

自适应滤波理论及应用

邹国良 著

河北大学出版社

ZI
SHI
YING
LU
BO
LI
LUN
JI
YING
YONG

自适应滤波理论及应用

责任编辑:韩 勇
著 者:邹国良



ISBN 7-81028-356-1



9 787810 283564 >

封面设计:郑颖立
装帧策划:邹 卫

ISBN7-81028-356-1/TN·1
定价:12.00元

邹国良 著

自适应滤波理论及应用

河北大学科研出版基金资助出版

河北大学出版社

责任编辑：韩勇
装帧策划：邹卫
封面设计：郑颖立

自适应滤波理论及应用

著者：邹国良
出版发行：河北大学出版社（保定市合作路1号）
经 销：全国新华书店
印 制：河北省迁安市印刷厂印刷
开 本：850×1168 1/32
印 张：9
字 数：180千字
版 次：1997年4月第1版
印 次：1997年4月第1次印刷
印 数：1-1000册
书 号：ISBN-81028-356-1/TN·1

定价：12.00元

前 言

自适应滤波理论,作为自适应信号处理的重要组成部分,在现代技术的各个领域,特别是在通讯、遥感与遥测、自动控制、雷达与电子对抗、模式识别等领域得到广泛而重要的应用。自适应信号处理的灵魂与核心是自适应算法,其实质是按某种优化准则求最优解的过程。在科学研究和工程设计的过程中,经常会遇到求最优解的问题,其中绝大部分问题中出现的因素不论是否已知,均是时不变的,或相当一个时期内是否已知,均是时不变的,因此,最优解一旦求得,无需作任何修正。但在很多情况下,各种因素都是时变的,因此,最优解必须不断修正,以适应外界的环境变化,这就是自适应的基本所在。

自适应算法及理论的最早产生,应以维纳最优滤波器作为真正的标志。自适应算法以一定的最优化准则,对特定的代价函数进行优化而求得。主要可分为两大类,一类是基于最小均方误差(LMS)准则的算法,称为LMS类算法,另一类是基于最小平方和(LS)准则的算法,称为LS类算法。LS准则有时也称为最小二乘准则。

本书以著者的硕士论文及博士论文,以及攻读学位期间的工作为基础,并吸收一些基本自适应理论并加以整理补充而成。本书以LMS算法自适应滤波理论及应用为主,也介绍了LS类算法及滤波器,以保证本书内容的严谨性、完整性及系统性。本书中的许多研究成果及结论还是第一次与读者见面,并且用计算机仿真实验进行验证。

本书可作为研究生及电子及信息类专业高年级大学生的专业课或专业基础课的教科书或参考书,也可作为本学科及相关学科的技术人员的参考书,希望能给他们提供尽可能多的帮助。

本书的很多成果是在著者的导师何振亚教授和副导师茅一民教授的悉心指导和帮助下获得的,在此表示最诚挚的感谢。东南大学无线电工程系的许多学友,特别是数字信号处理研究室的学友及老师也提供了许多帮助,在此表达由衷的谢意。

本书的出版,首先得益于河北大学出版基金的资助,在此,衷心感谢河北大学领导及其政策,其次感谢电子与信息工程系有关领导的大力支持。在编辑排版过程中,得到科研处王艳玉、出版社夏杏芝等同志的协助。特别是河北大学出版社排版部主任韩勇同志,作为本书责任编辑,对书稿从校对到实施编排的整个过程中,认真仔细,不辞辛苦,令我感动和钦佩。出版社胡平分社长亲自过问该书的出版。在此对以上同志表示真诚的感谢!

由于本学科发展迅速,著者水平有限,难免会存在这样那样的问题,恳请读者予以指正!

