

动 控 制 系 统

(一)

上海交大编

上海市科学技术协会

目 录

第一章 自动控制基本知识

§ 1—1 自动控制的基本原理	1—3
§ 1—2 自动控制系统应用举例	1—12
一、L、Z型XY记录仪	1—12
二、惯性导航系统	1—14
三、火炮控制系统	1—16
四、数字程序控制系统	1—21

第二章 自动控制系统的基本运动规律

§ 2—0 为什么要研究自动控制系统的运动	2—1
§ 2—1 线性反馈控制系统的微分方程	2—4
§ 2—2 微分方程的拉氏介法	2—19
一、拉氏变换	2—20
二、一、二阶系统的介	2—35
三、传递函数	2—43
§ 2—3 线性反馈系统的稳定条件	2—54
一、稳定性的概念	2—54
二、线性系统的代数稳定判据	2—60
三、系统参数对稳定性的影响	2—66
§ 2—4 自动控制系统的稳态误差	2—69
§ 2—5 自动控制系统的时间响应	2—77
一、一阶系统的时间特性	2—77
二、二阶系统的时间特性	2—79

三、系统的参数对动态特性的影响	2-92
四、小惯性的影响	2-94
附录 2-1 拉氏变换表	2-97
附录 2-2 计算表格式(劳斯判据)的代数判据	2-98
附录 2-3 6次以下行列式判据 (霍尔维茨判据)	2-100

第三章 用频率特性法研究自动控制系统

§ 3-1 频率特性法的产生	3-1
§ 3-2 频率特性	3-2
§ 3-3 频率特性和过渡过程对应关系	3-6
§ 3-4 频率特性求取方法	3-21
§ 3-5 稳定条件和稳定储备	3-23
§ 3-6 由开环频率特性确定稳态误差	3-36
§ 3-7 根据开环频率特性估计系统动态性能	3-41
§ 3-8 应用频率特性对系统进行校正	3-46
§ 3-9 应用频率特性法分析 LZ-3 函数记录仪控制系统	3-50

第四章 自动控制系统的设计

§ 4-0 设计的一般步骤	4-1
§ 4-1 方案选择	4-3
§ 4-2 元部件选择	4-6
一、执行电机	4-6
二、减速器	4-7
三、放大元件	4-13

四、滤波电路	4—23
五、测量元件	4—25
§ 4—3 系统的稳态计算	4—26
一、静态误差	4—27
二、速度误差	4—28
§ 4—4 同频率法确定串联校正装置	4—28
一、如何确定校正装置	4—29
二、品质指标的提法及相互转化	4—32
三、予期开环率特性的确定	4—37
§ 4—5 用频率法确定并联校正装置	4—57
第五章 自动控制系统中的非线性问题	
§ 5—1 为什么要研究非线性问题	5—1
§ 5—2 几种常见的非线性因素对随动 系统运动特性的影响	5—7
§ 5—3 包含非线性部件的反馈控制系统	5—18
第六章 自动控制系统的实验和调整	
§ 6—1 系统部件动特性测试	6—1
§ 6—2 系统的干扰及其消除	6—24
§ 6—3 系统调试中常遇到的一些问题	6—36
§ 6—4 控制系统性能的测定	6—43

第一章 自动控制基本知识

§ 1-0 引言

毛主席教导我们：“人的正确思想，只能从社会实践中来，只能从社会的生产斗争、阶级斗争和科学实验这三项实践中来。”自动控制技术是一门关于生产斗争的知识，是生产斗争和科学实验的结晶，是随着生产斗争和科学实践不断发展而发展的。人类从用简单的工具从事生产开始，逐步发展为使用复杂的工具，以及利用自然能源作为动力和制作能自动完成某种操作的自动装置。我国古代的自动计里车、指南车等，在某种程度上已经具有自动控制技术的形态，但是由于奴隶社会和封建社会的社会性质和生产规模的限制，自动控制不可能得到发展。欧美资本主义发展较早的国家，也只是到了十九世纪后期以后，尤其是第二次世界大战以后，由于资本主义生产规模的发展，自动控制技术有了较大的发展。近年来，由于电子计算机的诞生和发展，它与自动控制相结合，加快了自动控制技术的发展，使它达到了一个新的发展阶段。但是正如列宁所指出的：“帝国主义最深厚的经济基础就是垄断。”“这种垄断也同任何垄断一样，必然要引起停滞和腐朽的趋向。”“例如美国有个欧文斯，发明了一种能引起制瓶业革命的制瓶机。德国制瓶工厂主的卡特尔收买了欧文斯的发明专利权，可是却把这个发明搁起来迟迟不用。”所以帝国主义的腐朽没落决定了它们的科学技术发展受到严重阻碍。

