

学校编码: 10384

密级

学号: 32020101152691

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

固定翼飞行器气动参数辨识技术应用研究

Research on Aerodynamic Parameter Identification for
Fixed-wing Flight Vehicle

赵岩

指导教师姓名: 林 麒 教授

吴了泥 助理教授

专 业 名 称: 航空宇航制造工程

论文提交日期: 2013 年 6 月

论文答辩时间: 2013 年 6 月

学位授予日期: 2013 年 6 月

答辩委员会主席:

评阅人:

2013 年 6 月

厦门大学博硕士学位论文摘要库

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2.不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

本文研究利用多种参数辨识技术确定飞机纵向运动模型的参数问题，选取飞机纵向小扰动线性运动方程作为辨识模型，以外加激励重复激发某型飞机纵向飞行模态，并以其中有效飞行实测数据为例分别采用方程误差法和输出误差法从时域和频域的角度辨识了模型中的气动参数，同时对辨识结果以及辨识过程中发现的问题进行了分析研究。

本文所做的主要工作如下所述。

1. 在系统辨识算法方面，介绍近年来应用于飞行器气动参数辨识比较成熟的线性回归法和极大似然法基本理论，构建基于该理论的辨识方法；对比两种辨识算法各自的特点，分别比较它们在时域下和频域下的算法。

2. 在辨识实验设计方面，构建飞行器辨识模型，介绍应用于飞行器气动参数辨识中常用的激励信号，对比研究各激励信号的优缺点，获得适用于飞行器气动参数辨识领域输入激励的选取原则。与此同时，研究飞行数据测量技术以及数据相容性分析技术在飞行器系统辨识中的应用。

3. 在飞行辨识方面，利用无人机平台，采用外加激励对飞机纵向飞行模态进行激发，对比分析多组飞行数据，选取效果显著的飞行实测数据组，采用多种方法对飞机纵向主要气动参数进行辨识，验证飞行试验辨识技术方案的可行性以及辨识理论的有效性。

4. 在数据处理方面，研究去除实测数据噪声的有效措施，同时，针对频域辨识，研究提高飞行数据时频转换精度的方法，以期改善辨识结果，提高辨识精度。

关键词：气动参数辨识 无人机飞行试验 方程误差法 输出误差法 模型结构辨识

Abstract

In this thesis, estimation problems of aerodynamic coefficients of flight vehicle are investigated via various methods. Linear motion equations are adopted as identification mathematic model. Main motion modes in longitudinal direction have been excited with active incentive signals repeatedly. Then longitudinal aerodynamic parameters are identified with equation-error method and output-error method from time domain and frequency domain based on effective flight-test data. Moreover, vast discussion and analysis are made pointing to identification results and problems found in the whole process. Now the research work done in this paper will be summarized as follows:

1. In the respect of identification algorithm, a series of research results have been summarized about regression methods and maximum likelihood methods applied in aircraft system identification in recent years, then conclude different characteristics of each of the two identification algorithms both in time domain and in frequency domain.

2. Specific to experiment design, Firstly, small disturbance theory is used to deriving the linearized aircraft equations of motion; secondly, summarise main input types that be used for flight-test maneuvers and compare effectiveness of various inputs; thirdly, figure out valuable information for flight-test data measurements and data compatibility analysis.

3. Contrapose flight-test identification, active incentive signals are used to excite longitudinal modes of flight vehicle repeatedly; most effective measurements are chosen as identification data. Then longitudinal aerodynamic coefficients are identified with various methods. To some extent, the results are satisfactory, moreover, the feasibility of identification technology that active incentive and the reliability of identification theory used in aircraft system identification are verified.

4. In order to improve estimations, a low-pass filter is applied to remove high frequency noise among measurements, and a computation scheme to transforming

measured data to frequency domain with high accuracy at arbitrarily selected frequencies within specific frequency band is proposed.