著者 邹国良

1996年10月于保定

目 录

第一章 自适应信号处理综述	(1)
§ 1.1 自适应信号处理的原理及用途	(1)
§ 1.2 自适应滤波器的分类及含义	(2)
§ 1.3 自适应算法简述	(8)
§ 1.4 自适应信号处理的现状与发展趋势	(10)
第二章 自适应准则及规范方程	(12)
§ 2.1 维纳(Winener)滤波器	(12)
§ 2.2 最小均方准则(LMS)	(13)
§ 2.3 最小二乘准则(LS)	(15)
§ 2.4 规范方程与求解	(18)
第三章 最小均方(LMS)算法	(19)
§ 3.1 LMS算法的推导	(19)
§ 3.2 LMS算法的收敛性	(20)
§ 3.3 LMS算法的步长优化	(25)
§ 3.4 LMS算法分析结论的验证	(27)
§ 3.5 LMS算法的推广和应用	(31)
第四章 LMS算法的量化效应分析	(35)
§ 4.1 量化后参量及误差的约定与分析	(35)
§ 4.2 舍入处理的LMS量化效应	(42)
§ 4.3 截断处理的LMS量化效应	(46)
§ 4.4 量化效应的结论与验证	(53)
第五章 最小高阶均方(LMF)算法	(59)
§ 5.1 LMF算法的推导	(59)

§ 5.2	LMF 算法的收敛性	(60)
§ 5.3	LMF 算法与 LMS 算法的比较	(63)
第六章	LMF 算法的量化效应分析	(67)
§ 6.1	LMF 算法的量化效应综述	(67)
§ 6.2	舍入处理的 LMF 量化效应	(71)
§ 6.3	截断处理的 LMF 量化效应	(76)
§ 6.4	LMF 量化效应结论与验证	(81)
第七章	LS 算法及格形算法	(85)
§ 7.1	LS 算法的推导分析	(85)
§ 7.2	快速 LS 算法的推导分析	(90)
§ 7.3	卡尔曼(Kalman)算法	(95)
§ 7.4	LMS 格形算法(Durbin 算法)	(98)
§ 7.5	LS 格形算法	(102)
第八章	自适应 IIR 数字滤波器	(108)
§ 8.1	引 言	(108)
§ 8.2	结构 a 的自适应算法及收敛性	(110)
§ 8.3	结构 b 的自适应算法及收敛性	(115)
§ 8.4	计算机仿真及结果分析	(122)
第九章	传统的自适应均衡器	(127)
§ 9.1	综 述	(127)
§ 9.2	线性均衡器(LE)	(129)
§ 9.3	判决反馈均衡器(DFE)	(132)
§ 9.4	线性抵消均衡器(LCE)	(136)
§ 9.5	改进型传统均衡器	(138)
第十章	理相均衡器(IE)模型	(142)
§ 10.1	高频时变信道的等效基带模型	(142)
§ 10.2	理想均衡器(IE)模型的建立与分析	(146)
§ 10.3	IE 与传统均衡器的关系	(152)

§ 10.4	误码率(ECR)的估算	(155)
第十一章	理想均衡器的最佳自适应实现(OAE)	(159)
§ 11.1	理想均衡器的算法结构	(159)
§ 11.2	OAE 的稳定性及改进算法	(165)
§ 11.3	定阶及量化误差对系统性能的影响	(170)
§ 11.4	定时相位对系统性能的影响	(178)
§ 11.5	计算机仿真与结果分析	(179)
第十二章	IE 模型的改进与推广	(187)
§ 12.1	非理想条件下 IE 及 OAE 的修正	(187)
§ 12.2	OAE 结构的进一步化简	(190)
§ 12.3	OAE 的一种改进结构	(192)
§ 12.4	OAE 及 IE 向二维图象滤波的推广	(194)
第十三章	用高速信号处理器实现的自适应数字滤波器	(197)
§ 13.1	TMS320C25 通用信号处理开发板	(197)
§ 13.2	OAE 系统的实现	(200)
§ 13.3	LMS 自适应滤波器的实现	(207)
§ 13.4	自适应回波抵消器的实现	(211)
第十四章	二维自适应滤波器	(213)
§ 14.1	二维信号处理的现状与发展	(213)
§ 14.2	二维图象失真的建模	(214)
§ 14.3	阶递归 LS 快速自适应算法	(216)
§ 14.4	空域递归 LS 快速自适应算法	(220)
§ 14.5	二维最佳自适应滤波器(OAF)	(231)
参考文献		(237)

