



普通高等教育“九五”国家级重点教材

# 现代 伺服系统设计

刘胜 彭侠夫 叶瑰昀 编著

哈尔滨工程大学出版社



中国计算机教育出版集团  
清华大学出版社

# 现代 网络系统设计

作者：张三 李四 王五 赵六

清华大学出版社

普通高等教育“九五”国家级重点教材

# 现代伺服系统设计

刘 胜 彭侠夫 叶瑰昀 编著

哈尔滨工程大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

现代伺服系统设计/刘胜,彭侠夫,叶瑰昀编著. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2001.7  
ISBN 7-81073-189-0

I. 现... II. ①刘...②彭...③叶... III. 伺服系统-系统设计-高等学校-教材 IV. TP275

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 046375 号

---

## 内 容 简 介

本书从控制工程设计角度出发,围绕船舶运动机电设备及现代伺服控制技术,系统、详尽地介绍了现代伺服系统的设计与分析方法。内容包括:伺服控制技术的发展、组成、技术指标及设计思路,伺服系统的误差分析,建模方法,稳态设计及动态综合,PWM 直流伺服系统分析与设计,系统调试方法与实验,船舶运动及机电设备典型系统设计与实现,伺服系统电磁兼容性设计和可靠性设计等。书中还列举了不少典型应用电路和工程设计实例,并配备有相关习题。

本书是“九五”国家级重点教材,是为船舶院校自动化、测控技术及仪器、探测、制导与控制技术等专业本科生编写的教材,也可作为其它有关机电控制专业本科生和工程技术人员的参考书。

---

哈尔滨工程大学出版社出版发行  
哈尔滨市南通大街145号 哈工程大学11号楼  
发行部电话:(0451)2519328 邮编:150001  
新 华 书 店 经 销  
黑 龙 江 省 教 委 印 刷 厂 印 刷

\*

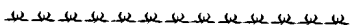
开本 787mm×1 092mm 1/16 印张 23 字数 529 千字

2001年8月第1版 2001年8月第1次印刷

印数:1~1 000册

定价:29.00元

# 前 言



本教材系国家普通高等教育“九五”国家级重点教材,是按照中国船舶工业总公司教材编写委员会审定的“控制系统设计”课程教学大纲编写的,可作为船舶院校自动化、测控技术,及仪器、探测、制导与控制技术等专业高年级本科生教材,也可供从事有关机电控制专业科技工作者参考。

本书从控制工程设计角度出发,围绕船舶机电设备及现代伺服控制技术,系统、详尽地介绍了现代伺服系统的设计与分析方法。全书共分 10 章。第 1 章介绍有关伺服系统控制技术的发展、结构组成、系统性能指标及设计思路。第 2 章阐述了如何对伺服系统进行误差分析及在系统设计中误差合理分配问题。第 3 章研究了伺服系统稳态计算及设计方法。第 4 章讨论了伺服系统建模的工程方法。第 5 章讨论了伺服系统的动态综合,介绍了频域法、复合控制、干扰补偿控制、鲁棒控制及状态空间法综合。第 6 章对 PWM 直流伺服系统分析、设计过程及设计方法进行了介绍。第 7 章介绍了伺服系统调试与实验过程,分析了系统调试实验中经常遇到的问题及解决办法。第 8 章给出了三种典型伺服系统设计与实现实例。第 9 章、第 10 章分别概括地介绍了伺服系统电磁兼容性设计与可靠性设计。书中列举了不少的典型应用电路和工程设计实例。

本教材的编写,结合了编著者多年的理论知识积累及船舶自动化、船舶自动控制设备的研制工程实践,也参阅了大量的相关中外文文献。

本教材第 1、2、6 章由刘胜教授编写,第 5、7、9 章由彭侠夫副教授编写,第 3、4、10 章由叶瑰昀副教授编写,第 8 章由刘胜教授、彭侠夫副教授共同编写。哈尔滨工业大学的苏宝库教授详细审阅了本书全部底稿并提出了许多宝贵意见,作者在此表示感谢。

在本教材中,引用了许多参考文献中的有关内容,对此编者表示深切的谢意!

