

# 雷达自动装置

彭一之 編著

內部資料

北京科学教育出版社

1961年9月

57

# 目 录

|                     |      |
|---------------------|------|
| 緒論                  | 7—10 |
| § 0-1 自动装置在雷达中的应用   | 7—8  |
| § 0-2 自动装置的其他应用及其意义 | 8—9  |
| § 0-3 自动技术的发展       | 9    |
| § 0-4 課程的任务和内容      | 9—10 |

## 第一篇 連續調整系統

|                    |       |
|--------------------|-------|
| 第一章 天綫控制系統——連續調整系統 | 11—55 |
| § 1-1 天綫控制系統的结构原理  | 11—12 |
| § 1-2 誤差灵敏元件       | 12—25 |
| (一) 自同步变压器系統       | 12—15 |
| (二) 自同步感应傳輸系統      | 15—19 |
| (三) 磁同步机           | 19—21 |
| (四) 电位器式誤差灵敏元件     | 21—22 |
| (五) 电容式誤差灵敏元件      | 22—23 |
| (六) 电感式誤差灵敏元件      | 23—25 |
| § 1-3 执行元件         | 25—32 |
| (一) 他激直流电动机        | 25—27 |
| (二) 两相异步电动机        | 27—32 |
| § 1-4 变换元件         | 32—41 |
| (一) 相灵敏整流器         | 32—38 |
| (二) 极性調制器          | 38—41 |
| § 1-5 放大元件         | 41—53 |
| (一) 閘流管放大器         | 41—42 |
| (二) 磁放大器           | 42—52 |
| (三) 电机放大器          | 52—53 |
| § 1-6 天綫控制系統的天綫路   | 53—55 |
| 参考資料               | 55    |

|                    |        |
|--------------------|--------|
| 第二章 連續調整系統的分析研究    | 56—124 |
| § 2-1 調整系統的动态特性要求  | 56—57  |
| § 2-2 調整系統的暫态研究法   | 57—63  |
| § 2-3 調整系統的頻率研究法和併 | 63—73  |

|                               |         |
|-------------------------------|---------|
| § 2-4 稳定的基本条件 .....           | 73—76   |
| § 2-5 稳定性的間接研究法 .....         | 76—86   |
| (一) 魏斯准則 .....                | 76—77   |
| (二) 米哈依洛夫准則 .....             | 77—79   |
| (三) 奈魁斯特准則 .....              | 79—84   |
| (四) 天綫控制系統的稳定性分析 .....        | 85—86   |
| § 2-6 稳态誤差的研究 .....           | 86—90   |
| (一) 以开环幅相特性曲綫来判断系統的稳态誤差 ..... | 86—88   |
| (二) 系数法决定系統的誤差 .....          | 88—90   |
| § 2-7 对数频率特性法研究調整系統的稳定性 ..... | 91—101  |
| (一) 对数幅相特性曲綫 .....            | 91—95   |
| (二) 对数幅频特性和相频特性間的关系 .....     | 95—99   |
| (三) 根据开环对数特性判定系統的稳定性 .....    | 99      |
| (四) 根据开环对数特性判定稳态誤差 .....      | 100—101 |
| § 2-8 調整过程质量的研究 .....         | 101—121 |
| (一) 根据稳定性儲量評判調整过程质量 .....     | 101—102 |
| (二) 根据振荡特性指标来評判調整过程质量 .....   | 102—103 |
| (三) 根据閉环实部频率特性来評判調整过程质量 ..... | 108—121 |
| § 2-9 改善調整过程的方法 .....         | 121—128 |
| (一) 串联校正 .....                | 122—125 |
| (二) 并联校正 .....                | 125—127 |
| (三) 串联校正和并联校正的比較 .....        | 128     |
| 参考資料 .....                    | 128     |

### 第三章 連續調整系統的綜合研究 .....

|                              |         |
|------------------------------|---------|
| § 3-1 調整系統的設計程序 .....        | 129—130 |
| § 3-2 执行电动机功率的計算 .....       | 130—139 |
| (一) 静态摩擦力矩的計算 .....          | 130—131 |
| (二) 風負載力矩的計算 .....           | 131     |
| (三) 大功率調整系統电动机功率之選擇 .....    | 131—134 |
| (四) 小功率調整系統电动机功率之選擇 .....    | 134—139 |
| § 3-3 減速器的設計 .....           | 139—142 |
| § 3-4 誤差灵敏元件的選擇 .....        | 142—149 |
| § 3-5 系統的动态計算——校正裝置之綜合 ..... | 149—160 |
| (一) 理想过渡过程 .....             | 150—151 |
| (二) 希望的对数幅频特性 .....          | 151—155 |
| (三) 校正裝置的綜合法 .....           | 155—158 |
| (四) 校正裝置綜合举例 .....           | 158—160 |
| 参考資料 .....                   | 160     |

### 第四章 連續調整系統的实驗研究 .....

|                              |         |
|------------------------------|---------|
| § 4-1 开环特性之測量                | 161—165 |
| (一) 暫态响应法                    | 161—162 |
| (二) 頻率响应法                    | 162—163 |
| (三) 測量設備                     | 163—165 |
| § 4-2 閉环特性之測量                | 165—167 |
| (一) $\theta_0/\theta_i$ 特性測量 | 165—166 |
| (二) $e/\theta_i$ 特性測量        | 166     |
| (三) $e/F$ 特性測量               | 166—167 |
| 參考資料                         | 167     |

## 第二篇 脉冲調整系統

|              |         |
|--------------|---------|
| 第五章 角度自动跟踪系統 | 168—214 |
|--------------|---------|