我们伟大的社会主义祖国，在解放以后，由于社会主义制度的优越性，生产力得到了飞快的发展。我国人民在伟大领袖毛主席和党中央的正确路线指引下，破除迷信，解放思想，艰苦奋斗，奋发图强，

技术革新、技术革命的群众运动蓬勃开展，生产自动化水平迅速提高，自动控制技术得到了空前迅速的发展。我国第一个人造地球卫星和科学实验卫星的发射成功，原子弹氢弹的爆炸成功，标志着自动控制技术发展到了一个新的水平。这种飞速发展的速度充分证明了社会主义制度的优越性。但是，我国在解放前的生产力和技术水平非常低，解放后又受到刘少奇、林彪和“四人帮”所推行的反革命修正主义路线的干扰和破坏；今天我们的科学技术水平仍然还是比较落后的，我们必须加倍努力，迅速赶上世界先进水平。“中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。”毛主席的号召一定能实现。

所谓自动控制，就是在没有人的直接参加下，利用控制器使被控制对象和过程自动地按照指定的运行规律运行。人造地球卫星和洲际导弹能极其准确地沿着预定的轨迹飞行就是应用自动控制技术的结果。现在自动控制技术在国防和工业生产等各方面都得到了广泛的应用。在国防上，导弹能自动的跟踪目标；使用自动跟踪雷达和指挥仪组成的防空系统，能使火炮自动地瞄准弹着点（见图1-9），大大地提高武器的命中率，有力地打击敌人。

生产上采用自动控制技术，可以取得十分良好的结果，主要是：

1. 自动化能提高劳动生产率，降低成本。例如，机床实现自动化后，一个人能操纵多台机床，提高了劳动生产率；在锅炉中，对烟道气体成分自动分析测量，对燃烧过程进行自动控制后，可以节约用煤，降低生产成本。

2. 自动化能保证安全生产，改善劳动条件，特别是在高温、高

压、有毒性、有爆炸危险的生产过程，采用自动控制技术后，可以防止事故的发生和使工人不在恶劣的环境中操作，改善劳动条件。

3. 自动化能提高产品质量。有些生产过程，如石油生产、炼钢等，严格要求在一定的温度范围内进行，才能保证质量，自动控制能做到这一点。

此外，有些情况，由于速度很快或对人体有危害（如原子能工业），更是非采用自动控制不可。

因此，自动控制成为建设现代化工业、现代化农业、现代化科学技术和现代化国防的必不可少的技术。

自动控制和一切科学技术一样，都是为一定的政治服务的。在资本主义和帝国主义国家里，自动控制技术掌握在资产阶级手里，它只能为资本家带来超额利润，而带给劳动人民的却是更深的苦难，对外应为侵略和奴役别国的工具。只有在社会主义制度下，自动控制技术才能成为巩固无产阶级专政的手段；成为提高社会主义劳动生产率的手段；成为缩小体力劳动和脑力劳动的差别，过渡到共产主义的手段。所以我们必须坚持无产阶级政治挂帅，努力掌握自动控制技术，更好地为祖国的社会主义国防建设、经济建设和社会主义革命服务，为巩固无产阶级专政服务。

§ 1-1 自动控制的基本原理

一 自动控制系统的任务和分类：

随着生产和科学技术的不断发展，自动控制技术得到越来越广泛的应用。自动控制类型也在增多。例如恒温箱的温度自动保持恒定，稳压电源的电压保持不变；交流电源的频率保持50周/秒；程序控

制机床能按预先排定的工艺程序自动地进刀切削，无人驾驶飞机能按照预先给定的航迹自动地飞行；电弧炼钢炉的电极能自动地跟随钢水的液面作上下移动（与液面保持一定距离）；雷达控制的火炮能跟着敌机转动，随时瞄准弹着点等等。上面列举的这些自动控制系统，从系统的结构，完成的任务和使用场合都有极大的差异，各有自己的特殊性，但是共性总是包含于一切个性之中，我们分析这些系统，可以发现它们有共同的本质和规律，这些共同的本质就是：它们都是使一个或一些被控制的物理量按照特定的规律变化，一般地说就是使被控制量按照给定量的变化规律变化。这就是一般的最基本的自动控制系统的任务。

