

近代电气液压 伺服控制



王占林 著

 北京航空航天大学出版社

近代电气液压伺服控制

王占林 著

北京航空航天大学出版社

内容简介

采用近代控制的方法,对电液伺服系统进行控制。包括电液伺服控制的发展、特点、控制策略;电液伺服控制系统的优化设计、自适应控制、负载变化的补偿;电液系统的复合控制与功率电传系统、差动液压缸伺服控制;电液伺服系统的冗余控制、非连续液压系统控制(包括Bang-Bang控制、变结构控制、模糊控制、PWM、PCM以及包括神经网络在内的各种近代控制策略的复合控制)、转速调节系统的神经网络控制及机载多机电系统的综合总线管理等。内容新颖,重视工程实际。

可供从事机电控制、液压技术、机械工程以及机电一体化等专业的工程技术人员参考,也可作为相关专业的研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

近代电气液压伺服控制/王占林著. —北京:北京航空航天大学出版社,2005.2

ISBN 7-81077-645-2

I. 近… II. 王… III. 电液伺服系统
IV. TH137.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 003016 号

近代电气液压伺服控制

王占林 著

责任编辑 史 东

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083) 发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

<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:787×960 1/16 印张:22.5 字数:504 千字

2005 年 2 月第 1 版 2005 年 2 月第 1 次印刷 印数:3000 册

ISBN 7-81077-645-2 定价:34.00 元

前 言

笔者曾著述《近代液压控制》一书,被北京航空航天大学等高校选为相关专业的研究生教材,但该书现已绝版。为了满足教学需要,作者在《近代液压控制》一书的基础上对各章节内容作了不同程度的修改与补充,并考虑到与学科方向的一致性,将书名命名为《近代电气液压伺服控制》。本书取材于作者的教学与科研实践及作者学生的博士论文,如第5章参考引用了2004年李军的博士论文,第9、10章分别参考引用了2003年陈娟及沈东凯的博士论文,另外,还参考了一些国内外最新的相关成果。

本书应用近代控制与液压控制的基础理论,分析研究了机载机电液压系统中的近代伺服控制。就伺服控制而言,目前航空航天领域所用机电伺服控制无外乎电气、液压及气压三种,其中以液压控制或称电液伺服控制居多,因此本书建模多以电液控制为主。众所周知,不管是电气、液压还是气压控制系统,一旦模型建立,其分析研究方法及理论的区别就不大了。

本书分析过程力求简化,不偏重数学公式推导,强调物理概念,并结合工程实际;所选分析方法多是从事这方面工作的工程技术人员喜欢使用的方法。

全书共分10章:

第1章介绍液压伺服控制的发展概况、所处地位、近代液压伺服控制的特点及近代控制策略在机电液压系统中的应用等;

第2章论述各种近代伺服控制的优化理论与方法;

第3章论述液压伺服系统的各种自适应控制;

第4章论述液压伺服系统负载干扰变化的补偿及多变数液压伺服系统交联干扰的补偿;

第5章论述泵控、阀控及电机控制的不同组合控制的分析方法及研究结论,特别是对功率电传系统作了较深入的分析与介绍;

第6章论述差动缸(非对称缸)系统,提供了理论分析与非对称特性的补偿方法;

第7章论述余度伺服系统的建模、分析与余度管理;

第8章论述 Bang-Bang 控制、变结构控制、模糊控制、PWM 及脉冲编码控制(PCM)等非连续系统控制的基本问题,并提供了它们之间各种组合的控制方案;

第9章结合转速系统控制,论述基于径向基函数(RBF)神经网络的控制方案和基于对角回归(DRNN)神经网络的控制方案以及与 PID 校正的结合方案;

第10章论述采用数据总线和多处理机对多机电系统实行综合管理的方案,建立了机载机电系统公共设备仿真平台,实现了飞机环控系统、液压源系统、电源系统、刹车系统、燃油管理系统及前轮转弯系统等综合管理的仿真,特别是对系统的通信、任务的分配与调度和数据库技术等作了论述。

