

绪 论

随着信息和计算机技术的不断发展,越来越多的高新科技进入传统领域中,人工智能技术也不例外。从车牌识别、人脸识别、智能家居到混凝土 3D 打印、勘察数据感知、楼宇自动化设计等,智能技术的应用给日常生活与生产带来了诸多便利。人工智能设计的应用还在很大程度上缓解了当前设计工作中的强度与难度,为设计工作质量与效率的提升提供了重要手段。但由于当前人工智能设计仍归属于弱人工智能,特别是土木建筑结构设计领域尚无法完全脱离人工自主运行,所以还需要进一步深入研究和开发新的智能设计技术,从而建立真正的结构智能设计类人系统。

智能结构设计是指将人工智能技术应用于结构设计领域,利用计算机模拟和优化技术,对结构进行系统建模和分析,从而设计出更加优异和高效的结构。它是一种集结构分析、优化、模拟于一体的多学科交叉技术,具有广泛的应用前景,可应用于土木工程、机械工程、航空工程等领域。

当前,智能结构设计已经成为工程设计研究的热点之一。经过 70 多年的发展,人工智能作为新一代产业变革的核心驱动力,是全面提高结构工程领域数字化、自动化、信息化和智能化的重要方法。目前,工程结构设计已开展了大量人工智能研究,但各阶段智能化发展不均衡,实际应用也存在一定局限性,因此需深入探索神经网络、大数据、深度学习等智能技术在工程结构全生命周期的交叉融合,促进结构设计与人工智能研究的协同发展。目前国内外研究人员已经开发了各种基于人工智能技术的结构设计方法,包括神经网络、遗传算法、离散优化等。这些方法可以在不同的领域和应用场景中发挥其优势,优化结构设计方案,提高结构设计效率。另外,人工智能和大数据等新技术的不断提升和发展,也为智能结构设计研究提供了新的机遇和途径。

未来,智能结构设计仍将继续发展、普及和应用。尤其是随着人工智能技术和应用价值的逐步释放,智能结构设计将会被更广泛地应用于各个领域。同时,在智能化结构设计领域,整合多专业知识和信息素材,提高自动化水平等方向的研究也将得到更多关注。

1.1 智能设计概述

1.1.1 智能的概念

人工智能^[1](artificial intelligence, AI)是一个内涵不断变化和拓展的概念。人类历史上,人们一直试图理解自己是如何思考的;人类的大脑是如何感知、理解、预测和改造复杂世界的。对于工程师而言,核心的问题是智能机器如何像人一样行动,表现出智能行为。由

于人工智能仍然存在许多不同的解释,很难简单而准确地定义人工智能或 AI 一词。尽管如此,人们还是在尝试通过一些发展历程或科学理论来定义或描述人工智能领域。要实现人工智能,首先要解答一个问题,什么是智能?

智能(intelligence)及智能的本质是古今中外许多哲学家、脑科学家一直在努力探索和研究的问题,智能的发生与物质的本质、宇宙的起源、生命的本质一起被列为自然界的四大奥秘。但至今人类对智能仍然没有完全了解,因此对智能并没有确切的定义。但是结合智能的具体表现,人们对智能的观点主要分为思维理论、知识阈值理论、进化理论三个流派。

1. 思维理论^[2]

思维理论认为,智能的核心是思维,人的一切智能都来自大脑的思维活动,人类的一切知识都是人类思维的产物,因而通过对思维规律与方法的研究可望揭示智能的本质。

思维科学体系的基础科学包括两大类:一类是总结人类思维经验、揭示思维对象的普遍规律和思维本身普遍规律的各种思维科学,包括哲学世界观、哲学史、认识论和逻辑学,是理论的思维科学;另一类包括研究思维主体——人脑的生理结构和功能,揭示思维过程生理机制的神经生理学和神经解剖学等。这种观点将认识论归在思维科学的基础科学范围内。其实两种观点都不否认智能和哲学是通过认识论相联系的。在智能设计过程中的想象能力、创造能力和改进能力等方面都能体现思维理论。例如,在桥梁设计中,设计师可以运用奥卡姆剃刀原理,尽量减少桥梁的材料使用,从而降低建设成本,如图 1-1 所示;还可以运用多目标优化理论,综合考虑桥梁的强度、稳定性和经济性等因素,得出最佳方案。在简化设计流程、提高工程质量和效率等方面,思维理论也可以发挥重要的作用。

