


# 闭环过程辨识 理论及应用技术

杨平 于会群 彭道刚 徐春梅 著

电气自动化新技术丛书

 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

电气自动化新技术丛书

# 闭环过程辨识理论及应用技术

杨平 于会群 彭道刚 徐春梅 著

机械工业出版社

本书主要是探讨面向控制需求的闭环辨识的基本理论以及工程应用技术，探索可工程实现的闭环辨识新方法和新技术。

本书提出了新的辨识六要素定义，关于闭环辨识的可辨识性和可辨识条件的新看法，模型辨识准确度的新定义和通用指标，不稳定过程的闭环辨识新方法，辨识数据采集的参数优化方法以及闭环辨识设定值激励的新技术。本书尽力避免那些晦涩难懂、故弄玄虚和空洞无物的理论阐述，致力于可解决工程实际问题的理论应用问题的研究。所提出的理论方法和应用技术可以认为是当前流行的大数据分析中急需的一种人工智能应用技术——数据驱动建模技术，利用它可完成通用的受控过程的模型自动创建任务。

本书适合于从事控制理论应用研究以及有关大数据分析、人工智能、智能工厂、智能机器人和智能识别研究的高校师生和研究所研究人员参考，也适合于从事电力、化工、信息、能源等产业的有关自动化及智能装备的研发人员、维护工程师和技术人员阅读。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

闭环过程辨识理论及应用技术/杨平等著. —北京: 机械工业出版社, 2019. 5

(电气自动化新技术丛书)

ISBN 978-7-111-63021-0

I. ①闭… II. ①杨… III. ①反馈控制系统—辨识—研究 IV. ①TP271

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 124550 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 林春泉 责任编辑: 林春泉

责任校对: 赵燕 封面设计: 马精明 责任印制: 张博

北京铭成印刷有限公司印刷

2019 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 8.75 印张 · 168 千字

0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-63021-0

定价: 45.00 元

电话服务

网络服务

客服电话: 010-88361066

机工官网: [www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

010-88379833

机工官博: [weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

010-68326294

金书网: [www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

封底无防伪标均为盗版

机工教育服务网: [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

## 前 言

迄今为止，先进控制技术还是很难在实际工程应用中流行起来，原因固然有很多，但至少有一个原因是可以明确的，那就是过程模型辨识应用技术远未成熟。先进控制之所以优越于常规控制，多半依赖于那些针对过程模型所设计的最优控制规律。如果过程模型不准确，那么先进控制的优越性就体现不出来；如果过程模型未知，那么先进控制就成了无源之木，失去了生命力。以在实际应用中最有成效的预测控制为例，其优越性是建立在输出预测准确的基础之上，而输出预测依赖于过程模型，过程模型则必须通过建模试验和建模计算获得（这个建模试验和建模计算就包含了模型辨识技术）。预测控制系统投入运行前必须置入对应的过程模型，而且每过一段时间，需要修整已置入的过程模型。否则，模型的不准确性将直接影响预测控制的品质。所以，每个预测控制应用成功案例都是建立在过程模型被准确辨识的基础上，而每个预测控制应用不成功案例的主要原因则必然包括所依赖的过程模型不够准确。

其实，即便是在实际工程中应用常规控制技术，也需要模型辨识技术来助力。例如，常见的 PID 控制系统在投入实际运行一段时间以后，也常常需要根据实际控制效果重新整定参数，因为过程模型的特性会由于设备老化、环境改变或负载改变而变化。这时，非常需要一种好用的模型辨识技术来助力，只要能够辨识出过程模型参数，那么 PID 控制器的参数重新整定工作就可轻松地完成。

遗憾的是，虽然辨识理论已有近 60 年的发展历史，但是让控制工程师应用起来还是十分困难。面对复杂的实际工程应用问题，似乎成熟且丰富的辨识理论一下变得空洞和贫瘠起来，许多很基本的概念变得模糊不清。例如，按照辨识理论，辨识激励信号至少应该是被辨识系统的  $n$  阶持续激励信号；可是用一阶的阶跃信号做辨识激励并获得成功的案例比比皆是，难道辨识理论错了？再例如，按照传统的辨识理论，闭环辨识存在可辨识性问题，不满足可辨识条件的闭环系统不应该采用直接辨识方案；可是在实际工程中差不多都是采用直接辨识方案，并且许多系统也不满足已提出的闭环可辨识条件。还有，实际工程中不存在纯理论研究中假设的、纯粹的干净条件。现实的条件不是纯线性的，不是零均值的白噪声，不是单变量的，不是开环的，也不是零初值的等。所以，如果按照实际的现实条件来找对应的辨识理论，那就找不到可用的理论了！即便能找到一些方法研究的文献，看到一些成功应用的案例，也往往只是特例理论，不可通用。

