

教 案

2025-2026 学年第一学期

课程名称 智能控制基础

专业班级 电气 251 、 251 (3+证书)

总学时数 64 学时

任课教师 谢浩鑫

课程基本信息

课程名称	智能控制基础			
课程性质	专业课	学分	4	
学时	总学时：64 学时。其中：课堂讲授 64 学时；实训/实验 0 学时；线上教学 0 学时			
开课部门	机电工程系	任课教师	谢浩鑫	
授课专业、班级	电气自动化专业技术 251、251(3+证书)	开课学期	2025-2026 第一学期	
成绩评定	平时成绩占 60 %；期末成绩占 40 %	考核方式	考查	
选用教材	书 名	主 编	出版社	出版日期
	智能控制基础	师丽	机械工业出版社	2025.07
本课程在本专业人才培养方案中的地位和作用	《智能控制基础》内容主要包括智能控制概论、模糊控制论、神经网络控制论、专家控制、分层递阶智能控制、学习控制、模糊神经网络控制与自适应神经网络、进化算法、多智能体系统控制等，培养学生掌握现代智能系统与智能控制思想，创新意识和团队协作能力。			
本课程教学目标	课程的任务和目标是：教授模糊控制、神经网络控制等核心理论，指导学生将理论用于解决复杂系统控制问题。帮助学生掌握智能控制核心技术，具备分析、设计简单智能控制系统的能力，为后续专业学习和从事智能控制相关工作筑牢基础。			
素质(思政)内容与要求	<p>培养创新思维：通过结合我国自主研发的工业智能控制算法案例，引导学生对比传统与智能控制逻辑差异，打破思维局限，体现时代精神和创新精神。</p> <p>强化团队协作：通过设置小组任务，强调团队协作的重要性，培养学生具备良好的团队合作精神和沟通能力，能够在团队中发挥个人优势，共同完成任务。</p> <p>树立责任意识：要求学生认识到智能控制在公共设施领域对社会和环境的责任，注重技术的安全性、可靠性和环保性，树立对消费者和社会负责的态度。</p>			
学生用主要参考资料	无			

第一章 绪论（4学时）

素质（思政）内容与要求：

以都江堰引出控制思想，讲解智能控制概念时，借傅京孙事迹传首创精神与家国情怀；述发展历程，用蔡自兴求学故事培坚韧品质；结合我国制造业升级、航天成就等应用，激民族自豪感与社会责任感。

教学内容：

1. 自动控制理论的发展历程；
2. 智能控制产生的背景及其发展概况、研究对象、主要特点；
3. 主要智能控制方法介绍。

教学目标：

1. 掌握自动控制发展的几个重要阶段及其研究成果；
2. 了解智能控制的产生背景、发展状况及主要方法；
3. 理解几种主要智能控制方法的特点；

教学重点：

1. 介绍智能控制的进展；
2. 叙述智能控制的定义、特点；
3. 介绍智能控制的结构理论。

教学难点：

1. 怎么样理解人工智能；
2. 智能控制作为一门学科有什么意义；
3. 智能控制的结构理论。

教学方法和手段：

课堂教学为主。适当提问,加深学生对概念的理解。

教学过程：

（一）传统控制理论面临的难题

(1)传统控制系统的设计与分析是建立在精确的系统数学模型基础上的,而实际系统由于存在复杂性、非线性、时变性、不确定性和不完全性等,一般无法获得精确的数学模型。

(2)研究这类系统时,必须提出并遵循一些比较苛刻的假设,而这些假设在应用中往往与实际不相吻合。

(3)对于某些复杂的和包含不确定性的对象,根本无法以传统数学模型来表示,即无法解决建模问题。

(4)为了提高性能,传统控制系统可能变得很复杂,从而增加了设备的初投资和维修费用,降低系统的可靠性。

(二)人工智能对自动控制的影响

人工智能影响了许多具有不同背景的学科,它的发展已促进自动控制向着更高的水平——智能控制(intelligent control)发展。人工智能和计算机科学界已经提出一些方法、示例和技术,用于解决自动控制面临的难题。例如,简化处理松散结构的启发式软件方法(专家系统外壳、面向对象程序设计和再生软件等;基于角色(actor)或艾真体(agent)的处理超大规模系统的软件模型;模糊信息处理与控制技术;进化计算、遗传算法、自然计算以及基于信息论和人工神经网络的控制思想和方法等。

讨论: 智能控制是在什么样的背景下发展起来的?

(三)智能控制的发展

傅京孙

1965年,著名的美籍华裔科学家傅京孙(K.S.Fu)教授首先把人工智能的启发式推理规则用于学习控制系统;然后,他又于1971年论述了人工智能与自动控制的交接关系。由于傅先生的重要贡献,他已成为国际公认的智能控制的先行者和奠基人。

扎德(Zadeh)与模糊控制

模糊控制是智能控制的又一活跃研究领域。扎德(Zadeh)于1965年发表了他的著名论文“模糊集合”(fuzzy sets),开辟了模糊控制的新领域。

利昂兹(Leondes)

1967年,利昂兹(Leondes)等人首次正式使用“智能控制”一词。这一术语的出现要比“人工智能”晚11年,比“机器人”晚47年。

萨里迪斯(Saridis)

萨里迪斯(Saridis)对智能控制系统的分类作出贡献。他把智能控制发展道路上的最远点标记为人工智能。他认为,人工智能能够提供最高层的控制结构,进行最高层的决策。

其他

奥斯特洛姆(Astrom)、迪席尔瓦(DeSilva)、周、蔡、霍门迪梅洛(HomendeMello)和桑德森(Sanderson)等于80年代分别提出和发展了专家控制、基于知识的控制、仿人控制、专家规划和分级规划等。

国内情况

近10多年来,相关学术组织、学术团体、学术会议等的活跃情况表明,智能控制作为一门独立的新学科,已在我国建立起来。以计算智能为基础的一些新的智能控制方法和技术已被先后提出,这些新的智能控制系统包括仿人控制系统、进化控制系统和免疫控制系统等。与人工智能学科相比,智能控制学科具有较大的容他性,而没有出发过于激烈和对立的争论。早在智能控制建立的初期,包括本书作者在内的许多智能控制专家实际上把3个不同认知学派的思想融合和贯穿在智能控制学科之中。

提问：智能控制作为一门独立学科是于什么时候建立起来的？

（四）智能控制的定义与特点

定义 1 智能机器

能够在定形或不定形,熟悉或不熟悉的环境中自主地或与操作人员交互作用以执行各种拟人任务(anthropomorphic tasks)的机器。或者比较通俗地说,智能机器是那些能够自主地代替人类从事危险、厌烦、远距离或高精度等作业的机器。

定义 2 自动控制

自动控制是能按规定程序对机器或装置进行自动操作或控制的过程。简单地说,不需要人工干预的控制就是自动控制。例如,一个装置能够自动接收所测得的过程物理变量,自动进行计算,然后对过程进行自动调节就是自动控制装置。

定义 3 智能控制

智能控制是驱动智能机器自主地实现其目标的过程。或者说,智能控制是一类无需人的干预就能够独立地驱动智能机器实现其目标的自动控制。对自主机器人的控制就是一例。

定义 4 智能控制系统

用于驱动自主智能机器以实现其目标而无需操作人员干预的系统叫智能控制系统。这类系统必须具有智能调度和执行等能力。智能控制系统的理论基础是人工智能、控制论、运筹学和信息论等学科的交叉。

提问：自动控制与智能控制有什么区别？

智能控制的特点

(1)同时具有以知识表示的非数学广义模型和以数学模型(含计算智能模型与算法)表示的混合控制过程。

(2)智能控制的核心在高层控制,即组织级。

(3)智能控制是一门边缘交叉学科。

(4)智能控制是一个新兴的研究领域。无论在理论上或实践上它都还很不成熟、很不完善,需要进一步探索与开发。

（五）智能控制的主要方法

(1) 模糊控制

1965年,美国加州大学的L.A.Zadeh教授在其发表的著名论文“Fuzzy Set”中,首次提出用“隶属函数”的概念来定量描述事物模糊性的模糊集合理论,并提出了模糊集的概念。这个概念试图用连续变量测量对象在某类集合中的占有程度,而不像传统集合那样,只有“属于”“不属于”两种状态。模糊集的思想反应了现实世

界所存在的客观不确定性与人们在认识中出现的不确定性。模糊集合的模糊性是针对在所划分的类别与类别之间无明显的隶属到不隶属的转折。事实上，客观世界绝大多数事务，说他们属于某一类或不属于某一类都不存在明显的分界线。

所谓模糊控制，就是在被控对象的模糊模型的基础上，运用模糊控制器近似推理手段，实现系统控制的一种方法。模糊模型是用模糊语言和规则描述的一个系统的动态特性及性能指标。

模糊控制的基本思想是用机器去模拟人对系统的控制。它是受这样事实而启发的：对于用传统控制理论无法进行分析和控制的复杂的和无法建立数学模型的系统，有经验的操作者或专家却能取得比较好的控制效果，这是因为他们拥有日积月累的丰富经验，因此人们希望把这种经验指导下的行为过程总结成一些规则，并根据这些规则设计出控制器。然后运用模糊理论、模糊语言变量和模糊逻辑推理的知识，把这些模糊的语言上升为数值运算，从而能够利用计算机来完成对这些规则的具体实现，达到以机器代替人对某些对象进行自动控制的目的。

(2) 神经网络

神经网络是指由大量与生物神经系统的神经细胞相类似的人工神经元互连而组成的网络；或由大量象生物神经元的处理单元并联互连而成。这种神经网络具有某些智能和仿人控制功能。

学习算法是神经网络的主要特征，也是当前研究的主要课题。学习的概念来自生物模型，它是机体在复杂多变的环境中进行有效的自我调节。神经网络具备类似人类的学习功能，那么神经网络如何进行学习呢？一个神经网络若想改变其输出值，但又不能改变它的转换函数，只能改变其输入，而改变输入的唯一方法只能修改加在输入端的加权系数。因而，神经网络的学习过程是修改加权系数的过程，最终使其输出达到期望值，学习结束。常用的学习算法有：**Hebb**学习算法、**widrowHoff**学习算法、反向传播学习算法—**BP**学习算法、**Hopfield**反馈神经网络学习算法等。

(3) 专家控制

专家指的是那些对解决专门问题非常熟悉的人们，他们的这种专门技术通常源于丰富的经验，以及他们处理问题的详细专业知识。专家系统主要指的是一个智能计算机程序系统，其内部含有大量的某个领域专家水平的知识与经验，能够利用人类专家的知识解决问题的经验方法来处理该领域的高水平难题。它具有启发性、透明性、灵活性、符号操作、不确定性推理等特点。应用专家系统的概念和技术，模拟人类专家的控制知识与经验而建造的控制系统，称为专家控制系统。专家控制系统目前主要有两种形式：专家控制系统（**Expert Control System**）和专家控制器（**Expert Controller**）。

(4) 遗传算法

基于 **Darwin** 的进化论和 **Mendel** 的遗传学说。

主要实现步骤：

- 问题编码，生成初始染色体群
- 复制（从旧种群中选择生命力强的个体进行复制）
- 再生
- 交叉（部分内容进行互换）
- 变异（某个或某几个位置的内容进行跳变）
- 循环进行直到收敛于问题的最优解。

第二章 模糊控制（8学时）

素质（思政）内容与要求：

讲模糊控制原理时，提扎德提出理论的突破精神，培养学生创新意识；结合我国用其优化家电控制、工业温控的案例，显技术落地能力，激民族自信；讨论技术伦理，引导学生守科技向善底线，树用技术服务社会的责任感。

教学内容：

1. 模糊控制的基本概念和数学基础；
2. 模糊控制设计；
3. 自适应模糊控制。

教学目标：

1. 理解模糊集合与传统集合的异同。
2. 掌握模糊集合的基本运算
3. 能够推导模糊推理过程。

教学重点：

模糊控制器的组成、语言变量和语言值的定义、模糊运算、模糊推理方法、模糊隐含、控制算法表格的建立以及解模糊方法。函数模糊系统中，Takagi-Sugeno 模糊系统的定义及线性差补能力。

教学难点：

函数模糊系统定义的准确把握和理解、函数模糊系统的通用近似特性的理解。对模糊控制系统的非线性分析的理解，掌握用李雅普诺夫（Lyapunov）法对模糊控制系统进行稳定性分析，以及对圆判据理论和稳态跟踪误差理论的理解。

教学方法和手段：

课堂教学为主。适当提问,加深学生对概念的理解。

教学过程：

（一）模糊控制概述

从控制理论和技术发展的角度来看，复杂系统的建模和模拟是智能控制研究的热点和难点。而且在实际工程应用中，我们还要考虑系统的实现问题。例如，假设一个动态系统有比较准确的模型，但是如果模型过于复杂，也无法应用到实际控制器设计上。对许多传统控制器设计过程而言，被控对象都有严格的假设条件（例如对象是线性的）。与此相比，模糊控制为控制工程师提供了一个表达和

利用控制系统的启发性知识，实现系统控制的正规方法。因此，模糊控制系统是智能控制的重要组成部分。本章我们将探索和提供设计模糊控制器的方法论。

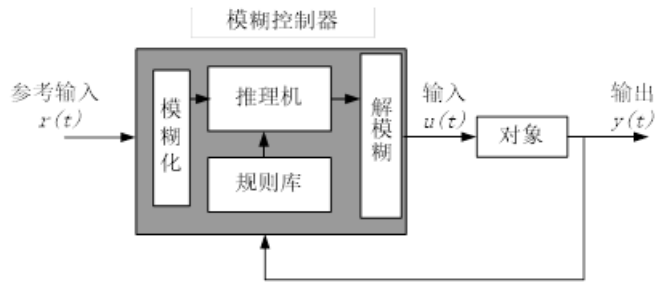


图 2-1-1 模糊控制器

模糊控制器主要由四部分组成：

- (1) “规则库”：以一套规则的形式表达如何最好控制系统的知识；
- (2) 推理机：确定哪条控制规则与当前时刻的状态是相关的，然后建议被控对象的输入；
- (3) 模糊化界面只是把控制器输入修改成能被规则表述且能与库中的规则相比较的形式；
- (4) 解模糊化界面把推理得到的结论转化成被控对象的输入。

为了设计模糊控制器，控制工程师必须收集闭环系统中人工决策器如何起作用的信息。这些信息有时来自执行控制任务的人类决策者，有时则需要控制工程师在了解被控对象的动态特性后，写出一套关于如何控制系统的规则。这些规则实质上是说：“如果对象输出和参考输入出于某种状态，那么对象的输入就应该取某些值”。把整个一套这样的“if-then”规则存入规则库，选择一个推理策略，就可以测试闭环性能是否满足要求了。

模糊控制器设计基本上可归纳为以下三步：

- (1) 选择模糊控制器的输入和输出；
- (2) 选择用于控制器输入的前处理和控制器输出的后处理算法；
- (3) 设计如图 2-1-1 所示的模糊控制器的每一部分。由于模糊化和解模糊都有标准的方法可以选择，设计者更多要关注的是推理机的问题，因此我们把模糊控制器设计的重点放在规则库上。

(二) 性能评价

模糊控制器是非线性控制器，许多传统的建模、分析和设计方法可以直接采用。因为模糊控制是比较新的控制技术，确定其相对传统控制方法的知识就相对重要了。不过，从国内外资料和文献来看，很少人完成了传统控制器和智能控制（包含大量的传统控制方法，如线性、非线性、自适应控制等；模糊控制方法，包括直接、自适应和监督控制等）之间的详细比较分析，包括理论上的模拟、实验分析和计算等。

此外，最新的模糊控制研究工作主要集中在模糊控制的优点上，没有对其应用中可能存在的缺点做认真地了解。因此，提醒读者在阅读有关文献是要注意这点。例如当你用收集启发式控制知识的策略进行控制时，你就要考虑以下问题：

1. 人类专家观察到并用于构造控制器的系统特性是不是包含了所有的情况(包括发生扰动、噪声和对象参数发生变化的情况);

2. 人类专家能否准确可靠地预见可能发生闭环系统不稳定或者极限环的问题;

3. 人类专家能否有效地将稳定性判据和性能指标(例如上升时间、超调和跟踪特性)结合到规则库中;

实际上,在以下情况下考虑这些问题就更加困难了:(1)如果控制系统工作在人命关天或者事关环境安全的环境下;(2)如果模糊控制器中的人类专家知识在某种程度上优于准备来设计我们控制系统的专家的知识(即不同的设计者会设计出不同水平的控制器)。显然,这就需要一种方法去设计、实现和评价模糊控制器,以保证控制器能够在满足性能指标的前提下,安全可靠工作。

(三) 语言规则

设 U 为某些对象的集合,称为论域,可以是连续的或离散的; u 表示 U 的元素,记作 $U = \{u\}$ 。

定义 2.1 模糊集合(fuzzy sets)

论域 U 到 $[0,1]$ 区间的任一映射 $\mu_F, \mu_{\bar{F}}$ 即: $U \rightarrow [0,1]$, 都确定 U 的一个模糊子集 F, μ_F 称为 F 的隶属函数(membership function)或隶属度(grade of membership)。也就是说, μ_F 表示 u 属于模糊子集 F 的程度或等级。在论域 U 中,可把模糊子集表示为元素 u 与其隶属函数 $\mu_F(u)$ 的序偶集合,记为:

$$F = \{(u, \mu_F(u)) | u \in U\}$$

若 U 为连续,则模糊集 F 可记作:

$$F = \int_U \mu_F(u) / u$$

若 U 为离散,则模糊集 F 可记作:

$$\begin{aligned} F &= \mu_F(u_1) / u_1 + \mu_F(u_2) / u_2 + \dots + \mu_F(u_n) / u_n \\ &= \sum_{i=1}^n \mu_F(u_i) / u_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

模糊集合的运算定义

设 A 和 B 为论域 U 中的两个模糊集,其隶属函数分别为 μ_A 和 μ_B , 则对于所有 $u \in U$, 存在下列运算:

- (1) A 与 B 的并(逻辑或)
- (2) A 与 B 的交(逻辑与)
- (3) A 的补(逻辑非)

定义 2.2 直积(笛卡儿乘积,代数积): 若 A_1, A_2, \dots, A_n 分别为论域 U_1, U_2, \dots, U_n 中的模糊集合, 则这些集合的直积是乘积空间 $U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n$ 中一个模糊集合, 其隶属函数为:

$$\begin{aligned} \mu_{A_1 \times \dots \times A_n}(u_1, u_2, \dots, u_n) &= \min\{\mu_{A_1}(u_1), \dots, \mu_{A_n}(u_n)\} \\ &= \mu_{A_1}(u_1) \mu_{A_2}(u_2) \cdots \mu_{A_n}(u_n) \end{aligned}$$

定义 2.3 模糊关系: 若 U, V 是两个非空模糊集合, 则其直积 $U \times V$ 中的一个模糊子集 R 称为从 U 到 V 的模糊关系, 可表示为:

$$U \times V = \{((u, v), \mu_R(u, v)) | u \in U, v \in V\}$$

定义 2.4 复合关系: 若 R 和 S 分别为 $U \times V$ 和 $V \times W$ 中的模糊关系, 则 R 和 S 的复合 $R \circ S$ 是一个从 U 到 W 的模糊关系, 记为:

$$\begin{aligned} R \circ S &= \{[(u, w), \sup_{v \in V} (\mu_R(u, v) * \mu_S(v, w))] \\ &\quad u \in U, v \in V, w \in W\} \end{aligned}$$

定义 2.5 正态模糊集、凸模糊集和模糊数

定义 2.6 语言变量

定义 2.7 常规集合的许多运算特性对模糊集合也同样成立。设模糊集合 $A, B, C \in U$, 则其并、交和补运算满足下列基本规律:

- (1) 幂等律
- (2) 交换律
- (3) 结合律
- (4) 分配律
- (5) 吸收律
- (6) 同一律
- (7) DeMorgan 律
- (8) 复原律
- (9) 对偶律(逆否律)

模糊逻辑推理

定义 2.8 三角协范式 三角协范式 $\dot{+}$ 是从 $[0, 1] \times [0, 1]$ 到 $[0, 1]$ 的两位函数, 即 $\dot{+}: [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$, 它包括并、代数和、有界和、强和以及不相交和。

定义 2.9 模糊合取: 对于所有 $u \in U, v \in V$, 模糊合取为:

$$A \rightarrow B = A \times B$$

$$= \int_{U \times V} \mu_A(u) * \mu_B(v) / (u, v)$$

式中,*为三角范式的一个算子。

定义 2.10 模糊析取: 对于所有 $u \in U, v \in V$, 模糊析取为:

$$A \rightarrow B = A + B$$

$$= \int_{U \times V} \mu_A(u) \dot{+} \mu_B(v) / (u, v)$$

式中,*为三角范式的一个算子。

定义 2.11 模糊蕴涵: 由 $A \rightarrow B$ 所表示的模糊蕴涵是定义在 $U \times V$ 上一个特殊的模糊关系, 其关系及隶属函数为:

- (1) 模糊合取
- (2) 模糊析取
- (3) 基本蕴涵
- (4) 命题演算
- (5) GMP 推理
- (6) GMT 推理

(四) 模糊控制设计案例

1. 内容回顾及引入 (5-8 分钟)

课堂提问:

(1) 模糊控制的智能性体现在哪里? (用计算机实现人的优秀控制策略)

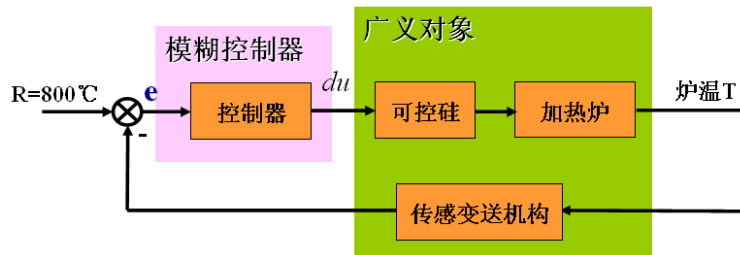
(2) 模糊控制由哪几部分组成? 其作用是什么? (模糊化, 反模糊化, 模糊规则库, 模糊推理)

通过提问, 带领大家回顾所学内容, 同时为本讲的模糊控制系统设计内容做好铺垫。

2. 电加热炉 SISO 炉温控制系统设计 (本节课可设计为讨论课)

控制目标: 保持炉温在 800°C ($R=800^{\circ}\text{C}$)

调节手段: 可控硅整流电源的供电电压



设计过程:

结构设计:

单入单出: e, du .

