



Flight Testing of Fixed-Wing Aircraft

固定翼飞机的飞行试验

(美)拉尔夫·D. 金伯林(Ralph D. Kimberlin) 著

张炜 田福礼 译

张怡哲 译审

航空工业出版社

AIAA EDUCATION SERIES

AIAA 航空航天技术丛书

“十二五”国家重点图书出版规划项目

固定翼飞机的飞行试验

(美) 拉尔夫·D. 金伯林 (Ralph D. Kimberlin) 著

张 炜 田福礼 译

张怡哲 译审

航空工业出版社

北 京

内 容 提 要

本书的作者拉尔夫·D. 金伯林曾经担任 AIAA 飞行试验分会主任,也是 FAA 的飞行试验咨询顾问,作者拥有丰富的飞行试验经验,并且通过对照相关的适航条例,系统地介绍了相应的飞行试验技术和方法,因此本教材具有很强的实用性。教材分为 3 大部分,共 35 章。第 1 部分讲述了与性能飞行试验有关的飞行测试方法;第 2 部分介绍了稳定性、操纵性基本理论和飞行试验方法;第 3 部分对危险性飞行测试内容进行了总结。

本书可用于本科高年级学生和研究生课程教学,也可作为试飞员和试飞工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

固定翼飞机的飞行试验/(美)金伯林
(Kimberlin, R. D.) 著;张炜,田福礼译. --北京:航
空工业出版社,2012.10

(AIAA 航空航天技术丛书)

书名原文:Flight Testing of Fixed-Wing
Aircraft

ISBN 978-7-5165-0055-2

I. ①固… II. ①金… ②张… ③田… III. ①飞机试
验 IV. ①V217

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 174060 号
北京市版权局著作权合同登记
图字:01-2011-2802

Translated from the English language edition: *Flight Testing of Fixed-Wing Aircraft*, by Ralph D. Kimberlin. Originally published by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. ISBN 978-1-56347-564-1. Copyright © 2003 by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. All rights reserved.

固定翼飞机的飞行试验

Gudingyi Feiji de Feixing Shiyan

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里 14 号 100029)

发行部电话:010-64815615 010-64978486

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2012 年 10 月第 1 版

2012 年 10 月第 1 次印刷

开本:710×1000 1/16

印张:23.5

字数:458 千字

印数:1—3000

定价:130.00 元

《AIAA 航空航天技术丛书》审委会

顾问：(按姓氏笔画排列)

尹泽勇 石 屏 冯培德 刘大响 关 桥 杨凤田 李 天
李 明 宋文骢 张彦仲 陈一坚 陈祥宝 赵振业 唐长红
顾诵芬 曹春晓 颜鸣皋

主任：林左鸣

副主任：谭瑞松 顾惠忠 吴献东 张新国

委员：(按姓氏笔画排列)

王 坚 王之林 王向阳 王英杰 王润孝 卢广山 曲景文
华 俊 刘选民 刘春晖 杨圣军 李晓红 吴 松 汪亚卫
陈元先 陈灌军 庞 为 郭恩明 都本正 彭卫东 葛子干
蔡 毅 魏金钟

《AIAA 航空航天技术丛书》编委会

主任：张新国

副主任：王英杰 魏金钟

委员：(按姓氏笔画排列)

丁文强 丁全心 王永庆 王永明 王明皓 王聪梅 车 宏
牛文生 邓景辉 尹红顺 艾俊强 帅朝林 田 泽 白晓东
冯子明 巩水利 朱知寿 朱荣刚 刘永泉 江和甫 孙 聪
杨 伟 杨 旭 杨 超 杨朝旭 苏炳君 李文正 李东杰
李孝堂 李宏新 李周复 严成忠 吴希明 吴良斌 吴学仁
何胜强 沈锡钢 宋笔锋 张 弘 张 波 张明习 张继高
陆志东 陆虎敏 陈聪慧 范彦铭 欧阳绍修 罗安阳 周自全
赵 霞 侯敏杰 姚 华 袁 立 聂海涛 徐华胜 郭德伦
益小苏 陶春虎 桑建华 黄 佑 黄传跃 曹奇凯 章怡宁
梁相文 梁晓庚 董建鸿 强宝平 童明波 曾 军 曾元松
蒲小勃 褚林塘 臧 军 廖志忠 樊会涛

