



大型客机综合导航系统设计 虚拟仿真实验指导书

南京航空航天大学

自动化学院

二〇二三年十二月



南京航空航天大学
NANJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS

自动化学院

目录

第一章 大型客机综合导航系统设计虚拟仿真实验	1
1.1 实验目的	1
1.2 实验仪器及设备	1
1.3 实验原理	1
1.3.1 大型客机导航系统认知实验原理	1
1.3.2 多源组合导航系统集成设计实验原理	3
1.3.3 导航系统故障检测与重构实验原理	4
1.4 实验步骤	5
1.5 实验数据处理	6
1.6 实验报告要求	6

第一章 大型客机综合导航系统设计虚拟仿真实验

1.1 实验目的

本实验结合航空特色高校自动化专业培养方案的要求,根据本专业特色专业主干课程《定位与导航系统》的关键知识点,梳理出从“典型认知”——“综合训练”——“系统探索三个层次的实验。

本教学虚拟仿真实验的实验目的如下:

(1)通过飞机导航系统的认知学习模块,帮助学生了解和掌握大型客机导航系统的基本组成和原理。帮助学生掌握系统的组成及系统中重要组成部件的结构,工作原理和运行特性,采用虚拟现实的学习方式,帮助学生深入了解各个核心部件如惯性导航系统、卫星导航系统、无线电导航系统、大气导航系统部件细节组成、结构形式和工作原理,为系统综合实验奠定基础;

(2)通过飞机导航系统的综合训练,显著提高学生对飞机导航系统系统优化设计能力。学生根据自己的理解设计飞机导航系统结构和参数,根据联邦滤波、集中滤波器结构,设计各类导航传感器的融合架构与参数,并在大型飞机不同飞行阶段下对导航性能进行评估,学生根据评估结果开展系统性能参数优化设计。

(3)通过飞机导航系统的探索实验,培养学生自主创新设计的能力。在综合实验的基础上,结合课程教学和相关的导航系统的创新能力培养的教学要求,在虚拟仿真系统中提供给学生开放性设计和测试环境,结合探索实验的要求,由学生可自主开展子系统的设计和功能模型的搭建,结合导航参数的优化设计,开展探索性和创新性的实验。

(4)有效解决实物教学成本高、危险性大等难题虚拟仿真实验系统避免在设置故障时损坏昂贵的导航设备,以及在操作大型测试设备时的危险性,容易构建系统,系统具有可逆性,有利于学生探索故障发生后的故障定位、隔离和故障重构策略。虚拟仿真教学实验系统成本低,因而具有示范性和可推广性。

