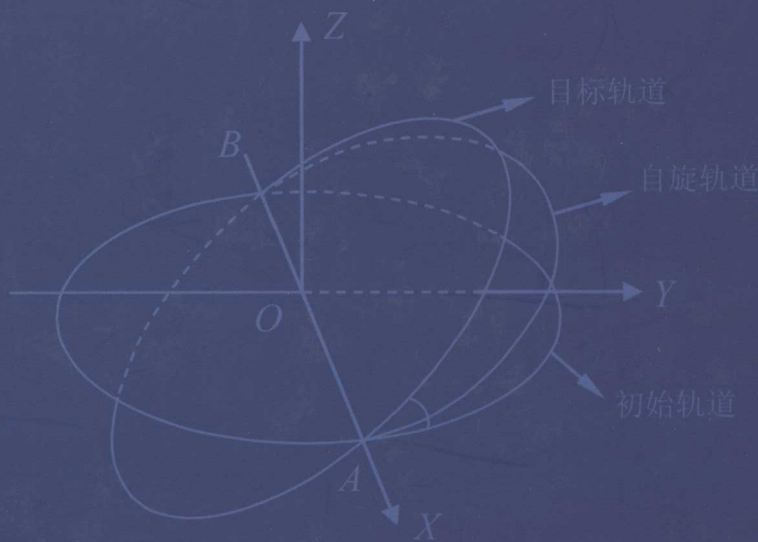




航天科技图书出版基金资助出版

# 航天器 轨道机动动力学

袁建平 和兴锁 等著



中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助出版

# 航天器轨道机动动力学

袁建平 和兴锁 等著



中国宇航出版社

·北京·

版权所有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

航天器轨道机动动力学/袁建平, 和兴锁等著. —北京: 中国宇航出版社, 2010. 12

ISBN 978 - 7 - 80218 - 870 - 9

I. ①航… II. ①袁…②和… III. ①航天器轨道—轨道力学  
IV. ①V412.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 245422 号

责任编辑 舒承东 责任校对 祝延萍 封面设计 宇航数码

---

出版  
发行

中国宇航出版社

社址 北京市阜成路 8 号 邮编 100830  
(010) 68768548

网址 [www.caphbook.com](http://www.caphbook.com) / [www.caphbook.com.cn](http://www.caphbook.com.cn)

经销 新华书店

发行部 (010) 68371900 (010) 88530478 (传真)  
(010) 68768541 (010) 68767294 (传真)

零售店 读者服务部 北京宇航文苑  
(010) 68371105 (010) 62529336

承印 北京画中国画印刷有限公司

版次 2010 年 12 月第 1 版 2010 年 12 月第 1 次印刷

规格 880×1230 开本 1/32

印张 17.5 字数 487 千字

书号 ISBN 978 - 7 - 80218 - 870 - 9

定价 128.00 元

---

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

## 序 言

轨道机动 (Orbital Maneuvers) 是指航天器主动地改变飞行轨道的过程。首先, 轨道机动是航天器的主动行为, 是有目的的、面向应用的飞行, 排除了某些干扰因素引起的漂移性轨道变化; 其次, 轨道机动是要改变飞行轨道的; 最后, 轨道机动是一个“过程”, 是航天器的一个飞行历程, 不同于脉冲变轨。

在轨道力学研究的初期, 由于研究对象是自然星体, 没有控制力的介入, 采用观测的方法, 开普勒定律给出了完美的表达。人造卫星出现的初期, 空间机动主要是轨道提升、转移和保持, 控制力“有限介入” (脉冲作用 (时间限制) 和连续小推力作用 (力幅限制)), 开普勒定律分段可用或采用考虑摄动影响的开普勒模型。

1923年, Hermann J. Oberth 在关于星际火箭的讨论中第一次提出了航天器在地球轨道上与燃料舱交会对接的设想。他提出的在轨装配、粒子喷射推进、在空间站附近移动的小型飞行器等, 如今正在逐渐变为现实。

另一位航天先驱 Hohmann 所提出的霍曼转移一直是处理脉冲作用的主要方法。1925年, 他出版了《The Attainability of Heavenly Bodies》一书, 其中“自由空间飞行”一章引入速度增量“ $\Delta V$ ”这一重要概念, 并设计了飞行器返回地球时需要的机动, 为空间的机动分析理论奠定了基础。他设计了第一条行星际轨道, 提出了航天器进行空间机动直接返回地球的设想。Hohmann 认识到由于各种因素的影响, 航天器会偏离它的设计轨道, 因此他还研究了轨道修正机动。