本书请袁丽华教授及多位博士生、硕士生审校,白国长和刘亭博士在文字录入及编辑排版方面做了大量工作,在此一并表示感谢。限于作者水平及时间有限,错误与缺点在所难免,望读者批评指正。

作 者

2004年9月3日

目 录

第 1 章 绪 论

1.1 电气液压伺服控制的应用与发展	1
1.2 电气液压伺服控制仍保持其有利的竞争地位	3
1.3 电气液压近代伺服控制的特点	5
1.4 近代控制策略在近代电气液压伺服控制的应用概况 ^[1]	5
1.4.1 PID 控制	5
1.4.2 自适应控制(AC)	6
1.4.3 鲁棒控制	6
1.4.4 非连续系统控制	7
1.4.5 智能控制(AIC)	9
1.5 多机电系统的综合总线管理	11
参考文献	11

第 2 章 电气液压伺服控制系统的优化设计

2.1 最优二次型控制的基本理论	13
2.1.1 最优控制的基本内容与定义	13
2.1.2 最优二次型的基本理论	14
2.2 二次型优化理论在液压伺服系统设计上的应用	16
2.2.1 液压伺服系统的建模	16
2.2.2 采用二次型理论进行液压伺服系统的优化设计	20
2.2.3 采用系数代换法进行系统的优化	26
2.3 轴向柱塞泵的最优控制	37
2.3.1 系统的建模	37
2.3.2 利用最优理论的优化设计	38
2.3.3 实验验证	39
2.4 其他优化方法	40
2.4.1 利用拉氏变换相似定理求优化参数	40
2.4.2 等效开环变阶闭环控制	43
2.5 状态反馈精确线性化的最优控制	47
2.5.1 基本描述方程	47
2.5.2 状态反馈精确线性化的优化设计原理	48
2.5.3 应用举例	50
2.6 状态反馈的实现	51



2.7 基于线性二次型最优控制的 PID 参数优化方法	52
2.7.1 线性二次最优控制(LQR)系统与 PID 控制系统结构	52
2.7.2 线性二次最优 PID 参数	53
2.8 输入前馈补偿	55
参考文献	55

第3章 电液伺服系统的自适应控制

3.1 自适应控制的基本概念	56
3.1.1 自适应控制的定义	56
3.1.2 自适应控制的分类	56
3.2 以局部参数最优为基础的设计	57
3.3 以 Lyapunov 函数为基础的设计	58
3.3.1 改变系统参数的自适应方法	59
3.3.2 采用信号综合的自适应方法	65
3.3.3 简化模型法	70
3.4 以 POPV 超稳理论为基础的设计	76
3.4.1 POPV 超稳理论	76
3.4.2 POPV 超稳理论在机电液压伺服系统中的应用	76
3.5 MRAC 中模型的选取	82
3.6 自适应 Smith 控制系统	83
3.6.1 采用预估器补偿系统延迟	83
3.6.2 自适应 Smith 预估补偿	84
3.7 离散化的非最小相位系统	85
3.7.1 离散化造成非最小相位问题的原因	86
3.7.2 非最小相位系统的基本自适应控制方法	87
参考文献	88

第4章 负载变化的补偿

4.1 电气液压伺服系统负载的非线性补偿	89
4.1.1 动力机构负载的静态补偿	89
4.1.2 一般系统的非线性抵消补偿	92
4.2 采用状态再现实现干扰的补偿	93
4.2.1 复合控制的基本原理	93
4.2.2 状态观测器的基本原理	94
4.2.3 利用观测器预估干扰的复合控制	96
4.3 状态反馈抗干扰设计	101
4.4 动态鲁棒补偿法	103
4.4.1 鲁棒补偿器的原理	103
4.4.2 伺服系统的动态鲁棒补偿举例分析	106



