



现代交通电子控制技术

XIANDAI JIAOTONG DIANZI KONGZHI JISHU

主 编：孔庆华 副主编：张东煜

主 审：关 强



东北林业大学 出版社

现代交通电子控制技术

主 编 孔庆华
副主编 张东煜
主 审 关 强

东北林业大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

现代交通电子控制技术/孔庆华主编. —哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2004.3

ISBN 7-81076-542-6

I. 现... II. 孔... III. 交通控制: 电子控制—高等学校—教材 IV. TN
965.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 013244 号

内 容 提 要

本书分为十章, 内容包括绪论、自动控制理论基础、交通信号控制器与交通电视监视系统、高速公路监视与控制系统、交通信息的采集与处理、交通信息的监控输出与反馈、智能运输系统 (ITS) 的体系结构、智能运输系统 (ITS) 的功能子系统、全球卫星定位系统 (GPS) 和交通地理信息系统 (GIS) 等方面的知识。本书可作为高等学校交通工程、交通运输专业的本科生、研究生教材, 也可供相关工程技术人员参考。

责任编辑: 袁俊琦

封面设计: 彭 宇



NEFUP

现代交通电子控制技术

Xiandai Jiaotong Dianzi Kongzhi Jishu

主 编 孔庆华

副主编 张东煜

主 审 关 强

东北林业大学出版社出版发行

(哈尔滨市和兴路 26 号)

东北林业大学印刷厂印刷

开本 787 × 1092 1/16 印张 11.5 字数 264 千字

2004 年 3 月第 1 版 2004 年 3 月第 1 次印刷

印数 1—1 000 册

ISBN 7-81076-542-6

U·45 定价: 19.80 元

前 言

现代交通电子控制技术旨在研究如何应用现代科学技术来保证交通的安全畅通,以促进国民经济的发展和社会文明的进步。现代交通电子控制技术是现代电子技术在交通管理与控制上的应用,即现代交通管理与控制系统。现代交通管理与控制系统是涉及交通工程、自动控制、交通心理学和机械电子技术的一门人、车、路与环境一体化的边缘学科,它属于自动控制的一个新的分支。交通的管理与控制是交通工程的主要研究任务之一,其内容主要分为法律法规的行政管理和工程技术措施两个方面。本课程是其中后一个方面,即现代交通电子控制系统的研究。它包括现代交通控制的一切机械电子技术和自动控制系统、智能运输系统、全球卫星定位系统等先进的、现代的、前沿的科学技术。本课程以自动控制理论为基础,从电子计算机应用技术的角度说明在工程技术上如何实施现代交通管理与控制。重点在于介绍当前用哪些现代化的技术手段、技术装备、工程理论来指导和实施现代化的交通管理与控制,使学生掌握现代控制理论的基础知识,交通信号控制器的电子电路技术,交通电视监视系统,高速公路监控系统,交通信息的采集与处理,交通信息的监控输出与反馈;智能运输系统(ITS)的体系结构,智能运输系统(ITS)的功能子系统,全球卫星定位系统(GPS)与地理信息系统(GIS)的原理与应用等方面的知识。

全书分为十章,由东北林业大学交通运输工程学院孔庆华教授任主编;由机电工程学院张东煜任副主编;其中第1~3章由张东煜编写;第4~10章由孔庆华编写;参加编写的还有交通工程教研室的弓福、景鹏、李洋、张莉。全书由孔庆华教授统稿,由东北林业大学交通运输工程学院关强教授主审。在编写的过程中研究生武慧荣、孙丽也做了大量耐心细致的工作,在此一并表示感谢。由于我们水平有限,加之资料不足,时间仓促,缺点和错误在所难免,欢迎读者批评指正。