1950年~1960年, D. F. Lawden 和 Angelo Miele 等科学家提出最低轨道、最优轨道、轨道确定、轨道修正、轨道转移、轨道改

变及空间交会等概念。

1958年召开的国际宇航联合会议将与轨道改变、轨道转移等有关的文献归纳为轨道机动类文献，这是第一次正式提出“轨道机动(Orbital Maneuver)”一词。此后很多科学家都展开了轨道机动问题的研究。

空间时代初期变轨、轨道提升及轨道转移等轨道机动是基于脉冲推力下的开普勒轨道飞行。随着空间应用领域的扩展，轨道机动幅度和范围越来越大、快速性要求越来越强、过程越来越复杂。当空间操作在20世纪逐渐成为航天活动的主流时，对轨道机动就有了新的要求，即大范围、快速、自主、精确的轨道机动，这种机动属于主动改变飞行轨道的任意机动范畴，既不限于短时间也不限于小幅度推力，而这种机动的起因完全是自己的任务或快速响应需求，例如空间营救，空间碎片规避，来袭规避，空间攻击，反侦察、反干扰机动，另外还有交会对接，编队飞行，在轨组装，协同工作，执行对目标航天器的监视、检查、维修及燃料加注等。

进入21世纪以来，美国相继验证了具有自主逼近、交会功能的实验卫星系列XSS-10和XSS-11、“自主交会技术验证(DART)”和“轨道快车(OE)”，已经实现自主逼近近地轨道空间目标、与目标自主交会、绕目标飞行、捕获空间目标、与空间目标对接、为合作目标输送燃料、更换电池及计算机等重要的空间操作。2005年启动的欧洲几个国家合作的PRISMA项目试验了自主编队飞行、接近操作和最终逼近/分离机动、自主交会。2005年美国发射的“深度撞击”彗星探测器也验证了越来越强的轨道机动能力和精准的控制技术。

在这个空间操作的年代，各类特殊的轨道机动已经不能满足空间任务要求，而对于任意的轨道机动，基于开普勒理论的脉冲变轨、霍曼转移等已无法胜任。任意的轨道机动要求控制与动力学深度融合，必须采用非开普勒的理论与方法。

我们充分认识到空间操作对空间飞行动力学与控制提出的挑战。

近五年来与其团队潜心研究了这一课题，尽管还不成熟，甚至还有很多问题没有涉及，但作为阶段性成果愿意呈现给同行一起讨论。本书涉及轨道机动的概念、发展及应用，动力学基础，非开普勒问题研究，泛开普勒问题研究，远距离机动，近距离机动，编队问题，伴飞问题和普适变量的应用。支撑本书的除了我们近几年发表的论文和技术报告（列于各章的参考文献中），还有18篇重要的博士学位论文（参考目录见附录），在此一并对论文和报告的作者表示感谢。

作 者

2010年10月

# 目 录

<b>第 1 章 轨道机动的概念、发展及应用</b> .....	1
1.1 轨道机动的概念和分类 .....	1
1.2 非开普勒运动 .....	3
1.3 轨道机动的历史发展 .....	6
1.4 轨道机动应用和案例 .....	11
参考文献 .....	16
<b>第 2 章 轨道机动的动力学基础</b> .....	17
2.1 概述 .....	17
2.2 轨道机动的动力学模型 .....	17
2.3 脉冲推力作用下的轨道机动 .....	41
2.4 连续(有限)推力作用下的轨道机动 .....	50
2.5 (微)小推力作用下的轨道机动 .....	82
参考文献 .....	97
<b>第 3 章 非开普勒轨道动力学及其应用</b> .....	101
3.1 概述 .....	101
3.2 非开普勒运动的线性理论 .....	103
3.3 共振轨道理论 .....	125
3.4 基于共振轨道的机动轨道设计 .....	151
3.5 非开普勒运动的陀螺效应 .....	166
参考文献 .....	193
<b>第 4 章 泛开普勒轨道动力学及其应用</b> .....	195
4.1 泛开普勒轨道的理论 .....	195
4.2 泛开普勒轨道方程及其几何性质 .....	207

