

战术飞行机动动作仿真设计与实现

刘思源¹, 张 蕾², 姚佩阳¹, 万路军¹

(1. 空军工程大学电讯工程学院, 陕西 西安 710077; 2. 中国人民解放军驻 631 所代表室, 陕西 西安 710068)

摘要 针对数据链飞机模拟器中飞行平台轨迹的终端实时显示问题,以飞机动力学运动方程为基础,构建了盘旋机动和斤斗机动过程的轨迹方程,并给出了机动动作设计的一般流程。通过建立基于时间戳的自适应交互多模(AIMM)时延补偿模型,使飞机动作显示与实际作战网络负载下的飞机状态保持同步。最后设定2种机动动作场景,对飞行机动轨迹予以演示,验证了所设计的可视化平台能有效模拟飞机进行盘旋和斤斗机动,实现了地面指挥所对模拟飞机飞行状态的实时监控,为空战仿真模拟训练奠定基础。

关键词 战术飞行;飞行模拟器;机动动作;数据链

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2011.05.007

中图分类号 V271.4 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2011)05-0030-05

随着作战飞机性能的不断提高,现代空中战场态势瞬息万变,为占据有利态势,作战飞机需要机动灵活地改变飞行高度、速度、航向、坡度等飞行诸元。为了对指挥人员和飞行人员进行有效的训练,使其满足现代空战对作战人员能力的要求,在指挥控制系统平台上,飞机机动动作的仿真显示成为关注的热点。作战飞机典型的机动动作^[1-2]有半滚倒转、半斤斗翻转、跃升、斤斗、(左、右)盘旋、70°机动、90°机动、置尾机动、双180°机动、S机动、8字型机动、椭圆机动、球形机动、70°分开、90°分开、扇形分开和置尾分开等。这些复杂机动动作均是在水平飞行、水平加速、水平减速、定常左转弯、定常右转弯、盘旋和斤斗等基本典型动作的基础上组合或者演变得来^[3]。本文以盘旋和斤斗为例,对飞行模拟器中的机动动作模块的软件系统进行分析与设计,并对机动动作飞行轨迹进行显示,使地面指控中心在观察飞行姿态同时获取飞行数据^[4],提高了战斗人员对机动动作和空中态势的理解和认识。

1 基于数据链的机动动作设计

机动动作设计^[5]是按照一定的控制参数变化规律,依据给定的初始和限制条件,求解飞机的运动方程,并根据态势描述控制参数变化规律。机动动作设计首先要确定动作类型,并加载动作的控制变量,按照控制量要求值输出飞机轨迹。读取模拟飞行参数,将信息通过数据链模块传至地面指控中心。地面控制中心可根据态势需要,调整动作或改变控制变量,利用数据链模块将指令上传。数据信息的上传和下载过程,要进行时延补偿处理,使轨迹显示更接近于实际作战环境。基于数据链机动动作设计的一般流程见图1。

1.1 飞机动力学运动方程

飞机模拟器中对飞行机动进行仿真,采用飞行器的质心运动方程组^[6],不仅是由于它简单,还因为在系统的整体设计中不可能取得飞机控制系统的完整数据。不考虑侧滑角和侧力项,质心动力学方程组为:

* 收稿日期:2011-04-12

基金项目:国家“863”计划资助项目(2010AAJ146)

作者简介:刘思源(1986-),女,陕西西安人,硕士,主要从事指挥控制信息决策支持系统研究。

E-mail:kekeyinyi@sina.com

$$\begin{cases} \dot{v} = g(n_x - \sin\phi) \\ \dot{\theta} = \frac{g}{v}(n_y \cos\gamma_s - \cos\phi) \\ \dot{\psi}_s = -\frac{g}{v \cos\phi} n_y \sin\gamma_s \end{cases} \quad (1)$$

式中: v 为飞机质心对地速度; ϕ 为轨迹倾斜角; ψ_s 为轨迹航向角; γ_s 为绕速度矢量的滚转角; n_x 为切向过载; n_y 为法向过载; g 为重力加速度。飞机动力学方程中的运动状态变量为 v 、 ϕ 、 ψ ,控制变量为 n_x 、 n_y 、 γ_s 。

