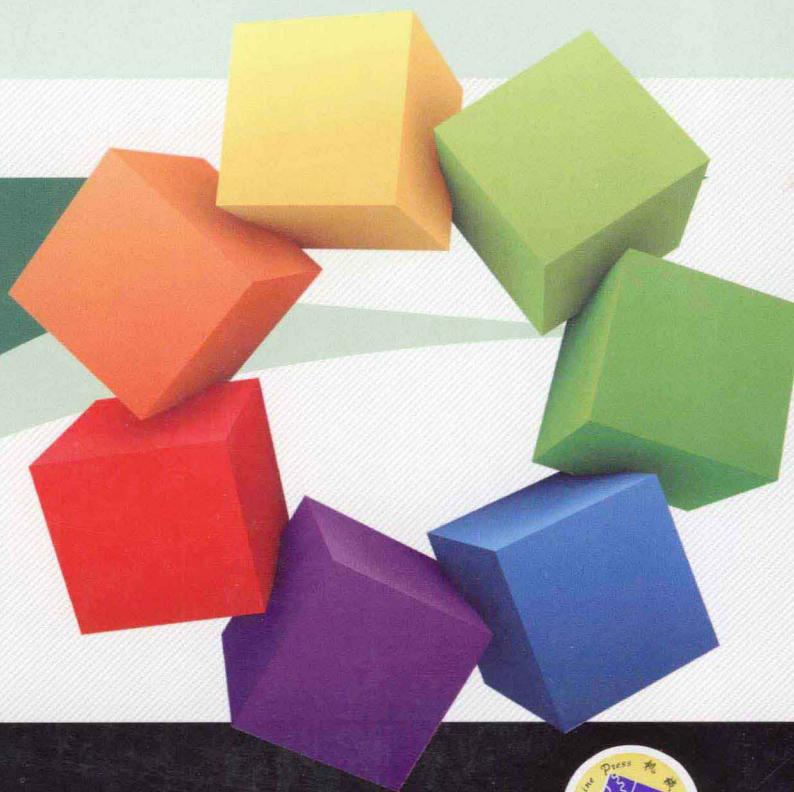


21世纪液压气动系统经典图书系列

从重视系统设计的基础到实际应用

伺服系统设计

姚晓先 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS





21 世纪液压气动系统经典图书系列

伺 服 系 统 设 计

主编 姚晓先
参编 吴晓明 林 凡
宋晓东 于志远



机 械 工 业 出 版 社

本书共分9章,第1章介绍了伺服系统的基本概念和伺服系统的分类、特点、工作原理及组成。第2章叙述了伺服系统中典型检测元件的工作原理和特点。第3章和第4章讲述了系统的静态设计的基本方法和伺服系统的性能指标及品质提高的方法,是进行伺服系统设计的基础。第5章论述了伺服系统的测试理论和方法。前5章的内容是进行伺服系统设计、研究的基本知识和理论方法,对于没有系统学习过控制理论的读者,这些内容是不可缺少的。第6~9章分别对电液伺服系统、气动伺服系统、直流伺服系统和永磁交流伺服系统进行了分析,是本书的主要内容,后4章的内容彼此基本独立,读者可根据自己的需要进行学习。

本书适用于伺服系统设计、研究人员以及高等院校相关专业师生。

图书在版编目(CIP)数据

伺服系统设计/姚晓先主编. —北京:机械工业出版社,2013.6

21世纪液压气动系统经典图书系列

ISBN 978-7-111-42546-5

I. ①伺… II. ①姚… III. ①伺服系统—系统设计 IV. ①TP275

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第101971号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:张秀恩 责任编辑:张秀恩 王寅生

版式设计:霍永明 责任校对:杜雨霏

封面设计:陈沛 责任印制:李洋

北京宝昌彩色印刷有限公司印刷

2013年8月第1版第1次印刷

169mm×239mm·22.5印张·435千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-42546-5

