第一章　适应系统的 MRAS

在控制对象的特性变化时，有可能把控制规律适应于对应的变化和维持高的控制性能。将这样的控制方式称作适应控制(adaptive control)，将具备适应机能的系统称作适应系统(adaptive system)。本书所研究的是对被称为模型参考适应系统(model reference adaptive system:MRAS)的设计及控制应用的问题。本章中，首先在 1.1 节介绍以利用参考模型(reference model)为中心的 MRAS 和以往的反馈控制理论的关系。1.2 节是适应系统的一般概况。在 1.3 节，明确 MRAS 的基本构成，并论述作为控制目的的 MRAS 和作为辨识为目的的 MRAS 的对偶性。另外还介绍几个 MRAS 的具体应用例子。

1.1　反馈控制和适应控制 —— 参考模型的应用

反馈的原理是古代纪元前希腊的水时计、17 世纪应用于瓦特蒸汽机的调速机、也是构成今日体系化自动控制的基础。但是，仅仅是反馈控制理论，在解决实际控制问题中往往是不够的。例如，在应用反馈控制理论之前，必须充分地把握控制对象的特性。另外，控制对象的特性在随时间变化的场合，仅用通常的反馈控制是不能维持高的性能的。作为提高控制性能的方法有：

(1) 使对于反馈控制系统参数变动的敏感度变小。

(2) 在线辨识控制对象的特性下，修正基于辨识 (identify) 结果的控制规律的参数。

(3) 基于评价反馈控制系统性能的性能指标 (index of performance) 的实测值和理想值的比较结果，直接修正控制规律。

关于第 1 个方法,在称为‘控制系统的敏感度’的领域里的研究增多了。这个方法在参数变化较小时是有效的。第 2、第 3 个方法虽然同是适应控制，但第 2 个方法在实用上有几个问题。其中一个问题是适应动作必须在辨识结束，时间上就迟了。

对第 3 个方法，明显地存在着适应控制和通常的反馈控制不一致的地方。适应控制系统和通常的反馈控制系统，同时含有状态或输出的反馈回路，这一点上虽然有共性，但是在适应控制系统中,存在性能指标这样抽象的目标变量,和与‘系统性能’有关的反馈回路。为了使性能指标的理论值和实测值的差变小，利用两者的差反馈至适应规律，改变控制系数或者改变控制对象的输入。“适应规律”对应于反馈控制的‘控制规律’,决定适应规律,是设计适应控制系统的主要课题。

对适应控制的关心日益高涨，许多适应控制方法的出现是进入 50 年代后开始的。模型参考适应系统 (MRAS) 的考虑方法,出现在 50 年代末。 MRAS 的特点是被称为参考模型 (reference model) 的动态系统是整个系统的一部分，并设定了性能指标的理想值。参考模型的考虑方法，不限于适应控制理论，即使线性控制理论使用得也很多。这里考虑一下在线性控制理论和适应控制理论中是怎样应用参考模型。

【1】 线性控制论中参考模型的应用

在线性二次形最优控制问题 (linear quadratic optimal control problem)[1]中，控制对象由以下状态方程式表示：

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{x}}{\mathrm{d}t}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{B}\boldsymbol{u} \tag{1.1}$$

式中,$\boldsymbol{x}$ 为状态矢量；$\boldsymbol{u}$ 为控制输入；$\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{B}$ 分别为适当维元的常系数矩阵。

对于这个控制对象，求二次形式评价函数

$$J=\int_0^{t_f}[\boldsymbol{x}^T\boldsymbol{Q}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{u}^T\boldsymbol{R}\boldsymbol{u}]\,\mathrm{d}t \tag{1.2}$$

为最小的最优控制，即是 LQ 问题。式中 Q 及 R 为正定对称矩阵(Q 也可为半正定)，T 是转置的记号。

LQ 问题能够解析解，最优控制即变成状态矢量的线性反馈控制：$u=-Kx$。在此要注意以下事项：

(1) 式(1.1)的线性状态方程式，作为控制对象的模型，不切合的情况也有。

(2) 根据式(1.2)的二次形式评价函数最优性与从工程角度看的最优性不一致的情况很多。另外，反馈控制增益 K 由于依赖于 Q 和 R，即使在二次形目标函数是合适的场合，在工程上要选择最优的 Q 和 R 是不容易的。

