

机械可动天线卸载方式研究

王文哲, 孙晓辉, 刘勃洋, 姜峰
天津航天机电设备研究所, 天津 300301
DOI: 10.61369/ERA.2026020017

摘要: 机械可动天线作为航天测控、卫星通信、深空探测等领域的核心设备, 面临着重力、温度梯度、振动等多源载荷的挑战。为了验证其在轨运行时的性能稳定, 地面需要进行各种验证试验。即便如此由于重力的影响, 需要对天线进行卸载, 以消除或缓冲各种载荷的影响, 确保其功能正常。本文针对机械可动天线常见的卸载方式进行了深入分析, 重点从原理、技术特点、应用场景及发展趋势等方面进行综述。我们着重分析了不同卸载技术的优势和局限, 以便在不同场景下做出适当选择。此外, 我们还展望了未来轻量化、高精度、智能化卸载技术的发展方向, 为航天级可动天线的结构与性能优化提供了有益参考。

关键词: 机械可动天线; 卸载方式; 载荷抵消; 指向精度

Research on Unloading Mode of Mechanically Movable Antenna

Wang Wenzhe, Sun Xiaohui, Liu Boyang, Feng Jiang
Tianjin Institute of Aerospace Electromechanical Equipment, Tianjin 300301

Abstract: As the core equipment in space TT&C, satellite communication, deep space exploration and other fields, mechanically movable antenna is facing the challenges of gravity, temperature gradient, vibration and other multi-source loads. In order to verify its stable performance in orbit, various verification tests need to be carried out on the ground. Even so, due to the influence of gravity, it is necessary to unload the antenna to eliminate or buffer the influence of various loads and ensure its normal function. In this paper, the common unloading methods of mechanically movable antennas are deeply analyzed, and the principle, technical characteristics, application scenarios and development trends are summarized. We focus on analyzing the advantages and limitations of different unloading technologies in order to make appropriate choices in different scenarios. In addition, we also look forward to the development direction of lightweight, high precision and intelligent unloading technology in the future, which provides a useful reference for the structural design and performance optimization of space-class movable antennas.

Keywords: mechanically movable antenna; unloading mode; load cancellation; pointing accuracy

引言

机械可动天线在航天测控网、深空通信和气象观测等关键领域中应用广泛。因为它具有大口径、高增益和宽覆盖等优势^[1]。随着航天任务对天线性能的要求越来越高, 天线口径和指向精度也在不断增加。而在太空中, 静态载荷(例如重力)和动态载荷(例如振动和惯性力)对天线结构的影响变得更加显著。以大口径可动天线^[1]为例, 重力可能会导致其反射面发生变形, 进而导致波束偏移和增益下降。此外, 在发射过程中也可能受到冲击载荷的影响, 导致传动机构磨损和连接部件松动。如何应对这些挑战, 保证天线的正常运行, 成为当前研究的重点之一。为了提高大口径可动天线在航天任务中的可靠性和稳定性, 需要持续探索和发展相关技术, 以满足日益增长的性能需求。只有不断创新和完善, 才能确保天线在各种极端环境下正常运行, 为航天领域的发展提供可靠支持。

卸载技术是解决有害载荷对天线结构影响的核心技术路径。近年来, 国内外学者提出了各种卸载方案, 包括被动、主动和混合卸载。本文建立在相关研究和工程案例, 对这些卸载方式进行系统分析, 确定它们的适用场景和发展潜力, 为未来高性能机械可动天线的设计与研发提供理论支持和技术参考。

一、机械可动天线卸载方式分类及原理

机械可动天线的卸载方式主要包括被动卸载、主动卸载及混合卸载三种。这些方式的核心原理和特点不同。被动卸载是指通过载

荷抵消来达到减轻天线负载的目的^[3], 主动卸载则是利用主动控制系统来实现负载的自动平衡, 而混合卸载则是将被动和主动卸载相结合, 以达到更好的效果。每种卸载方式都有其独特的优势和应用场景, 可以根据实际需求选择合适的方式来实现天线的卸载。

(一) 被动卸载技术

被动卸载技术利用机械结构自身的特性，比如弹性、阻尼和重力平衡，来实现载荷的缓冲和抵消。这种技术无需额外的能源输入，具有结构简单、可靠性高、成本低等优点，因此已成为目前可动天线和中低精度要求场景下的主流卸载方案。被动卸载技术的应用，不仅有效降低了系统的运行成本，还提高了系统的稳定性和可靠性。在未来的发展中，被动卸载技术有望在更多领域得到应用，为各种设备和系统提供更有力的载荷管理解决方案。

