

# 航天器电磁对接/编队飞行 动力学与控制

杨乐平 张元文 朱彦伟 黄 涣 蔡伟伟 著



科学出版社

# 航天器电磁对接/编队飞行 动力学与控制

杨乐平 张元文 朱彦伟 黄 涣 蔡伟伟 著

国防科学技术大学学术著作出版资助专项经费 资助

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书是关于航天器电磁对接/编队飞行动力学与控制的一本专著。全书共 10 章, 主要内容包括星间电磁作用基础、电磁对接/分离动力学与控制、电磁编队飞行动力学与控制、地面演示验证试验等。本书内容新颖、翔实, 全面系统地阐述了航天器电磁对接/编队飞行动力学与控制的理论基础、数学模型、动力学特性以及控制方法等内容, 具有较强的前沿性和实用性。

本书可供从事新概念航天器设计、航天器相对运动和在轨服务等领域的研究人员和工程技术人员参考, 也可作为高等院校飞行器设计、自动控制等相关专业本科生及研究生的参考教材。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

航天器电磁对接/编队飞行动力学与控制/杨乐平等著. —北京: 科学出版社, 2015. 9

ISBN 978-7-03-044793-7

I. ①航… II. ①杨… III. ①航天器对接-飞行力学-研究②航天器对接-飞行控制-研究 IV. ①V526

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 123728 号

责任编辑: 孙伯元 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2015 年 9 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2015 年 9 月第一次印刷 印张: 14 3/4

字数: 282 240

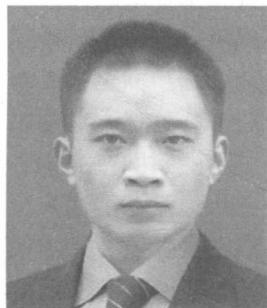
定价: 100.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

## 作者简介



杨乐平 男,汉族,四川乐山人,1964年11月出生,1980年8月考入国防科学技术大学。现任国防科学技术大学航天科学与工程学院教授、博士生导师、科技委委员,国家863专家,军队战略规划咨询委员会委员,《国防科技》杂志编委。主要从事太空安全战略、新概念航天器和在轨服务技术等研究,获军队科技进步一等奖两项、二等奖三项,出版《航天器相对运动轨迹规划与控制》、*On-orbit Operations Optimization* 等学术专著和教材8部,在国内外学术期刊和会议上发表论文100余篇。



张元文 男,汉族,贵州安顺人,1983年8月出生,2013年6月于国防科学技术大学获得博士学位。现任国防科学技术大学航天科学与工程学院讲师,主要从事飞行器动力学与控制、航天器电磁对接与编队飞行、在轨服务与新概念航天器技术等研究,已分别在 Springer、Nova 出版社各出版专著1部,发表文章30余篇,其中SCI检索10篇,主持国家自然科学基金青年基金1项。

## 前 言

进入 21 世纪,国际空间领域战略态势呈现“拥挤、竞争、对抗”新特点,引领空间技术向“更快、更高、更强”目标发展。“更快”体现在发展快速响应空间系统,全方位推动快速进入与利用空间;“更高”体现在深空探测快速发展,空间对抗更加关注高轨目标,出现了更多智能化、多样化的新概念航天器;“更强”体现在追求空间系统价值创造和性能提升的新途径,大力发展集群飞行、在轨操控等新技术。灵活、高效、多样的航天器相对运动控制是实现空间技术“更快、更高、更强”发展目标的共性技术要求,因而也成为当前空间技术领域研究热点与前沿,代表了航天器动力学与控制研究新的发展方向。

