



真空羽流效应 实验系统设计

Design of Vacuum Plume
Effects Experimental System

蔡国飙 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

真空羽流效应实验系统设计

Design of Vacuum Plume Effects
Experimental System

蔡国飙 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

真空羽流效应实验系统设计/蔡国飙著. —北京:
国防工业出版社, 2016. 2
ISBN 978 - 7 - 118 - 10665 - 7

I. ①真… II. ①蔡… III. ①导弹羽流—真空系
统一系统设计 IV. ①TJ760. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 004867 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 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 16½ 字数 280 千字

2016 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 89.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

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

第七届评审委员会组成人员

主任委员 潘银喜

副主任委员 吴有生 傅兴男 杨崇新

秘书长 杨崇新

副秘书长 邢海鹰 谢晓阳

委员 才鸿年 马伟明 王小谟 王群书

(按姓氏笔画排序) 甘茂治 甘晓华 卢秉恒 巩水利

刘泽金 孙秀冬 芮筱亭 李言荣

李德仁 李德毅 杨伟 肖志力

吴宏鑫 张文栋 张信威 陆军

陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起

郭云飞 唐志共 陶西平 韩祖南

傅惠民 魏炳波

前 言

空间飞行器上的姿态轨道控制发动机(以下简称姿轨控发动机)工作时会产生羽流气动力、气动热及羽流污染等羽流效应问题,因对该类问题认识不足,导致空间飞行器使用寿命缩短甚至整个任务失败等问题频发。随着我国航天工程的快速发展,真空羽流效应问题越来越受到航天设计部门的重视,而真空羽流效应实验系统是研究姿轨控发动机真空羽流及其效应的有效手段,利用该类实验设备可对羽流污染、羽流干扰力和羽流热效应等重大羽流问题进行研究,能更好地为国家航天型号任务需求服务。面对需求日益旺盛的羽流问题研究,目前国内还没有专门用于真空羽流效应实验系统设计、研制的书籍,在此背景下作者结合北京航空航天大学自行设计研制的真空羽流效应实验系统总结撰写了此书。

本书从真空羽流效应实验系统总体设计方法、主要分系统组成与设计、真空羽流实验测量方法等多个方面,对真空羽流效应实验系统设计进行了全面系统的论证,是作者团队多年研究成果的凝练和总结。本书共分 11 章。第 1 章介绍了真空羽流的基本概念、羽流问题的研究方法以及典型的真空羽流效应实验系统。第 2 章对羽流实验系统总体方案进行介绍,给出了内置式深冷泵捕获面积模型及羽流主要分系统组成。第 3 章介绍真空容器系统设计方法,主要包括材料选择、筒体、封头、大门、法兰、鞍座、观察窗以及容器强度校核。第 4 章介绍真空抽气系统设计方法,主要包括真空系统设计理论、真空泵的选择和配置、真空度测量技术、真空检漏技术。第 5 章介绍内置式深冷泵的设计与实现,主要包括深冷泵材料选择、壁板方案选择以及深冷泵结构、管路、支撑和进出口设计。第 6 章和第 7 章对液氮、气氮和液氮外流程系统进行介绍,主要包括系统方案设计、系统运行参数计算以及关键设备选型。第 8 章和第 9 章分别对羽流实验测量方法和实验测量与控制系统进行介绍,其中,羽流实验测量主要包括羽流场参数测量以及羽流气动力、气动热和污染效应测量;实验测量与控制系统主要包括数据采集方案设计和控制方案设计,用于完成上述羽流参数的测控。第 10 章对实验工质供应与发动机系统设计进行介绍,主要包括模型发动机和标准姿轨控发动机设计及其供应系统设计,还有常用阀门、气体减压器和气蚀文氏管等关键部件设计。第 11 章对实验台架与实验件系统设计进行介

绍,主要包括推力测量装置、舱内移动机构、支撑平台以及其他辅助设备设计。

全书由北京航空航天大学蔡国飙教授撰写,李晓娟副教授、贺碧蛟讲师、凌桂龙实验师、翁惠焱工程师、王文龙工程师等课题组成员参与了部分编写与校对工作。在北京航空航天大学真空羽流效应实验系统研制和本书撰写过程中得到了庄逢甘院士、戚发轫院士、黄本诚研究员、张国舟教授、张振鹏教授、王慧玉教授、庄毓南教授、徐旭教授、田辉副教授、张建华副教授等专家老师的指导和帮助。此外,北京有色金属研究总院郑杰研究员、常熟市虞华真空设备科技有限公司戴建新总经理、北京航天实验技术研究所杨思锋研究员、国防科技大学航天与材料工程学院宋志兵教授等单位 and 人员也给予了大力支持和配合,在此表示衷心感谢。