假设飞机的几何、质量和惯矩特性均为常值,且按速度坐标系给出无因次的气动力系数,则以过载系数表达的作用在飞机上的气动力可写为:

$$\begin{cases} n_x = [P(H, M) \cos\alpha - C_x(\alpha, M) qS] / G \\ n_y = [P(H, M) \sin\alpha - C_y(\alpha, M) qS] / G \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P(H, M)$ 为发动机推力,取决于飞行高度、马赫数和油门位置; $C_x(\alpha, M)$ 和 $C_y(\alpha, M)$ 为无因次气动力系数,取决于迎角和马赫数; q 为速压; G 为飞机重量; S 为机翼面积。为实现某一机动飞行动作设计,所要求的 n_x 、 n_y 、 γ_s 值以及相应的限制条件,将在后面叙述。

1.2 盘旋机动动作设计

当飞机进行盘旋机动时,飞机的盘旋运动方程^[5]应满足:

$$\begin{cases} L = D \\ L \cos\phi = mg \\ L \sin\phi = mV_p^2 / r_p \end{cases} \quad (3)$$

式中: L 为垂直于迎面空气流的升力; D 为与推力相反的阻力; ϕ 为飞行坡度; m 为飞机质量; V_p 为飞机盘旋机动速度; r_p 为飞机盘旋半径; g 为重力加速度。根据飞机盘旋运动方程,可以得到飞机盘旋半径 r_p 为:

$$r_p = mV_p^2 / L \sin\phi \quad (4)$$

盘旋是较为简单的机动方式,做动作设计时要考虑实际飞行中飞行员所能承受的最大载荷 n_y ,飞机作盘旋时,比飞机平飞时的速度扩大 $\sqrt{n_y}$ 倍,比平飞时所需的推力扩大 n_y 倍。

1.3 斤斗机动动作设计

在斤斗机动过程中,要保证飞机处于铅垂面内飞行,就要避免产生与铅垂面垂直的作用力。因此,斤斗机动不允许倾斜和侧滑。假设飞机在铅垂面内的推力与速度方向一致,其运动方程为:

$$\begin{cases} m \frac{dV_J}{dt} = P - D - G \sin\theta \\ \frac{d\theta}{dt} = \frac{g}{V_J} (n_y - \cos\theta) \end{cases} \quad (5)$$

式中: V_J 为飞机做斤斗机动时的飞行速度; P 为飞机推力; D 为飞机阻力; G 为飞机重力; θ 为仰角; n_y 为法向过载。为了生成斤斗机动飞行轨迹,除了每一瞬间的飞行高度,必须知道此时斤斗的水平坐标 ΔL 。此坐标由下式计算:

$$\Delta L = \int_0^t V_J \cos\theta dt = \frac{V_0^2 (n_y - 1)^2}{g} \int_0^\theta \frac{\cos\theta d\theta}{(n_y - \cos\theta)^3} \quad (6)$$

2 数据链时延补偿分析

实际空战环境中,作战飞机与地面之间的数据链网络的通信延时问题一直存在。造成数据链通信时延的原因包括:帧结构、通信速率、通信容量、通信距离以及多路通信方式等,其中网络负载是数据链通信时延的主要原因^[7]。为了使飞机模拟更接近于实战状态,特别针对数据链传输模块设计了时延补偿模型,依据不同网络负载下的时延值,人为增加时延时间,这样地面指控中心可以模拟出不同网络负载,并观察相应情