量化因子 K_e , 比例因子 K_u 。

模糊控制器设计

- (1) 模糊化接口:
- (2) 模糊规则: (通过提问的方式, 请同学们总结归纳)
- (3) 模糊推理:
- (4) 反模糊化接口: 最大隶属度法, 重心法。

3. 电加热炉 TISO 炉温控制系统设计

控制目标: 保持炉温在 800°C ($R=800^{\circ}\text{C}$)

调节手段: 可控硅整流电源的供电电压

设计过程:

控制器结构设计:

两入一出: e, ec, du

量化因子: K_e, K_{ec}

比例因子: K_u

模糊控制器设计:

- (1) 模糊化接口:
- (2) 二维模糊规则库构建: (重点讲解如何由经验构建出规则)
- (3) 模糊推理:
- (4) 反模糊化接口: 最大隶属度法, 重心法。

4. 模糊控制运行过程:

模糊控制器实时检测系统的误差和误差变化率 e^* 和 ec^* ;

- ① 通过量化因子 K_e 和 K_{ec} 将 e^* 和 ec^* 量化为控制器的精确输入 E^* 和 EC^* ;

② E^* 和 EC^* 通过模糊化接口转化为模糊输入 A^* 和 B^* ;

③将 A^* 和 B^* 根据规则库蕴涵的模糊关系进行模糊推理,得到模糊控制输出量 C^* ;

④对 C^* 进行清晰化处理,得到控制器的精确输出量 U^* ;

⑤通过比例因子 K_u 将 U^* 转化为实际作用于控制对象的控制量 u^* 。

将(2)~(4)步离线进行运算,对于每一种可能出现的 E 和 EC 取值,计算出相应的输出量 U ,并以表格的形式储存在计算机内存中,这样的表格我们称之为**模糊查询表**。(此部分重点讲解)

U		EC												
		-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
E	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-5	-5	-4	-3	-2	0	0	0
	-5	-6	-6	-6	-6	-5	-5	-5	-4	-3	-2	0	0	0
	-4	-6	-6	-6	-5	-5	-5	-5	-3	-3	-2	0	0	0
	-3	-5	-5	-5	-5	-4	-4	-4	-3	-2	-1	1	1	1
	-2	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-2	-1	0	2	2	2
	-1	-4	-4	-4	-3	-3	-3	-3	-1	2	2	3	3	3
	0	-4	-4	-4	-3	-3	-1	0	1	3	3	4	4	4
	1	-3	-3	-3	-2	-2	1	3	3	3	3	4	4	4
	2	-2	-2	0	0	1	2	4	4	4	4	4	4	4
	3	-1	-1	0	1	2	3	4	4	4	5	5	5	5
	4	0	0	1	2	3	4	5	5	5	5	6	6	6
	5	0	0	1	2	3	4	5	5	5	6	6	6	6
6	0	0	1	2	3	4	5	5	6	6	6	6	6	

有了模糊控制查询表,整个模糊控制的运行过程如下:

模糊控制器实时检测系统的误差和误差变化率 e^* 和 ec^* ;

1 通过量化因子 K_e 和 K_{ec} 将 e^* 和 ec^* 量化为控制器的精确输入 E^* 和 EC^* ;

2 查询模糊控制查询表,得到 U^* ;

3 通过比例因子 K_u 将 U^* 转化为实际作用于控制对象的控制量 u^* 。

(五) 性能评价

模糊控制器是非线性控制器,许多传统的建模、分析和设计方法可以直接采用。因为模糊控制是比较新的控制技术,确定其相对传统控制方法的知识就相对重要了。不过,从国内外

第三章 模糊建模与模糊辨识（4学时）

素质（思政）内容与要求：

结合我国用模糊辨识优化风电预测、电网调度的案例，显技术自主能力，激民族自信；讨论建模数据伦理，引导学生坚守数据诚信，树用技术服务能源安全的责任感。

教学内容：

1. 模糊模型的类型；
2. 模糊辨识和估计。

教学目标：

1. 明确模糊模型类型，重点区分 Mamdani 型（贴近人类语言，适合控制）与 Takagi-Sugeno 型（用函数输出，适合建模）；
2. 理解模糊辨识（从数据中确定模糊模型结构与参数）和估计（优化参数提升模型精度）的核心作用。

教学重点：

掌握几类模糊模型以及模糊辨识和估计的方法：最小二乘法、梯度法、聚类法和复合法。

教学难点：

对模糊辨识和估计的几种方法的准确把握和理解，关键是应用这几种方法实现模糊辨识和估计。

教学方法和手段：

课堂教学为主。适当提问,加深学生对概念的理解。

教学过程：

（一）模糊模型的类型

Mamdani 模糊模型最初提出是为了用从有经验的人类操作者获得的一套语言规则来实现蒸汽机和锅炉的控制。图 3-1 说明了当一个两规则 Mamdani 型的模糊推理系统有两个精确输入 x 和 y 时，系统是如何得到总的输出 z 。

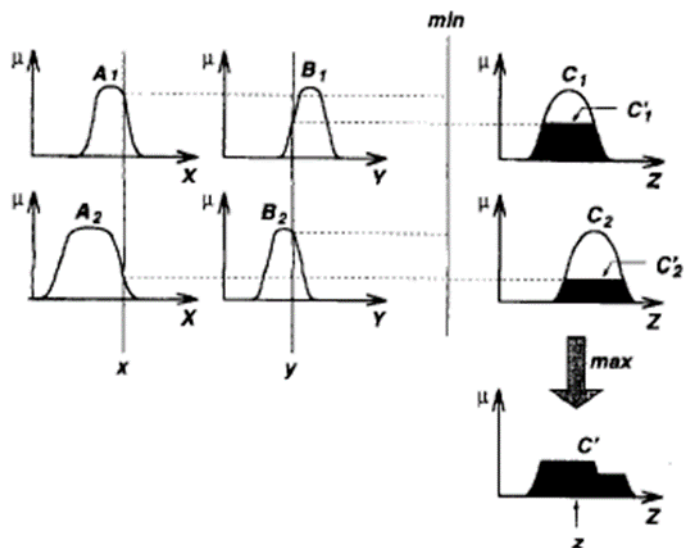


图 3-1 分别用最小和最大表示交和或操作的 Mamdani 模糊推理系统

在 Tsukamoto 模糊模型中，每条模糊 if-then 规则的结论可由一个具有单调隶属函数的模糊集合表示，如图 3-1-3 所示。因此，每条规则推得的输出可定义为由规则的激活强度产生的精确值。总的输出可以取每条规则输出的加权平均值。图 3-3 说明了一个双输入、双规则系统的全部推理过程。既然每条规则都推导出了一个精确输出，Tsukamoto 模糊模型通过加权平均的方法把每条规则的输出集成起来，这样就避免了耗时的解模糊过程。

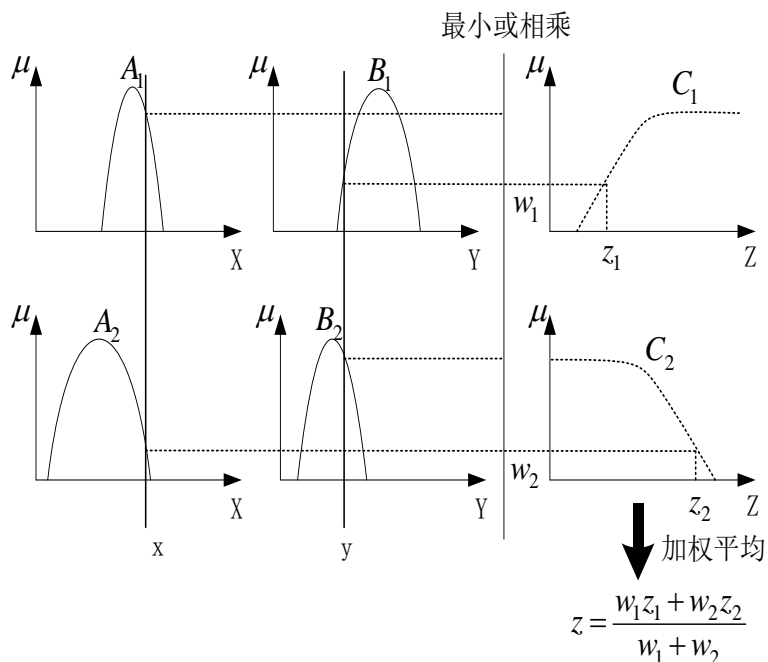


图 3-3 Tsukamoto 模糊模型

模糊推理系统的主旨很清楚，有点像“划分和征服”模糊规则的条件把输入空间划分成许多局部模糊区域，而结论是通过各种要素在给定区域对系统行为进

行描述。结论的要素可以是输出隶属函数（Mamdani 和 Tsukamoto 模糊模型）、一个常量（零阶 T-S 模糊模型）或者一个线性方程（一阶 T-S 模糊模型）。不同的结论要素导致不同的模糊推理系统，但是它们的条件总是相同的。因此，下面关于划分输入空间形成模糊规则条件的方法适用于上面提到的三种模糊系统。

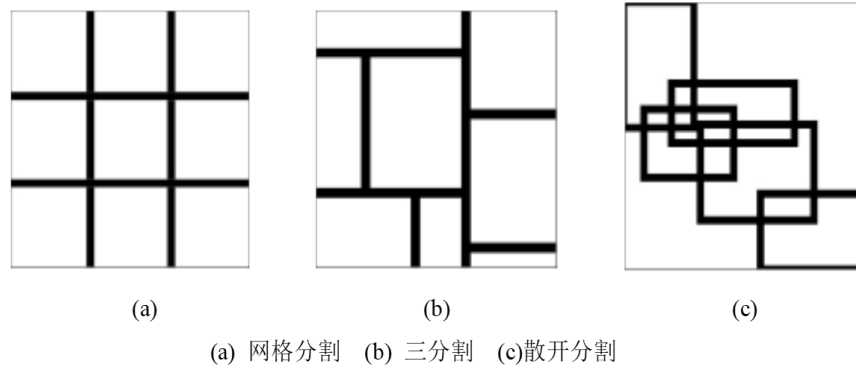


图 3-4 输入空间的不同分割方法

网格分割：图 3-4 (a) 是二维输入空间中的一个典型网格分割。设计仅含有几个输入状态变量的模糊控制器通常选用这种分割方法。这种分割方法仅需要每个输入隶属函数的一小部分。然而，当输入相当多时，问题就出现了。例如对于一个具有 10 个输入，且每个输入有两个隶属函数的模糊模型，就会有 1024 个模糊 if-then 规则，这对应用来讲就太大了。这个问题通常可通过下面介绍的分割方法解决。

三分割：图 3-4 (b) 显示了一个典型的三分割，这里每个区域通过相应的决定树被唯一指定。三分割可解决规则数按指数增长的问题。不过为了定义这些模糊区域的每个输入需要定义更多的隶属函数，并且这些隶属函数通常没有清楚的语言意义，比如“小”和“大”等等。

散开分割：如图 3-4 (c) 所示，通过覆盖整个输入空间的一个子集，也就是输入向量可能发生的区域，散开分割可以把规则数限制到一个合理的数量上。

(二) 模糊辨识和估计算法

X 中均匀覆盖的数据集合和系统辨识中足够丰富信号的信息有着密切联系。在系统辨识中，选择信号 u 来充分激励系统的动态特性，通过对象的输入-输出数据来观测系统。一般来讲，选择白噪声输入就可以充分激励系统，能比较好地辨识系统的动态特性。用含噪声的信号来激励是为了获得整个空间的数据信息，但是对于非线性系统则是被均匀覆盖。因此对于函数近似问题，如何挑选 u 来获得好的试验数据是非常困难的。目前还没有统一的方法，根据应用的系统的不同有多种选择。

上面集中研究了如何最好构造数据集合以便提供构造模糊系统 f 的有用信息。要强调的是语言信息在构造模糊系统中也起着重要作用。

假设从数据信息构造了一个模糊系统 f ，且已获得了一些语言信息，并用这些信息构造了另一个模糊系统 f_L 。如果我们研究系统辨识问题，那么 f_L 可能含有有关输入和输出的启发性知识，可以提供关于某一给定系统输入-输出数据估计器猜测的启发性信息。

假设模糊系统 f 和具有相同的形式。为了把模糊系统中的语言信息和模糊系统 f 中的数据信息结合起来，只需把两个模糊系统合并。

最小二乘算法：广义上讲，可以把模糊建模解释为用一种自然语言定性描述系统特性的等效模型。狭义上讲，模糊建模是用模糊量描述系统。模糊量包括模糊数和模糊集合。这里所说的定性模型是与系统动态特性的语言描述相一致的广义模糊模型。

模糊聚类法：所谓聚类就是以数据间的相似性为基础把数据进行归类的方法，是一种无监督的分类。模糊聚类是根据数据的相似性把同类数据归纳为模糊集合或聚类，即通过模糊集合定义软边界从而把数据聚类。模糊划分的概念最早由 **Ruspini** 提出，利用这一概念人们提出了多种聚类方法，比较典型的有：基于相似性关系和模糊关系的方法(包括聚合法和分裂法)、基于模糊等价关系的传递闭包方法、基于模糊图论最大树方法，以及基于数据集的凸分解、动态规划和难以辨识关系等方法。然而由于上述方法不适用于大数据量情况，难以满足实时性要求高的场合，因此其实际的应用不够广泛。实际中受到普遍欢迎的是基于目标函数的方法，该方法设计简单、解决问题的范围广，最终还可以转化为优化问题而借助经典数学的非线性规划理论求解，并易于计算机实现。因此，随着计算机的应用和发展，该类方法成为聚类研究的热点。这其中与模式识别有密切关系的模糊聚类主要有两种方法：**C-聚类法**和**最近邻聚类法**。这两种方法都与在模型识别领域中介绍过的传统方法有着密切的联系。本节我们首先用 **C-聚类**与**最小二乘算法**相结合的方法来训练 **T-S** 模糊系统，然后简单地介绍用最近邻法来训练标准的模糊系统。在 **C-聚类**算法中，我们用传统最优化方法来寻找聚类中心（条件模糊隶属函数参数）。结论模糊隶属函数参数用前面学习过的加权最小二乘算法获得。最近邻法同样也是用一种最优化的方法来得到聚类中心的结构，即模糊系统。

混合算法：模糊辨识可以采用最小二乘算法、梯度算法、聚类算法和样本学习算法及其修正算法方法来训练标准模糊系统和 **T-S** 模糊系统。这里我们将研究混合方法，即把上面提到的两个或更多个方法结合起来以训练模糊系统。

从基本上讲，混合算法可以归纳为三类：

(1) 混合初始化/训练

用一种方法初始化模糊系统的参数，然后用另一种方法训练该模糊系统。例如，你可以用最小二乘法初始化一个标准模糊系统的输出中心，然后用一个梯度算法来调整条件参数和更好的输出中心。

(2) 混合条件/结论训练

用一种方法训练规则的条件部分，而用另一种方法训练规则的结论部分。例如，在优化输出预解模糊的聚类方法中，用聚类算法来确定条件参数，用最小二乘算法来训练结论函数。下一章我们在 **ANFIS** 复合训练算法中，用最小二乘法训练 **T-S** 模糊系统的结论函数（已经被线性化），用梯度算法训练条件部分（非线性的）。

(3) 混合交叉训练

用一种算法训练后，用另一种算法继续训练，然后再换一种算法训练，以此类推。举例来说，你可以用样本学习方法来初始化模糊系统参数，然后用一种梯度算法训练模糊系统，并用最小二乘算法定期更新输出隶属函数的中心。总之，以上讲述的这些方法都有其优缺点。在实际应用中，我们应该根据计算复杂性、辨识的精度要求、数据量、训练的时间等具体情况和需要，灵活选择辨识方法。

模糊辨识作为非线性系统建模的重要方法，不仅可以利用系统的结构知识和模糊信息，而且能够应用优化技术用数据来建模。本章较系统地介绍了模糊辨识理论，主要内容可以概括为：

(1) 模糊系统的通用近似特性。这是模糊辨识的根本理论基础，是我们利用模糊辨识进行非线性系统建模的理论依据。

(2) 模糊辨识的主要方法：最小二乘法、梯度法、模糊聚类法和复合方法等。这些方法用于模糊辨识中系统结构和参数的优化，不仅适用于模糊辨识，同样也适用于作为神经网络的学习算法，在后面第四章和第六章中要用到。与传统的系统辨识问题类似，模糊辨识也包括结构辨识和参数辨识。其中，结构辨识包含模糊空间分割和规则抽取，参数辨识指的是模糊隶属函数参数的选取和优化。利用信息得到模糊辨识模型主要有两种策略：一种是使用专家知识(先验知识)，一种是基于输入输出数据。当不能得到足够和正确的专家信息，特别是面对复杂的未知模型时，基于输入输出数据的方法具有明显的优势。

第四章 神经网络控制（8学时）

素质（思政）内容与要求：

讲神经网络控制原理时，提罗森布拉特发明感知机的探索精神，培养学生创新意识；结合我国用其优化自动驾驶决策、电网负荷预测的案例，显技术自主实力，激民族自信；讨论算法偏见问题，引导学生守科技伦理，树用技术服务社会的责任感。

教学内容：

1. 神经网络理论基础；
2. 前馈神经网络；
3. 后馈神经网络

教学目标：

1. 掌握神经网络的概念及构成
2. 理解神经网络的学习、工作方式和原理
3. 了解神经网络的特点及应用场合
4. BP 网络的学习步骤
5. 反向传播算法的理解、实现

教学重点：

1. 人工神经网络模型
2. 神经网络的特点和分类
3. 神经网络的学习方式和学习算法
4. 前馈神经网络的结构和学习算法
5. 反馈神经网络的结构和学习算法
6. 神经网络 PID 控制

教学难点:

神经网络的学习算法以及神经网络 PID 控制。

教学方法和手段:

课堂教学为主, 结合课堂练习和小节提问。

教学过程:

(一) 人工神经网络研究的起源

神经网络:由人工神经元互联组成的网络。“结构上、功能上”对人脑的“抽象、简化、模拟”(不是人脑神经系统的真实写照); 模拟人脑的生理结构, 信息处理方式。人脑: 完成人的思维。神经元是组成人脑的基本单元。人脑约由 1011 ~ 1012 个神经元组成, 其中每个神经元约与 104 ~ 105 神经元相联, 组成人脑这样一个复杂的信息加工处理巨系统。

McCulloch 和 Pitts 曾于 1943 年提出一种叫做“似脑机器”(mindlike machine) 的思想, 这种机器可由基于生物神经元特性的互连模型来制造; 这就是神经网络的概念。

