



中国人工智能学会发展报告系列

——智能协同控制与人工智能

中国人工智能学会智能自适应协同优化控制专业委员会
编 制
二〇二三年九月

前言

随着科技的飞速发展，人工智能技术正成为推动社会和经济发展的关键驱动力。而智能协同控制作为人工智能技术的一个重要应用方向，为多智能体系统的协同工作和合作提供了强大的支持。从无人驾驶车辆到智能物流，从智能交通到机器人协同任务，智能协同控制正在不断拓展着应用领域的边界。智能协同控制作为一种创新的方法和理念，正在引领着各个领域的革新和进步。

本白皮书旨在深入探讨智能协同控制与人工智能技术的结合，从理论、方法和应用的角度，系统地阐述智能协同控制的概念、原理和发展趋势。我们将分享最新的研究成果和案例，探讨智能协同控制在解决复杂问题、优化整体性能和提高工作效率方面的潜力。

通过本白皮书，我们希望能够为社会各界人士打开深入了解智能协同控制的大门，探索多智能体系统中的协同与合作，以及人工智能技术在协同控制中的应用。我们相信，智能协同控制将成为未来智能化社会的重要支撑，为推动各行各业的发展和创新带来新的机遇和可能性。

最后，我们要感谢所有参与和支持本白皮书编写的专家、研究人员和业界伙伴，正是他们的努力和奉献，使得智能协同控制与人工智能技术发展得以深入探索和推动。我们也期待与您一起分享和讨论智能协同控制的未来，共同探索智能化时代的可能性。

目录

前言	I
目录	III
第 1 章 智能协同控制概述	1
1.1 引言	1
1.2 协同控制基础	1
1.2.1 协同控制定义	1
1.2.2 协同控制概念的发展	2
1.3 智能协同控制基础	2
1.3.1 智能协同控制概述	2
1.3.2 智能协同控制的发展历程	3
1.4 智能协同控制的典型特征	4
1.5 智能协同控制分类	5
1.6 智能协同控制与多智能体系统	6
1.6.1 多智能体系统	6
1.6.2 智能协同控制与多智能体的关系	7
第 2 章 智能协同控制研究现状	9
2.1 引言	9
2.2 智能协同控制概况	9
2.2.1 研究内容	9
2.2.2 主要应用	10
2.2.3 相关技术与核心思想	10
2.3 国内研究现状	12
2.3.1 科学研究	12
2.3.2 项目成果	15
2.3.3 存在的问题与挑战	17
2.4 国外研究现状	17
2.4.1 顶层规划	17

2.4.2 项目方面	19
2.4.3 科学研究	20
2.4.4 应用领域	20
第 3 章 协同控制算法	23
3.1 引言	23
3.2 基于任务分配的分类	23
3.2.1 集中式控制算法	23
3.2.2 分布式控制算法	24
3.3 协同过滤	26
3.3.1 定义	26
3.3.2 分类	26
3.3.3 协同过滤算法的优缺点	28
3.4 博弈论	30
3.4.1 定义	30
3.4.2 分类	30
3.4.3 经典的算法案例	30
3.5 机器学习	32
3.5.1 定义	32
3.5.2 分类	32
3.6 优化算法	38
3.6.1 定义	38
3.6.2 分类	38
第 4 章 行业发展概况	43
4.1 引言	43
4.2 智能协同控制在能源行业发展概况	43
4.3 智能协同控制在交通行业发展概况	46
4.4 智能协同控制在制造行业发展概况	48
4.5 智能协同控制在生物行业发展概况	50
4.6 智能协同控制在农业发展概况	51

4.7 智能协同控制在军事行业发展概况	54
第 5 章 典型应用案例	57
5.1 引言	57
5.2 分布式能源管理	57
5.3 自主车辆驾驶	60
5.4 无人机集群	65
5.5 多卫星任务	67
5.6 协作机器人	68
第 6 章 总结	71

第 1 章 智能协同控制概述

1.1 引言

随着信息技术的快速发展，各行各业的技术实现升级，极大的提高了生产力。在过去的几十年里，协同控制作为应用最为广泛的一种控制方式随着产业的升级在各行各业飞速发展，同时也随着技术的不断升级深度融合人工智能技术，迎来了智能协同控制的时代，无论是机器人协作、无人机编队、船舶导航等还是自动驾驶车辆、智能物流等场景，智能协同控制技术都发挥了重要的作用。

1.2 协同控制基础

1.2.1 协同控制定义

“协同系统(Cooperative System)”被定义为多个动态实体，它们共享信息或任务，以实现一个共同的(可能不止一个)目标。常见的协同控制系统包括：机器人系统、无人机编队、网络通信、交通系统等。协同的关键是沟通，通常表现为主动传递信息和被动观察，而协同的决策过程（控制）通常被认为是分布式或分散的。协同控制是指通过合作和协调的方式，对多个独立的智能体或系统进行控制，以实现整体性能优化。

在协同控制中，各个智能体或系统通过相互交流信息、共享知识和协同动作，以最佳的方式共同解决问题。协同控制(Cooperative Control)算法是一种多个动态实体或多个子系统进行协同工作的控制策略。它旨在实现系统各个动态实体或子系统之间的合作与协同，从而达到整体性能的优化或实现特定目标。术语“实体”通常与能够进行物理运动的交通工具（如机器人、汽车、船舶、飞机等）联系在一起，但是其定义实际上可以扩展表现出时间依赖行为的任何实体概念。在协同控制算法中，各个动态实体或子系统之间通过信息交互、协调和合作来共同完成任务，实现它们之间的协同决策和行动，从而有效地解决多个动态实体或子系统之间的冲突、资源分配、路径规划、任务分配等问题，提高整体系统的效率、鲁棒性和适应性。



图 1.1 协同控制系统

1.2.2 协同控制概念的发展

协同控制概念的发展可以追溯到控制理论和工程领域的早期研究，随着时间的推移，它逐渐演变和扩展为一个广泛的概念。以下是协同控制概念发展的主要里程碑：

分布式控制：早期的协同控制概念主要集中在分布式控制理论的研究中。分布式控制是指将系统控制任务分解为多个子任务，并将其分配给不同的控制器或智能体进行处理。这种方法通过将控制任务分布到多个独立的控制器上，以实现整体控制目标。

在分布式控制的基础上，协同控制理论逐渐建立起来。协同控制理论关注多个控制器或智能体之间的协同工作和合作，通过相互交流信息、共享知识和资源来实现整体性能的优化。

多智能体系统：随着智能系统与技术的发展，协同控制从最初的单体协同发展到多体协同，此后，随着多智能体系统的兴起，协同控制概念开始与多智能体系统的研究相结合。多智能体系统是指由多个相互作用的智能体组成的系统，它们可以通过协同控制实现合作、竞争和协调等行为。

自适应协同控制：自适应协同控制是指智能体通过感知和学习来适应环境和其他智能体的行为，并实时调整控制策略以实现优化的协同效果。自适应协同控制利用反馈机制和自适应算法，使得智能体能够根据环境的变化和系统的需求进行自主调整。

混合协同控制：混合协同控制是指将不同的控制方法和技术结合起来，以实现更复杂和高效的协同控制。这包括将传统的控制方法与人工智能、机器学习、优化算法等技术相结合，以处理复杂的多智能体系统和实现更高级的协同行为。

总结起来，协同控制概念的发展经历了从分布式控制到协同控制理论的建立，再到多智能体系统和自适应、混合协同控制的引入。多智能体系统的协同控制是协同控制发展过程的重要节点，自多智能体系统诞生以来，智能协同控制技术便在多智能体的基础上蓬勃发展起来，随着技术的不断进步和领域的发展，智能协同控制的概念将继续演变和丰富，并为实现复杂任务的多智能体系统提供更好的解决方案。

1.3 智能协同控制基础

1.3.1 智能协同控制概述

智能协同控制是一种通过多个智能体或系统之间的协作与协调，实现对特定任务或系统的控制和管理的方法。它涉及到将多个智能体的能力和知识集成在一起，以实现更高级别的控制和决策，应用于各种领域，例如工业自动化、交通管理、机器人技术等。在这些领域中，多个智能体（可以是机器人、传感器、控制系统等）通常需要协同工作，以完成复杂的任务或实现特定的目标。智能协同控制的关键是实现智能体

之间的有效通信和协作。这可以通过使用各种通信协议、共享信息和知识、协同决策等方式来实现。智能协同控制可以借助机器学习和人工智能技术，使智能体能够学习和适应不同的环境和任务，并根据需要进行自主决策。智能协同控制的优势在于能够提高系统的效率和性能，并且可以应对复杂和动态的环境。通过协同工作，多个智能体可以共同解决问题，提供更加灵活和智能的解决方案。然而，智能协同控制也面临一些挑战。例如，智能体之间的通信和协作可能会受到噪声、延迟或故障的影响。此外，智能体之间的目标可能存在冲突，需要进行冲突解决和协商。解决这些挑战需要设计合适的协同算法和机制，以确保系统的稳定性和可靠性。

总结起来，智能协同控制是一种通过多个智能体之间的协作和协调，实现对特定任务或系统的控制和管理的方法。它可以应用于各种领域，并提供高效、灵活和智能的解决方案。然而，为了充分发挥智能协同控制的优势，需要解决通信、协作和冲突解决等方面的挑战。

1.3.2 智能协同控制的发展历程

智能协同控制是一个多学科交叉的领域，其发展历史可以追溯到人工智能和控制领域过去几十年的研究和发展。

20世纪50年代至60年代初，人工智能的研究开始兴起，研究者们开始探索如何使用计算机具备类似人类智能的能力。在这个时期，早期的人工智能系统主要关注个体智能，即单个智能体的决策和控制能力。

早期研究（20世纪70-80年代）：智能协同控制的早期研究主要集中在分布式控制和协调问题上。该阶段的研究主要关注多个智能体之间如何共同工作以实现整体性能优化，如航空航天领域的飞行编队和协同控制。在这一时期研究者们提出了各种协同控制的概念和方法。

协同控制理论的建立（20世纪90年代）：随着互联网和计算机网络的普及，人们开始关注分布式控制和网络化控制。这种控制方式将控制任务分散到多个地理位置不同的智能体或系统中，通过网络进行通信和协调，实现整体控制目标。在这个时期，协同控制理论开始形成。研究人员开始探索多智能体系统的协同控制算法和方法，以实现合作和协调。协同控制理论的发展为智能协同控制提供了基础。

机器人领域的发展（21世纪初）：随着机器人技术的快速发展，智能协同控制在机器人领域得到广泛应用。例如，在多机器人系统中的协同任务执行、协同搜索和救援等方面进行了广泛的研究和实践。

人工智能的兴起（近年来）：近年来，随着人工智能技术的快速发展，智能协同控制与深度学习、强化学习等人工智能技术相结合，取得了更多的突破。这种结合使

得智能体能够更好地感知和理解环境，并做出更智能的决策和行动，从而实现更高效、灵活和自适应的协同控制。

实践应用的推广（近年来）：智能协同控制在各个领域得到了广泛的实践应用，如智能交通系统、无人驾驶车辆、智能物流和物联网等。这些应用推动了智能协同控制的进一步研究和发

展。总体而言，智能协同控制的发展历程经历了从早期研究到协同控制理论的建立，再到机器人领域的发展和人工智能技术的兴起。未来，随着技术的不断进步和实践应用的推广，智能协同控制将继续发展和演进，为实现更复杂、自主和智能化的系统提供支持。

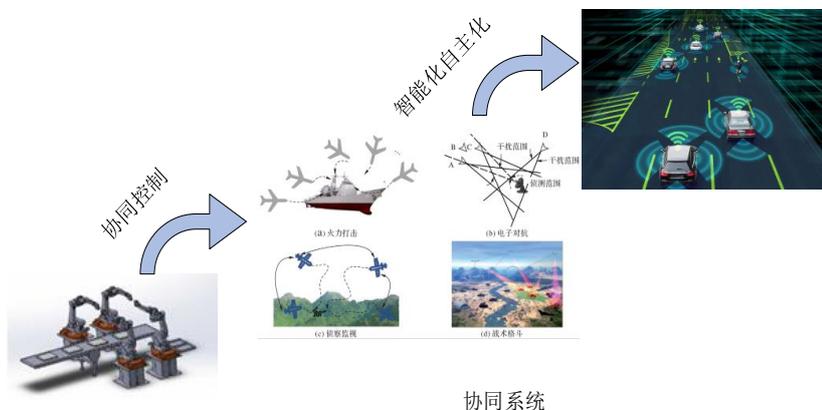


图 1.2 协同控制到智能协同控制的发展历程

1.4 智能协同控制的典型特征

智能协同控制能够有效地解决多个智能体或子系统之间的冲突、资源分配、路径规划、任务分配等问题，提高整体系统的效率、鲁棒性和适应性。智能协同控制的实现需要智能体之间具有通信和决策的能力。

协同控制主要涉及三个部分：

智能体动力学、智能体间相互作用、协同控制规律

协同控制的主要特点是具有多个智能体、异构性和非确定性等三个方面：

(1) 多智能体性

智能协同控制通常涉及多个智能体或系统的协同工作。这些智能体可以是机器人、无人机、传感器网络、自动驾驶车辆等。它们可以相互交流信息、共享知识和资源，并通过合作和协调实现共同目标。

(2) 通信和协调

智能协同控制需要智能体之间进行有效的通信和协调。智能体通过传递信息、共享感知数据和规划动作来相互交流，并协调各自的行动，以达到整体性能的优化。

(3) 分布式决策

智能协同控制中的每个智能体通常具有一定的决策能力，可以根据自身的感知和知识做出决策。这些智能体根据协同目标和环境情况，通过分布式的决策过程来确定自己的行动策略。

(4) 合作与竞争

智能协同控制中的智能体既需要合作又需要竞争。它们需要在协同工作中相互支持和协助，但有时也需要在资源有限或目标冲突的情况下进行竞争和协商。

(5) 自适应性和鲁棒性

智能协同控制需要智能体具有一定的自适应性和鲁棒性，能够适应环境的变化和不确定性。智能体需要根据感知和反馈信息，实时调整自己的决策和行动，以应对各种复杂和动态的情况。

这些典型特征使得智能协同控制成为解决复杂问题和优化整体性能的有效方法。

1.5 智能协同控制分类

智能协同控制可以按照不同的分类标准进行分类。以下是几种常见的分类方法：

(1) 基于控制结构和决策方式的分类

集中式协同控制：集中式协同控制指在一个系统中，由一个或多个中央控制节点对其他节点进行管理和控制。中央控制节点负责收集节点信息、制定决策并下发指令，其他节点则根据中央控制节点的指令执行任务。这种控制方式通常用于需要集中决策和协调的任务，中央控制节点具有较高的决策能力和控制权。

分布式协同控制：分布式协同控制指通过分布在不同地点的多个节点之间相互协作，共同实现任务或目标。在这种控制方式下，各个节点可以通过交换信息和共享数据来协调彼此的行动，以便达到整体优化或协同效应。

混合式协同控制：混合式协同控制结合了泛在分布式协同控制和局部集中式协同控制的特点。在这种控制方式下，系统中的节点既可以相互协作，又可以依赖中央控制节点进行整体协调。中央控制节点可以指导节点之间的通信和协作，同时也可以根据节点的反馈信息进行决策和调整。混合式协同控制通常能够兼顾分布式系统的灵活性和集中式系统的整体优化能力。

(2) 基于协同方式和交互方式的分类

合作式协同控制：在合作式协同控制中，智能体之间通过相互协作和合作来达到共同的目标。智能体之间可以交换信息、共享资源，并通过协同行动来实现整体优化。合作式协同控制强调团队合作和资源共享，以实现协同效应。

竞争式协同控制：在竞争式协同控制中，智能体之间存在竞争关系，它们通过相互竞争来实现整体性能的提升。智能体之间可能通过竞争资源、竞争任务或竞争奖励来激发协同行为。竞争式协同控制强调智能体之间的竞争与合作的平衡，以实现整体优化。

独立式协同控制：在独立式协同控制中，每个智能体都具有一定的自主决策能力和行动执行能力。虽然智能体之间不直接合作或竞争，但它们通过相互影响和调节来实现整体目标。独立式协同控制强调每个智能体的个体决策和行动对整体性能的影响。

混合式协同控制：混合式协同控制结合了不同协同方式的特点。在混合式协同控制中，智能体之间可以进行合作、竞争或独立决策，根据具体情况选择最优的协同方式。混合式协同控制能够充分利用不同协同方式的优势，以实现系统的整体优化和协调。

这些分类方法只是对智能协同控制进行了一种常见的分类方式，实际上，这些类别并不是完全独立的，通常智能协同控制系统可能会综合运用上述多种方式来实现复杂的控制任务。根据具体应用领域和需求，还可以有其他方式对智能协同控制进行分类。

1.6 智能协同控制与多智能体系统

1.6.1 多智能体系统

自然界中许多生物群系都是由大量个体组成。虽然个体功能简单，并且获取信息的方式单一，但它们成功凭借局部交互构成了复杂的群体行为，完成躲避捕食、寻找猎物和长途迁移等任务。集群作为一种集体行为，它最重要的特点便是从简单的局部规则演化为协调的全局行为。从系统学的角度看，群体行为具有自适应性、鲁棒性、分散性和自组织性等特点。

为了满足工程需要，美国麻省理工学院的 Minsky 提出了智能体(agent)的概念，并把生物界个体社会行为概念引入到计算机学科领域。多智能体系统是指由多个智能体组成的系统。每个智能体都有自己的感知、决策和行动能力，并且可以通过与其他智能体进行通信和协作来实现系统的控制目标。多智能体系统中的智能体可以分为两种类型：同质智能体和异质智能体。同质智能体具有相似的感知、决策和行动能力，可以根据相同的算法进行控制。异质智能体则具有不同的感知、决策和行动能力，需要根据不同的算法进行控制。多智能体系统具有分布式、并行、协同和自治等特点，可以应用于许多领域，如机器人控制、无人机编队、智能交通等。



图 1.3 集群行为

1.6.2 智能协同控制与多智能体的关系

智能协同控制与多智能体之间存在密切的关系。智能协同控制是指多个智能体或系统通过合作与协调实现共同目标的控制方式，而多智能体则是指这些相互独立的智能体或系统。

在智能协同控制中，多智能体系统中的每个智能体都具有一定的感知、决策和执行能力。这些智能体通过相互交流信息、共享知识和资源来实现协作与协调。智能体之间通过通信、协商和合作来共同解决问题，优化整体性能。

多智能体的关系可以表现为合作、竞争或合作与竞争的混合形式。在某些情况下，智能体之间需要相互合作，共同协同工作以实现共同目标。例如，在无人机协同搜索任务中，多个无人机需要协调搜索区域，避免重复搜索，提高搜索效率。

然而，有时智能体之间也可能存在竞争关系，例如在资源有限的情况下，多个机器人可能需要竞争获取资源，或者在目标冲突的情况下，智能体之间需要协商和决策如何分配任务和资源。

智能协同控制中的多智能体系统需要具备自适应性和鲁棒性，能够适应环境的变化和不确定性。智能体需要根据感知和反馈信息实时调整决策和行动，以适应变化的环境条件和其他智能体的状态。

总之，智能协同控制与多智能体之间是相辅相成的关系。多智能体系统通过智能协同控制的方式，实现智能体之间的合作与协调，从而达到优化整体性能和解决复杂问题的目标。

第2章 智能协同控制研究现状

2.1 引言

在现实世界中，许多系统都是由多个相互关联的子系统组成的，这些子系统之间存在着复杂的相互作用和依赖关系。传统的控制方法往往难以有效地处理这种复杂性，因此需要一种新的控制方法来实现系统的协同控制。随着人工智能技术的不断发展，智能体能够通过学习和适应来改进自身的行为，这为实现智能协同控制提供了可能。如今智能协同控制技术已成为科技领域的热门研究方向之一，本章将重点介绍智能协同控制技术的研究概况与国内外现状。

2.2 智能协同控制概况

智能协同控制是指通过智能化的方法，实现多个系统或机器之间的协同工作和控制。它通过系统或机器之间的信息交流和协作，实现任务的分配、资源的优化和决策的协同。它是人工智能、物联网、控制理论等多个领域的交叉应用，具有广泛的研究和应用前景。

2.2.1 研究内容

国内的高校、科研机构和企业积极开展智能协同控制技术的研究，涉及到机器人、交通、制造、农业、医疗等多个领域。智能协同控制核心内容包括协同感知、协同决策、协同控制/优化和协同学习等。随着近年来研究成果不断涌现，为智能协同控制技术的发展提供了坚实的基础。

(1) 协同感知

协同感知是指多个智能体之间共享感知信息，以实现对环境的全局感知。在智能协同控制中，智能体通过传感器获取环境的信息，并将这些信息与其他智能体进行共享。通过共享感知信息，智能体可以获得更全面和准确的环境状态，从而更好地适应和响应外部环境变化。协同感知可以通过点对点或广播方式实现信息交互，也可以利用网络进行分布式感知信息的传输和共享。

(2) 协同决策

协同决策是指多个智能体通过交流和合作，共同制定决策方案。在智能协同控制中，智能体之间可以通过交流和协商，共享感知信息和知识，并基于共同目标和约束条件，制定出更优的决策方案。协同决策可以采用不同的方法，如协商、博弈、合作搜索等。通过协同决策，智能体可以充分利用集体智慧和多样化的意见，提高整体系

统的决策质量和效果。

(3) 协同控制/优化

协同控制/优化是指多个智能体共同参与控制和优化过程，通过协作和协调来实现整体性能的最优化。在智能协同控制中，智能体之间通过交流和协商，制定统一的控制策略，并协同执行。协同控制可以涉及分布式控制、集群控制、协同任务分配等技术。同时，智能体之间可以通过协同优化的方式，共同寻求最优解。协同控制/优化可以提高系统的响应速度、稳定性和适应性，增强系统的鲁棒性和性能。