这里恒温箱的温度、稳压电源的电压、飞机的飞行轨迹、火炮的转动角度等就是被控制的物理量。预先给定的航迹、要求保持的温度等就是给定量（有时也称控制信号）。

通常根据给定量变化规律的特点，把自动控制系统分成以下几种类型：

1. 给定量是恒定值的称恒值调节系统（自动稳定系统）。如恒温箱的温度控制；稳压电源的电压稳定；交流电源的频率稳定等均属于此类。

2. 给定量是按预先给定的程序变化的称程序控制系统。如程序控制机床，无人驾驶飞机等。

3. 给定量是事先不知道的、随时间变化的，称随动系统。如电极跟随钢水液面运动的系统；高射炮控制系统等。其中钢水液面的位置，敌机运动情况都是事先不知道的。

最基本的控制系统都属于这三类系统（现代的复杂系统不属于此）

以后再作介绍)。

毛主席教导我们：“就人类认识运动的秩序说来，总是由认识个别的和特殊的事物，逐步地扩大到认识一般的事物。人们总是首先认识了许多可同事物的特殊的本质，然后才有可能更进一步地进行概括工作，认识诸种事物的共同本质。当着人们已经认识了这种共同的本质以后，就以这种共同的认识为指导，继续地向着尚未研究过的或者尚未深入地研究过的各种具体的事物进行研究……”自动控制技术就是研究由个别系统基础上总结起来的自动控制系统的共同规律，然后利用这些共同规律，去解决各种自动控制系统的分析和设计问题。

三、反馈控制原理

“马克思主义者认为人类的生产活动是最根本的实践活动，是决定其它一切活动的东西，人的认识，主要地依赖于物质的生产活动，……”人们对反馈控制的认识，也主要是从社会的生产实践中总结出来的。在广泛的生产实践中，所遇到的控制问题是大量的。例如常常要求机器的运行速度一定或按照一定的规律变化；要求恒温箱的温度为一定值等。现在恒温箱为例（见图1-1）加以说明。

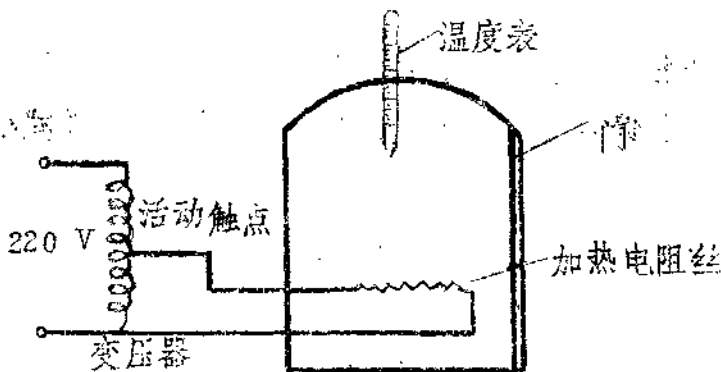


图1-1 恒温箱

这一恒温箱是用电阻丝加热的，改变变压器活动触点位置，输出不同的电压，通过电阻丝的电流不同，就可得到不同的温度，所以改变活动触点位置是可以达到控制温度目的。

但是世界上的事情是复杂的，充满矛盾的。温度的控制问题，并没有完全解决。人们在实践中遇到了新的问题，当恒温箱周围的温度不同时，由于散热情况不同，箱内温度就不一样（外界温度低，散热快，箱内温度就低）。另外，恒温箱的门关闭情况不同，也会影响箱内温度。所以活动触点放在一定位置还不能正确地保证一定温度。

那末，如何准确地获得人们所要求的温度呢？（例如 100°C ）。

开始，操作人员合上电源，逐渐加热，温度通过温度表反映出来，操作人员读出温度值后，与要求的数值（ 100°C ）进行比较，根据二值偏差的大小，去操作活动触点的位置。如果表上温度数低于 100°C 时，使触点向电压升高的方向移动，温度就可继续升高；当表上读数高于 100°C 时，就要将触点向电压低的方向移动，温度就降低一些。偏差大，移动位置大；偏差小，移动位置小。这样，改变触点位置，直到达到所需温度为止。

