

浅析航天领域中的关键力学问题及方法探究

李鑫

(正安县第一中学)

[摘要] 航天事业作为新时代人类对太空的奥秘进行探索的方式,寄托着人们对太空的无限热情。随着人类社会的不断发展,人类对于地球之外的能源的渴望也愈发强烈。然而,航天技术的短板却限制了人类探索太空的脚步。本文从航天领域中关键力学的角度出发,通过分析我国当前在航天力学领域存在的问题与挑战,而提出相关应对策略,并且对当今社会背景下航天事业的发展前景进行展望。

[关键词] 航天动力学;空气阻力;附件展开;分离;对接;重复使用

[DOI] 10.12252/j.issn.2096-6261.2021.08.275

引言

力学是研究物质机械运动规律的科学,在航天器的发展进程中,力学在其中起到至关重要的作用。我们通过对航天领域关键力学问题的研究,以此来不断完善航天事业的缺陷,发展性能更加优良的航天器体系,促进人类太空探索的前行。然而因理论体系以及实际生产的不足,航天器在一些领域面临着核心力学难以突破的瓶颈。因此多角度分析航天关键力学问题并提出对策成了当今航天事业发展的重中之重。

一、航天领域中的关键力学问题

1.1 空气阻力

伴随着航空航天事业的不断发展,飞行器向着更加精准和高速的方向发展,如何处理飞行器与空气之间相互作用产生的阻力所带来的一系列问题迫在眉睫。目前,各国在飞行器的研制中为获得大航程和高速度飞行,采用高升阻比气动布局、TBCC(ATREX, ATRDC, MIPCC, 火箭基增强型涡轮机)和RBCC(KLIN, AspiRE)等为飞行器提供更加优良的动力性能。飞行器超高速运动条件以及复杂大气的影 响,使得飞行器在升空过程中面临着许多挑战性的问题:(1)复杂的大气层空气中,气流不平衡和空气与飞行器摩擦产生的高温导致飞行器受力不均,出现偏转角偏差;(2)高速飞行器为了达到超高速,广泛采用轻质材料且采用大型的薄壁结构设计,飞行器部分凸出部件与空气摩擦,导致飞行器出现抖振问题。

1.2 大型附件展开

航天器附件,是指保证航天器有效、可靠而顺利工作所必需的各种附属装置。随着航天器的功能趋于多样化,在轨运行消耗的能量也越来越多,航天器上大型太阳帆板、展开天线等附件规模越来越大,能够更大程度上辅助航天器完成任务,保障正常运行,但使航天器的结构趋于大型化,运动形式也更加复杂多样。目前在此方面的研究已经从传统的多刚体动力学过渡到刚柔耦合动力学,运用多种坐标系与数值算法等方法解决附件展开问题。但在此类大型附件的展开过程中,由于质量与体型过大,会干扰其他系统正常运行、引起挠性附件振动和影响航天器运行姿态等问题。

1.3 分离冲击

目前航天器发射主要依赖于三级火箭(现代火箭的动力一般采用三级推进模式,所以形象的被人们称为三级火

箭)。在升空过程中,航天器飞入轨道高度后,航天器与上面级分离,航天器中大量使用了火工装置来完成分离、驱动等动作,火工装置动作时会产生短时、高频、高幅值的复杂震荡性爆炸冲击环境,对航天器的电子系统、薄壁结构、脆性材料等具有较强的破坏作用。分离装置作为航天器中的关键部件,直接影响到航天任务能否顺利完成。近年来,世界范围内发生多起因分离装置导致的发射事故。如:2009年8月15日,韩国的罗老号卫星因整流罩未正常分离未能入轨;2003年11月29日,日本H2A火箭因助推器未成功与火箭分离,被迫销毁火箭。但就目前航天事业发展水平,短时间内无法脱离对三级火箭的依赖,因此,如何解决航天器分离冲击影响,成了待需解决的问题。

1.4 对接撞击

目前,中国空间站——天宫空间站(China Space Station)正在建设中,而发展空间站技术离不开空间交会对接技术。空间交会对接是指两个航天器在空间轨道上会合并并在结构上连成一个整体的技术,由于其所处于太空环境、对接初始条件的不确定性、对接机构自身特性的复杂性等因素,此技术具有很高的难度。目前,用于大型飞船及空间站的对接机构主要有锥-杆式对接机构、周边连接式对接机构两类,但这两种对接机构都有着弊病。当两个具有一定相对速度的航天器对接在一起时,由于速度会发生突变,必然会引起撞击。对接撞击可能在两航天器接触部位引起较大的撞击载荷,在航天器各部位引起变形效应,甚至可能引起航天器姿态发生很大变化。