航天器相对运动控制传统上主要依赖推力器系统,虽然技术上已完全成熟,但在应用中也带来了一些问题,如推进剂消耗限制了任务寿命,近距离喷流有可能污染目标航天器有效载荷,控制灵活性不足等。针对上述问题,科学家开始探索利用新的方式进行航天器相对运动控制,其中一个思路就是利用航天器之间产生的可控场力(包括静电场力、电磁场力等)来实现相对运动控制,而电磁场力是目前研究相对系统、应用更为明确的解决方案。从 2000 年开始,美国麻省理工学院、马里兰大学、华盛顿大学、得克萨斯大学和日本东京大学等国际知名大学陆续开展了星间电磁力作用动力学与控制研究,逐步发展形成了“航天器电磁对接与编队技术”这一新的研究方向。英国的《新科学家》杂志 2008 年曾预言:电磁编队技术在空间探测领域具有重要的科学与应用价值,将给未来航天器编队飞行技术带来彻底革新。近年来,随着航天器交会对接与编队飞行任务常态化发展,航天器电磁对接与编队技术研究正在从理论探索、技术攻关逐步深入到地面及在轨演示验证,工程应用步伐显著加快,NASA 约翰逊空间中心和戈达德空间飞行中心等工程部门立项支持该项技术研究就说明了这一点。

简单来说,电磁对接与编队就是利用通电线圈产生的电磁力/力矩来完成航天器交会对接与编队控制。与传统的喷气推进技术相比,电磁对接与编队技术具有以下几方面突出的优势:一是仅耗电能而不消耗燃料,提高了航天器系统运行寿命;二是消除了羽流效应,避免了对目标航天器有效载荷的不利影响;三是改变电流大小和方向,可以很容易实现连续和可逆控制,提高了控制的灵活性。从面向未来的发展来看,电磁力作用与控制研制新型在轨自组装系统、新概念自适应薄膜成像系统、航天器抗空间辐射主动防护系统、空间站人造重力环境等方面具有突出的技术优势,潜力巨大。总体而言,电磁对接与编队技术优势明显、应用

广泛,值得深入研究。2005年,我们团队在国内最先提出开展电磁对接技术与系统研究,并于2010年在国内首次完成了电磁对接地面演示验证试验。此后进一步拓展到电磁编队技术,持续进行电磁对接与编队技术的系统研究,迄今已形成2篇博士论文和3篇硕士论文,并在国内外学术刊物和会议上发表了相关研究论文30余篇,产生了一定的学术影响。本书以2篇博士论文和我们在 *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*、*Acta Astronautica*、*Journal of Aerospace Engineering* 等有一定影响的国际学术期刊上发表的论文为基础,系统介绍了我们在电磁对接与编队技术研究方面取得的成果,主要内容包括星间电磁作用基础、电磁对接/分离动力学与控制、电磁编队飞行动力学与控制、地面演示验证试验等。

本书共10章,各章节主要内容安排如下:第1章阐述航天器电磁对接、分离与编队飞行的基本概念与技术内涵,综合论述航天器动力学与控制技术国内外相关研究情况;第2章针对航天器电磁对接、分离与编队飞行的共性基础问题,阐述星间电磁力作用原理与特点,推导远场、近场两类电磁力/力矩数学模型,并对电磁力/力矩的耦合特性及其影响进行分析,进一步探讨模型误差与地磁场干扰问题;第3~6章以航天器电磁对接/分离为研究对象,系统介绍基于牛顿力学理论的动力学建模、自对接特性及其实现的磁矩条件、制导控制方法、考虑地磁场作用的角动量管理以及地面演示验证试验等内容;第7~10章以航天器电磁编队飞行行为对象,系统介绍基于分析力学 Lagrange 方法、Kane 方法的动力学建模、六自由度相对平衡态特性、静止编队/自旋编队实现条件、编队构形保持与重构控制等内容。本书由杨乐平制定编写提纲,第1章由张元文、黄涣撰写,第2~6章由张元文撰写,第7章由黄涣、蔡伟伟撰写,第8~10章由黄涣撰写。全书由杨乐平统稿、朱彦伟审校。

本书是课题组集体智慧的结晶,部分内容参考了敖厚军博士在集群航天器动力学与控制方面的研究成果,戚大伟博士参与了相关地面试验工作,甄明博士、徐良硕士在文字校对、格式修改等方面做了有益工作。另外,国防科学技术大学张青斌副教授、刘新建副教授参与部分研究讨论,中国科学院力学研究所张珩研究员、北京邮电大学孙汉旭教授、中国航天科技集团公司第五研究院谭春林研究员对研究工作提出了有益建议,在此向他们致以由衷感谢!