(3 状态方程式中的 A 和 B 常常含有未知参数。

(4 为了实现状态反馈控制，一般地必须知道状态矢量的全部分量。而在许多情况下，直接地测量状态矢量的全部分量是不可能的,或者从成本观点看,没有好的方法。

利用 LQ 问题，设计控制系统时，以上的问题如何处理好呢？首先假定作为控制对象模型的式 (1.1) 是合适的：参数全部已知、状态矢量完全而且直接地可以测量。余下问题是选择式 (1.2)目标函数中的 Q 和 R。这个问题，随着控制对象阶次增加变得越来越复杂。许多实际问题，输入及状态变量的过渡响应特性在工程上虽可以满足，但更为重要的是二次目标函数最小化。由于式(1.2)的目标函数是积分形式，对于各瞬间的输入及状态变量是不明显的。例如把上升时间、超调量、衰减等用 Q 和 R 的形式来表示相当困难。在这种情况下，可以考虑这样的控制输入：把具有所要求的动态特性的理想模型作为“参考模型”，使控制对象跟踪参考模型。

即用输入 u_M，把被驱动的参考模型的状态矢量作为 x_M,求使以下二次形目标函数为最小的控制输入：

$$J=\int_0^{t_f}\{[x_M-x]^T Q[x_M-x]+u^T Ru\}\mathrm{d}t \qquad (1.3)$$

在这个目标函数中，正定对称矩阵 Q 和 R 的意义很明确。Q

和 R 影响到控制对象的模型跟踪性能。

参考模型可以间接或直接地进行应用。前者只是在计算控制规律时使用参考模型，后者把参考模型作为控制系统的一部分（参考图 1.1)。在图 1.1 的线性模型跟踪控制系统（linear model following control system)中，误差矢量 $e=x_M-x$，由各时刻参考模型期望输出值和控制对象的实际值之差直接地进行判明。这样的参考模型考虑方法，在线性控制系统的设计中是有效的。

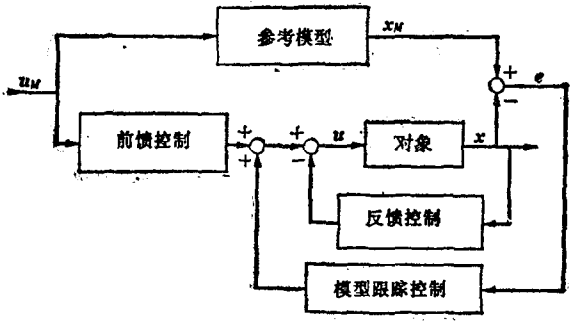


图 1.1 线性模型跟踪控制系统

这里看一下状态矢量的测量问题。对象的参数如果已知，把不能直接测量的状态变量由观测器 (observer)[3]估计，把(比 x 低阶的)可能测定的输出矢量设为

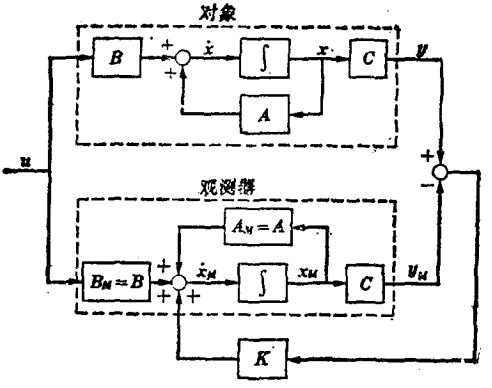


图 1.2 线性状态观测器

$$y=Cx \tag{1.4}$$

则含有观测器的状态观测系统的组成由图 1.2 表示出。

观测器是由和对象同一的信号驱动的数学模型，但也可以认为对象是观测器参考模型。把对象和观测器的输出差，通过适当增量反馈到观测器的输入端，则就能保证

$$\lim_{t\to\infty}(x_M(t)-x(t))=0$$

图 1.1 的线性模型跟踪系统和图 1.2 的状态观测系统，具有以下共同点。首先，尽管两者的使用目的不相同，但组成相似。两者同样地可分割为实际过程和模型两个部分系统。且把两个状态矢量 x_M 和 x 相一致为目的，为了达到该目的，把状态矢量或者输出矢量之间的差作为反馈信号，在这点上也是相同的。

