

王耀德 冷增祥 编

电气传动 控制系统

DIANQICHUANDONG
KONGZHIXITONG

东南大学出版社

内 容 简 介

本书是参照全国工业电气自动化专业教材指导委员会有关《自动控制系统》教材大纲编写的，主要讲授电气传动各类系统的基本控制规律和设计方法，也简要地介绍了电气传动系统的新理论，其特点是取材广泛、内容新颖。

全书共分六章，分别介绍电气传动控制系统的构成、模拟和数字控制系统的设计方法，直流和交流电气传动控制系统，位置随动和数控伺服系统，高精度稳速系统和张力控制系统，以及电气传动的最优和自适应控制系统等。

本书可作为工业电气自动化专业本科教材及其相近专业的本科和专科教材与教材参考书，也可供从事电气传动控制技术的科研和生产的广大科技人员阅读和参考。

责任编辑 雷家煜

责任校对 陈东方

电气传动控制系统

王耀德 冷增祥 编

东南大学出版社出版

南京四牌楼2号

江苏省新华书店发行 江宁县印刷厂印刷

开本787×1092毫米1/16 印张21 字数510千字

1990年6月第1版 1990年6月第1次印刷

印数：1—1500册

ISBN7—81023—254—1

TP·19

定价：4.15元

前 言

电气传动是以电能作为动力的机械和设备的一个组成部分。电气传动的控制随着整个工业生产和科学的进步而不断发展着。当今电气传动控制技术又面临一场重要的变革,它表现在:交流电动机传动系统正在向由直流电动机传动系统所垄断的高性能系统挑战,电气传动交流化的时代即将来临;现代控制理论不仅为解决复杂控制问题提供新概念和新方法,而且进一步揭示了控制系统的内在规律;这些复杂控制规律的实现,又离不开以微机为核心的全数字控制技术;以微机为核心同时具有控制和监视功能的新一代电气传动系统正在逐步形成和发展。

为适应上述电气传动控制技术发展动向,我们参照全国工业电气自动化专业教材指导委员会制订的《自动控制系统》课程大纲,在多年教学工作基础上编写成这本《电气传动控制系统》。编写本书时,我们着重考虑了如下几点:如果将交流调速系统另列课程与直流电气传动控制系统分开,已经不符合交流传动系统发展潮流,为此对直流和交流电动机传动控制系统采取并重的做法;只讲时间连续的模拟控制系统不讲数字控制系统将有失偏颇,以讲前者为主适当讲一些后者已成必要;现代化的生产已要求电气传动向综合自动化系统发展,为此除了介绍单电动机系统外,还应介绍多电动机系统和数字程序控制的概念;由于现代控制理论日益为人们掌握,在电气传动控制领域适当反映这一新理论的应用,已是摆在本专业工作者面前的课题。

如何在有限篇幅内将如此丰富的内容组织起来又易为读者理解,确是一件比较困难的任务。我们在精选内容上作了认真的努力,力图实现所述目标。因此本书可以作为工业电气自动化专业本科生教材,而前四章基本部分可以作为专科教材,也可以作为自动控制、电气技术等相近专业的教学参考书。由于本课程与先修课程《电机及拖动基础》、《电力电子技术》、《自动控制理论》以及相关课程《计算机控制技术》、《自适应控制》等有密切联系,书中部分内容可视具体情况选讲。

本书第一、三、四、六章由王耀德执笔,第二、五章由冷增祥执笔;王耀德统稿;全书由东南大学赵家璧审阅。本书出版过程中得到东南大学自动控制系、热能研究所以及教务处领导的大力支持。在编写过程中我们参阅了本校和兄弟院校许多同志发表的论文或著作,一并谨致谢意。还承黄春生同志为绘制全书图稿付出了辛勤的劳动。

由于编者业务水平和教学经验有限,错误和不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

1989.3

绪 论

电气传动控制系统广泛用于机械、钢铁、矿山、冶金、化工、石油、纺织、造纸、水泥、船舶、铁路等行业，这些行业中绝大部分生产机械都采用电动机作原动机。在我国，据统计，在电网总的负荷中，电机用电量占50%左右，因此，有效地利用电动机，提高其运行性能，并使电气传动控制系统进一步向前发展，对国民经济具有十分重要的现实意义。

电气传动控制系统属于电动机的自动控制技术，这门技术在近二十多年中获得迅速发展，特别是由于功率半导体器件晶闸管的发展，使电气传动控制技术出现新的面貌。七十年代初出现的微型计算机，使电气传动控制技术再次发生巨大变革，使用微机控制不仅可以简化控制硬设备，而且可以加入人工智能对系统运行状态进行诊断，这对电气传动控制系统的发展产生了深远的影响。因此说，电气传动控制技术已进入一个崭新的发展阶段，它以电动机为对象、以电力半导体变流器件为强弱电的媒介、以自动控制理论为指导、以电子技术和计算机控制及辅助设计为手段，并与检测技术和数据通讯技术相结合，构成一个具有相对独立性的科学技术。相应地，电气传动控制装置的制造和研究也已形成一个特定的生产部门，在生产设备和过程自动化的发展中，发挥着日益重要的作用。鉴此，我们正面临着这样一个形势，即如何跟上这门综合性的、在蓬勃发展的技术潮流。