编委会办公室

主任：刘 鑫

副主任：史晋蕾 李苏楠

成员：(按姓氏笔画排列)

安玉彦 李金梅 郭 玮 郭倩旒

丛书序（一）

中国航空工业要融入世界航空产业链，进行国际化开拓，参与国际合作和竞争，与世界航空航天企业共谋发展，需要的是强大的技术支撑。构建先进的技术研发平台，加速推进前沿科学技术的研究，加速推进航空发动机技术和航空先进材料技术领域的基础及应用技术研究、新产品研发与技术创新，关键是要有一批具有高水平、高素质的航空航天专业人才。而人才的培养离不开知识的传承，这套《AIAA 航空航天技术丛书》就为我们提供了一个很好的资源。

习人之长，补己之短，正视不足，奋发崛起，社会发展规律普遍如此。从这套书中，我们不仅能读到长久以来人类在探索天空的过程中积跬步而形成的基础的、科学的、先进的专业知识和技术，以及崭新的思维方式和解决问题的技巧及方法，更重要的是能在学习这些成功经验的同时，多注意看看前车之鉴，避免陷阱。在这里我想要与大家共勉的是，即使是在百科全书中也不能找到所有问题的答案，科学发展永无止境，航空航天业的进步带动着社会高精尖技术的发展，其中还有很多领域及问题需要我们去探索 and 解决，因此，我们要抱着虚心的态度去学习，勇于探索的态度去思考，用好这些书，读好这些书。

科技的进步是整个社会的进步。愿我们的科技工作者、科研管理人员和广大的院校师生，既能够从中学习到知识、寻找到答案，更能够汲取精华，并能积极探索，与自身的知识、技术和经验相结合，在中国航空工业整翼飞升之时，迸发出更加绚丽的思想火花。



中国航空工业集团公司董事长

丛书序（二）

航空航天业是关系国家安全和国民经济命脉的战略性产业，是高投入、高附加值的技术密集型产业。由于其技术含量高、产业链长、带动性强，其发展对我国经济结构调整、实现产业优化升级、提高综合国力具有重要意义。金融危机之后，全球对于实体经济的认识回归到正确的轨道上来，重振制造业已成大家共识。而依靠高新技术和高产品附加值的高端制造业，被认为是推进工业转型升级的突破口。航空航天业作为高端制造业的重中之重，如何发挥其“火车头”作用引领制造业拥有强大竞争优势，成为当务之急。而解决这一问题的关键，就是突破核心技术，加强自主创新。

相比欧美等发达国家，我国并没有系统地经历科学革命和工业革命的洗礼。科学技术和工业基础落后，是导致我们高端制造业发展缓慢的原因之一。科学技术的进步非一朝一夕之力。通常来讲，一个产业发展所依托的先进技术至少需要10~20年的储备周期。以前的飞机材料都是单一金属的，现在随着材料技术、制造技术的进步，发展到铝合金、铝镁合金、钛合金以及碳纤维材料。这种科学技术的进步改进了飞机的性能和功能，包括后期出现的预警机、加油机、空天飞机等，其背后凭借的也是飞机的电子设备、任务系统、功能系统等的不断升级，依靠的是一系列科学技术的积累。

夯实技术基础并谋求创新，除了依靠自身积极探索、不断积累技术成果，还要吸纳国外先进的技术成果和经验，建立开放式的科学技术发展架构。

着眼于此，中航出版传媒有限责任公司（航空工业出版社）从美国航空航天学会（AIAA）的专业出版物中选择优秀图书引进翻译出版为中文版，推出了这套《AIAA 航空航天技术丛书》。熟悉AIAA的同行们都知道，AIAA的出版物专注于航空航天领域，包括专业图书、期刊、会议论文和标准等，是为航空航天业提供信息服务的重要组成部分。AIAA的图书工作委员会及其严格的审查制度保证了其图书具有较高的学术水平和技术含量。

