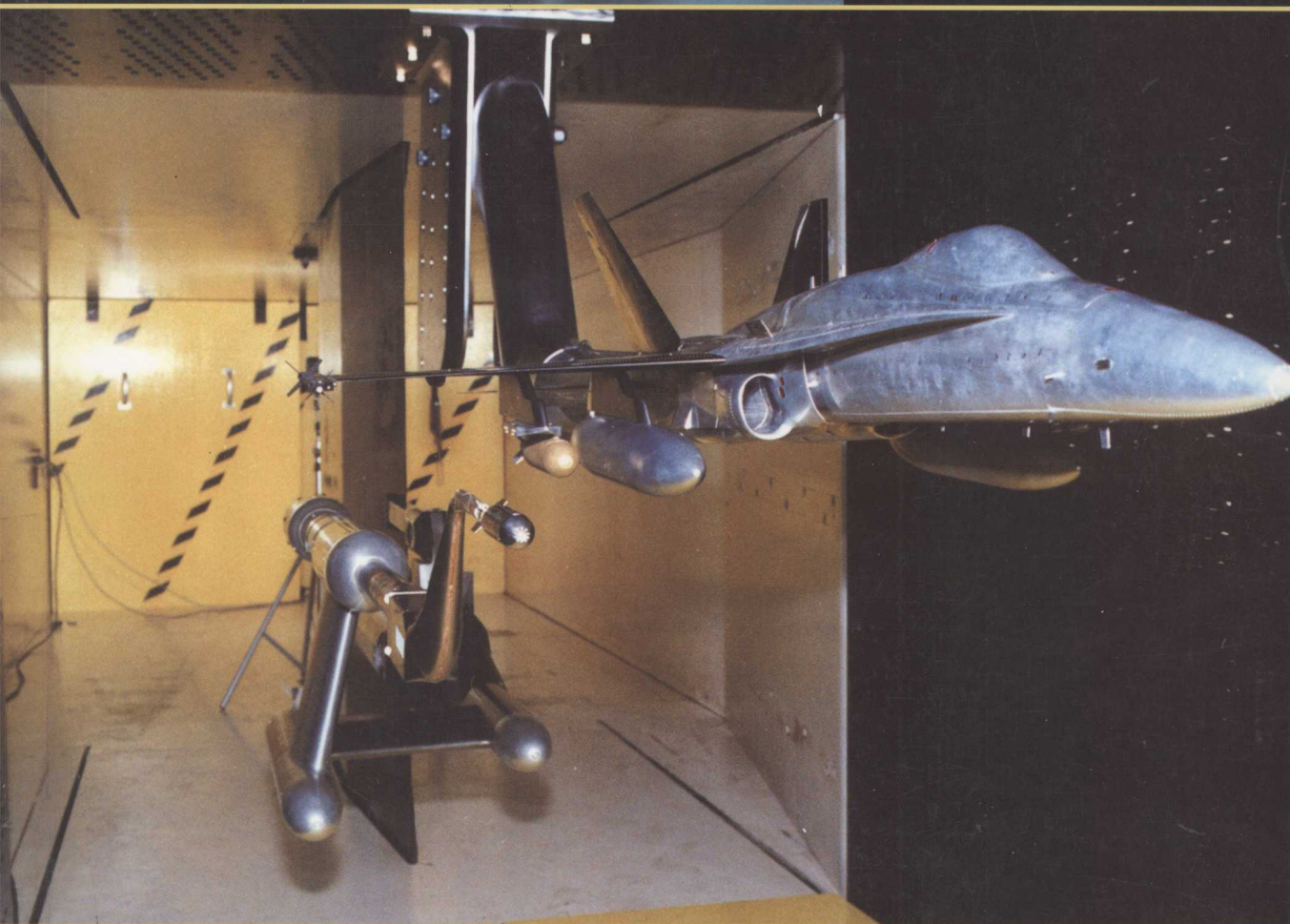




李周复 主编

风洞特种试验技术

FENGDONG TEZHONG SHIYAN JISHU



航空工业出版社



风洞特种试验技术

李周复 主编

航空工业出版社

北京

内 容 提 要

本书根据近年来风洞特种试验技术的发展,结合我国实际情况对现有的多种特种试验技术做了系统、简明的介绍,内容包括:动力模拟试验、多体干扰与分离试验、气动弹性试验、大迎角非定常试验、风洞尾旋试验、风洞模型自由飞试验、铰链力矩试验、非定常压力试验,弹射救生装置试验、结冰试验、航空声学试验、风洞虚拟飞行试验,以及先进实用的光学测量技术等。本书含有大量的试验数据、图表和曲线等,图文并茂。全书内容力求做到实用、严谨,尽可能体现当前风洞特种试验技术的最新发展。

本书可作为风洞试验人员,从事飞行器设计和其他空气动力研究工作者,以及大专院校有关专业师生的参考书;并为型号设计单位了解风洞特种试验技术能力,协调和安排风洞试验任务提供基本技术参考。

图书在版编目(CIP)数据

风洞特种试验技术/李周复主编. --北京:航空
工业出版社,2010.11

ISBN 978-7-80243-639-8

I. ①风… II. ①李… III. ①风洞试验 IV.
①V211.74

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第212460号

风洞特种试验技术

Fengdong Tezhong Shiyán Jishu

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)

发行部电话:010-64815615 010-64978486

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2010年11月第1版

2010年11月第1次印刷

开本:787×1092 1/16

印张:43 字数:1074千字

印数:1—1500

定价:180.00元