从三十年代的闸流管、引燃管，而后是磁放大器、磁饱和电抗器作为静止变流器，形成第一代直流和交流电动机传动控制系统。二次世界大战中发展起来的反馈控制理论，曾经有力地促进这类系统的发展。接着，现代电气传动控制技术又随着电力半导体器件、微电子器件以及微型计算机发展而发展。在二十多年的发展过程中，半导体器件的功率范围逐渐扩大，性能不断提高，使电气传动控制装置的结构更为紧凑，单位安装面积的容量更大、可靠性更高。同时，由于微型计算机正以非常迅猛的势头朝着普及化和社会化发展，运算速度和位数不断提高，各种优化控制规律的实现不再是可望而不可及的了。值得注意的是，集成电路技术已经能够将功率变换器和信号处理器件综合在一起，形成一些新型的合成器，如绝缘栅晶体管IGT是作驱动用的场效应管MOSFET和双极型晶体管的合成，它既有MOSFET高输入阻抗又有双极型器件的导通压降低的特点。另一种新型合成器件是MOS控制晶闸管，即用MOSFET控制晶闸管的开通和关断。最近又推出一项发展技术，是使功率集成器件包含检测信号和处理器件，既可以完成功率变换、如交-直、直-交、直-直和交-交变换，又能直接与速度、位置检测器相连，以至再加上过压、过流保护和温度控制功能。如果能将这些功能综合在一起，则一个单片微机系统就可以上与中心计算机相接，下与传动电动机相连，使电气传动控制装置发展到一个更为高级的水平。

电气传动控制系统近年来除了在传统的工业传动系统、仪器仪表的传动系统中应用外，在机器人、数控机床、计算机外部设备以及家用电器设备中的应用也获得巨大的效益。机器人的出现是对人工制造技术的一种挑战，工业机器人已从从事简单的工作，如搬运、加工等，发展到能从事复杂的工作，如油漆、焊接、安装、检修等。从事的工作愈复杂，对电气

传动控制系统性能要求也愈高。此外,用于非生产领域的机器人的数量正日益增加,如核电站、水下作业、空间探险以及医疗服务、社会福利等。

电气传动控制系统可以作为独立的单机系统,也可以作为综合自动化系统的基础单元。综合自动化系统的控制任务大体上可分为三个控制级:电气传动装置控制级、过程控制级和过程管理级。电气传动装置通过传动机械和加工对象相互联系或连接,它的控制量由上一级过程控制器来操纵。各分部的过程控制装置又由协调整个过程的管理装置来控制。这种多级系统的基本结构已应用于计算机控制金属加工和金属处理工业系统、以及计算机控制轧钢机系统和其它一些自动控制系统中。

总之,随着现代新技术的蓬勃兴起,电气传动控制系统发展极为迅速,控制手段不断更新,控制方式日趋优化,新的控制理论不断推出,这一切都朝着一个总的目标:保证生产过程优化、产品质量提高、劳动生产率增长、能源和原材料消耗降低,安全可靠加强以及劳动条件改善。因此,电气传动控制技术和装置已成为现代化生产和生活中必不可少的一个重要组成部分。

诚然,作为一本教材不可能在有限的篇幅内,包罗所有的内容,它应着重基础理论和基本知识,同时注意技术发展的动向,本书就是基于这一想法而组织的。书中共分六章,以讲授电气传动系统的各种控制规律为主,适当介绍一些系统的具体线路。

第一章是讨论构成电气传动系统的基本原理,首先扼要阐述系统的构成,强调非线性系统的线性化数学描述的概念,并介绍数学描述线性化的方法。其次阐述电气传动模拟控制系统动态校正中通用的“模最优”和“对称最优”校正方法;同时考虑到电气传动计算机控制系统日益增多,也介绍了数字控制系统的规范校正方法。由于按从属调节原理构成的系统(又简称为双闭环调节系统),目前在电气传动控制中应用最为普遍,故专门加以论述。这些内容都是自动控制系统的基本原理,了解这些概念,才能更好地分析和设计各种电气传动控制系统。

因为电动机是电气传动控制系统的对象,所以在第二和三两章一开始就较为详细讨论直流和交流异步电动机的数学模型。然后以差不多相同的篇幅来讨论直流它励电动机和交流电动机的各种型式的速度控制系统。虽然到目前为止,直流传动装置在工业应用中仍占主要地位,但交流传动装置的应用正迅速增长,已进入推广交流传动控制系统的时代。因此,本书对直流和交流传动控制系统并重,改变过去只讲直流不讲交流或者将直流和交流传动控制系统分开讲的做法。

第二章着重讨论有电流内环和速度外环的从属控制结构的直流传动系统,而在第三章中主要讲频率控制和串级控制的交流异步电动机传动系统,只简要地提及交流同步电动机速度控制系统。

第四章是讲位置随动系统,系统的输出量不是电动机转速而是转角,因此它既与电动机的速度控制有关,又有其特定的性能。通过定位和跟随控制位置随动系统来阐明这类系统的基本概念,进而结合在数控机床上的应用,介绍一些典型的数控伺服系统。为了协调控制两个以上的坐标位置,必须按一定程序控制相关的位置随动系统,为此扼要地介绍了程序控制的基本概念。这一章的最后一节是介绍交流伺服系统。

第五章对电动机速度稳定精度作进一步讨论和分析。由于速度反馈控制系统中,稳速精

度直接决定于速度给定、测量及偏差信号形成方式，所以专门设一小节围绕这一关键问题展开讨论。在介绍单电动机的数字模拟和数字式高精度稳速系统结构之后，进而讨论多电动机的速度比值控制及其相关的张力控制系统。

第六章的内容将反映应用现代控制理论于电气传动控制系统中所取得的最新成果，主要讲两个方面，一是介绍电气传动系统的最优控制规律和电动机最小损耗控制方法；二是介绍电气传动的自适应控制系统。尽管自适应控制理论刚刚开始用于电气传动系统，然而发展趋势喜人，因为这在机床和机器人传动系统中特别有用。