Keywords: aerodynamic parameters identification; flight tests; equation-error method; output-error method; model structure determination

厦门大学博硕士学位论文摘要库

厦门大学博硕士学位论文摘要库

目 录

图标索引.....	V
符号注释表.....	VII
第一章 绪论	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 飞行器气动参数辨识研究现状.....	3
1.2.1 国内外研究现状.....	3
1.2.2 辨识算法概述.....	5
1.3 论文研究内容.....	5
第二章 系统辨识原理及方法	7
2.1 方程误差法.....	7
2.1.1 辨识原理.....	7
2.1.2 准度评价.....	10
2.1.3 工程应用.....	11
2.2 输出误差法.....	13
2.2.1 时域辨识.....	13
2.2.2 频域辨识.....	17
2.2.3 准度评价.....	26
2.2.4 工程应用.....	27
2.3 模型结构辨识.....	29
2.4 本章小结.....	31
第三章 实验设计	33
3.1 飞行器数学模型.....	33
3.1.1 参考坐标系.....	33
3.1.2 运动方程线性化.....	33
3.2 输入设计.....	40
3.2.1 单输入设计.....	40
3.2.2 多输入设计.....	45
3.3 飞行数据采集.....	45

3.3.1 数据采样.....	45
3.3.2 数据测量.....	45
3.4 数据预处理.....	47
3.4.1 数据平滑.....	47
3.4.2 数据相容性分析.....	48
3.5 本章小结.....	51
第四章 飞行试验辨识.....	52
4.1 飞行辨识试验.....	52
4.1.1 试验无人机简介.....	52
4.1.2 数据采集系统.....	52
4.1.3 飞行机动.....	55
4.2 气动参数辨识.....	55
4.2.1 平滑滤波.....	56
4.2.2 数据相干性分析.....	56
4.2.3 数据相容性分析.....	57
4.2.4 时域辨识.....	58
4.2.5 频域辨识.....	60
4.2.6 辨识结果分析.....	62
4.3 模型结构辨识.....	67
4.4 本章小结.....	69
第五章 总结和展望.....	71
5.1 总结.....	71
5.2 展望.....	71
参考文献.....	73
作者攻读硕士学位期间所发表的论文.....	81
致 谢.....	82

Contents

IMAGEINDEX	V
SYMBOLS	VII
Chapter 1. Overview	1
1.1 Reaserch Background	1
1.2 Current Research Situation	3
1.2.1 Reasearch Situation.....	3
1.2.2 Main Algorithms Applied to System Identification.....	5
1.3 Reasearch Work	5
Chapter 2. Mathematical Theory for System Identificaiton	7
2.1 Equation-Error Mehod	7
2.1.1 Estimation Theory.....	7
2.1.2 Common Measures of Accuracy.....	10
2.1.3 Engineering Application.....	11
2.2 Output-Error Method	13
2.2.1 Time Domain Method	13
2.2.2 Frequency Domain Method.....	17
2.2.3 Common Measures of Accuracy.....	26
2.2.4 Engineering Application.....	27
2.3 Model Structure Determination	29
2.4 Summary	31
Chapter 3. Experiment Design	33
3.1 Mathematical Model of an Aircraft	33
3.1.1 Regerence Frames.....	33
3.1.2 Linearization of Motion Eauations	33
3.2 Input Design	40
3.2.1 Single-input Design	40
3.2.2 Multiple-Input Design.....	45
3.3 Flight-Test Data Acquisition	45
3.3.1 Data Sampling	45
3.3.2 Instrumentation	45
3.4 Data Preprocessing	47
3.4.1 Smoothing	47

3.4.2 Data Compatibility	48
3.5 Summary	51
Chapter 4. Experiment for Aerodynamic Parameter Identification...	52
4.1 Flight Test	52
4.1.1 Introduction of the Aircraft.....	52
4.1.2 Data Acquisition System	52
4.1.3 Flight Maneuver.....	55
4.2 Parameter Estimation Results	55
4.2.1 Smoothing	56
4.2.2 Analysis of Data Correlation	56
4.2.3 Analysis of Data Compatibility	57
4.2.4 Estimation Results in Time Domain	58
4.2.5 Estimation Results in Frequency Domain	60
4.2.6 Analysis of Estimation Results	62
4.3 Analysis of Model Structure	67
4.4 Summary	69
Chapter 5. Conclusion and Prospect	71
5.1 Conclusion	71
5.2 Prospect	71
References	73
Publications	81
Acknowledgments.....	82

