第6卷 第3期
1989年9月

控制理论与应用
CONTROL THEORY AND APPLICATIONS

Vol. 6, No. 3
Sept., 1989

系统辨识的最优输入设计(OID)综述

胡德文　　万百五

（国防科技大学三系，长沙）（西安交通大学系统工程研究所）

摘　要

本文分时域法和频域法综述了动态系统辨识的最优输入设计．首先回顾了最优输入设计的发展历史，接着主要就七十年代末及八十年代的主要研究成果进行了评述．同时，还介绍了最优输入设计的实际应用研究．最后，本文还对今后的发展方向提出了建议．

关键词：辨识；最优化；实验设计；最优输入设计

一、引　言

系统辨识的最优实验设计包括最优输入设计、均匀采样区间和非均匀采样区间设计、预采样滤波器的设计、递推最优和次优输入设计、传感器的最优安放与种类、执行器的最优安放与种类设计等．

目前，关于最优输入设计（以下简称OID）研究，已发表论文近二百篇，内容涉及如下几个方面：①以参数辨识精度（A-最优、D-最优、E-最优等）及输出空间误差作为优化判据；②以输入功率、幅值约束，状态变量约束和输出约束作为边界条件；③线性连续与离散SISO系统和MIMO系统；④开环和闭环系统；⑤时域法和频域法；⑥参数模型与非参数模型等多个方面．此外，还有人就非线性时变和分布参数系统的OID研究展开了讨论．

所谓OID，即在一定约束下，寻找使系统辨识精度的某一性能指标达到最高的输入信号．一般地，这一性能指标可以表为参数估计或传递函数估计误差等的凸性函数，如二次型指标．随着工业过程控制，空间技术以及生物医学工程的迅速发展，OID已成为系统辨识领域中一个引人注目的分支．辨识界的著名学者Mehra[1]曾于1974年就当时学科的发展作了一个详细的综述．1975年在美国波士顿召开的第6届IFAC世界大会上，举行了一个关于系统辨识的圆桌会议，指出了系统辨识的七个需要进一步发展的方向，其中OID列第三位．国际控制界的许多著名学者如Goodwin、Ljung、Söderström等人均先后作过许多深入的工作，我国学者袁震东、卢桂章、张永光[2]等多人分别作了许多的介绍与研究．

本文于1988年3月21日收到．1989年6月23日收到修改稿．

二、OID时域法

1。尽管OID的研究还可追溯到更早的一些时候，但人们公认，Levin[3]（1960）是首次系统地提出OID概念的学者。他在考虑线性离散SISO系统MA模型参数辨识问题时，证明了：在白色观测噪声干扰和一定的输入功率或幅值约束下，具有脉冲型自相关函数的输入（如白噪声）是最优的，即能使参数辨识的协方差达到最小值。接着，Litman和Huggins[4]（1963）利用正交增长指数型输入辨识了一阶连续时间系统的传递函数。Levadi[5]（1966）研究了相关噪声下连续时变系统的参数辨识问题。Gagliardi[6]（1967）研究了以实验误差概率为判据的OID。这些工作，都是具有开创意义的。

到60年代末并进入70年代，OID的研究迅速发展起来，这期间的工作可见Mehra[1]的综述。其特点有二个：一是采用Fisher信息矩阵，作为优化的依据，这是因为当时关于参数估计精度的分析研究还很不完善，只好用协方差阵的Gramer－Rao下界，即Fisher信息矩阵的逆来代替；二是采用最优控制理论的方法寻找OID的解。应当指出的是，由于OID的最优控制方法须求解二点边值问题，虽然辨识精度提高了，但带来了计算上的复杂性，这种“二点边值问题求解”方法已不再沿用。

2。对于一般的线性离散系统，数学模型可表为

$$y_t = G(z)u_t + H(z)\varepsilon_t \tag{1}$$

其中

$$H(\infty) = I,\quad \varepsilon_t \sim N(0,\ \Sigma) \tag{2}$$

$\{y_t\}$，$\{u_t\}$分别为输出、输入，且$\{u_t\}$与$\{\varepsilon_t\}$无关。规定系统参数向量为

$$\beta = [\beta_1^T, \beta_2^T, \beta_3^T]^T$$

其中β_1，β_2，β_3分别代表$G(z)$，$H(z)$和Σ中的参数，且互无关联。这时，基于Goodwin和Payne[7]的关于Fisher信息矩阵结构的研究，可以进一步推得Fisher平均信息阵具有如下结构[8]：

$$\overline{M}_\beta = \begin{pmatrix} \overline{M}_{\beta_1} & 0 & 0 \\ 0 & \overline{M}_{\beta_2} & 0 \\ 0 & 0 & \overline{M}_{\beta_3} \end{pmatrix} \tag{4}$$