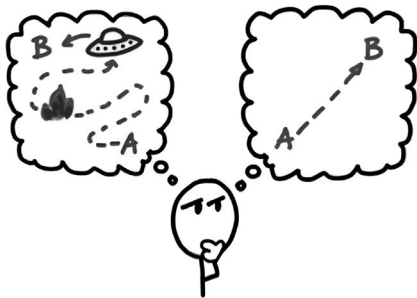


图 1-1 奥卡姆剃刀原理

2. 知识阈值理论^[3]

知识阈值理论(threshold of knowledge theory)是指一个人在特定领域中获取新知识所需的最低门槛。该理论认为,当一个人对某个领域的认知达到一定水平时,就能够更容易学习和理解相关的知识,而且对新知识的接受和理解也会更加迅速和深入。

知识阈值理论强调了在学习过程中知识累积的重要性。一旦个体跨越了特定领域的知识门槛,就能够更有效地理解和吸收相关的信息,从而不断扩大自己的知识领域,这一理论对教育实践和个体学习策略有着重要的启示作用。因此,根据知识阈值理论可以将智能定义为:智能就是在巨大的搜索空间中迅速找到一个满意解的能力。这一理论在人工智能的发展史中有着重要的影响,知识工程、专家系统^[4]等都是在这一理论的影响下发展起来的,如图 1-2 所示。在结构的智能优化领域^[5],知识阈值理论可以通过建立模型,利用优化算法

和有限元分析等技术,对土木工程结构进行优化设计,在保证其安全性和稳定性的同时提高计算的效率。实现的方法过程可以描述为:确定结构的受力分布,建立结构优化模型,通过结构参数优化算法寻找最优结构形状和尺寸等方案,最后利用有限元分析验证优化结果。

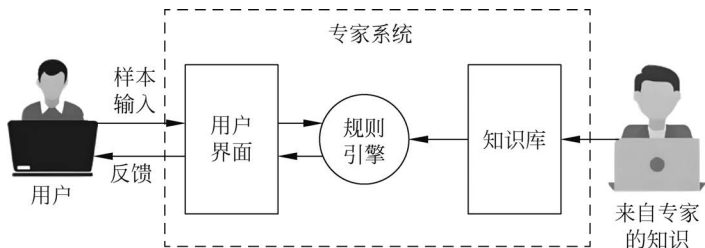


图 1-2 专家系统

3. 进化理论^[6]

进化理论着重强调控制,该理论认为人的本质能力是在动态环境中的活动能力、对外界事物的感知能力、维持生命和繁衍生息的能力。正是这些能力为智能的发展提供了基础,因此智能是某种复杂系统所涌现出的性质,是由许多部件交互作用产生的,智能仅仅取决于感知和行为,它可以在没有明显的可操作的内部表达的情况下产生,也可以在没有明显的推理系统出现的情况下产生,因此智能是在系统与周围环境不断“刺激-反应”的交互中发展和进化的。进化理论主要是通过模拟生物进化的遗传算法来优化设计的。这种方法可以自动地生成和评估无数种可能的结构形态,然后根据功能和成本等综合指标,逐步筛选出最优设计方案。例如,在桥梁结构的设计中,可以利用遗传算法搜索最优的跨度、支撑类型、结构类型等参数组合^[7],从而降低成本,提高结构的安全性和可靠性,如图 1-3 所示。该理论的核心是用控制取代表示,从而取消概念、模型及显式表示的知识,否定抽象对于智能及智能模拟的必要性,强调分层结构对于智能进化的可能性与必要性。目前这些观点尚未形成完整的理论体系,有待进一步的研究。

