

为人工智能打造应对现实世界复杂变化的理论方法体系

■本报记者 甘晓

在经典的机器学习理论中,世界往往是静止的。算法在封闭、静态的“数据温室”里得到精心培育,研究者通常假设未来的环境一成不变。然而,现实世界却充满了风吹雨打。

如何让人工智能(AI)模型走出理想温室,在开放、动态的真实环境中依然稳健、可靠?2020 年起,在国家自然科学基金创新研究群体项目(以下简称创新研究群体项目)支持下,中国科学院院士、南京大学教授周志华带领团队,直面复杂多变的现实挑战,为 AI 量身打造了一套应对现实世界复杂变化的理论方法体系。

值得一提的是,这是国家自然科学基金委员会(以下简称自然科学基金委)2018 年设立人工智能一级学科代码以来,资助的第一个创新研究群体项目,名为“面向开放动态环境的机器学习”。

“得益于国家自然科学基金的长期资助,我们在前瞻性基础研究上深耕,开辟了机器学习新的原创性发展方向。如今,这一领域的创新模式已发生根本性转变——从过去的‘企业出题’转变为现在的‘学术牵引’。”周志华在接受《中国科学报》采访时说。这意味着,基础研究正在成为产业创新的源头活水。

AI 如何面对真实世界

机器学习是 AI 的核心研究领域。周志华介绍,模型在训练时,会从数据中已知的特定因素里总结出规律,等未来真正工作时,也还会套用这些规律。同时,模型也默认它见过的类别就是全部——训练时只见过猫和狗,以后遇到的就只能是猫或狗。

经典的机器学习理论正是基于这种“刻舟求剑”的假设,认为模型处于“封闭环境”中。只要收集大量数据数据训练出模型,就能用它来做预测。

然而,现实世界总是充满了变化。以环境污染监控为例,随着气候变化或产业调整,污染物的扩散规律和分布特征可能随时发生改变,甚至会出现训练时从未见过的新污染源。如果模型不能适应这些变化,依然死守着旧有的规律,监控结果就会失真。

周志华团队将这些复杂的现实挑战,凝练为“小样本”“变分布”“常更新”“有交互”四个科学问题。



周志华作学术报告。

受访者供图

具体而言,在开放环境中,新情况往往缺乏历史数据,这就要求模型具备从小样本中提炼本质规律的“超级举一反三”能力。同时,事物发展的规律本身不断变化,意味着模型必须持续学习与自我迭代。此外,模型也不能仅靠离线数据被动学习,必须引入人与环境的交互,通过主动探索来获取关键信息。

2018 年,为响应国家新一代人工智能发展规划,自然科学基金委首次设立人工智能一级学科代码。为了突破机器学习的基础理论瓶颈,周志华团队于 2019 年申请了创新研究群体项目。项目成功获批,成为这一学科代码下的第一个创新研究群体项目。

几年来,在创新研究群体项目支持下,周志华团队从机制、框架到底层模型进行了全链条的理论重构。

面对开放环境中数据分布漂移、新情况层出不穷且样本稀缺的多重挑战,他们发现了最优动态遗憾在线学习机制,突破了传统误差线性增长的瓶颈,让 AI 在信息受限时也能精准追踪环境变化。团队还率先建立了开放环境学习理论框架,赋予 AI 识别未知类别与抗干扰的“免疫系统”,并解决了因果辨识领域困扰学界 20 年的难题。同时,他们提出的算法模型实现了强化学习计算效率的指数级跃升,为开放环境下的 AI 技术发展

奠定了坚实的理论基石。

周志华团队在国际学术期刊和会议上发表了一批高水平学术论文,并获授权一批国家发明专利,圆满完成了既定研究目标。

基础研究前瞻性的最好体现

周志华在机器学习领域的探索起步于 20 世纪 90 年代。他回忆道:“当时,机器学习可以说是‘大偏门’,是冷门中的冷门,甚至被人质疑‘机器学习不可能,AI 是骗人的’”。