由于编者学识所限,真诚地希望广大读者对本书中的错误和不当之处批评指正。

编 者

2001 年 4 月于哈尔滨工程大学

# 目 录

<b>第一章 绪论</b>	<b>1</b>
§ 1.1 伺服控制技术的发展	1
§ 1.2 伺服系统的组成原理	2
§ 1.3 伺服系统技术指标	5
§ 1.4 伺服系统设计内容与步骤	7
<b>第二章 伺服系统误差分析</b>	<b>9</b>
§ 2.1 概述	9
§ 2.2 伺服系统元件误差	11
§ 2.3 伺服系统原理动态误差	17
§ 2.4 伺服系统原理稳态误差	23
§ 2.5 随机系统误差分析	28
§ 2.6 伺服系统设计中误差分配	29
习题	30
<b>第三章 伺服系统稳态设计</b>	<b>32</b>
§ 3.1 概述	32
§ 3.2 伺服系统典型负载分析和计算	33
§ 3.3 伺服系统控制方案选择	44
§ 3.4 伺服电机选择	47
§ 3.5 伺服检测装置的选择	64
§ 3.6 放大装置选择	78
习题	87
<b>第四章 伺服系统工程建模方法</b>	<b>88</b>
§ 4.1 概述	88
§ 4.2 几种典型环节的动态特性	89
§ 4.3 控制对象的机理建模方法	91
§ 4.4 时域法建模	107
§ 4.5 频域法建模	112
§ 4.6 相关分析法建模	119
§ 4.7 船舶运动及姿态建模	124
习题	126
<b>第五章 伺服系统的动态综合</b>	<b>131</b>
§ 5.1 概述	131

§ 5.2 伺服系统的动态性能指标 .....	131
§ 5.3 动态性能指标与典型系统频率特性关系 .....	134
§ 5.4 频域法串联校正 .....	154
§ 5.5 频域法并联校正 .....	164
§ 5.6 伺服系统复合控制 .....	179
§ 5.7 伺服系统干扰补偿控制 .....	184
§ 5.8 伺服系统鲁棒控制 .....	186
§ 5.9 状态空间法动态综合 .....	193
习题 .....	203
<b>第六章 PWM 直流伺服系统</b> .....	<b>207</b>
§ 6.1 概述 .....	207
§ 6.2 PWM 直流伺服系统组成 .....	213
§ 6.3 PWM 直流伺服系统控制电路 .....	214
§ 6.4 伺服系统对 PWM 功放装置的要求 .....	228
§ 6.5 功率转换电路型式选择 .....	229
§ 6.6 PWM 开关频率选取原则 .....	230
§ 6.7 PWM 伺服系统动态综合 .....	231
<b>第七章 伺服系统的调试与试验</b> .....	<b>239</b>
§ 7.1 概述 .....	239
§ 7.2 伺服系统静态调试 .....	240
§ 7.3 伺服系统动态调试 .....	242
§ 7.4 典型非线性对系统的影响 .....	247
§ 7.5 机械谐振问题分析 .....	258
§ 7.6 系统性能测试 .....	262
<b>第八章 典型系统设计举例</b> .....	<b>269</b>
§ 8.1 陀螺平台稳定系统设计与实现 .....	269
§ 8.2 船舶减摇鳍电液伺服系统设计与实现 .....	277
§ 8.3 舰载平台 PWM 直流无刷力矩电机位置伺服系统设计 .....	293
<b>第九章 伺服系统电磁兼容性</b> .....	<b>309</b>
§ 9.1 概述 .....	309
§ 9.2 电磁干扰模型分析 .....	310
§ 9.3 抑制电磁干扰的方法 .....	312
§ 9.4 伺服系统电磁兼容设计导则 .....	320
<b>第十章 伺服系统可靠性设计</b> .....	<b>323</b>
§ 10.1 概述 .....	323

---

§ 10.2 伺服系统可靠性计算·····	325
§ 10.3 伺服系统可靠性工程设计导则及方法·····	338
§ 10.4 伺服系统可靠性试验及评定方法·····	349
习题·····	355
<b>参考文献</b>	<b>356</b>



# 第一章

## 绪 论

### § 1.1 伺服控制技术的发展

伺服控制技术是自动化学科中与产业部门族系最紧密,服务最广泛的一个分支。世界上第一个伺服系统由美国麻省理工学院辐射实验室(林肯实验室的前身)于1944年研制成功,这就是火炮自动跟踪目标的伺服系统。这种早期伺服系统都是采用交磁电机扩大机——直流电动机式的驱动方式。这种系统由于交磁电机扩大机的频响差,电动转动部分的转动惯量以及电气时间常数都比较大,因此,响应比较慢。