本书可作为高等学校工业电气自动化专业及其相近专业的教材，也可供厂矿、设计和研究单位从事电气传动控制工作的工程技术人员参考。

目 录

绪 论

第一章 电气传动自动控制系统的基本原理 (1)

1-1 电气传动控制系统的构成 (1)

1-2 电气传动控制系统的数学描述 (3)

1-2-1 非线性系统数学描述及其线性化 (3)

1-2-2 线性系统的数学描述模式 (5)

1-2-3 系统数学描述的标么化 (7)

1-3 模拟控制系统的规范校正方法 (7)

1-3-1 单环系统的规范校正 (8)

1-3-2 含非线性参数的闭环校正 (16)

1-3-3 单环系统的降阶计算和校正 (19)

1-3-4 中间变量约束和从属调节原理 (21)

1-4 数字控制系统的规范校正方法 (24)

1-5 受控对象的状态观测器 (30)

第二章 直流电动机的速度控制系统 (37)

2-1 直流它励电动机的数学模型 (38)

2-1-1 调压时直流它励电动机的数学描述 (38)

2-1-2 调压调磁时直流它励电动机的数学描述 (40)

2-1-3 直流它励电动机的线性化结构图 (41)

2-2 晶闸管变流器的特性 (42)

2-2-1 电流连续时晶闸管变流器特性 (43)

2-2-2 电流断续时晶闸管变流器特性 (45)

2-2-3 晶闸管变流器的动特性 (49)

2-3 单环速度控制系统 (52)

2-3-1 有静差单环速度控制系统 (52)

2-3-2 无静差单环速度控制系统 (59)

2-4 有从属电流环的直流电动机控制系统 (64)

2-4-1 系统的工作原理 (64)

2-4-2 系统的动态校正 (67)

2-4-3 速度调节器饱和时的起动超调 (70)

2-5 直流电动机速度的双域控制系统 (71)

2-5-1 系统的工作原理 (71)

2-5-2 双域控制系统的校正 (74)

2-5-3 与双域控制有关的非线性补偿 (76)

2—6	可逆的速度控制系统	(79)
2—6—1	静态环流分析	(79)
2—6—2	有环流可逆速度控制系统	(83)
2—6—3	错位无环流系统	(88)
2—6—4	逻辑无环流系统	(94)
2—7	直流电动机双闭环系统的计算机控制	(99)
2—7—1	电流环控制	(101)
2—7—2	速度环控制	(108)
第三章	交流电动机的速度控制系统	(111)
3—1	异步电动机在控制定子频率和电压时的数学描述	(111)
3—1—1	基本方程	(111)
3—1—2	简化的传递函数	(117)
3—2	笼型异步电动机的频率控制系统	(121)
3—2—1	控制定子频率时异步电动机的稳态特性	(121)
3—2—2	晶闸管变频器	(124)
3—2—3	用电压型变频器的频率控制系统	(127)
3—2—4	用电流型变频器的频率控制系统	(133)
3—3	用PWM变频器的异步电动机频率控制系统	(139)
3—3—1	谐波分析和脉动转矩	(140)
3—3—2	PWM型逆变器的基本电路及频率控制系统	(145)
3—3—3	PWM型逆变器的微机控制	(151)
3—4	绕线型异步电动机的串级速度控制系统	(156)
3—4—1	异步电动机亚同步串级速度控制系统的基本特性	(158)
3—4—2	异步电动机亚同步串级闭环速度控制系统	(167)
3—5	绕线型异步电动机速度控制系统的其它型式	(170)
3—5—1	有转子斩波器的速度控制系统	(170)
3—5—2	调节定子电压的速度控制系统	(172)
3—6	异步电动机的矢量变换控制系统	(176)
3—7	交流同步电动机的速度控制系统	(184)
3—7—1	它控式同步机变频速度控制系统	(185)
3—7—2	无换向器电机的速度控制系统	(186)
第四章	位置随动系统和数控伺服系统	(192)
4—1	概述	(192)
4—2	定位控制的位置随动系统	(194)
4—3	跟随控制的位置随动系统	(199)
4—3—1	跟随控制作用的误差	(199)
4—3—2	用复合控制提高跟随精度	(201)
4—3—3	双通道的位置随动系统	(204)
4—3—4	有扰动补偿的位置随动系统	(206)
4—4	位置检测	(211)

4—5	脉宽调制型的晶体管斩波器	(218)
4—5—1	PWM斩波器的工作原理	(218)
4—5—2	PWM斩波器的控制电路	(222)
4—6	数控机床的伺服系统	(225)
4—6—1	数控伺服系统结构	(225)
4—6—2	数字比较的位置伺服系统	(229)
4—6—3	相位比较的位置伺服系统	(233)
4—6—4	点位控制的数字伺服系统	(234)
4—7	数控机床伺服系统的程序控制	(235)
4—7—1	运动轨迹	(235)
4—7—2	插补器	(237)
4—8	交流伺服系统	(244)
4—8—1	开环的步进电动机伺服系统	(244)
4—8—2	闭环的交流伺服系统	(249)
第五章	电气传动的稳速系统和张力控制系统	(253)
5—1	电气传动稳速系统的分类和构成	(253)
5—1—1	稳速系统的分类	(253)
5—1—2	速度偏差信息的处理	(253)
5—2	单电动机的稳速控制系统	(261)
5—2—1	数字模拟式高精度稳速系统	(262)
5—2—2	鉴相式高精度稳速系统	(265)
5—2—3	微机控制的高精度稳速系统	(266)
5—3	多电动机的稳速系统	(269)
5—3—1	多电动机传动的工艺设备特点	(269)
5—3—2	多电动机的速度比值控制	(271)
5—3—3	多电动机的数字模拟控制系统	(273)
5—4	实现张力控制的电动机传动系统	(274)
5—4—1	张力的测量和控制	(274)
5—4—2	张力控制中的动态转矩	(276)
5—4—3	调节电动机功率的张力控制系统	(277)
5—4—4	保持电枢电流恒定的张力控制系统	(279)
第六章	电气传动的最优控制和自适应控制系统	(284)
6—1	电气传动的最优控制系统	(284)
6—1—1	电气传动最优控制的提出	(284)
6—1—2	最小损耗控制	(285)
6—2	直流和交流电动机的最小损耗控制	(291)
6—2—1	直流电动机的最小损耗控制	(291)
6—2—2	异步电动机的节能最优控制	(296)
6—3	电气传动自适应控制系统的基本原理	(303)
6—3—1	概述	(303)