本书研究工作得到国家自然科学基金项目支持,出版得到了“国防科学技术大学学术著作出版资助专项经费”的资助,在此一并深表谢意。

由于作者水平有限,书中不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

作者

2015年3月于长沙

# 目 录

## 前言

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 问题描述 .....	1
1.1.1 基本原理 .....	1
1.1.2 电磁对接/分离 .....	3
1.1.3 电磁编队飞行 .....	4
1.2 国内外研究综述 .....	5
1.2.1 动力学建模与特性分析 .....	5
1.2.2 电磁作用控制 .....	8
1.2.3 地面试验验证 .....	12
1.3 本书组织结构与主要内容 .....	12
1.3.1 组织结构 .....	12
1.3.2 主要内容 .....	13
参考文献 .....	15
第 2 章 星间电磁作用基础 .....	23
2.1 概述 .....	23
2.2 星间电磁力/力矩模型 .....	23
2.2.1 电磁力/力矩模型 .....	23
2.2.2 特性分析 .....	25
2.3 干扰特性分析 .....	26
2.3.1 远场模型乘性误差 .....	26
2.3.2 地磁场作用干扰 .....	27
2.3.3 模型应用准则 .....	31
2.4 小结 .....	32
参考文献 .....	32
第 3 章 电磁对接/分离动力学 .....	33
3.1 概述 .....	33
3.2 基于牛顿运动定律的动力学建模 .....	33
3.2.1 运动状态描述 .....	33
3.2.2 动力学模型 .....	36

3.3	对接特性分析 .....	37
3.3.1	一维自对接性 .....	37
3.3.2	二维自对接性 .....	38
3.3.3	三维自对接性 .....	43
3.4	分离特性分析 .....	46
3.4.1	V-bar 分离 .....	47
3.4.2	R-bar 分离 .....	50
3.4.3	H-bar 分离 .....	54
3.5	小结 .....	58
	参考文献 .....	58
<b>第4章</b>	<b>电磁对接/分离控制 .....</b>	<b>59</b>
4.1	概述 .....	59
4.2	对接轨迹的鲁棒及自适应控制 .....	59
4.2.1	反馈线性化+鲁棒 $H_\infty$ .....	62
4.2.2	反馈线性化+ESO+LQR .....	67
4.2.3	基于 Lyapunov 主稳定性的自适应控制 .....	76
4.3	对接姿态的分散协同鲁棒控制 .....	81
4.3.1	姿态控制需求分析 .....	81
4.3.2	分散协同鲁棒控制律 .....	83
4.3.3	全局渐近稳定性分析 .....	85
4.3.4	仿真算例 .....	92
4.4	分离轨迹的制导控制一体化设计 .....	95
4.4.1	循环追踪控制基本理论 .....	95
4.4.2	分离轨迹的制导控制律设计 .....	96
4.4.3	参数整定 .....	97
4.4.4	仿真算例 .....	98
4.5	小结 .....	101
	参考文献 .....	101
<b>第5章</b>	<b>电磁对接/分离角动量管理 .....</b>	<b>103</b>
5.1	概述 .....	103
5.2	地磁偶极子模型 .....	103
5.3	基于地磁场作用的角动量管理 .....	106
5.3.1	正常模式的动量管理 .....	106
5.3.2	角动量卸载模式的动量管理 .....	110
5.3.3	仿真分析 .....	112