《风洞特种试验技术》

编 委 会

主 编：李周复

副 主 编：李 潜 陈 玉 王志川 张祖庚

编 委：（按姓氏笔画为序）

卜 忱 于彦泽 王利京 王政礼 卞於中 曲芳亮

刘子强 刘国政 杜希奇 杨振发 李 晨 吴运君

沈 清 宋志安 张 威 张孝棣 张连河 张锡金

陈 兰 陈 农 陈 宝 陈平剑 范洁川 林永峰

罗乐平 赵 磊 胡 斌 胡 静 胡汉东 钮颂镛

贾元胜 高剑军 蒋甲利

主 审：杨其德 于 涛

前 言

近年来，随着航空航天科学技术的不断发展，风洞试验，特别是风洞特种试验为航空航天飞行器的研制和空气动力学的发展做出了重要贡献，广大从事气动研究的工作者为此付出了辛勤的劳动和不懈的努力。为了及时、系统地总结这些研究成果，促进风洞特种试验技术水平的进一步提高，更好地满足飞行器研制和培养风洞试验人员的需求，2006年由中国航空工业空气动力研究院和中国航空气动力技术研究院等单位倡议，组织编写《风洞特种试验技术》。这一建议得到了国内各有关单位的积极响应和上级主管部门的同意，并于2006年6月召开了国内各有关单位专家参加的第一次编写工作会议，正式开始了编写工作。在参加编写工作的单位和专家们的共同努力下，历时4年，《风洞特种试验技术》一书终于和读者见面了。

风洞特种试验技术是相对常规试验而言的，并在不断地发展和变化着。本书所述的风洞特种试验是指飞行器在低、跨、超声速范围内的除飞行器（或模型）定常测力和表面压力分布试验以外的风洞试验项目，但不包括高超声速流动的气动力、气动热和气动物理试验，以及工业空气动力学试验。风洞特种试验项目种类繁多，是风洞试验的精华，标志着风洞试验的技术水平和发展方向，是研究解决飞行器空气动力学问题不可缺少的试验内容。本书所述的试验项目是应用最广泛、技术上最具代表性的部分，全书共分17部分（章），内容主要包括：动力模拟试验、多体干扰与分离试验、气动弹性试验、动导数试验、大迎角非定常试验、风洞尾旋试验、风洞模型自由飞试验、马格努斯效应试验、铰链力矩试验、非定常压力测量、直升机试验、弹射救生装置试验、降落伞试验、结冰试验、航空声学试验、风洞虚拟飞行试验和PSP和PIV光学测量技术。

