

高等学校教学用书

# 自动控制系统

(修订本)

A. M. 苏启林 编

国防工业出版社

## 內容簡介

本书——Системы автоматического управления 系苏联专家苏启林 (А. М. Сучилин) 副教授 1956~57 年在清华大学自动控制系为教师及部分同学讲授“自动控制系统”一課时的讲稿。

本书讲述电的自动控制系统 (主要是电机自动控制系统和随动系统) 的元件、线路、原理和计算方法。书中采用结构图和函数图这个方便的工具来分析自动控制系统的工作。

本书可作为高等学校自动控制、企业电气化等专业的教学参考书, 也可供从事各种对象的自动控制方面工作的人员使用。

本书再版时訂正了在初版中发现的錯誤, 但可能还会存在一些问题, 希望讀者指正。意見請寄国防工业出版社或清华大学自动控制系。

苏联 A. M. 苏启林編  
清华大学自动控制系统譯

\*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业許可証出字第 074 号

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店科技发行所发行 各地新华书店經售

\*

787×1092<sup>1</sup>/<sub>16</sub> 印張 11<sup>6</sup>/<sub>8</sub> 271 千字

1959 年 2 月第一版

1962 年 5 月第二版第五次印刷

印数: 12,801—20,800 册 定价: (10-5)1.35 元

統一书号: 15034·299

高等学校教学用书

# 自动控制系統

(修訂本)

A. M. 苏启林編

清华大学自动控制系譯



国防工业出版社

1962



# 目 录

序言	5	1) 电机放大器(ЭМΥ).....61
第一章 自动控制系统的概念	8	a) 交磁放大机.....62
§1 手动控制和自动控制的概念	8	б) 交磁放大机中的反馈.....72
§2 自动控制系统的结构图	9	B) 自激放大机.....74
第二章 电动机	12	r) 饱和放大机.....80
§1 概述	12	2) ЭМΥ-Π系统中的转速自动控制.....81
§2 他激直流电动机	12	a) 具有内反馈的ЭМΥ-Π系统.....81
1) 他激直流电动机的机械特性和传递特性	14	б) 具有外反馈的ЭМΥ-Π系统.....91
2) 他激直流电动机的过渡过程	18	B) ЭМΥ-Π系统中的电流截止反馈和锁定
a) 当 $u_a$ 突变时的过渡过程	19	连接.....93
б) 当 $M_c$ 突变时的过渡过程	21	3) 利用ЭМΥ 他激磁机的连续控制系统.....96
B) 当 $u_B$ 突变时的过渡过程	23	a) 用交磁放大机作激磁机的Γ-Π系统.....96
r) 在各种负载力矩特性下电动机工作的稳定性	24	б) 用自激放大机作激磁机的Γ-Π系统.....98
§3 串激直流电动机	25	§3 电动机转速的电子-离子控制.....99
§4 异步电动机	28	1) 闸流管-电动机系统.....99
1) 三相异步电动机	28	2) 用电子-离子设备自动控制直流电动机转速
2) 空心转子两相异步电动机	31	的线路.....105
§5 电动机的制动	34	§4 用磁放大器(MY)来控制电动机的
1) 能耗制动	34	转速.....109
2) 反接制动	34	1) 用MY控制直流电动机的转速.....110
3) 能量回馈制动	35	2) 用MY控制异步电动机的转速.....110
第三章 电动机的继电器-接触器控制	36	第五章 距离传递.....115
§1 概述	36	§1 距离传递的基本特性.....115
§2 利用继电器-接触装置自动起动的电动机	36	§2 直流距离传递.....115
1) 作为转速的函数起动的电动机	37	1) 指示型距离传递.....116
2) 作为时间的函数起动的电动机	39	2) 自平衡距离传递.....119
3) 作为电流的函数起动的电动机	42	§3 交流距离传递.....124
4) 作为加速度的函数起动的电动机	42	1) 感应自同步式距离传递.....121
§3 利用继电器-接触装置自动制动的电动机	43	2) 永磁整角机距离传递.....126
1) 能耗制动的自动控制	44	第六章 随动系统.....123
2) 反接制动的自动控制	44	§1 随动系统的分类.....129
第四章 电动机的连续控制	47	§2 随动系统的输入量和品质指标.....131
§1 发电机-电动机系统(Γ-Π系统)	47	§3 最简单的随动系统的分析.....133
1) 概述	47	§4 附加积分-微分联接及其对随动系统工
2) Γ-Π系统中过渡过程的强化	49	作品质的影响.....139
3) Γ-Π系统中电动机的制动与逆转	50	1) 输出角一次导数(转速)的负反馈.....139
4) 串激电动机的Γ-Π系统	56	2) 输出角二次导数(加速度)的负反馈.....141
5) 三绕组发电机的Γ-Π系统	57	3) 与差角导数成比例的附加联接.....144
§2 利用电机放大器(ЭМΥ)自动控制电动机		4) 差角积分的正反馈.....146
的转速	61	5) 输入角导数的正反馈.....148
		6) 附加联接对随动系统动作速度的影响.....149
		§5 自整角机随动系统.....152
		1) 自整角机的变压器工作状态.....153

