

水平降落可复用货船质心变动问题与控制技术综述

唐秋实

成都飞机设计研究所，四川成都，610072；

摘要：水平降落型可复用货船是下一代低成本空间运输方案的重要子方向之一，由于携带载荷的多样性，此类飞行器将不可避免的遇到质心变动问题。本文针对货船，详细分析了其面临的载荷不定、质心未知和变动、与气动问题耦合等问题，并调研了国内外现有的三种飞行器质心变动解决方案，包括：质量矩控制、变质心调控操稳性能、质心容错控制，分析其作用、优缺点、当前工程可行性。最后归纳总结得出结论，以期能为进一步开展相关研究提供参考。

关键词：质心变动；可重复使用运载器；质量矩控制；变质心调控操稳性能；容错控制

DOI:10.69979/3041-0673.25.02.030

引言

可重复使用运载器（Reusable Launch Vehicle, RLV）是指能够把货物和人员运送至预定的空间轨道，完成任务后再入大气返回，最终降落地面的一类高超声速飞行器^[1]。由于携带载荷的多样性，其中的货运型 RLV——货船将不可避免的遇到质心变动问题，对其稳定性和操纵性造成严重影响^[2]。因此，本文调研了国内外各类飞行器应对质心变动的控制方法，分析其作用、优缺点、当前对货船的工程可行性，以期能为相关研究提供参考。

1 质心变动问题

1.1 载荷不定

对于货船，为完成不同的任务，其在运输的各个阶段以及不同的运输任务中，所携带的载荷并不相同。转动惯量、质心位置等质量参数都会由该次飞行的任务情况决定，带来不可预估性。以美国“追梦者”号货运飞船举例^{[3]-[6]}，该机在完成空间站货运任务受控离轨后，需要先将最多约 1500kg 的太空垃圾丢弃在大气层中烧毁，以减轻自重，这导致其无法在再入前准确测量自身的质量类参数，需要在线辨识。同时再入过程中，飞行器携带了最多约 5500kg 的货物返回，约占再入总重的 38%，在此占比下，货物左右摆放的重量不一致，货物滑动或液体晃动导致的重心偏移，都有可能产生不可预估的影响。

1.2 质心、气动问题耦合

不同于传统亚声速运输机和客机，货船的飞行空域、速域跨度都很宽，除了质心变化大外，焦点变化同样很大，这导致了稳定性变化剧烈。而此类飞行器在气动设计时，往往需要兼顾低速与高速性能，稳定性本就不好，还伴随有严重的非线性耦合、气动不确定性问题。上述结合，使得其对重心的变化非常敏感。

2 质心变动控制研究现状

目前，面对上述质心变动问题，工程界和学术界在以往飞行器的研究中提出了多种解决方案可供参考，研究主要集中在：质量矩控制^{[7]-[10]}、变质心调控操稳性能^{[10]-[17]}、质心容错控制^{[18]-[24]}等几个方向上。

2.1 质量矩控制

质量矩控制是指通过调节飞行器内部的质量物体，来实现姿态变化的一种控制方式^[7]，相关研究主要集中于高超声速飞行器^[10]。在这一领域，技术起步最早并且相对成熟的是美国，早在 1975 年，美国就已经完成了机动弹头 MK-500 的飞行试验，该弹头采用质量矩控制的方式在末制导段辅助机动以提升突防能力，不过具体研究细节一直处于高度保密状态。2000 年，美国陆军空间与导弹防御司令部提出了新概念拦截器——质量矩拦截器，该武器结构设想。其取消了以往导弹的各种翼面，转而由内部质量滑块进行机动控制，以此解决舵面灼烧的问题，但这一构想目前还没能实现^[8]。俄罗斯在质量矩控制技术方面同样也发展迅速，“白杨-M”导弹在 1997 年完成了飞行试验，标志着其同样掌握了质量

矩控制技术。后续“SS-18”、“SS-27”等洲际弹道导弹也采用了质量矩控制技术以提升突防能力^[9]。中国在这一领域起步较晚，但发展迅速。西北工业大学周凤岐教授团队于 2004 年完成了国内第一台一维变质心机构原理样机，该机构用于克服导弹螺旋运动，并有效提高了旋转导弹的命中精度^[9]。哈尔滨工业大学、北京理工大学也在这一领域发表了大量相关论文，完成了各类变质心机构的设计和性能测试，该已运用到部分飞行器控制中。

目前，质量矩控制技术虽有成果但并不成熟，对于货船来说，想将其作为主要的控制机构还有很长的路要走，且该方法鲁棒性差，无法应对燃料晃动等质心突变问题。但若能将货船携带的载荷或燃油作为质量矩控制机构，不仅能提升全速域飞行的稳定性，还能主动增强全机的控制能力，减少对气动舵面、RCS 的依赖，增强在恶劣热环境下的生存能力，是未来有较大潜在价值的方案之一。

