

化工自动化丛书

化工对象动态特性 测试方法

潘立登 编

化学工业出版社

化工自动化丛书

化工对象动态特性 测试方法

潘立登 编

化学工业出版社

内 容 简 介

《化工对象动态特性测试方法》是《化工自动化丛书》的一个分册。全书共分七章。第一章概述了实验测试的特点。第二、第三章介绍时间域测试法,主要讨论图解法、面积法及最小二乘法。第四章介绍频率域测试法,着重讨论谐波分析法、快速富里叶变换及倒频率特性的曲线拟合法。第五章介绍随机信号测试法,重点讨论用相关技术与PRBS辨识SISO系统与MIMO系统。第六章比较系统地介绍几种参数估计方法,尤其对各种类型的最小二乘法,如LS、GLS、ELS与MSLS作了深入的分析,并介绍了用随机数直接搜索的参数估计法与用子模型辨识MIMO系统的技术。第七章讨论了闭环系统可辨识性的条件,并分析了三种可行的辨识方案。全书对主要辨识方法都作了较系统的推导,并列举了大量实例,对主要测试仪器的工作原理也作了介绍。

本书可供从事工业自动化、系统辨识与参数估计的有关人员阅读,也可供大专院校有关专业的师生参考。

化工自动化丛书 化工对象动态特性测试方法 潘立登 编

责任编辑:刘 哲

封面设计:任 辉

*

化学工业出版社出版发行

(北京和平门七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所经销

*

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ 印张13插页1字数285千字

1989年1月第1版 1989年1月北京第1次印刷

印 数 1—1,860

ISBN 7-5025-0248-3/TQ·204

定 价 4.00元

编写说明

近年来，随着化学工业和自动化科学技术的迅速发展，化工自动化技术有了新的进展。以现代控制理论为基础的各种新型控制方法和调节系统相继成功地应用于化工生产；新型的自动控制技术工具以及电子计算机也日益广泛用于化工自动化领域。

为了总结交流我国化工生产应用自动化技术的经验，介绍新的调节理论和控制方法，提高从事化工自动化工作的工人和技术人员的理论和技术水平，促进化工自动化工作的发展，一九七五年，在炼油、化工自动控制设计业务建设会议上，决定由化工部炼油、化工自动控制设计技术中心站负责，组织有关院校、科研设计单位和工厂，编写一套《化工自动化丛书》。

《化工自动化丛书》是在普及的基础上侧重提高的一套读物，主要包括经典和现代控制理论，各类调节系统和化工单元操作控制等方面的题材。“丛书”内容力求密切反映化工应用的特点，做到理论联系实际，既阐明基本概念，作出理论分析，又叙述工程应用方法和应用实例，说明具体实施方案和现场运行经验。

《化工自动化丛书》编委会成员

- 主任委员 周春晖 (浙江大学)
- 副主任委员 蒋慰孙 (华东化工学院)
- 万学达 (中国寰球化学工程公司)
- 王骥程 (浙江大学)
- 沈承林 (北京化工学院)
- 委 员 韩建勋 (天津大学)
- 庄兴稼 (抚顺石油学院)
- 李乾光 (中国天津化学工程公司)
- 林秋鸿 (中国石油化工总公司、
 北京石油化工工程公司)
- 王 翼 (南开大学)
- 徐炳华 (化工部第三设计院)
- 钱积新 (浙江大学)
- 俞金寿 (华东化工学院)
- 孙优贤 (浙江大学)
- 罗秀来 (上海炼油厂)
- 蔡鸿雄 (兰州化学工业公司
 对外经济协作处)