本书所有实例均出自北京航空航天大学 PES 羽流实验设备,书中给出了大量系统原理图、实物照片以及实验数据,内容力求做到翔实、严谨,尽可能体现目前真空羽流效应实验系统设计的最新技术及发展。

真空羽流效应实验系统涉及多个学科领域,从理论和方法上都存在诸多不完善的地方,人们对它的认知还在不断深化中,书中难免存在缺陷和不足,恳请读者批评指正。

蔡国飙

2015 年 3 月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 真空羽流的基本概念	1
1.1.1 姿轨控发动机	1
1.1.2 真空羽流	2
1.1.3 真空羽流效应	3
1.2 羽流问题的研究方法	4
1.2.1 半经验法与解析分析法	4
1.2.2 数值模拟	4
1.2.3 实验研究	5
1.3 典型真空羽流效应实验系统	5
第2章 总体方案设计	9
2.1 总体方案设计要求	9
2.2 真空羽流实验系统主要组成	10
2.3 总体方案设计方法	11
2.3.1 抽气能力需求分析与抽气方式选择	12
2.3.2 内置式深冷泵冷板面积计算	13
2.3.3 内置式深冷泵空间结构设计	18
2.4 PES 总体方案设计	21
2.4.1 PES 总体设计要求	21
2.4.2 深冷泵冷板面积计算和结构设计	21
第3章 真空容器系统设计	27
3.1 真空容器主要设计原则	28
3.2 材料选择	28
3.3 真空容器筒体设计	29
3.3.1 短圆筒设计	29
3.3.2 长圆筒设计	31
3.3.3 加强筋设计	31
3.4 封头和大门机构设计	34

3.4.1	封头设计	34
3.4.2	大门机构设计	35
3.5	法兰设计	44
3.5.1	法兰结构形式	44
3.5.2	开孔补强	44
3.6	鞍座设计	47
3.6.1	鞍座选用原则	47
3.6.2	鞍座位置选择	48
3.6.3	鞍座轻重型选择	48
3.6.4	鞍座底板宽度	48
3.6.5	鞍座垫板宽度	49
3.6.6	鞍座的设计参数	49
3.6.7	鞍座的强度校核	50
3.7	观察窗机构	53
3.7.1	磁力耦合观察窗机构	53
3.7.2	花瓣形挡板观察窗	54
3.8	真空容器强度校核	55
3.9	真空容器的压升率与漏气率	56
3.10	PES 真空容器设计	57
3.10.1	真空容器筒体设计	57
3.10.2	加强筋设计	58
3.10.3	封头设计	60
3.10.4	大门机构设计	60
3.10.5	开孔补强	61
3.10.6	鞍座设计	62
3.10.7	真空容器强度校核	64
3.10.8	PES 真空容器的压升率与漏气率测试	69
第4章	真空抽气系统设计	70
4.1	真空抽气系统设计理论	72
4.1.1	真空抽气系统设计的主要参数	72
4.1.2	管道流导的计算	73
4.1.3	抽气时间的计算	76
4.2	真空泵的选择和配置	79
4.2.1	主泵选择的一般原则	79

4.2.2	管道及阀门布置应遵循的原则	80
4.2.3	粗真空抽气系统常见主泵比较和选择	80
4.2.4	高真空抽气系统常见主泵比较和选择	81
4.2.5	防污染设计	82
4.3	真空度测量技术	83
4.3.1	全压力测量	84
4.3.2	分压力测量	87
4.3.3	真空计校准	87
4.4	真空检漏技术	88
4.4.1	基本概念	88
4.4.2	检漏方法	89
4.4.3	检漏方法的选择原则	92
4.5	PES 真空抽气系统设计	93
4.5.1	系统方案配置	93
4.5.2	真空系统工作模式及计算	95
4.5.3	系统调试	97
第5章	内置式深冷泵设计与实现	104
5.1	液氦深冷泵设计的基本原则	104
5.2	常见深冷泵的结构形式	105
5.2.1	空间环模深冷泵的常见形式	105
5.2.2	真空羽流实验深冷泵的基本结构	105
5.3	深冷泵材料选择	107
5.3.1	常用深冷泵材料的性能比较	108
5.3.2	材料和焊接工艺的选择	109
5.4	壁板方案选择和设计	110
5.4.1	壁板选择原则	110
5.4.2	常见深冷泵壁板的形式	110
5.4.3	壁板几何尺寸设计计算	111
5.4.4	深冷泵热负荷计算	112
5.5	深冷泵管路设计	113
5.5.1	流道均压理论	113
5.5.2	深冷泵常见的管路形式	115
5.6	总管和支管尺寸的确定	116
5.7	支撑结构	117