### (一) 圓錐扫描角度跟踪系統

|                                |         |
|--------------------------------|---------|
| § 5-1 SCR-584 角度跟踪系統方框图        | 169—171 |
| § 5-2 雷达站自动跟踪系統的研究方法           | 171—174 |
| § 5-3 接收机、檢波器、放大器及諧振滤波器的傳輸函数   | 174—175 |
| § 5-4 相位鉴别器、滤波器及其傳輸函数          | 175—178 |
| § 5-5 直流放大器及其傳輸函数              | 178—179 |
| § 5-6 电机放大机和电动机                | 179—180 |
| § 5-7 校正装置及其傳輸函数               | 180—185 |
| § 5-8 SCR-584 跟踪系統的頻率特性及稳定性的研究 | 185—189 |
| § 5-9 SCR-584 跟踪系統調整过程质量的研究    | 189—191 |
| § 5-10 跟踪系統跟踪准确度的研究            | 191—197 |
| (1) 系統的动态誤差                    | 191—192 |
| (2) 目标回波起伏所引起的随机誤差             | 192—196 |
| (3) 角度跟踪时鉴别多目标的艱力              | 197     |
| § 5-11 圓錐扫描角度跟踪系統的战术要求和主要参数    | 197—201 |
| (1) 跟踪距离和跟踪速度的确定               | 197—198 |
| (2) 波束偏角的选择                    | 198—199 |
| (3) 波束宽度的选择                    | 199     |
| (4) 圓錐扫描速率的选择                  | 199—200 |
| (5) 圓錐扫描雷达跟踪距离的极限              | 200—201 |

### (二) 单脉冲角度跟踪系統

|                   |         |
|-------------------|---------|
| § 5-12 相位法单脉冲系統   | 202—204 |
| § 5-13 振幅法单脉冲系統   | 204—205 |
| § 5-14 和差法单脉冲系統   | 205—208 |
| § 5-15 单脉冲系統訊道的簡化 | 208—209 |
| (1) 四波束方式         | 208     |

|                                       |         |
|---------------------------------------|---------|
| (2) 双波束方式 .....                       | 208—209 |
| § 5-16 单脉冲系统天线轴綫 (电軸) 的稳定性和灵敏度 .....  | 209—211 |
| § 5-17 波束之最佳偏角和相位中心之最佳距离 .....        | 211—213 |
| § 5-18 单脉冲跟踪系统中, 自动增益控制对跟踪噪音的影响 ..... | 213—214 |
| 参考資料 .....                            | 214     |

## 第六章 距离自动跟踪系统.....215—232

|                           |         |
|---------------------------|---------|
| § 6-1 距离跟踪系统的最简方框图.....   | 215—216 |
| § 6-2 鉴别时间的方法.....        | 216—218 |
| § 6-3 距离脉冲的产生.....        | 218—219 |
| § 6-4 距离跟踪系统的结构举例.....    | 219—220 |
| § 6-5 搜索目标时工作状态的研究.....   | 220—222 |
| § 6-6 机电式距离系统跟踪状态的研究..... | 223—229 |
| § 6-7 电子式距离系统跟踪状态的研究..... | 229—232 |
| 参考資料.....                 | 232     |

## 第三篇 計 算 装 置

## 第七章 模拟計算装置.....234—255

|                                   |         |
|-----------------------------------|---------|
| § 7-1 加减乘除的綫路.....                | 234—241 |
| § 7-2 积分和微分电路.....                | 241—245 |
| § 7-3 产生函数的电路.....                | 245—249 |
| (一) 正弦余弦函数 .....                  | 245—247 |
| (二) 正切函数 .....                    | 247—248 |
| (三) 反三角函数 .....                   | 248—249 |
| § 7-4 坐标的变换.....                  | 249—252 |
| (一) 直角坐标的旋轉 .....                 | 249—250 |
| (二) 极坐标化为直角坐标 .....               | 250     |
| (三) 直角坐标化为极坐标 .....               | 250—252 |
| § 7-5 解微分方程的电路——自动調整系统的模拟研究法..... | 252—254 |
| 参考資料 .....                        | 254—255 |

## 第八章 数字計算装置.....256—274

|                          |         |
|--------------------------|---------|
| § 8-1 电子计算机的基本工作原理.....  | 256—257 |
| § 8-2 程序设计的基本原理.....     | 257—261 |
| § 8-3 数和指令的編碼.....       | 261—264 |
| § 8-4 电子计算机部件的技术原理.....  | 264     |
| (一) 运算器和控制器 .....        | 264—268 |
| (二) 存儲器 .....            | 268—273 |
| § 8-5 电子计算机和雷达的联合运用..... | 273—274 |

|                          |         |
|--------------------------|---------|
| 参考資料 .....               | 274     |
| 附录 I h 函数表 .....         | 275—278 |
| 附录 II 交流超前网络 .....       | 279—282 |
| 附录 III 有随机输入的线性系统 .....  | 283—295 |
| 附录 IV 脉冲调整系统理论 .....     | 296—307 |
| 附录 V 非线性对调整系统工作的影响 ..... | 308—324 |



## 緒 論

在开始学习本课程的时候，首先了解一下本课程的研究对象，本学科的发展过程以及课程内容，是很必要的，因为对这些方面的了解，可以帮助读者明确学习目的和研究自己的学习方法。

### § 0-1. 自动装置在雷达中的应用

自动装置在近代的雷达站中应用很多，几乎已成为必不可少的一部分了。尤其是自从出现了高速度的飞机和导弹以后，产生了建造自动防空和指挥系统的要求，在这类防空和指挥系统中，自动装置更是应用得十分集中和突出。

