

航天飞行动力学大作业

——有翼导弹飞行方案和稳定性分析

一、问题描述：

1. 在给定的条件下，计算纵向理想弹道，并给出采用瞬时平衡假设

$m_z^\alpha \alpha + m_z^{\delta_z} \delta_z = 0$ 时所有纵向参数随时间的变化曲线。

2. 不考虑气动力下洗影响，以第一问得出的弹道为基础，选取并计算作为特性点的 5 个以上点处的纵向短周期扰动运动的动力系数，并分析其在特性点处的自由扰动的稳定性，以及计算在各个特性点处弹体传递函数

$W_{\alpha\delta}(s), W_{n_y\delta}(s), W_{g\delta}(s)$ 。

二、模型建立：

根据给出的飞行条件进行初步分析，可给出如下假设和简化：

- 1、 近似认为导弹绕弹体轴的转动是无惯性的。
- 2、 近似认为导弹控制系统理想工作，既无误差，也无时间延迟。
- 3、 近似认为各种干扰因素对导弹无任何影响。
- 4、 由于侧向运动参数与 x 与 y 方向舵偏角都是小量，因此可近似认为相关参数可以忽略。
- 5、 近似认为导弹在某个铅锤面内飞行，即其飞行弹道与铅锤面内的弹道差别不大。
- 6、 近似认为俯仰操纵机构的偏转仅取决于纵向运动参数；偏航、滚转操纵机构的偏转仅取决于侧向运动参数。

根据以上假设，我们可以简化得到以下方程组：

质心移动的动力学方程：

$$m \frac{dV}{dt} = P \cos \alpha - X - mg \sin \theta$$
$$mV \frac{d\theta}{dt} = P \sin \alpha + Y - mg \cos \theta$$

质心移动的运动学方程：

$$\frac{dx}{dt} = V \cos \theta$$

$$\frac{dy}{dt} = V \sin \theta$$

质量方程：

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}$$

纵向平衡关系式：

$$m_z^\alpha \alpha + m_z^{\delta_z} \delta_z = 0$$

控制方程：

$$\varepsilon_1 = 0$$

$$\varepsilon_4 = 0$$

上式适用于全阶段的飞行方案，但是因为每个阶段的参数会有所不同，因此在不同阶段该方程组会有不同的形式，再根据每个阶段的具体的公式进行数值积分就能够得到最终各参数的变化情况。

三、求解弹道

1. 第一阶段：给定高度

导弹释放后，在第一阶段做无动力滑翔，采用给定高度的飞行方案，其控制系统方程有表达式如下：

$$H^* = 2000 \times \cos(0.000314 \times 1.1 \times x) + 5000$$

$$\delta_z = k_\phi \times (H - H^*) + \dot{k}_\phi \times (\dot{H} - \dot{H}^*)$$

值得注意的是，控制方程中包含开环增益系数，其值的选取关系到在控制系统下的飞行弹道与给定弹道的相合程度，通过 matlab 进行循环迭代调试选取使弹道最相合且震荡最微弱的参数 k_ϕ \dot{k}_ϕ ，得到阶段一各参数随时间变化的关系如下图所示：

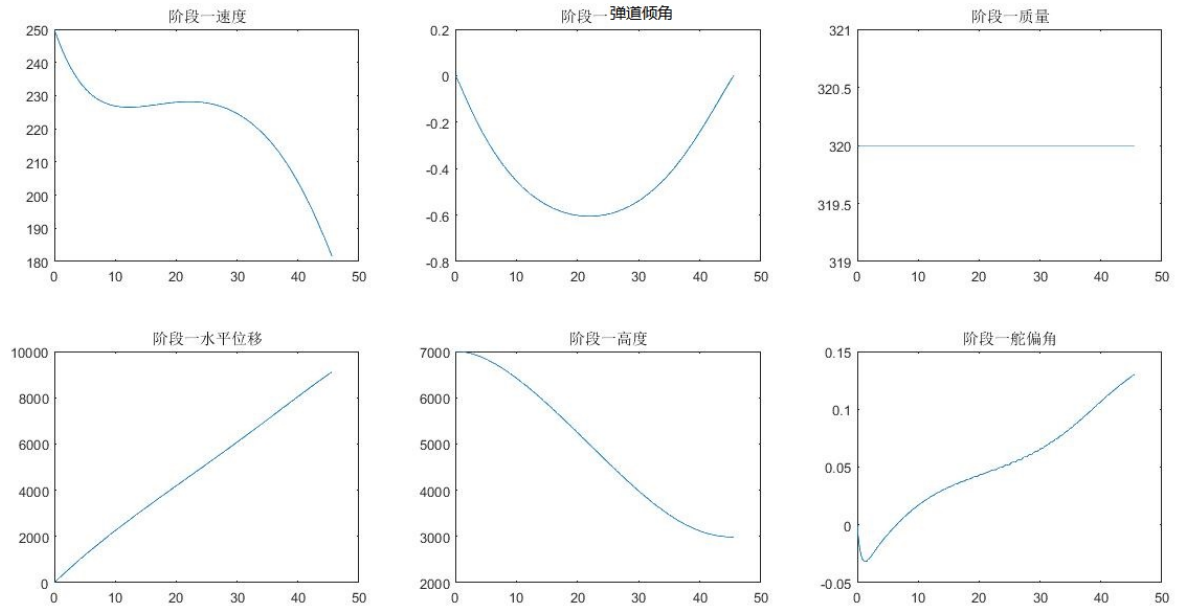


图 3-1 第一阶段飞行参数变化曲线

图 3-1 给出了阶段一导弹速度、弹道倾角、导弹质量、水平位移、导弹高度、z 向舵偏角随时间变化的关系，其中各单位分别为 m/s、rad、kg、m、m、rad，时间单位为 s。

