

对象模型的闭环衰减试验方法

王永初

(重庆工业自动化仪表研究所)

摘 要

西欧^[1]以及美国^[2]的许多自动化学者都曾致力于等幅振荡闭环方法的研究。本文提出了对象模型的闭环衰减试验方法,可以按照任意一条闭环的响应曲线来辨识对象模型。经过模拟、现场试验,证明本方法是正确的,不仅试验次数少、安全性好、非线性因素小,而且比较接近生产过程在控制状态下的特性。

一、基本原理

在控制系统中,如果每个方框的输入信号 X 都冠以一个指数函数的权函数 $e^{-m\omega t}$, 如图 1 所示,则其方框图的输出亦应该是一个冠有指数函数 $e^{-m\omega t}$ 的信号,所以其输出可以记成:

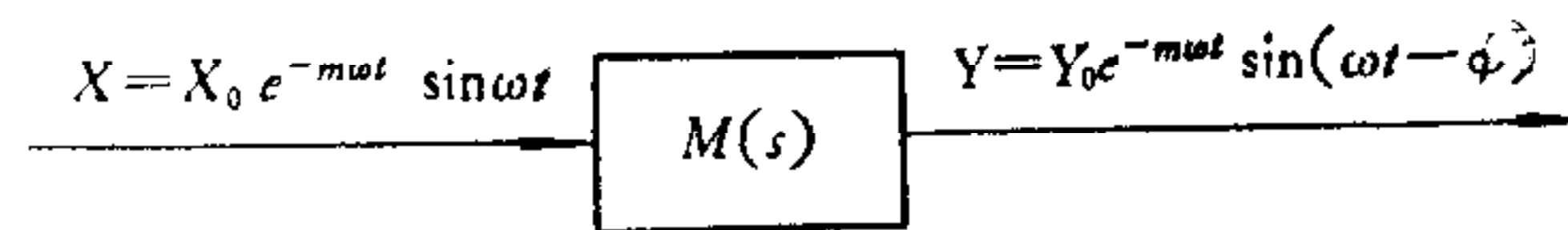


图 1

$$Y(t) = Y_0 e^{-m\omega t} \sin(\omega t - \phi). \quad (1)$$

按照这个原理,可以导出在衰减状态下,环节 $M(s)$ 的传递函数是将 $s = (j - m)\omega$ 代入 $M(s)$ 得到的 $M(m, \omega)$ 。同样可以求得振荡的边界条件:

$$1 + M(m, \omega) = 0$$

或

$$M(m, \omega) = -1. \quad (2)$$

式中 m 称为系统的波动度,可由衰减曲线确定。

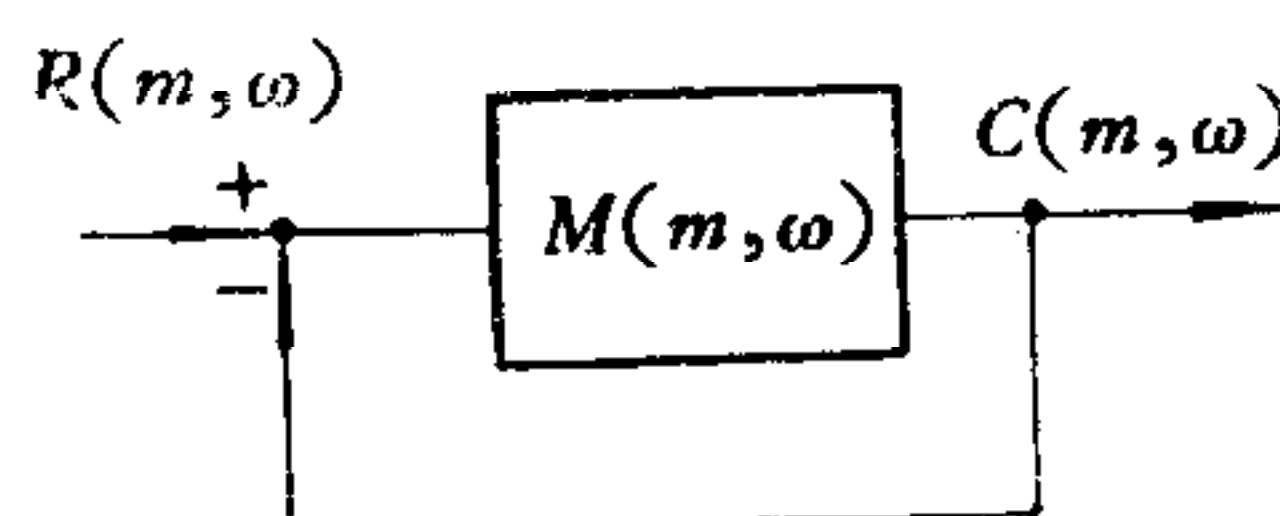


图 2

定义系统的衰减度 ψ 为

$$\psi = \frac{(A_1 - A_2)}{A_1} \quad (3)$$

A_1 与 A_2 如图 3 所示. ψ 与 m 的关系为

$$\psi = 1 - e^{-2\pi m}$$

或

$$m = \frac{\ln(1 - \psi)}{-2\pi} \quad (4)$$

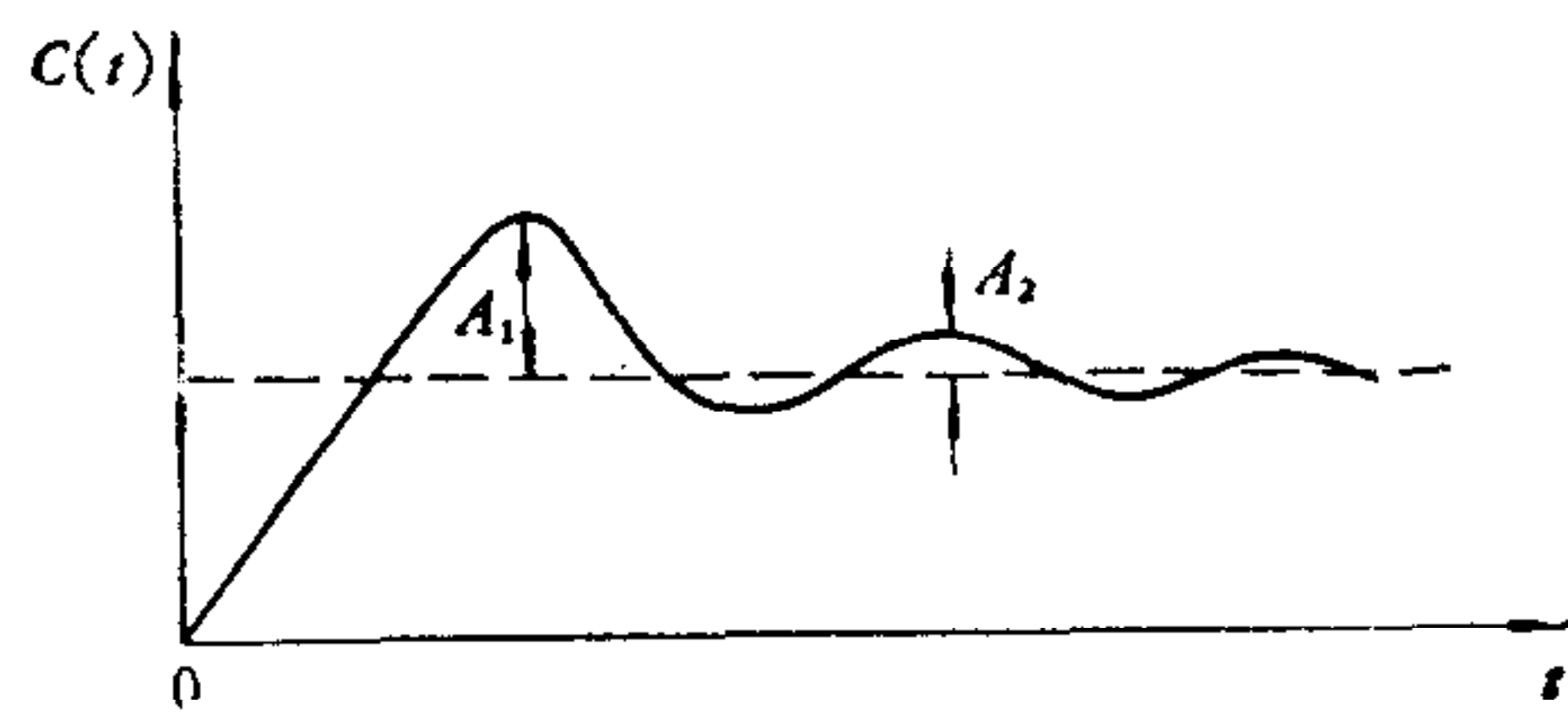


图 3

下面以两种典型对象为例说明试验的基本原理与计算公式.

$$1) \quad G(s) = \frac{K_0}{(T_s + 1)^n} \quad (5)$$

$G(s)$ 与比例调节器组成闭环控制的衰减振荡边界条件

$$\frac{K_0 K_p}{[(j - m)\omega T + 1]^n} = -1. \quad (6)$$

从式(6) 分别得到如下两个条件

$$\text{相角} \quad n \tan^{-1} \frac{2\pi T}{T_s - 2m\pi T} = 180^\circ; \quad (7a)$$

$$\text{振幅} \quad \frac{K_0 K_p}{\left[\left(1 - \frac{2m\pi T}{T_s}\right)^2 + \left(\frac{2\pi T}{T_s}\right)^2 \right]^{\frac{n}{2}}} = 1. \quad (7b)$$

由上述两式可以导出模型阶次的计算公式

$$K_c = \frac{1}{\left[\cos\left(\frac{180^\circ}{n}\right) + m \sin\left(\frac{180^\circ}{n}\right) \right]^n}, \text{ 式中 } K_c = K_0 K_p. \quad (8-9)$$

以及时间常数的计算公式

$$T = \frac{T_s \tan\left(\frac{180^\circ}{n}\right)}{2\pi \left[1 + m \tan\left(\frac{180^\circ}{n}\right) \right]}. \quad (10)$$

K_c, m 与 n 的关系见表 1.

