

第1章 概 论

● 课程材料

以本课程的课件为主，可参考丛爽教授的自编讲义《自适应控制》（东区印刷制本厂可以购买）。

● 课程特点

- 是一门关于控制器设计的课程；
- 公式较多，有推导，关键是弄懂设计思想；掌握推导结果；了解控制器的适用范围；会应用结果。

● 成绩：平时作业和考勤20分、实验20分、卷面成绩60分，其中，每章习题中的编程展示结果部分对应实验内容。

提交作业/实验方式：请于每次习题课之前提交A4版面电子版作业到助教邮箱（请同时发送给所有助教），编程实验部分需附代码。

主要内容

- 1.1 自适应控制的提出
- 1.2 自适应控制的发展历史
- 1.3 自适应控制的类型
- 1.4 自适应控制系统中控制器的设计方法
- 1.5 自适应控制研究的主要问题
- 1.6 自适应控制的应用

1.1 自适应控制的提出

● 传统控制的特点

- 经典控制：主要研究SISO线性系统，只要其传递函数已知，即可借助根轨迹法、频率特性法等设计控制器，使得控制系统的过渡过程性能指标（超调量、调节时间、振荡次数等）和通频带等符合要求。
- 现代控制：研究对象是MIMO线性系统、一般非线性系统，如：当其状态空间运动方程已知，即可借助最优控制理论设计最优控制器，使得控制系统的某一性能指标达到最优（运行时间最短、能耗最小等）。
- 共性：描述系统动力学的数学模型(结构、参数)是已知的。

● 自适应控制的引入

实际中，绝大多数被控对象具有不确定性，即其动力学模型和所处的环境不是完全已知的，表现为事先难以确定被控对象的模型参数，或者模型参数是时变的，或者被控对象本身的特性发生变化，这些不确定性的主要来源：

- 系统内部机理过于复杂，很难单纯利用机理分析法对系统进行准确建模，如化工过程的反应炉等；
- 外部环境的变化引起被控对象参数的变化，如，飞行器的空气动力学参数随飞行高度、速度和大气条件的变化而变化，电子元器件参数随温度和湿度等因素而变化等；
- 运行过程中被控对象本身的变化对原模型引入不确定性，如，电子元器件的老化、导弹的质量和重心参数随着燃料的消耗而变化等。

对不确定性的处理办法：

- 以不变应万变

控制理论中称为鲁棒控制，即：事先对模型引入一个不确定性余度，然后设计控制器使得系统的不确定性在该范围内时都能对系统进行有效控制。显然，模型变化超出该范围时，鲁棒控制将变得无效。鲁棒控制中没有用于补偿模型本身实时变化的反馈。