我们可称$\overline{M}_{\beta_1}$为辅助平均信息矩阵。当观测样本为N时，其元素为

$$\overline{M}_{\beta_1}(i,j) = \frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N}\left\{\left[H^{-1}(z)\frac{\partial G(z)}{\partial\beta_{1,i}}u_t\right]^T \Sigma^{-1}\left[H^{-1}(z)\frac{\partial G(z)}{\partial\beta_{1,j}}u_t\right]\right\} \tag{5}$$

$\overline{M}_{\beta_2}$和$\overline{M}_{\beta_3}$的元素分别为

$$\overline{M}_{\beta_2}(i,j)=\frac{1}{2\pi\sqrt{-1}}\oint_{|z|=1}\mathrm{tr}\left\{\left[H^{-1}(z)\frac{\partial H(z)}{\partial\beta_{2,i}}\right]\left[H^{-1}(z)\frac{\partial H(z)}{\partial\beta_{2,j}}\right]^T z^{-1}\mathrm{d}z\right. \tag{6}$$

$$\overline{M}_{\beta_3}(i,j)=\frac{1}{2}\mathrm{tr}\left(\Sigma^{-1}\frac{\partial\Sigma}{\partial\beta_{3,i}}\Sigma^{-1}\frac{\partial\Sigma}{\partial\beta_{3,j}}\right) \tag{7}$$

若我们以凸性函数$\mathrm{tr}\overline{M}_\beta^{-1}$或$-\log\det\overline{M}_\beta$作为OID优化判据，那么问题可等价为寻找这样的输入u_t，使得下面的目标函数极小：

$$J_1=\mathrm{tr}\,\overline{M}_{\beta_1} \tag{8}$$

或

$$J_2=-\log\det\overline{M}_{\beta_1} \tag{9}$$

这是因为，从(6)、(7)式看到，噪声参数的估计精度既与输入u_t无直接关系，又与待辨识的控制部分参数无关即与u_t无间接关系。在有效算法下，无论怎样设计输入，也不可能使噪声参数估计精度，从而只须注意$\overline{M}_{\beta_1}$就行了。

在最优设计理论中，极小化J_1和J_2的设计分别称为A-最优和D-最优设计，相应的$\{u_t\}$称之为A-最优或D-最优输入。此外，常见的设计判据还有E-最优、G-最优[1]以及D_S-最优[7]等。

最优设计的另一个重要问题就是约束条件问题。周知，在系统辨识实验中，加入被测系统的信号愈强，辨识的精度就愈高。同时，系统响应可能随之增大，甚至超过模型所能成立的假设区域和系统本身的极限。因此，OID必然地在一定约束条件下进行。就直接地从参数辨识精度来讲，输入功率或幅值约束总被采用。就系统的响应不超过允许限度（以保证正常运行）而言，输出功率、幅度约束甚至更为严格，系统状态变量约束更为直观。在研究中，也有采用特殊约束的。除非硬性地规定，否则在OID应采用有利于问题求解简化的约束条件。

3．对于SISO系统AR模型，在输出功率约束下使输出自相关函数在非零点上等于零的输入，即为白噪声干扰下的D-最优输入。这种输入，可由最小方差控制律构造的反馈信号与外部白噪声迭加而成。Söderström, Ljung和Gustavsson[9]最早注意到反馈在OID中的重要性。反馈可解决最优输入对未知参数依赖的问题。但一般来讲，反馈将会降低可达到的精度。

Uosaki[10]（1984）着手AR模型结构辨识的OID。在输出瞬时幅值超过阈值的概率不超过显著水平下，即

$$P\{|y_t|\geqslant A\}\leqslant\alpha\quad(\alpha\text{取}0.05\text{或}0.01) \tag{10}$$