2) 具有电子放大器和电机放大器的自整角机 随动系统.....	155	§ 9 电动-液动随动系统.....	173
3) 具有磁放大器和电机放大器的随动系统.....	161	§ 10 随动系统的設計.....	175
4) 精测-粗测随动系统.....	164	1) 选择随动系统各个元件的一般原则.....	176
§ 6 永磁整角机随动系统.....	167	2) 随动系统的静态计算.....	177
§ 7 感应式随动系统.....	168	3) 随动系统的动态计算.....	177
§ 8 电位计式随动系统.....	171	a) 用分析法计算校正装置.....	178
		b) 用综合法计算校正装置.....	181

# 序 言

自动控制系统是许多生产对象和国防对象自动化的基础。自动控制系统在国民经济中的意义和作用可以由自动化在工业、科学研究工作以及国防技术中的意义和作用来说明。如果说机械化是把人从沉重的体力劳动中解放出来的话，那末自动化则使人免除了用手去操作机器的必要，并且大大提高了劳动生产率。

利用自动装置来控制生产过程和单个对象，就有可能提高这些过程的进行速度，提高控制的准确度。一部现代的初轧机一年要轧一百万吨金属，而在手动控制时就不得不降低金属的压轧速度，以便人能够对金属的位置有所反应并采取相应的控制动作。这时不可避免地会有间歇。经验说明：这样一年中将损失掉20%的工作时间，也就是说将近20万吨轧成品。有一种磨床能在几秒钟之内加工好一个零件，同时加工精度达到1微米。要是用手控制砂轮的进给，恐怕就会有很高的废品率了。采用适当的自动控制系统可以保证要求的控制速度和准确度，并且几乎完全消除废品。

目前，对于完全自动化的工段、单个车间以及整个工厂的建立给予很大注意。在苏联有完全自动化的生产汽车发动机活塞的工厂，有生产轴承的自动化企业，并正在建设一系列的自动机床作业线。

在完全自动化的工作条件下，人的作用只在于监视机器及其控制系统的工作，只在于调整它们。

从技术文献上知道，在美国已经有几乎完全自动地加工和装配汽缸体的流水作业线。此外文献中也提出在美国已经有几乎完全自动化的电视机装配流水线。

加工汽车零件的自动工厂的建立，喷气发动机和飞机的生产的高度自动化，使得对金属切削机床的自动化加以特别的注意。由于汽车、透平、飞机的型式经常变化，其零件不断改善，有必要经常改变由同一组机床加工的零件的形状，这引起人们想设法制造能够很快地从生产这种产品改装成生产另一种产品的万能机床。这样就出现了第一批加工形状复杂的零件用的、由计算机控制的机床。在机床工作的过程中，计算机计算刀具的运动，使刀具按着被加工零件外形曲线运动。这样一来，就有可能免去画零件的复杂的视图的必要，有可能使由于机床改装而引起的停顿减到最少，有可能提高加工精度和速度。并且人也不必监视机床的工作，因为当有故障时，需要换刀、加油等时，机床会把磁带上记录的信号（通常就是人的话语）用声音发出通知，在许多场合下还会指示出人应当去做的操作。

自动化在科学研究中也有重大意义。用模拟的办法可以研究各种对象及其控制系统的工作。在苏联用这个办法研究了古比雪夫水电站的发电机的各种励磁系统以及它们的水轮机的工作。使复杂运算过程自动化的计算机的应用正日益推广。用计算机有可能解线性和非线性微分方程以及偏微分方程。

在苏联建造了自动计算火车运行图的装置。这里需要解二阶的非线性微分方程。

现代飞机的飞行高度和速度要求防空技术的改进，必须提高炮口瞄准的速度和准确度，要求准确到0.05度，炮身速度要达到每秒 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 。此外，要以很高的速度和准确度测定目的物的坐标，并把炮身引导到超前点，以便击中运动着的目的物。人既不能以所要求的速度和准确度转动沉重的炮身，也无法在很短的时间内测定目的物的坐标并进行必要的计

算。在目前高射武器都装备有复杂的自动控制系统，其中包括雷达设备，机电式和电子式计算仪器、高射炮射击指挥仪以及随动系统。

现在正在加速研究基于利用放射性同位素的自动装置。

根据上面所叙述的可以作出结论：现代技术的水平在很大程度上取决于其自动化的程度。由于解放了人而用自动装置来代替他；因而提高了劳动生产率，这样得到的高度经济效果对于一系列工艺过程的自动化是个强有力的刺激。

