



自动化技术应用丛书

仪表系统的闭环测试方法

王永初 著

四川科学技术出版社

《自动化技术应用丛书》之三

仪表系统的闭环测试方法

王永初 著

四川科学技术出版社

一九八四年·成都

责任编辑：崔泽海

封面设计：魏天禄

仪表系统的闭环测试方法

王永初 著

四川科学技术出版社出版 重庆新华印刷厂印刷

四川省新华书店重庆发行所发行

开本787×1092毫米 1/32 印张7.625 字数162千

1984年4月第一版 1984年4月第一次印刷

印数：1—7,200册

书号：15298·15

定价：0.95元

〔内容提要〕

本书系统地介绍仪表自动化系统的闭环试验方法，包括对象模型与仪表参数的闭环测试方法与数据处理，在控制状态下模型的简化、整化与降阶方法。并列举实例说明这些方法在系统设计、调节器参数整定、调节系统品质评价，以及在现代闭环辨识方法中的应用。本书的特点是理论结合实践，给出大量的图、表可供工程实际使用。为了内容的完整性，最后还简单介绍了常用对象模型的试验方法。

本书可供自动化和仪器仪表专业有关工程技术人员及大专院校的师生参考。

编写说明

1980年四川省自动化与仪器仪表学会成立时，理事会研究决定组织出版一套“自动化技术应用”丛书。在省各级领导的关怀下，在四川科学技术出版社的积极支持下，“丛书”首批12种将陆续出版。这对于繁荣自动化与仪器仪表科学无疑是个促进作用。

本丛书编写的目的是总结我省在自动化与仪器仪表领域的研究成果，介绍具有实践意义的自动化技术。编写的原则以著为主，同时兼顾同一领域的最新科学技术成就。“丛书”是在《自动化与仪器仪表》编委会的统一组织下进行的，并设立由机械工业部重庆工业自动化仪表研究所、成都电讯工程学院和成都科技大学所组成的常设组，负责本丛书的计划安排、书稿组审，以及出版过程中有关事务的处理。每本书都商请同行专家审议定稿。

我们希望本丛书的出版与发行能为推动四化建设与发掘人才起积极的作用。由于我们经验不足，缺点、甚至错误肯定不少，欢迎专家与广大读者批评指正，并提出积极的建议，以便改进我们的工作。

《自动化与仪器仪表》编委会

一九八三年五月

前 言

控制对象模型的辨识，是控制理论与工程自动化方面的重要课题，也是当前控制方面的六大热门之一，已引起许多人的注意。就模型研究的内容看，大概有：飞升法、频率法、统计法以及建立在时序分析基础上的数字计算机闭环方法等几种。飞升法有相当明显的对生产过程影响较大的缺点；频率法与统计法有测试时间长、使用仪器复杂、数据处理也相当烦杂等缺点；时序分析是一个值得推广的方法，但其应用前提是必须具备带数据采集的数字计算机，而且所包含的随机模型的研究目前尚未完全成熟，因此利用常规仪表或可调放大系数的放大器直接闭环测试，具有工程实践的意义。这种方法之所以目前应用不多，其原因有两点：

1. 对象模型结构难于确定；
2. 高阶模型计算很困难。

虽然国内外不少自动化工作者从事这方面内容的研究，但从已发表的论文或著作来看，假设条件过多，或应用了某些难于实现的补偿装置，因此至今尚没有很好解决工业控制对象模型结构和在实际工程中大量推广应用的问题。

工业控制对象模型研究有两个目的：一是进行系统的设计，如变参数对象的系统，全程调节的系统与耦合的系统，都建立在模型已知的基础上；二是正确设置调节器的整定参数，

使控制系统能够运行在近似最佳的工作状态。

我们的研究工作是把闭环试验方法从低阶推广到高阶,从等幅试验方法推广到衰减试验方法,提出在控制状态下简化模型的新方法,除了给出计算公式外,还作出图表可供实际使用。本书内容包括几个方面:闭环等幅振荡试验方法,闭环衰减试验方法,模型的简化、降阶与整化,闭环测试方法在设计中的应用,仪表的闭环试验以及其它常用的对象和仪表的试验方法。由于本书所介绍的方法是一种新的方法,不仅需要比较严密的理论推导,更重要的是需要实验证明,正因为这个原因,本书除了介绍理论方面的内容,还给出了大量的模拟试验结果及其处理,这些模拟试验例子不仅可以作为方法的证明,而且也可以作为读者应用本方法的练习。