第二次世界大战期间,由于军事上的需求,先进的武器和飞机的控制系统以及加工制造武器的复杂零件的机床等控制系统,均提出了诸如大功率、高精度、快速响应等一系列高性能要求。当时,若单纯地用电磁元件已很难,甚至根本不可能满足这些要求。而液压系统具有的一些特点正好适合于这种场合,从而促使人们更深入地研究液压技术。在这种背景条件下,液压伺服技术迅速发展起来,到50年代末期和60年代初期,有关电液伺服技术的基本理论日趋完善,从而使电液伺服系统的应用达到了前所未有的高潮,并被广泛地应用于武器、舰船、航空、航天等军事工业部门以及高精度机床控制。它表现出无以伦比的快速性、低速平稳性等一系列优点。因此,60年代的伺服系统中,液压控制有优于直流伺服电动机控制的趋向。有一些由电机拖动的机床给进系统,也相继改成了电液伺服系统。

但是,液压系统存在漏油、维护修理不方便,对油液中的污染物比较敏感,而经常发生故障等缺点。另一方面,机电伺服系统在一些重要元器件的性能上有新的突破。尤其是1957年可控的大功率半导体器件——晶闸管问世,由它组成的静止式可控整流装置无论在运行性能还是可靠性上都开始具有明显的优势,70年代以来,国际上电力电子技术(即大功率半导体技术)突飞猛进,推出了新一代的开和关都能控制的“全控式”电力电子器件,如可关断晶闸管(GTO)、大功率晶体管(GTR)、场效应晶体管(P-MOSFET)等。与此同时,随着稀土磁材料的发展和电机制作技术的进步,相继研制出了力矩电机、印刷绕组电机、无槽电机、大惯量宽调速电机等性能良好的执行元件,与脉宽调制式装置相配合,使直流电源以1~10kHz的频率交替地导通和关断,用改变脉冲电压的宽度来改变平均输出电压,从而调节电动机的转速,大大改善了伺服系统的性能。力矩电机是一种低速电机,调速范围广、低速平稳性好,最低平稳转速很低。这样可以用电动机直接拖动负载而省掉中间减速器,从根本上避免了齿隙、空回所带来的一系列问题。

无槽电机是一种小惯量高速电机,其转动惯量比甚至比同样功率的液压马达还高,其调速范围比同样功率容量的液压马达还宽,加上机电系统维修简便,成本低廉,形成了对电液伺服系统的有力挑战。

大惯量宽调速电动机是一种大扭矩直流伺服电动机,它具有响应快,过载能力强、调速范围宽、在机床伺服进给系统中获得广泛应用。70年代后期,我国引进了这一机电生产制作技术,初步形成了系列产品。

伺服系统隶属于自动控制的一个组成部分,早先是以经典的频率法进行分析和设计的。它是以传递函数、拉普拉斯变换和奈奎斯特稳定理论为基础的。50年代发展了根轨迹法。这种方法是根据闭环传递函数的特征方程的根在复平面上的分布,以及开环传递函数的零点和极点情况来判断增益对系统稳定性、动态特性、带宽等重要指标的影响而进行补偿器的设计。这些方法对于解决多变量时变系统是无能为力的。到60年代发展了现代控制理论,适用于多变量时变系统,为计算机在伺服系统中的应用奠定了理论基础。

随着控制技术的发展,对伺服系统的性能不断提出新的要求。近年来,数字技术的飞速发展,将计算机与伺服控制系统相结合,使计算机成为伺服系统中的一个环节已成为现实。在直流伺服系统中,利用计算机来完成系统的校正、改变伺服系统的增益、带宽、完成系统的管理、监视等任务,使系统向智能化发展。

随着大规模集成电路的飞速发展,以及计算机(特别是微处理机)在伺服控制系统中的普遍应用,近年来,构成伺服控制系统的重要组成部分——伺服元件发生了巨大的变革,并且向着便于计算机控制方向发展。为提高控制精度,便于计算机联接,位置、速度等测量元件趋于数字化、集成化。即使是模拟式的伺服元件亦在向高精度、低噪声的方向发展。

