

项目 3 导引弹道运动学的若干问题研究

本项目由一组与经典导引方法运动学分析有关的子项目组成,每个项目组可从中选择一个子项目进行重点研究。对其余子项目,每个子项目任选 2 项具体任务完成即可。每个子项目都配有难度或工作量较大的挑战性任务,在学有余力的情况下可进行尝试。为保证习者对各种典型的导引方法都能理解和掌握,促进研究过程中的交流学习,避免缺失和偏废,习者需要自觉学习全部有关章节,并在项目研究报告和答辩交流过程中能够体现项目组对各种导引方法的深入理解。

在习者选择子项目进行研究时,教师要有策略引导各项目组做出选择,不仅要确保所有子项目都能被选中,同时还要使选择不会过度集中于某个子项目。

项目 3-1 关于追踪法的若干问题研究

一、任务描述

1. 建立在可用法向过载约束条件下,适用于一般情况的追踪法的运动学分析模型。
2. 对于给定的可用法向过载,在目标作匀速直线运行,导弹作等速运动时,计算并作出允许攻击区,研究相关参数变化对允许攻击区的影响。
3. 设计合适的初始条件,包括目标运动规律、导弹的速度、初始位置等,使导弹出现可用法向过载无法满足需用过载的情况,编制程序计算完整的运动学弹道,求出临界点(导弹需用过载刚好等于可用过载)的弹目距离和视线角等参数,比较临界点前后两段弹道参数的变化规律,计算脱靶量,分析有关变量和运动参数之间的相互影响。
4. 建立并引入干扰模型,例如将视线角测量误差等效为导弹速度矢量相对于视线的前置或后置角度,计算并分析干扰对运动学弹道和脱靶量的影响。
5. 在可用法向过载的约束条件下,计算并分析当速度比大于 2 时的运动学弹道,重点研究当速度比大于 2 时的末端弹道及脱靶量,分析各种参数对此的影响。
6. 建立目标机动模型,研究目标采用急停、急加速(或其它机动方式)规避时,导弹的运动学弹道,分析各种参数对脱靶量、导弹需用法向过载及其它弹道参数的影响。
7. 根据导弹飞行速度与法向过载之间关系,提出适当假设,研究过载约束下的速度比对追踪法运动学弹道的影响。
8. 在导弹按追踪法攻击目标时,试设计目标规避方案,使导弹需要的法向过载最大。自行设计数值计算实验,进行追逃仿真验证。
9. 在不要求直接命中(导弹与目标质心重合)的前提下,建立合适的数学模型并自行设计数值计算实验,探索允许攻击区、速度比限制等方面可能出现的变化。
10. 追踪法可认为是常值前置角导引法的一种特例(速度矢量前置角恒为零),借鉴前置量法中的前置量设计原理,研究是否存在某种使前置角逐渐收敛于零的导引方法,以改善追踪法弹道“前缓后急”的弯曲特点。

其中,1-2 项必作,3-8 项至少选作其一,9-10 项为挑战项,学有余力者可放手一试。根据研究结果,制作 PPT,进行专题报告和研讨交流。按正式学术期刊论文的规范和要求,自拟题目整理一篇研究报告(不超过 6000 字)。

二、注意事项

1. 研究过程中要特别注意导弹绝对速度和相对速度矢量的指向，特别是绝对速度与相对速度矢量的后置情况。
2. 进行过载约束下的弹道计算时，要注意时刻检查导弹需用过载的变化，一旦需用过载恢复到小于或等于可用过载，应立即切换计算程序的走向，使追踪法重新生效。
3. 对计算数据的分析重点在于发现运动参数或变量之间隐含的联系，进而形成有意义的结论。不要简单重复地验证教科书上的结论或简单的逻辑推理即可证明的结论。
4. 编制弹道计算程序时，注意设置合适的中止计算条件，选择合适的计算步长和输出步长。接近弹道末端或临界点时，应根据具体情况采用可变步长。
5. 建立目标或导弹机动模型时，要注意弹目速度比的变化，同时应在计算程序中对导弹与目标速度的上下限有一定限制，避免无限制加减速。
6. 输出或绘制运动参数变化曲线时，涉及角度或角速度的量，尽量以度（度/秒）为单位。

