

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、一阶系统的时间特性	2—77
二、二阶系统的时间特性	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

第六章 自动控制系统的实验和调整

自动控制系统的实验和调整，主要解决两个方面的问题：

- (一) 为理论分析提供原始依据；
- (二) 将分析设计的结果加以实现和检验。因此，从某种意义上来说，它是系统分析设计的基础和准备，又是系统分析设计的实施和检查，是控制技术研究中的一个十分重要的环节。

一个复杂的系统要达到较高的性能指标，常常依赖于对其中每个环节的精心设计和调整。因此，我们先从系统的元部件测试开始，最后再讲系统的调试。

§ 6—1 系统部件动特性测试

在分析或设计自动控制系统时，必须掌握原始数据，即各个环节的动态特性。在许多情况下，动态特性的理论分析非常困难，两用实验方法来确定较为方便。通常用实验来测得频率特性或过渡特性。

我们知道，利用传递函数分析控制系统较为方便。因此，必须根据实验测得的过渡特性或频率特性，计算传递函数的系数。

一、传递函数系数的测定

当系统（或部件）的结构组成为已知时，它的传递函数的形式是确定的，问题在于传递函数的系数尚待确定。

例如，组成系统的放大器，由于存在着惯性它的传递函数具有一阶形式。直流电动机在略去电磁时间常数时它的传递函数也具有一阶形式；在不略去电磁时间常数时它的传递函数具有二阶形式。

1. 一阶环节(非周期环节)系数的测定
 一阶环节的传递函数一般具有如下形式:

$$W(S) = \frac{K}{TS + 1} \quad (6-1)$$

其中K和T为待定系数,可以根据实验测出的过渡过程曲线来确定。

前面已经讲过,式(6-1)在单位阶跃作用下的过渡过程关系式为:

$$X(t) = K(1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (6-2)$$

由式(6-2)得:

$$\text{当 } t \rightarrow \infty \text{ 时, } X(\infty) = X_{\infty}(t) = K \quad (6-3)$$

$$\text{当 } t = T \text{ 时, } X(T) = 0.632K \quad (6-4)$$

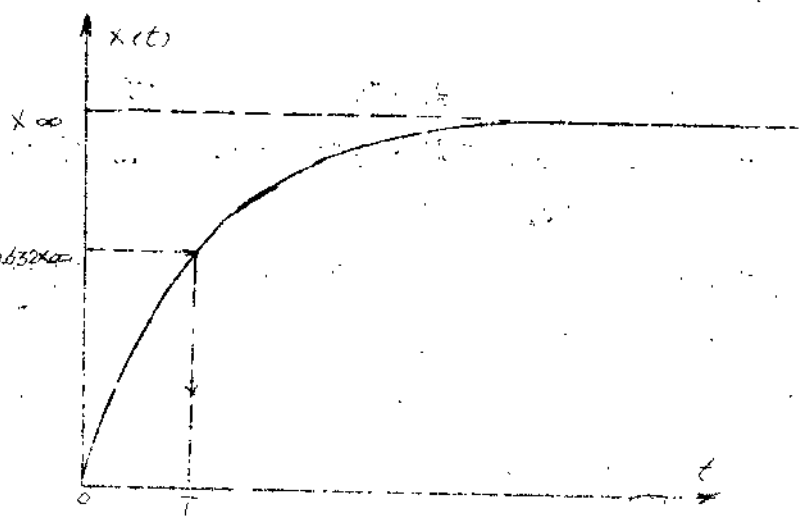


图 6-1 一阶环节的过渡曲线

一阶环节在单位阶跃作用下的过渡过程实验曲线具有图(6-1)所示的形状。利用式(6-3)和(6-4)在图上找出 $X(t)$ 的稳态值 $X_{\infty}(t)$ 即等于 K ；在纵座标 $X(t)$ 找出 $0.632 X_{\infty}(t)$ 所对应的横座标 t 的值，此值即为 T 。

2. 二阶环节(二阶系统)系数的测定

二阶系统的过渡过程，在第二章中已经指出，有两种形式：非周期性的变化过程和衰减振荡的变化过程。对应于这两种状态，在利用过渡特性来确定其传递函数的系数的关系式是不一样的。下面分别进行讨论：