4.4.3 液压 H^∞ 控制	107
4.5 多变量液压伺服系统干扰的补偿	110
4.5.1 耦合与解耦原理	110
4.5.2 双通道液压机器人伺服系统交联干扰的补偿	116
4.5.3 结构抵消法解耦与负载干扰补偿	122
参考文献	126
第 5 章 电气液压伺服系统的复合控制	
5.1 阀泵串联控制系统	127
5.1.1 阀泵串联控制系统的结构和工作原理	127
5.1.2 系统的数学模型	128
5.1.3 系统的性能分析	131
5.2 阀泵并联控制系统	133
5.2.1 泵控-阀控并联控制系统的原理	133
5.2.2 阀泵并联式容积作动系统的动态分析	134
5.2.3 旁路阀-泵复合控制系统	138
5.3 电液复合控制系统	139
5.3.1 电液复合调节作动系统的构成	139
5.3.2 电液复合控制子系统的建模	140
5.3.3 电液复合系统的建模与仿真	143
5.3.4 电液复合控制的效率分析	144
5.4 功率电传作动系统	147
5.4.1 功率电传作动系统的发展	148
5.4.2 功率电传作动器的关键技术	151
5.5 功率电传作动器的方案设计 ^[5]	154
5.5.1 飞控作动器的基本形式	154
5.5.2 EMA 与 EHA 的系统构成与方案比较	155
5.5.3 各种 EHA 方案的比较	158
参考文献	169
第 6 章 差动液压缸伺服控制	
6.1 差动液压缸的静特性分析	170
6.1.1 速度特性分析	170
6.1.2 液压缸的非对称对负荷曲线的影响	173
6.1.3 压力-流量特性	174
6.1.4 刚度分析	174
6.2 速度特性的补偿	176
6.2.1 速度反馈补偿	176
6.2.2 压力反馈参数补偿	177



6.3 差动缸伺服系统的动态特性分析与补偿	180
第7章 电气液压系统的余度控制	
7.1 余度液压伺服系统的种类与结构原理	185
7.1.1 余度液压伺服系统的种类	185
7.1.2 几种典型的液压余度舵机的结构原理	188
7.2 余度等级、余度配置和余度管理	192
7.2.1 余度等级的确定	192
7.2.2 余度的配置	193
7.2.3 余度的管理	194
7.2.4 故障监测器阈值的选取	195
7.3 余度伺服机构的建模分析 ^[1]	196
7.3.1 力综合式余度伺服系统的建模	196
7.3.2 磁通综合余度伺服系统的建模	199
7.3.3 机械反馈式余度伺服系统的建模	201
7.4 力纷争问题的分析与解决措施	203
7.4.1 中值均衡	206
7.4.2 均值均衡	207
7.5 余度伺服机构耦合问题的研究和最优均衡解耦控制	208
7.6 余度伺服机构故障检测阈值和均衡权限的选取	212
参考文献	214
第8章 非连续电气液压系统控制	
8.1 Bang-Bang 控制	215
8.1.1 Bang-Bang 控制的原理	215
8.1.2 Bang-Bang 控制的分析方法	216
8.1.3 液压系统的 Bang-Bang 控制	219
8.1.4 快速模型预测 Bang-Bang 控制	224
8.2 液压变结构控制系统(VSCS)	234
8.2.1 伺服系统结构控制原理	234
8.2.2 变结构控制的改进	237
8.2.3 全局鲁棒最优变结构控制	239
8.2.4 变结构控制与 Bang-Bang 控制的结合	245
8.3 模糊控制	248
8.3.1 模糊控制的一般设计方法	249
8.3.2 模糊控制与其他控制策略的结合	254
8.3.3 模糊控制存在的问题	264
8.4 脉冲宽度调节(PWM)	264
8.4.1 PWM 的工作原理	264



8.4.2 液压 PWM 系统的优缺点	266
8.4.3 PWM 的理论分析	267
8.4.4 与离散输入信号幅值成比例的 PWM	271
8.5 脉冲编码控制(PCM)	272
参考文献	273