以上操作过程可以归纳如下：

①观察测量被控制量→②被控制量与给定量比较，判断偏差大小和方向→③根据偏差大小和方向移动触点位置，使偏差减小达到要求值。

在了解了这样的操作过程后，就很容易改为用控制器来代替人的操作，这样就成为自动控制系统了。

图1-2就是这样的自动控制系统的示意图。

首先，对被控制量进行测量，为了便于和给定量进行比较，采用

热电偶进行测量（图 1-2 中 1 为热电偶），热电偶是以电压大小表示所测温度的高低，所以热电偶送出的电压与箱内温度成比例，电压高，温度高；电压低，温度低，第二，将被控制量与给定量进行比较。这里被控制量温度已由热电偶转变为电压量 u_2 ，为了实现被控制量与给定量的比较，给定量也改用一个电压量 u_1 （正比于给定的温度值）表示，判断被控制量与给定量的偏差大小和方向，是用一个减法器来实现的，或者就如图 1-2 中 2 的联接就实现了相减的作用， $u_1 - u_2 = \Delta u$ 代表了实际温度与给定温度的偏差。 Δu 的正负代

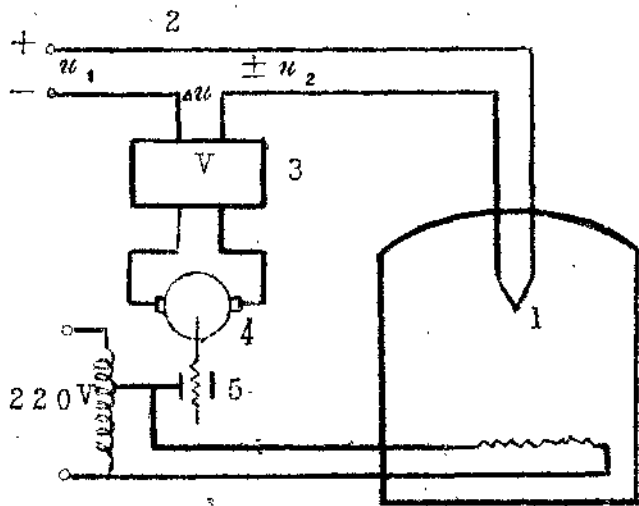


图 1-2 恒温箱自动控制系统

表了偏差的方向， Δu 的大小代表了偏差的大小。第三，将 Δu 经过放大器（图中 3）放大后控制电动机（图中 4），经过传动装置，将电动机的旋转运动变为直线运动（图中 5），移动变压器活动触点的位置，使偏差减小，直到温度达到给定值为止。这样就完成了所要求

的控制任务。所有这些装置组成了一个自动控制系統。

通常，給定量称为自动控制系統的輸入，被控制量称为輸出。輸出量（即被控制量）通过适当的測量裝置，將信号送回輸入端，並与輸入量相比较，这就称为反馈。輸出量与輸入量比较所得的结果叫做偏差，根据偏差的大小和方向进行操作，使偏差减小（或消除），从而使輸出量与輸入量一致，这就是反馈控制的原理，利用反馈控制原理組成的系統称为反馈控制系統。由此可见，有反馈存在，按偏差进行控制，这就是反馈控制系統最主要的特点。

实现自动控制的裝置可以各不相同，但反馈控制的原理却是相同的。反馈控制是实现自动控制最基本的方法，得到广泛的应用。

我们在实验室中看到的随动系統如图 1-3 所示。（图 1-3 在 19 页）。

这个随动系統有机械上没有联系的两个轴：一个主动轴，一个从动轴，从动轴能自动地跟随主动轴旋转。随动系統也是一个反馈控制系統，是按偏差进行控制的。在这里，主动轴和从动轴转过的角度之间偏差是由角差測量线路实现的。一般是用自整角发送机和自整角接收机通过适当的联接来組成角差測量线路，其中自整角发送机和主动轴联接，自整角接收机和从动轴联接，自整角发送和接收机之间没有机械联接，只有电的联系。当发送机一个线圈上加上电压，接收机的一个线圈就会产生一个电压，这个电压比例于两个轴的转角偏差。这个角差測量线路完成了上例中所列操作步骤的第一、二两步。然后将这个电压放大，控制电动机转动，並拖动从动轴（被控制的轴）向减少偏差的方向转动，直到偏差减为零时，电动机才停转。这种系統可以达到二个或多个轴同步转动的目的，由于主动和从动轴之间没有机