定价:49.00元



凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换。

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203

封面防伪标均为盗版

前 言

伺服技术是以自动控制理论为基础的应用技术，是传感技术、传动技术与控制技术的有机结合，在工农业生产及国防领域都有广泛及重要的应用。伺服系统的主要应用形式是位置伺服控制、速度伺服控制、力和压力伺服控制及温度伺服控制等。伺服系统一般由测量元件、执行机构和控制器等组成。根据执行机构传动方式的不同，伺服系统常分为电动伺服系统、液压伺服系统、气动伺服系统等。本书力图融合各种伺服技术进行介绍，内容以伺服技术中执行机构传动方式为主，重点是通过理论和实验解决液压、气动和电动机执行机构部分的数学模型问题，为从事伺服系统设计人员进行系统分析提供方法，也使读者了解不同伺服系统的特点，便于在实际应用中进行方案的最优选择和设计。

本书共分9章，第1章介绍了伺服系统的基本概念和伺服系统的分类、特点、工作原理及组成。第2章叙述了伺服系统中典型检测元件的工作原理和特点。第3章和第4章讲述了系统的静态设计的基本方法和伺服系统的性能指标及品质提高的方法，是进行伺服系统设计的基础。第5章论述了伺服系统的测试理论和方法。前5章的内容是进行伺服系统设计、研究的基本知识和理论方法，对于没有系统学习过控制理论的读者，这些内容是不可缺少的。第6~9章分别对电液伺服系统、气动伺服系统、直流伺服系统和永磁交流伺服系统进行了分析，是本书的主要内容，后4章的内容彼此基本独立，读者可根据自己的需要进行学习。

本书由姚晓先主编，其中第1、3章由吴晓明编写，第2、8章由林凡编写，第4、6章由宋晓东编写，第9章由于志远编写，第5、7章由姚晓先编写。徐家蓓副教授对本书的文字和图表进行了全面的整理，同时对书中的内容提出了很多宝贵意见，吴晓明教授对本书的全部内容进行了校对，对一些图文进行了更改。在此对他们的辛勤付出表示衷心的感谢。

由于水平有限，实践经验不足，书中难免有错误和不妥之处，恳请读者批评指正。

目 录

前言

第1章 伺服系统概述	1
1.1 伺服系统的发展简况、现状	1
1.1.1 伺服系统的发展简况	1
1.1.2 伺服系统的发展现状	4
1.2 伺服系统的基本概念	7
1.2.1 名词概念	7
1.2.2 伺服系统的定义	8
1.2.3 伺服系统的基本特性	8
1.2.4 伺服系统的控制方式	10
1.3 伺服系统的分类、特点、工作原理及组成	12
1.3.1 伺服系统的分类	12
1.3.2 伺服系统的特点	14
1.3.3 伺服系统的工作原理	14
1.3.4 伺服系统的组成	17
1.4 伺服系统的主要技术指标	18
1.4.1 位置伺服系统的主要技术指标	18
1.4.2 速度伺服系统的主要技术要求	19
1.5 液压、气动和电气伺服系统的对比	20
1.6 伺服系统的应用	25
第2章 伺服系统典型检测元件	27
2.1 位移检测元件	27
2.1.1 电阻式电位器	28
2.1.2 旋转变压器	29
2.1.3 感应同步器	32
2.1.4 自整角机	33
2.1.5 编码器	37
2.1.6 光栅	42
2.1.7 磁尺	46
2.2 速度检测元件	49
2.2.1 直流测速发电机	49
2.2.2 交流测速发电机	51
2.2.3 霍尔转速传感器	52

2.2.4 基于脉冲信号的数字测速方法	52
2.3 力传感器及转矩测量元件	56
2.3.1 力传感器	56
2.3.2 转矩测量元件	59
第3章 伺服系统静态设计的基本方法	63
3.1 设计概述	63
3.1.1 全面理解设计要求	63
3.1.2 拟订控制方案、绘制系统原理图	64
3.2 负载特性	65
3.2.1 几种典型负载	65
3.3 等效负载的计算	66
3.3.1 系统等效转动惯量 J_{in} 的计算	67
3.3.2 等效负载转矩的计算	67
3.3.3 等效刚度的计算	69
3.4 负载特性分析	70
3.5 负载匹配	72
3.5.1 液压伺服系统的负载匹配方法	73
3.6 执行元件的选择	74
3.6.1 液压缸、液压马达的选择	75
3.6.2 伺服电动机的选择计算	76
3.7 信号检测、转换及放大和电源等装置的选择与设计	93
第4章 伺服系统的性能指标与品质提高的方法	94
4.1 伺服系统的性能指标	94
4.1.1 伺服系统的稳定性	94
4.1.2 伺服系统的稳态误差	96
4.1.3 伺服系统动态特性	99
4.2 伺服系统的线性校正技术	101
4.2.1 串联校正	101
4.2.2 并联校正	106
4.2.3 局部反馈校正	107
4.2.4 复合校正	111
4.3 伺服系统的扰动补偿技术	112
4.3.1 前馈补偿在扰动补偿中的应用	112
4.3.2 模型跟踪在扰动补偿中的应用	113
第5章 伺服系统的测试理论和方法	115
5.1 伺服系统的性能指标	115
5.1.1 频率特性	115
5.1.2 动态特性之间关系	117

