

第2章 专家控制

Chapter 2 Expert Control

动机与起源



在传统控制系统中,系统的运行

- ✓ 排斥了人的干预,人-机之间缺乏交互。
- ✓ 控制器对被控对象在环境中的参数、结构的变化缺乏应变能力。

传统控制理论的不足,在于它必须依赖于被控对象严格的数学模型,试图对精确模型来求取最优的控制效果。而实际的被控对象存在着许多难以建模的因素。

动机与起源



上世纪80年代初,人工智能中专家系统的思想和方法开始被引入控制系统的研究和工程应用中。

专家系统能处理定性的、启发式或不确定的知识信息,经过各种推理来达到系统的任务目标。专家系统为解决传统控制理论的局限性提供了重要的启示,这二者的结合导致了专家控制这一方法。

内容提要



2.1 专家系统

2.2 专家控制

2.3 专家PID控制



何为专家?









(一)专家系统概述

1. 定义

专家系统是一类包含知识和推理的智能计算机程序,其内部包含某领域专家水平的知识和经验,具有解决专门问题的能力。

Definition of Expert Systems (ES)

- **Experts** are people who are very familiar with solving specific types of problems.
- **Expert system** is an intelligent computer program that can perform special and difficult task in some field at the level of human experts.



三个时期:

(1)初创期(1965-1971年)

第一代专家系统DENLDRA和MACSMA的出现,标志着专家系统的诞生。

- ✓ 其中DENLDRA为推断<u>化学分子结构</u>的专家系统,由专家系统的奠基人,斯坦福大学计算机系的费根 鲍姆(Feigenbaum)教授及其研究小组研制。
- ✓ MACSMA为用于<u>数学运算</u>的数学专家系统,由麻省 理工学院完成。



Important Person in History of Expert Systems?





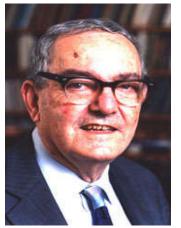
费根鲍姆(Edward Albert

Feigenbaum) 1936年生于新泽西州的威 霍肯, 生父是波兰移民, 但在费根鲍 姆一岁时就去世了。他的继父是一个 食品店的会计,使用着一台笨重的机 电式蒙络计算器(Monroecal culator, 是20世纪初的发明),这引起少年费根 鲍姆的极大好奇与兴趣。1952年,费 根鲍姆进入卡内基梅隆大学(当时还 叫卡内基理工学院)电气工程系。在 那里,他遇到了著名的诺贝尔奖得主 西蒙教授。 1994年获图灵奖。



- ✓ 费根鲍姆的重大贡献在于:通过实验和研究,证明了实现智能行为的主要手段在于<u>知识</u>,在多数实际情况下是<u>特定</u><u>领域的知识</u>,从而最早倡导了"知识工程"(Knowledge engineering),并使知识工程成为人工智能领域中取得实际成果最丰富、影响也最大的一个分支。
- ✓ 作为知识工程的倡导者和实践者,于1965年和罗杰·瑞迪(Raj Reddy)、遗传学系主任、诺贝尔奖得主莱德伯格(Joshua Lederberg)等人合作,开发出了世界上第一个专家系统程序DENDRAL。DENDRAL中保存着化学家的知识和质谱仪的知识,可以根据给定的有机化合物的分子式和质谱图,从几千种可能的分子结构中挑选出一个正确的分子结构。

Herbert Simon

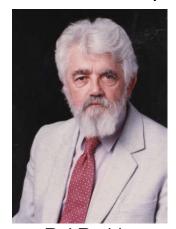


Edward Feigenbaum





John McCarthy



Raj Reddy



For pioneering the design and construction of large scale artificial intelligence systems, demonstrating the practical importance and potential commercial impact of artificial intelligence technology.

李开复



沈向洋



洪小文



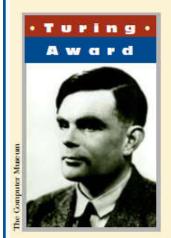






Al's Hall of Fame[J]. Intelligent Systems IEEE, 2011, 26(4):5-15.





Raj Reddy and Edward Feigenbaum have been seminal leaders in defining the emerging field of applied artificial intelligence and in demonstrating its technological significance. In 1994, they were named co-recipients of the A.M. Turing Award—ACM's most prestigious technical honor. We are pleased to present their insightful lectures that trace their professional development paths and expound on the roads ahead.

Edward A. Feigenbaum

How the "What" Becomes the "How"

F I were a little older, I would have known Alan Turing. As it was, I missed him by a decade at ents of this award.

EA Feigenbaum, How the" what" becomes the how, Communications of the ACM, 1996





"Knowledge is power"
---Francis Bacon



"In the Knowledge lies the power"

---Edward Feigenbaum



(2) 成熟期(1972-1977年)

在此期间斯坦福大学研究开发了最著名的专家系统-血液感染病诊断专家系统MYCIN,标志专家系统从理论走向应用。另一个著名的专家系统-语音识别专家系统HEARSAY的出现,标志着专家系统的理论走向成熟。



(3) 发展期(1978-现在)

在此期间,专家系统走向应用领域,专家系统的数量增加,仅1987年研制成功的专家系统就有1000种。

专家系统可以解决的问题一般包括解释、预测、设计、规划、监视、修理、指导和控制等。目前,专家系统已经广泛地应用于医疗诊断、语音识别、图象处理、金融决策、地质勘探、石油化工、教学、军事、计算机设计等领域。



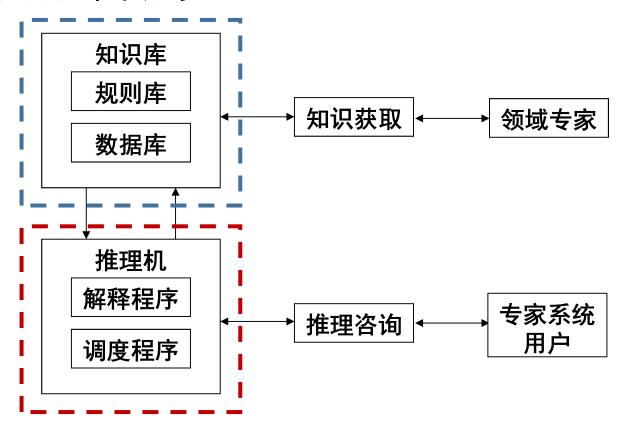
上世纪80年代初,人工智能中专家系统的思想和方法开始被引入控制系统的研究和工程应用中。

专家系统能处理定性的、启发式或不确定的知识信息,经过各种推理来达到系统的任务目标。专家系统为解决传统控制理论的局限性提供了重要的启示,二者的结合导致了专家控制这一方法。