本书给出了大量的试验数据、图表和曲线，内容力求做到实用、严谨，尽可能体现目前风洞特种试验技术的能力和最新发展。各部分（章节）的基本内容都是一个专门的试验项目，涉及范围广泛。但由于专业范围的限制，有些专题未能涵盖。

本书可作为风洞试验人员，从事飞行器设计和其他空气动力研究工作者，以及大中专院校有关专业师生的参考书；并为型号设计单位了解风洞特种试验技术能力，协调和安排风洞试验任务提供基本技术参考。

参加本书编写的人员有：绪论 王政礼，钮颂镛；第1章 曲芳亮，张锡金，宋志安、李晨；第2章 张祖庚，张威；第3章 王利京，刘成玉；第4章 刘子强；第5章 卜忱，杜希奇，刘国政；第6章 高剑军，卞於忠；第7章 陈农；第8章 刘子强；第9章 张祖庚；第10章 赵磊；第11章 林永峰，陈平剑；第12章 吴运君；第13章 罗乐平，胡斌；第14章 范洁川，张连河；第15章 贾元胜，李周复，樊昌；第16章 李潜，胡静；第17章 张孝棣，蒋甲利。全书由杨其德、于涛主审。出版审校：邵箭。

在编写中得到了总装备部空气动力学预研项目管理办公室、中国航空工业集团公司科技与信息化部等单位的大力支持，谨致谢意！

由于编者水平有限，不妥和错误在所难免，恳请读者批评指正。

目 录

绪论	(1)
0.1 风洞试验在飞行器设计中的作用	(1)
0.2 风洞特种试验的主要目的和内容	(1)
0.3 风洞特种试验的特点	(4)
0.4 风洞试验 (包括风洞特种试验) 的展望	(5)
第 1 章 动力模拟试验	(8)
1.1 螺旋桨飞机的动力模拟试验	(8)
1.1.1 动力模拟的相似参数	(8)
1.1.2 动力模拟的双匹配要求	(9)
1.1.3 一种简单的模拟思路	(11)
1.1.4 试验模型与试验装置	(13)
1.1.5 动力模拟试验	(15)
1.1.6 数据的修正与处理	(17)
1.1.7 试验结果以及比较分析	(20)
1.2 喷气动力飞机的进气道试验	(23)
1.2.1 试验模型与装置	(24)
1.2.2 试验方法	(25)
1.2.3 数据处理	(28)
1.2.4 进气道流场品质	(31)
1.2.5 试验曲线的绘制	(35)
1.2.6 新型进气道的风洞试验技术特点和展望	(36)
1.3 喷气动力飞机的喷流试验	(37)
1.3.1 试验的模拟参数	(38)
1.3.2 试验模型和设备	(42)
1.3.3 喷流试验方法	(47)
1.3.4 数据处理与修正	(49)
1.3.5 试验结果	(49)
1.4 推力转向试验	(50)
1.4.1 试验模型和设备	(51)
1.4.2 试验方法	(54)

1.4.3	数据处理	(56)
1.4.4	试验结果	(56)
1.5	进、排气组合动力模拟试验	(57)
1.5.1	引言	(57)
1.5.2	试验模型和设备	(59)
1.5.3	试验方法	(76)
1.5.4	数据处理	(80)
1.5.5	试验结果与分析比较	(85)
1.5.6	后语	(87)
第2章	多体干扰与分离试验	(88)
2.0	符号说明	(88)
2.1	概述	(89)
2.2	外挂物测力试验	(91)
2.2.1	试验目的	(91)
2.2.2	外挂物气动特性试验方法	(91)
2.2.3	外挂物模型试验结果	(93)
2.2.4	外挂物分段测力试验技术	(98)
2.2.5	试验技术的关键点	(100)
2.3	外挂物投放试验	(104)
2.3.1	外挂物分离轨迹测量的方法	(104)
2.3.2	外挂物分离的形式	(104)
2.3.3	外挂物投放试验的目的	(105)
2.3.4	投放试验的相似准则	(105)
2.3.5	低速投放试验	(106)
2.3.6	高速投放试验	(107)
2.3.7	模型和支撑的要求	(108)
2.3.8	试验装置	(109)
2.3.9	试验中关于助投力的确定	(113)
2.4	捕获轨迹试验	(113)
2.4.1	概述	(113)
2.4.2	捕获轨迹试验的特点	(114)
2.4.3	捕获轨迹试验原理及系统的组成	(115)
2.4.4	六自由度机构运动的控制系统模式	(139)
2.4.5	轨迹的图形显示	(149)
2.4.6	带控制律 CTS 试验	(152)
2.5	关于内埋武器舱的特性	(154)
2.6	多体分离抛撒初条件与分离特征参数	(157)

