飞机设计技术丛书

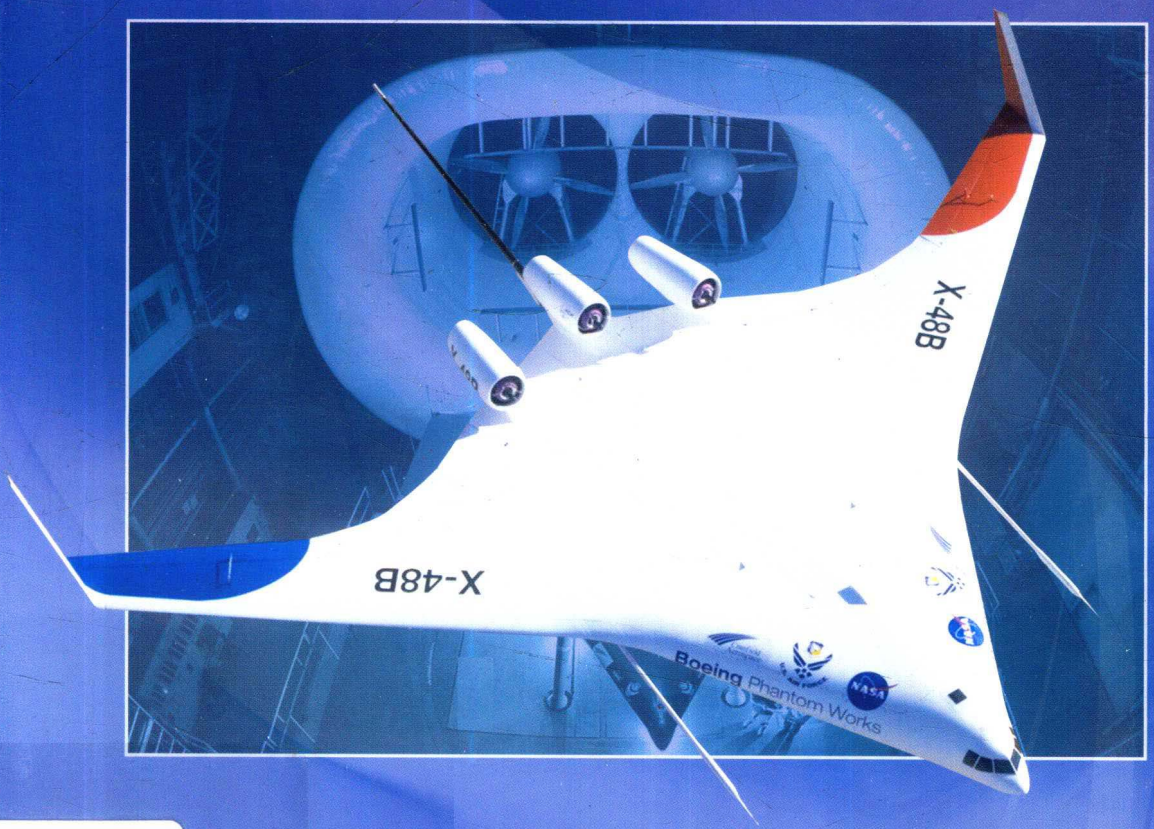
“十二五”国家重点图书出版规划项目

MODELING FLIGHT:
THE ROLE OF DYNAMICALLY SCALED FREE-FLIGHT MODELS IN SUPPORT OF NASA'S AEROSPACE PROGRAMS

缩比自由飞
——动力相似自由飞模型在保障NASA航空航天计划中的作用

[美] 约瑟夫·R.钱伯斯(Joseph R.Chambers) 著

段卓毅 主译



航空工业出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

缩比自由飞

——动力相似自由飞模型在保障NASA航空航天计划中的作用

Modeling Flight: The Role of Dynamically Scaled Free - Flight Models in Support of NASA's Aerospace Programs

[美] 约瑟夫·R. 钱伯斯 (Joseph R. Chambers) 著

段卓毅 主译

航空工业出版社

北京

内 容 提 要

本书共计9章及参考文献附录。开篇部分首先对缩比模型试验的方法准则及重要地位进行了简要介绍并对NASA及其前身NACA自由飞技术的发展历程进行了回顾。本书核心内容探讨了对重要模型试验设施的物理特征、所用模型和试验方法，分析了不同类型模型的试验过程，总结梳理了试验工作的经验与教训；最终对缩比模型试验方法的未来发展进行了展望。

本书采用简单平实的技术语言，深入浅出，不失为相关专业大学生及军民用航空界内研究人员的一本有益的技术参考资料。

图书在版编目（CIP）数据

缩比自由飞：动力相似自由飞模型在保障NASA航空航天计划中的作用／（美）约瑟夫·R. 钱伯斯（Joseph R. Chambers）著；段卓毅主译. --北京：航空工业出版社，2018.1（2018.12重印）