我们知道：早期的主要地面防空武器之一是高射火炮，它的方向和“炮目距离”是由肉眼借瞄准镜来观测的，瞄准动作是由人手来完成的，虽然由于当时飞机的航速还很低，人工操纵的火炮尚可加以对付，但当时火炮命中率很低（约五万分之一），而且防空能力受气候的限制很大，亟待加以改进。

第二次大战前后，飞机的速度提高很快，当时装有活塞式发动机的飞机已经达到其速度极限，而且还正在为争取更高速度的喷气发动机而斗争。除此以外，战争实践也要求在云雾、黑夜等气象条件恶劣、能见度很差的情况下，还具有防空能力。这样一来，靠人工来直接解决瞄准问题，就显得更不符合要求了。

于是在战争后期，研制了炮瞄雷达——指挥仪——自动火炮这样一种高度自动化的防空系统。在这系统中，联合了很多自动装置同时工作，炮瞄雷达连续不断地自动地测定目标的空位位置（方位角、仰角和斜距），同时把这些数据以适当的形式自动地传送给指挥仪；指挥仪根据这些数据、气象条件及炮弹初速等，自动计算出目标的前置点位置，并把计算出来的结果当作命令，指挥高射炮瞄准射击；高射炮执行指挥仪的瞄准命令也是由自动装置来实现的。

在炮瞄雷达中，为了能自动地测得目标的三个坐标，至少要有与之相应的三个自动跟踪系统。用炮瞄雷达代替人的观测，不仅解决了在任何气象条件下探测目标的问题，而且在瞄准速度，瞄准精确度，瞄准距离，以及减轻战士们的操作劳动方面都带来了巨大的跃进。

除了地面上的自动防空系统以外，近代的歼击机上也备有完成类似作用的指挥火炮的自动系统，在这种系统中，也有一个小型的自动跟踪雷达。

战后，帝国主义国家，特别是美国帝国主义，一直在不遗余力地发展火箭技术。我们社会主义国家，为了捍卫和平，如果帝国主义战争狂人敢于发动战争，我们便给以毁灭性的打击。因此，在充分发挥人的作用的同时，也十分重视武器的发展。在火箭技术方面苏联就远远走在美国的前面。现在已经有各种射程各种用途的火箭装备军队，固然操纵火箭运动的方式有各种各样，但由雷达来进行遥控的方式采用的非常普遍。譬如操纵防空火箭，除了要有前述的跟踪敌人目标的雷达站以外，还可能要有跟踪我方高射火箭的雷达站，计算机根据每一时刻目标和火箭的位置，计算出火箭在某一点命中目标时火箭应遵循的运动路线。如果火箭的实际航线偏离了应有的路线，地面指挥台就发出命令迫使火箭改变其运动参数。这种跟踪

火箭的雷达站，当然也是一种复杂的自动系统。操纵高射火箭也还可能用所谓波束法，这时用一个波束发射站，利用等讯号法去直接指挥火箭的运动。这种波束发射站，也是一个能执行由计算机来的命令的自动系统。

自动装置在雷达中的另一类应用是控制天线的方位（天线控制系统）。这一种应用和跟踪雷达不同：在跟踪雷达中，天线方向应永远保持指在目标的方向；而在控制天线的系统中，天线的角位置按照手摇柄给出的规律（命令）变化，应用这种自动系统，就能把人从摇动庞大笨重的天线底座操作中解脱出来，自然也就使转动天线角位置的操作进行得准确而迅速。

雷达站中往往有“平面位置显示器”，在这一类显示器中，示波管荧光屏上的径向扫迹应该和天线的方向同步旋转。如果这种显示器是采用旋转“偏转线圈”的方式，则就要求偏转线圈准确地和天线的转动同步，这种同步系统也是自动装置在雷达中常见的一种应用。

此外在雷达站接收机中，常有自动增益控制系统，自动频率微调系统，这些系统一般虽然都是纯粹的电子线路，但其工作原理和前面所列举的那些机电系统却是相同的。

上面谈到的都是自动装置在雷达站本身中的一些应用。除此以外，对于整个雷达网而言，还有将分布在各个地方的各种雷达所得数据的传输和处理的问题。由于航空兵器在远距离、高速度、大威力方面的迅速发展，这种全局性的情报系统更形必要，在这种系统中，可能采用计算机来处理情报，这种半自动或自动系统就更为复杂了。

本课程的任务，在于研究雷达站中这些自动装置的构成、工作原理以及其分析和综合的方法。

## § 0-2 自动装置的其他应用及其意义

自动装置和自动技术除了上述的在雷达站中的应用以外，在国民经济各部门以及其他军事技术方面的应用也越来越广泛：如发电站的电压、功率及频率的自动调整；仿形机床操作过程的自动控制；锅炉设备中蒸汽压力的自动调节；冶金部门电弧炉温度的自动控制；各种原动机（气轮机、水轮机、内燃机、电动机）转速的自动调整；飞机、火车及其他车辆的自动驾驶；原子能的生产；导弹的操纵；人造卫星和行星以及宇宙飞船的操纵等，都需要各种各样的、简单的以至十分复杂的自动装置来代替人的工作。近些年来，人们更致力于生产过程自动化的研究。现在有不少国家，尤其是社会主义国家，已经出现了很多完全自动化的车间和工厂企业。可以预见，随着我国社会主义建设的不断发展，自动技术在我国国民经济各部门中的应用，也将越来越显出其重大意义。

生产和操作过程的自动化，大大提高了社会劳动生产率，节省了大量活的劳动，而且减轻了人们的劳动强度。

自动化带来了工作的高准确度，没有主观误差而且作用迅速。由于人的生理条件的限制，对那些要求工作准确度高，动作极迅速的操作，单靠人手是不能适应的。譬如，由于飞机速度的不断提高，人工操纵的雷达，就不能适应防空的要求，于是研制了能自动跟踪目标的雷达。