械联接，而是靠电的联系，有时也称它们为“电轴”，一般称为同步传输系统或随动系统。

三 闭环控制与开环控制

从以上例子可以看出，由于反馈控制系统是按偏差进行控制的，所以它必需把被控制量回送到输入端，与给定量进行比较，得到偏差，然后进行控制，整个作用过程形成了一个闭环，因此称它为闭环控制。

闭环控制的特点是按偏差进行控制，所以不管是什么原因引起被控制量偏离给定值（例如恒温箱周围温度不同、门关闭情况不同……等等因素引起温度偏差），只要出现偏差，就会产生控制作用，使偏差减少或消除，达到被控制量与给定值一致的目的。

但是，事物总是一分为二的，闭环控制也不是十全十美的。由于各种机械总会有摩擦、死区（例如电动机的控制电压小到某一定数值，就不能转动）等因素，闭环控制系统也总是有误差的，即偏差总不能完全消除。采取适当办法，可以使误差减到极小，但如果配合不当也可能产生象实验中所看到的“振荡”现象，使系统失去控制。而这二者的要求往往是矛盾的，这给设计和调试反馈控制系统带来了困难。因此，有时也常采用比较简单的开环控制方法，这种控制方式不需对被控制量进行测量，只要根据输入信号要求进行控制。显然，它既不测量被控制量，所以即使控制量偏离给定值，也无法使它消除，这是开环控制的缺点。但是只要充分发挥人的主观能动性，采取适当措施仍然可以设计出精度相当高的开环控制系统。

图1-4所示是目前数字程序控制机床中广泛应用的精密定位控制系统。

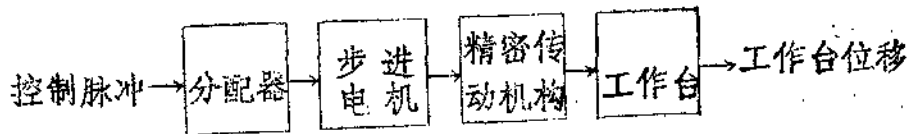


图 1-4 精密定位开环控制原理图

这是一个开环控制系统，工作台位移是被控制量，它只根据控制信号（控制脉冲）变化而变化，系统中既不对被控制量进行测量，也不和控制信号进行比较。系统结构比较简单，但不能消除误差。

图中步进电机是一种由“脉冲数”控制的电机，只要输入一个脉冲，电机就转过一定角度，称为“一步”。所以根据工作台所需移动的距离，输入端就给予一定数量的脉冲数。如果因为外界干扰，步进电机多走或少走了几步，系统并不能“察觉”，从而造成误差。

综上所述，开环控制与闭环控制，都有其各自的优点和缺点，根据控制系统工作条件的不同和要求的不同，可以选择适当的控制方式，满足控制要求。

由于反馈控制系统具有能消除（或减少）由各种因素造成误差的突出的优点，它得到广泛的应用。但它有可能出现振荡等问题，所以设计反馈控制系统需要有一定的理论和方法。自动控制专业就是着重研究设计和实现这类反馈控制系统的理论和方法。

