

高等学校交流讲义

随 动 系 统

SUIDONG XITONG

陈 堂 编

人 民 教 育 出 版 社

高等学校交流讲义



随 动 系 统

SUIDONG XITONG

陈 堂 编

人 民 教 育 出 版 社

本书叙述了随动系统的基本理论。设计原理和计算的基础；比较详细地介绍了各种常用的随动系统实用线路，还对近代发展很快的而又带有典型性的系统进行了分析；此外，还对随动系统中常用的主要元件的学理应用。选择作了一般介绍，对用实验方法研究随动系统的问题也有所提及。

本书可供高等学校“随动系统”课程教学时使用，也可供有关研究，设计和工程技术人员参考。

仓促编写，还有不少缺点，读者如有意见请径寄宣武门内承恩寺人民教育出版社转致作者。

随 动 系 统

陈 堂 编

人民教育出版社出版 高等学校数学用书编辑组
北京宣武门内承恩寺7号

北京市书刊出版业营业许可证出字第2号

京 华 印 书 局 印 刷

新华书店科技发行所发行

各 地 新 华 书 店 经 售

统一书号 15010·1036 开本 $850 \times 1168^{1/32}$ 印张 $11^{11/16}$ 插页 7

字数 276,000 印数 0001—4,000 定价 (7) 1.50

1961年7月第1版 1961年7月北京第1次印刷

目 录

第一章 緒論	1
1-1. 随动系统的定义和应用范围	1
1-2. 随动系统发展簡史	2
1-3. 应用举例	5
第二章 随动系統的基本原理	13
2-1. 随动系統的结构和工作原理	13
2-2. 最簡單的随动系統	18
2-3. 比例控制系統	33
2-4. 微分控制系統	36
2-5. 微分积分控制系統	53
第三章 随动系統的实用綫路	77
3-1. 自整角机	77
3-2. 測量角差的自整角机綫路	78
3-3. 双速的角差測量系統	82
3-4. 双速系統中的假零点	83
3-5. 精計和粗計綫路的信号选择	85
3-6. 干整流器选择器	87
3-7. 氖灯选择器	90
3-8. 具有电子管和继电器的选择器	91
3-9. 随动系統中的检相整流綫路	92
3-10. 具有电机放大机的系統	99
3-11. 具有磁放大器的系統	101
3-12. 电气液压系統	103
第四章 随动系統設計的一般方法	111
4-1. 轉移函数	111
4-2. 系統的稳态誤差	114
4-3. 开周幅相特性	122
4-4. 乃奎斯脱稳定判据	123
4-5. 根据开周轉移函数的解析运算式对系統进行綜合	133
4-6. 利用閉周系統的頻率响应特性对系統进行綜合	134
4-7. 利用对数頻率特性对系統进行綜合	179
4-8. 利用期望对数幅頻特性进行綜合	215

第五章 交流随动系统	265
5-1. 交流随动系统的特点	265
5-2. 对交流校正网络的要求	266
5-3. 交流校正网络的实际线路及其设计	268
5-4. 交流随动系统的实用线路	275
5-5. 結束語	279
第六章 快速随动系统	281
6-1. 快速随动系统的概念	281
6-2. 确定快速过程的形状	281
6-3. 快速随动系统的建立	292
6-4. 举例	296
第七章 随动系统中功率元件的选择	300
7-1. 前言	300
7-2. 負載特性	300
7-3. 負載要求的轉矩、轉速和功率	301
7-4. 决定功率元件的轉矩、轉速和額定功率	305
7-5. 使电动机获得最小均方根轉矩的电动机-負載的齿輪傳速比	308
7-6. 齿輪对的傳速比对总慣量的影响	309
第八章 研究随动系统的实验方法	314
8-1. 前言	314
8-2. 利用超低頻設備决定系統(或元件)的动特性	314
8-3. 根据过渡过程的示波图决定系統的参数	318
第九章 继电器随动系统	322
9-1. 一般继电器随动系统	322
9-2. 綫性化继电器随动系統	349
9-3. 最佳继电器随动系統	358

