

切换系统的模型参考 自适应状态跟踪控制

伍彩云 刘 玮 著



東北大學出版社
Northeastern University Press

切换系统的模型参考自适应 状态跟踪控制

伍彩云 刘 晔 著



东北大学出版社

· 沈 阳 ·

© 伍彩云 刘 玮 2017

图书在版编目 (CIP) 数据

切换系统的模型参考自适应状态跟踪控制 / 伍彩云,
刘玮著. — 沈阳: 东北大学出版社, 2017. 6

ISBN 978-7-5517-1625-3

I. ①切… II. ①伍… ②刘… III. ①开关控制—研
究 IV. ①TP271

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 173269 号

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路三号巷 11 号

邮编: 110819

电话: 024-83683655(总编室) 83687331(营销部)

传真: 024-83687332(总编室) 83680180(营销部)

网址: <http://www.neupress.com>

E-mail: neuph@neupress.com

印 刷 者: 沈阳市第二市政建设工程公司印刷厂

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 170mm × 228mm

印 张: 7.75

字 数: 135 千字

出版时间: 2017 年 6 月第 1 版

印刷时间: 2017 年 6 月第 1 次印刷

责任编辑: 牛连功 潘佳宁

责任校对: 图 图

封面设计: 潘正一

责任出版: 唐敏志

ISBN 978-7-5517-1625-3

定 价: 25.00 元

前 言

切换系统是一类典型的混杂系统，有着重要的理论研究价值和广泛的工程应用背景。尤其是近些年来，切换系统已经成为自动控制研究领域中最热门的系統类型之一。然而在实际的控制系统中，描述系统本身的数学模型包含有未知或随机的因素，此时常规反馈控制方法可能无法使用或控制效果难以令人满意，因此，研究含有不确定性的切换系统就更加具有理论和实际意义。由于此类系统中连续动态、离散动态与不确定性同时存在并相互作用，使系统的行为变得异常复杂，系统运行机制远未明晰，所以大量的分析与综合问题亟待解决，然而目前关于这方面的研究还很有限。本书研究切换系统的模型参考自适应状态跟踪控制问题。我们在书中设计了相应的切换信号、切换控制器以及切换自适应律，并且针对系统的执行器失效、控制器失效及异步切换等情况分别进行了研究，主要内容概括如下：

(1) 通过设计切换信号解决了模型参考自适应控制系统的状态跟踪问题。对一类含有未知常参数的线性系统，当已有的有限个自适应控制器分别无法实现控制目标时，与传统解决方法不同，我们无需重新设计自适应控制器，而是通过在给定的有限个自适应控制器之间引入切换机制，利用凸组合方法设计出切换信号，实现了闭环系统的状态跟踪。

(2) 研究了带有执行器失效的模型参考自适应状态跟踪控制问题。针对执行器同时失效，且在有限时间内同时恢复正常工作的情况，将带有执行器失效的系统看作一个切换系统，设计了自适应控制器并建立误差切换系统，利用驻留时间方法得到误差切换系统是全局实用稳定的充分条件。所提出的方法，不需要执行器中至少有一个能够实现控制目标的假设条件，而现有有关执行器失效的结果中，基本上都需要此假设。因此，我们所提出的方法对只具有单一执行器系统的执行器失效问题仍是有效的。

(3) 针对控制器失效且在有限时间内恢复工作的情况, 研究了一类非线性不确定系统的状态跟踪问题。给出了带有控制器失效的模型参考自适应状态跟踪问题可解的充分条件。将带有控制器失效的系统转化为误差切换系统, 并设计了切换自适应律。利用驻留时间方法, 得到了误差切换系统是全局实用稳定的结果。

(4) 首次研究了含有未知常参数切换系统的 H_∞ 状态跟踪控制问题。在给出切换参考模型是有界输入有界状态稳定的充分条件后, 对带有外部扰动信号的误差切换系统设计了 H_∞ 自适应控制器, 利用平均驻留时间方法得到了误差切换系统的全局实用稳定性的充分条件, 使得切换系统的模型参考自适应 H_∞ 状态跟踪控制问题可解。本书给出了当含有未知常参数的切换系统在受到外部扰动时的模型参考自适应 H_∞ 状态跟踪控制问题的一种解决方法。