目 录

前 言

第一章 化工对象动态特性及其测试特点	4
第一节 化工对象的动态特性	4
第二节 对象动态特性的表示方法	7
一、对象的微分方程式与状态方程	7
二、对象的传递函数	10
三、对象的频率特性	11
四、对象的脉冲反应函数	13
五、对象的阶跃反应函数	16
六、对象的差分方程	17
第三节 了解对象动态特性的基本方法	18
一、阶跃法	20
二、矩形脉冲法	21
三、周期信号法	22
四、随机信号法	25
第四节 测试对象动态特性的准备工作	25
一、了解被测对象的特点	26
二、确定测试通道与干扰量	26
三、选择测试方案与测试仪表	26
第五节 测试对象动态特性时的注意事项	32
第二章 阶跃信号测试法	34
第一节 实验测取对象的阶跃反应曲线	34
第二节 根据阶跃反应曲线确定对象的动态参数	38
一、由阶跃反应曲线确定一阶滞后环节的动态参数	39

二、由阶跃反应曲线来确定带纯滞后 τ 的一阶滞后环节的	
动态参数	43
三、由阶跃反应曲线确定二阶滞后环节的动态参数	45
四、由阶跃反应曲线确定无自衡对象的动态参数	58
五、由阶跃反应曲线确定具有微分特性的对象的动态	
参数	62
第三节 由阶跃反应曲线确定对象传递函数的半对数	
图解法	66
第四节 从对象的阶跃反应曲线求传递函数的面积法	77
第五节 结论	94
第三章 脉冲信号测试法	95
第一节 实验测取对象的脉冲反应曲线	95
第二节 将矩形脉冲反应曲线转换为阶跃反应曲线	
的方法	98
第三节 从对象的矩形脉冲反应曲线求传递函数的	
面积法	102
第四节 用最小二乘法辨识对象的脉冲反应函数	116
一、最小二乘估计	118
二、最小二乘估计的性质	121
三、求解正则方程的一种优良算法	123
四、在线最小二乘算法	133
第五节 由对象的脉冲反应曲线确定其传递函数	140
第六节 结论	146
第四章 频率域测试法	148
第一节 实验测取对象的频率特性	148
第二节 用组合正弦波方法测取对象的频率特性	154
一、测试方法	154
二、数据处理	156
第三节 用矩形波或梯形波方法测取对象的频率特性	162

一、测试方法	162
二、数据处理	166
第四节 由矩形波脉冲反应曲线确定对象的频率特性	170
第五节 由阶跃反应曲线求取对象的频率特性	177
第六节 由脉冲反应曲线求取对象的频率特性	181
一、矩形法	181
二、采用快速富里叶变换技术	187
第七节 由实验频率特性曲线求取对象的传递函数	194
一、由对数幅频特性及相频特性曲线求取对象的传递函数	195
二、由倒实频特性与倒虚频特性求取对象的传递函数	197
第八节 频率特性测试仪器的基本原理	209
一、双积分法超低频信号发生器	210
二、频率特性测试仪	211
第九节 结论	213
第五章 随机信号测试法	214
第一节 随机信号的统计描述	215
第二节 相关函数及频谱密度的基本概念	218
一、相关函数	218
二、频谱密度 (或称功率密度谱、谱密度)	223
第三节 用相关函数来确定对象动态特性	226
一、脉冲反应函数的辨识	226
二、对象的 z 传递函数的辨识	230
三、在线辨识算法	234
第四节 相关辨识与最小二乘法的关系	239
第五节 输入信号的最优设计	241
第六节 用伪随机信号测取对象动态特性	244
一、伪随机信号	244
二、用PRBS确定对象特性	251

