

风洞试验手册

Handbook of Wind Tunnel Test

范洁川 主编

航空工业出版社

风洞试验手册

Handbook of Wind Tunnel Test

范洁川 主编

内 容 提 要

本手册根据我国风洞设备及试验的发展情况,编入了9座生产性低速风洞(口径在2.25 m量级以上)和11座跨超声速风洞(口径在0.6 m量级以上)的有关资料,并对风洞试验的主要技术问题作了系统、简明的介绍。内容包括:风洞设备、模型及支撑系统、空气动力天平、流场校测与标模试验、测试设备、试验程序和试验方法、流动显示与测量、工业空气动力风洞试验,以及试验数据的修正和使用等,其中含有大量数据、图表和曲线。全部内容力求做到实用、严谨,尽可能体现我国风洞试验技术发展的最新面貌。

本手册可作为风洞试验工作人员的工具书,为气动力设计和进行风洞试验提供依据;也可作为其他气动研究工作者和有关工程技术人员的参考书;并为型号设计单位了解我国风洞试验能力,协调、安排风洞试验任务提供基本技术资料。

图书在版编目(CIP)数据

风洞试验手册/范洁川主编. —北京:航空工业出版社,2002.12

ISBN 7-80134-985-7

I. 风… II. 范… III. 风洞试验 - 手册 IV. V211.74 - 62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 026832 号

责任编辑:邵 箭 技术编辑:李 力 封面设计:麦醒媛

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)

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2002年12月第1版

2002年12月第1次印刷

开本:787×1092 1/16

印张:46.25

字数:1181千字

印数:1—550

定价:138.00元

ISBN 7 - 80134 - 985 - 7

《风洞试验手册》

编委会

主 编：范洁川

副 主 编：钮颂镛 贺德馨 王政礼 于 涛

编 委：(按姓氏笔画排列)

毛书熹 孙绍鹏 华鹤鸣 杨振发 张其威

张覃钧 陈 玉 陈正才 罗乐平 林荣生

武家陶 赵克诚 郝忠祥 骆冬伶 徐明方

傅增学 樊玉辰

前 言

近 50 年来,在航空航天科学技术发展的推动下,我国风洞设备建设和风洞试验技术研究取得了举世瞩目的成就,已建成各种类型的风洞百余座,风洞试验能力有了显著提高,为航空、航天飞行器的研制和空气动力学的发展作出了重要贡献。我国气动研究工作者为此付出了辛勤的劳动和不懈的努力,同时积累了丰富的经验。为了及时、系统地总结这些经验和研究成果,促进我国风洞试验技术水平的进一步提高,更好地培养风洞试验人员,满足飞行器研制和国民经济建设的需要,1996 年范洁川和陈玉等同志倡议,编写一部《风洞试验手册》。这一建议得到了诸多专家的响应和上级主管部门的同意,并于 1997 年 12 月 12 日在北京召开第一次工作会议,成立了编委会,正式开始编写工作。在各有关主管部门和单位的大力支持与配合下,历时 5 年,《风洞试验手册》终于和读者见面了。

风洞设备和风洞试验种类繁多,但生产性低速和跨超声速风洞试验在飞行器研制中,始终是应用最广泛、工作量最大、技术上最具代表性的部分。本手册根据我国风洞设备及试验的发展情况,编入了 9 座生产性低速风洞(口径在 2.25 m 量级以上)和 11 座跨超声速风洞(口径在 0.6 m 量级以上)的有关资料。这些风洞是:

中国空气动力研究与发展中心低速所:FL-12,FL-13,FL-14;

中国空气动力研究与发展中心高速所:FL-21,FL-23,FL-24,
FL-26;

北京空气动力研究所:FD-06,FD-07,FD-09;

中国航空工业空气动力研究院:FL-1,FL-2;FL-7,FL-8;

南京航空航天大学:NH-1,NH-2;

西北工业大学:NF-3;

北京大学:BD-4;

陕西青华机电研究所:CG-01;

中国航空工业宏伟机械厂:DFD-03。

手册对上述风洞试验的主要技术问题作了简明、系统的介绍,内容包括:风洞试验的目的、原理、发展;风洞的性能、构造;风洞试验模型的

设计、制造,模型支撑系统的形式和结构;风洞中机械天平和应变天平的原理、性能、设计、校准、使用和维护;对风洞流场品质的要求;流场校测和标模试验方法;风洞测量、控制、数据采集和处理系统的性能、要求、典型形式;风洞试验设计、试验大纲、试验程序和试验方法;流动显示与测量技术;风洞在工业空气动力学试验方面的应用,包括风力机、汽车、高速列车、桥梁、建筑物等试验方法;风洞试验数据的修正和使用等。其中含有大量数据、图表和曲线。全部内容力求做到实用、严谨,尽可能体现我国风洞试验技术发展的最新面貌。所有风洞设备的技术状态截止到 2000 年 12 月 31 日。

本手册可作为风洞试验工作人员的工具书,为气动力设计和进行风洞试验提供依据;也可作为其他气动研究工作者和有关工程技术人员参考书;并为型号设计单位了解我国生产性风洞试验能力,协调、安排风洞试验任务提供基本技术资料。

