

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	2-100
(霍尔维茨判据)	

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

第五章 自动控制系统中的非线性问题

本章提要

实际的自动控制系统中总是程度不同的存在非线性的。本章将扼要讨论两方面的内容：一是就小功率随动系统中常见的几种非线性因素，定性地分析其对系统运动的影响；二是介绍一类非线性控制方式，它比之前面讨论过的线性控制，常常可以获得更好的工作品质。

§ 5.1 为什么要研究非线性问题

实际系统总是或多或少带有非线性的

前面各章，我们所研究的，都是限于线性系统。但是，严格地说，任何一个实际的控制系统，由于其组成元件总是或多或少的带有非线性的特性，因此都是属于非线性系统的范畴。理想的线性系统，实际上是不存在的。

就以我们在前面各章的分析中常常举例的方位角解算随动系统来说，它就不能严格的算成一个线性系统。其测量元件旋转变压器，由于制造上不可能做到绝对完善，常常存在不灵敏区（图 5.1a）其放大元件电子放大器，由于它的组成元件（如晶体管、组件等）只有一定的线性工作区，因此往往只有在一定的范围内其输出电压和输入电压之间才有线性的关系，超出了这个线性范围放大器的特性上就出现了饱和现象（图 5.1b）；其减速装置，由于齿轮加工和装配上的缺陷，使得在传动中存在间隙（图 5.1c）；而执行电

机交流两相异步机，除了同样存在控制特性上的不灵敏区外，由实验研究表明，它的时间常数也并不是一个常数，而且随着控制电压的极性和大小的不同而变化的（图 5.1a）。类似的现象，还广泛存在于各种实际的自动控制系统中，如摩擦的非线性、磁性非线性等，都是常常遇到的非线性因素。

由此表明，实际的控制系统无疑都是非线性系统，所谓线性系统仅仅是实际系统在忽略了次要非线性因素后的理想化模型。这样，在前几章讨论了线性系统的分析以后，就有必要进一步来讨论实际存在的这些非线性因素对系统运动的影响。

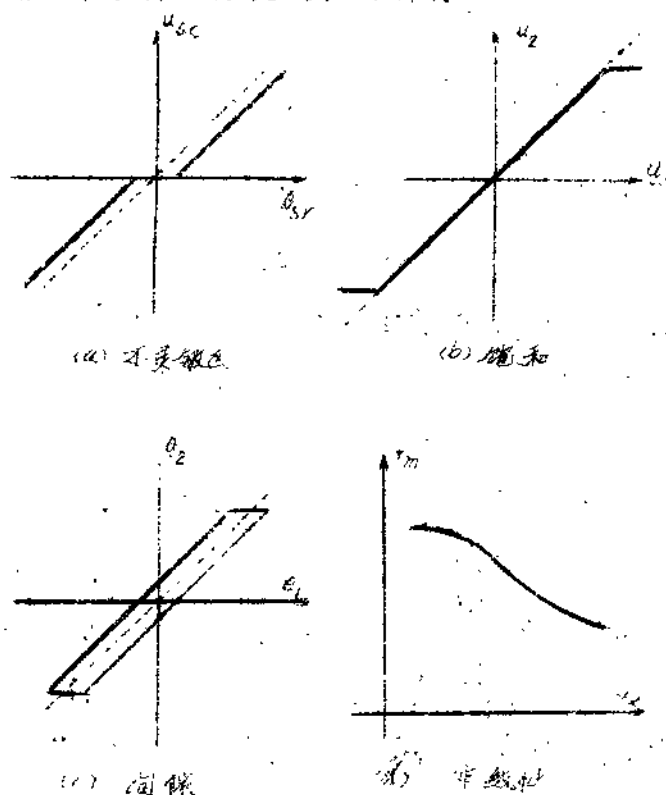


图 5.1

为了改善工作品质有时还要在系统中专门引入非线性部件

除了上面指出的实际系统总是或多或少的存在非线性因素外，有时为了达到改善系统工作品质的目的，如减少因为间隙引起的静态误差，提高系统运动的快速性等，还常常故意在系统中引入非线性部件。比较起来，前面一节中所指出的这种情况是属于主流为线性控制的系统，非线性因素只是支流性的东西，分析的目的在于弄清它对系统运动的影响，想办法减小或消除其中有害的影响；而这里所指出的情况，主流是非线性控制，它是属于利用有益的非线性特性来达到提高系统品质的类型。