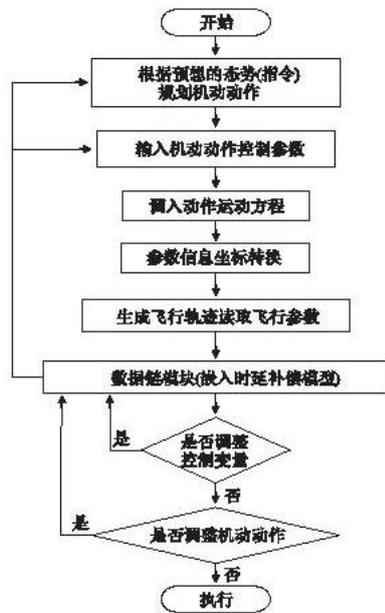


图1 机动动作设计一般流程

Fig.1 The flow of manipulation designing

况下的飞机机动动作显示。

信息按照特定的协议打包发送给接收方,在美军 Link-16 数据包结构下,数据链系统每 7.812 5 s 可以传送 3、6 或 12 个数据字(byte),每个字包含 75 bit。当网络负载为 30% 的时候,每 s 需要传送 2 160 bytes,即 17 280 bits。Link-16 的传输速率为 57 600 bps,理论上产生的端对端延时为:17 280 bits/57 600 bps = 0.300 s。实验测得的平均延时为 0.256 s。同理,当网络负载达到 60% (4 320 bytes) 时,平均延时达到 0.652 s,网络负载达到 90% (6 480 bytes) 时,平均延时更达到了 1.354 s。如果负载超过 90% 则可能导致整个网络堵塞。由于数据链主机发送数据包时,会根据实时传输协议(RTP)对每个数据包都打上一个时间戳。因此接收端收到发来的数据包后,只要根据时间戳和数据包到达时间就能计算出通信延时 t_d 。当然前提是网络各个平台时基准确同步。因此,补偿模型的基本思路是先通过数据链时间戳计算得到通信延时 t_d ,再以 t_d 为预测时间,采用机动目标跟踪模型预测当前时刻,进而完成标准时间延时设置。

对于时延补偿问题,有的学者直接采用固定运动模型进行跟踪,没有和数据链实时下传信息结合,目标运动状态与运动模型不能实时拟合,因而预测精度不高。文献[8-10]中提出一种自适应“当前”模型(ACM),该模型实时判断目标运动状态,通过改变模型信息,可以在 Singer、CA、CV 3 种不同运动状态模型之间进行切换。这种模型可以根据实时下传的平台状态信息切换模型,达到实时准确匹配目标运动。但是这种方法是通过状态方程信息的直接赋值实现的,这样的硬变换造成跟踪精度不甚理想。因此本文采用的跟踪模型由 2 个 CT 模型和 1 个 CV 模型进行交互,构建自适应交互多模模型(AIMM),通过交互多模型软切换解决模型变换时估计精度变差问题,并由数据链实时下传目标状态参数改变 CT 模型的角速度值,以实现与目标实际运动的实时匹配。

为解决模型集变换时预测精度跳动的问题,先根据数据链下传的前后 2 个相邻时刻转弯角速度的差值,是否大于设定阈值,判定目标是匀速转弯运动还是变速转弯运动(即常转弯角速度还是连续变化转弯角速度)。再采用相应的模型集自适应规则。当判定为常转弯角速度时,先将接收到数据链实时下传转弯角速度值赋予 2 个转弯模型之一的转弯角速度 ω ,当实时下传转弯角速度连续 3 个周期保持不变时,再赋予另一个转弯模型的转弯角速度 ω ,以防止由于扰动造成的预测精度跳动。当判定为连续变化转弯角速度时,先将接收到的转弯角速度值赋予其中一个模型的转弯角速度 ω ,然后根据下个时刻下传的转弯角速度值赋予另一个模型的转弯角速度 ω ,防止模型集变化过剧烈引起的预测精度跳动。

为有效说明 AIMM 模型的跟踪性能,将 AIMM 模型与 ACM 模型算法进行性能比较。假设目标做高度不变的平面运动,先向右再向左做 2 次转弯。参数设定为:目标初始位置坐标 $x_0 = 1\ 000\text{ m}$, $y_0 = 1\ 000\text{ m}$, $v_{x_0} = 200\text{ m/s}$, $v_{y_0} = 400\text{ m/s}$,在 25-45 s 期间以 $\omega(t) = -9^\circ/\text{s}$ 向右均匀转动,在 60-75 s 期间以 $\omega(t) = 7^\circ/\text{s}$ 向左匀速转动,其他时间均作匀速直线运动。航迹和模型跟踪精度见图 2-3。