- 你变我也变

控制理论中称为自适应控制，即：实时检测不确定性引起的被控对象自身的变化，并根据变化产生相应的反馈控制律，来逐渐消除这种变化，达到预期的控制目标。

- 无模型控制

如智能控制，其控制精度不能保证，理论上的定量分析困难。

被控对象的变化可以用事先定义的一个或一些性能指标来反映，也可以用与对象相关的某些参数（通常指描述对象的数学模型中的参数）的变化来直接反映。

- 自适应控制系统必备的功能

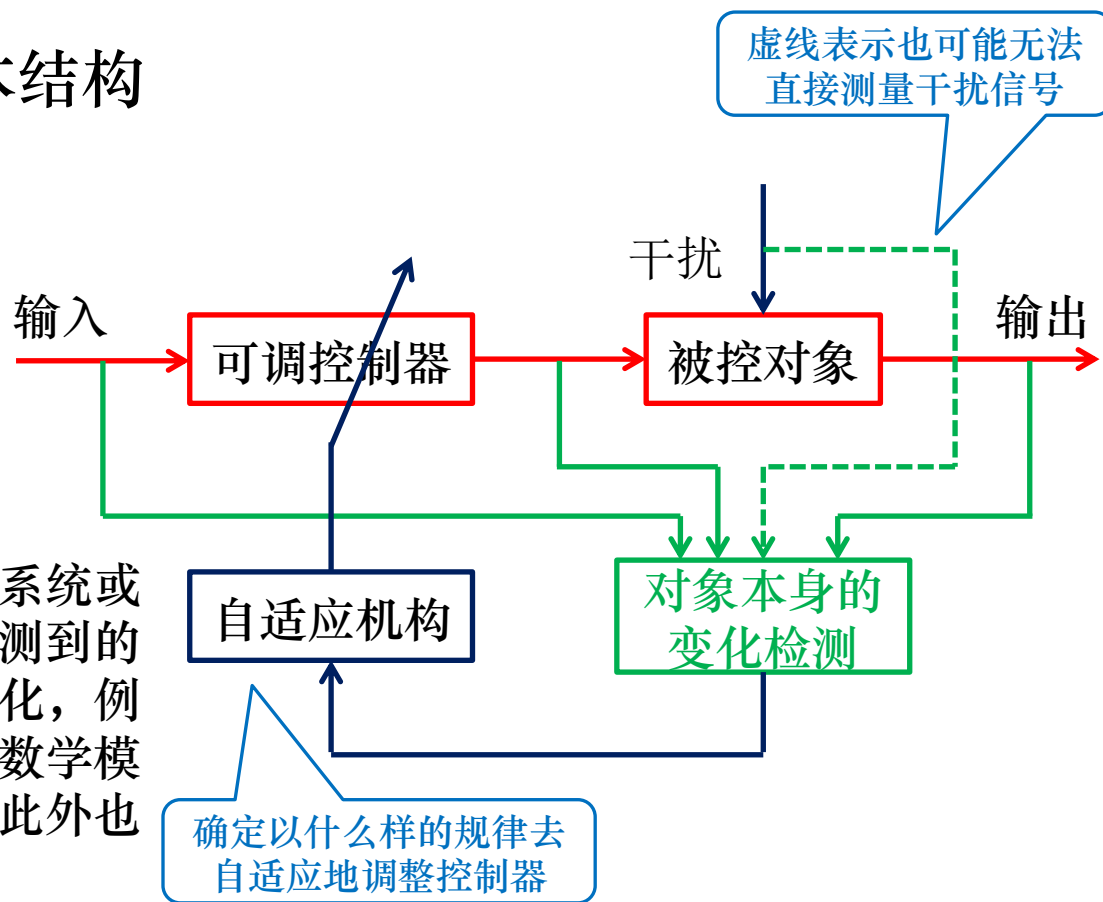
- 能够检测到对象的（性能或模型参数）变化；

其中，对象的性能可以借助测量得到的信息进行计算得到，描述对象的数学模型中的参数可以通过辨识的方法获得。

- 能够产生针对这种变化的自适应调节方案【决策】；
- 具有实现可变控制律的可调控制器。

● 自适应控制系统的基本结构

- 右图中控制器和被控对象构成了经典控制系统，二者之间可以有各种传统控制结构，如串联控制、反馈控制、前馈控制、局部反馈控制等。
- 对象的变化检测环节是根据系统或对象的输入、输出、可能检测到的干扰来确定出对象本身的变化，例如性能指标值的变化、对象数学模型中某些参数值的变化等，此外也有信息积累的功能。
- 自适应机构根据检测到的对象变化按预先制定的规则产生自适应调节方案，以调整控制器并逐渐实现期望的控制目标。其中，自适应调节方案分参数调节和结构调节两大类，前者只改变控制器的参数，如PID参数整定；后者则会改变控制律的形式。



1.2 自适应控制的发展历史

- 1958年，美国麻省理工学院(MIT)的Whitaker教授首先提出了飞机自动驾驶仪的模型参考自适应控制方案，称为MIT方案。在该方案中采用局部参数优化理论设计自适应控制律，但保证不了系统的稳定性。
- 为解决稳定性问题，1965年前后，Shackcloth和Butchar、Parks等人独立引进Lyapunov方法进行模型参考自适应控制律的设计，可保证系统的稳定性。
- 20世纪70年代前后，Laudau应用Popov超稳定性理论进行自适应控制系统设计。现已有人证明，Lyapunov方法和Popov方法本质是一样的。这两种方法在反馈中都要用到偏差的导数，给应用带来不便。