参加本手册编写人员如下:绪论 范洁川,王政礼,钮颂镛;第 1 章 范洁川,于涛,李周复;第 2 章 赵克诚,武家陶;第 3 章 贺德馨,顾兴若,沈鸿桥,孙庆和,江桂清;第 4 章 徐明方,孙绍鹏,王发祥;第 5 章 骆冬伶,孙少波;第 6 章 毛书熹,张覃钧,孙绍鹏,范洁川;第 7 章 范洁川,吴根兴,冯天植,申功忻,屠兴,张祖庚等;第 8 章 贺德馨,张亮亮;第 9 章 张其威,吴慰祖,赵协和。统编范洁川。参加校审人员有:于涛,范洁川,钮颂镛,贺德馨,王政礼,陈玉,樊玉辰,傅增学,郝忠祥,林荣生,范召林,徐明方,毛书熹等。出版审校由陈玉负责。

参加本手册编写人员还有:张孝棣、洪金森、孙启明、陈洪、韩晓涛等。

编写中,中国空气动力研究与发展中心低速所、中国空气动力研究与发展中心高速所、北京空气动力研究所、中国航空工业空气动力研究院、南京航空航天大学、西北工业大学、北京大学、陕西青华机电研究所和中国航空工业宏伟机械厂等单位提供了大量的宝贵资料,谨致谢意。

手册编写尚属尝试,不妥和错误之处在所难免,恳请批评指正。

编 者

2002 年 5 月

目 录

绪论	(1)	3.1.1 概述	(136)
第 1 章 风洞设备	(7)	3.1.2 机械天平的干扰	(137)
1.1 概述	(7)	3.1.3 机械天平的调整	(153)
1.2 低速风洞	(9)	3.2 应变天平	(156)
1.2.1 FL-12 风洞	(10)	3.2.1 概述	(156)
1.2.2 FL-13 风洞	(13)	3.2.2 应变天平测量及力和力矩的 分解原理	(157)
1.2.3 FL-14 风洞	(16)	3.2.3 应变天平元件	(165)
1.2.4 FL-8 风洞	(19)	3.2.4 应变天平连接件	(177)
1.2.5 FD-09 风洞	(23)	3.2.5 应变计	(179)
1.2.6 NF-3 风洞	(25)	3.2.6 应变天平电路补偿	(181)
1.2.7 NH-2 风洞	(29)	3.2.7 应变天平使用与维护	(182)
1.2.8 北大 $\phi 2.25$ m 风洞	(32)	3.3 天平的校准	(184)
1.2.9 DFD-03 风洞	(35)	3.3.1 概述	(184)
1.3 跨超声速风洞	(37)	3.3.2 天平的静态校准	(185)
1.3.1 FL-21 风洞	(37)	3.3.3 天平的动态校准	(198)
1.3.2 FL-23 风洞	(40)	3.4 附表	(200)
1.3.3 FL-24 风洞	(43)	3.4.1 低速风洞使用的机械天平	(200)
1.3.4 FL-26 风洞	(46)	3.4.2 低速风洞使用的应变天平	(200)
1.3.5 FL-1 风洞	(52)	3.4.3 跨超声速风洞使用的应变天平	(200)
1.3.6 FL-2 风洞	(55)	3.4.4 天平使用的应变计	(200)
1.3.7 FL-7 风洞	(59)	3.4.5 应变天平校准设备	(200)
1.3.8 FD-06 风洞	(62)	第 4 章 流场校测与标模试验	(216)
1.3.9 FD-08 风洞	(64)	4.1 概述	(216)
1.3.10 CG-01 风洞	(67)	4.2 流场校测	(216)
1.3.11 NH-1 风洞	(72)	4.2.1 低速风洞流场校测项目	(216)
第 2 章 模型及其支撑系统	(76)	4.2.2 低速风洞流场品质要求	(217)
2.1 概述	(76)	4.2.3 低速风洞流场校测方法与 数据处理	(218)
2.2 模型	(76)	4.2.4 跨超声速风洞流场校测项目	(229)
2.2.1 低速风洞试验模型	(76)	4.2.5 跨超声速风洞流场品质要求	(229)
2.2.2 亚跨超声速风洞试验模型	(91)	4.2.6 跨超声速风洞流场校测方法与 数据处理	(231)
2.3 模型支撑系统	(110)	4.3 标模试验	(240)
2.3.1 低速风洞模型支撑系统	(110)	4.3.1 低速风洞标模	(240)
2.3.2 亚跨超声速风洞模型支撑系统	(126)	4.3.2 低速风洞标模试验方法与 数据处理	(243)
第 3 章 空气动力天平	(136)		
3.1 机械天平	(136)		