6—3—2	确定系统的频率和时间特性.....	(304)
6—3—3	辨识的自适应观测器.....	(305)
6—4	电气传动的非搜索自适应控制系统.....	(308)
6—4—1	模型参考自适应控制系统.....	(308)
6—4—2	使开环频率特性稳定的自适应控制系统.....	(310)
6—4—3	比较偏差信号高频分量和低频分量构成的自适应控制系统.....	(311)
6—4—4	有辨识观测器的自适应控制系统.....	(314)
6—5	电气传动的搜索自适应控制系统.....	(318)
6—5—1	搜索自适应控制系统的组成原理.....	(318)
6—5—2	自适应控制系统中搜索极值的方法.....	(318)
6—5—3	均方误差最小的自适应控制系统.....	(321)

第一章 电气传动自动控制系统的基本原理

1—1 电气传动控制系统的构成

电气传动控制系统是以电动机为受控对象，对生产机械按工艺要求进行控制的电气传动系统。电气传动控制系统的基本部分可以包括电动机、控制电器、检测元件、功率半导体器件和处理信息的微电子器件等。如果采用数字控制方案，还可能包含微型计算机。一个大型的传动控制系统有许多台电动机，往往要用多级微型计算机进行控制，还有通讯设备和屏幕显示器等。

电气传动控制系统是以实现一种预定的自动控制功能为目的，以满足生产工艺和过程的要求，并达到最优的技术经济指标。因此，这类系统总是整个生产设备中的重要组成部分之一，它的性能和质量将在很大程度上影响到产品的质量、产量、生产成本和工人劳动条件。

电气传动控制系统从结构上可以分为开环系统和闭环系统。开环系统没有反馈，只有采用同步电动机时，在稳态时电动机转速才严格地与输入电源频率成正比。而在一般的开环控制的传动系统中，尽管系统输入的控制信号保持不变，但在某种扰动作用下，会使输出量偏离给定值。图 1—1 中示出一个由晶闸管变流器 T 、电动机 M 和工作机械 WM 组成的电气传动开环控制系统，其中工作机械 WM 包含传动机构 G 和执行机构 SM 。通常情况下，系统的输出量是工作机械中执行机构的速度或位移，当电动机与工作机械刚性连接时，它们分别对应于电动机转子的转速和转角。根据工作机械的需要，在一些系统中除了控制输出量以外，可能还需要控制系统内部的其它变量，如直流电动机的电枢电流或交流电动机的定子电流、变流器电压或频率等。图 1—1 系统中变流器 T 向电动机 M 供电并控制它的运行状态，也就可以控制工作机械和相应的工艺过程。当电网电压波动、负载转矩变化等扰动作用于变流器、电动机和工作机械时，会导致系统输出量偏离给定值。该系统在扰动作用下的静态和动态特性将由变流器、电动机和工作机械的特性决定。

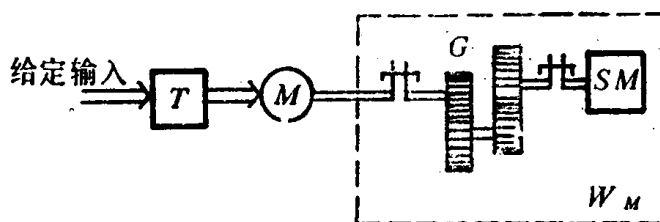


图 1—1

图1—2 (a) 所示闭环系统，当输出量的反馈值偏离给定输入值时，由于系统输出（受控）量信息反馈到系统输入端，使得作用到调节器 R 的输入量发生变化，调节器 R 根据这一信息产生控制信号，作用到变流器，确保系统输出量变化具有预期的特性。图 1—2 (a) 系

统采用检测转换装置 DT 测量系统的输出量和其它变量，并将其转换成与被检测量成正比的电信号，象测速机、位置传感器、电流检测器、数模转换器或模数转换器等均是电气传动控制系统中常用的检测转换装置的部件。通常，检测转换装置和调节器构成系统的控制部分，其功能是采集和处理系统中有关变量的信息，并按预定控制规律或算法产生控制信号。而把系统中的变流器、电动机和工作机械统称为功率部分，其功能是进行能量转换和控制。