三、关联的知识、能力与基础

1. 覆盖课程内容

导引弹道、运动学分析的有关假设和常用方法、相对运动方程、绝对弹道与相对弹道、追踪法的相关知识，包括：基本概念、设计原理、弹道特性、需用法向过载、速度比限制及其原因分析、允许攻击区、工程实现难度等。

2. 能力与意识

- 1) 理解导引弹道运动学分析的实质，深入理解追踪法的运动学弹道特性，理解理论上的直接命中与工程实际中的“命中目标”之间的区别，训练“批判性”思维。
- 2) 针对具体问题，通过实践体会“提出假设、建立模型、编程计算、数据分析、形成结论”的常用研究方法。
- 3) 通过实践体会“计算定量分析”与“解析定性分析”两种不同研究方法的特点，以及相互补充的必要性。
- 4) 学术写作、报告、交流与评价；领导能力与团队协作；自主学习与终生学习。

3. 先修课程与知识基础

常微分方程的数值解；计算机语言与编程；空气动力学与飞行器概论；制导与控制基础。

项目 3-2 关于平行接近法的若干问题研究

一、任务描述

1. 建立在可用法向过载约束条件下，适用于一般情况下的平行接近法的运动学分析模型。
2. 自行设计数值计算实验，建立导弹与目标的机动模型，在导弹和目标均作机动飞行的情况下，分析导弹与目标速度在垂直和平行于视线的方向上的投影，比较导弹以绝对速度到达瞬时命中点的时间和导弹以相对速度到达目标当前位置的时间，理解平行接近法的设计原理。
3. 分析导弹目标速度比对导弹需用法向过载的影响，对导弹速度矢量前置角的影响，

自行设计数值计算实验，验证有关结论。

4. 假定目标和导弹均作等速飞行，对于给定的目标可用法向过载和飞行速度，设计目标规避方案，使导弹的需用法向过载尽可能大。

5. 自行设计数值计算实验，使导弹出现可用法向过载无法满足需用过载的情况，编制程序计算完整的运动学弹道，求出临界点（导弹需用过载刚好等于可用过载）处的各运动参数，比较临界点前后两段弹道参数的变化规律，计算脱靶量，分析有关变量和运动参数之间的相互影响。

6. 自行设计数值计算实验，研究目标与导弹速度、目标与导弹的速度矢量前置角的测量误差对平行接近关系的影响以及对法向过载和命中精度的影响。

7. 在导弹按平行接近法攻击目标时，试设计目标规避方案，使导弹需要的法向过载最大。设计数值计算实验，进行追逃仿真验证。

8. 分析平行接近法的工程实现难点，尝试设计一种工程替代方案（不能使用比例导引法），近似地实现平行接近法。

9. 假定导弹在发射瞬时的速度和射向并不满足平行接近法，或因偶然干扰导致平行接近关系遭到破坏。自行设计过渡导引方案和数值计算实验，研究在可用法向过载约束条件下，使导弹过渡或恢复到按平行接近法飞行的可能性。

其中，1-2 项必作，3-7 项至少选作其一，8-9 项为挑战项，鼓励学有余力者放手一试。根据研究结果，制作 PPT，进行专题报告和研讨交流。按正式学术期刊论文的规范和要求，自拟题目整理一篇研究报告（不超过 6000 字）。

二、注意事项

1. 研究过程中要特别注意导弹绝对速度和相对速度矢量的指向，特别是相对速度矢量的后置情况。

2. 进行过载约束下的弹道计算时，要注意时刻检查导弹需用过载的变化，一旦需用过载恢复到小于或等于可用过载，应立即切换计算程序的走向，使平行接近法重新生效。

3. 对计算数据的分析重点在于发现运动参数或变量之间隐含的联系，进而形成有意义的结论。不要简单重复地验证教科书上的结论或简单的逻辑推理即可证明的结论。

4. 编制弹道计算程序时，注意设置合适的中止计算条件，选择合适的计算步长和输出步长。接近弹道末端或临界点时，应根据具体情况采用可变步长。

5. 建立目标或导弹机动模型时，要注意弹目速度比的变化，同时应在计算程序中对导弹与目标速度的上下限有一定限制，避免无限制加减速。

6. 输出或绘制运动参数变化曲线时，涉及角度或角速度的量，尽量以度（度/秒）为单位。

三、关联的知识、能力与基础

1. 覆盖课程内容

导引弹道、运动学分析的有关假设和常用方法、相对运动方程、平行接近法的相关知识，包括：基本概念、设计原理、平行接近关系、绝对弹道与相对弹道、弹道特性、需用法向过载、工程实现难度。

