

高等学校教材

# 自动控制实验教程

黄永宣 余文休 石作成 余杏元

电子工业出版社

# 自动控制实验教程

黄永宣 余文休 石作成 余杏元

电子工业出版社

## 内 容 提 要

本书是高校工科自动控制专业本科生用自动控制实验教材。内容包括自动控制实验常用仪器，自动控制系统动态性能的模拟与数字仿真实验，随动系统、温控系统与不稳定机械系统的镇定实验研究等。

本书内容丰富，取材面广，叙述方式通俗易懂，可以作为自动控制及相关专业的大专院校学生、青年教师和工程技术人员参考书。

### 自动控制实验教程

黄永宜 余文休 石作成 余杏元

责任编辑 王明君

\*

电子工业出版社出版（北京万寿路）

北京密云华都印刷厂印装

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

开本：787×109<sup>2</sup> 1/16 印张：15.25 字数：244千字

1989年9月第1版 1989年9月第1次印刷

印数：1—2,500册 定价：3.10元

ISBN 7-5053-0586-7/TN·214

## 出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社紧密配合，从1978年至1985年，已编审、出版了两轮教材，正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻“努力提高教材质量，逐步实现教材多样化，增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神，我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会，在总结前两轮教材工作的基础上，结合教育形式的发展和教学改革的需要，制订了1986~1990年的“七五”（第三轮）教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿，是从通过数学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会（小组）评选择优产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处，希望使用教材的单位，广大教师和同学积极提出批评建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

## 前 言

本教材系由全国工科电子类高校自动控制专业教材编审委员会征稿、评选、推荐出版的。

该教材由西安交通大学黄永宣、华南理工大学余文休、北京理工大学石作成、华中理工大学余杏元合作编写。由黄永宣任主编，哈尔滨船舶工程学院华克强副教授任主审。

全书主要讲述自动控制实验常用仪器，自动控制系统动态性能的模拟与数字仿真实验，随动系统、温控系统与不稳定机械系统的镇定实验研究等。书中所述的各实验仪器、装置和计算机硬、软件等，有的可以向有关工厂和高校购买，有的可以自制，因而有利于这些实验的普及。

本书第一、三、六章由黄永宣执笔，第二章由余杏元执笔，第四章由余文休执笔，第五章由石作成执笔。全书由黄永宣加工定稿。

本教材的编写工作是在哈尔滨工业大学王广雄教授的指导和帮助下进行的。主审华克强副教授对本书作了仔细审阅并提出了许多宝贵的修改意见，对提高本书的质量起到了重要作用。西安交通大学胡保生教授对本书的出版给予了关心，特此一并致谢。

书中错误和疏漏之处在所难免，恳请广大读者指正。

编 者

1988年10月



# 目 录

<b>第一章 自动控制实验常用仪器</b> .....	( 1 )
第一节 概 述.....	( 1 )
第二节 函数记录仪.....	( 2 )
第三节 光线示波器.....	( 8 )
第四节 BT6型超低频频率特性测试仪.....	( 12 )
第五节 电子模拟计算机.....	( 20 )
<b>第二章 自动控制系统动态性能的模拟仿真实验</b> .....	( 41 )
第一节 概 述.....	( 41 )
第二节 典型环节动态性能的研究.....	( 42 )
第三节 二阶系统动态性能的研究.....	( 46 )
第四节 非线性系统动态性能的研究.....	( 51 )
第五节 采样系统动态性能的研究.....	( 61 )
第六节 用单板机研究系统的动态性能.....	( 72 )
<b>第三章 自动控制系统动态性能的数字仿真实验</b> .....	( 93 )
第一节 概 述.....	( 93 )
第二节 经典控制理论常用计算机实用程序与说明.....	( 94 )
第三节 现代控制理论常用计算机实用程序与说明.....	( 112 )
第四节 面向结构图的数字计算机仿真.....	( 124 )
第五节 数字计算机仿真实验.....	( 143 )
<b>第四章 随动系统的实验研究</b> .....	( 146 )
第一节 概 述.....	( 146 )
第二节 随动系统的结构原理.....	( 146 )
第三节 随动系统的主要组成部分.....	( 148 )
第四节 数字随动系统.....	( 160 )
第五节 随动系统的实验研究.....	( 164 )
<b>第五章 温度控制系统实验研究</b> .....	( 182 )
第一节 概 述.....	( 182 )
第二节 建模原理和方法.....	( 182 )
第三节 控制原理和方法.....	( 185 )
第四节 电阻加热温箱控制系统实验装置.....	( 190 )
第五节 温控系统的实验研究.....	( 192 )
<b>第六章 不稳定机械系统镇定实验研究</b> .....	( 201 )
第一节 机械系统模型的建立与特性分析.....	( 201 )
第二节 自动平衡摆车系统.....	( 218 )

