

《近代空气动力学丛书》

风洞实验

Wind Tunnel Testing

恽超群 编著

国防工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

风洞实验/恽起麟编著. —北京:国防工业出版社,
2000.9

(近代空气动力学丛书)

ISBN 7-118-02230-6

I 风… II 恽… III 风洞试验 IV V211.74

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 12958 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)

三河腾飞胶印厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 20³/₄ 532 千字
2000 年 9 月第 1 版 2000 年 9 月北京第 1 次印刷
印数:1-1500 册 定价:36.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

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	王承尧	王政礼	邓学莹	田震	
(按姓氏笔画为序)	乔志德	邬华谟	刘官德	安复兴	
	杨其德	杨岷生	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。

《风洞实验》一书的目的在于介绍航空飞行器模型在低速、亚声速、跨声速以及超声速风洞中所进行的各种实验。每种实验大致包括了实验的目的、相似准则、实验方法、模型及其支撑、实验装置、实验数据的处理和修正,以及实验结果及其与飞行数据的比较等内容。风洞模型实验前,必须根据实验的目的和要求对实验进行精心设计,相似理论和误差理论是风洞实验设计的理论基础,这些内容写在第一章中。风洞实验的对象是模型,有关模型设计的基本内容(常规测力、测压实验模型的设计)列入第二章。飞行器模型的各种定常实验(所测参数不随时间变化)和非定常实验(所测参数随时间变化)方法是本书的重点,分别在第三、四、五章中介绍。由于定常实验种类多(32种)、篇幅大,故分做两章(第三、四章)书写:第三章侧重介绍常规的定常实验(16种),第四章侧重介绍非常规的定常实验。12种非定常实验作为第五章内容。

书中除了力求把风洞实验的基本理论、原理阐述清楚外,着重介绍当前国内外广泛采用的以及最新的风洞实验方法和技术,并给出了大量近期的国内外风洞实验数据、曲线、图表及计算公式,力图给读者介绍更多、更新、更实际有用的知识。衡量风洞实验数据准确与否的标准是飞行器的飞行试验,因此,书中尽力汇集了各类风洞模型实验数据与飞行值的比较。在本丛书中有《风工程与工业空气动力学》,因此,所有非航空飞行器的风洞实验内容,本书一概不涉及。丛书中还有《风洞实验干扰与修正》和《风洞天平》两本著作,本书内容也尽量减少与这些著作相重复。

书后附有大量参考文献(文献只写了第一作者),便于读者对所感兴趣的问题作进一步了解。本书除大量引用了国外最新、最广泛使用的有关风洞实验的研究成果外,还大量引用了中国空气

动力研究与发展中心、哈尔滨空气动力研究所、沈阳空气动力研究所、北京空气动力研究所、南京航空航天大学、西北工业大学及北京航空航天大学等单位在《航空气动力协作攻关办公室》风洞实验组召集的各类学术交流会议上发表的论文以及其它有关的论文。在此向本书所引用的实验、研究结果的作者致以真诚的谢意。

中国空气动力研究与发展中心贺德馨研究员、沈礼敏研究员、吴慰祖研究员仔细审阅了全书的初稿,北京航空航天大学邓学莹教授认真审阅了本书的第三、四、五章初稿;中国空气动力研究与发展中心江桂清研究员审阅了部分初稿,邓红俊工程师对本书修改稿做了文字校核,在此向他们表示诚挚的谢意。

由于作者水平所限,书中一定有不少缺点和错误,诚恳地欢迎读者批评指正。

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;密切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,密切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选出版。

