=eyJzdWl0OiJmN2FYjQ1My1lMmYwLTQ0MGQtYmRiNS1iNmFmZDU5ZDZmMjMiLCJ2ZXIiOiJkM2Q2ZGI3My1mMmZlLTQwZDItYTQ0Yy1jOTc1ODBkOGUwMTgiLCJleHAiOiJ0B9>.
- [8] 刘二中. 一种改变空间物体飞行方向和速度的装置与方法: CN117048858A[P]. 2023-11-14.
Liu E Z. A device and method for changing the direction and velocity of space objects: CN117048858A[P]. 2023-11-14.
- [9] 刘二中. 一种改变空间物体与星体距离的方法: CN117048859A[P]. 2023-11-14.
Liu E Z. A method for changing the distance between a space object and a celestial bod: CN117048859A[P]. 2023-11-14.
- [10] 刘二中. 改变空间物体与星体距离及速度的方法和系统: CN118723126A[P]. 2024-10-01.
Liu E Z. Method and system for changing the distance and velocity between space objects and celestial bodies: CN118723126A[P]. 2024-10-01.
- [11] 刘二中. 利用小型天体帮助航天器运行的系统和方法: CN118811120A[P]. 2024-10-22.

- Liu E Z. System and method for utilizing small celestial bodies to assist spacecraft operations: CN118811120A[P]. 2024-10-22.
- [12] 刘二中. 改变空间物体飞行方向和速度的装置与方法: CN118877233A[P]. 2024-11-01.
- Liu E Z. Device and method for changing the flight direction and speed of space objects: CN118877233A[P]. 2024-11-01.
- [13] 中央广播电视总台央视新闻. 2045 年有望实现“航班化航天运输”1 小时全球抵达[EB/OL].(2020-09-21)[2025-05-02]. http://news.cnr.cn/native/gd/20200921/t20200921_525269014.shtml.
- China Media Group CCTV News. By 2045, "airline-like space travel" is expected to become a reality, allowing global arrival in 1 hour[EB/OL]. (2020-09-21)[2025-05-02]. http://news.cnr.cn/native/gd/20200921/t20200921_525269014.shtml.

Principle of Space Wheel and Its Application in Deep Space Transportation

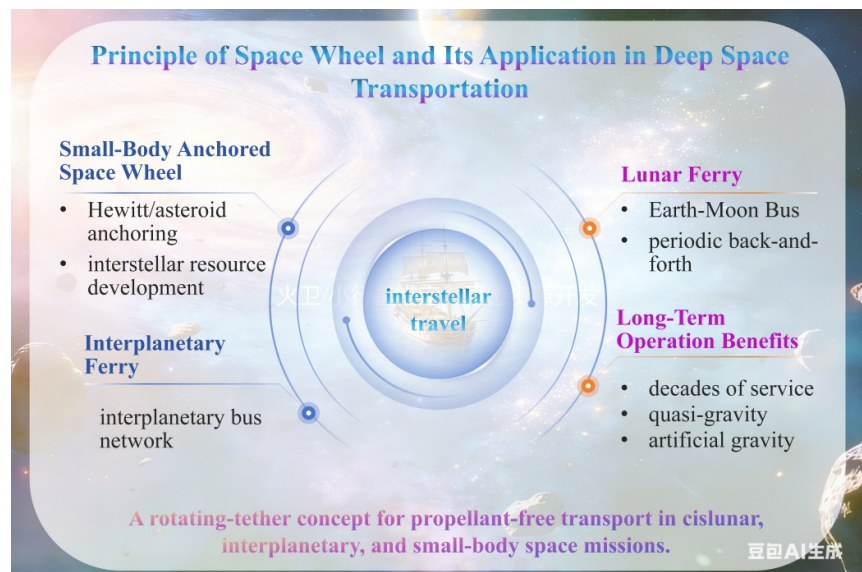
LIU Erzhong

University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Highlights

- Envisions a tether-based space wheel system enabling propellant-free momentum exchange through rotation.
- Proposes an interplanetary “bus-like” transportation network spanning orbits from Mercury to Jupiter.
- Designs a surface-anchored platform at small-body poles for in-situ resource transport and operations.
- Explores a long-duration crewed deep-space architecture integrating artificial gravity and radiation shielding.

