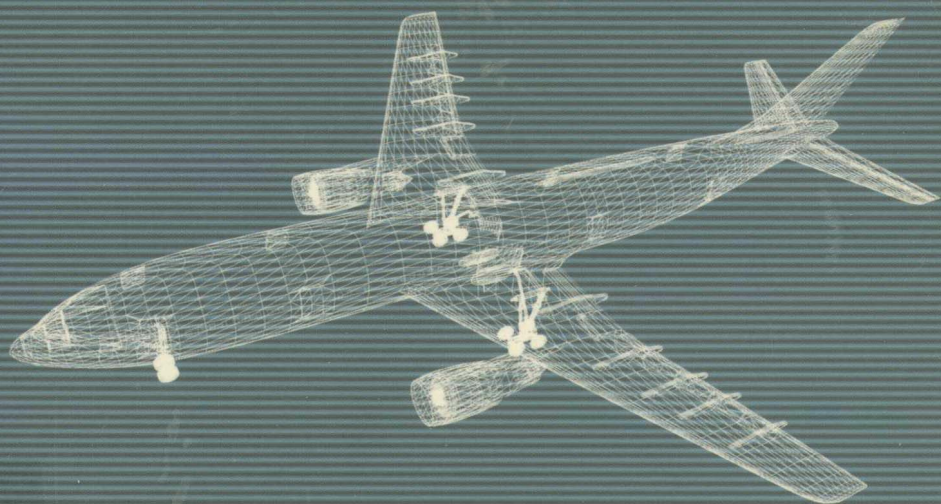


机械工程



飞机高压液压 能源系统

王占林 著



北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

西北工业大学出版社

哈尔滨工程大学出版社

V245.1

1003.

V245.1
1003-1



国防科工委“十五”规划专著

飞机高压液压能源系统

王占林 著



200541962

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 西北工业大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

200541962

内容简介

本书对飞机液压能源系统做了论述,主要包括液压能源系统的管路动态分析,高压管路振动流固耦合特性分析,高压管路脉动的抑制,恒压变量液压能源系统,变压泵源系统,机载智能泵源系统,余度液压能源系统等。为了更深入地了解液压能源系统,对飞机上用得较多的高压油泵(轴向柱塞泵)和齿轮泵也做了较详细的论述;配合液压能源系统的地面试验,对其驱动系统及控制策略与虚拟测试设备也做了阐述,这对地面液压系统及一般速度控制系统的分析设计具有参考价值。全书内容新颖,且结合工程实际。

本书可作为航空院校、研究所、企业有关专业的教学与科研用书,亦可作为广大从事液压技术的科技人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

飞机高压液压能源系统/王占林著. —北京:北京航空航天大学出版社,2004.11

ISBN 7-81077-563-4

I. 飞… II. 王… III. 飞机—能源—供应—液压系统 IV. ①V228.1 ②V245.1

飞机高压液压能源系统

王占林 著

责任编辑 赵延永

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市学院路37号(100083) 发行部电话:010-82317024

<http://www.buaapress.com.cn>

E-mail: bhpess@263.net

北京市松源印刷有限公司印装 各地书店经销

开本:850×1168 1/32 印张:14.25 字数:383千字

2004年11月第1版 2004年11月第1次印刷 印数:2000册

ISBN 7-81077-563-4 定价:23.50元

国防科工委“十五”规划专著编委会

(按姓氏笔画排序)

主 任：张华祝

副主任：陈一坚 屠森林

编 委：	王文生	王泽山	卢伯英	乔少杰
	刘建业	张华祝	张近乐	张金麟
	杨志宏	杨海成	肖锦清	苏秀华
	辛玖林	陈一坚	陈鹏飞	武博祎
	侯深渊	凌 球	聂 武	谈和平
	屠森林	崔玉祥	崔锐捷	焦清介
	葛小春			



总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就;研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了



一席之地。十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济作出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,生产和传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育,特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版200种国防



特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家、学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的100多位专家、学者,对经各单位精选的近550种教材和专著进行了严格的评审,评选出近200种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与技术、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入21世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展



阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



前 言

飞机液压能源系统是飞机的二次能源之一。它对于保证飞机的安全飞行,实现设计性能及飞行员的生存保障,都起着举足轻重的作用。液压传动与控制,具有反应快、功率密度比高与负载刚度大等特点,这使它在航空与航天应用中能够长期生存,并处于有利的竞争地位,而且可断定这种状况在未来几十年都不会有多大变化。为了满足高性能飞机对液压系统高压大功率的要求,有必要对其中的关键技术做进一步深入地研究与探讨。本书不对整个飞机液压系统及各种附件进行全面论述,而只从系统的角度对液压能源系统及其驱动系统进行讨论。有关液压附件的资料,可参阅参考文献[1~3]或其他有关书籍。

本书主要是在“八五”以来作者负责的课题组所完成的国防重点课题任务基础上总结出的成果及理论。这些课题曾获国家科技进步奖及多项部级科技进步奖。本书取材结合实际,是根据科研项目的技术总结与参加课题的博士生的论文等综合写成的,其中有陈斌的《机载智能泵源系统的研究》、潘陆原的《高压液压系统研究》、郭卫东的《斜盘式轴向柱塞泵计算机辅助设计研究》、马俊功