2. 能力与意识

1) 理解导引弹道运动学分析的实质，深入理解平行接近法的设计原理、运动学弹道特性、相对弹道的直线特性以及导弹目标速度比保持不变对需用法向过载的意义，理解理论意

义的完美与工程现实的差距。

2) 针对具体问题,通过实践体会“提出假设、建立模型、编程计算、数据分析、形成结论”的常用研究方法。

3) 通过实践体会“计算定量分析”与“解析定性分析”两种不同研究方法的特点,以及相互补充的必要性。

4) 学术写作、报告、交流与评价;领导能力与团队协作;自主学习与终生学习。

3. 先修课程与知识基础

常微分方程的数值解;计算机语言与编程;空气动力学与飞行器概论;制导与控制基础。

项目 3-3 关于比例导引法的若干问题研究

一、任务描述

1. 建立在可用法向过载约束条件下,适用于一般情况下的比例导引法的运动学分析模型。

2. 自行设计数值计算实验,研究各种典型情况下视线角速度和需用法向过载的收敛情况,计算并分析视线角速度收敛边界的变化情况,研究有关参数对收敛边界和收敛速度的影响。设计数值计算实验,使比例系数不满足收敛条件,观察视线角速度的收敛与发散情况。

3. 自行设计数值计算实验,研究典型交会情况下导弹按比例导引飞行时视线角、视线角速度、速度矢量前置角等参数的变化情况,从不同角度分析典型情况下比例导引法对平行接近法的近似。

4. 自行设计数值计算实验,设置典型的末制导初始条件,使导弹在末制导初期出现可用法向过载无法满足需用过载的情况,编制程序计算完整的运动学弹道,求出临界点(导弹需用过载刚好等于可用过载)处的各运动参数,比较临界点前后两段弹道参数的变化规律,特别是实际等效比例系数和瞬时收敛极限,计算脱靶量,分析有关变量和运动参数之间的相互影响。

5. 建立并引入干扰模型,自行设计数值计算实验,研究视线角速度测量误差对比例导引弹道的影响。

6. 自行设计数值计算实验,在铅垂平面内,设计典型的末制导初始条件和目标运动规律,在考虑重力作用和可用法向过载约束条件下,进行比例导引的运动学分析,研究重力对比比例导引弹道的影响。

7. 在导弹按比例导引法攻击目标时,试设计目标规避方案,使导弹需要的法向过载最大。设计数值计算实验,进行追逃仿真验证。

8. 自行设计数值计算实验,研究比例导引法的全向攻击特性,并尝试通过广义或改进的比例导引法,使结果更有利于全向攻击。

9. 建立并引入导引系统模型、目标机动模型,利用“铅垂面内弹道设计、解算与分析”项目的研究成果,自行设计数值计算实验,在可用法向过载约束条件下,对装甲目标采用比例导引完成平飞俯冲击顶。

10. 利用欠比例导引概念,自行设计数值计算实验,研究如何充分利用导弹的法向过载余量,增大反坦克导弹的击顶落角。

其中,1-2项必作,3-8项至少选作其一,9-10项为挑战项,鼓励学有余力者放手一试。根据研究结果,制作PPT,进行专题报告和研讨交流。按正式学术期刊论文的规范和要求,

自拟题目整理一篇研究报告（不超过 6000 字）。

二、注意事项

1. 研究过程中要特别注意观察导弹绝对速度和相对速度矢量的指向，特别是相对速度矢量的后置情况，必要时可以同追踪法、平行接近法进行对比。
2. 进行过载约束下的弹道计算时，要注意时刻检查导弹需用过载的变化，一旦需用过载恢复到小于或等于可用过载，应立即切换计算程序的走向，使比例导引法重新生效。
3. 对计算数据的分析重点在于发现运动参数或变量之间隐含的联系，进而形成有意义的结论。不要简单重复地验证教科书上的结论或简单的逻辑推理即可证明的结论。
4. 编制弹道计算程序时，注意设置合适的中止计算条件，选择合适的计算步长和输出步长。接近弹道末端或临界点时，应根据具体情况采用可变步长。
5. 建立目标或导弹机动模型时，要注意弹目速度比的变化，注意分析速度比对弹道性能的影响，同时应在计算程序中对导弹与目标速度的上下限有一定限制，避免无限制加减速。同时，应注意速度与可用法向过载之间的关联。
6. 输出或绘制运动参数变化曲线时，涉及角度或角速度的量，尽量以度（度/秒）为单位。不同量级的参数变化曲线需要绘制在一起时，应乘上一定的倍数，使各量级相当或相近，以利于分析比较。

