

《国防科研试验工程技术系列教材》

空气动力系统

模型自由飞试验

中国人民解放军总装备部军事训练教材编辑工作委员会

国防工业出版社

《国防科研试验工程技术系列教材》
空气动力系统

模型自由飞试验

中国人民解放军总装备部
军事训练教材编辑工作委员会

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

模型自由飞试验/中国人民解放军总装备部军事训练教材编辑工作委员会编. —北京:国防工业出版社, 2002.1

国防科研试验工程技术系列教材·空气动力系统
ISBN 7-118-02604-2

I 模... II . 中... III . 试验模型 - 自由飞试验 - 教材 IV . V217

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 044879 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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 12 $\frac{1}{2}$ 311 千字

2002 年 1 月第 1 版 2002 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1—1000 册 定价:30.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

《国防科研试验工程技术系列教材》 总编审委员会

名誉主任委员 程开甲 李元正

主任委员 胡世祥

副主任委员 段双泉 尚学琨 褚恭信 马国惠

委员 (以下按姓氏笔划排列)

王国玉 刘 强 刘晶儒 张忠华

李济生 邵发声 周铁民 姚炳洪

姜世忠 徐克俊 钱卫平 常显奇

萧泰顺 穆 山

办公室主任 任万德

办公室成员 王文宝 冯许平 左振平 朱承进

余德泉 李 钢 杨德洲 邱学臣

郑时运 聂 皞 陶有勤 郭詮水

钱玉民

《国防科研试验工程技术系列教材· 空气动力系统》编审委员会

主任委员 董臻东

副主任委员 陈作斌 乐嘉陵

委 员 张涵信 王侃 张志成 萧泰顺

刘义信 范召林 郭隆德 杨祖清

桂业伟

主 编 张涵信

副 主 编 萧泰顺 张志成 王侃

秘 书 赵志根 沈秀春

模型自由飞试验

主 编 张守言
副 主 编 惠宇昕
主 审 蔡金狮 汪清

编著人员	第 1 章	张守言	许光明	
	第 2 章	张守言	惠宇昕	许光明
	第 3 章	王太民	许光明	唐 焘
		黄树清	张守言	惠宇昕
	第 4 章	舒泽金	张守言	
	第 5 章	旷天金	李汝冲	王卫东
	第 6 章	惠宇昕	赵清奎	夏成有
	第 7 章	黄树清	刘高川	旷天金
	第 8 章	郑忠培		
	第 9 章	吴东升	张守言	
	第 10 章	张守言	吴东升	刘高川
	第 11 章	旷天金		
	第 12 章	张守言		
	第 13 章	张守言	许光明	黄树清
		王太民		

总 序

当今世界,科学技术突飞猛进,知识经济迅速兴起,国力竞争越来越取决于各类高技术、高层次人才的质量与数量,因此,作为人才培养的基础工作——教材建设,就显得格外重要和紧迫。为总结、巩固国防科研试验的经验和成果,促进国防科研试验事业的发展,加快人才培养,我们组织了近千名专家、学者编著了这套系列教材。

建国以来,我国国防科研试验战线上的广大科技人员,发扬“自力更生、艰苦奋斗、科学求实、大力协同、无私奉献”的精神,经过几十年的努力,建立起了具有相当规模和水平的科研试验体系,创立了一系列科研试验理论,造就了一支既有较高科学理论知识、又有实践经验,勇于攻关、能打硬仗的优秀科技队伍,取得了举世瞩目的成就。这些成就对增强国防实力,带动国家经济发展,促进科技进步,提高国家和民族威望,都发挥了重要作用。

编著这套系列教材是国防科研试验事业继往开来的大事,它是国防科研试验工程技术建设的一个重要方面,是国防科技成果的一个重要组成部分,也是体现国防科研试验技术水平的一个重要标志。它承担着记载与弘扬科技成就、积累和传播科技知识的使命,是众多科技工作者用心血和汗水凝成的科技成果。编著该套系列教材,旨在从总体的系统性、完整性、实用性角度出发,把丰富的实践经验进一步理论化、科学化,形成具有我国特色的国防科研试验理论与实践相结合的知识体系。一是总结整理国防科研试验事业创业 40 年来的重要成果及宝贵经验;二是优化专业技术教材体系,为国防科研试验专业技术人员提供一套系统、全面的教科书,满足人才培养对教材的急需;三是为国防科研试验提供有力的