第一章 結 論

1-1. 随动系统的定义和应用范围

随动系统乃是自动调整系统的一种类型，因为我们都知道按照控制作用的特点，可以把具有一个被调整量的自动调整系统分成三类，即：

(1) 恒值调整系统，其中控制作用为恒值；

(2) 程序调整系统，其中控制作用为给定的时间函数；

(3) 随动系统，其中控制作用的变化特点决定于这一系统外发生的过程，并且这种过程事先不能准确地决定。

随动系统或跟随系统这个名称的起源，乃是由于最初把它用来放大机械功率。例如在一个大的兵舰上，大炮的瞄准如果靠人力来直接操作是不可能的，因为炮筒和炮塔可能重达几百吨。这时要求有一个功率放大的自动装置，利用它操纵者只要转动手轮，于是炮筒就跟随动手轮而转动，它的位置和手轮位置相一致，这就是一个跟随系统，炮筒跟随着手轮而运动。同样的例子，还有象雷达站的天线控制。当然现在不应该把它理解得如此狭义，而最根本的是在这样的系统里输出量跟随任意的输入量作变化。目前，随动系统在各个部门都获得了相当广泛的应用，例如象机械制造业中的仿型铣床就是一个例子，铣头跟随模型的曲线形状运动。大型螺絲車床的进刀和主轴的转速之间保持着一定的关系，这样就代替了制造困难而昂贵的走刀螺絲杆。在冶金工业中，在焊接有缝钢管时，焊头自动对准焊缝就是应用着随动系统。在轻工业中，造纸机的卷筒间要求保持着严格的同步，否则就将造成废品和工作中断。仪表制造业中，各种记录式仪表很多也是应用随

動系統的。在軍事上，隨動系統更是獲得廣泛的應用，除了前面已經提到過的炮塔的控制、雷達站天綫的控制以外，還有象導彈的制導（后者就是要使導彈自動跟隨着目標飛行）等等都是屬於隨動系統的應用。可以舉出的隨動系統應用例子是很多的，我們這裡不可能一一加以列舉，總之隨動系統已經成為現代各個工業部門、國防部門和尖端科學技術領域中不可缺少的有力工具，它是實現自動化的基礎。

1-2. 隨動系統發展簡史

隨動系統既然是自動調整系統的一種類型，因此，它的理論發展和自動調整理論的發展是不可分割的。關於自動調整理論的發展，讀者在学习自動調整理論課程時已經清楚了，因此不再贅述。我們在這裡將十分簡要地介紹一下隨動系統技術應用的發展歷史。

隨動系統的發展從十九世紀的下半葉就開始了。在 1877—1880 年，俄國電氣工程師 А. И. 達維道夫在俄國海軍中進行了許多炮火控制系統的研究工作，創造了根據目標距離自動校正大炮仰角的隨動系統。隨動系統此時已經發明，但是並沒有得到廣泛的應用；原因是借助隨動系統來實現炮火自動瞄準的問題，對當時來說要求有較高的技術水平，而特別是要求有較高的電工技術水平。在 1882 年 Н. И. 薩哈洛夫曾經制成了機電式的仿型裝置，它可以說是現代仿型機床的雛型。1884 年，俄國工程師 И. 宋古洛夫提出了一種兩部并行工作機器的同步旋轉系統，其中一部機器的轉速追隨着另一部機器的變化。1898 年，現代噴氣技術創始人，俄國偉大學者 К. Э. 齊奧爾科斯基提出了世界上第一個飛行器的自動控制系統——自動駕駛系統，它用來使飛艇在水平方向上穩定飛行。這種原始的自動駕駛系統中，已經包含了現代火箭

控制系統中的主要原理和元件。在第一次世界大战后，由于电工技术和工业的进一步发展，生产过程自动控制与自动化的問題，开始被重視和发展起来。冶金工业的发展提出了軋鋼机工作过程自动化的任务，在其中要求应用随动系統来准确規定軋鋼机压下装置的位置。为了在軋鋼机工作时实现規定的軋制程序，应用一种程序装置来控制上述压下装置的随动系統。同样在造纸、电缆、化工等工业部門中，提出了借助随动系統来解决多电机拖动間轉速的协调、配合問題。在水利建筑、水閘閘門移动和巨型的起重設備中，也提出了应用随动系統来解决速度同步配合的問題。在机器制造工业中，由于加工复杂形状工件的要求，需要应用由随动系統来实现的仿型机床。因此創造出各种各样的随动系統。