（飞机设计技术丛书）

书名原文：Modeling Flight：The Role of Dynamically Scaled Free-Flight Models in Support of NASA's Aerospace Programs

ISBN 978-7-5165-1457-3

Ⅰ. ①缩… Ⅱ. ①约… ②段… Ⅲ. ①自由飞 Ⅳ. ①V323

中国版本图书馆CIP数据核字（2017）第308867号

缩比自由飞——动力相似自由飞模型在保障NASA航空航天计划中的作用

Suobi Ziyoufei——Dongli Xiangsi Ziyoufei Moxing zai Baozhang NASA Hangkong Hangtian Jihuazhong de Zuoyong

航空工业出版社出版发行

（北京市朝阳区北苑2号院 100012）

发行部电话：010-84936597 010-84936343

三河市华骏印务包装有限公司印刷 全国各地新华书店经售

2018年1月第1版 2018年12月第2次印刷

开本：787×1092 1/16 印张：11.25 字数：251千字

印数：1501—2300 定价：46.00元

编译委员会

主　译：段卓毅

副主译：郭圣洪　王立行　董进武　席小宁
　　杨　号　邓一菊　王伟钢

成　员：杨　戈　耿建中　王江三　王钟毓
　　许云峰　拜　斌　蒋　彪　吕　飞
　　马　坤　赵　彦　丁兴志　王永超
　　张　旭

译 者 序

缩比飞行试验技术随着飞行器的诞生而诞生，在辉煌的百年人类航空史中始终贯穿于航空基础研究、应用技术研究、先进技术发展、型号工程研制和用户使用验证的全过程。它具有试验模型自由度大、试验模拟条件广泛、综合模拟能力强和显著降低安全风险等优势，是一种地位特殊而重要的飞行试验手段。当今世界战场环境日新月异，用户对武器装备的需求向着多元化发展，新型布局飞行器大放异彩，缩比飞行试验验证的重要性更加凸显。如今的缩比飞行试验已经发展成为了集科学性、工程性和风险性于一体的系统工程。

近20年来，我国航空工业实现了井喷式的技术、型号双跨越式发展，成就喜人，奇崛峻岭已可窥峰。但我们也必须清醒地认识到，发达国家能够始终走在时代前沿引领行业发展，是因为他们在长期实践中摸索出了一整套先进的设计理念、科学的研发体系和成熟的设计流程。我们在紧盯世界最先进水平的装备、技术的同时，还要潜下心来对这套飞机设计系统工程的科学体系加以认真研究、悉心学习。在这个为发达国家航空工业带来了持续的活力和众多高新技术装备的科学体系中，缩比飞行试验技术是至关重要的一环。它能够大大提高创新布局飞机的气动、飞控、颤振等关键技术的成熟度，并显著降低型号的研制风险和全生命周期成本，在飞机设计工作中有着不可替代的地位。另一方面，缩比飞行试验本身就是一个复杂的系统工程，在我国航空工业系统工程工作正在大力贯彻发展的今天，对航空技术引领者NASA早已开始的缩比试验留下的诸多宝贵资料的挖掘与研究，无疑对我们更好地理解发展基于模型的系统工程方法论指导下的科学飞机设计流程工作具有重要的参考价值。

《缩比自由飞》一书对NASA及其前身NACA在过去80年的航空缩比试验技术发展历程进行了专业而生动的回顾，对这一历程中关键设施的物理特征、试验模型和试验方法进行了重点介绍，对飞行试验技术发展过程中凝结的重要经验教训进行了探讨分析。本书行文严谨，史料翔实，图片数据丰富生动，对于在空气动力学、结构和材料、推进系统和飞行控制系统等领域开展的包括空气动力和流体动力降阻、高升力系统、大气阵风和着陆冲击引致的载荷、飞行器水上迫降、抖振、推进效率、构型整合、结冰影响、气动弹性，以及稳定性和操作性的评估等工作有着宝贵的参考价值。此书是NASA在缩比飞行试验领域半个多世纪工作的总结提炼，译者在初读此书时如获至宝，获得了不少启迪与收获，如今与同仁将此书编译整理，是希望将这本好书分享出来，为我国从事航空事业的科研及管理工作者提供一册随手可阅的枕边书、案头卷。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

中国航空风雨兼程60余年，尤其近10年来，航空技术发展日新月盛，从昔日望尘莫及，到今朝望其项背，吾辈航空人不应一枝自足，更当竿头日进，擎系统工程之先进思维，悉心探究装备研发之内在规律，以世界顶尖水平老师为友，循“规”蹈“矩”，为中国航空事业早日实现从跟随到领跑的伟大跨越坚定前行。