第三节	自动平衡摆车系统实验.....	(222)
第四节	微机控制平衡摆车系统实验.....	(226)
第五节	二级倒立摆系统.....	(228)

# 第一章 自动控制实验常用仪器

## 第一节 概 述

自动控制技术是当代最活跃、发展最快的学科之一。是由控制理论、自动化技术工具和控制系统实验三部分组成。控制系统实验在自动化实践中占有十分重要的地位。

一般说来,设计一个自动控制系统,要经过以下几个步骤:

1. 确定任务与收集所有可能的资料;
2. 建立数学模型;
3. 进行性能的数学分析,如稳定性、能控性、能观测性、可辨识性、敏感性等;
4. 选定控制规律(或称策略),这一步亦称综合问题;
5. 进行仿真(或称模拟)实验,通常须借助于计算机(模拟机、数字机或混合机);
6. 修改与调整设计,建立实际系统;
7. 调整与试运行。

上述步骤,需要涉及三个方面的问题,即

1. 控制理论;
2. 自动化技术工具;
3. 控制系统实验。

控制理论是构造控制系统的理论基础,自动化技术工具是构造控制系统的物资保证,控制系统实验则是开发和研究控制系统性能必不可少的手段。

在设计自动控制系统的七个步骤中,除了第一步确定任务与收集资料外,其余六步全都与实验有关。总之,控制系统的设计离不开实验。

控制系统实验包括静态实验与动态实验。所谓静态实验,是指控制系统在静态情况下的各种性能参数的测试与调整。所谓动态实验,是指控制系统对输入信号的响应特性以及动态参数的测试与调整。例如,过渡过程品质的测试,频率特性的测试,时间常数的测试,数学仿真、半实物仿真与实物仿真实验等等。

对控制系统的动态特性进行实验研究,若依所施加的输入信号,主要有下述三种方法:

1. 时域法;
2. 频域法;
3. 统计法。

实验需要手段。各种不同类型的仪器、仪表与设备就是实验工具。控制系统的实验,无论静态实验,还是动态实验,均依控制系统类型的不同、具体实验内容的不同而采取相应不同类型的仪器、仪表与设备。在控制系统实验中所使用的仪器、仪表与设备,我们称为控制系统的测试仪器。

控制系统时域法测试,一般不用专门仪器,只要能产生一个阶跃信号加至系统输入端,在系统的输出端有示波器、笔式记录仪等通用设备进行显示与记录就可以了。超低频信号发生器、频率特性测试仪,电子模拟计算机,机械开关等等仪器设备均可产生阶跃信号。



控制系统频域法测试的理论、方法、手段与数据处理等各个方面都很成熟和完善，因此应用也最为广泛。由于控制系统工作频率一般属于超低频频段，因此超低频仪器在控制系统的实验中占有重要地位。频域法测试中使用的典型仪器为BT6型超低频频率特性测试仪。

控制系统的统计法测试仪器已日趋成熟、逐步完善，尤其随着数字技术与集成电路的飞速发展，解决了原来存在的精度不高等方面的问题，它的优越性一定会在控制系统动态特性测试中发挥越来越大的作用。这类仪器主要有白噪声发生器、伪随机信号发生器、相关仪、功率谱分析仪和快速傅里叶变换分析仪。

控制系统的测试仪器，种类繁多，我们不能一一列举。本章只就自动控制理论教学实验中常用几种主要仪器加以介绍。它们是：

1. 函数记录仪；
2. 光线示波器；
3. BT6型超低频频率特性测试仪；
4. 电子模拟计算机。

## 第二节 函数记录仪

常见的函数记录仪有三种形式：检流计式记录仪，电平自动平衡式记录仪和数字式记录仪。函数记录仪主要实现单参量及多参量的记录。它能把同一时刻发生的多种现象同时连续地记载在一张记录纸上。在整个记录纸的有效宽度上，数据记录曲线虽然相互交叉，但采用各种不同颜色，仍然十分容易区分。

有多个厂家生产各种型号的电平自动平衡式函数记录仪（又称X-Y函数记录仪），但它们的原理和结构大同小异。我们在这里只介绍上海自动化仪表二厂生产的LZ3系列函数记录仪。