第二次世界大战时期，也是随动系統得到飞速发展的一个重要时期。由于发展軍事技术的需要，尤其是由于雷达的应用、炮火射击的稳定、魚雷制导等等的需要，各国都大力研究高质量的随动系統。用統計方法研究随动系統在外界干扰作用下的理論得到了发展。在第二次大战后，原属国防机密的随动系統技术与理論，更广泛地应用到工业方面来。现在，几乎在任何一种形式和用途的現代自动控制設備中，随动系統总是它的基本組成环节之一，它能以高准确度实现着某些参数的复現与跟随的任务。

由于控制論这門新技术科学的开始发展和逐步形成，随动系統获得了更重大的意义。我們知道，控制論是研究关于如何构成由机械和电气元件組成的系統，它能預先估計各种可能方案，以实现有目的性动作的一門科学。要构成这种控制論系統，必須应用大量随动系統，即应用大量的反饋环节。生物器官中的各种控制过程大多也是按随动(跟随)作用原理来实现的。控制論中那些直接应用来解决工程技术問題的部分和方法可以称为“工程控制論”；而所謂“工程控制論”中的相当部分实际上就是随动系統理

論。“工程控制論”与随动系統理論的差別，主要在于前者包含的範圍較广，并且是一門技术科学，而随动系統理論，則主要是建立在調整理論基础上的一种技术实践的方法与工具。

近来，由于自动控制理論和方法越益普遍应用到各种不同的領域中去，随动系統在其型式、构成原理以及实现它的技术工具方面均有很大的发展。主要方面，例如可以举出所謂：具有非綫性校正环节的随动系統、最佳随动系統、脉冲与数字随动系統、具有磁放大器和半导体的无接触和无电子管随动系統、自整定(自适应或自調正)的随动系統等等。

在苏联，自动調整理論和随动系統的实践，在偉大的十月社会主义革命之后，由于实现工业化和头三个五年計劃的要求，得到了非常迅速的发展。有許多高等工业学校和科研机关从事有关調整理論和随动系統的研究和发展工作，并于 1939 年建立了苏联自动学与远动学研究所。

第二次世界大战时期，苏联处在卫国战争的困难年代里，苏联学者并没有停止工作。相反正由于卫国战争的需要，这段时期里苏联学者在自动調整和随动系統方面完成了許多重要的工作。在战后几个五年計劃和进一步建設共产主义的发展国民經济七年計劃(1959—1965)的需要与促进下，最近十几年来苏联在自动控制理論与实践方面取得了极大的发展与成就。苏联在控制热核反应問題中的杰出成績、世界上最大原子能发电站的首先投入生产、世界上第一艘原子破冰船“列宁号”的建成、第一批人造地球卫星和太阳系行星的发射成功等等，均証实和标志着苏联在自动学和远动学包括随动系統方面，已在世界科学技术的这一領域中，占有遙遙領先的地位。

在半封建半殖民地的旧中国，生产力得不到发展，近代的科学技术因而也非常落后。同样，在自动控制和随动系統方面很少有

人研究。只有在1949年我国取得了具有偉大世界意义的革命胜利以后,我們才从此粉碎了封建主义的枷鎖、掙脫了帝国主义的鉄鏈,建設了光明灿烂的社会主义社会。从解放以来,我国进行了偉大的社会主义革命和社会主义建設,取得了社会主义革命的决定性胜利和社会主义建設的輝煌成就,特別是在党中央和毛澤东同志提出“鼓足干劲、力爭上游、多快好省地建設社会主义”的总路綫之后,我国社会主义建設事业更以空前的速度向前跃进。同样,我国的科学技术事业在十分貧乏落后的基础上,經過十多年来的努力和苏联以及其他社会主义兄弟国家的帮助,也取得了极大的发展。在自动控制和随动系統科学技术領域內,总的情况也是如此。

但是总的說来,我国的科学技术还是比较落后的。目前我們又处在世界上科学技术突飞猛进的时代,所以我們必須尽快地掌握最新科学技术,以便迅速赶上世界先进水平,使它能更好地为我国社会主义的建設服务。