5.7.1	支撑结构的选择原则	117
5.7.2	支撑材料选择	117
5.7.3	支撑方案选择	117
5.8	进出口结构设计	118
5.8.1	进出口设计要求	118
5.8.2	液氮深冷泵进出口结构	119
5.8.3	液氮(气氮)深冷泵进出口结构	119
5.9	PES 深冷泵设计	120
5.9.1	PES 设计技术要求	120
5.9.2	PES 深冷泵设计与实现	121
第 6 章	液氮气氮外流程系统设计	127
6.1	液氮外流程系统设计	127
6.1.1	液氮系统设计	128
6.1.2	PES 液氮系统设计	143
6.2	气氮外流程系统设计	147
6.2.1	气氮系统设计	148
6.2.2	PES 气氮系统设计	152
6.3	液氮、气氮系统联合调试	155
6.3.1	PES 氮系统设备	155
6.3.2	调试流程	155
6.3.3	调试结果	155
第 7 章	液氮外流程系统设计	157
7.1	液氮系统方案介绍	157
7.1.1	开式系统	158
7.1.2	闭式回收液化系统	159
7.2	主要技术要求	161
7.3	系统工作过程	161
7.4	系统参数计算	163
7.4.1	最佳预冷时间分析	163
7.4.2	预冷所需液氮量	164
7.5	关键设备设计	167
7.5.1	液氮阀箱设计	167
7.5.2	液氮管道设计	169
7.6	PES 液氮系统设计	170

7.6.1	主要技术要求	170
7.6.2	PES 液氮系统方案介绍	170
7.6.3	液氮热沉预冷过程中需要的液氮量	171
7.6.4	预冷结束后维持系统正常工作所需液氮量	171
7.6.5	系统调试	172
第 8 章	羽流实验测量方法	173
8.1	羽流流场参数测量	173
8.1.1	羽流压力测量	173
8.1.2	羽流温度	174
8.1.3	羽流速度	175
8.1.4	羽流组分测量	175
8.1.5	羽流显示技术	177
8.2	羽流气动力效应测量	180
8.2.1	直接测量方法	180
8.2.2	间接测量方法	181
8.3	羽流气动热效应测量	183
8.4	羽流污染效应测量	184
第 9 章	实验测量与控制系统设计	185
9.1	实验测量与控制系统设计要求	185
9.2	数据采集方案设计	185
9.2.1	基于 PC 标准总线的测控系统	186
9.2.2	基于 VXI 总线的测控系统	186
9.2.3	基于 LXI 总线的测控系统	188
9.2.4	基于 PXI 总线的测控系统	188
9.2.5	基于 PLC 的测控系统	189
9.3	PES 测控方案	190
9.3.1	硬件方案设计	190
9.4	信号传输方式设计	195
9.4.1	测量信号传输	195
9.4.2	控制信号传输	195
9.4.3	系统软件方案设计	195
第 10 章	实验工质供应与发动机系统设计	198
10.1	实验工质供应系统设计	198
10.1.1	模型发动机工质供应系统设计	198

10.1.2	标准姿轨控发动机工质供应系统设计	203
10.2	模型发动机设计	205
10.2.1	单工质模型发动机	205
10.2.2	双工质模型发动机	207
10.3	标准姿轨控发动机设计	209
10.4	关键部件设计	210
10.4.1	常用阀门	211
10.4.2	气体减压器	217
10.4.3	气蚀文氏管	221
第 11 章	实验台架与实验件系统设计	226
11.1	实验台架与实验件系统基本原则和要求	226
11.2	推力测量装置	226
11.3	舱内移动机构	228
11.3.1	舱外驱动移动机构	229
11.3.2	舱内驱动移动机构	230
11.4	支撑平台	231
11.5	其他辅助设备	231
11.5.1	温控系统	231
11.5.2	摄像系统	232
参考文献		233

