

学校编码: 10384
学号: 32020141152866

分类号 _____ 密级 _____
UDC _____

厦 门 大 学

硕士学位论文

无人自转旋翼机建模与控制技术研究

Research on Modeling and Control Technology of
Unmanned Gyroplane

程晓倩

指导教师姓名: 吴了泥副教授

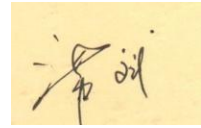
专业名称: 仪器仪表工程

论文提交日期: 2017年05月

论文答辩时间: 2017年05月

学位授予日期: 2017年05月

答辩委员会主席:



评 阅 人:

2017年05月

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

厦门大学博硕士学位论文摘要库

厦门大学博硕士学位论文摘要库

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

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘 要

自转旋翼机是一种依靠空气来流驱使旋翼自转提供升力的旋翼类飞行器，具有机械结构简单、经济成本低、飞行安全性好等特点，有着广阔的应用前景。旋翼机理论建模置信度较低，空中飞行纵横向/高度速度控制耦合强，起降有其自身的特点与难点。本文研究了基于参数辨识的自转旋翼机建模技术，开展了全自主飞行控制的设计，进行了基于 FlightGear 平台的起降仿真，并实现了飞行演示验证。本文的主要研究内容如下：

本文开展基于有人操纵主动激励的气动参数辨识技术的自转旋翼机建模方法。合理设计有人驾驶旋翼机飞行参数采集方案，经过相干性简化模型结构、辨识精度评估以及时域模型验证，基于时域线性回归和频域方程误差的参数辨识算法获得在空速 70mph 下的线性模型，为旋翼机飞行控制律设计奠定基础。

考虑到自转旋翼机与直升机以及固定翼飞机的飞行原理有差异，对其进行气动特性分析。基于辨识得到的线性模型同时结合旋翼机的气动受力情况，对自转旋翼机进行纵横向静稳定性以及操纵特性分析，同时分析不同前向力、配重、纵向力以及海拔高度下对旋翼机的气动特性的影响。最后统计驾驶员起降数据，研究旋翼机的起降规律，为旋翼机的全自主起降方案提供数据支持。

提出飞行控制总体设计方案，纵向采用推力控制高度、桨盘纵倾控制速度以及俯仰控制作为阻尼的控制策略，横侧向采用内回路滚转控制外回路航迹控制的控制策略。基于辨识线性模型并使用旋翼机不同状态下的配平舵面和油门作为前馈，在确定飞行控制结构的基础上，设计并整定飞行控制律。然后设计无人自主起降方案。采用低速大增益高速小增益的纠偏控制方案；旋翼机抬前轮瞬间压杆动作较危险，设计合理起飞策略以避免机身姿态不稳；采样等下滑角的陡下滑方式，提高着陆精度；针对下滑段机身姿态低头严重，提出两种姿态拉起的着陆控制策略；同时给出适合旋翼机的横侧向抗侧风策略。

为验证全自主起降控制策略，采用基于 FlightGear 软件的 YASim 建模方式，建立演示样机 ELA07 的全包线气动模型，搭建半物理仿真平台，最终实现全自主控制。同时考虑起降段的不确定因素以及环境干扰进行起降段飞行仿真，从而

验证无人自转旋翼机的控制律及控制逻辑的正确性。

提出合理的飞行试飞方案，给出在线调整控制参数的步骤，最后成功实现样机 ELA07 的无人化首飞。试飞数据表明空中巡航和自主起降的控制逻辑正确、控制参数合理。

关键词：无人自转旋翼机；系统辨识；控制方案设计；半物理仿真；试飞验证

厦门大学博硕士论文摘要库

ABSTRACT

Rotary rotorcraft is a rotor-type aircraft that relies on the air to drive the rotor to rotate. Because of the gyroplane characteristics of simple mechanical structure, low economic cost and good flight safety, the unmanned gyroplane has wide application prospect. However, gyroplane theory modeling confidence is low, vertical/horizontal and high/speed control coupling is strong, take-off/landing control has its own characteristics and difficulties. In this paper, the gyroplane modeling technology based on parameter identification is studied to design the autonomous flight control. The flight simulation based on FlightGear platform is carried out and the flight demonstration verification is realized. The main contents of this paper are as follows:

A gyroplane modeling method based on aerodynamic parameter identification technology with active control is introduced and a reasonable maneuvering gyroplane flight parameter acquisition scheme is designed. By the coherence model structure simplification, the identification accuracy evaluation and time domain model verification, the linear model at a velocity of 70mph based on the time - domain linear regression algorithm and the frequency domain equation error algorithm is obtained, which lays the foundation for the flight control law design of the gyroplane.

