# 第一章 飞机运动方程推导

## 1.1 飞机运动的质心动力学方程

### 1.1.1 风轴系下飞机运动的质心动力学方程

在平面大地假设下（），以气流轴系为动坐标系，取质心为动点，则动点始终位于动坐标系的原点，因此，动点相对动坐标系原点的矢量。

由动点相对惯性系的加速度在动系的投影计算公式为：



因此质心相对地轴系加速度在风轴系的投影满足：



地轴系速度在风轴系中的坐标满足公式：



其中，表示由地轴系到风轴系的旋转矩阵。又由于在地轴系中加速度与速度存在关系：



由(1.3)和(1.4)可以得到：



地轴系中加速度与风轴系中加速度存在关系：



将(1.5)式代入(1.6)式可得：



又由于存在关系：



因此由(1.7)式得出：



以矩阵形式表示为：



飞机的外力由可控力和重力构成



可控力为气动力和推力的和：



重力在风轴系下的表示为：



将(1.11), (1.12), (1.13)联立，应用牛顿第二方程得到风轴系中的力方程：



### 1.1.2 体轴系下飞机运动的力方程与力矩方程

#### 1.2.1 体轴系下飞机运动的质心力方程

与风轴系下飞机运动的力方程类似，在体轴系下，飞机的质心加速度为：



因此有：



体轴系中的力方程为：



应用牛顿第二定律可知飞机在体轴系下运动的力方程为：



#### 1.2.2 飞机在体轴系中运动的力矩方程

由 中的力矩方程：



可以推得中的力矩方程为：



设发动机转子 为常量，且在体轴系中为x方向，且飞机存在对称平面，有：



因此：



体轴系下力矩可以表示为：



因此由体轴系下力矩方程：



## 1.2 飞机运动学方程

### 1.2.1质心运动学方程

由于地速 、空速 以及风速 存在关系：



因此有：



因此在无风条件下飞机风轴系质心运动学方程为：





### 1.2.2转动运动学方程



飞机转动满足方程：



在平面大地假设下， ，则：



即：



因此飞机转动运动学方程为：



## 1.3 体轴系下风速为0时6自由度全量方程

联立体轴系下飞机质心动力学方程和运动学方程以及转动动力学方程和运动方程，即可得到飞机在体轴系下风速为0时6自由度全量方程：



# 第二章 对称定常直线平飞的小扰动线化运动方程

以对称定常直线平飞为基准运动状态，扰动运动为：



## 2.1 纵向运动方程小扰动线化处理

纵向运动方程为： 



进行小扰动线化，有



对于基准状态下的纵向运动方程为：



联立（2.3）和（2.4）可以的到飞机纵向小扰动方程为：



由于力和力矩可以用如下导数形式表示：



将上方程组代入(2.5)可得



纵向方程组状态变量 ，控制变量 ，可将(2.7)化为 的形式：



## 2.2 横侧向运动方程小扰动线化

飞机横侧向运动方程为：



基于定常直线平飞做小扰动处理，得到：



由基准状态运动方程：



代入(2.10)得到：



将上述方程组整理可得：



又由于力和力矩可以用如下形式表示：



因此小扰动线化方程为：



对于横侧向状态变量 以及横侧向控制变量 可得小扰动线性方程：



# 第三章 F16各状态变量在不同情况下的时域响应

## 3.1 F16 数据

### 3.1.1 飞机惯性数据

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 重量（kg） | 转动惯量（kg-m2） | | | |
|  |  |  |  |  |
| 9298.643585 | 12874.8446 | 75673.6077 | 85552.095 | 1331.4130 |

表1 飞机惯性数据

### 3.1.2 飞机几何尺寸

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 翼展 (m) | 机翼面积 (m2) | 平均气动弦 (m) |
| 9.144 | 27.87 | 3.45 |

表2 飞机几何尺寸

## 3.2 飞机运动全量方程组

将飞机惯性数据，气动数据、状态数据代入全量方程可以得到该飞机的全量方程：



其中气动力和气动力矩为：



气动力系数可以按如下方式通过插值求出：



## 3.3 纵向气动力配平

以高度10,000m，飞行速度190m/s的定常直线平飞运动状态作为基准状态，对飞机进行纵向气动力配平

纵向力和力矩方程为：



纵向气动力和力矩方程表达式为：



因此对于给定的定常直线平飞状态，纵向力和力矩方程为：



由气动力系数，，，方程转化为



## 3.4 大气密度计算

由于不同的大气密度计算公式算出的大气密度差别很大，所以采用常用的大气模型，1976年美国标准大气 模型USSA76，该模型以地理纬度45°32′33″地区海平面为基准，全年实际大气参数的统计平均值为标准大气参数。大气基准值为：温度288.15K，密度1.225kg/m3，声速340.294m/s。USSA适用高度范围为0-1000km，并分成低层和高层部分。低层高度为0-86km，在这里只介绍低层大气。

低层大气为完全气体，重力加速度为，h为海拔高度，=9.80665m/s2 与对应的地球半径R=6356766m，因此

当h满足 时，有：



在高度为10000m时，有，

## 3.4 求解纵向气动力配平方程

将飞机气动参数和大气参数代入方程组求解，可解得以高度10,000m，飞行速度190m/s的定常直线平飞运动状态下，飞机的配平参数为：



将以上结果代入(3.6)第一个方程，可以得到推力开度

## 3.5 小扰动线化方程

### 3.5.1 纵向小扰动线化方程

通过上一节解得的飞行状态和配平参数，对飞机的纵向小扰动线化方程：



各气动力的值推导如下：

由 ，可以得到：



由 可以得到：



由 ，可以得到



将上述导数代入方程(3.10)，可以得到