编 者

2003年10月8日

目 录

1 绪论	(1)
1.1 本课程的性质和内容	(1)
1.2 道路交通自动控制技术的发展	(1)
1.3 交通控制基本类型	(4)
2 自动控制理论基础	(6)
2.1 自动控制基础理论	(6)
2.2 动态系统的状态空间分析法	(11)
2.3 动态系统的最优控制	(13)
3 交通信号控制器与交通电视监视系统	(17)
3.1 交通信号控制器的分类	(17)
3.2 交通信号控制器的硬件系统	(20)
3.3 交通信号控制器的软件系统	(29)
3.4 交通电视监视系统	(36)
4 高速公路监视与控制系统	(39)
4.1 高速公路监控的目的	(39)
4.2 系统的监控参数	(39)
4.3 高速公路的发展及其特征	(41)
4.4 高速公路的分类	(44)
4.5 高速公路存在的问题	(45)
4.6 高速公路监视与控制系统的组成	(49)
4.7 高速公路的控制方法与策略	(50)
5 交通信息的采集与处理	(54)
5.1 交通信息采集子系统	(54)
5.2 检测传感技术	(56)
5.3 车辆检测器的工作原理与性能比较	(64)
5.4 道路气象检测器	(78)
5.5 检测器的安装	(82)
6 交通信息的监控输出与反馈	(83)
6.1 驾驶员信息系统	(83)
6.2 公路诱导通信传输子系统	(84)
6.3 中央控制室子系统	(84)
7 智能运输系统的体系结构	(94)

7.1	智能控制技术	(94)
7.2	智能运输系统的产生与发展	(98)
7.3	智能运输系统的社会效益和特点	(103)
7.4	智能运输系统的体系结构	(105)
7.5	我国智能型综合运输系统体系结构	(107)
8	智能运输系统的主要功能子系统	(115)
8.1	交通信息服务系统	(115)
8.2	城市智能交通管理系统	(117)
8.3	先进的城市公共交通系统	(119)
8.4	自动车辆驾驶系统	(121)
8.5	自动收费系统	(126)
8.6	先进的物流信息系统	(132)
9	全球卫星定位系统	(137)
9.1	全球卫星定位系统概述	(137)
9.2	全球卫星定位系统的组成	(139)
9.3	GPS 定位原理	(141)
9.4	差分 GPS 定位原理及方法	(143)
9.5	GSM 定位系统	(147)
9.6	全球卫星定位系统的应用	(150)
10	交通地理信息系统	(152)
10.1	电子地图	(152)
10.2	地理信息系统与地图	(156)
10.3	交通地理信息系统的组成及功能	(161)
10.4	GIS 应用于交通流诱导系统	(163)
10.5	地理信息系统在交通工程中的应用	(173)
10.6	数字城市的基本概念及关键技术	(175)
	参考文献	(178)

1 绪 论

1.1 本课程的性质和内容

现代交通电子控制技术旨在研究如何应用最现代的科学技术来保证交通的安全畅通,以促进国民经济的发展和社会文明的进步。现代交通电子控制技术是现代电子计算机技术在交通管理与控制上的应用,即现代交通管理与控制技术。现代交通管理与控制技术是涉及交通工程、计算机技术、自动控制、交通心理学和机械电子技术的一门人、车、路与环境一体化的边缘学科。它属于自动控制的一个新的分支,同时也是现代电子技术在交通领域的应用。交通的管理与控制是交通工程的主要研究任务之一,其内容主要分为法律法规的行政管理和工程技术措施两个方面。本课程是其中后一个方面,即现代交通电子控制系统的研究。它包括现代交通控制的一切机械电子技术和自动控制系统、智能运输系统、全球卫星定位系统和地理信息系统等先进的、现代的、前沿的科学技术。本课程以现代交通电子控制系统为出发点,以控制理论为基础,以信息系统和专家系统理论为指导,结合电子计算机应用技术来说明现代交通管理与控制技术的最新发展和成果;跟踪世界最新科学研究方向,尽可能反映新知识、新成果、新体系、新方法;介绍当前用哪些现代化的技术手段、技术装备、工程理论来指导和实施现代化的交通管理与控制,重点在于应用。通过本课程的学习,学生们可以掌握现代控制理论的基础知识、交通信号控制器的电子电路技术、交通电视监视系统的组成和工作原理、高速公路监控系统的组成和控制策略、交通信息的采集与处理、交通信息的监控输出与反馈、智能运输系统(ITS)的体系结构、智能运输系统(ITS)的功能子系统,以及全球卫星定位系统(GPS)与地理信息系统(GIS)的工作原理与实际应用等方面的知识。