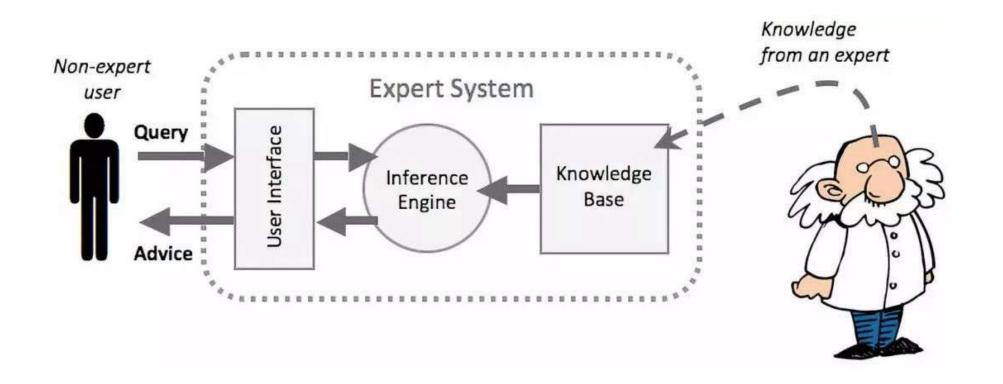


(二)专家系统的构成

专家系统主要由知识库和推理机构成,专家系统的结构如图所示:









(三)专家系统的建立

1 知识库

知识库包含三类知识:

- ✓ 基于专家经验的判断性规则; 如北京是中国的首都, 鸟有双翼
- ✓ 用于推理、问题求解的控制性规则;

如下棋、证明定理等

✓ 用于说明问题的状态、事实和概念以及当前的条件和常识等的数据。

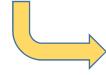


- ✓ 基于专家经验的判断性规则;
- ✓ 用于推理、问题求解的控制性规则;



进行推理时要用到的一般知识和领域知识

✓ 用于说明问题的状态、事实和概念以及当前的条件和常识等的数据。



已知的同当前问题有关的数据信息



知识库包含多种功能模块,主要有知识查询、检索、增删、修改和扩充等。知识库通过人机接口与<u>领域专家</u>相沟通,

实现知识的获取。



人类专家 or 其他知识库

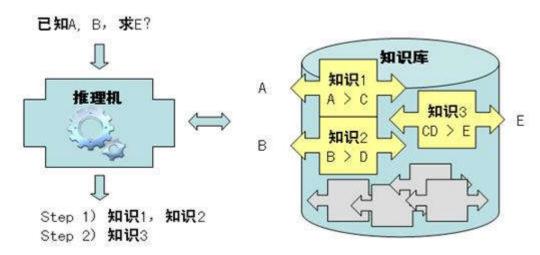
知识库中知识的质量和数量决定着专家系统的质量水平!



2 推理机

推理机是用于对知识库中的知识进行推理来得到结论的"思维"机构。推理机包括三种推理方式:

- ✓ 正向推理:从原始数据和已知条件得到结论;
- ✓ 反向推理:先提出假设的结论,然后寻找支持的证据,若证据存在,则假设成立;
- ✓ 双向推理:运用正向推理提出假设的结论,运用反向推理来证实假设。





- 知识的组织形式。
- 将知识符号化并将其输入计算机的过程和方法。 两个基本要求:
- (1) 有合适的数据结构,能用已有的计算机语言 为其编程;
- 3 知识的表示
- (2) 所包含的知识能用于推理过程。

常用的知识表示方法为:产生式规则、框架、 黑板、语义网络、过程、状态空间、逻辑模式、脚 本、面向对象等。其中产生式规则是专家系统最流 行的表达方法。

由产生式规则表示的专家系统又称为基于规则的系统或产生式系统。



产生式规则的表达方式为:

IF E THEN H WITH CF (E, H)

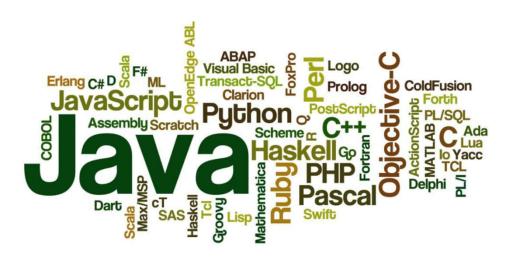
其中,

- ✓ E表示规则的前提条件,即证据,它可以是单独命题,也可以是复合命题;
- ✓ H表示规则的结论部分,即假设,也是命题;
- ✓ CF (Certainty Factor) 为规则的强度,反映当前提为 真时,规则对结论的影响程度。



4 专家系统开发工具

✓ 开发语言: C语言,人工智能语言(如Prolog, Lisp等);





✓ 专家系统外壳(expert system shell): 已经建好的专家系统框架,包括知识表达和推理机。在运用专家系统开发工具开发专家系统时,只需要加入领域知识。

【例】EMYCIN、KAS、EXPERT

EMYCIN 是由Stanford大学的Van Melle于1980年开发的一个专家系统外壳,是由MYCIN抽去原有的医学领域知识,保留外壳而形成的。采用产生式规则表达知识,目标驱动的反向推理控制策略,特别适用于诊断型专家系统的开发。

EMYCIN可提供MYCIN所有的辅助工具,如:

- 1)推理解释程序及可信度估算。
- 2)知识编辑程序及类似英语的简化会话语言。
- 3)知识库管理和维护手段,如一致性检查、跟踪、查错等。
- 4)系统测试实例。



KAS系统是由PROSPECTOR系统抽去原有的地质勘探知识而形成的。它采用语义网络和产生式规则相结合的知识表达方式,以及启发式双向推理控制策略。适用于开发解释型的专家咨询系统。

KAS可提供的辅助工具有:

- ✓ 知识编辑系统,用于知识获取、修改与扩充知识库,可直接操作和反馈修改结果。
- ✓ 推理解释系统。
- ✓ 用户问答系统。
- ✓ 英语分析器。



EXPERT系统是由CASNET系统抽去原有医学领域知识而形成的。EXPERT适用于诊断、分类的专家咨询系统的开发。它采用产生式规则表达知识,并有如下3种形式:

1) FF规则用于从已知的事实推知另一些事实的真值,从而可省去对后者的提问,被FF规则推导出来的事实只取逻辑值和"不知道"值。例如:

$$F(A, T) \rightarrow F(B, F)$$
;

表示如果已知事实A为真,则事实B一定为假。

2) FH规则用于指出事实与假设之间的逻辑关系,并用一个可信度指出肯定或否定一个假设有多大把握。例如:

 $F(A, O: 50) \& [2: F(B, T), F(C, T), F(D, F)] \rightarrow H(E, 0. 8);$

它表示,若第一个事实(A取值在0到50之间)成立,而且后面3个事实(B为真,C为真,D为假)中有两个成立,则假设E成立的可能性为0.8。

3) HH规则用于指出假设与假设之间的推理关系, EXPERT规定出现在规则左部的假设的确定性程度需用一个数值区间来指出。例如:

 $H(A, 0. 2: 1) \& H(B, 0. 1: 1) \rightarrow H(C, 1);$

它表示如果对假设A有0.2到1的把握,并且对假设B有0.1到1的把握程度,则可得出结论 C,其把握程度为100%。



✓ 通用型专家系统工具和开发环境:

通用型工具是根据专家系统的不同应用领域和人类智能活动的特征研制出来的适用于专家系统开发的开发工具系统。研制这类工具有一定的难度。

【例】ART、ESHELL、INSIGHT、KEE、LOOPS、REVEAL、EXSYS等就是这类工具的代表。



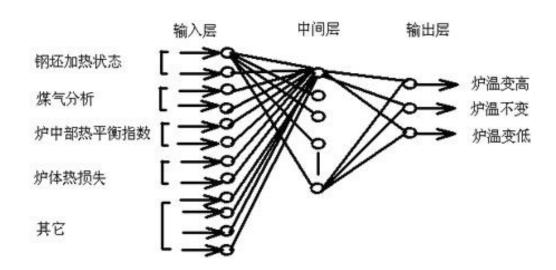
5 专家系统建立步骤

- (1) 知识库的设计
- ① 确定知识类型: 叙述性知识, 过程性知识, 控制性知识;
- ② 确定知识表达方法;
- ③ 知识库管理系统的设计:实现规则的保存、编辑、删除、增加、搜索等功能。



- (2) 推理机的设计
- ① 选择推理方式(正向、反向、双向);
- ② 选择推理算法:

选择各种搜索算法,如深度优先搜索、广度优先搜索、启 发式优先搜索、神经网络、模糊逻辑等。

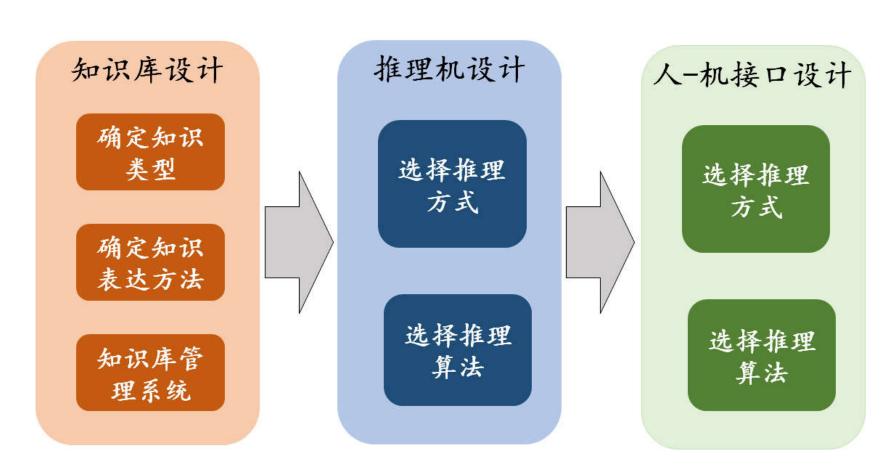




- (3) 人-机接口的设计
- ① 设计"用户一专家系统接口":
 用于咨询理解和结论解释:
- ② 设计"专家-专家系统接口": 用于知识库扩充及系统维护。



专家系统建立步骤:





什么叫专家系统?

- 就是人去学一个东西,然后把学到的知识理论化,再把这些理论模型化,最后把这个模型程序化,形成一个系统,就叫专家系统。
- 专家系统与传统的计算机"应用程序"最本质的不同之处在于,专家系统所要解决的问题一般没有算法解,并且经常要在不完全、不精确或者不确定的信息基础上做出结论。



专家系统的类型

诊断型专家系统(ES for Diagnosis)根据对症状的观察与分析,推断故障原因及排除故障方案。医疗、电子、机械等, MYCIN, PUFF, DART/DASD。

解释型专家系统(ES for Interpretation)根据表层信息解释深层结构或内部可能情况。如语音理解、图像分析、卫星云图分析、地质结构及化学结构分析等。

预测型专家系统(ES for Prediction)根据过去和现在观测数据预测未来可能发生的情况。如气象预报、人口预测、交通预测、经济、军事形势的预测等。



专家系统的类型

设计型专家系统(ES for Design)按给定的要求进行产品设计,广泛应用于电路设计、机械产品设计及建筑设计等领域,如R1(XCOM)。

决策型专家系统(ES for Decision)对各种可能的决策方案进行综合评判和选优,包括各种领域的智能决策及咨询。

规划型专家系统(ES for Planning)用于制订行动计划,可用于自动程序设计、机器人规划、交通运输调度、军事计划制订及农作物施肥方案规划等。



专家系统的类型

控制专家系统(ES for Control)自适应地管理一个受控对象或客体的全部行为,使之满足预定要求。如空中交通管制、自主机器人控制、生产质量控制。

教学型专家系统(ES for Instruction)根据学生特点、弱点和基础知识,以最适当的教案和教学方法对学生进行教学和辅导。如MACSYMA符号积分与定理证明系统。

监视型专家系统(ES for Monitoring)对某些行为进行 监视并在必要时进行干预,用于核电站的安全监视、机场监 视、森林监视、传染病疫情监视、防空监视等。