在人不能直接参与工作的条件下，自动控制就更有其特殊意义。如在原子能生产中，由于原子放射性对人体的有害作用，必须用自动机来代替人的直接操作。

社会主义国家最乐意在生产中使用机器，以及使生产过程自动化。刘少奇同志在中共第八次代表大会第二次会议的报告中谈到技术革命时说：“在技术革命方面，主要的任务是：

把包括农业和手工业在内的全国经济有计划有步骤地转到新的技术基础上，转到现代化大生产的技术基础上，使一切能够使用机器的劳动都使用机器，实现全国城市和农村的电气化；……在尽可能地采用世界上最新的技术成就的同时，在全国的城市和农村中广泛地开展改良工具和革新技术的群众运动，使机械操作、半机械操作和必要的手工劳动适当地结合起来”。生产过程的机械化自动化，在我们社会主义国家有着无限发展的前景。

但是在资本主义国家就根本是另一回事了，在那里只有“当新技术向资本主义预示着最大利润的时候资本家就拥护新技术。当新技术不再预示着最大利润的时候，资本家就反对新技术，主张转而采用手工劳动。”资本主义生产的目的在于追求最大利润，其企业中的自动化水平并不决定于技术和科学的合理性，此外自动化生产排挤着工人，造成大批工人失业；劳动力贬值，致使手工劳动比机械化劳动更便宜，这就给自动技术的发展造成了更多的障碍。

### § 0-3 自动技术的发展

在自动机械方面，我们祖先在很早以前就有过辉煌的贡献，如在公元 110 年张衡发明的指南车；公元 168—169 年汉灵帝时代的翻水车；公元 265—349 年晋代的记里鼓车等，至于三国时代诸葛亮的木牛流马，更是千古传扬的美谈。但是由于我国长期停留在封建社会，社会生产力发展迟缓，加以近百年来，我国沦为殖民地半殖民地，帝国主义者和国内统治阶级对我国人民的压迫，以及他们对科学事业的摧残，致使我国的自动技术和许多其他科学技术一样成了真正的空白点。

革命胜利后，由于中国共产党对于生产和科学事业的正确领导与深切关怀，自动技术和其他科学一样得到了迅速的发展。如在第一个五年计划期间，就建设了很多高度机械化自动化的工厂；在科学院成立了自动化研究所；在很多高等及中等工业学校都开设了有关的课程；在企业中已能成批生产高质量的自动系统和各种自动元件。

尤其是党提出“鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义”的总路线后，在全国大跃进的形势下，自动控制技术和其他科学一样又得到了进一步的发展，科学研究机关、高等学校和企业部门从此开始了一个大搞科研、大攀尖端和群众性局面，在这期间，不仅做出了许多有关自动控制技术方面的高精尖的新产品，及在理论方面作出了不少的发展，而且最重要的是培养了技术干部队伍。而群众性的、以半机械化、机械化、半自动化自动化为中心的技术革命运动的广泛开展，出现了无数个自动流水线 and 自动车间；在总路线鼓舞下的中国人民，不仅在工业上运用了自动技术，而且在农业、交通运输业、和服务性行业等各部门中，机械化自动化操作也都得到了一些应用。

苏联在自动控制技术和理论的发展方面，有着最杰出的贡献，还在十月革命以前，就出现过很多有贡献的匠师和学者。1876 年 И. А. Вышнеградский 的著作作为自动调整理论的发展打下了基础。在十月革命后，由于苏联共产党的领导，自动技术及理论更有着蓬勃发展，出现了成批的综合自动化工厂，造就了大批著名的学者专家。尤其近年来洲际火箭，人造卫星，人造行星、巨型宇宙飞船的发射成功和飞船的成功着陆，更标志着苏联的各门尖端科学，其中也包括自动控制得到了高度的发展。

### § 0-4 课程的任务和内容

本课程的研究对象是雷达中的自动装置，包括自动调整系统和计算仪器两大部分。通过对本课程的学习，要使学者掌握：1) 雷达站中主要调整系统结构和工作原理；2) 线性调整

理論（分析實驗研究和綜合法）；3）特別是自動跟踪雷達工作狀態的研究和有關參數的選擇；4）與雷達的工作密切有關的模擬式和數字式計算機的初步理論；5）對有關自動技術發展中的一些問題有一些了解。

全書共分三篇。第一篇講“連續調整系統”，在這一篇中，以雷達站中常見的天綫控制系統為綱，講授自動調整系統的結構、元件、工作原理、以及綫性調整系統理論。第二篇講“脈沖調整系統”，主要是研究跟踪雷達中的角度跟踪系統和距離跟踪系統。第三篇講“計算儀器”，它包括模擬式和數字式計算機的基本工作原理。

自動調整系統中的非綫性因素，能使系統具有和綫性系統根本不同的工作現象。研究這些非綫性因素的影響，要用非綫性理論去解決，非綫性理論目前還研究得很不完善。較準確的方法不獨很煩，而且系統方程的階數還不能超過二階，近似的方法，雖不受這一拘限，但也只有助於對物理本質的了解，還不足以滿足工程實際的需要。由於本課規模的限制，我們不能全面地介紹非綫性理論，只就諧波平衡法在本書附錄中作一介紹。學者在掌握這些內容後，是完全有獨立地進一步學習它的能力的。

關於雷達站中的自動增益控制系統，自動頻率微調系統，雖然前者是非綫性系統，後者基本上是綫性系統，其工作原理大体上和我們講過的系統相似，而且有專門的著作可資參考。在本課中也就不另作分析了。