的约束下，得到确定阶次的D_S-最优输入。这种输入由开环情况下AR模型所表征，表征参数与待辨识参数相关联。仿真时，给定100个预激点，得参数初值，继而使输入逐步地达到最优。经与D-最优、随机输入辨识效果相比，D_S-最优输入效果最理想，即判定阶次的显著性最强。

1987、1988年，Uosaki和Hatanaka[11,12]研究了输入幅值严格受限的AR模型结构辨识的OID，并将结论自然地推广到ARMA模型的情形。采用的最优判据是Kullback-Leibler信息准则，设计出的输入呈砰砰型，与随机输入仿真结果比较，效果改进是十分明显的。

研究结构辨识OID的还有Goodwin和Payne[7]，Bohlin和Rewo[13]，Krolikowshi和Eykhoff[14][15]等，目前的结果表明，这种结构辨识的OID是极有发展前途的方向。

4。MA模型（或脉冲响应函数）的OID研究，是OID方向研究得最早的问题，与一般情况相比，MA模型在白色观测噪声下的OID与系统待辨识参数无关，从而给设计应用带来了方便。

早在1975年的第6届IFAC世界大会上，德意志民主共和国学者Wernstedt和Hoffmeyer-zlotnik[16]就报告了采用Plackett-Burman序列辨识MIMO系统脉冲响应函数的结果，引起了与会者的广泛兴趣。这种设计首次给出了输入本身而不仅仅是其表达式的显式化。针对阶次不十分大的SISO系统，应用P-B序列是方便的，计算上也简单，并且在白色观测噪声下，辨识参数方差比采用同样长度的m-序列缩小近1倍，但是，正如指出，P-B序列应用于动态系统辨识时，情况与静态实验设计不尽相同。只有在动态系统放大倍数已知的情况下，精度才可能提高。

从1985年开始，胡德文等[8,17-20]研究了放大倍数未知的系统脉冲响应函数的OID。借助于组合数学、数论和群论的方法，将白噪声下脉冲响应函数辨识的A-最优和D-最优输入的实现周期扩充到了所有的素数P、孪生素数之积$P(P+2)$、$P-1$、$\frac{P-1}{2}$及2^n-1等。在相同噪声和输入功率下仿真表明，采用最优输入辨识的精度比伪随机m-序列的提高了近50%，这与理论分析也相符合。

目前，绝大多数的研究都假定干扰是白噪声序列。因为这样可方便地借助于有效方法下的Cramer-Rao下界进行设计。辨识的一个经典问题是，以m-序列作输入，采用相关分析法辨识脉冲响应函数。这时并不要求观测噪声是白色时，当然，估计也就不一定是有效的了。

1988年，胡德文、万百五和施仁[8]在分析对比有效估计方法后，严格地证明了相关分析下A-最优输入满足的显式条件。这一条件表明OID不仅与待辨识参数无关，还与噪声模型无关。参数估计的误差方差和达到了各种方法和各种输入下的双重意义的最高精度，即Cramer-Rao下界的下界。计算上也比m-序列相关分析法简单，输入不仅是显式的而且还是显化的。对一有色噪声下SISO系统的仿真表明，其辨识精度比用m-序列相关分析法提高了59.2%，理论上还可提高到约65%。在IFAC第8届辨识与系统参数估计会议上，这些结果得到了国际同行学者们的良好反应。

5。对于ARMA模型甚至更一般的模型参数估计OID，利用非线性最优化方法，原则上总可以求解。但计算上常常是十分复杂的。利用信息论的熵和相互信息量概念，马广富和王子才[21]于1987年给出了ARMA模型参数估计的一种新的OID。仿真精度

比采用 m-序列的明显提高。其方法可方便地用于控制系统的实时辨识。

关于递推次优输入信号，也曾有过一定研究，但就早期的结果与采用 m-序列效果相比，其改进甚微，而且每增加一步须增加相当大的计算量。1984 年，王行愚[22]在 IEEE 杂志上发表了一篇关于连续时变系统辨识的次优输入设计(SID)的文章。采用的是方块脉冲函数方法，将输入简化成许多直线段逼近于最优轨迹。这种简化不须解二点边值问题，从而在具有高辨识精度的同时，还保证了计算的简单性。这说明，采用“方块脉冲函数法”或“正交函数法”是解决设计复杂性的有效途径。