致　谢

真诚感谢美国国家航空航天局（NASA）及其前身——美国国家航空咨询委员会（NACA）许许多多在职和退休职工在我准备此专题著作时无私地分享他们宝贵的公司记忆和个人资料。记录和编纂过去80多年来的研究和开发活动是一项十分艰巨的挑战，如果没有这些人的无私帮助和鼓励，这是一件根本不可能完成的任务。是他们对此项目的直接参与确保了一些之前在NASA兰利（Langley）研究中心、NASA艾姆斯（Ames）研究中心、NASA德莱顿（Dryden）飞行研究中心和NASA瓦勒普斯飞行研究中心中开展的最值得铭记的试验活动才得以保留至今并形成档案入册。在这里，我还要专门感谢为此书贡献资料的以下人员：Long P. Yip，Norman L. Crabill，Mark A. Croom，John Sain，Donald B. Owens，Kevin Cunningham，Sue B. Grafton，Dan D. Vicroy和Joseph L. Johnson，Jr。

特别感谢NASA总部的Anthony M. Springer先生对这项事业的鼓励和支持，同时对负责此工作准备和管理协调工作的Paragon TEC的Lynn Bondurant和Dorothy Watkins表示衷心感谢。感谢Sue B. Grafton和Frederick J. Lallman让我们能够查阅兰利研究中心的许多历史档案和照片，感谢Lana L. Albaugh、Edward M. Schilling和Jack Boyd为我们在艾姆斯查阅资料提供的帮助。此外，还要感谢兰利技术图书室的Garland Gouger及其职员在资料查阅方面提供的协助。照片档案管理员Alicia Bagby也在我们查阅兰利资料库的照片时提供了方便，对此表示感谢。感谢兰利研究中心的图形专家Gerald Lee Pollard提供的专业指导和宝贵材料。

同时还要感谢兰利研究中心的Mike Fremaux、Ray Whipple（已退休）和Don Riley（已退休）、艾姆斯研究中心的Chuck Cornelison、德莱顿飞行研究中心的Christian Gelzer以及NASA总部的Greg Finley为此书编辑工作所付出的努力和提供的宝贵意见。感谢NASA总部的Janine Wise提供专业的排版和编排建议。

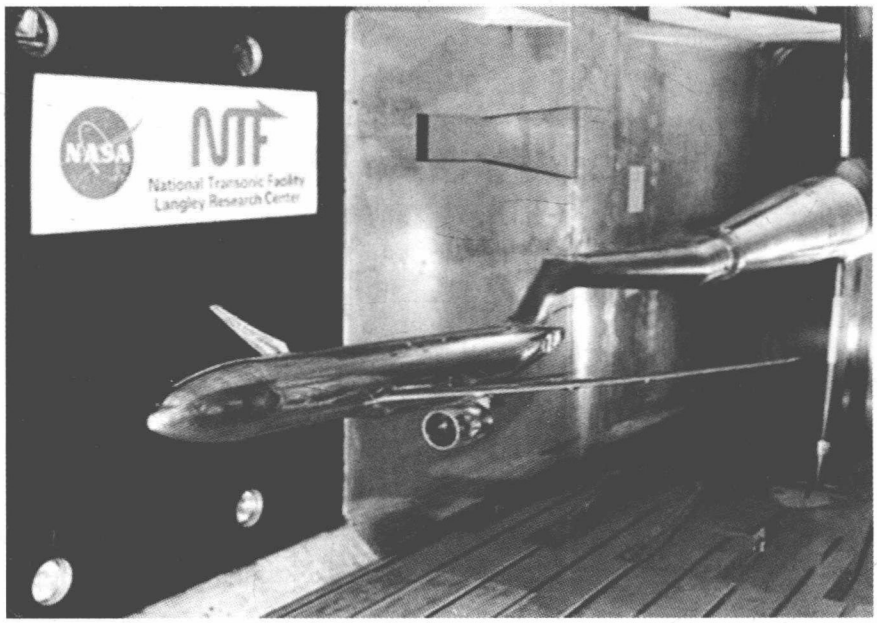
简　介

高级分析设计工具的发展，不断推动着航空工程的技术发展水平的提高。在航空器和航天器的早期设计阶段中使用的这些方法不仅让人们对物理现象有了基本的了解，而且让设计人员能够预测和分析新式运载工具的关键特征，包括控制或改进不理想的举措的能力。例如，最近涌现的数字计算机硬件和软件拥有极其强大的功能，它们的广泛使用对设计能力和设计程序产生了深远的影响。随着复杂的新式气流测量和可视化系统的出现，分析师能够在高级风洞中进行针对模型表面内外的流场内的特性的微观和宏观研究。可以在广泛的综合性技术学科范围内以闪电般的速度对飞行器的最高效的几何形状进行权衡研究，此外，复杂的有人驾驶飞行模拟器在运载工具研制过程中的运用允许操纵中最重要的一环——人类飞行员（地面操控）——对运载工具是否能够符合预期任务要求进行早期评估。通过全方位了解这些工具的应用，大大降低风险，有效地减少重新设计次数，从而提高新式航空航天器的适销性和安全性。