- 1974年，美国的Monopoli提出了一种广义误差信号法，只要采用对象的输入和输出就可以完成设计，避免了微分运算。Monopoli的工作具有里程碑性的意义，他使得模型参考自适应方法变得实用，去掉了求微分运算、增加了稳定性，更适合工程应用。此后的一些作者沿着Monopoli方法建立了全局稳定的模型参考自适应设计方法。
 - Landau、Narendra和Peterson很好地总结了这个时期的成果。以后的发展都是在1974年的基础上向各个方向推进。特别地，Narendra等人关于误差模型和收敛性的证明对自适应控制理论和设计的发展有着十分重要的推动作用。
-
- 1973年，瑞典学者K.J. Åström和B. Wittenmark首先提出最小方差自校正调节器，很容易实现，可以在生产中应用。他们证明了参数估计收敛时，设计的调节器将收敛到模型已知时设计的调节器。控制理论界几乎公认他们的工作奠定了自校正控制的基础。

- Åström和Wittenmark的设计方法涉及零极点对消，故只适合最小相位系统，而且可能由于控制器的增益太高而不易实现。为了克服这些不足，英国学者D.W.Clarker和Gawthrop在1976年提出了广义最小方差自校正控制器，几乎全部弥补了最小方差自校正调节器的局限。
- 1979年，P.E.Wellstead和K.J. Åström又提出了极点配置自校正调节器的设计方案。
- 之后许多学者在自适应控制的稳定性、收敛性和设计方法上又做了大量的研究工作，其中包括美国的Narendra, Morse和澳大利亚的Goodwin等人。我国学者陈翰馥在收敛性分析方面也做出了很大贡献。