目前,用大功率晶体管 PWM 控制的永磁式直流伺服电动机驱动装置,是高精度伺服控制领域应用最为广泛的驱动形式。这种装置能实现宽范围的速度和位置控制,较常规的驱动方式(交磁电机扩大机驱动、晶体管线性放大驱动、电液驱动、晶闸管驱动)具有无可比拟的优点。

总而言之,微电子学的突飞猛进、大规模集成电路的成批生产、微型计算机的广泛应用,使得伺服技术获得迅猛发展。其中微处理机,使现代控制理论在伺服系统中的应用得到有力的支持,架起了现代控制论通向伺服系统领域的桥梁,大大改善了控制性能。而电力电子学的最新成就,又促进了伺服系统的发展。展望未来,新器件、新理论、新技术必将驱使伺服系统朝“智能化”方向发展,赋予人工智能特性的伺服系统以及智能控制器在近几年内必将获得广泛应用。

## § 1.2 伺服系统的组成原理

为了说明伺服控制系统的组成,介绍两个实际的伺服控制系统。图 1.1 是仿型铣床随动系统的示意图。图中, $r(t)$  为模杆的位移, $c(t)$  是铣刀杆的位移。希望铣刀的运动  $c(t)$  完全复现模杆的运动  $r(t)$ 。使得加工出来的零件尺寸和模型一样。

图 1.2 画出了这个系统的原理方框图。由于系统有惯性,当  $r(t)$  随时间变化时, $c(t)$  不可能完全和  $r(t)$  相同,而存在误差  $e(t)$ ,  $e(t) = r(t) - c(t)$ 。这一误差通过测量装置(如电位计  $R_{w1}$ 、 $R_{w2}$ )转换为误差电压,误差电压信号经过放大器、校正装置和功率放大器放大后加到执行电机的输入端,使执行电机转动。通常执行电机通过减速器驱动控制对象,朝着消除误差的方向运动。只要输出量  $c(t)$  和输入量  $r(t)$  不相等,执行电机就会产生转动来消除误差,一直到误差电压等于零,执行电机停止转动。这时控制系统实现了输出量  $c(t)$  复现输入量  $r(t)$  的运动。

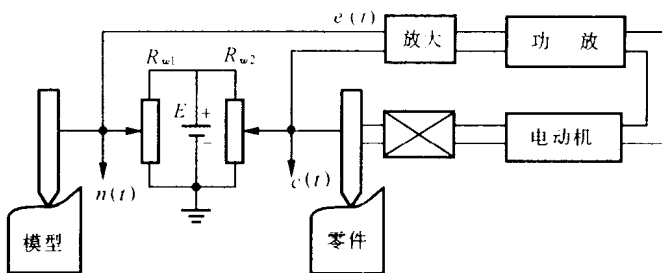


图 1.1 仿型铣床随动系统示意图

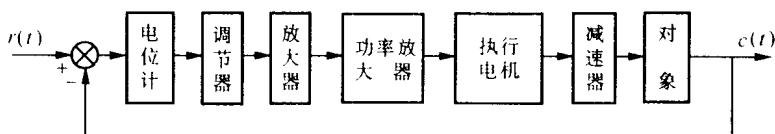


图 1.2 随动系统方框图

图 1.3 是工业控制中的龙门刨床速度控制系统。通常,当龙门刨床加工表面不平整的毛坯时,负载会有很大的波动。为了保证加工精度和表面粗糙度,一般不允许刨床速度变化过大,因此必须对速度进行控制。图中,刨床主电动机 SM 是电枢控制的直流电动机,其电枢电压由晶闸管整流装置 KZ 提供,并通过触发器 CF 的控制电压  $u_k$ , 来改变电动机的电枢电压,从而改变电动机的速度(即被控量)。测速发电机 TG 是测量元件,用来测量刨床速度并给出与速度成正比的电压  $u_t$ 。然后,将  $u_t$  反馈到输入端并与给定电压  $u_0$  反向串联便得到偏差电压  $\Delta u = u_0 - u_t$ 。在这里,  $u_0$  是根据刨床工作情况预先设置的速度给定电压,它与反电压  $u_t$  相减便形成偏差电压,因此,  $u_t$  称为负反馈电压。一般偏差电压比较微弱,故需经放大器 FD 放大后才能成为触发器的控制电压。在这个系统中,被控对象是电动机,触发器和整流装置起了执行控