缩比模型试验可以说是自飞行技术出现以来较具可行性和价值的一种设计工具。在本文中，“模型”一词指的是对较大型全尺寸运载工具进行试验分析时使用的一种实物。读者可能知道，航空航天设计中也用到了许多其他形式的数学模型和基于计算机的模型；但是，这方面内容不在本文的讨论范围内。自早期飞行技术发展以来，人类从未中断对模型飞行器的迷恋，而且是他们创造灵感和娱乐消遣的源泉。在科学界，列奥纳多·达·芬奇（Leonardo da Vinci）、乔治·凯利（George Cayley）和莱特兄弟（Wright brothers）就是早期航空先驱的代表，他们在科学试验中经常使用模型来了解和研制飞行机器。模型试验相关技术在世界范围的广泛运用，使得模型飞机成为新型航空航天研究和研制计划一大关键因素，其作用得到了巩固。目前，这类模型在许多应用环境得到广泛使用，且发挥着各种作用，包括风洞研究中的空气动力学数据采集（用于分析全尺寸飞机设计）、概念验证机（针对颠覆性航空概念）和已投产运载工具的问题求解练习。航空航天模型最重要的贡献在于它不仅提高了新型设计的信心，降低了新型设计的风险，同时也增强了现有构型的安全性能和效率。

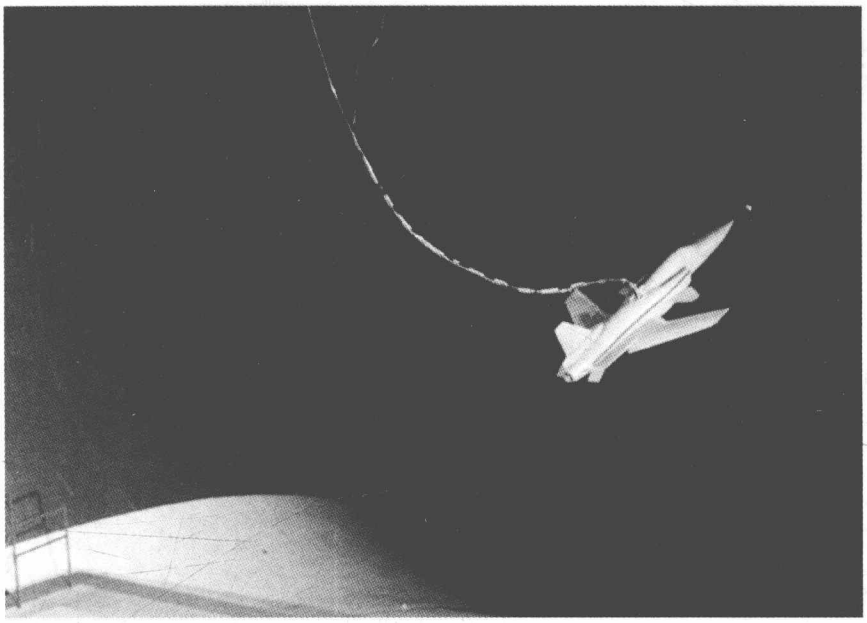
NASA 及其前身 NACA 是推动过去 80 年里航空航天模型试验技术发展的主力军。事实上，NACA/NASA 研究的各个技术学科在航空航天器的应用均采用独特、专门的模型，包括空气动力学、结构和材料、推进系统和飞行控制系统等领域。这些模型用于五花八门的专业领域中的成千上万的研究活动，范围牵涉广泛，包括空气动力和流体动力降阻、高升力系统、大气阵风和着陆冲击引致的载荷、飞行器水上迫降、抖振、推进效率、构型整合、结冰影响、气动弹性，以及稳定性和操作性的评估。在这些专业领域内，模型可以进一步分为“静态”模型和“动态”模型。

航空器和航天器的静态风洞模型旨在提取高质量、详尽的空气动力数据，以在指定飞行条件下对其对应的全尺寸机型进行分析。进行静态试验时，一般将模型固定到内部安装的测力装置上（称为“电测应变仪”，安装在尾撑支架系统上）。模型及其支架系统相对于风洞的方向和位置由研究人员按照指定的空气动力试验条件进行调节。静态试验的重点在于获取在不同空速、模型姿态和构型变量（如襟翼或操纵面偏转）组合下详尽的空气动力测量值。使用各式各样的仪器仪表来测量关键的空气动力参数，可能包括力和力矩、作用在模型表面的静态和动态压力、边界层（旧称附面层）的状态和模型表面内外流的可视化。