本課的先修課程有高等數學（特別是拉氏變換，概率論）、物理學、電工學、電機學、無線電基礎、脈沖技術和雷達原理，此外由於調整系統多是機電系統，在設計系統時，要求讀者具有較多的機械設計知識。

本課程是專業設備課，所以和其他專業課程也是有密切聯系的。

學習本課時，要建立許多新的概念，學者應很好地理解這些概念並能正確地運用它們，同時既要注重理論分析，更要重視將理論用於工程實際中去。

# 第一篇 連續調整系統

## 第一章 天綫控制系統——連續調整系統

### § 1-1 天綫控制系統的結構原理

許多精確測量目標座標的雷達站，如測高雷達、炮瞄雷達、反迫擊炮雷達等，都需要能對任意方向的目标進行探測或跟蹤。因此都要求能準確地控制其天綫的位置。一般天綫所應對准的方向由手搖柄給出，通過一套自動控制系統，使天綫重複手搖柄的運動。自動控制系統的特點是具有功率放大的作用（實際上是控制功率），人手去搖動很輕便的手柄，便可轉動龐大的天綫。這種使天綫重複手搖柄運動規律的自動控制系統，就叫做天綫控制系統。

顯而易見，在天綫控制系統中，必須有一個能提供力矩的元件，就靠這元件所產生的力矩去旋轉雷達的天綫，這類元件在自動技術的術語中叫做執行元件。因為天綫要能朝任何方向旋轉，所以對執行元件的起碼要求是可能產生方向彼此相反的兩種力矩（正和負），而一旦當天綫對准了某既定方向以後，天綫就不應該再動了，因此執行元件也不應該再產生力矩（力矩為零），常見的執行元件為他激直流電動機和兩相交流電動機。

執行元件的工作狀態是由一定的訊號來控制的。譬如當天綫位置在順時針方向偏离某既定方向時，要求執行元件產生力矩使天綫朝逆時針方向旋轉，一直到與既定方向相等；反之，當天綫位置在逆時針方向偏离既定方向時，則要求天綫朝順時針方向旋轉，以消除這一偏差。執行元件的這兩種相反的工作狀態，是由訊號的不同極性來控制的，如果執行元件的前一種工作狀態對應着正極性的控制訊號，則後一種工作狀態就對應着負極性的控制訊號，可見控制訊號的極性，或者說執行電動機旋轉的方向，決定于偏差的方向。此外，為了進行比例控制，即當偏差大時，電動機轉動快，偏差小時，電動機轉動慢，控制訊號的大小應該和偏差的大小成比例。在天綫控制系統中，這種將天綫實際位置和既定方向進行比較，以確定偏差（誤差），並且將角度偏差變為電壓訊號的任務，由所謂誤差靈敏元件來完成。

但是這種誤差靈敏元件所給出的訊號太微弱，不足以直接推動執行元件工作，因此在執行元件和誤差靈敏元件中間，必須加入電壓放大和功率放大的元件，這類放大元件有電子管放大器，半導體放大器，離子器件（如閘流管放大器），磁放大器以及電機放大器等。此外，為了使執行元件和誤差靈敏元件能協調地工作，以及便于對系統的工作質量進行校正，往往也需要在放大元件中插入所謂變換元件，變換元件能使交流的電壓訊號變成直流的控制電壓或者相反。

最後，在系統中一般都需要加入一些元件，以便系統的工作質量滿足既定的要求，這一類元件叫做校正元件。

圖（1-1）所示，就是根據上述各類元件所組成的天綫控制系統的結構圖。

在這里有必要對輸入量和輸出量兩個新的術語進行解釋，所謂輸入量即加入系統的一種控制作用。在圖1-1這個具體的系統中，手搖柄所轉的角度即是輸入量。輸出量即是从控制

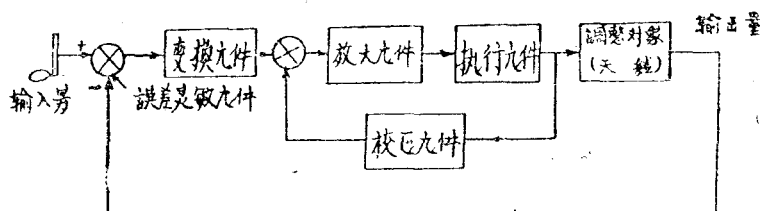


图1-1 天綫控制系統的结构图

的观点出发表示着控制对象（也叫調整对象）工作状态的一个物理量，在上述系統中，天綫在水平面內（或垂直面內）所轉的角度即是輸出量。

上面所提到的一些術語，对任何自动調整系統都是适用的。

任何自动調整系統的任务，都在于使系統的輸出量重复輸入量的变化規律。

視輸入量运动特点的不同，自动調整系統可分为三类：其輸入量为一常量者，叫做自动稳定系統；輸入量为一給定的時間函数者，叫做程序調整系統；若輸入量随工作情况而变，事先无法准确地确定者，則称之为随动系統。显然上面所說的天綫控制系統就是一种随动系統。

如果避开图（1-1）中術語所代表的具体內容，則同一張图也可作为一般調整系統的结构图。

从图中容易看出，自动調整系統的輸出量必須反饋到輸入端，以便通过誤差灵敏元件来比較它和輸入量的大小，因此可以得出自动調整系統的第二特点：即系統是閉环的（第一个特点在前面已經提到，是系統的功率放大作用）。

下面就各类元件中的一些具有代表性元件分别进行介紹。

### § 1-2 誤差灵敏元件

在自动調整系統中，視輸入量和輸出量的不同，誤差灵敏元件的种类很多。在天綫控制系統中，由于輸入量和輸出量均系角位移，因此需要有能反映角誤差的灵敏元件。目前广泛用自同步机（自整角机）来作为这种元件。