1-3. 应用举例

1. 6441A 型半自动仿型銑床的隨动系統

半自动仿型銑床是用来加工那些空間形状复杂、不能或者很难在万能銑床上加工的金屬部件的。在6441A型半自动仿型銑床上,加工是按1:1的模件进行的。在机床的一个立架上固定待加工的工件,而在另一个立架上固定模件。靠模指沿着模件移动,銑头則沿着工件重复靠模指的运动。

在沿着模件加工过程中,待加工的工件和模件的运动方向与刀具的移动方向是互相垂直的。工件和模件的运动連續向着同一方向(水平方向),这种运动叫作标定进給。銑头的运动重复着靠模指的运动,所以叫它作随动进給。

随动进給是沿垂直方向进行的,因此可以随着剖面輪廓或者

随着銑头与靠模指之間的差异改变方向(向上或向下)。这里它就是利用了一个随动系統。

图 1-1 所示为工件与銑头的运动图。

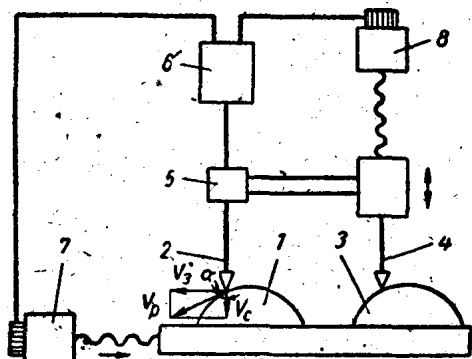


图 1-1

- 1—样件(模件) 2—靠模指, 3—差接变压器, 4—銑头;
5—感受元件, 6—放大器, 7—标定进给(水平进给)电动机;
8—随动进给(垂直进给)电动机。

标定进给是由另外一个自动調整系統所产生, 它受到随动系統跟随速度的控制, 这里我們不准备研究它。

以下我們比較詳細地研究一下半自动仿型銑床的随动系統綫路。随动系統的簡化綫路如图 1-2 所示。

靠模指 2 和差接变压器 3 的銜鉄相联, 它可以沿着模件的剖面曲綫滑动。当銑头和靠模指的位置准确对应时, 銜鉄位于两鉄心的中間位置, 差接变压器两个副繞組中的电压相等而相位相反, 因而供电給系統輸入級的变压器 4 的总电压等于零。这时沿电机放大器 (ЭМΥ) 7 的控制繞組 5 和 6 流过的电流大小相等, 符号相反, 电机放大器电刷所输出的电压等于零, 因而电动机 B 不动。

現在假設靠模指沿模件剖面滑动时提高了 δ 这样一个大小。这也就是說, 在銑头和靠模指位置之間出現了等于 δ 的差值。銜鉄随着靠模指升高, 銜鉄与上鉄心之間的空气隙减小而銜鉄与下

