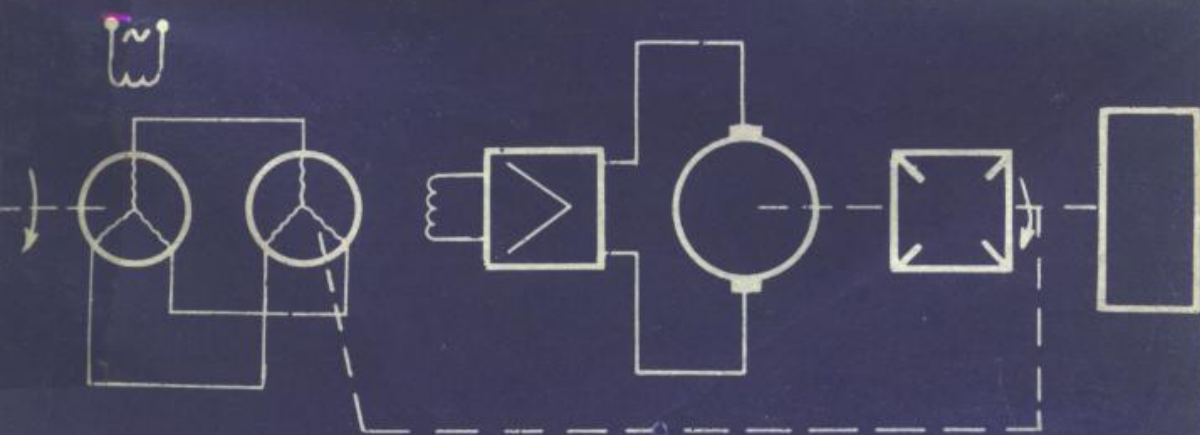


曾乐生 施妙和 编著

随动系统



北京工业学院出版社

随 动 系 统

曾乐生 施妙和 编著

北京工业学院出版社

内 容 简 介

本书主要论述随动系统的原理、结构、系统参数对系统品质的影响、改善系统品质的一些工程方法,介绍系统的误差测量方法、调制与解调线路、复合控制系统与交流随动系统的特点及其综合计算方法等。全书理论紧密结合工程实际,适用面宽,既可作高等工科院校自动控制专业及工业自动化专业本科学生教材,也可供工厂、院校、科研单位从事自动控制工作的工程技术人员参考。

本书由章燕申主审,经原兵器工业部第一教材编审委员会兵器自动控制编审小组审定同意作为教材出版。

随 动 系 统

曾乐生 施妙和 编著

北京工业学院出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京密云华都印刷厂印刷

787×1092毫米 32开本 14.625印张 308千字

1988年6月第一版 1988年6月第一次印刷

ISBN 7-81013-024-2/TP·2

印数: 1—5,000册 定价: 2.40元

前 言

本书是按原兵器工业部1985年教材编审计划会议意见，将原有《随动系统》一书（北京工业学院1983年印）改编而成。它与《反馈控制系统设计》、《计算机控制系统》、《电力传动与调速系统》构成自动控制专业本科生的一组专业教材。

本书的主要作用是在自动控制理论与自动控制系统设计之间提供一个理论联系实际的过渡。其内容以电气线性系统为工程背景，分十章进行介绍。第一章叙述随动系统原理、一般结构形式及系统性能指标，第二、三、四章论述随动系统的一些主要部件（误差测量装置、调制与解调线路、功率放大装置），第五章论述改善系统品质的一些常用方法。复合控制方式与利用非线性因素虽然也是为了改善系统品质，但考虑到这些内容的相对独立性，故单独设立章节（第六、八章）来叙述。第七章论述交流随动系统的特点、对交流校正网路的基本要求及交流系统的综合校正问题。第九章列举了随动系统在火炮、雷达、机床及机器人中的应用，并分析了各自的结构与性能。第十章对随动系统中常见的低速不平稳问题、机械谐振问题进行了分析，提出了某些改进措施，并介绍了系统灵敏度概念及其计算方法。

由于各院校的课程设置不尽相同，在应用本教材时，需按照各个院校先修课的具体情况有选择地进行讲授，与先

修课重复的内容可供学生复习参考。

本书第一、二、三、五、七、九章由曾乐生编写，第四、六、八、十章由施妙和编写，全书由曾乐生统稿。在编写过程中，得到了胡祐德副教授等一些同志的帮助。全书由清华大学章燕申教授、北京工业学院王远教授主审，原兵器工业部教材编审室审定。在此，我们对所有为本教材给予热情帮助和支持的同志表示衷心感谢。

由于我们水平有限，编写时间又较仓促，书中难免有错误和不妥之处，希望使用本书的师生与其他读者给予批评指正。

编者 1986.11.