$$2) \quad G(s) = \frac{K_0}{s(T_s + 1)^n}$$

对于无自衡对象同样可得如下计算模型阶次的公式

表 1

K_c \ n \ m	2.3	2.5	2.7	3	3.2	3.4	3.6	4	5	6	8
0.05	23.5777	13.1167	9.0361	6.2203	5.1954	4.4908	3.9785	3.2861	2.4114	1.9967	1.5981
0.1	15.6997	9.5972	6.9224	4.9432	4.1896	3.6600	3.2678	2.7285	2.0301	1.6914	1.3610
0.12	13.5878	8.5563	6.2660	4.5304	3.8591	3.3833	3.0292	2.5389	1.8981	1.5848	1.2775
0.14	11.8610	7.6669	5.6919	4.1623	3.5620	3.1333	2.8125	2.3655	1.7762	1.4859	1.1996
0.16	10.4324	6.9017	5.1876	3.8330	3.2942	2.9067	2.6151	2.2066	1.6636	1.3942	1.1271
0.18	9.2384	6.2394	4.7425	3.5375	3.0522	2.7008	2.4352	2.0609	1.5595	1.3090	1.0595
0.20	8.2311	5.6627	4.3482	3.2717	2.8330	2.5135	2.2707	1.9270	1.4631	1.2298	0.9964
0.22	7.3742	5.1579	3.9974	3.0318	2.6341	2.3426	2.1202	1.8038	1.3738	1.1562	0.9375
0.24	6.6397	4.7140	3.6843	2.8149	2.4530	2.1865	1.9822	1.6902	1.2909	1.0876	0.8824
0.26	6.0058	4.3218	3.4038	2.6181	2.2880	2.0436	1.8555	1.5855	1.2140	1.0237	0.8310
0.28	5.4553	3.9738	3.1518	2.4393	2.1372	1.9125	1.7389	1.4888	1.1425	0.9642	0.7830
0.30	4.9744	3.6637	2.9247	2.2763	1.9992	1.7921	1.6316	1.3993	1.0760	0.9087	0.7383

表 2

K_c \ n \ m	2.3	2.5	2.7	3	3.2	3.4	3.6	4	5	6	8
0.05	1.5787	1.5049	1.4465	1.3786	1.3426	1.3120	1.2857	1.2426	1.1701	1.1248	1.0713
0.10	1.4071	1.3484	1.3014	1.2462	1.2167	1.1915	1.1697	1.1339	1.0729	1.0345	0.9887
0.12	1.3481	1.2942	1.2510	1.1999	1.1725	1.1491	1.1288	1.0954	1.0383	1.0022	0.9591
0.14	1.2938	1.2442	1.2042	1.1569	1.1315	1.1096	1.0907	1.0594	1.0059	0.9719	0.9312
0.16	1.2437	1.1979	1.1609	1.1169	1.0932	1.0728	1.0551	1.0258	0.9755	0.9435	0.9050
0.18	1.1974	1.1551	1.1207	1.0797	1.0576	1.0385	1.0219	0.9944	0.9470	0.9168	0.8803
0.20	1.1546	1.1153	1.0833	1.0450	1.0243	1.0064	0.9908	0.9649	0.9203	0.8917	0.8570
0.22	1.1150	1.0784	1.0485	1.0127	0.9932	0.9764	0.9617	0.9374	0.8951	0.8680	0.8352
0.24	1.0782	1.0441	1.0161	0.9825	0.9642	0.9483	0.9345	0.9115	0.8715	0.8458	0.8145
0.26	1.0440	1.0121	0.9859	0.9543	0.9370	0.9221	0.9090	0.8872	0.8493	0.8248	0.7951
0.28	1.0122	0.9823	0.9577	0.9279	0.9116	0.8975	0.8851	0.8644	0.8284	0.8051	0.7767
0.30	0.9826	0.9545	0.9313	0.9032	0.8877	0.8743	0.8626	0.8430	0.8087	0.7865	0.7593

$$K_c = \frac{1}{\left[\cos\left(\frac{180^\circ - \phi}{n}\right) + m \sin\left(\frac{180^\circ - \phi}{n}\right) \right]^n} \quad (11)$$

$$\left(\text{式中 } K_c = \frac{K_0 K_p T_s}{\sqrt{1 + m^2} 2\pi}, \phi = \tan^{-1}\left(\frac{-1}{m}\right) \right). \quad (12)$$

以及时间常数的计算公式

$$T = \frac{T_s \tan\left(\frac{180^\circ - \phi}{n}\right)}{2\pi \left[1 + m \tan\left(\frac{180^\circ - \phi}{n}\right) \right]}. \quad (13)$$

K_c, m 与 n 的关系见表 2.

二、模拟试验

以对象特性 $G(s) = 1/(10s + 1)^6$ 为例, 在电子模拟计算机上模拟, 得到如图 4 所示的闭环衰减曲线, 试验记录: $K_p = 1.156$, $T_s = 123$ 秒. 由图求得

$$\phi = 0.75, \quad m = 0.221.$$

查表 1 得 $n \approx 6$.

计算 T

$$T = \frac{T_s \tan\left(\frac{180^\circ}{n}\right)}{2\pi \left[1 + m \tan\left(\frac{180^\circ}{n}\right)\right]} = \frac{123 \times 0.577}{6.28[1 + 0.221 \times 0.577]} = 10.07.$$

误差

$$\frac{\Delta T}{T} \% = \frac{0.07}{10} \times 100 \% = 0.7 \%.$$

以对象特性 $G(s) = \frac{1}{s(10s + 1)^6}$ 为例, 模拟试验曲线如图 5 所示, 试验记录: $m = 0.221$, $T_s = 288$ 秒, $K_p = 0.0194$. 经计算 $K_c = 0.867$, $\phi = 102.46^\circ$. 查表 2 得 $n = 6$, 经计算 $T = 10.02$.