60 年代初期, Widrow 等提出的 Adaline(adaptive linear element, 即自适应线性元)以及 Steinbuch 等提出的学习矩阵。然而, 不久之后 Minsky 和 Papert 从数学上证明了感知器不能实现复杂逻辑功能。

70 年代, Grossberg 和 Kohonen 以生物学和心理学证据为基础, Grossberg 提出几种具有新颖特性的非线性动态系统结构。

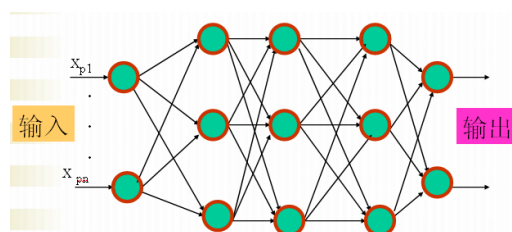
80 年代中叶, 作为一种前馈神经网络的学习算法, Parker 和 Rumelhart 等重新发现了反回传播算法。

近年来, 神经网络已在从家用电器到工业对象的广泛领域找到它的用武之地。

(二) 人工神经网络的特点

- (1) 便于信息的并行、分布式处理和存储
- (2) 逼近任意的非线性函数
- (3) 可以实现多输入、多输出
- (4) 便于用超大规模集成电路实现
- (5) 能进行学习, 以适应环境的变化

(三) 神经网络的基本结构



人工神经元是对生物神经元的一种模拟与简化, 它是神经网络的基本处理单

元。如图所示为一种简化的人工神经元结构。它是一个多输入、单输出的非线性元件。

前馈网络：具有递阶分层结构,由一些同层神经元间不存在互连的层级组成。从输入层至输出层的信号通过单向连接流通;神经元从一层连接至下一层,不存在同层神经元间的连接。前馈网络的例子有多层感知器(MLP)、学习矢量量化(LVQ)网络、小脑模型联接控制(CMAC)网络和数据处理方法(GMDH)网络等。

反馈网络：多个神经元互连以组织一个互连神经网络。有些神经元的输出被反馈至同层或前层神经元,递归网络又叫做反馈网络。Hopfield 网络,Elmman 网络和 Jordan 网络是递归网络有代表性的例子。

(四) 神经网络的学习方式及工作原理

神经网络的工作方式 (两个阶段)

Phase 1: 学习期 / 训练期

Phase 2: 工作期

学习方式:

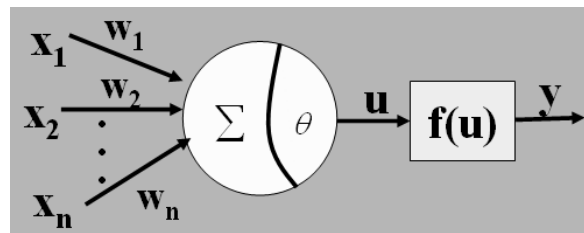
(1)有师学习：需要有个老师或导师来提供期望或目标输出信号。

(2)无师学习：无师学习算法不需要知道期望输出。在训练过程中,只要向神经网络提供输入模式,神经网络就能够自动地适应连接权,以便按相似特征把输入模式分组聚集。无师学习算法的例子包括 Kohonen 算法和 Carpenter-Grossberg 自适应谐振理论(ART)等。

(3)强化学习:强化学习是有师学习的特例,它不需要老师给出目标输出,采用一个“评论员”来评价与给定输入相对应的神经网络输出的优度(质量因数)。

(一) 感知器网络的基本结构

感知器 (perceptron) 是一个具有单层神经元的神经网络,并由线性阈值元件组成,是最简单的前向网络。它主要用于模式分类,单层的感知器网络结构如下图所示。

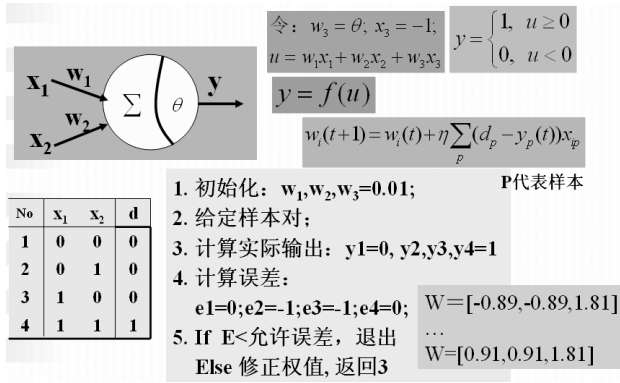


(二) 单层感知器的学习步骤

1. 设置权系数的初值 $w_i(0)$ 为较小的随机非零值
2. 给定输入 / 输出样本对 (即导师信号)
 $\{X_p, d_p\}, p=1, 2, \dots, L$
3. 求感知器输出 学习率 $[0, 1]$, 用于
控制权值调整速度
4. 权值调整: $w_i(t+1) = w_i(t) + \eta(d_p - y_p(t))x_{ip}$
5. 若 $y_p(t) = d_p$, 则学习结束, 否则, 返回3

(三) 课堂练习

用单层感知器训练实现 " 与 " 门。



(四) 单层感知器的功能及局限性

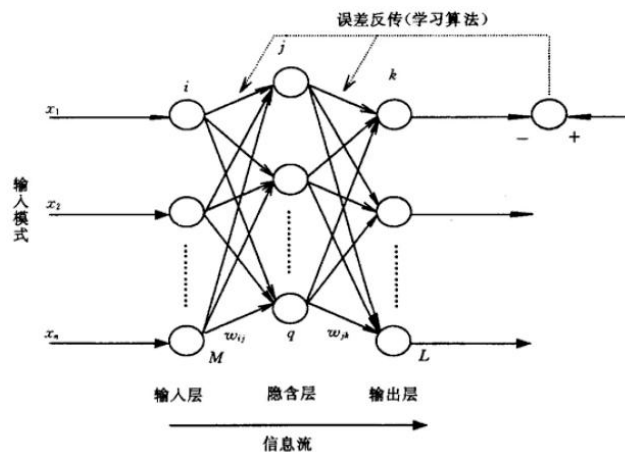
识别平面上线性可分的两类模式。

(五) 多层感知器的功能

感知器结构	异或问题	复杂问题	判决域形状	判决域
无隐层				半平面
单隐层				凸域
双隐层				任意复杂形状域

(一) BP网络的基本结构

误差反向传播神经网络，简称BP网络（Back Propagation），是一种单向传播的多层前向网络。在模式识别、图像处理、系统辨识、函数拟合、优化计算、最优预测和自适应控制等领域有着较为广泛的应用。如图是BP网络的结构示意图。



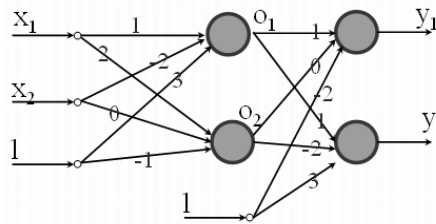
误差反向传播的BP算法简称BP算法，其基本思想是最小二乘算法。它采用梯度搜索技术，以期使网络的实际输出值与期望输出值的误差均方值为最小。BP算法的学习过程由正向传播和反向传播组成。在正向传播过程中，输入信息从输入层经隐含层逐层处理，并传向输出层，每层神经元（节点）的状态只影响下一层神经元的状态。如果在输出层不能得到期望的输出，则转入反向传播，将误差信号沿原来的连接通路返回，通过修改各层神经元的权值，使误差信号最小。

（二）BP 网络的学习步骤

- 1). 初始化：置所有权值为较小的随机数；
- 2). 提供训练集：给定输入向量 $X = (x_1, x_2, \dots, x_M)$ 和期望的目标输出向量 $D = (d_0, d_1, \dots, d_L)$ ；
- 3). 计算实际输出：计算隐含层、输出层各神经元输出；
- 4). 计算目标值与实际输出的偏差 E ；
- 5). 计算 $\Delta_p w_{jk}$ ；
- 6). 计算 $\Delta_p w_{ij}$ ；
- 7). 返回“2)”重复计算，直到误差 E_p 满足要求为止。

（三）BP 网络练习

多层前向传播神经网络结构如图所示。假设对于样本 $(x_1, x_2) = (1, 3)$ ，对应期望输出 (dy_1, dy_2) 为 $(0.95, 0.05)$ 。网络权系数的初值如图所示。试给出用BP算法训练此网络的一步迭代过程。这里所有神经元的激励函数为：



$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

学习步长 $\eta = 1$

（一）神经网络在控制系统中的应用

1.1 神经网络辨识技术

辨识:通过测量对象的输入输出状态来估计对象的数学模型，使建立的数学模型和对象具有相同的输入输出特性。

神经网络对非线性函数具有任意逼近和自学习能力，为系统的辨识，尤其是非线性动态系统的辨识提供了一条十分有效的途径。神经网络系统辨识实质上是选择一个适当的神经网络模型来逼近实际系统的数学模型。

1.2 神经网络控制技术

- (1)基于精确模型的各种控制结构中充当对象的模型；
- (2)在反馈控制系统中直接充当控制器的作用；
- (3)在传统控制系统中起优化计算作用；

(4)在与其它智能控制方法和优化算法相融合中,为其提供对象模型、优化参数、推理模型及故障诊断等。

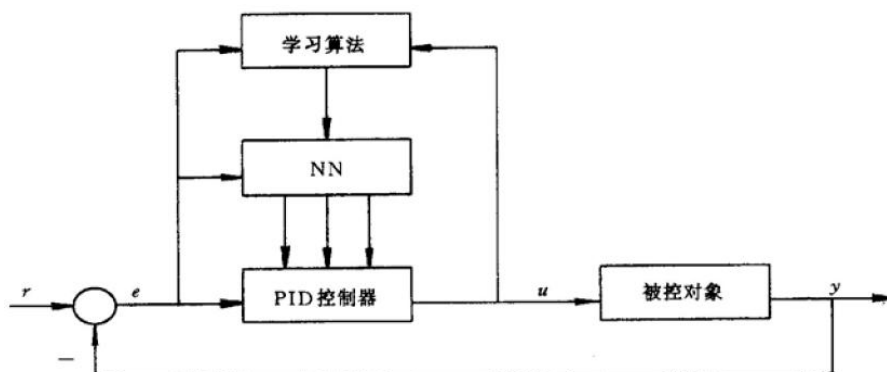
(二) 神经网络 PID 控制算法

神经网络控制或神经控制是指在控制系统中,应用神经网络技术,对难以精确建模的复杂非线性对象进行神经网络模型辨识,或作为控制器,或进行优化计算,或进行推理,或进行故障诊断,或同时兼有上述多种功能。这样的系统称为基于神经网络的控制系统,称这种控制方式为神经网络控制。

尽管神经网络控制技术有许多潜在的优势,但单纯使用神经网络的控制方法的研究仍有待进一步发展。通常将人工神经网络技术与传统的控制理论或智能技术综合使用。神经网络在控制中的作用有以下几种:

1. 在传统的控制系统中用以动态系统建模,充当对象模型;
2. 在反馈控制系统中直接充当控制器的作用;
3. 在传统控制系统中起优化计算作用;
4. 与其他智能控制方法如模糊逻辑、遗传算法、专家控制等相融合。

PID控制要取得好的控制效果,就必须对比例、积分和微分三种控制作用进行调整以形成相互配合又相互制约的关系,这种关系不是简单的“线性组合”,可从变化无穷的非线性组合中找出最佳的关系。神经网络所具有的任意非线性表示能力,可以通过对系统性能的学习来实现具有最佳组合的PID控制。



第五章 模糊神经控制 (8 学时)

素质 (思政) 内容与要求:

讲解模糊神经控制融合优势时,提及学者突破单一技术局限的创新思维,培养学生跨界融合意识;结合我国用其优化新能源并网控制、智能交通调度的案例,显技术自主实力,激民族自信;讨论系统决策伦理,引导学生守科技向善底线,树服务国家发展的责任感。

教学内容:

1. 模糊系统与神经网络的融合方式;
2. 模糊神经网络学习算法研究;

3. 自适应神经网络模糊推理系统;
4. 递归神经网络及其在系统辨识中的应用。

教学目标:

1. 掌握模糊系统和神经网络的结合方式;
2. 了解神经网络在系统辨识中的应用;

教学重点:

掌握模糊系统和神经网络的结合方式、自适应神经网络模糊推理系统以及基于 T-S 模糊型的递归神经网络。

教学难点:

自适应神经网络模糊推理系统和基于 T-S 模糊模型的递归神经网络在系统辨识中的应用。

教学方法和手段:

课堂教学为主, 结合课堂练习和小节提问。

教学过程:

(一) 模糊系统与神经网络的融合方式

模糊系统和神经网络相结合, 构成模糊神经网络可以有效地发挥模糊逻辑与神经网络的各自优势, 弥补各自的不足。模糊系统与神经网络的结合方式很多, 概括起来主要有三种形式:

在模糊控制中引入神经网络;

在神经网络中引入模糊逻辑;

模糊系统与神经网络在结构上的融合。

基于模糊技术的神经网络: 用模糊规则所表示的专家知识或经验来设计和训练神经网络的参数, 目的是改进和提高神经网络的自适应性、学习能力和收敛能力。

基于神经网络的模糊系统: 主要思想是利用神经网络优化模糊系统和增强模糊系统的自学习能力。例如, 可以用神经网络优化模糊系统的前件(后件)隶属函数, 或优化和自动生成模糊规则。

模糊逻辑与神经网络在结构上的融合: 主要思想是使神经网络具有与模糊系统匹配的推理机制, 即构造一个结构等价的模糊逻辑系统。

(二) 模糊神经网络学习算法研究

模糊神经网络可以被归纳为两大类: 前向模糊神经网络(FNN)和递归模糊神经网络(RFNN)。

模糊神经网络的优化采用一些神经网络和机器学习的方法:

(1)有监督学习: 需要外部的指导, 由外部信息确定提供样本的时机、性能误差和停机条件。

- (2)无监督学习：不需要外部的指导，只依赖于局部信息和内部控制。
 - (3)增强学习：用于目标、期望输出不明确的情况。
- 这三类学习算法各有优缺点，可同时采用，从而产生了各种混合学习方法。

(三) 自适应神经网络模糊推理系统

自适应网络是指所有具有监督学习能力的神经网络算法的扩展。 自适应网络是所有输入-输出行为可由一组可修改的参数决定的网络结构。

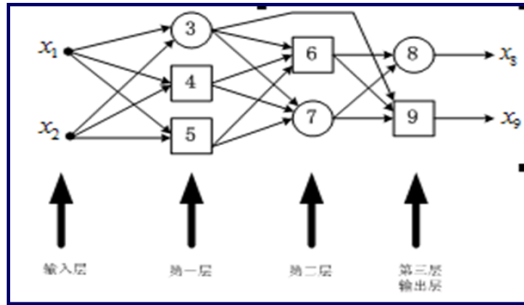


图5-1 前馈传播自适应网络的层表示

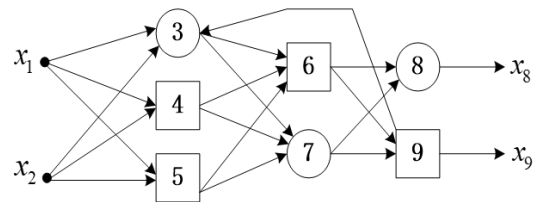
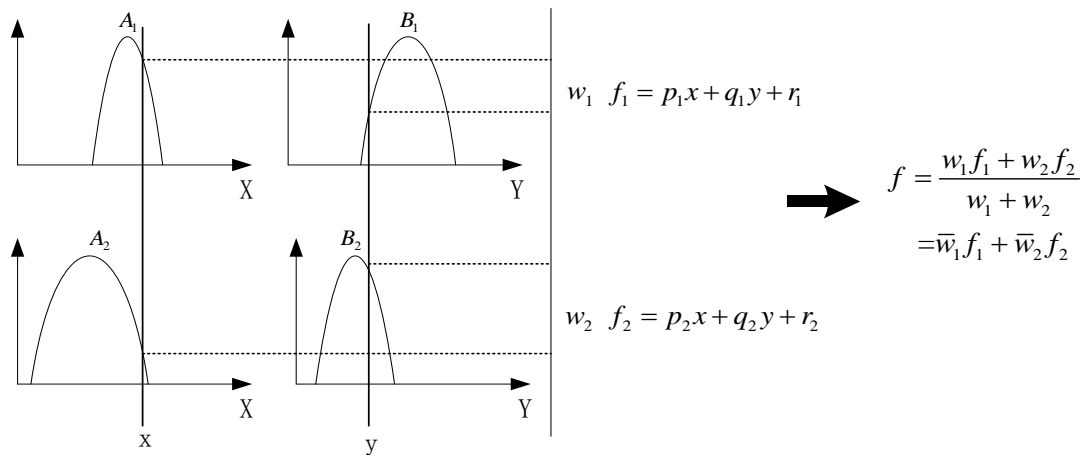


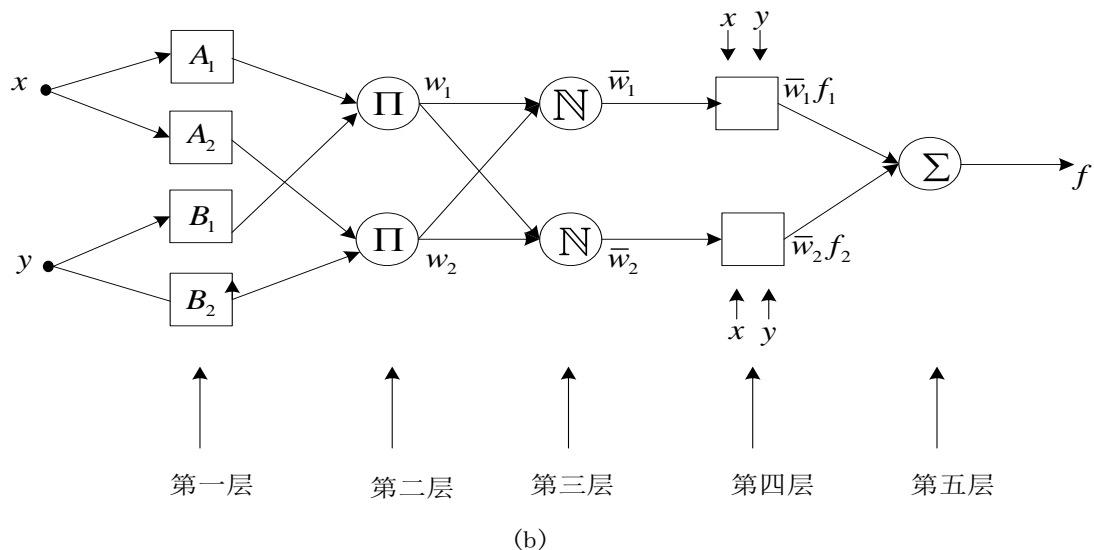
图5-2 递推自适应网络

自适应神经-模糊推理系统 ANFIS:



(a)两输入的一阶 T-S 型模糊模型

图 5-8 一阶 T-S 型模糊模型



(b) 等效的 ANFIS

图 5-8 一阶 T-S 型模糊模型等效的 ANFIS 网络结构

第 1 层:

$$O_{1,i} = \mu_{A_i}(x), i = 1,2 \text{ 或者 } O_{1,i} = \mu_{B_{i-2}}(y), i = 3,4$$

x (y) 是节点的输入; A_i (或 B_{i-2}) 是与这个节点相关的模糊集合。换句话说, 这层的输出是条件部分的隶属度 A_i 和 B_i 的隶属函数。

第 2 层:

这层的节点是标示为 Π 的固定节点。在这层, 输出节点是输入信号隶属函数的乘积

$$O_{2,i} = w_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(y), i = 1,2.$$

每个节点的输出代表规则的激活强度。

第 3 层: 这层的第 i 个节点计算第 i 条规则激活强度与所有规则激活强度的比值

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad i = 1,2$$

为了简便, 这层的输出就称为归一化的激活强度。第 4 层:

$$O_{4,i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i)$$

式中 \bar{w}_i 第 3 层的输出; $\{p_i, q_i, r_i\}$ 是参数集合。这层的参数称为结论参数。

第 5 层: 这层的节点是标示为 Σ 的固定节点, 计算出总的输出作为所有输入信号的总和:

$$O_{5,1} = \text{总的输出} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i}$$

这样就构造了一个自适应网络, 正好和 T-S 型模糊模型具有相同函数。注意这种自适应网络的结构并不是唯一的, 可以很容易地把第 3 层和第 4 层合并起来, 从而获得一个只有 4 层的等价网络。同样, 权值归一化可在最后一层完成。