(4) 协同学习

协同学习是指多个智能体通过共享经验和知识，相互学习和交流，提高自身的学习能力和性能。在智能协同控制中，智能体可以通过共享学习的结果和经验，相互学习和协同进化。协同学习可以采用集体智能、群体学习、迁移学习等方法。通过协同学习，智能体可以不断改进和优化自身的控制策略，提高系统的适应性和鲁棒性。此外，协同学习还可以减轻单个智能体的学习负担，提高学习效率和性能。

通过这些内容，智能体可以共同感知环境、制定决策方案、协同控制和优化系统，并相互学习和提升能力，从而提高整体系统的性能和效果。

2.2.2 主要应用

智能协同控制技术已经在国内外得到了广泛的应用。在制造业中，智能协同控制技术被应用于自动化生产线、机器人协作等领域，提高了生产效率和质量。

在交通领域，智能协同控制技术被应用于交通信号灯控制、智能交通管理等领域，优化了交通流动，减少了交通拥堵。在农业、医疗、能源等领域，智能协同控制技术也得到了广泛的应用，提高了农田的精准种植和管理、手术的精确操作、电力的高效分配和管理等。

2.2.3 相关技术与核心思想

智能协同控制的关键技术包括智能体的感知与决策、通信与协作、任务分配与资源分配等。感知与决策技术用于智能体对环境的感知和决策的制定，通信与协作技术用于智能体之间的信息交流和协同工作，任务分配与资源分配技术用于将任务和资源分配给不同的智能体。

(1) 分布式协同控制技术

分布式控制技术是智能协同控制的基础，它可以将控制任务分配给多个节点进行处理，实现分布式的协同控制。分布式控制技术可以提高系统的稳定性、可靠性和可扩展性，降低通信负载和延迟。在以往研究中，分布式控制技术被广泛应用于多机器

人系统、智能电网等领域。

（2）局部集中式协同控制技术

局部集中式协同控制技术是一种在系统中使用集中式控制方法来实现协同控制的重要技术，在复杂系统的控制和管理中发挥着重要的作用。它通过将多个子系统或组件的控制集中在一个中央控制器中，以实现系统的协同工作。通过高效的通信、智能决策和协作机制，该技术可以提高系统的效率和性能，并简化系统的设计和管理。局部集中式协同控制技术在许多领域都有应用，例如工业自动化、交通系统和能源管理等。

（3）多智能体协同控制技术

在现代工业和社会生活中，大量的系统都是由多个智能体组成的复杂系统，这些智能体之间需要协同工作才能完成任务。然而由于每个智能体拥有不同的知识、技能和能力，协同工作常常面临着困难。为了解决这个问题，多智能体协同控制技术应运而生。多智能体协同控制是指多个智能体在一定的环境中通过相互协作，完成特定任务的过程，针对多智能体协同控制技术的研究方法主要包括仿真实验、理论分析和实际验证等。多智能体协同控制技术的主要目的是设计使多个独立智能体之间协作的策略，从而实现高效的任务完成。多智能体协同控制技术包括环境建模、通信协议的设计、决策协同、行为协同、控制结构、控制算法等方面。在多智能体协同控制中，每个智能体负责完成其中一部分任务，而其他智能体则协助完成其他任务，从而实现整体目标。多智能体系统中的智能体之间的协作可以采用不同的协同策略，如分工协同、互助协同等。

（4）网络通信技术

网络通信技术是智能协同控制的基础，它可以实现智能体之间的信息交流和协同工作。网络通信技术可以通过有线或无线方式进行数据传输，实现智能体之间的实时通信。网络通信技术被广泛应用于多机器人系统、智能电网等领域。

（5）智能算法技术

智能算法技术是实现智能协同控制的核心。智能算法技术包括遗传算法、粒子群算法、模糊控制等，可以通过对系统进行学习和优化，实现自适应、智能化的控制。在国内的研究中，智能算法技术被广泛应用于自主无人车队、多机器人系统、智能交通系统等领域。

（6）核心思想

智能协同控制的核心思想是通过智能体之间的通信和协作，实现任务的分配、资源的分配和决策的协同。智能体可以是机器人、无人驾驶车辆、传感器等具有感知和

决策能力的实体。智能协同控制可以通过局部集中式或分布式的方式实现，局部集中式方式中有一个中央控制器负责协调各个智能体的行为，将所有智能体的信息和决策集中在一个中心节点进行处理；而分布式方式则将信息和决策分散在各个智能体之间进行处理，各个智能体之间通过通信和协商来实现协同控制。

2.3 国内研究现状

目前，国内在智能协同控制方面的研究现状非常活跃。智能协同控制已经成为一个热门的研究方向并且在这方面的研究已经取得了一些重要成果。同时这一领域的研究对于解决复杂系统的控制问题具有重要意义。

2.3.1 科学研究

我国对于智能协同控制技术的研究主要关注智能系统之间的协同工作，包括智能机器人、智能交通系统、智能制造系统等。研究内容涉及协同感知、协同决策、协同控制/优化和协同学习等方面。我国智能协同控制的研究已经涉及到了多个领域，包括机器人控制、无人机编队控制、智能交通系统、电力系统等。研究者们致力于开发新的算法和方法，以提高智能体之间的协同效能和控制性能。我国智能协同控制技术的研究已经取得了显著的进展。

随着科技的飞速发展，机器人技术也愈加成熟。在各行业中，机器人已经开始逐渐代替人完成一些繁琐、危险的工作，成为工业生产中不可或缺的一部分。而多智能体系统与协同控制，正是机器人领域中的研究热点之一。

多智能体协同控制技术的研究是人工智能、机器人学、控制理论和分布式计算等领域交叉的一个前沿课题。其概念来源于群体智能与协同控制理论，并应用了多学科的知识。多智能体系统是指由多个智能体组成的系统，智能协同控制是实现这些智能体之间协同工作的关键技术。我国研究人员提出了多种智能协同控制方法，包括分布式控制、集中式控制、混合控制等，并且将多智能体协同控制技术广泛应用于多种领域，例如生产调度交通管理、智慧城市、环境监测等，取得了不错的效果。

多智能体系统，简称 **MAS**，指的是多个智能单元(机器人、无人机等)以及它们之间的协作关系，以实现共同的任务。在实际应用中，多智能体系统已经被广泛应用于电力系统、智能交通等领域，大大提高了生产效率以及安全性。而协同控制是多智能体系统的核心部分，它是指多个智能单元之间在进行任务时所协同的控制方法。在实际应用中，协同控制是智能单元之间相互协作，实现复杂任务的关键。

多智能体系统中，智能单元之间并不是独立的实体，它们之间的协作是通过通信实现的。通信所带来的优势是，可以和同步控制、分布式处理以及共享数据，从而使多智能体系统变得更加高效和智能。

智能协同控制技术在无人机系统中得到了广泛应用。我国研究人员提出了多种无人智能协同控制方法，包括集群控制、编队控制、协同搜索等。集群控制方法通过协调多个无人机的行为，实现集群的协同工作和控制。编队控制方法将多个无人机组织成一个编队，通过控制编队中的每个无人机的位置和速度，实现编队的协同运动和控制。协同搜索方法利用多个无人机的协同工作，实现对目标区域的搜索和监测。下图为同济大学智能车辆与多智能体协同控制实验室所作的多智能体编队导航实验，多机器人的编队导航技术是完成各种多体协同任务的前提条件，其主要目的是通过系统内部机器人之间局部的信息交互，使机器人能够形成并且维持一个特定的相对位置以及相对速度关系，实现队形保持、队形变化和速度等多机器人系统的基本功能、在军事领域，无人舰和无人机组成的异构机器人系统，能够完成协同作战，侦察和补给等任务，如大规模无人机蜂群作战，在民用领域，多机器人系统被广泛运用于野外位置环境建图，灾后救援等任务。

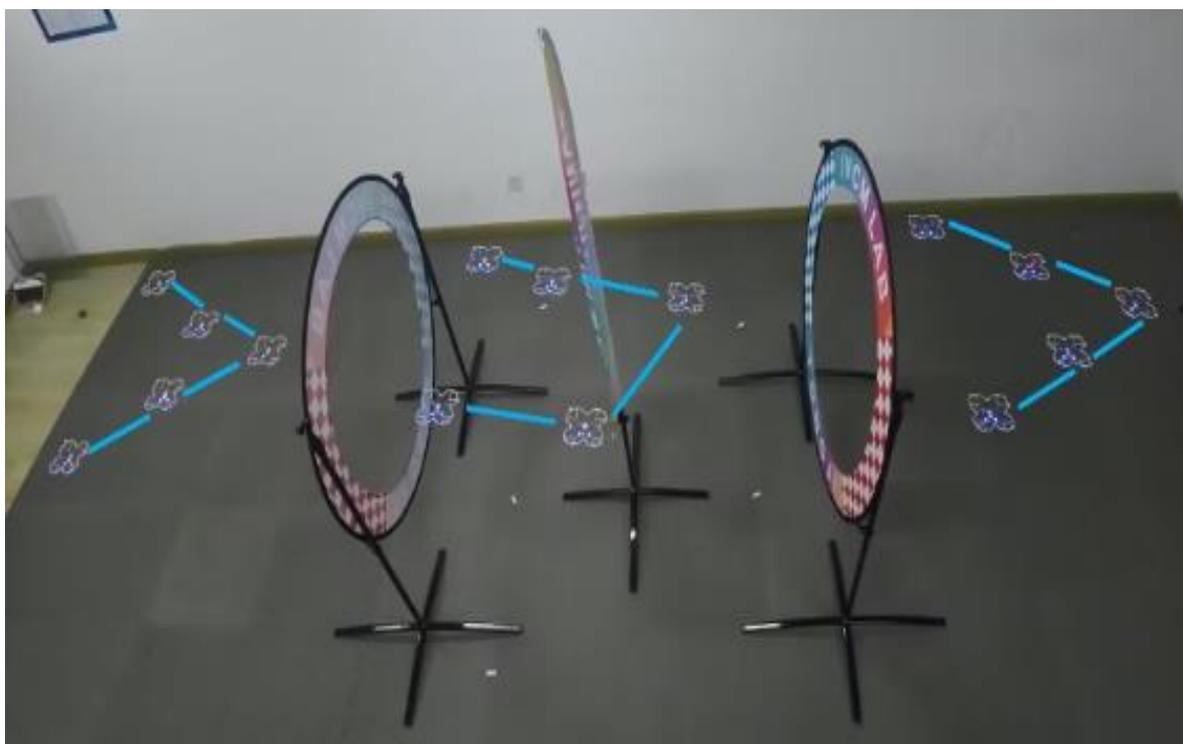


图 2.1 多智能体编队导航实验

在机器人领域我国研究人员提出了多种机器人智能协同控制方法，包括协作控制、协同定位、协同任务分配等。协作控制方法通过协调多个机器人的行为，实现机器人之间的协同工作和控制。协同定位方法利用多个机器人的传感器信息，实现对机器人

位置的协同估计和控制。协同任务分配方法将多个任务分配给多个机器人，通过协同工作和控制，实现任务的高效完成；自动驾驶系统是近年来备受关注的研究领域，我国研究人员在自动驾驶系统的智能协同控制方面也进行了大量的研究。例如，通过协同感知和协同决策算法，实现了自动驾驶车辆之间的协同行驶和协同交通管理。

对于多智能体系统中的协同控制来说，最常见的解决方案是去中心化控制。去中心化控制是指在多智能体系统中，不存在单个控制器，而是由多个智能单元相互协作完成任务。在去中心化控制的情况下，智能单元之间可以通过协议规定的方式，来达成共识，以实现任务的完成。这种协议可以基于角色、任务以及对特定信息的规定而定。

除了去中心化控制外，集中式控制也是多智能体系统协同控制的一种解决方案。集中式控制是指一个或多个智能单元作为中心节点，通过发送和接受消息，控制其他智能单元的行为以完成任务。但是，在多智能体系统中，集中式控制的优势相对去中心化控制来说并不明显。集中式控制瓶颈在于控制器可能会成为系统的瓶颈，而且格局的转移较为困难。相比之下，去中心化控制能够实现更高效的系统，能够更加简单地进行扩展。

尽管多智能体协同控制技术已经取得了很多成果，但依然存在着很多挑战和难点问题：

（1）通信协议的设计

在多智能体协同控制技术中，智能体之间的通信协议的设计对整个系统的性能至关重要。如何优化通信协议以减少通信时延提高信息传输的准确性和智能化，是需要攻克的核心问题。

（2）决策与行为的协同

由于每个智能体具有不同的知识、技能和能力，如何协调智能体之间的决策和行为，防止不稳定和崩溃等问题也是需要解决的关键难点。

（3）整体目标与个体优化的统一

一个优秀的多智能体协同控制系统需要保证整体目标的实现，同时也需要最大化个体的收益。如何平衡整体目标和个体优化之间的关系，是多智能体协同控制技术亟需解决的问题。

总的来说，多智能体协同控制技术是人工智能领域的一个重要研究方向，其具有广泛的应用前景。通过不断攻克挑战，多智能体协同控制技术有望在更广泛的领域中发挥重要作用。

2.3.2 项目成果

(1) 工业制造领域

我国的研究者们致力于开发智能协同控制技术，以提高工业制造系统的灵活性、效率和质量。例如，在智能机器人领域，我国的研究机构和企业已经推出了一系列能够实现协同操作的工业机器人系统。这些系统可以通过协同控制实现多个机器人之间的任务分配和协同操作，以提高生产效率。例如，2020年清华大学攻克高速多并联机器人协同作业系统的多项关键技术，该成果技术可应用于食品、医药、3C电子、新能源、日化用品、物流等行业，可大幅度提升生产效率，实现高效高稳定性生产。同时清华大学成功研制了满足高效生产的国产化成套装备，达到国际先进水平；另外，华为公司与华中科技大学合作开发了一种基于人工智能的智能协同机器人系统，可以实现多台机器人之间的协同作业和任务分配，提高生产效率和灵活性。

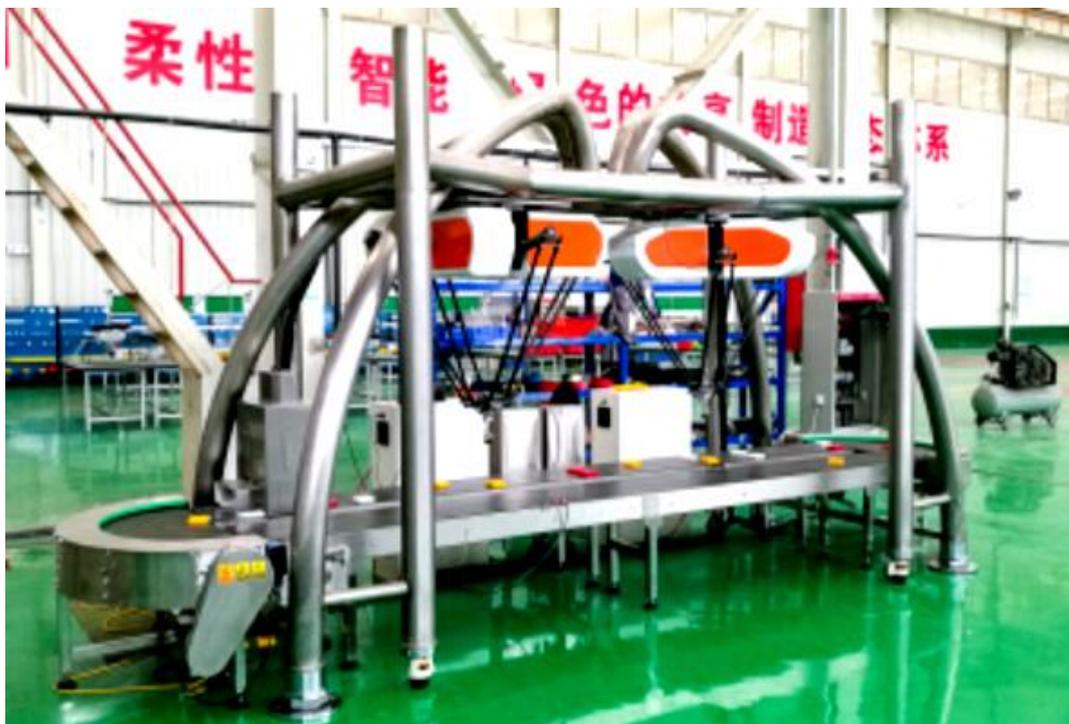


图 2.2 高速多并联机器人协同作业系统应用场景图

(2) 智能交通领域

智能交通系统是另一个重要的智能协同控制应用领域。在国内，研究人员通过网络通信技术和智能算法技术，实现了智能交通系统的协同控制。我国的研究者们致力于开发智能交通系统，通过车辆之间的协同控制和通信，实现交通流量的优化和拥堵的减少。此外，一些城市在智慧交通管理中也应用了智能协同控制的技术，如智能信号灯控制和交通调度系统。例如，北京交通大学开展了基于智能协同控制的交通信号灯优化研究。他们通过智能算法和交通数据分析，实现了交通信号灯的智能控制，以

减少拥堵并提高交通效率；上海交通大学的研究团队开发了一种基于车辆间通信和智能算法的交通协同控制系统，可以实现多车辆的协同驾驶，提高交通安全和流量效率。



图 2.3 智能协同控制技术在交通系统中的应用

(3) 智能电网领域

智能电网是能源管理领域的一个重要应用领域。研究人员通过分布式控制技术和智能算法技术，实现了智能电网的协同控制。例如，清华大学的研究团队开发了一种基于分布式控制和智能算法的智能电网协同控制系统，可以实现多个能源设备的协同运行，提高能源利用效率和环境友好性。多智能体一致性协调控制在电力系统中也很快得到发展，譬如，提出了有约束整合项的多智能体协同控制水滴优化方法，完成三相不平衡电网状态估计。又如，为使微网内部功率平衡实时调节控制，采取协调控制的方法合理对分布式电源出力调节。哈尔滨工业大学针对柔性直流互联孤岛微网群提出一种全新的分布式频率控制结构，并设计了与之匹配的协同控制策略。在该策略中，通过微网间的接口换流站来实现微网间频率调控目标，并利用微网内分布式单元间的协作解决了微网内频率恢复、备用容量精确分配等调控问题等。

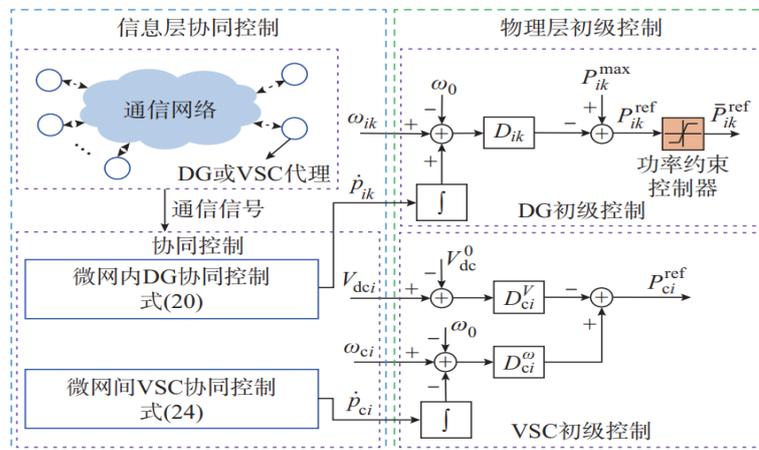


图 2.4 柔性直流互联孤岛微网群分布式频率控制器

(4) 农业领域

我国的农业智能化也借助了智能协同控制的技术。例如，我国农业大学开展了农业机器人智能协同控制的研究。他们研发了一种能够实现农业机器人之间协同作业的控制系统，可以提高农业生产效率和节约劳动力成本。

这些案例展示了我国智能协同控制研究在不同领域的应用和成果。通过智能算法和数据分析，实现了不同系统之间的协同操作和资源优化，提高了系统的整体性能和效率。随着技术的不断进步，我国的智能协同控制研究将继续发展，为各行各业带来更多的创新和应用。

综上所述，我国智能协同控制研究在科学研究和项目应用方面都取得了一定的进展。随着人工智能和物联网技术的不断发展，智能协同控制将在更多领域得到应用，并为社会经济发展带来更大的效益。

2.3.3 存在的问题与挑战

我国在智能协同控制方面取得了一些重要的进展，但仍然存在一些问题与挑战。

(1) 技术瓶颈

智能协同控制涉及多个学科领域的知识，技术研究面临着诸多挑战。例如，智能算法技术的研究需要解决算法设计、参数优化、性能评估等问题；多智能体系统技术的研究需要解决智能体之间的协同工作、通信协议等问题。目前，国内在智能协同控制领域的技术研究还存在一定的瓶颈，需要进一步加强基础研究和技术创新。

(2) 系统集成

智能协同控制涉及多个系统或机器之间的协同工作，系统集成是一个非常重要的问题。系统集成涉及到硬件设备的选择和配置、软件系统的设计和开发、通信协议的制定等。目前，国内在智能协同控制系统集成方面还存在一些问题，需要进一步加强多学科的合作和交流。

(3) 标准和规范

智能协同控制涉及到多个系统或机器之间的协同工作，需要制定相应的标准和规范来保证系统的互操作性和兼容性。目前，国内在智能协同控制标准和规范方面还存在一些问题，需要进一步加强标准化工作和规范制定。

