



高等学校统编教材

自动控制原理实验

李学忠 赵乃真 编

国防工业出版社

自动控制原理实验

李学忠 赵乃真 编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书是与李友善教授主编的《自动控制原理》统编教材相配套的一本实验教材。

本书集中阐述了自动控制实验技术、测试的理论与基本实践。侧重从实验的角度介绍了典型的自动控制系统的组成及原理, 自动控制系统数学模型的建立方法; 系统参数及性能指标的测试方法和基本的调试步骤以及微型计算机在自动控制原理实验中的应用, 并给出了全部程序清单; 对非线性系统实验也作了较详细的叙述。最后还给出了十几种自动控制原理的实验提纲。本书选材注意了理论联系实际和先进性、系统性及实用性。

本书除作高等院校自动控制、工业自动化等专业实验教材外, 还可供从事自动控制的工程技术人员参考。

自动控制原理实验

李学忠 赵乃真 编

国防工业出版社出版

(北京市车公庄西路老虎庙七号)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

787×1092 1/16 印张 15³/₄ 362千字

1989年9月第一版 1989年9月第一次印刷 印数: 0,001—4,280册

ISBN 7-118-09549-5/TP·72 定价: 3.15元

出版说明

根据国务院国发〔1978〕23号文件批转试行的“关于高等学校教材编审出版若干问题的暂行规定”，中国船舶工业总公司承担了全国高等学校船舶类专业教材的编审、出版的组织工作。自1978年以来，完成了两轮教材的编审、出版任务，共出版船舶类专业教材116种，对解决教学急需，稳定教学秩序，提高教学质量起到了积极作用。

为了进一步做好这一工作，中国船舶工业总公司成立了“船舶工程”、“船舶动力”两个教材委员会和“船电自动化”、“惯性导航及仪器”、“水声电子工程”、“液压”四个教材小组。船舶类教材委员会（小组）是有关船舶类专业教材建设的研究、指导、规划和评审方面的业务指导机构，其任务是为作好高校船舶类教材的编审工作，并为提高教材质量而努力。

中国船舶工业总公司在总结前两轮教材编审出版工作的基础上，于1986年制订了《1986年——1990年全国高等学校船舶类专业教材选题规划》。列入规划的教材、教学参考书等共166种。本规划在教材的种类和数量上有了很大增长，以适应多层次多规格办学形式的需要。在教材内容方面力求做到两个相适应：一是与教学改革相适应；二是与现代科学技术发展相适应。为此，教材编审除贯彻“打好基础，精选内容，逐步更新，利于教学”的原则以外，还注意了加强实践性教学环节，拓宽知识面，注重能力的培养，以适应社会主义现代化建设的需要。

这批教材由各有关院校推荐，同行专家评阅，教材委员会（小组）评议，完稿后又经主审人审阅，教材委员会（小组）复审。本规划所属教材分别由国防工业出版社、人民交通出版社以及各有关高等学校的出版社出版。

限于水平和经验，这批教材的编审出版工作还会有许多缺点和不足，希望使用教材的单位和广大师生积极提出宝贵意见，以便改进工作。

中国船舶工业总公司教材编审室

1988年3月

前 言

实验是工程理论课程教学的重要环节,尤其对《自动控制原理》这门实践性较强的课程来说,实验更是必不可少的一环。实验教材是指导实验的重要手段。本书是与哈尔滨工业大学李友善教授编写的《自动控制原理》统编教材相配套的一本实验教材。它既适于《自动控制原理》实验课用,也可作为自动控制原理实验独立设课的教材,具有相对的独立性。课程计划为 36 学时,其中包括课堂讲授和实验两部分内容,两者时数比为 1:3。