1.2 实验仪器及设备

虚拟仿真实验软件 1 套。

1.3 实验原理

1.3.1 大型客机导航系统认知实验原理

大型客机综合导航系统通常包括导航传感器、导航计算机和显示仪表三大部分。其中,大型客机导航系统所包含的传感器主要有惯性导航系统、大气数

据系统、卫星导航系统和无线电导航系统，是整个综合导航系统的重要信息来源。各类导航传感器的原理如下：

a) 惯性导航系统使用加速计和陀螺仪来测量物体的加速度和角速度，并递推估计运动物体的位置、速度和姿态。

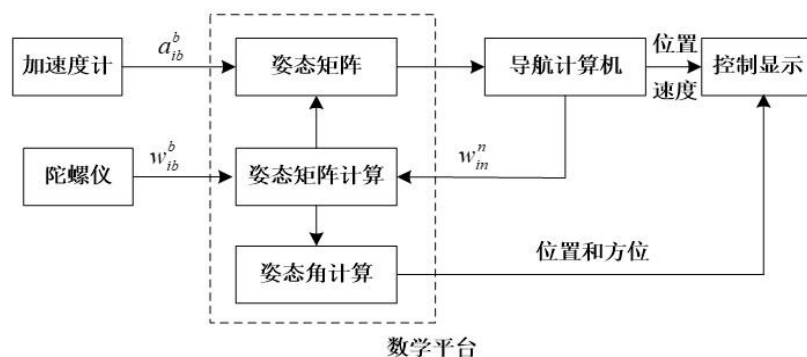


图 1 惯性导航系统原理图

b) 大气数据系统包括静压探头、全压探头、总温传感器等部分, 能为飞机提供空速、高度和压力等信息。

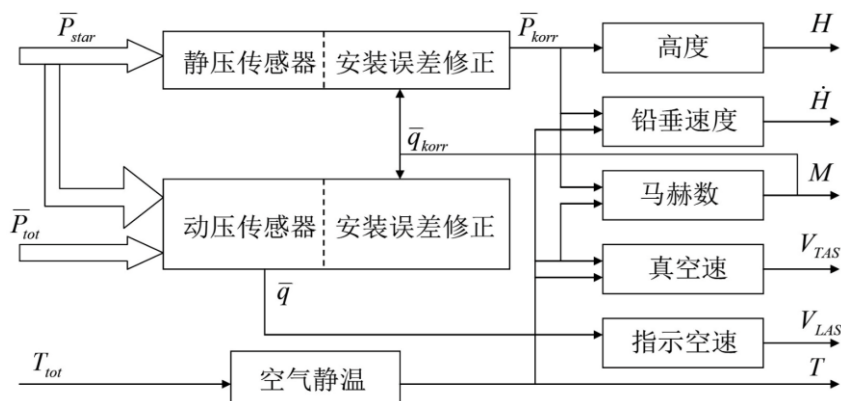


图 2 大气数据系统原理框图

c) 卫星导航系以卫星和用户接收机天线之间的距离观测量为基准，根据已知的卫星瞬时坐标，来确定用户接收天线的位置。通过星地空间距离为半径的三球交汇，可以求解三维坐标未知量，提供用户的三维位置信息。

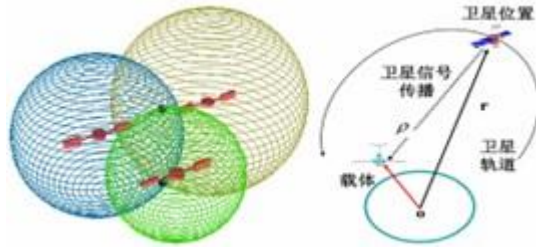


图 3 卫星导航系统原理示意图

d) 无线电导航系统是借助运动体上的电子设备接收已设置的无线电信号进行距离和角度测量，进而通过几何式定位、定向的方式确定运动体位置。

1.3.2 多源组合导航系统集成设计实验原理

联邦滤波作为分布式卡尔曼滤波的一种形式在组合导航系统中得到普遍应用。联邦滤波器的结构如图 7 所示，它有两层滤波结构，分别为子滤波器和主滤波器。依照典型机载导航设备配置，惯性基准系统输出惯性导航信息，各辅助导航系统分别输出的载体位置、姿态等信息，与惯导进行信息融合，并构建相应的子滤波系统。子滤波器采用基本卡尔曼滤波算法独立、并行计算，解算的局部最优估计值经过主滤波器全局融合后，可以获得最终的最优估计值。

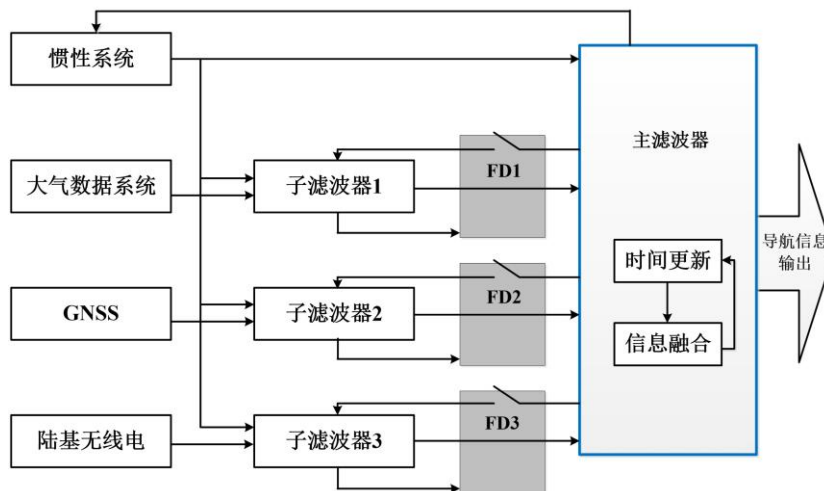


图 4 多源导航信息融合方案图

卡尔曼滤波在前一时刻最佳估计的基础上，根据现时刻的观测值作线性修正，获得现时刻状态的最佳估计，计算上采用递推。一般闭环离散卡尔曼滤波器满足以下几个方程：

① 状态一步预测方程：

$$\hat{X}_{k|k-1} = \Phi_{k,k-1} \hat{X}_{k-1|k-1} \quad (1)$$

② 状态估值方程:

$$\hat{X}_{k|k} = \hat{X}_{k|k-1} + K_k (Z_k - H_k \hat{X}_{k|k-1}) \quad (2)$$

③ 滤波增益方程:

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k)^{-1} \quad (3)$$

④ 一步预测均方误差方程:

$$P_{k|k-1} = \Phi_{k,k-1} P_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + \Gamma_{k-1} Q_{k-1} \Gamma_{k-1}^T \quad (4)$$

⑤ 估计均方误差方程:

$$P_{k|k} = (I - K_k H_k) P_{k|k-1} (I - K_k H_k)^T + K_k R_k K_k^T \quad (5)$$

式中, $\hat{X}_{k|k}$ 为 k 时刻的状态估计值; $\hat{X}_{k|k-1}$ 为 k-1 时刻对 k 时刻预测的状态值; K_k 为 k 时刻的滤波增益阵; $P_{k|k-1}$ 为 k-1 时刻对 k 时刻预测的误差估计协方差阵; $P_{k|k}$ 为 k 时刻的误差估计协方差阵; Q_k 为系统噪声方差阵; R_k 为量测噪声方差阵。

1.3.3 导航系统故障检测与重构实验原理

由于工作环境、传感器自身硬件以及软件算法的影响, 机载传感器可能出现多种故障。利用残差检验法可以实现系统故障的自动检测。当检测出某个传感器出现故障时, 需要对故障进行隔离并重构导航系统。系统重构使组合导航系统与故障子系统脱离关系, 剩余系统产生导航最优解, 使得整个组合导航系统具有很高的容错能力。故障检测与系统重构示意图如下所示。