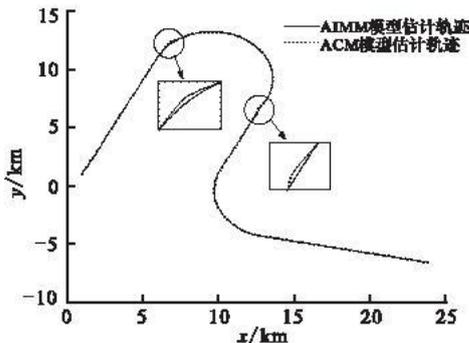


图2 AIMM 与 ACM 模型航迹预测结果对比

Fig.2 The comparing result of AIMM model

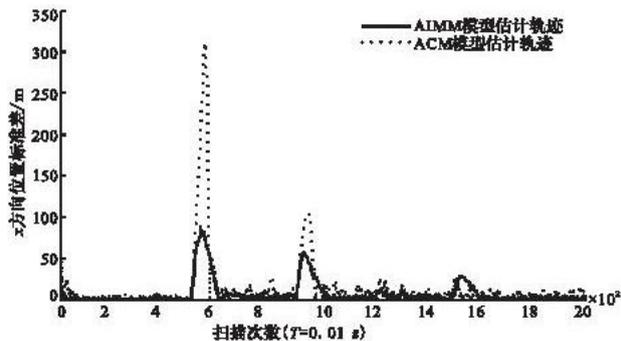


图3 航迹预测位置标准差

Fig.3 The RMS of prediction position

从图 2 和图 3 中可以看出 ACM 模型在转弯开始和结束时,航迹预测估计误差都会明显增大。而 AIMM 模型在转弯开始和结束时的航迹预测估计误差明显小于 ACM 模型。因此采用基于数据链的自适应交互多模型可以有效地提高模型预测估计精度,较为适合用作战术数据链通信延时补偿。

3 战术机动动作模块实现

3.1 盘旋机动的模拟实现

盘旋机动的基本过程为:作战飞机首先从指挥中心接收机动指令,在收到机动指令之后,进行指令确认。随后飞机到达机动的起始点,根据收到的指令进行盘旋机动,并通过数据链实时地将飞行状态回送到指挥中心,指控中心可以根据飞行参数显示当前飞机飞行状态,进行实时监控。飞机在正常盘旋机动时,速度和高度维持不变,飞机航向随盘旋过程而变化。盘旋机动的过程见图4。



图4 盘旋机动的过程示意

Fig. 4 The process of circle maneuver

盘旋模块的输出参数主要描述在进行盘旋飞行的不同时刻,本机的飞行状态,包括当前时刻的坐标,飞行的高度,速度和航线等信息。由输入参数和输出参数,根据上述设计的盘旋飞行模型,可以计算得到在执行盘旋飞行指令之后本机在任意时刻的飞行状态。

假设飞行平台接收到盘旋机动指令,模拟飞机进行盘旋机动,飞机的初始状态参数:速度 950 km/h,高度 8 000 m,航向 132°,网络负载参数为 30%,盘旋飞行的界面显示见图5。

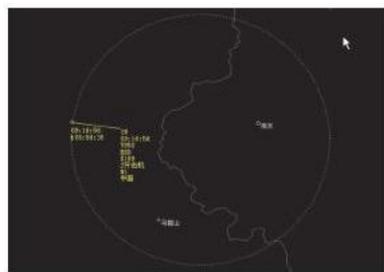


图5 模拟器的盘旋飞行界面显示

Fig. 5 The interface display of circle flight in simulator

盘旋模块的输入结构体主要描述飞机进行盘旋飞行时刻本机的坐标点,以及盘旋飞行的高度,速度,转弯半径和转弯方向。当转弯方向为 -1 时,本机做逆时针方向的盘旋飞行;当转弯方向为 1 时,本机做顺时针方向的盘旋飞行。

实验结果显示,作战飞机从做盘旋机动开始到盘旋机动结束,飞行的速度和高度始终维持不变,而航向随盘旋的进行不断进行调整。通过标牌可以得到本机在任意时刻的飞行状态信息。同时,本机的实时飞行参数信息也可以从输出参数 output 结构中获取,且与实际空中状态保持一致。

3.2 斤斗动作的模拟实现

斤斗机动的基本流程:飞机首先从指挥中心接收机动指令,当飞机收到机动指令之后,进行指令确认。随后飞机到达机动的起始点,根据收到的指令进行斤斗机动,并通过数据链实时将飞行状态回送到指挥中心,指控中心可以根据飞行参数显示当前飞机飞行状态,进行实时监控。斤斗机动的过程见图6。



图6 斤斗机动的过程示意

Fig. 6 The process of flip maneuver

斤斗机动的输入结构体主要描述进行斤斗飞行时刻本机的坐标点,以及斤斗飞行起始时刻同正北方向的夹角,初始高度,最大爬升高度,爬升率和飞机投影到平面时最大飞行距离。

斤斗模块的输出参数主要描述在进行斤斗机动飞行的不同时刻本机的飞行状态,包括当前时刻的坐标,飞行的高度、速度和航向等信息。由输入参数和输出参数,根据上述设计的斤斗飞行模型,可以计算得到在执行斤斗飞行指令之后,本机在任意时刻的飞行状态。