2.2 变质心调控操稳性能

变质心调控操稳性能是指通过改变质心位置，调节其与焦点的关系，使飞机在不同速域下都拥有良好的稳定性与操纵性能的方法^{[10]~[11]}，常见的控制框图如图 1 所示。

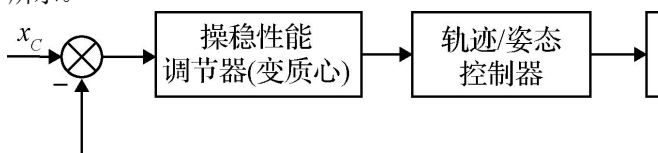


图 1 变质心调控操稳性能控制框图

上世纪 80 年代，放宽静稳定性^[12]和燃油重心控制^{[13]~[14]}的思想和方法逐渐走入了工程师们的视野。燃油重心控制是指通过调节燃油分布，使重心和焦点位置合理匹配，从而提升飞机稳定性操纵性的技术。欧洲的空客公司将该技术运用到了 A310-A380 系列客机上。相关实验表明，变质心调控技术，使 A-310 的任务耗油减少了约 1.5%，燃油容量增加了约 11%。美国的“SR-71”黑鸟高空高速侦察机在设计过程中，为提升超声速段的飞行性能，也引入了燃油重心控制技术^[15]。其在 3.2 马赫的巡航速度附近将质心位置后移至 25%平均气动弦长处，大大提升了飞行器在超声速段的飞行性能，增强了该机的任务能力与安全性。文献^[16]针对滑翔式高超声速弹头，

设计了质量滑块机构调节重心，使得飞行器在不同飞行阶段都有良好的稳定性。

对于货船来说，变质心调控操稳性能的优点是简单易实现，工程上成功经验多，能有效增强飞行器全速域的稳定性与操纵性，其需要飞行器能够完成重心的在线辨识工作。但也有一些较明显的缺点，如燃料消耗会影响控制能力，使用质量滑块机构的话则会增加死重，且横向调整能力不强、对燃料晃动等难预测的质心变动缺乏鲁棒性等。

2.3 质心容错控制

质心容错控制是指在重心不定的情况下，控制器仍能维持正常运行，并保证飞行性能的控制方法，常见的质心容错控制框图如图 2 所示。

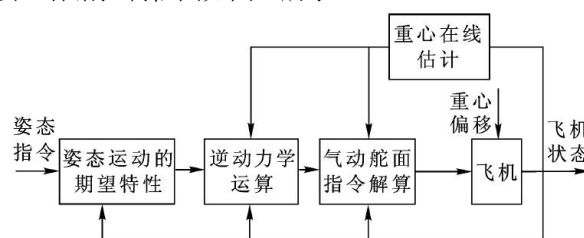


图 2 常见的质心容错控制框图

目前，质心容错控制的研究多为理论研究，可分为建模和控制算法两方面。针对建模问题，文献^[18]参考带有实际损伤的飞机建立了质心变动的 6 自由度动力学方程模型，并将模型仿真结果同实际风洞数据进行了对比，结果表明模型可靠有效。文献^[19]基于受损飞机的非线性质心变动动力学模型，推导了线性化模型，并详细分析了质心变动对飞行器线性矩阵模型的影响，最后设计了基于参考模型自适应控制的质心容错控制方法。文献^[20]对飞机可能遇到的各类受损情况进行了详细分析并完成了对应的空气动力学建模，其中着重分析了质心偏移对气动力和力矩的影响。文献^[21]建立了考虑质心偏移的 6 自由度飞行动力学模型，并依据伐利农定理将质心偏移对气动力的影响转换为偏心力矩。

针对控制算法。文献^[20]针对受损飞机，设计了具有质心偏移自适应能力的神经网络-自适应控制器，仿真结果表明神经网络有效增强了控制器的自适应能力。文献^[22]在考虑作动器故障的前提下，针对质心变动的高超声速飞行器设计了一种基于自适应估计器的滑模控制器。文献^[23]在充分考虑高超声速飞行器质心偏移导致的

不确定性、惯性矩阵变化、偏心力矩等问题的基础上,设计了自适应容错控制器。

目前,质心容错控制多还停留在理论研究阶段,想在工程中运用还需进一步完善方法。对于货船来说,该方法对横向质心偏移、燃料晃动等未知质心变动有更强的适应性,能够有效增强鲁棒性,同时还能提升飞行器在受损情况下的生存概率。而且还存在同质量矩、变质心调控操稳性能等方法协同使用的可行性。

3 总结

本文针对水平降落型可复用货船,分析了其可能遇到的各类质心变动问题,对目前已有的几种控制方案进行了原理阐述和研究现状调研,并分别对其作用、优缺点、当前工程可行性进行了分析。总结并归纳上述内容,得到以下三点结论:

(1) 货船的质心变动问题主要体现在载荷不定与气动问题耦合两方面。

(2) 针对三种控制方案。质量矩控制虽有成果但并不完全成熟,不过该方法既能保证全速域飞行的稳定性,还能主动增强全机的控制能力,是有较大潜在价值的方案之一。变质心调控操稳性能简单有效易实现,工程经验多,但燃料的消耗会影响控制能力,对燃料晃动等难预测的质心变动缺乏鲁棒性。质心容错控制多为理论研究,距工程运用还有一定距离,但该方法鲁棒性强,存在同质量矩、变质心调控操稳性能协同使用的可行性。

参考文献

[1] Baiocco, Paolo. "Overview of reusable space systems with a look to technology aspects." *Acta Astronautica* 189(2021): 10-25.