4.3 基于泛开普勒轨道的轨道设计方法及其应用 .....	216
4.4 基于泛开普勒轨道的轨道转移 .....	230
4.5 小结 .....	235
参考文献 .....	236
<b>第5章 远距离轨道机动动力学 .....</b>	<b>237</b>
5.1 概述 .....	237
5.2 单脉冲推力作用下远距离机动轨道动力学 .....	238
5.3 双脉冲推力作用下远距离机动轨道动力学 .....	251
5.4 多脉冲推力作用下远距离机动轨道动力学 .....	260
5.5 有限推力作用下远距离机动轨道动力学 .....	270
参考文献 .....	282
<b>第6章 航天器编队飞行的轨道动力学 .....</b>	<b>285</b>
6.1 概述 .....	285
6.2 相对运动状态转移矩阵 .....	286
6.3 相对运动的运动学描述方法 .....	293
6.4 椭圆参考轨道相对运动特性分析 .....	310
6.5 编队飞行的 $J_2$ 项摄动研究 .....	357
6.6 编队飞行队形设计 .....	371
6.7 案例分析 .....	391
附录 A 平均轨道要素与密切轨道要素之间的相互转换 .....	391
附录 B 基于平均轨道要素的相对运动状态转移矩阵 .....	394
参考文献 .....	398
<b>第7章 航天器伴飞轨道动力学 .....</b>	<b>401</b>
7.1 航天器伴飞运动的概念 .....	401
7.2 航天器伴飞运动的模型 .....	406
7.3 长期自然伴飞轨道的设计与保持 .....	417
7.4 机动伴飞轨道设计与制导 .....	433
7.5 航天器伴飞案例分析与仿真 .....	442
参考文献 .....	460



---

---

<b>第 8 章 近距离机动的轨道动力学</b> .....	462
8.1 概述 .....	462
8.2 近距离机动的动力学 .....	463
8.3 近距离机动策略与实现 .....	480
8.4 计算与仿真结果分析 .....	493
参考文献 .....	499
<b>第 9 章 普适变量在轨道机动动力学中的应用</b> .....	501
9.1 普适变量求解及摄动方程的建立 .....	501
9.2 普适变量轨道要素摄动方程 .....	525
9.3 普适变量轨道要素的 Gauss 伪谱法最优控制求解 .....	540
参考文献 .....	547
<b>附录 博士学位论文参考目录</b> .....	549

# 第 1 章 轨道机动的概念、发展及应用

袁建平 和兴锁

## 1.1 轨道机动的概念和分类

轨道机动(Orbital Maneuvers)是指航天器主动地改变飞行轨道的过程<sup>[1]</sup>。这里指出了三层含义,分别说明了轨道机动的目的、过程和属性。首先,轨道机动是航天器的主动行为,是有目的的、面向应用的飞行,这就排除了某些干扰因素引起的漂移性轨道变化;其次,轨道机动是要改变飞行轨道的,亦即航天器的机动飞行要打破已有的惯性飞行,不再遵从开普勒定律;最后,轨道机动是一个“过程”,是航天器的一个飞行历程,不同于脉冲变轨。

轨道机动的这一定义是一个逐渐明晰的结果,同一个词不断被赋予新的含义。实际上轨道机动的概念先于人造卫星的出现就已提出来了。在人造卫星发展的初期,轨道机动主要是指入轨时的变轨、轨道提升和轨道转移等,是基于脉冲推力下的开普勒轨道飞行。随着空间应用领域的扩展,轨道机动幅度和范围越来越大、快速性要求越来越强、过程越来越复杂。载人飞行实现后就进一步提出了这样的要求:如果载人飞船出现故障,营救飞船需要在指定的时间机动到飞船所在的任意位置,与之对接并实施救援。因此,当前对轨道机动就有了新的诠释,即大范围、快速、自主、精确的轨道机动,这种机动属于主动改变飞行轨道的任意机动范畴,既不限于短时间也不限于小幅度推力,并且没有参考航天器,是真正意义上的轨道机动。而这种机动的起因完全是自己的任务或快速响应需求,例如空间营救,空间碎片规避,空间操作占位,来袭规避,空间攻击,反侦察、反干

扰机动等。

轨道机动定义中所指的主动地改变飞行轨道并不限于航天器主动施加推力,还包括主动地利用环境或外界所提供的动力,例如空气动力,太阳光压,其他星体的引力,地球引力场的不均匀性,地球磁场,来自于宇宙的未知能量等。

轨道机动包含以下几种类型。

1) 轨道改变或轨道转移(orbit change or orbit transfer):改变轨道参数以便从初始轨道过渡到中间轨道或最终轨道的过程,经常使用大冲量脉冲推力作用。例如从低轨道转移到高轨道,从椭圆轨道转移到圆轨道。