1. 重力平衡卸载

重力平衡卸载是一种通过添加重物或弹簧组件的方法，在天线上构建一个与其自身重力方向相反的平衡力，以抵消重力对天线转动部位和反射面的负载^[3]。比如，在天线的重心位置添加一个与卸载部位相等的重物，来抵消展开时的重力影响，从而平衡天线主体的重力，减轻转动机构的负担。对于大口径天线^[1]，可以采用多组弹簧并联结构，利用弹簧的弹性力来补偿反射面自身重力引起的变形。这种技术适用于静态或低速运动场景，即便如此卸载效果取决于平衡参数的匹配精度，对动态负载的适应能力相对较弱。

2. 气球卸载

气球卸载利用浮生气体（如氦气）产生的浮力^[5]，实现静态载荷抵消，无需持续能源输入，结构轻量化优势明显。通过在天线非关键称重部位（如反射器边缘、支撑臂末端）挂载系留气球或气囊，利用浮力形成与重力方向相反的平衡力，抵消部分静态载荷以减少结构变形，例如在地面进行天线展开试验中，通过单个或多组气球协同悬吊，理论可平衡100%的天线自重，降低支撑结构应力。该技术适配中低载荷场景，具有结构简单、轻量化、无摩擦损耗、无需其他辅助卸载工装（如桁架）等优势，但存在浮力调节精度有限，易受气体泄漏、室内空气对流等因素影响，且大口径天线^[1]仍需解决气球协同控制与空间布局干涉问题，目前该方法只适用于小型可动天线卸载。

3. 气浮卸载

气浮卸载技术利用气体静压支撑的原理，通过注入高压气体形成均匀气膜，实现了对天线部件与支撑结构的无接触支撑，从而基本消除了机械摩擦载荷，同时能够通过动态调节气膜压力来抵消外部载荷。比如，可以在天线的方位轴与底座之间设置环形气垫，持续供应压缩空气，以实现气膜支撑天线主体，降低摩擦系数至0.0001以下，在反射面背部配置阵列式气浮执行器，根据载荷分布数据实时调节气浮单元的供气压力，以精准抵消重力和惯性力引起的局部变形。这项技术具有许多优点，如摩擦损耗极小、响应速度快（毫秒级）、承载能力强等。而且，气体介质干净无污染，适应性较好。即便如此是，该技术也存在一些局限，比如需要维护气源系统、存在高压气体泄漏风险、以及对卸载系统的安装精度和密封性要求非常严格。目前，气浮卸载技术已被广泛应用于地面高精度测试设备以及部分航天器的地面展开试验中。

(二) 主动卸载技术

传感器感知载荷状态，控制器做出决策，执行器产生相应力以保持平衡，这就是主动卸载技术的核心。它能够实时监测载荷状态，并迅速做出反应，使天线保持稳定。主动卸载技术具有高精度和自适应能力强的优点，特别适用于大口径、高精度、动态工况下的可动天线。主动卸载技术不仅可以有效减轻天线本身的负荷，还能提高其工作效率和精度。在现代通信中，主动卸载技

术被广泛应用，可以有效提升天线性能，确保通信质量。

现代控制系统在伺服驱动技术领域发挥着重要作用^[2]，通过实时数据反馈和主动输出驱动力，实现动态载荷的精准控制。天线俯仰轴驱动系统中集成扭矩传感器，可以及时调整电机输出扭矩来抵消重力或惯性力矩的影响，提高系统的稳定性。另外，在反射面变形控制方面，采用分布式压电陶瓷执行器根据激光测距传感器的数据进行补偿力施加，修正反射面的形状。这种技术精度高达 $\pm 0.1\text{N} \cdot \text{m}$ 级，能够适应复杂的动态工况，在这种情况下要求传感器精度和控制算法的实时性较高，系统复杂度和能耗相对较高。控制系统的发展使得伺服驱动技术应用更加广泛，不仅可以应用于天线俯仰轴驱动系统，还可以在其他领域如航空航天等方面发挥作用。采用伺服电机、电液伺服缸等执行机构，可以实现动态载荷的准确控制，为系统运行提供保障。总的来说，现代控制系统在伺服驱动领域^[2]的应用案例中展示出了更高的精度和可靠性，为各种复杂工况下的控制提供了有效解决方案。在未来的发展中，有望进一步提升传感器精度和控制算法的实时性，降低系统的复杂度和能耗，这种方式可以使得伺服驱动技术在更多领域得到广泛应用。