状态方程式中的矩阵 A 和 B 的确定问题，即考虑参数辨识(parameter identification)问题。如果 A 和 B 的结构已知，辨识的目的在于调整模型的 A 和 B，使模型输入输出特性和实际过程的输入输出特性相一致。这个辨识问题也含有参考模型的概念。即实际过程是辨识用的参考模型。

按以上的考察，参考模型的概念很明显地在线性控制系统的设计、不可测定的状态变量的估计以及未知参数的辨识中得到应用。

[2] 适应控制理论的参考模型——MRAS

图 1.3 表示含有参考模型的适应控制系统。具有所要求的动态特性的参考模型状态和控制对象状态之差，表示在各时刻期望值和实际值的偏差，这在线性模型跟踪控制系统中已作叙述。在适应控制系统，在把误差矢量 $e=x_M-x$ 使用于误差自身的反馈补偿同时，也应用于控制规律参数修正或者产生辅助输入信号。

当适应性必须设置观测器(用于估计对象参数不确切已知时对象的状态)时，在此情况下，对象过程输出和观测器输出的差，被反馈到观测器的输入端。同时，由于利用调节观测器参数，则可保证；

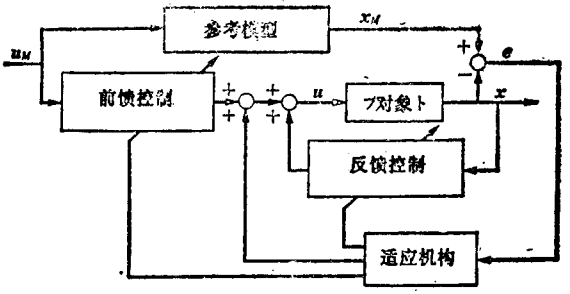


图 1.3　含有参考模型的适应控制系统（适应模型跟踪系统）

$$\lim(\boldsymbol{x}_M(t)-\boldsymbol{x}(t))=\boldsymbol{0}$$

该 MRAS 构成的“适应观测器”具有以下特点：

(1) 和观测器参数的初始值无关，观测器的状态矢量收敛于过程的状态矢量。

(2) (在某些条件下)观测器的参数收敛于过程的参数。

MRAS 弥补了把 LQ 问题作为中心的线性控制理论的不足，在解决实际问题方面十分有效。另一方面， MRAS 比 LQ 问题更引人注目，这是饶有兴味的。

MRAS 与人们的思考和行为过程的适应性相关连。例如，记述物理、社会或者生物现象，我们首先设想出一个定性的模型结构，以反映各变量因果特性现象。其次，为了决定这个结构的适宜因果关系，选择模型的参数。而且把模型和实际现象比较，不断修正参数，直至得到与实际情况匹配的模型。即，对于适应机构的人们的操作，不外乎“含有可调模型的辨识(MRAS 辨识)”，一边利用模型某种程度被确定的现象，一边进行操作。在这种情况下，我们虽然基于模型建立起确保期望的对策，但十分清楚模型是不完全的，或者模型的恰当程度随条件而变化。因此，我们把实际值和期望值相比较，使适应对策能在期望值附近操作。这种操作相当于“适应模型跟踪控制”。

1.2 适应控制系统概论

【1】 适应系统

反馈控制主要是以处理外扰输入为目的的。适应控制是以控制对象的动态特性变化，即处理参数变化为目的。例如：

[飞机] 飞机的动态特性，取决于高度、速度、机体的姿态。参数的变化，(极大值)／(极小值)从 10 达到 50 的程度。

[船舶] 大型油轮的动特性，依赖于载重量、航路的水深等。

[电气设备] 串联马达的动特性，随着负荷的惯性效率和摩擦而变化。由于这个原因，应用于压延机、卷扬机、工作机械、跟踪望远镜等就产生了问题。参数变化，(极大值)／(极小值)从 3 达到 100 的程度。硅可控整流回路因有能量—— 效率、价格、体积等方面的优点，应用在许多电机控制上，但导通角的变化影响到等价增量及时间常数。

