

目 录

第一章 自动控制基本知识

§ 1—0 引 言	1—1
§ 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、一阶系统的动态特性	2—77
二、二阶系统的动态特性	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

第四章 自动控制系统的设计

本章提要

通过对一些典型系统的分析，说明如何应用自动控制的基本理论和分析方法设计和建造自动控制系统的，着重于动态校正。这只是设计工作的一部分，至于实验调整的问题将在第六章讨论。

设计方法灵活多样，不能生搬硬套。设计人员应特别注意与工农兵相结合和“实事求是”“群众路线”的方法。学习本章的重点应放在掌握考虑问题的原则以及分析问题的方法。

§ 4.0 设计的一般步骤

设计制造一个自动控制系统，从任务的提出，经研制、定型生产，到交付使用，须经过实践——理论——实践多次反复的过程，不可能规定一个死板的到处运用的程序。这里只是粗略的介紹自动控制系统设计的一般步骤。

自动控制系统的设计，通常经过如下步骤：

一、方案选择和初步设计：从调查研究、分析设计任务开始，根据对系统提出的要求，确定初步方案，选择无部件（如测量元件、执行元件等应尽量选用标准件或定型产品，如都不能满足时，提出指标要求，联系协作试验制了，）拟订信号放大变换环节的方案和原理线路。经过初步的分析讨论，确定系统的放大倍数，选择校正装置，以保证满足性能指标的要求。

二、线路制作和系统实验、根据确定方案和原理线路，

建造实验模型，其中主要是信号变换放大线路的设计和调试。在完成线路制作后，接成系统，进行系统调试。并按照实验的结果调整系统的参数（如放大倍数，校正装置的参数等），在调试过程中，将出现在初步设计中予想不到的情况和问题，首先是要仔细观察所出现的现象，进行分析研究，逐个地排除故障，加以克服。毛主席说：“许多时候须反复失败过多次，才能纠正错误的认识，才能到达于和客观过程的规律性相符合，因而才能够变主观的东西为客观的东西，即在实践中得到预想的结果。”根据实践的结果，对原定方案进行局部的甚至全部修改，使之满足设计任务的要求。

对于小功率随动系统，由于制作实验模型比较容易。与大功率系统比较，在调试过程中损坏设备的危险性相对地要小。因此，往往无须事先进行过多的理论计算，不少问题可以在实验过程中加以解决。所以，实验调试是整个设计试制过程中十分重要的一步。

对于某些自动控制系统，或者由于建造实际系统的费用太大，或因其他客观条件的限制，（如整个惯性导航系统，飞机的自动驾驶仪等），在作系统实验调试之前，还需作模拟试验或局部模拟试验（第七章）的工作，在具有相当把握的时候，再作系统实验。这一步工作，有时也叫原理实验。

三 样机生产：在原理实验的基础上，考虑到实际的工艺结构、安装、使用、维修等条件，进行样机生产，通过实验、调整和鉴定，当性能指标基本满足设计指标和使用要求后，投入试运行。

通过实际使用的考验和多次的反复修改，才能最后定型生产交付使用。

应该特别注意，自动控制系统的的设计和试制过程，一个十分重要的特点是：理论的分析计算和实验研究是紧密结合的，而不是截然分开的，在实际工作中往往互相交叉，互相补充。在初步设计中为了取得原始数据往往需要进行部件实验，而初步设计的参数又作为实验的参考并在实验中验证和修改；实验调试中发现了新的问题，也要作理论的分析计算。通过实践——理论——实践的多次反复过程，使主观认识符合客观规律，使所设计的系统满足工程实际的需要。

§ 4 · 1 方案选择

在介绍了系统的工作要求，确定了性能指标以后，就可以选择系统方案了。这是决定系统结构的全局，影响系统技术经济指标好坏的十分重要的一步，要考虑许多因素：如任务的政治意义、党的方针政策、经济效果以及实现可能性等等。首先要破除迷信，解放思想，充分发挥群众的智慧，大胆提出各种可能的方案，然后经过反复比较，多方讨论，才能最后确定。有时甚至对不同方案作了部分试验以后才能确定。方案选择是一个问题涉及面广、比较复杂的工作，这里只从技术性能指标的角度叙述方案选择的一些问题。