5.1.3 静特性的定义	117
5.2 静特性测量与处理方法	118
5.3 频率特性测试方法概述	121
5.3.1 正弦波扫频法	121
5.3.2 多频信号法	122
5.3.3 广谱测量法	123
5.4 频率特性计算方法及误差分析	124
5.4.1 算法简介	124
5.4.2 误差分析	125
5.5 脉冲响应求传递函数	127
5.5.1 射流元件的工作原理及测试原理	127
5.5.2 测试系统的辨识	129
5.6 一种测试系统的实现	132
5.6.1 信号发生器	132
5.6.2 采集处理	133
第6章 电液伺服系统设计	139
6.1 电液伺服系统简介	139
6.1.1 电液伺服系统的分类	139
6.1.2 电液伺服系统基本组成及工作原理	139
6.1.3 电液伺服控制系统的优缺点	141
6.2 电液伺服阀	141
6.2.1 电液伺服阀的一般构成和分类	141
6.2.2 常用电液伺服阀的结构形式及其特点	143
6.2.3 电液伺服阀的主要性能参数	146
6.2.4 力反馈二级电液伺服阀	150
6.2.5 电液伺服阀的选型与使用	152
6.2.6 电液伺服阀故障分析	153
6.3 电液位置系统	155
6.3.1 系统的组成及框图	155
6.3.2 稳定性分析	157
6.3.3 闭环频率特性	159
6.3.4 系统的误差	162
6.3.5 改变系统参数以增加阻尼	164
6.3.6 系统校正	165
6.4 电液速度控制系统	170
6.4.1 速度控制系统框图	171
6.4.2 速度控制系统的控制方式	173
6.5 电液力(压力)控制系统	174

6.5.1	力控制系统的特性	175
6.5.2	压力控制系统简介	178
6.6	电液伺服系统设计	180
6.6.1	充分理解设计要求	181
6.6.2	确定控制系统方案	182
6.6.3	动力元件设计	182
6.6.4	反馈传感器的选择	186
6.6.5	确定系统框图	187
6.6.6	绘制系统开环伯德图并确定开环增益	187
6.6.7	系统静态品质分析及确定校正特性	187
6.7	液压油源	188
6.7.1	液压油源的基本形式	188
6.7.2	液压油源的品质要求	189
6.7.3	液压油源的参数选择及负载匹配	189
第7章	气动伺服系统设计	191
7.1	气动伺服阀的分类	191
7.1.1	气动滑阀	191
7.1.2	喷嘴-挡板阀	193
7.1.3	射流管阀	194
7.1.4	开关阀	195
7.2	射流管式伺服系统的性能分析	196
7.2.1	工作原理	196
7.2.2	系统的数字模型	197
7.3	阀系数的求解	207
7.4	阀的耗气量、输出功率及效率	212
7.5	射流管阀系统的设计	213
7.6	系统中一些关键参数的测试方法	216
7.6.1	力矩马达性能实验方法	216
7.6.2	射流管阀的压力特性测试	220
7.7	气缸摩擦力的实验	221
7.7.1	测试方法	221
7.7.2	测试结果	222
7.7.3	实验分析	223
7.8	一种低压 PWM 气动伺服系统分析	223
7.8.1	系统的非线性模型的建立	224
7.8.2	系统非线性模型的线性化	227
7.8.3	系统性能分析	233
7.8.4	系统辨识	234