4.3.3 低速风洞标模试验结果	(246)	6.2.5 坐标轴系和对应坐标轴的空气动力、 力矩及其系数	(314)
4.3.4 低速风洞测力精度要求	(250)	6.2.6 试验数据处理	(315)
4.3.5 跨超声速风洞标模	(251)	6.2.7 试验曲线绘制	(328)
4.3.6 跨超声速风洞标模试验方法与 数据处理	(258)	6.3 半模型试验	(333)
4.3.7 跨超声速风洞标模试验结果	(261)	6.3.1 试验方法	(333)
4.3.8 跨超声速风洞测力精度要求	(275)	6.3.2 半模型试验中一些参数的确定	(336)
第 5 章 测控系统	(277)	6.3.3 缝隙的影响及其消除方法	(337)
5.1 概述	(277)	6.3.4 半模型试验举例及初步结论	(337)
5.1.1 风洞测控系统	(277)	6.4 模型表面压力分布试验	(338)
5.1.2 风洞测控技术的发展	(277)	6.4.1 测压模型的技术要求	(339)
5.2 风洞测控系统的特点和一般要求	(280)	6.4.2 试验方法	(340)
5.3 风洞的测量和控制参数	(281)	6.4.3 数据处理	(340)
5.3.1 风洞的测量参数	(281)	6.4.4 表面压力分布测量的新方法	(342)
5.3.2 风洞的控制参数	(283)	6.5 二维翼型试验	(343)
5.4 风洞测控系统的典型形式	(283)	6.5.1 试验方法	(343)
5.4.1 集中控制系统(CCS)	(283)	6.5.2 侧壁边界层的影响及修正	(347)
5.4.2 分散控制系统(DCS)	(284)	6.6 地面效应试验	(348)
5.4.3 现场总线控制系统(FCS)	(284)	6.6.1 试验方法	(348)
5.5 数据采集系统的技术指标、配置 及参数选择	(286)	6.6.2 数据处理与修正	(350)
5.5.1 主要技术指标	(286)	6.7 铰链力矩试验	(350)
5.5.2 系统配置和参数选择	(287)	6.7.1 试验方法	(350)
5.5.3 数据采集系统的定期检定	(294)	6.7.2 对模型的技术要求	(351)
5.6 风洞的控制和运行监测系统	(295)	6.7.3 铰链力矩试验天平	(352)
5.6.1 风速或 M 数控制	(295)	6.7.4 数据处理	(353)
5.6.2 模型姿态角控制	(297)	6.8 进气道试验	(356)
5.6.3 风洞运行的监控系统	(299)	6.8.1 试验方法	(356)
5.7 计算机及网络系统	(300)	6.8.2 进气道出口流场畸变测量	(357)
5.7.1 系统硬件	(300)	6.8.3 数据处理	(357)
5.7.2 系统软件	(301)	6.8.4 试验曲线绘制	(362)
第 6 章 试验程序和试验方法	(303)	6.9 通气模型测力试验	(364)
6.1 风洞试验程序	(303)	6.9.1 模型	(364)
6.1.1 试验前的准备	(303)	6.9.2 试验方法	(365)
6.1.2 试验实施	(306)	6.9.3 数据处理	(365)
6.1.3 试验后的工作	(307)	6.9.4 流量系数 φ 对气动系数的影响	(366)
6.2 全模型测力试验	(308)	6.9.5 通气模型与堵锥模型试验结果 比较	(366)
6.2.1 相似参数	(309)	6.10 喷流试验	(369)
6.2.2 模型与试验设备	(309)	6.10.1 模拟参数的选择	(369)
6.2.3 试验方法	(309)	6.10.2 试验方法	(370)
6.2.4 模型表面边界层的固定转捩	(313)	6.10.3 数据处理	(373)
		6.11 喷气式飞机的动力模拟试验	(374)
		6.11.1 引射式动力模拟器(EPES)法	(375)
		6.11.2 涡轮动力模拟器(TPS)法	(376)

6.12 螺旋桨飞机的动力模拟试验····· (378)	6.19.5 抖振深入特性研究····· (420)
6.12.1 相似参数····· (378)	6.19.6 抖振载荷测量····· (422)
6.12.2 试验方法····· (378)	6.20 颤振试验····· (423)
6.12.3 两种试验方法的气动系数比较····· (380)	6.20.1 相似准则····· (423)
6.12.4 支架与洞壁干扰修正····· (381)	6.20.2 模型····· (424)
6.12.5 试验所需专用设备····· (381)	6.20.3 模型的支撑····· (425)
6.13 降落伞试验····· (381)	6.20.4 风洞和模型的防护····· (427)
6.13.1 相似参数····· (382)	6.20.5 试验方法····· (427)
6.13.2 模型····· (382)	6.20.6 数据处理及典型试验结果····· (429)
6.13.3 试验设备····· (382)	6.21 动导数试验····· (430)
6.13.4 试验方法····· (385)	6.21.1 相似参数····· (430)
6.13.5 试验数据修正····· (387)	6.21.2 模型及支撑····· (430)
6.14 弹射救生装置试验····· (387)	6.21.3 试验方法····· (431)
6.14.1 模型····· (388)	6.21.4 试验装置····· (431)
6.14.2 模型支撑与试验····· (388)	6.21.5 试验原理及试验数据处理····· (434)
6.14.3 数据处理与修正····· (389)	6.22 大迎角非定常试验····· (440)
6.15 外挂物测力试验····· (389)	6.22.1 大迎角俯仰振荡试验····· (440)
6.15.1 试验方法····· (389)	6.22.2 大迎角机翼摇摆试验····· (445)
6.15.2 数据处理····· (390)	6.23 旋转天平试验····· (447)
6.15.3 外挂标模的试验结果····· (390)	6.23.1 试验原理····· (447)
6.16 外挂物投放试验····· (393)	6.23.2 相似参数····· (447)
6.16.1 相似准则····· (393)	6.23.3 旋转天平试验装置····· (448)
6.16.2 模型与支架····· (395)	6.23.4 模型和支撑····· (449)
6.16.3 试验装置····· (395)	6.23.5 试验方法和数据处理····· (449)
6.16.4 试验方法····· (397)	6.23.6 试验内容与试验结果····· (450)
6.16.5 试验结果····· (399)	6.24 马格努斯效应试验····· (452)
6.17 外挂物轨迹捕获试验····· (400)	6.24.1 相似参数····· (453)
6.17.1 试验原理····· (401)	6.24.2 试验方法····· (453)
6.17.2 试验方法····· (401)	6.24.3 试验模型····· (454)
6.17.3 试验模型与试验设备····· (402)	6.24.4 天平····· (455)
6.17.4 数据处理····· (406)	6.24.5 试验结果····· (457)
6.17.5 典型试验结果····· (408)	6.25 直升机试验····· (459)
6.18 非定常压力分布试验····· (411)	6.25.1 相似参数····· (460)
6.18.1 风洞和模型····· (411)	6.25.2 试验模型····· (460)
6.18.2 动态压力传感器的选择、安装和 校准····· (412)	6.25.3 直升机试验台····· (461)
6.18.3 试验方法····· (413)	6.25.4 直升机试验程序····· (463)
6.18.4 数据处理····· (414)	6.25.5 几种常用的直升机试验方法····· (464)
6.18.5 典型试验结果····· (415)	6.25.6 数据处理与修正····· (466)
6.19 抖振试验····· (416)	6.25.7 试验结果····· (467)
6.19.1 风洞····· (417)	第7章 流动显示与测量····· (469)
6.19.2 模型····· (417)	7.1 概述····· (469)
6.19.3 抖振试验用仪器及分析系统····· (418)	7.2 烟流法····· (471)
6.19.4 抖振边界测量····· (419)	7.3 氦气泡法····· (473)