这套中文版的《AIAA 航空航天技术丛书》涵盖飞行器的结构技术、材料技术、制造技术、气动技术、推进技术、试验技术、控制技术、航电系统和武器系统等方面，是对国内有关专业领域的有益补充。这次引进翻译出版工作所涉及的专业领域较多，工作繁杂，难度很大，需要协调的事情也很多，衷心希望最终能够达到预期目的，真正为促进国际化的交流与合作、为培养高素质的航空航天专业人才、为前沿科学技术的探索和创新起到应有的作用。



中国航空工业集团公司副总经理

给 AIAA 中文版丛书的序言

美国航空航天学会 (AIAA) 由成立于 1930 年的美国火箭协会和成立于 1932 年的美国航空科学学会于 1963 年合并而成。自此, AIAA 就作为最早的平台服务于美国及全球航空航天技术的创新者、卓越者和引领人。广为人们所熟悉的奥维尔·莱特, 尼尔·阿姆斯特朗, 弗兰克·惠特尔, 凯利·约翰逊, 西奥多·冯·卡门和沃纳·冯·布朗都是 AIAA 的会员, 而每 6 名 AIAA 的会员中就有超过 1 名会员来自美国以外的国家或地区。

这套中文版的《AIAA 航空航天技术丛书》是 AIAA 和中航出版传媒有限责任公司 (航空工业出版社) 良好合作的硕果。这种合作关系使得 AIAA 与中国航空学会之间以及 AIAA 与中国航空学会之间的合作相得益彰。作为世界上最大的服务于航空航天业的技术学会, 由我们来推进 AIAA 图书中文版及双语版的出版和促成我们会员之间的交流是极为恰当之事。

我们的合作最早是由中航出版传媒有限责任公司所提出的, 最初主要关注在对 AIAA 技术图书的翻译上, 采用译注的形式使得英文技术词汇有限的学生能够掌握图书阐述的概念。正如你们所看到的这套丛书, 现在它已不仅限于最初的目的和形式。我们不会忘记我们的宗旨, 而当我们展望未来时, 我们感到非常高兴的是这套 AIAA 中文版图书包含了 AIAA 所出版的所有类别的图书: 教育系列 (大学教材)、航空航天进展系列 (科技) 以及飞行图书馆系列 (大众爱好)。

另外, 最近几年里, AIAA 的所有图书、期刊文章和技术会议论文都已进行电子版存档, 我们也希望我们的国际会员和合作伙伴能够很方便地访问这个强大的航空航天信息图书馆。

由最初在出版上的合作开始, AIAA 已增强了其与中国的合作关系, 包括代表团互访和交流等活动。这些互惠活动使美国和中国的航空航天团体之间的联系纽带更加牢固, 也使双方收获了重要的友谊。各种开拓性的互动将使我们的国家间拥有更好的相互理解与合作关系。AIAA 非常感谢中国航空工业集团公司的张新国副总经理、中航工业经济技术研究院王英杰院长、中航出版传媒有限责任公司的刘鑫总经理和李苏楠主任为此次合作所做出的努力。

AIAA 致力于服务广大会员和航空航天业。如今，AIAA 有许多来自中国的会员，随着更多的学生和专业人士通过这套丛书、AIAA 的其他出版物和直接的交流而对 AIAA 有更多的了解，我们希望来自中国的会员数量将会不断增多。而对于如何改善我们的服务，我们认为最好的想法是来自于我们的读者和会员。欢迎你们提出建议，并且我相信中航出版传媒有限责任公司会将你们提出的建议转达给 AIAA。

我们期待着未来长期且富有成效的合作。



罗伯特·迪克曼
美国航空航天学会主席

原 版 序

拉尔夫·D. 金柏林所著的《固定翼飞行的飞行试验》是关于新型飞行在研制阶段开展飞行试验研究的权威性论著。金柏林拥有丰富的工程实践经验，他早期在美国空军服役，之后在洛克韦尔通用航空和派珀飞行公司担任首席试飞员。他还担任过 AIAA 飞行试验委员会主席。同时，他也被指定为美国联邦航空局 (Federal Aviation Administration, FAA) 顾问试飞员和飞行分析师。

