

飞行可视化仿真系统设计与实现

王刚, 梅卫, 刘恒, 肖颖
(军械工程学院, 石家庄 050003)

摘要: 为了实现飞行仿真的人在回路控制和视景可视化, 建立了飞机运动/动力数学模型和气动力/重力模型实时计算飞行参数和旋转四元数, 并基于 Matlab/Simulink 环境构建仿真模块, 利用 V-realm Builder 设计 VRML 三维虚拟现实空间用于视景可视化仿真, 通过 Simulink 三维动画模块集将操纵设备、飞行控制模块与三维虚拟空间连成全仿真系统。仿真结果表明, 仿真系统可实现飞行可视化仿真, 视景界面逼真, 能够准确、实时地输出飞行参数, 可按照控制指令完成飞行动作, 系统操纵性、通用性和可扩展性较好。

关键词: 飞行仿真; 三维动画模块集; 虚拟现实; 四元数

中图分类号: V249.4; TP391.41

文献标志码: A

文章编号: 1671-637X(2013)12-0068-05

Design and Realization of a Flight Visualization Simulation System

WANG Gang, MEI Wei, LIU Heng, XIAO Ying
(Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: In order to create an flight visualization simulation system in man-in-the-loop, an aircraft motion/dynamic and aerodynamic/gravity model was established to calculate flight parameters and expression of rotation quaternion in real time, and simulating module was designed based on Matlab/Simulink conditions. A 3D virtual reality space based on VRML was built up by V-realm Builder for simulating visualization. Operating device, flight control module and 3D virtual space were integrated into a complete simulating system by Simulink 3D Animation Blockset. Results of simulation indicate that the system can realize the flight visualization simulation with high fidelity of scene view, supply accurate and real-time flight parameter output, and implement flight under the control instruction. The system has good maneuverability, versatility and scalability.

Key words: flight simulation; 3D animation blockset; virtual reality; quaternion

0 引言

飞行仿真作为一种重要的研究手段, 在飞机控制方案预研、性能验证、飞行演示、驾驶训练、效能评估等方面发挥着积极的作用, 产生了巨大的经济和军事效益^[1-2]。文献[3-5]从总体设计、飞行建模及功能设计等方面对飞行仿真系统进行了研究, 分别基于 Direct3D、OpenMP、OpenGL 等实现了相应的离线飞行可视化仿真, 文献[6]进行了离线纯数值仿真。

由于没有较强的缺省计算能力, 在 Visual Studio 等环境下进行飞行仿真设计时, 需要复杂的算法规划、代码编写和调试过程。离线飞行仿真采用预设航路, 在模拟驾驶、实时控制、编队飞行等研究方面存在局限性。纯数值飞行仿真缺乏视景界面, 仿真结果不够直观。Matlab/Simulink 程序采用模块化设计, 编程语言简洁, 计算功能强大, 支持与 C/C++、Fortran 的接口功能, 便于系统设计、程序调试和功能扩展。基于 VRML 语言设计的三维虚拟现实空间存储量小, 交互能力强, 建模简单, 易于网络传输, 视景逼真度较好。本文设计的仿真系统基于 Matlab/Simulink 环境, 并利用 V-realm Builder 设计了 VRML 三维虚拟现实空间, 可实现人在回路控制, 绘制三维航迹, 视景界面逼真, 飞行环境和飞机型号可由用户进行选择, 系统功能可根据需要进行开发和拓

收稿日期: 2012-12-03

修回日期: 2013-01-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61141009); 国防“十二五”预研项目(40405070102)

作者简介: 王刚(1988-), 男, 山东日照人, 硕士生, 研究方向为导航、制导与控制。

展,具有较好的操纵性、通用性和可扩展性。

1 总体方案设计

1.1 需求分析

根据理论研究的需要,仿真平台需基于常用的计算机实现飞行可视化仿真。在给定飞行模型和环境模型下实现六自由度任意操纵,具有视景界面,实时显示和输出飞行参数信息,可支持多架飞机控制飞行,可实现三维空间航迹绘制和视景回放。