7.4 油流法	(474)	7.15 热线风速仪	(544)
7.5 丝线法	(476)	7.15.1 热线测速原理	(544)
7.5.1 丝线流动显示的基本问题	(477)	7.15.2 基本电路	(545)
7.5.2 常规丝线法与荧光微丝法、 流动锥法	(478)	7.15.3 热线的热量损失	(545)
7.5.3 丝线法的其他应用	(479)	7.15.4 热线的静、动态特性	(547)
7.6 升华法	(479)	7.15.5 热线与热膜探头	(551)
7.7 液晶法	(480)	7.15.6 影响测量结果的因素及修正 方法	(555)
7.7.1 液晶流动显示的基本问题	(480)	7.15.7 热线测量应用	(560)
7.7.2 液晶流动显示技术的应用	(481)	7.16 粒子图像测速技术	(565)
7.8 阴影法	(482)	7.16.1 粒子图像测速及其基本 原理	(565)
7.8.1 阴影法的基本原理和试验装置	(482)	7.16.2 PIV 系统的基本构成	(567)
7.8.2 阴影法流动显示技术的应用	(484)	7.16.3 若干基本试验参数选择问题	(577)
7.9 纹影法	(484)	7.16.4 二维 PIV 在流动显示中的应用	(578)
7.9.1 纹影法的基本原理和试验装置	(484)	7.16.5 三维粒子图像测速技术	(582)
7.9.2 纹影法流动显示技术的应用	(488)	7.17 激光诱导荧光(LIF)流动显示与 测量技术	(587)
7.9.3 激光彩色纹影流动显示技术	(489)	7.17.1 激光诱导荧光测速基本原理	(588)
7.10 干涉法	(492)	7.17.2 试验装置的基本组成	(590)
7.10.1 干涉法的基本原理	(493)	7.17.3 数据处理	(591)
7.10.2 马赫-增德干干涉仪	(494)	7.17.4 应用实例	(591)
7.10.3 横向错位干涉仪	(499)	7.18 红外成像技术	(592)
7.11 片光流动显示技术	(506)	7.18.1 红外成像技术的基本原理	(593)
7.11.1 片光流动显示的基本原理和 试验装置	(506)	7.18.2 红外热像仪与温度测量	(594)
7.11.2 微机控制的多片光流动显示	(507)	7.18.3 红外成像技术在风洞试验中 的应用	(596)
7.11.3 光纤纤维片光流动显示	(508)	7.19 发光压力传感技术	(599)
7.11.4 片光流动显示技术的应用	(510)	7.19.1 概述	(599)
7.12 蒸汽屏流动显示技术	(511)	7.19.2 发光压力传感技术原理	(600)
7.12.1 蒸汽屏流动显示的基本原理和 试验装置	(511)	7.19.3 发光压力传感器(LPS)和压敏 涂料(PSP)的结构	(603)
7.12.2 在气流中形成最佳雾浓度的 条件	(514)	7.19.4 LPS 和 PSP 特性	(605)
7.12.3 水蒸气凝结对场的影响	(515)	7.19.5 光学压力测量(OPM)方法	(607)
7.12.4 蒸汽屏流动显示技术的应用	(517)	7.19.6 测量误差分析	(613)
7.13 彩色图像流动显示技术	(519)	7.19.7 应用实例	(617)
7.13.1 彩色图像流动显示的基本原理	(519)	第 8 章 工业空气动力风洞试验	(619)
7.13.2 彩色图像流动显示试验装置	(519)	8.1 概述	(619)
7.13.3 彩色图像流动显示技术的应用	(524)	8.2 风力机试验	(620)
7.14 激光测速仪	(525)	8.2.1 概述	(620)
7.14.1 激光测速仪(LDV)的基本原理	(525)	8.2.2 风洞试验相似准则	(620)
7.14.2 光学系统	(526)	8.2.3 风洞试验项目	(621)
7.14.3 散射微粒	(532)	8.3 建(构)筑物风洞试验	(625)
7.14.4 信号的分析与处理	(536)		
7.14.5 激光测速仪的应用	(541)		

