



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十二五”国家重点图书出版规划项目

先进制造技术与应用前沿

JIDUAN HUANJINGXIA DE
DIANYE SIFU KONGZHI LILUN
JI YINGYONG JISHU

极端环境下的 电液伺服控制理论 及应用技术

阎耀保 著

上海科学技术出版社



国家出版基金项目

NATIONAL PUBLISHING FUND PROJECT

“十二五”国家重点图书出版规划项目
先进制造技术与应用前沿

极端环境下的 电液伺服控制理论 及应用技术

阎耀保 著

上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

极端环境下的电液伺服控制理论及应用技术/阎
耀保著. —上海:上海科学技术出版社,2012.1

(先进制造技术与应用前沿)

ISBN 978-7-5478-1080-4

I. ①极... II. ①阎... III. ①电液伺服系统
IV. ①TH137.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 257362 号

上海世纪出版股份有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社

(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235)

新华书店上海发行所经销

苏州望电印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 29 插页:4

字数:500 千字

2012 年 1 月第 1 版 2012 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5478-1080-4/TP · 19

定价:98.00 元

本书如有缺页、错装或损坏等严重质量问题,
请向工厂联系调换



Synopsis

内容提要

本书论述极端环境下的电液伺服控制基础理论和应用技术。内容主要包括:电液伺服机构演变过程,工作介质,射流管伺服阀,飞行器液压能源、舵机及其密封技术,非对称液压阀与非对称液压缸匹配控制,对称不均等正开口液压滑阀,导弹与火箭集成式溢流阀与减压阀,极端温度、振动、冲击、离心加速度环境下电液伺服阀分析方法、数学模型、优化设计方法以及耐极端环境的诸措施,舰船液压技术。书后附有国内部分电液伺服阀系列产品结构。本书力求内容翔实,图文并茂,深入浅出,侧重系统性、前沿性,基础理论和工程实践紧密结合,重大应用实例资料丰富、翔实。

本书可供从事重大装备、武器系统电液伺服机构和元件的研究、设计、制造、试验、管理的科技人员阅读,也可供航空、航天、舰船、机械、能源、海洋、交通等专业的师生参考。

编撰委员会

先进制造技术与应用前沿

主 任 路甬祥

副 主 任 李蓓智 曹自强

委 员 (按姓氏笔画排序)

王庆林 石来德 包起帆 严仰光

杜宝江 李 明 李 春 李希明

何 宁 何亚飞 陈 明 简耀保

葛江华 董丽华 舒志兵

学术专家 艾 兴 汪 耕 周勤之

未来的重大装备和武器系统的竞争将主要集中在极端环境下的相关基础理论和关键技术的竞争。重大装备和飞行器件必须在极端环境下可靠地完成其工作功能,这就需要充分认识和掌握极端环境下电液伺服控制的基础理论和关键技术。第二次世界大战前后,欧洲人发明了单级喷嘴挡板阀、单级射流管阀,美国人研制了第一台喷嘴挡板式两级电液伺服阀,之后电液伺服机构广泛应用于导弹与火箭的姿态控制、飞机助力器、舰船操纵系统以及各工业领域的自动化控制系统。航空航天装备、舰船、冶金设备、机床、车辆等的电液伺服系统往往需要承受温度、振动、冲击、离心加速度的复杂极端环境考核。据不完全统计,电液伺服机构中70%~80%的故障是由于电液伺服控制器件在各种极端环境,如振动、冲击、离心、高加速度、极端油温时无法保持必要的工作性能而引起的。为此各国都在做细致的研究工作,但由于电液伺服控制技术可应用于军工领域,各国都实行严格的控制和封锁,公开资料和成果不多。要走在世界前列,掌握先进技术,解决在极端环境下困扰现在和未来的电液伺服元件的许多分析方法和实践问题,急需进行理论和技术的及时归纳和总结。

针对我国重大装备和武器研制过程中极端环境下的电液伺服控制基础理论和应用技术极其缺乏的现状,结合作者多年来从事国家科研项目研究成果,本书较系统地归纳和总结了电液伺服控制的共性基础理论和应用技术,特别是在振动、冲击、离心和大温度范围等极端环境下的基础理论和重大工程应用的关键技术,期望为未来更加苛刻环境条件下电液伺服器件的服役性能和机理作出定性和定量预测。全书共分为14章。第一章概论,着重描述电液伺服控制技术和电液伺服机构的演变过程。第二章工作介质与电液伺服阀,介绍工作介质的种类和特点、电液伺服阀原理及模型。第三章射流管电液伺服阀,包括射流管伺服阀原理、国外专利及其在飞行器中的