[冶金过程] 冶金过程带有间隙。另外，还必须考虑反应炉特性的逐年变化、材料的不均匀性等。

以上是在实际控制问题中遇到的若干例子。下面论述控制系统的设计问题。现场的控制技术人员需要的是结构简单同时即使在参数变动情况下，仍能保持允许性能的控制系统。参数变化范围小，用灵敏度方法的固定控制规律也能满足；但在参数大范围变化时，必须考虑适应方法。取固定控制规律还是选适应控制规律，决定于克服环境条件变动所必须的控制系统性能。这里叙述一下“适应系统”的定义。①

定义 **1.1**(适应系统)[4,9]：所谓适应系统是具备如下的适应机构 运用可调系统的输入、状态及输出，测量出性能指标(index of performance: IP)，并和给定的 IP 集合比较，根据比较结果，保持测定 IP 在设定 IP 集合附近(即在允许的 IP 集合内) 的参数

① 适应系统的定义还未统一，其他的定义请参考文献 5)～8)。

或具备产生辅助输入的适应机构。

把这个定义进行图解即是图 1.4。在定义所用的所谓“可调系统”，和文字一样是根据调节参数或者辅助输入信号，能够调节此动作的系统。性能指标直接地或间接地测量，例如通过参数辨识进行。图 1.4 的比较块，首先把测定的性能指标和给定的设定性能指标集合比较，判断在允许动作集合内是否圆满解决。在不能解决时，适应机构动作，调节可调系统的参数或者输入信号，修正其动作。一般地说，比较块不仅在集合里包含关系而且也计算出集合的距离。

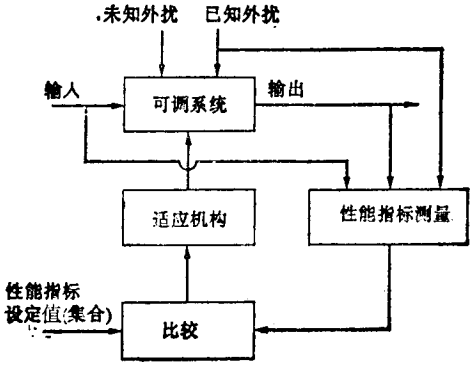


图 1.4 适应系统的基本组成

三个基本块(性能指标测定、比较、适应机构)错综复杂地交叉在一起，难以绝然分开，虽然也有分解各部分的适应系统，但是判明系统是否真正“适应”的重要基准是性能指标闭环是否存在。

图 1.5 的系统是利用测定可能的环境变量和控制对象的参数之间的已知关系，调节控制装置。但是，由适应机构修正的系统的性能不能预先测定，另外也没有反馈到比较块。因此，图 1.5 的系统并不是用定义 1.1 那种意义的适应控制系统，只可称作开环适应控制系统。把飞机的自动操纵特性以速度和高度为基准进行修正适应方式，就是这个原理的典型用例。在本书，把满足定义1.1的称为“适应系统”。

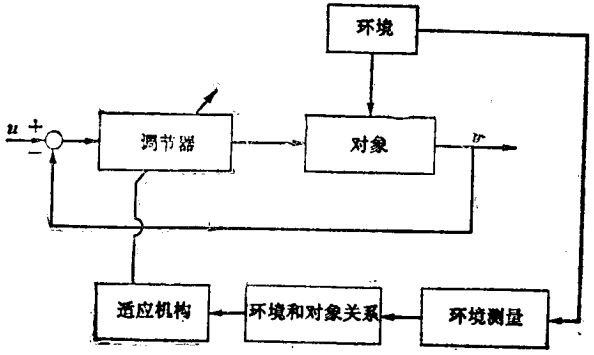


图 1.5　开环适应控制系统

[2]　适应系统的分类

适应系统的分类方法有各种各样。基本上可以认为有着眼于适应回路的种种模块特性分类法或着眼于进行如何适应动作分类方法。它可分：

(a) 基于性能指标(index of performance: IP)分类

(1) 静态 IP。

(2) 动态 IP。

(3) 参数形 IP。

(4) 状态变量及输入的泛函形 IP。

静态 IP 的一个例子是内燃机的效率。对于动态 IP,例如系统的阶跃响应波形。闭环控制系统的衰减系数是（动态）参数形 IP 的一个例子。另外，二次形积分准则是状态变量及输入的泛函形 IP。