误差 $\frac{\Delta T}{T} \% = 0.2 \%.$

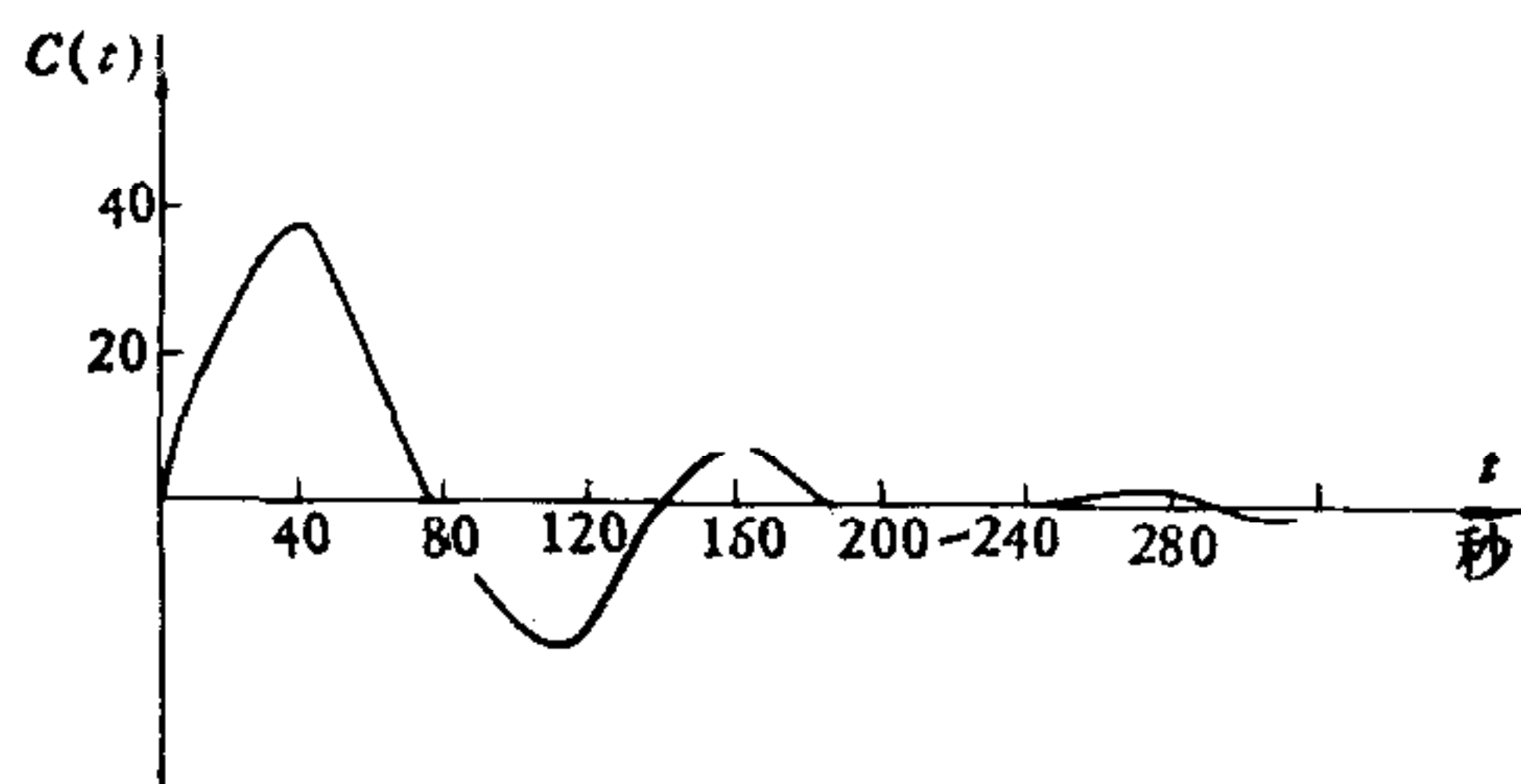


图 4

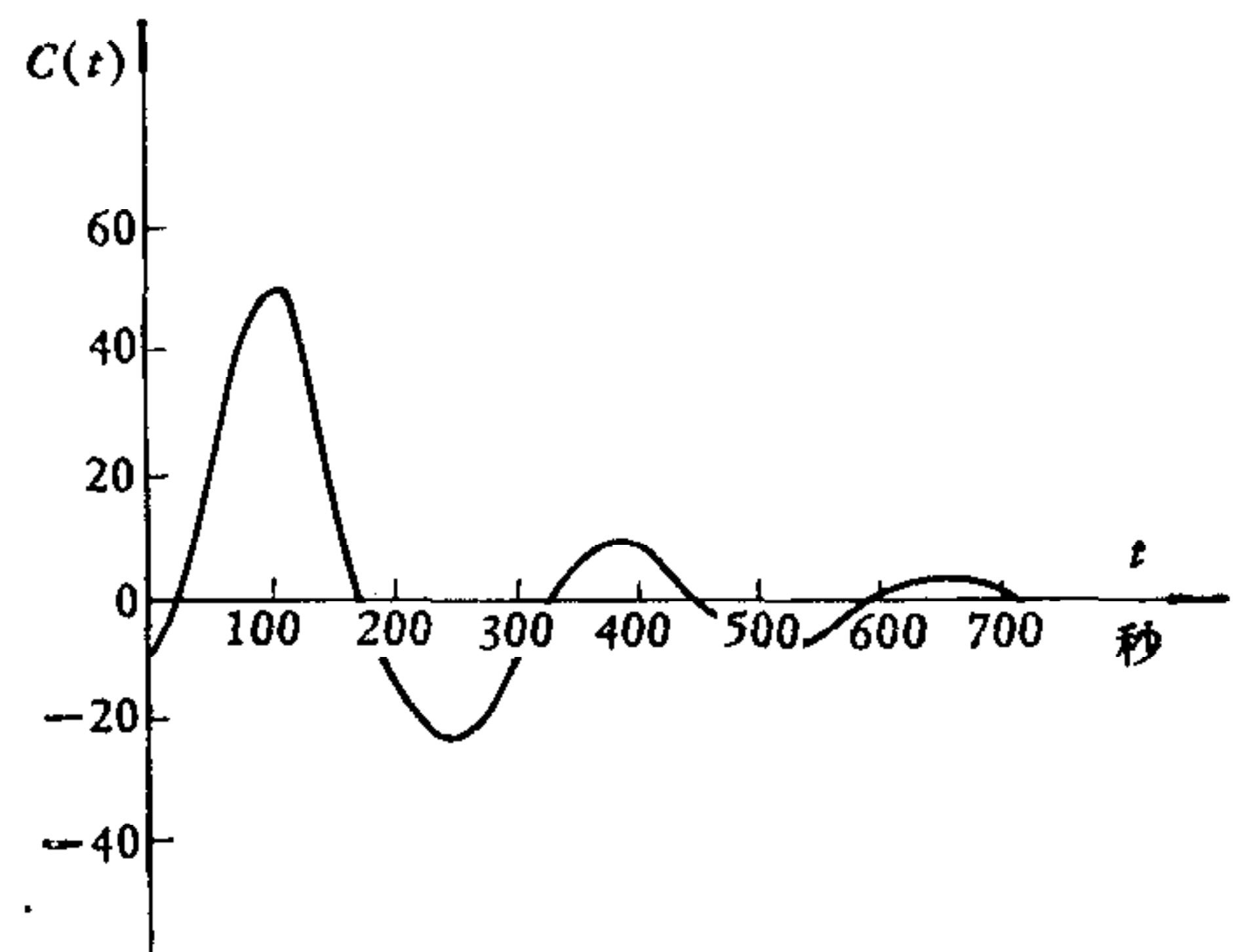


图 5

三、任意对象特性的试验

处于稳定状态的系统, 在施加一个阶跃扰动以后, 会出现一段不可克服的纯滞后时间 τ , 图 6 表示 $G(s) = e^{-\tau s}/(20s + 1)$ 的闭环试验曲线. 由图求得 $\tau = 5$ 秒. 这样, τ 可以直接由试验曲线量取. 为了使研究的问题具有普遍的意义, 观察如下两种任意对象:

$$1) G(s) = K_0 e^{-\tau s}/(Ts + 1)^n.$$

推导得出如下模型阶次的计算公式

$$K'_c = \frac{1}{\left[\cos\left(\frac{180^\circ}{n'}\right) + m \sin\left(\frac{180^\circ}{n'}\right)^{n'} \right]}. \quad (14)$$