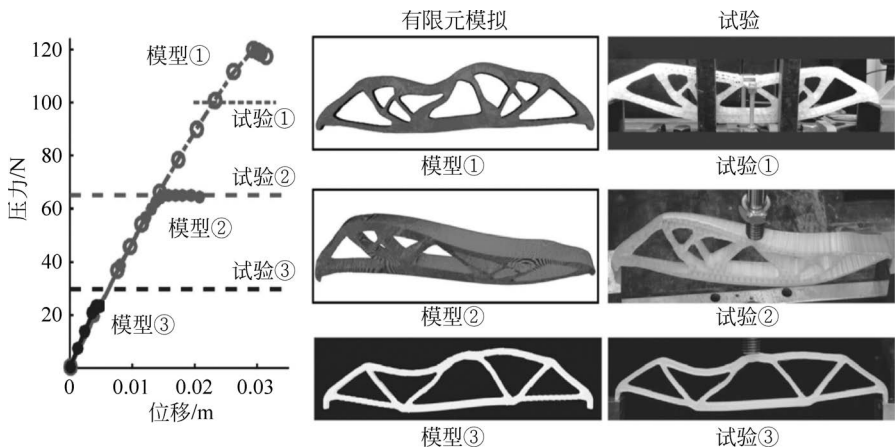


图 1-3 结构优化设计结果^[8]

值得注意的是,智能是一个开放的、包容的概念,发展至今其内容是不断完善的而且最终必将走向一体化。目前,可以认为智能是知识与智力的结合,知识作为智能行为的基础,来指导智力获取知识并应用知识求解相应的问题。

1.1.2 智能的特征

智能的特征包括具有感知能力、记忆和思维能力、学习能力、行为能力等。

1. 具有感知能力

感知能力是指通过视觉、听觉、触觉、嗅觉、味觉等感觉器官感知外部世界的能力。感知是人类获取外部信息的基本途径,人类的大部分知识都是通过感知获取,然后经过大脑加工获得的。如果没有感知,人们就不可能获得知识,也不可能产生其他各种智能活动。因此,感知是产生智能活动的前提。感知能力可以用于优化结构的设计和分析,快速识别结构的缺陷和脆弱性,提高结构的可靠性和安全性。例如,建立基于感知能力的非线性系统模型,可以根据健康检测数据快速预测结构的服役情况;利用感知能力算法优化结构的材料选型和断面设计,可以提高结构的效率,达到节能减排的目的。

2. 具有记忆和思维能力

记忆与思维是人脑最重要的功能。记忆用于存储思维所产生的知识,思维用于对信息的处理,是获取知识以及运用知识求解问题的根本途径。记忆和思维能力通过对历史经验和知识的记忆,以及对信息和数据的分析、归纳和推理,帮助工程师更好地理解 and 解决问题。例如,工程师可以利用记忆和思维能力,对已有的设计方案进行回顾和总结,加深对结构性能、耐久性和可靠性等方面的理解,从而更好地指导设计方案的优化。此外,在对不同方案进行评估和比较时,结合记忆和思维能力,可以更准确地预测其性能表现,并为决策提供更全面的参考。思维又可分为逻辑思维、形象思维、顿悟思维。

1) 逻辑思维

逻辑思维又称抽象思维。它是一种根据逻辑规则对信息进行处理理性思维方式。逻辑思维具有如下特点:

(1) 依靠逻辑进行思维。

(2) 思维过程是串行的,表现为一个线性过程。

(3) 容易形式化,其思维过程可以用符号串表达。

(4) 思维过程具有严密性、可靠性,能对事物未来的发展给出逻辑上合理的预测,可使人们对事物的认识不断深化。

2) 形象思维

形象思维又称直感思维。它是一种以客观现象为思维对象,以感性形象认识为思维材料,以意象为主要思维工具,以指导创造物化形象的实践为主要目的的思维活动。形象思维具有如下特点:

(1) 主要是依据直觉,即感性形象进行思维。

(2) 思维过程是并行协同式的,表现为一个非线性过程。

(3) 形式化困难,没有统一的形象联系规则,对象不同、场合不同,形象的联系规则亦不相同,不能直接套用。

(4) 在信息变形或缺少的情况下仍有可能得到比较满意的结果。

3) 顿悟思维

顿悟思维又称灵感思维。它是一种显意识与潜意识相互作用的思维方式。当人们遇到无法解决的问题时,会“苦思冥想”。这时,大脑处于一种极为活跃的思维状态,会从不同角度用不同方法去寻求解决问题的方法。有时一个“想法”突然从脑中涌现出来,使人“茅塞顿开”,问题便迎刃而解。像这样用于沟通有关知识或信息的“想法”通常被称为灵感。顿悟思维有以下特点:

(1) 具有不定期的突发性。

(2) 具有非线性的独创性及模糊性。

(3) 穿插于形象思维与逻辑思维之间,起着突破、创新及升华的作用。

但是,人的记忆与思维是不可分的,总是相随相伴的。它们的物质基础都是由神经元组成的大脑皮质,通过对相关神经元的兴奋与抑制实现记忆与思维活动。

3. 具有学习能力

学习是一种本能。人们在通过与环境的相互作用,不断地学习,从而积累知识,适应环境的变化。学习既可能是自觉的、有意识的,也可能是不自觉的、无意识的。学习能力可以用于设计更精准、高效的结构,通过机器学习的方式,将历史数据和实验结果输入系统中,让系统进行自我学习,掌握更加深入的结构优化规律,从而进行更加精准的结构设计。学习能力在结构设计中非常重要,通过深度学习等技术可以辅助工程师快速建立具备学习与应用新理论和新技术的智能系统,可以大幅提高结构设计的质量和效率。但需要注意的是,任何技术的应用都需要结合人机交互进行验证和决策,不可能单纯依赖模型和算法完成所有设计过程。

4. 具有行为能力

人们通常用语言或者某个表情、眼神及形体动作来对外界的刺激做出反应,传达某个信息,这些统称行为能力或表达能力。如果把人类的感知能力看作信息的输入,那么行为能力就可以看作信息的输出,它们都受神经系统的控制。类似地,行为能力可以用于输出材料的本构关系,预测结构的破坏与伸缩性能,进行非线性分析和优化设计等。具体应用包括:计算结构的刚度、强度、稳定性等;实现结构材料最优化设计、形状优化、拓扑优化。

1.1.3 人工智能的概念

人工智能^[9]是研究、开发用于模拟、延伸和扩展智能的理论、方法、技术及应用系统的一门交叉技术科学。它不但能够理解智能体,而且能够建造智能实体,是当前 21 世纪三大尖端技术之一。“人工智能”这个名词创造于 1956 年,其研究工作在第二次世界大战结束后迅速展开。人工智能通过模仿人类的思维和行为,实现类人智能系统。其基础理论包括机器学习、数据挖掘、知识表示与推理、自然语言识别与处理、计算机视觉等领域。人工智能的应用场景包括语音识别、机器翻译、自动驾驶、图像识别、智能客服、智能制造等领域,可以提高生产力,优化生产流程,降低成本,改善人类生活质量。

历史上,对 AI 的认识途径有以下两大类:以人为中心的途径在某种程度上是一种经验科学,涉及关于人类行为的观察与假设;理性论者的途径涉及数学与工程的结合。这两类

途径具体内容如下。

1. 脑科学和目标导向

智能的许多想法和原理都起源于脑科学和神经科学的相关领域。通过参考人类大脑的结构与功能,设计出更加高效、优化的计算机、网络或机器人等系统。此外,在神经科学的研究中也可以探索人类大脑的结构、功能以及认知过程等方面的问题。