2.6.1	概述	(157)
2.6.2	多体分离的重要特征参数	(158)
2.7	机载多用途布撒器与风洞试验	(160)
2.7.1	机载多用途布撒器	(160)
2.7.2	布撒器的风洞试验	(160)
第3章	气动弹性试验	(162)
3.1	静弹性试验	(163)
3.1.1	飞行器弹性变形对气动特性的影响	(163)
3.1.2	相似参数	(165)
3.1.3	静气动弹性模型	(166)
3.1.4	试验方法	(167)
3.1.5	试验结果及其与飞行数据的比较	(168)
3.2	抖振试验	(169)
3.2.1	相似参数	(170)
3.2.2	抖振模型和支撑	(170)
3.2.3	抖振试验对风洞气流品质和对雷诺数的要求	(171)
3.2.4	抖振边界的测量	(172)
3.2.5	抖振深入特性测量	(176)
3.2.6	抖振载荷测量	(177)
3.2.7	试验结果及其与飞行数据的比较	(178)
3.3	颤振试验	(180)
3.3.1	相似参数	(180)
3.3.2	颤振模型	(182)
3.3.3	模型的支撑方式	(193)
3.3.4	风洞和模型的防护	(196)
3.3.5	试验方法	(197)
3.3.6	数据处理及试验结果	(200)
3.4	嗡鸣试验	(201)
3.4.1	嗡鸣类型	(202)
3.4.2	相似参数	(202)
3.4.3	嗡鸣模型	(202)
3.4.4	试验方法	(205)
3.4.5	试验结果	(206)
第4章	动导数试验	(208)
4.1	概述	(208)
4.1.1	动导数	(208)
4.1.2	动导数风洞试验	(210)

4.2	动导数试验方法	(211)
4.2.1	自由振动试验方法	(211)
4.2.2	强迫振动试验方法	(213)
4.2.3	交叉导数和交叉耦合导数	(215)
4.2.4	多自由度自由振动试验	(217)
4.3	试验装置	(218)
4.3.1	弹性铰链和动态天平	(218)
4.3.2	动导数试验支撑方式	(224)
4.3.3	激振系统	(232)
4.4	试验装置调试和标模试验	(235)
4.4.1	试验装置调试	(235)
4.4.2	标模试验	(236)
4.5	风洞试验	(243)
4.5.1	模型设计	(243)
4.5.2	模型-天平系统地面试验	(244)
4.5.3	风洞试验	(245)
4.5.4	动导数试验的数据处理方法	(245)
4.5.5	动导数试验的不确定度	(246)
4.6	大迎角试验的特殊问题	(247)
4.7	高超声速试验的特殊问题	(250)
4.8	动导数试验技术的发展趋势	(254)
第5章	大迎角非定常试验	(257)
5.1	概述	(257)
5.2	大迎角非定常气动力试验	(259)
5.2.1	模拟准则	(259)
5.2.2	低速风洞动态试验标模	(260)
5.2.3	试验装置及测控设备	(260)
5.2.4	大幅滚转振荡试验	(265)
5.2.5	大幅俯仰振荡试验	(267)
5.2.6	大幅侧滑振荡试验	(268)
5.2.7	偏航和滚转耦合振荡试验	(269)
5.2.8	俯仰和滚转耦合振荡试验	(271)
5.3	单、双自由度大幅拉升运动试验	(272)
5.3.1	大幅拉升运动的历程描述	(272)
5.3.2	大幅拉升试验的测控与数据处理方法	(273)
5.3.3	单自由度大幅俯仰拉升试验	(273)
5.4	自由振荡试验	(275)