三、在线辨识算法	258
四、用改进FFT计算对象的脉冲反应函数	261
第七节 多变量系统辨识	266
第八节 随机信号法测试仪器的基本原理	269
一、伪随机信号发生器	269
二、相关仪	277
三、频谱密度分析仪	279
第九节 结论	281
第六章 用参数估计方法的系统辨识	282
第一节 模型结构	282
一、系统模型	282
二、几种典型模型	285
三、推广的自回归滑动平均模型(The extended auto-regressive, moving average model, 或ARMAX)	286
第二节 最小二乘法	289
一、直接最小二乘估计	289
二、最小二乘估计的统计特性	292
三、在线最小二乘估计	295
四、模型阶次的确定	297
1. 模型的拟合度检验 (即LF法)	298
2. 模型误差独立性检验 (即IO法)	299
五、纯滞后时间的确定	300
六、参数数目增加时的递推算法	302
七、时变参数的实时辨识	305
第三节 广义最小二乘法	317
一、广义最小二乘估计算法	318
二、偏差校正的GLS算法	325
三、推广最小二乘法(ELS-M)	333
第四节 辅助变量法	338

第五节 多步最小二乘法	342
一、多步最小二乘法 I (Multistage Least-squares Method I 或 MSLS I)	343
二、多步最小二乘法 II (MSLS II)	346
三、多步最小二乘法 III (MSIS III)	347
四、多步最小二乘法及广义最小二乘法的比较	352
第六节 用随机数直接搜索法	355
第七节 多变量系统的辨识	362
一、子模型技术	362
二、子子模型技术	365
三、辨识算法	367
四、MIMO 辨识的实际应用 ^[56]	368
第八节 系统辨识软件包	371
第九节 结论	372
第七章 闭环测试法	374
第一节 闭环系统的可辨识性	374
第二节 闭环系统的间接辨识	381
一、间接辨识原理	381
二、NLJ 辨识	383
三、简化模型辨识法	386
第三节 闭环系统的直接辨识	391
一、直接辨识原理	391
二、相关最小二乘法辨识	392
三、闭环系统直接辨识的应用	395
第四节 闭环系统的联合过程辨识	396
第五节 结论	399
参考文献	400

前 言

化工对象的动态特性是设计自动调节系统时选择调节通道、确定调节方案、分析质量指标、探索最优工况及调节器的参数整定等的重要依据，特别是新的控制方案设计，例如前馈控制、热焓控制、最优控制、自适应控制……，更离不开对象的动态特性。

化工对象动态特性的研究已受到各方面的重视，并逐步发展成为一门新的学科——过程动态学。然而，由于本学科的历史较短，加上化工对象较为复杂，某些物理、化学变化的机理还不完全了解，而且线性的并不多，大多数又是分布参数（参数往往同时是位置和时间的函数），所以目前尚处于科研阶段。通常采用理论解析法、实验测试法以及这两种方法的结合进行研究。

随着电子计算机与最优化理论、参数估计理论的迅速发展，根据系统的输入，输出数据建立系统模型的技术已经得到飞快的发展，并形成了一门新的学科——系统辨识。七十年代以来，国际上发表了大量有关系统辨识与参数估计方面的论文，各种辨识方法陆续诞生与被应用。国际自动控制联合会（IFAC）召开了六次关于辨识与系统参数估计的讨论会，一些专著也陆续问世。系统辨识的应用已经从自动控制领域日益渗透到生物学、医学和经济学乃至社会学。近年来，系统辨识在我国发展也很迅速，不仅对各种辨识方法的应用，而且对辨识方法与软件包的开发也作了大量的研究，