自同步机是一个通称，它又可以分为自同步发送机、自同步接收机、差动自同步机和自同步变压器等。自同步机的組合，常称为自同步机系統。例如自同步发送机和自同步变压器的組合，就常用作随动系統中的誤差灵敏元件；自同步发送机和接收机的組合，可完成遙远傳輸角运动的任务，而广泛用于雷达及导航等設備中。

#### （一）自同步变压器系統

一个原副方繞組固定在鉄芯上的变压器，其兩繞組間的互感系数是固定不变的（接近于1）。但是如果将变压器的結構作成可旋轉的电机的形式，而让一个繞組能相对于另一个繞組轉动，則兩繞組間的互感就不再是恒定的了，而是轉角的函数，譬如兩繞組彼此平行时，互感系数为最大；兩繞組彼此垂直时，互感系数等于零；兩繞組在其他相对位置时，互感虽不为最大但也不为零。根据这一原理，容易想到，如果将手搖柄与其中一个繞組机械耦合，而让另一个繞組与天綫轉軸耦合，則只有当手搖柄与天綫处在能使两个繞組互相垂直的位置时，副方繞組才沒有感应电压輸出，我們可以規定这一位置对应于手搖柄和天綫位置沒有誤差的情况，只要天綫和手搖柄間一出現偏差，旋轉变压器副方繞組就有某一电压輸出。在一定範圍內，偏差越大，輸出的电压也越大；偏差的方向不同，輸出电压的相位也相反。

自同步变压器正是根据旋转变压器的原理来工作的。图(1-2a)为这种系统的线路图，它是由两个在结构上基本相同的自同步机组成。图(1-2b)是自同步机的结构图，每个有一个定子及一个转子，定子(或转子)上有三个在空间互成 $120^\circ$ 角的绕组，转子(或定子)上有一个绕组。这两个自同步机一个是发送机，一个是变压器。把发送机和变压器定子上的三相绕组相应地联接好以后，再在发送机转子的绕组两端加上一个交流电压。

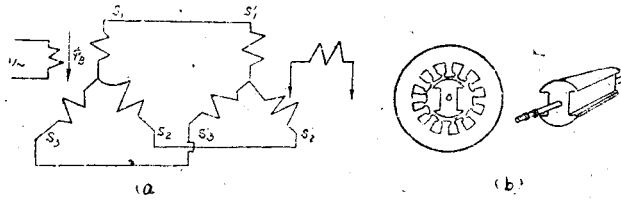


图 1-2 自同步变压器系统

于是在发送机转子绕组的沿轴方向产生了一个脉动磁通 $\Phi_B$ ， $\Phi_B$ 在发送机定子的三个绕组中产生感应电势，该电势具有与电源相同的频率，而相位则与电源电压相同或相反(视转子和定子的相对位置而定)。设转子绕组的轴线与定子绕组 $S_1$ 轴线间的夹角是 $\alpha$ ，那么在定子各绕组中感应的有效值电势为：

$$\left. \begin{aligned} E_{s1} &= E \cos \alpha \\ E_{s2} &= E \cos(\alpha - 120^\circ) \\ E_{s3} &= E \cos(\alpha - 240^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

设发送机和变压器定子的各个绕组的阻抗是 $z$ ，联接导线的阻抗都是 $Z_1$ ，则在定子每相中的电流是：

$$\left. \begin{aligned} I_{s1} &= \frac{E_{s1}}{2z + Z_1} = \frac{E}{\Sigma z} \cos \alpha \\ I_{s2} &= \frac{E}{\Sigma z} \cos(\alpha - 120^\circ) \\ I_{s3} &= \frac{E}{\Sigma z} \cos(\alpha - 240^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

如果忽略磁路的饱和，并假定磁通与电流的比例常数为 $k$ 则在自同步变压器定子各绕组中的磁通为：

$$\left. \begin{aligned} \phi'_{s1} &= k I_{s1} = \frac{kE}{\Sigma z} \cos \alpha = KE \cos \alpha \\ \phi'_{s2} &= KE \cos(\alpha - 120^\circ) \\ \phi'_{s3} &= KE \cos(\alpha - 240^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

$$\text{式中 } K = \frac{k}{\Sigma z}$$

设它们在横坐标轴和纵坐标轴方向(以定子绕组 $s_1$ 的轴线方向作纵轴)的磁通分量和为 $\phi_x$ 及 $\phi_y$ ，则 $\phi_x = \phi'_{s2} \cos(120^\circ - 90^\circ) - \phi'_{s3} \cos(120^\circ - 90^\circ)$

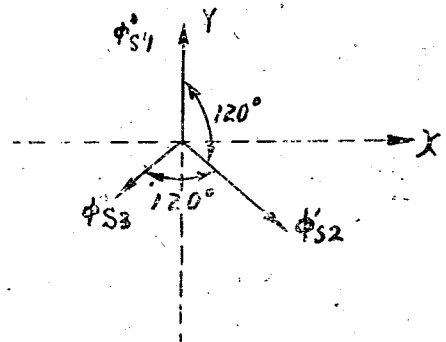


图 1-3

$$\begin{aligned}
 &= (\phi'_{s2} - \phi'_{s3}) \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{3KE}{2} \sin \alpha; \\
 \phi_y &= \phi'_{s3} - \phi'_{s2} \cos 60^\circ - \phi'_{s3} \cos 60^\circ \\
 &= KE \cos \alpha - KE \cos(\alpha - 120^\circ) \frac{1}{2} - KE \cos(\alpha - 240^\circ) \frac{1}{2} \\
 &= \frac{3KE}{2} \cos \alpha.
 \end{aligned}$$