LZ3型函数记录仪是一种通用的自动记录仪，它可在直角坐标轴上自动描绘二个电量的函数关系，即 $y = f(x)$ 。考虑到多方面的需要，记录仪在X轴方向带有走纸机构，因此，记录仪尚能自动描绘一个电量对时间的函数关系，即 $y = f(t)$ 。在多笔记录仪中则可以同时描绘几个因变量与自变量之间的函数关系。即 $y_1 = f_1(x)$ ， $y_2 = f_2(x)$ ， $y_3 = f_3(x)$  或  $y_1 = f_1(t)$ ， $y_2 = f_2(t)$ ， $y_3 = f_3(t)$ ，这样便于相互对比和分析。

LZ3型函数记录仪在设计时采用随动系统结构的电平自动平衡原理，具有记录幅面大、灵敏度高、精度高和速度快等特点。可以用它自动记录磁性材料的B-H曲线，电阻材料的温度系数曲线，晶体管的特性曲线，电子器件的频率特性曲线以及其它参数的函数关系曲线。如果配上各种非电量-电量转换器，还可以用它来测量和描绘温度、压力、液位、流量、力矩、速度、应变、位移、振动以及其它任何物理量的函数关系，如材料试验机中的压力和应变的函数关系，液压泵中的压力和流量的函数关系曲线等。此外，还可以用它作为电子模拟计算机的输出装置来记录计算结果的各种函数曲线。

### 一、LZ3型函数记录仪的主要技术参数

1. 记录幅面  
X轴：30cm  
Y轴：25cm

## 2. 测量范围及输入阻抗

序号	每厘米毫伏数	满量程范围		输入阻抗	附注
	X、Y轴	X轴	Y轴	X、Y轴	X、Y轴
1	0.5mV/cm	15mV	12.5mV	$\infty$	平衡时
2	1mV/cm	30mV	25mV	10k $\Omega$	
3	5mV/cm	150mV	125mV	50k $\Omega$	
4	10mV/cm	300mV	250mV	100k $\Omega$	
5	50mV/cm	1.5V	1.25mV	500k $\Omega$	
6	100mV/cm	3V	2.5V	1M $\Omega$	
7	0.5V/cm	15V	12.5V	1M $\Omega$	
8	1V/cm	30V	25V	1M $\Omega$	
9	5V/cm	150V	125V	1M $\Omega$	
10	10V/cm	300V	250V	1M $\Omega$	
11	短路	-	-	1M $\Omega$	内部短路输入端不短路

### 3. 全行程时间

Y轴 $\leq 0.5s$

X轴 $\leq 0.6 \sim 0.8s$

### 4. 相位特性

0.01HZ相移 $\leq 0.5^\circ$

0.5HZ相移 $\leq 2^\circ$

### 5. 记录纸速度

10, 5, 2.5, 1, 0.5, 0.25 (s/cm)

## 二、动作原理

LZ3型函数记录仪是一种采用电平自动平衡原理的记录仪，它的两个轴各由一套独立的随动系统带动（如果是多笔的，则系统作相应的增加）。仪表的原理如图1-1所示。

图中被测信号首先通过衰减器，然后送入测量电路，（由一个稳压单元及测量电位器所组成）。外界被测信号与测量电位器的电压相比较后，其偏差电压即由直流-交流变换器（振动变流器）进行调制变换成50周/秒的交流信号。微小的交流信号经过交流放大级进行

电压放大,而后经过解调器将交流信号再度变成直流信号,此直流信号又经过直流放大级及功率放大级放大就使直流伺服机组转动,并带动测量电位器的触头使偏差电压趋向于零。记录纸的记录笔则通过齿轮、拉线与电机相连,因此电机转动时记录笔就在X轴及Y轴上移动,并在记录纸上描绘出相应的曲线。为了使仪器在快速运动时能稳定,记录仪采用测速发电机反馈作为系统的阻尼。