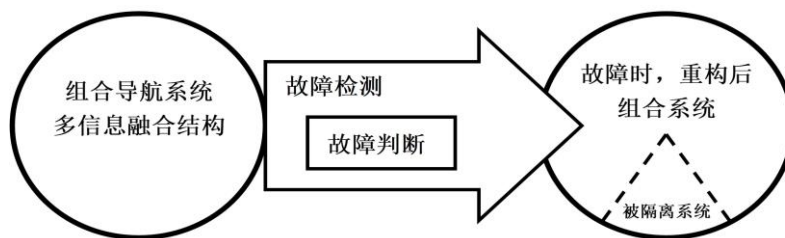


图 5 故障检测与系统重构示意图

知识点: 共 6 个

1. 大型客机导航系统组成认知
2. 多源导航传感器原理与故障认知
3. 所需导航性能及组合导航系统滤波架构设计
4. 组合导航滤波参数设计与性能评估技术

5. 多源组合导航系统故障检测技术
6. 多源组合导航系统降级重构技术

1.4 实验步骤

本实验围绕大型客机设计了三个环节。

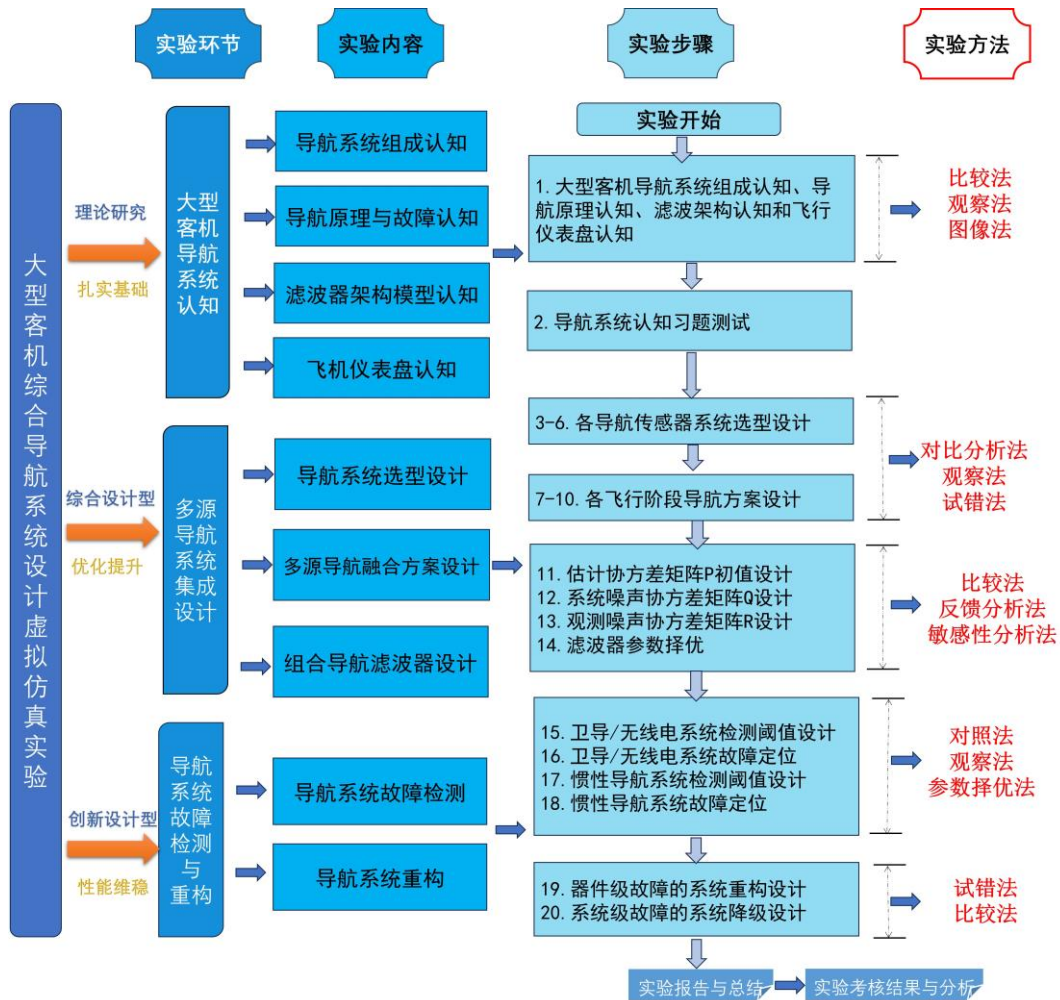


图 6 虚拟仿真实验实验步骤

1. 大型客机导航系统认知环节：主要包括大型客机导航系统组成认知、导航原理与故障、滤波器架构模型认知与飞机仪表盘认知四个子环节。采用虚拟现实技术和人机交互模式，开展大型客机导航系统认知学习，使学生了解大型客机多种导航系统的工作原理、常见故障、滤波融合架构等基本知识。
2. 多源组合导航系统集成设计环节：主要包括导航系统选型设计、多源导航融合方案设计和组合导航滤波器设计三个子环节。学生选取不同精度、不同装配套数的导航设备，通过拖拽匹配实现多源融合导航系统的集成

设计，并在此基础上对多源融合导航系统的融合滤波架构进行设计，利用对比分析法、试错法、观察法、参数择优法、反馈分析法等多种实验方法，分析不同滤波器参数、传感器选择与设计对导航系统性能的影响，旨在培养学生根据实际精度、稳定性、安全性、可靠性等方面的技术指标需求进行决策的能力，进而实现“分析设计”层面的训练。

3. 导航系统故障检测与重构环节：主要包括导航系统故障检测、导航系统故障重构两个子环节。学生通过本环节的学习和仿真实践，可掌握各导航系统的故障检测方法和故障表现，故障检测方法包括冗余检测法和残差检测法，故障表现包括飞机机身抖动、飞机逐渐偏离航线等。在故障检测的基础上，进一步进行故障隔离或故障降权完成系统重构，保障飞机安全性。

1.5 实验数据处理

表 1 组合导航滤波器参数实验记录表

实验次数	P 矩阵参数	Q 矩阵参数	R 矩阵参数	实际导航性能 (ANP) 曲线和水平误差曲线	实际导航性能是否满足所需性能
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					

1.6 实验报告要求

- 1、使用南航实验报告纸，手写，页数不够可以附南航稿纸（和实验报告纸固定好）。
- 2、填写表 1 并评估选定参数的实际性能导航和精度水平。
- 3、实验总结