

近代空气动力学丛书

# 风洞实验干扰与修正

INTERFERENCE AND CORRECTION  
ON WIND TUNNEL TESTING

程厚梅 等编著

国防工业出版社

·北京·

**图书在版编目(CIP)数据**

风洞实验干扰与修正/程厚梅等编著. —北京:国防工业出版社, 2003. 1

(近代空气动力学丛书)

ISBN 7-118-02839-8

I. 风... II. 程... III. 风洞试验 IV. V211.74

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 018766 号

**国防工业出版社** 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经营

开本 850×1168 1/32 印张 14 $\frac{3}{4}$  380 千字

2003 年 1 月第 1 版 2003 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1—2000 册 定价:30.00 元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

# 致 读 者

**本书由国防科技图书出版基金资助出版。**

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

**国防科技图书出版基金资助的对象是:**

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;紧密结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,紧密结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列出出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金  
评审委员会**

# 国防科技图书出版基金 第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员 怀国模

主任委员 黄 宁

副主任委员 殷鹤龄 高景德 陈芳允 曾 铎

秘 书 长 崔士义

委 员 于景元 王小谟 尤子平 冯允成

(以姓氏笔画为序) 刘 仁 朱森元 朵英贤 宋家树

杨星豪 吴有生 何庆芝 何国伟

何新贵 张立同 张汝果 张均武

张涵信 陈火旺 范学虹 柯有安

侯正明 莫梧生 崔尔杰

## 序

有书应有序,序者必须说明为什么要写书,写书有什么意义。

近代空气动力学丛书是1994年开始酝酿的,等书出齐肯定是下一世纪了。这是一套跨世纪的丛书,当然我们希望它能有跨世纪的意义。20世纪初始有飞机出现,莱特(W. Wright, O. Wright)兄弟于1903年发明了飞机。到30年代,低速飞机的设计已日趋成熟,而空气动力学的研究为此做出了突出的贡献。1934年开始由美国戈根海姆基金会支持、由杜朗(W. F. Durand)主编并成为航空发展基石的六卷本的空气动力学理论(Aerodynamic Theory)丛书就是很好的佐证。著名的力学家普朗特(L. Prandtl)、泰勒(G. I. Taylor)及卡门(T. von Karman)等均为该丛书撰写了重要章节。我国学者钱学森在40年代末曾称丛书中泰勒所写的可压缩性流体力学为此领域当时最佳的著作。杜朗的这一套书并不是直接为设计用的,它强调的是一个一个专题的理论基础,是为飞机设计者的技术创新服务的。第二次世界大战后,人类很快进入了超声速时代,卡门和钱学森等人在40年代末提出要编写一套现代化的空气动力学丛书,这就是由查雷(J. Charyk)做主编的由普林斯顿大学出版的高速空气动力学与喷气推进(High Speed Aerodynamics and Jet Propulsion)丛书,这套丛书直到50年代后期才出齐。著名空气动力学学者钱学森、林家翘、郭永怀都是该丛书的主要作者。

进入50年代,洲际核导弹的研制成为苏美两国武器竞赛的关键项目。苏联在1957年10月4日发射了世界上第一颗人造地球卫星,显示了苏联有发射洲际导弹的能力;1961年4月12日,世界上第一位航天员加加林(Ю. А. Гагарин)乘“东方”1号飞船实现了绕地球的轨道飞行。美国提出了“阿波罗”登月计划,并于1969

年7月20日实现了两名航天员登上了月球,并顺利地返回;1981年4月12日美国“哥伦比亚”号航天飞机从地面起飞,绕地球36圈以后成功地降落在爱德华兹空军基地。另一方面,气动性能先进的苏-27和F-22等也相继出现。这些大大促进了航空航天事业的发展。作为航空航天事业的基础,近代空气动力学不仅涉及低速、跨声速、超声速,而且包括高超声速和超高速范围,此时空气中已产生离解、电离和其他化学反应。空气动力学已不再仅仅是30年代以机翼理论为代表的传统的学科,它的发展引发了多学科之间相互渗透,大大丰富了空气动力学的内涵。