第 9 章 转速系统的神经网络控制

9.1 转速系统组成	275
9.2 转速模拟系统的建模	276
9.3 基于 RBF 神经网络的转速模拟系统的控制	278
9.3.1 基于神经网络的智能控制	278
9.3.2 基于 RBF 神经网络的转速控制	279
9.3.3 基于 RBF 神经网络的转速模拟系统的控制方案	280
9.3.4 基于 RBF 神经网络的转速模拟系统的实现	287
9.4 基于神经网络逆模型的训练	291
9.4.1 神经网络的逆控制	291
9.4.2 基于反馈误差学习算法	293
9.5 基于回归神经网络的非线性速度控制	294
9.5.1 基于 DRNN 的转速模拟系统的非线性控制方案	295
9.5.2 基于对角回归神经网络的非线性控制方案的实现	297
9.6 神经网络控制性能的改善	299
9.6.1 收敛速度	299
9.6.2 参数的优化分析	300
参考文献	300

第 10 章 机载多机电系统的综合总线管理

10.1 机载机电系统的发展趋势	302
10.2 机载多机电系统的综合总线管理方案	303
10.3 机载多机电系统分布式综合仿真通信系统	305
10.3.1 机载公共设备综合管理系统的分析	305
10.3.2 MIL-STD-1553B 通信控制方案	306
10.3.3 公共设备管理数据总线仿真技术	307
10.3.4 公共设备综合仿真系统的通信系统	309
10.3.5 公共设备综合仿真系统的结构	310
10.3.6 公共设备综合仿真系统软件	315
10.4 综合仿真系统任务调度算法	319
10.4.1 综合仿真系统任务特点	319
10.4.2 静态负载分配算法	320
10.4.3 动态负载平衡算法	324



10.4.4 动态任务调度算法的实现	334
10.5 综合仿真系统分布实时数据库系统	335
10.5.1 实时数据库模型	335
10.5.2 综合仿真系统中数据库的特点	336
10.6 故障注入系统	337
10.6.1 故障注入系统结构	337
10.6.2 分布式系统的故障诊断与监控在仿真平台上的实现	338
10.7 机载公共设备综合仿真系统综合实验	339
10.7.1 综合仿真实验平台	339
10.7.2 仿真实例运行	340
10.7.3 仿真结果分析	341
参考文献	347

第 1 章 绪 论

1.1 电气液压伺服控制的应用与发展

电液伺服控制是一门新兴的科学技术,历史并不长。它是在 20 世纪 50 年代至 60 年代以后才逐渐发展起来,并形成了一门学科。

远在第一次世界大战前,液压伺服控制曾用于海军舰艇中作为操舵设备;但是因当时电力系统的迅速发展及其显示出的明显优越性,动摇了液压控制的基础。近几十年来,由于整个工业技术的发展,尤其是在军事航空和宇航技术上所应用的伺服控制系统逐步向快速、大功率、高精度的方向发展,电液伺服控制所具有的反应快、重量轻、尺寸小及抗负载刚性大等优点,特别受到重视;因此,电液伺服控制作为一种新兴的技术科学迅速发展起来。

机械液压伺服控制出现较早,用在飞机上即是液压助力器。可以说,飞机操纵系统的发展是与飞机液压伺服控制装置的发展和完善分不开的。不断改进的液压助力器用于飞机舵面的操纵,不仅减轻了飞行员的体力消耗,而且克服了飞机在跨声速飞行时舵面气动力引起操纵杆力变化的不可操纵性,使飞行由亚声速跨入超声速。

电液伺服控制早在 20 世纪 40 年代已应用到飞机上,但当时所用的电液转换器是用一个小伺服电动机操纵一个滑阀来实现的。由于伺服电动机的时间常数较大,故所组成的系统频带较低。随着超声速飞机的发展,要求伺服控制反应速度愈来愈高,特别是导弹控制等,非常需要电信号控制的快速反应伺服机构,从而促进了快速电液伺服控制系统的产生与发展。20 世纪 50 年代初,出现了快速反应的永磁力矩马达。它是一个电气—机械转换装置。力矩马达与滑阀的适当组合,形成了电液伺服阀,进一步提高了电液转换的速度。20 世纪 60 年代以后,各种伺服阀的新结构相继出现。