2.4 国外研究现状

2.4.1 顶层规划

在美国，智能协同控制得到了政府的广泛支持和鼓励。美国政府通过制定智能制造政策，鼓励企业采用智能协同控制技术提高生产效率和产品质量。例如，美国国家

科学基金会（NSF）设立了智能制造和可持续制造计划，为智能协同控制技术的研发和应用提供资金支持；通过投资研发项目，支持智能协同控制技术的创新和应用。例如，美国国防高级研究计划局（DARPA）资助了一系列智能协同控制项目，旨在提高军事装备的自主性和协同能力；通过技术支持和培训计划，帮助企业 and 研究机构掌握智能协同控制技术。例如，美国国家标准与技术研究院（NIST）提供了智能制造测试床和技术指南，帮助企业实施智能协同控制系统；制定智能协同控制的法规和标准，保障技术的安全性和可靠性。例如，美国国家航空航天局（NASA）制定了智能协同控制系统的安全标准，确保航天器和机器人的协同工作不会对人类和环境造成危害。

2017 年英国政府发布了《工业战略白皮书》，将智能协同控制列为其中的重点领域之一。该战略旨在提高英国工业的竞争力，通过支持创新和技术发展来推动智能协同控制的应用。同时设立了技术创新基金，用于支持智能协同控制相关的研发和创新项目。该基金为企业 provide 资金支持，帮助他们开展研究和开发工作，推动智能协同控制技术的商业化和应用。英国政府鼓励企业之间和学术界之间的合作，共同推动智能协同控制的研究和应用。政府提供资金支持和资源整合，促进产学研合作，加速智能协同控制技术的商业化进程。

2018 年俄罗斯政府发布了《智能工业发展战略》，通过制定智能制造政策，鼓励企业采用智能协同控制技术提高生产效率和产品质量。通过投资研发项目，支持智能协同控制技术的创新和应用。例如，俄罗斯科学基金会（RFBR）和俄罗斯科技部（Ministry of Science and Technology）资助了一系列智能协同控制项目，旨在提高俄罗斯制造业的竞争力。同时通过技术支持和培训计划，帮助企业 and 研究机构掌握智能协同控制技术。

德国政府提出了“产业 4.0”战略，将智能协同控制作为该战略的核心内容之一。该战略旨在推动德国工业的数字化和智能化转型，通过支持技术创新和产业升级来促进智能协同控制的应用。德国政府设立了多个研发资金支持计划，用于支持智能协同控制相关的研究和创新项目，这些计划为企业 provide 资金支持，帮助他们进行研发工作，推动智能协同控制技术的商业化和应用。德国政府还积极参与制定智能协同控制的标准和规范，以确保技术的互操作性和安全性。政府与行业组织和研究机构合作，共同制定相关标准，为企业 provide 技术指导和支持。

日本政府一直致力于推动智能协同控制技术的发展。日本政府通过制定了一系列相关政策文件，明确了智能协同控制技术的重要性的发展方向；通过各种渠道提供资金支持，用于智能协同控制技术的研究和开发。在全国范围内建立了多个智能协同控制技术的研究中心和实验室，提供了研究设施和技术支持，为相关研究人员和企业提

供了良好的研发环境；积极参与智能协同控制技术的法律和标准制定工作，为相关技术的研发和应用提供法律保障和规范。政府还鼓励企业和研究机构参与国际标准的制定，推动技术的国际交流与合作。

2.4.2 项目方面

在智能协同控制的研究中，国外的研究项目涉及广泛的智能协同控制领域，有多机器人系统的协同控制、分布式能源系统的协同优化、智能交通系统的协同调度等。这些项目旨在通过智能体之间的协同合作，提高系统的整体性能。例如，欧洲的 Horizon 2020 计划资助了一系列智能协同控制项目，如 Co4Robots 项目和 ColRobot 项目，旨在实现工业机器人的协同操作和人机协作。此外，国外的大学和研究机构也开展了许多智能协同控制的项目，如自主无人机的协同控制、智能能源系统的协同优化等。英国在智能协同控制技术方面也进行了多项研究项目，包括"智能协同机器人系统"（2017 年至今）、"智能协同无人机系统"（2018 年至今）、"智能协同交通系统"（2019 年至今）等项目。



图 2.5 欧洲的 Horizon 2020 计划

美国在智能协同控制研究方面处于领先地位。美国的研究机构和大学在机器人协同控制、网络化控制系统和智能交通系统等领域取得了重要进展。斯坦福大学的机器人实验室和麻省理工学院的人工智能实验室都在机器人协同控制方面进行了深入研究。2019 年美国麻省理工学院（MIT）开发的智能协同控制系统 RoboRaise，旨在通过与人类工人合作完成物体搬运任务。该系统使用深度学习算法和传感器技术，能够准确地

理解人类工人的意图，并与其协同工作。2020 年斯坦福大学开发的 Distributed Flight Array 智能协同控制系统，旨在通过多个无人机的协同工作实现飞行。每个无人机都具有自主飞行和协同控制的能力，可以在空中组成不同的形态，以适应不同的任务需求。这些项目展示了近几年外国在智能协同控制领域的重要进展，它们利用人工智能、深度学习和传感器技术等先进技术，实现了智能系统与人类或其他智能体的高效协同工作。

同时，德国、日本以及英国在智能协同控制研究方面也有显著贡献。德国、日本和英国的研究机构和大学分别在工业自动化系统和能源系统协同控制、机器人协同控制和智能交通系统、网络化控制系统和智能交通系统等领域取得了重要进展。

2.4.3 科学研究

(1) 基于物联网的智能协同控制

国外研究者们将智能协同控制与物联网技术相结合，实现了多个物理设备之间的协同工作和控制。例如，在智能家居领域，通过物联网技术实现了家庭设备之间的智能协同控制，提高了家庭生活的便利性和舒适度。通过将家庭设备连接到物联网平台，实现了设备之间的信息共享和协同控制，使得家庭设备能够根据家庭成员的需求和环境的变化，自动调整工作状态。

(2) 基于机器学习的智能协同控制

国外研究者们通过机器学习算法，实现了多个系统之间的智能协同控制。例如，在交通运输领域，通过机器学习算法实现了多个交通信号灯之间的协同控制，提高了交通效率和安全性。通过分析交通流量数据和交通信号灯的状态，训练机器学习模型，使得交通信号灯能够根据交通流量的变化，自动调整信号灯的时长和配时方案，从而实现交通流畅和减少交通事故的目标。

2.4.4 应用领域

类似地，国外智能协同控制的研究已经涵盖了多个领域。在工业自动化领域，研究者们致力于设计协同控制策略，以实现多个机器人协同完成复杂任务。例如，有研究者提出了分布式协同控制方法，使得多个机器人能够共同合作完成物料搬运、装配等任务。在智能交通领域，智能协同控制可以实现车辆之间的协同调度和路径规划，从而提高交通流量的效率和安全性。在医疗卫生领域，智能协同控制可以实现医疗机器人的协同操作等。

总之，国内外智能协同控制的研究现状表明，大多数国家均对智能协同控制技术非常重视，给与了多方面的支持。同时通过研究智能协同控制技术，有利于实现系统

的高效工作和优化，同时为各个领域带来了许多应用和发展机会。这些研究工作对于提高系统的整体性能和解决复杂问题具有重要意义。

第3章 协同控制算法

3.1 引言

协同控制算法是一种在多个智能体或多个子系统之间进行协同工作的控制策略。它旨在实现系统中各个智能体或子系统之间的合作和协同，以达到整体性能的优化或其他特定目标。在协同控制算法中，各个智能体或子系统之间通过信息交互、协调和合作来共同完成任务。算法根据系统的需求和目标，利用传感器信息和相互之间的通信，实现智能体之间的协同决策和行动。协同控制算法可以应用于各种领域，包括机器人系统、无人机编队、网络通信、交通系统等。它能够有效地解决多个智能体或子系统之间的冲突、资源分配、路径规划、任务分配等问题，提高整体系统的效率、鲁棒性和适应性。常见的协同控制算法包括集中式和分布式控制、协同过滤、博弈论、机器学习和优化算法等。这些算法通过建立合适的模型和决策规则，使智能体或子系统能够相互感知、相互协调，并根据系统的需求进行决策和动作的调整。总的来说，协同控制算法是一种能够实现多个智能体或子系统之间合作与协调的控制策略，通过信息交互和协同决策，优化系统性能和实现特定目标。

3.2 基于任务分配的分类

3.2.1 集中式控制算法

(1) 定义

多智能体集中式控制的算法是一种常用的协作和协调方法，它通过中央控制器来协调智能体之间的行动，以实现系统的整体目标。顾名思义，集中式算法本质上可以看做是集中式控制：仅有一个控制中心，有一个或多个执行器。

集中式算法，系统的规模比较小时，集中式控制方案是一种高效的解决方式。通常应用在于环境变动较小，目标已明确且主体机器人功能突出的特殊情景，比如：疫情期间利用无人机和智能小车往小区派送物资等。

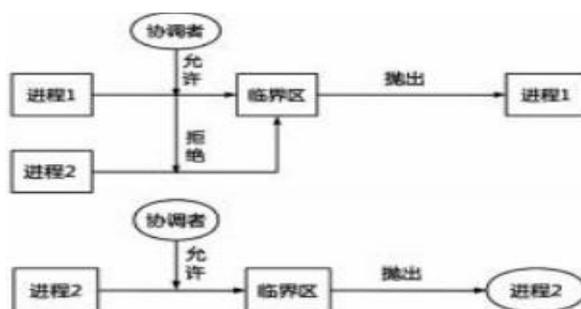


图 3.1 集中式算法

如图 3.1 所示，该算法中有一个协调者，不管何时某个进程需要加入临界点区，它都要给协调者发出一条请求消息，表示对它希望加入下一个临界点区域的请求许可。若当前尚无其他进程在该临界区，协调者将发出许可进入的应答消息。

(2) 算法的优缺点

优点：

如果没有进程，会处于永远待机状态(不会出现饿死的情况)，易于实现，因为每次通过一个临界区域仅需要3个消息(请求、允许和释放)；不但可以用来管理临界区域，还能够进行更一般的资源分配。

缺点：

如果协调者是一个单独的故障节点，一旦它崩溃了，整个网络系统也可能崩溃。在通常情形下，一旦进程在发出请求之后被阻止了，则请求者将无法分辨“拒绝进入”和协调者操作系统已经崩溃这二者状况，因此在上述的二者状况下均不会有消息返回。另外，在体量很大的操作系统中，对于一个协调者会形成性能的瓶颈。

3.2.2 分布式控制算法

(1) 定义

分布式控制算法是指将系统的控制任务分散到多个节点上执行，通过节点之间的通信和协作达到整体控制的目的。与传统的集中式算法相比，分布式控制算法具有更高的可靠性、可扩展性和适应性。

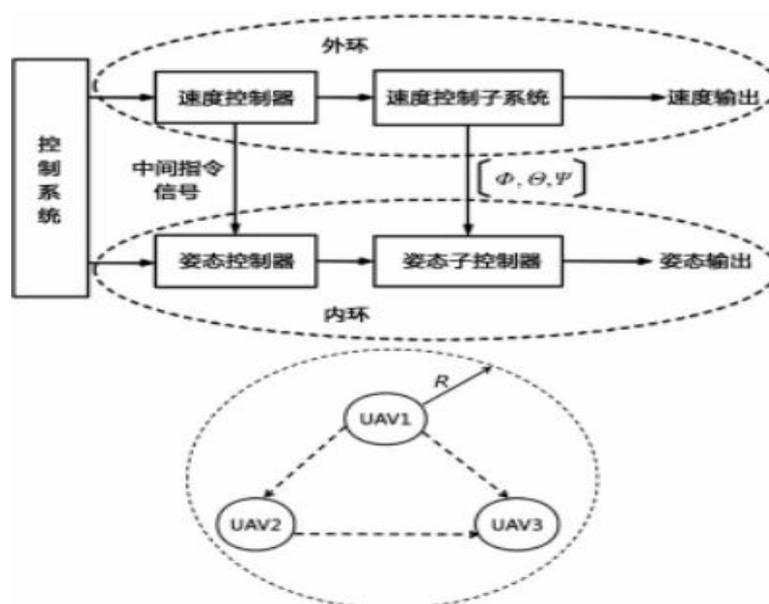


图 3.2 分布式算法

如图 3.2 所示，以无人驾驶飞行器群为例，UAV1 的无人机指挥官，在整个无人机

编队中起着指导与管理的重要角色，指导整个队伍沿着既定轨道航行，从而获得预期的目标定位，并与地面中心进行实时通讯。UAV2、UAV3 作为跟随机与地面站保持联系，不断接受无人指挥中心的指挥，且 2、3 之间进行实时通信，达到分布式控制目的。

(2) 分类

基于星型网络结构：所有节点都连接到一个中心节点，中心节点负责整个系统的协调和管理。

基于环形网络结构：所有节点按照环形连接，每个节点只与相邻两个节点通信。

基于树形网络结构：所有节点按照树形连接，每个节点只与其父亲和子孙通信。

基于网格网络结构：所有节点按照网格形连接，每个节点只与相邻四个或六个节点通信。

(3) 基于任务类型分类

分布式协同任务：多个智能体共同完成一个任务，需要协调合作。

分布式竞争任务：多个智能体互相竞争完成一个任务，需要竞争策略。

分布式优化任务：多个智能体通过相互协作来优化某一指标。

(4) 分布式控制算法的实现

基于传统控制算法的分布式实现：将传统的集中式控制算法改造成分布式控制算法，通过节点之间的通信和协作来实现整体控制。

基于协同控制算法的分布式实现：将系统分解成多个子系统，每个子系统由一个节点负责，通过协同合作来完成整体控制任务协同过滤算法。

基于自治智能体的分布式实现：每个节点都是一个自治智能体，自主决策和学习能力，通过相互协作来完成整体控制任务。

(5) 常见的分布式控制算法

分布式模型预测控制(DMPC)：将系统建模为一个动态模型，并通过模型预测来进行控制决策。

分布式最优化控制(DOC)：将系统建模为一个优化问题，并通过多个节点之间的通信和协作来求解最优解。

分布式强化学习(DRL)：每个节点都是一个智能体，具有自主决策和学习能力，并通过相互协作来完成整体控制任务。

分布式事件触发控制(DETC)：根据系统状态变化情况触发控制决策，减少节点之间的通信开销。

(6) 算法的优缺点

优点：

可靠性高：分布式控制算法可以通过节点之间的协作来实现容错和冗余，提高系统的可靠性。

可扩展性好：随着系统规模的增大，可以通过增加节点来扩展系统规模，而不需要改变整体架构。

适应性强：分布式控制算法可以根据不同的任务类型和网络拓扑结构进行灵活配置和调整。

缺点：

通信开销大：由于需要节点之间频繁通信和协作，通信开销较大，影响系统效率。

算法复杂度高：分布式控制算法需要考虑节点之间的相互影响和协作，在算法设计上较为复杂。

系统部署难度大：分布式控制算法需要在多个节点上同时部署和运行，需要考虑节点之间的兼容性和稳定性问题。

3.3 协同过滤

3.3.1 定义

协同过滤（Collaborative Filtering）推荐算法是最经典、最常用的推荐算法。所谓协同过滤，基本思想是根据用户之前的喜好以及其他兴趣相近的用户的选择来给用户推荐物品（基于对用户历史行为数据的挖掘发现用户的喜好偏向，并预测用户可能喜欢的产品进行推荐），一般是仅仅基于用户的行为数据（评价、购买、下载等），而不依赖于项的任何附加信息（物品自身特征）或者用户的任何附加信息（年龄，性别等）。目前应用比较广泛的协同过滤算法是基于邻域的方法。

3.3.2 分类

协同过滤主要有下面两种算法：

基于用户的协同过滤算法(UserCF)：推荐和用户兴趣相似的其他用户喜欢的产品。

基于物品的协同过滤算法(ItemCF)：给用户推荐和他之前喜欢的物品相似的物品。

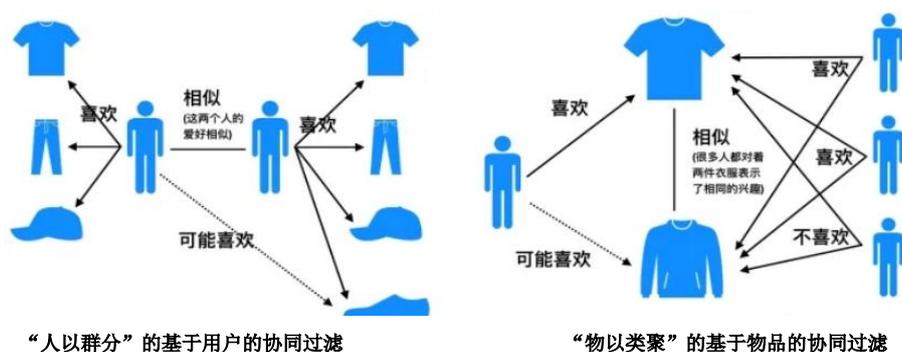


图 3.3 两种协同过滤算法对比

UserCF 算法主要包括两个步骤:

- (1) 找到和目标用户兴趣相似的集合
- (2) 找到这个集合中的用户喜欢的, 且目标用户没有听说过的物品推荐给目标用户。

上面的两个步骤中, 第一个步骤里面, 我们会基于前面给出的相似性度量的方法找出与目标用户兴趣相似的用户, 而第二个步骤里面, 如何基于相似用户喜欢的物品来对目标用户进行推荐呢? 这个要依赖于目标用户对相似用户喜欢的物品的一个喜好程度, 那么如何衡量这个程度大小呢? 为了更好理解上面的两个步骤, 下面拿一个具体的例子把两个步骤具体化。

以下图为例, 此例将会用于本文各种算法中

	物品1	物品2	物品3	物品4	物品5
Alice	5	3	4	4	?
用户1	3	1	2	3	3
用户2	4	3	4	3	5
用户3	3	3	1	5	4
用户4	1	5	5	2	1

图 3.4 用户对物品喜爱程度打分

给用户推荐物品的过程可以形象化为一个猜测用户对商品进行打分的任务, 上面表格里是 5 个用户对于 5 件物品的一个打分情况, 就可以理解为用户对物品的喜欢程度。

应用 UserCF 算法的两个步骤:

首先根据前面的这些打分情况 (或者说已有的用户向量) 计算一下 Alice 和用户 1, 2, 3, 4 的相似程度, 找出与 Alice 最相似的 n 个用户

根据这 n 个用户对物品 5 的评分情况和与 Alice 的相似程度会猜测出 Alice 对物品 5 的评分, 如果评分比较高的话, 就把物品 5 推荐给用户 Alice, 否则不推荐。

关于第一个步骤, 上面已经给出了计算两个用户相似性的方法, 这里不再过多赘述, 这里主要解决第二个问题, 如何产生最终结果的预测。

最终结果的预测:

根据上面的几种方法, 我们可以计算出向量之间的相似程度, 也就是可以计算出 Alice 和其他用户的相近程度, 这时候我们就可以选出与 Alice 最相近的前 n 个用户, 基于他们对物品 5 的评价猜测出 Alice 的打分值。

协同过滤

基于物品的协同过滤(ItemCF)的基本思想是预先根据所有用户的历史偏好数据计算

物品之间的相似性，然后把与用户喜欢的物品相类似的物品推荐给用户。比如物品 a 和 c 非常相似，因为喜欢 a 的用户同时也喜欢 c，而用户 A 喜欢 a，所以把 c 推荐给用户 A。ItemCF 算法并不利用物品的内容属性计算物品之间的相似度，主要通过分析用户的行为记录计算物品之间的相似度，该算法认为，物品 a 和物品 c 具有很大的相似度是因为喜欢物品 a 的用户大都喜欢物品 c。

基于物品的协同过滤算法主要步骤：

根据物品的相似度和用户的历史行为给用户生成推荐列表（购买了该商品的用户也经常购买的其他商品）

基于物品的协同过滤算法和基于用户的协同过滤算法很像，所以我们这里直接还是拿上面图 3.4 那个例子来看。

如果想知道 Alice 对物品 5 打多少分，基于物品的协同过滤算法会这么做：

首先计算一下物品 5 和物品 1, 2, 3, 4 之间的相似性（它们也是向量的形式，每一列的值就是它们的向量表示，因为 ItemCF 认为物品 a 和物品 c 具有很大的相似度是因为喜欢物品 a 的用户大都喜欢物品 c，所以就可以基于每个用户对该物品的打分或者说喜欢程度来向量化物品）；

找出与物品 5 最相近的 n 个物品；

根据 Alice 对最相近的 n 个物品的打分去计算对物品 5 的打分情况。

3.3.3 协同过滤算法的优缺点

前面对协同过滤算法做了比较完备的讲解，也提到了协同过滤算法的一些特点，这里我们简单罗列一些协同过滤算法的优缺点，方便大家更进一步深入了解协同过滤算法。

优点：

协同过滤算有很多优点，总结下来最大的优点有如下几个

(1) 算法原理简单、思想朴素

从前面的几节讲解中不难看出，协同过滤算法的实现非常简单，只要懂简单的四则混合运算，了解向量和矩阵的基本概念就可以理解算法的原理。估计在整个机器学习领域，没有比这个算法更直观简单的算法了。

协同过滤的思想是简单的“物以类聚，人以群分”的思想，相信大家都可以理解，正因为思想朴素，所以算法原理简单。

(2) 算法易于分布式实现、可以处理海量数据集

协同过滤算法可以非常容易利用 Spark 分布式平台来实现，因此可以通过增加计算节点很容易处理大规模数据集。

（3）算法易于工程化实现

协同过滤算法是得到工业界验证过的一类重要算法，在 Netflix、Google、Amazon 及国内大型互联网公司都有很好的落地和应用。

（4）能够为用户推荐出多样性、新颖性的物品

前面讲到协同过滤算法是基于群体智慧的一类算法，它利用群体行为来做决策。在实践中已经被证明可以很好地为用户推荐多样性、新颖性的标的物。特别是当群体规模越大，用户行为越多，推荐的效果越好。