第 8 章 直流伺服系统	237
8.1 直流伺服电动机	237
8.1.1 小惯量直流伺服电动机	238
8.1.2 直流力矩电动机	241
8.1.3 无刷直流电动机	243
8.2 直流调速系统	247
8.2.1 直流电动机调速的方法与稳态调速指标	247
8.2.2 转速负反馈有静差调速系统	250
8.2.3 电流截止负反馈调速系统	254
8.2.4 转速负反馈无静差调速系统	256
8.2.5 单闭环调速系统实例	258
8.3 双闭环直流调速系统	259
8.3.1 双闭环调速系统的组成和静态特性	259
8.3.2 转速、电流双闭环系统的动态性能	263
8.3.3 双闭环系统的抗干扰性能	269
8.4 脉宽调制 (PWM) 调速系统	270
8.4.1 脉宽调速系统 (PWMS) 的工作原理	270
8.4.2 脉宽调速系统的控制回路	277
8.5 位置伺服系统的分析与设计	281
8.5.1 自整角机位置伺服系统的组成和模型	281
8.5.2 位置伺服系统的稳态分析	285
8.5.3 位置控制系统的动态校正	289
第 9 章 永磁交流伺服系统	300
9.1 概述	300
9.2 永磁同步电动机的结构及类型	301
9.3 永磁同步电动机的数学模型	303
9.3.1 坐标变换	303
9.3.2 三相定子坐标系下永磁同步电动机数学模型	305
9.3.3 两相定子坐标系下永磁同步电动机数学模型	307
9.3.4 两相转子坐标系下永磁同步电动机数学模型	308
9.4 永磁同步电动机的控制方式	309
9.4.1 变压变频控制	309
9.4.2 矢量控制	310
9.4.3 直接转矩控制	313
9.5 永磁同步电动机的 PWM 技术	315
9.5.1 电流滞环跟踪 PWM 控制	316
9.5.2 正弦波脉宽调制技术	316
9.5.3 电压空间矢量脉冲调制技术	319

9.5.4 混合调制技术	323
9.6 永磁交流伺服系统与直流无刷电动机伺服系统的比较	324
9.6.1 功率密度和转矩惯量比	325
9.6.2 调速范围	326
9.6.3 转矩电流比	327
9.6.4 转矩脉动	328
9.6.5 位置反馈元件	328
9.6.6 逆变器容量	329
9.6.7 损耗及热容量	329
9.7 全数字永磁同步电动机驱动控制器的设计实例	330
9.7.1 驱动控制器系统设计	331
9.7.2 硬件电路设计	332
9.7.3 软件及控制算法设计	340
参考文献	345

第 1 章 伺服系统概述

1.1 伺服系统的发展简况、现状

1.1.1 伺服系统的发展简况

伺服系统的发展经历了由液压到电气的过程。液压伺服系统的历史最早可追溯到公元前 240 年，当时一位古埃及人发明了人类历史上第一个液压伺服系统——水钟。在第一次世界大战前，机械液压伺服控制系统就已经出现，开始应用于海军舰艇中作为操舵装置；用在飞机上作为液压助力器，操纵飞机舵面。1934 年，Hertz 提出了用于位置控制系统的伺服机构的概念，讨论了可以精确跟踪变化的输入信号的机电伺服机构。20 世纪 40 年代，在飞机上出现了电液伺服系统，系统中的滑阀是由伺服电动机驱动的，由于伺服电动机时间常数较大，限制了电液伺服系统的响应速度。在第二次世界大战期间，德国 V2 导弹的出现，促进了快速电液伺服系统的产生与发展。液压伺服系统因响应快、精度高和功率/重量比大等特点而受到特别重视，自动控制特别是武器和飞行器控制系统的研究得到进一步发展。

20 世纪 50 年代，出现了快速响应的永磁力矩马达。力矩马达与滑阀结合，形成了电液伺服阀。随后又出现了以喷嘴挡板阀作为第一级的电液伺服阀，进一步提高了电液伺服阀的快速性。20 世纪 60 年代，各种结构的电液伺服阀相继出现，其性能日趋完善。由于电液伺服阀和电子技术的发展，使电液伺服系统得到了迅速的发展。