1.2 总体设计

飞行可视化仿真系统由外部控制模块、飞机运动/动力模块、飞行环境模块、3D 虚拟现实等多个子模块构成。飞行运动/动力模块实时解算坐标、速度、航程、姿态角等飞行参数,飞行环境模块提供空气密度、风速、气压等大气参数和重力模型,外部控制模块根据操纵人员的输入整合成控制飞行的指令,3D 虚拟现实模块根据飞行参数实现可视化仿真。各子模型在 Matlab/Simulink 环境下连接构成完整仿真平台。

系统运行时,操作人员选定飞机型号、飞行视角与环境地形,选择是否绘制三维空间航迹和录制仿真过程,通过外置设备(如操纵杆)输入控制指令,飞行控制模块根据控制信号实时解算并输出飞机的坐标、高度、速度/加速度、欧拉角等飞行参数,在 3D 虚拟视景中实时呈现,并配以音响效果。系统总体设计见图 1。

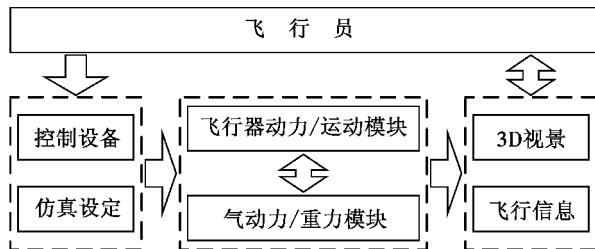


图 1 飞行可视化仿真系统总体框图

Fig.1 Scheme of flight visualization simulation system

2 仿真建模与设计

在飞行可视化仿真系统设计过程中,首先建立 Matlab/Simulink 飞行控制模型,然后用 V-realm Builder 设计三维虚拟现实空间,最终利用三维动画模块集(Simulink 3D Animation Blockset)将外部控制设备、飞行控制模块和三维虚拟视景连接构成全系统。

2.1 飞行控制模块

飞行控制模块总体结构设计如图 2 所示。

机体坐标系和地理坐标系如图 3 所示。“重力 Z”机体坐标系(OXYZ)_r相对于地理坐标系(OXYZ)_e。以 Z-Y-X 方式转动形成航向角、俯仰角、横滚角,记为(ψ, θ, φ)。

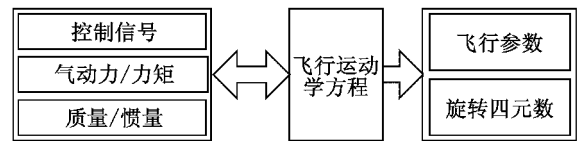


图 2 飞行控制模块结构

Fig.2 Organization of flight control module

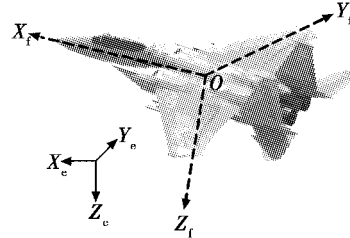


图 3 地理坐标系与“重力 Z”机体坐标系

Fig.3 Earth-based and “grave Z” body coordinate system

根据牛顿第二定律,作用在飞机上的外力与外力矩表示^[7]为

$$\mathbf{F} = m \frac{d\mathbf{V}}{dt} = \mathbf{G} + \mathbf{F}_A + \mathbf{F}_T \quad (1)$$

$$\mathbf{M} = \frac{d\mathbf{H}}{dt} = \mathbf{M}_A + \mathbf{M}_T \quad (2)$$

式中: \mathbf{F} 是飞机所受外力之和; m 为飞机总质量; \mathbf{V} 为飞机的质心相对于惯性坐标系的速度; \mathbf{F}_A 为空气动力; \mathbf{G} 为飞机重力; \mathbf{F}_T 为发动机推力; \mathbf{M} 为外力矩之和; \mathbf{H} 为动量矩; \mathbf{M}_A 为气动力矩; \mathbf{M}_T 为推力矩。

控制设备输入信号模拟控制力矩,气动/重力模块根据飞行参数计算相应的气动力(阻力 F_{AX} 、侧滑力 F_{AY} 、升力 F_{AZ})、气动力矩(滚转力矩 L_A 、俯仰力矩 M_A 、航向力矩 N_A)和重力各轴向分量(G_X 、 G_Y 、 G_Z)。