ZR 76/02

目 录

第一章 随动系统原理

§ 1-1 概述.....	(1)
§ 1-2 随动系统的基本结构形式.....	(2)
§ 1-3 随动系统的分类.....	(4)
1. 按系统控制方式分类.....	(5)
2. 按组成系统元件的物理性质分类.....	(5)
3. 按系统信号特点分类.....	(6)
4. 按系统部件输入—输出特性分类.....	(6)
5. 按执行元件功率大小分类.....	(7)
§ 1-4 I型系统的结构与工作原理.....	(7)
§ 1-5 II型系统的结构与工作原理.....	(12)
§ 1-6 随动系统的品质指标.....	(19)
1. 随动系统的动态品质指标	(19)
2. 随动系统的稳态品质指标	(24)
练习题.....	(32)

第二章 随动系统的误差测量

§ 2-1 常用的测量元件.....	(34)
1. 电位计.....	(35)
2. 差动变压器.....	(37)
3. 自整角机与旋转变压器.....	(39)
4. 感应同步器.....	(42)
5. 三自由度陀螺仪.....	(44)

§ 2-2 精、粗测角线路.....	(46)
1. 采用双读数线路时需要解决的问题.....	(48)
2. 精、粗测角装置之间速比的取值范围.....	(54)
3. 带电气速比的精、粗测角装置.....	(54)
§ 2-3 扫描测量.....	(55)
1. 圆锥扫描测量.....	(56)
2. 扇形扫描测量.....	(60)
§ 2-4 单脉冲测量.....	(64)
练习题	(68)

第三章 相敏调制器与相敏解调器

§ 3-1 概述.....	(69)
§ 3-2 相敏调制器的基本原理与线路.....	(72)
1. 开关调制器的基本原理.....	(72)
2. 晶体管开关调制器的残余电压.....	(75)
3. 开关调制器线路举例.....	(78)
4. 乘积调制器的基本原理与线路举例.....	(83)
§ 3-3 相敏解调器的基本原理与线路.....	(86)
1. 二极管环形解调器.....	(86)
2. 三极管解调器.....	(90)
3. 乘积解调器.....	(96)
练习题	(98)

第四章 功率放大装置

§ 4-1 可控硅整流电路.....	(99)
1. 单相半波可控硅整流电路.....	(99)
2. 控制直流电动机的不可逆整流电路.....	(104)
3. 可控硅控制直流电动机的可逆整流电路.....	(112)
§ 4-2 可控硅触发线路.....	(120)

1. 对触发电路的要求.....	(120)
2. 单结晶体管触发线路.....	(121)
3. 晶体管触发线路.....	(122)
4. 磁触发器.....	(124)
§ 4-3 晶体管线性放大线路.....	(127)
1. 控制直流电动机的不可逆放大线路.....	(127)
2. 控制直流电动机的可逆放大线路.....	(129)
3. 控制两相异步机的功放电路.....	(134)
§ 4-4 晶体管开关型放大线路.....	(135)
1. 控制直流电动机的不可逆控制电路.....	(136)
2. 控制直流电动机的可逆控制电路.....	(142)
§ 4-5 交磁放大机.....	(150)
1. 交磁放大机的工作原理和运行特性.....	(151)
2. 交磁放大机的动态特性.....	(155)
3. 交磁放大机—电动机组合的机械特性.....	(161)
练习题	(163)

第五章 改善系统品质的一般方法

§ 5-1 系统结构参数与系统品质的关系	(164)
1. 速度阻尼系数 F 与系统品质的关系.....	(169)
2. 放大系数 K_0 与系统品质的关系.....	(171)
3. 转动惯量 J 与系统品质的关系.....	(171)
§ 5-2 采用串联校正装置改善系统品质.....	(172)
1. 串联校正的概念.....	(172)
2. 常用的串联校正装置及其特性.....	(173)
§ 5-3 采用并联校正装置改善系统品质.....	(184)
1. 并联校正的概念	(184)
2. 常用的并联校正装置及其特性	(187)
§ 5-4 改善系统品质的其他方法	(198)
1. 采用复合控制	(198)

