

面向目标的控制系统

陈文华 英国拉夫堡大学航空与汽车工程系

目前控制系统的主要工作方式是，使系统的输出保持在给定的设定值，或者跟踪给定的参考信号。那么给定的设定值或参考信号是怎么来的？由谁来确定？通常它是由工艺人员或系统设计师，综合考虑系统运行环境、设计性能要求、各种物理及安全限制等，设计出来的。为了保持性能或能耗等最优，通常随着系统运行环境如原材料等变化，需要重新设计设定值或参考信号。如能让控制系统根据性能要求和环境变化，自己自动设计最优设定值或参考轨迹，取代人的工作，将进一步实现更高度的自动化，达到智能自主。

这篇文章介绍了实现这样高度自动化系统的一个概念框架——面向目标的控制系统。首先介绍什么是高度自动化系统，然后介绍面向目标的控制系统的理念，比较它与现有控制系统结构之

间的区别，指出它的基本特征，并用自动驾驶汽车进一步说明它的原理。最后介绍最近提出的实现面向目标的控制系统的一种技术，即主动利用和探索环境的双重控制理论，初步阐述了它和人工智能及解释人和生物智能的神经认知科学之间的关系。



图1 面向目标的行为

一、高度自动化系统

无人驾驶汽车、无人机、在家照顾老年人和残疾人的医疗机器人、全自动工厂和仓库（图2和图3），这些都是我们每天在新闻和社交媒体上看到的热门话题，也是我们餐桌上热烈讨论的话题。这些系统是人工智能和其他最新技术支持的高度自动化（High Levels of Automation, HLA）系统的典型例子。我们的社会、公众和政府对这些高度自动化的系统寄予了很高的期望，因为它们具有开发新产品和新服务的巨大潜力，可能彻底改变我们的生活和社会。但是，我们准备好接受这些未来的系统，进入一个高度自动化的社会了吗？它们安全吗？

自动化，如制造业中的生产线，极大地提高了我们社会的生产力和财富水平。然而，目前的自动化只能在受控环境下和在预先定义良好的条件下执行重复任务。为了利润最大化和其它原因，人们已经尽可能实现在现有的自动化技术范围内可以自动完成的任务。要进一步提高生产效率，就要发展高度自动化，能自动实现那些现在不能完成的复杂任务。在高度自动化系统，如自动驾驶和无人机中，自动化系统能够及时、适当地响应环境、目标和事件的变化是至关重要的，在执行分配任务时降低对人为干预需要的程度。在未知或不确定的环境中自动完成任务是极其困难和具有挑战性的，需要高水平的智能和自主性来根据观察到的信息做出决策。如果要自动实现最优的决策或控制方案（根据用户定义的指标，例如生产力或效率），那么挑战将更大。

在很大程度上，高度自动化与自主性密切相关^[1,2]。自主性可以被认为是自动化的最高水平，可以在所有条件下，而不是在预定义的一组条件下执行任务/操作。尽管如此本文不会明确区分高度自动化和自主性的术语，主要采用并倡导高



图2 全自动化的仓储流水线

度自动化这个术语。这是因为高度自动化强调自动化的渐进过程，它是从当前的低级别自动化开始的。它还强调了在大多数情况下，还会需要人类参与自动化过程，比如作为监督者、用户或顾问。当然随着自动化水平的提高，人类参与的程度可以减少，最终实现（完全）自主性，即系统能够在没有直接人为干预的情况下自行做出所有决策和行动。上述思考也反映在汽车行业最近从自主车辆（autonomous vehicles）改变到自动车辆（automated vehicles）的术语变化中^[3,4]。在美国汽车工程学会（SAE）定义的驾驶自动化等级中，它的最高级别，即5级全驾驶自动化，在许多意义上都可以被认为是自主性。

高度自动化的另一个特征是控制设计、规划和决策制定之间的界限消失了。这些术语在不同的行业学科，例如控制工程、运筹学研究、人工智能、机器人、金融等领域，广泛使用，并且在不同的背景下可能具有自己的含义。高度自动化通常需要面对动态和不确定环境，这就要求有决策制定和规划（例如任务、路径）能力。由于高度自动化中所有的决策和计划都是基于实时更新的感知和其他信息制定的，并且在实时执行，它们影响了自动化系统的行为，因此实际上“控制”了系统及其与运行环境的交互。在这种情况下，决策制定、规划和控制之间没有根本区别，除了