[2] 宋征宇, 蔡巧言, 韩鹏鑫, 等. 重复使用运载器制导与控制技术综述[J]. *航空学报*, 2021, 42(11): 525050.

[3] Ferretti, Stefano. *Space Capacity Building in the XXI Century*. Springer International Publishing, 2020.

[4] Meyer-Allyn M, Metts J, Anderson D, Johnson J, Quinn G. Dream chaser thermal control system: an overview. In 42nd International Conferen

ce on Environmental Systems 2013 (p. 3452).

[5] Zea L, Warren L, Ruttle T, Mosher T, Kelsey L, Wagner E. Orbital Reef and commercial low Earth orbit destinations—upcoming space research opportunities. *npj Microgravity*. 2024 Mar 29;10(1):43.

[6] Freeman Jr D C, Powell R W. Impact of far-aft center of gravity for a single-stage-to-orbit vehicle[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1980, 17(4):311-315.

[7] 赵鸿燕. 美国反导动能拦截器发展研究[J]. *飞航导弹*, 2016, (06):63-69.

[8] 温德义; 胡劲松. 美国新概念动能拦截器技术[J]. *现代军事*, 2003, (06):9-16.

[9] 周敏; 周凤岐; 周军; 郭建国. 变质心技术发展与应用[J]. *航空兵器*, 2021, (06):7-13.

[10] 周敏; 周凤岐; 周军; 郭建国. 高速飞行器变质心控制技术综述[J]. *宇航学报*, 2022, (03):271-281.

[11] 汤佳骏. 高超声速飞行器变质心辅助控制方法研究[D]. 南京航空航天大学, 2020.

[12] 冯小刚. 民机放宽静稳定性的研究[J]. *电子设计工程*, 2013, (19):118-119+122.

[13] 张晶. 飞机超声速巡航主动重心控制系统设计[J]. *系统仿真学报*, 2009, (23):7526-7530.

[14] Huber, Bernard. "Center of gravity control on Airbus aircraft: Fuel, range and loading." (1988).

[15] Mixon, Bryan, and Bernd Chudoba. "The Lockheed SR-71 Blackbird—a senior capstone re-engineering experience." 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 2007.

[16] Rogers J, Costello M. A variable stability protectile using an internal moving mass[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2009, 223(7):927-938.

[17] Lee, Howard, John M. Morgenstern, and Hossain Aminpour. "Aircraft with active center of

- gravity control." U.S. Patent No. 6,913,228. 5 Jul. 2005.
- [18]Bacon, B.J.; Gregory, I.M. General equations of motion for a damaged asymmetric aircraft. AIAA Paper 2007-6306. In Proceedings of the 2007 AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Hilton Head, SC, USA, 20 August 2007.
- [19]Nguyen, Nhan, et al. "Dynamics and adaptive control for stability recovery of damaged asymmetric aircraft." AIAA Guidance, navigation, and control Conference and Exhibit. 2006.
- [20]Nguyen, N.; Krishnakumar, K.; Kaneshige, J.; Nespeca, P. Flight dynamics modeling and hybrid adaptive control of damaged aircraft. J. Guid. Control. Dyn. 2008, 31, 171-186.
- [21]Y. Meng, B. Jiang, R. Qi. Modeling and control of hypersonic vehicle dynamic under centroid shift. Advances in Mechanical Engineering, 2018, 10(9):1-21.
- [22]Meng, Yizhen, Bin Jiang, and Ruiyun Qi. "Adaptive non-singular fault-tolerant control for hypersonic vehicle with unexpected centroid shift." IET Control Theory & Applications 13.12 (2019): 1773-1785.
- [23]Meng, Yizhen, Chun Liu, and Yiliu Liu. "Adaptive attitude angle constrained fault-tolerant control of hypersonic vehicle with unknown centroid shift." Aerospace Science and Technology 140 (2023): 108475.
- [24]吴仪政. 变负载无人机的自适应模糊自抗扰控制研究[D]. 华东交通大学, 2021.

作者简介：唐秋实（2000.3.21），男，汉族，云南省丽江市，本科（硕士在读），成都飞机设计研究所，飞行器控制，中航工业成都飞机设计研究所。