1.2 道路交通自动控制技术的发展

1.2.1 信号灯的诞生

道路交通自动控制技术的起源是交通自动信号灯的诞生。这可以追溯到 19 世纪末和 20 世纪初。

在 1868 年伦敦的威斯特敏斯特教堂附近安装了一台红绿两色煤气照明灯,用来控制交叉路口马车的通行。但由于意外的爆炸事故,致使这种信号灯没能继续使用。

1918 年初纽约街头出现了新的信号灯,这是与当今使用的信号灯极为相似的红黄绿三色灯。它是人工操纵的,以后英国也开始使用这种信号灯。

1926 年英国人首次采用自动化交通信号控制器来控制交通信号灯,这是城市交通

自动控制的开始。

1.2.2 定时控制向协调控制发展

自动化的交通信号灯是由交通信号控制器控制其红绿灯的周期变化的。

早期的交通信号控制器是按照固定不变的周期长和红绿灯的时间的比例来控制信号灯的变化的,即以“固定配时”方式实现自动控制。它在当时表现出的优点是警察可不必直接控制信号变化,而把主要精力用在交通管理上。

随着汽车工业的发展、交通流量的增加、随机变化的增强,采用以往那种单一模式的“固定配时”方式已不能满足客观需要。其表现是绿灯时间不能有效利用,车辆在交叉路口的时间延误和停车次数增加,致使已有的道路不能有效地利用。

于是一种多时段多方案的信号控制器取代了传统的只有一种控制方案的控制器。采用这种控制器其效果明显地好于传统的老式控制器。这种控制器在一天时间里备有几种不同的配时方案,它能按交通流的变化规律、不同的时间选用不同的方案。比如在早、晚高峰期间有各自的高峰方案,在高峰以外的时间有平时方案。用这种控制方式当交通流变化规律比较明显的时候,控制效果是很好的,所以至今仍作为单个交叉路口的一种控制方式广泛地应用。

多时段多方案定时控制器在长期的使用过程中不断地改进、提高。在使用中人们也发现了它的不足之处。我们知道,交通具有连续运动的特点。当一个交叉路口的信号变化与其相邻的交叉路口的信号变化各不相关时,难免使从上游交叉路口驶出的车辆(或车队),到达下游交叉路口时不遇红灯;到底是遇红灯还是遇绿灯全凭机遇。特别是当两个相邻交叉路口距离很近时,这种交叉路口之间“各自为政”的孤立控制方式,难免造成频繁停车,使控制效果不佳。

要解决这个问题,必须把相邻的交叉路口作为一个系统来统一地加以控制。早在1917年,在美国盐湖城市就开始使用联动式信号系统,即把六个交叉路口作为一个系统,以人工方法加以集中控制。1922年美国休斯顿市建立一个同步控制系统,它以一个交通岗亭为中心控制12个交叉路口。该系统使用了电动自动计时器。6年之后,即1928年,上述系统经过改进,形成“灵活步进式”定时系统。由于它简单、可靠、价格便宜,很快在美国推广普及。这种系统以后经过不断改进、完善,成为当今的协调控制系统。

1.2.3 车辆检测器和感应式信号控制器的诞生

20世纪30年代初,先是在美国,以后在英国开始使用车辆感应式信号控制器。当时使用的车辆检测器是气动橡皮管式车辆检测器。

车辆感应控制器的特点是它能根据检测器测量的交通量来调整绿灯时间的长短,使绿灯时间更有效地被利用,减少了车辆在交叉路口的时间延误,因此比定时控制方式有更大的灵活性。交通感应控制的这一特点刺激了车辆检测器技术的发展。继气动橡皮管式检测器之后,雷达、超声波、光电、地磁、电磁、微波、红外线以及环形线圈等检测器相继问世。当今在道路交通自动控制、交通检测和交通数据采集系统中,应用最广的

是环形线圈车辆检测器。超声波检测器主要在日本等少数国家得到广泛应用。

1.2.4 计算机的应用

20 世纪 50 年代初模拟式电子计算机首先在美国被用于交通控制中;1952 年在丹佛市安装了一套模拟计算机控制系统,经过改进被称为 PR 系统,其技术核心是单点感应控制原理在交通网络中的应用。

在 PR 系统中,检测器的抽样数据首先输入到系统中,用来计算信号周期长,而绿灯时间的分配(绿信比)和相邻信号绿灯起始时间差(相位差)则取决于周期长。这种控制十分有效,因此在 1952 年到 1962 年的 10 年间,在美国安装了 100 多个 PR 系统。