根据比较块的特性，可以进行如下分类。

(b) 基于比较块特性分类

(1) 减法器。

(2) IP 的极小值或极大值的探索。

(3) 在 IP 某领域的属性。

设定 IP 随各状态被唯一指定，用一个信号表示时，可以用减

法器。第二个方式中，被用在把 IP 的极大化或极小化作为目标的‘极值保持’适应系统中。例如，可提出内燃机效率极大化[8]。第三个方式被应用于把闭环系统的衰减系数保持在 0.6～0.8之间。

依照适应机构如何调节可调系统，可以进行如下分类。

(c) 基于适应机构的分类

(1) 参数适应。

(2) 信号综合适应。

例如，把适应动作作用于反馈控制系统时，可以考虑调节控制装置的参数和把附加信号加到控制装置的输出，直接调节输入作用于控制对象的方法。

若着眼于适应作用的方式，有以下三种情况。

(d) 基于适应作用的方式分类

(1) 确定性适应作用。

(2) 随机性适应作用。

(3) 学习性适应作用。

对确定性适应作用在此不再赘述。在 IP 测量块或比较块的设计中，若应用随机的概念，则适应作用成为随机性。在各种模型中，含有记忆、特性认识机能时的适应作用，就是学习性的。学习系统，根据过去的记忆，经验状况的判断，改善适应作用。学习系统虽是适应系统，但是适应系统未必具备学习机能。学习系统有重要而不同的特点，本书没有列入。

最后，叙述根据帮助适应作用的试验信号分类。

(e) 基于试验信号分类

(1) 有试验信号场合。

a. 用于输入；

b. 用于可调参数。

(2) 没有试验信号的场合。

对于试验信号，在系统已存的信号用质量和速度方面不能充分地决定 IP 时使用。例如，对目标值一定的闭环系统，想辨识对象过程的参数时，把试验信号加到过程设备，就能得到良好结果。

1.3 模型参考适应系统(MRAS)

[1] MRAS的基本构成

在 MRAS 中，由与可调系统的输入同一信号驱动的“参考模型”的输出或状态矢量构成“参考 IP”,即图1.4的“设定性能指标集合”。为了比较参考 IP 和可调系统测定的 IP,要用参考模型和可调系统的输出误差。适应机构是基于两者的差，修正使两者 IP 差的目标函数变小的可调系统参数或者产生辅助输出信号的机构。

MRAS 的基本组成如图 1.6 所示。这个适应系统的一个重要优点是适应动作的速度很快。这是因为参考模型决定的参考 IP 和可调系统测定的 IP 之差，由直接比较模型和可调系统的输出（或状态）而迅速达到的缘故。它的缺点是必须要具有有关模型或可调系统结构的某种程度的预备知识。

图 1.6 的 MRAS 组成被称为并联式 MRAS。以区别参考模型和可调系统的配置和它不一样的其它的 MRAS。

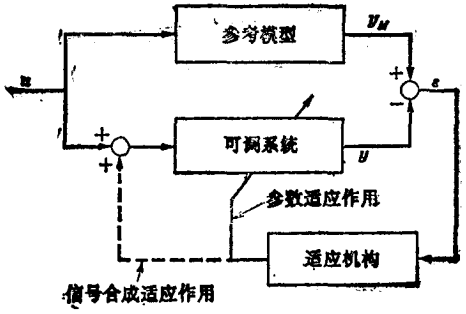


图 1.6 MRAS的基本组成

[2] 定义

考察图 1.6 的 MRAS 的组成。把这个参考模型和可调系统的状态方程式记述如下：

参考模型：

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{x}_M}{\mathrm{d}t}=\boldsymbol{A}_M\boldsymbol{x}_M+\boldsymbol{B}_M\boldsymbol{u} \tag{1.6}$$

$$\boldsymbol{y}_M=\boldsymbol{C}\boldsymbol{x}_M \tag{1.7}$$

并联可调系统：

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{x}}{\mathrm{d}t}=\boldsymbol{A}(t)\boldsymbol{x}+\boldsymbol{B}(t)\boldsymbol{u} \tag{1.8}$$