过去近50年的航空航天事业的迅速发展,拉动了空气动力学各方面的研究工作,使空气动力学作为一个重要学科,全方位突出于航空航天科学的前沿。特别是半个世纪以来计算机及计算理论和技术的发展使计算流体力学(计算空气动力学)成为一个主要的分支学科;电子技术、控制技术及传感器技术的迅猛发展使气动实验技术日新月异,从以前宏观的测力测压,发展到精细流场的测量;非线性动力学的发展和拓扑分析提供了新的理论武器。在这半个世纪内虽然有空气动力学专著出版,但是没有看到30年代、50年代那样高品位的空气动力学丛书。因此,在1994年的一次有国内部分空气动力学工作者参加的座谈会上,张涵信等同志就倡议由中国的空气动力学工作者发挥集体智慧来编著一套跨世纪的近代空气动力学丛书,并很快得到原国防科工委的赞同,成立了编委会,编委会的日常管理工作挂靠在中国空气动力研究与发展中心,并在国防科技图书出版基金评审委员会和国防工业出版社的支持下开展工作。

前面这两套丛书都是世界级权威写的。30年代的丛书是世界性的,主要的作者包括了世纪性的科学家普朗特、泰勒和卡门。50年代普林斯顿大学的那套丛书,主要的作者都是当时在美国的第一流科学家。我们的丛书要继承和发扬前两套丛书的优点,显然,编著工作是十分艰巨的。

新中国成立后,在自力更生的方针指引下,由于国内空气动力

学部门和全国有关单位的大力协同,以及气动力学工作者的努力奋斗,在钱学森和郭永怀的率领下,不仅继承了普朗特、卡门学派的优良传统,而且在钱学森发展的系统工程思想的指导下,抓住空气动力学总体,促进各学科之间的交叉,使我国的空气动力学在过去 40 多年的时间里得到了迅速的发展,可以说从无到有接近和达到国际先进水平,并积累了十分宝贵的经验。我们不能妄自菲薄,应该很好地加以总结,使这套丛书能充分反映新中国空气动力学工作者的重要成就。

我们并不认为这套丛书是经典性的、完美无缺的,但是是认真朝这个方向努力的。我们希望这套丛书的出版不仅能够促进中国航空航天事业在 21 世纪的发展,并且对世界航空航天事业也有所贡献。

庄逢甘

1999 年 9 月 9 日



# 近代空气动力学丛书编辑委员会 组成人员

主任委员 庄逢甘

副主任委员 张涵信 崔尔杰 贺德馨 张仁杰

委员 (按姓氏笔画为序)

王承尧 王政礼 邓学鋈 田震

乔志德 邬华谟 刘官德 安复兴

杨其德 杨岍生 李椿萱 吴芝萍

吴望一 沈青 沈孟育 苗瑞生

范洁川 俞鸿儒 蒋范 程厚梅

舒玮 童秉纲

# 前 言

空气动力学是研究空气和其他气体的运动以及与物体相互作用的科学,是航空航天技术最重要的理论基础之一。飞机和航天器的外形不断改进,性能不断提高,无不与空气动力学的发展密切相关。在新型飞行器设计中,空气动力学将起到愈发重要的作用。

我国的航空航天事业取得了举世瞩目的成就,广大空气动力学工作者为发展航空航天事业和空气动力学科学做出了突出贡献。为了促进空气动力学的进一步发展,迎接新世纪挑战,总结经验,培养人才,更好地为航空航天事业和国民经济服务,特组织编著出版近代空气动力学丛书。