2. 第二阶段：等高飞行

导弹在水平位移为 9100m 时，发动机开始点火，转入水平飞行模式。该阶段控制系统方程表达式如下：

$$H^* = 3050m$$

$$\delta_z = k_\phi(H - H^*) + \dot{k}_\phi \dot{H}$$

同样通过迭代选择最佳增益系数，通过 MATLAB 数值积分可得到如下各参数随时间变化关系图：

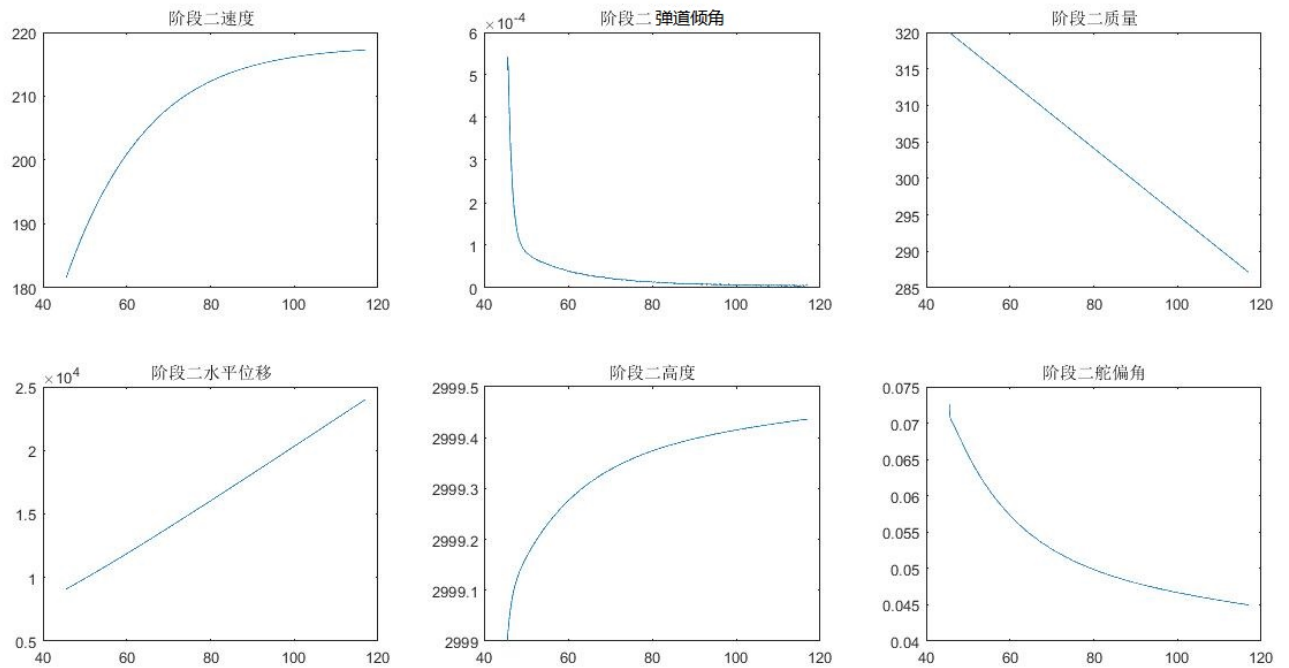


图 3-2 第二阶段飞行参数变化曲线

3. 第三阶段：导引飞行

导弹飞行到水平位移为 24000m 时开始瞄准目标，采用比例引导法接近目标。该阶段控制系统方程为：

$$r \frac{dq}{dt} = V_m \times \sin \eta - V_T \sin \eta_T$$

$$\tan q = \frac{y_T - y_m}{x_T - x_m}$$

$$\frac{d\theta^*}{dt} = k \frac{dq}{dt}$$

$$\theta^* - \theta_0 = k(q - q_0)$$

$$\delta_z = k_\theta(\theta - \theta^*) + k_{\dot{\theta}}(\dot{\theta} - \dot{\theta}^*)$$