5.4.1	FL-5 风洞机翼滚转试验	(275)
5.4.2	FL-5 风洞自由偏航试验	(276)
5.5	旋转流场下大幅振荡试验	(278)
5.5.1	模拟准则	(278)
5.5.2	试验装置	(279)
5.5.3	旋转流场下大幅滚转振荡试验	(280)
5.5.4	旋转流场下大幅俯仰振荡试验	(282)
第6章	尾旋试验	(287)
6.0	符号说明	(287)
6.1	概述	(288)
6.1.1	尾旋研究的回顾和任务	(288)
6.1.2	尾旋的三个阶段	(289)
6.1.3	尾旋运动	(290)
6.1.4	尾旋的自然发展趋势	(291)
6.1.5	尾旋的改出	(293)
6.1.6	研究飞机尾旋的方法	(294)
6.2	立式风洞模型自由飞试验	(294)
6.2.1	立式风洞	(294)
6.2.2	相似参数	(296)
6.2.3	模型	(298)
6.2.4	试验方法	(301)
6.2.5	试验结果及与飞行数据的比较	(303)
6.3	旋转天平试验	(305)
6.3.1	相似参数	(306)
6.3.2	试验装置	(308)
6.3.3	模型和支撑	(315)
6.3.4	试验方法和数据处理	(317)
6.3.5	试验结果及比较	(322)
第7章	风洞模型自由飞试验	(328)
7.0	符号说明	(328)
7.1	概述	(328)
7.2	动态缩比准则	(330)
7.2.1	动力学相似	(330)
7.2.2	运动学相似	(333)
7.3	风洞自由飞试验	(334)
7.3.1	试验设备	(335)
7.3.2	气动参数辨识	(339)

7.3.3	模型设计准则	(352)
7.3.4	试验步骤	(353)
7.3.5	试验实例	(353)
7.4	低速风洞带动力自由飞试验	(359)
7.4.1	试验设备	(363)
7.4.2	模型设计准则	(363)
7.4.3	试验设计	(364)
7.4.4	试验实例	(368)
第8章	马格努斯效应试验	(369)
8.1	概述	(369)
8.2	试验原理	(371)
8.2.1	相似参数	(371)
8.2.2	气动力表示	(373)
8.3	试验技术	(374)
8.3.1	模型支撑	(374)
8.3.2	旋转的驱动	(375)
8.3.3	模型	(378)
8.3.4	天平和数据采集	(381)
8.4	试验结果	(382)
第9章	铰链力矩试验	(384)
9.0	符号说明	(384)
9.1	概述	(384)
9.1.1	模型铰链力矩测量试验	(387)
9.1.2	模型试验的特点	(387)
9.2	铰链力矩测量方法	(388)
9.3	铰链力矩试验方法	(388)
9.3.1	测量方案	(389)
9.3.2	试验模型和天平	(391)
9.4	铰链力矩试验结果数据处理	(396)
9.4.1	铰链力矩系数计算	(396)
9.4.2	天平弹性变形的修正	(397)
9.4.3	试验曲线绘制	(397)
9.5	试验结果与飞行数据的比较	(398)
9.6	高速风洞舵面铰链力矩试验技术研究	(399)
9.6.1	二维测压试验	(399)
9.6.2	三维模型试验	(400)
9.7	大长细比飞行器操纵面铰链力矩的测量方法	(403)