所以定子合成磁通  $\phi$  的有效值为:

$$\phi = \sqrt{\phi_x^2 + \phi_y^2} = \frac{3KE}{2} \quad (1-4)$$

合成磁通  $\phi$  与纵座标轴的夹角  $\theta$  为

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\phi_x}{\phi_y} = \tan^{-1} \left( \frac{\frac{3KE}{2} \sin \alpha}{\frac{3KE}{2} \cos \alpha} \right) = \alpha \quad (1-5)$$

由此可见, 在自同步变压器中, 定子合成磁通的位置与发送机转子磁通的位置完全一致 (相对于定子某相绕组而言), 如果将发送机转子与手摇柄作机械耦合, 则根据上面的分析可知: 对于手摇柄 (或发送机转子) 角位置的信息, 通过定子间的联接线, 传递到了自同步变压器一端, 而且以磁通的形式重现了出来。这磁通在自同步变压器转子绕组上感生输出电压, 此电势只有当自同步变压器转子和磁通垂直时为零, 因此如果使自同步变压器转子和天线转轴作机械耦合, 而且假定在自同步变压器输出电压为零时天线和手摇柄的位置为一致, 则自同步变压器系统就可以比较手摇柄和天线的角位置, 发觉其间的误差, 并把这误差变为交流的误差电压。

误差电压  $U_e$  和误差角  $\delta$  间的关系式容易求得为:

$$U_e = U_m \sin \delta \quad (1-6)$$

式中  $U_m$  是当  $\delta = 90^\circ$  时自同步变压器的最大输出电压, 这时自同步变压器的定子合成磁通和转子绕组是彼此平行的。

图 (1-4) 表示自同步变压器系统的静态特性, 当误差角改变符号时, 电压  $U_e$  的相位改变  $180^\circ$ 。

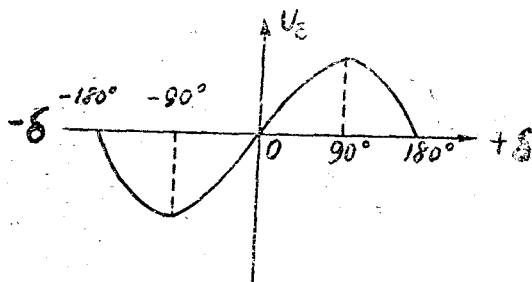


图1-4 自同步变压器系统的静态特性

在天线控制系统中, 由于能不断地纠正输出量和输入量之间的误差; 因此在工作中, 误差角  $\delta$  总是一个很小之值, 在这种情况下误差电压可以认为和误差角成比例, 即

$$U_e = U_m \cdot \delta$$

作为一个误差灵敏元件, 我们希望它能对一个很小的误差角产生一个不太小的误差电压, 也就是说, 希望它具有高的灵敏度, 灵敏度  $s$  可定义如下。

$$s = \left( \frac{dU_e}{d\delta} \right)_{\delta \rightarrow 0} \quad \text{伏/度} \quad (1-7)$$

一般自同步变压器系统的灵敏度约为1伏/度。

自同步发送机和自同步变压器虽然在结构上大体相同，但必竟各有特点，如发送机的转子为凸极式，而变压器的转子作成圆柱形（隐极式），这种结构上的区别，是由变压器的应用特点来决定的。由于变压器的任务只在于产生误差电压，而并不需要产生力矩（往后可知：对于自同步感应传输系统而言，正需要产生力矩），因此不应该将其转子作成凸极式。此外如果采用凸极式转子，则当转子轴与定子磁场方向垂直时，由于空气隙很大，磁路磁阻很大，定子电流就要加大，这样一来，非徒无益，而且还要使变压器过热。至于将发送机转子作为凸极式，则是因为发送机不独与变压器联合运用，而且还要和自同步接收机联合运用，在后一种应用情况下，正需要产生大的同步力矩，但这时自同步接收机的转子也必须是凸极式的。

自同步变压器按其在线路中工作时的准确度可以分为三级：

表 1-1

| 誤 差     | 精 度 級        |                          |                          |
|---------|--------------|--------------------------|--------------------------|
|         | 1            | 2                        | 3                        |
| 最大誤差（度） | 至 $\pm 0.25$ | 从 $\pm 0.25$ 至 $\pm 0.5$ | 从 $\pm 0.5$ 至 $\pm 0.75$ |

結論：

1. 自同步变压器系统的工作原理和常见的变压器相同，只不过它是作成可旋转的形式罢了。
2. 自同步变压器系统作为误差灵敏元件，是用来测量两个角位移间的误差，并把这误差变成交流误差电压。误差角的大小反映为电压大小的不同；误差的方向，反映为相位的 $180^\circ$ 变化。
3. 自同步变压器系统的突出优点是能将彼此相距很远的两个角运动进行比较，这就给整个系统的结构设计带来极大便利，同时也因此提供了遥远控制的可能性。

## （二）自同步感应传输系统

自同步发送机和接收机组成的自同步机系统，叫做自同步感应传输系统，它和自同步变压器系统不同，是用来远距离传送角运动的装置，它并不是天线控制系统中的一组成部分，但是它的结构和工作原理与变压器系统相似，而且在雷达站中也用得很广泛（如常用来传送目标的方位角，高低角以及距离的数据），所以也在这里一并讲授。

由于这一系统是用来同步传送角度，所以要求能有较大的反应力矩，去转动刻度盘等小负载，因此一方面把接收机转子作成凸极式（发送机转子总是凸极式的），另一方面，将接收机转子绕组和发送机者一样，也以同一交流电压来激励，线路图见图（1-5）。