本书共分六章。前四章对自动控制原理、实验的基础性问题进行了详尽的阐述。第一章集中介绍了小功率随动系统、调速系统、离散控制系统和小型模拟计算机等组成及原理,以便读者对实验对象有明确的了解。第二章系统地介绍了建立控制系统数学模型的方法及原理,为分析与综合系统作好准备。第三章主要说明如何对控制系统进行调试及其性能指标的测试。第四章着重讨论非线性系统中环节的模拟、参数的测试及综合方法。随着微型计算机技术的迅速发展,计算机不仅已成为控制系统的组成部分,而且也成为自动控制原理实验的重要手段。为此,第五章专门讨论了利用微型计算机进行自动控制原理实验的方法。其中介绍了各种实验原理、程序说明及使用举例,并给出了全部软件包的程序清单。第六章根据自动控制原理课程内容及本课程的要求列出了一系列实验参考提纲,并对每一实验提出了明确的目的和要求,可由学生自己拟定实验方法和步骤,以提高其实验技能和实际动手能力。实验的具体内容可根据具体实验条件及时数进行适当取舍。带“*”的实验为选作内容。为提高学生独立分析问题和解决问题的能力,本书各章后均附有若干思考题,供实验者选用。在书后附录中还介绍了在自动控制原理实验中经常选用的一些仪器的使用方法,以便读者参阅。

本书经中国船舶工业总公司“船电自动化”教材组评选审定。

本书是在参阅国内外大量文献和编者多年教学科研实践的基础上编写而成的,选材注意了先进性、系统性和实用性。

本书第一、二、三、四、六章及附录由李学忠编写。第五章由赵乃真编写。上海交通大学陈学中教授详细地审阅了全书,并提出了许多宝贵意见。哈尔滨工业大学李友善教授对本教材的内容和编排给予了热情的指导。在编写过程中,哈尔滨船舶工程学院“自动控制理论及应用”教研室的领导给予了大力支持。在此一并表示衷心感谢。

由于编者水平有限,时间仓促,书中难免存在错误和不当之处,恳请读者提出宝贵意见。

编 者

目 录

第一章 自动控制原理实验系统简介	1
§ 1.1 概述	1
§ 1.2 小功率随动系统	2
一、SYC-1 实验系统	2
二、SYC-2 实验角度随动系统	7
§ 1.3 调速系统	10
一、调速系统的主要技术指标	10
二、实验调速系统简介	11
§ 1.4 离散控制系统	16
一、SYC-5 离散系统的组成和工作原理	16
二、SYC-5 离散系统各部分的工作原理	16
三、控制算法及程序框图	22
§ 1.5 DJM-4 模拟计算机	24
一、概述	24
二、功能	24
三、使用方法	25
四、自动控制系统典型环节的模拟	26
五、时间比例尺和幅值比例尺	28
思考题	31
第二章 自动控制系统数学模型的建立	33
§ 2.1 静态参数的测量及实验数据的处理	33
一、自动控制系统静态参数的测量	33
二、实验数据的处理	34
§ 2.2 由瞬态响应建立动态数学模型	37
一、测定对象瞬态响应的方法	37
二、一阶系统数学模型的建立	40
三、二阶系统数学模型的建立	46
四、高阶惯性系统数学模型的建立	52
§ 2.3 由频率特性建立数学模型	53
一、频率特性的测量方法	53
二、由幅频特性建立数学模型	61
三、由幅相特性建立系统的数学模型	64
思考题	65
附录	65
第三章 自动控制系统的调试及性能指标的测量	73
§ 3.1 自动控制系统的调试	73

一、自动控制系统中测量元件的零位调整	73
二、自动控制系统调试的步骤及方法	76
三、自动控制系统在调试中的一般故障	84
§ 3.2 自动控制系统性能指标的测量方法	86
一、 t_s 、 $\sigma\%$ 、 N 的测量方法	86
二、稳态误差 e_{ss} 的测量方法	88
三、系统频域指标的测量方法	89
思考题	90
第四章 非线性自动控制系统的实验研究	91
§ 4.1 典型非线性环节的模拟	91
一、饱和和非线性的模拟	91
二、死区非线性的模拟	93
三、间隙非线性的模拟	94
四、继电器特性的模拟	95
§ 4.2 非线性系统性能参数的实验求法	95
一、自振荡振幅的测量	96
二、自振荡频率的测量	96
§ 4.3 消除自振荡的方法	97
§ 4.4 相轨迹的观察方法	101
思考题	101
附录	102
第五章 利用微型计算机进行控制系统实验	104
§ 5.1 概述	104
一、系统模型	104
二、输出形式	105
三、图形坐标参数选择	106
四、程序的引导	106
§ 5.2 频率响应实验	108
一、计算原理	108
二、对数频率特性实验(BODE)	110
三、幅相频率特性实验(NYQU)	114
四、闭环频率特性实验(CLFR)	115
§ 5.3 稳定性判别实验	119
一、NYSC 稳定性判别实验程序	119
二、ROUT 稳定性判别实验程序	119
§ 5.4 根轨迹实验(ROOT)	123
一、原理	126
二、程序流程	126
三、实例	127
§ 5.5 非线性特性实验	128
一、描述函数法实验(DESC)	129