通常，在自动控制系统中采用的非线性部件主要为具有继电型特性的元件，它是电磁继电器、电子继电器、磁性继电器、气动继电器等一类元件的名称。现在，我们以电磁继电器为例，来说明这类非线性特性的特点。说明电磁继电器工作原理的示意图如图 5.2(a) 所示，衔铁的运动由通入线圈的电流 i_B 来控制，衔铁的运动将带动其触点的相应动作（断开或闭合），此处触点被用来控制（接通或切断）加于电动机的电枢电压 u 。当正向线圈中通入激磁电流 i_B 时，就在铁芯中产生磁通。并且，在 i_B 较小时，由于磁力小于弹簧的反作用力，衔铁不动，正向触点保持原来的断开状态，电源电压 U 。加不到电动机的电枢端上， $u = 0$ ；而当 i_B 增加到某一数值 i_{B1} （ i_{B1} 叫吸合电流）时，磁力克服弹簧反作用力使衔铁吸合，同时带动正向触点使之变为闭合状态，从而 U 。加入到电动机的电枢端， $u = U$ ；此后，若继续再增加 i_B ，由于磁力始终大于弹簧反作用力，正向触点继续保持闭合状态，始终有 $u = U$ 。现若减少电流 i_B ，那么由于衔铁在吸合后比之吸合前磁阻要小得多，所以当 i_B 减小到等于 i_{B1} 时，磁力仍然大于弹簧反作用力，只有当 i_B 进一步减小到 i_{B2} （ i_{B2}

叫做释放电流)时,磁力不再能克服弹簧反使用力而使衔铁释放并断开触点,从而使电动机电枢电压 u 由 U_0 变成为零;当 i_b 进一步减小时, u 的数值将继续保持为零。类似地,当电流 i_b 是加入到反向线圈中时,也将有类同的过程。这就表明,对于继电型元件来说,其输入电流 i_b 和所控制的输出电压 u 之间不是简单的线性关系,而是具有图5.2(b)所示的非线性特性。在有些情况下,释放电流 i_{b0} 和吸合电流 i_{b1} 的数值相差不大,这时可不考虑继电特性的滞环,而将其简化成图5.2(c)所示的形状。

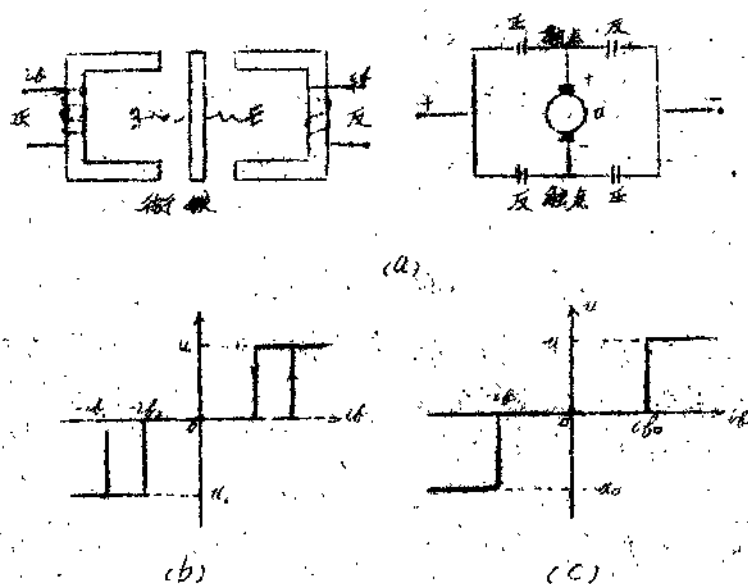


图 5.2

不难看出,图5.2所示的继电特性,是和图5.1所列举的那些非线性特性,有着本质的差别。前一节所指出的那些非线性因素,一般都可允许近似成一个线性化特性来处理,因此是非本质非线性

元件；而继电特性，原则上不允许直接通过线性化近似成为一个线性特性，通常称之为本质非线性特性。显然，对于包含本质非线性特性的控制系统，其分析方法和运动规律将和线性系统有着原则的区别，因此将不能直接按前几章中对线性控制的讨论所指出的那样来分析和综合。