在目前，自动装置已应用于许多工业部门、运输业以及复杂的战斗武器中了。现在，人应当保证复杂的自动系统的正确工作，应当进行它们的调节和调整，这就要求它具有高度的水平。此外应用复杂的自动系统大大提高了劳动生产率。因此在社会主义阵营各国自动化的作用特别日益显得重要。在苏联，二十次党代表大会在关于第六个五年计划的指示中指出了一系列的措施来创设新的自动装置，并把它们运用到各种生产过程中。要注意建立流水线、自动化车间和自动化工厂，注意研究和发展的新的自动装置，必需注意发展计算机的生产并应用它们来控制生产过程。为此设立了仪表制造及自动化设备部，负责建立工厂、研究所、实验室来研究和大量生产自动装置和计算机。在苏联，有苏联科学院自动学和远动学研究所、一系列的专门实验室和别的组织，从事自动装置的研究和在国民经济中的应用。在许多大工厂中设有生产自动化处。

重工业生产部门中自动化得到特别广泛的采用。因此在社会主义阵营各国自动化作用更加显得日益重要。

中华人民共和国成功地恢复和改进旧有工厂，建立了新的拥有现代化装备的工厂。按照科学技术发展的十二年规划，中华人民共和国将成为科学技术先进的国家之一。因此必须迅速掌握现代技术并向前发展，而这要是不研究新的自动装置，不在国民经济中采用自动化是不可想像的。

冶金企业和机器制造企业中愈来愈多地采用自动装置。在鞍钢采用了控制初轧机、钢轨压轧机和控制高炉进料的自动设备。正在建设的和已建成的汽车工厂和生产喷气式飞机的工厂都拥有流水线、传送带、自动铸造以及其他自动化了的对象。

正在建设的工厂应当用最新的，建立在广泛自动化和采用自动学最新成就的基础上的设备来装备。

在这样的情况下，自动学和远动学的专家应当很好地知道现有的自动控制系统，要会设计新的自动控制系统和应用它们来使生产对象自动化。除此之外，必须仔细研究自动化的对象，对因自动化而得到的效果有清楚的概念。这一切都要求自动学和远动学的专家有广阔的技术视野，善于独立解决复杂的技术任务，创造性地对待工作，不断地学习。

应该记住，自动学和远动学是发展最快，最迅速地趋于完善的科学技术部门之一。

### 关于“自动控制系统”课的一般介绍

“自动控制系统”这门课由三部分组成。

第一部分包括电力拖动理论的几个问题和电动机的继电-接触控制系统。这里面讲电动机的静态及动态特性，电动机的起动和制动用的继电-接触控制系统的建立；

第二部分中讲电动机的连续控制，其中包括用电机放大器和电子放大器的连续控制。这里讲电机放大器(ЭМУ)工作的分析，以及直流电动机自动调速系统；



第三部分研究远距离传递和随动系统。

本课程是自动学远动学专业的基础课之一。

我们假定同学事先已全部或部分地学过：“调节原理”、“自动元件”、“应用电子学”和“电机学”。本课程的任务是研究自动控制系统的静态和动态的现代分析方法以及它们的计算和设计方法。课程大纲中规定学生做 8 个实验，每个 3 小时，并有课程设计。

#### “自动控制系统”课的主要参考书

1. 索柯洛夫著：电气机械的自动控制系统，陈敦锡译，电力工业出版社。
2. 奇里金著：电力拖动普通教程，钟士模、萧达川译，高等教育出版社。
3. 约瑟夫扬、卡冈著：随从驱动原理，左宗朴译，水利电力出版社。
4. H. M. James, N. B. Nichols, R. S. Phillips 等著：Theory of Servomechanisms, 1947 (有俄译本)。

# 第一章 自动控制系统的概念

## § 1 手动控制和自动控制的概

本课程不可能一一包括为数众多的各种各样的自动控制系统。但是，考虑到它们构造上的相似之处，在研究了它们之中用得最普遍的一些系统之后，是可以有足够的力量来计算和分析任何自动控制系统的。

自动控制系统之间的主要区别在于其各个元件构造之不同以及它们工作所依据的物理过程之不同。这些元件的作用是放大和变换控制信号和检查信号。这些元件组合起来就形成控制系统。

控制分为手动和自动两种。手动和自动控制可以是直接的或是远距离的。

手动直接控制（图 1）和手动距离控制（图 2）都以有操作人为前提。

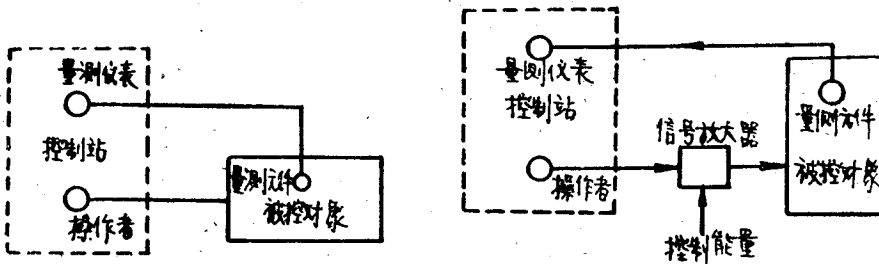


图 1

图 2

操作人根据测量仪表的指示操作控制机构，控制的质量完全取决于操作人的技术。控制回路经过操作人的动作而闭合，操作人好比是控制回路中不可分割的一个元件或环节。显然，操作人不在时就要失去控制。