在周志华看来,如果没有国家自然科学基金的持续支持,他可能不得不转去做当时一些热门的领域,否则科研都难以维持。

2000 年前后,刚刚博士毕业的周志华面临科研经费紧张的情况,在青年科学基金项目(C 类)支持下,周志华才有机会申请国际合作与交流项目,能够每年参加一次国际会议。“这在当时是非常难得的机会,对我初期的学术发展起到了很大的推动作用。”他表示。

2003 年,年仅 29 岁的周志华获得青年科学基金项目(A 类)资助,继续深耕机器学习领域。他说:“板凳冷不冷不重要,只要认为是重要的事情,不管什么时候总要有有人坚持下去。”

事实上,创新研究群体项目着力解决的开放环境机器学习问题,周志华团队早在 2012

年前后就开始布局。

“当时我们研判,用大量数据在封闭环境中训练模型的技术路线,国内外已经研究了 30 年,在原理和方法上基本成熟,需要攻克的是大规模工程化问题。”周志华介绍,“那么,从基础研究的角度,我们必须再往前一步,去探索那些尚未解决的难题。”

因此,他们将目光放在开放环境机器学习这个方向上,也成为世界上开展相关研究最早的团队之一。

2016 年,美国人工智能促进协会(AAAI)主席 Tom G. Dietterich(汤姆·迪特里奇)在作大会报告时,探讨了未来 AI 需要解决的核心问题,并提出了“通往鲁棒 AI”的愿景。报告中,他专门引用了周志华团队已经开展的工作。这意味着,中国学者的研究为未来 AI 的发展提供了极具前瞻性的理论依据。

“近 10 年来,我国 AI 研究发展非常快,已在一些领域有自己的特色和优势,在 AI 领域顶级学术会议上也能看到许多中国学者的身影。”周志华说,这样的变化不仅因为科技工作者的努力,更重要的是国家的发展让科技工作者赶上了好时候。

周志华团队在创新研究群体项目支持下取得的理论成果并没有停留在纸面上。他们坚持将论文写在祖国大地上,在某重大任务中领衔攻关,历经 7 年砥砺前行,使我国在关键领域关键技术上取得领先优势,被评价为“取得了远超预期的重大成果”。

与此同时,周志华团队与国内某头部企业联合设立实验室,将前沿理论转化为企业核心技术。2025 年,双方进一步合作打造先进研究中心。企业方面认为,周志华团队的原成果已实现行业引领,合作模式也随之发生根本转变,不再是企业出题、高校答题,而是由科研团队研判关键方向、企业出资支持,用研究成果引领产业发展。

在周志华看来,这正是基础研究前瞻性引领性的最好体现。

“左右互搏”的良性循环

当下,AI 浪潮席卷而来,机器学习也从昔日的冷门一跃成为炙手可热的焦点。但在热闹背后,周志华团队却敏锐地察觉到一个隐患:相比于应用层面的百花齐放,机器学习的基础研究面临着被“淹没”的风险。

究其原因,机器学习基础研究与应用技术研究存在差别。前者聚焦底层理论方法和关键算法模型,旨在从根本上提升 AI 的智能性、可靠性和可解释性。而后者则围绕某个特定应用任务领域,对已有方法和模型调整改进,以获得现实效用。

由于基础研究门槛高、出成果慢,许多团队更倾向于投入见效快的应用技术。

“但我们必须看到,机器学习基础理论与关键算法模型一旦突破,将影响深远。”周志华强调。例如,“支持向量机”源于统计学习理论和核方法,全世界的神经网络都在用“误差反向传播(BP)算法训练”,生成式 AI 技术则源于“生成对抗网络与扩散模型”。

“因此,大力加强机器学习基础研究,对实现我国 AI 领域高水平科技自立自强至关重要。”周志华强调。

为此,周志华组建了一支理论与应用紧密结合的团队。在这里,理论专家的成果可以直接在应用中验证,应用专家遇到的瓶颈也能在内部找到前沿理论支撑。两类人才互相尊重、和谐协作,形成了一种类似“左右互搏”的良性循环,让理论在应用中不断打磨,应用在理论的支撑下持续突破。