非线性系统和线性系统有着不同的运动规律和分析方法

研究非线性问题的必要性，还在于非线性系统在运动规律和分析方法上与线性系统有着许多本质上不相同的地方。因此，一般来说，将不允许直接搬用前面对线性控制系统指出的结论和方法，来分析和研究非线性系统。

前面已经指出过，对于线性系统，描述其运动状态的数学模型，是线性的微分方程；线性系统的这个特性，使其具有满足“叠加原理”的特性。而对于非线性系统，其数学模型为非线性微分方程；因此，在非析非线性系统时，叠加原理将是不适用的。两类系统在运动规律和分析方法上的区别正是由其特性上的这种区别所决定的：

(1) 和线性系统不同，非线性系统运动的稳定性，除了和系统的结构形式及参数大小有关以外，还和其起始状态有关。在线性系统中，系统的稳定性完全取决于其特征方程根（即传递函数极点）的分布，也即只取决于系统的结构和参数，而和起始条件无关。而在非线性系统中却往往并非如此，对于同一结构和参数的系统，在不同的起始条件下，运动过程的最终状态将是不一样的。有可能起

始条件在较小区域内时，系统是稳定的，当起始条件进入较大区域内时，系统就变成了不稳定，即小范围稳定大范围不稳定。当然，也可能是反过来的情况，小范围不稳定大范围稳定。总之，对于线性系统而言，它的稳定是绝对稳定；而对于非线性系统，则是条件稳定。

(2) 和线性系统不同，非线性系统运动的稳态过程，将不一定和输入量具有相同的函数结构。在线性系统中，当输入是正弦函数时，输出稳态过程也是同频率的正弦函数，两者仅在幅值与相位上有不同。因此，利用这一特点，将可采用频率特性来表示系统固有的特性。而在非线性系统中，情况就不是这样，输入为正弦函数，但输出稳态过程中除了包含这一频率的正弦分量外，还常常包含高次谐波分量。所以，对于非线性系统，一般来说将不能直接引入频率特性这一分析工具。

(3) 和线性系统不同，非线性系统运动的过渡过程，往往还随着输入量幅值和起始条件的不同而具有不同的变化形式。如大家所已经知道的，在线性系统中，输入量幅值和起始条件的不同，只引起输出量在量上的变化，不会在质上影响输出量的变化形式。而非线性系统中往往会出现这样的情况，当输入幅值和起始条件不同时，输出过程不仅在量上而且在质上也是不同的。例如，当幅值和起始条件较小时，输出过程是非周期性的单调衰减过程，而当幅值和起始条件较大时，输出过程将是衰减振荡的过程。甚至还可能出现这样的情况，即系统输出将过渡到不衰减的等幅振荡，其频率和振幅与输入量的幅值或系统起始条件有关；这种现象是非线性系统中所特有的，通常称之为自持振荡。

(4) 由于以上的区别 使得非线性系统和线性系统在分析方法上具有很大的不同。象在前面几章中指出过的那样，在线性系统中，一般可采用传递函数、频率特性等分析工具很方便地对系统进行分析 and 综合。而且，由于线性系统的输出运动状态和输入幅值的大小及起始条件的不同无关，所以通常是在典型输入函数（如单位跳跃函数 $1(t)$ 等）和零起始条件下来进行研究的。而在非线性系统中，情况就要复杂得多，到目前为止，还缺乏象线性系统研究中所采用的那样比较成熟比较有普遍意义的方法。一般来说，在工程计算中，对于非本质非线性常常采用直接线性化的方法进行处理，然后在线性分析结果基础上加以修正；而对于本质非线性系统，则采用分段线性化或其它更复杂一些的方法。需要指出的是，在非线性的分析中，模拟实验法往往可以取得更好的结果，因此也是当前采用较为普遍的一种方法。