在 NASA 兰利研究中心的国家跨声速实验室这个具有代表性的常规静态风洞试验中，将一架波音 777 飞机的 2.7% 缩比模型安装到尾撑支架系统上，在跨声速条件下进行试验。此模型配设了大量的仪器仪表，还在内部安装了电子应变仪天平，用于测量空气动力数据。在静态试验中，根据试验团队所控制的空速、模型组件和模型姿态的特定固定组合来提取数据。

这类模型设计的挑战包括实现足够的结构强度，尤其是承受高空速、大迎角（旧称攻角）或侧滑条件下的高载荷；防止模型及其数据源形成气动热载荷；在相对较小的机身模型内实现稳健而又可靠的仪表测量；以及设计能够及时操作风洞来获取数据的模型组件和试验方法，尽量缩短重新构建模型或支架系统所需的“死时间”。设计的另外一个问题在于保证模型线所要求的准确性，以及决定此模型需要复制哪些飞机特征。这些静态试验的结果用在分析中，或者作为可能涉及到其他试验方法和其他方法的后续研究的输入数据。须注意的是，静态试验不需要动态移动模型或者自由飞能力。



在 NASA 兰利研究中心的全尺寸风洞中对 X－29 先进技术验证机进行了动态自由飞模型试验，目的在于确定此构型的动态稳定性和操纵性特征。从照片可以看出，模型正在进行大迎角飞行，研究人员评估了此模型在这种条件下的表现。请注意在前翼表面上，机头俯冲偏转较大，这说明此构型具有固有的静态不稳定性。利用机头空速管上迎角传感器传回的数据进行主动控制，以实现人工稳定性。

动态自由飞模型研究对常规静态试验的目的进行延伸，包括了运载工具运动的效应。自由飞试验的主要目的在于评估某个构型的内在飞行运动及其对控制输入的响应。在完成此任务过程中，自由飞试验使用的模型同样可经常在常规静态试验以及特殊的风洞试验方法中使用，以确定运载工具运动对关键空气动力参数的影响。通过模型运动对大气强制函数或飞行员操纵偏差的响应即可轻易观察自由飞模型试验的结果。动态试验重点关注关键特征，如在传统飞行包线内外飞行时的稳定性、操纵性和安全性。对无现有经验可参考的彻底颠覆传统的设计的评估，以及由于空气动力现象复杂而无法建模，从而无法轻易使用静态试验方法或先进计算方法，进行研究的飞行条件下的飞行行为的分析，都是自由飞模型最重要的应用。相关的例子包括经常会出现分离流、非线性空气动力行为和大幅度的动态运动的大迎角、失速和尾旋（spin）条件下的飞行。

即使对 NACA/NASA 迄今为止在静态和动态模型试验的研究范围进行走马观花式的检查，也能发现这些研究堪称一笔丰富的经验和技术财富，远远超出本专题著作的预定范围。本资料的目的在于让读者能够了解一些已研发的更有趣的自由飞模型试验方法，以及此试验在基础和应用研究中和在开展一些国家级重点民用和军事航空航天计划提供保障中所扮演的角色。此外，本资料还讨论了动态模型试验所需专业设施和装置的研发。