技术保障;四是将许多老专家、老教授、老学者广博的学识见解和丰富的实践经验总结继承下来。

这套系列教材按国防科研试验主要工程技术范畴分为:导弹航天测试发射系统、导弹航天测量控制系统、试验通信系统、试验气象系统、常规兵器试验系统、核试验系统、空气动力系统、航天医学工程系统、国防科技情报系统、电子装备试验系统等。各系统分别重点论述各自的系统总体、设备总体知识,各专业及相关学科的基础理论与专业知识,主要设备的基本组成、原理与应用,主要试验方法与工作程序,本学科专业的主要科技成果,国内外的最新研究动态及未来发展方向等。

这套系列教材的使用对象主要是:具有大专以上学历的科技与管理干部,从事试验技术总体、技术管理工作的人员及院校有关专业的师生。

期望这套系列教材能够有益于高技术领域里人才的培养,有益于国防科研试验事业的发展,有益于科学技术的进步。

《国防科研试验工程技术系列教材》

总编审委员会

1999年10月

序

空气动力试验与研究是国防科研试验的重要组成部分。

新中国成立以来,我国从事航空、航天空气动力研究的科技人员坚持“自力更生、艰苦奋斗、团结协作、科学求实”的精神,建立了尺寸、速度、性能相配套的各类气动试验设备,开展了气动理论、数值计算、气动试验及模型自由飞研究,承担并完成了一系列航空、航天、兵器武器的试验、计算任务,为我国武器装备的发展作出了重要贡献。

中国空气动力研究与发展中心的广大科技人员,在空气动力试验设备的研制、空气动力试验、计算方法研究及完成航空、航天、兵器等各类武器的试验与设计中,积累了丰富的实践经验,取得了丰硕的科研成果。为了更有效地培养和造就新一代空气动力学研究人才,促进我国空气动力事业的不断巩固和发展,在总装备部的领导下,我们组织有关专家和科技人员编写了这套系统、全面总结几十年来理论与实践经验成果的空气动力系列教材。

本套教材是以具有大专以上学历,从事空气动力研究的科技人员为主要适用对象,既可作为空气动力试验研究的中、高级技术人员的学习指导用书,亦可作为院校空气动力学相关专业的师生参考用书。

本套教材共分 13 卷。包括:《分离流与旋涡运动的结构分析》、《计算流体力学及应用》、《低速风洞试验》、《高速风洞试验》、《高超声速气动力试验》、《高超声速气动热和热防护》、《再入物理》、《高低速风洞气动与结构设计》、《高低速风洞测量与控制系统设计》、《高超声速试验设备设计》、《飞行器系统辨识学》、《模型自由飞试验》和《流动显示技术》。

本套教材在编写过程中,得到了总装备部领导、机关,型号部门和国内空气动力研究单位的大力支持与协作,在此一并表示衷心的感谢。由于本套教材涉及专业面广,包含内容多,编者水平有限,书中难免有错误或疏漏之处,诚请读者予以指正。

《国防科研试验工程技术系列教材·

空气动力系统》编审委员会

2001年3月

前 言

《模型自由飞试验》是《国防科研试验工程技术系列教材·空气动力系统》中的第12册,主要介绍模型自由飞试验技术问题。全书共13章。前3章为概论、模型自由飞试验的总体方案和可靠性、模型的气动力参数计算和数据处理;第4至第10章为自由飞试验模型的设计制作、模型的控制系統、模型的測量系統、模型的动力系統、模型的回收系統、模型的总装調配、模型的升空与分离;第11和第12章为模型的飞行操纵和模型自由飞试验的组织实施;最后一章介绍了几种典型的模型自由飞试验。

本书是按照《国防科研试验工程技术系列教材》的编写规定编写的。由于模型自由飞试验涉及的专业面宽,以往又没有这方面的著作可供参考,这就增加了本书的编写难度。我们根据多年从事这方面工作摸索出的经验和体会,加以总结、归纳和系统化,编写成书。本书在章节安排和具体内容上突出了工程实用性,使读者通过学习可以对模型自由飞试验的概貌、模型和各系统的准备以及进行试验的方法有一个较全面的了解。特别是对于从事模型自由飞试验的年轻技术干部,具有较大的实用价值。