相应于电液转换装置的发展,带有快速反应伺服阀的电液伺服控制系统,亦因其性能优越而应用于飞机的操纵系统、弹道导弹的摇摆发动机控制系统或有翼导弹的自动驾驶仪系统。

现代飞机与导弹的飞行控制正是由于采用了电液伺服控制,从而提高了飞行控制系统的灵活性与适应性,保证了飞行器在所有飞行状态下所需要的稳定性与控制性(操纵性),改善了飞行器气动性能与布局,保证了舵面颤振的安全性。液压伺服控制装置是现代飞机操纵系统与大中型导弹控制系统最主要的装置之一。它决定了整个操纵系统、操纵结构的结构形式以及在飞机上的部位安排,在导弹的飞行控制系统中则几乎是系统动态特性的决定因素。

现在,液压伺服控制已在自动化领域占有重要位置。凡是需要大功率、快速、精确反应的



控制系统,都已经采用了液压伺服控制。

现代飞机上的操纵系统,如舵机、助力器、变臂器、人感系统,发动机与电源系统的恒速与恒频调节,火力系统中的雷达与炮塔的跟踪控制等大都采用了液压伺服控制。导弹的作动舵面、摆动发动机燃烧室、发射台的操纵以及人造卫星与宇航飞船的飞行控制也用到了液压伺服控制系统。飞行器的地面模拟设备,包括飞行模拟台、负载模拟器、大功率模拟振动台、疲劳强度实验的协调加载、大功率材料实验加载等大多采用了液压控制。因此液压伺服控制的发展关系到航空与宇航事业的发展。

其他的国防工业,如高射火炮的跟踪系统、坦克武器的稳定系统、舰艇的舵机操纵与消摆控制等液压控制系统都有了新的发展。它在民用工业方面的应用也得到广泛重视,如机床、冶炼、锻铸、轧钢、动力、车辆工程、矿山机械、海底作业、建筑、石油等,被当前世界上众所注目的机器人技术也大量采用了液压控制。

特别是 20 世纪 70 年代末 80 年代初逐渐完善和普及的计算机控制技术,为电子技术和液压技术的结合奠定了基础,大大地提高了液压伺服控制的功能与完成复杂控制的能力。机、电、液一体化技术已逐渐扩展到各个工业领域。由此可见,液压伺服控制系统的研究与发展对国防工业和民用工业,对我国实现四个现代化,赶超国际先进水平都有着相当重要的意义。

液压伺服控制今后的发展大体可以有以下几个方面:

① 高压大功率。高压的目的主要是为了减轻系统的重量及结构尺寸,大功率是为了解决大惯量与重负载的拖动问题。高压与大功率系统的研究与应用对航空与宇航技术显得尤其重要。

② 高的可靠性。液压控制设备一般都是高性能的机器,对油的污染和温度变化都很敏感,把这种机器应用于飞行器上,一开始,可靠性就是一个重要课题。在现在飞行器上应用功能愈来愈复杂的情况下,可靠性也就显得愈来愈重要。为了提高可靠性,除了对机器本身的研究与改良以及增加监测与诊断技术外,目前还在采用冗余技术与重构技术,采用了三或四通道的冗余构成系统。

③ 理论解析与特性补偿。液压伺服控制的理论解析,在 20 世纪 50 年代与 60 年代前半期,曾盛行一时,就伺服机构本身的理论,可以说大体上解决了。近期的研究倾向是利用计算机对复杂系统(如多变量液压系统)、复杂因素(非线性及时变等)进行仿真分析,其中大量的研究是围绕动态特性进行的。随着系统应用的目的多样化,控制对象也愈来愈复杂,大惯量、变参数、非线性及外干扰是经常遇到的。要使这些系统具有满意的性能,必须研究系统的性能补偿问题与近代控制策略。

④ 同微型机的结合。目前液压控制已从模拟控制转为以微机控制与数字控制为主。把微机放入控制回路之内进行实时控制时有很多问题需要研究——计算机速度问题,电液伺服机构如何与计算机配置的问题以及离散化带来的一些问题。直接与数字机结合需要发展液压数字技术,目前已产生了各种形式的数字阀、数字缸及高速开关阀等。众所周知,利用计算机



可以进行更复杂的功能控制。电液伺服控制与计算机的结合,提供了计算机创造的全部奇迹与大功率液压伺服控制之间牢固的、精确的、高性能的联系,产生了各种所谓智能化的电气液压伺服控制系统。

