

基于实现预期空战机动的飞机运动模型

李嘉林¹, 胡孟权², 徐浩军², 李晓勇³

(1. 空军工程大学理学院, 陕西西安, 710051; 2. 空军工程大学航空航天工程学院, 陕西西安, 710038;
3. 空军工程大学空管与领航学院, 陕西西安, 710051)

摘要 在研究空战战术和作战效能时, 往往先确定期望的机动动作, 继而解算预期动作的飞机动力学参数。针对如何建立既具有准确动力学特性又能适应空战机动研究的空战机动模型的问题, 建立了实现预期空战机动的简化飞机动力学模型, 用机动过载大小和方向、发动机状态或速度作为机动动作的输入量, 较好地飞行员的机动意图转换成机动控制的输入。同时, 考虑飞机的实际限制, 确定了飞机六自由度参数, 并以飞机刚体六自由度模型为参照进行了机动仿真, 比较了仿真结果。结果表明文中模型仿真精度高, 简单实用, 适用于空战仿真研究。

关键词 预期空战; 机动; 动力学; 建模仿真

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.01.001

中图分类号 V211 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)01-0001-04

Aircraft Dynamic Model for Realizing the Expected Air Combat Maneuvers

LI Jia-lin¹, HU Meng-quan², XU Hao-jun², LI Xiao-yong³

(1. Science College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;
3. Air Traffic Control and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: In air combat tactics and efficacy researching, it is often first to define the expected aircraft's maneuvers, then the dynamics parameters related to the maneuvers need to be determined. Aimed at this problem, the paper discusses the air combat maneuver modeling which has accurate dynamics property and also suits the need of air combat research. The simplified dynamic model is set up, in which the imports are aircraft's load vectors and engine's state or aircraft's velocity are taken as the imports of maneuverable action, these imports have close connection with air combat maneuver description and well transform the intension of pilot into the maneuver's control input. The simulation results show that the model is high in simulation precision, simple, practical and suitable for air combat tactics simulation.

Key words: expected air combat; maneuvers; dynamics; model and simulation

飞机空战机动的仿真通常采用六自由度刚体动力学模型, 通过输入驾驶杆的操纵量或是舵面操纵量, 解算飞机运动参数, 确定机动动作。但是, 研究

空战战术问题时往往需要先确定期望的机动动作来实现空战目的, 对仿真而言, 即是要解算预期动作的飞机动力学参数^[1-3]。若用飞机六自由度刚体动力

收稿日期: 2012-08-26

基金项目: 陕西省电子信息系统综合集成重点实验室基金资助项目(2011ZD04)

作者简介: 李嘉林(1961—), 男, 四川内江人, 教授, 主要从事飞行器设计、飞行仿真研究。

E-mail: lijialin200@163.com

学方程求解,则是解方程的逆问题,求得飞机输入舵面操纵量或驾驶杆量,这些量与空战机动运动的物理联系不紧密,无法把执行战术的机动用驾驶杆或舵面输入描述出来,所以飞机六自由度刚体动力学模型不适用。在精度要求不高的情况下,如作为目标机的机动参数,可以直接按设计的机动动作给出飞机运动参数,只要不超过飞机机动能力限制就可行。随着空战推演过程对机动过程参数要求越来越精确,如果仅仅直接给出飞机机动过程的参数时间历程,参数的准确性和协调性不够,同时也难以准确反映飞机的动力学特性。本文探讨了既要具有更加准确的动力学特性,又能适应空战机动问题研究的空战机动模型建模问题,并用计算机程序实现了模型解算。

1 建模需求分析

1.1 准确性

当前空战战术的研究常常需要考虑传感器、武器等多个机载系统的使用过程,飞机作为机动平台支持机载系统和武器的使用,要求飞机机动模型解算的飞机运动参数更加符合其真实的动力学特性,支撑空战战术推演结论的可用性。建模时必须考虑作为飞机质点机动能力的限制,用可行的机动过载确定相应的飞机六自由度运动参数。