近代空气动力学丛书由 20 多种单本专著组成,分理论和实验两部分。理论部分包括:跨声速空气动力学理论,无黏性高超声速空气动力学理论,稀薄气体动力学,计算流体力学——差分方法的原理与应用,计算流体力学谱方法,流体力学的有限元方法,高速气流传热与烧蚀热防护,多相湍流反应流体力学,高温非平衡空气绕流,湍流,旋涡与分离流动结构的分析,风工程与工业空气动力学,飞机设计空气动力学,发射气体动力学等。实验部分包括:风洞实验,风洞天平,风洞实验干扰与修正,脉冲风洞,近代流动显示技术等,丛书的编著坚持“五性”原则。即桥梁性:丛书是基础空气动力学到空气动力学前沿过渡的桥梁。专题性:丛书分成若干单本,每一单本仅涉及一个专门领域,是专著性丛书。近代性:丛书不仅重视学科已有的成就,而且重视近代的发展。系统性:每一单本专著,均有系统地介绍该领域的知识和发展。配套性:丛书的各单本专著联合在一起,基本覆盖了近代空气动力学各领域。为了组织和推动丛书的编著,组成了以庄逢甘院士为主任委员的编辑

委员会,负责制定丛书编写计划、选定编著者、审查书稿以及向国防科技图书出版基金评审委员会推荐申请资助等。中国空气动力研究与发展中心对编辑委员会的工作在人员和经费方面都给予了支持。丛书的各单本专著系通过申请国防科技图书出版基金获得资助后,由国防工业出版社列选出版。

风洞试验对于新一代飞行器的研制是至关重要的手段。对于载人飞行器,首先要保证飞行安全并有良好的飞行性能,高性能的取得要求进行大量的空气动力研究工作。在这些研究工作中,尽管气动力数值计算(CFD)在近十几年有了突飞猛进的发展,工程应用日趋成熟,但风洞试验仍然是确定飞行器气动性能的主要手段,CFD尚不能代替风洞试验,而只能作为飞行器设计手段与风洞试验互相补充,而且CFD的发展和可靠性也需风洞试验验证。风洞试验所提供的数据如此重要,但这些数据的获得一般是采用缩比模型在风洞模拟条件下得到的。风洞有尺寸的限制,模型有支持系统,模型的试验条件不同于大气中飞行器的飞行,存在洞壁干扰和支架干扰。更为严重的是,在常规风洞中,试验雷诺数较低,气流的粘性影响不能充分模拟,与高雷诺数结果相比存在较大差异,甚或存在质的差别。因此,风洞试验除了需保证严格的试验条件并进行统计控制以保证试验数据的精度外,还必须进行洞壁干扰、支架干扰修正,并考虑雷诺数的影响,以给出确定条件下,具有工程上可接受不确定度的飞行器气动力数据,并能以此为出发点,外插到飞行条件。本书重点介绍风洞试验数据质量保证体系及评估方法、洞壁干扰、支架干扰与修正以及雷诺数的影响和处理办法。自适应壁技术是作为洞壁干扰的一种解决办法予以介绍。

世界各航空技术先进的国家都投入大量的人力物力进行洞壁干扰、支架干扰修正研究,并建造高雷诺数风洞,研究雷诺数的影响,为飞行器气动力设计提供了大量可信的数据。我国也进行了大量研究,并取得了高水平的研究成果,为我国飞行器的研制做出了贡献。本书绪论部分简要介绍了风洞试验发展的历史、试验模拟的相似准则不能完全满足带来的问题、解决办法、达到的水平和