并已在很多领域，如航天、化工、炼油、冶金等工业部门取得成果。

本书与一些已经出版的系统辨识书籍比较，特别强调工程应用。它将经典方法与近代发展起来的参数估计方法结合起来，以不同的测试信号进行分类。叙述中注意由浅入深，由简到繁。在数据处理中，有精度低的，也有精度高的，以满足工程实践中不同辨识目的的需要。书中力求对所介绍的方法既有理论根据，又有实用步骤，并采用了大量的数值计算与实际应用的例子作为数据处理方法的补充说明。第一章主要介绍几种模型的表示方法及测试方法、具体步骤等实践方面的问题。第二章讨论阶跃信号测试法，重点介绍图解法与面积法。第三章为脉冲信号测试法，主要介绍面积法与最小二乘法，并讨论最小二乘估计的统计特性、克服病态的优良解法和在线算法。第四章专门讨论频率域测试法，重点介绍组合正弦波、快速富里叶变换技术和倒频率特性的最小二乘曲线拟合法。第五章与第六章是本书的重点。第五章研究随机信号测试法，从平稳随机过程的特点出发，运用相关技术与伪随机信号测取对象的动态特性，并从理论上阐述了相关法与最小二乘法的关系，讨论了最优输入信号的设计，指出PRBS是实际上的最优信号。也扼要地介绍了用PRBS辨识多变量系统的脉冲反应函数的原理，对PRBS的产生和特性都作了较详细的分析。第六章介绍用参数估计方法的系统辨识问题，最小二乘法是系统辨识中应用最广泛的方法，故用了大量篇幅讨论几种最小二乘法，如LS、GLS、偏差校正GLS、ELS与MSLS，不仅给出估计算法，而且介绍模型阶次与纯滞后时间的确定方法。还介绍了用随机数直接搜索的最优化方法，与用子模型辨识多变量系统的方法。第七章

讨论闭环测试法，主要讨论闭环系统的可辨识性，因为满足了可辨识性条件，就可使用各种参数估计方法进行辨识。

系统辨识与参数估计的方法还有很多，诸如最大似然法、随机逼近法、推广的卡尔玛滤波算法、富里叶分析算法等，限于篇幅，不能一一给予介绍。有兴趣的读者可参阅有关文章。近年来，国内外都已开发了很多系统辨识软件包，这对于推广应用系统辨识方法是很有意义的。我们深信在不久的将来，系统辨识软件包一定会在实践中不断完善，内容更加丰富，使用更加方便与灵活。

系统辨识是一门理论性很强，且与实践密切联系的新学科，由于编者水平所限，书中内容难免有不当或错误之处，请多多批评指正。

本书承蒙天津大学李光泉教授和北京化工学院沈承林教授仔细审阅，提出了很多宝贵的意见。北京化工学院计算站邱道发同志为本书的例题做了大量的计算。借此机会对他们表示衷心地感谢。

编者 1984.12

第一章 化工对象动态特性 及其测试特点

第一节 化工对象的动态特性

近年来，电子计算机，尤其是微型计算机技术的迅速发展，导致了广泛使用工业控制计算机对生产过程的分析管理与控制。计算机能在短时间内采样与存贮过程的测量数据，

并及时地对数据进行处理，使生产过程处于最优，有最好的产品质量等等。使生产过程处于最优操作的重要条件就是要了解有关生产过程的过去、现在乃至未来的动态特性。这种生产过程在自动调节系统中，都被称为对象，它的特性就称为对象特性。

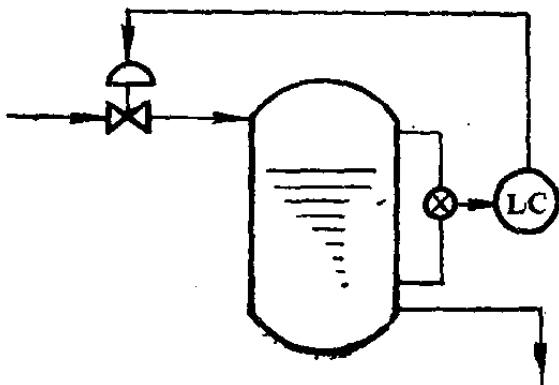


图1-1 液位调节系统

对于一个对象，如图1-1所示的贮槽，它的液位就是这个对象的被调参数。进料流量与出料流量的改变都是引起被调量变化的因素，称为对象的输入参数，在自动调节系统中也称为干扰作用，其中有的干扰作为一种调节手段，称为调节作用。这个贮槽的进料流量就是调节作用，出料流量就是干扰作用。输入参数至被调参数的信号联系称之为通道，调节作用至被调参数的信号联系称之为调节通道，干扰作用至