总之，已有的辨识理论在面对当今的工程应用实践的需求时已经显得力不从

心、指导乏力了。特别是在大数据分析盛行，机器学习、人工智能等大力发展的年代、迫切需要发展更先进的辨识理论和更实用的辨识技术，这就是本书写作的初心。当然，本书只专注在闭环辨识工程应用这个限定的领域内做了一些力所能及的探索。

本书还可以看成是作者《多容惯性标准传递函数控制器——设计理论及应用技术》和《PID 控制器参数整定方法及应用》两本书的延续。因为《多容惯性标准传递函数控制器——设计理论及应用技术》一书提出了一种依赖于过程模型的先进控制技术，《PID 控制器参数整定方法及应用》一书提出了依赖于过程模型的 PID 控制器参数整定技术，而本书《闭环过程辨识理论及应用技术》正是提供了一种过程模型辨识的实用理论和技术。

杨平

2019 年 4 月

# 目 录

## 前言

第 1 章 闭环过程辨识研究进展点评	1
1.1 闭环过程辨识的基本概念	1
1.2 闭环过程辨识的可辨识性	4
1.3 闭环过程辨识的辨识方案	5
1.4 闭环过程辨识的激励信号	6
1.5 闭环过程辨识的优化计算方法	7
1.6 闭环过程辨识的过程模型结构	8
第 2 章 闭环过程辨识理论的研究	10
2.1 模型辨识准确度	10
2.2 辨识试验方案设计与过程激励和响应数据采集	13
2.3 闭环可辨识性问题和闭环辨识条件	30
2.4 辨识优化计算与模型动态特性仿真	39
2.5 激励信号	41
2.6 直接辨识方案	49
2.7 间接辨识方案	50
2.8 非零初态条件下的过程辨识	59
2.9 不稳定过程的闭环过程辨识	63
2.10 有色噪声背景下的闭环过程辨识	69
2.11 模型结构辨识及基于阶跃响应特征的模型结构初定方法	75
2.12 扰动下的闭环过程辨识	82
第 3 章 设定值激励闭环过程辨识的仿真试验	85
3.1 大惯性过程的闭环辨识	85
3.2 大时滞过程的闭环辨识	87
3.3 积分过程的闭环辨识	88
3.4 微分过程的闭环辨识	90
3.5 振荡过程的闭环辨识	92
3.6 非最小相位(右零点)过程的闭环辨识	94
第 4 章 闭环过程的设定值激励直接辨识技术	97
4.1 设定值激励信号的类型选择和参数整定	97
4.2 智能优化算法辨识的算法参数和模型参数域整定	100
4.3 闭环过程设定值激励直接辨识技术	104

4.4 闭环过程设定值激励直接辨识技术的仿真试验·····	105
第5章 设定值激励闭环过程辨识实物的试验案例·····	110
5.1 热电偶自动检定装置及检定炉炉温的控制·····	110
5.2 检定炉炉温过程数学模型·····	111
5.3 检定炉炉温过程模型的闭环辨识试验·····	112
第6章 结论与展望·····	119
6.1 结论·····	119
6.1.1 辨识的六要素定义·····	119
6.1.2 模型辨识准确度的计算和评价·····	120
6.1.3 被辨识过程的模型结构初步确定方法·····	121
6.1.4 闭环辨识理论的几个新观点·····	122
6.1.5 不稳定过程的闭环辨识方法·····	126
6.1.6 有色噪声背景下的闭环辨识方法·····	127
6.1.7 基于智能优化算法的设定值激励闭环过程直接辨识技术·····	129
6.1.8 热电偶自动检定装置上的实物试验验证案例·····	129
6.2 展望·····	130
参考文献·····	131

# 第 1 章 闭环过程辨识研究进展点评

闭环过程辨识的理论经过 60 多年的研究有了不少成果。在辨识方案中，最基本也是最常用的方案是直接辨识法和间接辨识法。在辨识激励信号中，通常选用白噪声、伪随机信号和阶跃信号。在辨识模型的优化计算方法中，以往用得最多的是最小二乘法；现今更多的人选用的是现代智能优化计算方法。在被辨识过程模型结构中，更倾向于根据过程控制的需要，选用低阶的少参数的线性模型。在被辨识过程模型的选用，较多的是选用离散时间模型，但选用更通用的连续时间模型的比例正在逐渐增加。