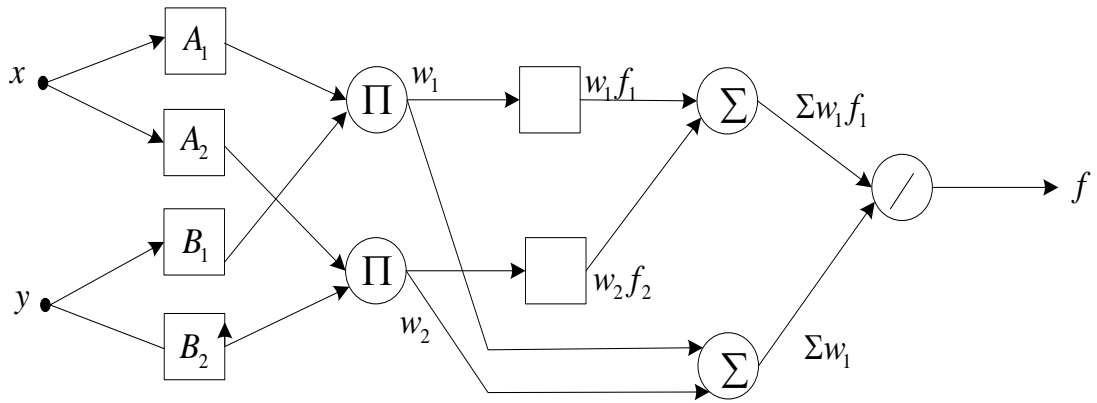


图 5-9 与两输入、两规则的 T-S 型模糊模型等效的 ANFIS

(四) 基于 T-S 模糊模型的递归神经网络

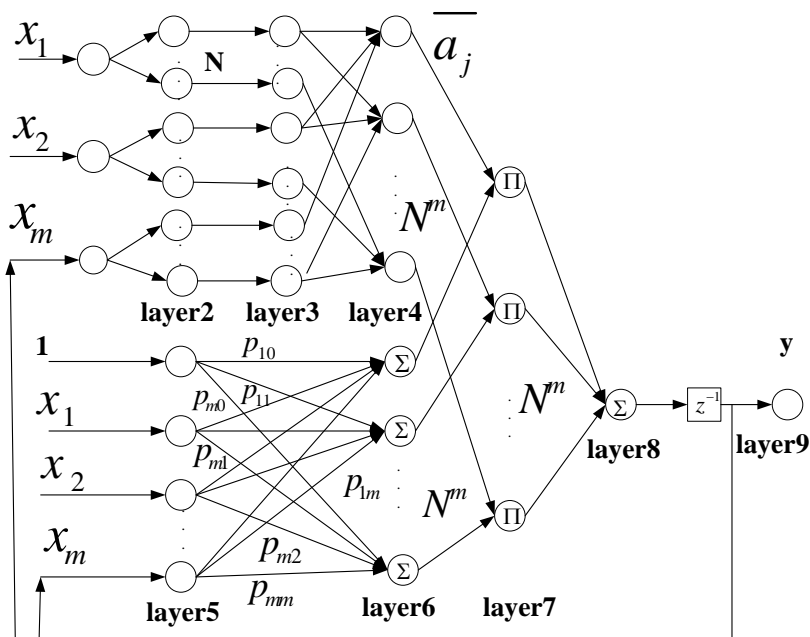


图 7-23 T-S 模糊神经网络模型

将基于 T-S 模糊模型的递归神经网络应用于系统的动态辨识要完成两部分工作：系统的结构辨识和参数辨识。为此我们采用了以下两种方法：

基于模糊聚类的结构辨识方法[前件参数（高斯函数的中心和宽度）]

基于动态反向传播算法的参数辨识算法。

实例 5.1 非线性函数 $y = e^{x_1} + x_2^2$

假设我们所要辨识的对象是一个具有 $y = e^{x_1} + x_2^2$ 特性的非线性系统。用 100 组随机产生的训练样本数据对网络训练，然后用测试样本数据进行测试。首先通过无监督聚类算法对训练样本聚类，得到输入数据隶属函数（高斯函数）中心分别为 0.26038、0.43488 和 0.19738、0.22079，输出数据的隶属函数中心为

1.3579、1.6178，高斯函数宽度全为 0.2，学习率取 0.01，训练次数是 30000。

结果如图 5-21 所示，最后用训练好的网络对测试数据进行测试，结果如图 5-22 所示。

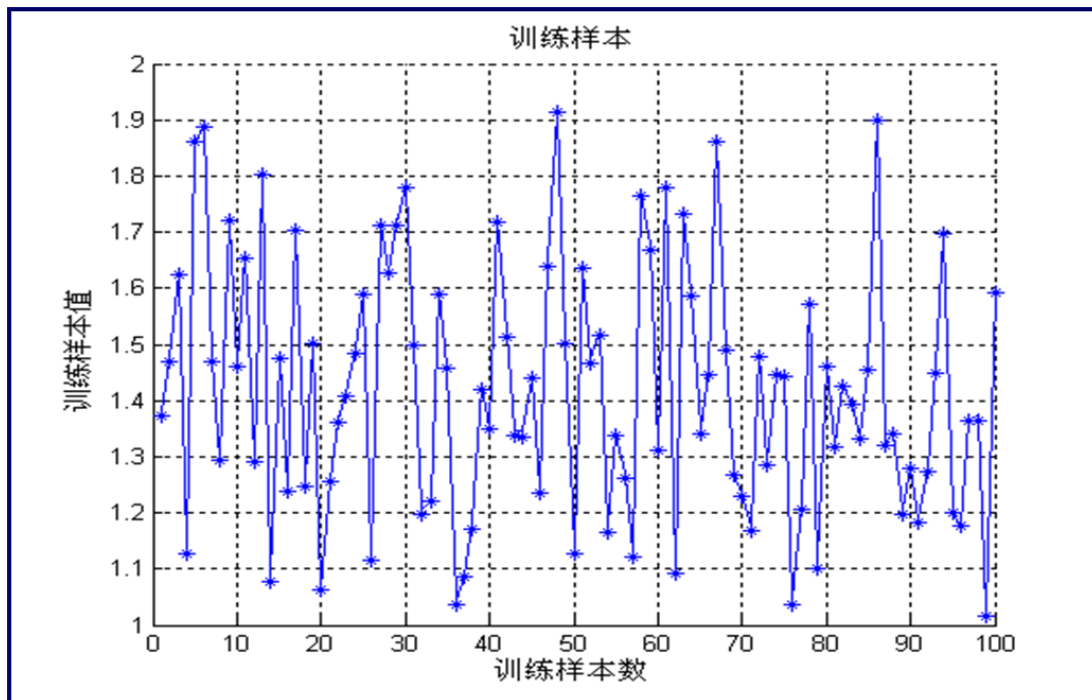


图 5-21 TSRFNN 训练样本结果

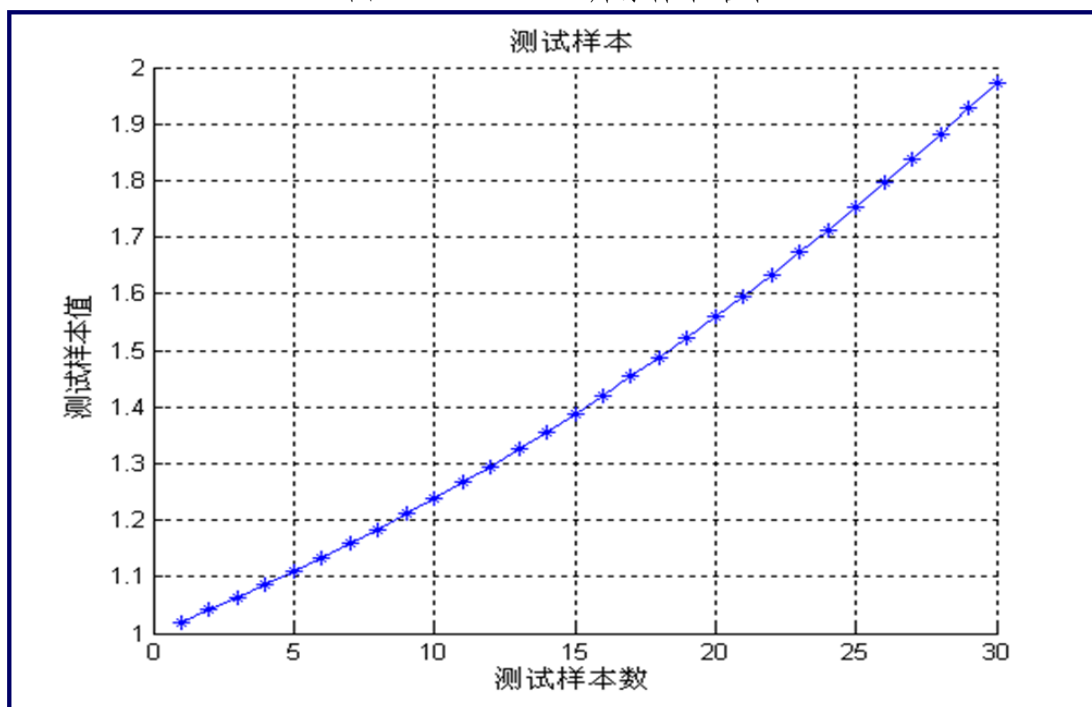


图 5-22 测试样本的结果

注：连线的为实际输出，*为网络输出

实例 5. 2

采用著名的 Mackey - Glass 混沌时间序列的离散模型进行辨识仿真。对象特性描述为

$$\dot{x} = \frac{0.2 * x(t - \tau)}{1 + x^{10}(t - \tau)} - 0.1 * x(t)$$

我们采用四阶 Runge - Kutta 法产生 Mackey - Glass 混沌时间序列。这是一个时间序列预测问题，即用已知时刻 t 以前的值预测将来某一时刻 $(t + p)$ 的值。这种预测模型的标准数学模型就是实现从已知时刻值 $x(t - (D - 1)\Delta), \dots, x(t - \Delta), x(t)$ 到未知时刻值 $x(t + p)$ 的映射。

选择 $D = 4, \Delta = P = 6$ ，我们可以得到如下模型：

$$x(t + 6) = f(x(t), x(t - 6), x(t - 12), x(t - 18))$$

则网络的输入数据矢量为：

$$w(t) = [x(t)x(t - 6)x(t - 12)x(t - 18)]$$

网络输出数据矢量为： $s(t) = x(t + 6)$

本文选择时间范围为 118 到 1117 的数据。用前 500 组输入输出数据作为网络的训练数据对，后 500 组数据作为网络的测试数据对。首先通过无监督聚类算法对训练样本聚类，得到输入数据隶属函数（高斯函数）中心为

0.5202、0.6902、0.7791、0.9830、1.1400，高斯函数宽度为 0.01。最后，用网络对该模型进行仿真，结果如图 5-23 所示。

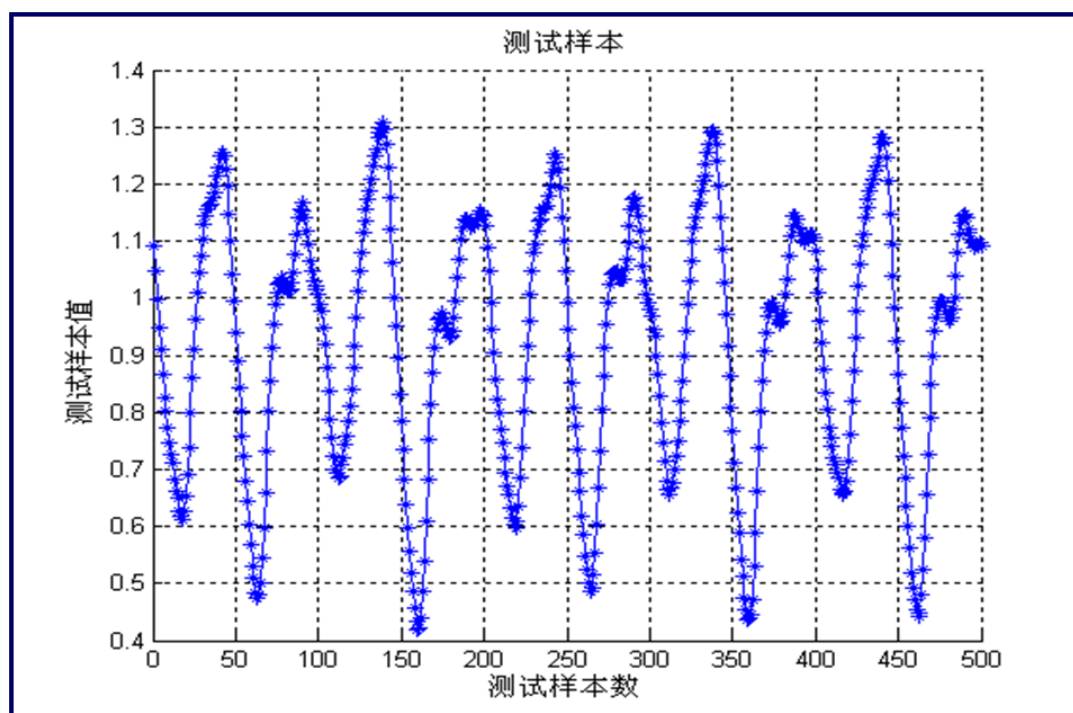


图 5-23 测试样本训练结果

第六章 专家系统（8 学时）

素质（思政）内容与要求：

讲专家系统原理时，提费根鲍姆研发首个专家系统的开拓精神，培学生创新意识；结合我国用其优化农业病虫害诊断、电网故障排查的案例，显技术自主实力，激民族自信；讨论系统决策公平性，引导学生守科技伦理，树用技术服务民生的责任感。

教学内容：

1. 专家系统概述；
2. 专家控制系统；
3. 神经网络专家系统。

教学目标：

1. 理解专家系统定义；
2. 能区分规则式、框架式等常见知识表示方法。

教学重点：

1. 专家系统的概念、专家系统的基本组成和专家系统设计的基本步骤。；
2. 专家控制系统的结构、工作原理和专家控制器的设计。

教学难点：

专家控制系统的设计。

教学方法和手段：

课堂教学为主，结合课堂练习和小节提问。

教学过程：

（一）专家控制系统的概念

所谓专家系统系统，就是一个（或一组）能在某种特殊领域内，以人类专家的水平去解决该领域中困难问题的计算机程序。包含两个含义：

1. 专家系统的强大功能来源于大量的专家知识，这些知识能够帮助我们从许多不相关的信息中发现本质，把遇到的复杂问题归结为具有一定逻辑的问题类型；
2. 专家系统主要研究如何运用专家知识解决专门问题而建立人机系统的方法和技术，也就是应用人工智能技术和计算机技术，基于专家知识进行推理和判断，模拟人类专家决策。

专家系统是一个计算机程序，但是它是不同于传统程序系统。主要区别体现在：

1. 专家系统具有良好的人机交互能力和解释机构，能够对求解的问题给出专家水平的建议或决策，并做出合理的推理解释。
2. 专家系统是由存放符号表示专家知识的知识库和能运用知识进行推理的推理机组成，设计方法简单表述为：

专家系统 = 知识 + 推理

3. 专家系统是描述式的，它可以将事实与规则分开，并且可以具备学习能

力不断补充规则和事实，使推理时的匹配过程不断完善，极大地增强了系统的灵活性。

4. 专家系统则体现计算机由一般数值信息处理向模糊和不确定性知识信息处理的智能化方向发展，开创了计算机求解非数值问题和知识处理的新途径。
5. 专家系统会通过知识库进行推理，给出解释性的建议或可接受的解。

(二) 专家系统的结构与建立步骤

专家系统的结构是指专家系统各组成部分的构造方法和组织形式。在设计专家系统时要根据系统的基本功能和应用环境等特点来选择确定其基本结构，选择恰当的系统结构对专家系统的适用性和有效性起着决定性的作用。

专家系统一般由知识库及其管理系统、推理机、综合数据库、知识获取机制、解释机构和人机接口六部分组成。

知识获取机制的建立，实质上是设计一组程序，把知识送入到知识库，负责维护知识的正确性、一致性和完整性。“知识获取”被公认为建造专家系统的关键和瓶颈之一。

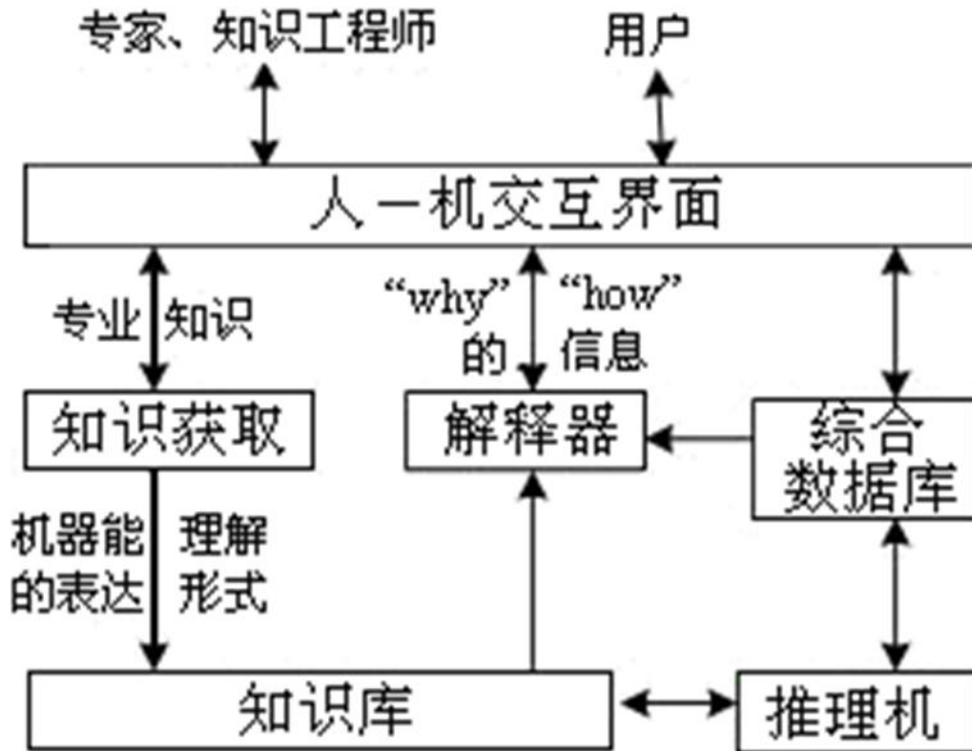


图 6-1 专家系统的一般结构图

专家系统的分类：

解释型：用于分析符号数据，进而阐明这些数据的实际意义；
预测型：根据对象的过去和现在情况来推断对象的未来演变结果；
诊断型：根据输入信息来找出对象的故障和缺陷；
调试型：给出已确定的故障的排除方案；
维修型：指定并实施纠正某类故障的规划；
规划型：根据给定目标拟订行动计划；
设计型：根据给定要求形成所需方案和图样；

监测型：完成实时监测任务；
控制型：完成实时控制任务；
教育型：诊断型和调试型的组合，用于教学和培训；

建造一个专家系统大致需要确认、概念化、形式化、实现、测试五个步骤，如图 8-2 所示。从各种知识源获取知识是建造专家系统的关键环节。

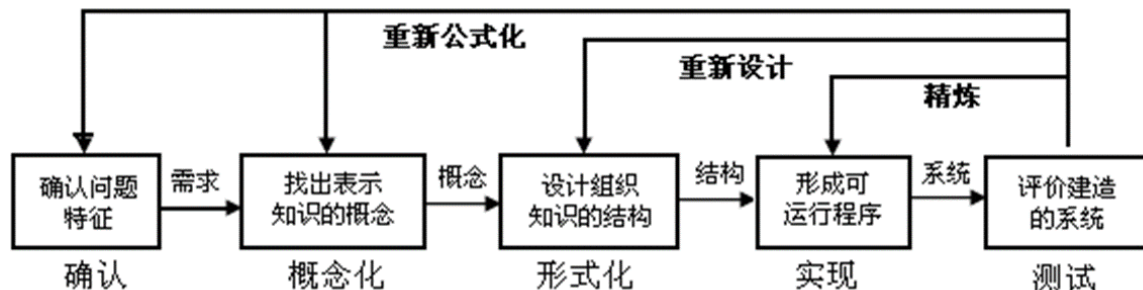


图 6-2 建立专家系统步骤

1. 确认过程中：

知识工程师与专家一起工作
 确认问题领域并定义其范围
 确定参加系统开发的人员
 决定需要的资源（时间、资金、进度、软硬件环境、计算工具等）
 决定专家系统的目标和任务
 提出对系统功能、性能的要求
 确定具有典型意义的子问题
 集中解决知识获取过程中的问题。