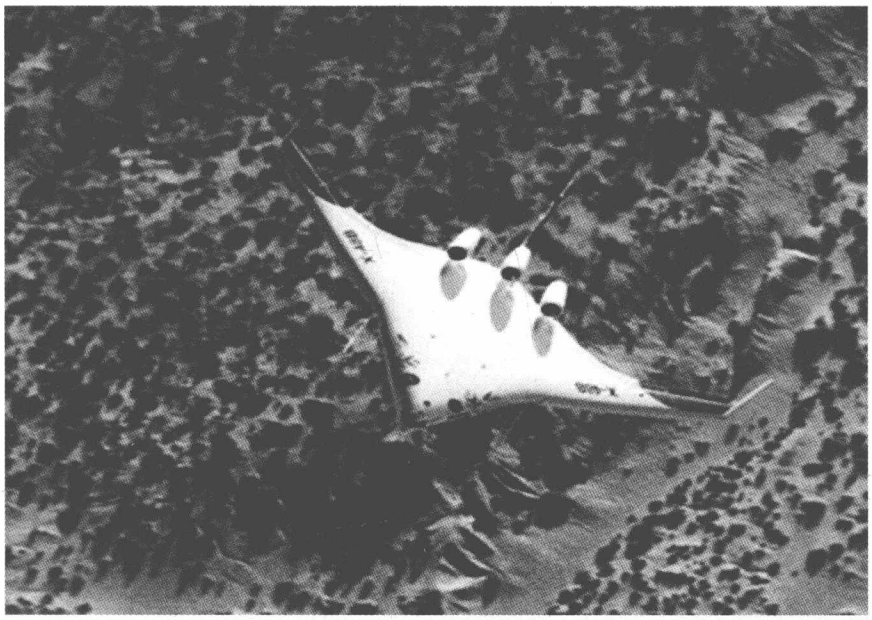


在过去的50多年里，NACA/NASA一直使用动态模型来预测高操纵性能军用飞机的尾旋进入和尾旋改出行为。图示的F-15战斗机模型安装在固定于直升机上的发射台上，准备进行无动力“坠落”试验，期间，无动力模型将由地面飞行员进行控制故意促使其进入尾旋状态。通过将得出的试验结果广泛关联后续的全尺寸飞机结果，NASA验证了其试验程序。

这些工作起源于80年前的第一个NACA实验室，该实验室坐落于弗吉尼亚州汉普顿，称为兰利纪念航空实验室。NACA提出的多数原理和概念经过持续更新，现在已然充分整合到NASA兰利研究中心的试验能力中。除了在兰利研究中心的研制工作和既有的运营能力外，本文还讨论了加利福尼亚州爱德华空军基地的NASA德莱顿飞行研究中心、加利福尼亚州山景城的NASA艾姆斯研究中心和弗吉尼亚州瓦勒普斯的NASA飞行研究中心开展的动态自由飞模型研究。这些NASA研究组织积累了多年的缩比自由飞模型的运用经验，并尽可能与全尺寸飞机飞行试验的结果相关联，从而确立模型试验的准确性和局限性。

要回顾的资料主要包括两种类型的动态模型试验，即动态自由飞试验和动态力试验。自由飞试验涉及到动力或无动力模型在风洞或者室外试验场中无明显限制地飞行的试验方法。这些模型可以不受控制或者由飞行员远程控制。动态自由飞模型的设计和构建符合所要求的比例缩小规则，以确保模型与其对应的全尺寸机型之间的动态运动类似。为了解背景知识，简要介绍了动态模型的比例缩小程序。动态力试验是NACA/NASA提出的特殊风洞试验方法，旨在测量正常运行期间和正常飞行包线外运载工具的运动对飞行条件的关键空气动力数据的影响，例如，尾旋和过失速回转。目前已部署多个独特的试验装置，可以实现在多个风洞设施中进行动态力试验。

需要全本请访问 www.ertongbook.com



自由飞动力相似模型已从简单的无动力丝绸包覆巴尔沙木飞机复制模型演变为采用先进材料，配设推进单元、控制系统和仪器仪表的高度复杂的微型飞机。此X－48B翼身融合体构型就是动态模型技术当前先进技术的一个代表。

各个讨论话题的材料组织如下：简要描述所关注领域的动态模型的目的和应用的背景、从特定项目获取的独特结果和这些数据在研究和开发过程中的运用。

本主题首先回顾了自由飞动态的几何和质量缩尺的特殊要求。同时还回顾了自由飞技术的限制条件。此论述然后回顾了NACA/NASA的自由飞技术的发展历程，包括关键设施的物理特征、所用模型和试验方法的探讨。本书腾出一大部分重点介绍了这些技术在常规研究中通用构型以及在特定航空器和航天器构型中的应用。文中还回顾了吸取的重要经验教训。除此之外，文中简要回顾了经常伴随自由飞试验进行的特殊动态力试验，本文最后给出了作者对自由飞模型试验的未来机会和要求的看法。

此处介绍的内容面向许多各种不同的感兴趣的读者，包括民用和军用航空界内的行业团队、高中生和大学生、自制试验飞机的设计师和制造人员，航空爱好者和历史学家。为了让这些读者尽可能理解本文内容，本文特地采用简单、合适的技术语言，同时尽量不使用方程式和专业术语。对于那些希望深入了解各个部分主题的读者，本文还提供大量的参考文献供学习参考。

在作者身为NASA研究员和管理员的职业生涯里，他有幸在国家航空界和公众做了多次有关NASA的动力相似自由飞模型在其航空航天研究计划中的应用的演讲。在这些场合中，观众始终对在研究活动中使用这些方法进行有意义的模型飞行试验表现出浓厚的兴趣和好奇。在许多场合，观众建议出版一本有关NASA自由飞模型的经验的书籍。在此，作者衷心希望，此出版物的内容能够为阐明这个极具价值而又具有历史意义的技术能力提供有用的信息。