1.3 自适应控制的类型

两类主要的自适应控制系统：模型参考自适应控制系统和自校正控制系统。

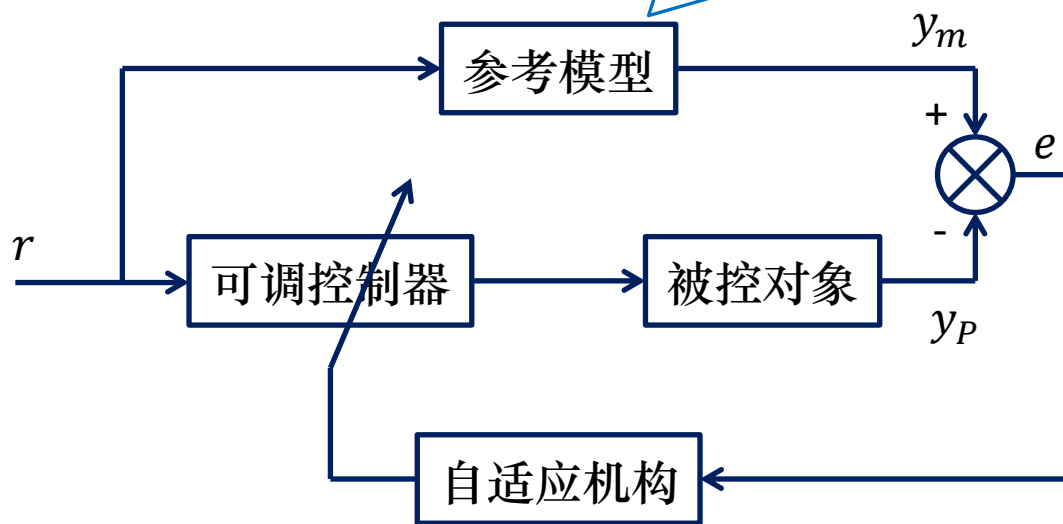
● 模型参考自适应控制系统

参考模型：根据控制目的设计的理想模型，通常假定其输出完全达到设计目标。

工作原理：理想情况下， $e = 0$ ；当控制器或被控对象因各种原因发生变化时， $e \neq 0$ ，此时偏差信号使得

自适应机构按照预先制定的规则产生调节方案，改变控制器的参数或结构，使得被控对象的输出逼近参考模型的输出，即 $e \rightarrow 0$ 。

以参考模型为基准，当对象的输出偏离参考模型提供的标准输出（ $e \neq 0$ ）时，我们认为对象发生了变化，并利用这个变化去调节控制器



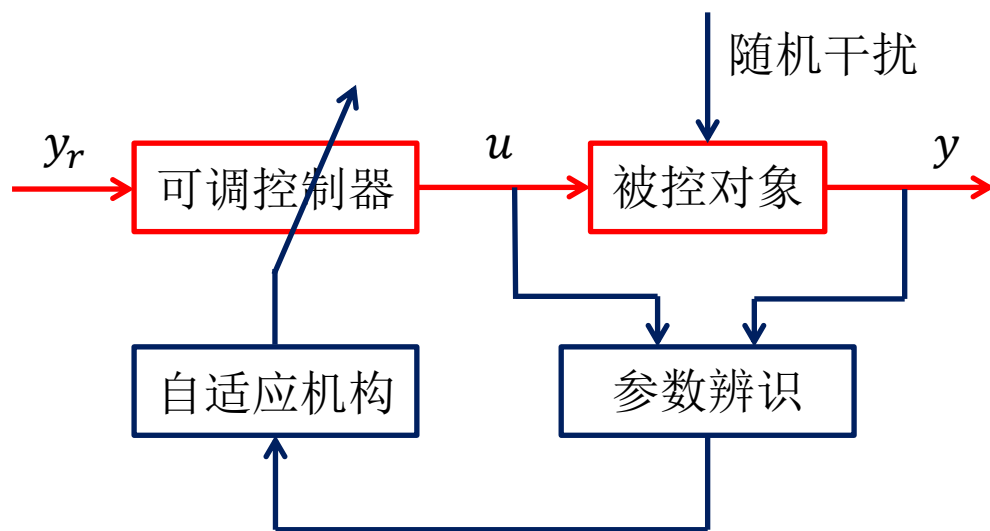
设计时，应根据控制要求和对象特点先行确定参考模型，然后再设计控制器，参考模型提供了被控对象期望达到的理想性能，包括被控对象的输出期望值和/或其内部参数的稳态期望值。故在设计参考模型之前需要对被控对象和控制目标有大概的了解。

对于多数实际系统而言，使用机理法或统计法难以建立起精确的数学模型，即模型中通常存在不确定性。此外，系统还会受到各式各样的外部随机扰动影响。这就是说，被控系统的期望输出和/或其内部参数的期望稳态值有时是难以把握的。此时，构造参考模型的难度将被加大。

● 自校正控制系统

自校正控制系统的本质是设计统计意义上的最优控制律。为了达到最优，需要在线辨识对象的模型，估计随机干扰对输出的影响。

工作原理：参数辨识单元按照被控对象的输入、输出数据，不断修正对象的数学模型，多数情况下是修正数学模型中的参数值，然后将新的参数值送至自适应机构，自适应机构根据得到的参数值修改控制器的参数，使得控制器最大程度地消除干扰的影响。



在自校正控制系统中，由于被控对象一般存在延时，即控制量要经过几个观测周期才能对输出产生影响。因此，要根据输出的某一性能指标设计当前时刻的控制量，需要将当前时刻的控制量在输出中体现出来，这样就需要考虑延时的影响。

自校正控制系统的目标：主要是使输出（是一个随机变量）是无偏的，且具有最小方差。

自校正控制系统的两个主要特点：

- 控制器是按照确定性系统设计的，因此自校正理论中的控制器设计多数是将参数已知时的控制方法自适应化，即使其能够适应参数的变化；
- 自校正控制系统仅考虑参数的自适应，不考虑结构的变化。