二、相平面法实验(PHPL)	131
三、波波夫法实验程序(POPO)	134
§ 5.6 控制系统时域仿真实验(TDRS)	138
一、原理	138
二、程序流程	139
三、实例	139
§ 5.7 控制系统校正实验	142
一、原理	142
二、程序流程	144
三、实例	144
附录 程序清单	144
第六章 实验参考提纲	183
实验一、自动控制系统基本概念的演示实验 (1 学时)	183
实验二、频率特性测试实验	185
一、R-C 网络频率特性的测试实验 (2 学时)	185
二、调速系统开环频率特性的测量*(2 学时)	187
三、随动系统的闭环频率特性的测量*(2 学时)	188
实验三、二阶模拟系统的实验研究	189
一、二阶系统阶跃响应实验 (2 学时)	189
二、二阶系统稳态误差的测定与分析实验 (2 学时)	190
实验四、自动控制系统中环节动态参数的测量实验 (2 学时)	194
实验五、自动控制系统在计算机上的辅助分析实验 (2 学时)	194
实验六、控制系统的调试及性能指标测量实验 (4 学时)	195
实验七、复合控制系统实验研究* (2 学时)	197
实验八、典型非线性环节模拟实验* (2 学时)	201
实验九、非线性系统描述函数法实验研究 (2 学时)	202
实验十、非线性控制系统相平面法实验研究 (2 学时)	203
实验十一、非线性系统的校正实验研究* (4 学时)	204
实验十二、非线性特性对控制系统的影响在计算机上的仿真研究* (2 学时)	206
实验十三、离散角度随动系统的实验研究 (4 学时)	207
实验十四、状态反馈法的实验研究* (4 学时)	209
附录	214
附录一、BT-6 型超低频频率特性测试仪的基本原理及使用	214
附录二、SC-16 光线示波器的原理及使用	221
附录三、LZ-6 型三笔记录仪的原理及使用	226
附录四、超低频系列仪器的基本原理及使用	231
参考书目	244

第一章 自动控制原理实验系统简介

§ 1.1 概 述

自动控制原理实验是在具体的实际系统上进行的。就实际自动控制系统而言,其种类繁多,即使是同一类系统,其组成也不尽相同。根据目前自动控制原理实验室的具体条件,只能通过几种典型系统进行实验研究,以达到举一反三之目的。在介绍具体自动控制原理实验系统之前,先简述一下自动控制系统的一般组成。

自动控制系统最基本的组成部分,包括测量环节、放大环节、执行环节和控制对象。为了改善系统的性能,在系统中加有校正环节;对闭环系统,还有反馈环节。其系统框图示于图 1-1-1。