还有一种认识智能的途径是采取目标导向的行动路线,目标导向是以明确的目标和具体的计划为基础,采取一系列行动和措施,以达成预期目标的方法和策略。目标导向可以让人们更加清晰地了解所要达成的目标,并制订明确的计划来实现这些目标。以创造智能理论方法来完成尽可能多的任务作为其最终的目标,相比用传统的方法去解决某一个问题更能体现智能的特点。在结构设计中,目标导向可以帮助设计师确定设计目标,进一步优化结构设计方案,提高设计效率和质量。例如,目标导向可以通过优化结构的荷载分配、截面形状和材料选择等方面,实现结构设计的最优化。

2. 图灵测试与聊天机器人

何为人工智能?现在许多人仍把图灵测试作为衡量机器智能的准则。早在“人工智能”被正式提出之前,英国数学家 A. M. 图灵(A. M. Turing)提出了“机器可以通过测试看出能否有思维方式”这一观点,形象地指出了什么是人工智能以及机器应该达到的智能标准,如图 1-4 所示。1950 年他发表了《计算机与智能》(Computing Machinery and Intelligence)^[10],在文中提出相关测试:让人与机器分别在两个房间里,二者之间可以通话,但彼此都看不到对方,如果通过对话,人不能分辨对方是人还是机器,那么就可以认为对方的那台机器达到了人类智能的水平。实际上,要使机器达到人类智能的水平,是非常困难的,但是,人工智能的研究正朝着这个方向前进,并且在一些专业领域内,人工智能能够充分利用专业的知识去解决特殊的问题,具有显著的优越性。

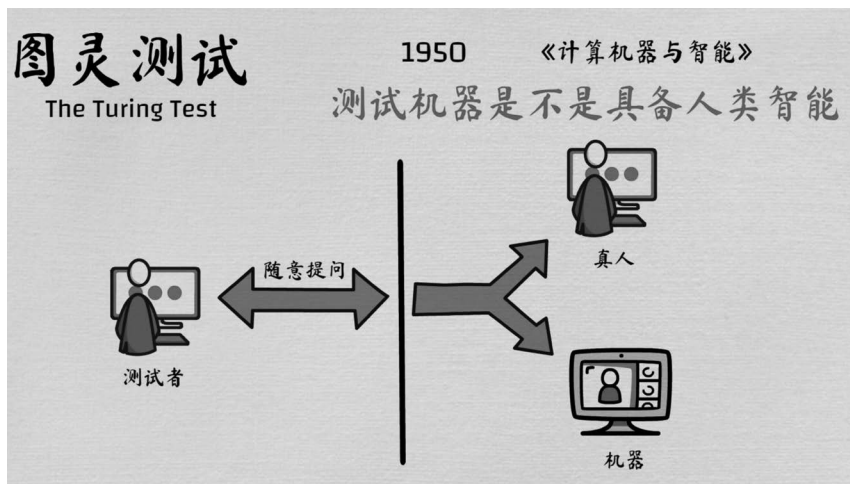


图 1-4 图灵测试^[10]

另一位人工智能先驱约瑟夫·维森鲍姆(Joseph Weizenbaum)开发了一个名为 Eliza 的程序,该程序旨在像人类心理学家一样回答测试对象的问题。目前,在互联网上有许多聊天机器人,都能具备和人聊天的属性。聊天机器人在某些领域已经有了商业应用,可为信息

识别、知识问答、自动编程等领域提供服务。特别是 ChatGPT 的出现更是揭开了人工智能应用的新篇章。

总而言之,人工智能是研究如何构造智能机器(智能计算机)或智能体,并使其能模拟、延伸、扩展人类智能的学科。换句话说,人工智能就是要研究如何使机器具有能听、会说、能看、会写、能思维、会学习、能适应环境变化、能解决面临的各种实际问题等功能的一门学科。

1.2 工程结构智能设计简介

智能代表着人们在逻辑认知、自我认知、学术研究、计划制定、创新思维以及问题解决等多个领域的综合能力。广义上讲,包括了人的意识活动、认知活动以及与之相关的各种社会实践活动。它可以被解释为,在感知或推测信息之后,将这些信息作为知识应用到其他环境中的一种自适应行为。