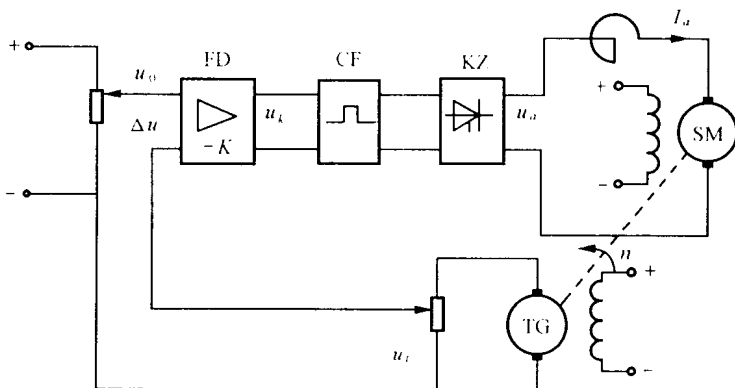


图 1.3 龙门刨床速度控制系统原理图

制动作的作用,故称为执行元件。现在具体分析一下刨床速度控制的过程。当刨床正常工作时,对于给定电压  $u_0$ ,电动机必须有确定的速度给定值  $n$  相对应,同时也有相应的测速发电机电压  $u_f$  以及相应的偏差电压  $\Delta u$  和触发器控制电压  $u_k$ 。如果刨床负载变化,例如增加负载,将使速度降低而偏离给定值,同时,测速发电机  $u_f$  将相应减小,偏差电压  $\Delta u$  将因此增大,触发器控制电压  $u_k$  也随之增大,从而使晶闸管整流电压  $u_a$  升高,逐步使速度回升到给定值附近。另外,如果调整给定电压  $u_0$ ,便可改变刨床工作速度。因此,在图 1.3 速度控制系统中,既可以在不同的负载下自动维持刨床速度不变,也可以根据需要自动地改变刨床速度,其工作原理都是相同的。它们都是由测量元件(测速发电机)对被控量(速度)进行检测,并将它反馈回比较电路,与给定值相减而得到偏差电压(即速度负反馈),经放大器放大,变换后,执行元件(触发器和晶闸管整流装置)便依据偏差电压的性质对被控量(速度)进行调节,从而使偏差消失或减小到允许范围。图 1.4 是刨床速度控制系统的方框图。

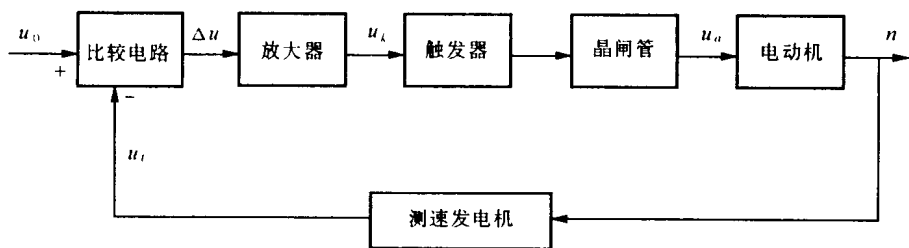


图 1.4 刨床速度控制系统方框图

由以上两个实际伺服系统工作原理可以看到,组成伺服系统的元部件按职能可分为以下几类。

### 1. 测量元件

其职能是检测被控制的物理量,在随动系统中被测量是角度或位移,而在速度控制系统中被测量是转速或角速度。如果被测量是非电量参数,一般必须转换为电量。常见的测量元件有电位计、测速发电机、测速桥、自整角机或旋转变压器。对于要求更高的测量精度时,可以用数字测速元件——光电脉冲测速机来测速或用数字式轴角编码器测量角位移。

### 2. 给定元件

其职能是给出与期望的被控量相对应的系统输出量(即参考量),例如图 1.3 中给出电压  $u_0$  的电位器。

### 3. 比较元件

其职能是把测量元件检测的被控量实际值与给定元件给出的参考量进行比较,求出它们之间的偏差。常用的比较元件有差动放大器、机械差动装置、电桥电路等。图 1.3 中,由于给定电压  $u_0$  和反馈电压  $u_f$  都是直流电压,故只需将它们反向串联便可得到偏差电压。