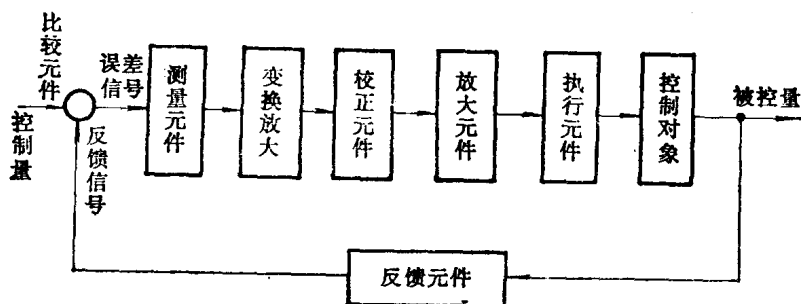


图1-1-1 闭环系统框图

测量环节的作用是检测信号。测量环节的元件种类很多,如电位器、陀螺仪、自整角机、旋转变压器等。放大环节的作用是对检测元件的输出信号进行放大,并为执行元件准备好足够大的功率信号。放大元件可分为电压放大元件和功率放大元件两种。电压放大元件有晶体管放大器、电子管放大器、磁放大器等;功率放大元件有晶体管放大器、可控硅放大器、磁放大器、电机扩大机和液压放大器等。校正环节分为有源校正器、无源校正器和数字校正器。校正环节的作用是使系统达到稳定并满足性能指标的要求。执行环节是用来操纵控制对象中的执行机构工作。执行元件有直流伺服电动机、交流伺服电动机、力矩电动机、步进电动机、液压马达等。反馈环节是用来产生与被控制量有一定函数关系的反馈信号。根据不同要求,反馈元件又可分为位置反馈元件、速度反馈元件和加速度反馈元件。位置反馈元件可采用电位器、旋转变压器、自整角机、光电编码盘等。速度反馈元件通常采用交流或直流测速发电机、速率陀螺及电阻电容元件组成的网络等。加速度反馈元件可用加速度计或阻容网络。

由于实际的自动控制系统是多种多样的,本章介绍的只是几种常用的典型系统,如小功率随动系统、恒值调速系统、离散控制系统、非线性系统等。后面介绍的非线性系统实验是采用模拟计算机完成的,所以最后简述了模拟计算机的有关内容。

§ 1.2 小功率随动系统

本节介绍两种由不同执行元件组成的角度随动系统。一种是由电机扩大机带动的直流伺服电动机为执行元件的随动系统（以后简称 SYC-1 系统）；另一种是用晶体管功率放大器带动直流力矩电动机为执行元件的随动系统（以后简称 SYC-2 系统）。

一、SYC-1 实验系统

1. 系统的工作原理

SYC-1 实验系统机电原理图如图 1-2-1 所示。该系统采用自整角机作位置检测元件，相敏解调器为信号变换放大元件，电压放大是采用一级运算放大器和两级差动放大器，功率放大元件采用电机扩大机，执行元件采用直流伺服电动机。直流测速发电机是提供反馈校正的速度信号的。旋转变压器和直流电桥是提供位置测量信号的。发送器部分的直流电动机是给系统提供速度信号的，而与此相连的直流测速发电机是供前馈校正时采用的。

系统的工作原理如下：

自整角机输出的位置偏差信号是正比于偏差角正弦变化的交流电压，其幅值为

$$u_y = U_m \sin \Delta \theta$$

在小角度下，

$$u_y = K \Delta \theta$$

该电压经过相敏解调器，把正反相位的交流电压变换成正负极性的直流电压。为了能推动系统的执行元件工作，它还要经过电压放大器及功率放大元件电机扩大机的放大。控制回路输出应保证执行电动机向消除角度差的方向旋转，当 $\theta_e = 0$ 时，自整角机无输出电压，电机也就没有输入控制信号，因此电动机停在输出角度为 θ_r 处，从而达到了系统对角度的随动跟踪的目的。

系统中所采用的测量元件、执行元件的原理，读者可参阅有关书籍和资料，这里不再赘述。本节仅对放大元件作简单介绍，以便在实验中使用和调整。

2. 系统中的伺服放大器

伺服系统中采用的放大器是各不相同的。SYC-1 实验系统中采用的放大器示于图 1-2-2。其中包括相敏解调器、综合放大器、差动放大器等部分。

(1) 相敏解调器

这里采用的是晶体管环形相敏解调器，它的作用是把交流信号变成能反映正反相位的直流信号。解调器的晶体管工作在开关状态饱和压降小，因此它的效率高、非灵敏区小、时间常数小。线路中考虑了补偿，温度特性好，易于调整。不足之处是需用输入和参考电压变压器，使之体积较大。

图 1-2-2 中的相敏解调器的工作原理简述如下：

当输入信号电压为零时，尽管由于参考电压的作用，使上下两对晶体管不断交替导通和截止，但在负载上仍无电流流过。这是由于采用双晶体管电路，相邻两管的饱和压降大小相等方向相反，从而相互抵消，克服了零点漂移的影响。