气动力的计算公式为

$$\begin{cases} F_{AX} = \frac{1}{2} \rho v^2 S c_x \\ F_{AY} = \frac{1}{2} \rho v^2 S c_y \\ F_{AZ} = \frac{1}{2} \rho v^2 S c_z \end{cases} \quad (3)$$

式中: ρ 为所在高度的大气密度; v 是飞行器对空速度; S 为机翼面积或特征面积; c_x, c_y, c_z 分别是阻力系数、侧滑力系数和升力系数。

气动力矩计算公式为

$$\begin{cases} N_A = \frac{1}{2} \rho v^2 S b m_z \\ M_A = \frac{1}{2} \rho v^2 S l m_y \\ L_A = \frac{1}{2} \rho v^2 S b m_x \end{cases} \quad (4)$$

式中: b 为机翼展长; l 为机翼平均气动弦长; m_x, m_y, m_z 分别是滚转力矩系数、俯仰力矩系数和航向力矩系数。

重力作用与飞机质心重合,不产生力矩,重力在机体各轴正向分量为

$$\begin{cases} G_x = -mg \sin \theta \\ G_y = mg \cos \theta \sin \phi \\ G_z = mg \cos \theta \cos \phi \end{cases} \quad (5)$$

在外力和外力矩的作用下,飞机会产生相应的质点运动和绕心运动,飞机一般运动方程可以写为

$$\begin{cases} m(\dot{U} + QW - RV) = G_x + (F_{Ax} + F_{Tx}) \\ m(\dot{V} + UR - PW) = G_y + (F_{Ay} + F_{Ty}) \\ m(\dot{W} + PV - QU) = G_z + (F_{Az} + F_{Tz}) \\ \dot{P}I_{xx} - \dot{R}I_{xz} - PQI_{yz} + RQ(I_{zz} - I_{yy}) = L_A + L_T \\ \dot{Q}I_{yy} + PR(I_{xx} - I_{zz}) + (P^2 - R^2)I_{xz} = M_A + M_T \\ \dot{R}I_{zz} + \dot{P}I_{xz} + PQ(I_{yy} - I_{xx}) + QR I_{yz} = N_A + N_T \end{cases} \quad (6)$$

式中: U, V, W 分别为飞行器质心速度在机体坐标轴正向的分量; P, Q, R 分别为飞行器质心转动角速度在机体坐标轴上的分量; $F_{Ax}, F_{Ay}, F_{Az}, F_{Tx}, F_{Ty}, F_{Tz}$ 分别表示气动力 F_A 和推力 F_T 在机体坐标轴上的分量; I 表示转动惯量在机体坐标轴上的分量或惯性积。

机体坐标系角速率和欧拉角速率的变换关系如式(7)所示,解方程后积分可得姿态角。

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi \sec \theta & \cos \phi \sec \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \\ R \end{bmatrix} \quad (7)$$

机体坐标系各轴向线速度与大地坐标系各轴向线速度变换关系如式8所示,积分后可得坐标值。

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} \quad (8)$$

目前,在飞行力学、捷联惯导系统以及航空航天器姿态控制中大都使用旋转四元数描述姿态角变化^[8]。Simulink 3D Animation 中虚拟现实显示模块(VR Sinks)控制虚拟对象旋转的接口即是旋转四元数的表达形式。

四元数是由1个实数单位和3个虚数单位 i, j, k 组成的4个元的超复数,其矢量运算符号表达式和矩阵表达式为

$$L = l_0 + l = l_0 + l_1 i + l_2 j + l_3 k = \begin{bmatrix} l_0 \\ l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

表示旋转角度 α ,旋转轴为单位矢量 n 的归一化旋转变换四元数^[9]为

$$L^* = \begin{bmatrix} \cos(\alpha/2) \\ \sin(\alpha/2)n \end{bmatrix}. \quad (10)$$