(5) 对具有未知常参数的切换系统, 首次研究了异步切换下的模型参考自适应状态跟踪控制问题。针对切换系统在实际运行中有可能出现的子系统切换与控制器切换不同步的情况, 本书给出充分条件得到切换参考模型的有界输入有界状态稳定性, 进而将状态跟踪控制问题转化为误差切换系统的稳定性问题。设计了参数投影自适应律, 并且提出一种方法可以估计出状态跟踪误差的上升率和下降率, 利用驻留时间方法找到一类切换信号, 使得异步切换下的误差切换系统是全局实用稳定的。揭示了异步切换与驻留时间意义下的“慢”切换二者的相互制约、相互作用以及对于跟踪性能的影响。

最后对全书所做的工作进行了总结, 并指出了下一步研究的问题。

本书的研究内容得到了国家自然科学基金青年基金项目“具有多平衡点的模型参考自适应控制在航空涡扇发动机中应用”(批准号: 61603264)、辽宁省博士启动基金“基于切换自适应技术的涡扇发动机转速控制方法研究”(批准号: 201601183)、辽宁省优秀人才支持计划(批准号: LJQ2015094)、国家自然科学基金重点项目“基于耗散性理论的反馈切换控制及其在航空发动机控制中的应用”(批准号: 61233002)、国家自然科学基金面上项目“非线性切换系统的输出调节”(批准号: 61174073)等的资助。

著者

2017年5月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 模型参考自适应控制系统	1
1.1.1 模型参考自适应控制系统的研究意义	1
1.1.2 模型参考自适应控制系统的研究进展	5
1.2 切换系统	7
1.2.1 切换系统的研究背景及概念	7
1.2.2 切换系统的主要问题及研究方法	11
1.3 切换系统的模型参考自适应控制	13
1.4 本书研究的主要工作	14
1.5 符号说明	16
第 2 章 基于凸组合方法的模型参考自适应切换信号的设计	17
2.1 概 述	17
2.2 问题描述	18
2.3 切换信号的设计	20
2.4 仿真算例	25
2.5 本章小结	28
第 3 章 带有执行器失效的模型参考自适应控制器设计	29
3.1 概 述	29
3.2 问题描述	30

3.3 执行器失效情况下的切换自适应控制器设计	31
3.4 误差切换系统的实用稳定性分析	35
3.5 仿真实例	39
3.6 本章小结	41

第4章 带有控制器失效的一类非线性不确定系统的切换 自适应律设计

42

4.1 概 述	42
4.2 问题描述	43
4.3 控制器失效情况下的切换自适应律设计	45
4.4 误差切换系统的实用稳定性分析	46
4.5 仿真例子	53
4.6 本章小结	56

第5章 切换系统的模型参考自适应 H_{∞} 状态跟踪

57

5.1 概 述	57
5.2 问题描述	58
5.3 切换参考模型的稳定性分析	59
5.4 具有扰动的误差切换系统	60
5.5 误差切换系统的 H_{∞} 控制器设计	61
5.6 仿真实例	71
5.7 本章小结	73

第6章 异步切换下的切换系统的模型参考自适应控制

75

6.1 概 述	75
6.2 问题描述	76
6.3 误差切换系统及投影自适应律的设计	78
6.4 误差切换系统的实用稳定性分析	80
6.5 仿真实例	91
6.6 本章小结	94

第7章 结论与展望	96
7.1 结 论	96
7.2 展 望	97
参考文献	99
后 记	113

第1章 绪 论

1.1 模型参考自适应控制系统

1.1.1 模型参考自适应控制系统的研究意义

在实际控制系统中,往往存在某种不确定性,这种不确定性表现为描述系统本身的数学模型包含有未知或随机的因素。此外,系统在运行过程中,还会受到各种扰动因素的影响,这些影响也会使系统的动态特性发生变化。在这种情况下,对于一个比较复杂的实际系统,先建立精确的数学模型,再进行控制系统的设计往往是行不通的。因此,研究如何处理这些不确定性使系统实现期望的控制目标是十分重要的。自适应控制作为处理这种不确定性的一个有效方法,已经在实际工程中得到了广泛的应用^[1~4]。在自适应控制系统运行过程中,系统本身不断地测量被控对象的状态、性能或参数,从而“认识”或“掌握”被控对象,然后通过所掌握的系统信息与期望的性能相比较,进而作出决策,来改变控制器的结构、参数或根据自适应规律来改变控制输入,以保证系统达到某种意义下的最优或接近最优状态^[5,6]。