5.4 ACMM 设计策略 .....	116
5.4.1 设计思路 .....	116
5.4.2 序列磁偶极子求解 .....	116
5.4.3 ACMM 控制 .....	117
5.5 小结 .....	120
参考文献 .....	120
<b>第 6 章 电磁对接/分离地面试验 .....</b>	<b>122</b>
6.1 概述 .....	122
6.2 试验系统总体方案 .....	122
6.2.1 硬/软件系统框架 .....	122
6.2.2 电磁装置作用力/力矩估算 .....	125
6.2.3 试验平台误差分析及处理措施 .....	128
6.3 试验系统硬件设计 .....	129
6.3.1 结构分系统 .....	129
6.3.2 气路分系统 .....	130
6.3.3 测量分系统 .....	131
6.3.4 嵌入式控制分系统 .....	132
6.3.5 执行分系统 .....	133
6.4 试验系统软件开发 .....	134
6.4.1 上位机监控软件 .....	134
6.4.2 PC104 主控软件 .....	136
6.4.3 单片机控制软件 .....	136
6.5 地面试验 .....	137
6.5.1 试验设计 .....	137
6.5.2 试验结果分析 .....	138
6.6 小结 .....	140
参考文献 .....	140
<b>第 7 章 电磁编队飞行动力学 .....</b>	<b>141</b>
7.1 概述 .....	141
7.2 基于 Euler-Lagrange 方程的动力学建模 .....	141
7.2.1 系统能量 .....	141
7.2.2 动力学模型 .....	143
7.3 基于 Kane 方法的动力学建模 .....	145
7.3.1 广义坐标与广义速率 .....	147
7.3.2 广义主动力与广义惯性力 .....	149

7.3.3	动力学模型	150
7.4	相对平衡态分析	152
7.4.1	相对平衡态	152
7.4.2	静态编队必要条件	154
7.5	小结	156
	参考文献	156
<b>第8章</b>	<b>双星静态/自旋电磁编队及其稳定性</b>	<b>157</b>
8.1	概述	157
8.2	双星电磁编队动力学	158
8.2.1	径向分布动力学	158
8.2.2	切向/法向分布动力学	160
8.3	静态编队及其稳定性	161
8.3.1	静态编队构形	161
8.3.2	双星磁矩配置与求解	164
8.3.3	稳定性分析	167
8.4	自旋编队及其稳定性	170
8.4.1	自旋编队可行性分析	171
8.4.2	深空自旋编队构形	172
8.4.3	稳定性分析	173
8.5	小结	174
	参考文献	175
<b>第9章</b>	<b>三星电磁编队不变构形及其稳定性</b>	<b>176</b>
9.1	概述	176
9.2	三星电磁编队动力学	176
9.2.1	共线编队	177
9.2.2	三角形编队	179
9.3	电磁编队三星共线不变构形	180
9.3.1	满足电磁力矩条件的磁矩解	180
9.3.2	静态共线构形	182
9.3.3	自旋共线构形	186
9.4	电磁编队三角形不变构形	187
9.4.1	静态三角形构形	188
9.4.2	自旋三角形构形	192
9.5	稳定性分析	194
9.6	小结	197

---

参考文献 .....	198
<b>第 10 章 电磁编队飞行控制 .....</b>	<b>199</b>
10.1 概述 .....	199
10.2 六自由度构形保持控制 .....	199
10.2.1 相对平衡态保持策略 .....	200
10.2.2 基于 LQR 及 ESO 的构形保持控制 .....	201
10.2.3 仿真算例 .....	203
10.3 构形重构控制 .....	212
10.3.1 重构轨迹规划 .....	212
10.3.2 基于伪谱法的最优构形重构控制 .....	213
10.3.3 仿真算例 .....	220
10.4 小结 .....	223
参考文献 .....	224