方案选择应包括采用什么控制原理和方法实现自动控制的问题，例如反馈控制，复合控制、开环控制等，本课程主要研究反馈控制的问题，因此方案选择就是指反馈控制的原理确定之后对执行环节，放大环节，测量环节的方案和具体元件的选择问题。在这些环节中一般首先确定执行环节的方案，因为执行环节对系统的性能影响最

大，而且执行环节也影响放大，测量环节方案的选择，例如选择了交流电动机作为执行机构时，功率放大元件也只能是交流功率放大器了。对前置放大器的选择也有影响。

对于电的随动系统来说，最常用的执行元件有交流两相电动机和直流电动机。（习惯上，根据执行电机类型的不同，分为交流随动系统和直流随动系统两大类）。它们的特点如下：

交流两相电机的优点：(1)工作可靠，(2)静摩擦力矩小，(3)无火花干扰不会影响其它电子仪器的工作；（以上三项主要是由于它没有整流子和电刷带来的），(4)采用交流放大器，较直流放大器制作容易，工作稳定。它的缺点是(1)机械特性明显非线性，动态校正较困难。(2)体积重量大。（与相同功率的直流电机比较）(3)效率低，此外，这类电机的功率一般较小，在几瓦到几十瓦的范围内。

直流电动机的优点是：(1)机械特性好，接近线性，动态校正容易。(2)激磁电路简单，尤其采用永磁式直流电机时，不要激磁，更为简单。(3)体积重量小，(4)效率较高。(5)功率不受限制，可以做得很大。但由于直流电机的电枢电流需用整流子和电刷换向，带来了如下缺点：工作可靠性降低，静摩擦力矩加大，有换向火花时，对电子仪器有干扰。此外，采用直流放大器时，制作较困难，稳定性差。为了克服整流子换向所带来的缺点，已制造出用晶体管电路换向的所谓无整流子直流电机。但还没有推广，只在特殊的情况下采用。

如上所述，两种执行电机各有其特点，在随动系统中都有应用。一般在可靠性要求高的小功率随动系统中，例如介算仪的方位随动系统就有用交流随动系统。而对于要求动态性能好的 LZ-3 型多

笔函数记录仪，在按装笔架的横梁上，最多要按装四个电机，以带动四个笔架，对于X轴系统来说，横梁重量越小越好，否则动态性能就变坏。因此按装在横梁上的y轴电机的重量要轻，体积要小，就成为拟定系统方案的决定性因素。可供选择的伺服——测速机组（电动机轴上装有测速发电机的）有ND-f-09（交流）和20SCY（直流），主要性能比较如下：

型 号	功 率	重 量	尺 寸	机电时间常数
20SCY	1.5瓦(额定)	100克	∅20	≤ 30 毫秒
ND-f-09	2.3瓦(最大)	700克	∅53×104	40 毫秒

由此可见，两种电机的功率基本相同，但20SCY的重量体积和机电时间常数都较ND-f-09为小，所以宜采用直流方案了。事实上，LZ-3是从LZ-2型X-y记录仪发展而来的（后者采用交流系统方案）性能指标有所提高。

对于功率100瓦以上的电的随动系统，由于交流两相电机制造上困难，一般都用直流执行电机。

近年来已设计制造了一种叫力矩电机（或力矩马达）的新型执行元件，它是一种低转速大转矩电机，其工作原理与一般电机相同，只是极对数较多，直径较大，长度较短而已。例如北京微电机厂生产的SYL-15型直流力矩电机，其主要技术数据如下：控制电压24伏，空载最大转速约349转/分，最大堵转力矩15000克·厘米（-5%波动），最大堵转峰值电流2.35安。可见其转速为一般电机的几分之一，而力矩大许多倍。正是由于这个特点，它可

以直接拖动负载而无需减速器，尤其对于稳定平台等工作速度很低的系统，如用一般电机作为执行电机，需要一个减速比很大的减速器，使系统结构复杂，对于高精度随动系统，要求减速器的精度也很高，这在制造工艺上也是很困难的。

§ 4.2 元部件的选择：

控制方案选定之后，就要着手选择各个环节的元部件和画出原理线路图。选择元件时应尽量选用标准的系列产品，当系列产品不能满足要求时，须自行设计或提出订货要求，进行协作试制。