1963 年,在加拿大的多伦多市,第一个以数字计算机为核心的城市交通控制系统——UTC 系统诞生了。从此,开始了交通控制发展历史的新纪元。

1967 年英国运输与道路研究室(TRRL)的专家们成功地研制出交通网络的研发工具 TRANSYT——Traffic Network Study Tool,它的广泛应用,把交通控制技术推向更高的发展阶段。它其实是一个脱机的计算机仿真程序,主要用于为 UTC 系统准备经过仿真程序优化的配时方案。实际应用表明,用 TRANSYT 生成的配时方案比以往使用的方法有更好的控制效果。因此,这一程序很快地在全世界推广,至今仍在使用。

20 世纪 70 年代英国运输与道路研究室(TRRL)开发的 SCOOT 系统——Split Cycle Offset Optimization Technique System 和澳大利亚的 SCAT 系统——Sydney Co-Ordinate Adapting Traffic System 为自适应交通控制系统的代表,它以检测器测量的实时交通数据为依据,联机生成配时方案,对交通流进行实时控制。它能够适应交通流的动态随机变化,不断修正控制参数,具有较高的控制精度和较好的响应速度。

1.2.5 高速公路监控系统

随着现代交通工具的迅猛发展,交通拥挤越来越严重地影响着现代人的生活,交通的过饱和现状促使人们去开辟一条效率更高的道路——高速公路。最初的高速公路是作为自由路(即不受交通控制)提出和设计的。安全、快速、高效、舒适、方便是它的理想目标,然而不断增长的交通需求,拥挤、事故和污染的发生又迫使人们去寻找新的解决办法——交通监视与控制。

所谓监视就是利用路面、路旁的数据采集、监测设备和人工观察,对道路交通状况、路面、天气状况和设备工作情况等参数进行实时观察与测量,并通过传输系统送到中心控制室。

所谓控制就是利用监控中心计算机或监控员实时处理系统各种数据,按照一定的模式进行分析、判断和决策,并将决策结果和控制命令通过传输系统送至路上驾驶员信息系统、收费控制设备或匝道控制设备,以促进行车安全,提高行车效率。对于引起延误的事件迅速响应,提供紧急服务,快速排除,从而达到调节和控制道路交通状况的目的。

1.2.6 智能运输系统

智能运输系统（ITS——Intelligent Transportation System）是将先进的信息技术、数据通讯技术、检测传感技术、自动控制理论、运筹学、人工智能、电子控制技术以及计算机处理技术综合运用于整个地面运输管理系统而建立起的一种大范围、全方位发挥作用的实时、准确、高效的公路运输综合管理系统。这个系统将汽车、驾驶员、道路及其相关的服务部门相互连接起来，并使汽车与道路的运行功能一体化、智能化。具体地说，该系统将采集到的各种道路交通及各种服务信息经过交通管理中心集中处理后，传输到公路运输系统的各个用户——包括驾驶员、居民、警察局、停车场、运输公司、医院、救护排障等部门。出行者可进行实时的交通选择；交通管理部门可自动进行合理的交通疏导、控制和事故处理；运输部门可随时掌握车辆的运行情况，进行合理调度，从而使路网上的交通流运行处于最佳状态。最大限度地提高路网的通行能力，提高整个公路运输系统的机动性、安全性和生产效率；同时减少公路运输对环境污染的影响。智能运输系统将应用到各种车辆——包括货车、公共汽车和小汽车，各种信息设施——包括计算机、公用电话和手持通讯装置，以及地面运输系统的所有部分——包括高速公路、城市干道、乡村道路、转运站、港口和国际联结终点站等。

1.3 交通控制基本类型

道路交通的自动控制有四种基本类型，这四种基本类型也就是四代交通控制系统。

1.3.1 定时控制

这种控制方式以历史的交通流的统计数据为依据，找出每个日/周和时/日不同交通流变化规律。用人工方法和计算机仿真方法预先准备好不同日/周和不同时间区间（时段）所使用的配时方案——即一组周期长、绿信比和相位差所组成的控制参数组合。采用程序存储方式将这些配时方案存储在信号控制器或中心计算机中。在实施信号控制时可以用不同的方式调用这些配时方案。通常可用日历钟在规定的时间表的控制下选用对应的方案。

1.3.2 感应控制

感应控制的原理是根据车辆检测器测量的交通流数据调整相应的绿灯时间的长短和顺序，以适应交通的随机变化。这种方式比定时控制有更大的灵活性。感应控制源于单个交叉路口的车辆感应（VA）控制，后经发展，干线和交通网络也利用了类似的控制方法。