自适应控制概念提出以来,在各种领域出现了许多形式不同的自适应控制方案,主要有以下几种:

- ① 增益自适应控制;
- ② 模型参考自适应控制;
- ③ 自校正控制;
- ④ 直接优化目标函数自适应控制;
- ⑤ 模糊自适应控制;
- ⑥ 多模型自适应控制;

⑦ 自适应逆控制。

其中,模型参考自适应是比较流行的自适应控制方式之一^[7-9]。模型参考自适应控制就是在系统中设置一个动态品质优良的参考模型,在系统运行过程中,要求被控对象的动态特性与参考模型的动态特性尽量接近,例如:状态跟踪或者输出跟踪等。

模型参考自适应控制系统有不同种类,从应用的角度可以分为自适应模型跟随控制系统和模型参考自适应参数估计或状态观测系统。

实际上,自适应模型跟随控制系统是由线性模型跟随系统演变而来的,图 1.1 给出了线性模型跟随系统的结构图^[10]。系统主要由参考模型、控制器、模型跟随调节器和被控对象组成,其中参考模型代表被控对象应该具有的特性。如果控制目标是输出跟踪,则可以通过设计控制器,使得被控对象的输出 $y(t)$ 能够跟踪参考模型的输出 $y_m(t)$,以实现消除输出跟踪误差 $e(t) = y(t) - y_m(t)$ 的目的;类似的,如果控制目标是状态跟踪,则可以通过设计控制器,使得被控对象的状态 $x(t)$ 能够跟踪参考模型的状态 $x_m(t)$,以实现消除状态跟踪误差 $e(t) = x(t) - x_m(t)$ 的目的。

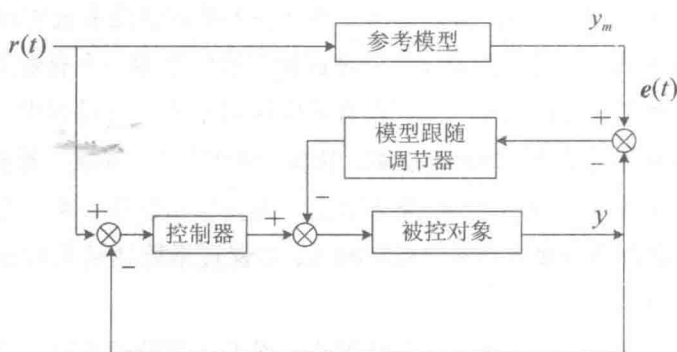


图 1.1 线性模型跟随系统

可是,模型跟随器的设计需要已知被控对象的数学模型及有关参数,如果被控对象的参数是未知的,或者在运行过程中发生变化,模型跟随系统无法实现控制目标,因此,引入了模型参考自适应控制系统。图 1.2 给出了模型参考自适应控制系统示意图。它的主要结构分为内环和外环两部分,其中外环由参考模型与自适应机构组成,内环由调节器与被控对象组成可调系统。当被控对象受扰动的影响而使运行特性偏离了最优轨迹时,则被控对象的输出 $y(t)$ 与参考模型的输出

$y_m(t)$ 相比较就产生了输出跟踪误差 $e(t) = y(t) - y_m(t)$ 。此时, 自适应机构根据一定的自适应规律产生反馈作用, 通过修改调节器的参数或者产生一个辅助的控制信号, 使得被控对象与参考模型输出相一致, 从而使输出跟踪误差 $e(t)$ 减少至零。

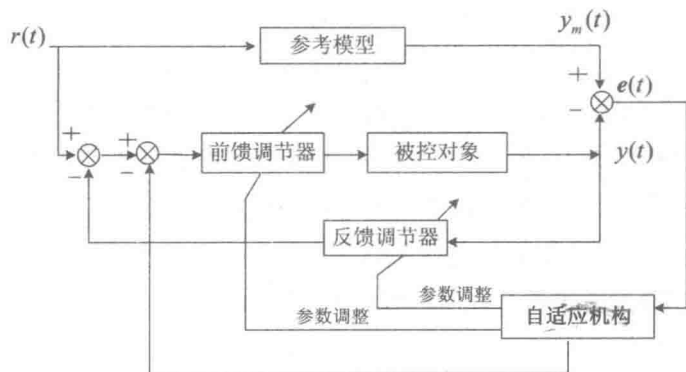


图 1.2 模型参考自适应控制系统示意图

模型参考自适应参数估计或状态观测系统能够完成对象的状态观测和参数辨识(如图 1.3 所示)。其工作原理是: 选择一个与被测对象有着相同数学结构的可调参考模型, 在自适应机构的作用下, 通过修改参考模型系统参数或者使用输入信号来调整系统特性, 使得可调参考模型的参数及状态将跟踪需辨识的对象的参数及状态^[11-13]。