Considering the different generation ways of rotor lift in which the gyroplane compared to helicopters and fixed-wing aircraft, gyroplane aerodynamic characteristics is analysed. Based on the identification results combined with the gyroplane aerodynamic force analysis, the gyroplane's vertical and horizontal static stability and maneuverability is analysed. At the same time, the influence of different forward force, longitudinal force, counterweight and altitude on the gyroplane aerodynamic characteristics are studied. Finally, human take-off and landing data are statistically averaged in order to study the take-off/landing control strategy and to provide data support for the autonomous take-off/landing scheme of the gyroplane.

The flight control scheme is proposed. The longitudinal control strategy are used, including the height control by thrust, the speed control by longitudinal paddle position and the pitch control as the damping of speed control. The inner loop of lateral control strategy is roll control and the outer loop is path control. Based on the identified linear model and using the matching control surface and the throttle trim in the different state of the gyroplane as feedforward, the flight control law is designed and set up on the basis of determining the flight control structure. And then the unmanned take-off/landing scheme is designed. The low-speed high-gain and high-speed small-gain of the skid correction control scheme is carried out. Because the pressure longitudinal paddle position action in the moment of the gyroplane's front wheel lifted up is very dangerous, a reasonable takeoff strategy is designed to avoid the fuselage posture instability. Take the same down angle to track down the trajectory for improving the landing accuracy. Aiming at the seriousness of the low fuselage posture in the sliding section, two kinds of landing control strategies are proposed. At the same time, the lateral anti - lateral wind strategy is proposed.

In order to verify the autonomous take-off/landing control strategy, the YASim modeling method based on FlightGear software is used to build the all-inclusive aerodynamic model of the prototype ELA07, and the semi-physical simulation platform is built to realize the fully autonomous control. At the same time, considering the uncertain factors of the take-off/landing section and the environmental disturbance, the flight simulation of the take-off/landing section is carried out to verify the correctness of the control law and control logic of the unmanned gyroplane.

Put forward a reasonable flight test scheme, given the steps to adjust the control parameters online, and finally succeeded in the prototype ELA07 unmanned first flight. The flight test data indicate that the control logic of the air cruise and autonomous takeoff/landing is correct and the control parameters are reasonable.

Key words: unmanned gyroplane; system identification; control scheme design; semi-physical simulation; flight test

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	III
目 录.....	V
CONTENTS	IX
符号表.....	XIII
第一章 绪论	1
1.1 研究背景、目的及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	3
1.2.1 旋翼机发展现状.....	3
1.2.2 无人旋翼机建模与控制技术研究现状	6
1.3 旋翼机飞行控制难点.....	8
1.4 本文研究内容	9
第二章 基于参数辨识的建模技术研究	10
2.1 气动参数辨识方案.....	10
2.1.1 试验方案设计.....	10
2.1.2 数据采集系统的设计	11
2.2 气动参数辨识算法.....	13
2.2.1 线性回归法.....	13
2.2.2 极大似然法.....	15
2.2.3 Newton-Raphson 优化算法.....	16
2.3 辨识试验输入设计.....	16
2.3.1 扫频激励.....	17
2.3.2 211 方波激励.....	17
2.3.3 试验激励响应.....	18

2.4 纵横向辨识模型及模型优化	19
2.4.1 纵横向辨识模型结构	19
2.4.2 模型辨识.....	20
2.5 辨识精度评估	22
2.5.1 纵向辨识精度评估	22
2.5.2 横侧向辨识效果精度评估.....	24
2.5.3 辨识结果分析.....	25
2.6 纵横向辨识效果验证.....	26
2.7 本章小结	29
第三章 无人自转旋翼机特性分析	30
3.1 基于辨识结果的气动特性分析	30
3.1.1 辨识模态分析.....	30
3.1.2 纵向静稳定性和操纵特性分析	32
3.1.3 横滚静稳定性和操纵特性分析	35
3.1.4 航向静稳定性分析	36
3.2 基于配平数据的气动特性分析	36
3.2.1 不同前向力对气动特性的影响	36
3.2.2 不同纵向力对气动特性的影响	37
3.2.3 不同配重对气动特性的影响.....	38
3.2.4 不同海拔高度对气动性能的影响	39
3.3 有人起飞着陆段气动特性分析	40
3.3.1 起飞段特性分析	40
3.3.2 着陆段特性分析	41
3.4 本章小结	42
第四章 无人自转旋翼机控制策略研究	43
4.1 控制律总体设计方案.....	43
4.2 纵向控制律设计.....	45
4.2.1 俯仰角控制.....	45