1.2 实用性

作战人员根据空战目的,采用适当的机动动作,使用通信、探测器和武器等装备,完成战术过程。使用者关注于完成作战的机动动作的描述,而机动动作分解为飞行速度、过载以及过载方向的描述是比较直观的,为此建立用速度、过载等参数作为模型输入量的飞机运动仿真模型,解决了从机动动作描述与速度、过载描述的一致性,最终实现飞机按预期机动进行的运动仿真。

2 空战机动模型结构

空战机动是一系列连续的机动动作,输入为机动动作序列,输出为飞机运动参数。本文空战机动运动参数的解算逻辑关系见图1。

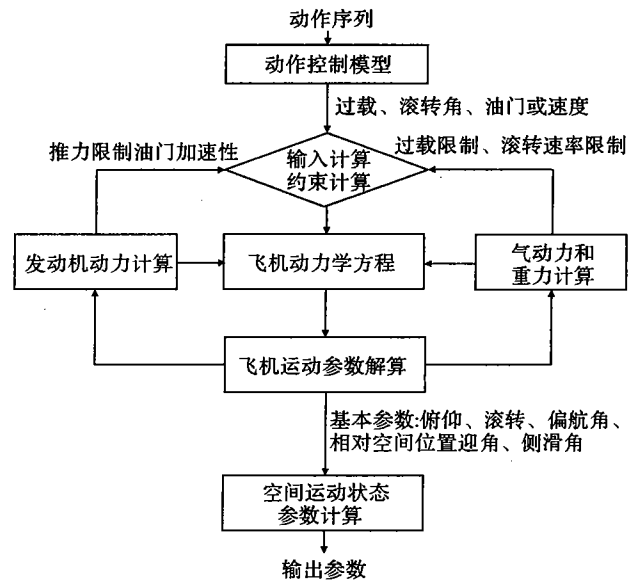


图1 空战机动运动模型结构

Fig. 1 Structure of air combat maneuvers models

3 机动动作动力学模型

动力学模型由飞机动力学方程、发动机动力计算、气动力和重力计算以及飞机运动基本参数解算模型4个部分联立构成。考虑到空战时的机动特点,发动机推力模型主要采用计算稳态力方法,可以考虑发动机油门变化的推力响应过程,计算得到推力时间历程 P 。气动力计算采用稳态计算模型。重力计算采用常值模型。

飞机动力学方程和运动学解算模型是根据飞行员控制表述解算动力学方程和计算所需运动参数的数学方法。飞行员控制表述是飞行员对机动的输入描述,即将机动动作的控制描述为机动时的机动过载(包括过载的方向)、发动机状态,这样更符合的空战机动预期。选取机动过载、发动机状态作为输入量,更符合飞行员对机动动作的控制习惯。如水平盘旋是将法向过载偏离铅垂面,并保持一定的滚转角,使过载达到 $n_y = \frac{1}{\cos\gamma}$ 的机动。为简化模型的复杂程度,用速度轴系滚转角 γ_s 表示飞行员对滚转趋势的描述。针对不同的机动动作要求,模型分为给定发动机推力状态或给定飞行速度两部分。当机动要求给定飞行速度时,发动机动力模型计算动力限制条件,约束飞行速度。当给定发动机推力状态时,发动机动力模型计算推力,提供解算速度的约束条件。所以机动模型的输入量为 $(n_y, \gamma_s, \varphi)|_i$ 或是 $(n_y, \gamma_s, v_{tr})|_i$,式中 φ 为油门位置, v_{tr} 为真空速。

模型假设空战中飞行员始终使得侧滑角很小,令 $\beta=0$,简化了输入量和气动侧力的计算。采用在

航迹坐标系下的质心动力学方程^[4]为:

$$\begin{cases} \dot{\psi}_h = \frac{1}{m} X_h \\ \dot{\theta} = \frac{1}{m v_{tr}} Y_h \\ \dot{\psi}_s = -\frac{1}{m v_{tr} \cos \theta} Z_h \end{cases}$$