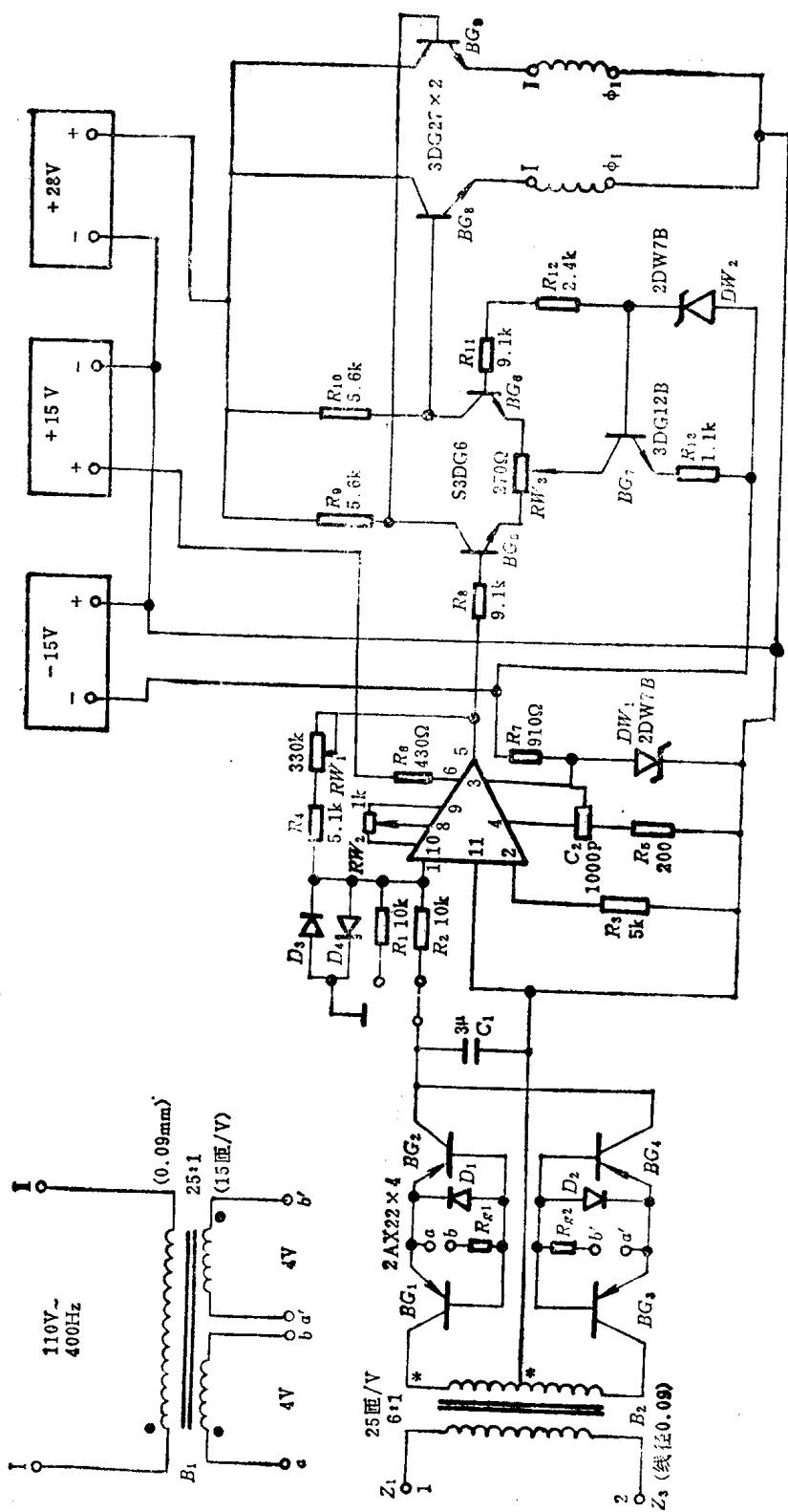


图1-2-2 SYC-1系统的伺服放大器

当输入信号电压不为零时:

(i) 输入电压与参考电压同相时

在正半周内, BG_1 和 BG_2 处于饱和状态, 则 BG_3 、 BG_4 构成的通路关闭。负载上的电压为上正下负。

在负半周内, 电路工作状态刚好与上述情况相反, 上通路关闭, 下通路导通, 流过负载的电流方向与正半周相同。

(ii) 参考电压与输入电压反相时

在正半周内, BG_1 和 BG_2 截止, BG_3 和 BG_4 导通, 在负半周内, BG_1 和 BG_2 导通, BG_3 和 BG_4 截止。负载上的电压为上负下正。