分析闭环系统的构成原理可以看出，图1—2 (a) 系统属于按偏差调节的系统，因为调节器 R 输入端信号是与受控量的给定值和反馈值之间偏差成正比的。

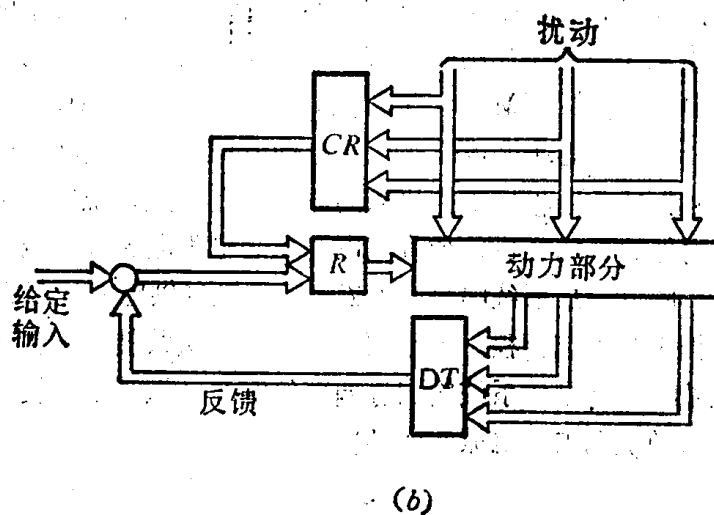
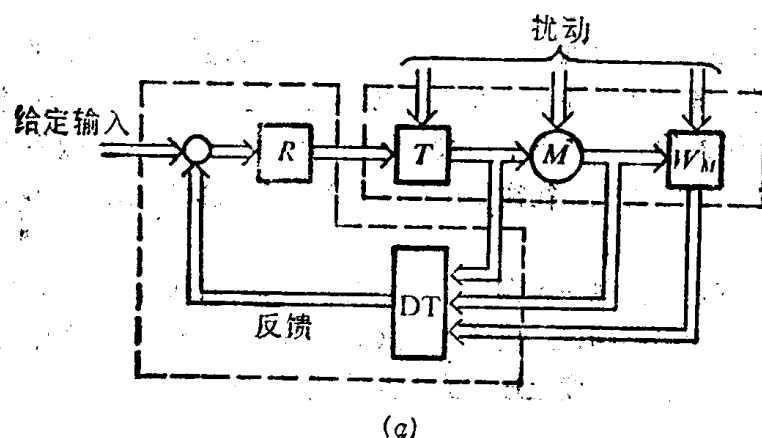


图 1—2

为了减小扰动作用引起的系统偏差，甚至在理想情况下消除扰动引起的偏差，可考虑构成按扰动调节的系统，又称为不变性系统。图 1—2 (b) 表示出这类系统的构成原理，与扰动作用有关的信号通过补偿装置 CR 加到调节器 R ，补偿装置 CR 既要测量扰动又要赋予补偿通道一定的动态特性。若能精确地测得扰动信号，又正确地选择补偿通道的传递函数，理论上可以证明系统对扰动的完全不变性，即依靠调节器的作用，完全可以补偿扰动对系统偏差的影响。这类系统一般只能对一种或少量主要扰动进行补偿，对其余扰动则无补偿能力。因

此通常不单独使用按扰动调节,而是将按扰动和按偏差调节结合起来,图1—2 (b) 所示系统就是根据这一原则组成的。

一般说,上述反馈闭环系统前向通道中环节的参数值与设计值相差甚微时,不会影响系统的正常工作。但是,如果对象参数随工作条件变化而大幅度地变化时,那么控制系统可能在一个工作条件下有满意的性能,而在其它工作条件下不可能有满意的性能,甚至会使系统不稳定。原因在于上述系统不能在工作过程中改变某些参数或结构来适应工作条件的变化。因而就提出建立一个能适应工作条件变化的系统,即要建立一个自适应控制系统。希望这样的系统不论工作条件如何变化都保证最优性能指标,即系统具有自行组织和自行整定的特点。

如果电气传动自动控制系统按控制目的来分,有以下三种方式。其一是定值控制,目的在于保持受控量恒定。最常见的电气传动定值控制系统是稳速系统。当然定值系统也可以是生产过程其它工艺参数的控制,例如各种带形物料卷取时的张力定值控制,就是一个多电动机的传动系统。其二是位置随动控制,是要控制工作机构的位移,即电动机的转角按事先规定的或者未知的规律变化。雷达天线的方位控制系统就是这种系统的一个典型例子,它的功能是将天线对准所跟踪的目标。其三是程序控制,目的在于使受控量按事先确定的规律变化,如机床上刀具位移控制系统就属于这一种系统,它的功能是要实现切削刀具和工件之间的复杂运动轨迹。

将系统按控制目的分类,与系统构成原理无关,主要决定于给定量的变化特性。在实践中,尽管系统控制目的相同,但其结构和作用仍会有本质上的区别。之所以要将电气传动控制系统分类,只是便于分别研究各类系统的一些共性。

1—2 电气传动控制系统的数学描述

1—2—1 非线性系统数学描述及其线性化

为了分析和设计电气传动控制系统,与分析和其它控制系统一样,必须知道系统动态的数学描述,即要有描述系统状态变量与外部作用相互关系的微分方程,它们可以是高阶微分方程或一阶矩阵微分方程。当然也可以用相应的模拟计算机仿真结构图,即用一系列相互有联系的基本积分环节组成的结构图来描述控制系统。至于描述系统静态性能的代数方程,只要令系统状态变量对时间的导数为零就可得到。

电气传动控制系统的数学描述常常是非线性的,原因之一是电机数学模型中有两个非线性关系:电动势与磁通和角速度之积成正比(即 $E \propto \phi \omega$),电磁转矩与磁通和电枢(或转子)电流之积成正比(即 $M \propto \phi i_a$),而磁通和角速度以及磁通和电流往往是系统中的两个状态变量,也是时间的函数。