本书的内容是专门针对航空工程教学需要而编写的，有助于读者在设计实践过程中进行学习，这也是航空工程教育的关键环节之一。本书的 35 个章节分为 3 大部分。第 1 部分是性能飞行试验，第 2 部分是稳定性和操纵性飞行试验，第 3 部分是危险性飞行试验。从各部分的内容安排可以看出本书的覆盖面很广。第 1 部分包括 FAA 的要求、螺旋桨和喷气发动机、平飞性能、航程和续航时间、爬升、盘旋、阻力测定、起飞以及着陆性能；第 2 部分包括稳定性与操纵性、纵向静稳定性及动稳定性、盘旋性能、横侧稳定性、航向操纵以及飞行技术；第 3 部分包括失速和尾旋试验以及颤振、振动和抖振的俯冲试验。

AIAA 系列教材与专著的形成始于 1984 年，它覆盖了航空航天多个学科的理论基础与应用技术，包括航空设计的工程与实践。该系列还包括国防科学、工程以及管理等学科的论著。这些论著可以作为学生的教科书，也可作为工程师、科学家和管理工作者的参考资料。

J. S. 普尔米尼亚茨基
《AIAA 教育系列丛书》主编

原版前言

本书有两个目的：第一是作为固定翼飞机飞行试验教学课程的教科书；第二是作为参考资料，主要针对从事飞行试验的专业人士或从事飞行试验管理工作的相关人员。书中内容分为三部分：第1部分介绍性能飞行试验；第2部分介绍稳定性和操纵性飞行试验；第3部分介绍危险性飞行试验。前两部分可以作为高年级的研究生或本科生一学期的课程。第3部分给出了至少30年的开展危险性飞行试验的相关经验信息。正因如此，它可以作为飞行试验方面的参考资料。

在飞机的飞行试验中，性能的测试是最重要的任务之一。因为它既影响飞机的安全性又影响飞机的市场竞争力。性能决定市场竞争力。如果飞机性能较差，那么它的生产和营运周期就会非常短。相比其他试验内容，如皮托管静压系统的校正和失速速度的测试，性能的测试一般会推迟到飞行试验项目的最后阶段进行。为了使飞机具有更好的操纵品质，在飞行试验进行过程中，飞机的结构有可能会改变，而飞机结构的改变将影响飞机的动力。因而，试飞员和飞行试验工程师应该注意到，飞机研发方往往很早就会要求进行性能测试，这将导致飞行试验工作的效率降低，因为每次结构改变之后都要求再次进行性能测试飞行。

本书讨论了螺旋桨飞机和喷气式飞机的性能飞行试验，重点是螺旋桨飞机。因为随着时间的流逝，许多螺旋桨飞机的试验方法已经遗失了，所以作者提醒，为获得更多的喷气式飞机飞行试验的信息，喷气式飞机的驾驶员和工程师可以查询美国空军飞行试验组织的最新文献。

稳定性和操纵性部分给出了用于测量和估计相关参数的经典飞行试验方法。确切地说，它是针对轻型飞机领域和发展尚不成熟的通用航空飞机企业。虽然像参数辨识等现代化的技术已经得到发展，但是，在最小型的飞机项目中，这些技术应用成本代价较高。此外，FAA 条例也仍然是基于经典的技术。

在新飞机研制过程中，飞机具备很好的稳定性和操纵性是最基本的要求，因此这部分内容在飞行试验管理机构的参考书中放在第一位。而在大学的飞行试验课程安排上与其他飞行动力学课程一样，一般首先介绍飞行性能这部分内容。