一、执行电机

选择执行电机必须根据已确定的主要参数来选择，例如功率、控制电压，额定（或空载）转速，电源频率（对交流电机来说）等。其中电机功率尤为重要。功率的大小有时可以根据负载力矩和最大速度来估计，但对于随动系统来说大多数情况是参考现有类似系统的功率大小来选择。例如 LZ—3 函数记录仪中执行电机，Y轴取 1.5 瓦，X轴取 3 瓦，是参考 X—y 记录仪中执行电机的最大输出功率为 2.3 瓦速择的。型号是 20SCY（Y轴）和 24SCY（X轴），它们的技术数据是

型 号	功率 (瓦)	控制电压 (伏)	额 定 转 速 (转/分)	额 定 力 矩 克厘米	起 动 电 压 (伏)	额 定 电 流 (毫安)
24SCY	3	13	5000 ±300	60	<1	300
24SCY	1.5	12	5000 ±300	30	<1	

根据系统工作的特点，还应参考其他因素，例如体积重量，机电时间常数等，如要求跟踪速度高的快速系统，应在功率满足的要求下，选择机电时间常数小的电机，如交流两相电机中，杯形转子电机的时间常数较鼠笼转子的小。

力矩电机主要根据堵转力矩的大小选择的。

三 减速器

(一)为什么需要减速器

在随动系统中，除了采用力矩马达作为直接传动的情况之外，一般都用高转速，小转矩电动机作为执行机构，而负载通常都要求低转速，大转矩，所以在执行机构到负载之间需要引入减速器以达到两者匹配的目的。有时为了改变比例尺，如双速系统中从输出轴到测量轴之间也需要齿轮传动。其他如实现机械量的相加或相减，要用差动齿轮、在工程上，用作减速器的有正齿轮，斜齿轮，伞齿轮，差动齿轮、蜗杆等，其中以正齿轮用得最多。

(二)减速器速比的选择

速比究竟选择多大为好，这主要是根据对系统的性能指标的要求来选定的。随动系统应用的地方很广，要求也各不相同，速比的选择要遵循“对于具体情况作具体分析”的原则，予以确定。在小功率随动系统中，突出的要求往往在系统的快速性和高精度方面，所以我们主要研究满足这方面要求的最佳传动比。

(1)按获得最大加速度选择速比

设电动机的转动惯量为 J_d ，力矩为 M_d ，负载的转动惯量为 J_f ，力矩为 M_f ，转速为 ω_f ，齿轮的减速比为 Z ，效率为 η

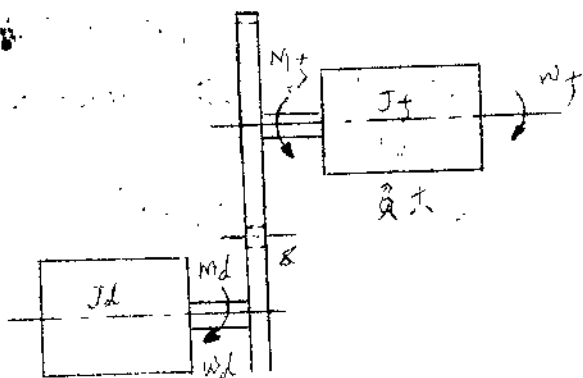


图 4-1 速比的选择

先列出负载的运动方程（力矩平衡方程）：

$$\eta Z M_d - M_f = (\eta Z^2 J_d + J_f) \dot{\omega}_f$$

由此可得加速度为

$$\dot{\omega}_f = \frac{\eta Z M_d - M_f}{\eta Z^2 J_d + J_f} \quad (4-1)$$

为了得到最大输出加速度，令

$$\frac{d \dot{\omega}_f}{d Z} = 0$$

得到最佳速比 Z_0 ：

$$Z_0 = \frac{M_f}{\eta M_d} + \sqrt{\left(\frac{M_f}{\eta M_d}\right)^2 + \frac{J_f}{\eta J_d}} \quad (4-2)$$

当负载力矩 M_f 很小，可以略去时，

$$Z_0 = \sqrt{\frac{J_f}{\eta J_d}} \quad (4-3)$$

这时负载的最大加速度值为

$$\omega_{max} = \frac{M_d}{2J_d Z_0} \quad (4-4)$$

为了满足加速度的要求， ω_{max} 应大于给定值。

在电路中，为了使功率放大器能达到最大输出功率，需要通过变压器与负载阻抗匹配；在机械传动中，为了使负载能获得最大加速度，需要用减速器来匹配。因此减速器起了机械匹配的作用。