存在的问题。第1章,风洞试验数据质量保证与不确定度评估。重点介绍保证风洞试验数据质量的措施及数据不确定度的评估方法,并给出了我国大迎角风洞试验数据质量的水平。第2章,洞壁干扰及其试验与计算修正。着重介绍了高、低速风洞试验的洞壁干扰及修正方法,特别是近十几年发展起来的壁压信息法,较详细地给出了壁压信息的试验提取、各种洞壁干扰计算方法、修正水平及试验验证结果。第3章,风洞模型支撑干扰及修正方法。介绍了风洞中常用支架形式、减少支架干扰的设计方法及剩余干扰的修正,包括了实验修正和计算修正。第4章,雷诺数对风洞试验数据的影响及修正。介绍了虚假雷诺数影响及风洞试验雷诺数不模拟带来的问题,包括了雷诺数对低速高升力翼型、机翼、全机、跨声速超临界机翼、大迎角前机身等的影响、试验模拟方法及高雷诺数风洞试验和全尺寸试飞结果。第5章,自适应壁风洞实验技术。文中阐述了自适应壁的原理、调节方法、适用条件、二元及三元流动的自适应壁技术和试验结果。上述各章都是作者从事该项研究几十年的成果总结并吸收了国内外近期研究的最新资料,具有自己的特色和较强的实用性。文末附有大量参考文献,为这些问题的深入研究提供了丰富的资料。

该书的绪论、第1章和第4章由程厚梅研究员编写,取材于多年的研究工作及讲课的资料;第2章是张其威教授根据洞壁干扰修正研究的资料编写而成;第3章由田学诗研究员编写,是风洞模型支架干扰研究经验的总结;第5章由贺家驹教授编写,全书由程厚梅研究员进行了统编。在书的编写过程中得到中国航空工业空气动力研究院的大力支持,在此表示诚挚的谢意。

本书的编写由于作者的水平所限,书中定会有不少错误、不妥和疏漏之处,请批评指正。

作 者

# 目 录

绪论 .....	1
<b>第 1 章 风洞试验数据质量保证与不确定度评估 .....</b>	<b>23</b>
1.1 风洞试验 .....	23
1.2 影响风洞试验数据不确定度的因素 .....	24
1.2.1 风洞试验流程 .....	26
1.2.2 影响风洞试验数据不确定度的因素及控制 措施 .....	28
1.3 风洞试验数据不确定度评估 .....	61
1.4 我国高、低速风洞飞机模型大迎角试验数据再现性 精度 .....	70
<b>第 2 章 洞壁干扰及其试验与计算修正 .....</b>	<b>77</b>
2.1 引言 .....	77
2.2 风洞壁形式及其对洞壁干扰的影响 .....	81
2.2.1 低速风洞 .....	81
2.2.2 高速风洞 .....	84
2.3 风洞试验的洞壁干扰修正方法 .....	89
2.3.1 洞壁边界条件的确定 .....	90
2.3.2 纯试验或经验修正法 .....	94
2.3.3 经典映像法和 Maskell 法 .....	95
2.3.4 使用洞壁边界条件表达式的洞壁干扰计算修 正法 .....	107
2.3.5 壁压信息洞壁干扰修正法 .....	110
2.3.6 洞壁干扰修正壁压信息法的大迎角试验验证 ..	129
2.4 一些特殊试验的洞壁干扰问题 .....	140
2.4.1 二维翼型试验的洞壁干扰 .....	140

2.4.2	半模试验的洞壁干扰 .....	146
2.4.3	螺旋桨试验的洞壁干扰问题 .....	150
2.4.4	直升机旋翼试验的洞壁干扰问题 .....	153
2.4.5	非定常试验的洞壁干扰问题 .....	155
<b>第3章</b>	<b>风洞模型支撑干扰及修正方法</b> .....	<b>156</b>
3.1	模型支撑系统及设计技术要求 .....	156
3.1.1	模型支撑系统概述及设计技术要求 .....	156
3.1.2	各种类型试验的支撑形式 .....	156
3.1.3	变角度机构 .....	182
3.2	支撑干扰特性分析 .....	185
3.2.1	低速风洞腹撑系统的支撑干扰特性 .....	185
3.2.2	低速(亚声速)风洞大(小)迎角的尾撑干扰 特性 .....	197
3.2.3	低速风洞大(小)迎角下背撑的干扰特性 .....	208
3.2.4	高速风洞各种支撑的干扰特性 .....	210
3.2.5	张线支撑的干扰特点 .....	220
3.2.6	带动力试验的支撑干扰特点 .....	222
3.2.7	动态试验的支撑干扰特点 .....	222
3.3	风洞模型支撑干扰的修正方法 .....	227
3.3.1	非线性现象中叠加法的可信度分析 .....	227
3.3.2	各种支撑对模型干扰的试验测定方法 .....	234
3.3.3	各种数值计算修正方法 .....	246
3.3.4	各种工程估算修正方法 .....	261
3.4	支架干扰与洞壁干扰的耦合 .....	266
3.5	风洞支撑设计、支撑干扰及其修正方法研究展望 .....	268
<b>第4章</b>	<b>雷诺数对风洞试验数据的影响及修正</b> .....	<b>271</b>
4.1	概述 .....	271
4.2	风洞试验雷诺数效应模拟中的问题 .....	274
4.2.1	尺度效应 .....	275
4.2.2	虚假雷诺数效应 .....	277