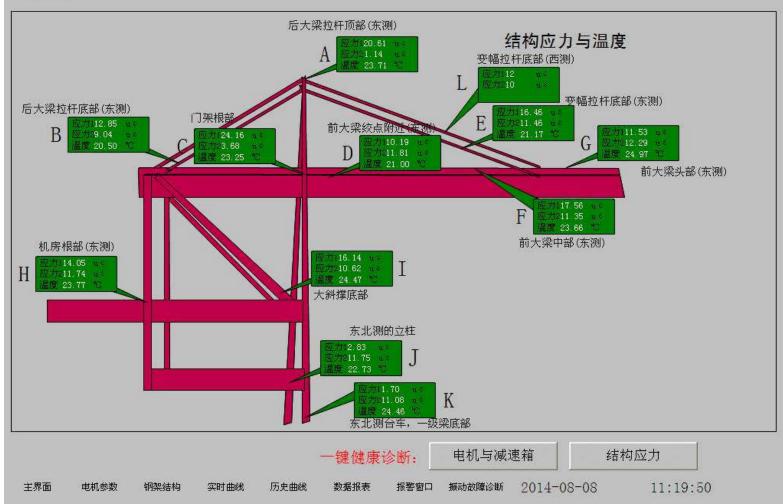


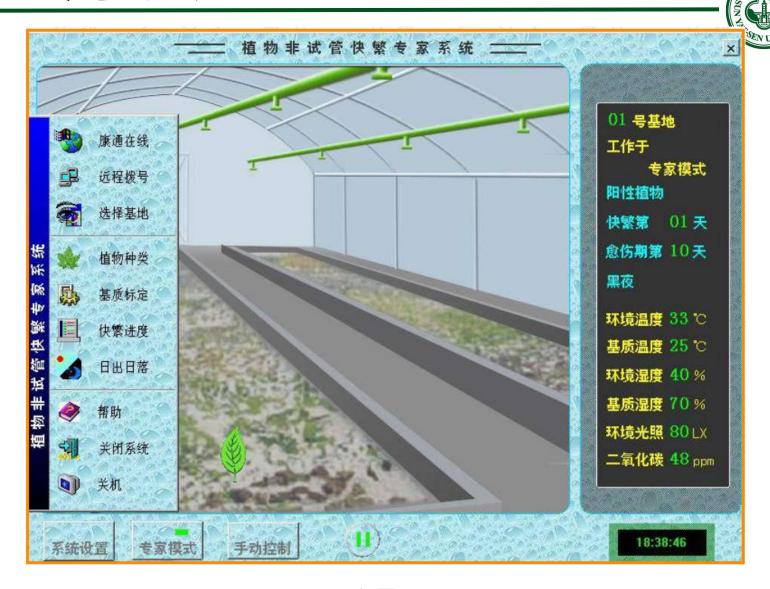
		A Property of the Parket of th
用户名:	密码:	登陆
	2,	





3#卸船机在线健康监测系统





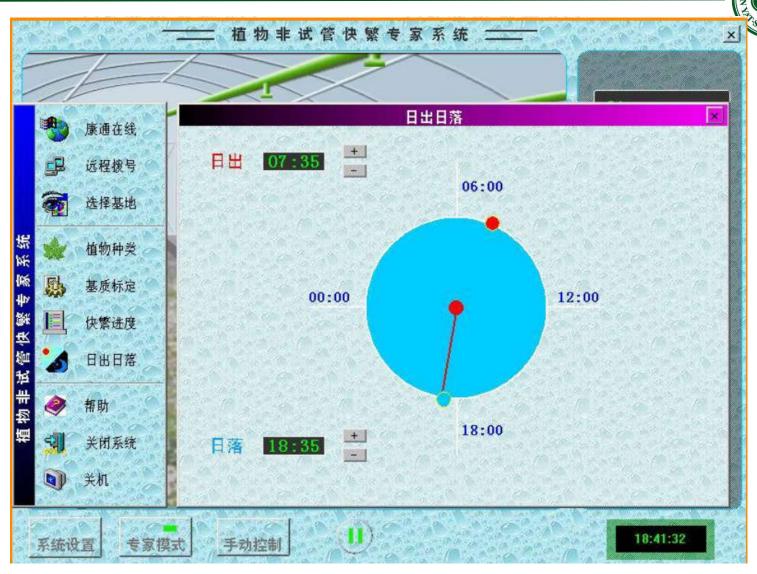
主界面 41



专家卡功能:傻瓜化操作



多区化远程控制, 手动及专家模式切换



智能化时差,日照,季节调控:可因时因地编制最佳化的农业专家系统软件



(一) 概述

瑞典学者K.J.Astrom,他于1983年发表"Implementation of an Auto-Tuner Using Expert System Ideas"一文,明确建立了将专家系统引入自动控制的思想,随后开展了原型系统的实验。1986年,他在另一篇论文"Expert Control"中以实例说明智能控制,正式提出了"专家控制"的概念,标志着"专家控制"作为一个学科的正式创立。

专家控制是智能控制的一个重要分支,又称专家智能控制。<u>所谓专家控制,是将专家系统的理论和技术同控制理论、</u>方法与技术相结合,在未知环境下,仿效专家的经验,实现对系统的控制。



专家控制试图在传统控制的基础上"加入"一个富有经验的控制工程师,实现控制的功能。

它由知识库和推理机构成主体框架,通过对控制领域知识(先验经验、动态信息、目标等)的获取与组织,按某种策略及时地选用恰当的规则进行推理输出,实现对实际对象

的控制。

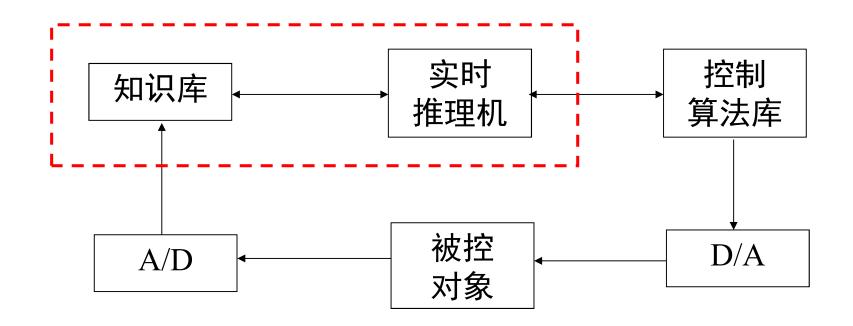




(二) 专家控制的基本原理

1 结构

专家控制的基本结构:





2 功能

- (1) 能够满足任意动态过程的控制需要,尤其适用于带有时变、非线性和强干扰的控制;
 - (2) 控制过程可以利用对象的先验知识;
- (3)通过修改、增加控制规则,可不断积累知识,改进控制性能;
 - (4) 可以定性地描述控制系统的性能,如"超调小"、"偏差增大"等;
 - (5) 对控制性能可进行解释;
- (6)可通过对控制闭环中的单元进行<mark>故障检测</mark>来获取经验规则。



3 与专家系统的区别

专家控制引入了专家系统的思想,但与专家系统存在区别:

- (1)专家系统能完成专门领域的功能,辅助用户决策;专家控制能进行独立的、实时的自动决策。 专家控制比专家系统对可靠性和抗干扰性有着更高的要求。
- (2)专家系统处于<mark>离线工作方式,而专家控制要求在线获取反馈信息,即要求在线工作方式。</mark>



4 知识表示

专家控制将系统视为基于知识的系统,控制系统的知识 表示如下:

(1) 受控过程的知识

- ① 先验知识:包括问题的类型及开环特性;
- ② 动态知识:包括中间状态及特性变化。

(2)控制、辨识、诊断知识

- ① 定量知识:各种算法;
- ② 定性知识: 各种经验、逻辑、直观判断。

按照专家系统知识库的结构,有关知识可以分类组织,形成数据库和规则库,从而构成专家控制系统的知识源。



数据库包括:

- ① 事实——已知的静态数据。例如传感器测量误差、运行阈值、报 警阈值、操作序列的约束条件、受控过程的单元组态等;
- ② 证据——测量到的动态数据。例如传感器的输出值、仪器仪表的测试结果等。证据的类型是各异的,常常带有噪声、延迟,也可能是不完整的,甚至相互之间有冲突;
- ③ 假设一由事实和证据推导的中间结果,作为当前事实集合的补充。例如,通过各种参数估计算法推得的状态估计等;
- ④ 目标一系统的性能指标。例如对稳定性的要求,对静态工作点的寻优、对现有控制规律是否需要改进的判断等。目标既可以是预定的,也可以是根据外部命令或内部运行状况在线地动态建立的。



专家控制的规则库一般采用产生式规则表示:

IF 控制局势(事实和数据) THEN 操作结论

多条产生式规则构成规则库。

IF。。。THEN。。。
IF。。。THEN。。。
0
o
О
IF。。。THEN。。。



5 分类

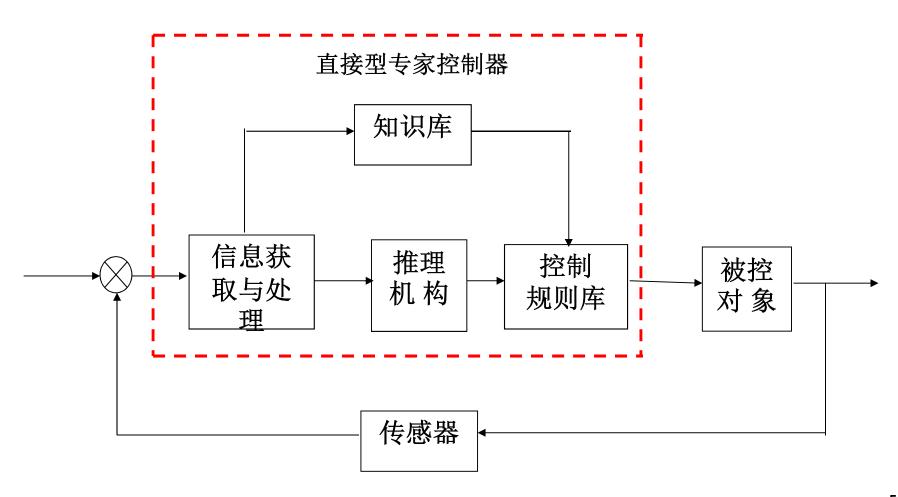
按专家控制在控制系统中的作用和功能,可将专家控制器分为以下两种类型:

(1) 直接型专家控制器

直接专家控制器用于取代常规控制器,直接控制生产过程或被控对象。具有模拟(或延伸,扩展)操作工人智能的功能。该控制器的任务和功能相对比较简单,但是需要在线、实时控制。因此,其知识表达和知识库也较简单,通常由几十条产生式规则构成,以便于增删和修改。



直接型专家控制器的示意图





(2) 间接型专家控制器

间接型专家控制器用于和常规控制器相结合,组成对生产过程或被控对象进行间接控制的智能控制系统。具有模拟(或延伸,扩展)控制工程师智能的功能。该控制器能够实现优化适应、协调、组织等高层决策的智能控制。按照高层决策功能的性质,间接型专家控制器可分为以下几种类型:

优化型专家 控制器 适应型专家 控制器

协调型专家 控制器 组织型专家 控制器



① 优化型专家控制器

基于最优控制专家的知识和经验的总结和运用。

通过设置整定值、优化控制参数或控制器,实现控制器的静态或动态优化。

② 适应型专家控制器

基于自适应控制专家的知识和经验的总结和运用。

根据现场运行状态和测试数据,相应地调整控制规律,校正控制参数,修改整定值或控制器,适应生产过程、对象特性或环境条件的漂移和变化。



③ 协调型专家控制器

基于协调控制专家和调度工程师的知识和经验的总结和运用。

用以协调局部控制器或各子控制系统的运行,实现大系统的全局稳定和优化。

④ 组织型专家控制器

基于控制工程的组织管理专家或总设计师的知识和经验的总结和运用。

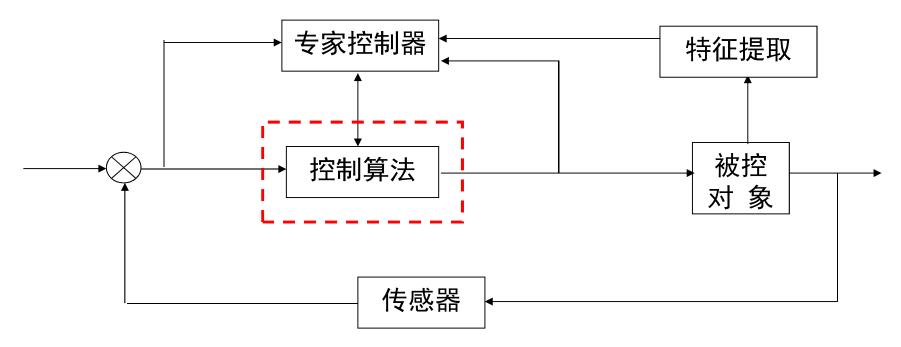
用以组织各种常规控制器,根据控制任务的目标和要求、构成所需要的控制系统。



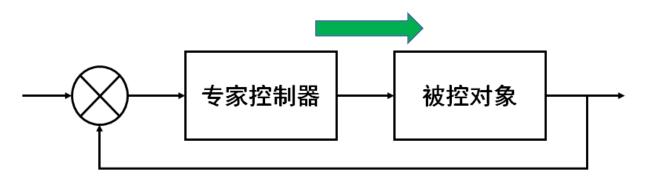
间接型专家控制器可以在线或离线运行。通常,

- ✓ 优化型、适应型需要在线、实时、联机运行。
- ✓ 协调型、组织型可以离线、非实时运行,作为相应的计算机辅助系统。

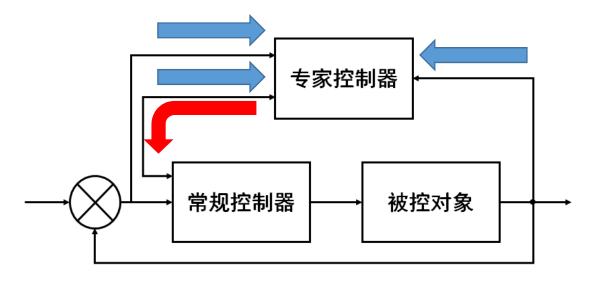
间接型专家控制器的示意图:







直接型专家控制系统



间接型专家控制系统



(三) 专家控制的关键技术及特点

- 1 专家控制的关键技术
 - (1) 知识的表达方法:
 - (2) 从传感器中识别和获取定量的控制信号;
 - (3) 将定性知识转化为定量的控制信号:
 - (4) 控制知识和控制规则的获取。

