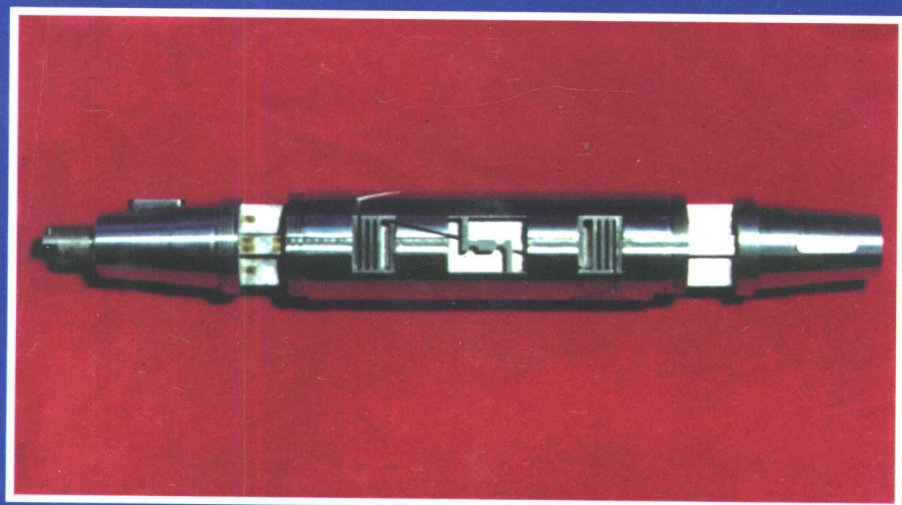


《近代空气动力学丛书》

# 风洞天平

## Wind Tunnel Balance

贺德馨 主编



国防工业出版社

近代空气动力学丛书

# 风洞天平

Wind Tunnel Balance

贺德馨 主编

国防工业出版社

·北京·

## 图书在版编目(CIP)数据

风洞天平/贺德馨主编. —北京:国防工业出版社,  
2001.5

(近代空气动力学丛书)

ISBN 7-118-02355-8

I. 风... II. 贺... III. 风洞天平 IV. TH715.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 38309 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

新华书店经售

\*

开本 850×1168 1/32 印张 12½ 319 千字

2001 年 5 月第 1 版 2001 年 5 月北京第 1 次印刷

印数:1—2000 册 定价:25.00 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;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

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 (按姓氏笔划为序)	于景元	王小谟	尤子平	冯允成
	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

## 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。

测力实验是风洞实验中最基本的实验项目,风洞天平则是风洞实验时最重要的测量装置。风洞天平按其工作原理可分为机械天平、应变天平、压电天平与磁悬挂天平等,简称天平。

风洞天平已有一百余年的历史,随着风洞及其实验技术的发展而发展,特别是近30年来,各种类型的应变天平在低速、跨、超声速与高超声速风洞中得到广泛的应用,天平校准设备与校准方法也有了很大的改进。另外,压电天平与磁悬挂天平的技术也得到了发展与应用。

本书主要介绍风洞天平的原理、设计、制造、校准与使用。全书共分六章,第一章重点介绍机械天平的原理及其干扰调整方法;第二章重点介绍应变天平的设计方法;第三章介绍特种应变天平;第四章介绍压电天平的原理与应用;第五章介绍磁悬挂天平的原理与应用;第六章介绍天平校准设备与校准方法。

本书的主要内容是我国风洞天平工作者的实践经验及研究成果的总结,同时也介绍国外风洞天平的研究成果与进展情况。本书还引用了在中国空气动力学学会测控专业委员会风洞天平专业组召开的学术交流会议上发表的技术报告。书后附有参考文献,便于读者查阅。另外,还有许多天平工作者为本书提供了素材。在此一并向他们表示真诚的谢意。

本书是集体编著的。各章主要撰稿人如下:绪论,贺德馨;第一章,蒋进荣、贺德馨、仇畔祥、孙庆和、张家骥;第二章,顾兴若、王朝安、贾庚仁、贺德馨、屠光峰、沈鸿桥、刘高计、王金印、郭开科、陆文祥;第三章,贺德馨、刘宗陶;第四章,杨耀棟、齐学群;第五章,尹力明;第六章,江桂清、韩步璋、贺德馨。另外刘伟、叶明磊、胡晋青、李俊国、胡国风、姜维本、陈淳等亦参加了部分章、节的撰稿。