（5）协同过滤算法只需要用户的行为信息，不依赖用户及标的物的其他信息

从前面的算法及工程实践中大家可以知道，协同过滤算法只依赖用户的操作行为，不依赖具体用户相关和标的物相关的信息就可以做推荐，往往用户信息和标的物信息都是比较复杂的半结构化或者非结构化的信息，处理起来很不方便。这是一个极大的优势，正因为这个优势让协同过滤算法在工业界大放异彩。

缺点：

除了上面介绍的这些优点外，协同过滤算法也存在一些不足的方面，具体来说，在下面这些点，协同过滤算法存在软肋，有提升和优化的空间。

（1）冷启动问题

协同过滤算法依赖用户的行为来为用户做推荐，如果用户行为少（比如新上线的产品或者用户规模不大的产品），这时就很难发挥协同过滤算法的优势和价值，甚至根本无法为用户做推荐。这时可以采用基于内容的推荐算法作为补充。

另外，对于新入库的标的物，由于只有很少的用户操作行为，这时相当于用户行为矩阵中该标的物对应的列基本都是零，这时无法计算出该标的物的相似标的物，同时，该标的物也不会出现在其他标的物的相似列表中，因此无法将该标的物推荐出去。这时，可以采用人工的策略将该标的物在一定的位位置曝光，或者强行以一定的比例或者概率加入推荐列表中，通过收集该标的物的行为解决该标的物无法被推荐出去的问题。

（2）稀疏性问题

对于现代的互联网产品，用户基数大，标的物数量多（特别是新闻、UGC 短视频类产品），一般用户只对很少量的标的物产生操作行为，这时用户操作行为矩阵是非常稀疏的，太稀疏的行为矩阵计算出的标的物相似度往往不够精准，最终影响推荐结果的精准度。

3.4 博弈论

3.4.1 定义

博弈论是研究决策者在特定情境下做出决策的一种数学方法，在博弈论中，决策者被称为玩家，他们的决策会影响其他玩家的利益。博弈论通过建立各种博弈模型，分析不同决策对于各个玩家利益的影响，从而提供研究优化方案，博弈论的应用非常广泛，可以应用研究竞争、合作、交互等各种情形。

3.4.2 分类

博弈论被分成两大类，合作与不合作。合作博弈和非合作博弈的区别在于相互发生作用的当事人之间有没有一个具有约束力的协议，如果有，就是合作博弈，如果没有，就是非合作博弈。

第一种是智能体之间完全合作的场景，表示为多智能体具有一个相同收益函数的博弈形式，成为团队博弈，这也是合作型多智能体强化学习的基础研究框架。

第二个场景则为智能体之间的完全竞争关系，典型形式为零和博弈，智能体之间具有零和收益关系。第三种场景是一般和博弈，对这种场景 Nash 均衡是标准的解形式。下面则对于基本的博弈形式分别进行介绍。在 1928 年，冯·诺依曼已经奠定了非合作博弈论。同时，在 1951 年，纳什提出了另一个概念，作为概括冯·诺依曼理论的基础。在他的文章中，双人游戏的解决方案对于战略的最低要求就是候选人，作为一个对战略的最低要求是对两个人的游戏解决方案的候选人，他建议每个策略都要给对方最好的答复。是为纳什均衡理论。

3.4.3 经典的算案例

合作博弈经典案例（财产分配、Shapley 值）

（1）问题：有一个三人财产分配问题：假定财产为 100 万元，这 100 万在三人之间进行分配。a 拥有 50% 的决定权，b 拥有 40% 的决定权，c 拥有 10% 的决定权。规定，当超过 50% 的同意时，才能获得整个财产，否则三人将一无所获。

（2）Shapley 值的思想

- 目的在一个大联盟 N 中，根据给定不同方式 S 对应的贡献函数 V ，得出最优利益分配(成本分摊)方案。

- 思想

参与者所应获得的效益 $x(i)$ 等于该参与者对每一个它所参与的联盟的边际贡献的期望值

Shapley值是边际盈利向量的算数平均：

N代表大联盟，v代表收益函数。
注：参与者可以组成任意的小联盟S。

博弈(N,v)的SHAPLEY值将大联盟的利益v(N)按照下述公式进行分摊：

w(S)表示概率，总和为1。

$$x_i(v) = \sum_{S \subseteq N} w(S) [v(S) - v(S - i)]; w(S) = \frac{(s-1)!(n-s)!}{n!}$$

对于联盟中的参与者i
的利益分配函数。

对于不同的S的边际收益。
即参与者加入系统而带来的收益。

其中，s表示联盟S中的参与人个数，v(∅)=0。

(3)

▶ 参与人A的分配计算

S	A	AB	AC	ABC
V(S)	10	70	50	100
V(S\{A})	0	10	10	40
V(S)-V(S\{A})	10	60	40	60
S	1	2	2	3
(n- S)!(S -1)!	2	1	1	2
W(S)	1/3	1/6	1/6	1/3
φ _A (V)	40			

同理可计算出参与人B、C的分配值

$$\varphi_B(V) = 35, \varphi_C(V) = 25$$

故三人分配为 A30 万元，B35 万元,C25 万元。
非合作博弈

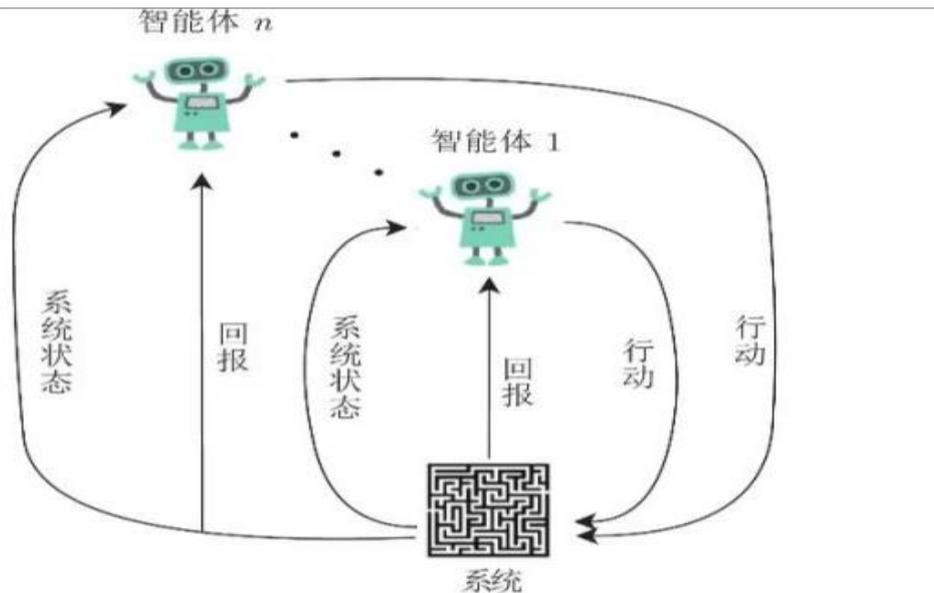


图 3.5 非合作的多智能体博弈

N 表示所有博弈者的标号构成的集合，S 表示所有博弈者所处“环境”或“系统”的

状态集, A_i 表示博弈者 $i \in N$ 的行动集, $r_i: S \times A \times S \rightarrow R$ 表示博弈者 $i \in N$ 的收益函数或回报函数(Reward function), $P: S \times A \rightarrow \mathcal{V}(s)$ 表示状态转移概率分布函数, Γ 表示博弈进行的时间集, $A: \pi_i \in N_{A_i}$, $\mathcal{V}(s)$ 表示集合 S 上的所有概率分布构成的集合。在随机博弈进行的每个阶段, 系统将处于状态集 S 中的某一个状态 $s \in S$ 。随后, 依赖系统当前的状态 $s \in S$, 每个博弈者 $i \in N$ 将根据它的策略(Policy) $\pi_i: S \rightarrow A_i$ 从其有效的行动空间 A_i 中选择一个行动 $\pi_i(s) = a_i \in A_i$ 。当所有博弈者执行完它们的行动之后, 博弈将会产生两方面的结果。一方面, 取决于系统当前的状态 $s \in S$ 以及所有博弈者在当前阶段采取的行动 $a \in A$, 系统将以概率 $P(s'|s, a)$ 从当前的状态 $s \in S$ 转移到下一阶段的另一个状态 $s' \in S$ 。另一方面, 作为所有博弈者行动和系统状态转移的结果, 每个博弈者 $i \in N$ 将从当前阶段的博弈中获得一个即时的收益值或回报值 r_i 。

3.5 机器学习

3.5.1 定义

一个计算机程序被称为可以学习, 是指它能够针对某个任务 T 和某个性能指标 P , 从经验 E 中学习。这种学习的特点是, 它在 T 上被 P 所衡量的性能, 会随着经验 E 的增加而提高。

3.5.2 分类

(1) 从学习方式分类

算法对一个问题建模的方式很多, 可以基于经历、环境, 或者任何我们称之为输入数据的东西。机器学习和人工智能的教科书通常会让你首先考虑算法能够采用什么方式学习。实际上, 算法能够采取的学习方式或者说学习模型只有几种, 下面我会一一说明。对机器学习算法进行分类是很有必要的事情, 因为这迫使你思考输入数据的作用以及模型准备过程, 从而选择一个最适用于你手头问题的算法。

监督学习:

输入数据被称为训练数据, 并且每一个都带有标签, 比如“广告/非广告”, 或者当时的股票价格。通过训练过程建模, 模型需要做出预测, 如果预测出错会被修正。直到模型输出准确的结果, 训练过程会一直持续。常用于解决的问题有分类和回归。常用的算法包括逻辑回归和 BP 神经网络。

常用的监督型学习方法举例

K-近邻算法 (k-Nearest Neighbors, KNN)

K-近邻是一种分类算法, 其思路是: 如果一个样本与特征空间中的K个最相似(即

特征空间中最邻近)的样本中的大多数属于某一个类别, 则该样本也属于这个类别。K 通常是不大于20的整数。KNN算法中, 所选择的邻居都是已经正确分类的对象。该方法在定类决策上只依据最邻近的一个或者几个样本的类别来决定待分类样本所属的类别。

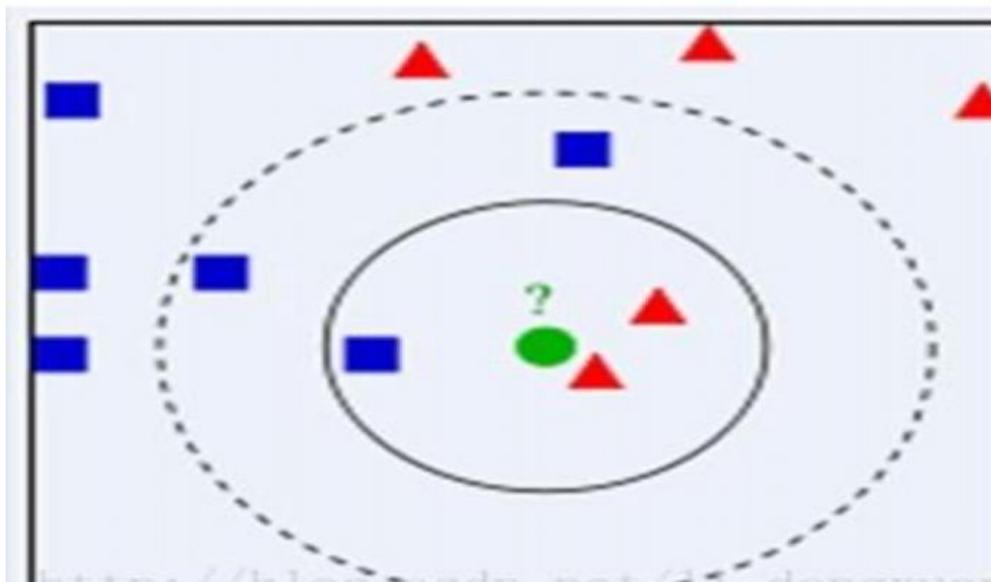


图 3.6 K-近邻算法计算流程

如上图, 绿色圆要被决定赋予哪个类, 是红色三角形还是蓝色四方形? 如果 $K=3$, 由于红色三角形所占比例为 $2/3$, 绿色圆将被赋予红色三角形那个类, 如果 $K=5$, 由于蓝色四方形比例为 $3/5$, 因此绿色圆被赋予蓝色四方形类。

算法的步骤为:

- (i) 计算测试数据与各个训练数据之间的距离;
- (ii) 按照距离的递增关系进行排序;
- (iii) 选取距离最小的 K 个点;
- (iv) 确定前 K 个点所在类别的出现频率;
- (v) 返回前 K 个点中出现频率最高的类别作为测试数据的预测分类。

无监督学习:

输入数据没有标签, 输出没有标准答案, 就是一系列的样本。无监督学习通过推断输入数据中的结构建模。这可能是提取一般规律, 可以通过数学处理系统地减少冗余, 或者根据相似性组织数据。常用于解决的问题有聚类、降维和关联规则的学习。常用的算法包括 Apriori 算法和 K 均值算法。

Apriori 的算法的应用

下面这个表格显示的是一个事务数据库 D,

Tid	项目集
1	面包, 牛奶, 啤酒, 尿布
2	面包, 牛奶, 啤酒
3	啤酒, 尿布
4	面包, 牛奶, 花生

图 3.7 事务数据库

其中最小支持度为 50%，最小置信度为 70%，求事务数据库中的频繁关联规则。

Apriori 算法的步骤如下所示：

(1) 生成候选频繁 1-项目集 $C_1 = \{\{\text{面包}\}, \{\text{牛奶}\}, \{\text{啤酒}\}, \{\text{花生}\}, \{\text{尿布}\}\}$ 。

(2) 扫描事务数据库 D，计算 C_1 中每个项目集在 D 中的支持度。从事务数据库 D 中可以得出每个项目集的支持数分别为 3,3,3,1,2，事务数据库 D 的项目集总数为 4，因此可得出 C_1 中每个项目集的支持度分别为 75%，75%，75%，25%，50%。根据最小支持度为 50%，可以得出频繁 1-项目集 $L_1 = \{\{\text{面包}\}, \{\text{牛奶}\}, \{\text{啤酒}\}, \{\text{尿布}\}\}$ 。

(3) 根据 L_1 生成候选频繁 2-项目集 $C_2 = \{\{\text{面包, 牛奶}\}, \{\text{面包, 啤酒}\}, \{\text{面包, 尿布}\}, \{\text{牛奶, 啤酒}\}, \{\text{牛奶, 尿布}\}, \{\text{啤酒, 尿布}\}\}$ 。

(4) 扫描事务数据库 D，计算 C_2 中每个项目集在 D 中的支持度。从事务数据库 D 中可以得出每个项目集的支持数分别为 3,2,1,2,1,2，事务数据库 D 的项目集总数为 4，因此可得出 C_2 中每个项目集的支持度分别为 75%，50%，25%，50%，25%，50%。根据最小支持度为 50%，可以得出频繁 2-项目集 $L_2 = \{\{\text{面包, 牛奶}\}, \{\text{面包, 啤酒}\}, \{\text{牛奶, 啤酒}\}, \{\text{啤酒, 尿布}\}\}$ 。

(5) 根据 L_2 生成候选频繁 3-项目集 $C_3 = \{\{\text{面包, 牛奶, 啤酒}\}, \{\text{面包, 牛奶, 尿布}\}, \{\text{面包, 啤酒, 尿布}\}, \{\text{牛奶, 啤酒, 尿布}\}\}$ ，由于 C_3 中项目集 $\{\text{面包, 牛奶, 尿布}\}$ 中的一个子集 $\{\text{牛奶, 尿布}\}$ 是 L_2 中不存在的，因此可以去除。同理项目集 $\{\text{面包, 啤酒, 尿布}\}$ 、 $\{\text{牛奶, 啤酒, 尿布}\}$ 也可去除。因此 $C_3 = \{\{\text{面包, 牛奶, 啤酒}\}\}$ 。

(6) 扫描事务数据库 D，计算 C_3 中每个项目集在 D 中的支持度。从事务数据库 D 中可以得出每个项目集的支持数分别为 2，事务数据库 D 的项目集总数为 4，因此可得出 C_3 中每个项目集的支持度分别为 50%。根据最小支持度为 50%，可以得出频繁 3-项目集 $L_3 = \{\{\text{面包, 牛奶, 啤酒}\}\}$ 。

(7) $L = \{\{\text{面包}\}, \{\text{牛奶}\}, \{\text{啤酒}\}, \{\text{尿布}\}, \{\text{面包, 牛奶}\}, \{\text{面包, 啤酒}\}, \{\text{牛奶, 啤酒}\}, \{\text{啤酒, 尿布}\}, \{\text{面包, 牛奶, 啤酒}\}\}$ 。

(8) 我们只考虑项目集长度大于 1 的项目集, 例如{面包, 牛奶, 啤酒}, 它的所有非真子集{面包}, {牛奶}, {啤酒}, {面包, 牛奶}, {面包, 啤酒}, {牛奶, 啤酒}, 分别计算关联规则{面包} \rightarrow {牛奶, 啤酒}, {牛奶} \rightarrow {面包, 啤酒}, {啤酒} \rightarrow {面包, 牛奶}, {面包, 牛奶} \rightarrow {啤酒}, {面包, 啤酒} \rightarrow {牛奶}, {牛奶, 啤酒} \rightarrow {面包}的置信度, 其值分别为 67%, 67%, 67%, 67%, 100%, 100%。由于最小置信度为 70%, 可得, {面包, 啤酒} \rightarrow {牛奶}, {牛奶, 啤酒} \rightarrow {面包}为频繁关联规则。也就是说买面包和啤酒的同时肯定会买牛奶, 买牛奶和啤酒的同时也是会买面包。

由这个例子可以看出 Apriori 主要是根据 最小支持度来判断, 最后逐步递进。

半监督学习:

半监督学习的输入数据包含带标签和不带标签的样本。半监督学习的情形是, 有一个预期中的预测, 但模型必须通过学习结构整理数据从而做出预测。常用于解决的问题是分类和回归。常用的算法是所有对无标签数据建模进行预测的算法 (即无监督学习) 的延伸。

(2) 从功能角度分类

研究人员常常通过功能相似对算法进行分类。例如, 基于树的方法和基于神经网络的方法。这种方法也是我个人认为最有用的分类方法。不过, 这种方法也并非完美, 比如学习矢量量化 (LVQ), 就既可以被归为神经网络方法, 也可以被归为基于实例的方法。此外, 像回归和聚类, 就既可以形容算法, 也可以指代问题。

回归算法:

回归分析是研究自变量和因变量之间关系的一种预测模型技术。这些技术应用于预测时间序列模型和找到变量之间关系。回归分析也是一种常用的统计学方法, 经由统计机器学习融入机器学习领域。“回归”既可以指算法也可以指问题, 因此在指代的时候容易混淆。实际上, 回归就是一个过程而已。常用的回归算法包括:

普通最小二乘回归 (OLSR) 线性回归、逻辑回归、逐步回归、多元自适应回归样条法 (MARS)、局部估计平滑散点图 (LOESS)。

基于实例的学习算法:

基于实例的学习通过训练数据的样本或事例建模, 这些样本或事例也被视为建模所必需的。这类模型通常会建一个样本数据库, 比较新的数据和数据库里的数据, 通过这种方式找到最佳匹配并做出预测。换句话说, 这类算法在做预测时, 一般会使用相似度准则, 比对待预测的样本和原始样本之间的相似度, 再做出预测。因此, 基于实例的方法也被称之为赢家通吃的方法 (winner-take-all) 和基于记忆的学习 (memory-based learning)。常用的基于实例的学习算法包括: k-邻近算法 (kNN)、学习矢量量

化算法（LVQ）、自组织映射算法（SOM）、局部加权学习算法（LWL）

正则化算法：

正则化算法背后的思路是，参数值比较小的时候模型更加简单。对模型的复杂度会有一个惩罚值，偏好简单的、更容易泛化的模型，正则化算法可以说是这种方法的延伸。我把正则化算法单独列出来，原因就是它们十分受欢迎、功能强大，而且能够对其他方法进行简单的修饰。常用的正则化算法包括：

- (1) 岭回归
- (2) LASSO 算法
- (3) Elastic Net
- (4) 最小角回归算法（LARS）
- (5) 决策树算法

决策树算法的目标是根据数据属性的实际值，创建一个预测样本目标值的模型。训练时，树状的结构会不断分叉，直到作出最终的决策。也就是说，预测阶段模型会选择路径进行决策。决策树常被用于分类和回归。决策树一般速度快，结果准，因此也属于最受欢迎的机器学习算法之一。常用的决策树算法包括：

- (1) 分类和回归树（CART）
- (2) ID3 算法
- (3) C4.5 算法和 C5.0 算法（它们是一种算法的两种不同版本）
- (4) CHAID 算法
- (5) 单层决策树
- (6) M5 算法
- (7) 条件决策树
- (8) 贝叶斯算法

贝叶斯方法指的是那些明确使用贝叶斯定理解决分类或回归等问题的算法。常用的贝叶斯算法包括：

朴素贝叶斯算法、高斯朴素贝叶斯算法、多项式朴素贝叶斯算法、AODE 算法、贝叶斯信念网络（BBN）、贝叶斯网络（BN）

聚类算法：

聚类跟回归一样，既可以用来形容一类问题，也可以指代一组方法。聚类方法通常涉及质心（centroid-based）或层次（hierarchal）等建模方式，所有的方法都与数据固有的结构有关，目标是将数据按照它们之间共性最大的组织方式分成几组。换句话说，算法将输入样本聚成围绕一些中心的数据团，通过这样的方式发现数据分布结构