该阶段各参数变化曲线如下图所示：

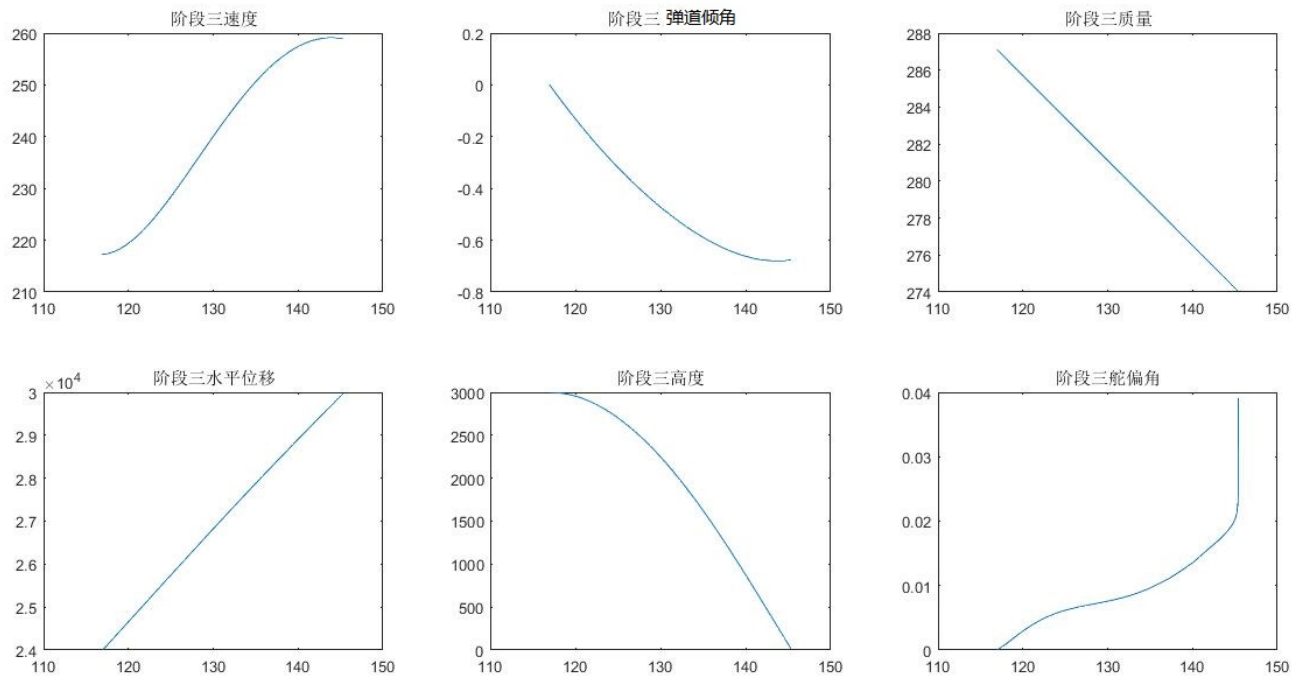


图 3-3 第三阶段飞行参数变化曲线

下图 3-5 展示了全过程各参数的变化曲线。

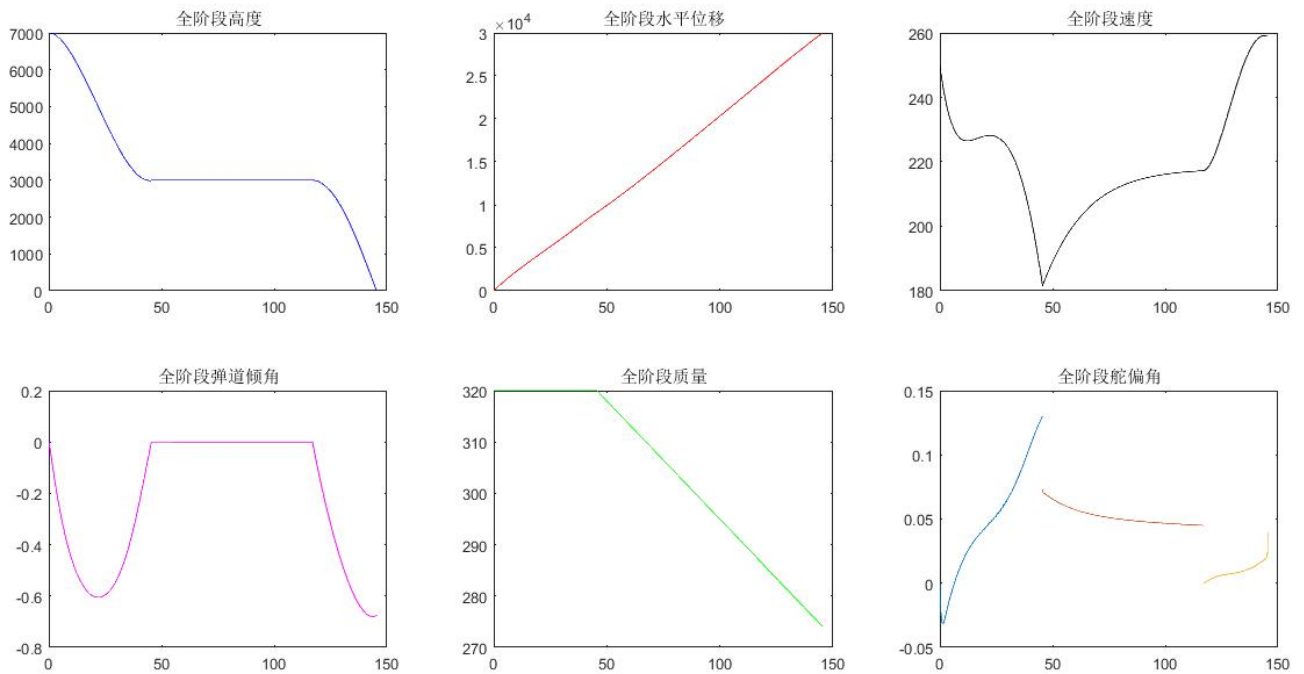


图 3-5 全阶段各参数变化曲线

四、稳定性分析

对于有控导弹而言，短周期扰动运动的动态稳定性是非常重要的，下面利用动力系数之间的相互关系判断导弹稳定与否。在不考虑重力动力系数的影响且不考虑下洗的情况下，导弹的纵向短周期扰动运动态稳定性的条件为：

$$a_{24} + a_{22}a_{34} > 0$$

计算短周期扰动的动力系数 a_{22} a_{24} a_{25} a_{34} a_{35} 如下：

$$a_{22} = -\frac{(M_z^{\omega_z})_0}{J_{z0}}$$

$$a_{24} = -\frac{(M_z^\alpha)_0}{J_{z0}}$$

$$a_{25} = -\frac{(M_z^{\delta_z})_0}{J_{z0}}$$

$$a_{34} = \frac{(P + Y^a)_0}{(mV)_0}$$

$$a_{35} = \frac{(Y^{\delta_z})_0}{(mV)_0}$$

根据得到的动力系数可以求出纵向传递系数 K_α 、纵向时间常数 T_α 、纵向相对阻尼系数 ξ_α 、纵向俯仰角时间常数 $T_{1\alpha}$ ，公式如下：