第一章 自适应信号处理综述

纵观信号处理技术的进步,它经历了从模拟到数字、固定到自适应的发展历程。这种发展是以当时技术水平与能力,以及技术发展的需求为前提逐渐进行的。但两条发展主线是交叉进行的。数字信号处理与模拟信号处理相比有几大优点:① 精度高。数字系统的精度很容易控制,而模拟系统则很不易控制;② 灵活性大,同一套硬件系统,改变程序及参数可实现不同功能的处理;③ 可靠性高。由于数字系统以“0”与“1”两种电平工作,几乎不受元器件本身特性差异的影响,抗干扰能力也强,不易损坏;④ 易于大规模集成。数字系统的逻辑可组合功能强,并且每个部件的高度规范性,便于大规模集成和生产,高成品率与低价格使之富有技术生命力;⑤ 时分复用。数字系统随处理功能的日益强大,同一时间内,可同时完成几个通道信号的处理及多个处理功能。

由于数字信号处理的诸多优点,使之在各个科学技术与经济领域得到了广泛应用。但是随着科学技术的发展,特别是电子技术的发展,人们对信号处理功能的需要越来越高。时不变的数字信号处理的局限性日渐明显,在相当多的场合已不适应于需要。由此,促使自适应信号处理技术与理论快速发展。

§ 1.1 自适应信号处理原理及用途

数字信号处理系统一旦按指标设计完毕,其系统结构和参数就固定不变了,其对应功能也就确定了。但实际需处理的信号,其干扰的特性是时变的,引起信号失真的因素是时变的,并且变化很

快,变化范围很大,如数据移动通信中的信道十分复杂,而且其变化很大,车辆在道路上快速运动并不断转向,周围建筑物的反射和绕射环境快速改变。要克服这种信道引起的失真,必须用快速自适应跟踪算法才能实现。

自适应数字信号处理,顾名思义,它能随着干扰变化而自动地变化,其参数甚至结构都能按要求不断修正改变,以达到某些性能指标的要求。实际自适应信号处理的含义也基本如此。

从原理上讲,自适应信号处理参数的调整是按某种最优化准则,对某种代价函数进行优化为依据的。这种优化的过程在技术上往往演化成某个算法。通过建立输出与输入的联系方式,算法的反复迭代运算,就实现了某种自适应处理的功能及过程。

自适应信号处理的基本用途可以分为两类。一类是从未知特征的信号和物理过程中提取所需要的信息。这些信号的特征和物理过程是时变的,所以信息的提取也是跟踪进行的。另一类对所接收的信号,去除干扰和失真,保留有用信息,而这种干扰和失真也是时变的,并且在频谱和波形上与有用信息有交叠。这两类应用是紧密联系的,有时一个自适应系统可能兼有两种用途。

从另一个角度出发,自适应系统可分自适应谱处理(AST)和自适应滤波两类用途。如果按所处理的信号来分,又可分为一维自适应处理,和 multidimensional 自适应处理两种用途。广义地说,自适应处理的核心特征是信息的分离和提取,即滤波。本书正是基于这个思想而命名为自适应滤波理论及应用。

§ 1.2 自适应滤波系统的分类及含义

自适应滤波系统从功能上划分可分为三大类,它们是:自适应系统辨识(ASI)、自适应线性预测(ALP)、自适应均衡(AE)。下面就它们的含义,分别加以叙述。

1. 自适应系统辨识(ASI)。ASI 有两种基本形式,如图 1.

1(a) 和(b) 所示。图中, $H(Z)$ 为待识别系统, $\hat{H}(Z)$ 为自适应跟踪系统。在这两种形式中, 输入序列 $x(n)$ 应该是广谱分布的序列, 一般是满足某种分布的随机序列或伪随机序列。习惯上, 我们要对待识系统进行先验建模, 目前最常用的有自回归(AR)、滑动平均(MA)、自回归滑动平均(ARMA) 三种模型, 对应着三种典型结构, 并同时确定系统的规模或阶数, 而随后进行的系统辨识就是通过某些准则进行递归或非递归的参数确定。衡量自适应系统辨识的优劣可用几个指标: ① 收敛速度, 在最短的时间或数据点数内, 达到稳定收敛; ② 收敛精度, 误差信号 $e(n)$ 应达到最小; ③ 运算量, 完成每次迭代运算即参数调整及信号比较的加、减、乘和除的次数最少, 花时最少。系统结构也有多种, 有关结构的分类在后面叙述, 这儿不再详述。