飞机当前姿态可看作机体分别进行转向 ψ 、俯仰 θ 和横滚 ϕ 后的姿态。设四元数 p_1, p_2, p_3 分别表示绕 Z_e, Y_e, X_e 轴旋转 (ψ, θ, ϕ) 的规范化旋转四元数,约定以符号“ \circ ”为两个四元数相乘的运算符号,根据四元数乘法规则,机体姿态角的旋转变换四元数 Q 的表达式为

$$Q = p_1 \circ p_2 \circ p_3 = \begin{bmatrix} \cos(\psi/2) \\ 0 \\ 0 \\ \sin(\psi/2) \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} \cos(\theta/2) \\ 0 \\ \sin(\theta/2) \\ 0 \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} \cos(\phi/2) \\ \sin(\phi/2) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\frac{\psi}{2})\cos(\frac{\theta}{2})\cos(\frac{\phi}{2}) + \sin(\frac{\psi}{2})\sin(\frac{\theta}{2})\sin(\frac{\phi}{2}) \\ -\sin(\frac{\psi}{2})\sin(\frac{\theta}{2})\cos(\frac{\phi}{2}) + \cos(\frac{\psi}{2})\cos(\frac{\theta}{2})\sin(\frac{\phi}{2}) \\ \cos(\frac{\psi}{2})\sin(\frac{\theta}{2})\cos(\frac{\phi}{2}) + \sin(\frac{\psi}{2})\cos(\frac{\theta}{2})\sin(\frac{\phi}{2}) \\ \sin(\frac{\psi}{2})\cos(\frac{\theta}{2})\cos(\frac{\phi}{2}) - \cos(\frac{\psi}{2})\sin(\frac{\theta}{2})\sin(\frac{\phi}{2}) \end{bmatrix} \quad (11)$$

2.2 3D 虚拟现实模块

V-Realm Builder 是用于设计虚拟现实空间和导入/导出三维虚拟对象的软件^[10]。虚拟世界对象的位移、旋转、尺寸、多媒体效果等性质可以通过 Matlab 和 Simulink 模型控制,在浏览器中生成三维视景。VRML 虚拟现实建模语言文件存储量小,易于网络传输,交互性好,具有较强的多媒体功能。使用 V-Realm Builder 根据参数构建飞机和地形环境的三维模型(如图4所示)。

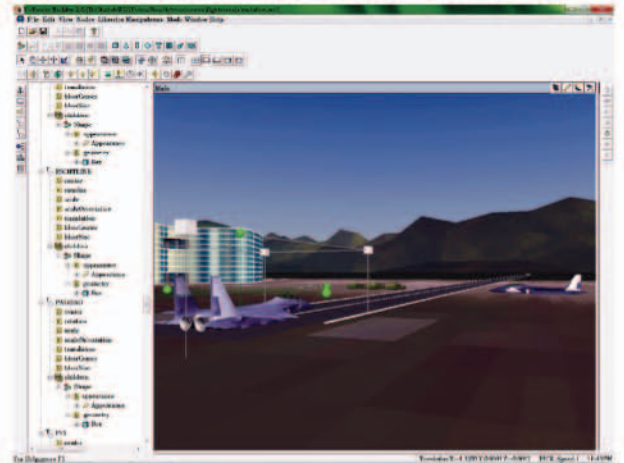


图4 V-Realm Builder 设计虚拟现实空间
Fig.4 The virtual reality space designed by using V-Realm Builder

并创建编辑音响、雾化、阴影等效果,生成“*.wrl”格式文件。本模块将多种飞机类型和环境地形编辑成库供用户选择。

Simulink 驱动的 3D Animation Blockset 相应模块使虚拟现实和三维动画处理变得很直观,利用虚拟现实显示 (VR Sink)、虚拟现实跟踪器 (VR Tracer)、虚拟现实文字叠印 (VR Text Output) 等模块将三维视景与飞行控制模块连接成可视化仿真全系统。其中飞行控

制模块输出的旋转四元数连接 VR Sink 节点树中飞机的“rotation”节点,位置三维坐标连接“translation”节点,VR Tracer 绘制三维空间航迹,仪表显示通过 Simulink Gauges Blockset 实现,飞行信息通过 VR Text Block 在视景中呈现。