被调参数的信号联系称之为干扰通道，因此，对象特性要区分为哪个通道的特性。

对象是经典控制理论中的术语（在现代控制论中往往称为被控过程或系统的数学模型）。对象特性就是指被控过程的运动规律，可分为静态特性与动态特性。静态特性是指对象输出量与输入量在稳定状态下的关系，动态特性是指对象输出量与输入量随时间变化的规律，通常动态特性也包括静态特性。

对于每个具体的化工对象，其动态特性往往是随着负荷的变化而变化的，这就给研究对象动态特性的工作带来了较大的困难。但在一般情况下，当输入量在较小范围内变化时，输出量也是在较小范围内变化，这时就可将对象动态特性在工作点附近进行线性化，简化了问题的处理方法，同时也可以运用叠加原理，即在对象受到好几个干扰（输入量）作用时，它们对被调参数的总的作用等于每个干扰单独作用所引起的效果的总和。因此，研究对象动态特性时要充分注意其非线性，对于负荷变化较大的对象，往往将它在不同的工作点下分成若干个小的区段，在相应的每个区段内则可以认为对象是线性的。

对于一些复杂对象，例如精馏塔，它的输入量与输出量均较多，称为多变量对象。严格来讲，这些变量又都是分布参数（同时是位置与时间的函数），使问题更为复杂。但在实际应用的情况下，为了简化，目前往往都用集中参数（仅为时间的函数，与位置无关）来近似处理。如有 n 个输出量、 m 个输入量的对象，无论对于哪一个输入量，都将有 n 个通道的动态特性，因此总共将有 $n \times m$ 个通道的特性。对于第 i 个输出量 y_i 与第 j 个输入量 x_j 之间的动态特性如用