⑤ 液压伺服控制普遍的工业应用阶段。液压伺服控制元部件的批量及规格化生产,降低成本或开发简易廉价的各种转换元件、数字化元部件以及各种抗污染的产品,仍然是今后液压控制系统设计的课题。

1.2 电气液压伺服控制仍保持其有利的竞争地位

众所周知,对飞机与导弹上应用的伺服机构较之与一般伺服机构的要求要严格得多,归纳起来可以有以下几个方面:

① 在要求的持续工作时间内有足够的功率输出,即能满足力矩(或推力)与转速(或速度)的要求。

② 有良好的动态性能,在大惯性的载荷下需有必要的稳定性与快速性能。在航空的应用中,一定稳定裕度下的快速性是一个关键问题。战斗机与战术导弹的机动性都很高,伺服机构的响应快慢直接影响操纵系统及自动控制系统的品质。

③ 对外界环境的影响(如冲击、振动、加速度过载及高低温等)不敏感,有较大的负载刚度,对反操纵状态的抑制能力强。

④ 重量轻、体积小、寿命长、可靠性高、使用方便、维护容易、生产周期短、成本低等。

长期以来,由于飞机上存在着两种能源——电源和液压源,给飞机系统设计带来诸多不便。多少人试图将液压源去掉,设计所谓全电飞机,但目前的可能性怎样,不妨作以下对比:

① 液压与电气伺服控制系统相比,最突出的优点是体积小、重量轻、惯性小,而产生的力或力矩可以相当大。

一般电气元件的动作是基于电磁作用的,已知的各种铁磁物质在很低的磁通下便饱和了,这意味着一定体积的电动机不可能获得更大的力矩。优质电磁铁每平方厘米能产生的最大力大致为 171.6 N 左右,即使昂贵的坡莫合金,每平方厘米面积所产生的力也不超过 215.7 N 。而采用作动筒的在一平方厘米上产生 $1\,372.9\sim 2\,059.4\text{ N}$ 的力却很普遍,用 $3\,138\text{ N/cm}^2$ 的液压系统也在发展。由此看出,与电气元件同样大小的液压元件所产生的力要比电气元件大得多。如采用液压马达,其转动惯量约为相应功率电动机的转动惯量的 1% 左右。液压伺服控制的力矩惯性比,比电气伺服系统大十几倍到几十倍。对于一个自动控制系统,元件质量及惯量的减低除减轻了系统的重量和体积外,更重要的是由于惯量小,变化速度与反向控制容易,快速性可大大地提高。因此我国及美英等多数国家的大中型导弹与飞机上,液压伺服机构一直获得更为广泛的应用。美国第四代战斗机仍然采用液压驱动,而且有可能将压力提高到 56 MPa 。



在小功率系统中,采用电气伺服还是很有效的。它可以直接利用飞机上或导弹上电源,在 300 W 以下输出功率,其动态指标的体积重量也能满足要求。液压马达即使设计得十分有效,其最小功率也有 300~400 W,因此液压伺服的优越性在小功率系统中就反映不出来了。

② 静、动态精度控制对一般工业应用,特别是航空与航天的应用,是更重要的指标。由于液压伺服控制,特别是电液伺服控制,可以允许较大的放大倍数,功率放大的倍数可达 10^6 ,因而可以获得较高的静态与动态精度。时间常数在 $0.1 \sim 10^{-3}$ s,而电动一般在 $0.5 \sim 10^{-2}$ s。液压伺服的动力输出机构的压力放大倍数大,故系统受载荷变化的影响小,对反操纵的抑制能力也强。液压伺服所表现的这种对负载的大刚性的另一个原因是液压油本身带来的优点,制动力矩大。液压油的可压缩性小,负载力变化时引起的油的体积变化很小,作动筒活塞因负载干扰的变化而产生的位移变动也小。电动机的输出力是由电磁场的电磁作用造成的,它的刚性比液压的差,因而定位误差也大。