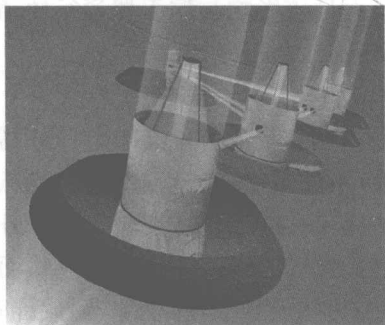
# 第 1 章 绪 论

随着空间科学技术和协同操控需求的提出,航天器对接和编队飞行对星间相对位置/姿态的控制精度要求逐步提高,其科学问题可归结为航天器相对运动的六自由度高精度控制。采用传统推力器(特别是连续小推力装置)作用可实现该类控制,但存在推进剂消耗、羽流污染、燃料储箱抖振等固有不足,而采用星间可控磁场力作用实现航天器相对运动控制可有效克服推力器的这些不足,且具有连续、可逆以及同步控制能力,应用前景广阔。然而,星间可控磁场力作用同时也带来了动力学的强非线性耦合与不确定性等问题,需深入研究作用力/力矩、动力学等模型以及动力学特性,并在此基础上开展利用其特殊动力学特性的新颖控制方法及其验证研究。

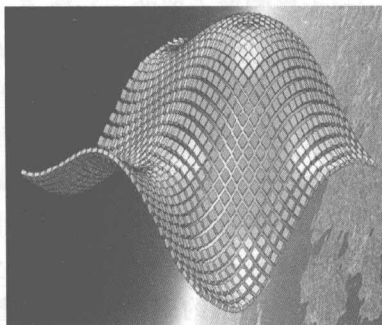
## 1.1 问题描述

### 1.1.1 基本原理

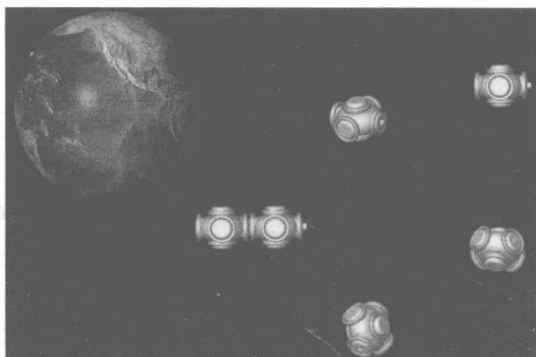
航天器电磁对接/编队飞行为利用星上电磁装置所主动产生磁场相互作用生成的力/力矩控制航天器间相对位置/姿态,属于星间电磁力/力矩作用的航天器近距离相对运动范畴。相对于传统推力器作用,星间电磁力/力矩作用的相对运动具有不消耗推进剂、无羽流污染以及非接触、连续、可逆、同步控制等能力,非常适合长期、高精度、近距离在轨操控任务,在编队飞行[图 1.1(a)]、非接触在轨组装[图 1.1(b)]、对接/分离[图 1.1(c)]等领域应用潜力巨大。



(a) 编队飞行



(b) 非接触在轨组装



(c) 对接/分离

图 1.1 星间电磁力/力矩作用相对运动的应用

航天器电磁对接和编队飞行属于星间电磁力/力矩作用相对运动的不同分支,前者所涵盖的相对运动间距逐渐减小,直至为 0;后者间距一般不会减小到 0,而是在一定距离范围内运动。因此,从任务角度和控制需求来说,航天器电磁对接与电磁编队飞行存在明显区别。然而,由于同属星间电磁力/力矩作用的近距离相对运动范畴,电磁对接和电磁编队飞行存在较多一致的、明显区别于传统推力器作用的本质属性,分析如下。

(1) 电磁力/力矩矢量由相对位置/姿态、电流确定,且受外界环境影响。

由日常生活中永磁铁相吸/斥的物理现象可知,两永磁铁相距越近,两者间吸力或斥力越大,而且作用力矢量与两永磁铁摆放方位密切相关。已有研究表明,电磁力/力矩与电磁装置间相对位置/姿态强非线性耦合,即电磁力/力矩影响电磁装置间相对位置/姿态,同时电磁装置间位置/姿态也影响电磁力/力矩矢量。

另外,地球本身存在较强的地磁场,与在轨运行航天器所产生的星上电磁场相互作用进而影响航天器的运行轨道/姿态,而且该影响与航天器运行轨道/姿态密切相关。因此,航天器电磁对接/编队飞行需深入考虑地磁场作用。