人工智能是一种研究人类思维活动规律及其发展过程的综合学科,包括计算机科学、控制科学、机器人科学、逻辑学、心理学、社会学等多个方面。人工智能这一概念的起源可以追溯到 1956 年,但关于它的确切定义仍然存在许多争议。一般把人类智能看成由认知系统与感觉系统两部分组成。迄今为止,AI 技术已经成功地在策略游戏(如 AlphaGo)、自动驾驶技术、人脸识别、医疗诊断等领域中得到了应用。通过深度学习、大数据、云计算等技术,人工智能已经对传统学科产生了进一步的挑战。与金融、机械、医疗等领域相比,土木工程这一传统学科在人工智能的浪潮中显得相对滞后。如何实现对土木工程领域知识体系和设计方法的智能化升级,将为该领域带来新的机遇与挑战^[1]。因此,有学者指出,“人工智能化在设计方法上是工程系统设计的一个关键发展趋势”。

传统设计过程中,试错法(trial-and-error)是一种针对某一特定指标不达标的设计方案进行持续调试的方法。其目的是满足业主、建筑师、结构工程师、施工单位等多方的设计需求。通过参数化设计过程,上述的重复工作可以利用参数化技术来提高执行的效率。参数化设计过程中,引入一个或多个目标函数来约束设计方案以保证设计结果符合需求,通过调整设计参数获得优化后的设计结果。如此,通过对设计参数的分析和提取就可以得到一系列的目标解以及相应的解决方案。参数化自动生成方案的方法,在与优化算法相结合的情况下,能够替代传统的人工试错法设计模式。通过引入人工智能算法作为一种内嵌设计方案生成器,根据设计者提供的初始输入信息,通过不断迭代计算来确定相应约束条件下的最优设计方案。

事实上,结构智能设计的技术本质是建立在计算机技术之上的。实际应用中,通过建立人工智能模型进行分析和计算可以有效减少设计人员的工作量并提高工作效率。对于已知且相对明确的设计经验,结构工程师可以将其以代码方式保存在计算机中,从而直接参与智能设计算法规则的制定过程,具有更高的灵活性和适应性。此外,结构智能设计可以借助机器学习和其他数据驱动的经验学习方法,通过构建具有自适应能力的智能模型来辅助设计者进行方案设计。结构设计模型的智能化类似于抽象的建模机器,能够在相同的算法规则下不断生成不同的结构方案,从而生成大量的样本供机器学习使用。通过对设计过程中积累下来的历史数据和专家知识的挖掘与整理,有望构建出基于人工智能理论基础上的优化设计方案数据库。既有数据可为制定相关专家系统提供参考,为未来的设计工作积累宝贵

的经验,填补初学者设计经验的空白,降低机械操作所需的时间,提高结构设计的工作效率,并增强设计方案的经济效益和合理性。此外,对于新型复杂结构而言,由于其几何形状及材料属性都是未知且难以精确描述的,传统人工分析和修改已经远远不能满足现代设计需求。可以轻易地设想,如果设计师需要手动寻找更优的设计方案,那么构建一个能够进行全面方案比较的结构模型将会消耗大量的时间资源。将智能化技术与参数化建模技术相结合,有望进一步促进结构设计向智能化方向发展。

1.3 工程结构智能设计的基本内容

随着人工智能和计算机技术的快速发展,智能设计在土木工程领域中的应用越来越广泛。结构智能设计旨在利用人工智能技术自动化生成、评估和优化工程结构设计结果,从而提高设计效率和质量。本节简要介绍土木工程结构中智能设计的基本概念、关键技术和应用案例等方面内容。

1. 工程结构智能设计的基本概念

结构智能设计是指利用人工智能技术实现工程结构的自动化设计过程。通过将机器视觉、机器学习、机器推理、机器行为等技术应用于结构设计,实现结构形态的生成、参数优化和性能评估等目标。

相比传统的设计方法,结构智能设计的优势在于,结构智能设计可以显著提高设计效率,减少人为错误的发生,实现结构形态的多样性和创新性,适应多约束条件和多目标优化等。尽管结构智能设计有很多潜力和优势,但也面临一些挑战,如需要大量的训练数据和计算资源、模型的可解释性和适应性、算法的鲁棒性和健壮性等。