2) 轨道保持或轨道修正(orbit keeping or orbit correction):其目的是补偿轨道参数中的误差或由各类干扰因素引起的偏差,使航天器回到设计轨道上,经常使用小推力长时间作用。

3) 轨道接近(orbital approach):航天器主动去接近一个目标(包括另一个航天器)的飞行,例如航天器在轨道上的交会、拦截、对接、绕飞、伴飞及编队飞行等。其特征是主动航天器的机动运动总是以另一个空间目标为参考。

4) 任意机动(orbital maneuvers):主动地改变飞行轨道,既不限于短时间也不限于小幅度推力,并且没有参考航天器,是真正意义上的轨道机动,前面3种情况仅属特例。

若按照持续时间的长短,航天器的轨道机动又可分为大推力脉冲式机动和小推力连续式机动。

1) 大推力脉冲式机动:发动机在非常短暂的时间内产生推力,使航天器获得脉冲速度。目前大多数航天器的轨道机动都是采用这种方式,而且关于这种脉冲式变轨的理论和技術都比较成熟。对这种机动方式的研究主要集中在轨道机动策略上,即怎样实现能量最优或时间最优,或者两者综合最优。这种机动方式多采用化学推进剂,推进器的排气速度慢、推力大、工作时间短,分析时可认为速度变化是在一瞬间完成的,即将推力处理成瞬间的速度变化 $\Delta V$ 。但是

此方式需要的推进剂量大,不适合多次、大幅度的机动,并且脉冲推力只是一种理想状态,无法做到精确机动。

2) 小推力连续式机动:在持续的一段时间内依靠小的作用力改变轨道。例如利用电离子火箭发动机、空气动力、太阳光压等进行的机动。随着小推力发动机制造技术的成熟,越来越多的航天任务特别是深空探测任务开始采用不同于大推力脉冲式的小推力连续式机动。此方式用的推进器排气速度快,推力小(加速度小),可长时间连续工作几十天甚至几年。航天器的加速过程虽然缓慢,但推力装置小,可将更多的有效载荷送入轨道,而且通过长时间的连续加速,航天器可以获得足够高的速度增量,这一特点更适合深空探测的需要。但是此种机动显然达不到快速性要求。

对应于任意的轨道机动,推力确定即是轨道动力学与控制设计的内容,既不限于脉冲推力也不限于小幅度推力,属于目前研究的热点,也是本书力图说明的问题。

## 1.2 非开普勒运动

根据轨道机动的定义,航天器的轨道机动运动一定是非开普勒运动。

开普勒依据前人对自然星体的大量观测数据和他的数学天赋进行计算发现,火星绕太阳运动的轨迹并不是哥白尼所说的圆轨道,而是椭圆轨道,进而归纳总结出著名的行星运动三大定律。

**第一定律** 行星绕太阳运动时,其运行轨道为椭圆,太阳位于椭圆的一个焦点上。

**第二定律** 行星绕太阳运动时,在相同的时间间隔内,行星和太阳的连线扫过的面积相同。

**第三定律** 行星绕太阳运行周期的平方与它们的轨道椭圆半长轴的立方成正比。

在开普勒、伽利略之后,牛顿也研究了星体的运动,但他更注重

星体所受的力和其产生的结果。牛顿对开普勒行星运动定律做了如下改进：

1) 天体的运动轨迹除椭圆外，还包括圆、抛物线和双曲线，即圆锥曲线。

2) 开普勒第三定律中，行星绕太阳运行周期规律中还应包含天体的质量。

开普勒轨道是指圆锥曲线中的椭圆曲线轨道，逃逸抛物线和双曲线轨道均不属于开普勒轨道。可见，非开普勒轨道问题在牛顿时期就已发现了。开普勒由于其天文学家的出身和依赖于观测的研究方法，使得他对于卫星轨道理论的卓越贡献主要集中在运动学的范畴。

人造卫星出现以后，虽然沿用了开普勒轨道理论和描述方法，但是卫星不可避免的人为控制已经从根本上打破了开普勒轨道理论的前提条件。只是人造卫星发展的初期，人的控制只限于个别弧段的变轨，不考虑摄动力时绝大部分的卫星轨道仍然遵循开普勒轨道定律。