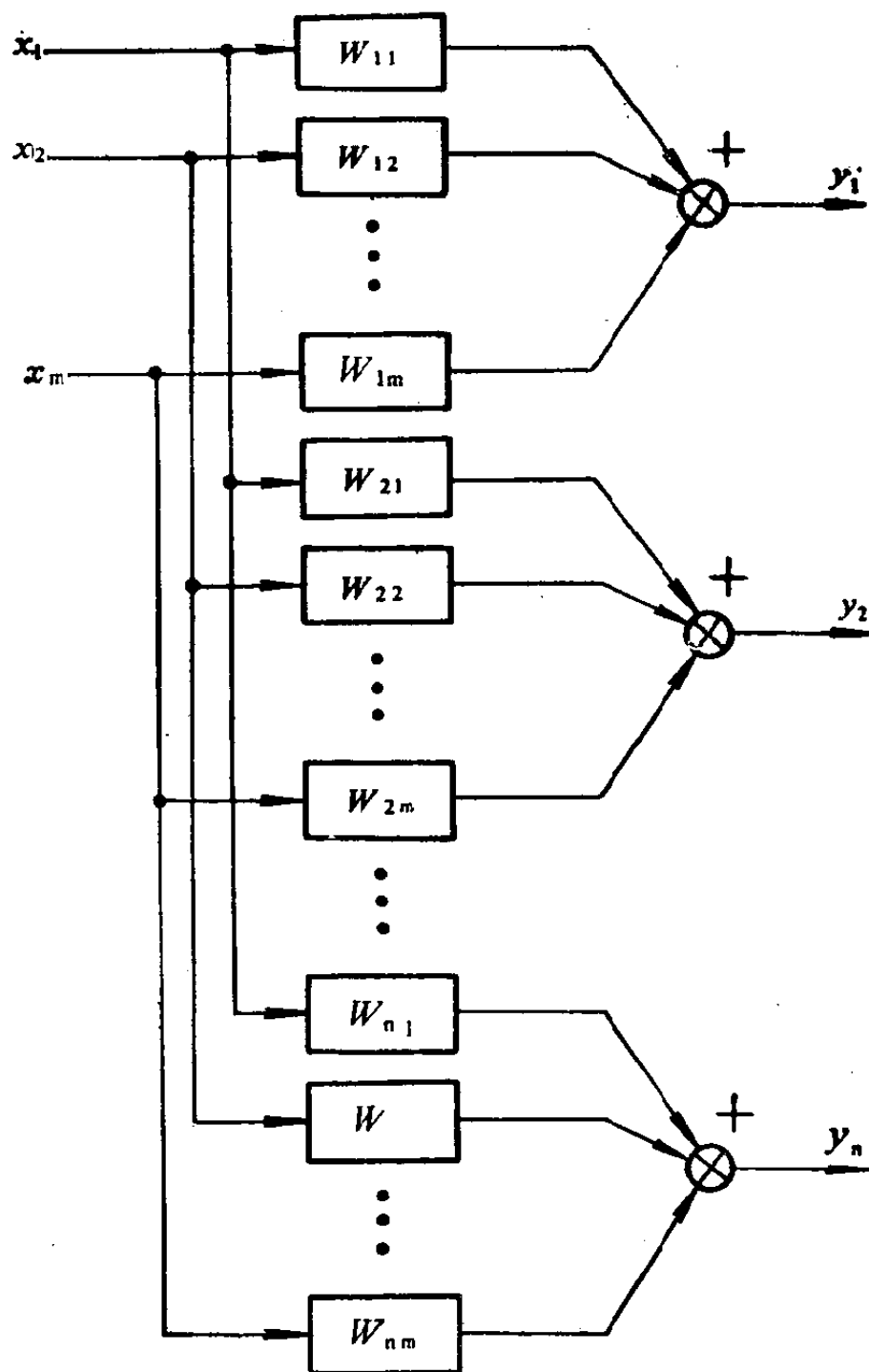


图 1-2 多变量对象的方块图

$W_{ij} \begin{pmatrix} i=1,2,\dots,n \\ j=1,2,\dots,m \end{pmatrix}$ 表示, 则这个复杂对象的动态特性可以用一个矩阵表示:

$$W = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} \cdots w_{1m} \\ w_{21} & w_{22} \cdots w_{2m} \\ \vdots & \\ w_{n1} & w_{n2} \cdots w_{nm} \end{bmatrix} \quad (1-1)$$

它的动态特性结构图如图1-2所示。

第二节 对象动态特性的表示方法

表示对象动态特性的方法较多，主要有用解析法表示的微分方程式、传递函数、频率特性，也有用实验测取到的曲线表示法，如阶跃反应曲线（即阶跃反应函数）、脉冲反应曲线（即脉冲反应函数）、矩形脉冲反应曲线、幅相特性曲线等，它们之间是可以互相转换的。在现代控制论中，则有状态方程、输入输出方程、随机模型等。

一、对象的微分方程式与状态方程

对于线性对象，通常可用常系数线性微分方程来描述它的运动规律，其输入量用 $x(t)$ 表示，输出量用 $y(t)$ 表示。

对于自衡对象，它可用下述的微分方程式表示：

$$\begin{aligned} & a_n y^{(n)}(t) + a_{n-1} y^{(n-1)}(t) + \cdots + a_1 y'(t) + a_0 y(t) \\ & = b_m x^{(m)}(t) + b_{m-1} x^{(m-1)}(t) + \cdots + b_1 x'(t) + b_0 x(t) \end{aligned} \quad (1-2)$$

式中， $m \leq n$ 。

对于无自衡对象，它可用下述的微分方程式表示：

$$\begin{aligned} & a_n y^{(n)}(t) + a_{n-1} y^{(n-1)}(t) + \cdots + a_1 y'(t) \\ & = b_m x^{(m)}(t) + b_{m-1} x^{(m-1)}(t) + \cdots + b_1 x'(t) + b_0 x(t) \end{aligned} \quad (1-3)$$

式中， $m \leq n$ 。