中的规律。常用的聚类算法包括：K-均值、K-中位数、EM 算法、分层聚类算法关联规则学习。

关联规则学习在数据不同变量之间观察到了一些关联，算法要做的就是找出最能描述这些关系的规则，也就是获取一个事件和其他事件之间依赖或关联的知识。常用的关联规则算法有：Apriori 算法、Eclat 算法、人工神经网络。

人工神经网络是一类受生物神经网络的结构及/或功能启发而来的模型。它们是一类常用于解决回归和分类等问题的模式匹配，不过，实际上是一个含有成百上千种算法及各种问题变化的子集。人工神经网络指的是更加经典的感知方法。常用的人工神经网络包括：反向传播算法（BP 神经网络）Hopfield 网络。

径向基函数网络（RBFN）、深度学习算法：

深度学习算法是人工神经网络的升级版，充分利用廉价的计算力。近年来，深度学习得到广泛应用，尤其是语音识别、图像识别。深度学习算法会搭建规模更大、结构更复杂的神经网络，正如上文所说，很多深度学习方法都涉及半监督学习问题，这种问题的数据一般量极大，而且只有很少部分带有标签。常用的深度学习算法包括：

深度玻尔兹曼机（DBM）、深度信念网络（DBN）、卷积神经网络（CNN）、栈式自编码算法（Stacked Auto-Encoder）。

降维算法：

降维算法和聚类有些类似，也是试图发现数据的固有结构。但是，降维算法采用的是无监督学习的方式，用更少（更低维）的信息进行总结和描述。降维算法可以监督学习的方式，被用于多维数据的可视化或对数据进行简化处理。很多降维算法经过修改后，也被用于分类和回归的问题。常用的降维算法包括：

（1）主成分分析法（PCA）、主成分回归（PCR）、偏最小二乘回归（PLSR）、萨蒙映射；

（2）多维尺度分析法（MDS）、投影寻踪法（PP）、线性判别分析法（LDA、混合判别分析法（MDA）、二次判别分析法（QDA）、灵活判别分析法（Flexible Discriminant Analysis, FDA）。

模型融合算法：

模型融合算法将多个简单的、分别单独训练的弱机器学习算法结合在一起，这些弱机器学习算法的预测以某种方式整合成一个预测。通常这个整合后的预测会比单独的预测要好一些。构建模型融合算法的主要精力一般用于决定将哪些弱机器学习算法以什么样的方式结合在一起。模型融合算法是一类非常强大的算法。常用的模型融合增强方法包括：

Boosting、Bagging、AdaBoost、堆叠泛化（混合）、GBM 算法、GBRT 算法、随机森林等。

3.6 优化算法

3.6.1 定义

最优化问题指，基于某种思想或机制，通过一定的途径或规则得到满足用户要求的问题的解的过程，同时找到函数的最小值和最大数。这个函数可以是一个特定的输出，比如利润或成本，或者是某一个输入变量的函数，我们最终目的是找到使得这个目标最小或者最大的输入量。优化算法就是用于逐步改进设计，直到无法再对其进行改进或达到预算时间或成本为止。

3.6.2 分类

优化算法有很多，关键是针对不同的优化问题。例如可行解变量的取值（连续还是离散）、目标函数和约束条件的复杂程度（线性还是非线性）等，应用不同的算法。

1、对于连续和线性等较简单的问题，可以选择一些经典算法，如梯度、Hessian 矩阵、拉格朗日乘数、单纯形法、梯度下降法等。

2、对于更复杂的问题，则可考虑用一些智能优化算法，如遗传算法和蚁群算法，此外还包括模拟退火、禁忌搜索、粒子群算法等。

采用最优化算法解决实际问题主要分为下列两步：

(1) 建立数学模型。对可行方案进行编码（变量），约束条件以及目标函数的构造。

(2) 最优值的搜索策略。在可行解（约束条件下）搜索最优解的方法，有穷举、随机和启发式搜索方法。

最优化算法有三要素：变量（Decision Variable）、约束条件（Constraints）和目标函数（Objective function）。最优化算法，其实就是一种搜索过程或规则，它是基于某种思想和机制，通过一定的途径或规则来得到满足用户要求的问题的解。

优化问题相关算法有如下分类：

(1) 精确算法（绝对最优解）

精确算法包括线性规划、动态规划、整数规划和分支定界法等运筹学中的传统算法，其算法计算复杂性一般很大，只适合于求解小规模问题，在工程中往往不实用。

(2) 启发式算法（近似算法）

启发式方法指人在解决问题时所采取的一种根据经验规则进行发现的方法。其特点是在解决问题时，利用过去的经验，选择已经行之有效的方法，而不是系统地、以

确定的步骤去寻求答案。

领域搜索算法。从任一解出发，对其领域的不断搜索和当前解的替换来实现优化。根据搜索行为，它又可分为局部搜索法和指导性搜索法。

局部领域搜索法（也称爬山法）。以局部优化策略在当前解的领域中贪婪搜索，如只接受优于当前解的状态作为下一当前解的爬山法，接受当前邻域中的最好解作为下一当前解的最陡下降法等。

指导性搜索法。利用一些指导规则来指导整个解空间中优良解的探索，如 SA、GA、EP、ES 和 TS 等。

个体启发（寻找相对最优）

特点：每次输出的是相同的。从一个解开始，寻找最优，易陷入局部最优。

爬山算法：

算法思想：从当前的节点开始，和周围的邻居节点的值进行比较。如果当前节点是最大的，那么返回当前节点，作为最大值(即山峰最高点)；反之就用最高的邻居节点替换当前节点，从而实现向山峰的高处攀爬的目的。

其实就是，在初始值的附近，找到最大的一个。

优点：

容易理解，容易实现，具有较强的通用性；局部开发能力强，收敛速度很快

缺点：

全局开发能力弱，只能搜索到局部最优解；搜索结果完全依赖于初始解和邻域的映射关系。

禁忌算法(Tabu Search, TS)：

基本思想：基于爬山算法的改进，标记已经解得的局部最优解或求解过程，并在进一步的迭代中避开这些局部最优解或求解过程。局部搜索的缺点在于，太过于对某一局部区域及其邻域的搜索，导致一叶障目。为了找到全局最优解，禁忌搜索就是对于找到的一部分局部最优解，有意识地避开它，从而或得更多的搜索区域。

特点：

- 1 避免在搜索过程中的循环；
- 2 只进不退的原则，通过禁忌表实现；
- 3 不以局部最优作为停止准则；
- 4 邻域选优的规则模拟了人类的记忆功能；

禁忌表：用于防止搜索出现循环。

记录前若干步走过的点、方向或目标值，禁止返回。

表是动态更新的。

表的长度称为 Tabu-Size。

禁忌表的主要指标（两项指标）。

禁忌对象：禁忌表中被禁的那些变化元素。

禁忌长度：禁忌的步数。

禁忌对象（三种变化）：

以状态本身或者状态的变化作为禁忌对象。

以状态分量以及分量的变化作为禁忌对象。

采用类似的等高线做法，以目标值变化作为禁忌对象。

禁忌长度：可以是一个固定的常数($T=c$),也可以是动态变化的，可按照某种规则或公式在区间内变化。

禁忌长度过短，一旦陷入局部最优点，出现循环无法跳出；

禁忌长度过长，候选解全部被禁忌，造成计算时间较大，也可能造成计算无法继续下去。

贪婪算法

从问题的某一个初始解出发逐步逼近给定的目标，以尽可能快地求得更好的解。

当达到算法中的某一步不能再继续前进时，算法停止。

举例：单源路径中的 Dijkstra 算法

求 A 到其他节点的最短路径：

基本都要先排序，从排序的开始那个依次判断，符合就留下不符合就去掉。

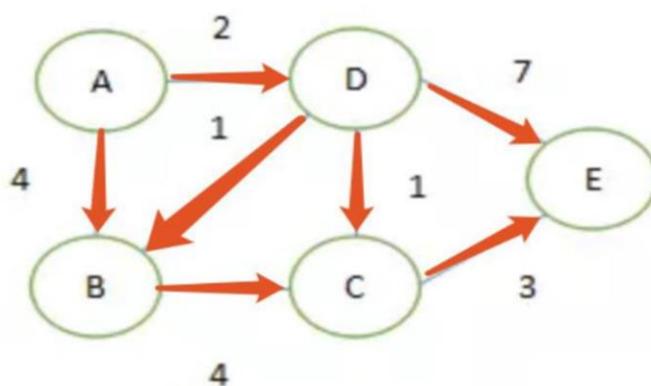


图 3.8 最短路径

从 A 到其他节点的路径长度队列 Queue，数组 visited 用于记录已保存最短路径的节点，数组 res 用于记录节点 A 到其他节点的最短路径。

开始时，Queue 中只有 A 节点，三组数据如下：

Queue: [(A, 0)] 起始节点为 A，A 到 A 的距离为 0

visited: [true, false, false, false, false] A 节点是已经访问过的节点，是 true，其他节点是 false

res: [0, ∞ , ∞ , ∞ , ∞] A 到自己的距离是 0，到其他节点的距离目前是 ∞

将以 A 为起点的路径加入到 Queue 中，2 和 4 是节点 D 和 B 的路径权重：

Queue: [(D, 2), (B, 4)]

visited: [true, false, false, false, false]

res: [0, ∞ , ∞ , ∞ , ∞]

在 Queue 中，路径最短的是 D，取出 D，更新三组数据：

Queue: [(B, 3), (C, 3), (E, 9)]

因为 A-D-B 的路径权重为 3 小于 A-B 的路径权重 4，所以更新一下 B 的路径权重。

visited: [true, false, false, true, false]

res: [0, ∞ , ∞ , 2, ∞]

取出 B，更新三组数据：

Queue: [(C, 3), (E, 9)]

visited: [true, true, false, true, false]

res: [0, 3, ∞ , 2, ∞]

取出 C，更新三组数据：

Queue: [(E, 6)]

visited: [true, true, true, true, false]

res: [0, 3, 3, 2, ∞]

取出 E，更新三组数据：

Queue: []

visited: [true, true, true, true, true]

res: [0, 3, 3, 2, 6]

至此，Queue 队列空，计算过程结束。

模拟退火(simulated annealing, SA):

模拟退火算法作为局部搜索算法的扩展，在每一次修改模型的过程中，随机产生

一个新的状态模型，然后以一定的概率选择邻域中能量值大的状态。这种接受新模型的方式使其成为一种全局最优算法，并得到理论证明和实际应用的验证。SA 虽然在寻优能力上不容置疑，但它是以严密的退火计划为保证的，具体地讲，就是足够高的初始温度、缓慢的退火速度、大量的迭代次数及同一温度下足够的扰动次数。

用兔子的故事来说：兔子喝醉了。随机地跳了很长时间。这期间，它可能走向高处，也可能踏入平地。但是，渐渐清醒了并朝它踏过的最高方向跳去。这就是模拟退火。

其实就是，先用初始值进行随机更新，记录每次更新的值，最后取历史记录中最大的值。

参考：模拟退火算法、群体智能（全局最优）。

类别：粒子群算法(PSO)、蚁群算法(ACO)、人工蜂群算法(ABC)、人工鱼群算法(AFSA)、混洗蛙跳算法(SFLA)、烟花算法(FWA)、细菌觅食优化(BFO)、萤火虫算法(FA)

特点：全局寻优每次的解都不同时间较长智能计算包括：

进化算法（EC）：如遗传算法、模糊逻辑群智能(SI)算法、人工免疫系统(AIS)人工神经网络(ANN)。

智能协同控制控制算法最初在多智能体研究领域提出并广泛应用，常用于多智能体的编队控制、趋同控制、蜂拥控制以及聚集等问题。近几年，协同性控制尤其里面的优化控制算法中的 ADP（自适应动态规划算法）方法应用到了在多智能体优化控制和电力系统的方向。

第4章 行业发展概况

4.1 引言

2023年，随着深度学习技术的突破，我国人工智能产业飞速发展，相关专利申请数量和专利权人数量呈现井喷增长态势，各个产业的从业者对于人工智能技术的市场价值已经有了更为清晰的认识。人工智能既是推进经济发展的新型引擎，又是引领未来社会的战略产业。目前产业整体处于快速成长期，具有明显的“风口”特征，大量资本涌入，几乎每季度都有非常多的初创公司诞生，众多传统产业也纷纷布局这一领域。当前，人工智能正在与实体经济中的各行各业快速融合，助力产业转型升级、提质增效。

传统行业的智能化升级是推动实体经济高质量发展的关键，新型智能协同控制技术相互融合交汇，为各个行业创造出以数据流引导人员流、物流、能源流、资金流以及监管流运转的商业规则，同时也令各行业创造出各自的“+智能”模式，形成“资产优化-运营创新-模式变革”的行业变迁形态，成就商业新范式。

行业智能控制技术架构融合5G、人工智能、物联网等新型数字技术，构成“+智能”平台，通过智能分析、决策和辅助行动，助力实现各行各业的跨越式发展，是焕发产业潜力与价值的路径。通过“技术-场景-技术-场景...”循序渐进，不断积累、学习、发展，最终达到行业每个场景的智慧化。

智能体系统的应用正以惊人的速度发展，随着大数据技术、传感器技术、认知计算技术、机器学习和深度学习等技术的不断发展，现在大多数智能体系统应用都采用多智能体协同技术。总的来说，多智能体系统与协同控制的发展将会使智能单元之间的协作更加紧密，未来随着科技的发展，多智能体系统也将有更广泛的应用。

鼓励在能源、交通、制造、农业、军事等重点行业深入挖掘人工智能技术应用场景，促进智能经济高端高效发展。制造领域优先探索机器人协助制造、机器视觉工业检测、设备互联管理等智能场景。农业领域优先探索农机卫星导航自动驾驶作业、农业地理信息引擎、智能农场、无人机植保、农业生产物联监测等智能场景。物流领域优先探索物料搬运、智能立体仓储以及追溯终端等智能场景。总之，智能体系统的多智能体协同控制技术在现今不同应用领域中发挥着独特的作用，可为我们生活带来自动化、智能化和便携化，从而极大地提升社会福祉水平。

4.2 智能协同控制在能源行业发展概况

能源是实现“双碳”目标最基本的支撑，是核心，是关键。2030年前碳达峰行动

方案要求，到2030年，非化石能源消费比重达到25%左右，迫使各地区必须加快能源结构调整和能源系统变革，加快构建清洁低碳安全高效的新型能源体系。能源和电力系统作为国家发展的支柱性产业和核心动力，与人们的生活息息相关。油气、电力等关系到国计民生的行业，存在全产业链降低成本、安全运营、高效管理、提升综合竞争力等要求。智慧能源系统用数字技术对传统能源网络进行改造，构建资产中心，以数据流引领和优化能量流，实现能源供需信息的实时匹配和智能响应，以及全作业周期的安全高效。

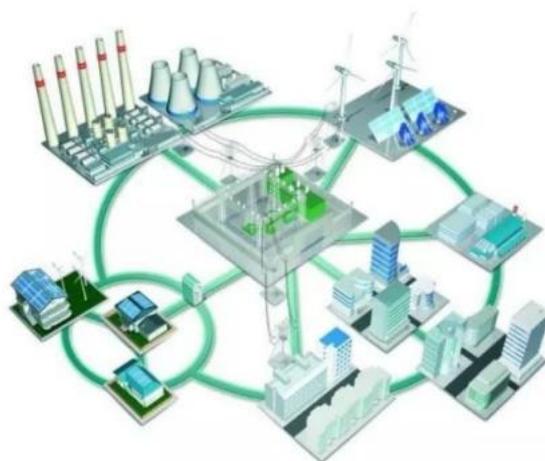


图 4.1 智能电网和能源网的物联网模型

近年来，由于分布式协同控制方法的优越性，在智能电网和能源网的研究中得到重视，并在虚拟发电厂控制、经济调度、微电网频率控制及主动配电网无功优化等领域得到重点研究。通过各种作业终端和高速联接网络构筑的全域物联网，如图4.1所示，将散落在能源生产-能源传输-能源消费不同生产链流程中的数据，进行全域数据集中统一管理和智能分析决策，提供全网感知、实时运检、主动预警、智能诊断决策，准实时闭环的智慧能源服务。能源行业的巡检工作是高风险、高重复性和高精度的工作，过去，一名普通线路工人一生巡检走过的山路可绕赤道一圈。山路崎岖，杆塔高耸，工作强度极大，危险系数极高。通过在端侧部署的无人机和摄像机等智能设备，和在云端部署的人工智能解决方案相联接的智能巡检方案，能对外部施工隐患和本体缺陷进行现场识别和预警，用无人机在线巡检代替传统人工现场巡视值守，极大提高生产力和安全性，人工效率提升5倍以上，系统成本降低30%以上。

综合智慧能源是针对区域内的能源用户，改变原有的不同能源品种、不同供应环节单独规划、单独设计、单独运行的传统模式，以电为核心，提供电、热、冷、气、水等能源一体化的解决方案，通过如图所示的中央智能控制服务平台，实现横向能源多品种之间、纵向“源-网-荷-储-用”能源供应环节之间的协同和互动，是能源革命

的一种实现形式。

其中，“综合”强调能源一体化解决方案，从用户侧思维出发，是多种能源品种的融合。“智慧”体现为三个层次，一是信息技术智慧，通过互联网以及信息技术、能源信息高速公路，把综合的能源系统有机结合起来；二是系统算法升级，不同能源品种之间、不同供应环节之间需要优化计算，实现多个维度的互补协同，这需要更强大的中央指挥系统，降低系统生产成本；三是设备端智慧，每个能源元件的智能化。

综合智慧能源是能源革命、新一轮电力体制改革和电力新技术、互联网技术结合的产物；是随着可再生能源和分布式能源的发展、能源的协同利用，以及能源体制、管理、理论、技术变革催生出来的一种新产业、新业态；是以用户侧思维主导的新概念；是智慧城市、智慧社区、美丽乡村建设的基础。

综合智慧能源项目主要针对一定范围内的有用能需求的区域，如图4.2所示，是新增经济活动区域最适合的能源配置方式，如新增工业园区、开发区、新农村建设等。也可以部分存量的完善和改造作为补充，如以传统电厂为依托发展综合智慧能源，特别是城市供热电厂更具有天然优势和潜力。

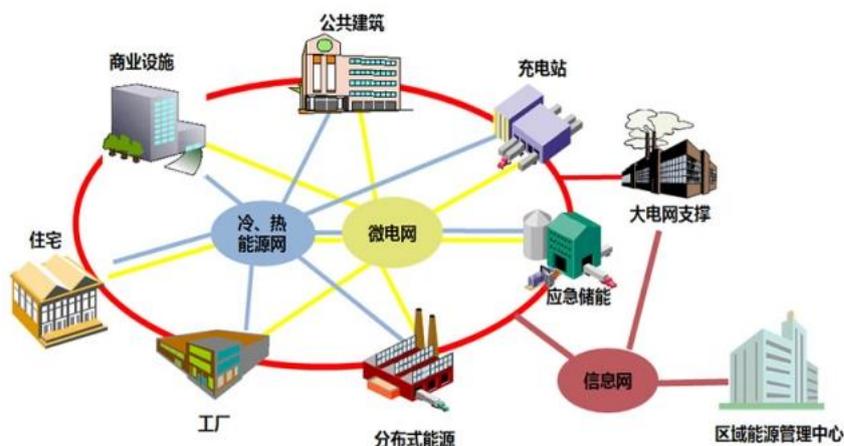


图 4.2 综合智慧能源网的系统工程开发设计架构。

另外，针对新能源互联网系统全域运行状态同步和全工况能量实时平衡的行业关键问题，在正常运行情况下，通过网内多能量主体状态协同/区间控制，实现同质能源网内能量无差调节；在源荷大幅随机波动等冲击扰动情况下，构建了多能网间能量立体转化通道及其调控策略，实现多能网间能量高通互济；在故障情况下，利用电势能前馈-冷/热/气势能反馈的虚拟惯性/阻尼致稳调控，实现新能源互联网系统的全网暂稳态能量平衡。

新能源技术和电力系统的协同发展将会在未来成为能源和电力行业的发展趋势，促进了电力供应的可持续发展和对环境的可持续保护，随着新技术的不断涌出，可以预期的是，将会诞生更多新兴的技术应用，从而对未来的能源供应构成了巨大的挑战

和机会。

4.3 智能协同控制在交通行业发展概况

拥堵是城市的顽疾。智慧交通是人民对美好生活的向往之一。智能交通从安全、效率、节能等方面改善人民的出行体验，无人驾驶的发展和普及进一步改变人们的生活方式。网络联接、实时通信是智慧交通的基础。5G赋能智慧交通，将车、路、人、云连接起来，形成一张可随时通信、实时监控、及时决策的智能网络。在“端-管-云”新型交通架构下，车端和路端将实现基础设施的全面信息化，形成底层与顶层的数字化映射；5G与C-V2X联合组网构建广覆盖与直连通信协同的融合网络，保障智慧交通业务连续性；人工智能和大数据实现海量数据分析与实时决策，建立智能交通的一体化管控平台。智慧交通业务丰富，面对不同的应用场景，需要专属的解决方案。智慧交通系统将行人、驾驶员、车辆和道路联接到统一的动态网络中，更有效地规划道路资源和缩短应急响应时间，让零拥堵的交通、虚拟应急车道的规划成为可能。