四 反馈控制系统的基本组成：

通过上面对反馈控制系统工作过程分析，可以看出一个典型的反馈控制系统，应包含以下基本环节：

1. 测量被控制量的测量环节；

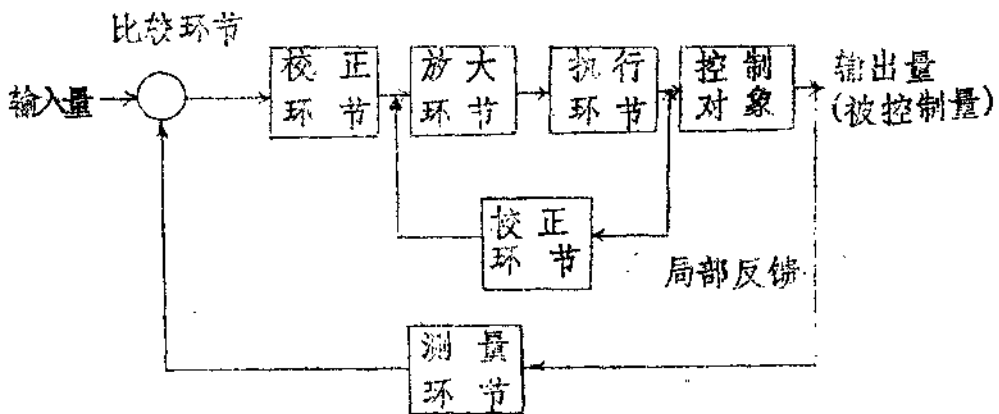
2. 比较被控制量（输出量）和给定量（输入量），得出两者之间偏差的比较环节；

3. 将偏差信号放大使之达到足够的幅值和功率的放大环节；

4. 根据偏差信号产生控制作用，使被控制量按照输入的要求进行操作的执行环节（如电动机、步进电机）；

以上是构成反馈控制系统的最基本的不可缺少的环节。除此之外还有：

5. 为改善系统控制性能而加入的校正环节（有时也叫校正装置）。



如图 1-5 典型反馈控制系统方框图

图 1-5 表示了上述各环节在系统中的位置及其相互联系。系统的基本环节是按它们在系统中所具有的职能来分类的。在具体系统中，有时一个环节可能由一个或几个部件组成（如放大环节常包括电压放大器和功率放大器），有时一个部件也可能担负两个环节的职能

(如随动系统中一对自整角机组成的角差测量线路,它完成了测量环节和比较环节的任务)。

小 结

自动控制系统可以分为开环控制系统和闭环控制系统(即反馈控制系统);开环控制不需要对被控制量进行测量检验,所以它比较简单。闭环控制系统,需对被控制量进行测量,并把测量结果送回到输入端(称为反馈),与输入量进行比较,按比较的结果——偏差进行控制。

反馈控制系统按控制信号(即给定量)的变化规律不同,可以分为:

1. 自动稳定系统(恒值调节系统)——控制信号为恒值。
2. 程序控制系统——控制信号按预先给定的程序变化。
3. 随动系统——控制信号是任意变化的。

反馈控制系统是按偏差进行控制的,它能消除(或减小)由任何因素造成的误差,一般来说,它比较精确,所以应用广泛。我们着重学习这类系统的分析设计和实现方法。

§ 1-2 自动控制系统应用举例

一、LZ型XY记录仪

XY记录仪是一种快速自动记录仪器,它可以在直角坐标纸上(y 是纵座标, x 是横座标)迅速而准确地自动记录两个电量的函数曲线($y=f(x)$),这个数学式的意思就是表示 y 这个电量随着 x

这个电量变化而变化的规律)。具体来说,这种仪器可以用来自动记录晶体管的特性曲线,磁性材料的磁化曲线,模拟电子计算机的输出,船舶的航行轨迹等等。

记录笔是由两套(X和Y两个方向)独立的随动系统带动的,其工作原理图如图1-6所示。上面一个随动系统是带动笔架在X方向移动,下面一个是带动记录笔在Y方向移动,由于两个方向动作原理相同,我们就以X方向作原理来说明。

把要记录的电压送到电位差计电路,这个电路中有一确定的电压,两个电压相比较,如果不相等,那末电位差计电路就有一个偏差量送给放大器,再去控制电动机转动。电动机一方面带动笔架移动,另一方面同时又拖动电位差计电路中电位器的滑动触点,使电位差计电路的偏差电压值逐渐减小到零,这时,电动机就停止转动,笔架也就停下来了,笔架走过的距离就表明要记录的电压大小。

这个系统和上面讲过的随动系统比较一下,其实是很相似的。只是现在控制信号不是角度变化量而是电量,上例中是以自整角机角差

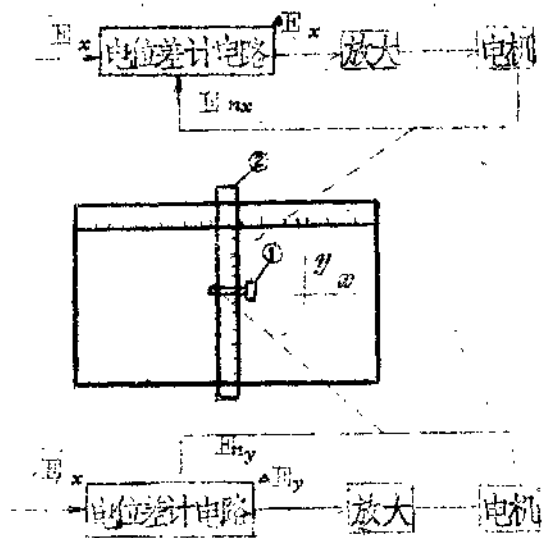


图1-6 X Y记录仪器工作
原理示意图