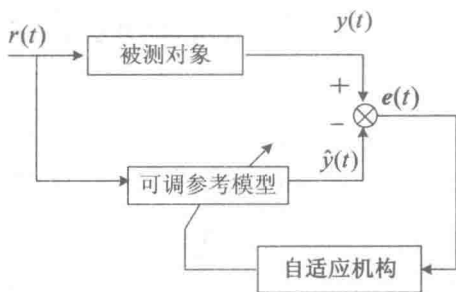


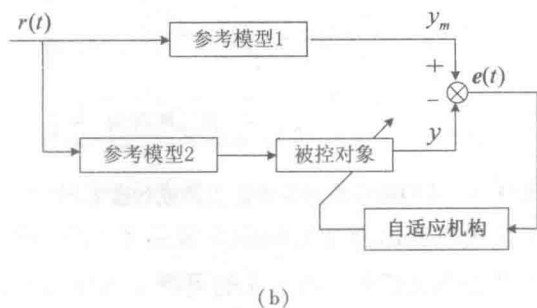
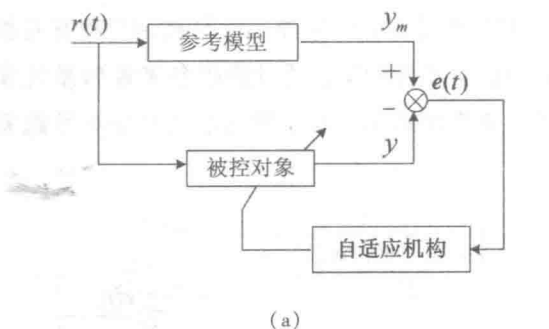
图 1.3 模型参考自适应参数估计或状态观测系统

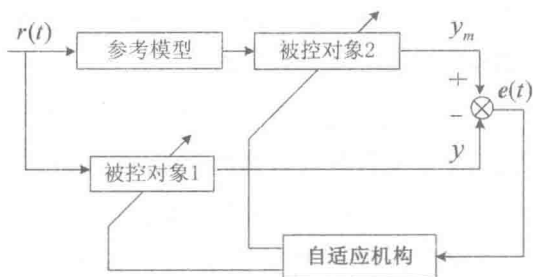
从图 1.2 和图 1.3 可以看出两者之间的对偶关系, 即, 图 1.3 的被测对象可以对应地认为是图 1.2 的参考模型, 图 1.3 的可调参考模型可以对应地认为是图 1.2 的被控对象。由于这种对偶性的存在, 对于这两种类型结构的分析和综合可以用相同的理论来完成, 因此许多设计问题在一定程度上是相类似的。

从结构角度来说,模型参考自适应控制系统可以分为并联、串联和串并联的模型参考自适应控制系统(如图 1.4 所示)。图 1.4(a)是应用最普遍的并联结构,一般可以直接用于自适应控制,同时也可以用于自适应参数辨识和状态估计。当用于辨识时,一般称为输出误差法。此时参考模型相当于被辨识的对象,被控对象相当于辨识器或者状态观测器。

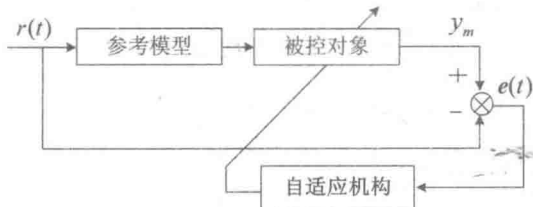
图 1.4 中的(b)和(c)均为串并联结构,常用于参数辨识,这种情况的参考模型就是被辨识的对象。被控对象分为两部分,一部分与被辨识对象串联,另一部分与被辨识对象并联,这种用于辨识的串并联模型参考自适应系统常称为方程误差法或广义误差法。图 1.4 中的(d)为串联结构,也用于辨识,常称为输入误差法。该方法是通过被控对象的输出 $y_m(t)$ 与输入 $r(t)$ 作比较,当两者有偏差时产生 $e(t)$,利用自适应机构去改变被控对象,最终使得 $y_m(t) = r(t)$,因此这种方法被称为输入误差法。