1.4 自适应控制系统中控制器的设计方法

控制器的设计需要根据控制目标确定，根据控制目标的不同，有不同的设计方法。

- 基于优化策略的自校正控制器

- a) 最小方差控制

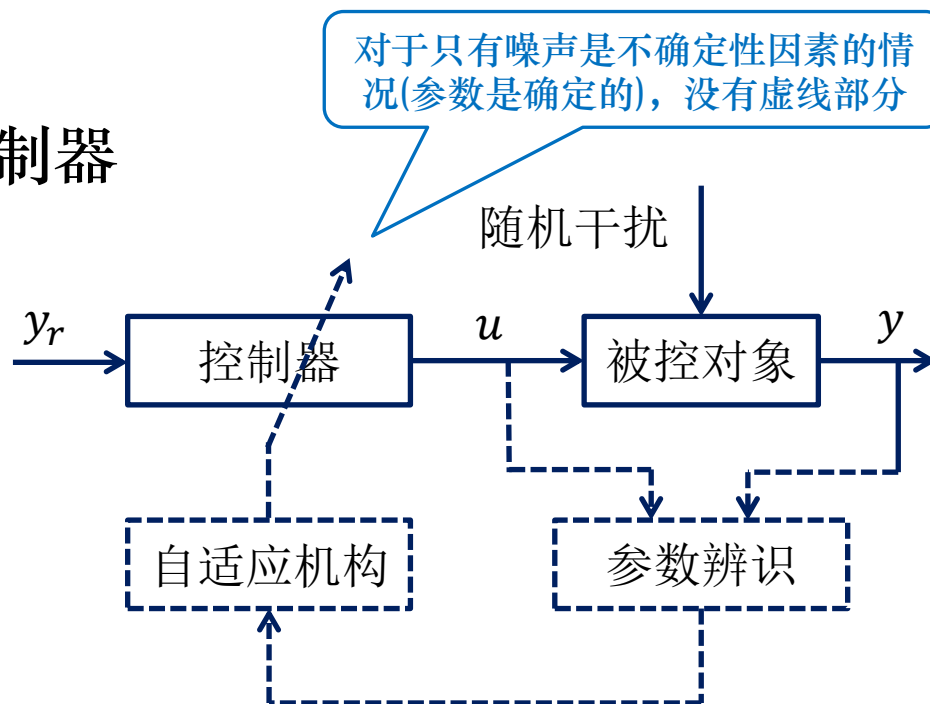
$$J_1 = E\{e^2\}$$

- b) 广义最小方差控制

$$J_2 = E\{e^2 + ru^2\}$$

- c) LQG控制

$$J_3 = E\{x^T Q x + u^T R u\}$$



- 基于常规策略的自校正器

- a) 极点配置法

把期望的闭环系统的行为用期望传递函数的（零）极点的位置表征，设计自校正控制器的目的是保证控制器作用下闭环系统的（零）极点等于或收敛于期望的（零）极点。

- b) PID控制器

讨论在常规PID控制器作用下如何消除干扰的特殊问题。

- 模型参考自适应控制

通过使参考模型输出与对象输出的偏差按一个确定的动态过程趋于零来设计控制律。

1.5 自适应控制研究的主要问题

自适应控制针对对象和其所处的环境的变化而言，因此需要分析对象的不确定性，其理论涉及概率论、随机过程和系统控制理论。

自适应控制的根本在于设计一个能适应对象和环境变化的自适应控制律。

根据对控制系统的基本要求，与自适应律相关的问题有稳定性、收敛性和鲁棒性。

● 稳定性

渐近稳定的系统指它在受到微小的冲击后，经过一段时间的运行仍能回到原先的工作状态。

在模型参考自适应控制中，目的是使 $e \rightarrow 0$ ，即要求误差满足Lyapunov渐近稳定性，故稳定性理论是模型参考自适应控制的理论基础。

在设计模型参考自适应控制中，Lyapunov稳定性理论和Popov超稳定性理论还是重要的设计工具。

● 收敛性

在自适应控制中，收敛性多指算法的收敛性。

自适应机构修正控制器从而形成的控制算法、或自校正的参数辨识算法，一般都会出现递推形式，即根据前一步的结果来计算这一步的控制律和参数值。有效的控制结果要求算法必须在有限步后满足要求。