感应控制适用于饱和度较低的交叉路口或各向交通流相差较大的交叉路口的控制。特别是交通流没有明显的变化规律，随机性较强的时候，效果更为明显。

当各向交通流接近道路允许的通行能力时，绿灯时间经过调整必然要接近各方向允许的最大绿灯时间。这时的感应控制与定时控制实际上并无区别。由此可见，感应控制

方式与定时控制方式一样是有条件限制的，预先要认真地分析其可行性和效果。

1.3.3 自适应控制

在一条干线或一个区域，根据交通流的动态的随机变化而自动地调整信号控制参数，使控制系统自动地适应交通流的随机变化。这种控制方式就是自适应交通控制方式。

前面介绍的澳大利亚“SCAT”系统和英国的“SCOOT”系统均属于自适应交通控制系统。

1.3.4 智能控制

智能控制不仅仅是交通信号的控制而是整个交通系统的控制，即智能运输系统(ITS)。它是将先进的信息技术、数据通讯技术、检测传感技术、自动控制理论、运筹学、人工智能、机械电子技术以及计算机处理技术综合运用于整个地面运输管理子系统而建立起的一种大范围、全方位发挥作用的实时、准确、高效的公路运输综合管理系统。这个系统将汽车、驾驶员、道路及其相关的服务部门相互连接起来，从而使汽车与道路的运行功能一体化、智能化。有关内容将在后面章节详细介绍。

2 自动控制理论基础

现代交通自动控制系统是在不需要人直接参与的条件下通过交通自动控制系统,采用适当的交通控制策略(例如入口调节、主线限速、交通引导等)使道路某一段或全线,甚至整个路网的交通流运行在人们所期望的状态,达到安全、高效的目的。现代交通管理与控制系统是涉及交通工程、自动控制、计算机技术、交通心理学和机械电子应用技术的一门人、车、路与环境一体化的边缘学科。它属于自动控制的一个新的分支。

2.1 自动控制基础理论

2.1.1 自动控制

自动控制是采用控制装置使被控制对象的某些物理量自动地按照给定的规律运行的技术。

自动控制装置是各式各样的,用途和结构各不相同,但基本原理是一样的,即自动控制理论。自动控制理论包括经典控制理论和现代控制理论。经典控制理论有频率法和根轨迹法;现代控制理论有线性系统理论、最优控制理论、动态系统辨识、自适应控制、大系统理论等。自动控制理论的发展进一步促进自动控制技术和其他学科的发展,是建立在各种自动控制装置基础之上的统一的理论。

自动控制的目的是使被控制对象的一个或数个物理量能够在一定的精度范围内按照给定的规律变化。系统则是为达到某一目的,由相互制约的各个部分按一定规律组成的,具有一定功能的整体。由相互制约的各个部分按一定规律组成的,使被控制对象的一个或数个物理量能够在一定的精度范围内按照给定的规律变化,具有一定功能的整体称自动控制系统。

2.1.2 自动控制系统的组成和常用术语

按照元件在控制过程中的职能画出反馈控制系统的方框图,如图2-1所示。

2.1.2.1 系统组成

- (1) 输入元件——产生输入到控制系统的指令信号参考输入 $r(t)$ 的装置或元件。
- (2) 被控对象——系统中要求控制的装置或生产过程;它接受控制量,产生并输出被控制量 $y(t)$ 。
- (3) 执行元件——直接对被控对象进行控制的装置或元件。
- (4) 反馈元件——产生与输出量 $y(t)$ 有一定函数关系的主反馈信号 $b(t)$,并把这个信号反馈到系统的输入端,与参考输入信号 $r(t)$ 进行比较。
- (5) 比较元件——用以比较参考输入 $r(t)$ 和主反馈信号 $b(t)$,输出偏差信号 e