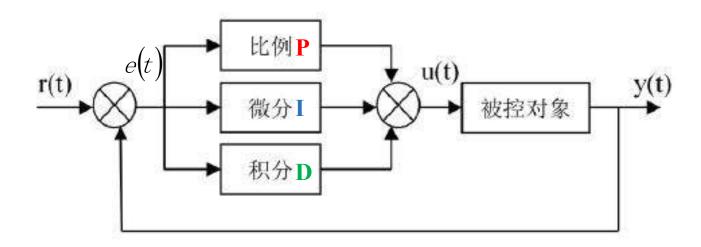


2 专家控制的特点

- (1) 灵活性:根据系统的工作状态及误差情况,可灵活地选取相应的控制律;
- (2) 适应性:能根据专家知识和经验,调整控制器的参数,适应对象特性及环境的变化;
- (3) 鲁棒性:通过利用专家规则,系统可以在 非线性、大偏差下可靠地工作。



(零)PID控制原理



✓ PID控制是比例积分微分控制

(Proportional-Integral-Differential)

- ✓ 历史最久、应用最广、适应性最强的控制方式
- ✓ 在工业生产过程中, PID控制算法占85%-90%



PID调节器是一种线性调节器,它将给定的r(t)的值与实际输出的y(t)的偏差的<mark>比例(P)、积分(I)、微分(D)通过线性组合构成控制量,对控制对象进行控制。</mark>

$$u(t) = K_P \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right]$$

其中
$$e(t) = r(t) - y(t)$$

PID调节器的传递函数:

$$D(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s\right)$$

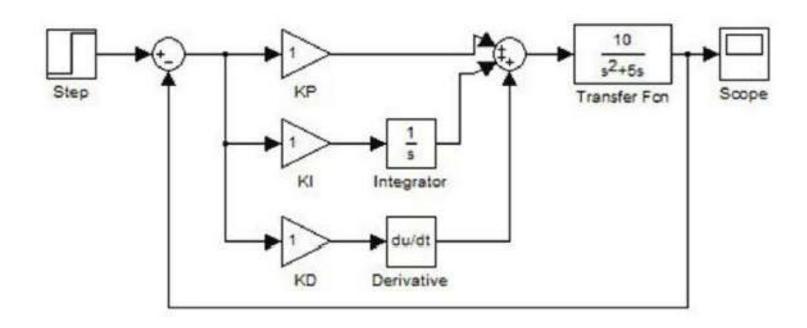


PID调节各个单元的作用:

- ① 比例单元P: 即时成比例地反应控制系统的偏差信号e(t), 偏差一旦产生, 调节器立即产生控制作用以减小偏差。
- ② 积分单元I:主要用于消除静差,提高系统的无差度。积分作用的强弱取决于积分时间常数 T_I , T_I 越大,积分作用越弱,反之则越强。
- ③ 微分单元D: 能反应偏差信号的变化趋势(变化速率),并能在偏差信号的值变得太大之前,在系统中引入一个有效的早期修正信号,从而加快系统的动作速度,减小调节时间。



PID控制的MATLAB/Simulink实现



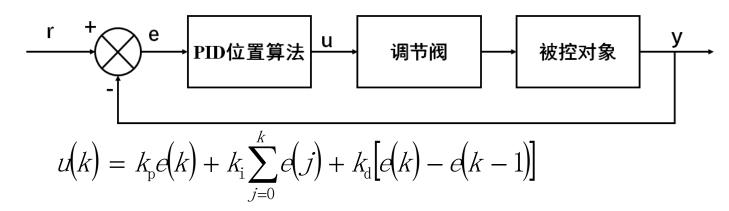


模拟PID控制的离散化(模拟→数字)

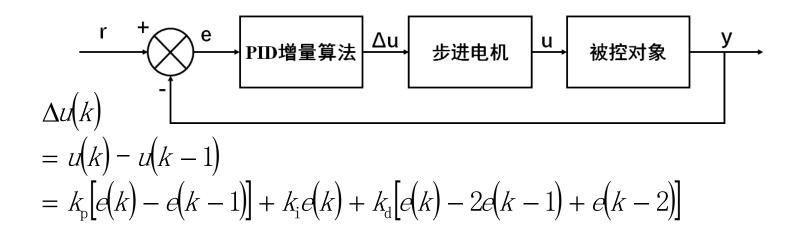
模拟形式	离散形式
e(t) = r(t) - y(t)	e(k) = r(k) - y(k)
$\frac{\mathrm{d}e(t)}{dT}$	$\frac{e(k) - e(k-1)}{dT}$
$\int_0^t e(t)dt$	$\sum_{i=0}^{n} e(i)T = T \sum_{i=0}^{n} e(i)$



数字PID位置型控制算法:



数字PID增量型控制算法:





位置型VS增量型:

- ① 位置式PID控制的输出与整个过去的状态有关,用到了误差的累加值;而增量式PID的输出只与当前拍和前两拍的误差有关,因此位置式PID控制的累积误差相对更大;
- ② 增量式PID控制输出的是控制量增量,并无积分作用,因此该方法适用于 执行机构带积分部件的对象,如**步进电机**等,而位置式PID适用于执行机 构不带积分部件的对象,如**电液伺服阀**。
- ③ 由于增量式PID输出的是控制量增量,如果计算机出现故障,**误动作影响较小**,而执行机构本身有记忆功能,可仍保持原位,不会严重影响系统的工作,而位置式的输出直接对应对象的输出,因此**对系统影响较大**。