$$\boldsymbol{y}=\boldsymbol{C}\boldsymbol{x} \tag{1.9}$$

式中，$\boldsymbol{x}_M$, $\boldsymbol{x}$ 为 n 维状态矢量，$\boldsymbol{u}$ 为 m 维输入量；$\boldsymbol{y}_M$, $\boldsymbol{y}$ 为 r 维输出矢量，$\boldsymbol{A}_M$, $\boldsymbol{B}_M$, $\boldsymbol{C}$ 为时不变矩阵，$\boldsymbol{A}(t)$, $\boldsymbol{B}(t)$ 为时变矩阵。

参考模型和可调系统双方同样使用 $\boldsymbol{C}$，这并不失去一般性。但是，参考模型的状态变量和可调系统的状态变量，必须能够互助直接比较或对应。

以下预先介绍一下定义[4]。

定义 1.2(状态误差 $\boldsymbol{e}$)：表示参考模型的状态矢量 $\boldsymbol{x}_M$ 和可调系统的状态矢量 $\boldsymbol{x}$ 差的矢量

$$\boldsymbol{e}=\boldsymbol{x}_M-\boldsymbol{x} \tag{1.10}$$

定义 1.3(输出误差 ε)：表示参考模型的输出 $\boldsymbol{y}_M$ 和可调系统输出 $\boldsymbol{y}$ 差的矢量

$$\varepsilon=\boldsymbol{y}_M-\boldsymbol{y} \tag{1.11}$$

定义 1.4（状态距离）：参考模型的状态矢量和可调系统的状态矢量（或矩阵）差的任何一种范数。

定义 1.5(结构距离)参考模型的参数矢量(或矩阵)和可调系统参数矢量（或矩阵）差的任何一种范数。

定义 1.6(适应规律(算法))前面给出的定义 1.2、定义 1.3 的误差和可调系统参数或输入修正量的关系。

定义 1.7（适应机构）：为实施适应规律的一连串线性、非线性或者时变模型。

定义 1.8(模型参考适应系统，MRAS)：

a. 参考模型

$$\boldsymbol{y}_M=\boldsymbol{f}_M(\boldsymbol{u},\ \boldsymbol{P}_M,\ \boldsymbol{x}_M,\ t) \tag{1.12}$$

式中，P_M 为参考模型的参数。

b．可调系统

$$y=f(u,\ P,\ x,\ t) \tag{1.13}$$

式中，P 为可调系统的参数。

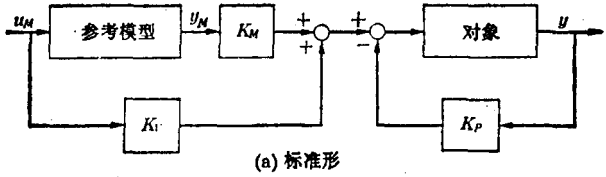
c．表示参考模型决定的参考 IP 和可调系统 IP 差的性能函数

$$J_{IP}=F(\varepsilon,\ P_M-P,\ e,\ t) \tag{1.14}$$

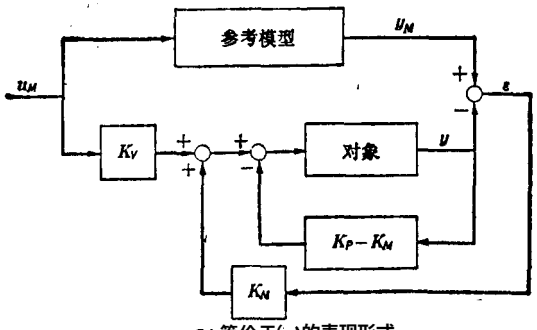
在以上三者给出时，MRAS 即是由适应机构反馈前面给出的误差 e 或 ε，进行参数适应或信号合成使式(1.14)的 J_{IP} 最小化的系统。

【3】 各种 MRAS 构成和 MRAS 的对偶性

像已经指出的那样，在应用 LQ 问题，设计控制系统时，调节二次形目标函数中的正定对称矩阵，得到期望的过渡响应特性相当困难。在这种情况，若使用图 1.7(a) 的线性模型跟踪控