将输入量分解在合力中,有合力表达式为:

$$\begin{Bmatrix} X_h \\ Y_h \\ Z_h \end{Bmatrix} = C_{tu} \begin{Bmatrix} P \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} + C_{hq} \begin{Bmatrix} X \\ mg \cdot n_y \\ Z \end{Bmatrix} + C_{hd} \begin{Bmatrix} 0 \\ mg \\ 0 \end{Bmatrix}$$

式中:气动阻力 X 由过载和极曲线确定,侧力与侧滑相关, $\beta=0, Z=0$; C_{tu}, C_{hq}, C_{hd} 分别为飞机机体轴系、速度轴系、地面轴系到航迹轴系的坐标转换矩阵,可由 $\theta, \gamma_s, \psi_s, \alpha, \beta$ 等参数求得^[5]。式中 P 为发动机动力模型的推力值,当机动输入是速度时, P 满足航迹切线方向合力平衡。

根据运动学关系,飞机空间位置由航迹轴系和地面轴系的关系得到:

$$\begin{Bmatrix} v_{dx} \\ v_{dy} \\ v_{dz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \cos \theta \cos \psi_s \\ \sin \theta \\ \cos \theta \sin \psi_s \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} v_h \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

飞机姿态参数由下式确定:

$$\sin \vartheta = \sin \theta \cos \alpha + \cos \theta \sin \alpha \cos \gamma_s + \Delta \vartheta_w$$

$$C_{td} = C_{th} \cdot C_{hd}$$

式中: $\Delta \vartheta_w$ 为风速的影响修正量; C_{td}, C_{th}, C_{hd} 分别为地面轴系、航迹轴系到飞机机体轴系以及地面轴系到航迹轴系的坐标转换矩阵。

4 模型验算与分析

用飞机刚体六自由度模型为参照,以驾驶杆为输入,控制飞机进行俯仰和横侧机动运动,记录过载和滚转角并作为本文模型的输入,再进行机动仿真,比较 2 个模型的计算结果,见图 2~5,带 * 号的为本文模型结果。

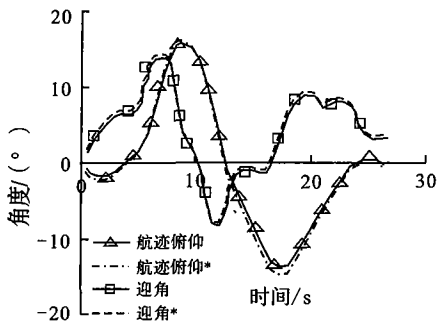


图 2 俯仰机动俯仰角迎角时间历程对比

Fig. 2 Compare of the history for longitudinal maneuver

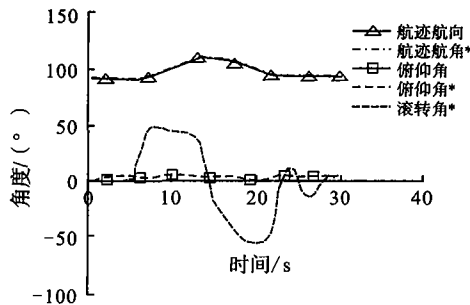


图 3 滚转机动航向角滚转角时间历程对比

Fig. 3 Compare of the history for lateral maneuver

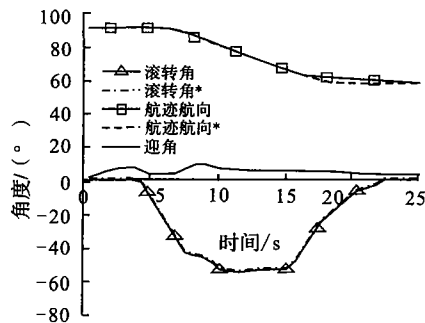


图 4 水平转弯滚转角航向角时间历程对比

Fig. 4 Compare of the history for level turn

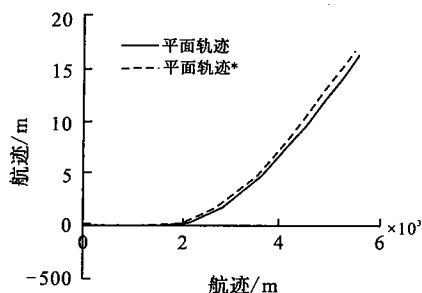


图 5 水平转弯平面航迹投影对比

Fig. 5 Compare of the track of level turn

计算结果表明,本文模型具有较高的准确度,与六自由度刚体动力学模型相比,飞机运动参数差别不大。经过对解算模型的内部中间数据进行分析,飞机位置姿态数据的差异主要来自参考模型初始状态未配平,导致计算速度随时间进程而差异增大引起偏差。该偏差性质和大小属于正常的、可接受的范围。