收敛算法意味着，参数值最终会收敛到一个确定值。

数学上，收敛一般指一个无限过程。实际使用时，可以指定一个递进误差界，当两步计算所得的参数值之差小于这个误差界时就认为算法已收敛到极限值，停止计算。

● 鲁棒性

鲁棒控制和自适应控制的兼容形成鲁棒自适应控制，即自适应控制律具有鲁棒性。

鲁棒自适应控制的动机：对于对象或环境的细小变化就引起自适应机构和控制器的动作，很多时候是没有必要的，而且过于频繁的启停会大大缩短设备的寿命，甚至导致系统不稳定。因此，希望自适应机构对控制器的每一次改变都有一定的适用范围，环境和对象在该范围内变化时不需要启动自适应机构。

鲁棒自适应控制的研究重点：鲁棒域的估计，即估计实现控制目标容许的模型参数变化范围和外部扰动的强度范围；具有较强鲁棒性的自适应控制律的特征。

1.6 自适应控制的应用

● 航空方面

自适应控制系统最早在航空方面得到了应用。这是由于飞机的动力学特性取决于许多的环境因素和结构参数。例如，随着飞机飞行高度和速度的不同，飞机的动力学参数可能在相当大的范围内变化，要使飞机在整个飞行高度与速度范围内保证控制的高质量。依靠经典的控制理论难以解决。



为解决上述问题，在五十年代末期，MIT的Whitaker教授提出了模型参考自适应控制的方案。模拟研究和飞行实验表明，在飞机正常速度下该模型参考自适应控制系统具有满意的性能。

限于当时计算机技术和控制理论的发展水平，这一自适应控制技术的成果未能得到迅速发展和推广。

随着计算机技术和控制理论发展水平的不断提高，特别是由于航空航天事业的迅速发展的需要，目前自适应控制在航空航天方面已取得了很好的发展和应用。

● 航海方面

在航海方面，军舰运用最多。许多学者提出采用自适应自动驾驶仪代替原有的PID调节自动驾驶仪。实践表明，在变化复杂的随机环境（如在海浪、潮流、阵风的干扰下）以及不同的负荷和航速下，自适应自动驾驶仪都能使军舰按照预定的航迹稳定而可靠地航行，并取得了良好的经济效益。

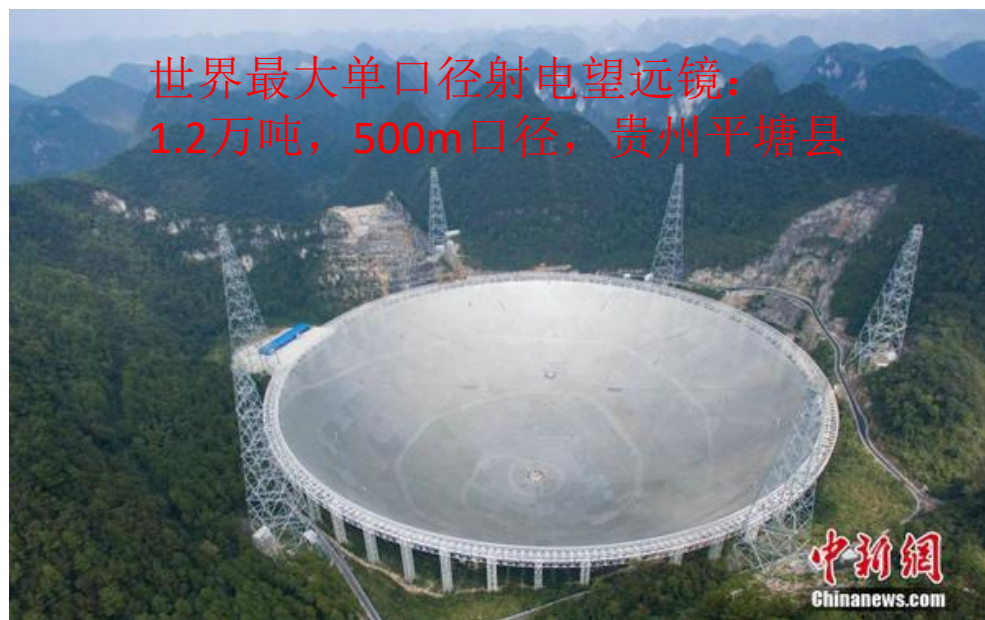
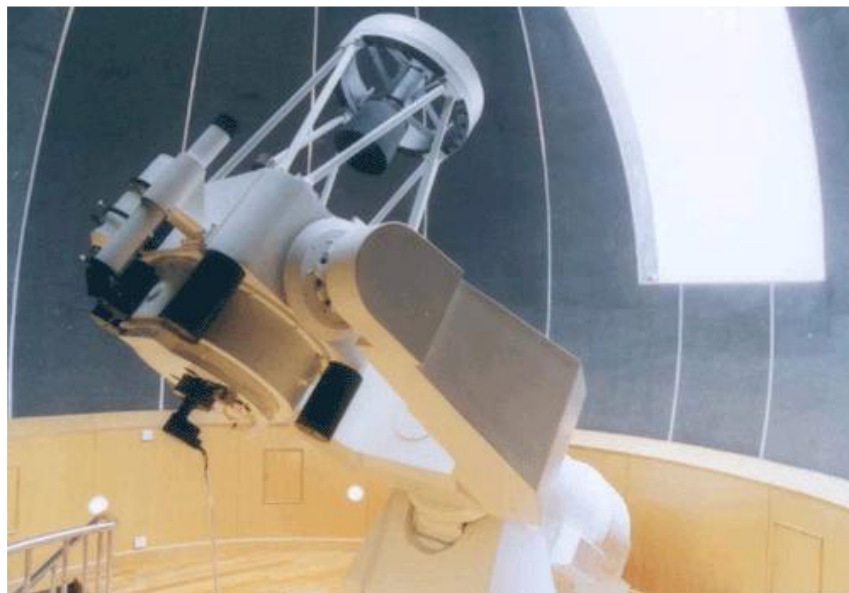