① 二阶系统非周期性变化的过渡特性。

在第二章中已经知道，当过渡过程是非周期变化时，二阶系统

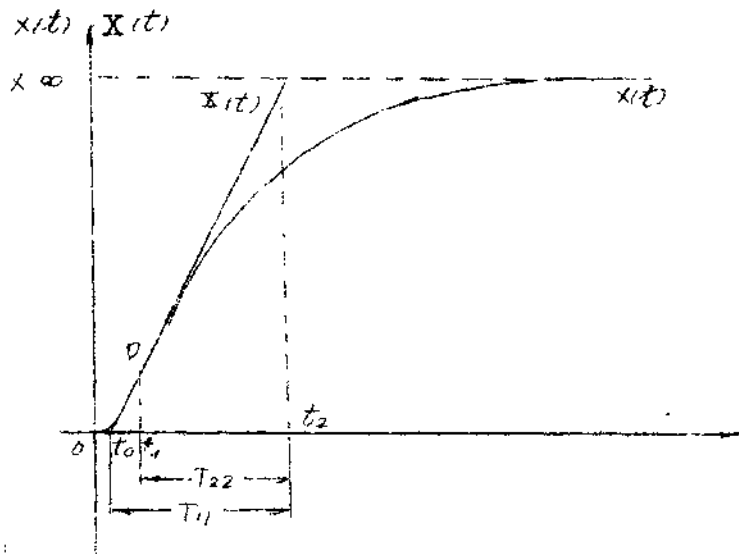


图 6-2 二阶系统非周期性变化的过渡过程曲线

的传递函数及其在单位阶跃作用下的过渡过程关系式分别为：

$$W(S) = \frac{K}{(T_1 S + 1)(T_2 S + 1)} \quad (6-5)$$

$$X(t) = K \left(1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_1}} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_2}} \right) \quad (6-6)$$

式(6-6)曲线如图(6-2)所示。

通过曲线的拐点D(即斜率最大的点)作一切线,交于座标横轴和稳态水平线,定出 T_{11} 、 T_{22} 和 X_∞ 。可以证明,传递函数系数可以由下式进行计算:

$$K = X_\infty \quad (6-7)$$

$$T_1 + T_2 = T_{22} \quad (6-8)$$

$$T_2 \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{T_1}{T_1 - T_2}} = T_{11} \quad (6-9)$$

为了便于计算,设: $T_1 > T_2$,

$$\text{则: } T_1 = \alpha T_2, \quad (\alpha > 1) \quad (6-10)$$

将式(6-10)代入式(6-8)、(6-9)得:

$$T_2(1+\alpha) = T_{22} \quad (6-11)$$

$$T_2 \alpha^{\frac{\alpha}{\alpha-1}} = T_{11} \quad (6-12)$$

式(6-12)与(6-11)之比为:

$$\frac{T_{11}}{T_{22}} = \frac{1}{1+\alpha} \alpha^{\frac{\alpha}{\alpha-1}} \quad (6-13)$$

式(6-13)不是一般的代数方程,难于求出 α ,通常利用图解法来求解:

$$\text{令: } F(\alpha) = \frac{1}{1+\alpha} \alpha^{\frac{\alpha}{\alpha-1}}, \quad \text{且: } F(\alpha) = \frac{T_{11}}{T_{22}}$$

$F(\alpha)$ 和 α 的关系如图6-3所示。

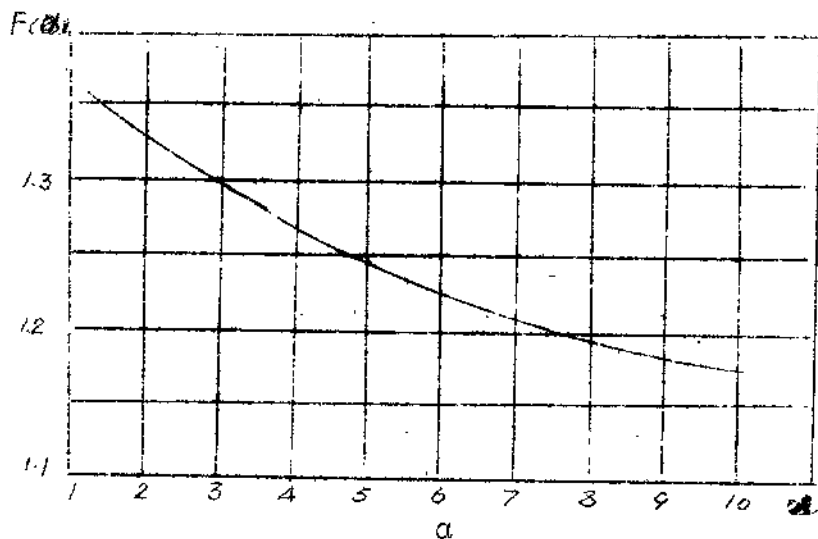


图 6-3 $F(\alpha) = \frac{1}{1+\alpha} \alpha^{\frac{\alpha}{\alpha-1}} \quad \alpha > 1$