2. 概念化过程中：

知识工程师与专家密切配合，深入了解给定领域中问题求解过程需要的关键概念，关系和信息流的特点，并加以详细说明，若能用图形描述这些概念和关系，使之成为建造系统的永久性概念库将是非常有用的。

3. 形式化过程中：

根据在概念化期间分离的重要概念、子问题及信息流特性，选择适当的知识工程工具，把它们映射为以该知识工程工具或语言表示的标准形式。

4. 实现过程中

把前一阶段形式化的知识映射到与该问题选择的工具相联系的表达格式中。

5. 测试过程中

主要是评价原型系统的性能和实现它的表示形式。

（三）专家控制系统

专家控制是指将人工智能领域的专家系统理论、技术与控制理论方法、技术相结合，仿效专家的智能，实现对较为复杂问题的控制。基于专家控制原理所设计的系统称为专家控制系统。

专家控制系统把
 操作者、工程师和领域专家的经验知识与控制算法相结合
 知识模型与数学模型相结合
 符号推理与数值运算相结合
 知识信息处理技术与控制技术相结合

专家控制系统的提出:

1983年,著名自动控制理论专家、瑞典学者 K.J.Astrom 明确提出将专家系统技术引入自动控制领域。

1984年,在布达佩斯召开的 IFAC 第9届大会上, J.Zaborszky 提出了系统科学的一般结构,其系统的功能和构成实际上主要是专家系统。

1986年, K.J.Astrom 发表论文正式提出了专家控制系统的理论。

1987年, IFAC 第10届大会发表了49篇有关专家系统用于控制问题的研究论文,而且设专门会议讨论有关问题。

专家控制系统应该具有如下特点:

- (1) 在线控制的实时性;
- (2) 现场运行的高可靠性和连续性;
- (3) 控制的灵活性与应用的通用性;
- (4) 优良的控制性能与自学习能力;
- (5) 维护的方便性;

一般的专家控制系统有:

知识基系统、数值算法库和人-机接口三个并发运行的子过程。

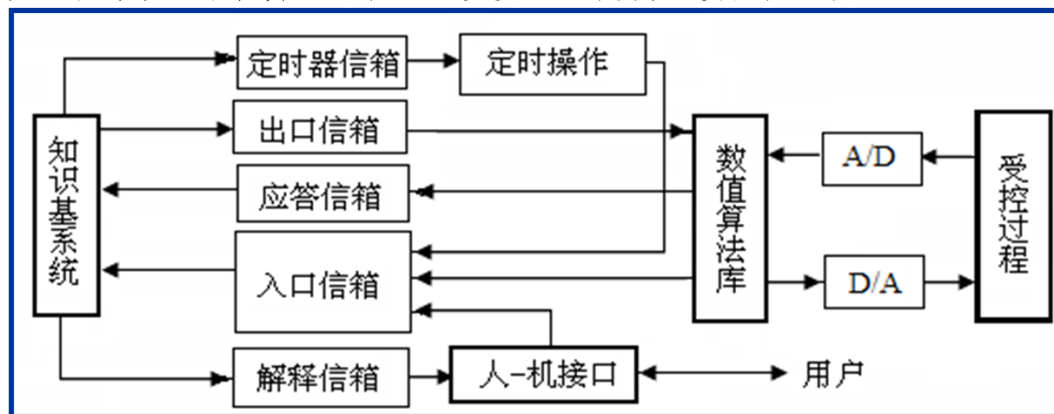


图 6-3 专家控制系统的基本结构图

1. 数值算法库: 数值算法库包含的是定量的知识,即各种有关的解析控制算法,一般都独立编码,按常规的程序设计方法组织,进行快速、精确的数值计算,算法编程直接作用于受控过程,拥有最高的优先权。
2. 知识基子系统: 位于系统上层,对数值算法进行决策、协调和组织;针对当前的问题信息,识别和选取对解决当前问题有用的定性的启发式知识进行符号推理;通过数值算法库与受控过程间接相连。
3. 人机接口子过程: 人机接口子过程包括两类命令,一类是面向数值算法库的命令,如改变算法参数或改变操作方式等;另一部分是运行时的用户接口,

用户通过人一机接口可以直接地与知识基系统交互，包含更新知识库的规则，编辑、修改和跟踪规则的执行，以便操作人员对于控制系统进行离线的修改或在线的监控、干预。

(四) PID 专家控制器应用实例

我们以某钢厂加热炉为例，设计一种 PID 专家控制器控制加热炉的炉温。

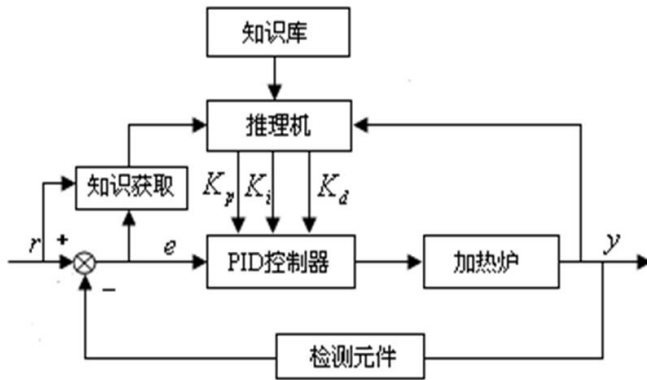


图6-9 加热炉PID控制系统结构图

设计要求：

加热炉一般具有大惯性、滞后性及严重的时变性和非线性特性，要求通过设计适当的 PID 控制器，能够快速准确地控制其炉温，实现降低能源消耗，提高加热质量，从而进一步提高整个生产过程的经济效益。

常规 PID 控制算法的原理可以表示为：

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt}$$

PID 控制算法的数字表达式为：

$$\Delta u_i = K_p \Delta e_i + K_I e_i + K_D (\Delta e_i - \Delta e_{i-1})$$

K_p, K_I, K_D 为控制器的比例系数、积分系数和微分系数，可以根据过程的动态特性进行整定。

根据影响加热炉炉温的若干个因素，如当前采样时刻炉温给定值、温度偏差和温度偏差变化率来分析和总结专家规则如下：

专家规则 1：给定温度值对 PID 控制参数的修正系数

根据实际生产工况调整在不同给定温度下的 PID 参数，通常一组 PID 参数只适用于一定的给定温度。

	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300
	0.61	0.65	0.69	0.72	0.75	0.79	0.82	0.87	0.92	1.00

表 6-2 给定输入 R_i 对 PID 控制参数的修正系数 K_{Ri}

专家规则 2: 温度偏差 e_i 对 PID 控制参数的修正系数 K_{ei}

根据控制精度的要求, 控制器把温度误差分成三个区域:

<p>$\pm 10^\circ\text{C}$ 理想区域</p> <p>该区域以稳定运行为主, 可减少调节阀动作, 修正系数较小。</p>	<p>$\pm 10^\circ\text{C} \sim \pm 20^\circ\text{C}$ 加大调节力度区域</p> <p>增大修正系数, 根据 PID 参数影响规律, 尤其加大加快系统的响应速度, 使误差不进入第三区域。</p>	<p>($\pm 20^\circ\text{C} \sim \pm 30^\circ\text{C}$ 误差过大区域)</p> <p>为了不出现过度调节而产生较大振荡, 所以要降低修正系数。</p>
------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------

表 6-3 温度偏差 e_i 对 PID 控制参数的修正系数 K_{ei}

$ e_i $	0°C	2°C	4°C	6°C	8°C	10°C	12°C	14°C
K_{pei}	0.65	0.7	0.75	0.8	0.85	1.0	1.25	1.5
K_{lei}	0	0	0	0.75	0.8	1.0	1.1	1.1
K_{Dei}	0.75	0.8	0.85	0.9	0.95	1.0	1.25	1.25
$ e_i $	16°C	18°C	20°C	22°C	24°C	26°C	28°C	30°C
K_{pei}	1.5	1.25	1.0	0.85	0.8	0.75	0.7	0.6
K_{lei}	0.9	0.85	0.75	0.7	0.6	0.55	0.5	0.4
K_{Dei}	1.0	1.0	0.9	0.9	0.85	0.8	0.75	0.7

专家规则 3: 温度变化率 Δe_i 对 PID 控制参数的修正系数 $K\Delta_{ei}$

表 6-4 温度变化率 Δe_i 对 PID 控制参数的修正系数 $K\Delta_{ei}$

$ \Delta e_i $	0°C	2°C	4°C	6°C	8°C
$K\Delta_{ei}$	1.15	1.00	0.85	0.7	0.6

$|\Delta e_i|$ 为一个采样周期内温度的变化率, 若大于一定值就会出现振荡或烧嘴堵塞的不正常现象, 应降低修正系数, 不变则不易起到抑制振荡的作用, 增加则会引引起更大的振荡。

专家规则 4: 控制值 u_i 的限幅。

如果 PID 控制量是燃料流量值, 则应根据加热炉的特性进行限幅, 最大、

最小值可以根据经验输入计算机，也可以由计算机自动整定。最大值不能超过加热炉的热负荷，最小值是随温度偏差而变化的，即根据温度偏差要乘以相应的修正系数。

表 6-5 温度偏差 e_i 对控制量 u_i 最小值的修正系数 K_{ui}

e_i	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
K_{ui}	1.0	0.95	0.9	0.85	0.8	0.75	0.7	0.65	0.6	0.55	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4
$-e_i$	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
K_{ui}	1.0	1.0	1.05	1.1	1.15	1.2	1.25	1.3	1.35	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.5

(五) 神经网络与专家系统的集成

神经网络专家系统有效地解决了专家系统实现过程中遇到的难点，具有如下优点。

1. 具有并行结构和并行分布处理方式
2. 高度的鲁棒性和容错能力
3. 具有自适应性和自组织性
4. 具有很强的自学习能力
5. 便于硬件实现

如果利用神经网络的大量神经元的相互连接即各连接权值或阈值的分布来表征特定问题领域的概念和知识来建立知识库，就需要确定神经网络的拓扑结构。包括确定神经网络的层数、输入神经元、隐含层神经元和输出层神经元的个数，以及各神经元的连接权值和阈值。知识库的建立实际上就是神经网络的学习过程，包括知识的获取和存储两个过程。

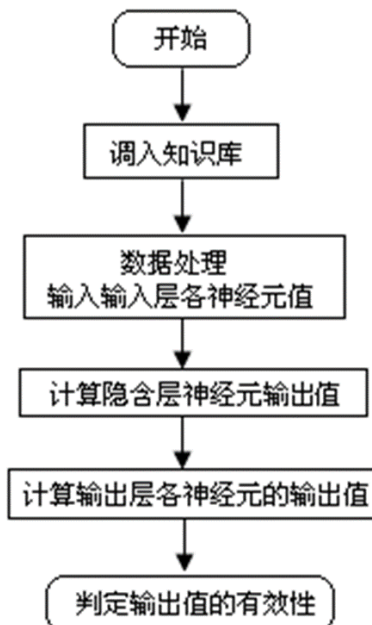


图 6-11 正向推理流程图

推理机是用于记忆所采用的规则和控制策略的程序，完成依据一定的知识规则从已有的事实推出结论的近似专家的思维过程，实现问题求解。神经网络专家系统的知识推理具有三种推理机制：正向推理、反向推理和混合推理。

基于神经网络专家系统的火电厂锅炉在线故障诊断：

1. 故障诊断系统的组成与诊断原理

针对火电厂锅炉热工生产过程高度复杂，多测点、多故障和同时性诊断等特点，采用多个子网络结构并联，并与专家系统结合，设计基于神经网络的锅炉生产过程故障诊断专家系统。

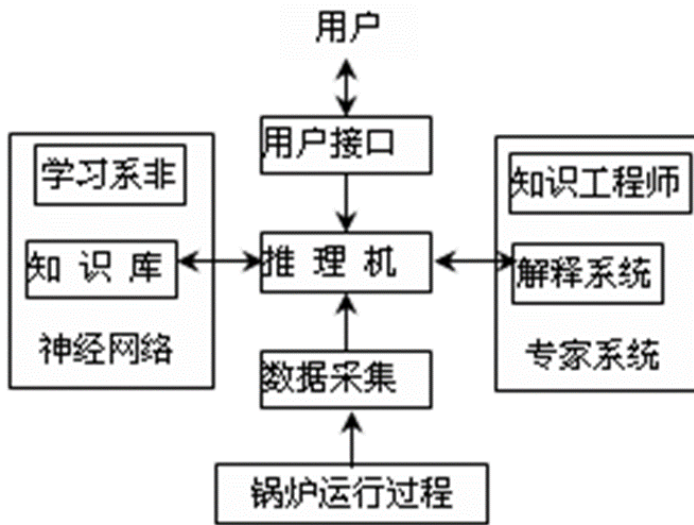


图 6-12 锅炉故障诊断系统结构图

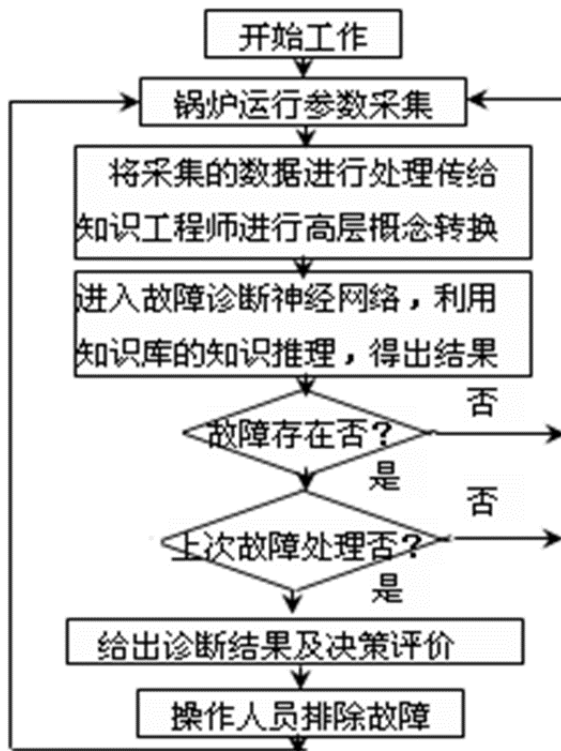


图 6-13 故障诊断流程图

2. 锅炉机组故障机理与故障征兆分类

根据工程师和操作人员的专家知识，归纳锅炉常见的 20 种系统级故障，用产生式规则表示。

IF (PR1, PR2, ..., PRM) THEN (Conclusion)

例如：锅炉满水故障，归纳知识库规则如下：

规则: IF 汽包水位超过+75mm AND 过热蒸汽温度下降 AND 给水量不正常的大于蒸汽流量。 THEN 报警：锅炉满水。

3. 基于神经网络专家系统锅炉机组故障诊断

每种故障彼此独立，可用独立的子网络并联构成神经网络故障诊断系统。

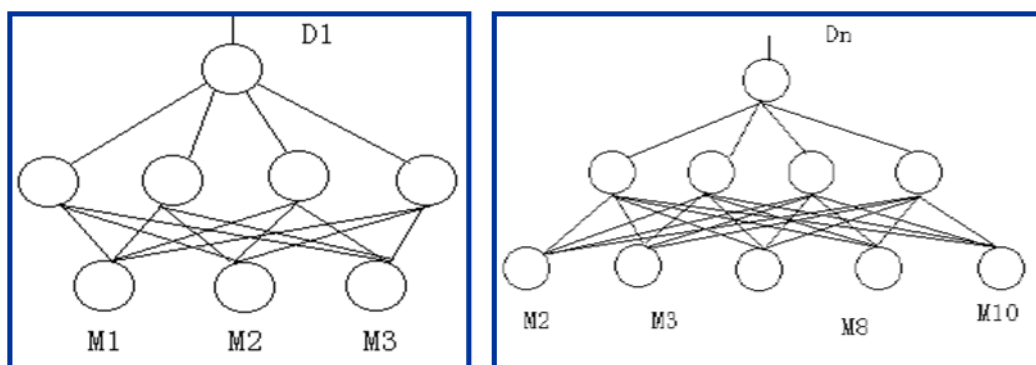


图 6-14 子网络并联映射结构图

4. 水冷壁管损坏故障诊断结果

参数名称	t = 1	t = 2	t = 3	t = 4	t = 5*	t = 6	t = 7	t = 8	t = 9	t = 10
汽包水位 mm	2	- 6	- 15	- 27	- 40	- 56	- 63	- 70	- 72	- 77
给水流量 t /h	210	212	212	216	217	218	222	221	226	228
蒸汽流量 t /h	200	202	202	196	190	192	188	186	186	188

蒸汽压力 Mpa	9.72	9.72	9.71	9.71	9.70	9.68	9.67	9.67	9.66	9.66
水门前压 Mpa	12.5	12.5	12.4	12.4	12.2	12.2	12.0	12.0	11.8	11.8
水门后压 Mpa	11.0	11.0	11.1	11.2	11.2	11.4	11.5	11.5	11.6	11.6
东排烟温 c	145	146	145	144	144	144	143	142	142	142
西排烟温 c	145	145	146	144	144	144	143	143	142	142
炉膛负压 Pa	20	20	16	13	8	3	-1	-5	-7	-10
网络输出 Y_6	0.007	0.008	0.008	0.007	0.714	0.823	0.853	0.984	0.984	0.986

第七章 其他智能控制（12学时）

素质（思政）内容与要求：

讲遗传算法，提霍兰提出时的仿生创新思维，结合我国用其优化物流调度显技术实力；谈 DNA 计算，借阿德曼实验的突破精神，引学生探索跨界；说粒子群算法，结合其在我国电网优化的应用，激民族自信，同时强调算法伦理，树服务社会责任感。

教学内容:

1. 遗传算法;
2. DNA 计算;
3. 粒子群算法。

教学目标:

1. 理解遗传算法原理;
2. 知晓 DNA 计算的生物基础, 了解其在复杂问题求解中的优势;
3. 掌握粒子群算法的粒子更新规则, 清楚群体智能的协同优化逻辑。

教学重点:

1. 遗传算法的基本操作过程以及与其它智能控制技术的融合;
2. DNA 计算的原理;
3. 粒子群算法的计算模型, 以及粒子群优化参数设置方法。

教学难点:

1. 遗传算法的交叉和变异机制的实现;
2. DNA 计算如何与其它软计算方法有效结合, 从而拓宽软计算的应用范畴;
3. 基于粒子群的 PID 控制系统参数优化设计。

教学方法和手段:

课堂教学为主, 结合课堂练习和小节提问。

教学过程:

(一) 遗传算法

遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 是基于 Darwin 进化论和 Mendal 遗传学说的一种优化搜索方法, 是一种实用、高效、鲁棒性强的优化技术, 具有全局收敛性和并行性的特点。其适用性广、仅需要较少的先验知识、可扩展。

遗传算法经历了兴起、发展、低迷和重新繁荣等阶段, 取得了一些具有代表性的研究成果。

1. 20 世纪 60 年代中期, 美国密歇根大学教授 Holland 开始研究自然和人工系统的自适应行为和编码技术;
2. 1967 年, Holland 教授的学社 Bagley 首次提出“遗传算法(Genetic Algorithms)”一词。开创性地采用双倍体编码, 发展了复制、交叉、变异、显性和倒位等基因操作。
3. 1975 年, Holland 出版了著名的“Adaptation in Natural and Artificial Systems”, 标志遗传算法的诞生。Holland 提出了“模式定理”, 奠定了遗传算法研究的理论基础。
4. 1985 年, 在美国召开了第一届遗传算法国际会议, 成立了国际遗传算法学会。
5. 1989 年, Goldberg 出版了“Genetic Algorithms in Search, Optimization, and

Machine Learning”，对遗传算法及其应用作了全面而系统的论述。

遗传学术语、名词

染色体：遗传物质的载体

脱氧核糖核酸（DNA）：是生物细胞内携带有合成 RNA 和蛋白质所必需的遗传信息的一种核酸，是生物体发育和正常运作必不可少的生物大分子，具有双螺旋结构。

基因（gene）：DNA 长链结构中占有一定位置的基本遗传单位。

个体（individual）：带有染色体特征的实体。

种群（population）：个体的集合。

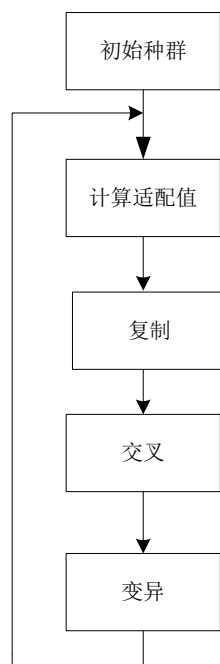
适应度（fitness）：度量某个物种对于生存环境的适应程度。

复制（reproduction）：细胞在分裂时，DNA 通过复制转移到新产生的细胞中的过程。

交叉（crossover）：在两个染色体的某一相同位置处 DNA 被切断，其前后两串分别交叉组合形成两个新的染色体的过程。

变异（mutation）：在细胞进行复制时以很小的概率产生某些复制差错，从而使 DNA 发生某种变异，产生出新的染色体。

GA 的基本思想：



- (1) 产生一个种群
- (2) 根据问题的目标函数构造适应值函数
- (3) 根据适应值函数的好坏，进行遗传操作，不断繁殖后代
- (4) 若干代后得到适应值最大的个体即最优解