目　录

第 1 章　背景 …… (1)
1.1　目的 …… (1)
1.2　自由飞试验的作用 …… (2)
1.3　动态缩尺原则 …… (2)
1.4　刚体动态模型 …… (4)
1.5　不可压缩流 …… (4)
1.6　可压缩流 …… (6)
1.7　限制和结果解释 …… (7)
第 2 章　NACA 和 NASA 的历史演进 …… (9)
2.1　尾旋研究装置 …… (9)
2.2　兰利 20ft 尾旋风洞 …… (11)
2.3　风洞自由飞研究装置 …… (13)
2.4　兰利 12ft 自由飞风洞 …… (14)
2.5　兰利全尺寸风洞 …… (16)
2.6　艾姆斯极高速自由飞试验装置 …… (19)
2.7　艾姆斯 40ft × 80ft 风洞 …… (23)
2.8　室外自由飞试验装置和试验场 …… (24)
2.9　兰利无动力模型投放 …… (24)
2.10　德莱顿无动力模型投放 …… (29)
2.11　兰利带动力自由飞模型 …… (30)
2.12　艾姆斯带动力自由飞模型 …… (33)
2.13　德莱顿带动力自由飞模型 …… (34)
2.14　瓦勒普斯火箭助推模型 …… (35)
第 3 章　典型应用 …… (37)
第 4 章　动态稳定性和操纵性 …… (39)
4.1　低速研究 …… (39)
4.2　高速研究：火箭助推模型 …… (42)
4.3　艾姆斯超声速试验 …… (44)
4.4　非传统构型 …… (44)

4.5 早期 …… (45)
4.6 V/STOL 构型 …… (50)
4.7 翼伞构型 …… (58)
4.8 可变几何 …… (60)
4.9 太空舱 …… (66)
4.10 再入飞行器和升力体 …… (68)
4.11 超声速运输机 …… (73)
4.12 飞机/外挂物分离 …… (75)
4.13 先进民用飞机 …… (77)
4.14 尾涡风险 …… (79)
4.15 牵引飞机 …… (80)
4.16 概念验证机 …… (81)
4.17 小结 …… (84)
第5章 大迎角飞行 …… (85)
5.1 战斗机 …… (89)
5.2 小结 …… (99)
第6章 尾旋和尾旋改出 …… (100)
6.1 背景 …… (100)
6.2 军用构型 …… (101)
6.3 通用航空构型 …… (111)
6.4 斜置翼构型 …… (112)
6.5 小结 …… (113)
第7章 尾旋进入和过失速运动 …… (114)
7.1 尾旋进入 …… (114)
7.2 军用构型 …… (115)
7.3 通用航空构型 …… (125)
7.4 喷气运输机不明状态改出 …… (129)
7.5 翻滚 …… (130)
7.6 其他研究 …… (132)
7.7 小结 …… (132)
第8章 相关试验方法 …… (133)
8.1 空气动力数据 …… (133)
8.2 静态试验 …… (133)
8.3 强制振荡试验 …… (134)
8.4 自由滚转试验 …… (136)
8.5 旋衡试验 …… (137)

8.6　自由俯仰试验 …… (138)
第9章　未来展望 …… (139)
参考文献 …… (141)
关于作者 …… (159)

第1章 背 景

1.1 目的

动力相似自由飞模型特别适用于航空器和航天器构型的飞行动力学的调查研究。飞行动力学（又称飞行力学）主要讲述飞机的行为以及大气扰动或飞行员输入所造成的运动的影响因素。该学科涉猎广泛，包括应用空气动力学、静态和动态稳定性与操纵性、飞行控制系统，以及操纵品质等各方面内容。从基础研究——如机翼后掠对动态稳定性和操纵性的影响的研究，到对特定构型飞行行为的详细评估——如高操纵性军用飞机的防尾旋和尾旋改出特征，都是自由飞试验能力在飞行动力学中的应用。在开展这些研究期间，试验人员评估了此模型的一般操纵性和固有问题，如无法控制的振荡或尾旋改出失败。工作人员还评价了人工增稳系统、机身改装和辅助设备（如紧急尾缘改出降落伞）