图1—3 的结构图可以看成是电气传动控制系统中的一部分。该结构中除了时间常数为 T_k 的第 k 个积分环节以外,还包括常见的两种非线性环节。一种是用非线性静特性 $F_1(x_1)$ 和 $F_k(x_k)$ 曲线表示的两个非线性环节,该曲线代表这两个环节的静态传递关系;另一种是用乘法器表示相乘关系的非线性环节,其输入为外加信号和(或)系统状态变量信号(x_r 、 x_s),而输出信号为两个输入信号之积($x_n = x_r x_s$)。

为了分析这类系统，常常要把这些非线性描述加以线性化。许多系统，尤其是定值控制系统，在一定条件下，可以应用自动控制理论中的微偏线性化方法来处理非线性特性。因此，图1—3 中的两种非线性特性可作如下线性化处理。

一、将具有平滑变化的非线性特性 $F_i(x_i)$ 和 $F_k(x_k)$ 环节用比例环节代替，该等效环节的传递系数为非线性关系特性上经过工作点的切线倾角的正切函数，或者近似用增量比 $k_i \triangleq \Delta F_i(x_i) / \Delta x_i$ 和 $k_k \triangleq \Delta F_k(x_k) / \Delta x_k$ 来表示该环节的传递系数，见图 1—4。这里的符号 $\triangle$ 表示，分别用系数 k_i 和 k_k 代表增量比 $\Delta F_i(x_i) / \Delta x_i$ 和 $\Delta F_k(x_k) / \Delta x_k$ 。

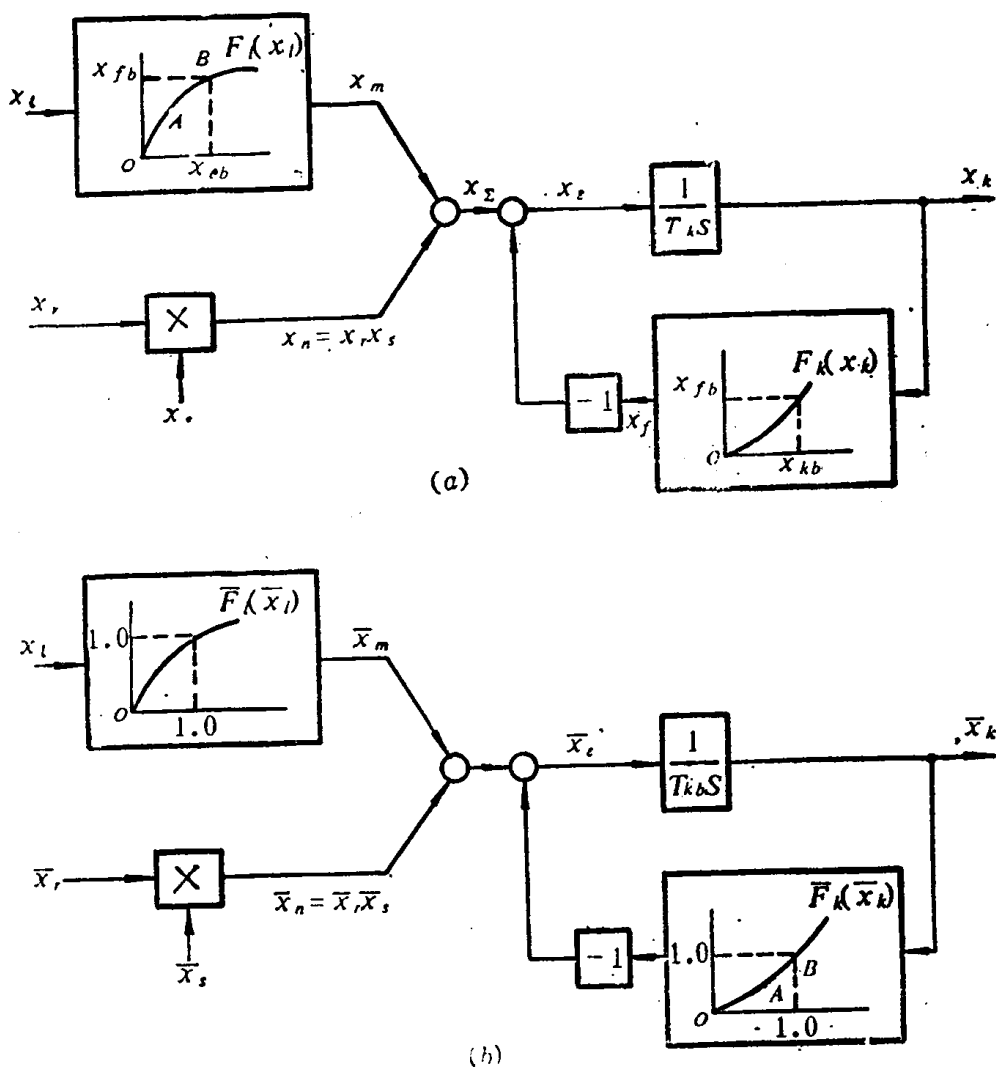


图 1—3

二、将变量积 $x_n = x_r x_s$ 加以线性化，给各变量以增量后便写成

$$x_{n,0} + \Delta x_n = (x_{r,0} + \Delta x_r)(x_{s,0} + \Delta x_s) \quad (1-1)$$

式中 $x_{n,0}$ 、 $x_{r,0}$ 和 $x_{s,0}$ 分别为变量 x_n 、 x_r 和 x_s 在设定工作点的值，显然有

$$x_{n,0} = x_{r,0} x_{s,0} \quad (1-2)$$

将式 (1-2) 代入式 (1-1)，并略去二阶微小增量 $\Delta x_r \Delta x_s$ ，则有

$$\Delta x_n \approx x_{r,0} \Delta x_s + x_{s,0} \Delta x_r \quad (1-3)$$

这意味着可用增量和来等效变量乘积的增量,如图1—4所示,在该结构图中引入传递系数为 $x_{r.o}$ 和 $x_{s.o}$ 的环节,其大小决定于系统所处的工作点。图1—4是图1—3线性化处理后的结构图。显然,线性化以后的系统特性与所处的工作点有关。