2. 工程结构智能设计的关键技术

1) 机器视觉技术

机器视觉技术能够利用图像处理和模式识别等技术,对工程结构的形态、材料和荷载进行分析 and 识别,从而实现结构形态的生成和参数化设计。

图像处理是计算机视觉的基础,通过对工程结构的图像进行预处理、增强和分割等操作,提取有用的信息。例如,可以利用图像处理技术对建筑物的外观进行分析,获取建筑物的基本几何形状和结构特征,如图 1-5 所示。

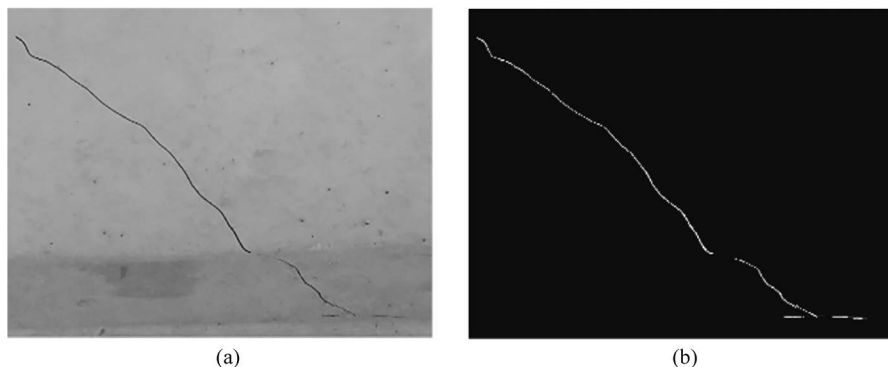


图 1-5 图像分割识别裂缝^[12]

(a) 原始图像; (b) 阈值法分割图像

通过图像处理技术,可以提取工程结构图像的特征,如边缘、角点、纹理等,如图 1-6 所示。提取的特征可以作为结构形态生成和参数优化的输入信息。

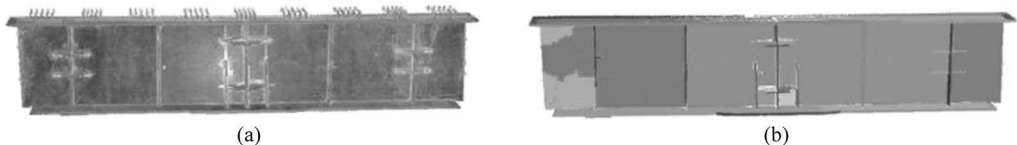


图 1-6 特征提取前后模型对比^[13]

(a) 模型处理前; (b) 模型处理后

模式识别是计算机视觉的核心任务之一,通过模型训练学习工程结构的规律和特征。例如,可以利用机器学习算法对大量工程结构图像进行分类和识别,以实现结构形态的自动化生成。

2) 机器学习技术

机器学习技术是工程结构智能设计中的核心技术之一。它可以通过对大量数据的学习和分析,实现结构设计的参数化和优化。机器学习是人工智能研究的一个主要组成内容,通常分为监督学习、无监督学习和强化学习,如图 1-7 所示。