20 世纪 50 ~ 60 年代是电液元件和技术发展的高峰期，电液伺服阀控制在军事应用中大显身手，特别是在航空、航天上的应用。这些应用最初是在雷达驱动、制导平台驱动及导弹发射架控制等方面，电液伺服作动器也被用于空间运载火箭的导航和控制。电液控制在非军事工业上的应用也越来越多，最主要的是机床工业。在早些时候，数控机床的工作台定位伺服装置中多采用电液系统（通常是液压伺服马达）来代替人工操作，其次是工程机械。在以后的几十年中，电液控制技术的工业应用又进一步扩展到工业机器人控制、塑料加工、地质和矿藏探测、燃气或蒸汽涡轮控制及可移动设备的自动化等领域。

20 世纪 70 年代，随着集成电路的问世及微处理器的诞生，基于集成电路的

控制电子器件和装置广泛应用于电液控制技术领域。

目前, 液压伺服系统特别是电液伺服系统已成为武器自动化和工业自动化的一个重要方面。凡是需要大功率、快速、精确反应的控制系统, 液压伺服系统都得到了应用: 在国防工业中, 有飞机的操纵系统、导弹的自动控制系统、火炮操纵系统、坦克火炮稳定装置, 雷达跟踪系统和舰艇的操舵装置系统; 在一般工业中, 有机床、冶炼、轧钢、铸锻、动力、工程机械、矿山机械、建筑机械、拖拉机、船舶等系统。

在气动伺服研究方面, 早在 1956 年, 美国 Shearer 等人成功地将高压、高温气体作为工作介质的气动伺服机构应用于航天飞行器及导弹的姿态和飞行稳定控制中。当时前苏联在气动伺服技术的研究和应用方面处于领先水平, 将气动伺服技术大量应用于导弹控制中, 形成了系列产品。

1979 年德国 Aachen R. W 工业大学 W. Backe 教授研制出的第一个气动伺服阀大大推进了气动伺服控制的发展。但初期的气动伺服阀是仿照液压伺服阀中的喷嘴挡板型加工而成的, 由于种种原因一直未能得到推广应用, 气动伺服阀也因此一度被认为是气动技术的死区。

此后, 德国、日本、美国等工业发达国家投入大量资金和人力成功地研制了各种规格的伺服阀, 以及高性能的气缸、气马达。随着高性能的电气控制元件和执行元件的迅速发展, 气动伺服控制技术的研究也取得了一定的成果。

随着成熟的电气伺服阀被研制成功, 气动伺服技术才得以迅速发展。电气伺服阀以 FESTO 公司的 MPYE 系列为典型代表, 其主要由双向位移电磁铁、位移传感器、控制电路及主阀等组成。阀芯由双向电磁铁直接驱动, 用传感器检测出阀芯位移信号并反馈给控制电路, 从而调节输入电信号与输出流量成比例关系。这种阀采用双向电磁铁调节阀芯位置, 没有弹簧, 电磁铁不受弹簧力负载, 功耗小。此阀采用直动式滑阀结构, 不需外加比例放大器, 响应速度和控制精度高, 能构成高精度位移伺服系统。

气压伺服控制因其工作介质具有防燃、防爆、防电磁干扰等一系列的优点也得到了迅速发展。随着市场需求向多品种、小批量的多样化方向发展, 自动生产设备对气动控制系统的要求, 也从原来简单的开关控制向可实现执行元件的位置、速度和力的连续可调的高精度控制方向转变。近年来, 随着电子、材料、控制理论及传感器等科学技术的发展, 气动比例伺服控制技术也得到了快速提高。以比例伺服控制阀为核心组成的气动比例伺服控制系统可实现压力、流量连续变化的高精度控制, 能够满足自动化设备的柔性生产要求。

电气伺服系统的发展与伺服电动机的发展紧密地联系在一起。第一个发展阶段 (20 世纪 60 年代以前)。开环伺服系统的驱动电动机为步进电动机或功率

步进电动机。步进电动机是一种将电脉冲转化为角位移的执行机构，两相混合式步进电动机的步距角一般为 3.6° 、 1.8° ，五相混合式步进电动机步距角一般为 0.72° 、 0.36° 。但步进电动机存在一些缺点：在低速时易出现低频振动现象；一般不具有过载能力；步进电动机的控制为开环控制，起动频率过高或负载过大易出现丢步或堵转现象，停止时转速过高易出现过冲现象。