2. 采用惯性阻尼器	(199)
§ 5-5 校正装置的联接	(204)
1. 联接位置的选择	(204)
2. 注意阻抗匹配	(206)
3. 主控信号与反馈信号的叠加问题	(207)
练习题	(208)

第六章 复合控制系统

§ 6-1 概述	(209)
1. 问题的提出	(209)
2. 复合控制与扰动补偿	(209)
3. 不变性原理	(212)
§ 6-2 系统的不变性条件	(213)
1. 系统的不变性条件	(213)
2. 控制系统的不变性分类	(220)
3. 实现不变性条件的双通道原理	(221)
§ 6-3 实现不变性条件的结构形式	(223)
1. 直接测量与补偿	(224)
2. 间接测量与补偿	(226)
3. 复合控制系统的推广	(235)
§ 6-4 复合控制系统举例	(240)
1. 工作原理	(240)
2. 系统的传递函数与结构图	(243)
3. 采用复合控制提高系统的控制精度	(250)
练习题	(254)

第七章 交流随动系统

§ 7-1 交流随动系统概述	(257)
§ 7-2 “零相角”条件及等效传函	(260)

1. “零相角”条件的表达式	(261)
2. 等效传递函数	(264)
§ 7-3 交流校正网路的分析与计算	(269)
1. “谐振”校正网路的分析与计算	(270)
2. “开关”校正网路的分析与计算	(286)
§ 7-4 交流系统的综合校正	(295)
1. 交流系统的传递函数	(295)
2. 交流校正网路的选择与计算	(298)
§ 7-5 交流随动系统路线举例	(303)
练习题	(306)

第八章 非线性因素对系统的影响与利用

§ 8-1 非线性因素对系统性能的影响	(309)
1. 随动系统中的几种主要非线性因素	(309)
2. 几种主要非线性因素对系统品质的影响	(312)
§ 8-2 消除非线性因素影响的常用方法	(321)
1. 振荡线性化	(321)
2. 利用局部负反馈削弱非线性因素的影响	(328)
§ 8-3 利用非线性因素改善系统品质	(329)
1. 非线性并联校正	(330)
2. 非线性串联校正	(333)
3. 利用系统的饱和特性	(336)
4. 利用非线性特性改善系统品质的实例	(338)
练习题	(342)

第九章 随动系统应用举例

§ 9-1 高射炮跟踪瞄准随动系统	(344)
1. 系统结构	(344)
2. 系统的信号传递	(349)

3. 系统的传递函数及结构图.....	(351)
§ 9-2 雷达天线控制系统.....	(355)
1. 正反馈的作用及正反馈线路的基本原理.....	(357)
2. 触发线路与单相全波可控硅整流线路.....	(367)
§ 9-3 铣床光电跟踪系统.....	(372)
§ 9-4 遥控机器人双向力反应随动系统.....	(383)
1. 系统结构与工作原理.....	(385)
2. 系统实验线路.....	(387)
3. 随动系统部分的位置阶跃响应特性.....	(388)
4. 系统动力传递特性(力反应特性).....	(390)
§ 9-5 脉冲—相位随动系统.....	(394)
1. 脉冲—相位随动系统的结构.....	(394)
2. 脉冲—相位随动系统的工作原理.....	(401)
3. 脉冲—相位随动系统的传函与动态结构图.....	(402)
练习题	(404)

第十章 随动系统中若干问题的分析

§ 10-1 低速不平稳问题	(406)
1. 产生低速“跳动”的原因	(406)
2. 减小“跳动”的办法	(411)
§ 10-2 机械谐振问题	(414)
1. 问题的提出	(414)
2. 扭转弹性变形对系统特性的影响—机械谐振	(414)
3. 消除或减小机械谐振的措施	(422)
§ 10-3 系统的灵敏度问题	(424)
1. 问题的提出	(424)
2. 灵敏度概念	(425)
3. 系统的灵敏度分析	(434)
练习题	(444)

第一章 随动系统原理

§1-1 概 述

随动系统（又称伺服系统）是构成自动化体系的基本环节，它是由若干元件和部件组成的、具有功率放大作用的一种自动控制系统，它的输出量总是相当精确地跟随输入量的变化而变化，或者说，它的输出量总是复现输入量。