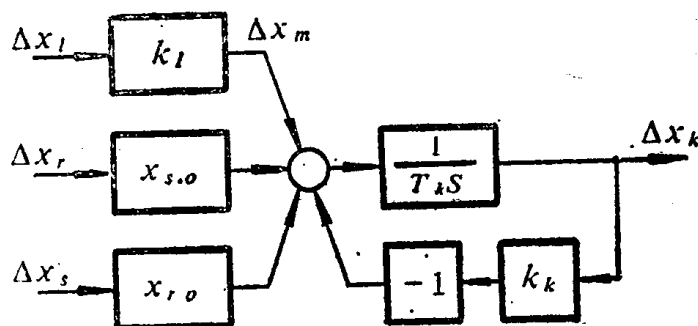


图1—4

自动控制系统中也可能包含非平滑的非线性特性,例如非灵敏区、输出饱和等。这类特性就不能用上述微偏法加以线性化。在这种非线性影响不可忽略的情况下,常常要用模拟计算机和数字计算机的数值计算方法来分析系统工作状态。但是,在有些条件下,这种非线性特性并不影响系统工作性能,例如小信号输入时,运算放大器输出电压不会达到饱和,因此饱和特性并不会影响系统工作性能,系统可以看成线性的。总之,在分析和线性化处理系统时要谨慎,不是所有的非线性影响都能忽略,也不是所有的非线性特性都对系统性能有影响,要作具体分析。

1—2—2 线性系统的数学描述模式

本节介绍描述线性系统(包括已线性化系统)的结构图,传递函数和微分方程(高阶的或一阶矩阵的)之间的相互变换关系。因为对于同一个系统,可根据需要,选用任一种数学描述模式。

图1—5(a)所示系统是电气传动控制系统中常见的一种闭环系统,可以作为一个例子来说明系统的数学描述模式。图1—5(a)系统中积分环节 $1/T_o S$ 表示受控对象,它受到输入增量 Δu_T 和扰动增量 Δu_δ 的作用,沿这两个作用通道,对象的传递系数分别为 k_o 和 k_δ 。 Δu_T 为执行环节输出电压增量。假定它的动态特性用传递系数 k_T 和小时间常数 T_μ 表示的非周期环节来描述。图中传递系数为 k_R 的环节表示比例调节器。给定输入信号与反馈信号在比例调节器输入端进行比较。给定输入信号与受控量给定值成正比,其增量为 Δu_{ri} ,受控量的增量为 Δu_{ou} ,而反馈信号增量为 $\Delta u_i = k_f \Delta u_{ou}$, k_f 为反馈系数。

图1—5(a)所示系统亦可用如下方程组来描述

$$\left. \begin{aligned} \Delta u_{ou} &= \frac{1}{T_o S} (k_o \Delta u_T + k_\delta \Delta u_\delta) \\ \Delta u_T &= \frac{k_T}{T_\mu S + 1} \Delta u_R \\ \Delta u_R &= k_R (\Delta u_{ri} - \Delta u_i) \\ \Delta u_i &= k_f \Delta u_{ou} \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