- 在化工过程、钢铁和冶金工业方面，许多工艺过程是非线性、非平稳的复杂过程，原材料成分的改变、催化剂的老化和设备的磨损等都可能使工艺参数发生复杂而幅度较大的变化。对于这类生产过程，采用常规的PID调节器往往不能很好地适应工艺参数的变化，从而使产品的产量和质量不稳定。当采用自适应控制后，由于调节器的参数可以随工艺参数的变化而按某种最优性能自动镇定，从而保证了产品的质量不随工艺参数的变化而下降。因此，在二十年前即有人提出采用自适应技术来代替常规的PID调节器对上述工业过程进行自动控制。目前，已经在板轧机的厚度、带钢热轧机的张力、破碎机的效率、矿石的干燥和电加热炉的温度以及水泥的配料、蒸发器的液位等方面，不同程度地采用了自适应控制系统，并取得了较好的效果。

- 在电力拖动方面，除了对直流电动机的转矩、转速、位置和功率采用自适应控制外，也提出了对交流感应电动机的转速实现自适应控制的研究，采用自适应控制后，可以保证系统参数（如，惯性、负载力矩、时间常数和放大倍数等）在大范围内变化时，系统的动态响应仍可保持与期望值相接近。



- 在高精度的随动系统方面，如射电望远镜的高精度随动系统，由于采用了模型参考自适应控制方案，它能自动补偿系统在低速和超低速运行时由系统惯量的变化及摩擦所带来的不良影响，从而大幅度提高系统的跟踪精度。



● 其他应用

随着计算机技术的发展和理论的不完善，自适应控制技术的推广应用将不断发展，这种控制技术不但用于各工业部门，而且还逐渐推广应用于非工业部门，如生物医学部门、人文管理、道路交通管理、音乐演唱艺术、经济管理等行业。

就现有的关于应用方面的报导来看，自适应控制技术主要用于过程较慢的系统和特性变化速度不很快的对象。但随着理论的不完善和计算机技术的迅速提高，自适应控制的应用将会愈来愈广泛，而收效则愈来愈大。

思考题

- 1、与传统的最优控制、随机控制相比，自适应控制考虑的对象有什么特点？
- 2、对于具有不确定性的对象，有哪几种控制方法，其主要差别是什么？
- 3、自适应控制系统具备的特征有哪些？
- 4、自适应控制系统的主要类型有哪两种？
- 5、自适应控制律设计的主要方法有哪些？
- 6、自适应控制的收敛性指什么？