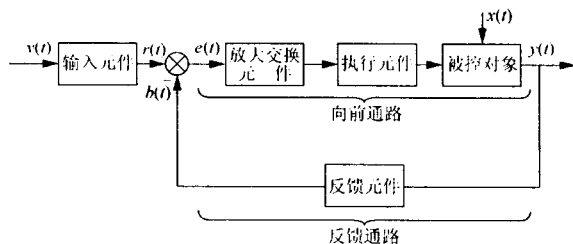


图 2-1 反馈控制系统的组成

(t); - 相减, + 相加。

(6) 放大变换元件——是系统的控制环节, 接受偏差信号, 通过放大、转换与运算产生控制量驱动执行元件。

2.1.2.2 常用符号与常用术语

(1) 输入量(指令) $v(t)$ ——来自反馈系统之外的对系统所施加的控制作用。

(2) 参考输入 $r(t)$ ——输入元件的输出, 它是系统的实际输入量。

(3) 输出量(被控制量) $y(t)$ ——被控对象中要求按一定规律变化的物理量, 它与输入量之间保持一定的函数关系。

(4) 主反馈信号 $b(t)$ ——反馈元件的输出, 与输出量成函数关系, 与输入量量纲相同。

(5) 偏差信号 $e(t)$ ——比较元件的输出, 它等于参考输入 $r(t)$ 与主反馈信号 $b(t)$ 之差。

(6) 扰动 $n(t)$ ——不需要的而又影响系统输出的物理量。它可以来自系统之外, 也可以来自系统内部。

(7) 误差 $e(t)$ ——希望的或要求的输出量与实际的输出量之差。

(8) 反馈——将检测出来的输出量送回到系统输入端, 并与输入信号比较的过程。

2.1.3 自动控制的分类

由于自动控制技术发展很快, 应用很广, 因此自动控制系统的分类方法很多。这里仅介绍常见的四种分类方法。

2.1.3.1 按结构特点分类

(1) 开环控制——系统的输出量对控制量没有影响。

(2) 闭环控制——也称反馈控制, 由于将检测出来的输出量送回到系统输入端, 并与输入信号进行比较, 具有自动修正被控量偏离给定值的作用, 因而可以抑制内扰和外扰所引起的误差。

2.1.3.2 按输入信号特征分类

(1) 恒值控制系统——若系统的输入量是常数, 并要求在干扰作用下, 其输出量在某一希望值附近做微小变化, 则这类系统称为恒值控制系统。如生产过程中的温度、压力、流量、液位高度的控制。

(2) 程序控制系统——若系统的输入量是已知的时间函数(不是常数), 则这类系

统称为程序控制系统。热处理炉温度控制系统的升温、保温、降温过程都是按照预先设定的规律进行控制的, 这个系统属于程序控制系统。

(3) 随动系统 ——若系统的输入量是未知的时间系数, 并要求输出量精确地随输入量变化, 则这类系统称为随动系统, 又称伺服系统。如雷达天线跟踪系统、地对空导弹瞄准系统。

2.1.3.3 按所使用的数学方法分类

(1) 线性系统和非线性系统

①线性系统 ——自动控制系统是一个动态系统, 它的运动规律可用微分方程或差分方程来描述。当系统的运动规律用线性微分方程或线性差分方程描述时, 则这类系统称为线性系统。

②非线性系统 ——若描述系统的运动方程为非线性微分方程或差分方程, 则此系统称为非线性系统。

(2) 连续系统和离散系统

①连续系统 ——若系统中各元件的输入量和输出量均为时间的连续函数, 这类系统称为连续系统。连续系统的运动规律可用微分方程描述。

②离散系统 ——在系统中只要有一个环节的信号是脉冲序列或数字编码时, 这类系统就称为离散系统。

(3) 定常系统和时变系统

①定常系统 ——若系统中的参数不随时间变化, 则称为定常系统。在实践中遇到的系统, 大多数属于这一类。

②时变系统 ——若系统中的参数是时间 t 的函数, 则称为时变系统。

2.1.3.4 在交通控制中按输入信号分类

(1) 稳态控制 (开环控制) ——其控制量 (入口调节率、限速标志站等) 是在统计规律的基础上按不同时段预先设定的, 实时交通状态可以不反馈到控制器, 或者不必进行检测, 前提是假设在一定时段内每个路段的交通状态变化不大。

优点: 系统结构与算法都比较简单, 容易实现。

缺点: 精度低, 难以保持在期望的最佳状态, 无法应对突发事件。

(2) 动态控制 (闭环控制) ——需要对现场的实时交通状态 (占有率、平均速度、交通流量、排队车数等) 进行检测并反馈到控制器选择适当的控制策略以保持各路段始终处于期望的最佳交通状态。