## 1.1 闭环过程辨识的基本概念

### 1. 关于辨识

据参考文献 [1]，辨识的经典定义源自前辈 Zadd L、Eykholf P、Strejc V 和 Ljung L。尤其是 Ljung L 的定义备受推崇。

【Ljung L 的“辨识”定义】辨识有 3 个要素：数据、模型类和准则。辨识就是按照一个准则，在一组模型类中选择一个与数据拟合得最好的模型。

笔者认为 Ljung L 的辨识定义虽经典和揭示了辨识的主要本质，但仍不够完善。辨识本身应该不只这 3 个要素，还有以下所述的 3 个要素不可或缺，所以不应被忽视。

首先，被辨识过程（过去常被笼统地称为“系统”）就是一个不可忽略的辨识要素。因为与数据拟合得最好的模型并不一定能代表或等价于被辨识过程。辨识的目的不就是寻求被辨识过程的等价模型吗？只要对辨识理论有一定的实践后就不难发现，常见的情况是与数据拟合得很好的模型并不能代表被辨识过程。这或许是因为所依赖的数据不能代表被辨识过程，或许是因为辨识优化计算完成后并没有求得全局最优解。关于所辨识得到的模型是否能代表被辨识过程已有许多种判别方法，但并没有大家一致公认的标准方法。利用被辨识过程先验知识的方法算是其中的一种。例如，对一个公认的、具有自平衡特性的过程进行辨识时，如果得到了一个具有无自平衡特性的过程模型，那么凭借已有的、具有自平衡特性的先验知识就可以断定所辨识得到的这个模型肯定不是所期待的正确模型。事实上，当你依据一个有自平衡特性过程的阶跃响应起始段曲线的数据来辨识模型时，如果采用有自平衡特性过程模型结构进行辨识计算时就可能得到正确过程模型；如果采用无自平衡特性过程模型结构进行辨识计算时就可能得到具有无自平



衡特性的错误过程模型。

其次，进行辨识的过程中，“激励”这个要素更不应该忽略。众所周知，对任何被辨识过程，无激励就无响应，或者零激励下只能得到零响应。零响应的数据就是无价值的。用无价值的数据进行辨识计算，即使求得了模型也是无价值的模型。此外，激励这个要素非但不可或缺，而且还必须有足够的强度、能量和较适合的频谱带宽才行。试想，当激励信号比背景噪声还要弱时，得到的响应数据又怎能体现被辨识过程在正常激励下的基本响应特性？另一方面，若用低频信号激励具有高频特性的被辨识过程，那么用所得的响应数据辨识计算出过程模型能代表被辨识过程吗？一般而论，成功的辨识是用足够大的信噪比保障的。总之，辨识离不了激励，而且是需要有足够强度和适当带宽的激励。

再者，优化这个要素应该独立提出。准则可以是同样的一个，但优化方法可以选不同的方法。例如，等价准则选误差平方和，方法可选最小二乘法，也可以选粒子群算法（Particle Swarm Optimization, PSO）。优化方法不同，辨识的效果肯定也不同。例如，选最小二乘法，当计算矩阵的逆不存在时，就被认为该被辨识过程是不可辨识的；但是改用智能优化方法时，就不存在逆阵计算问题，该被辨识过程又可认为是可辨识的。

综上所述，辨识的要素应不止3个，还有3个。这里不妨将辨识要素重新定义为6个要素：数据、模型、准则、优化、激励和过程。辨识之含义，若要用一句话来概括，那就是：根据激励被辨识过程得到的响应数据，按照预设的优化准则，通过优化计算得到与被辨识过程特性等价的模型。

## 2. 关于开环辨识

图 1-1 是一个典型的开环过程辨识系统框图。其中  $G_p(s)$  为被辨识过程， $\hat{G}_p(s)$  为被辨识过程的模型， $x(t)$  为过程输入变量， $y(t)$  为过程输出变量， $\hat{y}(t)$  为过程模型输出变量， $\varepsilon(t)$  为过程噪声信号。开环辨识既是对被辨识过程的输入端施加独立于噪声的有一定强度的激励信号，并采集过程输出端的响应数据，再依据被辨识过程的输入输出数据用某种优化计算方法（依据某种准则指标  $J$ ）计算被辨识过程的模型。常用的激励信号有：白噪声信号、伪随机信号、阶跃信号、正弦波信号等。常用的辨识优化计算方法有：预报误差法、相关分析法、频谱分析法、最小二乘法类方法、智能优化计算类方法等。按照参考文献 [2]，预报误差法、相关分析法、频谱分析法被归为经典辨识方法，最小二乘法被归为现代辨识方法。笔者认为，智能优化计算类方法更是一种现代流行的辨识方法，是近年来应用越来越多的有工程应用潜力的新方法。