Elokobrosy[23,24]，Goodwin 和 Payne[7]等开始研究了采用自适应控制的OID。由于自适应控制理论已建立起一套完整的参数估计与实时控制的递推算法，因此，对一大类 OID 将是有发展前途的方法。可惜这方面的工作还不多见。

三、OID 频域法

1. OID 的频域法是70年代初开始发展起来的。1972年，Viort[25]首先发现动态系统辨识 OID 与静态最优实验设计之间的密切联系，同时将这种联系用于SISO系统 ARMA 模型参数的频域 OID。1976年，Mehra[26]将比推广到了 MIMO 系统的情形。

在频域 OID 研究中，一般都假定：采样次数 N 足够多，输入$\{u_t\}$限于可用谱表示的类，约束条件为输入功率限制。

令 $\xi(\omega)$ 表示$[0,\ \pi]$上的一个频域设计，可看作是$[0,\ \pi]$上的一个分布，同输入 u_t 的谱分布相对应。类似于文[8]的方法，在功率约束

$$\frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} d\xi(\omega) \leqslant P_u \tag{11}$$

的条件下，频域辅助平均信息矩阵可表示为

$$\overline{M}_{\beta_1} = \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} \widetilde{M}_{\beta_1}(\omega) d\xi(\omega) \tag{12}$$

其中
$$\widetilde{M}_{\beta_1}(\omega) = \mathrm{Re}\left[\frac{\partial G(e^{j\omega})}{\partial \beta_1} H^{-1}(e^{j\omega}) H^{-1}(e^{-j\omega}) \frac{\partial G((e^{-j\omega})}{\partial \beta_1^T}\right] \tag{13}$$

在有效算法下，可采用频域的 A-最优和 D-最优判据(8)、(9)式，噪声模型参数辨识精度与 OID 无关。

在频域设计中，可以对 u_t 的谱值和频率的分布同时设计。但是，众所周知，要产生由许多频率合成的信号并非易事。因此，总是希望在频率数尽可能少的情况下对谱值进行设计。设 n 为 β_1 中参数个数，应用 Caratheodory 定理，Mehra[27]证明频域 OID 可由不超过$\frac{1}{2}n(n+1)$个单频率正弦信号的凸组合构成。接着 Goodwin 和 Payne[7] 进一步证明 OID 仅需$(n+1)/2$ 或 $n/2$ 个单频正弦所构成。1979 年，具有广

泛国际影响的《信息与系统科学丛书》（第21卷）推出了关于动态系统实验设计的专著。该书的作者Zarrop[28]通过引入Chebyshev系统的概念，将$(n+1)/2$（n为奇数）和$n/2$（n为偶数）个单频正弦信号规范化，这一结果在后来的研究中经常被引用。

$(n+1)/2$和$n/2$是维持系统持续激励的最小频率数目，因此是不能再改进的。若推广到MIMO系统，还必须增加$2r$个可调量，以表征r个输入在每个频率上的有关幅度和相位的相对大小关系。

2．正如Ng[29]等人所指出的那样，OID遇到的主要麻烦是，输入依赖于未知的待辨识参数。解决这一问题的方法是构造递推算法，或者假定参数向的先验概率，采用Bayes方法计算。还有一种方法是干脆将实验分成各个层次，上一层次向下一层次提信息，逐步逼近最优。基于这一思想，Ng等采用频域法，避开了反馈控制，推出了AR模型开环频域OID。计算上只须求解两组线性方程组和一个高阶多项式方程，辨识的方差与采用最小方差反馈控制律所得的结果相同。在输入信号的构成上采用了Zarrop[28]方法，由$(n+1)/2$或$n/2$个单频信正弦信号迭加而成。这实际上相当于物理上的“自由度”的思想，辨识几个参数保证至少有几个自由度（可调系数，包括幅值和频率）。如果可以采用几个频率正弦并将其分别定位，而只使幅值可调，那么Ng等人的结果还可以大大地简化。

3．我国学者袁震东与L.Ljung[30-32]合作，在系统传递函数辨识及其OID方面做出许多好的结果。他们采用的是频域均方差的二次型范数作为最优度量标准。在研究系统传递函数的频域辨识时，他们指出，以前的OID常常假定待辨识模型属于一确定的模型集，这种假定是一种偏见，当真实模型不属于这一集合时，辨识的结果甚至不如非最优的好。为此提出的无偏见最优输入不须了解传递函数的任何先验信息，即在给定噪声频谱的情况下OID是显式的。与“有偏见”最优输入相比，具有计算简单，对系统的性质具有更强的鲁棒性等特点。