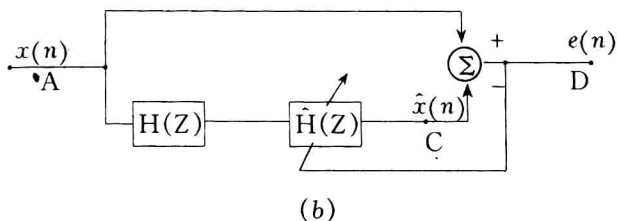
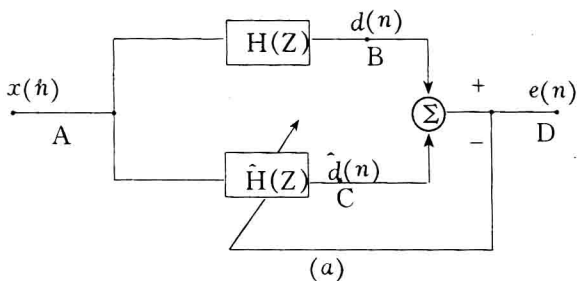


图 1.1 ASI 两类系统原理框图

自适应系统辨识较典型的应用是谱分析与谱估计, 如自适应最大熵谱估计, 就是 AR 结构的 ASI。此外, 自适应逆滤波(AIF)

本身是自适应滤波的重要内容,也是 ASI 的一种形式。

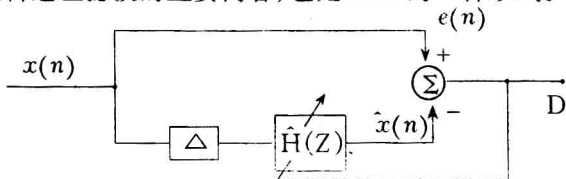


图 1.2 线性预测原理图

2. 自适应线性预测 (ALP)。ALP 在 自适应线性谱增强 (ALE), 自适应线性预测编码 (LPC) 等方面的应用最为典型,如图 1.2 所示。图中 $\hat{H}(Z)$ 为预测系统。 Δ 为时延, $\Delta = 1$ 称为一步 ALP, $\Delta = 2$ 称为两步 ALP, 以此类推。线性预测器有时也称为白化滤波器 (WF), 因为经过预测后, $e(n)$ 的相关性将不如 $x(n)$, 即 ALE 滤除了 $x(n)$ 的相关分量, 使 $e(n)$ 的特性接近于白噪声。 $\hat{x}(n)$ 称为 ALE 的输出, 它主要由 $x(n)$ 中相关性强的分量组成。

ALP 也可有多种结构形式, 与 ASI 类似。ALP 有时也称为线性特征提取, 这是信号分析的一种强有力的手段, 通过特征提取和压缩, 可使同一信息的有效数据量大大减少, 对语音和文字, 以及图象的数据通讯与传输十分重要。

3. 自适应均衡 (AE)。自适应均衡在当代数据通信中, 是与编码与解码 (Codec)、调制与解调 (Modem) 并列的三大核心技术之一。自适应均衡的原理如图 1.3 所示。图中 $S(n)$ 为数据经编码后的信码。实质上讲, AE 是图 1.1(b) 的系统辨识, 所不同的是, 在接收端发射信码是未知的, 若已知则无需均衡了, 只能通过判决来获得, 判决的最基本方式是“0”与“1”的判决。通过比较判决前后的误差来调整均衡器的结构参数, 使误差尽可能小。衡量 AE 的指标除了 ASI 中的三条外, 还有最重要的一条是接收信码的误码率 (ECR)。当然这几条指标是相互关连的。自适应均衡器是本书的重要内容, 后面要用专门几章研究, 这儿不再累述。

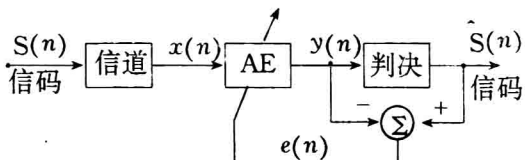


图 1.3 自适应均衡原理图

自适应滤波系统，若按结构分可分为自适应横向滤波器 (ATF)，自适应反馈滤波器 (AFF)，自适应陷波器 (ANF)，自适应格形滤波器及自适应梯格形滤波器 (ALF 与 ALLF) 等五种。下面分别介绍其含义。