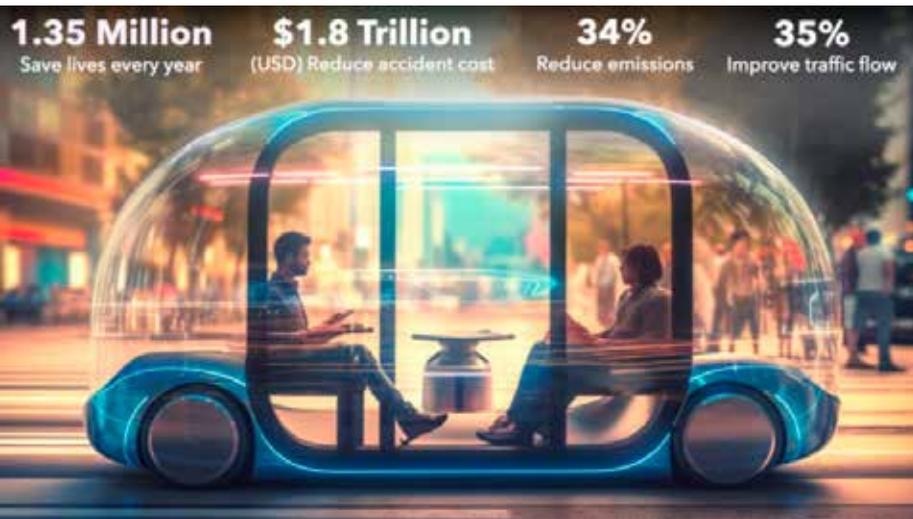


图3 自动驾驶汽车及社会效益

控制更常用于低层控制回路，在机器人和自主系统的更高回路中倾向于使用决策和规划等术语^[1,3]。

二、面向目标的控制系统

控制理论在当前自动化系统的开发和应用中起着核心作用。它提供了系统化和严谨的设计和过程，以确保所得控制系统的性能和稳定性。从当前的低水平自动化向高度自动化发展时，当前的控制理论不能满足，因为它无法像它为低水平自动化所做的那样，为无人驾驶汽车和无人机系统提供分析和设计支持。算法的复杂性（如嵌入式人工智能功能）、处理未知或不确定环境中出现的挑战，以及系统设计要求和任务的复杂性，需要新的控制理论来支持未来的高度自动化系统设计和分析。

为回应这种需求，面向目标的控制系统（GOCS）框架最近被提出了（图4）。它试图将控制系统设计的基本思想，从目前的“如何（how）”完成一个任务，转变为“什么（what）”是需要完成的。在典型的经典控制结构中（图5），控制系

统被设计为，达到并保持在设计者指定的设定点或跟踪参考轨迹。这就是为什么控制系统设计通常被表示为跟踪或调节问题。控制系统设计者通过精心综合考虑系统的性能、安全及各种要求，设计出最理想的操作条件（例如设定点）或轨迹（如动作程序），然后传递给控制系统去实现。通过这种思路，设计者指导控制系统“如何”自动达到更高层目标（例如节能或提高生产力）。在面向目标的控制系统