GA 的基本操作：

1. 解空间与染色体编码：

解空间：一个问题的解空间是它的所有可能的解构成的集合。

编码：把一个问题的解从其解空间转换到遗传算法能够处理的搜索空间的转换方法。

编码是应用遗传算法时要解决的首要问题。编码方法决定了个体的染色体排列形式，编码方法也影响到交叉算子、变异算子等遗传算子的运算方法。常用的编码方法有：二进制编码方法和浮点数编码方法。

(1) 二进制编码方法

二进制编码方法是由二进制符号 0 和 1 所组成的二值符号集{0,1}，它所构成的个体基因型是一个二进制编码符号串。二进制编码符号串的长度与问题所要求的求解精度有关。

二进制编码方法的优点：

- 1) 编码、解码操作简单易行。
- 2) 交叉、变异等遗传操作便于实现。
- 3) 符合最小字符集编码原则。
- 4) 便于利用模式定理对算法进行理论分析。

二进制编码方法的缺点：

- 1) 存在海明悬崖现象，妨碍了在连续搜索空间的局部搜索；
- 2) 最优解不能达到任意的精度；
- 3) 不便于反映所求问题的特定知识，不便于开发针对问题专门知识的遗传运算算子，不便于处理复杂的约束条件。

(2) 浮点数编码方法

浮点数编码方法，是指个体的每个基因值用某一范围内的一个浮点数来表示，个体的编码长度等于其决策变量的个数。由于这种编码方法使用的是决策变量的真实值，所以浮点数编码方法也称为真值编码方法（或实参编码方法）。

注意事项

- 1) 编码时必须保证基因值在给定的区间限制范围内；
- 2) 遗传算法中所使用的交叉、变异等遗传算子也必须保证其运算结果在给定的区间限制范围内；
- 3) 当用多个字节表示一个基因值时，交叉运算必须在两个基因的分界字节处进行，而不能在某个基因的中间字节分隔处进行。

浮点编码方法的优点：

- 1) 适合于在遗传算法中表示范围较大的数；
- 2) 适合于精度要求较高的遗传算法；
- 3) 便于较大空间的遗传搜索；
- 4) 改善了遗传算法的计算复杂性，提高了运算效率；
- 5) 便于遗传算法与经典优化方法的混合使用；
- 6) 便于设计针对问题的专门知识的知识型遗传算子；
- 7) 便于处理复杂的决策变量约束条件。

2. 种群构建

种群是若干个体组成的群体，一般是整个搜索空间的一个很小的子集，是一组字符串结构。种群大小依赖于计算机的计算能力和计算复杂度，通常设为常数。

初始种群的两种方法：

- 1) 完全随机的方法产生。如抛硬币的方法或产生随机数的方法。
- 2) 先验知识启发的方法，可首先将这些先验知识转变为必须满足的一组要求，然后在满足这些要求的解中再随机地选取样本。

(二) 遗传算法的应用

遗传算法已被广泛地应用于解决组合优化、机器学习、图像处理、模式识别、信号处理、自适应控制和人工生命等领域的实际问题。遗传算法具有可扩展性，便于与模糊逻辑、神经网络和专家系统结合，从而为智能控制的研究注入新的活力。

例

需要求解的优化问题为寻找 $f(x) = x^2$ 在 $0 \sim 31$ 之间取整数值时函数的最大值。

1. 解空间编码

- 1) 根据具体问题确定待寻优的参数；
- 2) 对每一个参数确定它的变化范围，并用一个二进制数来表示。例如若参数 a 的

变化范围为 $[a_{\min}, a_{\max}]$ ，则用 m 位二进制数 b 来表示，则二者之间满足

$$a = a_{\min} + \frac{b}{2^m - 1} (a_{\max} - a_{\min})$$

- 3) 将所有表示参数的二进制数串接起来组成一个长的二进制字串，形成一个个体。

将 x 编码为有限长度的串，根据优化问题中自变量的定义域，采用二进制数编码，用 5 位数来表示，则：

00000 对应于 0，11111 对应于 31。

2. 种群生成

设种群大小为 4，即含有 4 个个体，按位随机生成 4 个 5 位二进制串。

位串 1 01101 位串 2 11000
位串 3 01000 位串 4 10011

3. 适应度函数选择与计算

由于目标函数为最大化问题，取原函数 $f(x)$ 为适应度函数。

即：

$$\text{Fit}(f(x)) = f(x) = x^2$$

则

$$\text{Fit}(\text{个体 1}) = 169 \quad \text{Fit}(\text{个体 2}) = 576$$

$$\text{Fit}(\text{个体 3}) = 64 \quad \text{Fit}(\text{个体 4}) = 361$$

4. 复制

采用轮盘赌策略进行复制

表 7-1 种群的初始位串及对应的适配值

编号	位串 (x)	适配值 $f(x)$	占整体的百分数
1	01101	169	14.4%
2	11000	576	49.2%
3	01000	64	5.5%
4	10011	361	30.9%
总计 (初始种群整体)			

表 7-2 复制操作之后的各项数据

串号	随机产生的初始种群	x 值	$f(x) = x^2$	选择复制的概率 $f_i / \sum f_i$	期望的复制数 f_i / \bar{f}_i	实际得到的复制数
1	01101	13	169	0.14	0.58	1
2	11000	24	576	0.49	1.97	2
3	01000	8	64	0.06	0.22	0
4	10011	19	361	0.31	1.23	1
总计			1170	1.00	4.00	4
平均			293	0.25	1.00	1
最大值			576	0.49	1.97	2

5. 交叉

设位串的字符长度为 l ，随机地从在 $[1, l-1]$ 选取一个整数位置值 k ，则从

两个配对位串中从位置 k 到串末尾的子串相互交换，从而生成两个新的位串。

本题中 $l = 5$ ，随机选择 $k = 4$ 。

$$A_1 = 0110110 | 1$$

$$A_2 = 1100 \left| \begin{array}{cccc} 1 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right. \square \begin{array}{l} A'_1 = 01110 \\ A'_2 = 11100 \end{array}$$

表 7-3 交叉操作后的各项数据

新串号	复制后的匹配池 (" " 为交叉点)	配对对象 (随机选择)	交叉点 (随机选择)	新群体	x 值	$f(x) = x^2$
1	0110 1	2	4	01100	12	144
2	1100 0	1	4	11001	25	625
3	11 000	4	2	11011	27	729
4	10 011	3	2	10000	16	256
总计						1754
平均						439
最大值						729

6. 变异

变异在遗传算法中的作用是第二位的，但却是必不可少的。变异操作可以起到恢复位串字符位多样性的作用，并能适当地提高遗传算法的搜索效率。根据经验的研究，为了取得好的结果，变异的概率位每一个千位的传送中，只变异一位，即变异的概率为 0.001。

7. 结果

在经过大约 120 代的计算时， $f(x)$ 达到最大值 961。

(三) DNA 计算

DNA 计算是一种模拟生物分子 DNA 的结构并借助于分子生物技术进行计算的新方法，它开创了以化学反应作为计算工具的先例。DNA 分子生物算法具有高度并行性、运算速度快、贮存容量大、耗能少以及分子资源丰富等多种优点。1994 年，Adleman 在《Science》杂志上发表文章，提出了 DNA 计算的概念，成功解决了著名的 Hamilton 路径问题。

1995 年，Lipton 在《Science》杂志上发表文章，进一步论证了 DNA 计算可解决完全性问题。

从 1995 年起，每年一次 DNA 计算机国际会议。

1998 年，第一本 DNA 计算的专著已于问世。

1. DNA 计算原理

DNA 计算就是利用 DNA 的双螺旋结构和碱基互补配对原则对问题进行编码，把要运算的对象映射成 DNA 分子链，然后将携有编码信息的 DNA 链进行互补杂交，产生类似于某种数学过程的一种组合的结果，并根据限定条件对其进行筛选。



DNA 计算是建立在一系列连续的分子操作上的，分子生物操作具有多样性：切割、粘贴、分离、连接、插入和删除等。从理论上讲，合理的使用这些分子生物操作可以建立与图灵机一样强大的新的计算模型。

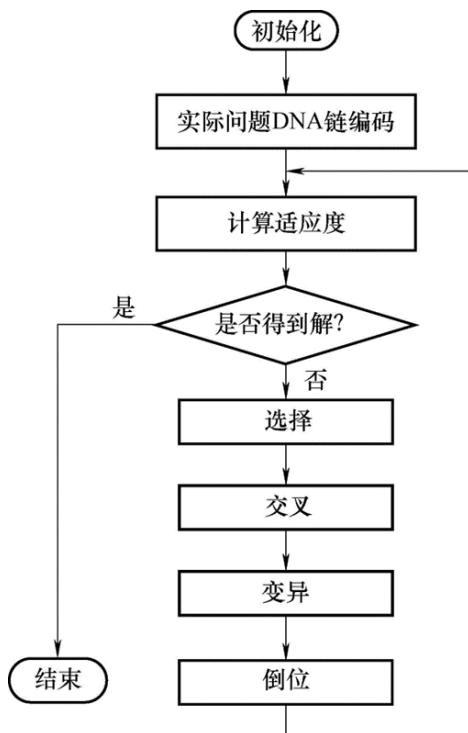
2.DNA 计算基本术语

- 1) DNA 链 (染色体): 遗传物质的主要载体，是多个遗传因子的集合，由 A、T、C、G 编码集合组成。
- 2) 遗传子座: DNA 链上遗传因子的位置，各个位置决定所遗传得信息。
- 3) 基因型: 遗传因子组合的模型，是性状 DNA 链的内部表现。
- 4) 表现型: 由 DNA 链决定性状的外部表现，或者说是根据基因型形成的个体。
- 5) DNA 汤 (群体): DNA 链带有特征的个体的集合，该集合内的 DNA 链的多少为 DNA 汤的大小。
- 6) 倒位: 在 DNA 链中两个随机选择位置之间的某些碱基的序列进行倒位。可以使在父代中离得很远的位在后代中靠在一起，相当于重新定义基因块。

3.DNA 计算的扩展

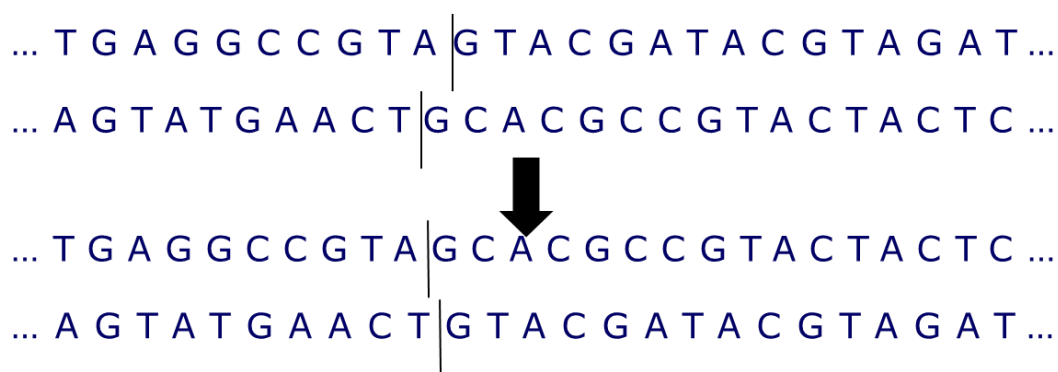
将 DNA 编码的信息模型与其他算法相结合，拓展了拓宽了 DNA 计算的应用范畴。主要有 DNA 计算与；遗传算法、模糊系统、神经网络的集成。

DNA-GA 的任务是从 DNA 汤出发，模拟进化过程，最后选择出优秀的群体和个体，满足求解问题的优化要求。



DNA-GA 的流程图

- 1) 初始化及 DNA 链编码: 使用 n 个具有任意 DNA 链的个体组成初始世代群体 (DNA 汤) $P(t)$ 。DNA 链的长短将直接影响问题求解的精度和收敛速度。
- 2) 适应度的评价: 按编码规则, 将 DNA 汤 $P(t)$ 中每一个 DNA 链的密码子转化成对应参数值用于求解问题, 并按某一标准计算其评价函数 $f(i)$ 。若其评价函数值高, 表示该 DNA 链有较高的适应度。(密码子与参数的翻译关系见课本表 7-7, 表 7-8, 及公式 (7-14))
- 3) 选择: 按一定的概率 P_s 从 DNA 汤 $P(t)$ 中选出 m 个 DNA 链个体, 作为双亲用于繁殖后代, 产生新的个体加入到下一代 DNA 汤 $P(t+1)$ 。DNA-GA 常见的选择实现方法适应度比例法、期望值法、排位次法、精华保存法。
- 4) 交叉: 交叉是对于选中的用于繁殖的每一对 DNA 链个体, 将其中部分内容进行互换。交叉位置随机产生, 通过交叉点产生新的 DNA 链, 基因得到了极大的改变。交叉有单点交叉和多点交叉等多种方式。



单点交叉操作实例

- 5) 变异: 以一定的概率 P_m 从 DNA 汤 $P(t+1)$ 中随机选择若干个 DNA 链个体, 对于选中的 DNA 链个体, 随机地选取某一位进行 DNA 链中碱基序列的变化。DNA 链中的变化有碱基的替换、丢失和嵌入。

碱基的取代有两种: 一种是同类型碱基转换变异, 嘌呤替代嘌呤或嘧啶替代嘧啶, 如 T 变为 C; 另一种是异类型碱基转换变异, 嘌呤被嘌呤或嘧啶替代, 如 T 变为 A 或 G, C 变为 G 或 A。



点变异 (T→A)

- 6) 倒位: 以一定的概率 P_i 从 DNA 汤 $P(t+1)$ 中随机选择若干个 DNA 链个体, 对于选中的 DNA 链个体, 随机地选取某两个位置, 将它们之间的碱基顺序进行倒位。倒位的目的是试图找到好的进化特性的基因顺序, 倒位操作是可选的。

第 i 个粒子搜索到的当前最优位置为： $\vec{p}_{i\text{best}}(t) = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$ 粒子群搜索到

的当前最优位置为： $\vec{p}_{g\text{best}}(t) = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD})$ 第 i 个粒子的位置和速度更新公式为：

$$\begin{aligned} v_{id}(t+1) &= v_{id}(t) + c_1 r_1 (p_{id}(t) - x_{id}(t)) + c_2 r_2 (p_{gd}(t) - x_{id}(t)) \\ x_{id}(t+1) &= x_{id}(t) + v_{id}(t+1) \end{aligned}$$

式中， c_1 和 c_2 为为学习因子，也称加速常数， c_1 用来调节粒子飞向自身最好位置方向的步长， c_2 用来调节粒子向全局最好位置飞行的步长，通常取 $c_2 = 2r_1$ 和为 $[0,1]$ 范围内的均匀随机数。称为基本粒子群优化算法（basic particles warm optimization, BPSO）模型。

$$\begin{aligned} v_{id}(t+1) &= v_{id}(t) + c_1 r_1 (p_{id}(t) - x_{id}(t)) + c_2 r_2 (p_{gd}(t) - x_{id}(t)) \\ x_{id}(t+1) &= x_{id}(t) + v_{id}(t+1) \end{aligned}$$

由三部分组成：第一部分为“惯性”部分，反映粒子的运动惯性，代表粒子有维持自己先前速度的趋势；第二部分为“认知”部分，反映粒子对自身历史经验的记忆，代表粒子有向自身历史最佳位置逼近的趋势，是一个增强学习的过程；第三部分为“社会”部分，反映粒子间协同合作与知识共享的群体历史经验，代表粒子有向群体或邻域历史最佳位置逼近的趋势。在搜索过程中，粒子一方面记住它们自己的经验，同时考虑其同伴的经验。当单个粒子察觉同伴经验较好的时候，它将进行适应性的调整，寻求一致认知过程。

2.标准粒子群模型

在 BPSO 模型存在的问题

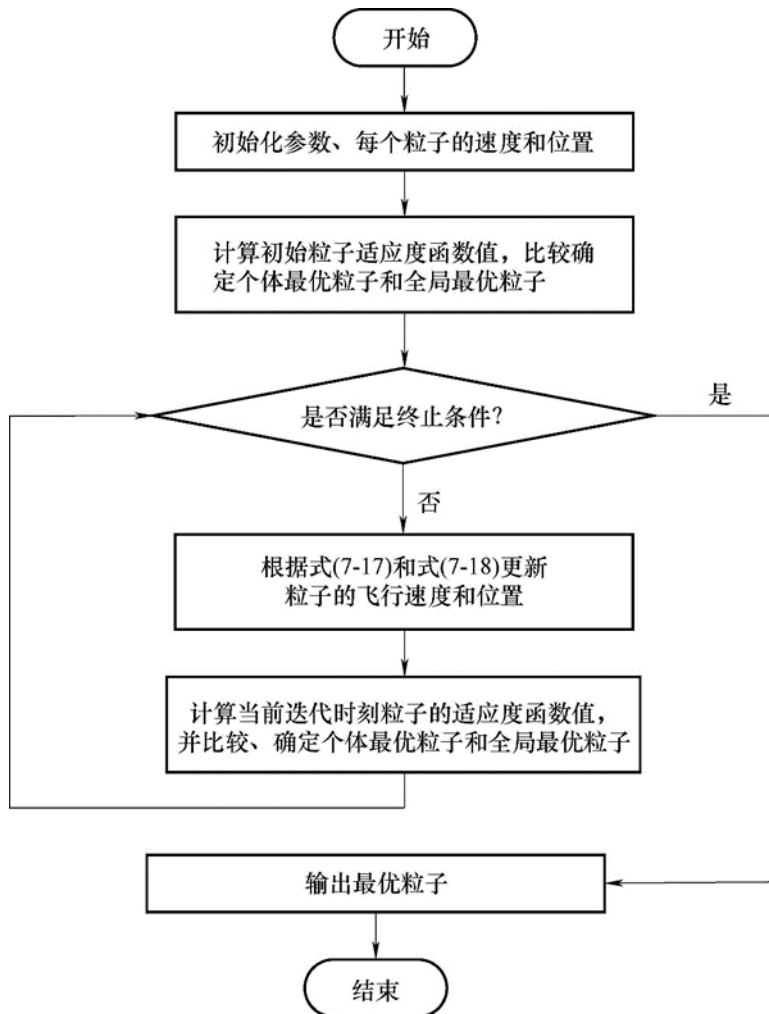
- 1) 粒子的飞行速度相当于搜索步长，过大的搜索步长很容易使粒子飞越最优解，使算法难以收敛；
- 2) 当粒子的搜索步长过小时，尽管能够保证算法局部区域的精细搜索，但却直接导致算法全局探测能力降低。
- 3) 为达到算法局部开采和全局探测之间的有效平衡，必须对粒子的飞行速度采取有效的控制与约束。

为了提高粒子群优化算法的性能，Shi 和 Eberhart 在基本粒子群优化算法模型中引入了惯性权重以控制粒子飞行的速度。计算模型如下：

$$v_{id}(t+1) = \omega v_{id}(t) + c_1 r_1 (p_{id}(t) - x_{id}(t)) + c_2 r_2 (p_{gd}(t) - x_{id}(t))$$

$$x_{id}(t+1) = x_{id}(t) + v_{id}(t+1)$$

称为惯性权重，通过该权重可以调节飞行中惯性的大小。引入惯性权重的粒子群优化计算模型通常被称为标准粒子群优化(standard particles warm optimization, SPSO)算法。



粒子群算法的具体步骤:

(1) 算法初始化。设置粒子群算法参数, 包括粒子群数目 N , 粒子的维度 D , 粒子飞行的最大速度 V_{\max} 、最小速度 V_{\min} , 最大迭代次数 T_{\max} , 惯性权值 ω , 并置当前迭代次数 $t = 0$;