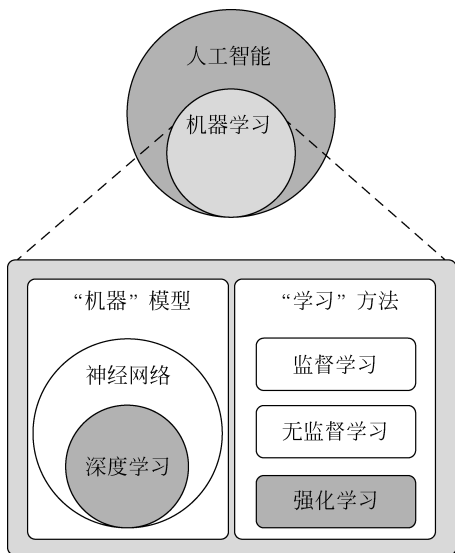


图 1-7 机器学习分类

监督学习是一种通过有标签数据学习输入和输出之间的映射关系的方法。在工程结构智能设计中,可以利用监督学习算法学习结构设计的规律和特征,实现结构参数的优化和预测。

无监督学习是一种不依赖于标记数据的学习方法,它可以自动发掘数据中的隐藏规律和结构。在工程结构智能设计中,可以利用无监督学习算法对结构的形态和特征进行聚类分析,帮助设计师生成新的结构形态。

强化学习是一种通过与环境的交互来学习最优策略的方法。在工程结构智能设计中,可以将结构设计过程看作一个强化学习问题,通过与评估器的交互,学习最优的结构设计

策略。

3) 进化算法

进化算法是一类模拟自然进化过程的优化算法,通过模拟生物进化中的选择、交叉和变异等操作,逐代迭代搜索最优解。在工程结构智能设计中,进化算法被广泛应用于结构参数的优化和形态的生成。

遗传算法是一种经典的进化算法,通过模拟生物的遗传机制,将问题的解表示为染色体,并利用选择、交叉和变异等操作,搜索最优解。在工程结构智能设计中,遗传算法可以用于结构参数的优化和形态的生成。

粒子群算法是一种模拟鸟群或鱼群行为的优化算法,通过模拟粒子的速度和位置更新,搜索最优解。在工程结构智能设计中,粒子群算法也主要用于结构设计参数的优化和形态的生成。

4) 多目标优化技术

工程结构设计优化过程通常涉及多个冲突的目标,如结构的安全性、经济性和可持续性。多目标优化技术可以在多个目标之间寻求平衡,生成一系列的 Pareto 最优解。

Pareto 最优解是指在多目标优化问题中,不能再改进一个目标值而不牺牲其他目标值的解。在工程结构智能设计中,通过多目标优化算法搜索 Pareto 最优解,从而在不同的优化目标之间做出权衡。

多目标优化算法有很多种,如遗传算法、粒子群算法、模拟退火算法等。这些算法通过不同的策略和操作,寻找 Pareto 最优解,如图 1-8 所示。

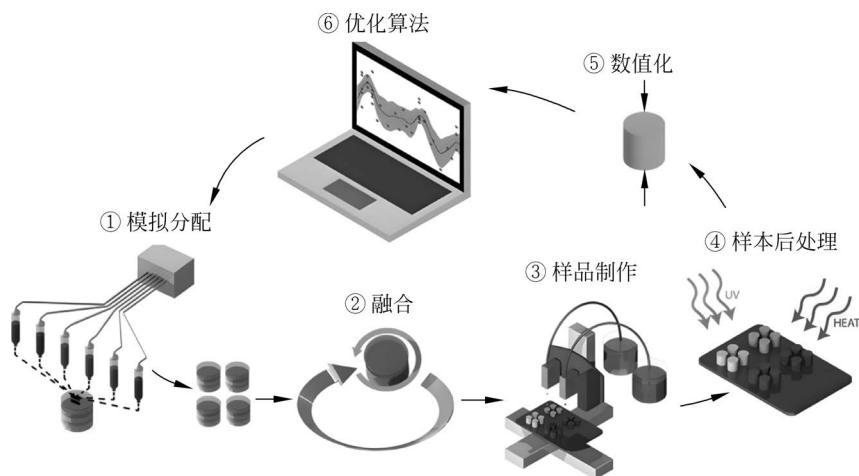


图 1-8 多目标优化技术

5) 结构性能评估技术

结构性能评估是工程结构智能设计的重要环节,它通过数值模拟或试验等手段,对设计结果进行性能评估,如结构的强度、刚度和稳定性等。结构性能评估可以作为优化算法的目标函数或约束条件。

数值模拟是一种利用数值方法对结构进行力学分析的技术,如有限元分析、离散元分析等。通过数值模拟,可以对结构的性能进行预测和评估。