2.3 仿真全系统

飞行可视化仿真 Matlab/Simulink 全系统设计如图 5 所示(由子系统和模块封装)。

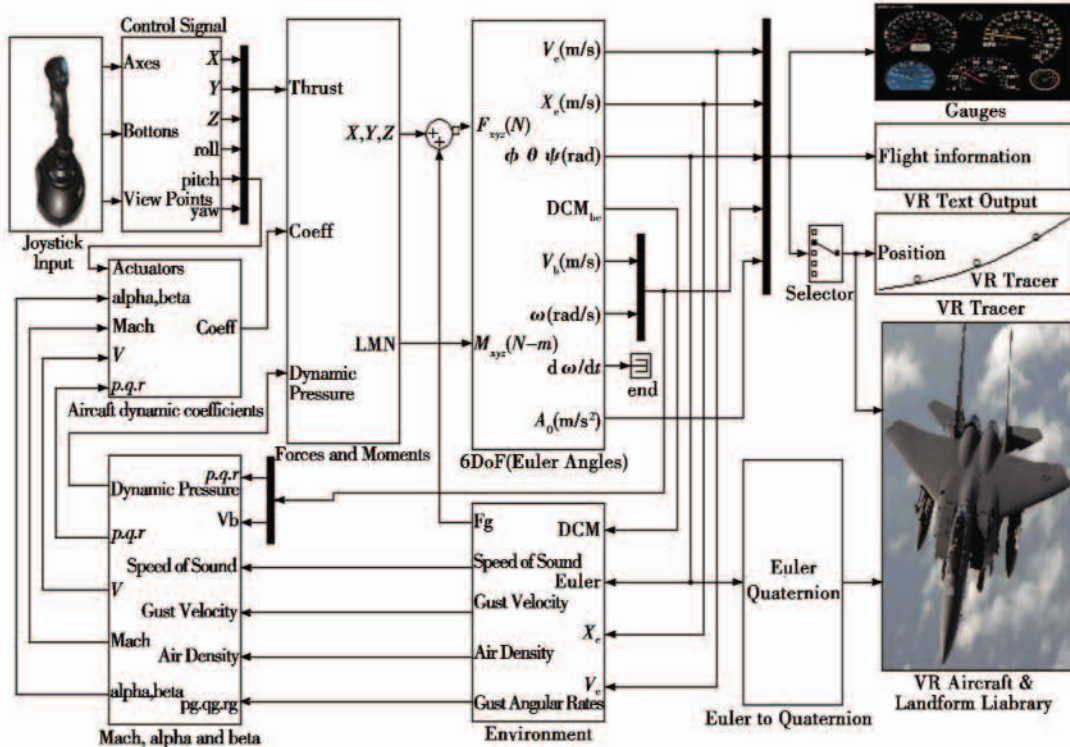


图 5 飞行可视化仿真系统 Matlab/Simulink 设计图

Fig. 5 Matlab/Simulink design of flight visualization simulation system

3 仿真实例与验证

实验环境:PC 计算机一台, Intel Core i7 3.2 GHz CPU, 4.00 G 内存, ATI Radeon HD 6570 显卡, 运行平台为 Windows 7 系统, 显示器分辨率 1680 × 1050, 外接操纵摇杆 2 个。

仿真前操作人员预设定型号、环境地形、飞行视角、是否绘制航迹、是否录制仿真过程等。以某型战斗机为例, 仿真环境为机场与山地。考虑到人的视觉在扫频为 24 帧以上时察觉不到闪烁, 画面变化平滑, 同时兼顾数据计算量, 仿真步长设为 40 ms。

为了验证模型合理性和准确性, 并检验仿真平台的操纵性和扩展性, 设计如下飞行任务。

1) 1 名操作人员控制飞机 I 从机场 A 起飞升空后进行转弯飞行, 然后前往 B 空域并完成俯冲和拉起动作。

2) 2 名操作人员分别控制飞机 I、II 进行自由编

队飞行。

实验结果表明, 仿真系统用户界面可实时呈现飞行视景(如图 6 和图 8 所示), 并可根据需要切换用户体验视景。虚拟飞机可在操作人员控制下完成预定飞行动作和飞行任务(如图 6、图 7 和图 8 所示)。此外, 仿真系统能够绘制虚拟空间内的三维航迹, “Recording” 命令可将仿真过程保存为视频文件, 虚拟仪表数据显示准确(如图 9 所示)。