应用。第四、五章阐述飞机、导弹与火箭液压能源、舵机系统、温度控制、密封的设计方法,大飞机和导弹火箭应用实例,关键技术以及未来发展趋势。第六、七章非对称液压阀与非对称液压缸匹配控制理论,包括对称不均等开口量液压滑阀压力特性。第八、九章阐述导弹与火箭用集成式精密压力控制溢流阀和减压阀,涉及工作机理、静动态特性、振动环境下的数学模型与制振措施,导弹应用实例与工艺技术进展。第十至十三章介绍电液伺服阀在极端温度、振动、冲击和离心环境下的分析方法、数学模型、优化设计技术以及耐极端环境的诸措施和工艺方法等研究成果。第十四章舰船液压技术是实践工作的总结。为便于读者了解电液伺服阀结构、性能,附录部分列出了我国电液伺服阀部分系列产品。本书旨在为我国重大装备和武器系统的研究、设计、制造、试验和管理的技术人员提供有益的前沿性基础理论和实践材料,也希望为提高我国基础理论和关键技术的原始创新和集成创新能力,探索电液伺服控制领域目前未知的基础理论、技术途径或解决方案,突破装备理论和关键技术起到一定的促进作用。

本书由同济大学阎耀保教授根据多年实践经验和研究成果系统归纳、总结而成,包括在上海航天控制技术研究所工作期间同仁甘克力、胡东健、高增宏、傅俊勇等的共同研究成果。全书由阎耀保教授撰写完成,其中第一、五至十三章由阎耀保撰写;第二章由郭生荣(南京机电液压工程研究中心)、阎耀保撰写;第三章由阎耀保、黄增(中船重工第七〇四研究所)撰写;第四章由李晶(同济大学)、阎耀保撰写;第十四章由黄亚农(中船重工第七一九研究所)、阎耀保撰写。附录一至四分别由南京机电液压工程研究中心方向、中国运载火箭技术研究院第十八研究所王书铭、中船重工第七〇四研究所方群、中航工业西安飞机自动控制研究所杜海提供素材编写而成。在出版过程中得到了上海科学技术出版社的大力支持和帮助。同济大学阎耀保教授研究室博士研究生张曦,硕士生李长明、孟伟,硕士研究生张晓琪协助进行资料整理工作。本书部分资料作为同济大学博士研究生教材、硕士研究生教材已在教学中连续多年使用。

限于作者水平,书中难免有不妥和错误之处,恳请读者批评、指正。

作者



目 录

第一章 概论 **1**

第一节 电液控制技术	1
第二节 飞行器电液伺服控制技术	3
一、导弹的起源	3
二、火箭的原理与历史	7
三、航天飞机	11
第三节 电液伺服阀历史及演变过程	13
一、电液伺服阀的历史	13
二、电液伺服阀结构演变过程	16
第四节 极端环境下的电液伺服控制系统研究的意义	23
参考文献	26

第二章 工作介质与电液伺服阀 **29**

第一节 电液伺服系统的工作介质	29
一、喷气燃料(燃油)	29
二、液压油	30
三、磷酸酯液压油	32
第二节 电液伺服阀工作原理与数学模型	33
一、电液伺服阀工作原理	33
二、力反馈电液伺服阀的基本方程	34
三、力反馈电液伺服阀的传递函数	45
参考文献	47

第三章 射流管电液伺服阀 48

第一节 概述	48
第二节 射流管伺服阀基本原理与结构	51
一、分类及工作原理	51
二、结构与特点	64
第三节 电液伺服阀术语和定义	65
第四节 射流管伺服阀国外专利简介	73
第五节 射流管伺服阀在航空飞行器上的应用	81
第六节 小结	88
参考文献	89

第四章 飞机液压能源系统 92

第一节 飞机液压能源系统概要	92
第二节 空中客车 A320 飞机液压系统	93
一、飞机液压系统功能	94
二、主液压系统	94
三、辅助液压系统	96
四、液压系统性能和特点	97
第三节 飞机液压系统热分析与油液温度控制技术	100
一、飞机液压系统热分析基础理论	100
二、飞机液压系统静态热分析建模与静态温度计算方法	101
三、飞机液压系统动态热分析建模与动态温度计算方法	104
第四节 小结	112
参考文献	113