### 4. 放大元件

其职能是将比较元件给出的偏差信号进行放大,用来推动执行元件控制被控对象。电压偏差信号可用电子管、晶体管、集成电路、晶闸管等组成的电压放大级和功率放大级加以放大。

### 5. 执行元件

其职能是直接推动被控对象。用来作为执行元件的有阀、电动机、液压马达等。

#### 6. 校正元件

也叫补偿元件,它是结构或参数便于调整的元件,用串联或反馈的方式连接在系统中,以改善系统的动态性能,减小或消除系统的稳态误差。最简单的校正元件是由电阻、电容组成的无源或有源网络,复杂的则用电子计算机。

## § 1.3 伺服系统技术指标

工程上对伺服控制系统的技术要求是很具体的。这些要求规定了所要求设计的系统的各种性能指标,同时也是设计该系统的基本依据。对系统的技术要求一般以《设计任务书》或者以《技术规格书》的形式提出。由于实际伺服系统有着各种不同的用途和工作环境,因而其技术要求也不尽相同。我们不可能一一量说明每种伺服系统的技术要求;但可以用一两个典型系统来说明这些技术要求的基本内容,同时还可以定性说明对一般伺服系统的共同的技术要求。

### 一、对调速系统的基本技术要求

①对被控对象运动速度和运动加速度的要求,指被控对象应能达到的最高转速  $n_{\max}$  (r/min)、最高角速度  $\Omega_{\max}$  (rad/s)、最高平稳线速度  $v_{\max}$  (m/s)以及被控对象平滑运行时的最低转速  $n_{\min}$  (r/min)、最低角速度  $\Omega_{\min}$  (rad/s)、最低平稳线速度  $v_{\min}$  (m/s)。有时用调速范围  $D$  表示:

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{\Omega_{\max}}{\Omega_{\min}} = \frac{v_{\max}}{v_{\min}} \quad (1.3.1)$$

②速度调节的连续性和平滑性要求,即系统带动负载在调速范围内,是有级调速,还是无级调速;系统是可逆的,还是不可逆的。

③对动态性能的要求,也就是对阶跃信号输入下系统的响应特性。系统处于稳态时,在阶跃信号作用下系统的最大超调量  $\sigma\%$ 、过渡过程时间  $t_s$  以及振荡次数等。另一种指标是在正弦信号输入作用下,控制系统的通频带和振荡度等,第三种指标是提出控制系统的剪切频率、相角裕度和增益裕量。

④静差率  $\delta$  或转速降  $\Delta n$  (或  $\Delta\Omega, \Delta v$ )。转速降是指控制信号一定的条件下,系统理想空载转速  $n_0$  与满载转速  $n_R$  之差即

$$\Delta n = n_0 - n_R \quad (\text{或 } \Delta\Omega = \Omega_0 - \Omega_R) \quad (1.3.2)$$

静差率是指控制信号一定时,  $\Delta n$  与  $n_0$  的百分比,即

$$\delta = \frac{n_0 - n_R}{n_0} \times 100\% = \frac{\Delta n}{n_0} \times 100\% \quad (1.3.3)$$

⑤负载扰动作用下系统的响应特性,负载扰动对系统动态过程的影响是调速系统的重要技术指标之一。衡量抗扰能力一般取大转速降(升)  $\Delta n_{\max}$  与响应时间  $t_{sf}$  来度量。

⑥对元件参数变化的敏感性要求,指控制系统本身各项元件参数的变化所引起的误差。通常如不提出要求,则应包含在系统精度和稳定性要求之内。

⑦对系统工作制(有长期连续运行、间歇循环运行和短时间运行之分)、MTBF、可靠性以及使用寿命的要求。

⑧对系统的环境温度、湿度、三防(防潮、防腐蚀、防辐射)、抗振动、抗冲击的要求。

⑨对系统的体积、重量、结构外形、安装特点等的限制。

⑩对系统生产成本、元部件通用性、标准化程度、能源利用率、维护使用以及对系统电源条件(电源种类、规格、容量)等的限制。

## 二、对随动系统的基本技术要求

①系统静态误差  $e_0$  (简称系统静差),通常指系统输入指令为常值时,输入与输出之间的误差。位置控制系统一般设计成无静差系统。理论上系统静止协调时没有位置误差。实际上,系统的测量元件(亦称敏感元件)的分辨率有限,系统输出端承受干摩擦造成死区,这些均可造成系统静误差。