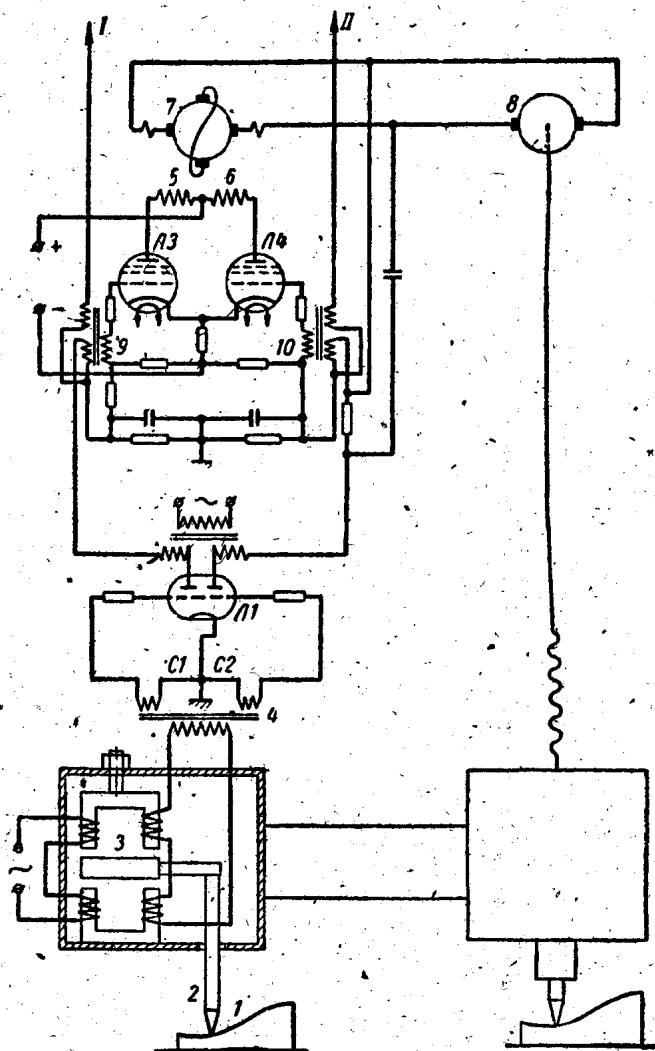


图 1-2

鉄心之間的空气隙增大；差接变压器上繞組的电动势增加而下繞組的电动势减小。两电动势差的絕對值(供給变压器 4)差不多正比于偏移 ε ，而它的相位要看銜鉄靠近那个鉄心(上鉄心还是下鉄心)，也就是說决定于 ε 的符号。

这时在双三极管 J_1 的某一半边(即誤差电压和它阳极电压同相的那半边)的阳极电路中阳极电流增加，另一半边阳极电流减小。

如果綫路中不包括校正装置，那末阳极电流的差就和偏移 ε 成正比。由于有了校正装置，阳极电流差就成了偏移 ε 和它的导数 $\frac{d\varepsilon}{dt}$ 的某一函数。在这一章里不可能詳尽地研究阳极电流差与 ε 的关系，只能一般地說明： ε 导数的引入是靠了微分变压器 9 和 10 的帮助。采取这种措施使我們有可能提高系統的穩定性和准确度。

加在电子管 J_3 和 J_4 栅极上的电压，是和电子管 J_1 的阳极电流差成正比的，也就是說，和 ε 及其导数有关。电机放大器的控制繞組接到电子管 J_3 和 J_4 的阳极电路上。繞組是相反联接的，电机放大器所产生的电动势与电子管 J_3 和 J_4 的阳极电流差成正比。这样一来，由放大机加到电动机 8 上的电压将是 ε 及其导数的函数。电动机旋轉，使銑头追随着靠模指移动。差接变压器 3 的鉄心装在一个壳体上，壳体随着銑头同时移动。因此，鉄心力求移到对銜鉄对称的位置上。当达成对称时，系統就停止运动。这样一来，銑头就随时都跟随着模件剖面的輪廓而运动，以保持銑头的位置和輪廓曲綫相符合。

2. ЦИР—584 型雷达站的隨动系統

ЦИР—584 型陆用可移雷达站是在厘米波段工作的。当被偵迹的目标进入一定的区域之内时，雷达站从靜止状态换接到自动追隨目标状态。这时隨动系統可以保証天綫軸与目标方向連續地寻求一致，因而能以差不多 0.06° 的准确度决定目标的角坐标。

雷达站的天线振子装在抛物面形反射器内，连续旋转，而在旋转时发射轴与抛物面轴之间差 1.25° ，因而射线描出一个圆锥来。图 1-3 所示为圆锥和射线的截面。如果目标位于圆锥中心 A （在抛物面轴上），那末当射线旋转时，它均匀地受射线照射，因而反射信号的幅值是恒定的（曲线 A ）。当目标偏离中心时，射线射中强度开始周期性地变化。比方说目标位于 B 点，而射线中心位于点 1 ，那末射中的射线最少；而当射线移到点 2 时射中射线最多。