第五章 飞行器电液伺服控制技术 114

第一节 电液控制技术	114
一、电液控制技术概要	114
二、机载电液控制技术	115

三、发展动向	116
四、新材料	119
五、电流变流体技术	119
第二节 弹性 O 形圈密封技术	120
一、O 形圈的构型和密封原理	120
二、O 形圈密封的特点	122
三、O 形圈材料	122
四、O 形圈的选择和设计	123
五、O 形圈的保护和故障防止	126
六、小结	127
第三节 飞行器电液伺服技术	128
一、大功率	128
二、高压、高温	130
三、高速	133
四、高可靠性	133
五、数字化、信息化	135
第四节 防空导弹控制执行系统	136
一、设计综合要求	137
二、必要性、可行性论证过程	139
三、设计准则	143
四、性能试验	149
五、小结	152
第五节 防空导弹辅助能源	153
一、能源方案分类	153
二、应用实例	157
三、小结	165
第六节 飞行器燃气涡轮泵液压能源应用技术	166
一、燃气初级能源的应用	166
二、燃气涡轮泵的应用	168
三、燃气涡轮泵液压系统工作区域	170
第七节 液压舵机系统功率匹配设计	172
一、液压舵机系统负载模型	172

二、伺服机构输出特性与负载轨迹最佳匹配	175
三、实际舵机系统能源需求状况	176
四、工作压力变化因素与系统频率特性	177
五、小结	177
参考文献	178

第六章 非对称液压阀与非对称液压缸的流量匹配控制 **180**

第一节 零开口阀控非对称缸的液压伺服机构数学模型与压力特性	181
一、液压缸换向前后的压力突变	183
二、负载边界	185
三、小结	186
第二节 液压控制系统速度增益特性	186
一、零开口阀控液压缸动力机构速度增益特性	187
二、正开口阀控液压缸动力机构速度增益特性	190
三、负载力边界	193
四、小结	194
第三节 液压缸和气缸的固有频率	195
一、液压缸和气缸的分类	195
二、活塞初始位置对气缸固有频率的影响	196
三、活塞初始位置对液压缸固有频率的影响	201
四、气动气缸系统和液压缸系统比较	203
五、小结	204
参考文献	205

第七章 对称不均等正开口液压滑阀压力特性 **207**

第一节 对称不均等液压滑阀压力特性	207
第二节 零位压力值及零位泄漏量	211
一、零位压力值	211
二、零位泄漏量	212

第三节 应用事例	213
参考文献	214

第八章 飞行器液压控制系统单级溢流阀 **215**

第一节 概述	215
第二节 带平衡活塞固定节流器单级溢流阀的特点与 工作原理	217
一、结构特点	217
二、工作原理	217
三、性能特点	218
第三节 工作点与基本特性	219
一、工作点	219
二、基本方程	220
三、状态方程	221
四、基本特性及其分析	222
第四节 结构参数对动态特性的影响	225
一、压力控制机理	225
二、数学模型	226
三、稳态特性	229
四、数值计算	229
第五节 振动环境下的阀特性	234
一、振动环境下阀芯开启前阀的数学模型	234
二、振动环境下阀芯开启后阀的数学模型	236
三、仿真模型与动态特性	237
四、制振措施	240
第六节 溢流阀工作点对导弹电液能源系统频率的影响	241
一、概述	241
二、理论分析	242
三、数值计算及其程序	244
四、工艺措施	246
五、结论	247

参考文献	248
------------	-----

第九章 飞行器液压减压阀 **250**

第一节 概述	250
第二节 结构特点和工作机理	251
第三节 数学模型	253
一、阀芯移动前的动态特性	253
二、工作压力下的动态方程	255
三、工作压力下的稳态特性	256
第四节 理论特性及其影响因素	257
一、出口压力特性和固定节流器的影响	257
二、固定节流口的影响	258
三、压力感受腔的影响	259
四、出口压力恒定	259
参考文献	261

第十章 极端温度环境下的液压元件 **262**

第一节 概述	262
第二节 极端温度环境下的飞行器液压蓄能器与气瓶	263
一、极端温度下的应用	263
二、真实气体的范德瓦耳斯方程	265
三、高压气瓶充气质量	266
四、高压气瓶和气腔的气体压力特性	267
五、蓄能器特性	269
六、结论	270
第三节 极端温度环境下的电液伺服阀	270
一、温度对电液伺服阀配合间隙的影响	271
二、温度对液压油黏度的影响	274
三、温度对阀腔流场的影响	274
四、温度对磁性材料的影响	278