②速度误差  $e_v$  和正弦跟踪误差  $e_{\sin}$ ,当位置控制系统处于等速跟踪状态时,系统输出轴与输入轴之间瞬时位置误差(角度或角位移)称为速度误差  $e_v$ 。当系统作正弦摆动跟踪时,输出轴与输入轴之间瞬时误差的振幅值称为正弦跟踪误差  $e_{\sin}$ 。

③最大跟踪角速度  $\Omega_{\max}$ 、最低跟踪角速度  $\Omega_{\min}$ ,最大跟踪角速度是指系统跟踪误差不超过允许值时所达到稳定运行的最大输出角速度。最低跟踪角速度是指系统控制对象作匀速跟踪时所能达到的最低平稳角速度。

④最大跟踪角加速度  $\epsilon_{\max}$ , (线加速度  $a_{\max}$ ),是指系统跟踪误差不超过允许值时,系统输出轴所能达到的最大角加速度。

⑤速度品质系数  $K_v$  和加速度品质系数  $K_a$ ,速度品质系数是指输入斜坡信号时,系统稳态输出角速度  $\Omega_0$  (或线速度  $v_0$ ) 与速度误差  $e_v$  的比值:

$$K_v = \Omega_0 / e_v \quad (1.3.4)$$

而加速度品质系数  $K_a$  是以抛物线函数信号(等加速度信号)输入时,系统稳态角加速度  $\epsilon_0$  (或线加速度  $a_0$ ) 与其对应的系统稳态误差  $e_a$  的比值:

$$K_a = \epsilon_0 / e_a \quad (1.3.5)$$

⑥振荡指标  $M_r$  和频带宽度  $\omega_b$ ,随动系统闭环幅频特性  $A(\omega)$  的最大值  $A(\omega_0)$  与  $A(0)$  (由于随动系统为无静差系统,故  $A(0) = 1$ ) 的比值,称之为振荡指标  $M_r$ 。当闭环幅频特性  $A(\omega_b) = 0.707$  时,所对应的角频率  $\omega_b$  称之为系统的带宽。

⑦系统对阶跃信号输入的响应特性,当系统处于静止协调状态(零初始状态)下,输入阶跃信号时,系统的最大允许超调量  $\sigma\%$ 、过渡过程时间  $t_s$  和振荡次数  $N$  均应有具体限制。

⑧等速跟踪状态下,负载扰动引起的系统响应特性,系统作等速跟踪时,负载扰动(阶跃或脉冲扰动)所造成系统最大瞬时误差  $e_{mf}$  和过渡过程时间  $t_{fj}$  均应有具体要求。

此外,对调速系统的⑦、⑧、⑨、⑩项要求,对随动系统也适用。

## § 1.4 伺服系统设计内容与步骤

伺服系统的服务对象是各种各样的,要概括出一种通用的行之有效的设计方法是困难的。但每个伺服控制系统都是为某一具体的控制对象服务的。因而,按照对象的特点和需要,制订出技术条件,以作为设计系统的依据是可行的。一般来说,系统的设计工作大体上可归纳为以下几个方面。

### 一、系统方案的制订与稳态设计

系统总是由若干元部件组合而成。因此,系统设计师必须熟悉市场上供应的元器件和材料的情况,索取新产品资料,了解国内加工工艺和检验技术水平,追踪新元器件、新工艺和新技术的发展,密切注视电力电子学领域的发展动态。这样,才有可能制订出能付诸实施的、合理的设计方案。

经过调查研究,在充分掌握上述信息的基础上,结合设计技术要求,制订出系统的结构方案。具体地讲,要选定系统各主要元部件的形式,确定各部件的接口方式、系统控制方式,确定系统的主干线路、辅助线路及电源型式。同时,进行必要的稳态计算(稳态计算包括:执行元件的计算和选择,功率放大器的选择和计算,敏感元件确定,中间控制电路的确定、传动装置设计等),检验各部件之间输入、输出的功率匹配以及精度,解决信号的有效传递、综合叠加、信号形成与变换,以及级间耦合匹配等问题,作出定量的计算和选择。

拟定系统主干线(指模拟控制系统)时,要为引入校正补偿装置留有余地,尽量照顾到改善动态性能及综合校正的方便。

### 二、建立系统的数学模型

当系统的控制对象,驱动装置,功率转换电路及其元器件、线路参数初步确定之后,便可着手建立系统的动态数学模型,亦即推导系统开环或闭环传递函数或建立系统的状态方程。在推导过程中,需作适当的简化和近似线性化处理。必要时还需对有关元部件的特性进行实验测试,以获得必要的数据。目前,也可用辨识的方法对系统建模。