三、关联的知识、能力与基础

1. 覆盖课程内容

导引弹道、运动学分析的有关假设和常用方法、相对运动方程、比例导引法的相关知识，包括：基本概念、设计原理、比例系数、视线角速度的收敛与发散，视线旋转幅度、弹道特性、需用法向过载、与追踪法和平行接近法的关系、改进的比例导引法、视线角速度的测量、工程实现难度。比例导引的不足与改进方向。

2. 扩展知识

1) 欠比例导引与实际等效比例系数

导引弹道运动学分析，一般是在假定导弹能够理想地按照导引规律飞行的前提下进行的。如果这个假定始终成立，实际上意味着导弹的可用过载必须在任何时候都能覆盖需用过载，否则导弹就会按可用过载飞行，而不是按原来设计的导引规律飞行。如果设计的导引规律是如下形式比例导引：

$$\dot{\theta} = K\dot{q} \quad (1)$$

对应的需用法向过载为：

$$n = \frac{V\dot{\theta}}{g} \quad (2)$$

导弹的可用法向过载 n_p 不能满足需用法向过载的要求时，导弹应按可用法向过载飞行，此时导弹的速度矢量旋转速度为：

$$\dot{\theta}^* = \frac{n_p g}{V} \quad (3)$$

代入式 (1)，可得实际等效比例系数为：

$$K^* = \frac{\dot{\theta}^*}{\dot{q}} = \frac{n_p g}{\dot{q} V} \quad (4)$$

当视线角速度增大到导弹的可用法向过载已经无法满足式(1)时,按式(4)计算的实际等效比例系数 K^* 必然会小于原来的设计值 K 。换言之,在这种情况下,可以假定导弹仍然在按某种比例导引飞行,只不过比例系数是一个小于 K 且不断变化的数,故把这种情况称为导弹是在按欠比例导引规律飞行。只要实际等效的比例系数满足比例导引法的视线角速度收敛条件,即:

$$K^* > \frac{2|\dot{r}|}{V \cos \eta} \quad (5)$$

视线角速度就应该收敛。当视线角速度收敛到按设计的比例系数计算的需用法向过载不大于可用法向过载时,导引规律即恢复为原来设计的比例导引,即式(1)。当视线角速度大到实际等效的比例系数不能满足式(5)时,即使导弹按可用法向过载飞行,也不能使视线角速度收敛。不过,在某些极特殊的弹目遭遇情况下,仍有可能出现例外。

2) 着角与落角

在终点弹道学或弹丸对装甲的侵彻作用研究中,着角是一个备受关注的基本概念。但这个概念常常被误解,特别是对终点效应和弹着点姿态不甚关心的学者,在研究有关末端弹道形状的问题时,常会混淆着角与落角或其它角度的概念。

着角的定义是弹体纵轴与被撞击物体表面在弹着点处的法线之间的角度。无论是对反装甲的弹丸还是导弹,这个角度越小,意味着战斗部所需要穿透的装甲厚度越小,相应地,战斗部的效率也就越高,如图1所示。相反,当着角过大时,甚至可能出现跳弹的情况(如图中导弹b的着角远大于导弹a,不仅需要穿透更厚装甲,而且有一定跳弹的可能)。