第二个发展阶段（20世纪60~70年代）。直流伺服电动机闭环伺服系统。由于直流电动机具有优良的调速性能，很多高性能驱动装置采用了直流电动机，伺服系统的位置控制也由开环系统发展成为闭环系统。在数控机床的应用领域，永磁式直流电动机占统治地位，其控制电路简单，无励磁损耗，低速性能好。

第三个发展阶段（20世纪80年代至今）。无刷直流伺服电动机、交流伺服电动机伺服系统占主导地位。随着微处理器技术、大功率高性能半导体功率器件技术和电机永磁材料制造工艺的发展及其性能价格比的日益提高，应用交流伺服驱动技术的交流伺服电动机和交流伺服控制系统逐渐成为主导产品。交流伺服驱动技术已经成为工业领域实现自动化的基础技术之一，并将逐渐取代直流伺服系统。

交流伺服系统按其采用的驱动电动机的类型来分，主要有两大类：永磁同步（SM型）电动机交流伺服系统和感应式异步（IM型）电动机交流伺服系统。其中，永磁同步电动机交流伺服系统在技术上已趋于成熟，具备了十分优良的低速性能，并可实现弱磁高速控制，拓宽了系统的调速范围，适应了高性能伺服驱动的要求。并且随着永磁材料性能的大幅度提高和价格的降低，其在工业生产自动化领域中的应用将越来越广泛，目前已成为交流伺服系统的主流。感应式异步电动机交流伺服系统由于感应式异步电动机结构坚固、制造容易、价格低廉，因而具有很好的发展前景，代表了将来伺服技术的方向。但由于该系统采用矢量变换控制，相对来说控制比较复杂，而且电动机低速运行时还存在着效率低、发热严重等有待克服的技术问题，目前并未得到普遍应用。

20世纪80年代以来，随着电动机技术、现代电力电子技术、微电子技术、控制技术及计算机技术的快速发展，大大推动了交流伺服驱动技术的发展，使交流伺服系统性能日渐提高，与其相应的伺服传动装置也经历了模拟式、数模混合式和全数字化的发展历程。

20世纪90年代开环伺服系统迅速被交流伺服系统所取代。

进入21世纪，交流伺服系统越来越成熟，市场呈现快速多元化发展趋势，国内外众多品牌进入市场竞争。目前交流伺服技术已成为工业自动化的支撑性技术之一。

1.1.2 伺服系统的发展现状

1. 液压伺服系统的发展情况

目前, 液压伺服控制技术已经开始向数字化方向发展, 液压技术同电子技术、控制技术的结合日益紧密, 电液元件和系统的性能有了进一步的提高。电液控制技术将在电子设备、控制策略、软件和材料方面取得更大的突破, 主要包括以下几个方面。

1) 与电子技术、计算机技术融为一体。随着电子组件系统的集成, 相应的电子组件接口和现场总线技术开始应用于电液系统的控制中, 从而实现高水平的信息系统, 该系统简化了控制环节、易于维护, 提高了液压系统的可控性能和诊断性能。

2) 更加注重节能增效。负荷传感系统和变频技术等新技术的应用将使效率大大提高。

3) 在其相关的主要基础元件的改进和发展上, 电液伺服阀向着简化结构、降低制造成本、提高抗污染能力和高可靠性方向发展, 研究开发了大功率永磁直线力马达, 形成了新型的直接驱动式伺服阀产品系列; 电子控制器向着专用集成电路方向发展, 实现小型化、组合化, 并达到高可靠性目的。新型电液元件和一体化敏感元件将得到广泛研究和应用, 如具有耐污染、高精度、高频响的直动型电液控制阀, 液压变换器及电子液压泵等的研究。

4) 计算机技术将广泛应用于电液控制系统的设计、建模、仿真试验和控制中。包含 CAD (计算机辅助设计)、CAE (计算机辅助分析)、CAPP (计算机辅助工艺规划)、CAT (计算机辅助测试) 的 CIMS (计算机制造系统) 将会在电液元件及系统的全过程中发挥更大的作用。