1.5 难以重复使用

从1965年我国航天事业创建以来,我国已发射400余颗火箭,但这些航天器在完成任务返回地球后,就不再具备再次进行航天任务的能力。这为我国航天事业发展带来了极大的成本浪费问题。2020年9月4日,我国在酒泉发射中心成功发射可重复使用航天器,在轨运行两天后成功返回预定着陆场。2021年7月16日,由中国航天科技集团有限公司一院研制的亚轨道重复使用演示验证项目运载器在酒泉卫星发射中心准时点火起飞,按照设定程序完成飞行后,平稳水平着陆于阿拉善右旗机场,首飞任务取得圆满成功。虽然我国已经迈出了航天器重复使用的第一步,相较于美国、俄罗斯等具备成熟航天飞机技术的国家,我国将此技术成熟应用于航天事业还有着一段漫长的路。

二、航天关键力学的解决方案

2.1 探索新材料与新技术

2.1.1 新型材料

火箭外壳多采用高强度铝合金制成半硬壳式结构或蜂窝结构。这类材料具备密度小、强度大等优点，但却缺乏耐高温等性能。在新型飞行器的研究中，通过物理研究、材料设计、材料加工、试验评价等一系列研究过程，创造出能满足需要的新型材料，这种材料应具备密度小、强度大、焊接性能优良、耐高温，固有频率与大气环境相适应等性能。这使飞行器在升空过程中，能有效克服与空气摩擦产生高温对飞行器航线影响等问题。

2.1.2 气体缓冲系统

薄壁结构是飞行器的典型轻量化承力构件，能为飞行器带来优良性能的同时，也带来了诸多问题。空气与飞行器之间的作用力，是一种非刚体间作用力，可选择在飞行器薄壁内特地区域（如飞行器主要受力部位，飞行器抖振部位）充入性质稳定、缓冲性能良好的气体，在外壳与内部系统之间构成具有弹性性能的气体层，在极大程度上避免飞行器部件损害等问题。空气缓冲系统的引入，将能有效解决空气对飞行器的抖振，飞行器因气流不平衡而受力不均等问题。在未来飞行器的研发及发射过程中，可以更好地服务于更高水平的航天事业。

2.1.3 多动力系统

航天器附件如太阳帆板是从折叠状态展开为平面状态，展开形式单一，附件各个部件之间仅依靠铰连接，无附加支撑结构保证平面结构的稳定性。基于这些问题：（1）可以应用辅助机械臂，借助机械臂的刚体性能，分段式展开大型附件，可有效解决附件自由运动状态、无稳定支撑结构的问题；（2）可在展开部件上设置轻型动力系统，在展开时能够根据所处环境和航天器运行情况，供给自身运动动力和调整展开姿态，减轻对航天器主体的影响。此系统能够较大程度上提高附件的稳定性，实现附件展开时能精确转动和低程度振动。

2.1.4 电磁分离装置

虽然现在传统解锁分离装置已经成熟，依据分离动力的不同，分为火工分离装置和非火工分离装置但传统分离装置的弊病却是难以解决。由此，电磁力以它独特的力学性质有望能成为解决分离冲击问题的突破口之一。在航天器的连接处，应用特殊设计的电磁动力分离装置代替传统分离装置，有效避免了火工装置会产生复杂震荡性爆炸冲击，且能够有效避免损害脆弱的航天器。这要求电磁动力分离装置能够完美完成传统分离装置的任务，在这方面有专项突破，成功降低分离冲击给航天器带来的影响。

2.1.5 柔性转动与锁定

附件在其展开过程中，由于结构构型的巨大变化以及附件弹性振动的影响，会诱发起含间隙的铰接件的碰撞，从而使关节的内力大大增加，加快关节的损伤，并激发起附件的弹性振动，进一步可能影响到航天器本体的姿态运动。由此，可以在附件接口位置应用柔性结构，如高黏度材料，此