a 飞机起飞视景

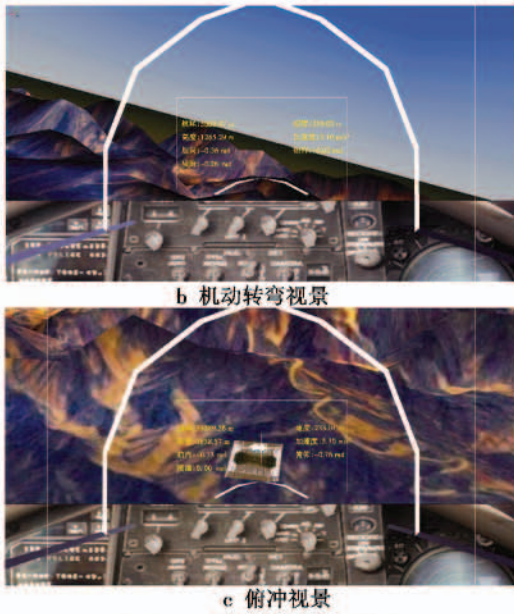


图6 飞行任务1)仿真视景
Fig.6 Simulation scene of Task1)

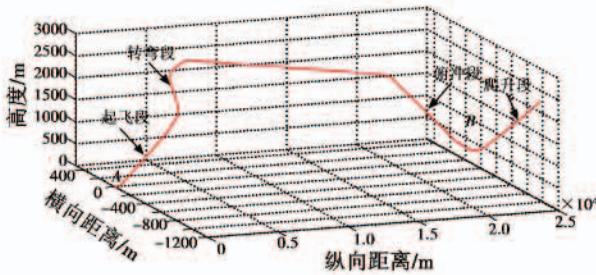


图7 Matlab命令绘制的全航程飞行航迹
Fig.7 Trajectory of plane plotted by Matlab command



图8 编队飞行视景
Fig.8 Scene of formation flight



图9 仪表显示
Fig.9 Gauges display

4 结束语

本文进行了飞行可视化仿真系统的总体结构设计和模块划分,建立了相应的数学模型,设计了3D虚拟现实空间,并在 Simulink 环境下构成仿真全系统。仿真结果表明,系统可实现飞行可视化仿真,视景界面逼真,可以准确、实时地输出飞行参数,能够在操作人员的控制下操纵多架飞机完成预定飞行动作和飞行任务,并可借助 Matlab/Simulink 的强大计算功能进行功能拓展,具有较好的操纵性、通用性和可扩展性,可作为飞行训练、效能评估的仿真基础平台,下一步将在该系统的基础上改进飞行的稳定性和真实感,并开发人在回路飞行控制品质评估、航空火力控制系统、空空/空地博弈对抗等功能。

参考文献

- [1] 毕开波,王晓东,刘智平. 飞行器制导与控制及其 MATLAB 仿真技术[M]. 北京:国防工业出版社,2009.
- [2] 卢惠民. 飞行仿真数学建模与实践[M]. 北京:航空工业出版社,2007.
- [3] 徐海亮,李骏扬,费树岷. 全数字飞行仿真平台的设计与实现[J]. 东南大学学报:自然科学版,2011,41(1): 113-117.
- [4] 陈力威,朱凡,刘希,等. 飞行控制系统可视化仿真平台设计[J]. 电光与控制,2012,19(1):90-94.
- [5] YAO Hongge. The realization of flight simulation system based on OpenGL[C]//2010 Second International Conference on Information Technology and Computer Science, 2010:198-201.
- [6] 张锦庚,高晓光,符小卫. 一种无人攻击机航路飞行仿真方法设计[J]. 电光与控制,2010,17(6):25-39.
- [7] NAPOLITANO M R. Aircraft dynamics: From modeling to simulation [M]. Hoboken:John Wiley & Sons, Inc, 2012.
- [8] 周志刚. 航空综合火力控制原理[M]. 北京:国防工业出版社,2008.
- [9] HOLZAPFE F, THEIL S. Advances in aerospace guidance, navigation and control [M]. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
- [10] KHALED N. Virtual reality and animation for Matlab and Simulink users: Visualization of dynamic models and control simulations [M]. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.