对于MIMO系统，从袁震东和Ljung[32]的结果可进一步推出，当OID判据中的加权阵$Q(\omega)=I$时，

i）$\phi_{ij}(\omega)=0$，$i\neq j$，i，$j=1\sim m$ （14）

即输入向量$\{u_t\}$的各分量序列两两互不相关；

ii）$\phi_{ii}(\omega)=A_i\sqrt{\mathrm{tr}\phi_V(\omega)}$，$i=1\sim m$ （15）

即输入向量$\{u_t\}$各分量功率谱只相差常数倍；

iii）若观测噪声$\{V_t\}$是白噪声向量，那么，无偏见最优输入向量由各分量间两两互不相关的白噪声序列所组成；

iv）以iii）为条件，则传递函数矩阵$G(\exp(j\omega)$各元素，即各通道传递函数间的辨识误差两两互不相关；

v）以iii）为条件，则i-输入，j-输出通道的传递函数辨识方差$\mathrm{Var}\hat{\xi}_N(i,j)$满足，

$$\frac{N}{d(N)}\mathrm{Var}\hat{\xi}_N(i,j)\xrightarrow[N\to\infty]{}\frac{(\phi_V(\omega))_{jj}}{\phi_{ii}(\omega)} \tag{16}$$

即等于该通道的噪信比与阶次d(N)和样本比的乘积。

Gevers 和 Ljung[33] 继续研究了频域传递函数辨识的 OID，采用的是最小方差控制律。正如他们提出的那样，闭环设计确比开环的辨识精度低，同时，由于 OID 与待辨识系统有关，自校正控制器算法用于 OID 是有效地解决这一问题的途径之一。

四、OID 的 应 用

OID 的实际应用于70年代末开展起来。当时，Gupta 等人[34]将 OID 引入直升飞机的稳定参数与控制导数的辨识，得到了比一般方法好的结果。

Wernstedt 和 Hoffmeyer—Zlotnik[16]采用 D-最优输入 P-B 序列辨识人体血液循环系统的脉冲响应函数，已用于疾病的临床诊断。他们还试图用于水坝的水流量预测模型的辨识。

近年来生物医学工程的发展，大大激发了人们对 OID 的兴趣。美国著名应用数学家 Kalaba 与 Springarn[35]等人合作，采用系数灵敏度法研究线性与非线性连续时间系统的状态方程辨识问题。根据一位生物学家提出的建议，Kalaba 等人研究了人体血液中血浆与葡萄糖浓度的二维状态方程的建模。在对人体的干扰（注入葡萄糖）不超过一定量的条件下，通过控制葡萄糖注入速度，最精确地辨识有关参数，为对糖尿病患者的症状诊断提供了科学的定量依据。

意大利学者 Thomaseth 和 Cobelli 近年来对葡萄糖反应动力学进行了一系列的研究，其生物房室建模 OID 研究可见 Thomasech 和 Cobelli[36]（1988）及其所列参考文献。

航天技术的发展，引起了人们对 OID 的注意。对于大型空间挠性结构的系统辨识，涉及到许多问题。1988年，Automatica 杂志上刊出了 Bayard[37]等的文章。他们不仅研究了传感器的最优定位问题，还解决了辨识的 OID，利用大型空间结构固有的轻阻尼特性，将两问题解耦，分别单独进行设计，从而极大地降低了设计的复杂性。

Foss[38]（1987）研究了多种判据下贮液器的数学模型辨识的 OID。

从事机械振动研究的人员发现，若振动试验中加入的激励信号（如白噪声、伪随机序列、正弦信号）不同，则其结构模态辨识精度具有很明显的差别。Desilva[39]（1987）将 OID 应用于多自由度动态系统特别是小汽车的振动试验。研究表明，确实存在这样的激励信号，它不仅能激起各个感兴趣的模态响应，而且能使得辨识的误差最小，这将在工程实践中带来显著的经济效益。