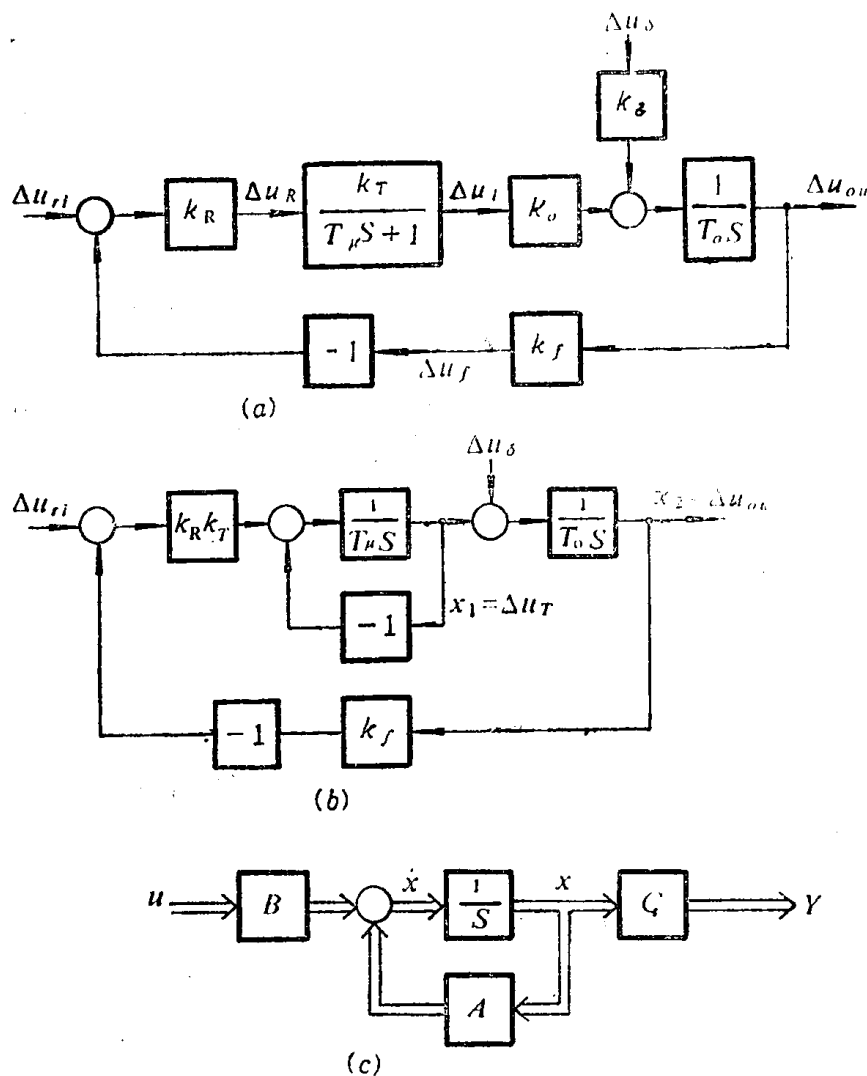


图 1—5

可以消去式中的中间变量 Δu_R 和 Δu_T ，因为这两个变量的导数在系统中没有出现，所以不必取其为状态变量。消去 Δu_R 和 Δu_T 后，式(1—4)可以写成规范形式：

$$\left. \begin{aligned} \Delta u_T &= \frac{1}{T_\mu S} (-\Delta u_T - k_T k_R k_f \Delta u_{ou} + k_T k_R \Delta u_{ri}) \\ \Delta u_{ou} &= \frac{1}{T_o S} (k_o \Delta u_T + k_d \Delta u_\delta) \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

与式(1—5)对应的结构图如图1—5(b)所示。

还可以将方程组(1—5)写成矩阵微分方程的形式。设上例中系统输出变量只是 u_{ou} ，则其数学描述为

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{X}} &= \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{Y} &= \mathbf{C}\mathbf{X} \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

式中 $\mathbf{X} \triangleq \begin{bmatrix} \Delta u_T \\ \Delta u_{ou} \end{bmatrix}$, $\mathbf{Y} \triangleq \Delta u_{ou}$ $\mathbf{u} \triangleq \begin{bmatrix} \Delta u_{ri} \\ \Delta u_\delta \end{bmatrix}$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_\mu} & -\frac{k_T k_R k_f}{T_\mu} \\ \frac{k_o}{T_o} & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \frac{k_T k_R}{T_\mu} & 0 \\ 0 & \frac{k_o}{T_o} \end{bmatrix} \quad C = [0 \quad 1]$$

这里的 A 为 2×2 的系数矩阵， B 为 2×2 的控制矩阵， C 为 1×2 的输出矩阵。与式(1—6)对应的结构图如图1—5(c)所示。

1—2—3 系统数学描述的标么化

控制系统中的变量都是物理量，如电压、电流和速度等。对系统进行分析和计算时，数学描述中所用的量应是实际物理量。但是，在研究较为复杂的控制系统时，许多量纲系数常使结构图和数学方程变得烦琐和不容易理解，如果这时将变量以相对值表示，即将系统的数学描述标么化，则常常可以简化结构图和方程中的系数。

某个变量 x 的实际值与其基值 x_b 之比称为相对值。在电气传动控制系统中，一般取该变量的额定值或有意义的稳态值作为基值。应该指出，规定系统中一个或两个不相关变量的基值之后，与其相关的其他变量基值就不能随意再取，而是要根据它们之间的相互关系来确定基值。仍以图1—3(a)为例，假定取积分环节输出量 x_k 的基值为 x_{kb} ，则反馈量 x_f 的基值就必须取 $x_{fb} = F_k(x_{kb})$ ，即 x_{fb} 与 x_{kb} 之间要满足反馈传递特性 $x_f = F_k(x_k)$ 函数关系。又因为变量 x_m 、 x_n 和 x_f 之间要进行加减运算，所以 x_m 、 x_n 的基值 x_{mb} 、 x_{nb} 也必须取 x_{fb} 。类似地， x_i 的基值 x_{ib} 应满足条件： $x_{mb} = F_i(x_{ib})$ 。由于 $x_n = x_r x_s$ ，故有 $x_{nb} = x_{rb} x_{sb}$ ，因 x_{nb} 已选定，所以 x_{rb} 和 x_{sb} 中任意选定一个之后，另一个也就不能再任意选取。

根据上述标么化方法，可将图1—3(a)改画为以相对值表示的结构图，如图1—3(b)所示。首先将各个变量除以各自的基值得到相对值，相对值的表示法是在对应变量上加一横（例如 $\bar{x} = x/x_b$ ）。其次，要将以绝对值表示的非线性传递特性 $F_i(x_i)$ 和 $F_k(x_k)$ 改为相对值表示的非线性特性 $\bar{F}_i(\bar{x}_i)$ 和 $\bar{F}_k(\bar{x}_k)$ ，办法是将坐标上绝对值除以其基值就化为相对值。第三要将基本环节的时间常数 T_k 换成时间常数基值 T_{kb} ，这个 T_{kb} 决定于基本环节输入量和输出量基值。这是因为从图1—3(a)有

$$x_k = x_e / T_k S$$

$$\text{显然有 } \frac{x_k}{x_{kb}} x_{kb} = \frac{x_e}{x_{fb}} x_{fb} \frac{1}{T_k S}$$

$$\bar{x}_k = \bar{x}_e / (T_k x_{kb} S / x_{fb})$$

令 $T_{kb} = T_k x_{kb} / x_{fb}$ ，则有

$$\bar{x}_k = \bar{x}_e / T_{kb} S \quad (1-7)$$

1—3 模拟控制系统的规范校正方法

第1—1节中已经指出，电气传动控制系统可分为连续和断续（或模拟和数字）控制系统。本节讨论模拟型电气传动控制系统的规范校正方法，下一节将讨论数字型控制系统的校正方法。