框架中，设计者指定高层目标（即“什么”）和约

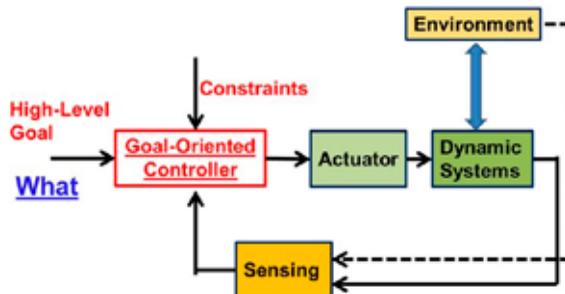


图4 面向目标的控制系统框架

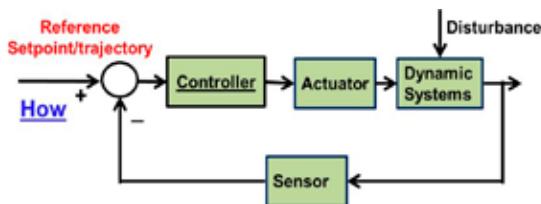


图5 常用的控制系统结构图，通过仔细设计工作点或参考轨迹提供给控制系统，高层目标可以实现

束（例如安全或资源），由控制系统决定最佳实现方式（即“如何”），完成目标并满足所有约束。

我们可以用一个日常的例子来阐述这两种设计理念的区别。一个经理要求团队中的一名成员从北京前往南京执行任务。在目前的控制系统设

计方法中,经理需要指导该成员“如何”从他们当前位置去南京的每一个细节,包括使用哪种交通工具(出租车、公交车、地铁)去北京火车站以及相应的发车时间,具体什么时间乘哪趟火车到南京,以及从南京火车站如何到达具体的目的地等。这与父母指导幼儿的方式十分类似。然后该成员按照计划的每一个细节来执行完成这个任务。但万一出现意外事件或变化怎么办?比如公共汽车或火车取消或延误?他只有等待经理告诉他该怎么做。在面向目标的控制设计理念下,高层目标很清楚,即去南京的某个特定地点。同时他还要告诉该成员一些限制,例如到达目的地的最后期限和可用预算范围。由该成员根据所有他能得到的信息,决定什么是完成该任务的最佳方式(即他自己决定“如何”,而不是别人告诉他)。

显然,为了实现面向目标的控制系统,它要求控制系统具有更高水平的智能和能力,因此控制系统也具有更高水平的自动化或自主性。根据任务和交通环境的知识,该成员制定出最合适的旅行计划,例如选择从北京到南京的交通工具,可以乘坐火车或飞机,或驾车,以及选择合适的交通工具(公交车、地铁或出租车)到北京火车站,并决定相应的出发时间。如果旅行计划中有任何中断,例如公交车、地铁或火车/飞机的延误或取消,该成员将根据更新的交通信息、预算和时间的约束重新规划该任务。

更重要的是,这种设计理念还赋予了该成员寻找并利用由于交通环境变化而可能带来的机会的能力。例如,可能有人碰巧开车去北京火车站,所以该成员可以搭顺风车,或者飞机票有很大的折扣,可以选择坐飞机而不是火车去南京,或者由于交通状况比预想的好得多,公交车到达火车站的时间比计划快得多,所以可以乘坐更早的火车。相反,根据当前的控制系统设计理念,该成

员死板地照着经理制定的计划执行,而不会利用这些机会。这个例子也说明了不同自动化程度之间的区别。实际上,衡量智能和自主水平的一个关键特征是能否进行面向目标的行为。

除了从“如何”到“什么”的设计理念的根本转变之外,图5中的经典控制系统框架和图4中的面向目标的控制系统的框架之间还有几个关键区别。

1. 控制设计的任务要求。目前控制系统中的目标/任务通常非常简单。它们常可以表述为或转变为跟踪或调节问题,通过设计设定点或给定理想轨迹来实现。基于此,从中导出相应的性能指标或评价标准,用于定义系统设计的性能要求,例如,在时间域中的超调、上升时间和稳态误差,或在频率域中的带宽和阻尼比,或优化某一指标。然而,随着自动化水平的提高,越来越复杂的任务必须由控制系统完成。这成为限制当前控制分析和设计技术应用到高度自动化系统的主要瓶颈之一。有时,甚至很难处理随处可见的简单任务,例如,一个应急系统的设计要求可能是,“在警报响起10秒后,除非先发出一切正常的信号,否则系统必须关闭。”在当前的控制理论中,很难应对这种类型的任务,因为它缺乏能够在同一个数学框架下,同时表达这些任务和系统的动态模型的能力。应该注意的是,一些现有的控制技术,如极值寻求或经济模型预测控制,能够处理一些更复杂的任务,但仍然相当有限。在高度自动化系统中,需要有严格的方法和相应的数学表示来描述复杂的任务或高层次目标。最近在时态逻辑控制方面的进展,展示了一种在描述高层控制目标方面很有前途的方法。计算机科学中的形式化方法,如各种类型的时态逻辑,可以用于复杂控制系统设计要求的描述。

2. 约束在面向目标的控制系统中起着核心作

用。在产生控制方案和决策时，必须考虑到各种各样的约束。一些可能来自物理限制，如温度、压力、位置，但其他可能来自更广泛的范围，如安全、资源、法律，甚至文化或道德等方面的考虑。这在目前倡导的以人为中心的工程设计中尤为重要。所有约束都必须仔细考虑并用数学严格表示，才能保证因此产生的控制动作和决策是可行的、能被接受。在上面的旅行例子中，必须明确截止日期和预算的约束，才能保证产生合理和可接受的旅行计划。这些约束在当前控制设计方法中，由控制系统设计者在设计设定点或参考轨迹时，显式或隐式地考虑了。此外，目前的大多数控制设计技术，除了少数像模型预测控制之类的技术外，无法显式地考虑状态和控制等约束。面向目标的控制系统旨在替换人为设计，自动的寻找系统的最佳运行条件或最优地完成该任务的过程，以提高自动化水平。也就是说，面向目标的控制系统中指定了“什么”目标应该实现，而“如何”实现由控制系统本身决定。如果没有明确指定必须满足的必要约束条件，面向目标的控制系统所做的控制方案和决定可能是不合理的，甚至是不安全的。