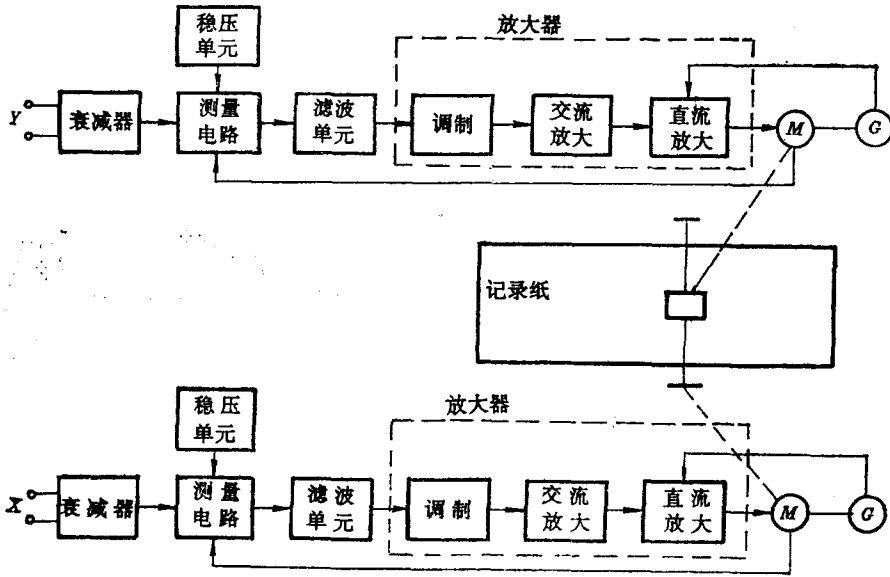


图1-1 函数记录仪工作原理图

### 三、线路简述

#### 1. 输入电路（衰减器）

输入电路是由衰减器电阻及多档开关组成。为了保持较高的输入阻抗,衰减器的电阻值是比较高,最高达500kΩ。衰减器的转换在低量程( $<0.5V/cm$ )是改变输入电阻(图1-2a),在高量程( $>0.5V/cm$ )是改变输出电阻(图1-2b)。

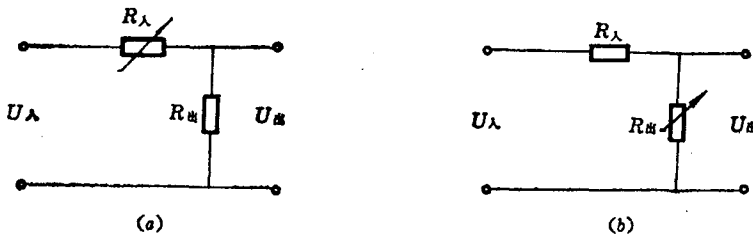


图1-2 输入电路

#### 2. 测量电路

测量电路由桥式电位差计线路组成(图1-3)。图中 $R_0$ 作为调零电位器, $R_M$ 为精密测量电位器。 $R_0$ 与 $R_M$ 所组成的桥路由一稳定的参考电源供电。为了降低 $R_M$ 电位器的动触点在运动时所产生的热电势,桥路的输出采用分压形式以提高仪表的动态性能。由图可知,外界被测电压 $U_x$ 是与 $R_{11}$ 的电势进行比较,当二者不相等时则产生偏差电压 $\Delta E$ 输入到放大器中,经过放大后使电机旋转从而带动 $R_M$ 的滑动触头使桥路趋向平衡。仪表的精度除决

定于参考电压和放大器灵敏度外，最主要还决定于测量电位器 $R_M$ 的精度。因此，LZ3型函数记录仪的测量电位器系采用直线式电位器，其线性度保持在0.15%左右。

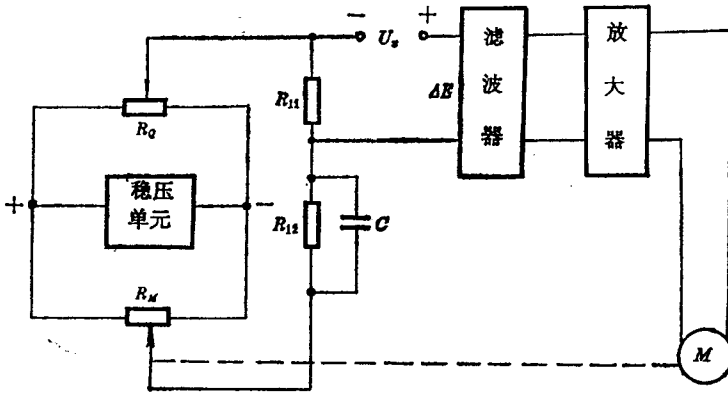


图1-3 测量电路原理线路图

### 3. 放大器

放大器是放大测量电路送来的偏差电压以驱动伺服电机，从而使偏差趋向于零。由于本仪表是采用永磁式直流伺服电机，因此要求放大器的输出为直流信号。因为测量电路送来的偏差电压很小，不宜直接进行直流放大，所以本仪表的放大器的组成如图1-4所示。各组成部分的原理如下。

