

## 项目 4 导弹纵向动态特性分析

### 一、任务描述

已知某导弹在纵向平面内有明显的爬升段、平飞段、俯冲段和拉起改平段。平飞段高度  $H=300\text{m}$ ，俯冲拉起改平后，平飞高度为  $H=30\text{m}$ 。气动数据和其它有关数据同项目 2。

#### 1. 计算动力系数

从稳定爬升段、平飞段、俯冲段中各选一个特征点，利用气动数据表和式 (6-27) 计算动力系数—— $a_{11}$ 、 $a_{13}$ 、 $a_{14}$ 、 $a_{15}$ （可取  $a_{15} \approx (0.05 \sim 0.08)a_{14}$ ）、 $a_{16}$ 、 $a_{21}$ 、 $a_{22}$ 、 $a_{24}$ 、 $a_{25}$ 、 $a_{26}$ 、 $a_{31}$ 、 $a_{33}$ 、 $a_{34}$ 、 $a_{35}$ （可取  $a_{35} \approx (0.05 \sim 0.08)a_{34}$ ）、 $a_{36}$ 。注意角度单位应为  $\text{rad}$ 。写出与式 (7-16) 对应的特征方程，用霍氏判据判断未扰动运动是否稳定。

#### 2. 特征方程

求出特征方程的根（注明求根方法），并据此判断扰动运动方程组通解的构成、扰动运动的衰减或发散程度、半衰期（振幅或偏量值）、振荡运动的周期和频率、以及一个周期内的衰减或发散程度。

将扰动运动方程组简化为短周期扰动运动方程组，重新计算并与简化之前的结果进行比较。

#### 3. 传递函数

利用式 (7-16)，写出弹体纵向传递函数—— $W_{\delta_z}^V(s)$ 、 $W_{\delta_z}^g(s)$ 、 $W_{\delta_z}^\theta(s)$ 、 $W_{\delta_z}^\alpha(s)$ ，以及与此对应的短周期纵向扰动运动的传递函数—— $W_{\delta_z}^g(s)$ 、 $W_{\delta_z}^\theta(s)$ 、 $W_{\delta_z}^\alpha(s)$ 、 $W_{\delta_z}^{n_y}(s)$ ，并按典型环节整理成标准形式。

计算导弹传递系数  $K_M$ 、导弹时间常数  $T_M$ 、相对阻尼系数  $\xi_M$ 、气动力时间常数  $T_1$ 、攻角传递系数  $K_\alpha$ 、攻角时间常数  $T_\alpha$ 、法向过载传递系数  $K_{n_y}$ 、阻尼（衰减）系数  $\xi_M/T_M$ 、振荡频率  $\omega$ 、固有频率  $\omega_c$ ，通过数据对比分析决定上述参数的主要变量，分析气动参数、大气参数、飞行状态、质心变化等因素对上述参数和扰动运动的影响。

#### 4. 动力系数 $a_{24}$ 的意义

利用式 (7-118)、式 (7-123)、式 (7-133)、式 (7-143) 等，分析弹体静稳定性对纵向

运动的影响。

## 5. 求解过渡过程

1) 当①  $\Delta\alpha_0 = 2^\circ$ ,  $\Delta\vartheta_0 = 2^\circ$ , ②  $\Delta\alpha_0 = 2^\circ$ ,  $\Delta\theta_0 = 2^\circ$  时, 用拉氏变换求解导弹的纵向自由扰动。

2) 当升降舵产生阶跃偏转  $\Delta\delta_z = 2^\circ$ , 求式 (7-2) 所描述的纵向扰动运动及其所对应的短周期扰动运动的过渡过程, 并进行比较。

3) 条件同 1)、2), 对式 (7-2) 直接求数值解, 并将结果与 1)、2) 进行对比。

4) 对上述计算结果进行分析, 结合项目 2 所取得的弹道数据, 对导弹的操稳特性作出评价, 根据仿真结果提出对弹体进行改进设计的建议。

## 6. 选作与挑战项目

下列内容为选作与挑战项目, 研习者可根据自己的兴趣和精力选作, 不做统一要求。

1) 利用项目 2 和本项目取得的数据, 自行设计方案, 分析研究特征点附近主要动力系数的变化范围及其影响, 并据此对系数冻结法进行评价。

2) 利用项目 2 和本项目取得的数据, 自行设计方案, 分析研究通过小扰动线性化和系数冻结法所到结果的误差。

3) 利用本项目的研究结果, 评价在项目 2 中所设计的控制方案与弹体动态特性的匹配性, 给出相应的改进建议。

## 7. 撰写研究报告

根据以上计算和分析, 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. 选择特征点时, 尽量让三个特征点之间的距离间隔远一些。

2. 教材中式 (7-69) 及其它与传递函数有关的公式, 仅供参考, 不建议直接采用, 请习者自行推导或验证。

3. 对计算结果的分析不要套用书上的模式, 要联系每一个特征点处导弹的实际情况, 注意计算结果与物理过程之间的相互印证。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。不要用文字将图示化的结果重复陈述一遍。

## 三、关联的知识、能力与基础

## 1. 覆盖课程内容

1) 飞行器动态特性分析的基本方法、假设、原理, 包括: 基于小扰动法的扰动运动建模方法、飞行器运动方程的线性化、扰动运动的纵侧向分解、系数冻结法。(即教材第六章的主要内容)

2) 飞行器纵向扰动运动分析及其一般特性, 包括: 特征点的选取与动力系数计算、特征方程与特征根、特征根与稳定性之间的关系、稳定性判定方法、振荡周期与衰减特性、特征根计算方法、纵向扰动运动分解与简化、纵向短周期运动及其意义、长短周期运动出现的物理原因。飞行器纵向传递函数、短周期运动对应的传递函数、拉氏变换法求解阶跃响应与自由扰动运动、衰减程度与振荡频率、过渡过程分析、导弹传递系数、过度过程时间、固有频率、最大偏差与超调量。(即教材第七章的主要内容)

## 2. 能力与意识

运用基本的原理与方法研究飞行器纵向动态特性及相关问题; 原始数据的分析与处理; 针对具体情况提出合理假设; 选择及使用合适的研究方法和计算工具; 系统分析与综合; 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与解析解; 行列式与线性代数; 拉氏变换与反拉氏变换; 经典自动控制原理与方法; 计算机语言与编程; 空气动力学与飞行器概论。