$$K_\alpha = \frac{a_{25}a_{34} - a_{24}a_{35}}{a_{24} + a_{22}a_{34}}$$

$$T_\alpha = \frac{1}{\sqrt{a_{24} + a_{22}a_{34}}}$$

$$\xi_\alpha = \frac{a_{22} + a_{34}}{2\sqrt{a_{24} + a_{22}a_{34}}}$$

$$T_{1\alpha} = \frac{a_{25}}{a_{25}a_{34} - a_{24}a_{35}}$$

根据以上公式，通过数直接算可以得到飞行全过程的稳定性和参数变化如

下图所示：

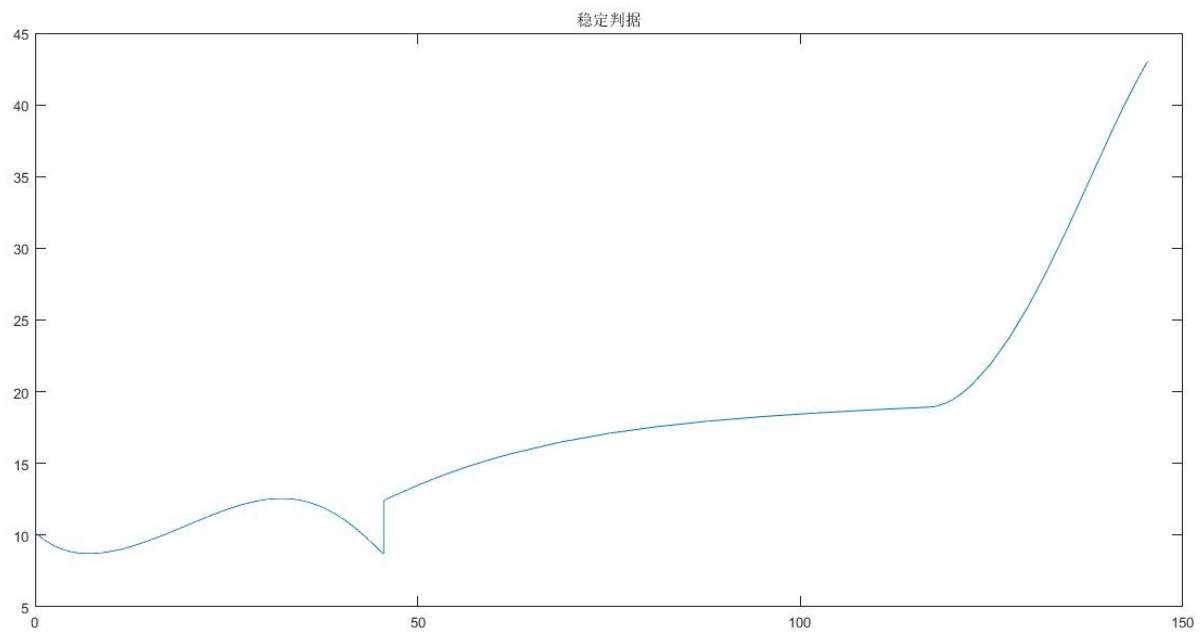


图 4-1 全过程短周期稳定性判断

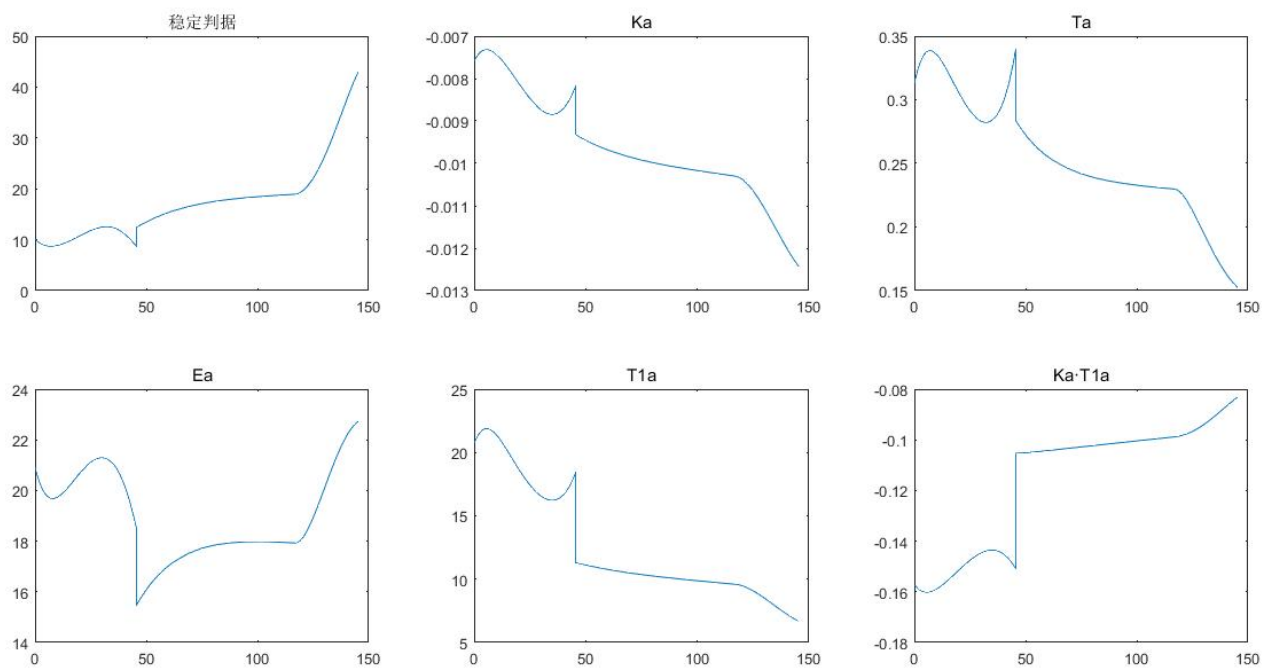


图 4-2 传函中各参数变化曲线

从图 4-1 中我们可以看到， $a_{24} + a_{22}a_{34} > 0$ 始终成立，即全过程中导弹处于短周期扰动稳定状态。

由数值求解的结果可以得到各点传递函数中各个参数，现选择全过程弹道的六个特征点，根据公式 4-1 分别写出六个特征点处的传递函数。（鸭式布局）

$$W_{g\delta}(s) = \frac{-K_{\alpha}(T_{1\alpha}s+1)}{s(T_{\alpha}^2s^2+2\xi_{\alpha}T_{\alpha}s+1)}$$

$$W_{\theta\delta}(s) = \frac{-K_{\alpha}}{s(T_{\alpha}^2s^2+2\xi_{\alpha}T_{\alpha}s+1)}$$

$$W_{\alpha\delta}(s) = \frac{-K_{\alpha}T_{1\alpha}}{T_{\alpha}^2s^2+2\xi_{\alpha}T_{\alpha}s+1}$$

$$W_{n_y\delta}(s) = \frac{V_0}{g} \frac{-K_{\alpha}}{(T_{\alpha}^2s^2+2\xi_{\alpha}T_{\alpha}s+1)}$$