于是我们可以根据 $\frac{T''}{T_{22}}$ ，从曲线上找出 α ，利用式 (6-11)、

(6-8) 即可很快算出 T_1 和 T_2 。

(证明式 (6-7)、(6-8)、(6-9))

a) 令： $t = \infty$ ，代入式 (6-6) 即得：

$$X_{\infty} = K, \quad \text{此即式 (6-7)}$$

b) 斜率最大的点，就是二阶导数为零的点，即在 D 点满足：

$$X''(t) = 0$$

对式 (6-6) 求导数：

$$X'(t) = K \left(\frac{1}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_1}} - \frac{1}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_2}} \right) \quad \dots\dots\dots (6-14)$$

$$X''(t) = K \left[\frac{1}{T_2(T_1 - T_2)} e^{-\frac{t}{T_2}} - \frac{1}{T_1(T_1 - T_2)} e^{-\frac{t}{T_1}} \right] \quad \dots\dots\dots (6-15)$$

令：在拐点 D 的坐标 $t = t_1$ ，

即 $X''(t_1) = 0$ ，由式 (6-15) 得 t_1 ：

$$t_1 = \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \quad (6-16)$$

将式 (6-16) 代入式 (6-6)、(6-14) 得：

$$X(t_1) = K \left[1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{T_2}{T_1 - T_2}} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{T_1}{T_1 - T_2}} \right] \quad \dots\dots\dots (6-17)$$

$$X'(t_1) = K \left\{ \frac{1}{T_1 - T_2} \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{T_2}{T_1 - T_2}} - \frac{1}{T_1 - T_2} \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{T_1}{T_1 - T_2}} \right\} \quad \dots\dots\dots (6-18)$$

通过D点的直线方程为：

$$X(t) - X(t_1) = X'(t_1)(t - t_1) \quad (6-19)$$

由图(6-2)得：当 $t = t_2$ 时，

$$\begin{cases} (t_2 - t_1) = T_{22} \\ X(t_2) = X(\infty) = K \end{cases} \quad (6-20)$$

将式(6-20)、(6-17)、(6-18)代入式(6-19)经过算式的化简，

即得： $T_{22} = T_1 + T_2$ ， 此即式(6-8)

c) 在直线方程上，当 $t = t_0$ 时，

则： $X(t_0) = 0$ ，代入式(6-19)得：

$$X(t_1) = X'(t_1)(t_1 - t_0) \quad (6-21)$$

将式(6-17)、(6-18)代入式(6-21)整理后得：

$$(t_1 - t_0) = T_2 \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{T_1}{T_1 - T_2}} - (T_1 + T_2) \quad (6-22)$$

由图6-2 可知：

$$T_{11} = T_{22} + (t_1 - t_0) \quad (6-23)$$

将式(6-8), (6-22)代入式(6-23)即得:

$$T_{11} = T_2 \left(\frac{T_1}{T_2} \right) \frac{T_1}{T_1 - T_2}, \quad \text{此即式(6-9)}$$

(证毕)

② 二阶系统在衰减振荡变化时的过渡特性

前面已经讲到, 当过渡过程是衰减振荡时, 二阶系统的传递函数及其相应的在单位阶跃作用下的输出过渡过程为:

$$W(S) = \frac{K}{T_0^2 S^2 + 2\xi T_0 S + 1} \quad (6-24)$$

式中: $\xi < 1$

$$X(t) = K \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\frac{\xi}{T_0} t} \sin \left(\frac{\sqrt{1-\xi^2}}{T_0} t + \varphi \right) \right] \quad \dots\dots\dots (6-25)$$