③ 液压伺服控制系统解决散热问题方便。利用液体流动把那些由于功率损耗而产生的热量,从发生的地方带到别处,只要在适当地方装上冷却器即可解决发热问题。自动控制系统的工况变化较大。系统元件往往不能保证在最佳条件下工作,因而功耗大,效率低。电气元件由于电阻损失和涡流损失等产生的热量无法很快带走,故而限制了它的使用条件,或是它的最小尺寸受到限制。一般电气元件的最小尺寸取决于有效磁通密度和电流密度,而液压元件的最小尺寸只受结构和制造工艺的限制,因此液压元件的体积可以做得相当小。这在航空上的应用是非常重要的优点。特别是对于大量采用复合材料的高速飞行器,能否节能和方便散热是至关重要的。

④ 液压油能兼起润滑剂的作用,从而使元件的寿命得到延长。

除此之外,液压伺服系统调速范围宽,高低速之比可达 400 以上;另外,固有粘滞性使其传动平稳,特别是低速有良好稳定性。国内飞行模拟台已做到 $0.0004^\circ/\text{s}$ 的低速。液压执行机构又有直线式与旋转式两种,故而提高了适应性,扩大了使用范围。液压能源的射频干扰也小,能源系统即使是某些战术导弹上选用电池组—电机泵方案而产生的射频干扰,也只有电气伺服电机的 $1/4 \sim 1/2$ 。

因此,对于飞机与导弹上的大功率(大于 1 000 W)伺服,而要求响应频带较宽(30 Hz 以上),体积小重量又轻的情况,电气类型的伺服机构目前尚无法代替液压伺服机构;对于一些中等功率(如 500~1 000 W)的伺服机构,比较起来也是液压方案为最佳。美国的第三代地对空导弹“爱国者”(SAMD),曾经对电动式与液压式两种方案进行过论证。根据要求,铰链力矩为 $510 \text{ N} \cdot \text{m}$,舵的空载速度为 $150^\circ/\text{s}$,机构的最大输出功率为 875 W,开环响应为 70 Hz,工作时间大于 100 s,有载($451 \text{ N} \cdot \text{m}$)下速度为 $100^\circ/\text{s}$,弹内安装允许空间为 $406 \text{ mm} \times 114 \text{ mm} \times 305 \text{ mm}$,对电动与液压两种方案都作了设计,结论是:“电动与液压在性能上无法相比。液压更强有力,刚度更好,体积更小,重量更轻”。足见液压适应的功率范围是极其宽广的。

电气液压伺服控制用得广泛还有一个重要原因是,可以用多种形式的能源系统,如油泵可



以直接由发动机带动,或燃气涡轮带动,或燃气马达带动,另外还有电池组—电机泵液压能源系统、气容积压式液压能源系统。这些系统用于各自的特定条件下,既能保证可靠的工作,又能在总体结构重量与体积方面优于电气类型的伺服机构,从而确定了液压伺服控制在航空与宇航应用上长期生存与有利的竞争地位。

事物都是一分为二的,液压伺服控制也存在着诸如液压油易污染,液体流动复杂,理论上的描述不如电气成熟,以及管路传输不如电气方便的缺陷;特别是机身布满了液压管路,影响了飞机的战斗生存率。一些航空发达国家,正在发展全电或多电飞机及功率电传系统。随着电气技术的发展,特别是高功率密度的稀土永磁材料的发展及大功率晶体器件的发展,也许会产生大功率的超过液压功率重量比的稀土永磁无刷电机和高性能的功率变换装置。

1.3 电气液压近代伺服控制的特点

对于近代液压伺服控制需考虑:① 环境和任务复杂,普遍存在较大程度的参数变化和外负载干扰以及交联耦合的影响;② 非线性的影响,特别是阀控动力机构流量非线性的影响;③ 有高的频宽要求及静动态精度的要求,须优化系统的性能;④ 微机控制与数字化及离散化带来的问题;⑤ 如何通过“软件伺服”达到简化系统及部件的结构。

近代液压伺服控制的以上这些特点,对控制策略提出了下述要求:

- ① 应尽量满足系统的静、动态精度要求,严格地优化设计,使系统做到快速而无超调;
- ② 对时变、外负载干扰和交联耦合以及非线性因素引起的不定性,控制系统应呈现较强的鲁棒性;
- ③ 控制策略应具有较强的智能;
- ④ 控制律、控制算法应力求简单可行,实时性强;
- ⑤ 系统应有较高的效率。

满足上述要求对电液伺服控制是个关键。开展这方面的研究,建立近代液压伺服控制的系统理论与控制方法,寻求工程实用的设计,对推广液压伺服控制的应用,促进液压伺服控制的发展将有重要意义。

1.4 近代控制策略在近代电气液压伺服控制的应用概况^[1]

1.4.1 PID 控制

与经典控制理论相应而发展起来的控制策略,是以 PID 控制为代表的。近代控制理论和智能控制理论仍然吸取了 PID 控制的一些基本思想。PID 控制基于系统误差的现实因素(P)、过去因素(I)和未来因素(D)进行线性组合来确定控制量,具有结构简单、易于实现等特



点,至今在液压伺服控制系统中仍有广泛的应用。

传统的 PID 采用线性定常组合方案,难于协调快速性和稳态性之间的矛盾;在具有参数变化和外干扰的情况下,其鲁棒性也不够好。随着对系统性能要求的不断提高,传统的 PID 控制往往不能满足要求。在这种情况下,吸取自适应控制和智能控制的基本思想并利用计算机技术的优势,对传统的 PID 控制进行改造形成自适应 PID、模糊 PID、智能积分 PID 和非线性 PID 等,使其适应新的要求。

1.4.2 自适应控制(AC)

在设计控制系统时,不完全知道系统的参数或结构,要求一边估计未知参数,一边修正控制作用,这就是自适应控制问题。AC 可分为两大类:一类以自校正控制(STC)为代表,另一类以模型参考自适应控制(MRAC)为代表。STC 由于在线辨识系统参数需要实时计算,时间长,一般适用于具有慢时变的对象调节;而对具有参数突变(如试验机伺服系统存在刚度突变)和突加外负载干扰的电液伺服系统往往不能满足要求,因此,液压伺服采用的 AC 大多为 MRAC 或其变型。

文献[2]针对机器人电液伺服系统参数的变化特点(主要是负载惯量 J 随姿态变化),提出了电液位置伺服系统的自适应控制律。文献[3]对模型跟随自适应控制(AMFC)进行了深入研究,分别基于直接状态提取法和最小范数法提出了 AMFC 新方法,使得模型可跟随条件(PMF)自动满足。这些方法在双缸同步控制系统、试验伺服系统和机器人伺服系统中获得成功应用。

AC 的不足之处是对被控对象的数学模型(阶次和相对阶)仍有严格的要求,此外诸如持续激励、慢时变,严格正实和波波夫不等式等条件也制约了 AC 具有更强的鲁棒性。恰当吸取其他控制策略的长处,研究限制条件少、算法简便和鲁棒法强的 AC 律是近年来发展的方向。另外随着采样频率的提高,如何避免离散化中最小相位问题也是值得研究的难点。

1.4.3 鲁棒控制

在实际问题中,系统的模型可能包含不确定因素,但又希望这时控制系统仍有良好的性能,这就是鲁棒控制问题。近年来出现了 H^∞ 设计方法,要求频率响应函数的 H^∞ 模的上确界极小。这种方法成功地应用了经典函数论和算子理论。在 H^∞ 模约束下,已成功解决了多变量定常系统的镇定补偿问题。 H^∞ 方法既保留了状态空间方法在计算上的优点,又有频率法的直观性;加上 H^∞ 控制器的全部设计工作可由 MATLAB 语言实现,所以对工程技术人员很有吸引力。但当系统发生不是小振动时, H^∞ 下的优化是否能保持次优性还不清楚。Piche R. 和 Ponjolaineu S.^[4] 针对电液位置伺服系统,分别采用基于混合灵敏度问题的由 Glover 和 Doyle 提出的 Two-Riccati equation formula 方法和基于结构奇异值优化的 Doyle's μ -synthesis 方法实现的 H^∞ 控制。仿真和实验表明,系统具有良好的静动特性且对未建模动态呈现较强