① 特性点 1 : (t=29.18s)

$$W_{g\delta}(s) = \frac{0.1451s+0.0087}{s(0.0807s^2+12.0927s+1)}$$

$$W_{\theta\delta}(s) = \frac{0.0087}{s(0.0807s^2+12.0927s+1)}$$

$$W_{\alpha\delta}(s) = \frac{0.1451}{0.0807s^2+12.0927s+1}$$

$$W_{n_y\delta}(s) = \frac{1.9610}{(0.79086s^2+118.5085s+1)}$$

② 特性点 2 : (t=7.629s)

$$W_{g\delta}(s) = \frac{0.1596s+0.0073}{s(0.1144s^2+13.3155s+1)}$$

$$W_{\theta\delta}(s) = \frac{0.0073}{s(0.1144s^2+13.3155s+1)}$$

$$W_{\alpha\delta}(s) = \frac{0.1596}{0.1144s^2+13.3155s+1}$$

$$W_{n_y\delta}(s) = \frac{1.6782}{(1.1216s^2+130.4918s+1)}$$

③ 特性点 3 : (t=56.56s)

$$W_{g\delta}(s) = \frac{0.1049s+0.0097}{s(0.0662s^2 + 8.7019s + 1)}$$

$$W_{\theta\delta}(s) = \frac{0.0097}{s(0.0662s^2 + 8.7019s + 1)}$$

$$W_{\alpha\delta}(s) = \frac{0.1049}{0.0662s^2 + 8.7019s + 1}$$

$$W_{n_y\delta}(s) = \frac{1.9069}{(0.6488s^2 + 85.2785s + 1)}$$

④ 特性点 4 : (t=87.78s)

$$W_{g\delta}(s) = \frac{0.1015s+0.01}{s(0.05574s^2 + 8.4665s + 1)}$$

$$W_{\theta\delta}(s) = \frac{0.01}{s(0.05574s^2 + 8.4665s + 1)}$$

$$W_{\alpha\delta}(s) = \frac{0.1015}{0.05574s^2 + 8.4665s + 1}$$

$$W_{n_y\delta}(s) = \frac{2.1569}{(0.5463s^2 + 82.9722s + 1)}$$

⑤ 特性点 5 : (t=124.9s)

$$W_{g\delta}(s) = \frac{0.0968s+0.0106}{s(0.0456s^2 + 8.0660s + 1)}$$

$$W_{\theta\delta}(s) = \frac{0.0106}{s(0.0456s^2 + 8.0660s + 1)}$$

$$W_{\alpha\delta}(s) = \frac{0.0968}{0.0456s^2 + 8.0660s + 1}$$

$$W_{n_y\delta}(s) = \frac{2.4270}{(0.4467s^2 + 79.0471s + 1)}$$

⑥ 特性点 6 : (t=135s)

$$W_{\theta\delta}(s) = \frac{0.0906s + 0.0115}{s(0.0317s^2 + 7.5586s + 1)}$$

$$W_{\theta\delta}(s) = \frac{0.0115}{s(0.0317s^2 + 7.5586s + 1)}$$

$$W_{\alpha\delta}(s) = \frac{0.0906}{0.0317s^2 + 7.5586s + 1}$$

$$W_{n_y\delta}(s) = \frac{2.8857}{(0.3109s^2 + 74.0739s + 1)}$$

五、完成大作业所用软件

这次作业主要使用的是 MATLAB 和 Mathematica 两款软件，使用 Mathematica 进行公式的推导和整理工作，使用 MATLAB（尤其是其中的 ode 类函数）进行数值计算解算微分方程组。

六、总结

不知不觉，又是一个凌晨 4 点，功夫不负有心人终于把第一题中所有的内容写完了，成长的过程总会伴随着阵痛，在这个过程中发现了自己的许多问题也让自己成长了很多，马虎出错，正好写成负号，对公式不熟悉导致我经常使用错公式，对 MATLAB 不熟悉导致 ode 函数使用过程中频频出错，但是最终都发现并一一解决，我猜中了结局却没猜中过程，希望能够在今后通过这类的大作业不断提高自己，让自己的能力不断得到提高，同时希望能够在飞动考试中取得一个较为理想的成绩。

七、源代码

Mathematica 公式推导：

第一阶段：

```
m dv == -x - m g Sin[θ] /. {m -> 320, x -> cx q sref, g -> 9.8} /. {cx -> 0.2 + 0.005
(α*57.296)^2, q -> p v^2/2, sref -> 0.45} /. {α -> 0.24δz, p -> 1.2495 ((288.15-
```

```

0.0065y)/288.15)^4.25588}/.δz->k(y-2000*Cos[0.000314*1.1*x]-5000)+ki(dy+2000
Sin[0.000314*1.1*x]*0.000314*1.1*dx)/.{dy->v Sin[θ],dx->v Cos[θ]}
320 dv==(-3136. Sin[θ]-9.57364*10^-12 v^2 (288.15 -0.0065 y)^4.25588 (0.2
+0.945456 (k (-5000+y-2000 Cos[0.0003454 x])+ki (0.6908 v Cos[θ] Sin[0.0003454
x]+v Sin[θ]))^2)
dv==(-3136. Sin[θ]-9.573639489642105*^-12 v^2 (288.15 -0.0065 y)^4.25588 (0.2
+0.9454555054079999 (k (-5000+y-2000 Cos[0.0003454 x])+ki
(0.69080000000000001 v Cos[θ] Sin[0.0003454 x]+v Sin[θ]))^2))/320
dv==1/320 (-3136. Sin[θ]-9.57364*10^-12 v^2 (288.15 -0.0065 y)^4.25588 (0.2
+0.945456 (k (-5000+y-2000 Cos[0.0003454 x])+ki (0.6908 v Cos[θ] Sin[0.0003454
x]+v Sin[θ]))^2))
ToMatlab[1/320 (-3136. Sin[θ]-9.573639489642105*^-12 v^2 (288.15 -0.0065
y)^4.25588 (0.2 +0.9454555054079999 (k (-5000+y-2000 Cos[0.0003454 x])+ki
(0.6908000000000000001 v Cos[θ] Sin[0.0003454 x]+v Sin[θ]))^2))]
(1/320).*((-0.3136E4).*sin(θ))+(-0.957364E-11).*v.^2.*(0.28815E3+( ...
-0.65E-2).*y).^0.425588E1.*(0.2E0+0.945456E0.*(k.*((-5000)+y+( ...
-2000)).*cos(0.3454E-3.*x))+ki.*(0.6908E0.*v.*cos(θ).*sin( ...
0.3454E-3.*x)+v.*sin(θ))).^2));
m v dθ==y-m g Cos[θ]/.{m->320,y->cy q sref,g->9.8}/.{cy->0.25
α*57.296+0.05*δz*57.296,q->ρ v^2/2,sref->0.45}/.{α->0.24δz,ρ->1.2495 ((288.15-
0.0065y)/288.15)^4.25588}/.δz->k(y-2000*Cos[0.000314*1.1*x]-5000)+ki(dy+2000
Sin[0.000314*1.1*x]*0.000314*1.1*dx)/.{dy->v Sin[θ],dx->v Cos[θ]}
320 dθ v==(-3136. Cos[θ]+6.03384*10^-11 v^2 (288.15 -0.0065 y)^4.25588 (k (-
5000+y-2000 Cos[0.0003454 x])+ki (0.6908 v Cos[θ] Sin[0.0003454 x]+v Sin[θ]))
dθ==(-3136. Cos[θ]+6.033843730183874*^-11 v^2 (288.15 -0.0065 y)^4.25588 (k (-
5000+y-2000 Cos[0.0003454 x])+ki (0.69080000000000001 v Cos[θ] Sin[0.0003454
x]+v Sin[θ])))/320/v
dθ==1/(320 v) (-3136. Cos[θ]+6.03384*10^-11 v^2 (288.15 -0.0065 y)^4.25588 (k (-
5000+y-2000 Cos[0.0003454 x])+ki (0.6908 v Cos[θ] Sin[0.0003454 x]+v Sin[θ])))
ToMatlab[1/(320 v) (-3136. Cos[θ]+6.033843730183874*^-11 v^2 (288.15 -0.0065
y)^4.25588 (k (-5000+y-2000 Cos[0.0003454 x])+ki (0.6908000000000000001 v Cos[θ]
Sin[0.0003454 x]+v Sin[θ])))]
(1/320).*v.^(-1).*((-0.3136E4).*cos(θ)+0.603384E-10.*v.^2.*( ...
0.28815E3+(-0.65E-2).*y).^0.425588E1.*(k.*((-5000)+y+(-2000)).*cos( ...
0.3454E-3.*x))+ki.*(0.6908E0.*v.*cos(θ).*sin(0.3454E-3.*x)+v.*sin( ...
θ))));