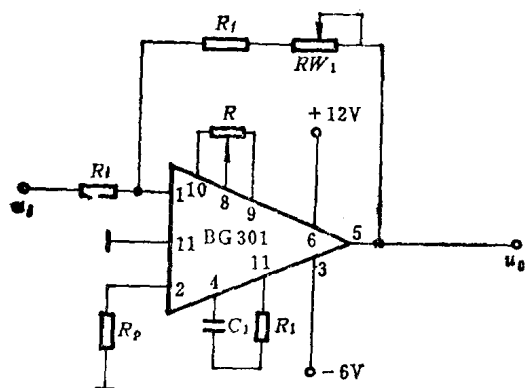


图1-2-3 综合放大器原理图

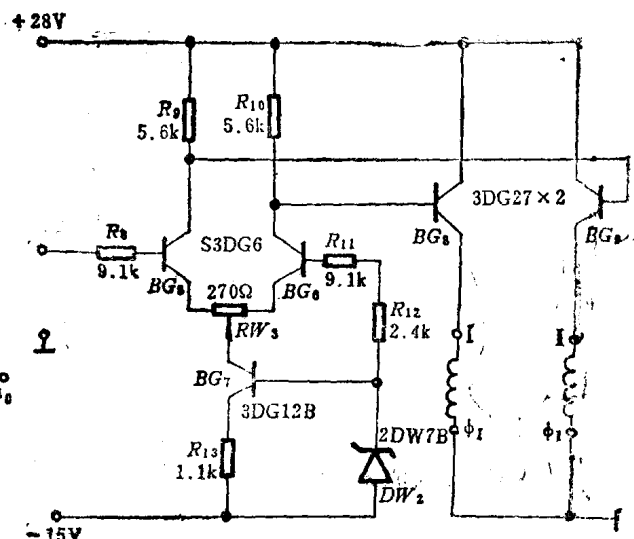


图1-2-4 差动放大器

当参考电压与输入电压之间相位差为 $-\frac{\pi}{2}$ 时, 则在一周内负载两端的平均电压为零。

从以上分析可知, 解调器输出的极性决定于输入电压的相位, 对相位有敏感作用, 其大小取决于输入电压的大小。

(2) 综合放大器

它是由运算放大器 $BG301$ 构成的直流放大器。它把来自反馈回路的信号与主回路信号(解调器的输出)相加并进行放大, 其放大倍数通过 RW_1 来调节。电原理图示于图 1-2-3。

放大器的放大倍数为

$$K = -\frac{U_o}{U_i} = -R'_f/R_i$$

放大倍数的调节范围是从 0.5~50。

(3) 差动放大器

电路图示于图 1-2-4 中。

差动放大器由两级组成, 第一级是差分放大, 第二级是射级输出。第一级的静态工作点 U_{c1} 和 U_{c2} 等于 15V, 第二级的静态电流 I_{c1} 等于 I_{c2} , 其值为 3~4mA。第一级设