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

IV

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

目 录

绪论	1
第 1 章 风洞实验设计	3
1.1 风洞实验设计	3
1.2 相似理论及其在风洞实验中的应用	7
1.2.1 相似定理	7
1.2.2 相似准则	8
1.2.3 相似定理	10
1.2.4 相似参数的导出	10
1.2.5 风洞实验常用的相似参数	11
1.2.6 完全模拟与部分模拟	13
1.2.7 自模性	15
1.3 误差理论及其在风洞实验中的应用	16
1.3.1 误差的基本概念	18
1.3.2 误差的基本特性和计算方法	21
1.3.3 风洞实验数据误差的计算	31
1.3.4 对风洞实验数据精确度的要求	40
第 2 章 风洞模型设计	47
2.1 模型的几何外形模拟	47
2.1.1 飞机进气口和尾喷口的模拟	47
2.1.2 飞行器表面突出物的模拟	50
2.1.3 缝隙的模拟	50
2.2 模型的尺寸及在风洞中的位置	52
2.2.1 模型的尺寸	52
2.2.2 模型在风洞中的位置	53
2.3 模型的强度、刚度及材料选择	53

2.3.1	模型的强度	53
2.3.2	模型的刚度	54
2.3.3	模型材料	55
2.4	模型结构	56
2.4.1	测力模型结构	56
2.4.2	压力分布测量模型结构	61
2.5	模型支架	63
2.5.1	腹部支撑支架	64
2.5.2	尾部支撑支架	68
2.5.3	其它模型支撑形式	70
2.6	模型的振动	71
2.7	模型的加工精度和表面粗糙度	75
2.7.1	国内低速风洞模型加工精度和表面粗糙度	75
2.7.2	国内高速风洞模型加工精度和表面粗糙度	76
2.7.3	国外风洞模型加工精度和表面粗糙度	78
2.8	模型外形不精确对实验数据的影响	80
2.8.1	模型加工和安装误差对实验数据的影响	80
2.8.2	模型表面粗糙度对实验数据的影响	87
2.8.3	模型变形对实验数据的影响	89
2.8.4	模型尾部放大对实验数据的影响	92
2.8.5	突出物的影响	93
2.8.6	测压孔的影响	95
第3章	风洞模型定常实验(I)	97
3.1	全机测力实验	97
3.1.1	相似参数	97
3.1.2	实验方法	98
3.1.3	模型边界层的固定转换	102
3.1.4	实验结果及其与飞行数据的比较	108
3.2	压力分布测量	114
3.2.1	常规压力分布测量方法	114
3.2.2	光学压力分布测量方法	117
3.2.3	实验结果及其与飞行数据的比较	121

3.3 翼型实验	122
3.3.1 实验方法	122
3.3.2 侧壁边界层的影响及修正	127
3.3.3 实验结果及其与飞行数据的比较	135
3.4 半模型实验	137
3.4.1 实验方法	138
3.4.2 缝隙的影响及其消除方法	146
3.4.3 半模型实验结果及其与全模型比较	150
3.5 进气道实验	152
3.5.1 模型	152
3.5.2 气动特性测量	154
3.5.3 实验结果及其与飞行数据的比较	164
3.6 通气模型实验及溢流阻力、附加阻力测量	168
3.6.1 通气模型实验	169
3.6.2 附加阻力和溢流阻力测量	173
3.7 喷流实验	178
3.7.1 喷流对飞行器气动特性的影响	179
3.7.2 相似参数	179
3.7.3 模拟方法	184
3.7.4 喷流的温度影响及其修正	186
3.7.5 模型支架及其影响	192
3.7.6 实验结果及其与飞行数据的比较	194
3.8 大迎角(定常)实验	197
3.8.1 飞行器大迎角状态下的气动现象	198
3.8.2 实验方法	199
3.8.3 模型	205
3.8.4 模型支撑形式及其干扰	206
3.8.5 洞壁干扰	212
3.8.6 风洞实验结果及其与飞行数据的比较	215
3.9 地面效应实验	218
3.9.1 飞行器靠近地面飞行时的气流流动	218
3.9.2 地面效应的模拟	218