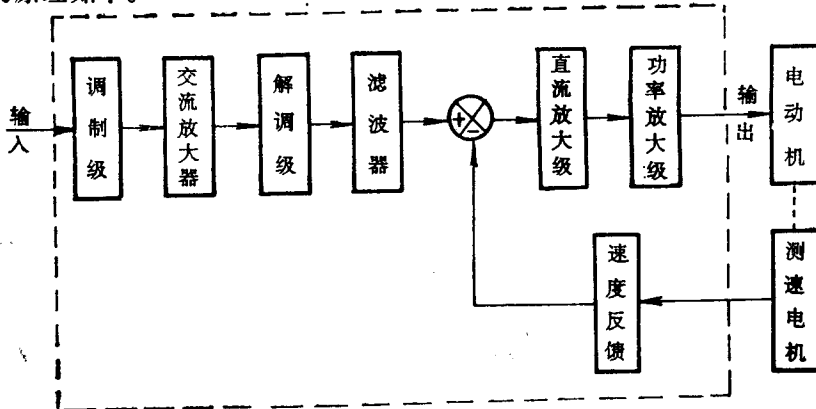


图1-4 放大器组成图

#### (1) 调制级

调制级是由直流-交流变换器和输入变压器所组成。它的作用是将测量电路送来的微小直流信号转换成交流信号。此放大器的直流-交流变换器是采用机械振动变流器（简称振子），调制频率采用50HZ。当振子的激磁线圈中加6.3V，50HZ的交流调制信号时，簧片c即按50HZ的频率来回振动。当电源在正半周时，假定簧片c与触头a接触，于是电流由c经a通过输入变压器初级绕组的上半部而自中心触头d流出。当电源在负半周时，簧片c与触头b接触，于是电流自c、b、d而流出。由于流经输入变压器初级绕组的电流方向发生变化，因此在变压器的次级绕组中感应出频率50HZ的交变电压。这样就将直流信号转换成交流信号。（见图1-5）。

#### (2) 交流放大级

交流放大级的作用是将调制成50HZ的偏差电压进行电压放大。电路特点是：先用三级直接耦合电路，通过T型网络完成交流反馈，而后又经二级直接耦合电路放大交流信号，用电位器调节仪表的灵敏度。

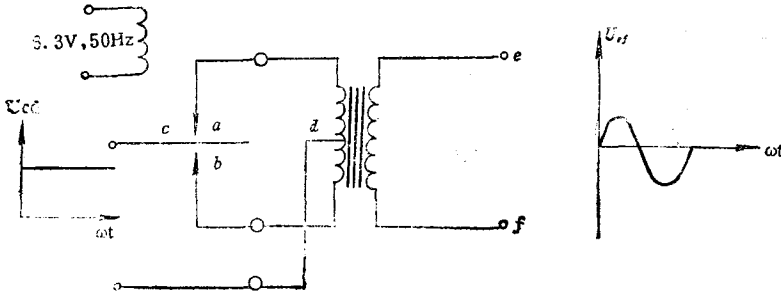


图1-5 直流-交流变换器电气原理图

### (3) 解调级与滤波器

交流电压放大级的输出通过输出变压器与解调级相耦合。解调级是双管相敏检波器，它由输出变压器、两个三极管和提供开关信号的变压器组成。解调级的作用是将载频为50HZ的交流信号变换成直流信号，并经由双T滤波器滤掉交流分量后送入直流放大器。

### (4) 直流放大级

为了适应直流伺服电机正反转及漂移小的要求，本级采用两级双端输入和双端输出的差分放大。

### (5) 功率放大级

直流放大级输出的直流信号经过射极跟随器后送到功率放大级。功率放大级是由大功率晶体管组成的桥式电路。

### (6) 速度反馈

稳定随动系统的速度反馈电压由伺服机组中的测速发电机送出。通过可调电位器加到直流放大级的输入端作为仪表的“阻尼”。

## 4. 稳压单元

稳压单元的原理线路如图1-6所示，整个单元包括整流及两级稳压。交流电压经 $D_1 \sim D_4$ 二极管桥式整流后由电容 $C$ 滤波， $D_5$ 作为第一级稳压， $D_6$ 作为第二级稳压。采用二级稳压的目的是使输入电压较大幅度内波动时其输出电流仍保持稳定。 $R_1$ 、 $R_2$ 是限流电阻。稳压单元输出的稳定电压为6V左右，稳定电流为6mA左右。