有零位调解电位器 RH_3 ，用来调节两输出端 I 和 II 的平衡。差动输出的负载是电机扩大机的两个差动控制绕组 ϕ_{II} 和 ϕ_{I_1} 。

3. SYC-1 实验系统各环节的传递函数

(1) 控制式自整角机的传递系数

$$\frac{U(s)}{\theta_e(s)} = \frac{K_1}{T_1 s + 1} \approx K_1$$

式中 $U(s)$ ——自整角机输出电压的拉氏变换；

$\theta_e(s)$ ——角度差的拉氏变换；

K_1 ——自整角机的传递系数。

T_1 ——自整角机的时间常数（在系统中可忽略不计）

此传递函数在小失调角下才成立。

(2) 直流伺服电动机的传递函数

$$\frac{\omega(s)}{U_a(s)} = \frac{K_D}{T_M s + 1}$$

式中 $\omega(s)$ ——输出角速度的拉氏变换；

$U_a(s)$ ——输入控制电压的拉氏变换；

K_D ——电机的传递系数；

T_M ——电动机的时间常数。

在以角度 θ 为输出时的直流伺服电动机传递函数表达式为，

$$\frac{\theta(s)}{U_a(s)} = \frac{K_D}{s(T_M s + 1)}$$

(3) 电机扩大机的传递函数

$$\frac{E_a(s)}{U_c(s)} = \frac{K_K}{(T_c s + 1)(T_a s + 1)}$$

式中 $E_a(s)$ ——直轴绕组输出电压的拉氏变换；

$U_c(s)$ ——控制绕组输入电压的拉氏变换；

K_K ——电机扩大机的电压放大倍数；

T_c ——控制绕组的时间常数；

T_a ——交轴绕组的时间常数。

(4) 测速发电机的传递函数

$$\frac{U(s)}{\omega(s)} = K_e$$

式中 $U(s)$ ——输出电压的拉氏变换；

$\omega(s)$ ——输入角速度的拉氏变换；

K_e ——测速发电机的传递系数。

测速发电机传递函数的另一种表示形式为，

$$\frac{U(s)}{\theta(s)} = K_e s$$

式中 $\theta(s)$ ——输入角度 θ 的拉氏变换。

二、SYC-2 实验角度随动系统

该系统由一对自整角机、伺服放大器、功率放大器、直流力矩电动机 (SYL-20) 组成。CYD-2.7 为高灵敏度测速发电机, 用来产生速度信号。SYL-1.5 力矩电机为系统提供一斜波输入信号。其系统的机电原理图示于图 1-2-5。

从结构上看, 它与 SYC-1 系统是类似的。但它的执行元件直接与负载、自整角接收机同轴相连。这里仅对本系统的伺服放大器作些简单介绍。

1. 伺服放大器

SYC-2 系统的伺服放大器如图 1-2-6 所示。

伺服放大部分由交流放大、相敏解调、综合放大、功率放大等组成。下边分别予以介绍。

(1) 交流放大器

从图 1-2-6 的第一部分可看出, 交流放大器的输入电路是由一个分压器和一个可调电位器 RW_1 组成。 RW_1 用来调节系统的开环放大倍数。交流放大器的第一级由场效应晶体管 T_1 构成的高输入阻抗输入级, 经过 T_2 晶体管放大后, 把信号送到解调器。

(2) 场效应晶体管相敏解调器

由场效应管 T_3 构成的半波相敏解调器采用共地驱动方式, 参考信号为 400Hz 的正弦信号, 经二极管 D_1 耦合到 T_3 的栅极 G 。当参考电压为负半周时, 二极管 D_1 导通, 将栅极 G 的电位限制在负 14V 左右, 保证 T_3 断开, 输入信号不能通过; 当参考电压为正半周时, 二极管 D_1 反偏而将栅极与参考信号切断。在加速电容 C_3 的作用下, 使栅极电位迅速恢复为零, 使 T_3 导通, 这时输入信号可以通过。输出的极性取决于输入信号的相位, 从而实现了相敏解调作用。为了与下一级的阻抗匹配, 相敏解调器输出应接至由场效应管 T_4 构成的源极跟随器。

(3) 功率放大器

这种类型的功率放大器与一般 OCL 电路不同的是输出级为两个同类型的 NPN 型晶体管。其工作原理是:

T_5 、 T_6 组成一个差动放大电路, T_7 为驱动级, T_8 、 T_9 和 T_{10} 、 T_{11} 组成互补对称电路。电路的结构可以保证输入信号为零时, U_K 为零。这说明无输入信号时没有电流流过电动机 SYL-20 的电枢。当电路输入正信号时, T_8 输出为正, 使 T_7 处于截止状态 (T_8 、 T_9 也截止), 截止的程度取决于输入信号的大小。但另一通路 $R_{36} \rightarrow D_4$ 、 $D_5 \rightarrow R_{36}$ 有电流流过, 使 T_{10} 的基极与 T_{11} 的发射极之间加入正向偏置, 因此 T_{10} 、 T_{11} 导通, 但导通程度大小取决于流过 T_8 集电极和发射极电流的大小。 I_{8ee} 愈小, T_{10} 、 T_{11} 的导通程度愈大, 则从正 24V 电源流经电机电枢的电流 I_{11ee} 也愈大。此时电流的通路是 $+24V \rightarrow T_{11ee} \rightarrow$ 力矩电机电枢 $\rightarrow$ 地端。