9.7.1	前言	(403)
9.7.2	研究方法	(404)
9.8	大型飞机铰链力矩试验技术	(406)
9.8.1	前言	(406)
9.8.2	试验模型的选取	(407)
9.8.3	研究方案	(407)
9.8.4	试验结果	(408)
9.9	自动偏转模型操纵面的铰链力矩测量技术	(409)
9.9.1	前言	(409)
9.9.2	实施方案及控制系统	(409)
9.9.3	操纵面偏转角的测试	(411)
9.9.4	试验验证结果	(411)
9.10	高超声速风洞铰链力矩测量	(412)
9.10.1	前言	(412)
9.10.2	舵面天平技术	(412)
9.10.3	铰链力矩模型的结构设计	(413)
9.10.4	全模型铰链力矩测量	(414)
第10章	非正常压力测量	(418)
10.1	概述	(418)
10.2	风洞和模型	(419)
10.2.1	风洞	(419)
10.2.2	模型	(422)
10.2.3	测点布置	(423)
10.3	测量系统	(424)
10.3.1	动态压力传感器	(424)
10.3.2	信号调理器	(428)
10.3.3	数据采集器	(429)
10.3.4	数据分析系统	(430)
10.4	试验方法	(431)
10.4.1	谐振压力测量	(431)
10.4.2	脉动压力测量	(432)
10.5	数据处理	(433)
10.5.1	谐振压力测量	(433)
10.5.2	脉动压力测量	(433)
10.6	测量结果及其与飞行数据的比较	(437)
10.6.1	谐振压力测量	(437)
10.6.2	脉动压力测量	(438)

10.7	风洞气动噪声对试验结果的影响	(442)
第11章	直升机试验	(444)
11.1	概述	(444)
11.1.1	试验目的	(445)
11.1.2	试验项目	(445)
11.2	相似参数	(446)
11.2.1	旋翼模型的设计准则	(446)
11.2.2	旋翼缩尺模型参数确定	(447)
11.3	试验模型	(449)
11.3.1	机身模型的设计与制造	(449)
11.3.2	旋翼模型的设计与制造	(449)
11.3.3	模型的设计与生产程序	(451)
11.4	直升机旋翼/机身模型组合试验台	(451)
11.4.1	试验台架系统	(451)
11.4.2	动力系统	(453)
11.4.3	测量系统	(453)
11.4.4	操纵控制系统	(454)
11.4.5	旋翼轴倾斜系统	(454)
11.4.6	数据采集处理系统	(454)
11.4.7	监视报警系统	(454)
11.4.8	振动监视系统	(454)
11.4.9	信号传输系统	(455)
11.5	试验方法和试验程序	(455)
11.5.1	孤立旋翼模型风洞试验一般要求	(455)
11.5.2	单独旋翼性能试验	(459)
11.5.3	旋翼/机身组合模型风洞试验	(462)
11.6	试验结果及其与飞行数据的比较	(469)
第12章	弹射救生装置试验	(471)
12.1	概述	(471)
12.2	试验方法	(472)
12.2.1	弹射救生装置风洞测力试验	(473)
12.2.2	弹射救生装置风洞测压试验	(474)
12.2.3	弹射救生装置机身干扰影响风洞试验	(475)
12.2.4	弹射救生装置火箭喷流影响风洞试验	(476)
12.3	模型及支撑	(476)
12.3.1	弹射救生装置风洞试验模型	(476)
12.3.2	弹射救生装置风洞试验模型的支撑	(476)

12.4	数据处理及试验结果	(478)
12.4.1	数据处理	(478)
12.4.2	弹射救生装置风洞试验结果	(479)
12.5	弹射救生装置火箭滑车气动力试验	(481)
第13章	降落伞试验	(483)
13.1	概述	(483)
13.2	相似参数	(483)
13.3	试验设备	(484)
13.3.1	支撑装置	(484)
13.3.2	测量设备	(486)
13.3.3	开伞试验装置	(487)
13.4	试验方法	(487)
13.4.1	常规测力试验	(488)
13.4.2	开伞动载试验	(488)
13.4.3	伞衣压力分布试验	(489)
13.4.4	翼形伞试验	(490)
13.4.5	无支架干扰试验	(490)
13.4.6	伞绳张力测量试验	(490)
13.5	试验结果及其修正	(491)
13.5.1	降落伞气动力	(491)
13.5.2	对降落伞阻力影响的因素	(491)
13.5.3	多种结构形式的降落伞的性能特点	(493)
13.5.4	伞的风洞阻塞修正	(494)
第14章	结冰试验	(495)
14.1	概述	(495)
14.2	结冰对飞机气动特性的影响	(496)
14.3	结冰风洞	(498)
14.3.1	结冰风洞的功能	(498)
14.3.2	结冰风洞的现状与发展	(499)
14.3.3	典型的结冰风洞	(500)
14.4	结冰风洞的特殊装置	(507)
14.4.1	高度模拟系统	(507)
14.4.2	制冷系统	(509)
14.4.3	喷雾系统	(512)
14.4.4	测控系统	(517)
14.5	结冰风洞试验模拟	(520)
14.5.1	试验方法	(520)