```

第二阶段：

```

m dv==p Cos[α]-x-m g Sin[θ]/.{p->2000,x->cx q sref,g->9.8}/.{cx->0.2+0.005
(α*57.296)^2,q->ρ v^2/2,sref->0.45}/.{α->0.24δz,ρ->1.2495 ((288.15-
0.0065y)/288.15)^4.25588}/.δz->k(y-3000)+ki(dy)/.{dy->v Sin[θ],dx->v Cos[θ]}

```

```

dv m==2000 Cos[0.24 (k (-3000+y)+ki v Sin[θ])]-9.8 m Sin[θ]-9.57364*10^-12 v^2
(288.15 -0.0065 y)^4.25588 (0.2 +0.945456 (k (-3000+y)+ki v Sin[θ])^2)
dv==(2000 Cos[0.24 (k (-3000+y)+ki v Sin[θ])]-9.8 m Sin[θ]-9.573639489642105*^-
12 v^2 (288.15 -0.0065 y)^4.25588 (0.2 +0.9454555054079999 (k (-3000+y)+ki v
Sin[θ])^2))/m
dv==1/m (2000 Cos[0.24 (k (-3000+y)+ki v Sin[θ])]-9.8 m Sin[θ]-9.57364*10^-12
v^2 (288.15 -0.0065 y)^4.25588 (0.2 +0.945456 (k (-3000+y)+ki v Sin[θ])^2))
ToMatlab[1/m (2000 Cos[0.24 (k (-3000+y)+ki v Sin[θ])]-9.8 m Sin[θ]-
9.573639489642105*^-12 v^2 (288.15 -0.0065 y)^4.25588 (0.2
+0.9454555054079999 (k (-3000+y)+ki v Sin[θ])^2))]
m.^(-1).*(2000.*cos(0.24E0.*(k.*((-3000)+y)+ki.*v.*sin(θ)))+( ...
-0.98E1).*m.*sin(θ)+(-0.957364E-11).*v.^2.*(0.28815E3+(-0.65E-2).* ...
y).^0.425588E1.*(0.2E0+0.945456E0.*(k.*((-3000)+y)+ki.*v.*sin(θ)) ...
.^2));
m v dθ==p Sin[α]+y-m g Cos[θ]/.{p->2000,y->cy q sref,g->9.8}/.{cy->0.25
α*57.296+0.05*δz*57.296,q->p v^2/2,sref->0.45}/.{α->0.24δz,p->1.2495 ((288.15-
0.0065y)/288.15)^4.25588}/.δz->k(y-3000)+ki(dy)/.{dy->v Sin[θ],dx->v Cos[θ]}
dθ m v== -9.8 m Cos[θ]+6.03384*10^-11 v^2 (288.15 -0.0065 y)^4.25588 (k (-
3000+y)+ki v Sin[θ])+2000 Sin[0.24 (k (-3000+y)+ki v Sin[θ])]
dθ==(-9.8 m Cos[θ]+6.033843730183874*^-11 v^2 (288.15 -0.0065 y)^4.25588 (k (-
3000+y)+ki v Sin[θ])+2000 Sin[0.24 (k (-3000+y)+ki v Sin[θ])])/m/v
dθ==1/(m v) (-9.8 m Cos[θ]+6.03384*10^-11 v^2 (288.15 -0.0065 y)^4.25588 (k (-
3000+y)+ki v Sin[θ])+2000 Sin[0.24 (k (-3000+y)+ki v Sin[θ])])
ToMatlab[1/(m v) (-9.8 m Cos[θ]+6.033843730183874*^-11 v^2 (288.15 -0.0065
y)^4.25588 (k (-3000+y)+ki v Sin[θ])+2000 Sin[0.24 (k (-3000+y)+ki v Sin[θ])])]
m.^(-1).*v.^(-1).*((-0.98E1).*m.*cos(θ)+0.603384E-10.*v.^2.*( ...
0.28815E3+(-0.65E-2).*y).^0.425588E1.*(k.*((-3000)+y)+ki.*v.*sin( ...
θ))+2000.*sin(0.24E0.*(k.*((-3000)+y)+ki.*v.*sin(θ))));