这种独特的科研氛围吸引了国际知名专家加入。澳大利亚莫纳什大学计算机系前主任、英国帝国理工学院机器学习方向带头人、英国皇家工程院院士等海内外学者先后全职加入团队。

在团队整体布局上,周志华始终坚持一个理念:没有任何一个算法模型是包打天下的。他认为,当前业界对大模型存在一定的迷信。如果无视实际需求,强行用大模型处理小模型即可胜任的任务,不仅会造成算力资源的浪费,还可能因过度设计而适得其反。因此,在应用落地时,必须坚持因地制宜、因任务制宜的原则。

面向未来,团队的目光投向了两个更加前沿的方向。一是探索“学件”路线,这种全新的机器学习范式试图让更多模型在互不泄露训练数据的前提下,实现高效的协作与组装;二是致力于攻克 AI 的“信任危机”,让模型变得更加可信、可靠。

在周志华看来,基础研究的使命就是去啃这些“硬骨头”。一旦在科学层面取得了初步突破,厘清了底层逻辑,他们便会将这些成果交给产业界,由工程团队去完成后续的方案设计与产品化落地。

服务国家需求,他们让古老学科“破壁”新生

■本报记者 杨晨 通讯员 罗莎

“这是一个古老又年轻的学科。”谈及真空电子学,电子科技大学电子科学与工程学院教授宫玉彬如此形容道。

从 19 世纪后期爱迪生发现热电子发射效应,到真空二极管、三极管的问世,人类算是摸到了信息社会的大门。后来速调管、磁控管、行波管、回旋管等相继出现,不仅支撑起通信、探测、成像和众多大科学装置,还应用于家用微波炉、医院计算机断层扫描(CT)和 X 光机这些日常设备。

真空电子学之所以年轻,是因为它从实验室走向工程应用后,仍有许多基础问题尚未解决。高效率、高功率、高频率、长寿命、小型化,是该学科发展的几个关键方向。

更重要的是,这门学科正通过新材料、新工艺、新计算手段与众多前沿领域进行交叉融合。老树渐发新芽。

2019 年,依托真空电子器件技术全国重点实验室,宫玉彬带领的真空电子学团队获得国家自然科学基金创新研究群体项目(以下简称创新研究群体项目)。在创新研究群体项目支持下,他们一边啃基础研究的“硬骨头”,一边为国家重大工程提供核心器件的技术支撑。

“要耐得住性子”

“真空电子学学科的发展可以从电子科技大学建校时苏联专家援建真空电子器件专业算起,经过几代研究者的努力一直延续到今天。”宫玉彬说道。

真空电子学这个学科最显著的特质在于其既不是纯粹的从 0 到 1 的自由探索,也不是简单的工程拼凑,而是以国家重大需求为抓手,在解决实际工程瓶颈问题中又反向探索最底层的物理规律。这恰恰是创新研究群体项目最看重的。

在行波管、速调管、回旋管、磁控管等真空电子器件的研制过程中,表面上看是提升相应的功率、效率和延长寿命,抑或缩小器件体积、减轻重量等工程指标,但归根结底指向的是一个基础科学问题:如何让高速运动的自由电子更高效地将能量交给电磁波?

宫玉彬以太赫兹频段的真空电子器件为例,当频率升至太赫兹频段,器件内部结构尺度缩小到微米量级,传统机械加工就会无能为力。“我们的做法是,首先在基础物理层重新

思考微尺度下电磁波与电子的相互作用机理,设计出适配微纳加工的新型结构。”宫玉彬介绍,同时引入计算机数控、光刻、紫外光刻电铸成型等新的加工工艺来替代传统加工手段。

“标准工艺流程基本保持不动,但在参数设置、材料选取上做针对性改进,而工艺端也需针对器件结构的特殊性做一些调整。”宫玉彬将这一过程概括为“双向奔赴”。

在他看来,研发真空电子器件,终究是一门急不来的学问,“要耐得住性子”。

一个器件,光图纸就要画几十到一百多张,涉及许多种材料、几十到上百个零件。每一件单独加工后,再装配到一起,工艺要求极高。装好了还得排气,因为要保证器件能在真空环境下工作。任何一个环节出问题,没有重来的机会,只能整个报废。