而输入信号 U_i 为负时, T_9 的集电极为负, 使 T_7 处于导通状态, 则使 T_8 、 T_9 也处于导通状态。开启程度的大小与输入信号的幅值有关。开启越大, I_{8ee} 越大, U_{R36} 也越大, T_{10} 、 T_{11} 趋于截止。负载电流的通路是: 地端 $\rightarrow$ 力矩电机电枢 $\rightarrow R_{36} \rightarrow T_9 \rightarrow -24V$ 电源。

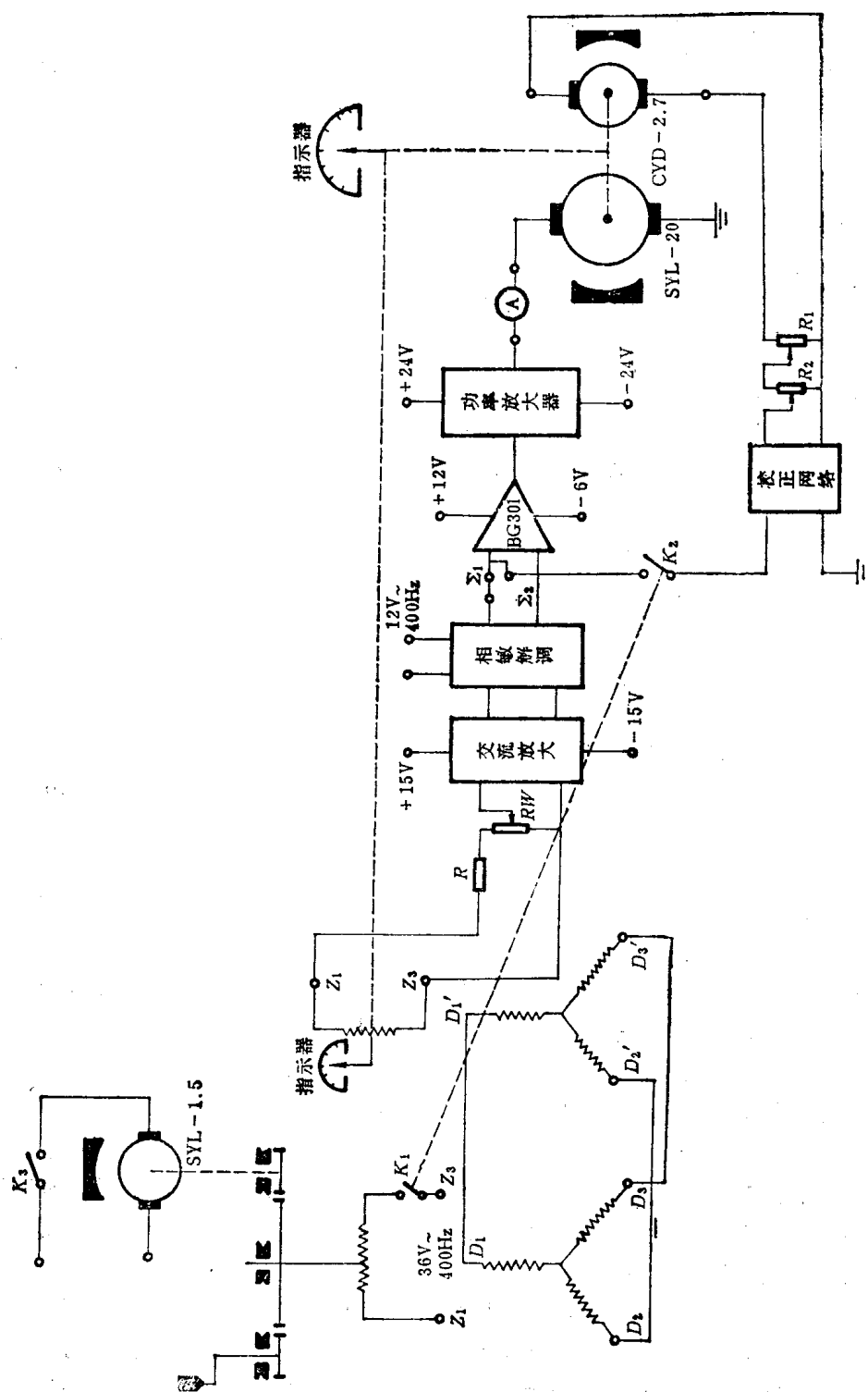


图1-2-5 SYC-2系统机电原理图