```

第三阶段：

```

m dv==p Cos[α]-x-m g Sin[θ]/.{p->2000,x->cx q sref,g->9.8}/.{cx->0.2+0.005
(α*57.296)^2,q->p v^2/2,sref->0.45}/.{α->0.24δz,p->1.2495 ((288.15-
0.0065y)/288.15)^4.25588}/.δz->ki(dθ-dq)+k(θ-q-0.46365)/.{dy->v Sin[θ],dx->v
Cos[θ]}
dv m== -9.57364*10^-12 v^2 (288.15 -0.0065 y)^4.25588 (0.2 +0.945456 ((-dq+dθ)
ki+k (-0.46365-q+θ))^2)+2000 Cos[0.24 ((-dq+dθ) ki+k (-0.46365-q+θ))]-9.8 m
Sin[θ]
dv==(2000 Cos[0.24 (k (-3000+y)+ki v Sin[θ])]-9.8 m Sin[θ]-9.573639489642105*^-
12 v^2 (288.15 -0.0065 y)^4.25588 (0.2 +0.9454555054079999 (k (-3000+y)+ki v
Sin[θ])^2))/m
dv==1/m (2000 Cos[0.24 (k (-3000+y)+ki v Sin[θ])]-9.8 m Sin[θ]-9.57364*10^-12
v^2 (288.15 -0.0065 y)^4.25588 (0.2 +0.945456 (k (-3000+y)+ki v Sin[θ])^2))

```

```

ToMatlab[1/m (2000 Cos[0.24 (k (-3000+y)+ki v Sin[θ]))-9.8 m Sin[θ]-
9.573639489642105*^-12 v^2 (288.15 -0.0065 y)^4.25588 (0.2
+0.9454555054079999 (k (-3000+y)+ki v Sin[θ])^2))]
m.^(-1).*(2000.*cos(0.24E0.*(k.*((-3000)+y)+ki.*v.*sin(θ)))+( ...
-0.98E1).*m.*sin(θ)+(-0.957364E-11).*v.^2.*(0.28815E3+(-0.65E-2).* ...
y).^0.425588E1.*(0.2E0+0.945456E0.*(k.*((-3000)+y)+ki.*v.*sin(θ)) ...
.^2));
m v dθ==p Sin[α]+y-m g Cos[θ]/.{p->2000,y->cy q sref,g->9.8}/.{cy->0.25
α*57.296+0.05*δz*57.296,q->ρ v^2/2,sref->0.45}/.{α->0.24δz,p->1.2495 ((288.15-
0.0065y)/288.15)^4.25588}/.δz->ki(dθ-dq)+k(θ-q-0.46365)/.{dy->v Sin[θ],dx->v
Cos[θ]}
dθ m v==6.03384*10^-11 v^2 (288.15 -0.0065 y)^4.25588 ((-dq+dθ) ki+k (-0.46365-
q+θ))-9.8 m Cos[θ]+2000 Sin[0.24 ((-dq+dθ) ki+k (-0.46365-q+θ))]
dθ==(-9.8 m Cos[θ]+6.033843730183874*^-11 v^2 (288.15 -0.0065 y)^4.25588 (k (-
3000+y)+ki v Sin[θ])+2000 Sin[0.24 (k (-3000+y)+ki v Sin[θ]))]/m/v
dθ==1/(m v) (-9.8 m Cos[θ]+6.03384*10^-11 v^2 (288.15 -0.0065 y)^4.25588 (k (-
3000+y)+ki v Sin[θ])+2000 Sin[0.24 (k (-3000+y)+ki v Sin[θ]))]
ToMatlab[1/(m v) (-9.8 m Cos[θ]+6.033843730183874*^-11 v^2 (288.15 -0.0065
y)^4.25588 (k (-3000+y)+ki v Sin[θ])+2000 Sin[0.24 (k (-3000+y)+ki v Sin[θ]))]
m.^(-1).*v.^(-1).*((-0.98E1).*m.*cos(θ)+0.603384E-10.*v.^2.*( ...
0.28815E3+(-0.65E-2).*y).^0.425588E1.*(k.*((-3000)+y)+ki.*v.*sin( ...
θ))+2000.*sin(0.24E0.*(k.*((-3000)+y)+ki.*v.*sin(θ)))));
dr==v Cos[-ArcTan[y/(30000-x)]-θ]
dr==v Cos[θ+ArcTan[y/(30000-x)]]
dq==v Sin[-ArcTan[y/(30000-x)]-θ]/r
dq==-(v Sin[θ+ArcTan[y/(30000-x)]]/r)

```

MATLAB 代码：

第一阶段各参数随时间变化绘制函数：

```

function Dn()
global k;
global ki;
k=-0.01;
ki=-0.014;

[t,x]=ode45('Dt',[0,45.538],[250 0 0 7000]);

H=x(:,4);
HH=2000*cos(0.000314*1.1*x(:,3))+5000;

```

```
subplot(2,2,1)
plot(t,H)
hold on
plot(t,HH)
```

```
subplot(2,2,2)
plot(t,x(:,3))
```

```
subplot(2,2,3)
plot(t,x(:,1))
```

```
subplot(2,2,4)
plot(t,x(:,2))
end
```

第一阶段迭代微分方程组：

```
function dy=Dt(t,y)
global k;
global ki;
dy=zeros(4,1);

dy(1)=(1/320).*((-0.3136E4).*(sin(y(2)))+(-0.957364E-11).*(y (1).^2.*(0.28815E3+( ...
-0.65E-2).*(y(4)).^0.425588E1.*(0.2E0+0.945456E0.*(k.*((-
5000)+y(4)+( ...
-2000).*(cos(0.3454E-3.*y(3))))+ki.*(0.6908E0.*y (1).*(cos
(y(2)).*(sin( ...
0.3454E-3.*y(3))+y (1).*(sin(y(2))))).^2)));

dy(2)=(1/320).*(y (1).^(-1).*((-0.3136E4).*(cos(y(2)))+0.603384E-10.*y (1).^2.*( ...
0.28815E3+(-0.65E-2).*(y(4)).^0.425588E1.*(k.*((-5000)+y(4)+(-
2000).*(cos( ...
0.3454E-3.*y(3))))+ki.*(0.6908E0.*y (1).*(cos (y(2)).*(sin(0.3454E-
3.*y(3))+y (1).*(sin( ...
y(2))))));

dy(3)=y(1)*cos(y(2));

dy(4)=y(1)*sin(y(2));
end
```