五、结　束　语

以上我们回顾了近三十年发展起来的 OID 的理论与应用的历史，并特别就近年来的工作作了评述。应当指出，动态系统最优实验设计的其它方向也是很值得研究的。鉴于静态实验设计已广泛应用于科学试验和生产实践的事实，动态系统最优实验设计也必

将得到广泛的应用并带来重大的效益。就 OID 来讲，我们认为如下方面是值得进一步研究的：

1。自适应控制方法应用于 OID；

2。一般噪声下递推最优与次优输入设计；

3。模型结构辨识的 OID；

4。有限采样数据下的频域 OID；

5。非线性、时变和分布参数系统辨识 OID；

6。OID 算法的简化与显式化；

7。在航空、航天技术，生物、医学工程，振动模态试验及一般过程控制对象辨识等众多领域中的进一步应用。

致谢　作者衷心感谢华东师范大学袁震东教授所提供的帮助和支持。

参考文献

〔1〕 Mehra, R. K., Optimal Input Signals for Parameters Estimation in Dynamic System——survey and New Results, IEEE Trans., AC-19, 6, (1974), 753—768.

〔2〕 袁震东、卢桂章、张永光，系统辨识综述，现代控制理论专辑，中国科技情报社重庆分社.（1980），133—151.

〔3〕 Levin, M. J., Optimal Estimation of Impulse Response in the Presence of Noise, IRE Trans., CT-7, Mar, (1960), 50—56.

〔4〕 Litman, S., Huggins, W. H., Growing Exponentials as a Probing Signal for System Identification, Proc. IEEE, 51, June, (1963), 917—923.

〔5〕 Levadi. V. S., Design of Input Signal for Parameter Estimation, IEEE Trans., AC-11, Apr., (1966), 205—211.

〔6〕 Gagliardi, R. M., Input Selection for Parameter Identification in Discrete System, IEEE Trans., AC-12, Oct., (1967), 597—599.

〔7〕 Goodwin, G. C., Payne, R. L., Dynamic System Identification——Experiment Design and Data Analysis, Academic Press, (1977), Chapter 6—7.

〔8〕 Hu, D. W., Wan, B. W., Shi, R., Optimal Input Signal Design and Statistic Properties of the Impulse Response Functions Estimation, IFAC 8th Symp. Identification, Beijing, (1988), 854—859.

〔9〕 Söderström, T., Ljung, L., Gustavsson, I., On the Accuracy Problem in Identification, Proc. IFAC 6th World Congress, USA, Pt. 2, (1975).

〔10〕 Uosaki, K., Tanaka, I., Sugiyama, H., Optimal Input Design for Autoregressive Model Discrimination with Output Amplitute Constraints, Proc. IFAC 9th World Congress, Budapest, Hungary, (1984).

〔11〕 Uosaki, K., Hatanaka, T., Optimal Input Design for Autoregressive Model Discrimination Based on the Kullback-Leibler Discrimination Information, Proc. IFAC 10th World Congress, (1987), 376—380.

〔12〕 Hatanaka, T., Uosaki, K., Optimal Input Design for Discrimination Information of linear Stochastic Models Based on Kullback—Leibler Discrimination Information Measure, IFAC 8th Symp. Identification, Beijing, (1988).

〔13〕 Bohlin, T., Rewo, L., Experiment design for Maximum-power Model Validation, Automatica, 16, (1980), 405—408.

〔14〕 Krolikowski, A., Eykhoff, P., Aspects of Input Signal Design for Order and Parameter Estimation in linear Dynamic Systems, Proc IFAC 9th World Congress, (1984).

〔15〕 Krolikowski, A., Eykhoff, P., Input Signal Design for System Identification: A Comparative Analysis, IFAC 7th Symp. Identification, U. K., (1985).

〔16〕 Wernstedt, J., Hoffmeyer-Zlotnik, H. J., A New Variant for the Use of D-optimal Factorial Designs in Estimating Dynamic Multivariable System, Proc. IFAC 6th World Congress, Pt. 2, (1975), Session 11.5.

〔17〕 胡德文，最优输入信号设计，中国航空学会自动控制专业委员会成立及学术交流会，长沙，(1985).

〔18〕 胡德文，改良型m-序列及其应用，控制理论与应用，3，1，(1986)，111—116.