(a) 标准形



(b) 等价于(a)的表现形式

图 1.7　线性模型跟踪控制

制”(liner model following control: LMFC) 就较好。在 LMFC 中，模型指定控制系统的期望特性。把 LMFC 像图 1.7(b)那样排列，则模型的作用变得更加明确[2,4]。在对象和模型参数已知的场合，应用线性控制理论，使计算含有对象和模型状态误差的二次形性能函数最小矩阵是可能的。

对象参数未知或在运行中离基准值有大的变化时，可应用“适应模型跟踪控制”(adaptive model following control: AMFC)。图 **1.8** 的 AMFC 系统，适应机构修正控制增量矩阵 K_V 及 K_P 或产生辅助输入信号，以确保良好的模型跟踪特性。这种系统也被称作“模型参考适应控制”系统[4](model reference adaptive control(MRAC) system)。关于 AMFC 的应用例子在本节 [5]接触。

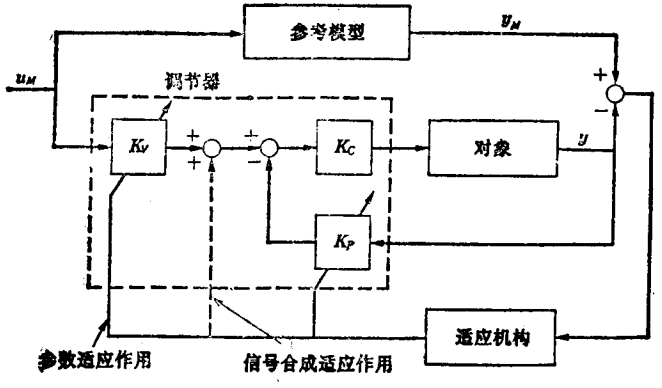


图 1.8 适应模型跟踪控制

图 **1.9**(a) 表示子各种形式的 AMFC 系统。此 AMFC，进行对象的输出、跟踪参考模型输出的信号合成适应动作。因此，即使对象的参数变化时，控制增量 K_P 和 K_V，可符合参考模型特性所设计的固定增益。这种方式在控制对象的一部分参数发生变化（例如图 1.9(b) 的位置控制系统中，过程含有纯积分的情况）时，也可以部分构成 AMFC。作为应用实例，有光学式望远镜跟踪位置控制[10]、船泊舵的控制[11]、电动机的速度控制等。

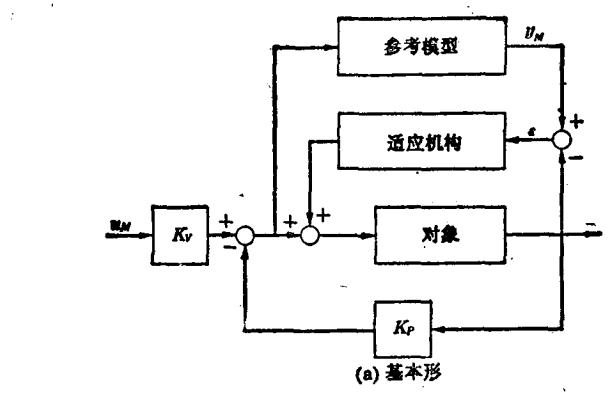


图 1.9 反馈回路内的 AMFC

LMFC 的对偶问题,是估计不能测状态变量的(状态)观测器(state observer)问题(图 1.10)。对象参数已知，噪声不存在时，观测器增益 K 由以下关系式成立的条件决定。

$$\lim_{t\to\infty}(\boldsymbol{x}(t)-\hat{\boldsymbol{x}}(t))=0 \quad \forall \boldsymbol{x}(0),\ \hat{\boldsymbol{x}}(0)\in R^n \qquad (1.15)$$

观测器的参数和对象的参数发生偏离时，观测器的状态矢量不能收敛于过程的状态矢量。这时,可使用图 1.11 所示的适应(状态)观测器(adaptive state observer)。适应观测器是和对象相同数学结构的“可调模型”。根据适应机构的信号，适应观测器的参数和状态各自跟踪对象的参数和状态。即状态观测和参数辨识是