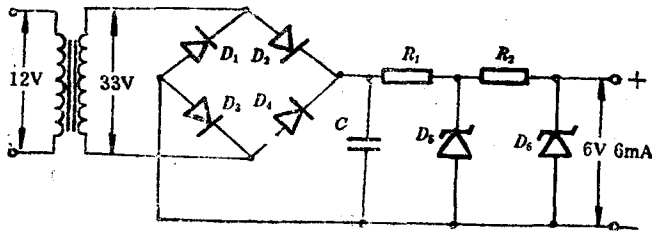


图1-6 稳压单元原理线路图

## 5. 滤波单元

滤波单元是一双T网络，如图1-7所示。其中 $R_1$ 、 $C_3$ 、 $R_2$ 组成低通滤波， $C_1$ 、 $R_3$ 、 $C_2$ 组

成高通滤波，两者组合以后对某一频带的信号有显著的衰减，为了提高仪器的抗工频干扰的性能，所以滤波单元设计成对50HZ信号具有较大衰减的网络。

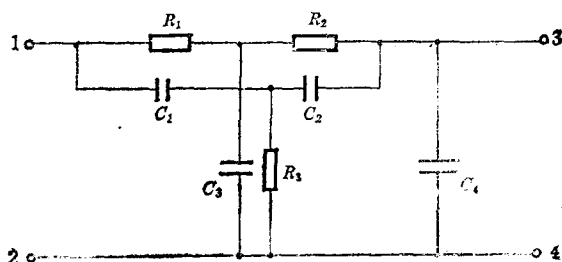


图1-7 滤波器原理线路图

#### 四、操作程序

1. 将“电源”及记录开关置于断开位置。
2. 将“X-T”开关置于“X”位置，“记录”开关打向抬笔的位置，测量开关断开。
3. 将量程开关置于短路位置。
4. 将“⊥”接线柱用连接板与“-”接线柱联接。
5. 将被测信号接到控制箱面板上的接线柱上。
6. 接通电源，稍等片刻。
7. 将测量开关接通。
8. 作“Y-T”运行时，将“X-T”开关打向“T”位置，并将量程开关选择至所需要的记录纸速度。
9. 将记录笔用调零电位器调至坐标纸的中点。
10. 作“X-T”运行时，可将量程开关调至10V/cm，然后，根据记录的幅度再逐档进行调整，直至适当的量程位置。同时，根据输入信号变化的情况，再将零位进行适当的调整。
11. Y轴的量程开关也按10的方法进行选择和调整。
12. 确定两个轴的运动正常后，将“记录”开关打向“记录”位置，然后开始记录并预演一次，预演满意后即可正式记录。

#### 五、应用举例

##### 1. 晶体二极管特性曲线测试

晶体二极管特性曲线测试如图1-8所示。电位器滑动头的位置决定了加在二极管D两端

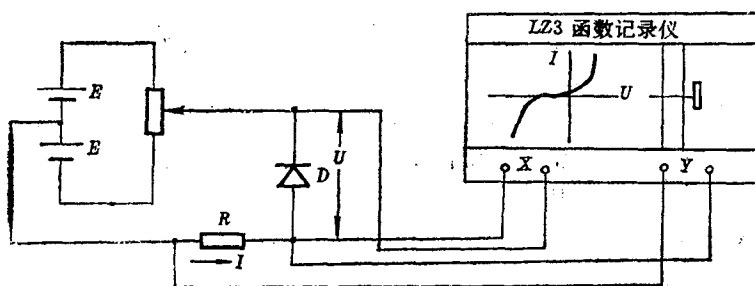


图1-8 晶体二极管特性曲线测试

的电压 $U$ 的极性和大小，此电压值送至 LZ3型函数记录仪的X轴。流过二极管的电流 $I$ 在电阻 $R$ 上产生的电压加至LZ3型函数记录的Y轴。 $U$ 、 $I$ 的同时作用，在坐标纸上绘出二极管 $D$ 的特性曲线。

## 2. 二阶系统单位阶跃响应特性测试

由三个运算放大器组成的二阶模拟系统如图1-9所示。将函数记录仪“X-T”开关打向“T”位置，再拨动X轴波段开关，以适当速度走纸，然后合上 $K$ （相当于加上单位阶跃信号），在函数记录纸上绘出单位阶跃响应曲线。