在手动距离控制中，操作人要操作一定距离以外的对象，不像在直接手动控制时对象就在操作人身边。考虑到在把信号传给远处的对象时不可避免的能量损失，在远距离控制中必须有放大器（图 2）。

在自动控制系统中（图 3），计算装置（在自动线路中常常称做显示元件）代替了操作人。当支配装置发出的给定信号和从被控制对象传来的被检查信号之间发生差异时，计算装置就发出控制信号，操作人的作用缩小到安排支配装置或者是向计算装置发信号。应当注意：在自动控制系统中控制回路是封闭的。这样，封闭结构是绝大多数自动控制系统的特征；或者更确切地说，现代的自动控制系统总是有反馈的。

一般说来，自动控制系统可以有不止一个，而是许多个反馈，因此它们的结构就不是如同图 3 所示的单回路，而是多回路的。自动控制系统实质上是距离控制的，因为它们的回路中总是有放大器。

### §2 自动控制系统的结构图

按照其用途，組成自动控制系统的元件分为：执行元件，放大元件，计算元件（显示元件），支配元件和量测元件。每种元件的作用可以从图3很方便地看出来。

在分析自动控制系统的工作时，特别重要的是要知道信号是如何在元件之间传递的，信号如何放大，有哪些惯性引起的畸变，在传递当中有没有积分或微分。此外还必须找出元件之间的一切连系以及这些连系的连接处。这一切都可从结构图得到完整的概念。

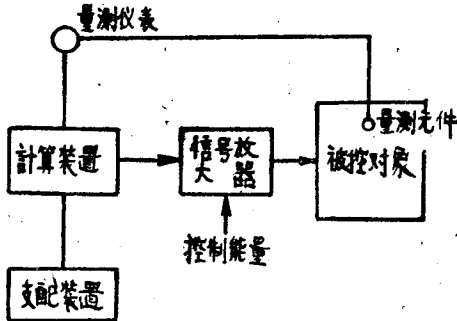


图 3

结构图由基本动态环节组成，并标明了它们之间的连系。根据对组成自动控制系统的元件或装置的分析，可得到它们的传递函数，传递函数用算子的形式写出来。每个环节都有确定的传递函数。

动态环节有许多种，各以它们的传递函数而互相区别开来（关于基本环节及其传递函数的概念在“自动调节理论”中有详细叙述，所以在这里就不谈了）。

这样，分析自动控制系统的的第一步就是画结构图。关于建立结构图的问题在“自动调节理论”中有详细叙述。上面已经指出，自动控制系统的特性是具有反馈。因此，应该讲一讲具有反馈的结构图的变换。

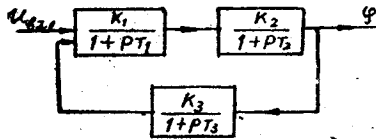


图 4



图 5

假定有一自动控制系统的结构图（图4）。把这个图变成图5的样子，得到

$$K(p) = \frac{K_1 K_2 (1+pT_3)}{(1+pT_1)(1+pT_2)(1+pT_3) + K_1 K_2 K_3} \tag{1-1}$$

变换已完成了，因为我们已经找到了就动态特性说来和自动控制系统等价的环节的传递函数。从这个式子中可以决定自动控制系统的特征方程

$$(1+pT_1)(1+pT_2)(1+pT_3) + K_1 K_2 K_3 = 0 \tag{1-2}$$

如果已经知道结构图的话，比较（1-1）、（1-2）两式以及图4可以得到迅速找出单闭环系统的传递函数和特征方程的规则。单闭环系统的传递函数是一个分式，其分子等于各正反馈环节的传递函数的分子和各反馈环节的传递函数的分母的乘积，分母则等于闭环所有环节的传递函数的分母的乘积再加上所有环节的分子的乘积，系统的特征方程是闭环中各传递函数的分子乘积和分母乘积的和，并让它等于零。

如果自动控制系统是多闭环的，则首先应当变换内环，然后变换外环。图6是二闭环自动控制系统的结构图。相当于回路J的环节的传递函数是

$$K_1(p) = \frac{K_1 p T_3}{(1 + p T_1) p T_3 + K_1}$$

这样便得到图 7 所示的单回路图，这个图可以用上面讲的方法继续变换。

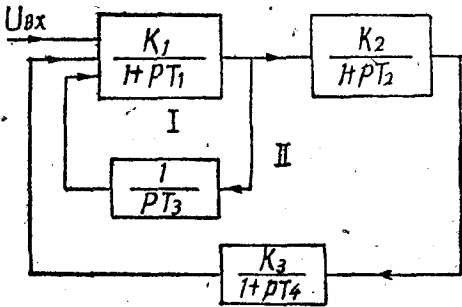


图 6

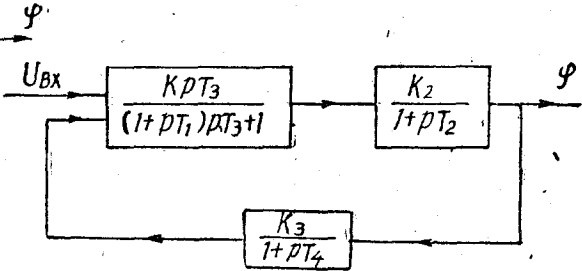


图 7

自动控制系统的结构图取决于信号在其各元件间的传递方向。自动控制系统基本上是由定向作用的装置组成的。例如：电子管放大器只能通过方向为由入端到出端的信号，磁放大器和其他元件也只能这样通过信号。因此一般说来自动控制系统具有完全肯定的唯一正确的结构图。