拉尔夫·D. 金伯林

2003年5月

目 录

第 1 部分 性能飞行试验

第 1 章 绪论	(3)
1.1 飞行试验介绍	(3)
1.2 飞行试验的种类	(3)
1.3 飞行试验的顺序	(4)
1.4 飞行试验计划	(4)
1.4.1 试验项目计划	(4)
1.4.2 单次飞行计划	(5)
1.4.3 飞行数据卡	(5)
1.5 规范与要求的管理	(6)
1.5.1 FAA 条例	(7)
1.5.2 FAA 飞行试验指导	(7)
1.5.3 其他要求	(8)
1.6 大气	(8)
1.6.1 标准大气	(9)
1.6.2 大气变量	(9)
1.7 飞机的重量和重心	(11)
1.7.1 称重与配重方法	(11)
1.7.2 测试中重量和重心的要求	(12)
1.7.3 如何确定和使用平均气动弦长	(12)
1.8 飞行测试的公差	(14)
参考文献	(15)
第 2 章 减少飞行试验数据误差的方法	(17)
2.1 简介	(17)
2.2 误差的来源及大小	(17)

2.2.1 仪器误差	(17)
2.2.2 飞行速度误差与高度误差	(18)
2.2.3 读数误差或分辨误差	(19)
2.2.4 大气环境导致的误差	(19)
2.2.5 由驾驶员技术导致的误差	(19)
2.2.6 不准确的推力或功率设置导致的误差	(19)
2.2.7 控制系统内的摩擦力或迟滞导致的误差	(19)
2.3 避免和减小误差	(20)
2.3.1 仪器校正	(20)
2.3.2 样本量大小	(20)
2.3.3 避免读数误差的方法	(20)
2.3.4 降低大气误差	(20)
2.3.5 减小由驾驶员技术导致的误差	(21)
2.3.6 减小由不精确的推力和功率测量导致的误差	(21)
2.3.7 减小摩擦力误差	(21)
2.4 误差分析	(21)
2.4.1 一致性试验	(22)
2.4.2 理论验证试验	(22)
2.4.3 相关性试验	(22)
参考文献	(23)

第3章 空速系统理论和校准方法

(25)

3.1 简介	(25)
3.2 联邦航空局条例	(25)
3.2.1 民用航空条例 3.663 空速显示系统	(25)
3.2.2 民用航空条例 3.665 静通气孔系统	(25)
3.2.3 联邦航空条例 23.1323 空速显示系统	(25)
3.2.4 联邦航空条例 23.1325 静压系统	(26)
3.2.5 咨询通告 23-8A	(26)
3.3 空速系统理论	(26)
3.4 位置误差	(27)
3.5 延迟误差	(28)
3.6 高度计位置误差	(28)
3.7 飞行校准方法	(29)

3.7.1 航线速度方法	(29)
3.7.2 塔台测试方法	(30)
3.7.3 标准机同步飞行方法	(30)
3.7.4 雷达方法	(30)
3.7.5 机上参照方法	(31)
3.7.6 GPS 方法	(31)
3.8 温度探测计校准	(31)
参考文献	(32)
第 4 章 失速速度的测量	(33)
4.1 引言	(33)
4.2 联邦航空局条例	(33)
4.2.1 民用航空手册要求 3	(33)
4.2.2 联邦航空条例第 23 部	(34)
4.3 失速理论	(35)
4.3.1 二维因素	(35)
4.3.2 三维因素	(37)
4.4 飞机载荷	(39)
4.5 安全考虑因素	(40)
4.6 飞行测试方法	(40)
4.6.1 配平空速	(40)
4.6.2 动力设置	(40)
4.6.3 减速速率	(41)
4.6.4 定义失速	(41)
4.6.5 静态样本	(41)
4.7 数据简化方法	(41)
4.7.1 重量修正	(41)
4.7.2 减速速度修正	(41)
4.7.3 重心位置修正	(42)
4.7.4 平均修正数据	(42)
参考文献	(42)
第 5 章 飞行中的发动机推力测定	(44)
5.1 简介	(44)