5) 在电液系统中, 像电磁材料、陶瓷、聚合物等新材料将得到进一步的研究和应用。

6) 无线电液比例遥控系统开始得到进一步的研究和应用。

2. 电气伺服系统的发展

电气伺服系统的发展趋势可以概括为以下几个方面。

(1) 交流化

伺服技术将继续迅速地由 DC 伺服系统转向 AC 伺服系统。从目前国际市场的情况看, 几乎所有的新产品都是 AC 伺服系统。在工业发达国家, AC 伺服电动机的市场占有率已经超过 80%。在国内生产 AC 伺服电动机的厂家也越来越多, 正在逐步地超过生产 DC 伺服电动机的厂家。可以预见, 在不远的将来, 除了在某些微型电动机领域之外, AC 伺服电动机将完全取代 DC 伺服电动机。

(2) 数字化

采用新型高速微处理器和专用数字信号处理机 (DSP) 的伺服控制单元将全面代替以模拟电子器件为主的伺服控制单元, 从而实现完全数字化的伺服系统。全数字化的实现, 将原有的硬件伺服控制变成了软件伺服控制, 从而使在伺服系统中应用现代控制理论的先进算法 (如最优控制、人工智能、模糊控制、神经元网络等) 成为可能。

(3) 采用新型电力电子半导体器件

目前, 伺服控制系统的输出器件越来越多地采用开关频率很高的新型功率半导体器件, 主要有大功率晶体管 (GTR)、功率场效应晶体管 (MOSFET) 和绝缘门极晶体管 (IGBT) 等。这些先进器件的应用显著地降低了伺服单元输出回路的功耗, 提高了系统的响应速度, 降低了运行噪声。尤其值得一提的是, 最新型的伺服控制系统已经开始使用一种把控制电路功能和大功率电子开关器件集成在一起的新型模块, 称为智能功率模块 (Intelligent Power Modules, IPM)。这种器件将输入隔离、能耗制动、过温、过电压、过电流保护及故障诊断等功能全部集成于一个不大的模块之中。其输入逻辑电平与 TTL 信号完全兼容, 与微处理器的输出可以直接接口。它的应用显著地简化了伺服单元的设计, 并实现了伺服系统的小型化和微型化。

(4) 高度集成化

新的伺服系统产品改变了将伺服系统划分为速度伺服单元与位置伺服单元两个模块的做法, 代之以单一的、高度集成化、多功能的控制单元。同一个控制单元, 只要通过软件设置系统参数, 就可以改变其性能, 既可以使用电动机本身配置的传感器构成半闭环调节系统, 又可以通过接口与外部的的位置或速度或力矩传感器构成高精度的全闭环调节系统。高度的集成化还显著地缩小了整个控制系统的体积, 使得伺服系统的安装与调试工作都得到了简化。

(5) 智能化

智能化是当前一切工业控制设备的流行趋势, 伺服驱动系统作为一种高级的工业控制装置当然也不例外。最新数字化的伺服控制单元通常都设计为智能型产品, 它们的智能化特点表现在以下几个方面: 首先, 它们都具有参数记忆功能, 系统的所有运行参数都可以通过人、机对话的方式由软件来设置, 保存在伺服单元内部, 通过通信接口, 这些参数甚至可以在运行中由上位计算机加以修改, 应用起来十分方便; 其次, 它们都具有故障自诊断与分析功能, 无论什么时候, 只要系统出现故障, 就会将故障的类型以及可能引起故障的原因通过用户界面清楚地显示出来, 这就简化了维修与调试的复杂性。除以上特点之外, 有的伺服系统还具有参数自整定的功能。众所周知, 闭环调节系统的参数整定是保证系统性能指标的重要环节, 也是需要耗费较多时间与精力的工作。