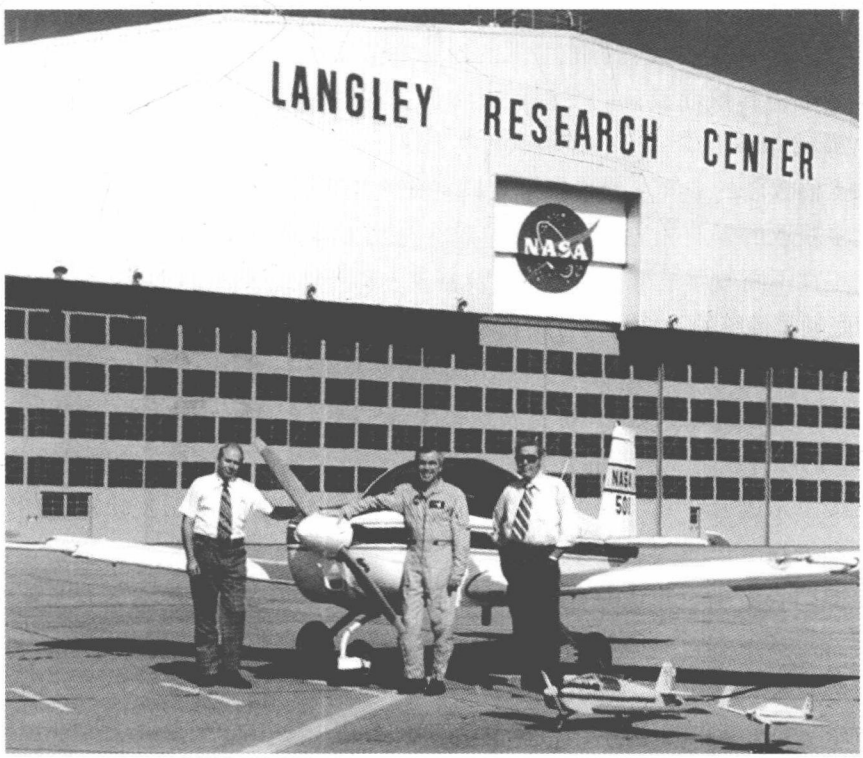


图 1－1　按惯例，从动态模型试验获取的预测结果与从飞机飞行试验中获取的结果相关联。在 NASA 对通用航空构型尾旋特征的传统研究中，所开展的试验从右到左分别如下：尾旋风洞模型、无线电控制模型和全尺寸飞机。兰利试飞员 Jim Patton（中）、研究员 Jim Bowman（左）和 Todd Burk 与测试器拍照留念。

的作用。记载诸如模型姿态、角速率、线性加速度、迎角和侧滑、空速和操纵部位等运动参数的时程，用于分析并与全尺寸结果和其他分析方法相关联。可从模型飞行结果提取自由飞模型的空气动力数据，且多数模型可用于常规静态风洞试验以及专业的动态力试验。通过自由飞试验，在早期设计阶段，即可发现潜在不利甚至灾难性的行为，以将一些改良措施融入设计过程，进而满足要求，因此其试验结果对于航空航天器研制项目来说极具价值。除此之外，依据这些数据，让试验和评估组织对在准备全尺寸飞机试验过程和后续的飞行试验中存在的潜在问题有一个大体的了解。对于无既有经验可参考的传统或颠覆性构型，作用尤其明显。

1.2 自由飞试验的作用

自由飞模型是航空工程中所用其他工具的补充。在缺乏不利的缩比效应的情况下，发现这些模型的空气动力特性能够很好地吻合从其他类型的风洞试验和理论分析中获取的数据。通过深入了解空气动力对航行器动力学的影响，得出的自由飞试验结果帮助建立了对空气动力临界参数和改型的影响的必要了解，从而实现解决问题的目的。对于试验技术来说，使用同一个模型同时完成自由飞试验和空气动力测量的能力是一个强大的优势。当加之以更为复杂的静态风洞试验、计算流体力学方法和驾驶飞行模拟器技术时，这些试验所能提供的信息非常全面。最后，不管是向批评者和反对者证明彻底颠覆传统而设计的飞机可以飞行，或是发现新构型的关键飞行问题，自由飞试验结果都非常直观，这一点令人印象深刻。

正如人们预料的一样，对于自由飞模型试验的开展和试验结果的解读，需要借助从连续反馈中获取的专业能力，同时要求建立与从大量全尺寸飞机获取的飞行结果的关联。我们正在不断改善模型构造方法、仪器仪表和控制技术。设施和设备必须更新换代，此外，彻底颠覆传统的飞机构型可能要求对这些设施和试验方法进行改良。就自由飞模型的技术而言，NASA 职员过去已经积累了丰富的专业知识和经验，为此，航空航天界希望从他们获取专业的意见建议，并希望展开一些合作研究。在自由飞试验的科学与艺术中，该机构采购的硬件设施和培养的人力资源为民用和军事项目做出了不可磨灭的贡献。

本文接下来的几个章节将整体介绍一下 NACA/NASA 研究员提出的自由飞试验方法的概念和发展，以及对特定航空航天计划的一些重大贡献。但是，在讨论这些话题前，将先回顾一下动态自由飞模型要求的具体缩尺程序，以提供更多背景信息，同时了解模型构建细节和试验程序。除此之外，还阐述了自由飞模型试验中遇到的制约与限制相关的观察结果。

1.3 动态缩尺原则

为了从自由飞模型试验项目中获取有效的试验结果，设计和构建模型时必须确保其运动类似于全尺寸实物所展现出的运动。动力相似自由飞模型不仅仅是几何缩尺的复制

需要全本请访问 www.ertongbook.com