4.2.2	空速控制.....	47
4.2.3	基于油门的高度控制	49
4.2.4	下沉率控制.....	51
4.3	横侧向控制律设计.....	54
4.3.1	航迹控制.....	54
4.3.2	滚转控制.....	55
4.4	滑跑控制方案	56
4.4.1	预旋控制策略设计	56
4.4.2	滑跑控制策略设计	57
4.5	起飞阶段控制方案.....	58
4.5.1	起飞纵向控制策略设计.....	58
4.5.2	起飞横侧向控制策略设计.....	59
4.6	着陆阶段控制方案.....	60
4.6.1	着陆纵向控制策略设计.....	60
4.6.2	两种姿态拉起控制策略设计.....	62
4.6.3	着陆横侧向抗侧风控制策略设计	65
4.7	本章小结	67
第五章	基于 FlightGear 的飞行仿真	69
5.1	半物理仿真环境简介	69
5.1.1	FlightGear 飞行平台	69
5.1.2	FlightGear 飞行动力学模型	70
5.1.3	基于 YABSim 的无人自转旋翼机 ELA07 建模.....	70
5.1.4	基于 FlightGear 的半物理仿真平台	73
5.2	起飞段控制策略仿真验证	75
5.2.1	考虑桨盘控制偏差的起飞仿真验证	75
5.2.2	考虑油门偏差的起飞仿真验证	76
5.2.3	考虑重心偏差的起飞仿真验证	77
5.2.4	起飞段前向风扰动的影响.....	78

5.3 着陆段控制策略仿真验证	79
5.3.1 拉起高度偏差的着陆仿真验证	80
5.3.2 考虑空速测量偏差的着陆仿真	81
5.3.3 着陆段前右向侧风扰动的影响	82
5.4 本章小结	83
第六章 自主起降飞行试验设计与试验结果分析	85
6.1 自主起降试飞方案设计	85
6.1.1 飞行航路与试验内容	85
6.1.2 起降轨迹线设计	86
6.2 在线调整控制律参数	86
6.2.1 起飞段控制律调整	87
6.2.2 空中段控制律调整	88
6.2.3 模拟着陆以及着陆段控制律调整	88
6.3 试验结果分析	89
6.3.1 滑跑纠偏试验结果分析	90
6.3.2 起飞段试验结果分析	91
6.3.3 空中飞行试验结果分析	92
6.3.4 模拟着陆以及实际着陆段试验结果分析	95
6.4 本章小结	97
第七章 总结与展望	98
7.1 本文工作的总结	98
7.2 后续工作展望	99
参考文献	100
致谢	104
攻读学位期间的研究成果及发表的学术论文	105

CONTENTS

ABSTRACT	III
CONTENTS	IX
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Research Background	1
1.2 Research Status at Home and Abroad	3
1.2.1 Gyroplane Development Status.....	3
1.2.2 Unmanned Gyroplane's Modeling and Control Status.....	6
1.3 Gyroplane Flight Control Problems	8
1.4 The Main Content of Paper	9
Chapter 2 Modeling Technology Research Based on the Parameter Identification	10
2.1 Aerodynamic Parameter Identification Scheme	10
2.1.1 Flight Test Scheme Design.....	10
2.1.2 Data Collection System Design.....	11
2.2 Aerodynamic Parameter Identification Algorithm	13
2.2.1 Linear Regression Algorithm	13
2.2.2 Maximum Likelihood Algorithm	15
2.2.3 Newton-Rapson Optimization Algorithm.....	16
2.3 Flight Identification Test Input Design	16
2.3.1 Frequency Sweep Excitation.....	17
2.3.2 211 Square Wave Excitation	17
2.3.3 Flight Test Excitation Response	18
2.4 Longitudinal/Lateral Identification Model and Optimization	19
2.4.1 Longitudinal/Lateral Identification Model	19
2.4.2 Model Identification	20
2.5 Identification Parameter Precision Evaluation	22

2.5.1 Longitudinal Identification Parameter Precision Evaluation	22
2.5.2 Lateral Identification Parameter Precision Evaluation	24
2.5.3 Identification Result Analysis	25
2.6 Longitudinal/Lateral Identification Result Verification	26
2.7 Summary	29
Chapter 3 Unmanned Gyroplane's Characteristics Analysis .	30
3.1 Aerodynamic Characteristics Analysis Based on Identification	30
3.1.1 Identification Model Analysis	30
3.1.2 Longitudinal Static Stability / Control Characteristics Analysis	32
3.1.3 Lateral Static Stability / Control Characteristics Analysis.....	35
3.1.4 Directional Static Stability Control Analysis	36
3.2 Aerodynamic Characteristics Analysis Based on Balancing Data ..	36
3.2.1 Forward Force Influence on Aerodynamic Characteristics	36
3.2.2 Longitudinal Force Influence on Aerodynamic Characteristics .	37
3.2.3 Weight Influence on Aerodynamic Characteristics	38
3.2.4 Altitude Influence on Aerodynamic Characteristics	39
3.3 Manoeuvre Take-off/Landing Aerodynamic Characteristics Analysis	
.....	40
3.3.1 Manoeuvre Take-off Aerodynamic Characteristics Analysis.....	40
3.3.2 Manoeuvre Landing Aerodynamic Characteristics Analysis	41
3.4 Summary	42
Chapter 3 The Unmanned Gyroplane Control Strategy	43
4.1 Control Law Overall Design Scheme.....	43
4.2 Longitudinal Control Law	45
4.2.1 Pitch Control	45
4.2.2 Airspeed Control.....	47
4.2.3 Height Control Based on Throttle	49
4.2.4 Sink Rate Control	51

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