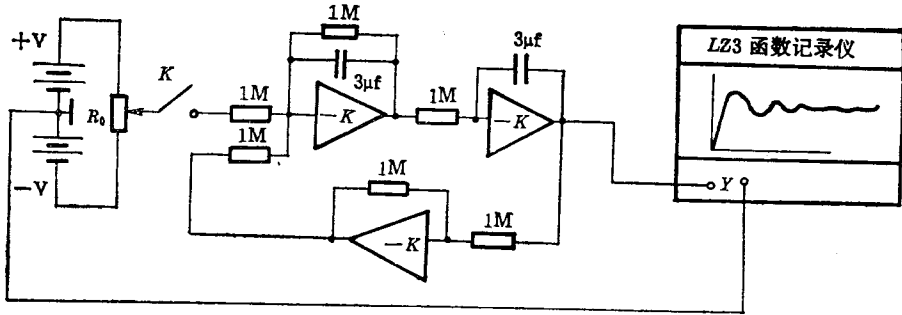


图1-9 二阶系统单位阶跃响应特性测试

用LZ3函数记录仪测试单位阶跃响应特性，只适用于响应特性变化较慢的情况。否则，由于记录笔等的机械惯性而不能准确测试响应特性曲线。

## 第三节 光线示波器

光线示波器又称振子示波器，是一种多线模拟量记录仪器，可同时记录十几个至几十个参量。被记录量的频率自0至5000HZ。光线示波器有各种型号，我们这里只介绍上海电表厂生产的SC16型光线示波器。

SC16型光线示波器，可以测量直流电流和电压、交流电流和电压、瞬态过程、频率及波形等。通过转换器，还可以测量应力、压力、位移、振动、转矩、速度、加速度、流量和心电流等。该示波器的主要特点是：记录线数较多，纸容量大，采用紫外线直接记录，记录纸不需要经过冲洗手续就能很快显示波形，记录速度可以在记录过程中任意变换，适合在实验室及野外或运输工具上使用。

### 一、SC16型光线示波器的主要技术数据

1. 可以安装16个FC6型振子，因此可以同时记录16个以下的变化过程。
2. 振子到记录纸的光线长度为300mm。
3. 可以使用120mm，90mm，60mm宽的紫外线感光记录纸。可容纳30m长的记录纸，并且装有记录纸储量的百分比指示和纸完信号灯，当记录纸余量用剩10%左右时纸宽指示灯亮，以示记录纸即将用完。
4. 记录纸移动速度为5~2500mm/s，分九档。时间标志为横线式，时标周期为1, 0.1, 0.01s，与纸联动（见下表）。
5. 示波器装有分格线装置，便于对记录波形幅值的度量计算，分格线在记录纸上产生



记录纸速度 (mm/s)	5	10	25	50	100	250	500	1000	2500
时间标志 (s)	1			0.1			0.01		

每间隔2mm为一细线，每间隔10mm为一粗线。还装有拍摄长度自动定长装置，调节范围为0~3m，或长拍摄。

6. 示波器中使用GSC100型超高压水银灯。灯泡工作电压为20v，工作电流为4.2~4.6A，额定功率100瓦，发光体面积 $0.3 \times 0.3\text{mm}^2$ 。

## 二、工作原理

光线示波器由光学系统、传动系统、电气系统和振动子及磁系统所组成。下面分别加以说明。

### 1. 示波器的结构

示波器内安装有振动子磁系统，时标，变速齿轮箱，摄影机构，长度控制机构，紫外线光源设备等。

示波器前面板上装有光点观察屏，记录纸储量指示，光栅调节，变速按钮，拍摄定长旋钮，拍摄指示灯，记录纸完指示灯，电源指示灯，电机按钮，起辉按钮，分辨线按钮，标记按钮，拍摄按钮，以及示波器工作电压指示表等。见图1-10。

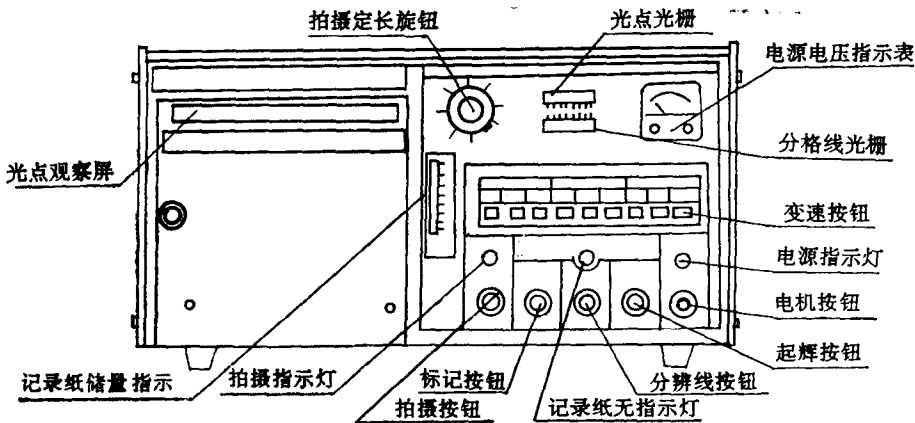


图1-10 示波器的前面板示意图

示波器后面板上装有振动子讯号输入插座，接触点插座，时标输入输出插座与开关，遥控接线插座，电源保险丝座，电源插座，电源开关，电源电压调节开关，箱壳接线柱，振动子外临界电阻调节器等。见图1-11。