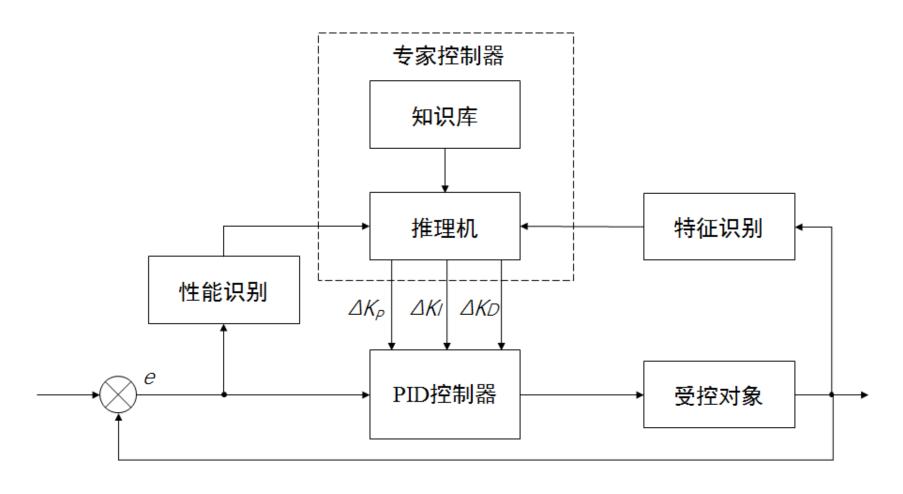
(一)专家PID控制原理

专家PID控制的实质是:基于受控对象和控制规律的各种知识,无需知道被控对象的精确模型,利用专家经验来设计PID参数。

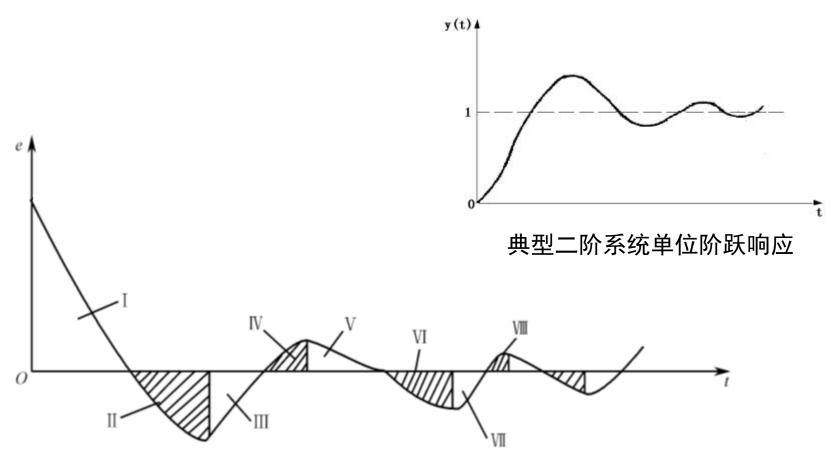




专家PID控制是一种间接型专家控制器。







典型二阶系统单位阶跃响应误差曲线



对于典型二阶系统阶跃响应过程, 作如下分析:

令e(k)表示离散化的当前采样时刻的误差值,e(k-1)和 e(k-2)分别表示前一个和前两个采样时刻的误差值,则有:

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$$

$$\Delta e(k-1) = e(k-1) - e(k-2)$$

令u(k)为控制器输出; M_1 、 M_2 为设定的误差界限, $M_1 > M_2 > 0$;k为控制周期序号(自然数); ε 为任意小的正实数。



根据误差及其变化,可设计专家PID控制器。

该控制器可分为以下五种情况进行设计:

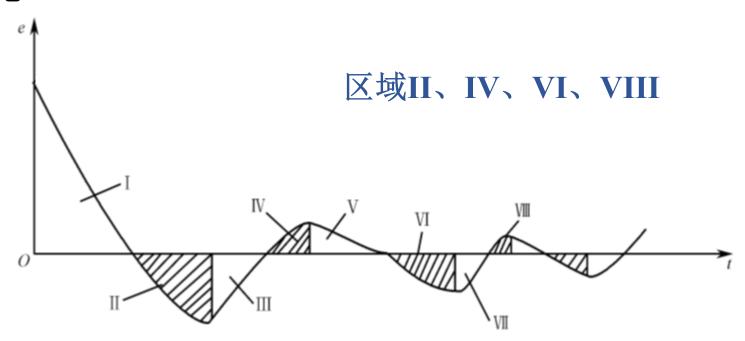
(1) 当 $|e(k)| > M_1$ 时,说明误差的绝对值已经很大。

不论误差变化趋势如何,都应使控制器的输出按 最大或者最小(定值)输出,以迅速调整误差,使误 差绝对值以最大速度减小。此时,它相当于实施开环 控制。

$$u(k)$$
=定值



(2) 当 $e(k)\Delta e(k) > 0$ 或 $\Delta e(k) = 0$ 时,说明误差在朝绝对值增大方向变化,或误差为某一常值,未发生变化。





如果 $|e(k)| \ge M_2$,说明误差也较大,可考虑由控制器实施<u>较强</u>的控制作用,以达到扭转误差绝对值朝减小方向变化,并迅速减小误差的绝对值,控制器输出为:

$$u(k)=u(k-1)+k_1$$
 $\{k_p[e(k)-e(k-1)]+k_ie(k)+k_d[e(k)-2e(k-1)+e(k-2)]\}$
 k_1 为增益放大系数, $k_1>1$



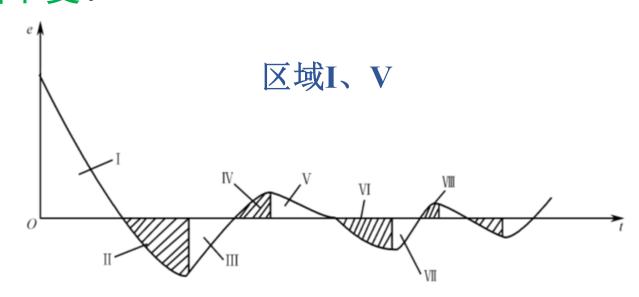
如果 $|e(k)| < M_2$,说明尽管误差朝绝对值增大方向变化,但误差绝对值本身并不很大,可考虑控制器实施<u>一般</u>的控制作用,只要扭转误差的变化趋势,使其朝误差绝对值减小方向变化,控制器输出为:

$$u(k) = u(k-1) + k_{p}[e(k) - e(k-1)] + k_{i}e(k) + k_{d}[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)]$$



(3) 当 $e(k)\Delta e(k) < 0$ 且 $\Delta e(k)\Delta e(k-1) > 0$ 或者 e(k) = 0

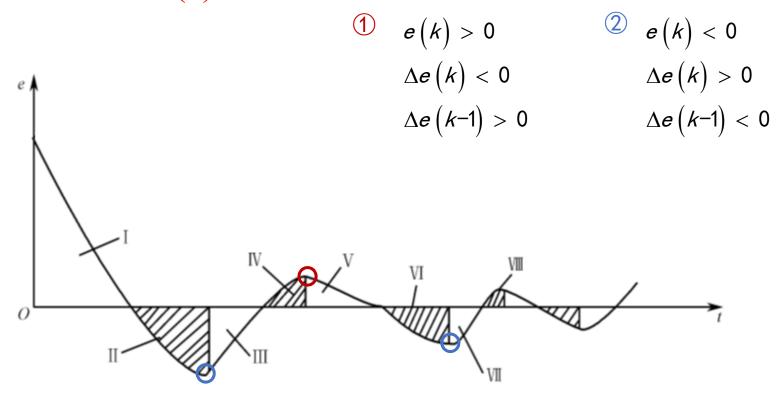
时,说明误差的绝对值朝减小的方向变化,或者已经达到平衡状态。此时,可考虑采取保持控制器输出不变。