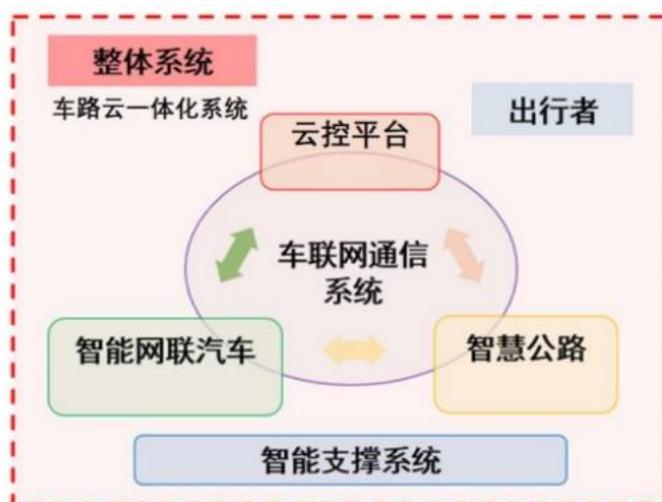


图 4.3 车路云协同自动驾驶系统框架图

车路云协同自动驾驶（图4.3）是交通、汽车、信息与通信产业的协同发展成果，交通、汽车、信息与通信三大产业交叉融合、互为前提、相互促进、相互支撑，形成以“聪明的车+智慧的路+融合的云”为基础架构，以高精地图、导航定位等产业为支撑，融合信息安全、大数据、人工智能等关键技术，面向交通应用提供安全、搞笑的出行服务，形成车路运协同自动驾驶系统，是实现高等级自动驾驶的必由之路。

智能交通车路协同系统具有以下几个主要功能：

（1）实时监测道路交通情况，提供实时的路况信息和驾驶辅助服务：通过车载终端和路测设备收集和分析交通数据，识别道路上的异常情况，如交通事故、道路施工等，及时向其他车辆提供路况信息，避免交通拥堵和事故发生。同时，该系统可以为

驾驶员提供实时的路况提示和驾驶辅助服务，提高驾驶安全性能。

(2) 优化交通信号，减少交通拥堵，提高交通流量：通过交管中心对交通信号进行优化，减少交通拥堵，提高交通流量，缩短行车时间，提高交通效率。

(3) 提高道路安全性能，减少交通事故发生率：通过车载终端和路测设备实时监测车辆的行驶情况，识别危险驾驶行为，如超速、疲劳驾驶等，提供实时的驾驶辅助服务，减少交通事故发生率。

(4) 提供智能停车服务，减少停车难题：通过车载终端和路测设备实时监测停车位的使用情况，提供实时的停车位信息和导航服务，减少停车难题。

(5) 为城市交通管理提供数据支持，优化城市交通规划和决策：通过数据中心存储和管理交通数据，为城市交通管理部门提供数据支持，优化城市交通规划和决策。

广义上，车路云协同自动驾驶系统涵盖和整合了智能网联汽车、智慧公路、云控平台、车联网通信系统和智能支撑系统等。车路云协同自动驾驶是一个由低至高的发展历程。车路云协同自动驾驶系统包括协同感知、协同决策、协同控制，如图4.4所示，按不同等级逐个实现突破，最终实现一体化。

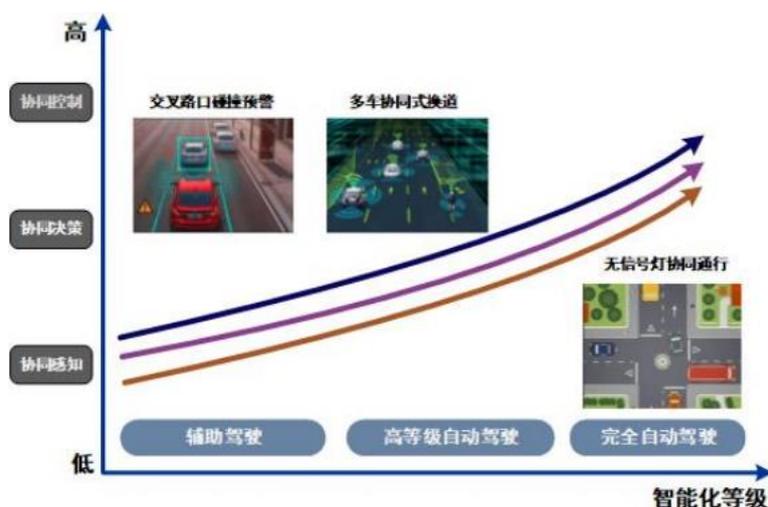


图 4.4 车路云智能协同发展路线

基于智能体参考架构构筑的核心数字能力，开展感知-认知-诊断-优化-评价的五步闭环，打造完善的综合交通治理体系。全息感知交警视频、交通数据、天气信息、路网信息等数据，再将数据汇聚成湖，构建道路的健康档案，然后量化分析拥堵成因，基于事件大样本和专家库经验优化方案和执行，最后给出宏观-中观-微观的三维评价。经测算，智能交通能将城市道路早高峰平均车速提升14%，早高峰通勤时间减少20-30分钟，城市道路拥堵警情下降7.8%。

近年来，随着人们对环境问题的重视，电动汽车的发展利用受到各国政府和消费者的青睐，其最主要的原因在于电动汽车的节能性和低排放等优点。如果将可再生能

源与电动汽车联合使用，能够进一步降低碳排放；然而自然情况下可再生能源具有不可控性和不确定性，电动汽车接入电网会增大电网负荷峰谷差，增大网络损耗等，不利于电网的稳定运行，因此有必要研究电动汽车与可再生能源协调控制问题，如图4.5所示。

目前关于电动汽车与可再生能源协调控制的研究主要有以下几个方面：1) 区域电动汽车与可再生能源的协同调度；2) 含有电动汽车和可再生能源的经济调度；3) 基于微电网或分布式配电网的电动汽车与可再生能源协调控制。

电动汽车和分布式电源是未来智能配电网中必不可少的负荷和电源，如何对这些元件进行合理的调度是一个至关重要的研究课题。利用分层有序充电控制架构，在配电网建立两层控制系统：配电系统控制系统和站级控制系统，通过相应的控制模型，在传统电网控制架构融合的基础上，实现配电网范围内电动汽车与分布式可再生能源的协同有序控制。

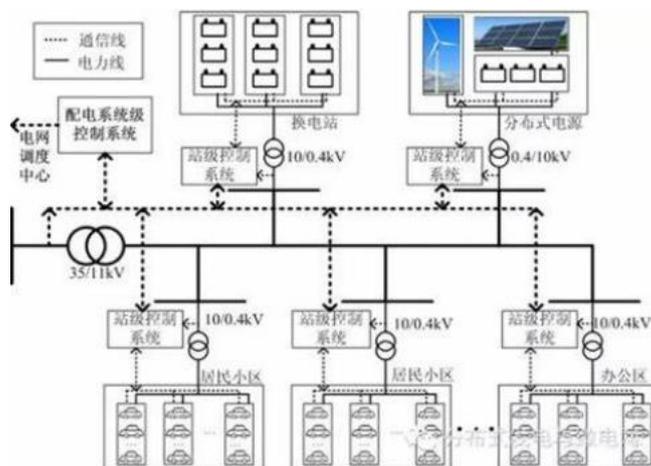


图 4.5 电动汽车与分布式电源协同控制

4.4 智能协同控制在制造行业发展概况

工业互联网已成为全球制造业发展的新趋势，我国作为制造业大国，为了应对新一轮科技革命和产业变革，从战略规划与技术推动等多方面开展了相关行动。在新基建的推动下，5G、人工智能、云计算等技术与传统工业深度融合，为实现智能制造提供了技术支撑，将有力促进制造强国早日实现。国际上，德国提出“工业4.0”、美国提出“先进制造业国家战略计划”、日本提出“科技工业联盟”、英国提出“工业2050战略”，也都是为了实现信息技术与制造业深度融合的数字化、网络化、智能化制造，实现智慧工厂。在智慧工厂建设中，如图4.6所示的工业互联网赋能智能制造，工业互联网作为关键技术手段，通过对工业要素的互联互通、相关要素的深度协同，实现了设备管理精细化、生产过程一体化、企业管理标准化、分析应用数据化和决策

支持科学化。



图 4.6 在智慧工厂的基础上利用工业互联网所开发的协同制造平台

随着生产要素价格不断上涨，个性化的需求越来越多，制造业面临交付压力不断增加，上市周期不断缩减，产品工艺日益复杂，制造模式用户定制，生产规模不断扩大等挑战。智慧制造是将新一代信息技术与设计、生产、管理、服务等制造活动的各个环节相融合，具有信息深度自感知、智慧优化自决策、精准控制自执行等功能的先进制造过程、系统与模式的总称。智慧制造以智慧工厂为载体，以关键制造环节智能化为核心，以端到端数据流为基础、以网通互联为支撑的四大特征，可有效缩短产品研制周期、提高生产效率、提升产品质量、降低资源能源消耗，对推动制造业转型升级具有重要意义。

边缘智能和边缘计算与人工智能相结合的一种新兴技术方案，其发展对边缘计算和人工智能具有双赢优势：一方面，边缘数据可以借助智能算法释放潜力，提供更高的可用性。随着万物互联的发展，边缘数据需要借鉴智能算法进行分析，实现智能化的功能。以深度学习为代表的智能算法能从边缘数据中提取实时信息以提高决策的效率和准确性。另一方面，边缘计算能为智能算法提供更多的数据和应用场景。传统的人工智能和大数据应用都存放在云端服务器和大数据中心，而边缘智能技术在网络边缘部署具备通信与计算能力的边缘设备，直接从物端设备获取海量数据并实现智能计算，将有力推动人工智能应用的进一步普及与发展，特别是工业互联网那个相关的应用。但边缘智能技术发展面临多方面困难，包括人工智能算法的资源需求与边缘节点资源有限之间的矛盾、智能任务需求多样与边缘节点设备能力单一之间的矛盾等。边缘智能协同计算系统有中心云服务器、边缘节点、物端设备之间的协作组成，可以有效地解决上述矛盾。

基于边缘智能协同的工业互联网体系，解决了边缘节点计算资源受限的难题，满

足了智能制造等工业应用场景对任务响应时延的要求。通过考虑多个边缘节点之间的协同，优化任务分配策略，在工业互联网网络边缘完成各种应用的智能计算，既可以减轻单一边缘节点的计算压力又可以满足各类人工智能算法对算力的需求，在满足工业互联网智能计算应用需求的同时避免了云服务器到物端设备的计算任务的通信开销。进一步，为了降低边缘节点部署的软硬件开销，采取边缘智能模型轻量化方法，提升边缘智能协同计算技术的可扩展性，有助于面向智慧工厂的工业互联网的广泛应用。

在“互联网+工业”年代，制造业传统意义上的价值创造和分配形式正在发生改变，凭借互联网渠道，公司、客户及利益有关方正纷纷参与到价值创造、价值传递及价值完成等生产制造的各个环节中来。由于“互联网+工业”不仅仅意味着“信息共享”，还将广泛开展“物理同享”，然后构成新的价值发明与共享形式，创造全新的共享经济，鼓动群众创业和万众立异。

通过以上分析，可以看出，智能协同控制技术已经成为智能制造的重要技术之一。未来随着相关技术的不断发展和完善，多智能体系统的智能协同控制技术的应用将会越来越广泛。同时，对于提高生产效率、降低生产成本、提高产品质量也将会有着越来越重要的作用。

4.5 智能协同控制在生物行业发展概况

生物智能是生物脑所具有的信息感知、加工、投射整合决策以及控制功能和行为，人类自身的智能是人类思维活动中表现出来的能力。人工智能具有强大的记忆力、准确的执行力和快速的信息处理以及推理能力，但目前人工智能仍然缺乏适应复杂环境或求解问题的高级智能属性。人类智能具有抽象思维、推理、学习等高级智能属性，但人脑的信息加工处理速度不高、记忆容量有限。协同控制是一种生物计算的方法，是指多种生物体通过相互合作、协作，共同完成某一任务的过程。协同控制的性质和特点是其维持生物体在生物环境内生存和发展的重要手段之一。在协同控制的过程中，不同的生物体之间会根据任务的不同发挥出各自的优势，从而实现协同完成任务的目标。因此，人机智能与生物智能的协同作用能够发挥两种智能所长，使它们优势互补、协同工作，从而有望产生更强大的智能形态，并将孕育出重大的理论创新和技术方法突破。人机智能协同被认为是影响21世纪最重要的科技之一。

人机智能协同的主要研究方向是以智能人机交互系统为目标，以信息技术和生物医学工程为支撑，围绕生物智能与人工智能协同的主题，重点研究多源感知觉与运动信息的获取以及计算理论，生物智能与人工智能增强以及协同，以及人机智能协同系统智能行为的实现这三个关键科学问题。

(1) 多源感知觉和运动信息的融合与编解码原理

人工智能协同首先需要建立人与机之间的信息通道并进行双向通信，因此，人机智能系统所涉及到的多源环境信息、生物信息和交互信息的感知和计算是开展人机智能协同研究的基础，主要包括视觉、听觉、触觉等信息的感知与交互，运动信息和人体生理信息的感知与交互，以及人的情感信息的感知与交互等。探索人机交互信息的获取、传输、分析、存储等方法，并对多源、高通量、时变、非线性的多源感知觉和运动信息，进行高效、动态、联合的解码分析，发现感知觉和运动信息的编码原理，将带动智能系统信息学领域的突破与发展。

(2) 生物智能与人工智能的协同以及互适应学习机理

实现生物智能与人工智能的有机融合需要研究生物智能与人工智能之间稳定、高效的接口方法、生物智能端的功能重塑和增强方法、人工智能端的智能增强方法以及生物智能和人工智能两种智能形式的有机融合模型等。人、机器以及外部环境都处于动态变化之中，机器必须具备学习能力以及适应人的变化，人对机器与外部变化具有可塑性，通过互适应学习促进人与机器相互适应对方的变化，因此，研究互适应学习机理是实现人机协同的关键。

(3) 人机智能协同系统智能行为的实现策略

实现人机智能系统高效、自然的交互研发以及应用是研究人机智能协同工作的目标。为此，需要研究智能控制策略和方法，构建人机智能协同系统的应用技术平台与典型示范，研究人工智能和生物智能协同系统的整合结构，探索人机智能协同系统与交互的模式等问题。

总之，智能协同控制是生物计算中重要的研究方向之一。通过对协同控制问题的深入研究和探索，可以为人类创造更多的实现途径和解决方式。同时，也可以在更广泛的领域中发挥生物计算的应用潜力，为整个社会创建更多的价值和福利。

4.6 智能协同控制在农业发展概况

近年来，我国在智慧农业发展方面开展了系列部署，实施了一批重大应用示范工程，农业专家系统、农业智能装备、北斗农机自动驾驶等智慧农业科技取得了突破。由于行业顶层设计缺失，各地区的智慧农业建设水平参差不齐。提高农业质量效益和竞争力，建设智慧农业，是国家发展的必然要求；进入新发展阶段后，智慧农业的高质量发展，亟需从战略层面进行系统谋划与科学布局。现阶段关于智慧农业的研究较多关注概念解析、技术产出效率测算、技术进展梳理、技术方案论证等方面，而从宏观角度入手，面向2035年我国智慧农业发展路线进行的前瞻性分析较为少见，尤

其缺乏针对不同规模主体、不同产业类型的路径选择问题研究。

按照国家部署，从当前到2035年是我国基本实现现代化的关键时期。加快智慧农业发展必须立足新的发展阶段，贯彻新发展理念，实现农业高质量高效发展；聚焦“保障国家粮食安全、食品安全、生态安全，促进农民持续增收”的目标，针对农业“新基建”、智慧种养、智慧供应链、农业智能信息服务、智慧农业相关技术产业化等方向，按照“抓重点、补短板、强弱项”的总体思路，开展重点建设。突出农业科技自立自强，加强智慧农业的战略性、前沿性、基础性研究与关键共性技术研发，论证实施智慧农业重大科技专项与应用示范工程。攻关农业传感器与高端芯片、农业大数据智能与知识模型、农业人工智能算法与云服务等关键技术，研制高端智能农机装备、农业智能感知产品、农业自主作业智能服务产品等重点产品。推动高端产品在智慧农场、植物工厂、农产品加工智能车间、农产品智慧供应链等的集成应用示范，培育农业软件开发与智能信息服务、农业传感器与测控终端、农业智能装备制造等配套产业。融合生物技术、信息技术、智能装备，建立以“AI+大数据+新一代通信技术+物联网+北斗卫星导航”为技术支撑、与农业强国发展目标相适应、达到世界先进水平的智慧农业产业技术体系。推动农业“机器替代人力”“电脑替代人脑”“自主技术竞争力增强”三大转变，提升农业生产智能化和经营网络化水平，强化农业质量效益和竞争力，拓展农民增收空间，助力乡村全面振兴。

传统农业涉及到的新技术很多，如遥感技术、物联网技术、无线通信技术以及以数据分析和数据挖掘为主的大数据技术和以机器视觉和深度学习为主的人工智能技术等，通过这些新技术与传统农业的结合，助力农业快速发展。以计算机视觉、图像识别以及深度学习等人工智能技术实现作物产量预测、土地规划以及病虫害防治；通过传感器、摄像头等监测设备，使用无线传感技术，实现动植物的远程监控、管理等；以天气、土壤、农作物、病虫害以及动物身体特征数据等作为大数据基础对动植物生长情况进行分析、预测等；使用卫星遥感技术实现作物勘测、生长情况以及病虫害预测、预防，运用GPS进行精准定位、跟踪等。多智能体系统作为一种新型的智能系统得到了广泛应用。此外，在农业领域，农业机器人和无人机等智能方法已经被广泛使用，使得农业自动化程度不断提高。因此，基于多智能体系统的智能农业发展研究越来越受到关注。



图 4.7 智能协同控制方法在农业行业中的应用

农业生产环节种植方式主要分为设施种植和大田种植。大田种植主要以粮食作物为主，其中包括世界三大口粮：水稻、小麦和玉米；而设施种植由于成本的问题，主要以经济作物为主，包括蔬菜、水果、花卉等。设施种植分为温室大棚种植、集装箱种植两种，目前多采用无土栽培技术，利用 LED 灯代替自然光，自动控制植物光合作用，增加植物营养；由于设施种植受天气气候以及病虫害等因素的影响较少，可以提高作物产量，增加效益。目前，大田种植主要运用遥感技术、地理信息系统和全球定位系统，人工智能技术监测室外的天气气候、病虫害以及农作物生长等数据；而设施种植主要通过物联网技术实时监测空气温度湿度、二氧化碳浓度以及作物生长情况等。

针对监控任务，无人机是一种广泛应用的智能方法。通过搭载高分辨率摄像头或其他传感器，无人机可以对农田进行全面监控，实现作物生长情况和病虫害防治的遥感检测。与传统的人工巡视相比，无人机巡视可以大大减少工作量和成本，提高检测精度和效率。另外，为了提高农作物种植和收割效率，多智能体系统可以通过协作完成任务，智慧农业（图 4.7）利用互联网、物联网和云计算等现代信息技术成果，改造提升整个农业产业链，促进农业与二三产业交叉渗透、融合发展，提升了农业竞争力，拓展了农业发展空间。智慧农业是农业发展的必然趋势，大力发展智慧农业对提高农业现代化水平、促进农业转型升级、提高经济发展质量和效益，有着重要的现实意义。

虽然多智能体系统在智能农业中还存在一些局限，但其应用前景十分广阔。未来，多智能体系统将更加密集和广泛地应用于农业领域，助力农业生产的智能化和自动化。

此外，多智能体系统还可以与其他技术相结合，促进智能农业的进一步发展。例如，在使用多智能体系统实现作物监控的同时，可以通过物联网传感器的应用，获得更加全面和准确的作物信息。另外，随着 5G 技术的发展，多智能体系统还可以通过更快的数据传输和更高的通信稳定性，实现实时监测和精准决策。

4.7 智能协同控制在军事行业发展概况

人工智能正逐渐成为战争形态质变的第一推动力，以无人作战飞机为代表的智能化武器装备得到了空前的重视和发展，无人机智能协同空战（图 4.8）作为一种可以预见的全新的作战力量，将作为生成体系作战能力的有效途径，不仅会给未来空战样式带来巨大的变革，也对航空兵作战样式产生颠覆与冲击。随着科技的不断发展，无人机被广泛应用于军事领域，帮助军队完成各种危险程度高的任务。而其中的人工智能技术更是成为了无人机的重要组成部分，发挥了越来越重要的作用。



图 4.8 多无人机作战协同控制

深度学习、模式识别、脑科学等人工智能基础领域的突破性进展，有力推动了无人机自主性水平即智能化的跃升。据悉，ALPHA 智能空战系统在模拟器中战胜了已退役的空战专家，是迄今为止最具有侵略性，反应迅速，最具活力和可行度的人工智能”。但是在不确定、多任务、高威胁的现代强对抗作战条件下，无人机全自主模式离实战还有较大的距离。要实现无人机完全自主作战需要具备复杂战场环境理解能力、战场态势综合分析与判断能力、对手和目标战术意图的预估、及时响应能力以及面对意外事件的处理等智能化能力，这样，具有战术宏观决策优势的有人机和具有技术微观规划与控制优势的无人机协同作战应运而生，并已初露端倪。美国等军事强国率先进行了概念发展计划与能力试飞验证，利用 AH-64E “阿帕奇” 武装直升机同时控制 “灰鹰” 无人机和 “影子” 无人机完成了执行任务的测试。从而，对于无人机智能协同作战能力评估结论是：完成战术侦察任务所需的时间缩短 10%；识别和上报高价值目标的数量增加 15%；提供给指挥官的关键信息增加了 30%。无人机智能协同所具备的巨大潜能必将对未来航空兵作战带来巨大的冲击乃至颠覆。