著者以无限感激的心情,把此书奉献给自己的启蒙导师——浙江大学周春晖教授,感谢他曾在著者最困难的时候给予的许多指导和帮助。著者以同样的心情感谢重庆大学周其鉴教授,感谢他在百忙中审阅了本书,提出许多宝贵的意见。

由于著者学习不够,水平不高,书中难免有不少缺点和错误,欢迎读者批评指正。

著 者 一九八三年十一月

目 录

第一章 闭环等幅振荡试验的工程化

方法..... 1

- 一、闭环等幅试验的原理..... 1
- 二、两种重要模型的图解计算方法.....10
- 三、等幅闭环试验存在的问题.....18
- 四、改进的试验方法.....19

第二章 闭环衰减振荡试验的工程化

方法.....49

- 一、在衰减振荡状态下的对象特性描述.....49
- 二、两类典型对象的试验计算公式.....56
- 三、开环与闭环结合的试验方法.....69
- 四、衰减方法在现代模型辨识中的作用.....84
- 五、应用衰减法进行试验的限制条件.....87

第三章 模型的简化、降阶与整化.....90

- 一、最基本的简化模型.....90
- 二、自衡对象的模型简化.....92

三、无自衡对象的模型简化	112
四、模型的整化	128
五、模型的降阶	136
六、无自衡对象模型的整化与 降阶	138
七、四种特殊模型的转化	143
第四章 闭环测试方法的应用	154
一、在对象辨识中的应用	154
二、在整定调节器参数中的应用	169
三、在系统设计中的应用	180
四、估计控制系统的调节品质	192
第五章 调节器的闭环试验	199
一、现场的闭环调校	199
二、实验室的闭环试验方法	206
第六章 其它常用的模型试验方法	214
一、频率特性的闭环试验方法	214
二、阶跃响应曲线的图解方法	222
参考文献	234

第一章 闭环等幅振荡试验的工程化方法

一、闭环等幅试验的原理

很早以来^[1]，闭环等幅试验方法就应用于调节系统的参数整定，后来不断有人利用这种方法来研究控制对象的特性，例如美国辛斯基就应用这种方法来确定低阶对象的特性。图1-1表示一个闭环调节系统的组成，图中 $D(s)$ 表示调节器，

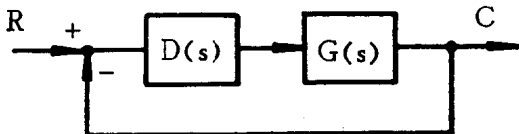


图1-1 简单闭环控制系统

$G(s)$ 表示包括 阀门及测量仪表在内的广义对象特性。由图求得闭环调节系统的传递函数：

$$W(s) = \frac{D(s)G(s)}{1 + D(s)G(s)} \quad (1-1a)$$

其特征方程式为：

$$1 + D(s)G(s) = 0 \quad (1-1b)$$

假如式(1-1b)中的 s 用 $j\omega$ 代替，表示特征方程式的根沿着 s 复平面的虚轴变化，这时调节系统处于等幅振荡状态。因此，

等幅振荡的边界条件式可写成:

$$D(j\omega)G(j\omega) = -1 \quad (1-2)$$

为使试验简单起见, 取 $D(s) = K_p$ (比例调节器)。当调节器与对象闭环以后, 调整 K_p 值使被调节变量处于等幅振荡状态, 记等幅振荡状态下的比例增益 K_p 及操作周期 T_s , 由这两个记录参数, 可以导出对象模型参数的计算式。

现举如下两例说明:

1. 纯滞后对象

对象模型记为:

$$G(s) = K_0 e^{-\tau s} \quad (1-3)$$

根据式(1-1b)与式(1-3)知道:

$$D(s)G(s) = K_p K_0 e^{-\tau s} = -1$$

利用 $s = j\omega = j\frac{2\pi}{T_s}$ 代入上式得:

$$K_p K_0 e^{-j\frac{2\pi\tau}{T_s}} = -1 \quad (1-4)$$

式(1-4)分别写成振幅与相角条件为:

$$K_p K_0 = 1 \quad (1-5a)$$

$$\frac{360^\circ\tau}{T_s} = 180^\circ \quad (1-5b)$$

由上述两式求得纯滞后对象的两个特征参数:

对象的静态增益

$$K_0 = \frac{1}{K_p}$$

对象的纯滞后时间常数

$$\tau = \frac{T_s}{2}$$

2. 具有纯滞后的积分对象

其对象特性记为：

$$G(s) = K_0 \frac{e^{-\tau s}}{s} \quad (1-6)$$

根据式(1-1b)与式(1-6)的关系有：

$$D(s)G(s) = \frac{K_p K_0 e^{-\tau s}}{s} = -1$$

将 $s = j\frac{2\pi}{T_s}$ 的关系代入上式得：

$$\frac{K_0 K_p e^{-j\frac{2\pi\tau}{T_s}}}{j\frac{2\pi}{T_s}} = -1$$

上述关系分别写成振幅与相角条件为：

$$\frac{K_0 K_p T_s}{2\pi} = 1 \quad (1-7a)$$

$$\frac{360^\circ \tau}{T_s} = \frac{180^\circ}{2} \quad (1-7b)$$

式(1-7a)与式(1-7b)联立，求出模型的两个特征参数为：

纯滞后时间常数

$$\tau = \frac{T_s}{4}$$

对象的静态增益

$$K_0 = \frac{2\pi}{K_p T_s}$$

根据闭环等幅振荡原理，可以得到表1-1所示典型对象的计算公式。

在表1-1中的 K_z 表示在反馈回路加入放大环节的比例增

表1-1 若干典型对象模型的闭环辨识计算公式

对象结构	测试参数	计 算 参 数	
$G(s)$		K_0	T
$K_0 e^{-\tau s}$	K_p, K_z, T_s	$K_0 = \frac{1}{K_p K_z}$	$\frac{T_s}{2}$
$\frac{e^{-\tau s}}{T_s}$			$\frac{T_s}{4}$
$\frac{K_0 e^{-\tau s}}{T_s + 1}$		Δ_1	$\frac{T_s(180^\circ - \tan^{-1} \frac{2\pi T_s}{T_s})}{360^\circ}$
$\frac{K_0 e^{-\tau s}}{(T_s + 1)^2}$		Δ_1	$\frac{T_s(180^\circ - 2 \tan^{-1} \frac{2\pi T_s}{T_s})}{360^\circ}$
$\frac{K_0 e^{-\tau s}}{(T_s + 1)^3}$		Δ_1	$\frac{T_s(180^\circ - 3 \tan^{-1} \frac{2\pi T_s}{T_s})}{360^\circ}$

续 表

对象结构	测试参数	计 算	参 数
$\frac{K_0 e^{-\tau s}}{(Ts+1)^0}$		Δ_1	$\frac{T_s \sqrt{(K_0 K_p K_z)^2 - 1}}{360^\circ}$
$\frac{K_0 e^{-\tau s}}{s(Ts+1)}$		Δ_2	$\frac{T_s \sqrt{\left(\frac{K_0 K_p T_z}{6.28}\right)^2 - 1}}{360^\circ}$
$\frac{K_0 e^{-\tau s}}{s(Ts+1)^2}$		Δ_3	$\frac{T_s \sqrt{\left(\frac{K_0 K_p T_z}{6.28}\right)^2 - 1}}{360^\circ}$
$\frac{K_0 e^{-\tau s}}{s(Ts+1)^3}$		Δ_4	$\frac{T_s \sqrt{\left(\frac{K_0 K_p T_z}{6.28}\right)^2 - 1}}{360^\circ}$
$\frac{K_0 e^{-\tau s}}{s(Ts+1)^n}$		Δ_5	$\frac{T_s \sqrt{\left(\frac{K_0 K_p T_z}{6.28}\right)^2 - 1}}{360^\circ}$

益。在本章后面有关章节将要介绍加入 K_z 的目的，这是减少在等幅振荡状态下被控制(或被测试)变量的振幅。这种情况多数发生在变送器量程选择较大的场合，这种情况改变变送器的量程实际上可以减少被测试变量的振幅。在不少场合下，减少变送器的量程尚不能使被测试变量的振幅减少到不影响正常生产的程度，可以在变送器的输出端，加入一个起比例作用的比例积分调节器，其接线方式如图 1-2 所示。并按照如下顺序进行操作：

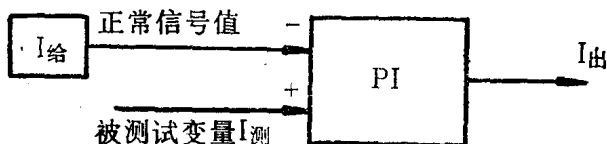


图1-2 在反馈回路接入放大环节的常用方法

(1) PI 调节器的作用形式选择反作用型(即将调节器的作用型式开关切换到“反作用端”)。利用内给定(或外给定)设置 PI 调节器的给定值，使其给定信号等于被测试变量的正常(或称额定)控制信号。