4.3	边界层固定转捩技术 .....	291
4.3.1	边界层的厚度 .....	291
4.3.2	粗糙带及其类型 .....	292
4.3.3	粗糙带的粘贴位置 .....	293
4.3.4	粗糙带的高度(粒度) .....	297
4.4	低速高升力风洞试验的雷诺数效应 .....	300
4.4.1	翼型失速特性 .....	300
4.4.2	二元多段翼型气动特性 .....	310
4.4.3	三元机翼的雷诺数影响 .....	318
4.4.4	全机雷诺数影响 .....	327
4.5	跨声速雷诺数影响 .....	344
4.5.1	绕流特性分析 .....	344
4.5.2	模拟方法 .....	351
4.5.3	模拟方法的应用范围 .....	357
4.5.4	CFD 用于扩大风洞试验雷诺数影响模拟的能力 .....	361
4.6	大迎角飞行器绕流的雷诺数影响 .....	362
4.6.1	大迎角机身的绕流类型和控制 .....	363
4.6.2	大迎角零侧滑机身的力和力矩 .....	369
4.6.3	飞机模型大迎角风洞试验结果 .....	372
<b>第5章</b>	<b>自适应壁风洞试验技术</b> .....	<b>378</b>
5.1	概述 .....	378
5.2	自适应壁风洞试验的理论 .....	379
5.3	自适应壁风洞及其调节方法 .....	383
5.3.1	自适应壁风洞调节原理 .....	383
5.3.2	自适应壁风洞的分类及其调节方法 .....	389
5.3.3	控制面上流动的性质 .....	394
5.3.4	一步法原理 .....	397
5.4	自适应壁风洞试验 .....	397
5.4.1	二元流动的自适应壁风洞试验及其技术 .....	397

5.4.2 三元流动的自适应壁风洞试验技术 .....	408
<b>参考文献</b> .....	423
<b>主题词索引</b> .....	440



# Contents

<b>Introductions</b> .....	1
<b>1 Quality assurance and uncertainty assessments of wind tunnel testing data</b> .....	23
1.1 Wind tunnel testing .....	23
1.2 Factors affecting uncertainty of wind tunnel testing data .....	24
1.2.1 Circuit of wind tunnel testing .....	26
1.2.2 Factors affecting uncertainty of wind tunnel testing data and measurements controlling uncertainty .....	28
1.3 Assessments on uncertainty of wind tunnel testing data .....	61
1.4 Reproducibility of testing data of aircraft models in high and low speed wind tunnels in China .....	70
<b>2 Wall interference in wind tunnel testing and its experimental and computational corrections</b> .....	77
2.1 Foreword .....	77
2.2 Forms of wind tunnel wall and its effects on interference .....	81
2.2.1 Low speed wind tunnels .....	81
2.2.2 High speed wind tunnels .....	84
2.3 Wall interference correction methods in wind tunnel testing .....	89
2.3.1 Determination of boundary condition on wind tunnel walls .....	90
2.3.2 Experimental and experienced correction methods on wall interference .....	94