8.3.1 概述	(625)	9.2.1 典型支撑方式支架干扰的特点及 减小支架干扰的措施	(648)
8.3.2 风洞试验相似准则	(625)	9.2.2 支架干扰的修正方法	(659)
8.3.3 风洞试验项目	(628)	9.3 洞壁干扰及其修正	(663)
8.4 桥梁风洞试验	(632)	9.3.1 洞壁干扰的性质及类型	(663)
8.4.1 概述	(632)	9.3.2 减小洞壁干扰的方法	(664)
8.4.2 桥梁风洞试验相似准则	(633)	9.3.3 洞壁边界条件	(673)
8.4.3 风洞试验项目	(634)	9.3.4 洞壁干扰的试验修正法	(676)
8.5 汽车风洞试验	(638)	9.3.5 映像法和 Maskell 法	(676)
8.5.1 概述	(638)	9.3.6 有限基本解法(涡格法)	(683)
8.5.2 风洞试验相似准则	(639)	9.3.7 数值算法法	(684)
8.5.3 风洞试验项目	(639)	9.3.8 壁压信息法	(684)
8.6 列车风洞试验	(642)	9.3.9 某些特殊风洞试验的洞壁 干扰修正	(698)
8.6.1 概述	(642)	9.4 尺度效应	(702)
8.6.2 列车风洞试验相似准则	(642)	9.4.1 概述	(702)
8.6.3 风洞试验项目	(642)	9.4.2 零升阻力的雷诺数影响修正方法 ..	(702)
第 9 章 风洞试验数据修正	(645)	9.4.3 升致阻力的雷诺数影响修正方法 ..	(703)
9.1 概述	(645)	9.4.4 雷诺数对飞机升力系数的影响	(706)
9.1.1 测量系统偏差修正	(645)	9.4.5 雷诺数对边界层转换位置的影响 ..	(707)
9.1.2 风洞气流品质偏差修正	(646)	9.4.6 雷诺数对其他气动现象和气动力的 影响	(708)
9.1.3 与模型模拟有关的修正	(646)	9.4.7 动态试验中的尺度效应	(708)
9.1.4 支架干扰修正	(647)	9.5 风洞数据与飞行数据的相关性	(709)
9.1.5 洞壁干扰修正	(647)	参考文献	(711)
9.1.6 尺度效应修正	(647)		
9.2 支架干扰及其修正	(648)		

Contents

Introduction	(1)	Supersonic Wind Tunnel Test	(91)
Chapter 1 Wind Tunnel Equipment	(7)	2.3 Model Support System	(110)
1.1 Summary	(7)	2.3.1 Model Support System for Low Speed Wind Tunnel	(110)
1.2 Low Speed Wind Tunnel	(9)	2.3.2 Model Support System for Subsonic, Transonic and Supersonic Wind Tunnel	(126)
1.2.1 FL-12 Wind Tunnel	(10)	Chapter 3 Aerodynamic Balance	(136)
1.2.2 FL-13 Wind Tunnel	(13)	3.1 Mechanical Balance	(136)
1.2.3 FL-14 Wind Tunnel	(16)	3.1.1 Summary	(136)
1.2.4 FL-8 Wind Tunnel	(19)	3.1.2 Interference of Mechanical Balance	(137)
1.2.5 FD-09 Wind Tunnel	(23)	3.1.3 Adjustment of Mechanical Balance	(153)
1.2.6 NF-3 Wind Tunnel	(25)	3.2 Strain Gauge Balance	(156)
1.2.7 NH-2 Wind Tunnel	(29)	3.2.1 Summary	(156)
1.2.8 ϕ 2.25m Wind Tunnel of Beijing University	(32)	3.2.2 The Principle of Measurement and Resolution of Force and Moment	(157)
1.2.9 DFD-03 Wind Tunnel	(35)	3.2.3 Elements of Strain Gauge Balance	(165)
1.3 Transonic and Supersonic Wind Tunnel	(37)	3.2.4 Connectors of Strain Gauge Balance ...	(177)
1.3.1 FL-21 Wind Tunnel	(37)	3.2.5 Strain Gauge	(179)
1.3.2 FL-23 Wind Tunnel	(40)	3.2.6 Electric Circuit Compensation of Strain Gauge Balance	(181)
1.3.3 FL-24 Wind Tunnel	(43)	3.2.7 Usage and Maintenance of Strain Gauge Balance	(182)
1.3.4 FL-26 Wind Tunnel	(46)	3.3 Calibration of Balance	(184)
1.3.5 FL-1 Wind Tunnel	(52)	3.3.1 Summary	(184)
1.3.6 FL-2 Wind Tunnel	(55)	3.3.2 Static Calibration of Balance	(185)
1.3.7 FL-7 Wind Tunnel	(59)	3.3.3 Dynamic Calibration of Balance	(198)
1.3.8 FD-06 Wind Tunnel	(62)	3.4 Attached List	(200)
1.3.9 FD-08 Wind Tunnel	(64)	3.4.1 Mechanical Balance Used in Low Speed Wind Tunnel	(200)
1.3.10 CG-01 Wind Tunnel	(67)	3.4.2 Strain Gauges Balance Used in Low Speed Wind Tunnel	(200)
1.3.11 NH-1 Wind Tunnel	(72)	3.4.3 Strain Gauges Balance Used in Transonic and Supersonic Wind Tunnel	(200)
Chapter 2 Model and Model Support System	(76)	3.4.4 Strain Gauges Used in Balance	(200)
2.1 Summary	(76)		
2.2 Model	(76)		
2.2.1 Model for Low Speed Wind Tunnel Test	(76)		
2.2.2 Model for Subsonic, Transonic and			