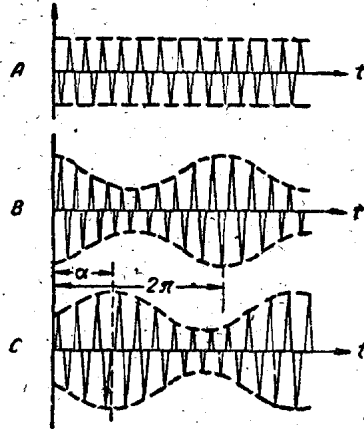
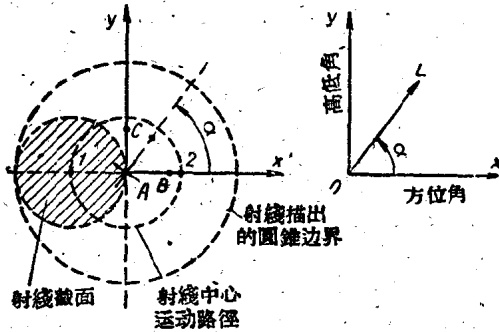


图 1-3

这样一来，当目标离开抛物面轴时，反射脉冲的幅值将以射线旋转频率差不多按正弦规律变化；包络线的幅值这时将和目标从抛物面轴的偏移成正比（曲线 B ）。当目标移向距 B 点为 α 角的 C 点时，包络线的相角差也是 α 角（曲线 C ）。

目标与某些与抛物面有关的固定轴之间的相对位置可以用向量 OL 表示；这个向量 OL 的模与信号的包络线幅值成正比，它的幅角 α 等于这条包络线对某一固定位置来说的相角。

随动系統應該沿着下面这两个坐标来校正拋物面軸的偏移：方位角(X 軸)和高低角(Y 軸)。因此，誤差信号(包絡綫向量)可以分解成沿这两个軸的投影，并且設法产生两个和这两个投影成正比的电压。每一个电压都加在它自己的随动系統輸入端，而天綫是用两个电动机来旋移的。

把向量 OL 分解成沿 OX 軸和 OY 軸的两个分量是利用所謂参考电压发生器来进行的。这个发生器具有两个互相垂直的繞組，与天綫振子同步旋轉，产生两个頻率与信号頻率相同而相位互差 90° 的交变电压。这两个电压再变成矩形脉冲，每一个都和誤差信号一起同时加在它自己的随动系統上。

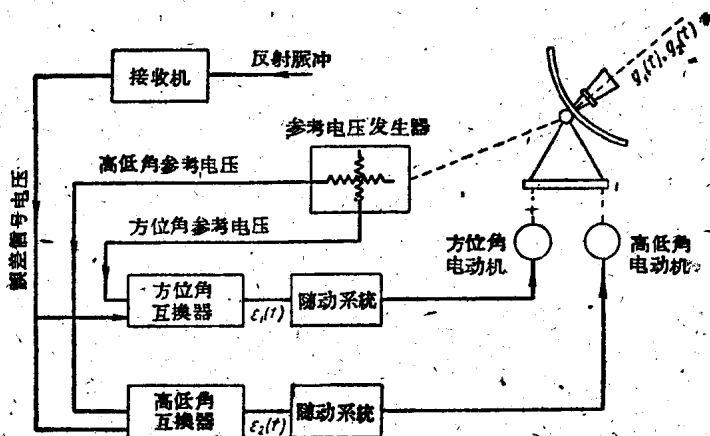


图 1-4

这些脉冲和誤差信号相互作用，使得一个随动系統(方位角互感器)第一級产生的电压和 $OL \cos \alpha$ 成正比，而另一随动系統第一級产生的电压和 $OL \sin \alpha$ 成正比，其中 OL 是誤差信号的幅值， α 是其相角。第一个电压正比于目标方位角和天綫軸方位角的偏差，而第二个电压正比于目标高低角和天綫軸高低角的偏差。