下面，我们就分别来分析小功率随动系统中非线性因素对其运动的影响，以及包含有非线性部件的控制系统

§ 5.2 几种常见的非线性因素对随动系统运动特性的影响

饱和

饱和特性是随动系统中最常见的一种非线性因素。几乎在各类放大器中，都存在饱和现象。除此之外，执行机的功率限制，也同样是一种饱和现象。经过理想化后，饱和特性的典型形状如图 5.1 所示，其中 u_1 为输入量， u_2 为输出量。当输入量处于线性范围 $-\alpha \leq u_1 \leq \alpha$ 时，特性有着线性的关系；当输入量超出了线性范围

$|a_1| > a$ 以后，特性就进入到饱和区。因此，对于包含饱和特性的系统，其线性分析的结果，只是在小信号输入时才是符合实际情况的；而在大信号输入时，必须考虑饱和特性的影响，否则线性分析的结果将和实际情况有着较大的差别。

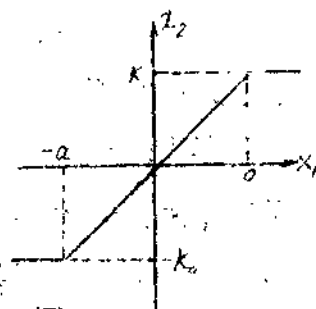
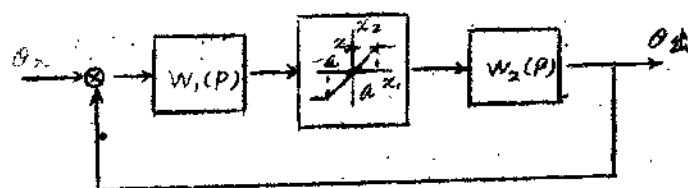


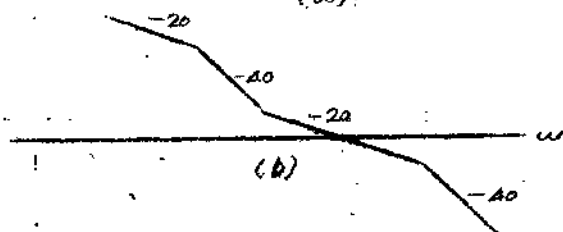
图 5-3

极为粗略地来看，饱和特性的存在，相当于使系统在大信号作用时等效放大倍数的降低。反映到系统的对数频率特性上，这也就是使幅特性沿零分贝线下移，而对于相特性则没有什么影响。例如，图 5.4 (e) 所示的系统，当工作在放大器的线性范围内时，设其对数幅特性为图 5.4 (b) 所示的形式；而当系统工作在大信号输入时，由于放大器特性进入饱和区而引起等效放大倍数下降，从而使对数特性下移成了图 5.4 (c) 所示的形状。容易看出，在这种情况下，特性下移的结果，使系统的剪切频率数值变小，而通过零分贝线的斜率也由 -20 变成 -40 。它反映在系统的动态特性上，也即引起过渡过程时间的增加，动态品质的变坏。对于有的系统，如果饱和状况比较严重，那么甚至将使系统由小信号稳定变成大信号不稳定。当然，也有可能出现使系统动态品质改善的情况，这和系统线性部分的特性形式有关。

由此可见，为了避免系统在大信号作用时由于饱和的影响而使动态品质变坏，应当尽可能使系统具有较大的线性范围，至少应当



(a)



(b)

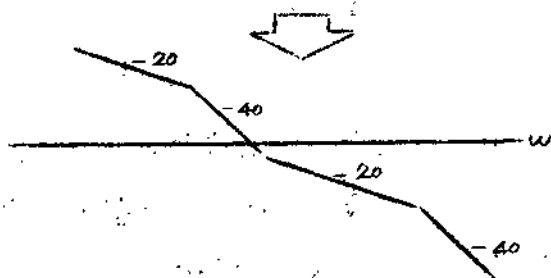


图 5.4

合理地确定各级放大元件的线性范围，十分明显，在分配系统各级放大器的线性区时，总是应当使前级比后级更宽，即前级比后级晚进入饱和，那种前级比后级率先进入饱和的分配方式当然是不合理的。

不 灵 敏 区

不灵敏区又叫作死区，它也是所有随动系统中都包含的非线性因素。通常，死区是由测量元件的不灵敏区、执行机构的死区以及放大器的不灵敏区所造成的。死区的典型形式如图 5.5 所示。