“从设计到制作,时间都以年为单位计算。”宫玉彬说,尽管器件在所应用的设备或装置里可能只是小小的一部分,但在研究者眼里,复杂的器件本身就是一个系统。为了提升设计效率,团队还将人工智能技术引入自主开发的模拟仿真软件,使计算周期大幅缩短。

真空电子器件的应用场景跨度极大,上至空间科学领域、大科学装置中的核心功率源,下至家用微波炉里巴掌大的磁控管,后者一年量产几千万支。

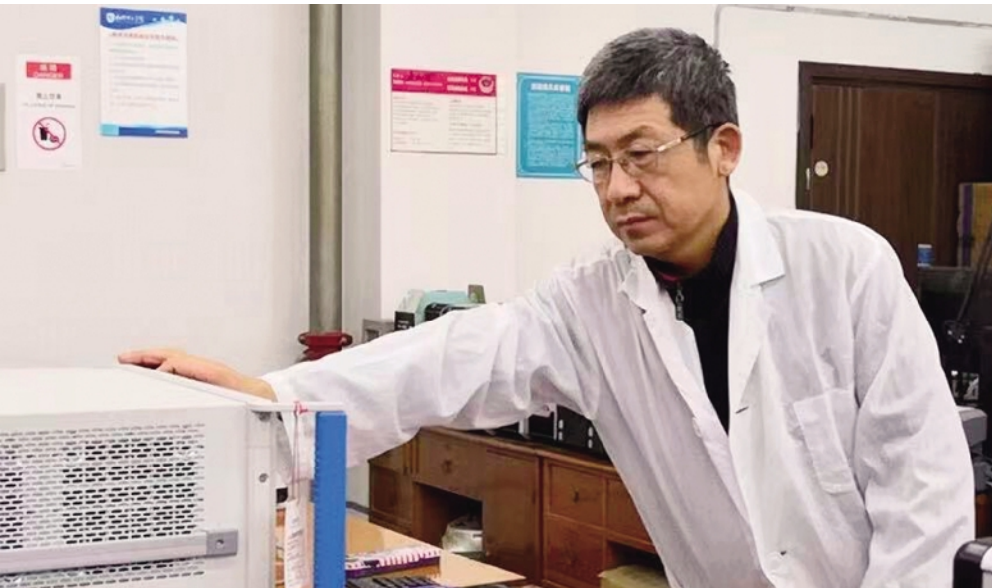
磁控管看似简单且基础,但在量产中仍有尚未解决的实际问题,为此团队与国内电器企业共建联合实验室开展攻关。“比如效率,把直流电转换成微波的过程中,能量损耗在哪个环节?如何降低?效率每提高一个百分点,乘以每年几千万支的产量,带来的经济效益就非常可观。”宫玉彬说。

像磁控管这样可以批量化生产的品类,在真空电子器件中实属凤毛麟角,其他器件绝大多数都得“一用一议”。

同一个底层理论,面对不同的应用场景,提炼出来的具体科学问题也不相同。例如,如果是要应用的大功率器件,就必须针对空间环境的特殊要求,从物理设计到工艺实现重新适配。在宫玉彬眼里,这恰恰是基础研究最有意思的地方。

使古老学科保持年轻

融合,是宫玉彬一直思考的问题。多学科



宫玉彬在工作中。

受访者供图

背景让他和团队对真空电子学有了一层特殊的理解:“等离激元、超材料这些新概念,最早是在光学和材料技术领域兴起的。能否把这些新东西引入真空电子学,在拓宽基础认知的同时,也让传统器件性能获得提升?”