控制天綫的綫路結構图如图 1-4 所示。我們現在来比較仔細

地研究其中一个随动系统——高低角随动系统的线路。在这个随动系统中,控制作用 $g(t)$ 乃是目标的高低角,控制对象就是天线;控制对象的坐标 $x(t)$ 是天线的高低角;这个坐标值与参考电压发生器发出的高低角的参考电压一起加到高低角互换器上。高低角互换器输出端上产生的电压就是高低角的误差信号

$$\varepsilon(t) = g(t) - x(t).$$

随动系统的简化电路图与结构图如图 1-5 所示。由高低角互换器输出端引出的经整流后的电压加在一个纹波滤波器上。这个滤波器的输出端电压 $U_r(t)$ ——纹平的直流电压——与抛物面反射器轴和目标方向高低角的差成正比。这个电压加在一个供电给电机放大器(ЭМЯ)控制绕组的推挽放大器上。这两个绕组的磁化安匝的差和 $\varepsilon(t)$ 成正比。在电机放大器电刷两端引起电压 $U_{\varepsilon, \text{м.я.}}$, 这个电压加在直流电动机的电刷上。当反射器轴和目标方向一致时,误差信号和 $\varepsilon(t)$ 都等于零, $U_{\varepsilon, \text{м.я.}} = 0$, 因而电动机不转动。当 $\varepsilon(t)$ 出现时,电动机开始旋转,转速与 $U_{\varepsilon, \text{м.я.}}$ 成正比,通过减速器使天线旋移,减少 $\varepsilon(t)$ (也就是说使天线向目标方向移动)。

上述线路具有很高的灵敏度,当角度差只是一分的几分之一时就会动作。系统在有这样高的灵敏度时如果没有校正装置,就将会不稳定。为了使系统稳定,除了上述串联校正装置而外,还应应用速度反馈。速度反馈电桥可以产生与电动机角速度成正比的电压 U , 这个电压通过特殊电路,变成反馈电压;电路输出端的分压器使我们从这个电压中取得我们所必需的那一部分,也就是说,确定所需的反馈系数。反馈电压加在供电给电机放大器的推挽放大器的栅极上,它和误差电压 $\varepsilon(t)$ 相对联接。当电动机的转速变化太快时,反馈可以削弱电压 $\varepsilon(t)$ 的作用,而当变化较慢时它便不起作用。由于系统上接有反馈,所以当参数选择得当时,系统可以做到稳定,并且使调整过程具有所需的品质。

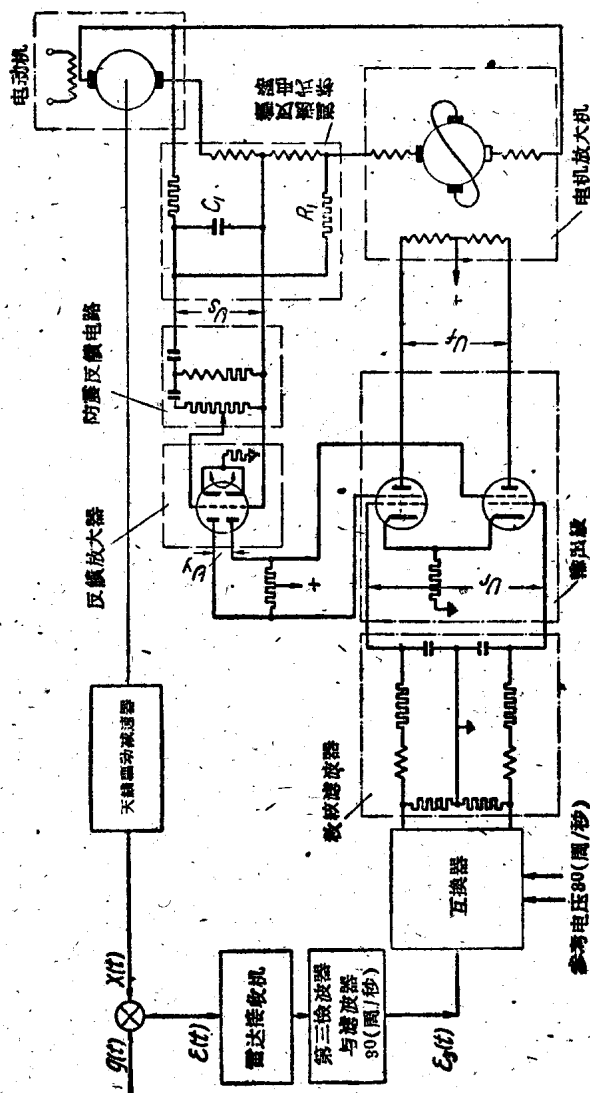


图 1-5