1. 自适应横向滤波器 (ATF)。ATF 是自适应滤波器中最常用的结构之一，如图 1.4 所示。图中， $x(n)$ 为 ATF 的输入， $d(n)$ 为参考输入或理想输入， $y(n)$ 为输出， $e(n)$ 为误差信号， $W_0 \dots W_{N-1}$ 为系统参数， N 为系统阶数。对于不同的用途， $d(n)$ 的选择是不同的，并且是至关重要的。横向滤波器总体说只有 LMS 和 LS 两大类，但针对具体应用有很多的特点及形式，在本书一些具体章节中将详细讨论。

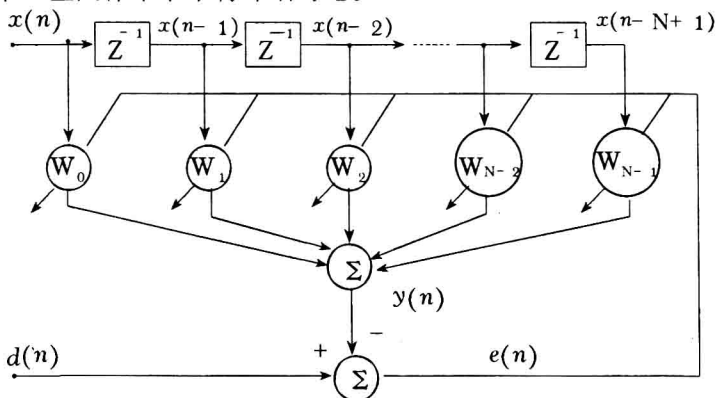


图 1.4 自适应横向滤波器结构

2. 自适应反馈滤波器 (AFF)。AFF 一般是指带有自回归结构的线性滤波器，象第八章中的 IIR 自适应滤波器、第九章中的判决

反馈均衡器(DFE)都属于这一类。由于这一类结构存在极点,所以算法的及系统的稳定性是至关重要的。有些参考文献中,也把这一结构列为横向结构,因为在形式上和算法上与之非常相似。反馈滤波器的典型结构如图1.5所示。图中 $\hat{A}(Z)$, $\hat{B}(Z)$ 为与图1.4一样的线性结构。本书中的第十与第十一、十二等章中的IE, OAE结构为广义反馈结构,要比图1.5复杂得多,我们将在后面叙述,这儿不再讨论。

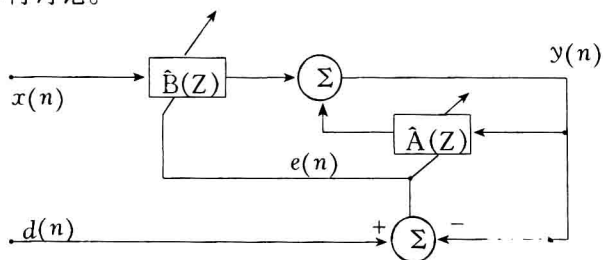


图 1.5 自适应反馈滤波器

3. 自适应陷波器(ANF)。由于其结构上的特殊性,我们将它单独列出。ANF的前提是干扰为单频或谐波干扰,或多个干扰频率,这些频率正好落在有用信号的频谱内,采用自适应方法可跟踪这些信号的相位变化,比固定参数的点阻滤波器效果更好。ANF

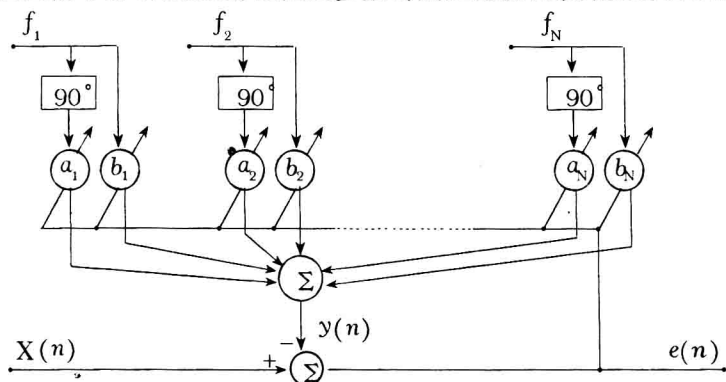


图 1.6 自适应陷波器原理图

一般可将单频干扰抑制 50dB 以上, 甚至 70dB 以上。ANF 如图 1.6 所示。图中 90° 表示 90° 移相器, f_1, f_2, \dots, f_N 为干扰信号频率。心电图信号处理中 50Hz 干扰的抑制就是采用 ANF。