(4) 当 $e(k)\Delta e(k) < 0$ 且 $\Delta e(k)\Delta e(k-1) < 0$ 时,说明误差处于

极值状态em(k)。





如果此时误差的绝对值较大, $\mathbb{D}|e(k)| \geq M_2$,

可考虑实施较强的控制作用:

$$u(k) = u(k-1) + k_1 k_p e_m(k)$$

 k_1 为增益放大系数, $k_1 > 1$ $e_m(k)$ 为误差e的第k个极值

如果此时误差的绝对值较小,即 $|e(k)| < M_2$,可考虑实施较弱的控制作用:

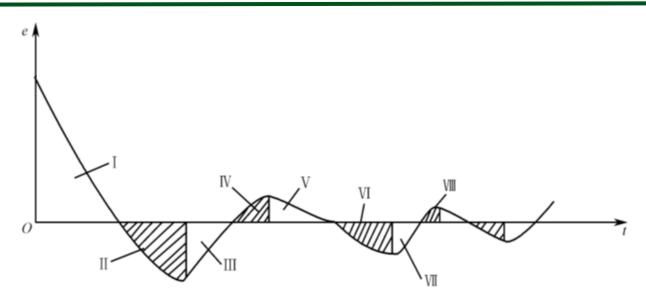
$$u(k) = u(k-1) + k_2 k_p e_m(k)$$

 k_2 为抑制系数, $0 < k_2 < 1$



(5) 当 $|e(k)| \le \varepsilon$ 时,说明误差的绝对值很小,这种偏差有可能是系统静差引起的,此时加入积分,减少稳态误差。

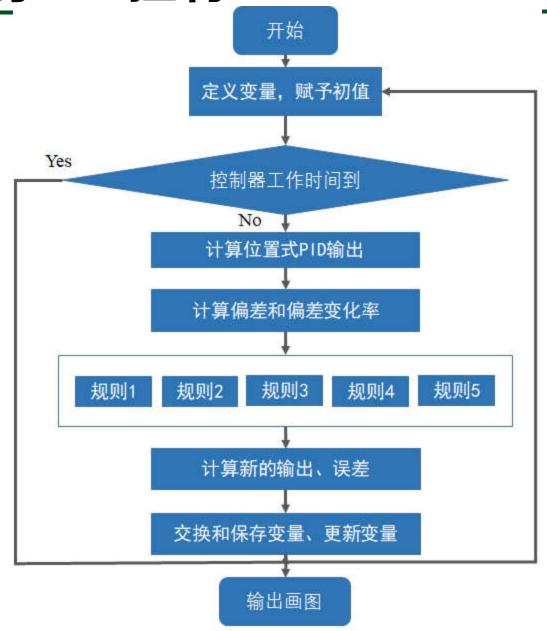




上图中,

- ▶ I、Ⅲ、Ⅴ、Ⅶ、…区域,误差朝绝对值减小的方向变化。此时,可采取保持等待措施,相当于实施开环控制;
- ▶ II、IV、VII、VIII、···区域,误差朝绝对值增大的方向变化。此时,可根据误差的大小分别实施较强或一般的控制作用,以抑制动态误差。







(二) 仿真实例

求三阶传递函数的单位阶跃响应

$$G_{p}(s) = \frac{523500}{s^{3} + 87.35 s^{2} + 10470 s}$$

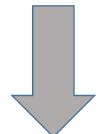
其中对象采样时间为1ms。

采用专家PID设计控制器。在仿真过程中, ε 取 0.001,程序中的五条规则与控制算法的五种情况相对应。

仿真程序: chap2_1.m



$$G_{p}(s) = \frac{523500}{s^3 + 87.35s^2 + 10470s}$$



sys=tf(5.235e005,[1,87.35,1.047e004,0]); %Plant dsys=c2d(sys,ts,'z'); [num,den]=tfdata(dsys,'v');

$$G(z) = \frac{\text{num } (2)z^2 + \text{num } (3)z + \text{num } (4)}{\text{den } (1)z^3 + \text{den } (2)z^2 + \text{den } (3)z + \text{den } (4)}$$



$$G(z) = \frac{Y(z)}{U(z)}$$

$$Y(z) = -\text{den } (2)z^{-1}Y(z) - \text{den } (3)z^{-2}Y(z) - \text{den } (4)z^{-3}Y(z)$$

+ num $(2)z^{-1}U(z)$ + num $(3)z^{-2}U(z)$ + num $(4)z^{-3}U(z)$



$$y(k) = -\text{den } (2)y(k-1) - \text{den } (3)y(k-2) - \text{den } (4)y(k-3) + \text{num } (2)u(k-1) + \text{num } (3)u(k-2) + \text{num } (4)u(k-3)$$



规则代码:

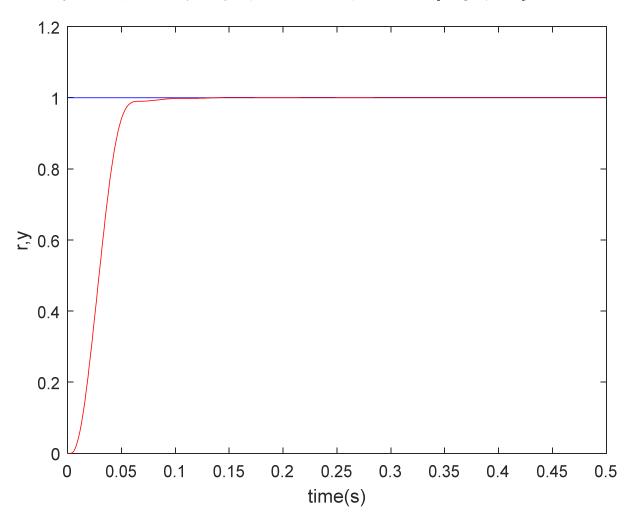
```
%Expert control rule
if abs(x(1))>0.8
                       %Rule1:Unclosed control rule
   u(k) = 0.45;
elseif abs(x(1))>0.40
   u(k) = 0.40;
elseif abs(x(1))>0.20
   u(k) = 0.12;
elseif abs(x(1))>0.01
   u(k) = 0.10;
end
if x(1)*x(2)>0 | (x(2)==0)
                                  %Rule2
   if abs(x(1)) >= 0.05
      u(k)=u_1+2*kp*x(1);
   else
      u(k) = u_1 + 0.4 * kp * x(1);
   end
end
```



```
if (x(1)*x(2)<0&x(2)*x2_1>0) \mid (x(1)==0) %Rule3 u(k)=u(k); end if x(1)*x(2)<0&x(2)*x2_1<0 %Rule4 if abs(x(1))>=0.05 u(k)=u_1+2*kp*error_1; else u(k)=u_1+0.6*kp*error_1; end end if abs(x(1))<=0.001 %Rule5:Integration separation PI control u(k)=0.5*x(1)+0.010*x(3); end
```



专家PID控制阶跃响应曲线如下图所示





误差响应曲线如下图所示