(2)按最小稳态误差来确定最佳速比：

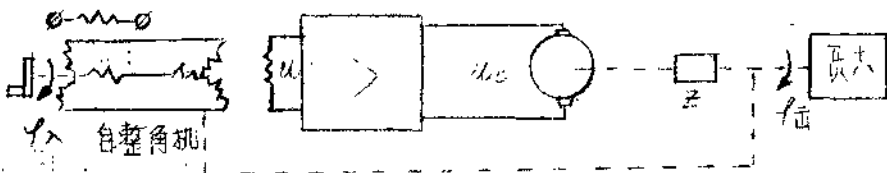


图 4-2 小功率随动系统原理图

图 4-2 是一个简单的小功率随动系统。误差角 $\vartheta = \varphi \lambda - \varphi$ 出。自整角机的误差信号经晶体管放大器放大后输出的控制电压 u_c 。

$$u_c = K_1 K_2 \vartheta$$

其中 K_1 为自整角机比例系数。

K_2 为放大器的放大倍数。

当系统处于稳态时，电动机的电磁力矩与负载力矩平衡：

$$K_M (u_c - K_e \omega_f Z) = \frac{M_f}{Z \eta} + M_c$$

$$\text{即：} \quad K_M K_1 K_2 Z \eta \vartheta - K_M K_e Z^2 \eta \omega_f = M_f + M_c Z \eta$$

其中 K_M ——电动机起动转矩与控制电压系数；

K_e ——电动机反电势与转速的比例系数

ω_f ——负载转速

M_f ——负载力矩

M_c ——电动机的摩擦力矩

$K_e \omega_f Z$ ——电动机的反电势

由此可得系统的稳态误差 ϑ 为

$$\vartheta = \frac{M_f + M_c Z \eta}{Z \eta K_M K_1 K_2} + \frac{Z K_M K_e \omega_f}{K_M K_1 K_2} \quad (4-5)$$

由此可见，稳态误差角 ϑ 由负载力矩引起的静态误差和负载转速引起的速度误差两部分组成。当增加速比 Z 时，可使静态误差减小，但速度误差却增加，因此可以选择一个最佳速比 Z_0 ，使系统

的稳态误差为最小。

令

$$\frac{d\vartheta}{dz} = 0 \quad \text{即得：}$$

$$\frac{-M_f}{K_M K_1 K_2 Z^2 \eta} + \frac{K_e \omega_f}{K_1 K_2} = 0$$

$$\text{化简得：} \quad -M_f + K_M K_e Z^2 \eta \omega_f = 0$$

所以最佳速比 Z_0 为

$$Z_0 = \sqrt{\frac{M_f}{K_M K_e \eta \omega_f}} \quad (4-6)$$

这种最佳速比，适用于系统经常处于等速运动的状态，並在这种速度下，要求稳定误差为最小；而前者运用于系统经常处于激烈变化，並有很大加速度的情况。应该指出：对于同一个系统，按照不同的指标，计算所得的最佳速比 Z_0 是不一定相等的。这时应根据抓主要矛盾的原则，按系统的主要指标要求来选择。

按照某一个指标为最佳，选择速比的方法很多，这里只例举了两种，学习时主要掌握处理问题的方法，举一反三；在选择速比时，对情况作具体分析，适当处理。

有时，生产上还提出负载应达到某一最大转速 ω_{fM} 的要求，则速比应满足：

$$Z \leq \frac{\omega_{dH}}{\omega_{fM}} \quad (4-7)$$

式中 ω_{dH} 为电动机额定转速。

(三) 自动控制系统对齿轮传动部分的要求。传动部分的质量对控制系统的质量有什么影响，自动控制系统对齿轮传动部分有什么要求呢？

(1) 转动惯量要小

在随动系统中，执行机构的时间常数往往是系统中最大的，它对系统品质的影响最大，而执行机构的时间常数与电机轴上的转动惯量（包括负载和齿轮折算到电机轴上）成正比。在小功率随动系统中，电机和负载的转动惯量都并不大，减速器的转动惯量占了一定的比重，为了减少执行机构的时间常数，就尽量减少减速器的转动惯量。其办法很多，如采用轻质材料，改进结构等。在速比选定之后合理选择齿轮对数和合理分配各对齿轮的速比也是一个重要方法（参考随动系统方面的有关书籍）。