4. 自适应格形滤波器 (ALF)。自适应格形滤波器的最初是来源于 Durbin 算法中关于阶递归的概念, 后经人们的发展形成了一类独特的算法结构, 该结构由格形算法决定。最基本的用于线性预测的格形结构如图 1.7 所示。图中 $e_N^f(n)$ 为 N 阶前向预测误差, $e_N^b(n)$ 为 N 阶后向预测误差, k_1, k_2, \dots, k_N 为需自适应调整的参数, 这仅是一个简单算法, 较复杂的算法还分前向及后向系数 $k_i^f, k_i^b, i = 1, 2, \dots, N$ 。图中结构完成的功能与图 1.4 实现的 N 阶线性预测器类似, 但性能上有差异, 运算量也不同。

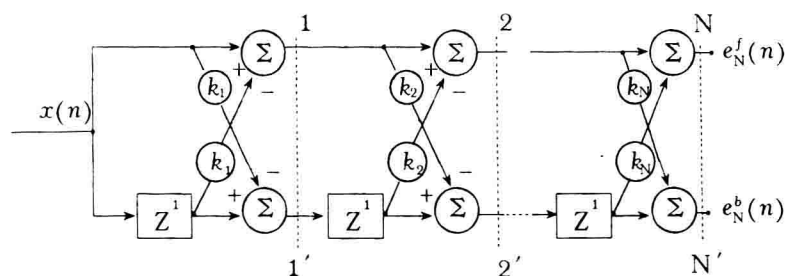


图 1.7 N 阶格形滤波器原理图

5. 梯格型自适应滤波器 (ALLF)。ALLF 有两种结构, 一种是图 1.7 再加图 1.4, 可完成横向滤波器的功能, 另一种是反向传递格形加梯形结构, 完成图 1.5 的反馈滤波器的功能, 如图 1.8 所示。

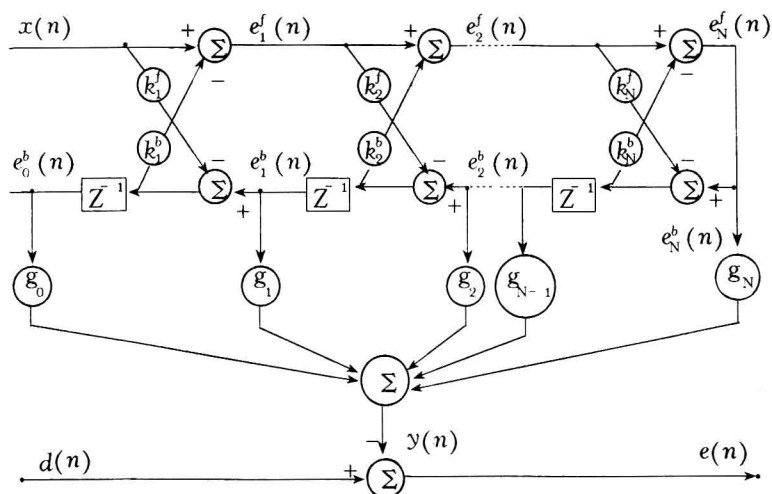


图 1.8 N 阶反馈式梯格形滤波器

§ 1.3 自适应算法简述

自适应信号处理及自适应滤波的核心内容是自适应算法，不同的自适应算法结合不同的系统结构形成了不同的自适应系统。

自适应算法是由特定的优化准则作用于相应的代价函数或目标函数后的产物。所有自适应技术的起源，是以美国科学家维纳 (Wiener) 于二十世纪 40 年代提出的维纳滤波器模型为基础的。维纳滤波器以维纳 - 霍夫 (Wiener - Holf) 方程的形式给出

$$R\vec{W}_{opt} = \vec{P} \quad (1-1)$$

$$R = E\{\vec{X}(n)\vec{X}^T(n)\} \quad (1-2)$$

$$\vec{P} = E\{d(n)\vec{X}(n)\} \quad (1-3)$$

式中 $\vec{X}(n)$ 为由输入 $x(n)$ 及其延迟组成的矢量，称为输入矢量，该式对应于图 1.4 的横向滤波器结构，其它滤波器的方程表达形式类似。维纳滤波器这儿不再细说。维纳滤波器是一种理想模型，