3. 环境的重要性。高度自动化系统的一个关键特征是，它可能在一个（部分）未知或不确定的环境中运行，所以理解、学习和以最佳方式应对环境非常重要。因此，环境建模、感知和理解成为面向目标的控制系统的一个重要组成部分。在生成控制动作时，不仅要考虑系统动态行为，而且还要考虑环境，来完成指定的目标和满足给定的约束。在当前的控制理论中，环境的影响主要通过干扰或系统动态参数的变化来表示，因此，当前控制系统设计的一个核心目标是排除干扰的影响。但这要么过于简化，要么不能完全反映环境的影响。然而，高度自动化系统不仅旨在减少

环境对其性能的影响，更重要的是与环境和其他相关利益者一起协商和妥协。例如，在自动驾驶汽车中，控制系统必须适应交通状况的变化，并在需要时给其他车辆 / 行人让路。

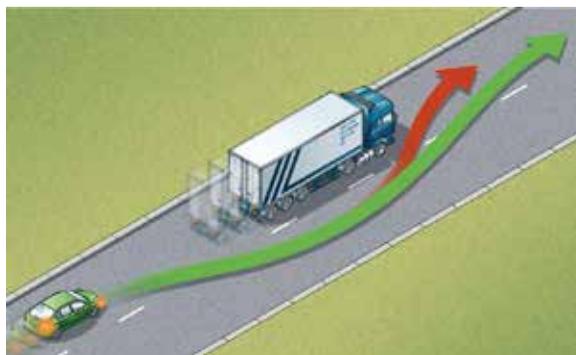


图6 超车是驾驶中最危险和难度最大的一种机动

现在让我们用图6中所示的自主超车来进一步说明面向目标的控制系统概念。考虑这样一种情况，一辆车在一条有单向车道的乡村道路上靠左行驶。有一辆车停在车道上，自动驾驶车辆需要从右侧超过停的车辆。这意味着超车车辆必须在对面车道上行驶一段时间，并且必须给任何突然出现的来车让路。图7是使用面向目标的控制系统设计的控制系统结构图。高层的目标是，“安全超过停止的车辆”。当然，也可以添加更多细节，如“不要撞到两边的路缘”和“只能在超车过程中的短时间超过速度限制”。面向目标的控制系统考虑的约束包括，自动驾驶车辆与任何周围车辆之间的安全距离、道路宽度、速度限制、传感器范围、传感器的视野、最大加速度或减速度、可接受的转向角或角速率以及车辆的方向等。根据当前车辆动态和环境信息，包括任何来车的速度和位置，可以设计一个面向目标的控制器，它可以安全地执行超车任务，同时遵守所有约束。它由三层组成，最高层的是模式 / 行为规划器，它根据基于自动车辆的动态系统和环境（例如交通状况和