## 3. 关于闭环辨识

图 1-2 是闭环过程辨识的系统框图。其中  $G_c(s)$  为控制器， $r(t)$  为系统的设

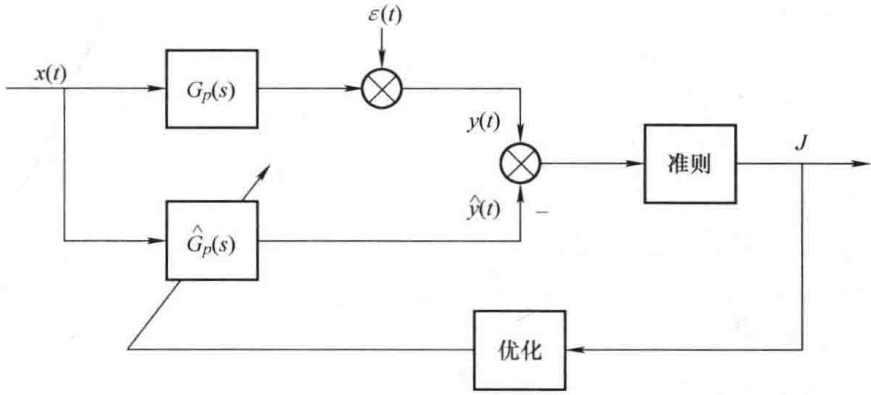


图 1-1 开环过程辨识系统

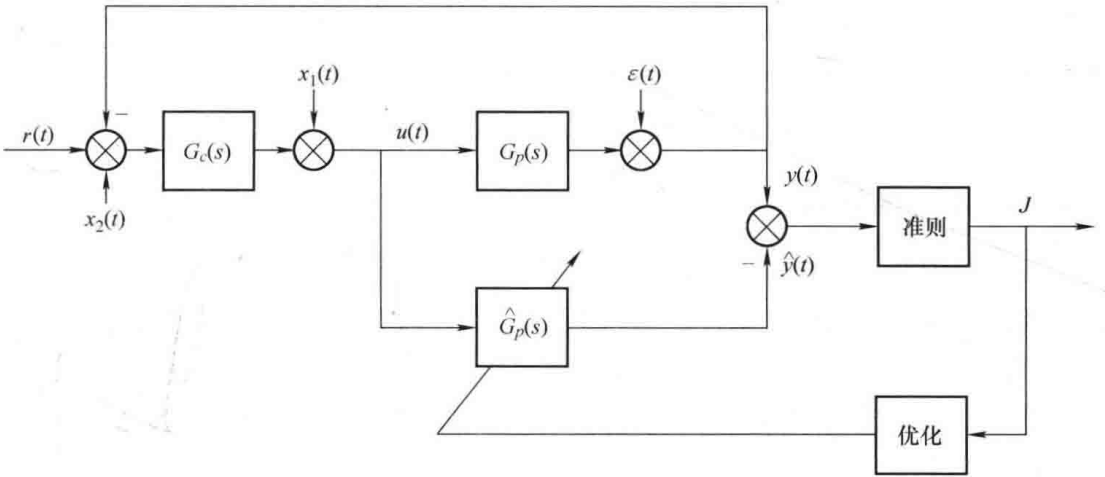


图 1-2 闭环过程辨识系统

定值输入,  $G_p(s)$  为被辨识过程,  $\hat{G}_p(s)$  为被辨识过程的模型,  $u(t)$  为过程输入变量,  $y(t)$  为过程输出变量,  $\hat{y}(t)$  为过程模型输出变量,  $\varepsilon(t)$  为过程噪声信号。

闭环辨识的提出源自实际工程应用的需求。虽然开环辨识的许多方法已经比较成熟,但是在实际工程应用中常常不具备应用开环辨识方法的条件。需要被辨识的过程,常常处于闭环控制环境之下,并且由于生产安全性和系统可靠性的考虑,不允许被辨识过程断开闭环,变为开环运行。因此,闭环辨识是人们不得不面对亟需解决的工程实际应用课题。

然而,人们发现直接将经典的开环辨识方法应用于闭环辨识后,常常得不到预期的无偏辨识模型,进而发现了所谓的闭环辨识可辨识性问题。一个经常列举的特例是,当控制器为比例控制器时,将开环辨识时好用的预报误差法套用于闭环辨识时,就出现了数据向量线性相关而导致奇异矩阵,最终使辨识计算被迫中止的情况。