优点: 适时调节, 应对多变的交通状态。

缺点: 系统结构与算法都比较复杂, 难于实现。

2.1.4 自动控制系统的数学模型

2.1.4.1 控制系统的静态模型

静态模型是在静态条件下 (即输入量对时间 t 的各阶导数为零) 得到的控制系统数学模型。若不考虑滞后及蠕变, 控制系统静态模型可用下式表示

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \cdots + a_n x^n \quad (2-1)$$

式中: x ——输入量;

y ——输出量;

a_0 ——系统的零位输出;

a_1 ——系统的灵敏度, 常用 k 或 s 表示。

从式 (2-1) 可见, 一般静态特性由线性项 ($a_0 + a_1 x$) 和 x 的高次项所决定。当 $a_0 \neq 0$ 时, 表示即使在没有输入的情况下, 仍有输出, 通常称为零点偏移。

多项式代数方程可能有四种情况, 如图 2-2 所示。

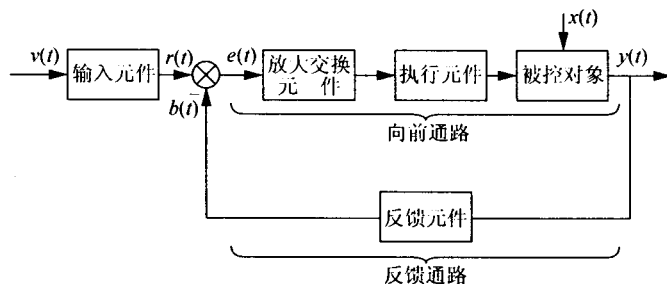


图 2-2 系统的静态特性

(a) $a_1 x$; (b) $a_1 x + a_3 x^3 + a_5 x^5 + \dots$;

(c) $a_1 x + a_2 x^2 + a_4 x^4 + \dots$; (d) $y = a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \dots$

这里表示输出与输入之间关系的曲线称为特性曲线, 通常希望输出与输入关系呈线性, 这时控制系统的数学模型为

$$y = a_1 x \quad (2-2)$$

当控制系统特性出现如图 2-2 的 (b)、(c)、(c)、(d) 所示的非线性时, 必须对系统采取线性化措施。

2.1.4.2 控制系统的动态模型

为研究控制系统的动态响应特性而建立的控制系统的数学模型称为动态模型。

(1) 微分方程, 在研究系统的动态响应特性时, 可以忽略控制系统的非线性和随机变化等复杂因素, 将系统作为线性定常系统考虑。因而其动态模型可用常系数微分方程来表示

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \quad (2-3)$$

式中: $a_0, a_1, \dots, a_n; b_0, b_1, \dots, b_m$ ——取决于系统参数的常数, 一般除 $b_0 \neq 0$ 外, $b_1 = b_2 = \dots = b_m = 0$ 。

用微分方程作为数学模型的优点是求解微分方程容易分清暂态响应与稳态响应。缺点是求解微分方程很麻烦, 不便于对系统的分析和设计。

(2) 传递函数, 用拉氏变换法求解线性定常微分方程, 可以得到控制系统在复数域的数学模型——传递函数, 即当初始条件为零时, 输出 $y(t)$ 的拉氏变换 $y(s)$ 和输入 x

(t)的拉氏变换 $x(s)$ 之比。传递函数不仅可以表征系统的动态特性,且可用来研究系统结构或参数变化对系统性能的影响。对由式(2-3)表示的系统,其传递函数为

$$G(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{b_m S^m + b_{m-1} S^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0}{a_n S^n + a_{n-1} S^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0} \quad (2-4)$$

式中: $S = \sigma + j\omega$, 为复变数,称为拉普拉斯变换的自变量。

拉普拉斯变换: $C(t) = \int_0^t g(t-\tau)(\tau) d\tau \quad (2-5)$

式中: τ ——外施输入作用到系统的时刻;

t ——观测系统影响的时刻。

$$G(t-\tau) = 0 \quad \text{当 } t < \tau$$

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \int_0^\infty g(t) e^{-st} dt \quad (2-6)$$

式中: $R(s)$ ——输入函数 $r(t)$ 的象函数——输入函数的拉氏变换;