Graphical Abstract



Abstract: This paper proposes and elaborates in detail a novel space infrastructure concept for future deep-space exploration—the "Space Wheel" system. Built upon the coupling of classical orbital mechanics and rotational dynamics, this concept employs ultra-long flexible tethers connecting a momentum station to one or more docking stations, thereby creating a platform capable of high-performance momentum exchange with spacecraft. The core mechanism operates as follows: a spacecraft briefly docks with a rapidly rotating grapple station (docking station), co-rotates through a segment of circular motion, and is then released at an optimal phase—gaining or losing significant velocity. Theoretically, the maximum achievable Δv can approach twice the docking station rotational velocity. This principle offers a transformative pathway toward drastically reducing propellant consumption and enhancing transportation efficiency in deep-space missions. Besides rotating space ladder, Moon space wheel, the paper also systematically outlines Space Wheel applications across four representative scenarios. First, on small bodies—such as Phobos, Deimos, or near-Earth asteroids—a momentum anchor can be firmly affixed to the surface (e.g., at the poles) to construct a "Martian Moon/Small-Body Space Wheel". Due to sufficient total mass to absorb repeated momentum exchanges without significant orbital perturbation, such systems could operate stably for decades. They would enable low-cost insertion into

or escape from Martian orbit, as well as support *in-situ* resource utilization (ISRU) operations on asteroids. Second, a "Lunar Ferry" is envisioned in a highly eccentric Earth orbit, with its perigee within low Earth orbit (LEO) and apogee extending to the vicinity of the Moon. With an orbital period of approximately half a month, this ferry could encounter Earth once every one revolutions while also approaching the Moon periodically. Equipped with multiple rotating docking stations, it could provide scheduled, point-to-point cargo or crew transfer between Earth and the Moon. Third, the concept is extended to heliocentric orbits *via* the "Interplanetary Ferry": Its perihelion could be placed near Earth's orbit—or even Venus's—while its aphelion reaches Mars, Jupiter, or the asteroid belt. By selecting resonant orbital periods (*e.g.*, 1.5, 2, 3—12 Earth years) and strategically distributing aphelion longitudes, a network of such ferries could form an "interplanetary bus system" spanning from Mercury to the asteroid belt and beyond, accommodating diverse mission launch windows and trajectory requirements. Fourth, all these configurations can be adapted for human spaceflight. Thanks to tether lengths of tens of kilometers and controllable angular velocities, the Space Wheel can generate artificial gravity ranging from 0.1g to 1g—effectively mitigating physiological degradation caused by prolonged weightlessness, such as muscle atrophy, bone loss, and cardiovascular deconditioning. Moreover, the system's projected multi-decade service life justifies higher initial construction costs, enabling the integration of thick radiation shielding layers around crewed docking modules to significantly enhance protection against galactic cosmic rays and solar particle events during deep-space transits.

Despite its compelling potential, the realization of the Space Wheel faces several critical engineering challenges: The development of ultra-lightweight tether materials capable of spanning tens of kilometers while exhibiting exceptional specific strength, resistance to atomic oxygen erosion, and resilience against micrometeoroid impacts; Autonomous rendezvous, rapid capture, and safe release mechanisms for spacecraft interfacing with high-speed rotating grapple stations under dynamic conditions; Attitude stabilization, vibration suppression, and orbital maintenance for extremely large, flexible multi-body systems; Future challenges in space traffic management, collision avoidance, and international coordination should large constellations of such systems be deployed. Nevertheless, ongoing advances in carbon nanotube fibers, graphene-reinforced composites, AI-driven autonomous operations, and in-orbit servicing and manufacturing capabilities are steadily rendering these challenges tractable.

The paper concludes by proposing a phased, incremental development roadmap: Near-term: Conduct sub-kilometer to kilometer-scale technology demonstration missions in LEO to validate rotational dynamics, artificial gravity generation, and docking reliability; Mid-term: Deploy the first-generation Lunar Ferry prototype to support logistics for lunar gateways and crewed lunar landings; Long-term: Integrate Space Wheels into Mars exploration and asteroid mining campaigns, ultimately establishing an interplanetary momentum-exchange network that synergizes with orbital propellant depots, deep-space relay stations, and in-orbit assembly platforms—forming a sustainable, high-efficiency infrastructure for solar system transportation and resource utilization.

In summary, while the Space Wheel remains a conceptual proposal, its unique advantages in reducing mission cost, enhancing operational flexibility, and enabling long-duration human presence in deep space position it as a compelling and forward-looking architecture—one that could play a pivotal role in humanity's sustained expansion into the solar system in the latter half of the 21st century. This English version maintains fidelity to the original Chinese extended abstract, uses precise aerospace terminology, and adopts a formal academic style suitable for conference proceedings, white papers, or high-level concept publications in journals such as *Acta Astronautica*, *Journal of Spacecraft and Rockets*, or *Space Policy*. Let me know if you'd like a shorter abstract, keyword list, or adaptation for a specific publication format.

Keywords: space wheel; momentum exchange; space transportation system; interplanetary bus; artificial gravity; small body utilization; deep space infrastructure