闭环辨识可辨识性问题的出现,促进了闭环辨识理论的深入研究。特别是针对可辨识性有了更深入的探讨。此外,对于闭环辨识有一种较为流行的认识,那就是闭环辨识套用开环辨识方法是否能成功,取决于闭环可辨识性。如果证明闭环是不可辨识的,那其过程就不能套用开环辨识方法去辨识。参考文献 [3] 还列出了如下 4 条的闭环过程辨识的可辨识条件:

1) 当控制器是线性的、非时变的,且不存在扰动信号,给定值又是恒定的时候,控制器的结构不导致闭环传递函数的零极点相消,且控制器的阶数不低于过程的模型阶数。

2)  $u(t)$  含有足够阶次的持续激励信号,并与噪声  $\varepsilon(t)$  不相关。

3) 控制器是时变的,或是非线性。

4) 控制器可以在几种调节规律之间切换。

不过,本书后面给出的研究结果将表明:上述的认识并不是通用的正确结论,闭环辨识可辨识性问题也不是在任何情况下始终存在,当用智能优化计算类方法进行闭环辨识时,就没有必要考虑闭环过程辨识的可辨识条件。

## 1.2 闭环过程辨识的可辨识性

闭环辨识套用开环辨识方法后,出现了辨识不准和辨识不出的问题,进而引发了闭环过程辨识的可辨识性问题的研究。对可辨识性的深入研究产生了可辨识性的概念定义。最经典的可辨识性概念定义源自学者 Ljung L。根据参考文献 [3] 可辨识性概念可定义为 3 个层次:可辨识的、强可辨识的和参数可辨识的。

### 1. 可辨识定义

若

$$\hat{\theta}(L, S, M, I, X) \xrightarrow{L \rightarrow \infty} D_T(S, M) \quad (1-1)$$

即采用辨识方法  $I$  依据足够多的数据 ( $L$  为数据长度),在实验条件  $X$  下得到模型参数估计  $\hat{\theta}$ ,从而得到与系统  $S$  等价的模型  $D_T(S, M)$ ,则称系统  $S$  在模型类  $M$ 、辨识方法  $I$  及实验条件  $X$  下是可辨识的,记作  $SI(M, I, X)$ 。

### 2. 强可辨识定义

若系统  $S$  对一切使  $D_T(S, M)$  非空的模型都是  $SI(M, I, X)$  的,那么称系统是强可辨识的,记作  $SSI(I, X)$ 。

### 3. 参数可辨识定义

若系统  $S$  是  $SI(M, I, X)$  的,且  $D_T(S, M)$  仅含一个元素,则称系统是参数可辨识的,记作  $PI(M, I, X)$ 。

显然,这 3 项定义是抽象的和费解的,至少从工程应用的角度看是难理解的。但是有一点容易看出,那就是系统的可辨识性与系统 ( $S$ )、模型 ( $M$ )、辨

识方法 ( $I$ )、实验条件 ( $X$ ) 以及数据长度 ( $L$ ) 等 5 个因素有关。与我们前面提出的辨识 6 要素相比较,“过程”“模型”“优化”和“数据”4 个要素正好与  $S$ 、 $M$ 、 $I$ 、 $L$  相吻合。那么,多出的要素正是“过程”,即  $S$ ,这一点可认为是“辨识六要素观”的一种佐证。不过从文献上看实验条件  $X$  是意指开环或闭环实验条件,并不指“激励”。但是开环或闭环实验条件的变化,本质上是激励信号的变化。如果把这里的实验条件  $X$  理解为要素“激励”,那么所提出的“辨识 6 要素观”就得到了又一个佐证。

若是将上述用抽象的数学语言表达的 3 项可辨识性定义换用更通俗的文字语言来表达,则可能更容易被理解些。不妨将上述的可辨识性定义表达为:

1) 如果能用确定的辨识方法、实验条件和模型集合的某元素辨识出与被辨识系统具有相同外特征的模型,那么可称该系统是可辨识的。

2) 如果系统是可辨识的,并且是用模型集合的任一元素都可成功辨识出模型,那么可称该系统是强可辨识的。

3) 如果系统是可辨识的,并且所用的是模型集合的唯一元素,那么可称该系统是参数可辨识的。

对于可辨识性的 3 项定义,其实理解第一项定义就够了。因为只要能辨识一个过程模型,就满足了判定系统可辨识性的需求。至于强可辨识性和参数可辨识性的细分,对于实际工程应用是无意义的。面向对控制的辨识需求只是获得一个大致准确的过程模型,一个就够了。所以是不是强可辨识或是参数可辨识并不重要。

如果想依据可辨识性定义完成一种实际可执行的可辨识性测试,可想而知是一项几乎无法完成的工作。因为如何判断已辨识的模型具有等同于原过程的特征并无公认的可参照的具体标准。何况现实中真实过程的具体模型是一般辨识前不知道的。即使有真实过程的响应曲线,也难找到对应的具体准确模型。所以,关于可辨识性的定义,更多的只是具有理论研究和定性分析的意义。