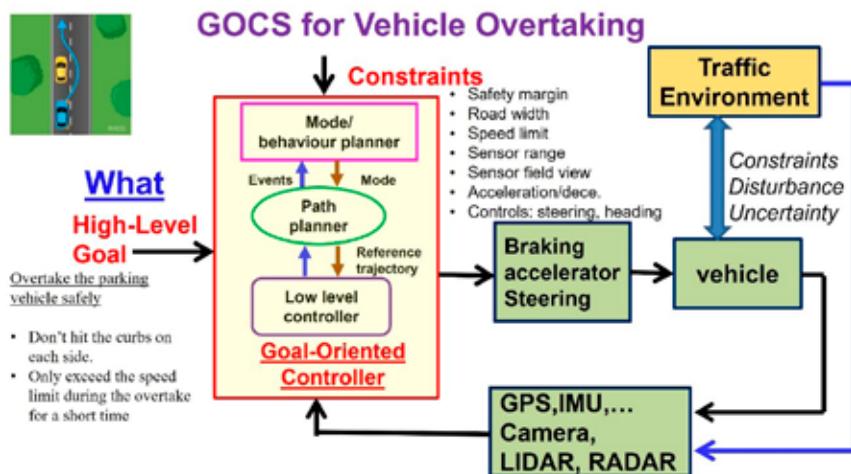


图7 基于面向目标的控制系统概念设计的自动超车功能

其他车辆)的所有可用信息,决定执行超车任务的最佳行动方案。它的高层行动决定,如超车或者在停止车辆后面减速等对面车辆过去,传递到下一层的路径规划,它根据实际路况给出执行由顶层指示动作的最佳可能路径。例如,在停止车辆后面减速等待来车通过,但不要撞到停止的车辆或太靠近而阻挡自动驾驶车辆传感器的视野。计算出的运动轨迹被转发到最低层的车辆控制系统,作为车辆跟踪的参考轨迹。面向目标的控制系统的顶层不断根据最新的交通环境信息重新评估其决定,就像在经典控制系统中使用反馈一样。例如,一个已经启动的超车动作可能不得不放弃,转入等待,因为有一个新的来车突然出现。

在面向目标的控制系统框架中,只指定了高层的目标(“什么”),面向目标的控制系统本身根据实时交通状况和自动驾驶车辆的状态,确定何时以最佳方式执行超车。目前,自动驾驶汽车中最广泛使用的方法是基于规则的方法^[9],根据交通状况和预定义的规则做出决定。借助计算机视觉和AI算法,自动驾驶汽车感知周围环境,确定相应的场景。根据场景的解释,设计者教车辆使用预定义的规则,

来决定采取哪些相应的动作。如果新的场景或相应的规则没有在车载计算机中定义,车辆将不知道如何处理它。

无独有偶,最近图灵奖得主杨立昆(Yann LeCun)教授提出了目标驱动的人工智能系统(Objective Driven AI Systems)^[8]。针对大语言模型等现有人工智能技术对数据和算力不可持续的依赖等缺点,他提出下一代的人工智能应该由目标驱动,通过和环境交互,自我学习、推理、规划。这和面向目标的控制系统的理念是惊人的一致。

三、利用和探索的双重控制(Dual Control for Exploitation and Exploration)与主动学习

当在未知或变化的环境中运行时,高度自动化系统的理想特征之一是它能够自动优化其性能,使其不受环境变化或不确定性的影响,这称为自动优化控制。也就是说,高度自动化系统能够根据定义的惩罚或奖励函数(例如生产力、能量损失或效率),自动获得并保持其在未知环境中的最佳运行状态,并能够自动跟踪随环境变化而变化的最佳运行状态。

要实现这种能力，重要的是高度自动化系统能够有效地学习环境并理解环境变化对性能和系统行为的影响。GOCS 最近的一个主要进展之一是开发了一种基于利用和探索的双重控制 (Dual Control for Exploitation and Exploration) 框架，它能够主动探索环境，具有主动学习能力^[5,6]。其根本原理是，一个在未知环境中运行的系统，它的控制动作具有双重效应。也就是说，控制动作不仅改变动态系统自身的行为和状态，而且改变它与环境互动，进而产生有信息量的新数据，从而改变它对周围世界的理解。已经证明，双重控制实现了利用（基于当前认知实现控制任务）和探索（主动探测环境改变认知）之间的最佳权衡^[6]。

控制动作的双重效应在控制理论中很早就被认可，但传统上主要关注动态系统本身的不确定性，例如估计系统状态和未知系统参数。相反，正如在强化学习中一样，面向目标的控制系统更关心系统运行环境的不确定性。如果放在传统控制框架下考虑，这里考虑的主要是性能指标中的不确定性，而不是动态系统自身，比如性能指标中的未知权重，或系统的未知最佳运行条件（如最佳工作点或最佳运行轨迹），利用控制动作的双重效应自动探索学习这些未知。性能指标中的不确定性来源于相同的控制动作和系统状态在不同的环境可能产生完全不同的奖励 / 成本后果，例如，一个驾驶动作在一种交通状况下可能是好的，但在另一种交通状况下变得危险。这种来自环境的影响可以反映为奖励 / 成本函数中的权重未知，随环境变化而变化。

利用和探索的双重控制是受自主搜索空气中化学污染源的研究启发而开发出来的^[5]，已经在地面机器人和无人飞机上使用，显示了其优越的性能。它也已经应用到在未知路况下的自主紧急制动、在变化的海洋条件下波浪发电（如图 8），以