由于我们的技术水平有限,遗漏、不妥和错误之处在所难免,敬请提出批评指正。

编 者

2001年4月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 概述	1
1.1.1 模型自由飞试验的特点及分类	1
1.1.2 模型自由飞试验的主要研究内容	5
1.2 模型自由飞试验在飞行器研制中的作用	11
1.3 模型自由飞试验的经济性与精度	18
1.3.1 模型自由飞试验的经济性	18
1.3.2 模型自由飞试验的精度	20
1.4 模型自由飞试验技术的发展方向	23
1.4.1 扩大试验空域和速域	23
1.4.2 开展带动力模型自由飞试验研究	24
1.4.3 改进自由飞试验技术	24
参考文献	26
第 2 章 模型自由飞试验的总体方案和可靠性	30
2.1 模型自由飞试验的相似性要求	30
2.1.1 几何相似和质量参数相似	30
2.1.2 主要相似参数	32
2.2 模型自由飞试验的总体方案	34
2.2.1 总体方案的制定	34
2.2.2 总体方案与各系统方案之间的关系	42
2.3 模型自由飞试验的可靠性	44
2.3.1 模型自由飞试验中可靠性的特殊意义	44
2.3.2 影响模型自由飞试验可靠性的因素	45
2.4 模型自由飞试验的可靠性设计	47

2.4.1 模型自由飞试验的可靠性要求及指标	47
2.4.2 模型自由飞试验可靠性设计的基本原则	52
2.4.3 模型自由飞试验可靠性的验收及评估	52
参考文献	53
第3章 模型自由飞试验的参数计算和测量数据处理	54
3.1 自由飞试验模型气动力数据估算	54
3.1.1 自由飞试验模型气动力数据预估	54
3.1.2 自由飞试验模型的风洞试验	63
3.2 自由飞试验模型飞行弹道计算	66
3.2.1 弹道计算的目的	66
3.2.2 质点弹道计算	67
3.2.3 六自由度弹道计算	68
3.2.4 解方程所用的原始数据	70
3.2.5 数值积分与插值方法	71
3.3 自由飞试验模型稳定性和扰动运动估算	73
3.3.1 自由飞试验模型的稳定性	73
3.3.2 扰动运动估算	77
3.4 自由飞试验模型气动热环境参数估算	82
3.4.1 估算的初始条件	83
3.4.2 无粘流场计算	84
3.4.3 边界层传热系数计算	86
3.4.4 壳体(蒙皮)温度计算	88
3.5 自由飞试验模型尾旋仿真计算	90
3.5.1 数学模型	90
3.5.2 气动力模型	93
3.6 光学测量和遥测数据处理	95
3.6.1 光测数据处理	95
3.6.2 遥测数据处理	101
3.6.3 遥测数据的预处理	104
参考文献	107
第4章 自由飞试验模型的设计制作	108

4.1 自由飞试验模型的设计要求	108
4.1.1 自由飞试验模型的基本要求	108
4.1.2 自由飞试验模型外形精度的确定	110
4.1.3 自由飞试验模型结构材料的选取	112
4.2 自由飞试验模型结构设计	116
4.2.1 自由飞试验模型设计载荷的确定	116
4.2.2 自由飞试验模型结构设计步骤	117
4.2.3 自由飞试验模型几种典型结构	120
4.3 自由飞试验模型强度计算	126
4.3.1 选取模型结构数学模型的原则	127
4.3.2 模型结构强度计算	127
4.4 模型结构的动态特性分析	131
4.4.1 模型结构动态特性分析的目的和特点	131
4.4.2 模型结构动态特性计算	132
4.5 自由飞试验模型的加工装配和检验	134
4.5.1 自由飞试验模型的加工装配	134
4.5.2 自由飞试验模型的检验	138
4.6 自由飞试验模型的地面试验	139
4.6.1 自由飞试验模型的静力试验	139
4.6.2 自由飞试验模型的动态特性试验	142
4.6.3 自由飞试验模型的动强度试验	144
4.6.4 自由飞试验模型的热载试验	145
参考文献	147
第5章 模型自由飞试验的控制系统	148
5.1 自由飞试验模型的控制方式	148
5.1.1 有线控制	148
5.1.2 无线电遥控	149
5.1.3 程序控制	149
5.1.4 自动驾驶	150
5.1.5 推力向量控制	150
5.1.6 姿态控制	151