式中: $\varphi = \arctan \frac{-\sqrt{1-\xi^2}}{\xi}$

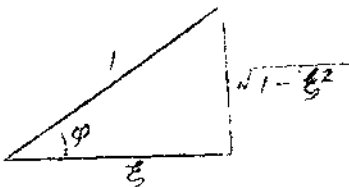


图 6-4

如图6-4所示。

式(6-25)曲线如图

(6-5)所示。

在图6-5上作出A、B

和 T_A , 可以证明, 传递函数

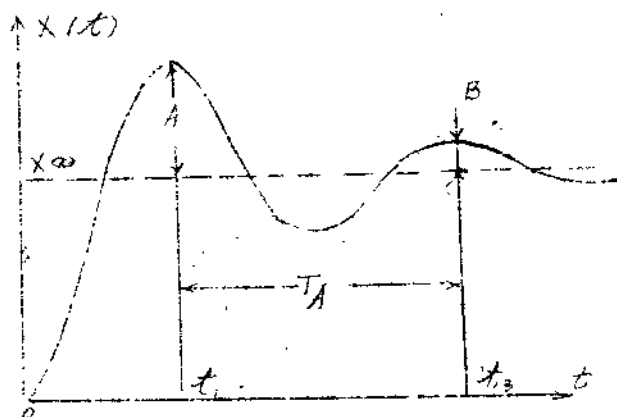


图 6-5 二阶系统衰减振荡时的过渡过程曲线

的系数可以用下式计算：

$$K = X_{\infty}$$

$$\xi = \ln \frac{A}{B} \cdot \left[\left(\ln \frac{A}{B} \right)^2 + (2\pi)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (6-27)$$

$$T_0 = T_A \left[\left(\ln \frac{A}{B} \right)^2 + (2\pi)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (6-28)$$

(证明式(6-26)、(6-27)、(6-28))

a) 当 $t = \infty$ ，代入式(6-25)即得 $X_{\infty} = K$ ，即式(6-26)。

b) 图 6-5 上在 t_1 ， t_2 处是具有极大值的，

即 $X'(t) = 0$, 对式(6-25)求导并令其等于零, 得:

$$t_g \left(\frac{\sqrt{1-\xi^2}}{T_0} t + \varphi \right) = t_g \varphi$$

$$\therefore \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{T_0} t = n\pi \quad (n=1, 2, \dots)$$

当 $n=1, 3, 5, \dots$ 时具有极大值

$$\text{当 } n=1 \text{ 时, } t = t_1 = \frac{\pi T_0}{\sqrt{1-\xi^2}} \quad (6-29)$$

$$n=3 \text{ 时, } t = t_3 = \frac{3\pi T_0}{\sqrt{1-\xi^2}} \quad (6-30)$$

将 t_1, t_3 代入式(6-25)得:

$$X(t_1) = K \left(1 + e^{-\frac{\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}} \right)$$

$$X(t_3) = K \left(1 + e^{-\frac{3\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}} \right)$$

$$A = X(t_1) - K = e^{-\frac{\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}}$$

$$B = X(t_2) - K = e^{-\frac{3\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}}$$

$$\frac{A}{B} = e^{\frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}}, \text{ 解此方程即得式 (6-27)}$$

(提示: 两边取对数再平方)

$$c) \quad T_A = t_2 - t_1, \quad \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{T_0} (t_2 - t_1) = 2\pi \quad (6-31)$$

将式 (6-29), (6-30) 及 (6-27) 代入上式即得式 (6-28) (证毕)

3. 电动机动态特性的测试

测量电动机动态特性的方法, 主要有过渡过程法, 参数计算法等几种, 现分别介绍。

① 过渡过程法

前面已经讲过, 直流电动机的传递函数是一个二阶环节; 而小功率直流电机的电磁时间常数的影响可以忽略, 这样就简化为一阶环节, 于是就归结为用实验方法求取传递函数系数的问题。交流电机也是一阶环节。

以直流电动机为例, 其传递函数为:

$$W(s) = \frac{\Omega}{U} = \frac{K}{T_m s + 1} \quad (6-32)$$

式中： Ω —电机的转速。

U —输入控制电压。

T^m —机电时间常数。

K —传递系数。

在有测速电机和直流电机配合时，用过渡过程法确定机电时间常数和传递系数的测量电路如图 6—6 所示。必须指出：电机应接上实际的负载，若实际负载暂缺，也应接一与实际负载相当的负载。