14.5.2	相似准则	(520)
14.5.3	模拟参数计算结果及分析	(522)
14.6	试验结果	(525)
第15章	航空声学试验	(532)
15.1	概述	(532)
15.2	航空声学试验的必要性	(533)
15.3	相似参数	(533)
15.3.1	脉动质量源的声场相似	(533)
15.3.2	脉动力源的声场相似	(534)
15.3.3	脉动应力源的声场相似	(535)
15.3.4	一般气动声场的相似问题	(536)
15.3.5	非正常流动中脉动力谱的相似分析与声学相似的关系	(536)
15.3.6	相似准则	(537)
15.4	航空声学风洞	(538)
15.4.1	航空声学风洞的发展	(538)
15.4.2	航空声学风洞的设计	(540)
15.5	噪声的麦克风阵列测量	(543)
15.5.1	宽带阵列设计	(543)
15.5.2	阵列设计策略	(544)
15.5.3	阵列的构成与安装	(547)
15.5.4	阵列校准	(549)
15.6	测量仪器	(551)
15.6.1	传感器	(551)
15.6.2	阵列数据采集系统	(554)
15.6.3	阵列数据处理系统	(555)
15.7	几个典型的航空声学试验	(556)
15.7.1	空客 A340 模型在 DNW 风洞的声学阵列测量	(556)
15.7.2	美国 CRJ-700 型轰炸机模型的机身噪声测量	(557)
15.7.3	麦克风阵列现场测量机翼脱落涡噪声	(559)
15.7.4	某型飞机受油探头降噪试验中的噪声测量	(560)
第16章	风洞虚拟飞行试验	(562)
16.1	概述	(562)
16.1.1	风洞虚拟飞行试验的目的	(562)
16.1.2	风洞虚拟飞行试验研究内容	(563)
16.1.3	风洞虚拟飞行试验的作用	(565)
16.1.4	风洞虚拟飞行试验技术在国内外发展水平	(565)
16.1.5	虚拟飞行试验的试验原理	(568)

16.1.6	虚拟飞行试验中的相似关系	(569)
16.2	风洞虚拟飞行试验装置与安装	(571)
16.2.1	风洞虚拟飞行试验装置	(571)
16.2.2	风洞虚拟飞行试验系统的安装与调试	(573)
16.3	风洞虚拟飞行试验	(576)
16.4	风洞试验数据处理与分析	(577)
第17章	PSP和PIV光学测量技术	(581)
17.1	概述	(581)
17.2	压敏涂料光学测压技术	(581)
17.2.1	压敏涂料光学测压技术基本原理	(582)
17.2.2	风洞中压敏涂料测压试验概述	(586)
17.2.3	压敏涂料	(591)
17.2.4	另一种压敏涂料测压方法——发光寿命衰减法	(601)
17.2.5	压敏涂料测压技术的测量误差	(604)
17.2.6	风洞中压敏涂料测压试验	(606)
17.3	粒子图像测速技术	(612)
17.3.1	PIV测量技术基本原理	(614)
17.3.2	PIV测量技术的典型系统与关键设备	(626)
17.3.3	PIV数据处理方法	(637)
17.3.4	PIV测量误差分析	(647)
17.3.5	PIV测量应用	(653)
参考文献		(656)