5.2 无线电遥控系统	151
5.2.1 遥控系统在模型自由飞试验中的作用	151
5.2.2 遥控系统的组成和工作原理	152
5.2.3 频分制多通道遥控系统	153
5.2.4 多通道数字比例遥控系统	155
5.3 程序控制系统	157
5.3.1 程序控制系统的作用及分类	157
5.3.2 自由飞试验使用的程序控制器	158
5.4 自动驾驶系统	159
5.4.1 自动驾驶系统的主要功能	159
5.4.2 自动驾驶系统的工作原理	162
5.4.3 一种典型的遥控试验机自动驾驶系统	165
5.5 推力向量控制系统	167
5.5.1 推力向量控制技术的作用	167
5.5.2 推力向量控制系统的种类	168
5.5.3 流体二次喷射推力向量控制系统	169
5.6 姿态控制系统	170
5.6.1 姿态控制系统的任务和要求	171
5.6.2 姿态控制系统的组成及工作原理	171
第 6 章 模型自由飞试验的测量系统	173
6.1 遥测技术的发展概况	173
6.1.1 遥测技术的一般概念	173
6.1.2 国内外遥测技术及发展方向	173
6.2 自由飞试验的测量技术	176
6.2.1 自由飞试验测量技术的现状	176
6.2.2 自由飞试验测量技术的要求和特点	177
6.3 自由飞试验常用的传感器	177
6.3.1 压电角速度传感器	178
6.3.2 过载传感器	179
6.3.3 压电晶体加速度传感器	179
6.3.4 电感式压差及压力传感器	180

6.3.5	角加速度传感器	180
6.3.6	压差归零式迎角/侧滑角传感器	181
6.3.7	高度传感器	182
6.3.8	速度传感器	182
6.3.9	差容式加速度传感器	183
6.3.10	石英挠性伺服加速度传感器	184
6.4	无线电遥测系统	184
6.4.1	无线电遥测系统的组成	184
6.4.2	系统的性能及技术指标	185
6.5	小型磁记录系统	186
6.5.1	系统的组成	186
6.5.2	系统的功能及工作原理	188
6.5.3	系统的性能及技术指标	189
6.6	单片机遥测系统	191
6.6.1	系统的技术指标及特点	191
6.6.2	系统的组成及工作原理	192
第7章	模型自由飞试验的动力系统	196
7.1	助推固体火箭发动机	196
7.1.1	固体火箭发动机的结构和工作原理	197
7.1.2	固体火箭发动机的主要参数	200
7.2	助推固体火箭发动机的选用及组合	202
7.2.1	助推固体火箭发动机的选用	202
7.2.2	助推固体火箭发动机的组合	204
7.3	小型固体火箭发动机	205
7.4	小型活塞式航空发动机	206
7.4.1	小型活塞式航空发动机的种类	206
7.4.2	小型活塞式航空发动机的组成	206
7.5	小型空气喷气发动机	208
第8章	模型自由飞试验的回收系统	214
8.1	自由飞试验模型的回收方式	214
8.2	降落伞回收系统的设计	217

8.2.1 降落伞-模型吊挂系统平衡下降速度	217
8.2.2 开伞过程	218
8.2.3 降落伞系统的参数设计	222
8.2.4 伞型的选择	223
8.3 降落伞回收过程的轨迹计算	225
8.4 伞舱开启机构和伞包释放装置	226
8.5 回收系统空投试验	228
第9章 自由飞试验模型的总装调配	230
9.1 模型总装调配的内容和要求	230
9.1.1 试验设备的安装及方位测量	230
9.1.2 模型质量参数的调配与测量	231
9.1.3 模型和助推(运载)器的对接装配	231
9.2 模型的总装与调配	233
9.2.1 有安装要求之设备的安装及位置测量	234
9.2.2 其余设备和配重的安装及调配	235
9.3 模型总装调配方案的估算	236
9.3.1 手工试算估算装配方案	237
9.3.2 用内点惩罚函数法估算装配方案	240
9.4 模型质量质心位置和惯性矩的测量	244
9.4.1 模型质量质心位置的测量	244
9.4.2 模型惯性矩的测量	246
第10章 自由飞试验模型的升空与分离	252
10.1 自由飞试验模型的升空方式	252
10.1.1 助推器发射升空	252
10.1.2 运载器带飞升空	253
10.1.3 其它升空方式	255
10.2 模型和助推器的组合方式及分离机构	255
10.2.1 模型和助推器的组合方式	255
10.2.2 分离机构	256
10.3 地面发射设备	263
10.3.1 HP-2号地面发射车	264