目前尚无关于非开普勒运动的权威定义。在此我们尝试从不同角度给出不同的定义以供参考，它们既不相互独立也不相互包含。

**定义一(运动学定义)** 如果航天器环绕地球(或其他星体)的运动满足开普勒三大定律，则称该航天器的运动为开普勒运动，否则为非开普勒运动。

**定义二(动力学定义)** 如果航天器所受到的合力为平方反比中心引力，则称该航天器的运动为开普勒运动，否则为非开普勒运动。

**定义三(控制力定义)** 如果环绕地球(或其他星体)的航天器受到人为控制力的作用，则称其运动为非开普勒运动。

**定义四(引力系定义)** 如果航天器的运动不符合二体问题的假设，则其运动为非开普勒运动。

**定义五(稳定性定义)** 如果航天器环绕地球(或其他星体)的运动是不稳定的，即其轨道要素不为常值，则称其为非开普勒运动。

可见,打破开普勒运动规律是可以有多种方式的。下面将要举例说明的“悬挂轨道”按照定义一和定义三是非开普勒运动,而按照定义二、定义四和定义五可以是开普勒运动。

### 1.2.1 部分非开普勒椭圆轨道运动

所谓部分非开普勒椭圆轨道运动,是指航天器在有限推力作用期间的运动轨迹,一旦有限推力作用停止,航天器的运动轨迹又成为开普勒椭圆轨道。通常航天器有限推力作用时间与整个运行时间相比只是很小一部分,所以一般的航天器大部分时间都是在天体引力场约束下沿开普勒椭圆轨道运动,只有很小一部分时间运行在非开普勒椭圆轨道。

多圈强迫绕飞是部分非开普勒椭圆轨道运动的一个案例,它是指航天器在多次冲量推力作用下,在其一个运行轨道周期内,对另一个航天器作多次绕飞。自然绕飞的周期很长,通常都在 1.5 h 以上。但在有些场合,例如执行空间营救或空间检测任务时,需要在短时间内围绕目标航天器作多圈绕飞,这种快速绕飞称为强迫绕飞。对航天器实施多冲量推力,可以在其绕地球飞行的一个周期内对另一个航天器作多次绕飞。

美国于 2003 年 1 月发射的 XSS-10 卫星进行了周期为 10 min 的强迫绕飞演示验证试验。中国的神舟 7 号载人飞船也释放了一个小型伴飞飞行器作强迫绕飞。

### 1.2.2 全部非开普勒椭圆轨道运动

所谓全部非开普勒椭圆轨道运动,是指航天器在连续有限推力作用下的运动轨迹。在这种情况下,航天器除受到天体引力约束外,还受人为主控制力的作用,因此其运动轨迹始终与开普勒椭圆轨道不同。

现举两个例子说明,它们的详细数学分析将在后面的章节中给出。

### (1) 螺旋变轨爬升

航天器在连续小推力作用下的机动变轨爬升轨迹，为螺旋曲线，不是开普勒椭圆，也不是圆锥曲线。

假定小推力沿航天器运动切向作用，这时航天器绕地球沿螺旋轨道爬升。实际上还有一个比切向推力效果更好的推力方向角。

在 1963 年出版的《星际航行概论》中，钱学森先生得出了小推力沿航天器运动切向作用时的运动方程的近似解析解。

### (2) 悬挂轨道

一个航天器在另一个航天器下边的不远处，两者以相同的角速度围绕地球运行，下面航天器的运行轨迹称为悬挂轨道。

在悬挂轨道情况下，上面的航天器沿开普勒椭圆轨道(或圆轨道)运行。下面航天器的运行轨迹，看上去其外观仍然是椭圆(或圆)，但是，由于它围绕地球飞行一圈的时间与上面的航天器相同，所以悬挂在下面的航天器的运行规律不符合开普勒第三定律，它不是开普勒椭圆轨道。当目标卫星在圆轨道上运行时，对航天器实施连续径向控制力，可以实现悬挂轨道。

## 1.3 轨道机动的历史发展

从哥白尼的日心说、开普勒运动学定律、牛顿万有引力和动力学定律至今，轨道力学已有几百年的发展历程。从人造卫星、载人航天、登陆月球到深空探测，这一切的飞速发展都离不开轨道力学。作为轨道力学重要组成部分和深度发展的轨道机动，也经历了由提出到发展，再到应用的过程。但是轨道机动真正引起学者的关注并作为一个重要方向去研究是源于 21 世纪以来大量空间操作活动的展开。