及在未知环境中的无人机跟踪，表现出良好的性能。它的理论分析如稳定性和收敛性也有初步进展。文章 [6] 解释了为什么利用和探索的双重控制



图8 双重控制可以用于自动优化海浪发电，它能根据目标需要，即产生最大的电力，不断调整自己的运动，适应海况环境的不断变化

比强化学习更适用于在不确定环境中运行的工程系统，包括高度自动化系统。

3.1 自由能原理和主动推理

最近一个有趣的发现是，利用和探索的双重控制 (DCEE) 的概念与神经科学中用于解释和理解人类和动物智能行为的自由能原理 (free energy principle) 和主动推理 (active inference) 密切相关 (图 9)。神经生物学中的自由能原理由英国皇家学会院士、前世界人脑学会主席 Karl Friston 教授 (图 10) 提出^[7]，旨在统一现有的大脑理论，并提供一个关于感性行为的第一原理。基于此，主动推理认为，人类或动物采取的行动是为了最小化其对周围环境理解的不确定性，该不确定性可以用自由能量来度量，这被认为是所有生命系统的基本生存原则。它与利用和探索的双重控制基本思想类似，强调探索对认知的影响。正是这一主动探索的特征，为自由能原理带来了主动学



图9 自由能原理和主动推理用来解释人和动物的智能

习能力。这促进了人和动物的探索性行为，使其能够更加理解世界，使世界变得更可预测。令人惊讶的是，尽管主动推理和利用和探索的双重控制是从完全不同的背景和动机发展起来的，但它们殊途同归。有兴趣的读者可以进一步阅读 [6] 中关于这两个从完全不同学科发展起来的观念之间的相似性的初步讨论。当然，还需要更多的工作来理解这两种工程和生物学方法之间的关系，促进它们的发展，设计更好的面向目标的控制系统。

四、结束语

本文解释了新提出的面向目标的控制系统背后的主要动机和基本思想。高度自动化社会的需求和人工智能及数据科学的最新发展，对控制系统设计提出了巨大的挑战，而当前的控制理论对这类系统并不能提供有效的分析设计工具。作为



图10 神经科学家Karl Friston教授：自由能原理和主动推理理论的创始人

一种探索，面向目标的控制系统被提出来应对这些挑战。它主张要改变控制系统设计的基本理念，从当前告诉控制系统“如何”完成一个任务转变为告诉它“什么”是需要实现的，即高层的目标是什么。

致谢 这项工作得到了英国工程和物理科学研究委员会 (EPSRC) 最高人才项目“面向目标的控制系统:干扰、不确定性和约束”的支持，项目号 EP/T005734/1。

参考文献

- [1] P. J. Antsaklis, K. M. Passino, and S. J. Wang. Towards intelligent autonomous control systems: Architecture and fundamental issues. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 1989, 1: 315 – 342.
- [2] Panos Antsaklis. *Autonomy and metrics of autonomy*. *Annual Reviews in Control*, 2020, 49: 15 – 26.
- [3] Claudine Badue, R`anik Guidolini, Raphael Vivacqua Carneiro, Pedro Azevedo, Vinicius B Cardoso, Avelino Forechi, Luan Jesus, Rodrigo Berriel, Thiago M Paixao, Filipe Mutz, et al. Self-driving cars: A survey. *Expert Systems with Applications*, 2021, 165: 113816.
- [4] Society of Automotive Engineers, “Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for onroad motor vehicles,” Tech. Rep., 2021.
- [5] Wen-Hua Chen. Perspective view of autonomous control in unknown environment: Dual control for exploitation and exploration vs reinforcement learning. *Neurocomputing*, 2022, 497: 50 – 63.
- [6] Wen-Hua Chen, Callum Rhodes, and Cunjia Liu. Dual control for exploitation and exploration (DCEE) in autonomous search. *Automatica*, 2021, 133: 109851.
- [7] Karl Friston. The free-energy principle: a unified brain theory? *Nature reviews neuroscience*, 2010, 11(2): 127 – 138.
- [8] Yann LeCun. A path towards autonomous machine intelligence. 2022. <https://openreview.net/forum?id=BZ5a1r-kVsf>.



【作者简介】陈文华，1991年获东北大学工业自动化专业博士学位。现任英国拉夫堡大学航空与汽车工程系无人飞机及自主车辆讲座教授。主要从事非线性干扰观测器控制、模型预测控制以及无人自主系统等方面的研究，创建了拉夫堡大学自主系统研究中心。陈文华曾任全英华人自动化与计算机协会主席，教育部长江讲座教授。为 IEEE Fellow, 英国注册工程师 (CEng), 英国工程技术学会和机械工程学会 Fellow。曾获英国工程与自然科学研究委员会资深杰出人才奖 (Established Career Fellowship)。