结构可以稳定附件的运动，在展开过程中大幅减少振动，并削弱附件锁定过程对航天器主体的突变力。

2.1.6 缓冲设施与预分离

分离装置是被用来分离航天器的装置，强调在正确分离的同时保持航天器能正常运行，完成任务。由于传统火工分离装置的作用力较强，对航天器影响较大，选择在航天器连接处设置缓冲设施，如活塞弹性系统、高阻尼黏性系统，用来减轻火工装置的强烈震荡环境，将突变力转化为渐变力，在保障低影响航天器正常飞行的同时保护了航天器的完整结构。同时，也可选择在进行正式分离前进行一次预分离，将分离产生的力分段作用与航天器上，避免了因分离力过大而对航天器造成影响和损害。

2.1.7 新型对接结构

目前国际上主流的两种对接结构，都是刚体直接碰撞相连接的结构，具有很大的缺点。因此，可以用弹性力代替碰撞冲击力，这样能够很大程度上减弱撞击带来的一系列影响。具体措施为在航天器对接处设置活塞装置、高强度弹性材料等缓冲设施，借助气体和形变提供的渐变力，增大最大撞击载荷，以温和的方式来化解两航天器间的撞击力，且能够保护各部件不因对接而产生变形，从而使航天器在对接前后都能正常运行，完成太空作业。

2.2 预期模拟与仿真

2.2.1 仿真模型实验

现今新型材料技术的逐渐成熟和人工智能时代的来临，使得我们可以在地面可以采用模型仿真的方式，高场景还原太空环境，运用人工智能的模型建构，从多方面进行精细化实验，模拟在太空中航天器可能会受到的各种力，获取足够多的数据，从复杂环境与和各种模型实验情况出发，深入分析在航天器的运行中各种力的变化情况，研制出高性能的附件展开计划与最佳附件结构。

2.2.2 建模与理论分析

在航天器的地面研究阶段，应该选择构建空间物理模型，在设计方面应用各种矢量力学、结构力学方程完善模型，在一定范围内借助人工智能推导对接撞击和航天器变形的表达式，借助计算机模拟技术，进行虚拟实验，以此来验证方法的可能性，同时在实验的同时会暴露原有实验装置的缺陷，可以对其加以完善。通过分析各组模型和实验结果，对其对接优良能力进行评估，不断明确研究方向。

2.3 制定合理目标与方向

2.3.1 数据获取与撞击分析

在人类这几十年的太空探索中，我们应该去精确获取以往空间对接活动的数据，并对其分析，明确撞击对航天器产生影响的部位、影响程度和变形效应。借助数据明确对接过程中各部位的功能以及可能会发生的变化。航天器在变轨运动中所受力的变化情况都会影响对接中撞击力的作用效果。进行轨道分析，了解目前空间对接技术的准确性和容差，进一步可分析撞击的最大载荷。

2.3.2 加强技术积累与明确突破方向

到目前为止，世界上已建造19架航天飞机，世界上的可

重复使用航天运载器技术都处于研究及发展阶段。可重复使用航天运载器主要包括第一代：航天飞机；第二代：X-37B、猎鹰-9；第三代：云霄塔、空天飞机。可分为部分可重复使用航天运载器：主要有垂直起飞、水平着陆模式和垂直起飞、垂直着陆模式。完全可重复使用航天器：组合动力重复使用运载器和升力式火箭动力重复使用运载器。在国际上，可重复使用航天运载器技术已趋渐成熟。而我国在这方面发展尚浅，没有足够多的实验器材和实验数据支持这方面的前沿研究。我国可以从多方面入手，借鉴国外建造可回收航天器的经验和数据，分析它的结构特征、动力系统以及控制系统，同时吸取美国航天飞机爆炸事件的教训，尽量避免走弯路，建造我国的可重复使用航天器，为我国长期发展航天事业服务。可重复使用航天运载器范围广，可选择结构动力结构和动力设计两方面进行突破，用最大速度实现我国可重复使用航天器技术的成熟。

三、航天领域关键力学问题展望

3.1 在航天领域引入人工智能

随着人工智能技术的不断发展，我国正向着强人工智能（强人工智能是指具有与人类相似的学习能力，思维能力及创新能力，具有自我意识的机器人）的方向不断迈步。人工智能技术的成熟，会给我国航天科技技术的发展提供更多方式，并更好地解决涉及的诸多力学问题。未来航天试验将会将人工智能作为重点领域，利用人工智能高精度、高自主的优点，自主分析航天试验中运行轨迹、姿态等数据，并提出相应的解决方案，促进航天器趋于完善。在航天器的发射与在轨运行中，人工智能可作为检测、应急、自主识别、运行分析和调控等智能装置，进一步解决航天力学问题，保证航天的正常运行。