在自动控制系统中，常有由无源元件组成的电路作为微分和积分环节出现。电路的无源元件不是定向作用元件，因此由它们组成的电路就没有固定的结构图。可是也能给它们建立由基本动态环节组成的图，这种图很合理地叫做函数图。

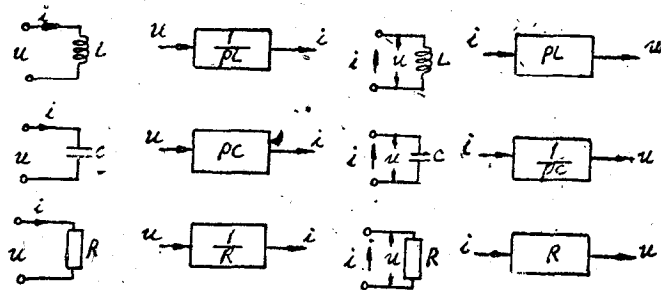


图 8

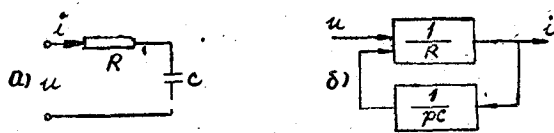


图 9

图 8 列有单个的电路无源元件和它们的传递函数。

图 9 a 所示的最简单的单回路系统具有如图 9 b 所示的函数图，它的传递函数是

$$K(p) = \frac{i(p)}{u(p)} = \frac{pC}{pCR + 1} = \frac{pT}{pT + 1} \cdot \frac{1}{R}$$

式中  $T = RC$ 。如果输出量是电器上的电压  $u_c$ ，则函数图变为图 10 的样子，其传递函数为

$$K(p) = \frac{u_c(p)}{u(p)} = \frac{1}{pT + 1}$$

现在来找图 11 a 的双回路的传递函数。它的函数图 (图 11 b) 中有交叉联接。在把回路 I 变成复合环节之后得到新图 (如图 11 c)。为了避开交叉联接，我们设想一个结构图 (图 11 d)。考虑到正反馈和反反馈的作用都通过传递函数为  $\frac{1}{R_1}$  的环节，这样便可以用重复画  $\frac{1}{R_1}$  这个环节的办法来把正反馈和反反馈分开来。从图 11 d 的结构图可找到

$$K_{II}(p) = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}, \quad K_{III}(p) = \frac{R_1 R_2 p C}{(R_1 + R_2)(p C R_3 + 1) + R_1 R_2 p C}$$

$$K(p) = \frac{i_2(p)}{u(p)} = \frac{R_2 p C}{p C R_3 + 1 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} p C} \cdot \frac{1}{R_1 + R_2}$$

因此

$$K(p) = \frac{p T_1}{p(T_1 + T_2) + 1} \cdot \frac{1}{R_1}$$

式中  $T_1 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \cdot C$ ;  $T_2 = C R_3$ 。

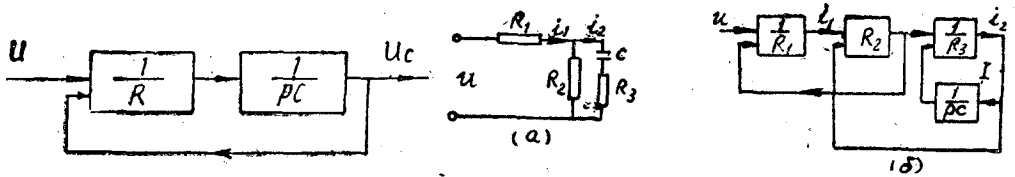


图 10

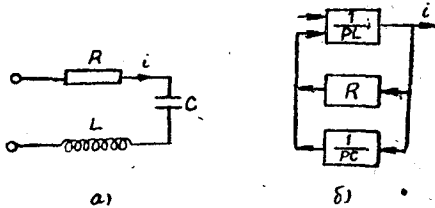


图 12

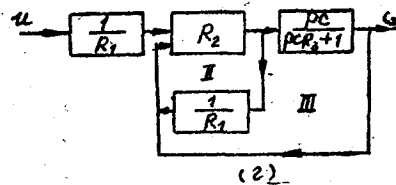
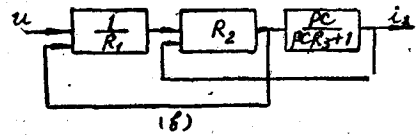


