

1.4

航天器交会近距离导引

基本信息			
教学主题	航天器交会近距离导引	课时安排	15 分钟
所在章节	第 8 章 航天器相对运动		

【教学目标】

❖ 知识目标

能理解近距离导引的基本原理,并应用基本原理完成航天器近程交会。

❖ 能力目标

能应用计算机解决航天器近程交会工程实践中的问题。

❖ 素养目标

- (1)通过两种近程导引思路的学习,培养从工程应用的角度全面思考问题的能力。
- (2)通过空间碎片案例,加强学生技术进步与环境保护的工程伦理教育。

【教学重点与难点】

❖ 教学重点

双速度冲量近距离导引的计算方法。

❖ 教学难点

近程导引的设计思想。

【课程思政】

- (1)通过我国载人航天交会对接案例的引入,培养学生航天强国、航天报国的理想信念。
- (2)通过近程导引第二种思路的阐述,培养学生充分应用自然规律完成工程设计,践行人与自然和谐发展的理念。
- (3)通过空间碎片案例的引入,培养学生环境保护与技术发展和谐共生的理念。

【教学思路和方法】

采用线上线下、课内课外、信息化教学与传统教学相结合的混合式教学方法。依托互联网和智能手机移动终端,将教学环节分为课前准备、课堂学习和课后复习拓展三个阶段。各阶段综合应用信息化教学方法、基于 BOPPPS 的五步教学法、启发引导式教学法、案例教学法等。

一、课前准备

- (1) 通过微信平台布置与本节课内容密切相关的复习题，温故知新。
- (2) 通过教材和推送的课件，预习本节课的内容，初步了解本节课教学的重点和难点。

二、课堂学习

采用 ISW 的 BOPPS 教学模式，辅之以智能手机微信 App 和腾讯问卷 App。

(1) 课堂导入和前测。通过我国载人航天交会对接近距离的案例导入授课内容，激发学生兴趣；通过有对比性的虚拟仿真实验，启发学生思考，激发学生的求知欲。

(2) 课程目标。明确本节课程的教学目标。

(3) 参与式学习。采用提问、启发、类比、归纳及课堂小讨论等方式讲授，层层递进，以期突出重点，破解难点，开拓思维。

(4) 课后检验和总结。总结本节课学习的主要内容，给出预习提示和拓展要求。

本节课将我国载人航天交会对接近距离的案例导入课程内容，首先给出了双速度冲量交会的思想；然后结合相对运动方程，给出了双速度冲量导引的计算方法；最后重点讨论了双速度冲量的工程应用。

三、课后复习拓展

- (1) 鼓励学生积极参与微信教学群师生交流与讨论。
- (2) 督促学生完成课后作业以及下一次课的预习。
- (3) 通过腾讯问卷测试学生对重点难点问题的掌握程度，收集学生对本节课的意见和建议。
- (4) 推荐学生阅读科研论文，扩展学生的视野。

【教具】

电脑、投影仪、多媒体课件、激光笔、粉笔。

教 学 过 程

◆ 课堂导入(2 分钟)

【新闻】2011 年 11 月神舟八号载人飞船与天宫一号进行了空间交会对接(见图 1.33), 标志着我国已经成功突破了空间交会对接技术(载人航天三大关键技术之一)。

【问题】神舟八号交会对接近距离如何导引? 能否从后加速追赶?

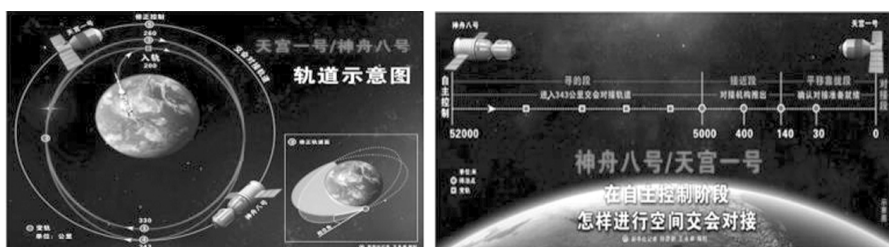


图 1.33 空间交会对接

向前加速的虚拟仿真实验见图 1.34。

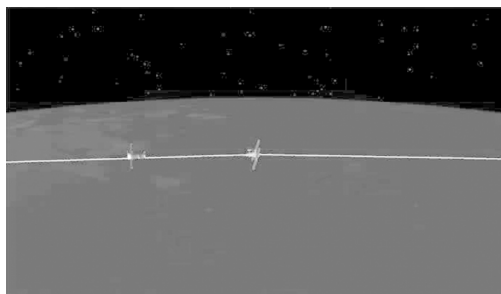


图 1.34 向前加速的虚拟仿真实验

◆ 课程内容(1 分钟)