应该指出,上述的可辨识性定义是通用的,并不是闭环专用的。无论是开环辨识还是闭环辨识,被辨识过程的可辨识性都与辨识的 6 个要素(数据、模型、准则、优化、激励和过程)相关。

### 1.3 闭环过程辨识的辨识方案

虽然,至今已出现多种闭环过程辨识方法<sup>[4-15]</sup>,诸如直接法、间接法、联合输入输出法、两阶段法、参数化法、互质因子法、噪声协方差补偿法、输出误差递推校正法、闭环响应特征试验法、子空间法、子模型法和 NLJ 法等,但是不难发现公认的可在工程应用中推广的方法却很少。众多闭环过程辨识新方法难以应用的主要原因可归结为方法过于复杂且在工程现场实施缺乏条件,必做的辨

识试验可能会危及生产安全，现场工程技术人员难以理解和掌握现有的辨识技术。因此，从工程实用的角度来看，更应该关注的是那些有工程应用潜力的闭环过程辨识方法。

从已发表的闭环过程辨识研究文献来看，能实际应用的主要是直接法和间接法，而且直接法应用的案例远远多于间接法。虽然参考文献 [4] 把联合输入输出法也归为闭环过程辨识的经典方法，但是笔者认为联合输入输出法过于复杂，难以在工程中应用。

所谓闭环过程辨识的直接法就是依据闭环条件下得到的过程输入和过程输出数据，直接套用开环辨识方法进行被辨识过程模型的优化计算。关于闭环过程直接法辨识的研究文献很多，直接法的优点很明显，那就是简单易行；有文献指出，在可辨识条件较好的情况下具有和开环辨识一样的辨识精度，甚至在噪声较强的时候有着比开环辨识更好的效果。直接法的缺点也很明显，那就是无视闭环引起的可辨识问题而强行套用经典的开环辨识方法，自然冒着辨识失败的风险；即用直接法的闭环辨识的辨识有效性和可靠性是没有保障的。不过，后续的研究结果表明，当采用智能优化计算类方法进行闭环辨识时，这个缺点就不必多虑了。

所谓闭环过程辨识的间接法则是依据闭环系统的输入和输出数据，先用开环辨识方法辨识闭环系统的模型，再利用已知的控制器模型和辨识所得的闭环系统的模型去推算过程模型。虽然用间接法辨识是辨识闭环系统整体的模型，不存在闭环引起的可辨识问题，用开环辨识方法辨识的结果是有效的和可靠的，但是深入研究的结果表明，闭环系统模型的辨识成功并不意味着过程模型的辨识成功。恰恰是由闭环系统模型反推过程模型的工作有难度、有多解和有误差，可能致使采用闭环过程的间接法辨识毫无优势可言。

还有一种方法<sup>[16-18]</sup>比较实用，它是类似于的 PID 整定的闭环试验方法。因为是用闭环特征参数推算过程模型，也可归类于闭环过程辨识的间接法。这里不妨称之为闭环特征参数推算法。只要调整闭环控制系统中的控制器参数使系统呈现衰减振荡特性，就可使用这种方法。应用该方法有 3 个步骤：1) 做一次系统的阶跃响应试验；2) 根据已得阶跃响应曲线算出几个闭环特征参数；3) 根据一些预推公式算出过程模型参数。显然，该方法的有效性和可靠性是有保障的，但是它的局限性在于只适用于那些能成功做成衰减振荡特性试验的系统。

#### 1.4 闭环过程辨识的激励信号

在闭环过程辨识中使用的激励信号有阶跃信号、伪随机信号、广义白噪声信号、方波信号和正弦波信号，最常用的是阶跃信号和伪随机信号。

阶跃信号产生简单，施加容易，所以在实际中用得最普遍。阶跃信号被认为

是一阶的持续激励信号，那么对于高于一阶的被辨识过程的辨识就被认为是阶数不够的激励信号。然而也有不同的观点<sup>[19]</sup>认为所谓至少  $n$  阶的持续激励辨识条件，不过是充分条件而不是必要条件，所以阶跃信号可用于高于一阶的被辨识过程。已有不少文献报道了用阶跃信号成功辨识高于  $n$  阶的被辨识过程的案例。对此，笔者认为所谓至少  $2n$  阶的持续激励辨识条件，是基于离散过程模型辨识得出的结论，并非可套用于一切被辨识过程，例如连续时间过程。