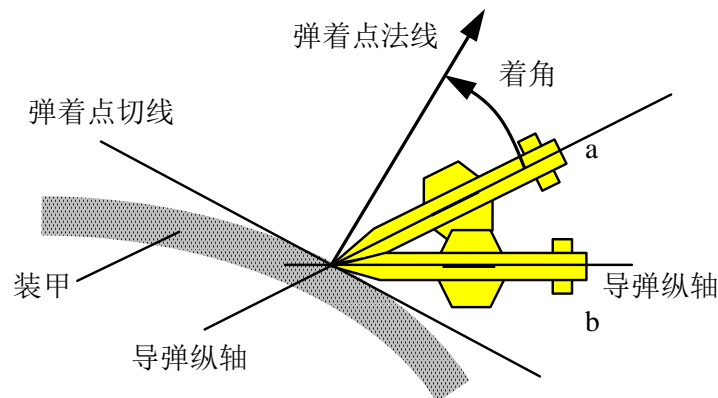


图1 着角的定义与作用

但是,在确定武器系统战术技术指标,或对弹道设计提出技术要求时,着角这一概念有时并不便于使用。例如在图2所示的实际战况中,假定命中目标时导弹纵轴与导弹速度矢量刚好重合,并且两枚导弹攻击的坦克型号、弹着点位置以及着角均相同。但显然,由于左边的坦克处于上坡阶段,而右边的坦克处于下坡阶段,两个弹着点处的法线方向之间存在一个不等于零的角度,这个角度应等于上坡角度和下坡角度之和。相应地,落角1和落角2之间,也必然存在一个差值,这个差值,也应等于上坡角度和下坡角度之和,或等于两条法线之间的夹角。因此,当用着角这个概念来给弹道设计提出技术要求时,命中点处的落角必然是一个变数。由于落角基本标定了弹道末段的形状,这意味着典型弹道的末段形状将是复杂多变的。

有些学者试图通过弹道成形控制技术,或将某些角度约束引入末制导律中,来实现预期的着角指标。但事实上,当目标在高低不平的地面上运动时,或弹着点位于目标的不同位置时,由于弹着点的法线方向很难准确地测定,因此以着角来描述的预期同样是难以达到的。正因为如此,在进行总体和弹道设计时,特别是设计对装甲目标的击顶弹道时,一般会采用落角这个指标而不是着角。

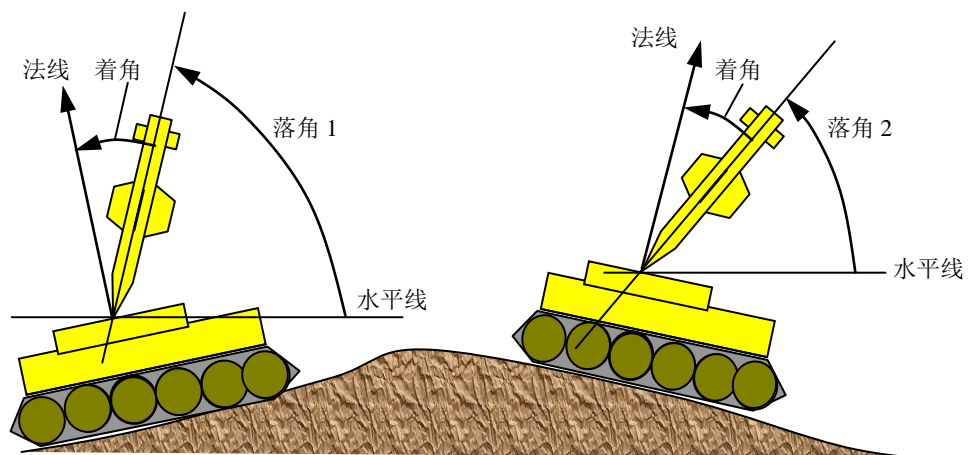


图 2 着角与落角的使用

3) 导引头与视线和视线角速度测量误差

当采用教材 P. 112 图 4-18 所示的导引头获得视线角速度信号时,在稳态情况下有:

$$u = \frac{1}{K_H K_M} \dot{q} \quad (6)$$

由于 $u = K_\varepsilon(q - q_1) = K_\varepsilon \Delta q$, 代入式 (6), 可得稳态情况下:

$$\Delta q = \frac{1}{K_H K_M K_\varepsilon} \dot{q} \quad (7)$$

显然,当视线角速度不为零时,导引头位标器测得的视线角与实际值之间存在一个不等零的稳态误差,在这种情况下,导引头的光轴并不严格地指向目标(或称与视线重合),而是与视线之间成某一个角度(即稳态误差)。

事实上,在考虑导引头的惯性、延迟和二阶特性时,对视线角速度的测量也是存在误差的。这在某种程度上可以理解为没有测量误差但比例系数出现了相应的变化,进而对弹道产生相同的影响。此外,根据教材 P. 113 式 (4-65) 可知,当导弹的质心移动或推力等参数出现变化时,实际的比例系数也将出现一些变化。