的《智能泵及其实验研究》、范开华的《飞机余度液压能源系统的研究》等。博士生刘亭在文字录入及编辑排版方面做了大量的工作,文稿曾请多位老师及学生校核,在此一并表示感谢。限于著者水平及时间有限,错误与缺点在所难免,望读者批评指正。

王占林

2004年10月于北京航空航天大学

目 录

第1章 绪 论

1.1 机载液压系统的主要发展趋势	2
1.1.1 高压化的意义	2
1.1.2 大功率	5
1.1.3 高压化、大功率带来的问题	8
1.2 机载智能泵源系统的提出及国内外发展概况	11
1.2.1 液压节能技术的发展概况	11
1.2.2 机载双级压力与智能泵源系统	16
1.3 管路动态特性研究方法	21
1.3.1 理论分析	21
1.3.2 实验方法	25
1.3.3 压力脉动抑制技术研究综述	27
1.4 泵源试验驱动系统	31
1.4.1 泵源驱动系统的形式	31
1.4.2 泵源试验驱动系统的控制策略	32

第2章 航空高压油泵

2.1 斜盘式轴向柱塞泵	35
2.1.1 斜盘式轴向柱塞泵的运动学分析	35
2.1.2 动力学分析	45
2.1.3 柱塞泵的性能分析及主要零部件的强度与刚度计算	78
2.2 高压齿轮泵	102
2.2.1 高压齿轮泵的结构	103
2.2.2 齿轮泵流量	105
2.2.3 齿轮泵的闭死现象、流量脉动、气穴和噪音	115
2.2.4 齿轮泵的功率、效率和扭矩	124



2.2.5	齿轮泵主要构件结构分析与计算	126
2.2.6	齿轮泵整体结构设计特点和设计计算	143
2.2.7	齿轮泵的工艺要求	150
第3章 飞机液压能源系统的管路动态与布局		
3.1	流体管路的频率相关模型	153
3.2	不同末端条件下的流体管路谐振	156
3.2.1	开端管路	156
3.2.2	闭端管路	159
3.2.3	开度变化的阀口	160
3.3	容腔元件对管路动态特性的影响	161
3.3.1	滤油器的影响	161
3.3.2	液压泵出口容积的影响	164
3.4	支管的作用	168
3.4.1	实际的支管	168
3.4.2	改进的支管	170
3.5	溢流阀与蓄能器的作用	171
3.6	某型飞机液压能源管路系统的动态特性	172
3.7	管路布局的一般原则	175
第4章 飞机液压管路振动的流固耦合特性分析		
4.1	液压能源系统的振动形式	178
4.2	流体管路的瞬态特性	179
4.2.1	特征线方法	179
4.2.2	瞬态特性求解	180
4.3	固体管道的振动	184
4.4	管道-支承结构系统的慢变参数特性研究	187
4.4.1	接触、摩擦与磨损	187
4.4.2	慢变参数系统强迫振动的平均法	191
4.4.3	微动磨损的接触结构振动分析	196
4.4.4	微动磨损的预防	206
4.5	支承结构状态变化对管道固有频率的影响	207
4.6	管路流固耦合振动的基本规律	211



第 5 章 飞机液压泵源的流量脉动抑制

5.1 柱塞泵流量脉动的特点	214
5.2 H 型液压滤波器的消振机理	215
5.3 随动消振液压滤波器的设计	218
5.3.1 随动消振液压滤波器的原型结构与工作原理	218
5.3.2 随动消振液压滤波器的静态设计	220
5.3.3 随动调节装置的动态特性	222
5.4 随动消振液压滤波器特性仿真	225
5.5 含消振液压泵的管路系统动态特性仿真	227

第 6 章 恒压力变量泵源系统

6.1 恒压力变量泵式液压能源	230
6.2 恒压力变量泵式液压能源的动态分析	233
6.2.1 不带蓄能器的恒压力变量泵式液压能源	233
6.2.2 带蓄能器的恒压力变量泵式液压能源	239
6.3 液压能源和伺服回路之间的相互影响	241
6.4 对液压能源的要求	244

第 7 章 变压泵源

7.1 变压泵系统原理方案	246
7.2 调压机构的特性分析	251
7.2.1 调压机构的传递函数及稳定性分析	251
7.2.2 短管的动特性方程	253
7.2.3 加校正的调节机构方框图及传递函数	254
7.2.4 泵的动特性研究	256
7.3 泵源的试验特性	257

第 8 章 智能泵源系统

8.1 机载液压系统对智能泵源的要求	259
8.2 智能泵与飞控系统的关系	262
8.3 智能泵结构形式选择	264
8.3.1 智能泵主要结构形式	264
8.3.2 智能泵结构方案	267
8.4 智能泵实现模式	270