(三) 混合卸载技术

混合卸载技术^[4]是目前大口径、高性能可动天线的主流技术方案。它结合了被动卸载的可靠性和主动卸载的高精度优势。被动结构来抵消基础载荷，同时主动系统能够补偿残余载荷和动态载荷，从而提升卸载精度并确保系统稳定性。这种技术在实践中发挥着重要作用，为天线的运行提供了有力支持。随着科技的不断进步，混合卸载技术将继续发展完善，为可动天线的性能提升和优化提供更多可能性。

混合卸载技术^[4]是一种结合了被动平衡重和主动伺服补偿的方案，能够有效地抵消大部分静态重力矩和动态惯性力矩，同时还能够实时补偿由温度变形引起的附加载荷。另外，该技术还结合了阻尼缓冲和磁悬浮支撑，通过阻尼器吸收冲击载荷，降低稳态运行时的摩擦载荷，从而提高系统的稳定性和精度。混合卸载技术的优点是在保证可靠性的同时，提高了系统的精度和适应复杂工况的能力。即便如此是，由于系统集成难度较大，需要解决被动和主动部件之间的协同控制问题。在应用混合卸载技术时，需要充分考虑系统集成的复杂性，确保被动和主动部件之间的协同运作，以实现最佳的效果。总之，混合卸载技术在工业应用中具有重要意义，能够有效提高系统的性能和稳定性，即便如此在实际应用中需要综合考虑各种因素，才能发挥其最大的作用。

二、各类卸载方式的性能对比与应用场景

表1 性能对比

卸载方式	被动卸载-重力平衡	被动卸载-气球卸载	被动卸载-气浮卸载	主动卸载-伺服驱动	混合卸载
卸载精度	中低 ($\pm 1\text{N} \cdot \text{m}$)	中低 ($\pm 1\text{N} \cdot \text{m}$)	中 ($\pm 0.5\text{N} \cdot \text{m}$)	高 ($\pm 0.1\text{N} \cdot \text{m}$)	高 ($\pm 0.05\text{N} \cdot \text{m}$)
动态适应能力	弱	弱	中	强	强
结构复杂度	低	低	低-中	中高	中高

可靠性	高	中高	中高	中	中高
成本	低	低	中高	中高	中高
能耗	无	无	无	中	中

被动卸载技术是一种适用于口径较小、指向精度要求不高、工况稳定的可动天线的解决方案。比如地面气象观测天线和小型卫星通信天线。重力平衡卸载主要用于静态载荷抵消，而阻尼缓冲卸载则广泛应用于发射段冲击防护和地面测试阶段的振动抑制。这种技术可以有效减轻天线系统的负荷，保证设备的稳定性和寿命。被动卸载技术也提高了设备的工作效率和可靠性。在现代科技发展的背景下，被动卸载技术将会有更广泛的应用前景。

主动卸载技术适用于大口径^[1]、高精度、动态工况的可动天线，例如深空探测地面站天线和大型网状天线。伺服驱动卸载技术被广泛应用于各种高精度天线，用于动态载荷补偿。主动卸载技术，可以有效提高天线的精度和稳定性，使其在复杂的环境中更加可靠地工作。这项技术对于提升天线性能和可靠性，具有重要意义，已成为现代天线工程中不可或缺的关键技术。

混合卸载技术在航天级大口径可动天线中具有重要地位。我国深空测控网所采用的35m和65m可动天线，采用了“重力平衡+伺服补偿”的混合卸载方式，能够高效抵消静态载荷，并实现动态工况下的高精度载荷补偿。与此不同，美国NASA的深空通信天线采用“阻尼缓冲+磁悬浮支撑”方案，既能保护发射段免受冲击，又满足在轨运行中低摩擦的要求。这些先进技术的应用，为航天领域的发展提供了有力支撑，为天文探测和深空通信提供了可靠保障。混合卸载技术的创新和发展，将进一步提高大口径可动天线的性能和稳定性，推动航天科技的不断进步。

三、机械可动天线卸载技术的发展趋势

(一) 轻量化与集成化

随着航天任务对载荷重量的限制日益严格，轻量化设计成为重要发展方向。未来，通过材料创新和结构优化，降低卸载部件的重量占比，同时推动卸载系统的集成化设计。开发一体化伺服电机，将载荷传感器与执行器集成于天线关节处，简化系统结构，减少冗余部件，提升系统紧凑性。这样不仅能够满足航天任务的要求，也有助于提高系统的效率和性能。