2019 年,宫玉彬团队获得创新研究群体项目支持后,将表面等离激元和超材料引入真空电子学,形成了等离激元与超构真空电子学这一新方向,在真空电子器件性能上取得突破。

传统器件依赖真空中的自由电子,而二维电子气被限制在极薄界面层内运动,行为接近自由电子,却无需真空环境。于是,团队尝试用真空电子学的理论框架去解释和利用这一效应,研制出更小型的器件。

“以前的真空电子器件可能是米级、几十厘米级,我们现在尝试让它达到芯片量级。”宫玉彬说,这种真空电子学与微电子学的融合,为高频率、微型化器件开辟了新路径。

传统印象中,真空电子学是一门研究领域较窄的学科。但宫玉彬认为,其底层逻辑“场与自由电子相互作用”天然具备跨界辐射的能力。这一逻辑推动了真空电子学与其他学科的交叉融合,也持续刷新着应用交叉领域

的边界,使古老学科得以保持年轻。

“能不能把真空电子学中研究场与自由电子相互作用的基本物理原理,用于研究生命体当中无机粒子的跨膜运输问题?”怀揣着这一想法,宫玉彬团队基于创新研究群体项目与生命科学相关团队展开合作,推动了电磁生物效应方向的发展。

CT 球管、胸片透视的 X 射线源亦是真空电子学的重要研究内容。为此,宫玉彬团队还引进了一位专门从事 X 射线研究的年轻科学家。

在支持国家大科学装置方面,真空电子器件同样是不可或缺的核心动力源。“大型粒子加速器要把带电粒子从零加速到很高能量,能量从哪里来?就靠我们的大功率真空电子器件提供微波场。”宫玉彬介绍,受控核聚变研究中,对等离子体进行加热,其波源也是大功率真空电子器件。在他看来,这些应用已不再是简单的器件输出,而是将基础研究成果向前沿科学领域纵深推进。

团队必须自然形成

找准学科间交叉融合的切入点,需要敏锐度,但这份敏锐并非与生俱来。

“首先要有非常好的数学和物理基础,有了这个基础,你才能抓住问题的本质。”宫玉彬表示,扎实的基础之外,勤快同样重要。“要不停地阅读文献,掌握最新动态,分析这些动态跟所学的专业之间到底有没有关联。”

学生进入宫玉彬团队后,也被要求认真阅读文献,基本功打牢了,再逐步进入更深入的科研工作。

科研格局也要打开。“不能觉得‘这是我的技术,就不能跟任何人分享’。一个人不可能掌握全部知识,一定要跟同行、不同领域研究者以及团队内成员有广泛交流。”宫玉彬指出,创新研究群体项目的可贵之处在于,它有一个重要前提,即团队必须自然形成。

这意味着成员以及合作者之间原本就有长期的合作基础和学术默契,交流起来没有行政壁垒,不必先花时间磨合,可以直接碰撞、互相启发。

交流碰撞最终要落到解决基础科学问题上,一旦取得突破,影响是加倍的。一方面,器件性能提升后能够更好地契合国家重大需求;另一方面,整个学科在国际上的学术能力也因此得到显著提升。

创新研究群体项目执行 6 年间,宫玉彬团队老中青梯度齐整,自主培养和引进了 4 位高层次国家级青年人才,分布在真空电子学各细分方向,还有多人成长为国家级人才。

团队在国际上的学术影响力也在持续积累。近 5 年,团队两名 40 岁以下青年学者斩获国际真空电子学青年科学家奖,该奖项是领域内面向 40 岁以下青年科学家的最高奖励。而宫玉彬也担任了电气和电子工程师协会(IEEE)国际真空电子学技术委员会委员、2025—2026 年度 IEEE 真空电子技术委员会主席……

面向未来,真空电子学创新研究群体项目团队有张清晰的路线图。他们最看重的还是从国家重大需求里凝练出最底层的基础科学问题。“这是学科发展和交叉融合的根基。”宫玉彬说,此外还得盯着国际前沿,把研究不断与新原理、新材料、新工艺相结合。他们最终的目标仍然是把实验室里的成果变成可用的产品和装置。

宫玉彬也希望有更多具有研究基础,既能够瞄准国际前沿又能为国家作贡献的团队获得创新研究群体项目的支持,让科学家真正把论文写在祖国大地上。