

基于 Matlab 无人机数学模型仿真分析与研究

荣辉 李冬 殷堂春

(63880 部队, 济源 454650)

摘要 无人机数学模型的研究和建立是其飞行实时仿真系统和研究其飞行控制律设计的基础, 针对某型无人机进行飞机运动方程的建模与仿真研究, 建立了飞机六自由度非线性飞行运动学和动力学模型, 并在 Matlab/SIMULINK 软件环境下建立数字仿真模型和线性化模型。飞行仿真模型采用了模块化的设计结构, 具有一定的通用性。

关键词 无人机 六自由度非线性模型 Matlab 模型跟随控制

中图分类号 V279; **文献标志码** A

无人机模型的建立是研究无人机飞行实时仿真系统和飞行控制系统工作的基础, 也是仿真系统逼真程度的关键所在。利用 Matlab 进行系统仿真, 免去了大量经常重复的矩阵运算和数据分析等繁琐的编程工作, 其数值计算结果可以直接在 Matlab 环境下用曲线和曲面等形式表示出来, 因此利用其强大功能进行无人机模型仿真研究成为本文内容研究途径的首选。

根据仿真的目的和内容, 模型的描述可选择恰当的复杂程度。总之, 仿真模型尽可能地复现真实对象是无人机模型仿真研究的主要内容。这里首先以某型无人机为研究对象建立其数学模型, 在 Matlab 环境下对其进行仿真研究。

1 无人机数学模型的基本假设

无人机在空间运动有六个自由度, 包括质心的三个移动自由度(前后、上下、左右)和绕质心的三个转动自由度(滚转、俯仰、偏航), 如图 1 所示。由于其系统庞大、结构复杂、气动数据多, 所以建立完整的六自由度全量飞机模型比较困难。为了获得飞机六自由度运动的非线性微分方程, 做如下假设:

(1) 认为飞机是刚体, 不考虑机翼、机身和尾翼的弹性自由度, 而且质量是常数。

(2) 假设地面为惯性参考系, 即假设地坐标为惯性坐标。

(3) 忽略地面曲率, 视地面为平面。

(4) 假设重力加速度不随飞行高度的变化而变化。

(5) 假设本体坐标系的 Oxz 平面为飞机对称平面, 且飞机不仅几何外形对称, 而且内部质量分布也对称, 惯性积 $I_{xy} = I_{yz} = 0$ 。

(6) 假设大气是静止的标准大气。

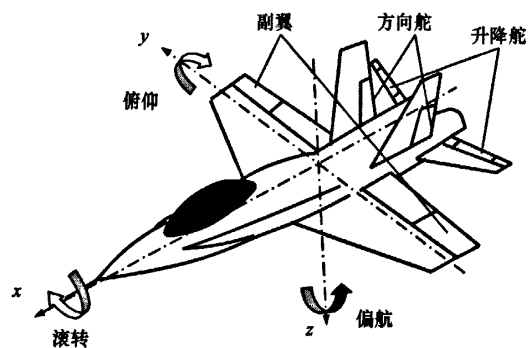


图1 无人机常规气动操纵面布局

2 无人机运动的仿真

进行飞机运动模态分析时, 线性系统理论是主要的理论工具, 数值计算与分析工具利用 Matlab 软件。

2.1 无人机运动方程的线性化

无人机非线性数学模型用于计算机仿真, 验证

2007年11月20日收到

飞行控制系统的性能。但对于非线性方程,一般只能用数值法求解。为便于研究飞行器的稳定性和操纵性,最常用的方法是利用小扰动原理,将微分方程线性化,这样就可能用解析法求解或进行解析研究,并从中归纳出普遍规律,确定飞行品质指标,作为飞行器设计的指南^[1]。

纵向运动是在基准运动平面,即飞机对称平面内发生的运动。纵向运动的状态变量是:飞行速度 V ,迎角 α ,俯仰角 θ ,航迹倾角 γ ,俯仰角速度 q ,升降舵偏角 δ_e 等。

横侧向运动是偏离基准运动平面(即飞机对称平面)的运动。横侧向运动的状态变量是:侧滑角 β ,滚转角 φ ,偏航角 ψ ,航迹方位角 χ ,滚转角速度 p ,偏航角速度 r ,方向舵偏角 δ_r ,副翼舵偏角 δ_a 。

在 Matlab 中提供了一个线性化函数 `linmod`,利用这个函数可以很方便地对非线性模型进行线性化处理。将飞机模型在配平得到的状态平衡点和输入平衡点处运用该函数,就可以得到线性模型。它的格式为