(二) 智能化与自适应化

在此情况下人工智能与机器学习技术的自适应卸载技术将成为未来研究的热点。该技术借助多维度传感器实时采集天线运行状态和载荷数据，利用深度学习算法构建载荷预测模型，从而实现提前优化和动态调整卸载参数。自适应控制算法也将被研发，根据不同工况（如天线转速、载荷类型）自动调整卸载模式（被动、主动、混合），提升系统对复杂工况的适应能力。举例来说，当天线低速运行时，系统将自动切换至被动卸载模式以减少能耗，

参考文献

- [1] 李明, 王建华, 张晓东. 大口径可动天线重力卸载技术研究 [J]. 宇航学报, 2020, 41(3): 356-363.
- [2] 张伟, 刘洋, 陈静. 机械可动天线主动卸载伺服控制系统设计 [J]. 控制工程, 2021, 28(5): 921-927.
- [3] 侯管仲, 许煜, 杨昭宁, 栗卫华, 刘汝冰. 星载机械可动天线地面零重力卸载概述. 空间电子技术, 2018(01): 74-78.
- [4] 王强, 李娜, 赵伟. 混合卸载技术在深空测控天线中的应用 [J]. 航天技术与产品, 2022, 45(7): 45-51.
- [5] 侯管仲. 气球在星载机械可动天线地面重力卸载中的应用 [C]// 中国航天科技集团公司科技委, 中国力学学会, 中国振动工程学会, 中国宇航学会, 空间微波技术重点实验室. 2014年可展开空间结构学术会议摘要集. 中国空间技术研究院西安分院, 2014: 23.

而当遇到突发冲击载荷时，则会启动主动补偿系统，以保证卸载精度。这种技术的发展不仅提高了系统的性能和稳定性，也为工程领域带来了全新的可能性。

(三) 高精度与长寿命

深空探测^[4]、空间通信等任务对天线指向精度的要求不断提高，这促使卸载技术朝着更高精度的方向不断发展。未来，我们将通过提升传感器精度（如纳米级位移传感器、微牛顿级力传感器）、优化控制算法（如模型预测控制、滑模控制）以及改进执行器性能（如高精度压电执行器、无刷伺服电机），来实现微米级变形补偿和微牛顿级载荷抵消。通过材料耐磨处理、润滑技术创新（如固体润滑、自修复润滑）和冗余设计的应用，提升卸载系统的使用寿命，以满足长周期在轨运行的需求。在不断追求精度的过程中，我们将不断探索技术的边界，为更高效、更稳定的空间任务提供更可靠的支持。

(四) 极端环境适应性

未来的深空探测和建设月球/火星基地等项目，面对极端环境的考验，需要强调卸载技术的环境适应性设计。为此，我们将致力于研发耐极端温度的阻尼材料和电磁部件，改进真空环境下的润滑方案，增强辐射防护性能。我们还将深入研究极端环境下的载荷特性变化规律，建立起环境、载荷和卸载参数之间的映射模型，以确保卸载系统在极端条件下稳定运行。这些努力将为未来的探索与生存提供坚实的技术基础。

四、结论

机械可动天线的卸载技术是验证其稳定性和指向精度的重要支撑。目前，已经形成了被动卸载、主动卸载和混合卸载三大技术系统。被动卸载技术由于结构简单、可靠性高，在中低精度、稳定工况下发挥着不可替代的作用。而主动卸载技术则以高精度、强适应性著称，成为大口径、高精度天线不可或缺的关键技术。此外，混合卸载技术兼顾了可靠性和精度，因此成为目前大型可动天线的主流选择。总的来看，机械可动天线的卸载技术不仅在技术发展上有着重要作用，同时也为天线的稳定性和指向精度提供了有力支持。

未来，随着航天任务朝向深空化、高精度化、长周期化发展，机械可动天线的卸载技术将不断演进。这种演进将朝着轻量化、集成化、智能化、高精度、极端环境适应性的方向进行。材料、结构、控制与传感器技术的协同创新，卸载系统的性能将进一步提升，以满足更复杂工况下的需求。卸载技术与天线整体结构的协同设计也将变得至关重要。建立完善的性能评估体系，是为了为卸载技术的工程化应用提供充分保障。不断的技术改进和创新，机械可动天线的卸载技术将更好地适应各种极端环境，并为航天任务的顺利进行提供更加可靠的支持。