3. 能力与意识

1) 理解导引弹道运动学分析的实质,深入理解比例导引法的设计原理、运动学弹道特性、近似平行接近特性,导弹目标速度比比例导引弹道的意义、比例系数的重要意义用及选取原则、视线角速度收敛条件的重要意义、比例导引法的重大工程实际意义,辩证理解需用过载与可用过载之关的关系、辩证理解制导律设计对导弹需用过载的基本要求与可用过载之间的关系,了解比例导引的不足与改进方向。

2) 针对具体问题,通过实践体会“提出假设、建立模型、编程计算、数据分析、形成结论”的常用研究方法。

3) 通过实践体会“计算定量分析”与“解析定性分析”两种不同研究方法的特点,以

及相互补充的必要性。

4) 通过对各种导引方法的拓展研究,促进批判意识的形成。

5) 学术写作、报告、交流与评价;领导能力与团队协作;自主学习与终生学习。

3. 先修课程与知识基础

常微分方程的数值解;计算机语言与编程;空气动力学与飞行器概论;制导与控制基础。

项目 3-4 关于遥控制导律若干问题的研究

一、任务描述

1. 建立在可用法向过载约束条件下,适用于一般情况下三种典型遥控导引方法(三点法、前置量法和半前置量法)的运动学分析模型。

2. 设计数值计算实验,解算并分析三种典型遥控导引方法下的导引弹道,对三种典型遥控导引方法下导弹的转弯速率进行计算和比较分析,研究导弹高低角导数与导弹转弯速率和需用法向过载之间的关系,研判根据转弯速率判定导弹需用法向过载大小的合理性。

3. 设计数值计算实验,计算分析三种典型遥控导引方法下导弹迎击和尾追攻击特性,研判攻击禁区存在的可能性。

4. 建立并引入合适的干扰模型,设计数值计算实验,就干扰对三种典型遥控导引方法的影响进行比较研究。

5. 以三点法为例,自行设计数值计算实验,研究制导站的运动对导引弹道的影响,重点研究导弹的转弯速率和需用法向过载的变化。

6. 在不同的弹目速度比条件下,研究三种典型遥控导引方法的导引弹道,重点研究导弹的转弯速率和需用法向过载的变化情况。

7. 建立并引入合适的干扰模型,借用前置量法所需要的测量信息,分析通过遥测数据获取视线角和视线角速度的精度,研判通过遥测数据实施比例导引的可行性。

8. 以三点法为例,提出合理假设,研究设计和实施具有自寻的意义的三点法的可能性。

9. 建立并引入制导站和目标机动模型,利用“铅垂面内弹道设计、解算与分析”项目的研究成果,自行设计数值计算实验,在可用法向过载约束条件下,在铅垂面内对直升机目标采用三点法实施攻击。

其中,1-2项必作,3-7项至少选作其一,8-9项为挑战项,鼓励学有余力者放手一试。根据研究结果,制作PPT,进行专题报告和研讨交流。按正式学术期刊论文的规范和要求,自拟题目整理一篇研究报告(不超过6000字)。

二、注意事项

1. 研究过程中要合理设计目标运动规律,在进行三种方法的对比研究时,对目标运动规律及导弹速度的假定要保持一致。

2. 在设计数值实验和提出假设时,应尽可能使其具有代表性。

3. 输出或绘制运动参数变化曲线时,涉及角度或角速度的量,尽量以度(度/秒)为单位。

三、关联的知识、能力与基础

1. 覆盖课程内容

三点法、前置量法和半前置量法的设计思路、运动弹道特性、抗干扰特性。

2. 能力与意识

1) 理解典型遥控导引方法的导引弹道运动学分析实质，深入理解三种典型遥控导引方法的设计原理、运动学弹道特性，抗干扰特性。深入理解典型遥控导引方法迎击和尾追攻击方式的差异，深入理解弹目速度比的重要意义。了解技术的发展对传统的遥控与自寻的概念的影响与冲击。

2) 针对具体问题，通过实践体会“提出假设、建立模型、编程计算、数据分析、形成结论”的常用研究方法。

3) 通过实践体会“计算定量分析”与“解析定性分析”两种不同研究方法的特点，以及相互补充的必要性。

4) 学术写作、报告、交流与评价；领导能力与团队协作；自主学习与终生学习。

5) 批判思维训练。

3. 先修课程与知识基础

常微分方程的数值解；计算机语言与编程；空气动力学与飞行器概论；制导与控制基础。