空中力量的作战运用主要包括空中机动作战、近距离空中支援作战、空中遮断作战、制空作战、战略空袭作战等五种作战样式（具体如图 4.9 所示）。空中机动作战，无人机作为先遣机前突到高危战场前沿完成侦察、打击等任务，协助有人作战平台避开进而摧毁敌防空火力威胁，大幅提升有人作战平台的战场生存能力，从而为空中机

动作战意图的达成提供一种低风险、远射程、多任务、高效能的作战样式。近距离空中支援作战，在接敌任务中无人机可以担任前方侦察的任务，为作战行动提供实时目标情报信息，搭建起有人机全面感知战场态势的“桥梁”，在进攻歼灭任务中，无人机可以携带制导弹药对目标进行突发性的攻击摧毁，为对地目标打击提供一个安全通道。空中遮断作战，有人机置身于攻击目标的防空火力范围之外，指挥无人机实施隐蔽接敌，不仅有效降低有人机执行作战任务的风险，还能够大幅提高有人机的打击能力，最终有效提高空中遮断作战的整体效能和灵活性。制空作战，无人机具有信息处理完整、机动轨迹规划精细、跟踪控制能力精准等优点，而有人机可以在无人机的保护和辅助全方位态势感知的支持下，更加关注整体态势判断和战术决策，根据整体效能最优的原则指挥无人机执行具体目标的攻击等任务。在未来一段时间内，无人机作战功能相互补充，在智能协同作战中通过态势感知与指挥交联的相互融合，更有利于空中协同作战单元的作战决策，快速提升夺取制空权的能力。战略空袭，有人/无人机智能协同作战具有长航时、更低可探测性、超长距离突袭等特征，不仅可以显著提高飞机的战时突防与生存能力，还可以有效提高战略空袭执行复杂任务的灵活性、隐蔽性和不确定情况下的适应性。



图 4.9 智能无人集群协同控制系统作战使用场景示意图

第5章 典型应用案例

5.1 引言

智能协同控制在分布式能源管理、自主车辆驾驶、无人机编队飞行、多卫星任务和协作机器人等多个应用场景中都发挥着关键作用。通过实现多个智能实体之间的协调和合作，智能协同控制系统能够优化资源利用、提高系统效率，并确保安全可靠地完成各种任务。随着人工智能技术的不断发展，智能协同控制在各个领域的应用前景将变得更加广阔。

5.2 分布式能源管理

当谈及能源互联网，这实际上是一个综合性的能源体系，旨在将各种不同类型的能源源头、能源网格和能源终端进行高效整合和协同，以满足能源多元化、清洁化以及高效利用的要求。在这一背景下，智能协同控制技术扮演着关键角色，可以使得能源互联网中的多种能源参与方在分布式环境下高效协同，实现能源的合理分配、供需平衡和优化控制。以下将详细描述项目中智能协同控制技术在能源互联网中的应用。

(1) 面向能源互联网集群内分布式自治控制的边缘计算算法：

在能源互联网中，涉及到不同类型的能源资源，如电、热、冷、气等，这些能源在时空分布特性和特征量上存在差异。为了实现这些能源的协同控制，项目将构建适应多能源协同的通信网络架构，考虑多类型异质能源的交互作用机理和数据交互需求。通过离散一致性控制算法，项目旨在维持系统的能量平衡、平抑能量波动等目标，使得能源系统能够快速收敛到稳定状态。同时，项目将基于动态事件触发机制，提出适用于系统扰动情况下的一致性控制算法，以确保能源系统在面临外界变化时依然保持自治的稳定性。

(2) 基于多智能体的分布式能源管理协同控制方法：

考虑到能源互联网中涉及不同能源形式和多个区域的复杂性，项目将探索如何通过多智能体协同来管理这些分布式能源。首先，项目将分析不同能源的出力特征，根据这些特征建立小区域能源互联网集群。随后，将设计多智能体功能，构建集群级多智能体协同的分布式调控框架。该框架将集群内部的能源协同与集群间的协同需求结合起来，实现能源的高效利用和系统的经济、稳定运行。通过改进交替乘子算法，项目将建立能源互联网集群级的分布式调度模型，考虑潮流约束、电压约束等安全约束，以随机-鲁棒优化方法来优化集群的运行。此外，基于离散一致性协议，项目将构建多智能体分布式控制模型，实现能源集群内部和集群间的能量波动合理分配，从而保证

整个系统的稳定性和高效性。

(3) 能源互联网分布式协同控制与优化系统的示范应用：

最终，项目将把前述的智能协同控制技术应用于实际场景，以能源互联网典型园区为例进行示范应用。这意味着通过智能协同控制技术，不同能源参与方可以在实际运行中进行高效的协同控制和优化。这将验证技术在实际环境中的有效性和可行性，同时也为能源互联网的推广和应用提供了有力的实践基础。

综上所述，智能协同控制在能源互联网中的应用，不仅能够实现各种能源的高效协同、优化调度和稳定运行，也为能源互联网的发展提供了坚实的技术支持。通过智能协同控制，能源互联网有望实现能源的可持续发展和清洁利用，为我国能源革命目标迈出关键一步。

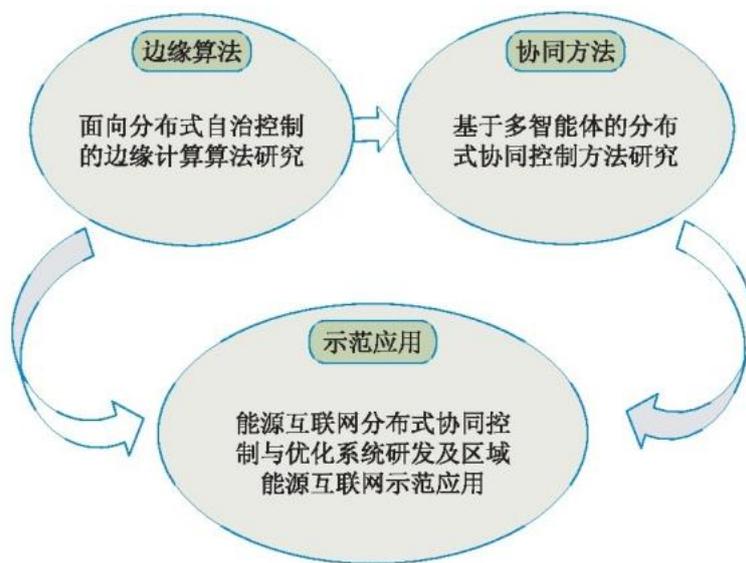


图 5.1 基于多智能体的分布式能源管理智能协同控制技术研究框架



图 5.2 分布式能源管理智能协同控制与优化系统研发

基于分布式能源管理群体智能协同控制与优化系统研发的框架如图 5.2 所示。

(1) 以含有冷、热、电、气等多种能源的能源互联网为用户对象，分析能源互联网中基础数据、业务数据及各个能源系统间接口数据，设计区域能源互联网分布式协调优化系统架构。

(2) 设计系统的通信、安全防护以及与冷热气系统、储能系统的集成方案，进行

功能模块、用户体验界面、接口等的详细设计，完成系统开发、测试与部署上线。建立基于多智能体的分布式协同控制架构，可有效解决单一分布式能源个体容量小、波动性强、可控性差、难以集中调控等问题，从而提升能源互联网的综合治理水平。

项目依托河南省兰考县能源互联网平台开展示范建设应用。兰考作为国家能源局批准设立的全国首个农村能源革命试点建设示范县，近年来，以服务农村能源革命试点建设为宗旨，统筹推进方案设计、数据融合、功能研发、服务创新系列工作，全力建设“一库三中心”为核心的农村能源互联网平台，如图 5.3 所示，支撑农村能源转型驶入“快车道”。具体项目引入南瑞集团有限公司、许继集团有限公司、施耐德、ABB 等 15 个专家团队，为平台方案设计提供技术支持。



图 5.3 能源互联网平台实地应用场景

目前已建立政府牵头、企业参与的能源数据归集机制，保证数据质量和数据更新频率。探索“三权”分置的县域能源数据互信机制，与 15 家能源企业签订协议，明确了政府部门的数据使用权、能源企业的数据所有权、平台的数据采集管理权，确保县域能源数据体系建设的可持续性。提供全面覆盖的数据接入方式，包括系统对接、物联接入、批量导入及在线填报 4 种方式，实现全品类、全链条能源数据的高效接入。累计接入电、热、气、油等能源数据 2577 万条，实现兰考“全县域、全品类、全链条”能源数据可观可测。建立全品类能源数据库，形成可推广可复制的县域能源大数据建设模式，打造“能源监测、运营指挥、公共服务”三个平台，面向政府、企业、居民提供智慧能源服务。2022 年 7 月，国网河南省电力公司联合河南省发展和改革委员会、兰考县人民政府发布《兰考农村能源革命实践与展望》白皮书，全力推动兰考农村能源革命试点“升级版”建设。计划到 2025 年，能源领域实现“三个 80%”目标（可再生

能源占一次能源消费比重、电能占终端能源消费比重和新能源就地消纳率均达到80%)，基本建成清洁低碳、安全高效的农村现代能源体系，以清洁能源高效利用助力乡村全面振兴。能源互联网的智能协同控制平台在兰考应用成为了示范样板，为探索新时代县域能源发展转型提供了新的道路。

5.3 自主车辆驾驶

1. 地面多车智能协同控制系统

为了验证项目在网联式自动驾驶车辆多车智能协同控制系统方面的有效性、鲁棒性和实际驾驶效果，我们选择了项目组研发的东风AX7作为自动驾驶试验平台，并在专用的5G试车场进行实车测试。该自动驾驶平台（东风AX7）具备感知、决策、控制和执行的功能。以下将详细介绍与网联和协同控制相关的软硬件平台。

试验平台硬件框图如图5.4所示，涵盖了线控刹车、电动助力转向和电子油门、USB-CAN接口卡、工控机、惯性导航和高性能笔记本等组件。其中，工控机作为系统执行单元，通过底层驱动程序向车辆发送执行命令，同时采集车辆CAN总线信息并反馈给车辆计算单元。智能车的定位使用了GPS/INS组合定位方式，其中GPS采用司南GPS定位导航，并引入了RTK（Real-time kinematic）差分技术以提高定位精度。

在测试中，我们针对不同驾驶场景向网联式自动驾驶车辆下发多车智能协同驾驶任务。在结构化路面上，我们测试了多车队形保持策略、多车队形切换策略和编队避障策略。在未知的非结构化道路上，我们测试了自适应策略环境感知部分的功能。在测试过程中，网联式自动驾驶车辆通过车载单元（OBU）持续接收来自中心服务单元（CSU）和路侧单元（RSU）的道路交通信息，协同驾驶指令可以通过UI人机交互界面发送到车载单元（OBU），然后编队车辆根据指令通过多车协同驾驶策略进行控制。

在多车智能协同驾驶的控制模型中，智能车辆之间存在相互排斥和吸引的势能作用，以实现相邻车辆之间的安全保持。实际测试中，东风AX7自动驾驶平台成功实现了多车队形保持策略，编队车辆的速度稳定，没有出现不稳定的三角结构。在多车队形切换策略中，车队成功实现了拆分和重组，整个切换过程稳定有效。编队避障策略中，车辆根据状态变化成功避免了障碍物。从速度-时间曲线可以看出，车辆速度不会随着虚拟引导车的速度上下波动而产生误差增益，破坏编队的稳定性。在多车队形切换策略中，智能车辆根据状态变化，实现了车队的拆分重组，整个切换过程稳定有效。编队避障策略由于在变道过程中改变了跟踪目标，每辆智能车对应一个跟踪目标，目标对智能车产生引导反馈作用，智能车之间的势能作用在车辆到达期望距离后可以忽略，从而实现汽车的速度与目标车速一致，车队按期望速度协同驾驶前进。

综上所述，项目利用多车智能协同控制技术在实际驾驶环境中验证了东风AX7自主驾驶平台的多车协同驾驶功能。在结构化道路和非结构化道路上，系统成功实现了车辆的编队、切换、避障等多种协同驾驶操作。这些实验结果表明，该项目的多车智能协同控制技术在网联式自动驾驶领域具有良好的应用潜力，在协同控制策略下纵向速度误差保持在10%以内，距离误差不超过5%，横向加速度控制在 $-0.5\sim 0.5\text{m/s}^2$ 以内，可以满足中低速的多车编队行驶功能，能够实现车辆之间的安全协同驾驶。



图 5.4 硬件结构框图

系统中利用网联设备对自动驾驶车辆的控制流程分为以下三个步骤：

(1) 中心服务单元（CSU）部分：这一部分主要负责道路级路径规划。其目标是借助CSU获取的全局交通流量信息，以选择最短路径来避免拥堵路段。一旦CSU完成规划，它会将信息发送给相应的路侧单元（RSU）。这些RSU根据局部交通情况，进行多车和路口协同，以确保交通畅通和高效。

(2) 路侧单元（RSU）部分：RSU在这一流程中扮演关键角色，负责协调多车和路口的交通流。一旦RSU收到CSU的规划信息，它会根据当时的局部交通状况进行调整，以保证交通通畅和高速运行。RSU的任务是优化车辆在路口的通过顺序，最小化等待时间，从而提高整体交通效率。

(3) 车载单元（OBU）部分：这是控制流程的最后一步，涉及到车道级的规划和控制。OBU接收RSU提供的车辆通过顺序和CSU的道路级路径规划，基于这些信息进行轨迹规划。主要目标是保障车辆的安全行驶。然后，OBU将最终的轨迹规划传递给车辆平台，通过车辆平台实现车辆的控制。

整个控制流程如图5.5所示，经过这三个步骤，通过网联设备的协同作用，实现对自动驾驶车辆的精确控制和交通优化。

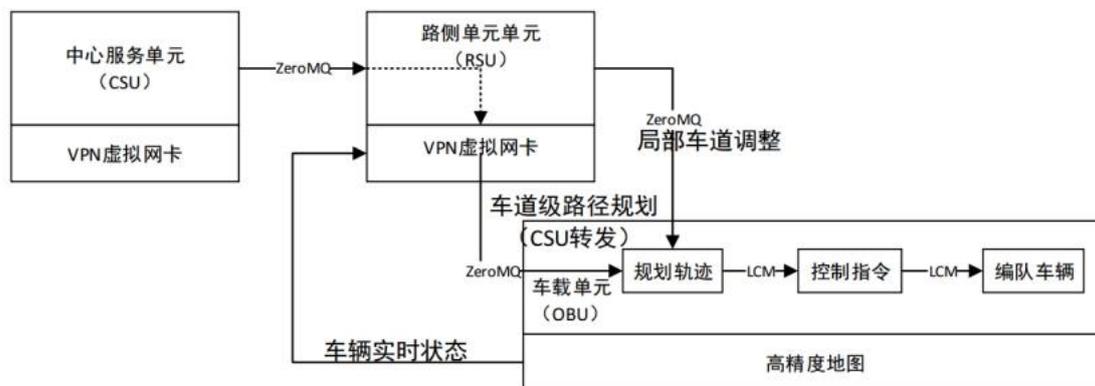


图 5.5 网联式自动驾驶车辆控制流程

在这一网联架构中，CSU 位于云端，类似于整个系统的大脑，扮演着高效的动态数据库的角色。CSU 的部署位置通常根据网络负载平衡的原则，选择合适的位置，通常是区域中心。而 RSU 则在整个网联系统中充当信使和执行者的角色。在数据通信方面，RSU 负责与 OBU 和 CSU 模块进行数据交互和信息分享。为了便于网络布局，CSU 和 RSU 通常放在同一个局域网内，通过无线路由器连接。OBU 作为车辆的载体，是整个系统的终端。它具备一定的感知识别和决策能力，同时也是整个系统指令的接收者。在这一架构中，CSU、RSU 和 OBU 各自由三台工控机来实现。同时，它们还配备了 OCT、UI 和 ETS 三个显示设备，用于信息输出。OBU 包含工控机处理器、传感器、执行机构和 UI 大屏幕四个部分。RSU 部分主要由工控机和 ETS 平板组成，而 CSU 则由工控机和 OCT 平板组成。通过外部网络连接，将 CSU、RSU 和 OBU 连接在一起。在各个模块内部，使用 LCM 接口进行通信，而外部通信则采用 ZeroMQ。整个系统使用 ubuntu 操作系统，核心模块的开发采用 C/C++ 语言。

表 5.1 试验平台硬件设备

名称	型号	功能
笔记本电脑	3156NGW	底层控制程序
工控机	集智达工控机 NiceE-6500	底层驱动程序、传感算法信息采集
GPS/INS	迈普时空 MP-POS320 司南 GPS	定位、车辆姿态
周立功 USB-CAN 接口卡	USBCAN-1+	向动力 CAN 发送执行命令，将车辆信号 CAN 的车辆状态信息发送至工控机
车内网络设备	TP-LINK 千兆交换机 通外网	构建车内局域网
	无线路由算法	
	4G 无线网卡	接收 RTK 数据给惯导

如图 5.6 所示，演示场地选择在华北地区、华中地区的某试车场内，场景中车道线清晰，有各种上下高速环境的闸道和收费站，拥有结构化道路交通环境，并可进行“高速”、“耐久”和“可靠”等环道测试。场地周围有进行路测的交通调度系统和视频监控系统，为实现完善的网联式自主多车协同驾驶提供了理想的环境。在此环境中，结合上述系统架构及软硬件方案，项目利用三辆东风 AX7 自动驾驶车辆（如图 5.7 所示）模拟多车编队保持、多车队形切换、编队避障及自适应四种协同驾驶场景，并讨论协同控制算法实车测试的效果。



图 5.6 测试场地



图 5.7 测试车辆

2. 空地结合智能协同控制系统

空地结合智能协同控制系统实验平台提供了一套完整的集群智能协同控制的研究、调试和验证环境。该实验系统是基于 ROS/Matlab 开发的，具有强大的开放性。它专注于无人系统的动态建模、控制研究、运动规划、避障控制、多信息融合、编队控制、多智能体协调控制以及无人系统自主控制等技术验证。这为无人系统控制和多机集群控制等教学演示以及二次开发提供了核心设备支持。

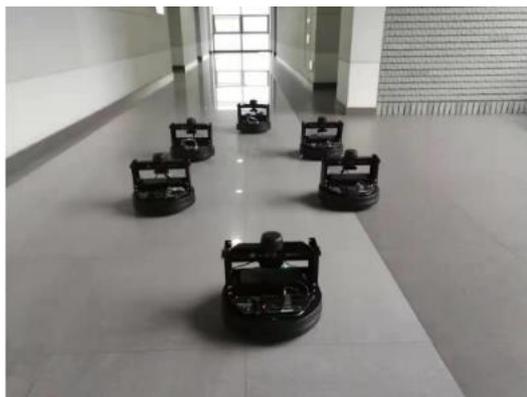
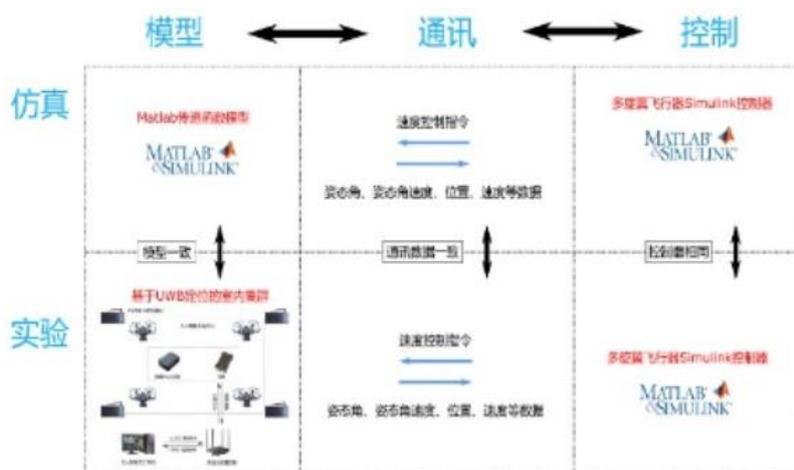


图 5.8 测试机器人集群

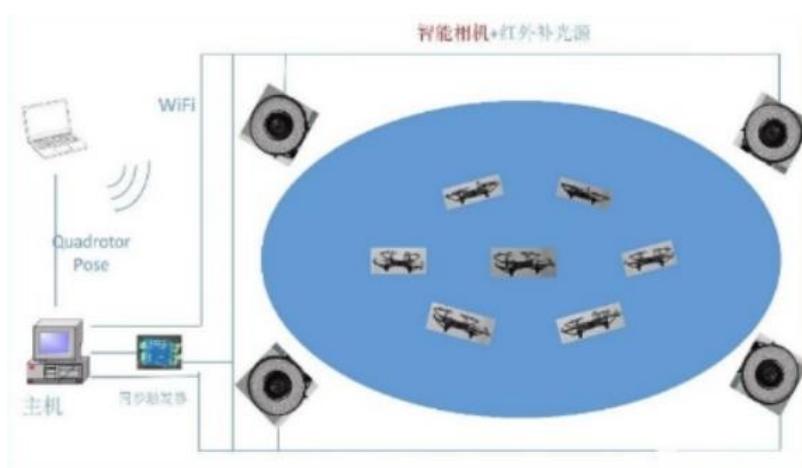


图 5.9 测试无人车

该实验平台已经取得了一些关键技术突破，包括 XBEE 分布式网络和 PIXHAWK 飞控。成功地嵌入了人工势场法、图论法等编队理论算法。在室内环境下，已经实现了定点、直线、圆等常见编队演示。此外，在飞行过程中，该平台还可以实时地对无人机编队进行队形切换。因此，该平台不仅可以为多无人机飞行过程中的算法提供数据支持，还可以直接用作演示效果的工具。