(2) 在搜索范围内随机初始化每个粒子的位置 $X_i(0)$ 和速度 $V_i(0)$ 计算每个粒

子的适应度值 $f(X_i(0))$ ，并将当前粒子的位置和适应值存储在 P_{ibst} 中，将所

有粒子的 P_{ibst} 中适应值最好的个体存储在 P_{gbest} 中；

(3) 开始循环，根据公式 (1) 和 (2) 更新粒子的速度和位置 $X_i(t)$ ，如果粒子的速度和位置超出最大值和边界值，则按最值计算。

(4) 计算当前迭代下每个粒子的适应度函数值 $f(X_i(t))$ ，比较更新 P_{ibest} 和 P_{gbest} ；

(5) 判断迭代是否满足终止标准（如收敛到指定精度，或达到最大迭代次数），若满足，则算法停止，进入步骤 6，否则，返回步骤 3。

(6) 输出最优粒子的值。

基于粒子群算法的 PID 参数优化

1. PID 控制原理

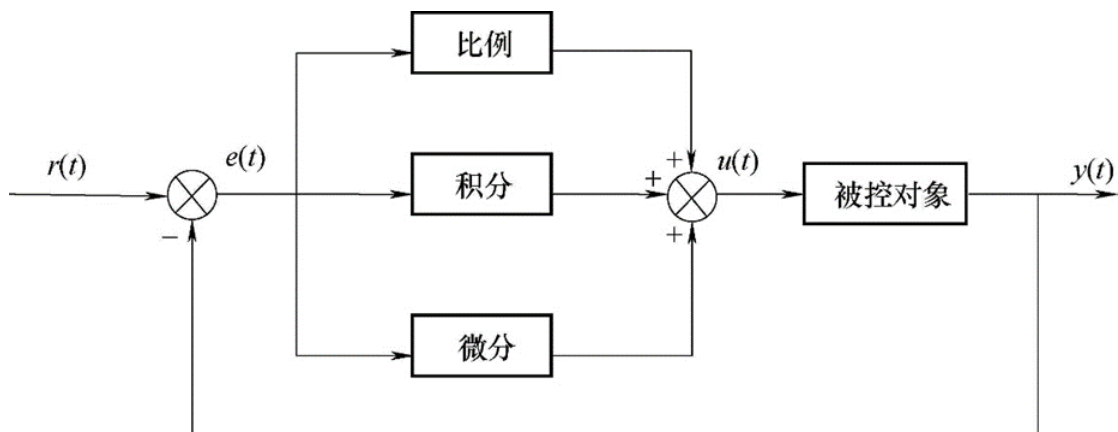
PID 控制是最早发展起来的控制策略之一，是指将偏差的比例、积分和微分通过线性组合构成控制量，对被控对象进行控制。在现代工业控制领域，PID 控制器由于其结构简单、鲁棒性好、可靠性高等优点得到了广泛应用。PID 的控制性能与控制器参数 K_p, K_i, K_d 的优化整定直接相关，在工业控制过程中，多数控制对象是高阶、时滞、非线性的，所以 PID 控制器的参数整定是较为困难的。粒子群算法具有良好的全局寻优能力，本节采用粒子群算法实现对 PID 控制器的参数优化。

PID 控制系统的原理框图，该控制系统由模拟 PID 控制器和被控对象组成。PID 控制器是一种线性控制器，它根据给定值 $r(t)$ 与实际输出值 $y(t)$ 构成控制偏差对系统控制。

即 $e(t) = r(t) - y(t)$ ，PID 的控制规律为：

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right]$$

其中， K_p 为比例系数； T_i 为积分时间常数； T_d 为微分时间常数。



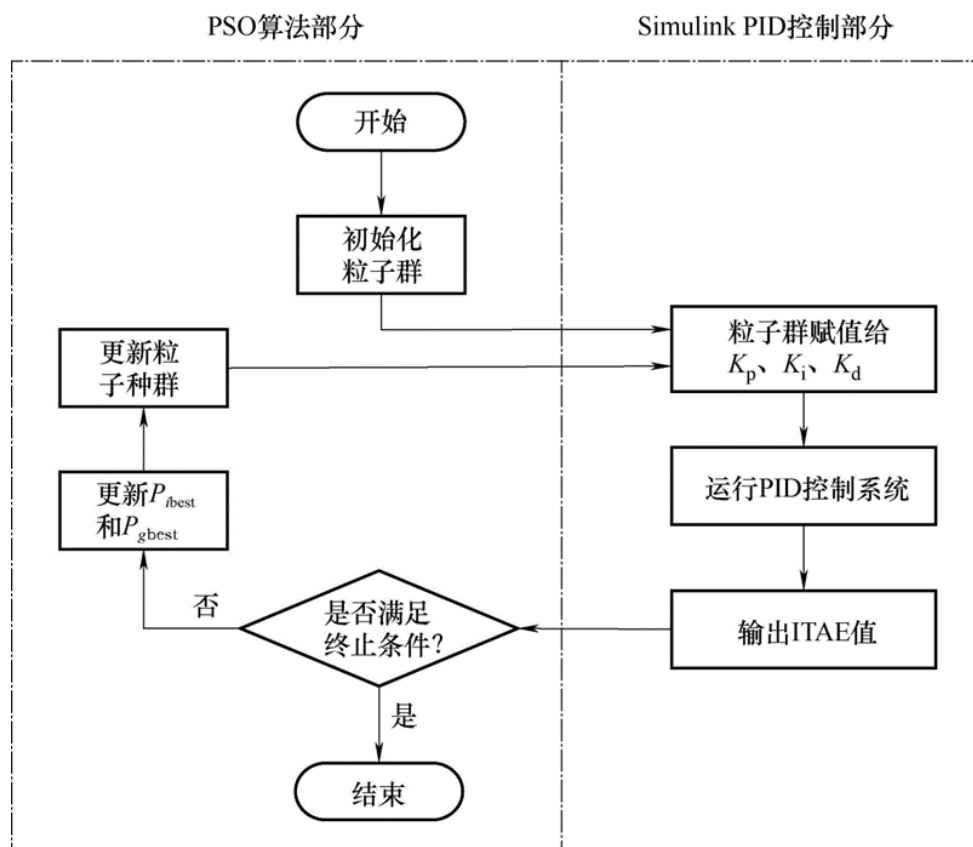
PID 的控制规律的传递函数为：

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

各个校正环节的作用：

- ✓ 比例环节：成比例地反映控制系统的偏差信号，偏差 $e(t)$ 一旦产生，控制器立即产生控制作用，以减小偏差。
- ✓ 积分环节：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，积分作用越强，反之则越弱。
- ✓ 微分环节：反映偏差信号的变化趋势，并能在误差信号变得太大之前，在系统中引入一个有效的早期修正信号，加快系统的动作速度，减少调节时间。

3. 基于粒子群优化算法的 PID 参数优化步骤



第八章 深度学习在 智能控制中应用（12学时）

素质（思政）内容与要求：

讲深度学习优化智能控制时，提辛顿等学者突破传统算法局限的钻研精神，培养学生创新思维；结合我国用其提升工业机器人精度、优化无人机导航的案例，显技术自主实力，激民族自信；讨论数据安全问题，引导学生守科技伦理，树用技术服务产业升级的责任感。

教学内容：

1. 深度学习概述；
2. 自编码网络在易混淆目标识别中应用；
3. 卷积神经网络在心电图自动分类中应用；
4. 基于鸟类视觉信息处理机制的大视场小目标检测模型。

教学目标：

1. 理解深度学习的层级结构；
2. 掌握神经网络基本构成，知晓激活函数、权重更新的关键作用；
3. 了解 CNN、RNN 等典型模型的适用场景。

教学重点:

深度学习与机器学习、人工智能的关系，基于受限玻尔兹曼机的深度信念网络、基于自动编码器的堆叠自编码器、卷积神经网络和递归神经网络等四种深度学习算法的原理。

教学难点:

深度学习在目标识别、心电图分类以及小目标检测等场景下的应用。

教学方法和手段:

课堂教学为主，结合课堂练习和小节提问。

教学过程:

(一) 深度学习

目前深度学习的模型有很多，本节对常用的四种深度学习算法进行介绍。

- 1) 基于受限玻尔兹曼机 (Restricted Boltzmann machine, RBM) 的深度信念网络 (Deep belief net-work, DBN);
- 2) 基于自动编码器 (Auto encoder, AE) 的堆叠自编码器 (Stacked auto encoders, SAE);
- 3) 卷积神经网络 (Convolutional neural net-works, CNN);
- 4) 递归神经网络 (Recurrent neural networks, RNN)。

基于受限玻尔兹曼机的深度信念网络概述与原理

受限玻尔兹曼机 (RBM) 是一类具有两层结构、对称连接无自反馈的随机神经网络模型，层与层之间是全连接形式、层内之间无互连接，有一层隐含变量，用于学习输入的表达。

$$E(s) = -\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n w_{ij} s_i s_j - \sum_{i=1}^n \theta_i s_i$$

玻尔兹曼机能量定义为:

该模型被分成两种单元: h 和 v 。模型如右图所示，显层和隐层内部的神经元都没有互连，只有层间的神经元有对称的连接线。基于这种性质，可以同时并行地计算整层神经元的权重，因此又称此玻尔兹曼机为受限玻尔兹曼机。

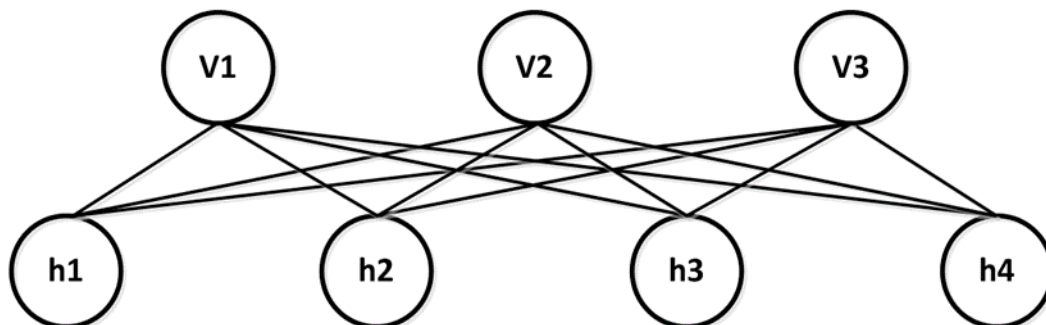


图 8-2 马尔可夫网络形式的受限玻尔兹曼机

基于受限玻尔兹曼机的深度信念网络是由多个受限玻尔兹曼机堆叠而成的一个神经网络，它是一个生成模型，也是一个判别模型，其结构如图 8-3 所示。

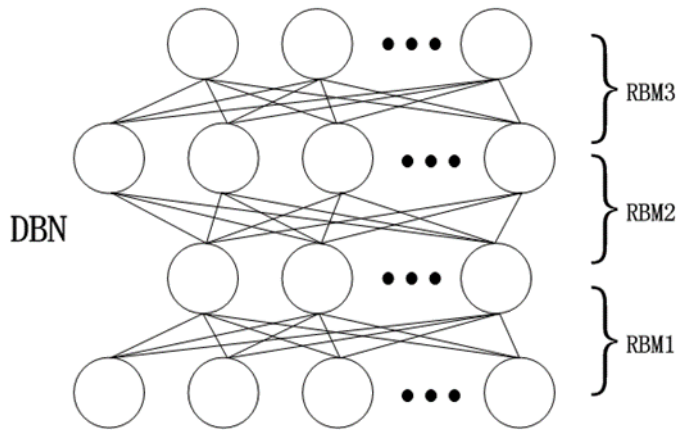


图 8-3 DBN 网络结构

- ①预训练阶段：只使用输入数据，不使用数据的标签，属于无监督学习。
- ②全局微调阶段：以训练好的 **RBM** 之间的权重和偏置作为深度信念网络的初始权重和偏置，以数据的标签作为监督信号计算网络误差，利用误差反向传播 **BP** 算法计算各层误差，使用梯度下降法完成各层权重和偏置调节。

卷积神经网络是专门用来处理具有类似网状结构数据的神经网络。卷积神经网络即在神经网络中使用卷积运算代替一般的矩阵乘法运算。卷积这种数学运算是一种特殊的线性运算。

卷积神经网络的结构非常多，但其基本架构非常相似，卷积神经网络的结构一般包括以下几层：

- (1) 输入层：进行数据输入
- (2) 卷积层：进行特征提取与特征映射
- (3) 池化层：进行特征图像稀疏处理，减少数据运算量及降低数据过拟合现象
- (4) 全连接层：在卷积神经网络尾部进行数据的二次拟合，减少特征信息的损失
- (5) 输出层：进行数据输出

以 **LeNet-5** 为例进行介绍它包含三个主要的层——卷积层、池化层、全连接层，如图 8-4 所示。

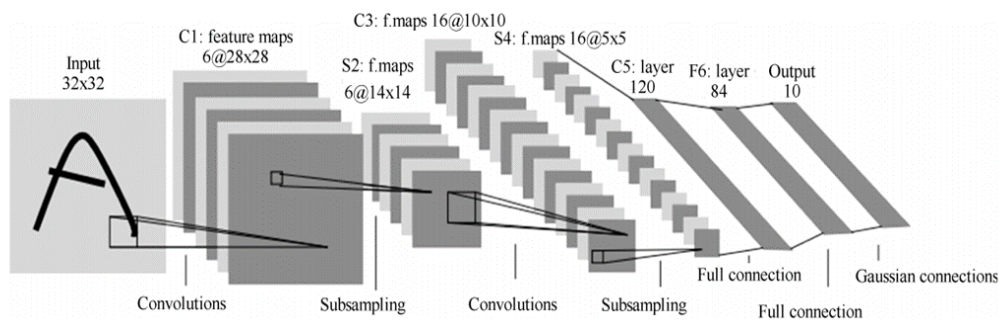


图 8-4 LeNet-5 结构图，用于手写体识别的经典卷积神经网络输入层 32×32 由感知节点组成，用于数据的输入。第一隐藏层进行卷积；

第二隐藏层实现子抽样和局部平均；第三隐藏层进行第二次卷积；第四个隐藏层进行第二次子抽样和局部平均计算；第五个隐藏层实现卷积的最后阶段。多层卷积的目的是一层卷积层学习到的特征比较局部，卷积层数越多，学习到的特征越具有全局化。

自动编码器 (AE) 是神经网络的一种，经过一定的训练后可以将输入复制到输出。自动编码器神经网络一般由两部分组成：一个是编码器函数 $h = f(x)$ ，另外一个生成重构的解码器 $r = g(x)$ 。

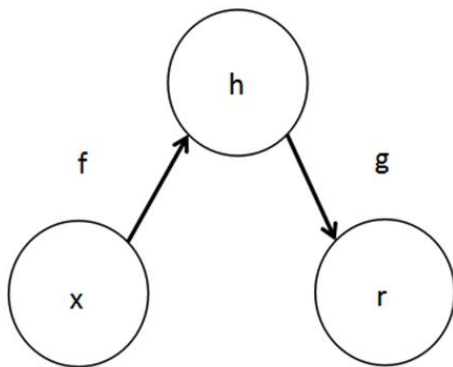


图 8-5 自动编码器一般结构，编码器 f 将 x 映射到 h ，解码器 g 将 h 映射到 r

自动编码器一般结构如图 8-5 所示，自动编码器是前馈网络的一种特殊情况，通常使用基于反向传播计算的梯度下降算法进行训练，也可以使用基于比较原始输入和重构输入激活的再循环训练学习算法。

堆叠自编码器由多个自动编码器堆叠而成，图 8-6 为堆叠自编码器网络结构。堆叠多层自动编码器的目的是为了逐层提取输入数据的高阶特征，在此过程中逐层降低输入数据的维度，将一个复杂的输入数据转化成一系列简单的高阶特征，然后再把这些高阶特征输入一个分类器或者聚类器中进行分类或聚类。



图 8-6 堆叠自动编码器网络结构

递归神经网络 (RNN) 是一类用于处理序列数据的神经网络，被广泛应用于语音识别、机器翻译、实时在线的建模和优化方面。递归神经网络可以扩展成非常长的序列。大部分的递归神经网络也可以处理可变长度的序列数据。图 8-7 是典型的 RNN 结构。

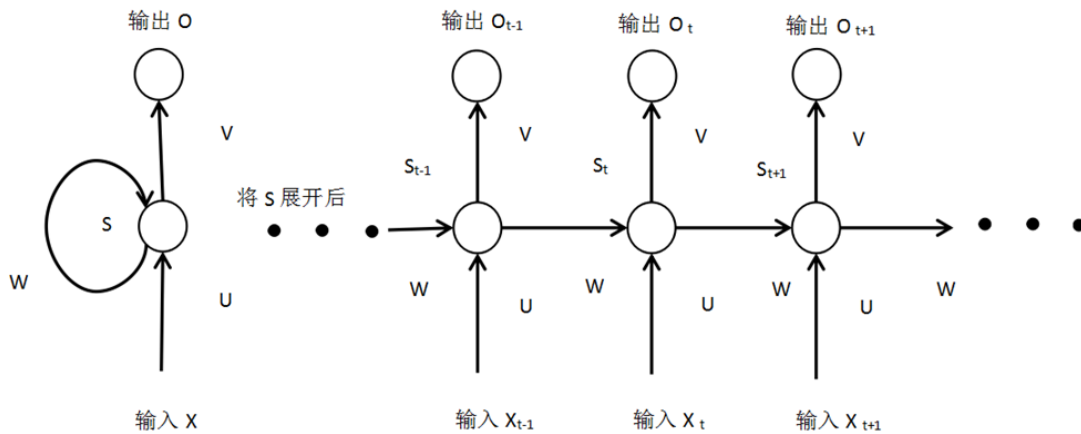


图 8-7 一个递归神经网络在时间中展开的计算和涉及的相关计算

(二) 自编码网络在易混淆目标识别中应用

目标识别是计算机视觉研究的关键问题。将相似的目标分类到其子类别中的任务，即目标细微识别 (FGOR) 对于人类和计算机都非常困难。而关键特征点的提取是 FGOR 算法的关键。这里给出一种模拟视网膜、LGN、V1 和视皮层形式通路逐级信息处理过程的稀疏自编码网络，用于易混淆目标识别中的关键点提取。基于拓扑图独立分量分析 (TICA) 可以得到非常类似于 V1 拓扑图的线性滤波器的空间拓扑组织。TICA 包括线性滤波层和池化层，分别模拟了简单细胞和复杂细胞。卷积神经网络 (CNN) 的核心是局部感受野和权值共享；平铺神经网络 (TCNN) 是 TICA 和 CNN 的结合

TICA 包括线性滤波层和池化层，分别模拟了简单细胞和复杂细胞。卷积神经网络 (CNN) 的核心是局部感受野和权值共享，即每个单元仅仅‘观察’输入图像的一个小的区域。平铺神经网络 (TCNN) 是 TICA 和 CNN 的结合，其中共享的权值是单个超柱所包含的具有系统变化的响应属性的多个神经元的连接权值。

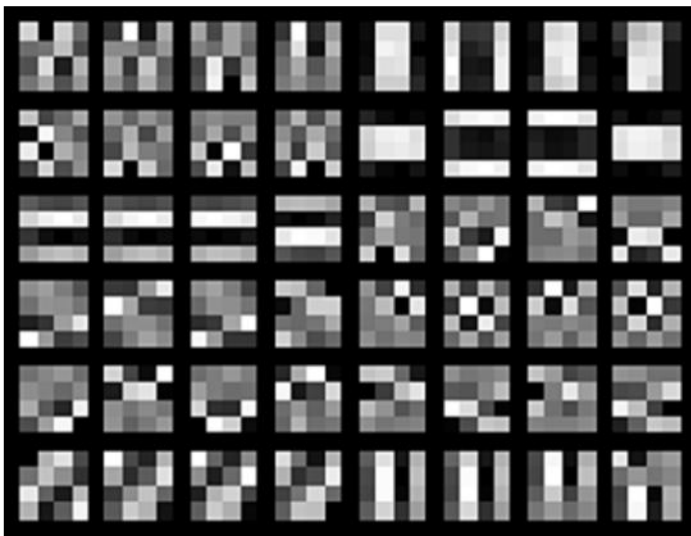


图 8-10 输入为白化图像的感受野尺寸为 44 的 TCNN 线性滤波层神经元感受野。其中，每行前四个为一组，后四个另外一组

如图 8-10 所示，对每个‘超柱’对应的输入区域训练了 12 组正交的特征映射，可以发现每组 4 个神经元响应属性具有系统的渐变。TCNN 较 CNN 可以获得更加复杂的不变特征，是对 V1 区更加逼真的模拟。

与局部对比规格化 (LCN) 相关联的神经机制广泛存在于视网膜到视皮层的很多区域。神经元有限的响应范围，以及对视觉系统对不同光照环境的适应性都可由 LCN 解释。该模块实现了同一特征映射中相邻特征及不同特征映射中同一空间位置特征之间的相互竞争和整合。LCN 包括减规格化和除规格化。