假设飞行平台接收到斤斗机动指令,模拟飞机进行斤斗机动。飞机的初始状态参数:速度 810 km/h,高度 6 700 m,航向 40°,筋斗飞行的界面显示见图7。

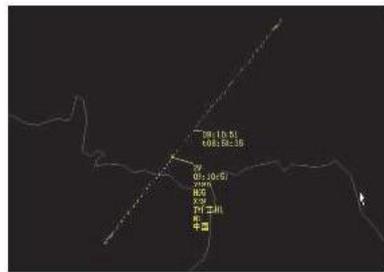


图7 模拟器的斤斗飞行界面显示

Fig. 7 The interface display of flip flight in simulator

实验结果显示,飞机在斤斗机动过程中,飞行参数信息不断变化,与实际飞机状态保持同步,从标牌中可以实时获取飞行参数信息。

4 结束语

本文对作战飞机 2 种典型的盘旋和斤斗机动动作进行了分析研究,并在指控系统上进行了程序实现。针对实际作战环境中,数据链系统在一定网络负载下存在较大的时延,根据时间戳和机动模型设计的时延补偿方案,使得模拟器中的飞行显示更逼近于真实环境中飞行器飞行态势。通过模拟实验,直观地显示了飞机进行 2 种机动动作过程的飞行参数变化,实现了地面指控中心对模拟飞机飞行状态的实时监控。应用实践表明,该模块软件的设计与实现可以简化地空训练流程,提高指挥人员和飞行人员的互联互通能力,对提升指挥人员和飞行人员训练效益进行了有益探索。

参考文献:

- [1] 王建航,孙浩. 飞行原理[M]. 北京:国防工业出版社,2007.
WANG Jianhang, SUN Hao. Principle of flight [M]. Beijing: National defense industry press, 2007. (in Chinese)
- [2] 余小兴. 飞机空气动力学[M]. 北京:国防工业出版社,2004.
YU Xiaoxing. The plane aerodynamics[M]. Beijing: National defense industry press, 2004. (in Chinese)
- [3] 倪世宏,史忠科,谢川,等. 军用战机机动飞行动作识别知识库的建立[J]. 计算机仿真,2005,22(4):23-26.
NI Shihong, SHI Zhongke, XIE Chuan, et al. Warplanes maneuvering flight movements recognition knowledgebase of establishing [J]. Journal of computer simulation, 2005, 22 (4): 23 - 26. (in Chinese)
- [4] Nan Wu, Hua Wang, Jingming Kuang. Performance analysis and simulation of JTIDS network time synchronization [C]//Proceedings of the 2005 IEEE international frequency control symposium and exposition. Vancouver, BC; IEEE press, 2005:836-839.
- [5] 卢惠民,杨蔷薇. 飞行仿真数学建模与实践[M]. 北京:航空工业出版社,2007.
LU Huimin, YANG Qiangwei. Flight simulation mathematic modeling and practice [M]. Beijing: Aviation industry press, 2007. (in Chinese)
- [6] Kelton David W, Sadowski Randall P, Sturrock David T. Simulation with arena [M]. New York: Mc Graw Hill, 2003.
- [7] Mitchell G E, Gander J F. Impact of time delay on the JTIDS network [J]. Journal of aerospace and electronics conference, 1990, 1(5):440-445.
- [8] Li X R, Jilkov V P. Survey of maneuvering target tracking - part I: dynamic models [J]. IEEE transactions on aerospace and electronic system, 2003, 39(4):1333-1364.
- [9] Li X R, Jilkov V P. Survey of maneuvering target tracking - part III: measurement models [C]//Proc 2001 SPIE conference signal and data processing of small targets. San Diego, CA: The international society of optical engineering, 2001:423-446.
- [10] Li X R, Jilkov V P. Survey of maneuvering target tracking - part V: multiple - model methods [J]. IEEE transactions on aerospace and electronic system, 2005, 41(4):1255-1321.

(编辑:田新华)

Tactical Air Maneuver Simulation Design and Implementation

LIU Si - yuan¹, ZHANG Lei², YAO Pei - yang¹, WAN Lu - jun¹

(1. Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi' an 710077, China; 2. The 631 Research Institute of China Aviation Industry Group, Xi' an 710068, China)

Abstract: In view of the problem of the terminal real - time display of the platform trajectory in the data - link aircraft simulator, the trajectory equations of circling maneuver and looping maneuver are constructed, and the general processing of maneuver is designed. Establishing AIMM time delay - compensation model based on the timestamp makes the Aircraft movements show keep pace with the plane state of actual combat under the network load. Finally two maneuver scenes are set to demonstrate the flight mobile track, which verifies that the visual platform can effectively simulate aircraft hovering and looping, realizes the ground command post real - time monitoring the analog aircraft flight state, and lays a foundation for air combat simulation training.

Key words: tactical flight; flight simulator; maneuver; data link