由于发送机和接收机转子绕组都被激励，各在其定子绕组中感生电势，当发送机和接收机的转子具有

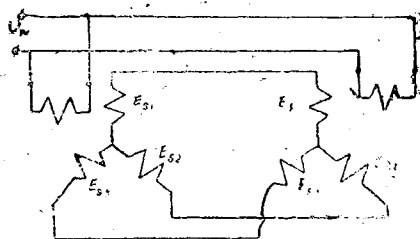


图1-5 自同步感应传输系统

相同的角位置时(指轉子对定子的相对角位置), 发送机轉子在定子三相中感生的电势  $E_{s1}$ ,  $E_{s2}$ ,  $E_{s3}$  和接收机轉子在其定子三相中感生的电势  $E'_{s1}$ ,  $E'_{s2}$ ,  $E'_{s3}$  分别一一相等而相反, 因此定子各相中无电流, 接收机轉子不轉动, 而居于平衡位置。

如果发送机轉子轉动某一角度  $\delta$ , 则发送机定子繞組和接收机的对应定子繞組中的感应电势不再相等, 結果在定子繞組中产生电流并建立磁通, 显然此磁通的大小及方向和  $E_{s1}$ ,  $E_{s2}$ ,  $E_{s3}$ , 及  $E'_{s1}$ ,  $E'_{s2}$ ,  $E'_{s3}$  的大小及方向(相位)有关, 亦即和  $\delta$  的大小有关。定子磁通和轉子磁通彼此作用的结果, 产生所謂“同步力矩”, 它力求接收机轉子和发送机轉子占住相同的位置, 因而能实现机械角移的远距傳送。

下面我们來較詳細地研究一下定子和轉子磁通彼此作用的情况。

发送机(接收机也一样)定子磁通可以看作两个磁通分量矢量和, 一个是其自己的轉子磁通  $\phi_{r0}$  在定子繞組中感生电势  $E_{s1}$ ,  $E_{s2}$ ,  $E_{s3}$  推动电流所建立的磁通  $\phi_{c0}$ ; 另一个是接收机轉子磁通  $\phi_{rn}$  其自己的定子繞組中感生电势  $E'_{s1}$ ,  $E'_{s2}$ ,  $E'_{s3}$  推动电流(此电流自然也通过发送机定子繞組)而在发送机定子中所建立的磁通  $\phi'_{c0}$ 。

定子的合成磁通以  $\phi_{\Sigma c0}$  表示。

$$\bar{\phi}_{\Sigma c0} = \bar{\phi}_{c0} + \bar{\phi}'_{c0} \quad (1-8)$$

同样, 接收机定子磁通  $\phi_{\Sigma cn}$  也是两部分的矢量和:

$$\bar{\phi}_{\Sigma cn} = \bar{\phi}_{cn} + \bar{\phi}'_{cn} \quad (1-9)$$

图 1-6 中已画出了这些磁通矢量的相对关系, 从图中可見, 如果发送机和接收机的电气特性相同, 因而  $\phi_{cn} = \phi'_{cn}$  則  $\phi_{\Sigma c0}$  和  $\phi_{\Sigma cn}$  大小相等而方向相反。

不难进一步指出: 定子的合成磁通与轉子激励磁通間的夹角为

$$\alpha = \alpha' = 90^\circ + \frac{\delta}{2} \quad (1-10)$$

合成磁通的大小可容易求得为:

$$\phi_{\Sigma c0} = \sqrt{\phi_{cn}^2 + \phi_{cn}'^2 - 2\phi_{cn}\phi_{cn}'\cos\delta}$$

因为  $\phi_{cn} = \phi'_{cn}$ , 故

$$\phi_{\Sigma cn} = 2\phi_{cn}\sqrt{\frac{1 - \cos\delta}{2}} = 2\phi_{cn}\sin\frac{\delta}{2}$$

磁通分量  $\phi_{cn}$  与誤差角  $\delta$  无关。因此上式亦可写成:

$$\phi_{\Sigma cn} = 2K\sin\frac{\delta}{2} \quad (1-11)$$

式中  $K = \phi_{cn}$  为常数。

将  $\phi_{\Sigma cn}$  分解成沿接收机轉子磁通方向和与之垂直的两部分  $\phi_{\Sigma 1}$ ,  $\phi_{\Sigma 2}$ , 如图(1-7)所示。

$$\text{則 } \phi_{\Sigma 1} = \phi_{\Sigma cn}\sin\frac{\delta}{2}$$

$$= 2K\sin\frac{\delta}{2}\sin\frac{\delta}{2} = K(1 - \cos\delta) \quad (1-12)$$

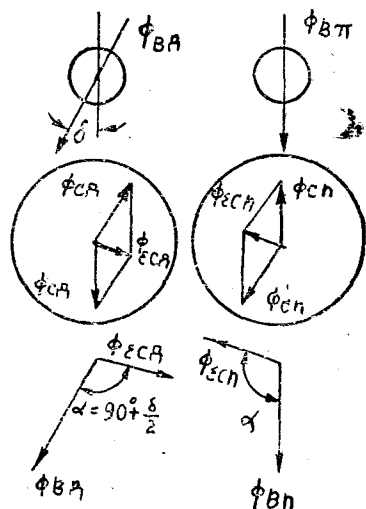


图 1-6 磁通矢量图

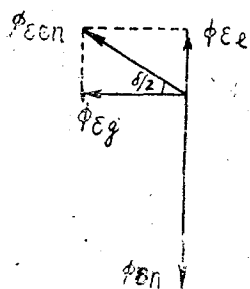


图 1-7 定子磁通的分解