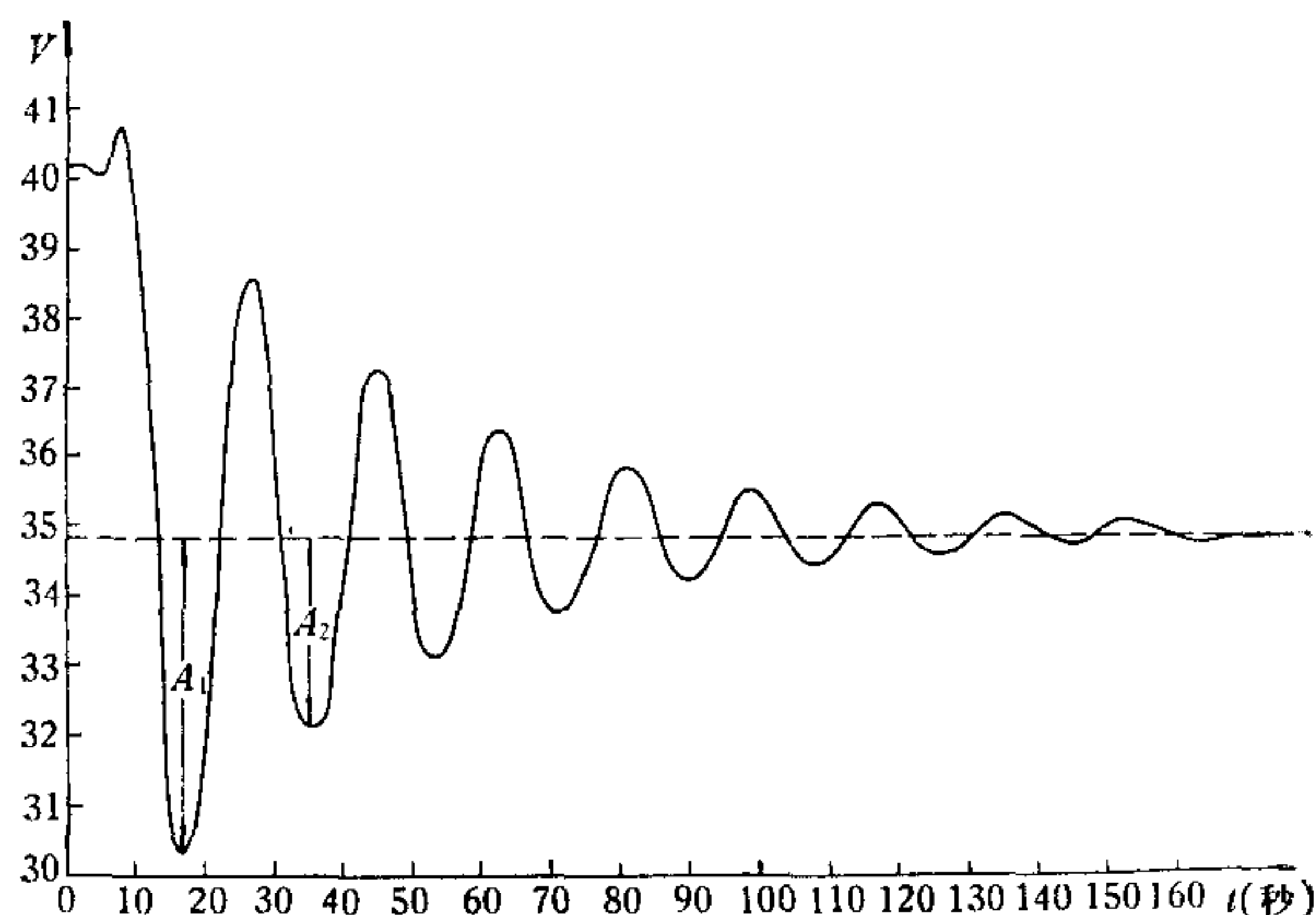


图 6

其中

$$K'_c = (K_c)^{\frac{180^\circ}{180^\circ - \phi_\tau}}, \quad \phi_\tau = 360^\circ \tau / T_s, \quad K_c = K_0 K_p A_\tau, \quad A_\tau = e^{\frac{2\pi m \tau}{T_s}}, \quad n' = \frac{180^\circ \pi}{180^\circ - \phi_\tau}. \quad (15)$$

利用表 1 可以确定 n' , 按下式计算 T :

$$T = \frac{T_s \tan\left(\frac{180^\circ - \phi_\tau}{n}\right)}{2\pi \left[1 + m \tan\left(\frac{180^\circ - \phi_\tau}{n}\right)\right]}. \quad (16)$$

以图 6 的试验曲线进行验证. 实验记录: $\tau = 5$ 秒, $K_p = 5.75$, $T_s = 19.1$ 秒, 第一个波峰 $A_1 = 47.5$, 第二个波峰 $A_2 = 29.3$, 计算得到 $\phi = 0.379$, $m = 0.0758$. 计算得: $K_c = 6.513$, $\phi_\tau = 94.241$, $K'_c = (6.513)^{2.099} = 51.065$. 查表 1 $n' = 2.1$.

则知

$$n = \frac{180^\circ - \phi_\tau}{180^\circ} n' = 2.1 / 2.099 = 1.0005 \approx 1.$$

$$T = 20.28.$$

误差

$$\frac{\Delta T}{T} \% = 1.4 \%$$

2)

$$G(s) = \frac{K_0 e^{-\tau s}}{s(T_s + 1)^n}.$$

同样可得

$$K'_c = \frac{1}{\left[\cos\left(\frac{180^\circ}{n'}\right) + m \sin\left(\frac{180^\circ}{n'}\right)\right]^{n'}}. \quad (17)$$

其中

$$K'_c = (K_c)^{\frac{180^\circ}{180^\circ - \phi_c}}, \quad K_c = \frac{K_0 K_p e^{2\pi m \tau / T_s}}{\sqrt{1 + m^2}} \cdot \frac{T_s}{2\pi},$$

$$n' = \frac{180^\circ n}{(180^\circ - \phi_c)}, \quad \phi_c = \frac{360^\circ \tau}{T_s} + \tan^{-1}(-1/m). \quad (18)$$

利用表 2 可以求出 n' , 按下式计算 T

$$T = \frac{T_s \tan\left(\frac{180^\circ - \phi_c}{n}\right)}{6.28 \left[1 + m \tan\left(\frac{180^\circ - \phi_c}{n}\right)\right]} \quad (19)$$