图标索引

图 1.1 系统辨识过程流程图.....	2
图 2.1 方程误差辨识流程图.....	12
图 2.2 频域辨识法流程图.....	17
图 2.3 时域输出误差辨识算法流程图.....	28
图 2.4 时域输出误差辨识算法流程图.....	29
图 3.1 地面坐标系.....	33
图 3.2 机体坐标系.....	34
图 3.3 速度坐标系.....	34
图 3.4 稳定坐标系.....	34
图 3.5 飞行器符号及符号法则示意图.....	35
图 3.6 线性扫频信号图.....	42
图 3.7 正弦扫频信号图.....	43
图 3.8 3211 信号图.....	44
图 3.9 211 信号图.....	44
图 3.10 偶极方波信号图.....	44
表 3.1 单输入系统输入激励比较.....	40
图 4.1 实验无人机.....	52
图 4.2 无人机配置结构图.....	53
图 4.3 AHRS 实物图.....	53
图 4.4 ARHS 传感器设置界面示意图.....	54
图 4.5 迎角传感器实物图.....	54
图 4.6 数据记录仪实物图.....	54
图 4.7 无人机飞行航路示意图.....	55

图 4.8 无人机飞行辨识控制回路结构图	55
图 4.9 迎角实测数据平滑仿真结果	56
图 4.10 俯仰角速率和升降舵数据相干性分析结果	56
图 4.11 数据修正之前数据和模型仿真结果	57
图 4.13 频域方程误差法回归量序列图	59
图 4.14 时域方程误差法辨识后模型仿真结果	59
图 4.15 时域输出误差法输出量模型和数据仿真结果	60
图 4.17 频域方程误差法数据模型仿真结果	61
图 4.18 频域输出误差法辨识模型仿真结果	61
图 4.20 不同辨识方法参数置信区间估计	65
图 4.21 不同辨识方法参数置信区间估计	65
图 4.22 不同辨识方法参数置信区间估计	66
图 4.23 俯仰力矩系数模型仿真结果	69
表 4.1 AHRS 传感器主要参数	53
表 4.2 纵向主要飞行参数辨识值	57
表 4.4 时域输出误差法辨识结果	59
表 4.5 频域方程误差法辨识结果	60
表 4.6 频域输出误差法辨识结果	61
表 4.7 方程误差法辨识结果	62
表 4.8 输出误差法辨识结果	62
表 4.9 脉宽 0.8 秒 211 激励辨识结果汇总	62
表 4.10 俯仰力矩系数辨识模型构型	67
表 4.11 俯仰力矩系数模型确定结果	68

符号注释表

1. 有关矩阵，概率和数理统计方面的符号说明

符号	符号意义
θ	参数向量
ξ	回归向量
v	误差项
$E(\cdot)$	数学期望
$Cov(\cdot)$	协方差
v	新息
σ^2	方差
SS_T	总变差
SS_R	回归平方和
SS_E	残差平方和
R^2	可决系数
$\Re(\cdot)$	自相关矩阵
$Var(\cdot)$	参数方差
$N(\cdot)$	正态分布
α	显著水平
$t(\cdot)$	t 分布
$F(\cdot)$	F 分布
H_0	原假设
H_1	备择假设
s	标准差
PRESS	残差平方和
PSE	预测方差
$L(\cdot)$	似然函数
P	协方差矩阵
R	测量噪声方差矩阵
K	卡尔曼修正矩阵

M	信息矩阵
γ^2	相干系数
$S(\cdot)$	分散度
f_N	奈奎斯特频率
f_s	采样频率
f_{\max}	系统最大频率
$PF(\cdot)$	峰值因子
$RPF(\cdot)$	相对峰值因子
v	残差
ν	新息
A	系统矩阵
B	控制矩阵
C	输出矩阵
D	直联矩阵
B	新息方差矩阵

2. 有关飞行器方面的符号说明

符号	符号意义
V	空速
α	迎角
β	侧滑角
p	滚转角速率
q	俯仰角速率
r	偏航角速率
ϕ	欧拉滚转角
θ	欧拉俯仰角
ψ	欧拉偏航角
a_x	机体 x 轴加速度
a_y	机体 y 轴加速度

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库