五、试验及其结果分析	279
六、结论	280
参考文献	281

第十一章 振动冲击环境下的电液伺服阀 **282**

第一节 振动冲击环境下的电液伺服阀数学模型	282
第二节 单位阶跃加速度环境下的电液伺服阀	284
一、负载压力的影响	284
二、衔铁挡板组件质量的影响	286
三、主阀芯质量的影响	286
四、弹簧管刚度的影响	286
五、衔铁挡板组件质心与弹簧管旋转中心距离的影响	288
六、喷嘴挡板放大器控制腔容积的影响	288
第三节 单位脉冲加速度环境下的电液伺服阀	288
一、负载压力的影响	288
二、衔铁挡板组件质量的影响	290
三、主阀芯质量的影响	291
四、弹簧管刚度的影响	292
五、衔铁挡板组件质心与弹簧管旋转中心距离的影响	293
六、喷嘴挡板放大器控制腔容积的影响	295
第四节 振动条件下的电液伺服阀	295
一、各参数对滑阀位移频率响应的影响	295
二、各参数对挡板位移频率响应的影响	298
三、各参数对衔铁位移频率响应的影响	300
第五节 小结	303
一、电液伺服阀抗冲击的措施	303
二、振动环境下电液伺服阀的影响因素与制振措施	304
参考文献	304

第十二章 离心环境下的电液伺服阀 **306**

第一节 牵连运动为圆周运动时的加速度合成定理	306
------------------------------	-----

第二节	离心环境为匀速圆周运动时的电液伺服阀	307
一、	主滑阀阀芯方向与离心运动角速度矢 ω 同面垂直	307
二、	主滑阀阀芯方向与离心运动角速度矢 ω 异面垂直	311
第三节	离心环境为匀加速圆周运动时的电液伺服阀	312
一、	主滑阀阀芯方向与离心运动角速度矢 ω 同面垂直	312
二、	主滑阀阀芯方向与离心运动角速度矢 ω 异面垂直	316
第四节	离心环境下电液伺服阀的零偏值	319
一、	电液伺服阀喷嘴挡板前置级静态压力特性	320
二、	离心环境下电液伺服阀的纠偏电流	323
三、	一维离心环境下电液伺服阀的零偏值	324
四、	应用实例与试验分析	326
五、	结论	329
第五节	离心环境下电液伺服阀的性能	329
第六节	振动、冲击、离心环境下电液伺服阀布局措施	330
	参考文献	331

第十三章 电液伺服阀优化设计

332

第一节	基于幅值裕度的电液伺服阀优化设计	332
一、	概述	333
二、	理论分析	334
三、	优化设计	338
四、	结论	340
第二节	电液伺服阀力矩马达综合刚度优化设计	340
一、	概述	340
二、	理论分析	341
三、	力矩马达设计	346
第三节	带补偿节流器的电液伺服阀	346
一、	结构原理	347
二、	理论分析	348
三、	特性分析	352
第四节	非对称喷嘴挡板式单级电液伺服阀	354

一、喷嘴挡板式电液伺服阀结构	354
二、理论分析	355
三、应用分析	361
第五节 力反馈两级电液伺服阀喷嘴挡板阀的非对称性	362
一、喷嘴挡板初始间隙对称与不对称特性	362
二、喷嘴直径对称与不对称特性	366
三、小结	369
参考文献	370

第十四章 舰船液压技术

372

第一节 舰船调距桨液压系统	372
一、开式系统	374
二、闭式系统	376
第二节 舰船蓄能器-泵液压能源体制	378
一、舰船蓄能器-泵交替工作液压能源体制	378
二、蓄能器-泵液压系统压力缓冲原理	378
第三节 动压阻尼器技术	380
一、动压阻尼器的结构及工作原理	380
二、结构参数的影响	381
第四节 舰船液压系统螺纹接头技术	382
第五节 液压系统消波器	383
第六节 潜艇海水液压系统	385
一、海水介质的优越性	385
二、海水液压系统关键基础技术	386
三、海水液压系统现状	386
参考文献	387
附录一 南京机电液压工程研究中心特殊电液伺服阀	389
一、燃油介质电液伺服阀	389
二、磷酸酯介质电液伺服阀	393
三、高抗污能力电液伺服阀	395

四、防爆电液伺服阀	397
五、水下用电液伺服阀	398
六、高响应电液伺服阀	399
七、压力-流量电液伺服阀	402
八、压力电液伺服阀	403
九、特殊单级伺服阀	406
十、余度电液伺服阀	414
十一、廉价电液伺服阀	417
十二、耐高压电液伺服阀	417
十三、其他特殊电液伺服阀	419
附录二 中国运载火箭技术研究院第十八研究所电液伺服阀	422
一、产品类型	422
二、典型产品与外形尺寸	422
附录三 中船重工第七〇四研究所射流管伺服阀	430
一、CSDY 型射流管电液伺服阀	430
二、DSDY 三线圈电余度射流管电液伺服阀	438
三、CSDK 型射流管电液伺服阀	438
附录四 中航工业西安飞机自动控制研究所电液伺服阀	441
一、喷嘴挡板式双级电液伺服阀	441
二、喷嘴挡板式自检测双级电液伺服阀	442
三、喷嘴挡板式高压双单级电液伺服阀	442