3.4.5	Calibration Equipments of Strain Gauge Balance	(200)		
Chapter 4 Flow Field Calibration and Calibration-model Test			Chapter 5 Measurement and Control System	
		(216)		(277)
4.1	Summary	(216)	5.1	Summary
4.2	Flow Field Calibration	(216)	5.1.1	Measurement and Control System of Wind Tunnel
4.2.1	Calibration Items of Flow Field for Low Speed Wind Tunnel	(216)	5.1.2	Development of Measurement and Control Technology for Wind Tunnel ...
4.2.2	Flow Quality Requirements for Low Speed Wind Tunnel	(217)	5.2	Characters and General Requirements for Wind Tunnel Measurement and Control System
4.2.3	Calibration Method and Data Reduction of Flow Field for Low Speed Wind Tunnel	(218)	5.3	Measurement and Control Parameters of Wind Tunnel
4.2.4	Calibration Items of Flow Field for Transonic and Supersonic Wind Tunnel	(229)	5.3.1	Measurement Parameters of Wind Tunnel
4.2.5	Flow Quality Requirements for Transonic and Supersonic Wind Tunnel	(229)	5.3.2	Control Parameters of Wind Tunnel
4.2.6	Calibration Method and Data Reduction of Flow Field for Transonic and Supersonic Wind Tunnel	(231)	5.4	Typical Forms of Wind Tunnel Control System
4.3	Calibration-model Test	(240)	5.4.1	Centralized Control System(CCS)
4.3.1	Calibration-model for Low Speed Wind Tunnel	(240)	5.4.2	Distributed Control System (DCS)
4.3.2	Calibration - model Test Method and Data Reduction for Low Speed Wind Tunnel	(243)	5.4.3	Field Bus Control System (FCS)
4.3.3	Calibration - model Test Results for Low Speed Wind Tunnel	(246)	5.5	Specification, Disposition and Selection of Parameters for Data Acquisition System
4.3.4	Requirements of Force Test Precision for Low Speed Wind Tunnel	(250)	5.5.1	Main Specifications
4.3.5	Calibration-model for Transonic and Supersonic Wind Tunnel	(251)	5.5.2	Disposition and Selection of Parameters for Data Acquisition System
4.3.6	Calibration - model Test Method and Data Reduction for Transonic and Supersonic Wind Tunnel	(258)	5.5.3	Periodical Inspection and Calibration for Data Acquisition System
4.3.7	Calibration-model Test Results for Transonic and Supersonic Wind Tunnel	(261)	5.6	Control of Wind Tunnel and Operation Monitoring System of Wind Tunnel
4.3.8	Requirements of Force Test Precision for Transonic and Supersonic Wind Tunnel	(275)	5.6.1	Wind Speed or Mach Number Control
			5.6.2	Model Attitude Angles Control
			5.6.3	Operation Monitoring System of Wind Tunnel
			5.7	Computer and Network System
			5.7.1	Hardware
			5.7.2	Software
			Chapter 6 Program and Test Method	
				(303)
			6.1	Program of Wind Tunnel
				(303)

6.1.1 Test Prepare	(303)	6.8.1 Test Method	(356)
6.1.2 Test Implement	(306)	6.8.2 Measurement of Flow Field Distortion at Exit of Air Intake	(357)
6.1.3 Works after Test	(307)	6.8.3 Data Reduction	(357)
6.2 Full Model Force Test	(308)	6.8.4 Test Curves Drawing	(362)
6.2.1 Similarity Parameter	(309)	6.9 Aerated Model Force Test	(364)
6.2.2 Model and Test Equipment	(309)	6.9.1 Model	(364)
6.2.3 Test Method	(309)	6.9.2 Test Method	(365)
6.2.4 Fixed Transition of Boundary Layer of Model Surface	(313)	6.9.3 Data Reduction	(365)
6.2.5 Aerodynamic Forces, Moments and Coefficients of Axis System Corresponding Coordinate Axis	(314)	6.9.4 Mass Flow Coefficient Influent on Aero- dynamic Coefficients	(366)
6.2.6 Test Data Reduction	(315)	6.9.5 Test Results Comparison between Aerated Model and Blocking - cone Model	(366)
6.2.7 Test Curves Drawing	(328)	6.10 Jet Test	(369)
6.3 Half - model Test	(333)	6.10.1 Choose of Simulated Parameter	(369)
6.3.1 Test Method	(333)	6.10.2 Test Method	(370)
6.3.2 Some Parameters Determining for Half- model Test	(336)	6.10.3 Data Reduction	(373)
6.3.3 Seam Influence and Elimination	(337)	6.11 Engine Simulation Test of Jet Airplane	(374)
6.3.4 Give an Example and Preliminary Concl- usion	(337)	6.11.1 Ejector Power Engine Simulator (EPES)	(375)
6.4 Pressure Distribution Test of Model Surface	(338)	6.11.2 Turbine Power Simulator (TPS)	(376)
6.4.1 Technique Requirements for Pressure Model	(339)	6.12 Engine Simulation Test of Propeller	(378)
6.4.2 Test Method	(340)	6.12.1 Similarity Parameter	(378)
6.4.3 Data Reduction	(340)	6.12.2 Test Method	(378)
6.4.4 New Method for Model Surface Pressure Distribution Measurement	(342)	6.12.3 Aerodynamic Coefficient Comparison between Two Methods	(380)
6.5 2 - Dimensional Foil Test	(343)	6.12.4 Support Interference Correction and Wind Tunnel Wall Interference Correction	(381)
6.5.1 Test Method	(343)	6.12.5 Special Equipment Used for Propeller Engine Simulation Test	(381)
6.5.2 Influence of Side Wall Boundary Layer and Correction	(347)	6.13 Parachute Test	(381)
6.6 Ground Effect Test	(348)	6.13.1 Similarity Parameter	(382)
6.6.1 Test Method	(348)	6.13.2 Model	(382)
6.6.2 Data Reduction and Correction	(350)	6.13.3 Test Equipment	(382)
6.7 Hinge - moment Test	(350)	6.13.4 Test Method	(385)
6.7.1 Test Method	(350)	6.13.5 Test Data Correction	(387)
6.7.2 Technique Requirements for Model Design	(351)	6.14 Ejection Lifesaving Device Test	(387)
6.7.3 Balances Used for Hinge - moment Test	(352)	6.14.1 Model	(388)
6.7.4 Test Data Reduction	(353)	6.14.2 Model Support and Test	(388)
6.8 Air Intake Test	(356)	6.14.3 Data Reduction and Correction	(389)
		6.15 External Stores Force Test	(389)
		6.15.1 Test Method	(389)