$[A,B,C,D] = \text{linmod}('sys', x, u)。$

其中, 'sys' 是 Simulink 模型的名称, x 和 u 分别为状态向量和输入向量, A,B,C,D 为线性模型的系数矩阵。

一般而言,应该对飞机模型在全包线内,取不同的高度、速度、姿态角下的若干典型状态配平,这样才能全面反映飞机的总体稳定性^[2]。这里选取飞机平飞状态的一个配平点:

$$\begin{aligned} x_0 &= [V, \alpha, \beta, p, q, r, \varphi, \theta, \psi, P_x, P_y, H]^T = \\ &[88 \ 0 \ 0.159 \ 3 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.001 \ 8 \ 0 \ 0 \ 0 \ 800]^T, \\ u_0 &= [\delta_e, \delta_r, \delta_a, \delta_T]^T = \\ &[-0.043 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0.980 \ 5]^T \end{aligned} \quad (1)$$

利用 `linmod` 命令对非线性飞机模型进行线性化,可得到线性化模型的状态空间描述形如

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) \end{cases} \quad (2)$$

再利用函数 `[Wn,Z,P] = damp(A)` 求出系统的特征值、阻尼比、自然频率,然后可得出对应的运动模态,如表 1 所示。

表 1 各运动模态的特征值、阻尼比与自然频率

运动模态名称	特征值	阻尼比	自然频率/rad · s ⁻¹
长周期模态短周期模态	-0.0293 ± 0.5597i	0.048 9	0.660 4
荷兰滚模态	-2. 9715 ± 2. 9456i	0.692 6	4.964 9
螺旋模态	-0.1794 ± 2.2872i	0.081 4	2.488 9
滚转阻尼模态	0.047 3	-1.000 0	0.047 3
	-3.269 1	1.000 0	3.269 1

从表 1 可以看出,前两组特征值对应了飞机纵向运动的长周期模态和短周期模态。长周期模态对应着一对较小的共轭复根,具有振荡周期长、衰减慢的特点;短周期模态对应着一对较大的共轭复根,通常具有振荡周期短、衰减快的特点。后三组特征值对应了飞机横侧向运动的荷兰滚模态、滚转阻尼模态和螺旋模态。荷兰滚模态周期短、阻尼小;滚转阻尼模态对应了一个大负根,受机翼产生的较大阻尼力矩的阻止而很快结束;一个小的正根对应着螺旋模态。

3 模型的运动仿真

对于无人机常规布局,其模态特性呈现一定的规律^[3]。下面以无人机纵向运动为例,对其开环线性模型进行仿真,分析其运动模型特点。将飞机线性化模型分解成互相不耦合的纵向运动和横侧向运动两部分。其中,纵向运动线性模型为:

$$\begin{cases} \dot{x}_{long} = A_{long}x_{long} + B_{long}u_{long} \\ y_{long} = C_{long}x_{long} \end{cases} \quad (3)$$

(3)式中,系数矩阵分别为:

$$\begin{aligned} A_{long} &= \begin{bmatrix} -0.101\ 4 & 0.172\ 2 & -0.153\ 2 & -32.173\ 9 & 0 \\ -0.716\ 2 & -3.751\ 0 & 84.619\ 6 & -0.057\ 3 & 0 \\ 0.041\ 2 & -0.153\ 2 & -3.724\ 4 & 0.000\ 7 & 0 \\ 0 & 0 & 1.000\ 0 & 0 & 0 \\ -0.001\ 8 & 1.000\ 0 & 0 & -88.000\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\ &\quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_{long} &= \begin{bmatrix} -5.118\ 4 & -29.617\ 9 & -32.828\ 8 & 0 & 0 \\ 4.596\ 3 & 0 & -1.427\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \\ &\quad (5) \end{aligned}$$

$$C_{long} = \text{diag}([1,1,1,1,1]) \quad (6)$$

状态向量为: $x_{\text{long}} = [V, \alpha, q, \theta, H]^T$, 控制向量为: $u_{\text{long}} = [\delta_e, \delta_r]^T$ 。

在图 2 中给出了无人机的升降舵为脉冲偏转时纵向运动各个状态变量的响应情况。在外界瞬时扰动作用下, 各运动参数随时间变化的规律是两种典型模态运动的叠加。

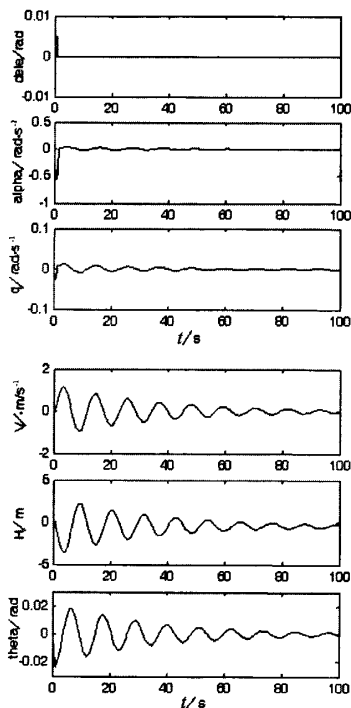


图 2 升降舵为脉冲输入纵向运动各变量的响应

从图 2 中可以看出, 在短周期运动中, 迎角 α 和俯仰角速度 q 的幅值变化剧烈, 短周期结束后变化就很小了。飞行速度 V 与高度 H 在短周期幅值变化小, 主要体现的是长周期运动。而俯仰角 θ 在短周期和长周期都有变化, 但主要体现长周期运动的特点。所以, 迎角 α 和俯仰角速度 q 属于短周期运动模态, 飞行速度 V 与俯仰角 θ 则属于长周期运动模态。