3.2 新型材料研发

化学和物理学的快速发展，引发了具备一系列具有优良力学性能的新型材料的涌现，并投入实际使用，使航天器具有更优良的性能，在面对复杂情况时能从容应对。而随着人类探索外太空的步伐趋紧，国内外在航天新型材料研发上都不遗余力。在这个方面，将会根据航天器在使用过程中所发挥的作用以及所面临的问题，依照现有技术水平，专项研发新型材料，供给航天器多方位材料需求，为航天器保驾护航。

3.3 超精密化生产工艺

伴随着航天器功能趋于多样化，运行工作趋于精细化，高精度的航天设施变得尤为重要。超精密加工技术追求加工上的精度和表面质量极限，将其应用于航天器电子仪器、实验设备和对接分离等装置中，会显著提高航天器的整体性能和工作实验精确度。更高科技层次的第三代航天器如云霄塔、空天飞机等，由于其自身重复使用功能和超高精度的实验工作，可应用超精密加工技术，精确化生产各个部件，将航天器性能整体上升一个水平。

3.4 极限试验

为应对复杂且多变的太空环境，航天器应在各个方面具有应对突发情况的能力，为此，航天器的最大载荷应

在正常情况下载荷的120%以上，才能有效保证航天器的安全。未来的航天事业，是将安全放在首位，对航天器进行极限试验，明确其载荷和性能的极限，根据实际情况制定航天器方案，将会极大的提高航天器在太空的生存能力，为更加复杂的太空作业打下基础，为人类的太空探索做好安全保障。

3.5 增大对天体力学的研究

在对广袤无垠的宇宙的探索中，理论是实践操作必要前提，增加对天体力学的研究，会为我们带来更多的理论与模型，在人类将足迹踏入宇宙后，这些理论将能服务人类通过建造工具等手段，探索有关宇宙的秘密。这些研究也将激起人类探索宇宙的热潮，用饱满的激情向太空前行。

3.6 增强人才储备

一代又一代的人不断冲击航天事业，是航天发展的基石。在未来基础教育全面覆盖，高等教育逐渐普及的教育体系下，会涌现出一大批有志于航天事业的人才，而着重培养出一批有能力、有志向、有责任担当的高新技术人才，会为未来的太空探索事业奠定坚实的基础。

四、结语

“道阻且长，行则将至；行而不辍，未来可期。”本文从现阶段我国在航天领域有待突破的关键力学问题出发，但由于笔者能力有限，本文虽然取得一定的研究成果，但还存在着太多亟待解决的问题。尤其是我国航天工业薄弱，物理理论体系知识不足，在许多关键问题上尚处于初始阶段。但只要我们能够矢志不渝，坚定走好自己的道路，在航天领域上下真功夫，可以预见，在将来的某一天，人类一定能够走向太空，探索宇宙无穷的奥秘。

参考文献

- [1]张毅瑄, 王晓宇. 航天器微振动力学参数测量单元设计与验证[J]. 航天器环境工程, 2021, 38(01): 76-82.
- [2]王俊峰, 韩增尧, 张玉梅, 丁继锋, 邹元杰. 可重复使用航天器力学试验方法及试验条件设计综述[J]. 航天器环境工程, 2020, 37(05): 464-472.
- [3]张蒙正, 张玫. 航天运载器重复使用液体动力若干问题探讨[J]. 火箭推进, 2019, 45(04): 9-15.
- [4]韩增尧, 邹元杰, 朱卫红, 庞世伟. 航天器力学环境分析与试验技术研究进展[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49(02): 6-22.
- [5]代卫兵, 胡瑞钦, 易旺民. 航天器大型舱段柔性对接技术研究[J]. 航天器环境工程, 2014, 31(06): 584-588.
- [6]杨建中, 姜汉文. 航天器解锁分离装置[J]. 载人航天, 2007(02): 11-14+38.
- [7]王天舒, 孔宪仁, 王本利, 马兴瑞. 含铰间间隙的航天器附件展开过程分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2001(03): 283-286.
- [8]马兴瑞, 王天舒, 王本利, 孔献仁. 大型复杂航天器的柔性附件展开的动力学分析[J]. 中国空间科学技术, 2000(04): 4-10+17.