- ☐ 近距离导引的数学模型
- ☐ 近距离导引的计算方法
- ☐ 近距离导引的工程应用

从航天热点新闻导入课程内容, 启发学生思维, 激发学生学习兴趣。

★ 课程思政

通过神舟八号交会对接的案例, 培养学生航天强国、航天报国的理想。

通过一个虚拟仿真实验, 让学生直观地意识到空间航天器之间的相对运动规律与地面上的不一致, 激发学生的求知欲。

参与式学习(10 分钟)

一、航天器交会近距离导引

临近航天器相对动力学方程

$$\begin{cases} \ddot{x} - 2n\dot{y} - n^2x = -\frac{\mu(r+x)}{[(r+x)^2+y^2+z^2]^{\frac{3}{2}}} + \frac{\mu}{r^2} + a_x \\ \ddot{y} + 2n\dot{x} - n^2y = -\frac{\mu y}{[(r+x)^2+y^2+z^2]^{\frac{3}{2}}} + a_y \\ \ddot{z} = -\frac{\mu z}{[(r+x)^2+y^2+z^2]^{\frac{3}{2}}} + a_z \end{cases}$$

其中: a_x —— x 方向施加的加速度;

a_y —— y 方向施加的速度;

a_z —— z 方向施加的速度

航天器交会近距离导引的目的:

设计 a_x 、 a_y 、 a_z , 使得

$$x, y, z \rightarrow 0 \quad \dot{x}, \dot{y}, \dot{z} \rightarrow 0$$

思路一: 应用控制理论中反馈线性化的思想。

以 x 方向为例

$$\text{设计 } a_x = \frac{\mu(r+x)}{[(r+x)^2+y^2+z^2]^{\frac{3}{2}}} - \frac{\mu}{r^2} - 2n\dot{y} - n^2x - k_1\dot{x} - k_2x$$

代入原方程 $\ddot{x} + k_1\dot{x} + k_2x = 0$

设计 k_1 、 k_2 , 使得微分方程的特征根都为负实部, $x \rightarrow 0$ 。

讨论: 这样的设计是否可行? 这样的设计是否可取?

不可行; 不可取。未考虑相对运动规律; 以消耗推进剂为代价。

思路二: 利用相对运动方程的规律。

$$\text{相对运动方程的近似解析解} \quad \begin{bmatrix} \rho \\ \dot{\rho} \end{bmatrix} = \Phi(t) \begin{bmatrix} \rho_0 \\ \dot{\rho}_0 \end{bmatrix}$$

$$\Phi(t) = \begin{bmatrix} 4-3\cos nt & 0 & 0 & \frac{\sin nt}{n} & \frac{2-2\cos nt}{n} & 0 \\ 6(\sin nt - nt) & 1 & 0 & \frac{2\cos nt - 2}{n} & \frac{4\sin nt}{n} - 3t & 0 \\ 0 & 0 & \cos nt & 0 & 0 & \frac{\sin nt}{n} \\ 3n\sin nt & 0 & 0 & \cos nt & 2\sin nt & 0 \\ 6n(\cos nt - t) & 0 & 0 & -2\sin nt & 4\cos nt - 3 & 0 \\ 0 & 0 & -n\sin nt & 0 & 0 & \cos nt \end{bmatrix}$$

参与学习方式: 通过引导学生一起复习上节课重点内容, 做到温故知新, 同时帮助学生建立本节课与前期课程的联系, 形成系统性的知识。

人定胜天的思想。

参与学习方式: 通过对第一种设计思路的讨论, 帮助学生理解工程可行和工程可取之间的关系, 培养学生从工程应用的角度考虑问题的能力。

遵循规律和谐发展。

★ 课程思政

通过对第二种设计思路的阐述, 培养学生充分应用自然规律完成工程设计, 践行人与自然和谐发展的理念。

二、近距离交会双速度冲量导引

近似解析解

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\rho} \\ \dot{\boldsymbol{\rho}} \end{bmatrix} = \Phi(t) \begin{bmatrix} \boldsymbol{\rho}_0 \\ \dot{\boldsymbol{\rho}}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{rr} & \Phi_{rv} \\ \Phi_{vr} & \Phi_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\rho}_0 \\ \dot{\boldsymbol{\rho}}_0 \end{bmatrix}$$

问题: $\begin{bmatrix} \boldsymbol{\rho} \\ \dot{\boldsymbol{\rho}} \end{bmatrix} \neq 0$ 无法满足交会对接条件, 如何通过改变 $\dot{\boldsymbol{\rho}}_0$ (速度冲量)

消除误差?