全书最后由贺德馨完成统稿。

本书是近代空气动力学丛书之一。在本书编著与出版过程中得到了近代空气动力学丛书编委会与国防工业出版社的大力支持,也得到了中国空气动力学学会测控专业委员会的帮助,范洁川、蒋范与沈礼敏对本书进行了校审,提出了许多宝贵的意见。

在本书编著过程中,陈坤、彭云、万利强、梁鉴、陈洪、倪章松与曾菊辉等帮助做了大量的文字校对与图表绘制工作。在此向他们表示衷心的感谢。

由于水平所限,书中定有不妥之处,谨请专家与读者批评指正。

编著者

# 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 (按姓氏笔划为序)

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

## 内 容 简 介

本书全面地介绍了风洞试验中使用的各种风洞天平,包括机械天平、应变天平、压电天平和磁悬挂天平的基本原理、设计方法和使用维护,以及风洞天平的校准设备和校准方法。书中给出了应变天平的设计实例和 20 种特种用途的应变天平。

本书主要对象是从事风洞试验的工程技术人员以及有关高等院校的师生。

This book describes comprehensively various wind tunnel balances including mechanical balance, strain gage balance, piezoelectric balance and magnetic suspension and balance system, which are used in wind tunnel testing. The fundament, design method, usage and maintenance, calibration equipment and calibration method of wind tunnel balance are presented in this book. In addition, the example of the strain gage balance design, and 20 kinds of special strain gage balance are included also.

This is a useful reference book for engineers working on wind tunnel testing, teachers and students of university concerned as well.

# 目 录

绪 论	1
第一章 机械天平	9
1.1 机械天平概述	9
1.2 机械天平设计	12
1.3 机械天平调整	40
第二章 应变天平	67
2.1 应变天平概述	67
2.2 应变天平设计	72
2.3 应变天平支杆与连接	168
2.4 应变天平材料与加工	178
2.5 应变计	187
2.6 应变天平使用与维护	200
第三章 特种应变天平	208
3.1 动导数天平	208
3.2 铰链力矩天平	214
3.3 外挂天平	220
3.4 喷流天平	222
3.5 马格努斯力天平	225
3.6 旋转天平	226
3.7 螺旋桨天平	230
3.8 旋翼天平	233
3.9 降落伞天平	235
3.10 洞外应变天平	236
3.11 张线式天平	240

3.12	高频底座天平	242
3.13	高温天平	244
3.14	低温天平	247
3.15	摩阻天平	249
3.16	小滚转力矩天平	250
3.17	微量天平	253
3.18	脉冲天平	256
3.19	应力波天平	258
3.20	水洞天平	260
<b>第四章</b>	<b>压电天平</b>	<b>262</b>
4.1	压电天平概述	262
4.2	压电天平设计	266
4.3	压电天平应用	277
<b>第五章</b>	<b>磁悬挂天平</b>	<b>284</b>
5.1	磁悬挂天平概述	284
5.2	磁悬挂天平设计	287
5.3	磁悬挂天平应用	305
<b>第六章</b>	<b>风洞天平校准</b>	<b>309</b>
6.1	风洞天平校准设备	309
6.2	风洞天平静态校准	328
6.3	风洞天平动态校准	359
	<b>参考文献</b>	<b>365</b>
	<b>主题词索引</b>	<b>373</b>



# Content

<b>Introduction</b> .....	1
<b>Chapter 1 Mechanical Balance</b> .....	9
1.1 Survey of Mechanical Balance .....	9
1.2 Design of Mechanical Balance .....	12
1.3 Adjustment of Mechanical Balance .....	40
<b>Chapter 2 Strain Gauge Balance</b> .....	67
2.1 Survey of Strain Gauge Balance .....	67
2.2 Design of Strain Gauge Balance .....	72
2.3 Sting and Connection of Strain Gauge Balance .....	168
2.4 Material and Machining of Strain Gauge Balance .....	178
2.5 Strain Gauge .....	187
2.6 Use and Maintenance of Strain Gauge Balance .....	200
<b>Chapter 3 Special Strain Gauge Balance</b> .....	208
3.1 Dynamic Derivative Balance .....	208
3.2 Hinge Moment Balance .....	214
3.3 External Store Balance .....	220
3.4 Jet Flow Balance .....	222
3.5 Magnus Balance .....	225
3.6 Rotary Balance .....	226
3.7 Propeller Balance .....	230
3.8 Rotor Balance .....	233
3.9 Parachute Balance .....	235
3.10 Balance of Outside the Wind Tunnel .....	236
3.11 Wired Balance .....	240