3.9.3	实验结果及其与飞行数据的比较	227
3.10	铰链力矩实验	229
3.10.1	铰链力矩的定义和实验方法	230
3.10.2	模型和天平	232
3.10.3	实验结果及其与飞行数据的比较	235
3.11	减速板实验	236
3.11.1	减速板的气动特性	237
3.11.2	减速板脉动压力特性测量	237
3.11.3	实验结果及其与飞行数据的比较	241
3.12	外挂物实验	241
3.12.1	实验方法	241
3.12.2	实验结果及其与飞行数据的比较	245
3.13	空速管实验	248
3.13.1	空速管的气动特性	249
3.13.2	实验方法	253
3.13.3	数据处理	254
3.13.4	实验结果及其与飞行数据的比较	256
3.14	迎角传感器实验	258
3.14.1	迎角传感器的工作原理	258
3.14.2	实验方法与数据处理	261
3.14.3	实验结果及其与飞行数据的比较	263
3.15	温度传感器实验	265
3.15.1	实验方法和数据处理	265
3.15.2	实验结果	267
3.16	雷达天线实验	268
3.16.1	模型和支撑	268
3.16.2	实验方法	268
3.16.3	数据处理和修正	272
3.16.4	实验结果及其与实物露天实测数据的比较	272
第4章	风洞模型定常实验(II)	274
4.1	静弹性实验	274
4.1.1	飞行器弹性变形对气动特性的影响	274

4.1.2	相似参数	277
4.1.3	模型	278
4.1.4	实验方法	280
4.1.5	实验结果及其与飞行数据的比较	281
4.2	螺旋桨及螺旋桨飞机模型实验	284
4.2.1	相似参数	284
4.2.2	实验方法	285
4.2.3	模型	289
4.2.4	实验装置	290
4.2.5	实验数据修正	291
4.2.6	实验结果及其与飞行数据的比较	294
4.3	涡轮发动机动力模拟实验	295
4.3.1	模拟方法	297
4.3.2	引射器模型模拟器	299
4.3.3	涡轮动力模拟器	301
4.3.4	实验方法	302
4.3.5	实验结果	304
4.4	降落伞实验	305
4.4.1	相似参数	306
4.4.2	实验方法	306
4.4.3	模型和支撑装置	308
4.4.4	实验设备和仪器	310
4.4.5	实验结果及其修正	314
4.4.6	风洞实验结果与自由投放实验结果的比较	317
4.5	弹射救生装置实验	319
4.5.1	实验方法	319
4.5.2	实验结果	322
4.6	旋转弹实验	325
4.6.1	实验方法	325
4.6.2	模型	325
4.6.3	实验结果	327
4.7	马格努斯力实验	329

4.7.1	相似参数	330
4.7.2	实验方法	332
4.7.3	模型	332
4.7.4	天平	337
4.7.5	实验结果	338
4.8	旋转天平实验	340
4.8.1	旋转天平装置	340
4.8.2	相似参数	347
4.8.3	模型和支撑	348
4.8.4	实验方法和数据处理	350
4.8.5	洞壁和支架干扰	352
4.8.6	实验结果及其与飞行数据的比较	355
4.9	吹(吸)气流动控制实验	361
4.9.1	吹气特性及其对飞机气动性能的影响	361
4.9.2	相似参数	364
4.9.3	模型和实验装置	366
4.9.4	实验结果及其与飞行数据的比较	371
4.10	垂直/短距起落飞机实验	373
4.10.1	风洞实验的限制	374
4.10.2	模型	380
4.10.3	实验装置	382
4.10.4	实验结果及其与飞行数据的比较	382
4.11	直升机实验	384
4.11.1	相似参数	385
4.11.2	模型	387
4.11.3	直升机实验台	390
4.11.4	实验方法	393
4.11.5	洞壁干扰修正	394
4.11.6	实验结果及其与飞行数据的比较	395
4.12	大雨实验	398
4.12.1	大雨对飞机性能的影响	399
4.12.2	雨特性	400