图 11

对图12 a 中包含三个元件  $R$ ,  $L$ ,  $C$  的单闭路可以建立如图12 b 所示的函数图。和上例一样，可以找到它的传递函数。

以前面分析过的关于建立函数图的例子做基础，可以提出建立无源元件组成的电路的函数图的普遍方法。

对由若干元件串联而成的单闭路电路，应当取一个元件做正反馈环节，其余元件则表为反反馈环节（图12 b）。各环节的传递函数则按照作用在它们的输入端和输出端的物理量来选定（见图 8）。

对多闭路电路（图11）来说，应该把第一闭路中的一个元件表为正反馈环节。它的输出应该加到代表两个闭路的公共元件的环节上。公共元件环节的输出则经过反反馈加到第一闭路的输入端，经过正反馈加到第二闭路的输入端去。第二闭路的反反馈作用经过公共元件环节。

结构图和函数图使推导传递函数和特征方程所需的数学计算简化了。它们给我们以各作用如何在系统中进行的直观性的概念，并使我們較容易地檢驗計算結果是否正確。

当然，系统的方程也可以用任何其他在“自动调节理论”中讲的方法推导，但是經驗說明，用结构图和函数图使分析更简化更醒目。

## 第二章 电动机

### §1 概述

电动机种类很多,我们将只讲那些在自动控制系统中用得最广泛的。这类电动机有:他激直流电动机,串激直流电动机,两相的和三相的异步电动机。在小功率控制系统中用得最多的是具有空心转子的两相异步电动机,功率较大的系统中主要是用他激直流电动机,有时也用三相异步电动机。

在分析电动机的工作时,我们将讨论那些为研究自动控制系统所必需的特性。要在自动控制系统中采用电动机,它们的机械特性和传递特性有很大的意义。传递特性在拖动中叫调节特性。在本课中用“传递”一词是因为本课中所讲的“调节”和拖动中所讲的含意有所不同。

在研究电动机时,我们把它看作控制回路的一个环节。这时应该注意:它的输出量在大多数情况下是转速,它的输入量可以是负载力矩或者是控制讯号。

在静态下,当控制讯号恒定时,电机转速随负载的变动而变动。关系式 $\omega = f(M)$ 或是 $n = f(M)$ 叫做机械特性,因为等式两边均为机械量之故。如果负载力矩不变,而控制讯号变了,则同样要引起速度的变化。在静态下转速和控制讯号的关系式叫做传递特性或者调节特性。

应当指出,在线性近似时,如果已经知道了传递函数,令其中的 $p$ 等于零,就可得到传递特性或调节特性的解析式。机械特性好坏的指标是它的硬度。机械特性的硬度用系数 $\gamma_{omn}$ 来决定(下标 $omn$ 表示是相对值的意思)

$$\gamma_{omn} = \frac{dM\%}{dn\%}。$$

在选择用来带动某一个机械的电动机时,机械特性的硬度是主要指标之一(关于这个问题的详细叙述可参阅拖理论方面的书籍)。

在转速自动调节中,同样的给定准确度下,硬度愈大,所需要的控制回路总放大系数就愈小。传递特性的斜率决定了系统的总放大系数,因而也决定了系统工作的准确度。

电动机的传递函数表达了其过渡过程的特征,后者对于控制的动态准确度和稳定性有决定性的影响。由于自动化了的工艺过程的速度不断提高,电动机的动态特性在现在尤其具有特殊的意义。

### §2 他激直流电动机

图13a所示的是用得很广的一种他激直流电动机联接图。图13b是它的结构图,其中表现了影响转速的诸作用 $u_a$ 、 $u_b$ 、 $M_c$ 等的传递方向及其接入处。

作用 $u_a$ 和 $u_b$ 应当算作控制作用,用来控制电动机的转速;反抗力矩 $M_c$ 应算做扰动作用,因为在大多数场合里它引起不希望有的速度变化。

如果更詳細地分析上面所讲的各个作用进行的通道，我們可以得到下述的情景。

当电樞两端出現电压  $u_a$  时，电樞迴路中产生电流  $i_a$ 。电流  $i_a$  是电樞迴路的輸出量，这迴路实质上由电阻  $R_a$  和电感  $L_a$  串联組成。电流  $i_a$  和磁通  $\phi_B$  作用，产生旋轉力矩  $M$ ，这个力矩使得轉动慣量为  $J$  的电樞以  $\frac{d\omega}{dt}$  的加速度旋轉起来，获得  $\omega$  的轉速。有了磁通  $\phi_B$ ，当电樞以轉速  $\omega$  旋轉时就会产生反电动势  $E$ ，其方向和  $u_a$  相反。当激磁电压  $u_B$  改变时， $R_B$  和  $L_B$  的串联电路中的激磁电流  $i_B$  也变化， $i_B$  的变化又引起磁通  $\phi_B$  的变化。从而使电机的力矩也变化。

电机軸上的反抗力矩  $M_c$  假定不随轉速而变，其方向应当看作和电动力矩  $M$  相反。

根据第一章所讲的組成結構图和傳遞函数的方法，可以得到图 14 的电动机結構图，其中包括电樞迴路和激磁迴路的函数图。图中用箭头表明了用在电樞迴路中串入附加电阻的办法来控制速度的可能性。