(2) 调节器的比例带设置为 $\delta\%$ ，积分时间设置为50~100秒之间的任意值。然后手动调整 $I_{\text{给}}$ 信号，直到下列条件满足为止：

$$I_{\text{给}} = I_{\text{测}} = I_{\text{出}}$$

调节器的比例带 $\delta\%$ 同 K_z 有如下关系：

$$\delta\% = \frac{1}{K_z} \times 100\%$$

(3) 立即将 PI 调节器的积分时间切断(积分时间 T_i 为 ∞)。这时 PI 调节器起着比例放大器的作用。

当然, K_z 还可以用其它方式来实现, 但是对现场应用来说, 应用 PI 调节器来实现是比较简单易行的一种方法。

如果对象的结构形式可以从工艺的分析知道, 利用表1-1所列公式, 即很容易计算出模型参数 τ 与 T 。表中 Δ_1 表示由图1-1所示结构的终值定理确定, 即:

$$\frac{\Delta C}{\Delta R} = \frac{K_p K_0}{1 + K_p K_0}$$

故知:

$$K_0 = \frac{\Delta C}{K_p(\Delta R - \Delta C)} \triangleq \Delta_1$$

Δ_2 表示 $D(s)$ 为:

$$D(s) = \frac{T_D s}{1 + T_D s}$$

根据终值定理知道:

$$\lim_{s \rightarrow 0} \frac{D(s)G(s)}{1 + D(s)G(s)} = \frac{T_D K_0}{1 + T_D K_0} = \frac{\Delta C}{\Delta R}$$

因此有:

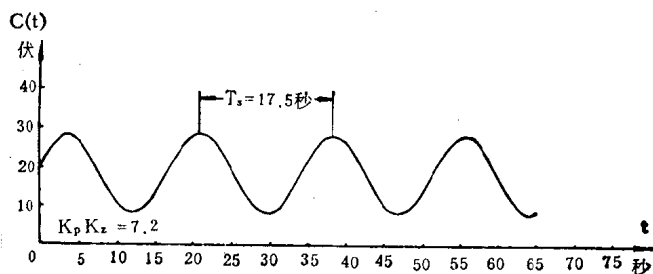
$$K_0 = \frac{\Delta C}{T_D(\Delta R - \Delta C)} \triangleq \Delta_2$$

但是, 对于大多数的工业生产过程对象, 其模型的结构往往是未知的, 所以在一般场合下无法直接应用。

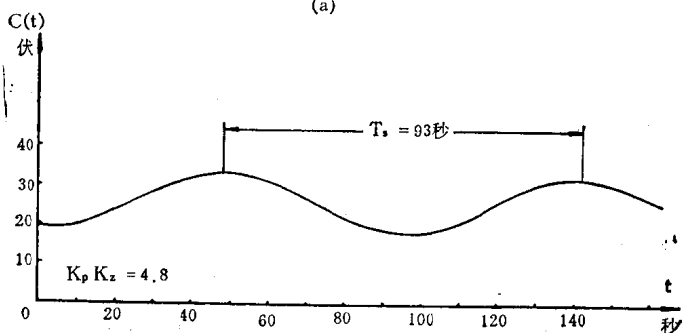
为了验证理论公式的正确性, 著者在模拟计算机上进行了一系列的试验。这里例举几种有代表性的对象试验曲线, 作为理论计算公式的验证和表1-1应用的说明。图1-3(a)曲线所对应的对象特性为:

$$G(s) = \frac{1 \times e^{-4.75s}}{20s + 1}$$

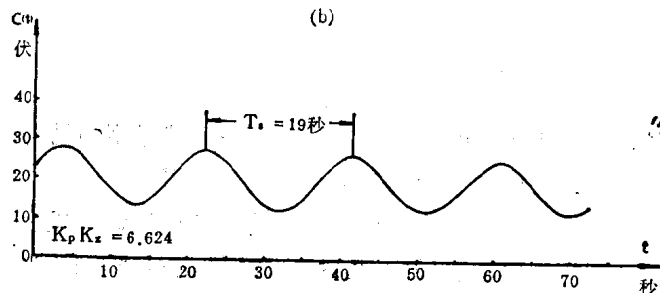
试验记录: $T_s = 17.5$ 秒, $K_0 K_p K_z = 7.2$ 。根据表 1-1 的计



(a)



(b)



(a) $G(s) = \frac{1 \times e^{-4.7s}}{20s+1}$ 的等幅试验曲线 (b) $G(s) = \frac{1 \times e^{-6s}}{(20s+1)^3}$

的等幅试验曲线 (c) $G(s) = \frac{e^{-4.75s}}{20s}$ 的等幅试验曲线

图1-3 若干对象的闭环试验曲线