〔19〕 Hu, D. W., Shi, R., Optimal Input Signal Design of MA-model, MTNS*87, Arizona, American, (1987).

〔20〕 胡德文、施仁，MA-模型最优输入信号设计研究，国防科技大 学 学 报，2，(1987)，33—40.

〔21〕 马广富、王子才，系统参数估计的最优输入信号设计，中国航空学会自动控制专业委员会年会，宁波，(1987)，87—89.

〔22〕 Wang, S. Y., The Design of Subopitmal Inputs for Identifying Parameters in Linear Time-varying System, IEEE Trans., AC-29, July, (1984).

〔23〕 Elokobrosy, G. A., A Selftuning Test Signal Generator, Proc. IFAC 8th World Congress, Kyoto-Japan, (1981), Session 26.5.

〔24〕 Elokobrosy, G. A., Real-time Generation of Probing Signals in System Parameter Estimation Problems, The IFAC Workshop, Aukara-Turkey, (1982).

〔25〕 Viort, B., D-optimal Designs for Dynamic Models, Univ. of Wisconsin, Tech. Report 314, (1972).

〔26〕 Mehra, R. K., Synthesis of Optimal Inputs for Multiinputs Multioutputs (MIMO) Systems with Process Noise, System Identification, Advances and Case Studies, (Ed. Mehra, R. K., Lainiotis, D. G.)

Academic Press, New York, (1976), 221—249.

〔27〕 Mehra, R. K., Frequency Domain Synthesis of Optimal Inputs for Parameter Estimation Proolems, Harvard Univ., Tech. Report 645, (1973).

〔28〕 Zarrop, M. B., Optimal Experiment Design for Dynamic System Identification, Springer-Verlag, New York, (1979).

〔29〕 Ng, T. S., Qureshi, Z. H., Cheah, Y. C., Optimal Input Design for an AR-model with Output Constraints, Automatica, 20, 3, (1984), 359—363.

〔30〕 Yuan, Z. D., Ljung, L., Optimal Input Design by Frequency Domain Criterion, IEEE 21th CDC, (1982).

〔31〕 Yuan, Z. D., Ljung, L., Unprejudiced Optimal Open Loop Input Design for Identification of Transfer Functions, Automatica, 20, 6, (1985), 697—768.

〔32〕 Yuan, Z. D., Ljung, L., Black-box Identification of Multivariable Transfer Functions——A Symptotic Properties and Optimal Input Design, Int, J. Control, 40, 2, (1984), 233—256.

〔33〕 Gevers, M., Ljung, L., Optimal Experiment Designs with Respect to the Intended Model Application, Automatica, 22, 5, (1986).

〔34〕 Gupta, N. K., Mehra, R. K., Hall, W. E., Jr., Application of Optimal Input Synthesis to Aircraft Parameter Estimation, ASME J, Dynamic System Measurement, 98, 2, (1976).

〔35〕 Kalaba, R. E., Springgarn, K., Control, Identification, and Input Optimazation, Plenum Press, New York and London, 9, (1982).

〔36〕 Thomasech, K., Cobelli, C., Optimal Input Design for Physiological Systems Identification: Thoery and Pactice, Proc. IMACS 12th World Congress, Paris, (1988), 511—516.

〔37〕 Bayard, D. S., Hadaegh, F. Y., Meldrum, D. R., Optimal Experiment Design for Identification of Large Space Structures, Automatica, 24, 3, (1988), 357—364.

〔38〕 Foss, B. A., A Modified Optimal Input Design Criterion Proc. IEEE 26th CDC, Los Angeles, (1987), 303—308.

〔39〕 Desilva, C. W., Optimal Input Design for the Dynamic Testing of Mechanical Systems, ASME J. Dynamic System Measurement, 109, 2, (1987), 111—119.

Survey of the Optimal Input Designs (OID) for System Identification

Hu Dewen

(Department of Automatic Control, Changsha Institute of Technology)

Wan Baiwu

(Institute of Systems Engineering, Xian Jiaotong University)

Abstract

This paper surveys the optimal input design (OID) theory and applications in system identification. The paper divides the OID into time domain and frequency domain methods, and provides them in the Section 2 and 3 respectively. Section 4 introduces the applications of the OID. Finally, Section 5 suggests some research problems for further study.

Key words——Identificotion; Optimization; Experimental design; Optimal input design