(2) 传动精度要高

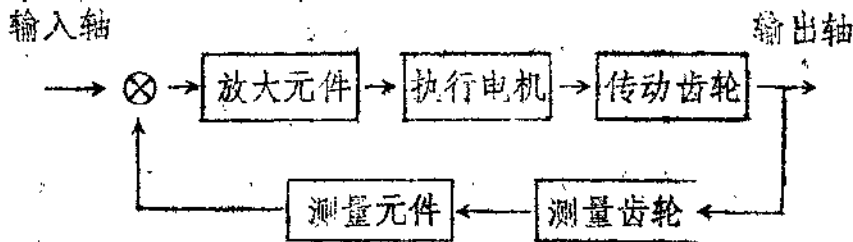


图 4—3 传动齿轮与测量齿轮在系统中的位置

随动系统中的齿轮箱，根据它在系统中的作用，大体可以分为两类：一类是联系电机和输出轴的，叫传动齿轮；另一类是联系输出轴和测量元件的（例双速系统中的升速齿轮）叫测量齿轮。它们在系统中的位置，如图 4—3 所示，传动齿轮处在闭环系统的主通

道内，它的误差可以由系统加以克服，不直接影响系统的精度，可相对地放低要求。而测量齿轮处在反馈通道内，它的误差直接影响系统精度，因此要求高些。在一般小功率随动系统中，传动齿轮的模数通常取 1，0.5 或 0.3，精度达到 7—8 级也就可以了。测量齿轮的模数一般取得比较小，精度要求则更高。齿轮传动的精度，一方面固然靠加工精度以保证；另一方面，有时甚至是主要的，还要靠准确的接装和调整。

(3) 摩擦和齿隙要小

摩擦力矩带来系统的静态误差；齿轮间隙则容易引起系统自激振荡（在非线性中讨论）因此要求减少摩擦和齿隙。在多级传动中，前级齿轮靠近电机轴，其摩擦力矩的影响最大，后级影响相对较小，因为折算到电机轴上时要除以速比。而齿隙对系统的影响却相反，前级小，后级大，这是因为间隙折合到电机轴要乘以速比的关系。所以，在安装齿轮时，通常使前级啮合得松些，后级啮合得紧些。为了便于调整，后级齿轮对的中心距离最好是做或可调的，在系统调试过程中，适当调整，使之满足系统要求。安装时对各传动轴的平行度有一定要求，否则由于轴的偏心造成啮合不良，既加大了摩擦和间隙，又增加磨损降低齿轮寿命。有时为了消除传动间隙的影响，还可采取某些特殊措施，如采用双片齿轮等。

三 放大元件

信号放大元件用来放大误差电压，使系统具有足够的电压放大倍数和足够的输出功率，以控制执行电机的工作。一般包括前置放大器和功率放大器两部分。前置放大器主要放大电压，要求有足够的电压放大倍数和幅度；功率放大器主要放大功率，使之有足够的

输出功率。

(一)功率放大器

用作功率放大器的，在小功率随动系统中有晶体管放大器，电子管放大器和磁放大器等。晶体管放大器优点较多；（主要是可靠耐用，体积小，重量轻，惯性小，无需预热可瞬时投入工作等）应用广泛。磁放大器虽然也较可靠，过载能力强，但由于制造工艺复杂，重量重，时间常数大，目前也已少用。在较老的自动控制系统中电子管放大器用得较多，但它有体积大，怕振动，寿命短，要预热不能瞬时投入工作等缺点，现在逐渐被晶体管所代替。在大功率放大器中，有发电机，交磁放大机和可控制硅放大器等。发电机，交磁放大机在老的控制系统中用得较多，从发展的趋势看，也将被可控硅代替。

自动控制系统对功率放大器提出哪些要求呢？以直流随动系统为例，主要有二大要求：

(1)足够的功率，对具体的系统来说，应具有足够的输出电压和输出电流（都应大于执行电机的额定值），并具有较大的过载能力，随动系统在工作时，执行电机的瞬时最大电流可达额定的2~3倍，甚至更高，否则将可能损坏放大器和影响系统工作速度。如LZ-3记录仪的X轴电执行电机，额定电压为18V，额定电流为300mA，所选用的功率放大器如图4—4所示。这是一种对称桥式直流功率放大器电路，输入信号通过A B两端输入，其中只能一个为负电压（由前置差放级保证），BG1，BG2工作于射极跟随状态，BG3，BG4工作于开关状态。当A端为负电压，BG1工作于射极跟随状态，BG3由BG1发射极通过1K电阻打开，使之工作于饱和状态，