5.2 飞行中内燃机的动力测量	(44)
5.2.1 扭矩表方法	(44)
5.2.2 发动机推力表法	(45)
5.2.3 燃油流量法	(48)
5.3 安装马力损失及其如何影响推力测量	(48)
5.3.1 进气系统损失	(48)
5.3.2 排气系统损失	(49)
5.3.3 附件损失	(49)
5.3.4 冷却损失	(49)
5.4 推力修正	(49)
5.4.1 高度修正	(49)
5.4.2 非标准温度修正	(49)
5.4.3 湿度修正	(50)
5.4.4 全油门修正	(50)
5.4.5 在总压一定时由涡轮转速和背压引起的推力修正	(50)
5.5 临界高度	(50)
参考文献	(51)
第 6 章 螺旋桨理论	(52)
6.1 引言	(52)
6.2 螺旋桨理论	(52)
6.2.1 动力理论	(52)
6.2.2 桨叶剖面理论	(53)
6.3 螺旋桨特性图	(55)
6.4 定常速度或可控的螺旋桨	(55)
6.5 活性因素	(55)
6.6 螺旋桨噪声	(56)
参考文献	(56)
第 7 章 飞行中的喷气推力测量	(57)
7.1 简介	(57)
7.2 基本理论	(57)
7.3 飞行推力测试方法	(59)
7.3.1 喷气流测量法	(59)

7.3.2 发动机手册数据	(59)
7.3.3 风洞测量	(59)
7.3.4 爬升性能方法	(60)
参考文献	(60)
第 8 章 平飞性能理论	(61)
8.1 导论	(61)
8.2 需用推力	(61)
8.3 需用推力中变量的影响	(62)
8.3.1 重力的影响	(62)
8.3.2 空气密度的影响	(63)
8.4 需用功率	(63)
8.5 需用功率曲线中变量的影响	(64)
8.5.1 重力的影响	(64)
8.5.2 密度的影响	(64)
8.6 高马赫数的影响	(65)
8.7 可用推力或功率	(65)
参考文献	(66)
第 9 章 螺旋桨飞机平飞性能飞行试验和数据简化方法	(67)
9.1 导论	(67)
9.2 联邦航空局的要求	(67)
9.3 PIW – VIW 方法	(67)
9.4 飞行试验方法	(68)
9.4.1 定速螺旋桨飞机的试验方法	(68)
9.4.2 定螺距螺旋桨飞机的试验方法	(69)
9.5 简化观察到的数据	(69)
9.5.1 定速螺旋桨	(69)
9.5.2 PIW 对 VIW 的标准化	(70)
9.5.3 定螺距螺旋桨	(71)
9.6 扩展观察到的数据	(72)
9.6.1 定速螺旋桨飞机数据扩展	(72)
9.6.2 定螺距螺旋桨飞机数据扩展	(75)
参考文献	(77)

第 10 章 喷气式飞机的平飞性能..... (78)

10.1 导论 (78)

10.2 相关理论 (78)

10.3 飞行试验技术 (81)

10.4 数据简化 (82)

参考文献 (83)

第 11 章 航程和续航时间..... (84)

11.1 导论 (84)

11.2 航程——螺旋桨飞机 (85)

11.2.1 螺旋桨飞机航程理论 (85)

11.2.2 普通的吸气往复式发动机 (86)

11.2.3 涡轮增压往复式发动机 (88)

11.2.4 涡轮螺旋桨发动机 (88)

11.3 航程——喷气式飞机 (89)

11.4 风对航程的影响 (92)

11.5 续航时间——螺旋桨飞机 (93)

11.6 续航时间——喷气式飞机 (94)

参考文献 (95)

第 12 章 爬升性能理论..... (96)

12.1 导论 (96)

12.2 爬升理论 (96)

12.2.1 矢量方法 (96)

12.2.2 能量方法 (100)

参考文献 (100)

第 13 章 爬升性能数据简化和扩展方法..... (102)

13.1 简介 (102)

13.2 联邦航空局条例 (102)

13.2.1 民用航空条例..... (102)

13.2.2 联邦航空条例第 23 部..... (103)

13.2.3 咨询通告 23-8A (103)