1923 年，Hermann J. Oberth 在关于星际火箭的讨论中，第一次提出了航天器在地球轨道上与燃料舱交会对接的设想。在《飞往星际空间的火箭》一书中他第一次提出了有人驾驶的空间站这一概念，认

为它可以作为科学观测站或者军事基地。Oberth 还对轨道空间站做了详细的描述,并提出了一些很有意义的想法,如:在轨装配、粒子喷射推进、在空间站附近移动的小型飞行器等,如今这些正在逐渐变为现实。

另一位航天先驱 Hohmann 所提出的霍曼转移一直是轨道机动的主要方法。Hohmann 还对星际任务的轨道设计做出了很多贡献。1925 年,他出版了《The Attainability of Heavenly Bodies》一书,其中“自由空间飞行”一章引入速度增量“ $\Delta V$ ”这一重要概念,并设计了飞行器返回地球时需要的机动,为空间的机动分析理论奠定了基础。Hohmann 设计了第一条行星际轨道:从地球飞往金星。在航天器飞越金星返回地球时,他给出了两种方案:1)先将航天器机动到绕金星的驻留轨道,待地球运行到合适的位置时,航天器喷气离开环绕金星的轨道并与地球交会;2)航天器进行空间机动直接返回地球。Hohmann 还认识到由于各种因素的影响,航天器会偏离它的设计轨道,因此他还研究了轨道修正机动。

1950 年~1960 年,D. F. Lawden 和 Angelo Miele 等科学家提出最低轨道(Minimum Orbit)、最优轨道(Optimal Trajectory)、轨道确定(Determination)、轨道修正(Correction of Orbits)、轨道转移(Orbit Transfer)、轨道改变(Orbit Change)及空间交会(Rendezvous)等概念。

1958 年召开的国际宇航联合会议将与轨道改变、轨道转移等相关的文献归纳为轨道机动(Orbital Maneuver)类文献,这是第一次正式提出“Orbital Maneuver”一词。

1960 年,Armand R. Tanguay 在《Space Maneuvers》一文中指出,“A space maneuver may be broadly defined as any change in a ballistic orbit”,并对修正机动、交会机动和连续推力问题做了详细介绍。

1962 年,K. A. Ehricke 在《Space Flight: Environmental and celestial mechanics. v. 2. Dynamics》中将轨道机动分为 Orbit Transfer



和 Orbit Change 两类。他指出,当轨道改变很小的时候,可以视为轨道修正;当轨道改变较大时,即为轨道转移。该书在二体力场转移轨道中提出了逃逸机动和捕获机动(Escape and Capture Maneuvers)。

可以看出,在航天器还没有进入太空的时代,人们就已经不满足于按照既定的开普勒轨道往复运行,而对轨道机动能力提出了种种设想。随着 1957 年第一颗人造卫星的发射,人类希望航天器能够按照自己的需要在空间运动,并能执行更复杂的空间任务,如交会对接、编队飞行、在轨组装、协同工作,以及执行对目标航天器的监视、检查、维修及燃料加注等。轨道机动的理论和技术是实现这一目标的基础,因此越来越受到人们的关注。

20 世纪 50 年代末到 60 年代初期,发射入轨的航天器的种类开始增多,但是大多数航天器都只具备简单的轨道机动能力(变轨),寿命很短,功能也很单一。1962 年,苏联发射两艘东方号飞船,首次在太空实现编队飞行,最近相距 5 km。

60 年代中后期,载人航天和月球探测时代到来。美国宣布了阿波罗载人登月计划,从弹道式水星飞船到载人登月飞行,有许多像交会与对接、航天员出舱活动之类的技术问题有待解决,因此需要一个过渡性飞船计划,即双子座载人飞船计划。该计划的具体目标之一就是发展交会、对接技术,掌握机动飞行技术。1966 年 3 月 16 日,美国双子座 8 号飞船与阿金纳号火箭实现了世界上首次在航天员参与下的空间手控交会和对接,从那时起至今,全世界在轨成功实现交会对接已有大约 300 多次。

在此期间苏联发射了联盟号载人飞船,它具有轨道机动、交会和对接能力,可为空间站接送航天员,又能在对接后与空间站一起飞行,是苏联载人航天计划中重要的天地往返运输系统。此外,从 1968 年开始,苏联还进行了分阶段的空间拦截试验,先发射一个宇宙号卫星作为目标在轨道上运行,经过一段时间后,再发射另一个宇宙号卫星——截击卫星,然后控制截击卫星变轨机动,去接近或追击目标并将其击毁。