随着我国四个现代化的向前推进，随动系统在我国工农业生产、国防与科学技术各个部门越来越获得广泛的应用。例如，仿型铣床的光电跟踪系统，自动车床的定位与进给系统，各种自动化仪表中的一些量测与记录系统，雷达天线控制系统，高射火炮自动跟踪系统，舰艇火炮与仪表的自动稳定系统，各种导弹的自动导引系统，卫星与宇航工具的自动驾驶系统等等。

随动系统之所以被广泛应用，是因为它在一定程度上能按照人们的愿望去完成所要求的控制规律。它能完成人们无法直接参与的控制任务，并能达到人们直接控制无法达到的快速性与高精度。所以，在四化建设中广泛采用随动系统，既省人力，又提高了效率，提高了工作质量。

随动系统的基本职能是对信号进行功率放大，保证有足够能量推动负载（被控对象）按输入信号的规律运动（即输出），并使输入与输出之间的偏差不超出允许的误差范围。

另外，某些随动系统还必须完成一定距离的自动跟踪任务。例如，高射炮随动系统就是一例，系统的控制信号源在指挥仪内，高射炮阵地的一台指挥仪要同时指挥6门（或8门）高射炮自动跟踪敌机（见图1-1-1），指挥仪与各门炮之间的距离有百米之远。

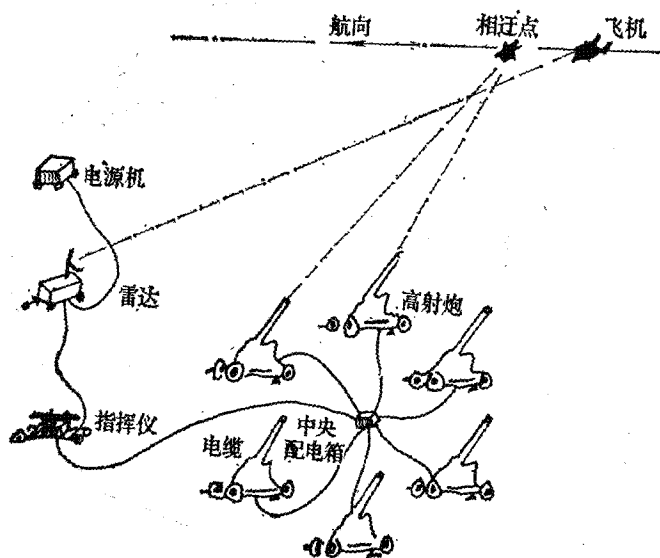


图1-1-1 高射炮防空体系示意图

§1-2 随动系统的基本结构形式

按误差控制的随动系统的基本结构形式可用图1-2-1来表示，从图中可以看出，整个系统由误差测量装置、信号放

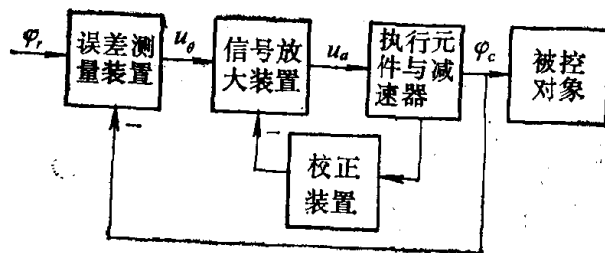


图1-2-1 随动系统结构图

大装置、执行元件、校正装置等部分组成。图中 φ_r 表示系统的输入信号（又称参考输入）， φ_c 表示系统的输出。系统的误差 θ 为

$$\theta = \varphi_r - \varphi_c$$

误差测量装置又称比较元件或敏感元件，它的作用是将系统的输入 φ_r 与输出 φ_c 之间的差值 θ 随时测量出来，并将误差信号 θ 转换成电信号 u_θ ，送入放大装置。放大装置将误差电压 u_θ ，进行必要的变换与功率放大之后，驱动执行元件，使执行元件通过减速器（若执行元件用力矩电机，则可省去减速器）拖动被控对象，按照输入信号 φ_r 的规律运动。校正装置的作用是补偿系统中存在的电磁与机电惯性所引起的滞后作用，使系统的输出信号 φ_c 能瞬时跟随输入信号 φ_r 的变化，以满足系统的动态品质要求。

按误差控制的随动系统具有良好的抗干扰性能。当系统受到外部干扰，使输出量 φ_c 偏离输入量 φ_r 时，通过负反馈作用，使误差测量装置输出误差电压，执行元件推动被控对象回到与输入相对应的位置，即将系统输出量 φ_c 自动调整到