$C(s)$ ——输出函数 $c(t)$ 的象函数——输出函数的拉氏变换。

传递函数是又一种以控制系统参数来表示输出量与输入量之间关系的数学模型,它表示了系统本身的特性,而与输入量无关。

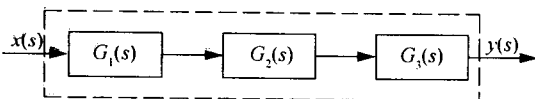


图 2-3 串联系统

对多环节串、并联组成的系统,如果各环节阻抗匹配适当,可忽略相互间的影响,总的传递函数可按下式求得:

对 n 个环节串联系统,如图 2-3 所示。

$$G(s) = \prod_{i=1}^n G_i(s) \quad (2-7)$$

对 n 个环节并联系统,如图 2-4 所示。

$$G(s) = \sum_{i=1}^n G_i(s) \quad (2-8)$$

这样就容易看清各环节对系统的影响,因而便于对传感器或检测系统进行改进。

传递函数的特点:

①反应系统输入与输出之间信息传递的动态特性,它与系统的运动方程一一对应;

②是经典控制理论中描述系统动态特性的主要数学工具;

③只适用于线性定常系统;

④只取决于系统的结构和参数与输入量无关;

⑤为复变量 s 的函数,一般为有理分式。

典型环节的传递函数(频域描述):

比例环节: $G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = k \quad k \text{ 为比例系数} \quad (2-9)$

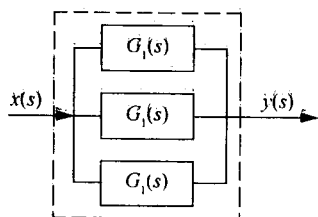


图 2-4 并联系统

$$\text{惯性环节: } G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{k}{\tau s + 1} \quad \tau \text{ 为时间常数} \quad (2-10)$$

$$\text{积分环节: } G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{k}{s} \quad (2-11)$$

$$\text{微分环节: } G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \tau s \quad (2-12)$$

$$\text{振荡环节: } G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{k}{\tau^2 s^2 + 2\xi\tau s + 1} \quad \xi \text{——阻尼比} \quad (2-13)$$

$$\text{纯滞后环节: } G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = e^{-\tau s} \quad (2-14)$$

(3) 频率响应函数。系统的频率响应函数定义为：当初始条件为零时，输出的傅里叶变换和输入的傅里叶变换之比，即

$$G(j\omega) = G(s)_{s=j\omega} = \frac{b_m(j\omega)^m + b_{m-1}(j\omega)^{m-1} + \cdots + b_1(j\omega) + b_0}{a_n(j\omega)^n + a_{n-1}(j\omega)^{n-1} + \cdots + a_1(j\omega) + a_0} \quad (2-15)$$

根据频率响应函数能够从频率特性出发研究系统。

微分方程、传递函数及频率响应函数都是表征系统动态特性的数学模型，表征了系统的运动规律。三者分别从时域、复数域和频域对系统的动态特性及运动规律进行描述和研究。

2.2 动态系统的状态空间分析法

2.2.1 状态空间的基本概念

在分析研究一个给定的动力学系统时，首先应建立该系统的数学模型，即导出描述该系统动态特性的数学表达式。这种表达式亦称控制系统的动态方程，它是按照控制系统的实际结构、工作原理，并通过某些决定系统动态行为的物理学定理而写成的。

以状态空间分析法为基础的现代控制理论是采用状态空间表达式作为描述系统的数学模型。状态空间分析法是一种时域分析法，它对控制过程的描述比较直观。状态空间表达式是由状态方程和输出方程组成；状态方程是一个一阶微分方程组，主要描述系统输入与系统内部状态的变化关系，即描述系统的内部行为，揭示控制系统的内在规律；输出方程是一个代数方程，主要描述系统状态与输出的关系，即描述系统的外部行为，说明控制系统的外部输出规律。因此，状态空间表达式反映了控制系统动态行为的全部信息，它是对系统的一种完全描述。状态空间表达式的建立一般有三种方法：

- ①机理分析——根据系统的物理机理导出它的数学模型。
- ②系统辨识——通过对实验数据的分析得出它的数学模型。
- ③实现问题——由系统的传递函数求出它的数学模型。

描述系统状态空间的基本概念如下：

(1) 状态——能完全描述系统动态行为（运动状态）的一个最小变量组，它是时间的函数。所谓完全描述，即当给定了初始时刻 $t = t_0$ 时的值（即初始状态）和 $t \geq t_0$ 时