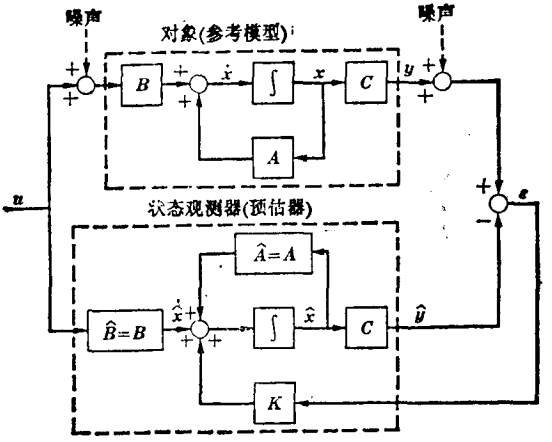


图 1.10 状态观测器

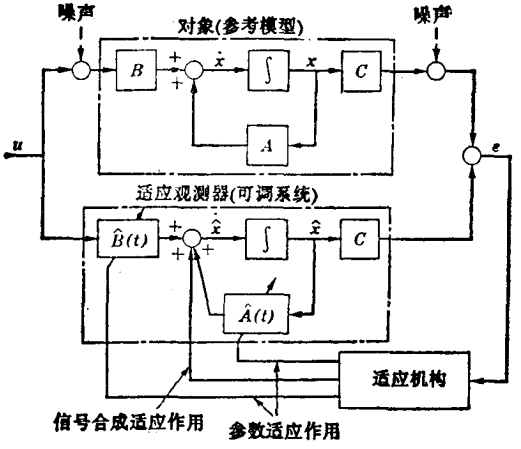


图 1.11

同时进行。在有噪声的场合，适当地选择适应机构的结构，对象的状态可以概率性地估计。

图 1.11 的适应观测器也可称为“含可调模型辨识(状态观测)器”。在第四章叙述的回归形(recursive)参数辨识方法可以如图 1.11 所示的 MRAS 形式构成。

图 1.8 的 MRAS构成(AMFC:把控制作为目的的 MRAS)[①]和图 1.11 的MRAS 构成（适应观测器：把辨识作为目的的 MRAS)是对偶关系，可归纳为图 1.12那样的关系。

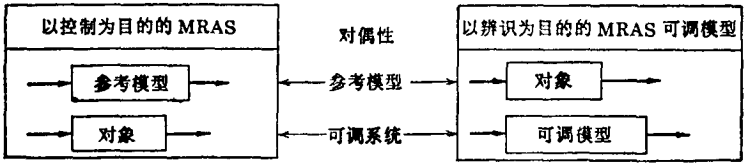


图 1.12 控制 MRAS及辨识 MRAS的对偶关系

因为控制用 MRAS 和辨识用 MRAS具有这样对偶特性，两者的分析和设计可以应用同样的理论。

在对象的参数未知状态不能直接测定的场合，可考虑用图 1.11 适应观察器组合实施的适应状态变量控制（图 1.13)。这个系统，对象输入 u影响适应性能[4,12]。在需要快速辨识对象参数时，常用较小振幅的试验信号（随机信号最理想）叠加到装置的输入。但是，这信号因为从控制观点看，变成外扰，必须谋求辨识和控制的协调来决定试验信号。

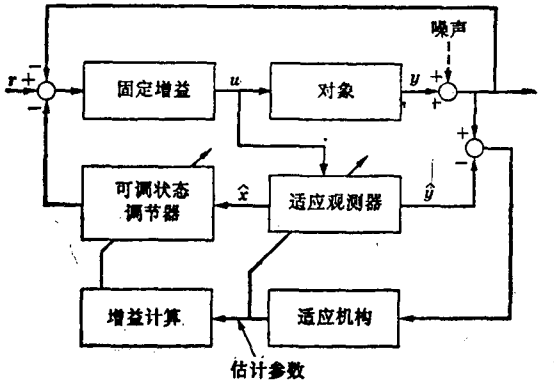


图 1.13 组合适应观测器的适应状态变量控制

可以把 AMFC和适应状态变量控制组合(图 1.14)，可以认

① 原文错印为 NRAS。—— 译者注