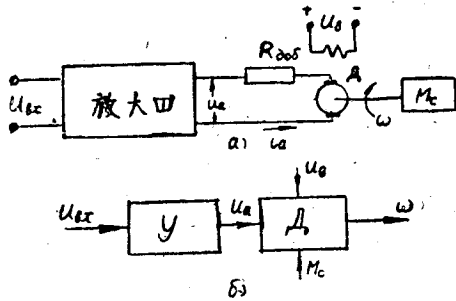


图 13

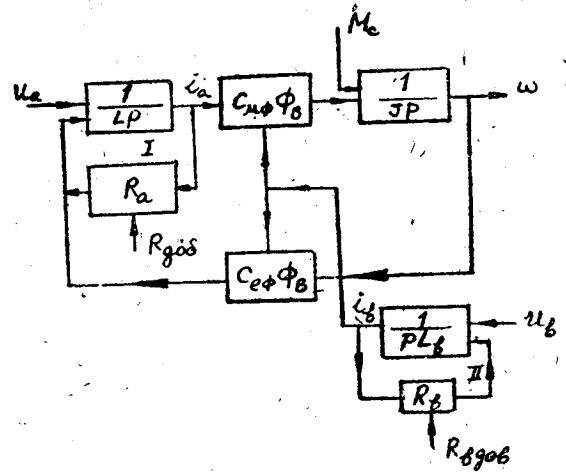


图 14

把函数图变换之后可以得到比較简单的图15。如果激磁电压恒定 ( $u_B = \text{const}$ )，則可以进一步簡化如图16。这些图里面的符号意义是：

$$C_e = \frac{E}{\omega} = C_{e\phi} \phi_B$$

$$C_m = \frac{M}{i_a} = C_{m\phi} \phi_B$$

式中  $C_{e\phi}$ 、 $C_{m\phi}$  是电机的結構上的常数：

$$C_{e\phi} = \frac{pN}{a \cdot 60} \cdot 10^{-8}$$

$$C_{m\phi} = \frac{pN}{a \cdot 2\pi \cdot 9.81} \cdot 10^{-8}$$

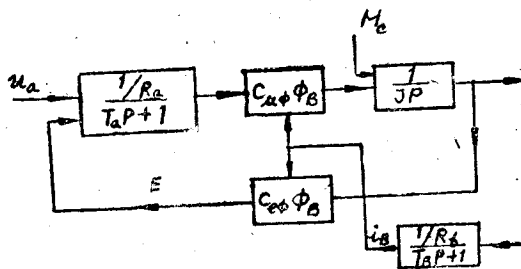


图 15

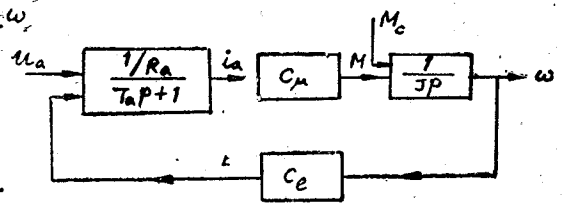


图 16

如果电动机的输出——轉速 ( $n$ ) 是用每分钟若干轉来量度时, 則

$$\frac{C_e \phi}{C_m \phi} = \frac{C_r}{C_n} = 1.03, \quad J = \frac{GD^2}{375}。$$

如果轉速 ( $\omega$ ) 用每秒若干弧度来表示, 則

$$\frac{C_e \phi}{C_m \phi} = \frac{C_e}{C_n} = 9.81。$$

图 14, 15, 16 中的結構图都是已經綫性近似化了的。事实上当作用訊号傳遞时要发生非綫性畸变, 尤其是  $u_a$  这个作用傳遞的时候畸变特别大。畸变情况取决于磁化曲綫的饱和度。即使磁化曲綫是直綫, 当二变量  $\phi_b$  与  $i_a$  相乘时仍出現非綫性, 因此在分析激磁电压变化的情况下工作的电机时, 应当用已知的方法来綫性化。

### 1) 他激直流电动机的机械特性和傳遞特性

他激直流电动机的轉速控制方法中用得最广的是从电樞这边控制, 即改变电压  $u_a$ 。反抗力矩当然也可能同时变化。

我們考虑有两个作用  $u_a$  和  $M_c$  (見图 16)。利用疊加定理, 可得到

$$\omega = \frac{u_a \frac{C_n}{R_a}}{(T_a p + 1) p + \frac{C_n C_e}{R_a}} - \frac{M_c (T_a p + 1)}{p (T_a p + 1) + \frac{C_n C_e}{R_a}},$$

或者, 經過整理后得

$$\omega = \frac{u_a \frac{1}{C_e} - M_c \frac{R_a}{C_n C_e} (T_a p + 1)}{T_a T_m p^2 + T_m p + 1}, \quad (2-1)$$

式中  $T_a = \frac{L_a}{R_a}$  —— 电樞迴路的时间常数;