基本思路: 第一次速度冲量消除终端位置误差, $\boldsymbol{\rho} = 0$;

第二次速度冲量消除终端速度误差, $\dot{\boldsymbol{\rho}} = 0$ 。

这是思路二的具体实现。

三、双速度冲量的计算

已知: 初始相对位置和相对速度 $\boldsymbol{\rho}_0$ 、 $\dot{\boldsymbol{\rho}}_0$; 近距离交会时间 t_f 。

(1) 无动力自由飞行

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\rho} \\ \dot{\boldsymbol{\rho}} \end{bmatrix} = e^{At_f} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\rho}_0 \\ \dot{\boldsymbol{\rho}}_0 \end{bmatrix} = \Phi(t_f) \begin{bmatrix} \boldsymbol{\rho}_0 \\ \dot{\boldsymbol{\rho}}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{rr} & \Phi_{rv} \\ \Phi_{vr} & \Phi_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\rho}_0 \\ \dot{\boldsymbol{\rho}}_0 \end{bmatrix}$$

(2) 第一次速度冲量消除终端位置误差

$$\begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \dot{\boldsymbol{\rho}}_f \end{bmatrix} = e^{At_f} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\rho}_0 \\ \dot{\boldsymbol{\rho}}_0 + \Delta \mathbf{v}_0 \end{bmatrix} = \Phi(t_f) \begin{bmatrix} \boldsymbol{\rho}_0 \\ \dot{\boldsymbol{\rho}}_0 + \Delta \mathbf{v}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{rr} & \Phi_{rv} \\ \Phi_{vr} & \Phi_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\rho}_0 \\ \dot{\boldsymbol{\rho}}_0 + \Delta \mathbf{v}_0 \end{bmatrix}$$

得到第一次施加的速度冲量

$$\Delta \mathbf{v}_0 = -\dot{\boldsymbol{\rho}}_0 - [\Phi_{rv}]^{-1} \Phi_{rr} \boldsymbol{\rho}_0$$

此时终端速度为

$$\dot{\boldsymbol{\rho}}_f = \Phi_{vr} \boldsymbol{\rho}_0 + \Phi_{vv} (\dot{\boldsymbol{\rho}}_0 + \Delta \mathbf{v}_0)$$

第二次速度冲量消除终端速度误差

$$\Delta \mathbf{v}_f = -(\dot{\boldsymbol{\rho}}_f) = -[\Phi_{vr} \boldsymbol{\rho}_0 + \Phi_{vv} (\dot{\boldsymbol{\rho}}_0 + \Delta \mathbf{v}_0)]$$

$$|\Delta \mathbf{v}| = |\Delta \mathbf{v}_0| + |\Delta \mathbf{v}_f|$$

双脉冲速度增量为 t_f 的函数。

四、双速度冲量的算例

算例: 目标飞行器在 300 km 圆轨道, 追踪飞行器在其后 5 km 处, 相对速度为零, 设计 1.49 h 的双脉冲转移轨道(见表 1.6、图 1.35)。

表 1.6 数据表

冲量方向	第一次 /(m · s ⁻¹)	第二次 (m · s ⁻¹)
x	-0.0238	-0.0238
y	-0.3056	0.3056
z	0	0

$$|\Delta \mathbf{v}| = |\Delta \mathbf{v}_0| + |\Delta \mathbf{v}_f| = 0.6131 \text{ (m/s)}$$