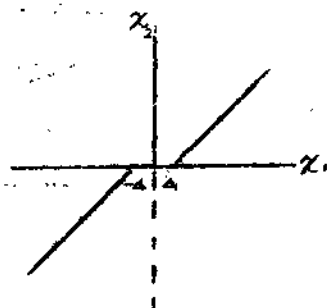


图 5.5

显而易见，死区对系统运动过程所带来的最直接影响是造成静态误差。而且，其中尤以处于系统正向通道最前边的测量元件，它的死区所造成的影响最大。以角速度随动系统为例，如果采用的测量元件

（旋转变压器等）的不灵敏区为 $5'$ ，那么这时系统的静态误差将至少等于 $5'$ 。而放大器和执行机构的情况就好办一些，因为它的死区的不良影响，将可以通过提高系统的放大倍数来予以减少。

除了造成静态误差外，一般地说，对于简单的随动系统，死区并不会影响系统的稳定性。因为，作用于系统的信号幅值小于死区范围时，测量元件将不能测出，因此系统在这时相当于工作在开环状态，这样也就没有稳定性问题了。而且，由于死区的存在，也滤掉了作用于输入端（当无输入信号时）的作小幅度振荡的干扰信号。但是，当系统的输入信号是直线增长函数时，那么死区的存在将造成系统输出在时间上的滞后。

摩 擦

摩擦非线性对于小功率角度随动系统来说是一个很重要的非线性因素。它的影响，从静态方面看，相当于执行机构中引入死区，从而造成系统的静态误差，这一点是与死区的影响相类同的。摩擦非线性对系统运动过程的最主要的影响，是造成系统低速运动的不平滑性，即尽管系统的输入轴作低速平稳旋转，但输出执行轴却是跳动式地跟着旋转的。工程实际中，低速旋转的不平滑跟踪是不希望的，对于火炮或雷达随动系统来说，它将导致不能准确地跟踪目标，甚至有丢失目标的危险。

下面，我们来分析摩擦非线性对系统运动平滑性的影响。考虑到摩擦与系统运动状态间的非线性关系比较复杂，需要作一定的简化才能进行分析，因此将其简化成图 5.6 所示的形式。其中， M_1 为执行轴的静摩擦力矩， M_2 为执行轴的动摩擦力矩， Ω 为执行轴的角速度。

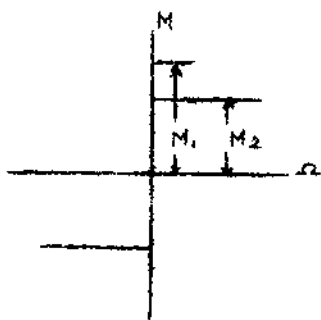


图 5.6

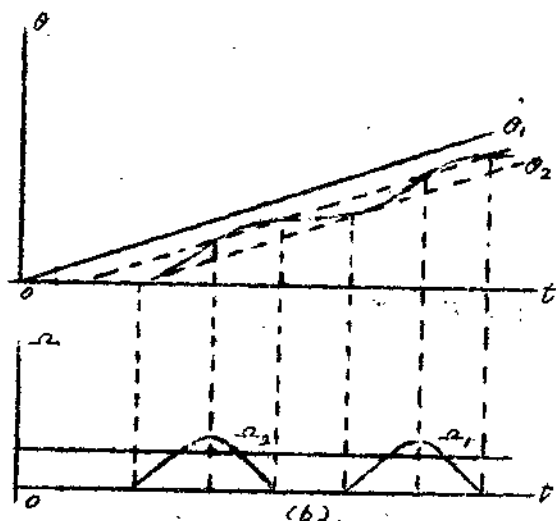


图 5.7

现在令随动系统输入轴以 Ω_1 作等速旋转，也即输入角 θ ，如图 5.7 所示作直线增长变化；这时，由于摩擦力矩的存在，系统输出轴并不是一开始就马上跟着输入轴作等速旋转的。十分明显，只有当由误差角引起的执行机转矩恰好等于静摩擦力矩时，输出轴才开始转动。