(2) 相对运动状态满足线动量、角动量和机械能守恒约束。

对于对接的两航天器或编队飞行的多航天器整体,星间电磁力/力矩属于内力/力矩作用范畴,相对运动状态满足线动量、角动量和机械能守恒约束。这些守恒约束一方面给航天器相对运动引入了一些限制,即限定了在轨操控任务类型,如航天器系统质心不能任意机动、各航天器运动需满足一定对称性等;然而,如果能有效利用这些守恒约束特性,可简化动力学模型和控制律设计,形成许多新颖的航天器系统在轨构形以完成特殊的操控任务,如不消耗推进剂的长期稳定“一”字形编队、旋转绕飞编队以及螺旋绕飞编队等。

(3) 属于非接触空间操控领域,需考虑电磁屏蔽。

星间电磁力/力矩为电磁场相互作用产生的力/力矩,具有场力作用特性,如非接触、全维性、不受真空环境影响等,为未来新概念的非接触在轨操控提供了一种可行的手段与方法。另外,由于电磁场的全维性,在利用其产生作用力/力矩的同时,需要考虑其对星上电子的影响,采取相应的电磁屏蔽措施,如通过电磁装置设计及其在航天器上的布置使电磁场远离星上电子、电子器件屏蔽壳、反向电磁场抵消等。

需要说明的是,星间库仑力和磁通钉扎(flux-pinned)效应力的作用机理、动力学及控制需求与航天器电磁对接/编队飞行具有较多相似性,对后者动力学与控制的研究可借鉴前者相关成果。另外,针对该三种作用力的基本特性,本章有时以星间非接触内力这一概念统一描述这三种作用力。

### 1.1.2 电磁对接/分离

航天器电磁对接为星间电磁力/力矩作用下航天器相对位置/姿态减小为0,如图1.2所示,存在自对准、自吸附等特性。

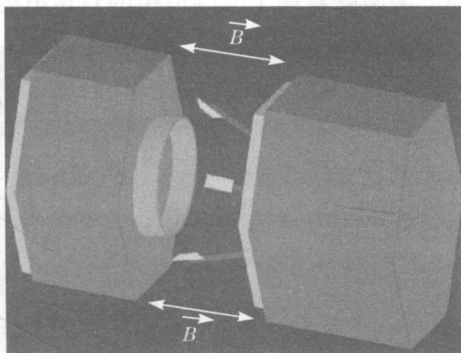


图 1.2 星间电磁力/力矩作用的对接

电磁对接的动力学与控制存在如下一些特殊问题。

(1) 电磁对接伴随着航天器相对位置/姿态逐渐减小,直至为0;后面将会介绍,目前用于对接动力学分析与控制设计的星间电磁力/力矩模型都为远场解析模型,该模型随电磁装置间相对位置的减小而逐渐增大。因此,对于电磁对接,电磁力/力矩远场模型误差对其动力学分析与控制设计的影响更加突出。

(2) 航天器对接属于超近距离操控,对相对位置/姿态的控制精度要求较高。因此,对于电磁对接,控制更注重精度与鲁棒性需求。

(3) 电磁力/力矩与相对距离的3~4次方成反比,随着相对距离的减小,其变化对电磁力/力矩大小的影响更突出,即电磁力/力矩与相对位置的非线性耦合特

性更强,姿/轨耦合性也更强。因此,电磁对接控制需重点考虑如何解决该强非线性及耦合性问题。

(4) 航天器电磁对接的目的是实现两航天器物理连接,则电磁装置形状、电磁装置与对接机械机构的匹配性、电磁装置在航天器上的布置等物理问题成为需要解决的理论研究及工程实际问题。

(5) 就前面 4 点特性来说,电磁分离与电磁对接本质一致,而且在工程实际层面具有对称性;然而,两者的动力学特性具有较大差异,电磁对接具有收敛稳定性,而电磁分离具有发散失稳性。因此,在控制律设计时,两者的研究重点有所不同,这在后面会有所体现。