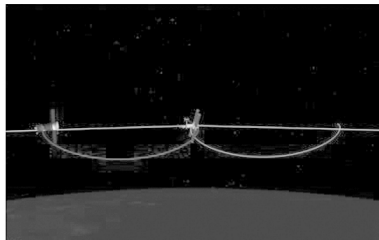


图 1.35 算例图

参与学习方式: 让学生编制计算机程序完成算例, 引导学生分析数据, 以及通过仿真动画分析每次速度冲量的物理意义。

算例与导入问题相呼应。

五、双速度冲量的工程应用

(一) 工程应用一

空间交会对接是我国载人航天第二步重点突破的核心技术，是建造空间站的关键(见图 1.36)。中国是世界上第三个完整独立掌握空间交会对接技术的国家。

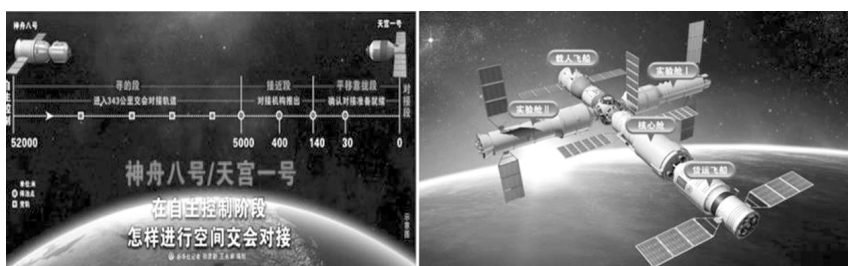


图 1.36 空间交会对接示意

(二) 工程应用二

1957—2020 年，人类总计航天发射 4000 多次，全世界至少发射过 19252 颗卫星(截至 2020 年 9 月 23 日)，其中多达 13092 颗成为太空垃圾(见图 1.37)。

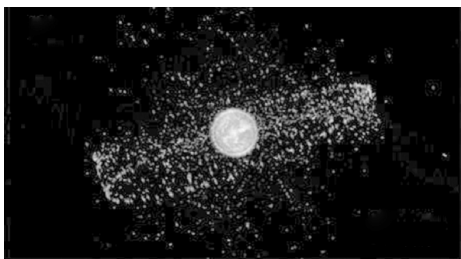


图 1.37 太空

空间碎片的大小和数量：

大于 10 cm 以上——约 3.4 万块；

1~10 cm——约 90 万块；

小于 1 cm——约 1.5 亿块。

太空垃圾严重影响人类航天活动(见图 1.38、图 1.39)，保护空间环境刻不容缓。



图 1.38 国际空间站在 2020 年进行了 3 次规避机动

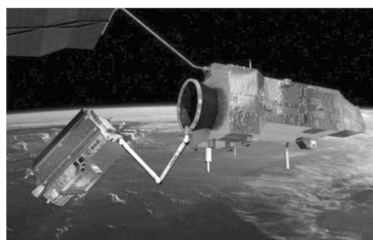


图 1.39 空间碎片清除难度大、成本高

★ 课程思政

通过神舟八号交会对接的案例，培养学生航天强国、航天报国的理想。

★ 课程思政

通过空间碎片案例的引入，培养学生环境保护与技术发展和谐共生的理念。

◆ 总结(2 分钟)

小结

近距离导引的基本原理：利用相对运动规律，减少推进剂消耗。
运动规律：利用相对运动方程随时间现象变化的长期项。
近距离导引的基本方法：双速度冲量。
第一次速度冲量消除终端位置误差；
第二次速度冲量消除终端速度误差。

小结与板书相呼应。

课后导学

【作业】设计我国神舟八号近距离双脉冲交会制导轨迹。
【测试】(1) 近程双速度冲量导引的计算方法。
(2) 请你对本节课教学目标达成度进行自我评估。
【拓展】袁利，马广富，董经纬，等. 航天器近距离交会的固定时间终端滑模控制[J]. 宇航学报, 2018, 39(2): 195-205.



板书设计

$$\begin{bmatrix} \rho \\ \dot{\rho} \end{bmatrix} = \Phi(t) \begin{bmatrix} \rho_0 \\ \dot{\rho}_0 \end{bmatrix}$$

$$\Delta \mathbf{v}_0 \rightarrow \rho = 0$$

$$\Delta \mathbf{v}_1 \rightarrow \dot{\rho} = 0$$

教

学

后

记

- (1) 通过大量引导性问题，引导学生思考，培养学生的深入探索和开放性思维的能力。
- (2) 通过工程案例，加深学生对所学问题的理解，提高学生学习兴趣。
- (3) 通过计算程序开发，锻炼学生解决实际问题的能力，培养严谨细致的工作作风。