纵向运动各输出变量的响应曲线如图 3 所示。从图 3 中曲线可以看出, 开环飞机的纵向运动输出响应曲线不同程度的出现振荡, 不能够满足飞机稳定性的要求, 表明, 随着现代飞机的飞行包线(飞行速度和高度的变化范围) 逐渐扩大, 越来越复杂的

飞行任务对飞机性能的要求也越来越高, 仅仅依靠飞机自身气动布局和发动机的设计所获得的飞机性能已经很难满足复杂飞行任务的要求。

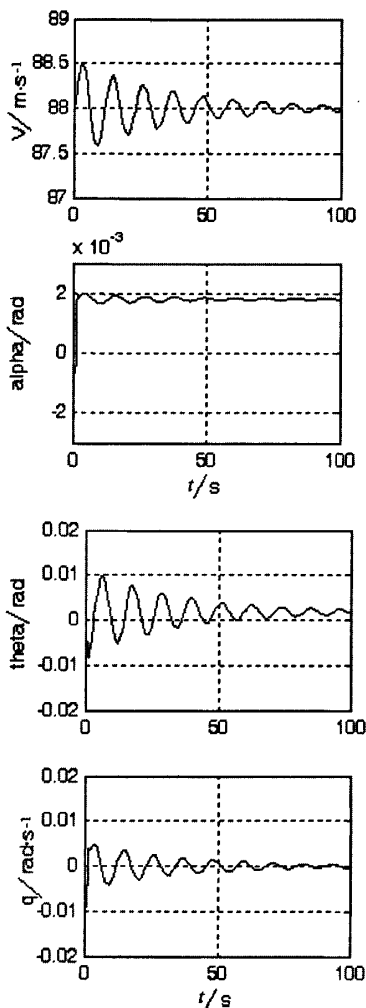


图 3 升降舵为脉冲输入时非线性模型纵向运动各变量的响应

4 结论

本文以某型无人机为研究对象, 首先, 推导、建立了飞机运动的六自由度数学模型; 其次, 在数学模型建立的基础上, 利用 MATLAB/SIMULINK 软件环境, 对非线性方程采用 S-function 来实现, 构建了飞机仿真模型; 最后, 对线性化后的无人机, 分析了

(下转第 1535 页)

study on CBM would be concentrated on the fifth and sixth modules of OSA-CBM are also provided. The method and framework of building mathematical model to make health assessment and maintenance decision for equipments are also proposed for these two components.

[Key words] condition based maintenance technical standard OSA-CBM health assessment

(上接第 1504 页)

Fault Diagnosis of Aeroengine Gas Path Based on Small Deviation Method

SONG Jiang-tao, LEI Yong

(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China)

[Abstract] How to build the fault diagnosis matrix of the aero engine in the stable condition is presented based on the small deviation method. Moreover, the fault diagnosis matrix of a certain turbojet engine is built and the validity is proved by the experimental data. Not only the physical quantities have the definite meaning in the small deviation method but also the construction of the system of the gas path fault diagnosis is simple, so this method is value to the manufacture, the test run and the maintenance of the aero engine.

[Key words] fault diagnosis small deviation method turbojet engine gas path diagnosis

(上接第 1512 页)

其运动模态等特性,并以纵向运动为例,进行了仿真研究,这样就可能通过进一步论证,并从中归纳出普遍规律,确定飞行品质指标,可为无人机的设计和改进提供技术指南。

参 考 文 献

- 1 方振平,陈万春. 航空飞行器飞行动力学. 北京:北京航空航天大学出版社,2005
- 2 肖业伦. 航空航天器运动的建模. 北京:北京航空航天大学出版社,2003
- 3 吕秀平,李小民,杨毅. 基于 Windows CE.NET 平台的串行通信实现. 科学技术与工程,2007;7(8):1752—1754

Analysis and Research on Matlab Based Simulation for Mathematical Model of the UAV

RONG Hui, LI Dong, YIN Tang-chun

(No. 63880 Unit of PLA, Jiyuan 454650, P. R. China)

[Abstract] The mathematical model of the unmanned aerial vehicle is a fundamental part of the real-time flight simulation system and flight control laws design. A six degrees-of-freedom non-linear model of an aircraft is first developed based on the flight characteristic data of the unmanned aerial vehicle. This model comprises of two main parts which are the formulation of equations of motion and the computation of forces and moments. The emulation model of block diagram and the linearized model are both developed in the Matlab/SIMULINK environment, and these models have modular structure and certain commonalities.

[Key words] unmanned aerial vehicle six degrees-of-freedom non-linear model Matlab model-following control