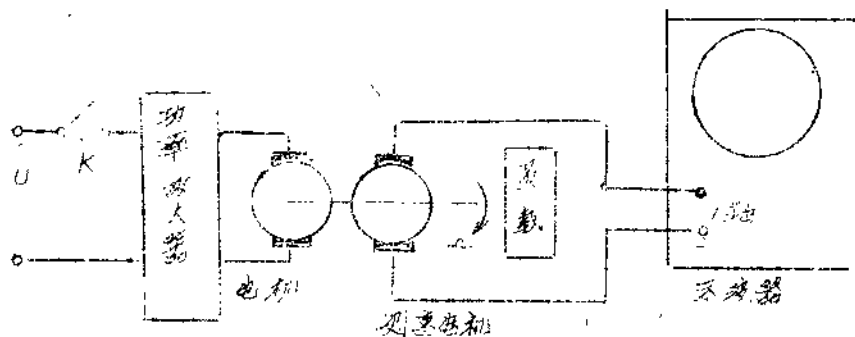


图 6—6 电机传递函数的测试

测试时，迅速合上开关K，将U接入，于是从长余辉示波器上就可观察到转速变化的过渡过程，如图6-7所示，其中 U_T 为测速发电机的电压。

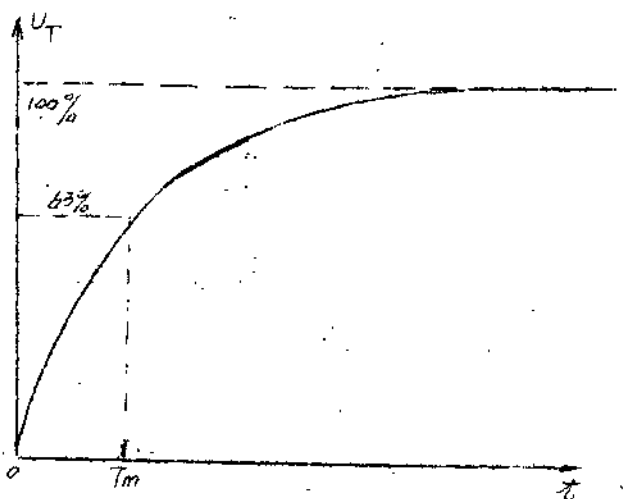


图6-7 电机转速变化过渡过程

在图6-7上，找出稳值的63%所对应的时间即为 T_m 。

至于电机的传递系数K，只要测得输入控制电压U和转速 Ω 的稳态值即得：

$$K = \frac{\Omega}{U}$$

若没有测速电机，或者在实际系统中无法安装测速电机的情况下，可用电桥法测得电机的转速过渡特性，经过简单的换算即可测出 T_m ，电桥法测取电机的转速过渡过程线路如图6-8所示。

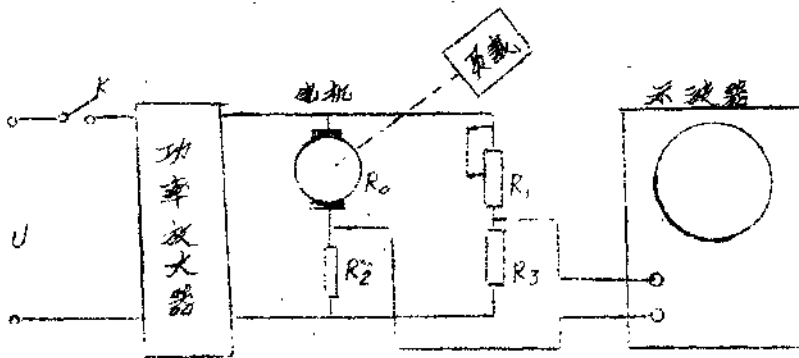


图 6—8 电桥法测取电机传递函数

图中： R_0 为电机直流电阻；

$$R_1, R_2 = R_0, R_3, \quad (R_1 + R_3) \gg (R_0 + R_2)$$

测试方法和上述一样，迅速合上开关 K 从示波器上即得电机转速变化的过渡过程。这是因为当电机不转时，其反电势：

$E_s = C_e \Omega = 0$ 桥路平衡，输出为零；当转速变化后，其反电势亦相应变化，桥路不平衡，因此以示波器上便得到了与转速变化成比例的电压。必须指出：这时从过渡过程曲线得到的时间常数 (T_{mm}) 要扣除由于 R_2 接入的影响，要经过下面的换算，便得电机的电机时间常数 T^m ：

$$T^m = \frac{R_0}{R_0 + R_2} T_{mm}$$

② 参数计算法：

在推导直流执行电机传递函数时，已得到：

$$T^m = \frac{(R_s + R_{sc})(J_d + J_H)}{C_e CM} \quad (6-32)$$