另外,从被控对象,参考模型以及自适应机构的信号采集处理的角度来说,模型参考自适应控制系统可以分为连续型、离散型和混合型 3 种^[14]。





(c)



(d)

图 1.4 模型参考自适应控制系统的分类

目前,模型参考自适应控制已经广泛应用在电厂锅炉-汽轮机单元机组协调自适应控制系统、自适应位置跟踪控制系统、炼钢过程的在线辨识以及含碳量估计与预测系统、电流转换装置的自适应电压控制系统、热交换器的自适应模型跟随控制系统、电力自适应控制系统、内燃机的动态辨识控制系统等^[15-18]。

1.1.2 模型参考自适应控制系统的研究进展

在模型参考自适应控制系统中,参考模型的特性被设定为闭环系统所期望的动态行为。自适应机构保证被控对象和参考模型之间性能的一致性,性能一致性程度可以由被控对象和参考模型之间的状态误差向量或输出误差向量来度量,自适应控制器就是按照减小偏差的方向修正或更新控制律,使得系统的性能指标达到或接近期望的性能指标。因此,在模型参考自适应控制系统中,自适应控制器的设计非常关键。经过了多年发展,针对模型参考自适应控制系统的研究过程大体上分为以下4个阶段^[10]。

第一阶段(1958—1966年):基于局部参数最优化理论的设计方法。这种方法是由美国麻省理工学院的Whitaker教授首先提出的,并且尝试将其应用到解决飞机自动驾驶问题,被称为MIT方案^[19],但是限于当时的计算机技术和控制理论的

发展水平,飞行试验没有成功。该方案采用了局部参数优化理论设计自适应控制器,通过让被控对象系统中的某个局部参数在某一性能指标下取得最小来设计自适应律,一般采用的是梯度法或其他参数最优化方法以使确定的目标函数达到最小。该方法的局限性在于,不能保证参数调整过程中闭环系统的稳定性,由于控制系统的稳定性是一个基本要求,因此这种方案很少被采用。

第二阶段(1966—1972年):基于稳定性理论的设计方法。由于模型参考自适应控制系统可以等价地表示为非线性时变反馈系统,同时考虑到 Lyapunov 稳定性理论是解决非线性系统稳定性的一种有力工具,所以 Parks 于 1966 年提出了基于 Lyapunov 稳定性理论的设计方法^[20]。它的基本思想是首先构造一个 Lyapunov 备选函数 $V(e, \theta)$, 通过选择自适应律使得 $\dot{V}(e, \theta) \leq 0$, 从而保证系统具有 Lyapunov 意义下的稳定性。但是对 n 阶系统而言,这种设计方法需要输入信号的 1 到 $n-1$ 阶的微分信号,因此系统会被引入很强的噪声。Landau 将波波夫超稳定理论用于模型参考自适应控制系统的研究中^[21]。其基本思想是将模型参考自适应控制系统等价为非线性时变反馈系统,然后将寻求一个合适的 Lyapunov 函数的问题等价为两个独立的问题,即,前向环节的正实性和反馈环节满足 Popov 不等式两个问题。该方法实际上是基于 Lyapunov 稳定性理论的设计方法,而且两种的全局稳定性都取决于误差模型传递函数的正实性,因此自适应控制器的结构基本上是一致的。

第三阶段(1974—1980年):解决了系统状态不可测的问题。当系统的状态不可测的时候,Monopoli 利用直接法将能观测到的对象输入\输出数据来综合一个动态控制器^[22]。另外,Narendra 和 Valavani 提出间接法,即利用状态观测器将对象参数和状态重构出来,然后利用这种估计值改变控制器的参数,以达到自适应控制的目的^[7]。

第四阶段(从 1980 年至今):自适应的发展阶段。随着非模型智能控制算法的提出与发展,使得科技工作者对于智能控制与自适应控制在方法上相互渗透、在功能上互相补充等方面产生了极大的兴趣,从而使模型参考自适应理论得到了飞速的发展。例如,Narendra 和 Morse 等人提出了多模型自适应控制系统,对提高系统的性能有着重要的意义^[23-26];设计模糊/神经网络控制器解决非线性系统的跟踪控制问题^[10];此外,切换模型参考自适应控制以及分段线性模型参考自适应控制已成为热点问题并且受到学者们的广泛重视^[27-29]。