(a) 空地结合多智能体协同控制模型



(b) 空地结合多智能体协同控制示意图

图 5.10 空地结合多智能体协同控制示意图

3. 天空地结合智能协同控制系统

天空地跨域多智能体系统是指由在不同空间领域内运行、拥有显著功能差异的运动体所组成的有机整体。在当今多智能体系统领域，这是一个备受关注的研究方向，也是未来跨域多智能体系统应用和技术发展的新趋势。跨域多智能体系统可以通过信息共享与融合、行为交互与协调、任务协同与合作等方式实现功能的互补和效能的增强，从而提升其在面对复杂任务和使命时的应对能力。

在应用方面，天空地跨域多智能体系统的互联与协同合作有助于减少异构平台的功能冗余，最大程度发挥不同平台的系统鲁棒性和能力互补性，实现各要素单元的协同运用，从而实现效果的互通和整体效能的提升。同时，跨域协同也有助于推动新的应用模式在跨域多智能体系统领域的涌现，进一步推动这些系统在各个领域发挥全新的作用。

从技术角度来看，协同是跨域多智能体系统自主性技术的高级阶段。物联网的概念为改变世界带来了巨大的潜力，结合先进的控制和智能决策系统，形成了跨域协同

的技术基础。这种技术与人工智能、信息技术等领域的交叉融合能够显著推动跨域多智能体系统整体技术的发展和提升。



图 5.11 天空地结合智能协同控制系统框图

天空地结合智能协同控制系统是由多种不同类型的运动体，如航天器、空中飞行器和地面移动平台等，组成的异构跨域协同系统。这种系统引入了云控制的理念，其中包括天基云、空基云以及地基云。这些子云控制系统不仅各自构成了一个独立的控制系统，还通过天空地一体化网络实现了彼此之间的互联、互通和互操作。这样的构架建立了一个天空地一体化的跨域协同系统，如图 5.11 所示。

在每个子云控制系统中，通过多种探测设备获得的大量数据在云端进行存储，然后利用数据融合等方法进行在线辨识和建模。基于人工智能技术，实现了整个天空地一体化系统的跨域自主指挥、规划、计划、优化、调度、预测和决策。通过云、网和边的协同作用，结合模型预测控制、数据驱动控制、模型数据混合驱动控制等先进控制方法，实现了整个天空地一体化系统的智能自主协同控制。

这种系统中不同类型的运动体可以在功能和性能上相互补充。例如，由天基系统和空基系统组成的非地基网络能够提供全方位的态势感知和空间覆盖能力，从而辅助地基系统实现全域覆盖和支持。与此同时，地基系统则能够充分发挥其在地面操作方面的高性能优势。这种天空地一体化的跨域协同系统在各种领域中具有重要的应用潜力。

5.4 无人机集群

在无人机集群智能协同控制仿真平台中，无人机集群协同控制模块的作用可以分为以下几个步骤。首先，该模块起始会将无人机集群的初始信息（包括位置、速度等）传递给无人机飞行动力学模块和无人机集群组网仿真模块。这两个模块分别结合当前

仿真环境的物理特性、气象情况以及模拟的飞行自组网，将无人机模型的状态信息和网络数据传回到集群控制模块。

集群智能协同控制模块随后将收到的物理模型和网络信息作为输入，用于执行集群智能协同控制算法的计算。这些算法基于输入信息，计算出每个无人机在下一个时刻的目标位置和速度等信息。随着仿真的进行，集群智能协同控制模块将计算得到的无人机的下一时刻目标位置和速度信息再次传递给飞行动力学模块和网络仿真模块，以进行相应的模拟。模拟后的数据会继续作为接下来集群智能协同控制模块的输入。

在需要进行无人机网络安全相关仿真时，无人机网络攻击模块会分析传入网络仿真模块的信息并实施网络攻击。然后网络仿真模块会将攻击后的网络数据传回集群智能协同控制模块。同时，无人机集群可视化模块会收集网络状态指标、集群智能控制模块中的协同控制指标等数据，并以动态的方式将整个无人机集群飞行过程展示出来。

这一系统的架构如图5.12所示，为了更加流畅地描述其机制，上述步骤被更紧密地连接起来。

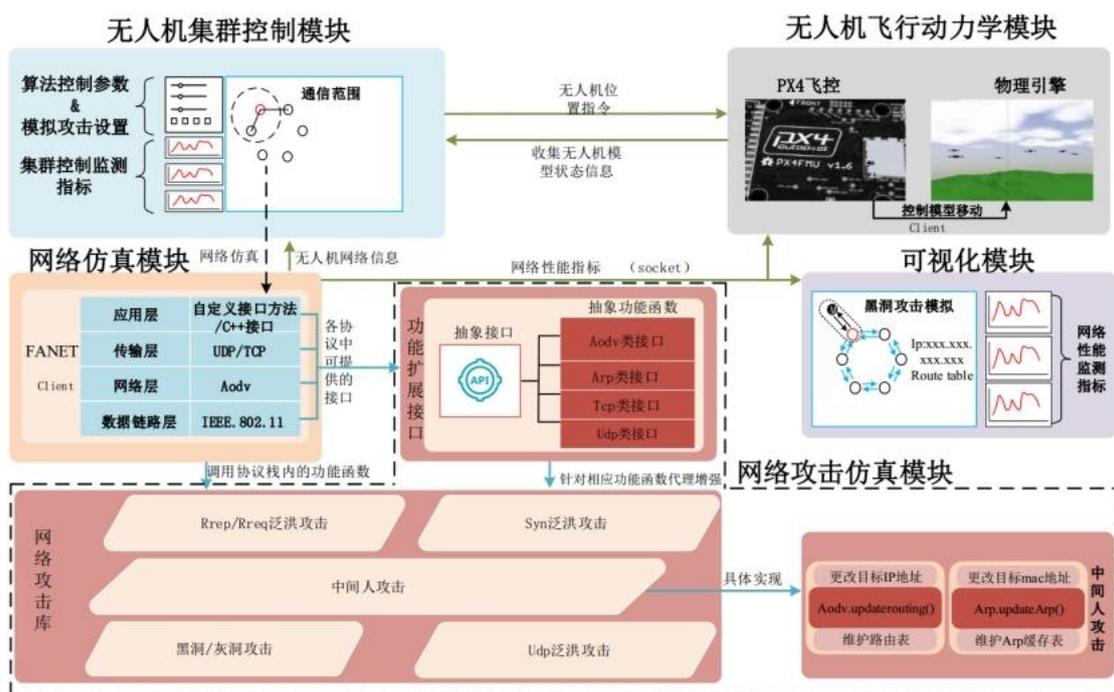


图 5.12 无人机集群仿真平台整体框架图

在控制层面，基于多智能体框架构建的无人机集群协同控制模型能够有效测试大规模无人机集群协同算法的仿真效果。无人机集群控制算法使得每个个体无人机能够获取协同区域内邻近无人机的信息，并根据周围邻近信息计算下一时刻的飞行策略（如位置、速度等）。各无人机根据网络拓扑结构进行信息传递。

集群协同控制算法采用智能分布式协同控制方法，即每个无人机只需获取周围邻近无人机的状态信息，然后执行协同控制策略。无人机依据当前的网络拓扑结构，通

过广播方式将自身状态数据发送给邻近无人机。在状态数据传播完成后，集群内的无人机将更新飞行策略，并根据智能协同控制算法更新当前的飞行策略，从而实现协同避障、智能编队、目标追踪等功能。协同避障和智能编队利用了Flocking无人机集群智能协同的原理，个体无人机遵循三个准则：在短距离内相互避让、在局部范围内通过对齐规则与邻近个体保持速度一致、整个集群保持在有限区域内，即保持编队整体性。目标追踪控制则将无人机集群视为质量分布均匀的整体，利用虚拟代理以质心为中心向目标点运动。每架无人机的速度模型满足两个条件：（1）接近虚拟代理以加入集群；（2）通过与虚拟代理速度对齐，跟随集群朝目标点靠近。

整体而言，这个描述更加紧凑，流畅地展示了无人机集群智能协同控制仿真平台的运行和机制。无人机集群协同控制模块在该平台中扮演着最高控制层的角色。当无人机集群执行协同任务时，各无人机通过在邻近区域内向周围广播其位置和速度信息，通过无人机自组织网络将广播的信息传递到无人机群组中的各个节点。无人机集群智能协同控制算法在此基础上进行计算，以在无人机群内形成编队并朝目标位置移动。无人机集群自组织网络仿真模块和无人机集群协同控制模块的紧密结合在无人机集群网络化仿真平台中至关重要。为了确保这两个模块的信息交互，数据控制器负责统一两个模块之间交互的数据格式，并确保在仿真过程中能够同步进行。

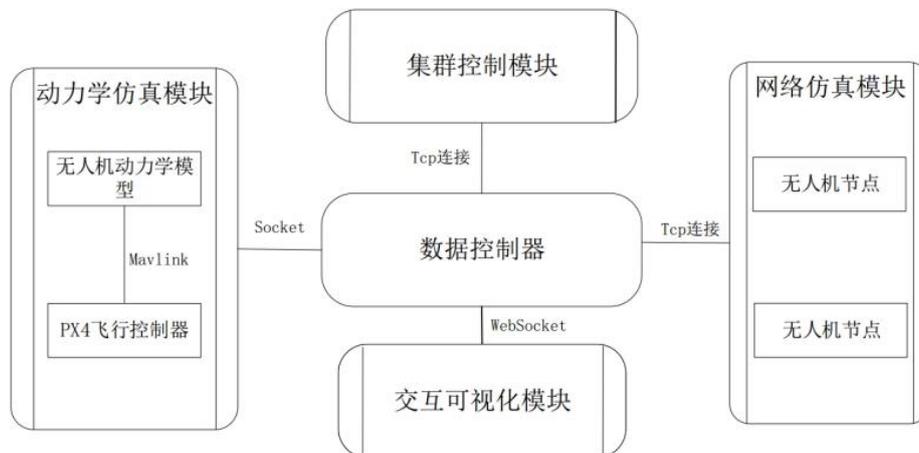


图 5.13 数据控制器智能协同控制框图

5.5 多卫星任务

随着科技的进步，智能协同技术在卫星领域的应用正变得越来越重要，尤其是在实现大规模多卫星共位密集编队的任务中。在这个过程中，我们可以从自然界的群体行为中汲取灵感，将自组织机制应用于人工智能协同技术，从而实现卫星之间的高效合作。航天领域中的多卫星人工智能协同技术的发展可以划分为三个阶段：第一阶段，卫星的某些分系统实现了智能化的任务协同。这意味着一些特定的任务或功能可以在单个卫星上自主完成，并与其他卫星协同工作。第二阶段，单个卫星不再完全依赖具

体的动作指令，而是能够根据既定任务自主进行决策。这包括了自主完成具体行动并具备系统诊断和纠错能力，从而提高了整个系统的稳定性和可靠性。第三阶段，则是在一个任务中所有参与的卫星都实现了智能化。这些卫星通过先进的通信技术进行协同配合，实现了全程无人参与的自主决策。

特别是随着5G技术的普及和6G技术的开发，大带宽无线通信为大规模多卫星共位密集编队卫星群的组建提供了可能。这种技术的发展为实现更高效的卫星协同打下了坚实基础。在这方面的实验中，我们建立了一个基于超深网络和浅网络机器学习框架的仿真环境。通过超深网络训练和地面-轨道双向迁移学习，我们使系统具备了强大的拟合能力。实验结果表明，我们的平台能够在较短时间内对非合作目标进行甄别和定点清除，并在模型迁移后有效地提取特征。未来，随着后端技术验证平台的升级，我们有信心将获得更高效的表现。总的来说，航天领域中的人工智能协同技术正朝着更高的水平不断发展，为卫星之间的智能合作提供了广阔的前景。

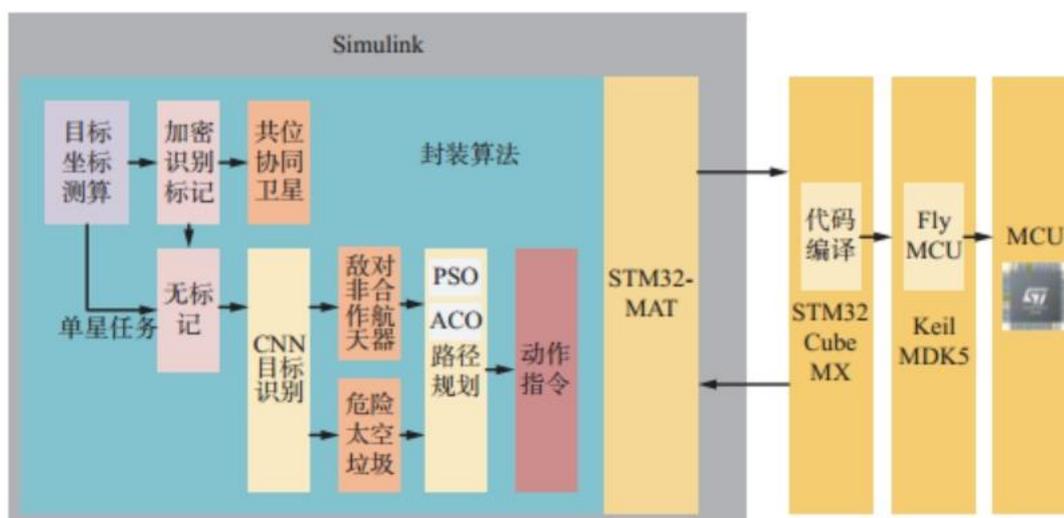


图 5.14 智能协同控制关键技术地面验证平台架构

5.6 协作机器人

在工业生产中，多台协作机器人可以通过智能协同控制系统共同完成复杂的组装和加工任务。每个机器人负责不同的步骤，通过协同控制确保零部件的高精度组装，提高生产效率和一致性。多机器人协同系统具有负载能力强、工作空间广、灵活性好等优点，是机器人领域的研究热点。多机器人智能协同控制指通过设计协同控制策略，使多机器人执行共同的任務，在多机搬运、装配、焊接等领域应用广泛。为了解决关节约束下多机器人任务空间跟踪的智能协同控制问题，以轨迹追踪为主要任务，首先构建同步跟踪误差并设计外环控制策略，选取关节速度范数最小化为次级任务，进一步考虑关节速度和关节角限幅，将多机协同运动控制问题建模为一个二次型优化问题，

然后设计一个动态神经网络控制器实时求解控制量，最后建立 MATLAB 与 V-REP 联合仿真实验平台以验证多机协同控制策略的有效性，如图 5.15 所示。

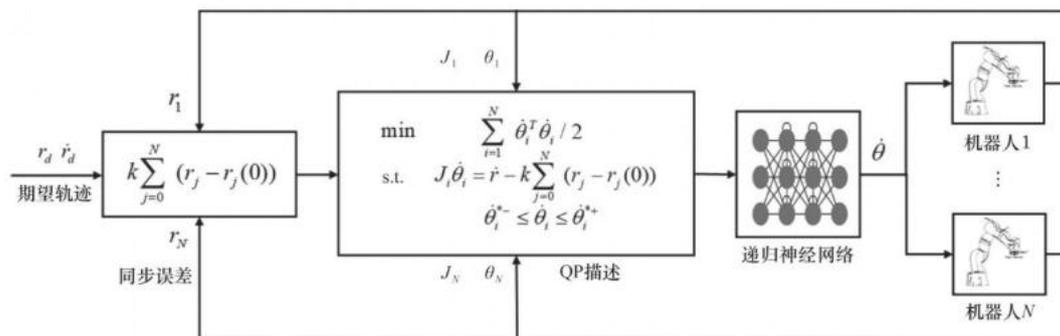


图 5.15 多机器人智能协同控制框图

MATLAB 与 V-REP 联合仿真实验验证了在神经网络协同控制策略的控制下，多机器人系统成功地实现了期望轨迹跟踪，跟踪误差可达到 10^{-4} 量级，且关节角和关节速度值都在所设置的限幅内。图 5.16 (a) 所示为三环曲线跟踪过程中 V-REP 环境下截取的跟踪效果，图 5.16 (b) 所示为最终状态下机器人实现的曲线跟踪结果，可以看到在神经网络协同控制器控制下所有机器人最终都精确实现了期望的三环路径轨迹。

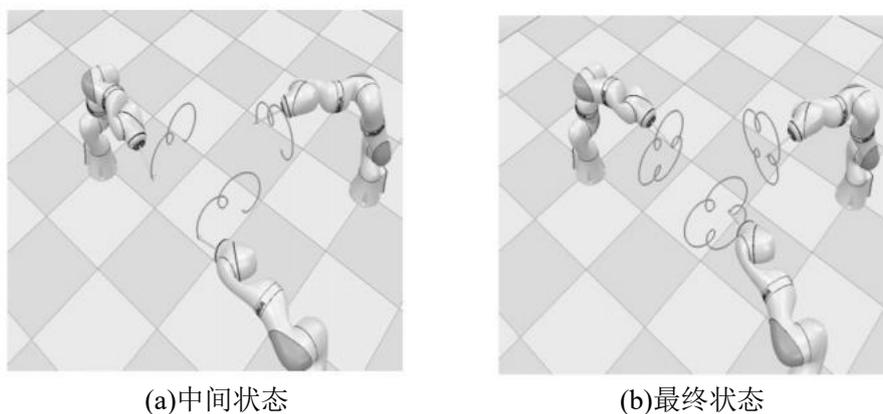


图 5.16 V-REP 环境下对三环曲线的跟踪效果

第6章 总结

近几十年来，智能协同控制技术蓬勃发展，未来在计算机算法的加持下，智能协同控制将进一步快速发展，会更好的应用于企业和教育产业，成为我国经济产业的重要组成部分。智能协同控制在能源互联网、智能车辆、多运动体系统、多智能体、无人机、航天器和机器人等多个应用场景中都发挥着关键作用。通过实现多个智能实体之间的协调和合作，智能协同控制系统能够优化资源利用、提高系统效率，并确保安全可靠地完成各种任务。追求智能化，解放双手，实现任务的分配、资源的优化和决策的协同是智能协同控制的发展目标。回顾它的发展历史，发现它是智能协同控制、物联网、控制理论等多个领域的交叉应用，是随着计算机技术的愈发成熟，才有了广泛的研究和应用前景。

我国对智能协同控制的发展环境高度重视，协同控制发展策略不断完善，根据观研报告网发布的《中国智能控制器行业发展趋势调研与未来投资分析报告（2022-2029年）》，我国将加大扶持智能控制的力度，比如在上海，我国投资2.2亿元打造双制协同“中国样板”，将智慧城市和智能网联汽车融合发展，双智协同发展即智慧城市和智能网联汽车融合发展，是一个综合性、系统性工程，需要城市、道路、汽车等各种要素共同参与，相互支持、相互协同，以解决或突破各领域‘单打独斗’过程中遇到的困难。

党的十八大以来，我国智能控制产业进入高速发展阶段。与其他国家相比，我国在计算机视觉、语音识别、自然语言处理等领域具有领先优势，为后续智能控制发展奠定了坚实基础。随着当前智能控制逐步走向通用型的发展新阶段，为充分发挥我国智能协同控制发展多方面比较优势，应从多角度发力，促进智能协同控制创新与治理的协同发展，加强国内国际交流合作，推动智能协同控制更好地造福人类。

营造创新生态，不断提升自主创新能力。技术方面，要加速智能协同控制基础设施建设布局，加快芯片、器件、算法等软硬件研发，取得核心技术突破。数据方面，智能协同控制依赖于大量数据的标注与学习，应充分发挥我国海量数据的优势，健全数据流通交易制度，强化各类数据资源汇聚与高质量供给。场景方面，要充分发挥我国超大规模市场及丰富应用场景的优势，促进智能协同控制与实体经济深度融合，推动各类主体开放场景机会、提升场景创新能力。人才方面，要持续强化基础研究工作，优化学科布局，推进学科交叉融合，实施一批具有战略性的国家重大科研攻关项目，培养精通算法和工程实现的高水平人才。通过聚集技术、数据、场景、人才等创新要素，营造创新生态，激发智能协同控制创新潜力。

重视防范风险，推动智能协同控制良性健康发展。针对技术风险，要推动智能协同控制安全攻防技术创新，降低智能协同控制模型遭受攻击的风险。要提高数据质量，降低模型算法偏差。针对意识形态及伦理风险，要重点关注智能协同控制技术本身存在的体制机制不健全与制度不完善等问题。一方面，在借助智能协同控制赋能意识形态治理的同时，要将我国意识形态安全要求贯穿科学研究、技术开发及应用等科技活动全过程，使智能协同控制产品的研发及利用遵守法律法规、社会公德、公序良俗，体现社会主义核心价值观；另一方面，要加快推进科技伦理治理法律制度建设，强化智能协同控制算法审查及监管机制，构建智能协同控制等重点领域的科技伦理规范。深入开展科技伦理教育和宣传，构建良好智能协同控制伦理氛围，推动智能协同控制安全可控、健康有序发展。

加强国内国际交流合作，促进互利共赢。面向国内，各地区各行业智能协同控制发展布局要坚持与国家规划方向一致，并结合自身优势构建具有特色的发展格局。加快建设国家智能协同控制发展试验区，推动试验区在创新与治理方面先行先试，发挥示范引领作用，促进地区间、校企间智能协同控制发展的交流与合作。面向国际，要积极搭建智能协同控制发展各方参与的开放性平台，推动形成具有广泛共识的国际智能协同控制治理方案，通过打造中国智能协同控制发展的成功版本，向国际社会发出中国声音、提出中国方案、贡献中国智慧。

在未来物联网时代，工具将会赋予更多拟人化的功能，人们的生活更多是由智能的“小助手”辅助，智能协同控制在未来的发展必将扮演重要角色，向更高更好的层次发展。