航天器电磁对接/分离技术可以为在轨组装、构形重构、在轨加注等未来在轨服务任务提供支撑,可满足长期性、超近距离性、高精度性等需求。

### 1.1.3 电磁编队飞行

电磁编队属于近距离的星间电磁力/力矩作用范畴,为几十至百米量级,重点研究如何利用星间电磁力/力矩更有效地控制多航天器间相对位置与姿态,实现编队构形的保持与重构。美国麻省理工学院设想的双星电磁编队如图 1.3 所示。

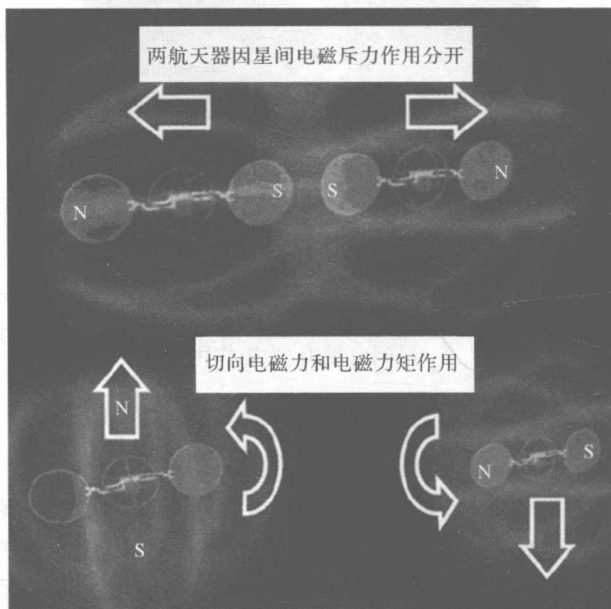


图 1.3 麻省理工学院设想的双星电磁编队

一般而言,航天器编队中星间距离都在几十米范围以外。在此距离条件下,航天器电磁编队的动力学分析与控制设计可采用远场电磁力/力矩模型,模型相

对误差小于10%。因此,航天器电磁编队对电磁装置的具体形状需求较少,动力学分析与控制设计时可將电磁装置以磁偶极子看待。另外,电磁编队重点研究星间电磁力/力矩作用下编队系统保持与重构的动力学与控制,主要包括构形稳定性、可控自由度、构形重构优化以及利用星间电磁力/力矩特性的控制策略与方法等。同时,需考虑地球引力场、地磁场等干扰因素的影响,研究如何利用或有效抑制的措施。

航天器电磁编队可为大型空间结构(如大口径太空望远镜、多模块空间干涉仪)、分离模块航天器等新型空间操控任务提供动力与手段支撑,可满足长期性、高精度、安全性等需求。

## 1.2 国内外研究综述

### 1.2.1 动力学建模与特性分析

#### 1. 动力学建模

航天器电磁对接/编队飞行的动力学建模具有统一性,都为星间电磁力/力矩作用下的航天器相对运动建模。因此,可基于两电磁航天器系统开展动力学建模研究,进而扩展到多航天器系统。星间电磁力与传统推力相比具有明显区别,即具有典型的内力特性,同时作用于多个航天器,具有几何与力学意义上的对称性,不影响整个系统的质心运动,满足动量守恒与动量矩守恒定律。因此,星间电磁力/力矩作用下的航天器相对运动建模与传统推力作用建模相比存在一定特殊性。目前来说,应用最广泛的动力学建模方法主要包括基于牛顿力学以及分析力学框架的方法,另外,多体动力学的建模也逐渐得到重视与研究。

基于牛顿力学框架的相对运动建模可分为两种思路<sup>[1,2]</sup>:一是从绝对位置矢量出发,通过动力学分析得到相对运动模型,称为代数法或动力学法;二是从轨道根数出发,通过空间几何关系得到相对运动模型,称为几何法或运动学法。动力学方法基于C-W方程或T-H方程建立相对运动模型,前者以地球中心引力体和圆参考轨道为假设,未包含摄动力影响,对于长周期或相对距离较大的任务存在明显误差;后者以真近点角为自变量,通过简化非线性相对运动方程得到,不受近圆轨道假设限制,但依然存在线性化误差和未包含摄动影响的缺陷。运动学方法基于两航天器绝对轨道根数或相对轨道根数表示相对运动模型,其未作任何近似,适于描述任意偏心率及相对距离的相对运动,但形式复杂不便于揭示相对运动规律。当两航天器相距较近或执行特定任务时,还必须考虑相对姿态运动,建立6-DOF相对运动模型<sup>[3,4]</sup>。针对星间电磁力作用的新概念航天器编队,Ahsun