5 结语

本文建立了实现预期空战机动的简化飞机动力学模型,确定了飞机六自由度参数,其解算结果与经典的飞机刚体六自由度模型很接近,说明模型的仿真精度适用于空战仿真研究。模型用机动过载大小和方向、发动机状态或速度作为机动动作的输入量,可以更好地将飞行员的机动意图转换成机动控制的输入,在空战实时推演、武器模型验证、空战战法研

究等方面具有较强的实用性。需要注意的是,模型不适用于过失速机动、尾旋等极限空战机动情况。

参考文献(References):

- [1] 童中翔,董小龙,李传良. 超视距空战机动动作库的可视化设计[J]. 火力与指挥控制,2006,31(7):59-62.
TONG Zhongxiang, DONG Xiaolong, LI Chuanliang. Visual design of BVRAC maneuver movements [J]. Fire control and command control, 2006, 31(7): 59-62. (in Chinese)
- [2] 梁鸿飞,范广才,董彦非. 空战战法训练系统目标机飞行轨迹实现[J]. 计算机仿真,2005,22(12):32-34.
LIANG Hongcai, FAN Guangcai, DONG Yanfei. Generation of target aircrafts flight track in air combat plan simulation [J]. Computer simulation, 2005, 22(12): 32-34. (in Chinese)
- [3] 万路军,姚佩阳,孙鹏,等. 空中对抗机动飞行实时评估方法研究[J]. 火力与指挥控制,2012,37(7):31-36.
WAN Lujun, YAO Peiyang, SUN Peng, et al. Real time evaluation method for flight manipulation in countering [J]. Fire control and command control, 2012, 37(7): 31-36. (in Chinese)
- [4] 陈廷楠. 飞机飞行性能品质与控制[M]. 北京:国防工业出版社,2007:106-121.
CHEN Tingnan. Flight performance and control of aircraft[M]. Beijing: National defense industry press, 2007: 106-121. (in Chinese)
- [5] 航空气动力手册编写组. 航空气动力手册[M]. 北京:国防工业出版社,1975:28-35.
Editorial office of manual of aerodynamics. Manual of

aerodynamics[M]. Beijing: National defence industrial press, 1975: 28-35. (in Chinese)

本刊相关链接文献:

- [1] 刘思源,张蕾,姚佩阳,万路军. 战术飞行机动动作仿真设计与实现[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2011,12(5):20-24.
- [2] 邹毅,姚宏. 飞机大攻角俯仰飞行的稳定域分析[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2006,7(4):11-12.
- [3] 税清才,孙本华. 基于飞机空气动力和动力学方程的非线性分析李雅普诺夫稳定性[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2003,4(3):12-15.
- [4] 张建邦,程邦勤,王旭. 飞机扰动运动方程特征根的数值求解[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2002,3(4):81-83.
- [5] 邹仕军,胡孟权,李嘉林. 某型战斗机六自由度动力学建模与仿真[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2005,6(6):10-12.
- [6] 白双刚,胡孟权,段进坦. 舰载机弹射起飞六自由度静平衡分析[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2012,13(3):21-24.
- [7] 杨蔷薇,占正勇. 无人机指令生成器设计[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2010,11(3):21-25.
- [8] 薛源,徐浩军,胡孟权,郭辉,柴世杰. 基于四元数法飞行运动方程的逆向仿真算法[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2010,11(3):6-10.
- [9] 姚佩阳,薛艺莉,王冬旭. 迎头抢攻飞行轨迹数学建模及评估[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2010,11(2):6-10.

(编辑:徐敏)