带有自整定功能的伺服单元可以通过几次试运行，自动将系统的参数整定出来，并自动实现其最优化。对于使用伺服单元的用户来说，这是新型伺服系统最具吸引力的特点之一。

(6) 模块化和网络化

在国外，以工业局域网技术为基础的工厂自动化（Factory Automation, FA）工程技术在最近十年来得到了长足的发展，并显示出良好的发展势头。为适应这一发展趋势，最新的伺服系统都配置了标准的串行通信接口（如 RS-232C 或 RS-422 接口等）和专用的局域网接口。这些接口的设置，显著地增强了伺服单元与其他控制设备间的互联能力，从而与 CNC 系统间的连接也由此变得十分简单，只需要一根电缆或光缆，就可以将数台，甚至数十台伺服单元与上位计算机连接成为整个数控系统。也可以通过串行接口，与可编程序控制器（PLC）的数控模块相连。

综上所述，电气伺服系统将向两个方向发展：一个是满足一般工业应用要求，对性能指标要求不高的应用场合，追求低成本、少维护、使用简单等特点的驱动产品，如变频电动机、变频器等；另一个就是代表着伺服系统发展水平的主导产品，如伺服电动机、伺服控制器，追求高性能、高速度、数字化、智能型、网络化的驱动控制，以满足用户较高的应用要求。

3. 气动伺服控制系统的发展

气动伺服控制系统由于可以在高温、高湿、强磁场、要求防爆等恶劣环境下可靠地工作，在过程控制领域得到了广泛的使用。与电气伺服系统相比，气动伺服控制系统具有不发热、不产生磁场等优点，在汽车的车身点焊设备、对热及磁场极其敏感的半导体高精度制造设备等工业设备中也发挥着不可替代的作用。另外，高速列车的气压减振系统、承载精密光学设备的空气弹簧式主动隔振台等实际上也是气动伺服控制系统。近年，由于重量轻、低成本、检测气缸两腔压力可推定外力等特点，气动伺服控制系统开始被尝试研究应用于机器人手臂、灵巧手、远程手术主从操作系统等。

气动伺服技术的发展也体现在各种现代控制技术的研究方面，传统的 PID 控制是古典控制理论的中心，它具有简单、实用易掌握等特点，在气动控制技术中得到了广泛的应用。但控制器设计时准确确定比例、积分及微分环节的增益系数比较困难。合适的增益系数的确定需要经过大量实验，工作量很大。另一方面，不适用于控制对象参数经常变化、外部有干扰、大滞后系统等场合。在此情况下，一是使用神经网络与 PID 控制并行组成控制器，利用神经网络的学习功能，在线调整增益系数，抑制因参数变化等对系统稳定性造成的影响。二是使用各种现代控制理论，如自适应控制、最优控制、鲁棒控制、 H_∞ 控制及 μ 控制等来设计控制器，构成具有较强鲁棒性的控制系统。目前，应用现代控制

理论来控制气缸的位置或输出力已经取得了一定的研究成果。

1.2 伺服系统的基本概念

1.2.1 名词概念

(1) 伺服

“伺服”一词源于希腊语“奴隶”的意思。人们想把“伺服机构”当个得心应手的驯服工具，服从控制信号的要求而动作。

(2) 控制

对于人-机系统，为使某一机器、设备或过程处于希望的状态对其进行的操作，称为控制。

(3) 被控对象

被控制的物件、机器、设备或过程称为被控对象或对象。例如，一个机械手臂，或是一个机械工作平台。

(4) 被控量

被控制的物理量称为被控量或输出量。被控量是表征受控对象工作状态的物理量，即位移、速度、力等。

(5) 给定量

定被控量的物理量称为给定量或参考输入。给定量表征了被控量的期望值或受控对象的期望状态。

(6) 扰动量

妨碍给定量对被控量进行正常控制的所有因素称为扰动量。如果扰动量产生在系统内部称为内扰；扰动量产生在系统外部称为外扰。给定量和扰动量都是伺服系统的输入量。

(7) 开环控制系统

若系统的输出量不被引回来对系统的控制部分产生影响，则这样的系统称为开环控制系统。

(8) 闭环控制系统

系统输出量通过反馈环节返回来作用于控制部分，形成闭合环路，则这样的系统称为闭环控制系统，又称为反馈控制系统（Feedback Control System）。

(9) 反馈

把输入的被调量按一定比例回输给控制装置的输入端的控制方法。

(10) 负反馈

如果反馈信号的极性与输入信号的极性相反，这种反馈称为负反馈。