等<sup>[5]</sup>基于相对运动原理,建立了圆轨道并考虑  $J_2$  项影响的电磁编队模型,同时考虑动量轮和电磁力矩作用建立了相对姿态的欧拉动力学方程;针对具有相似作用特性的双星库仑编队,Natarajan<sup>[6]</sup>基于 C-W 方程分别建立了三种编队模式下的线性化相对运动模型;Kim 等<sup>[7]</sup>建立了以差分轨道根数描述的编队相对运动模型,用以分析库仑力作用下编队的运动特性。

牛顿力学方法具有物理原理清晰、几何直观性强等优势,但较难应用于复杂力学问题的分析,并且由于各种假设和简化的引入,一定程度上降低了物理模型的真实性和精确性。以 Lagrange 方程为代表的分析力学方法有效弥补了牛顿力学方法的不足。对于航天器编队问题,除需进一步考虑摄动力以提高模型精度,对参考轨道的一般性提出了需求。Guibout 等<sup>[8]</sup>创造性地应用分析力学原理,建立了分布式卫星系统相对运动的 Hamilton 力学描述和求解方法,其优势在于能够统一考虑各阶摄动因素,同时适用于任何类型参考轨道;但该方法只能获得半解析解。吴文昭<sup>[9]</sup>建立了分布式卫星系统相对运动 Hamilton 力学模型,分析了相对运动的 Hamilton 函数近似阶数对求解精度的影响,并分析了相对运动 Hamilton 力学模型的生成函数近似求解方法以及求解的奇异性问题。Ahsun<sup>[10]</sup>分别针对深空探测及低地轨道任务背景,利用 Lagrange 方法推导了多星电磁编队非线性动力学模型。Inampudi 等<sup>[11]</sup>建立了地月平动点轨道径向的双星库仑编队动力学模型。

多体系统动力学<sup>[12,13]</sup>是在经典力学基础上,为研究由若干柔性和刚性物体连接的复杂系统动力学特性而逐渐发展起来的基础科学,典型的分析方法包括罗伯森-维滕堡(R/W)方法、牛顿-欧拉方法、变分方法、Kane 方法等。多体动力学方法在航天领域<sup>[14]</sup>,尤其刚柔耦合航天器<sup>[15]</sup>、变结构航天器<sup>[16]</sup>等复杂系统分析中具有广泛应用,对于编队飞行<sup>[17]</sup>亦有探索研究。其中 Kane 方法<sup>[12]</sup>是建立多自由度系统动力学方程的一种有效方法,其基本思想源于 Gibbs、Appell 的伪坐标概念,其特点是利用广义速率代替广义坐标作为独立变量来描述系统的运动,兼有矢量力学与分析力学的特点,直接利用 D'Alembert 原理建立动力学方程;并以代数运算取代函数求导,可有效降低自由度庞大的复杂系统建模难度。Elias 等<sup>[18]</sup>基于 Kane 方法建立了带刚性反作用动量轮的双星电磁编队动力学模型,并分析了线性化模型的稳定性;Norman<sup>[19]</sup>基于多体动力学理论建立了 flux-pinned 效应力作用下多星系统实现空间虚拟结构的一般数学模型,特别针对忽略力矩作用的简化二体问题,采用 Kane 方法建立了 flux-pinned 编队相对运动模型<sup>[20]</sup>,并分析了线性系统的被动稳定性。

## 2. 动力学特性分析

### 1) 运动约束特性

就物理本质而言,星间电磁力/力矩属于一类场力/力矩作用,具有非接触、对