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Basic Concepts of Vacuum Plume	1
1.1.1 Control Engine of Attitude and Position	1
1.1.2 Vacuum Plume	2
1.1.3 Effects of Vacuum Plume	3
1.2 Research Methods of Plume	4
1.2.1 Semi-empirical Method and Analytical Method	4
1.2.2 Numerical Simulation	4
1.2.3 Experimental Research	5
1.3 Typical Vacuum Plume Effects Experimental System(PES)	5
Chapter 2 Overall Scheme Design	9
2.1 Requirements of Overall Scheme Design	9
2.2 Main Components of PES	10
2.3 Methods of Overall Scheme Design	11
2.3.1 Requirements Analysis of Suction Capacity and Selection of Suction Mode	12
2.3.2 Calculation of Built – in Cryogenic Pump’s Cold Plate Area	13
2.3.3 Spatial Structure Design of Built – in Cryogenic Pump	18
2.4 Overall Scheme Design of PES	21
2.4.1 Requirements of PES Overall Scheme Design	21
2.4.2 Calculation of Cryogenic Pump’s Cold Plate Area and Structure Design	21
Chapter 3 Design of Vacuum Chamber System	27
3.1 Principles of Vacuum Chamber Design	28
3.2 Material Selection	28
3.3 Cylinder Design of Vacuum Chamber	29

3.3.1	Short Cylinder Design	29
3.3.2	Long Dylinder Design	31
3.3.3	Stiffener Design	31
3.4	End Socket and Gate Mechanism Design	34
3.4.1	End Socket Design	34
3.4.2	Gate Mechanism Design	35
3.5	Flange Design	44
3.5.1	Flange Structure	44
3.5.2	Orifice Reinforcement	44
3.6	Saddle Design	47
3.6.1	Principles of Saddle Selection	47
3.6.2	Saddle Position Selection	48
3.6.3	Saddle Weight Selection	48
3.6.4	Width of Saddle Floor	48
3.6.5	Width of Saddle Plate	49
3.6.6	Saddle Design Parameters	49
3.6.7	Saddle Strength Check	50
3.7	Observation Windows Mechanism	53
3.7.1	Magnetism Force Coupling Observation Window	53
3.7.2	Petal Shaped Baffle Observation Window	54
3.8	Strength Check of Vacuum Chamber	55
3.9	Pressure Rise Rate and Leak Rate of Vacuum Chamber	56
3.10	Vacuum Chamber Design of PES	57
3.10.1	The Shell Design of Vacuum Chamber	57
3.10.2	Stiffener Design	58
3.10.3	End Socket Design	60
3.10.4	Gate Mechanism Design	60
3.10.5	Orifice Reinforcement	61
3.10.6	Saddle Design	62
3.10.7	Strength Check of Vacuum Chamber	64
3.10.8	Pressure Rise Rate and Leak Rate Test of Vacuum Chamber	69

Chapter 4 Design of Vacuum Pumping System 70

4.1	Method of Vacuum Pumping System Design	72
-----	--	----

4. 1. 1	Main Parameters of Vacuum Pumping System Design	72
4. 1. 2	Calculation of Tube Conductance	73
4. 1. 3	Calculation of Pump-down Time	76
4. 2	Selection and Configuration of Vacuum Pump	79
4. 2. 1	The General Principles of Primary Pump Selection	79
4. 2. 2	Principles of Pipeline and Valve Arrangement	80
4. 2. 3	Comparisons and Selection of Primary Pump in Low Vacuum System	80
4. 2. 4	Comparisons and Selection of Primary Pump in High Vacuum System	81
4. 2. 5	Pollution Prevention Design	82
4. 3	Measurement Technology of Vacuum Degree	83
4. 3. 1	Full Pressure Measurement	84
4. 3. 2	Partial Pressure Measurement	87
4. 3. 3	Vacuometer Calibration	87
4. 4	Vacuum Leak Detection Technology	88
4. 4. 1	Basic Concepts	88
4. 4. 2	Leak Detection Methods	89
4. 4. 3	Principles of Leak Detection Methods Selection	92
4. 5	Vacuum Pumping System Design of PES	93
4. 5. 1	System Schemes Configuration	93
4. 5. 2	Working Mode and Calculation of Vacuum System	95
4. 5. 3	System Debugging	97
Chapter 5	Built – in Cryogenic Pump Design and Realization	104
5. 1	Basic Principles of Liquid Helium Cryogenic Pump Design	104
5. 2	Common Structure Forms of Cryogenic Pump	105
5. 2. 1	Common Forms of Space Environment Simulating Cryogenic Pump	105
5. 2. 2	Fundamental Structure of Cryogenic Pump in Vacuum Plume Experiment	105
5. 3	Material Selection of Cryogenic Pump	107
5. 3. 1	Property Comparisons of Common Materials of Cryogenic Pump	108
5. 3. 2	Selection of Materials and Welding Technology	109