为了确定输出轴开始转动的瞬时，根据一般情况，我们假定系统放大级有一个时间常数 T_1 ，即从系统输入端到执行机转矩之间的传递函数为

$$W_m(P) = \frac{K_M}{T_1 P + 1} \quad (5.1)$$

式中， K_M 为系统从误差角到执行机转矩间的放大系数。而对于输出转矩，则有

$$\begin{aligned} M(P) &= W_m(P) \frac{\Omega_1}{P^2} = \frac{K_M \Omega_1}{P^2 (T_1 P + 1)} \\ &= K_M \Omega_1 \left(\frac{1}{P^2} - \frac{T_1}{P} + \frac{T_1}{P + \frac{1}{T_1}} \right) \end{aligned} \quad (5.2)$$

将其变换为原函数，就是

$$M(t) = K_M \Omega_1 \left(t - T_1 (1 - e^{-\frac{t}{T_1}}) \right) \quad (5.3)$$

上式中，指数项的衰减时间比之输出轴从静止到开始转动的时间要短得多，所以可认为到输出轴开始转动的瞬时，这一指数衰减项已

经衰减完毕。这样，上式就可以成为

$$M(t) = K_M \Omega_1 (t - T_1) \quad (5.4)$$

如前所述，当输出轴开始转动时，执行机转矩恰好等于静摩擦转矩，也就是成立如下关系式

$$K_M \Omega_1 (t_1 - T_1) = M_1 \quad (5.5)$$

由此，就可定出输出轴开始转动的时间为

$$t_1 = \frac{M_1}{K_M \Omega_1} + T_1 \quad (5.6)$$

而此瞬时系统已经积累的误差角则是

$$\Delta \theta_2 = \Omega_1 t_1 = \frac{M_1}{K_M} + \Omega_1 T_1 \quad (5.7)$$

对于静摩擦力矩等于动摩擦力矩 M_2 的情况，那么如图 5.7 所示，输出轴将不是在 1 处开始转动，而是在 1' 处开始转动，其相应的开始转动瞬时和此瞬时的系统误差角分别可类似地定出，为

$$t_{1'} = \frac{M_2}{K_M \Omega_1} + T_1 \quad (5.8)$$

和

$$\Delta \theta_{1'} = \Omega_1 t_{1'} = \frac{M_2}{K_M} + \Omega_1 T_1 \quad (5.9)$$

当输出轴开始转动以后，摩擦力矩值一下子由静摩擦力矩 M_1

下降到动摩擦力矩 M_2 。这样，输出轴便以初始加速度 $\frac{M_1 - M_2}{J}$

(J 是执行电机和负载的转动惯量)作加速运动，输出轴的转速开始上升，输出角 θ_2 开始增加，这相当于图5.7中 θ_2 和 Ω_2 从1点开始变化的情况。随着 θ_2 的增加，系统误差角相应地减小，从而引起执行机转矩的减小。如图5.7所示，当 θ_2 上升到2点时由于系统的误差角变到了等于 $\Delta\theta_1$ ，因此执行机转矩由起始时的 M_1 减少到了 M_2 ，从而使输出轴的加速度也由起始时的 $\frac{M_1 - M_2}{J}$ 减少

到零；所以，在点2 Ω_2 具有最大值，即输出轴在此瞬时具有最大速度。在2点以后，输出轴作减速运动， Ω_2 开始减少， θ_2 增长变慢。当变到3点时， Ω_2 等于零，摩擦力矩一下子又由动摩擦力矩 M_2 增加到了静摩擦力矩 M_1 ；这样，又出现了执行机转矩小于静摩擦力矩的情况，所以输出轴停止转动，输出转角 θ_2 停止增加，加图中3点以后的情况。在3点以后，输入转角 θ_1 继续增加，但输出转角 θ_2 不变，因此又造成误差角越来越大；当误差角增加到 $\Delta\theta_2$ 时，也即图中的4点时，执行机转矩再次克服静摩擦力矩 M_1 ，使输出轴又开始转动，从而又开始了新的加速运动。此后，输出轴重复前而已指出的一会儿起动一会儿制动的运动过程，这就使得输出轴不是平滑地跟踪输入轴转动，而是一拱一拱的跳动式地进行跟踪。这种现象就是所谓随动系统运动的不平滑性。

但是，这种运动的不平滑性通常实际上只发生在低速跟踪的时候，而在高速跟踪时这种现象并不突出，这又是什么原因呢？这一点，同样可以从系统的跟踪过程中来得到解释。