$T_m = \frac{J R_a}{C_n C_e}$  —— 机电时间常数。

在 (2-1) 中令  $p = 0$ , 則

$$\omega = \frac{u_a}{C_e} - M_c \frac{R_a}{C_n C_e}。 \quad (2-2)$$

方程式 (2-2) 相当于电动机的静态方程。

如果在 (2-2) 中令  $u_a = \text{const}$ , 就得机械特性的式子  $\omega = f(M_c)$ 。机械特性可以写作电流的函数的形式:

$$\omega = \frac{u_a}{C_e} - \frac{R_a}{C_e} i_a, \quad (2-3)$$

因为在直流他激机中  $C_n = \text{const}$  ( $\phi_b = \text{const}$ ), 那么 (2-2) 和 (2-3) 所表示的特性曲綫仅是横坐标比例尺不同。

在不同的  $u_a$  下的电动机的机械特性画在图 17 中 ( $\phi_b = \text{const}$ ,  $R_a = \text{const}$ )。  $\omega_{o1}$ ,  $\omega_{o2}$ ,  $\omega_{o3}$ ,  $\omega_{o4}$  表示理想无載轉速, 或者叫做临界轉速。它們的数值可以从 (2-2) 或者 (2-3) 中得到, 只要相应地令  $M_c = 0$  或  $i_a = 0$ , 所以

$$\omega_o = \frac{u_a}{C_e}。$$

图 17 中  $M_n$  和  $i_{an}$  是起动力矩和起电电流。它們也可以从 (2-2) 和 (2-3) 中得到, 只要設  $\omega = 0$ 。



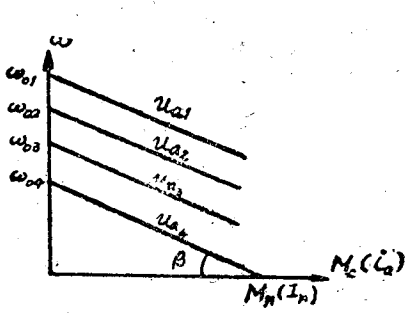


图 17

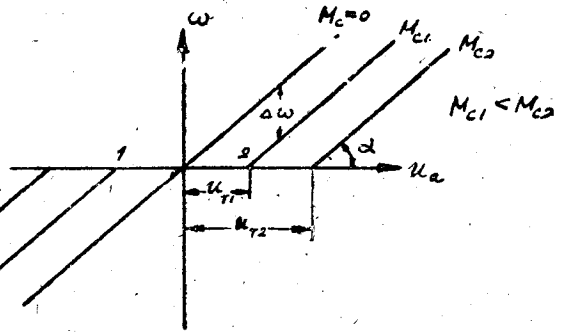


图 18

$$M_n = \frac{u_a}{R_a} \cdot C_{em}$$

$$I_n = \frac{u_a}{R_a} \circ$$

从图 17 和 (2-2)、(2-3) 可得

$$\tan \beta = \frac{R_a}{C_e C_m} \text{——机械特性的斜率。}$$

如果给定  $\omega_0$ ，则因负载的作用，转速要降低  $\Delta\omega$ ，

$$\Delta\omega = \frac{R_a}{C_e C_m} M_{c0}$$

自动控制系统的任务常常就是要维持给定的转速，这时为了补偿误差  $\Delta\omega$  起见，利用反馈在电枢回路中加进一个和  $\Delta\omega$  或者电枢电流成正比的附加电压。

如果 (2-2) 中  $M_c = \text{const}$ ，而  $u_a = \text{var}$ ，则得到方程式  $\omega = f(u_a)$ ，这个式子决定电动机的传递特性或调节特性。

图 18 是在不同的  $M_c$  下的传递特性。如果电动机轴上有反抗力矩  $M_c$  存在，只有当电枢两端的电压超过  $u_T$  时电机才开始转动。电压在  $+u_T$  和  $-u_T$  之间时电机不转，因此，控制回路好像断开了。这样，当轴上有反抗力矩时，控制便有了失灵区（在点 1、2 之间）其大小取决于反抗力矩之值。

当控制过程中转速会经过零时，例如在随动系统中，就会出现失灵区。由于有失灵区，传递特性成为非线性的，因此，其中的电动机转速会经过零值的控制系统也就是非线性的。

传递特性的斜率取决于倾斜角的正切  $\tan \alpha$ （图 18）。

在某些随动系统中是依靠改变激磁电压  $u_b$  来控制电动机的。借助于放大器改变激磁电流，从而改变磁通  $\phi_b$ ，结果转速发生变化（图 19）。

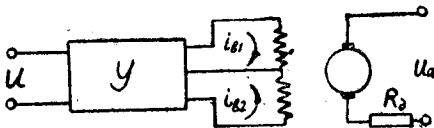


图 19

为了找出  $\omega = f(\phi_b)$ ，把 (2-2) 中的  $C_e$  和  $C_m$  分别用  $C_{e\phi} \phi_b$  和  $C_{m\phi} \phi_b$  代替，得

$$\omega = \frac{u_a}{C_{e\phi} \phi_b} - \frac{R_a}{C_{e\phi} C_{m\phi} \phi_b^2} M_c, \tag{2-4}$$

不同磁通下的机械特性见图 20。