总之,数学模型应尽量反映该系统的实际,因为它是进行系统动态设计计算的基础。为了便于工程设计计算,又不宜将模型搞得过于复杂。

### 三、系统动态分析综合

动态分析和综合是为了研究系统的动态品质,决定校正装置的形式和参数以及考虑提高动态品质的其它措施,使得系统的动态性能符合设计指标。为此,必须根据技术要求合理地选择设计方法和相应的计算指标。

综合校正装置一般应与它在系统中所处部位、联接形式全面考虑,并要检验校正后系统的动态品质,必要时进行仿真试验。

### 四、模拟试验

系统设计方案经过稳态和动态计算之后,如果技术指标均满足要求,便可以确定下来。否

则,须作局部修改、返工和调整,甚至需要重新制订方案。鉴于设计计算总是近似的,因此,结果往往与实际情形有较大出入。为了在样机试制之前能初步检验一下设计计算的正确与否,用计算机进行模拟是一种有效的方法。采用缩小比例的实物模拟负载试验(除了负载是用惯性轮和摩擦盘外,其余部件都是系统实物),基本上可以逼近实际系统,它可以有效地指导具体系统的制造、安装和调试,减少盲目性。



## 第二章

# 伺服系统误差分析

### § 2.1 概 述

伺服系统提出的一个共同要求是被控对象(角度、位移、速度)按指定的规律变化。但是,任何一个实际的伺服系统,在满足系统稳定的前提下,都不能完全做到这一点,而总是存在一定的误差(也称控制精度)。伺服系统在运行过程中的误差是多种多样的,但归结起来,误差源于以下几个方面。

#### 1. 元件误差

伺服系统由各种控制元件组成,如测量元件、执行元件等,而每种元件都有自身的误差。由于元件在系统结构中所处的位置不同,它们本身的误差对系统误差影响程度也不同。在设计系统选择元件时,往往无法知道这些元件的确切误差,一般只知道误差的极限范围。在本章中着重讨论测量元件的误差分析和计算方法。

#### 2. 原理误差

原理误差是指在控制机理方面必然产生的误差,它与系统的结构及控制作用的性质有关。例如,伺服系统多为反馈系统,反馈控制系统中,它能产生控制作用的原因只有偏差信号 $\epsilon(t)$ ,而偏差信号本身就是系统误差。另外,系统在外部干扰作用下也会产生误差。原理误差分为确定型和随机型两类。确定型的原理误差就是在确定型的输入信号和扰动作用下产生的误差;而随机型的误差则是指在随机输入和随机扰动下系统产生的误差。这两类系统的原理误差的分析和计算将在§ 2.3、§ 2.4及§ 2.5中详细介绍。

#### 3. 环境变化引起的误差

环境的变化,例如温度、压力的变化,振动、冲击、腐蚀以及元件的自然老化等,都会引起元件性能参数发生变化而影响系统产生误差。

伺服系统设计时,首先就遇到如何确定精度问题。本章将从分析系统误差的主要来源及其计算方法、元件误差的类型及其对系统误差的影响出发,进一步阐明在伺服系统设计初期如何考虑精度,如何进行误差的分配。

在分析系统误差时,假定系统的结构是已知的。一个确定系统能传递和转化有效的控制信息,也能传递和转化干扰信息。如果我们把系统内各元件的误差看成干扰信息,那么,它对系统精度的影响也就不难分析了。

在讨论系统的各种误差的定量分析和计算之前,首先讨论一下系统各环节对输入信号、干扰信号引起的误差传递和归化。设有如图 2.1 所示结构的系统,输入为 $R(s)$ ,输入干扰噪声为 $N_0(s)$ ,输出为 $C(s)$ ,误差为 $E(s)$ ,各级的等效扰动信号分别为 $N_1(s)$ 、 $N_2(s)$ 、 $N_3(s)$ 。因为对单位反馈系统而言,总的误差就是 $R(s)$ 、 $N_0(s)$ 、 $N_1(s)$ 、 $N_2(s)$ 、 $N_3(s)$ 所引起的误差