伪随机信号 (Pseudo - Random Binary Sequence, PRBS) 的产生需要运行一段计算机程序，所以比用阶跃信号要复杂、困难一些。在实际工程应用时，常需要配置专门的计算机设备，还需要专业的技术人员专门实施。

闭环过程辨识工程实施时，激励信号常在控制器的输出端或设定值的输入端加入。用直接法辨识时，激励信号应加在控制器的输出端或设定值的输入端。用间接法辨识时，激励信号只应加在设定值的输入端。

### 1.5 闭环过程辨识的优化计算方法

辨识问题可归结为一个最优化问题。无论考虑的被辨识过程是在开环架构下还是在闭环架构下，其模型辨识都是归结为最优化问题。

据参考文献 [20]，对于被辨识过程  $S$ ，施加输入序列  $u_k$  后，可得到过程输出序列  $y_k$ 。假设有模型  $M$ ，可描述过程  $S$ ，则当把同样的序列  $u_k$  施加于模型  $M$  后，可产生模型输出序列  $\hat{y}_k$ 。参见图 1-3。

若定义一个损失函数

$$J = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (y_k - \hat{y}_k)^2 \quad (1-2)$$

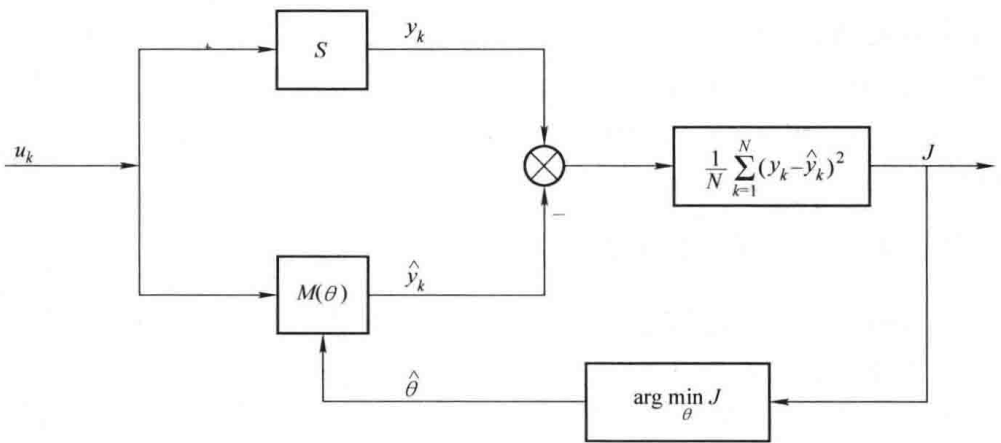


图 1-3 过程模型辨识的最优化系统

设模型  $M$  的结构已确定，其特性可用参数  $\theta$  完全定义，则过程模型辨识的问题可归结为寻求最优的模型参数  $\hat{\theta}$  使损失函数  $J$  最小的最优化问题，即

$$\hat{\theta} = \operatorname{argmin}_{\theta} J \quad (1-3)$$

例如，针对一个被辨识的连续时间过程，其模型结构确定为

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0}{s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0} \quad (1-4)$$

若对这个过程施加激励信号  $u_k$ ，并获得了过程输出信号  $y_k$ ，则可利用仿真技术通过假设模型获得在激励信号  $u_k$  下的模拟过程输出  $\hat{y}_k$ 。

设模拟过程输出  $\hat{y}_k$  与实际过程输出  $y_k$  的方差为优化目标函数，即

$$J = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (y_k - \hat{y}_k)^2 \quad (1-5)$$

以模型参数为优化参数，即令

$$\theta = \{b_m, b_{m-1}, \cdots, b_1, b_0, a_n, a_{n-1}, \cdots, a_1, a_0\} \quad (1-6)$$

则可利用最优化方法求得使目标函数  $J$  最小的最优模型参数

$$\hat{\theta} = \operatorname{argmin}_{\theta} J \quad (1-7)$$

闭环辨识和开环辨识一样，都可以归结为一个最优化问题。所以解决这个最优化问题的最优计算方法对于闭环辨识或是开环辨识都是一样的。经典的辨识理论所用的最优化方法主要是最小二乘法。现代辨识理论更倾向用现代智能优化方法。两类方法都能完成一般的辨识计算任务，但是在应用条件、计算精度和计算效率方面还是有区别的。一般而言，用最小二乘方法辨识的优点是计算量小，大多是一次计算即可完成；缺点是应用条件比较苛刻，对于有线性相关的数据，常因逆阵无解而使辨识计算终止。用现代智能优化方法辨识的缺点是优化计算量大，常需要几百次的迭代计算。但是用现代智能优化方法辨识的优点更多：1) 应用条件宽，无需逆阵运算，对于线性相关的数据也能算；2) 辨识精度可以做得很高；3) 对连续时间系统模型可以直接辨识计算，无需进行专门的参数向量和估计模型结构的专门构建。