模拟验证:

$$G(s) = \frac{e^{-5s}}{s(20s + 1)^2}$$

模拟曲线如图 7 所示. 计算得到的结果为

$$n \approx 2.16, T = 20.59 \text{ (按 } n = 2 \text{ 计算).}$$

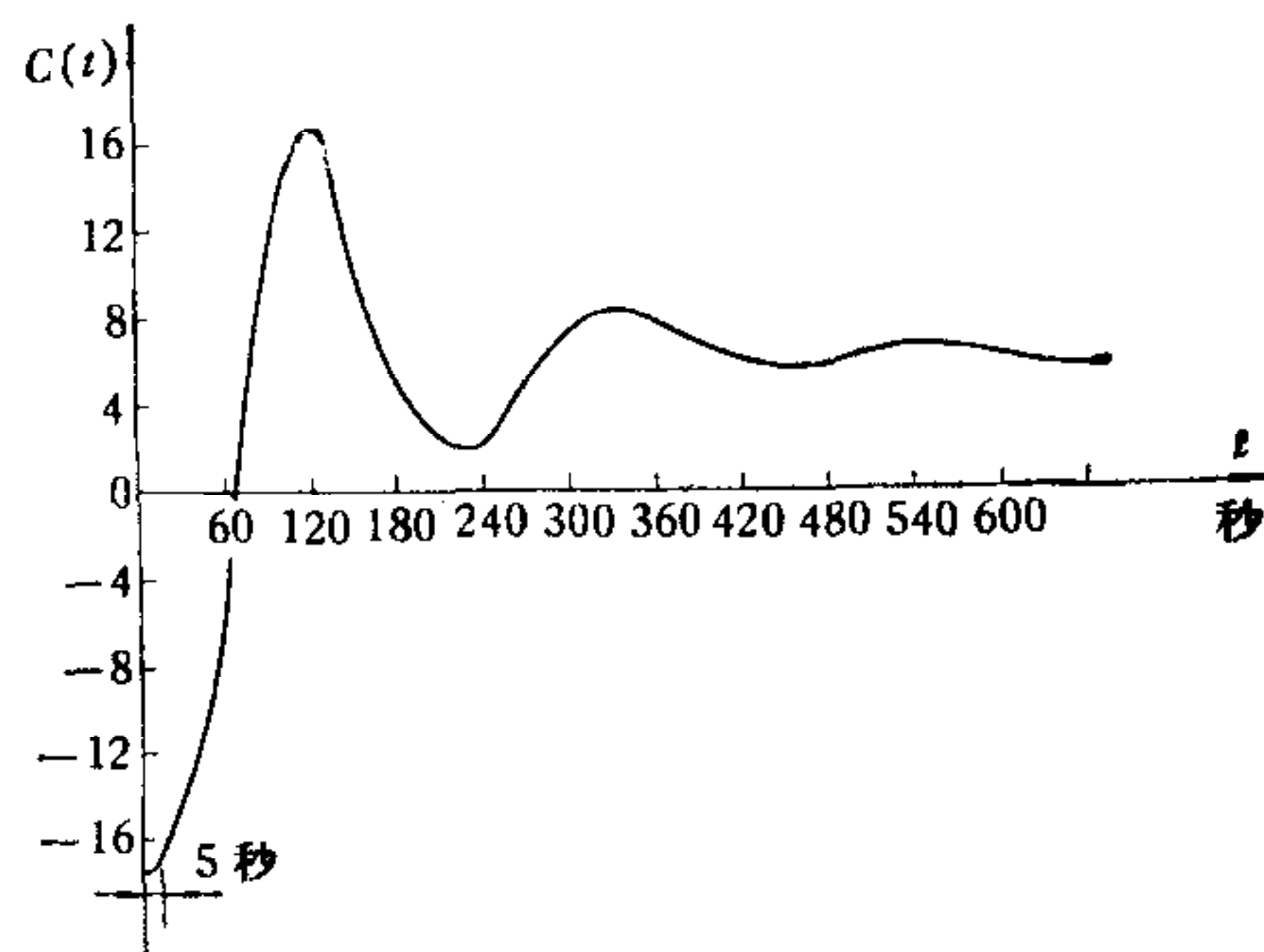


图 7

四、现场试验

在川南电业局和豆坝发电厂对10万千瓦机组的3#减温器温度对象特性进行了测试, 试验记录曲线如图8所示. 静态增益试验: 给定值改变 $\Delta R = 1\text{mA}$, 调节器输出改为 $\Delta m = 1.5\text{mA}$, 即知