第二阶段：

第二阶段各参数随时间变化绘制函数：

```

function Dn()
global k;
global ki;
k=-0.08;
ki=-0.08;

[t,x]=ode15s('Dt',[0,75],[181.6 0.000511 320 9095 2999]);

H=x(:,5);
HH=3000;

subplot(2,2,1)
plot(t,H)
hold on
plot(t,HH)

subplot(2,2,2)
plot(t,x(:,4))

subplot(2,2,3)
plot(t,x(:,1))

subplot(2,2,4)
plot(t,x(:,2))
end

```

第二阶段迭代微分方程组：

```

function dy=Dt(t,y)
global k;
global ki;
dy=zeros(5,1);

dy(1)=y(3).^(-1).*(2000.*cos(0.24E0.*(k.*((-3000)+y(5))+ki.*y(1).*sin(y(2)))))+( ...
    -0.98E1).*y(3).*sin(y(2))+(-0.957364E-11).*y(1).^2.*(0.28815E3+(-
    0.65E-2).* ...
    y(5)).^0.425588E1.*(0.2E0+0.945456E0.*(k.*((-3000)+y(5))+ki.*y
    (1).*sin(y(2))).^2));

dy(2)=y(3).^(-1).*y(1).^(-1).*((-0.98E1).*y(3).*cos(y(2))+0.603384E-10.*y
    (1).^2.*( ...
    0.28815E3+(-0.65E-2).*y(5)).^0.425588E1.*(k.*((-3000)+y(5))+ki.*y
    (1).*sin( ...

```

$y(2))) + 2000 * \sin(0.24E0 * (k * ((-3000) + y(5)) + k_i * y(1) * \sin(y(2)))));$

dy(3)=-0.46;

dy(4)=y(1)*cos(y(2));

dy(5)=y(1)*sin(y(2));

end

第三阶段：

第三阶段各参数随时间变化绘制函数：

function Dn()

global k;

global k_i;

global st;

global tt;

global k_k;

st=0;

k=-0.5;

k_i=0;

k_k=1.9;

[t,x]=ode15s('Dt',[0,29],[217.3 5.045E-6 287.1 24000 3000 6708.2 -0.46365]);

subplot(2,4,1)

plot(t,x(:,1))

title('v')

subplot(2,5,2)

plot(t,x(:,2))

hold on

plot(t,x(:,7))

title('&a')

subplot(2,5,3)

plot(t,x(:,3))

title('m')

subplot(2,5,4)

plot(t,x(:,4))

title('x')

subplot(2,5,5)

plot(t,x(:,5))

title('y')


```
subplot(2,5,6)
plot(t,x(:,6))
title('r')
subplot(2,5,7)
plot(t,x(:,7))
title('q')
subplot(2,5,8)
j=1;
bb=[];
for i=1:length(t)
    while(j)
        if(abs(t(i)-tt(j,2))<0.001)
            bb(length(bb)+1)=tt(j,1);
            break
        else
            j=j+1;
        end
    end
end
AA=ki*(-kk*x(:,6).^(-1).*x(:,1).*sin(x(:,2)+...
        atan(((30000)-x(:,4)).^(-1).*x(:,5))-bb')...
        +k*(x(:,2)-kk*x(:,7)+kk*0.46365);
plot(t,AA)
title('dpj')
subplot(2,5,9)
plot(t,(-1).*x(:,2)+(-1).*atan(((30000)-x(:,4)).^(-1).*x(:,5)))
title('n')
subplot(2,5,10)
plot(t,0.24*AA)
title('a')
% subplot(1,1,1)
% plot(t,AA,'*',t,x(:,2),'r',t,x(:,7),'b')
end
```

第三阶段迭代微分方程组：

```
function dy=Dt(t,y)
global k;
global ki;
global st;
global tt;
global kk;
```

```

dy(2)=y (3).^(-1).*y (1).^(-1).*((-0.98E1).*y (3).*cos(y(2))+0.603384E-10.*y
(1).^2.*( ...
    0.28815E3+(-0.65E-2).*y(5)).^0.425588E1.*(k.*(kk*(-0.46365E0)+(-
1).*kk*y(7)+y(2)) ...
    +ki.*(st+kk*y (6).^(-1).*y (1).*sin(y(2)+atan((30000-y(4)).^(-
1).*y(5)))))+2000.* ...
    sin(0.24E0.*(k.*(kk*(-0.46365E0)+kk*(-1).*y(7)+y(2))+ki.*(st+kk*y (6).^(-
1).*y (1).*sin( ...
        y(2)+atan((30000-y(4)).^(-1).*y(5)))))));

```

```

st=dy(2);
tt(length(tt)+1,1)=st;
tt(length(tt)+1,2)=t;

```

```

dy(1)=y (3).^(-1).*(2000.*cos(0.24E0.*(k.*(kk*(-0.46365E0)+kk*(-
1).*y(7)+y(2))+ki.*(dy(2)+ ...
    kk*y (6).^(-1).*y (1).*sin(y(2)+atan((30000-y(4)).^(-
1).*y(5))))))+(-0.98E1).*y (3).* ...
    sin(y(2))+(-0.957364E-11).*y (1).^2.*(0.28815E3+(-0.65E-2).*y(5)) ...
    .^0.425588E1.*(0.2E0+0.945456E0.*(k.*(kk*(-0.46365E0)+kk*(-
1).*y(7)+y(2))+ki.* ...
    (dy(2)+kk*y (6).^(-1).*y (1).*sin(y(2)+atan((30000-y(4)).^(-
1).*y(5))))).^2));
dy(6)=(-1).*y (1).*cos(y(2)+atan((30000-y(4)).^(-1).*y(5)));

```

```

dy(7)=(-1).*y (6).^(-1).*y (1).*sin(y(2)+atan((30000-y(4)).^(-1).*y(5)));

```

```

dy(3)=-0.46;

```

```

dy(4)=y(1)*cos(y(2));

```

```

dy(5)=y(1)*sin(y(2));

```

```

dy=dy';

```

```

end

```