## 1.6 闭环过程辨识的过程模型结构

被辨识的过程，在辨识理论研究者看来，应该是宽泛的，无限定条件的。它可以是一个经济学意义上的过程，也可以是一种生物学意义上的过程。定义越宽，则理论意义越大。但是，在辨识技术应用工程师看来，被辨识的过程最好明确、具体并且结构简单。否则，模型辨识就是一句空话，没有实际意义。一个实际过程的辨识，成败几乎取决于它是否足够简单。哪怕增加一个参数，实际辨识难度就可能增大以致辨识失败。闭环过程辨识中的被辨识过程，大多数还是指过

程控制学意义的过程。不妨把被辨识的过程就限制在过程控制领域。前辈 Ljung L 也提倡面向控制的辨识研究，并且指出：在工业控制实践中，面向控制的辨识意味着辨识那些可用于 PID 参数整定需要的简单过程模型，这些模型只有一阶或二阶，不高于三阶，可带有时滞环节。

Ljung L 在参考文献 [21] 中给出了几种可用于工业控制器参数整定的简单过程模型结构：单容时滞型、单容时滞积分型、双容时滞型、双容时滞超前型和振荡超前时滞型。

关于模型结构，应该包含更全面的概念。如就传递函数型的线性模型而言，模型结构应指零点、极点、增益、阶数及纯延迟时间。但是，在以往的有关辨识的教科书和研究文献中，常涉及的模型结构概念只是指模型的阶数。这或许是因为辨识理论的初期研究常基于以通用多项式表达的离散时间模型；还有就是黑箱式辨识时完全没有被辨识过程的先验知识，也就无法确定更深层的模型结构信息。但是在工程应用界，被辨识过程大多是已有许多先验知识的过程。这些先验知识来自机理建模分析，来自以往的控制实践。根据这些先验知识，大多数被辨识过程的模型结构已经可以确定。例如，可确定为一个有自平衡过程，可确定为一个多容惯性过程，或是可确定为有积分特性的过程等。因此，不利用这些模型结构信息，还当作黑箱过程处理，显然是太不明智了。



## 第2章 闭环过程辨识理论的研究

### 2.1 模型辨识准确度

辨识工作是否成功应该有一个检验标准,即比较辨识方法、辨识计算算法、辨识试验方案、辨识激励信号设计方法、辨识模型结构选取方案以及辨识数据采集方法优劣的实际需要。然而,迄今为止尚未出现一种被普遍认可的用于模型辨识的检验标准。为此,在这里提出模型辨识准确度的定义和两类模型辨识准确度指标计算公式。

#### 1. 模型辨识准确度的定义

根据前述辨识的定义,模型辨识本质就是:根据激励被辨识过程得到的响应数据,通过优化计算得到与被辨识过程特性等价的模型。可以认为模型辨识的关键在于被辨识过程和辨识所得模型之间的特性等价性。两者之间的等价程度越高,则意味着模型辨识得越准确。因此,模型辨识准确度的概念就是被辨识过程和辨识所得模型之间的特性等价程度。换言之,模型辨识准确度可被定义为被辨识过程和辨识所得模型之间的特性等价程度。

#### 2. 基于响应数据吻合度的模型辨识准确度指标

为了比较被辨识过程和辨识所得模型之间的特性等价程度,不妨构建如图2-1所示的被辨识过程和辨识所得模型之间的特性等价比较系统。其中, $G_p(s)$ 为被辨识过程, $\hat{G}_p(s)$ 为辨识所得模型, $u(t)$ 为输入激励, $y(t)$ 为输出响应, $\varepsilon(t)$ 为模型误差。

当把同样的输入激励序列 $u_k$ 同时加在被辨识过程和辨识所得模型后,可得到过程输出序列 $y_k$ 和模型输出序列 $\hat{y}_k$ ,于是如下定义的两种指标就可计算。这两种指标可以衡量在相同激励下被辨识过程和辨识所得模型之间的响应曲线吻合程度。

相对最大误差百分数

$$J_1 = \frac{\max\{|y_k - \hat{y}_k|\}}{\max\{y_k\} - \min\{y_k\}} \times 100\% \quad (2-1)$$

相对均方差百分数

$$J_2 = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (y_k - \hat{y}_k)^2}}{\max\{y_k\} - \min\{y_k\}} \times 100\% \quad (2-2)$$