$$K_0 = \frac{\Delta R \cdot K_p - \Delta m}{K_p \Delta m} = 0.44.$$

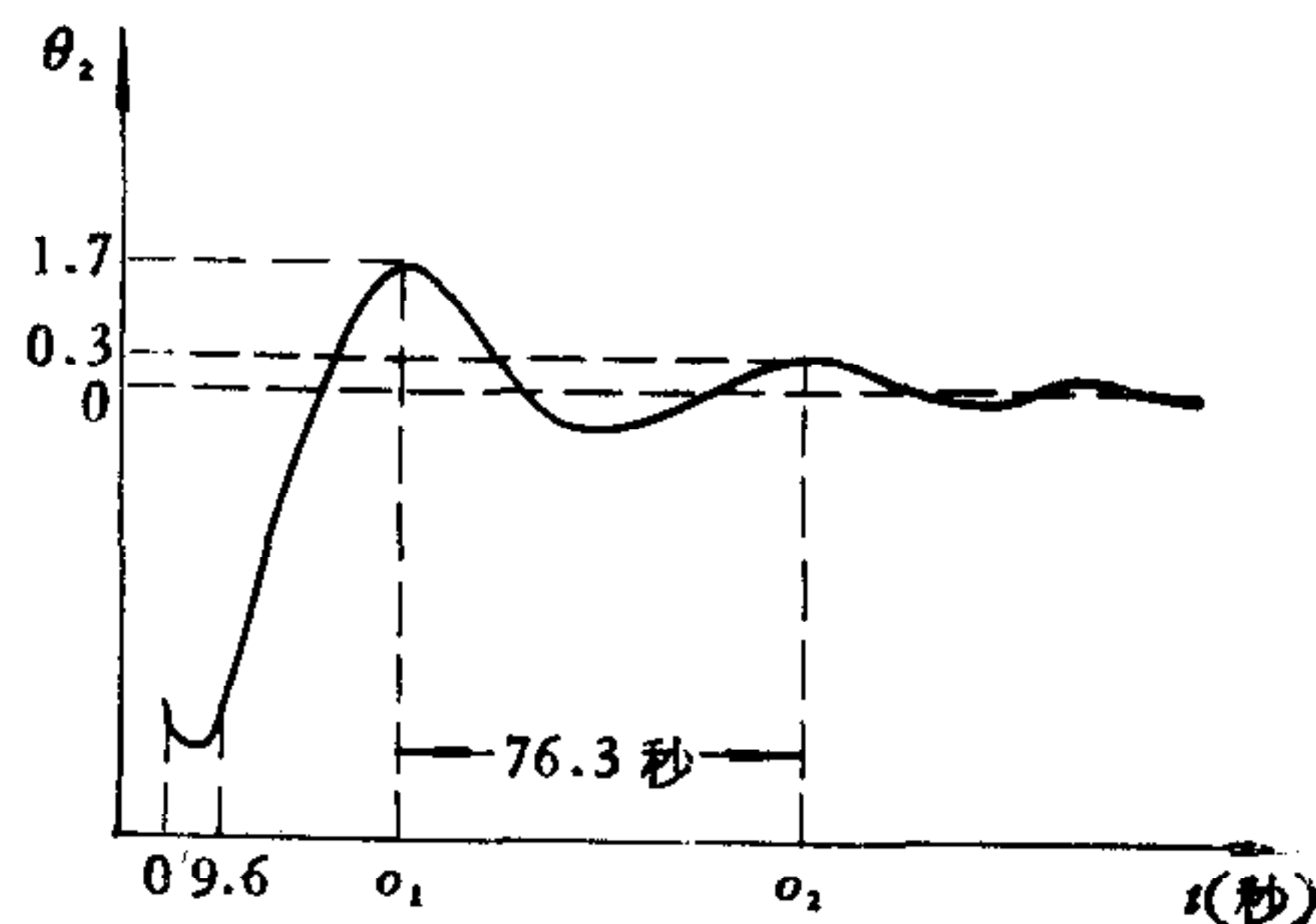


图 8

动态试验记录: $\tau = 9.6$ 秒, $T_s = 76.3$ 秒, $A_1 = 1.7$, $A_2 = 0.3$,

$$K_p = 1/\delta = 1/0.23 = 4.35 (\delta = 23\%).$$

计算:

$$K_c = K_0 K_p = 4.35 \times 0.44 = 1.914, \quad \phi = 0.176, \quad m = 0.277.$$

查表得 $n \approx 3.4$.

计算时间常数

$$T = \frac{T_s \tan\left(\frac{180^\circ}{n}\right)}{2\pi \left[1 + m \tan\left(\frac{180^\circ}{n}\right)\right]} = 11.77.$$

因此对象传递函数可以写成

$$G(s) = \frac{0.44}{(11.77s + 1)^{3.4}}$$

以上分析了 $K/(Ts + 1)^n$, $Ke^{-\tau s}/(Ts + 1)^n$, $K/s(Ts + 1)^n$ 以及 $\frac{Ke^{-\tau s}}{s(Ts + 1)^n}$ 对象特性的辨识方法, 实际证明大多数工业控制对象都可以用这种试验方法. 作者还研究了不是等价系统转化为等价的方法, 从这个方面来说, 本文介绍的方法具有比较普遍的应用意义. 值得指出的是闭环测试方法还可以用来对伪随机信号闭环试验的数据进行处理, 可以方便地由脉冲响应函数求得试验对象的传递函数, 比按矩阵方法搜寻解题大大简化, 限于篇幅, 这方面内容拟另作专题介绍.

参 考 文 献

- [1] 赵登荣, 闭环测试方法在法国的研究概况, 自动化与仪器仪表, 第1期 (1982).
 [2] F.G., Shinsky, Process Control Systems, McGraw-Hill, 1979.

A MODEL IDENTIFICATION METHOD USING DAMPING AND OSCILLATING EXPERIMENT IN CLOSED-LOOP SYSTEM

WANG YONGCHU

(Chongqing Institute of Industrial Automation Instrumentation)

ABSTRACT

A new method for model identification based on experiments performed in closed-loop system is proposed in this paper. The orders and parameters of the model are easily determined by the damping and oscillating curves. Having distinguished merits in regard to safety and simplicity, this method would be widely used in industrial process experiment. Principles of model testing and results obtained by simulation are given