6.15.2	Data Reduction	(390)	6.21.4	Test Equipment	(431)
6.15.3	Test Results of External Store		6.21.5	Test Principle and Data Reduction	(434)
	Calibration Model	(390)	6.22	Unsteady Flow Test at High Angle of Attack	(440)
6.16	External Store Jettison Test	(393)			
6.16.1	Similarity Criterion	(393)	6.22.1	Pitching Oscillation Test at High	
6.16.2	Model and Support	(395)		Angle of Attack	(440)
6.16.3	Test Equipment	(395)	6.22.2	Wing Rock Test at High Angle of Attack	(445)
6.16.4	Test Method	(397)			
6.16.5	Test Results	(399)	6.23	Rotary Balance Test	(447)
6.17	Captive Trajectory Test of External Store	(400)	6.23.1	Test Principle	(447)
			6.23.2	Similarity Parameter	(447)
6.17.1	Test Principle	(401)	6.23.3	Test Equipment of Rotary Balance	(448)
6.17.2	Test Method	(401)	6.23.4	Model and Support	(449)
6.17.3	Test Model and Test Equipment	(402)	6.23.5	Test Method and Data Reduction	(449)
6.17.4	Data Reduction	(406)	6.23.6	Test Contents and Test Results	(450)
6.17.5	Typical Test Results	(408)	6.24	Magnus Effect Test	(452)
6.18	Unsteady Pressure Distribution Test	(411)	6.24.1	Similarity Parameter	(453)
6.18.1	Wind Tunnel and Model	(411)	6.24.2	Test Method	(453)
6.18.2	Choose, Install and Calibration for		6.24.3	Test Model	(454)
	Dynamic Pressure Transducer	(412)	6.24.4	Balance	(455)
6.18.3	Test Method	(413)	6.24.5	Test Results	(457)
6.18.4	Data Reduction	(414)	6.25	Helicopter Wind Tunnel Test	(459)
6.18.5	Typical Test Results	(415)	6.25.1	Similarity Parameter	(460)
6.19	Buffet Test	(416)	6.25.2	Test Model	(460)
6.19.1	Wind Tunnel	(417)	6.25.3	Test Board of Helicopter	(461)
6.19.2	Model	(417)	6.25.4	Test Program of Helicopter	(463)
6.19.3	Instruments and Analyzing System		6.25.5	Several Test Methods General Used	(464)
	Used for Buffet Test	(418)		in Helicopter Test	(464)
6.19.4	Buffet Boundary Measurement	(419)	6.25.6	Data Reduction and Correction	(466)
6.19.5	Buffet Deep Characteristic Study	(420)	6.25.7	Test Result	(467)
6.19.6	Buffet Load Measurement	(422)			
6.20	Flutter Test	(423)	Chapter 7	Flow Visualization	(469)
6.20.1	Similarity Criterion	(423)	7.1	Summary	(469)
6.20.2	Model	(424)	7.2	Smoke Wire	(471)
6.20.3	Support of Model	(425)	7.3	Helium Bubble	(473)
6.20.4	Protection of Wind Tunnel and Model	(427)	7.4	Oil Film	(474)
			7.5	Tuft	(476)
6.20.5	Test Method	(427)	7.5.1	Some Basic Questions of Tuft	(477)
6.20.6	Data Reduction and Typical Test Results	(429)	7.5.2	Conventional Tuft and Fluorescent Tuft,	
				Flow Cone Tuft	(478)
6.21	Dynamic Derivative Test	(430)	7.5.3	Other Applications of Tuft	(479)
6.21.1	Similarity Parameter	(430)	7.6	Sublimation Method	(479)
6.21.2	Model and Support	(430)	7.7	Liquid Crystal	(480)
6.21.3	Test Method	(431)	7.7.1	Basic Questions of Liquid Crystal	