数据库：分别在 CU-Bird2011 和 LFW[24]。这两个数据库上进行测试。CU-Bird2011 是被广泛采用的目标细微识别数据库，包含 200 种不同类别的鸟；人脸数据库共计 13,466 幅人脸图片，其中 5,590 幅源于 LFW[26]，剩余图像源于网络。每个人脸标记 5 个关键位置点。

网络结构：网络构造如图所示。

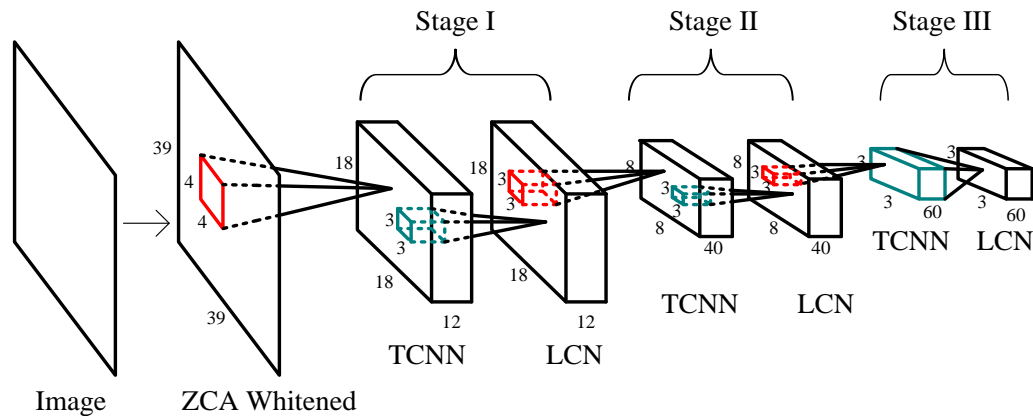


图 8-11 三阶段深度网络 ZCA Whitened 中的框及 LCN 中的立方体代表上一层神经元的感受野，TCNN 中的立方体代表 LCN 层的高斯滤波器尺寸

采用保持任意两点距离的多维度缩放 (Multi-Dimensional Scaling, MDS) 变换对这些输出降维至二维以可视化，结果如图 8-12 所示。可以发现，相邻的样本具有相似的关键点结构信息，即，具有相似的头、胸、腹和尾的配置关系。

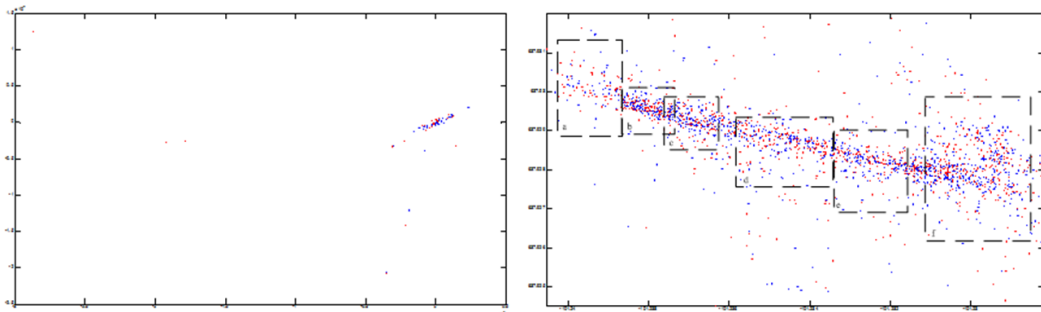


图 8-12 数据库中部分图像网络输出向量经 MDS 降至 2 维后可视化效果

与 CU-Bird2011 中目标相比，人脸数据库中图像虽然也受到一定程度的姿态、光照和遮挡等因素的影响，但各个关键点的位置相对比较稳定，从网络输出

中进行知觉组织信息的解码也获得了更好的效果，如图 8-13 所示。采用平均检

$$err = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2}$$

测误差进行性能度量，定义为：

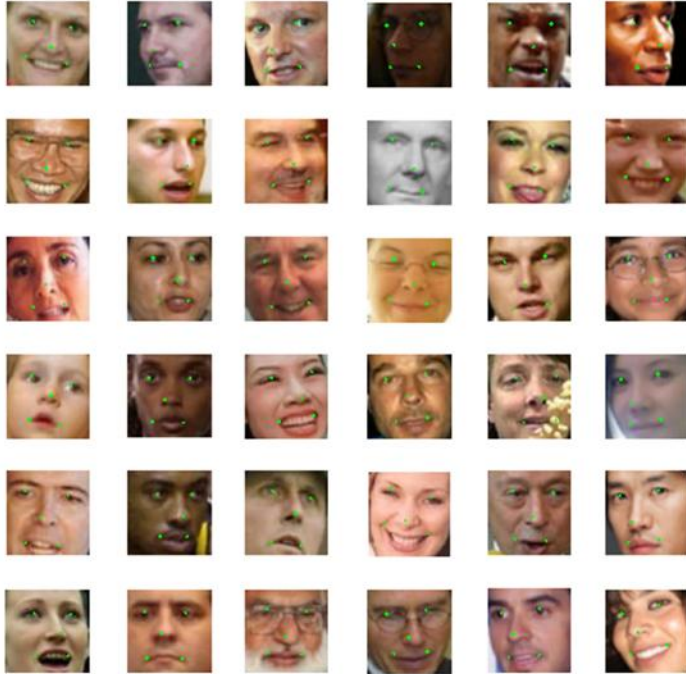


图 8-13 人脸数据库中部分人脸关键点检测效果

(三) 卷积神经网络在心电图自动分类中应用

下图是心电图主要波形示意图，主要由 P 波、QRS 波、T 波、U 波组成。

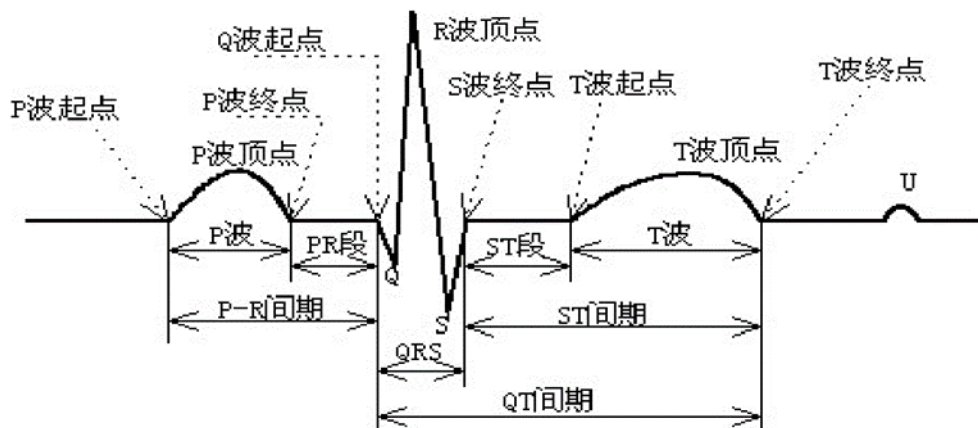


图 8-14 心电图主要波形示意图

本节将深度学习方法用于心电图自动分类的研究中。具体步骤如下：首先利用多尺度小波分解与重构法和阈值法分别滤除 ECG 信号的基线低频干扰和肌电高频干扰，然后通过奇异值的小波检测提取心电信号的 R 波峰值点，在此基础上按疾病类型对心拍进行分割，最后将心电数据输入卷积神经网络中完全心律失常的自动分类。流程图如图 8-15 所示：

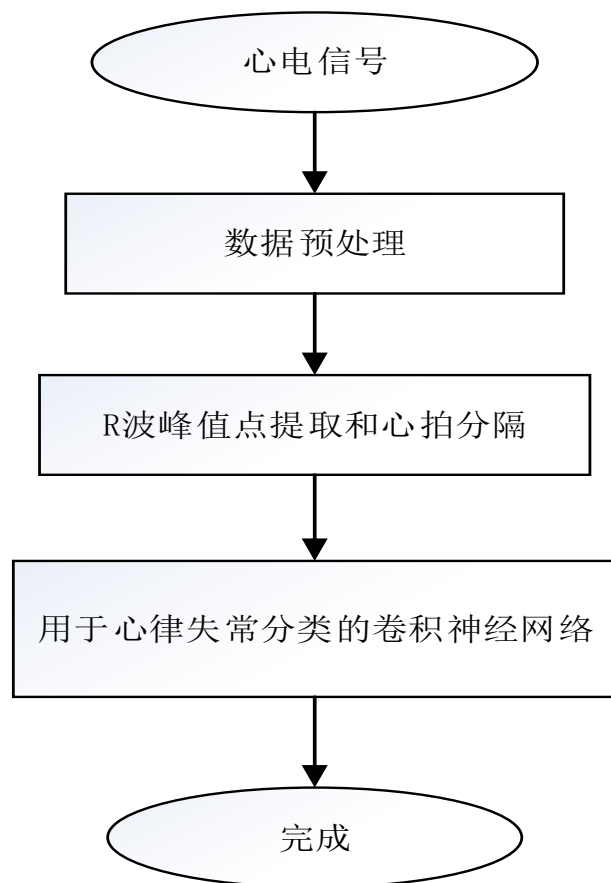


图 8-15 流程图

数据集：以 MIT-BIH 作为实验数据集，选取 6 种心拍类型，分别为正常心拍 (N)；左束支传导阻滞心拍 (L)；右束支传导阻滞心拍 (R)；起搏心拍 (P)；房性早搏心拍 (A)；室性早搏心拍 (V)。

数据预处理：对高频信号进行小波分解、阈值量化与信号重构实现工频干扰和肌电干扰的抑制；对于低频干扰，使用 sym8 小波进行八尺度分解，通过对第八尺度的近似系数置零，进而抑制基线噪声。

R 波峰值点的提取和心拍分割：基于二次样条小波变换提取 R 波峰值点，根据信号奇异点与其小波变换的对应关系，心电图 QRS 波对应该尺度上小波变换的一个模极大值对，且 R 波峰值点与该模极大值对的零交叉点有较稳定的时移，然后取 R 波峰值点之前的 99 个采样点和之后的 200 个峰值点共计 300 个采样点组成一个心拍，即每个心拍为 300 维。

心律失常自动分类的卷积神经网络结构图如图 8-16 所示：

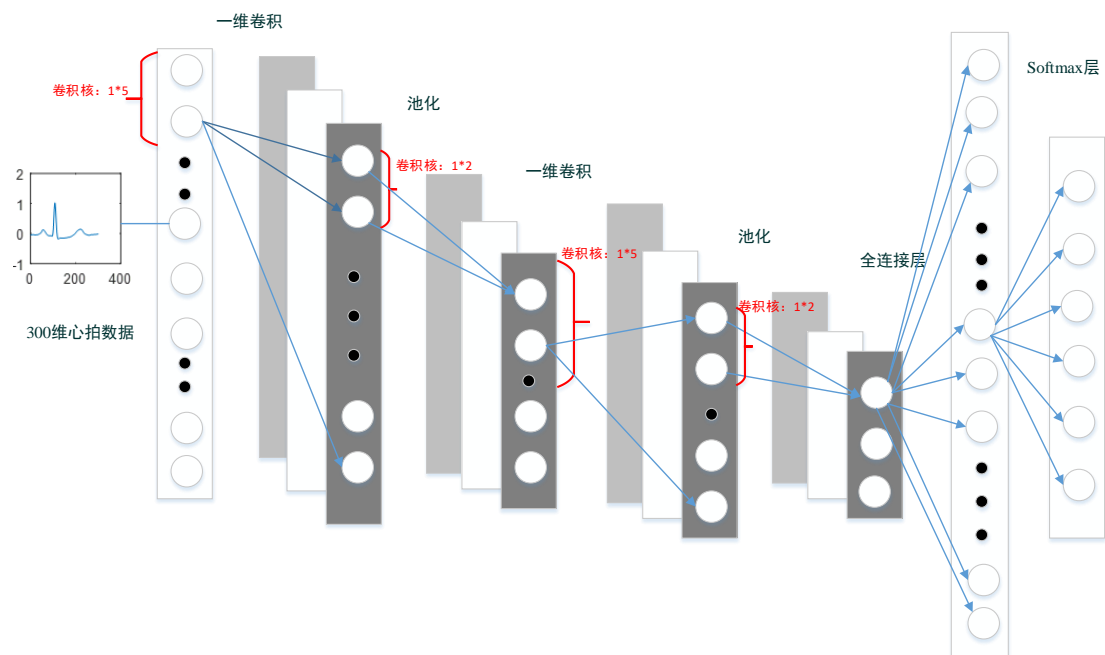


图 8-16 心律失常自动分类的卷积神经网络结构
 心律失常自动分类的卷积神经网络模型，其训练算法的流程图如图 8-17 所示：

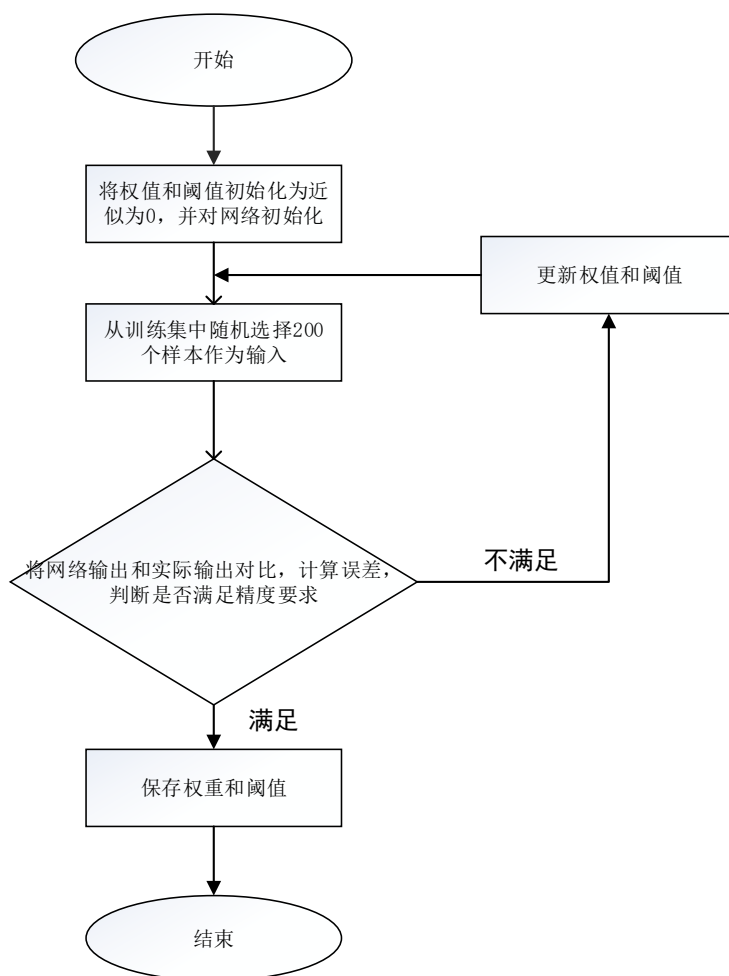


图 8-17 训练算法流程图

(1) 预处理结果

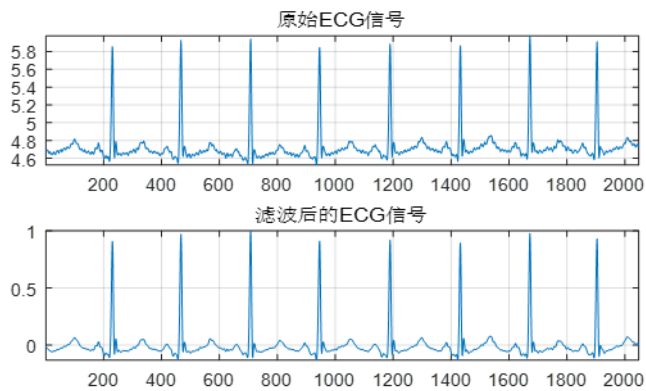


图 8-18 滤波前后心电图波形对比

(2) R 波峰值点提取和心拍分割结果

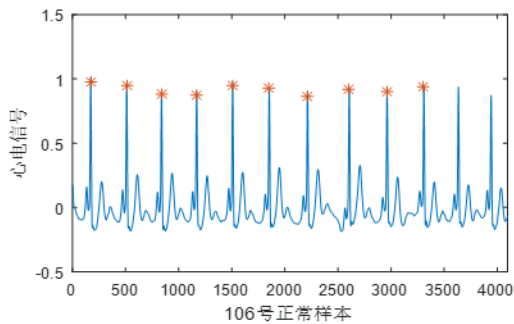


图 8-19 R 波峰值点提取

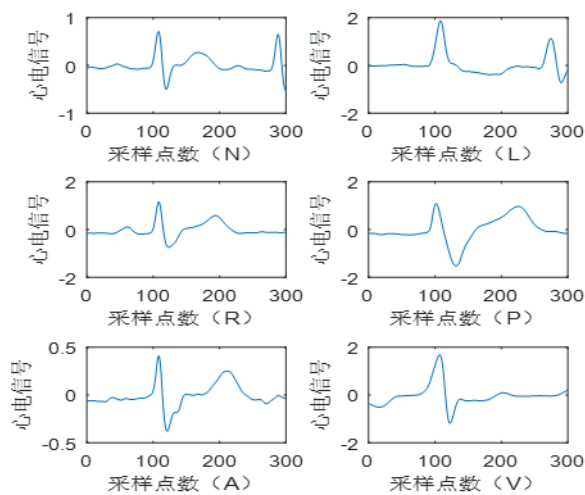


图 8-20 六种类型心拍示例

(3) 自动识别算法评估:

经过 200 次迭代 CNN 的准确率为 96.41%

(四) 基于鸟类视觉信息处理机制的大视场小目标检测模型

在使用无人机进行航拍时，其所获得的图像往往具有场景大，背景杂乱、图像分辨率低和目标特征少，尺寸小（一般不超过 50×50 像素）等特点，使得大视场下的小目标实时检测成为一项困难的任務。卷积神经网络等在常规图像分

类、目标检测中有较好性能的算法，在复杂的大视场下进行较小目标检测时，结果往往不尽人意。

鸟类具有极其发达的视觉系统，能在大视场下迅速发现地面的小目标。鸟类优异的视觉感知能力得益于其发达的视觉系统。这里给出一种基于鸟类视觉三通路协同处理机制，并结合卷积神经网络的大视场小目标协同处理的模型，用于提高大视场小目标检测精度和速度。

对于目标检测任务来说，大部分背景信息往往是多余的，而显著性检测方法往往能提取出图像中的有用信息。将航拍图像转为 Lab 空间模型，为了抑制均匀区域，突出小目标，定义标准偏差

$$\sigma = \frac{\min(W, H)}{\sigma_s}$$

接着使用高斯低通滤波器，对 Lab 空间的每个通道模糊化，并计算每个颜色通道的平方差作为显著图。最终显著图可以用下式表示并进一步归一化到 [0,1] 的范围内。

$$M_A = \sum_{i=1}^2 \|(L_i, a_i, b_i) - (L_i^\omega, a_i^\omega, b_i^\omega)\|^2$$

由于保留一定的背景信息有利于提高检测器的检测精度，在利用显著性方法得到的小目标边界框的基础上，将其长和宽放大一定倍数以此来获取一定的背景区域。

但操作将引入，多个小目标产生多张小图片，临近的小目标就被分割成几部分等问题。解决办法为，根据中心点距离，通过聚类的方式判断小目标是否临近，进而合并不同小目标的裁剪区域。

航拍图像中小目标的分辨率通常不够高，导致小目标不明显，所以在裁剪获得小图像后，为了增强小目标的特征，可以采用 SR (Super-Resolution) 的方法重建图像，以得到小目标更精细的信息。

每幅图像平均有 5.5 辆车，它们占据了图像总像素的 0.7 % 左右。该数据集所有图像都是从与地面相同的距离拍摄的，图像包含不同的背景，如田地，河流，山脉，城市地区。使用 mean average precision (mAP) 评价目标检测模型的性能。指标的计算公式如下：

$$\text{Precision} = \frac{\text{True Positive}}{\text{True Positive} + \text{False Positive}}$$



(a) 人工标注..... (b) 模型预报..... (c) 人工标注..... (d) 模型预报.....



(e) 人工标注..... (f) 模型预报..... (g) 人工标注..... (h) 模型预报.....

模拟鸟类视觉处理机制的目标检测模型进行分类和定位的可视化结果, 如图所示。其中, a, c, e, g 是人工标注, b, d, f, h 是与之对应的模型预测结果。