1.2 切换系统

1.2.1 切换系统的研究背景及概念

混杂系统是同时包含连续(离散)的时间动态和离散事件动态以及二者之间相互作用的复杂动态系统。随着科学技术的发展,现代工业过程中遇到的各种控制和管理问题变得越来越复杂。这些系统常常包含连续时间动态、离散时间动态,以及二者之间的相互耦合作用,因此用单纯的连续变量动态系统或离散变量系统已很难精确地分析和控制实际系统。然而,混杂系统比单一连续系统或者离散系统更能精确地描述实际的大系统,因此这类系统的研究已经成为当今自动控制与计算机科学领域的热点课题之一^[30-33]。

作为一类特殊的混杂系统,切换系统与切换控制具有非常广泛的应用^[34-39]。一方面,实际工程中存在着大量的复杂系统,环境的变化或者人为控制作用导致这些系统出现不同的模态,例如:切换的网络化控制系统、变电站的切换控制、飞行器控制、交通控制、机器人行走控制、计算机磁盘驱动器、化工过程控制和航空发动机控制等^[40-47]。另一方面,切换系统在理论上的发展与完善也为大规模的实际系统的设计和控制提供了理论依据和技术指导。

以下通过一个实例来说明切换系统的实际应用。

例 1.1 连续搅拌反应釜控制系统^[43]

具有切换结构的连续搅拌反应釜的基本结构如图 1.5 所示。两种不同的反应物可通过一个进料口投入反应釜。一般情况下,在反应釜内发生的是一个放热、不可逆的化学反应。在进行化学反应之前,将反应物按照规定的比例进行混合,然后与催化剂等通过进料口一同投入反应釜中。在每一时刻,哪种反应物进入到反应釜由监控装置决定。简言之,根据不同的控制目标,监控装置用来确定进料口的选择阀的位置。为了使反应釜温度稳定,在夹套中通过一定冷却介质,用于移走反应釜反应物放出的热量。通常采用具有定常流速和可变温度 x_2 的冷却介质来控制反应釜内的温度。

这个系统可以建模为非线性切换系统^[43, 48-49]:

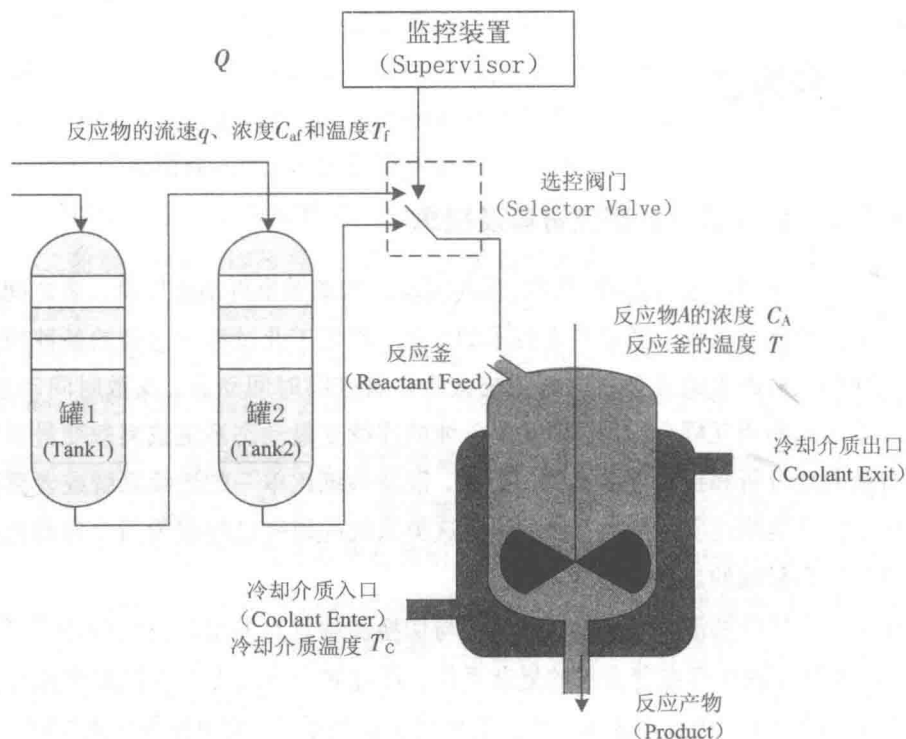


图 1.5 连续搅拌反应釜反应过程示意图

$$\begin{aligned} \dot{C}_A &= \frac{q_\sigma}{V} (C_{Af_\sigma} - C_A) - a_0 e^{-\frac{E}{RT}} C_A, \\ \dot{T} &= \frac{q_\sigma}{V} (T_{f_\sigma} - T) - a_1 e^{-\frac{E}{RT}} C_A + a_2 (T_c - T), \end{aligned} \quad (1.1)$$

其中, C_A 表示反应物 A 的浓度; T 表示反应釜的温度; $\sigma: [0, +\infty) \rightarrow M = \{1, 2\}$ 表示切换信号; E 为活化能; V 表示反应釜的容积; q_i , C_{Af_i} 和 T_{f_i} 分别表示反应物的流速、浓度和温度; R 为气体常数; T_c 为冷却介质入口温度; a_0 , a_1 , a_2 为常数系数。

由例 1.1 可知, 典型的切换系统是由一组连续(或离散)时间子系统和一条决定子系统之间如何切换的切换规则所组成, 整个切换系统的运行情况由这条切换规则进行控制。这条规则也称为切换律、切换信号或切换函数, 通常它是一个依赖于状态或时间的分段常值函数^[50-52]。由 m 个子系统构成的自治切换系统由如下微分方程描述:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = f_{\sigma}(\mathbf{x}(t)), \quad (1.2)$$

其中, $\sigma: [0, +\infty) \rightarrow \Xi = \{1, 2, \dots, M\}$ 表示分段常值的切换信号, 对每一个 $i \in \Xi$, $f_i(\mathbf{x}(t))$ 是 R^n 上的光滑函数。相应的, 如果每一个子系统均是线性的, 则得到如下线性切换系统

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = A_{\sigma} \mathbf{x}(t). \quad (1.3)$$

图 1.6 给出了切换系统的结构框图。

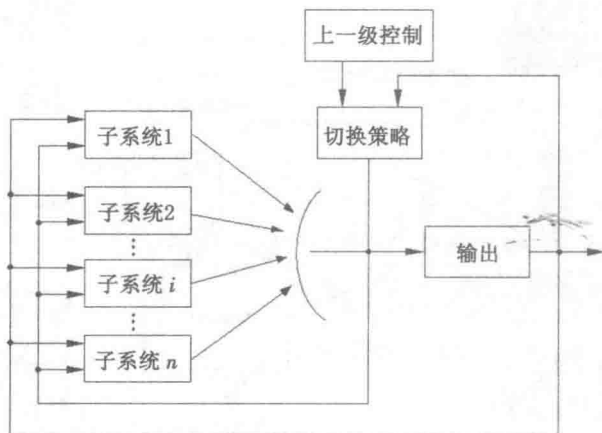


图 1.6 切换系统结构框图

由于切换系统相对一般的混杂系统具有结构形式简单, 便于理解、分析及实际应用, 而且切换系统看作混杂系统的简化模型, 因此切换系统的设计方法与结果常常可为一般混杂系统的研究提供理论和方法上的借鉴与启示。

另外, 切换的思想还体现在单一系统通过多个控制器的切换来达到某种控制目标。下面通过一个例子来说明切换控制的作用。

例 1.2 切换控制在混合动力汽车中的应用^[53]

由于燃油发动机汽车存在污染等种种弊端, 电动汽车的研究逐渐得到重视, 但是电池技术问题阻碍了电动汽车的发展。因此, 一种混合动力装置 (Hybrid-Electric Vehicle, HEV) 的汽车成为当今汽车工业发展的新兴热点。如图 1.7 所示, 混合动力装置就是将电动机与辅助动力单元组合在一辆汽车上提供驱动力, 辅助动力单元实际上是一台小型燃料发动机或动力发电机组。这种混合动力装置既发挥了发动机持续工作时间长, 动力性好的优点, 又可以发挥电动机无污染、低噪声的长处, 二者“并肩战斗”, 取长补短, 汽车的热效率可提高 10% 以上, 废气排