8.4.1	排量调节模式	270
8.4.2	转速调节模式	271
8.4.3	转速-排量复合调节模式	272
8.5	智能泵系统的数学建模和理论分析	274
8.5.1	转速-排量复合调节模式的组成及工作原理	274
8.5.2	转速-排量复合调节模式的数学建模及理论分析	276
8.6	智能泵控制系统的仿真研究	285
8.6.1	智能泵变量机构子系统的仿真研究	286
8.6.2	转速-排量复合调节模式的仿真研究	288
8.7	智能泵控制策略及其实现	289
8.7.1	最优控制	289
8.7.2	多模式控制	292

第9章 飞机余度液压油源系统

9.1	国内外飞机液压余度能源的发展概况	296
9.2	液压余度能源系统技术	300
9.2.1	液压能源系统的余度配置	300
9.2.2	余度管理	305
9.2.3	可靠性分析	313
9.2.4	能源系统余度管理软件	318
9.3	余度液压能源系统瞬态响应	319

第10章 地面试验液压能源速度驱动系统

10.1	泵源驱动系统形式	323
10.2	电液驱动系统方案	325
10.2.1	泵控液压马达速度伺服系统	326
10.2.2	阀控液压马达速度伺服系统	328
10.2.3	阀泵联合控制液压马达速度伺服系统	331
10.2.4	方案比较	334
10.3	电液速度伺服系统静态特性分析	335
10.3.1	串联阀控马达速度伺服系统	335
10.3.2	并联阀控马达速度伺服系统	340
10.4	电液速度伺服系统动态特性分析	344
10.4.1	串联阀控马达速度伺服系统	344



10.4.2 并联阀控马达速度伺服系统	350
10.5 串、并联阀控马达电液速度系统静动态特性比较	355
10.6 驱动系统控制方法研究	357
10.6.1 计算机控制电液速度伺服系统组成	358
10.6.2 电液速度伺服系统的 PID 控制	359
10.6.3 电液速度伺服系统的增益调度控制	362
10.6.4 电液速度伺服系统的自适应交互控制	375
10.7 变频调速驱动系统	391
10.7.1 变频调速交流驱动系统	391
10.7.2 系统组成	395
10.7.3 控制策略	399
10.8 液压调速与变频调速的比较	401
10.8.1 两种调速方式的技术性能比较	401
10.8.2 应用领域	403
第 11 章 地面试验液压能源虚拟仪器测试系统	
11.1 虚拟仪器简介	404
11.1.1 虚拟仪器的概念	404
11.1.2 虚拟仪器的构成及分类	405
11.2 基于虚拟仪器的智能泵测试系统组成	409
11.2.1 液压回路	409
11.2.2 测试系统硬件	411
11.2.3 测试系统软件	413
11.3 虚拟仪器控制面板的设计与实现	416
11.4 在 LabVIEW 中构造复杂多任务应用程序	418
11.4.1 测试系统中常见的线程及其关系	418
11.4.2 复杂多任务的实现	419
11.5 LabVIEW 中高精度软定时器的实现	421
11.5.1 VC 中定时器的实现方法	422
11.5.2 在 LabVIEW 中使用高精度定时器	423
11.6 虚拟仪器中采样数据的预处理	423
11.6.1 软件调零	424
11.6.2 刻度标定	424



参考文献

第1章 绪论

第二次世界大战以来,液压技术在飞机上得到了广泛的应用。最初,液压系统的作用是给当时的高速飞机的平尾助力器提供液压动力。20世纪60年代以后,随着液压技术与电气电子技术和自动控制理论等相关学科的有机结合,液压技术逐渐成为机械电子工程领域的主要方向,飞机液压系统也得到了突飞猛进的发展,担负着飞机的特定操纵与驱动任务。

为保证液压系统可靠工作,现代飞机上大多装有两套(或多套)相互独立的液压系统,分别称为公用液压系统(或主液压系统)和助力液压系统。公用液压系统用于起落架、襟翼和减速板的收放、前轮转弯操纵、机轮刹车、驱动风挡板雨刷和燃油泵的液压马达;同时还用于驱动部分副翼、升降舵(或全动平尾)和方向舵的助力器。助力液压系统仅用于驱动飞机操纵系统的助力器和阻尼舵机。助力液压系统本身也可包含两套独立的液压系统。为了进一步提高液压系统的可靠性,系统中还并联有应急电动泵和风动泵,当飞机发动机发生故障时,可由应急电动泵或应急风动泵使液压系统连续工作。

液压系统由液压能源装置、控制装置、执行装置,以及包括液压油箱、液压管路、蓄压器和油滤在内的其他装置组成。其中,液压能源装置主要包括作为主液压泵的发动机驱动泵,作为应急泵的电动泵和风动泵,以及作为备份泵提供辅助功率用的辅助动力装置驱动泵;控制装置主要包括各种阀、油路断路器、液压保险器、流量调节器、自动压力调节器和系统低压告警器等;执行作动装置主要包括液压马达、液压作动器、组合式马达伺服装置以及助力器和舵机等。因此,机载液压系统对于飞机安全正常飞行、实现设计