### 2. 光学系统

示波器中光学系统示意图如图1-12所示。从水银灯ZD1发出的紫外线经过圆柱面聚光镜 $L_1$ 聚焦，经过镜子 $M_1$ 的反射，使光线呈水平狭长光带照在振动子 $G_1$ 上，并经过振动子内小镜子反射和透镜聚焦，成为细长的光带经过反射镜 $M_2$ 反射和柱面透镜 $L_2$ 的聚焦成小光点投于记录纸上，当记录纸移动时，便可将被测试的过程信号记录下来。

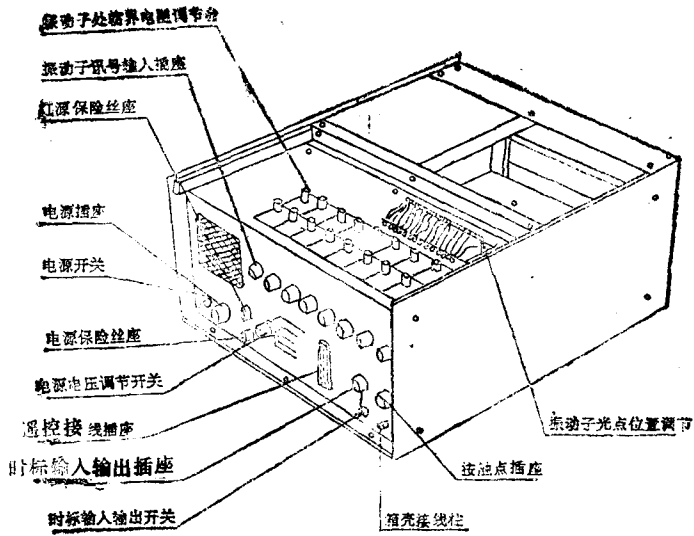


图1-11 示波器的后面板示意图

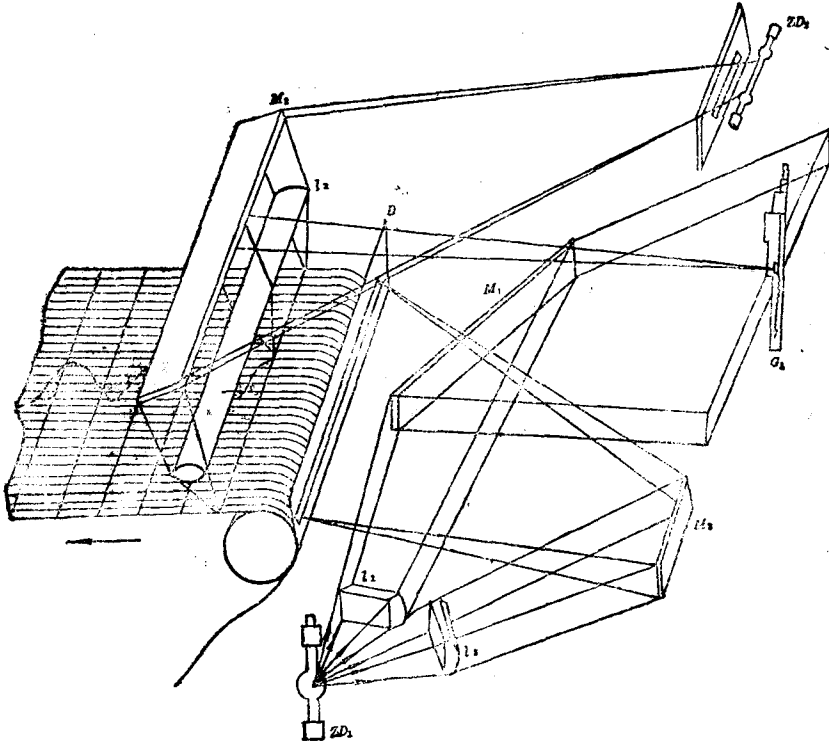


图1-12 示波器的光学系统示意图

分格线光线从水银灯ZD1发出经过柱面聚光镜 $M_3$ 的反射直接透过分格线光栅D照射到记录纸上,当记录纸移动时,在记录纸上产生每2毫米一细线、每10毫米一粗线的分格线。

时标脉冲频闪灯ZD2的光线经过镜子 $M_2$ 的反射和柱面透镜 $l_2$ 的聚焦成很细的光线照射在记录纸上成象。

### 3. 传动系统