允许的误差范围之内。这是按误差控制（又称反馈控制）的极大优点。其缺点是负反馈削弱了系统的放大系数，降低了系统的快速性，且系统精度的进一步提高，受到这种结构形式的制约，因为提高精度需要增大系统开环放大系数和增加积分环节，这又危及了系统的稳定性。如果按系统误差及输入信号的一阶或一阶与二阶微分来控制系统，则可大大提高系统的精度与快速性，而又不影响系统的稳定性，保留了单纯按误差控制的全部优点。这种随动系统称为复合控制系统，其结构图如图1-2-2所示。这种复合控制系统将在第六章专门讨论。

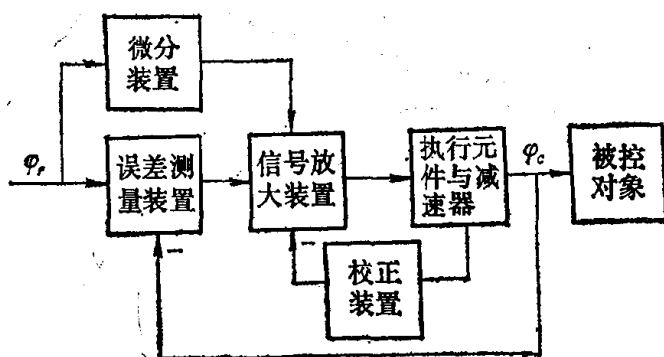


图1-2-2 复合控制系统结构图

§1-3 随动系统的分类

随着科学技术的不断发展，组成随动系统的新型元件不断出现，随动系统的具体结构形式日益多种多样，随动系统的类型也日益繁多。

按不同方法分类，则得到不同名称的随动系统。常用的分类方法有以下几种：

1. 按系统控制方式分类，则有

① 误差控制的随动系统。它的特点是系统运动的快慢取决于误差信号的大小。当系统的误差信号为零时（即系统输出量与输入量完全相等），系统便处于静止。

② 复合控制系统，即按输入信号微分和系统误差综合控制的系统。它的特点是系统的运动取决于输入信号的变化率（包括输入速度和加速度）和系统误差信号的综合作用。

2. 按组成系统元件的物理性质分类，则有

① 电气随动系统。组成系统的元件除机械部件外，均是电磁或电子元件。由于执行元件有交流伺服电机与直流伺服电机之分，所以又将电气随动系统分为两类，即

(a) 直流随动系统，系统的执行元件是直流伺服电机。

(b) 交流随动系统。系统的执行元件是交流伺服电机。（由于交流系统校正网路的设计计算相对直流系统有很大差异，所以在本书第七章专门讨论交流随动系统）。

② 电气—液压随动系统。系统的误差测量装置与前级放大部分是电气的，而系统的功率放大与执行元件则是液压的。后面 § 1-5 中图 1-5-2 是电气—液压随动系统的一种结构形式。

③ 电气—气动随动系统。系统的误差测量与前级放大部分是电气的，而执行元件是气动的。

3. 按系统信号特点分类, 则有

① 连续随动系统。系统中传递的电信号是连续的, 而不是离散的。

② 数字随动系统。系统中传递的电信号有离散的脉冲数字信号。当然, 数字信号还得变成模拟信号去驱动执行元件。所以, 这种系统中必须有模—数(A/D)、数—模(D/A)转换器。系统的运动是靠数字量来控制。

③ 脉冲—相位随动系统, 又称锁相随动系统。这种系统的特点是输入信号为指令正弦脉冲, 输出也转换成方波脉冲, 按输入与输出方波脉冲之相位差来控制系统的运动。本书§9-5中, 简要介绍了这种脉冲—相位随动系统的基本原理。

4. 按系统部件输入—输出特性的不同, 分为

① 线性随动系统, 系统各部件的输入—输出特性在正常工作范围内均是线性关系。

② 非线性随动系统。系统中含有输入—输出特性是非线性的部件。

严格的讲, 任何一个实际的随动系统都是非线性的, 不可能存在那种理想的线性系统, 因为组成系统的某些元部件总是存在较小的不灵敏区(或称死区), 并有饱和界限。但只要不灵敏区处在系统允许误差范围之内, 而且系统正常工作时, 没有进入饱和界限, 则称该系统是线性系统。只有系统在正常工作时, 其元部件的输入—输出特性存在非线性关系时, 才称该系统为非线性系统。