Visualization	(480)	7.14.3 Scattering Particles	(532)
7.7.2 Applications of Liquid Crystal Visualization	(481)	7.14.4 Signal Analysis and Reduction	(536)
7.8 Shadowgraph	(482)	7.14.5 Applications of LDV	(541)
7.8.1 Basic Principle and Test Equipment of Shadowgraph	(482)	7.15 Hot - wire Anemometer	(544)
7.8.2 Applications of Shadowgraph Visualization	(484)	7.15.1 Principle of Hot - wire Measuring Velocity	(544)
7.9 Schlieren	(484)	7.15.2 Basic Electric Circuit	(545)
7.9.1 Basic Principle and Test Equipment of Schlieren	(484)	7.15.3 Heat Waste of Hot - wire	(545)
7.9.2 Applications of Schlieren Visualization	(488)	7.15.4 Static and Dynamic Characteristics of Hot - wire	(547)
7.9.3 Laser Colour Schlieren Visualization ...	(489)	7.15.5 Hot - wire and Hot - film	(551)
7.10 Interferometry	(492)	7.15.6 Influence Factors of Measuring Results and Correction Method	(555)
7.10.1 Basic Principle of Interferometry	(493)	7.15.7 Applications of Hot - wire Measuring	(560)
7.10.2 Mach - Zehnder Interferometry	(494)	7.16 Partical Image Velocimeter (PIV)	(565)
7.10.3 Cross Malposition Interferometry	(499)	7.16.1 Basic Principle	(565)
7.11 Light Sheet Flow Visualization	(506)	7.16.2 Basic System of PIV	(567)
7.11.1 Basic Principle and Test Equipment	(506)	7.16.3 Selection of Some Basic Test Parameters	(577)
7.11.2 Multi-light Sheet Flow Visualization Controlled by Computer	(507)	7.16.4 Applications at Flow Visualization for 2 - Dimensional PIV	(578)
7.11.3 Light Sheet Flow Visualization with Optical Fiber	(508)	7.16.5 3 - Dimensional Particle Image Velocimetry	(582)
7.11.4 Applications of Light Sheet Flow Visu- alization	(510)	7.17 Flow Visualization and Measurement Method for Laser Induced Fluorescence (LIF)	(587)
7.12 Vapor - screen Flow Visualization	(511)	7.17.1 Basic Principle	(588)
7.12.1 Basic Principle and Test Equipment	(511)	7.17.2 Basic Test Equipment	(590)
7.12.2 Tunnel Condition for Optimum Fog Density	(514)	7.17.3 Data Reduction	(591)
7.12.3 Effect of Moisture Condensation on Flow Field	(515)	7.17.4 Examples of Application	(591)
7.12.4 Applications of Vapor - screen Flow Visualization	(517)	7.18 Infrared Imagery	(592)
7.13 Colour Picture Display for Flow Visualization	(519)	7.18.1 Basic Principle	(593)
7.13.1 Basic Principle	(519)	7.18.2 Infrared Camera and Temperature Measurement	(594)
7.13.2 Test Equipment	(519)	7.18.3 Applications of Infrared Imagery in Wind Tunnel Testing	(596)
7.13.3 Applications of Colour Picture Display for Flow Visualization	(524)	7.19 Luminescent Pressure Sensor Technology	(599)
7.14 Laser Doppler Velocimeter (LDV)	(525)	7.19.1 Summary	(599)
7.14.1 Basic Principle	(525)	7.19.2 Basic Principle of Luminescent Pressure Sensor	(600)
7.14.2 Optical System	(526)	7.19.3 Construction of Luminescent Pressure Sensor (LPS) and Pressure Sensitive	

Paints (PSP)	(603)	9.1.6 Scale Effect Correction	(647)
7.19.4 Properties of LPS and PSP	(605)	9.2 Support Interference and Corrections	(648)
7.19.5 Optical Pressure Measurement (OPM)		9.2.1 Character of Support Interference	
Method	(607)	for Typical Support Forms and Measures	
7.19.6 Analyses of Measuring Error	(613)	to Decrease Support Interference	(648)
7.19.7 Examples of Application	(617)	9.2.2 Correction Methods of Support Interference	
		(659)
Chapter 8 Industrial Aerodynamic Test		9.3 Wind Tunnel Wall Interference and	
in Wind Tunnel	(619)	Correction	(663)
8.1 Summary	(619)	9.3.1 Character and Type of Wall Interference	
8.2 Windmill Test	(620)	(663)
8.2.1 Summary	(620)	9.3.2 Method of Decreasing Wall Interference	
8.2.2 Similarity Criterion	(620)	(664)
8.2.3 Test Items	(621)	9.3.3 Boundary Conditions of Wind Tunnel Wall	
8.3 Building Structure Test in Wind Tunnel		(673)
.....	(625)	9.3.4 Experimental Correction Methods	
8.3.1 Summary	(625)	for Wall Interference	(676)
8.3.2 Similarity Criterion	(625)	9.3.5 Method of Images and Maskell	
8.3.3 Test Items	(628)	Method	(676)
8.4 Bridge Test in Wind Tunnel	(632)	9.3.6 Method of Finite Fundamental Solution	
8.4.1 Summary	(632)	(Vortex Lattice Method)	(683)
8.4.2 Similarity Criterion	(633)	9.3.7 Numerical Computational	
8.4.3 Test Items	(634)	Method	(684)
8.5 Automobile Test in Wind Tunnel	(638)	9.3.8 Wall Pressure Message Method	(684)
8.5.1 Summary	(638)	9.3.9 Wind Tunnel Wall Interference Corrections	
8.5.2 Similarity Criterion	(639)	for Some Special Tests in Wind Tunnel	
8.5.3 Test Items	(639)	(698)
8.6 Train Test in Wind Tunnel	(642)	9.4 Scale Effect	(702)
8.6.1 Summary	(642)	9.4.1 Summary	(702)
8.6.2 Similarity Criterion	(642)	9.4.2 Reynolds Number Correction Method for	
8.6.3 Test Items	(642)	Drag with Zero Lift	(702)
		9.4.3 Reynolds Number Correction Method for	
Chapter 9 Data Correction for Wind		Drag from Lift	(703)
Tunnel Test	(645)	9.4.4 Lift Coefficient Correction of Airplane	
9.1 Summary	(645)	Caused by Reynolds Number	(706)
9.1.1 Deviation Correction for Measuring System		9.4.5 Influence of Reynolds Number on Position	
.....	(645)	of Boundary Layer Transition	(707)
9.1.2 Deviation Correction for Flow Quality		9.4.6 Influence of Reynolds Number on Other	
of Wind Tunnel	(646)	Aerodynamic Phenomenon and	
9.1.3 Correction Concerned in Model		Aerodynamic	(708)
Similarity	(646)	9.4.7 Scale Effect of Dynamic Test	(708)
9.1.4 Support Interference Correction	(647)	9.5 Interrelation between Wind Tunnel Testing	
9.1.5 Wind Tunnel Wall Interference Correction		Data and Flight	(709)
.....	(647)	References	(711)