

第一作者

## 清华大学一科研团队实现《自然》杂志 三连发

# 类脑计算,他们从0到1

中青报 中青网记者 叶雨婷  
通讯员 詹萌

想象有一天,机器可以像人一样思考和处理问题,这对于21世纪的我们早已不是一个陌生的话题。人工通用智能的梦想鞭策着人类不断探索脑科学的奥秘与用机器模拟生物神经网络的结构和信息加工的潜力,而后者就是我们所说的类脑计算,也叫神经形态计算。

然而,目前的类脑计算研究尚处于起步阶段,国际上还没有形成公认的技术标准与方案。10月14日,清华大学计算机系张悠慧团队和精仪系施路平团队与合作者在《自然》杂志发表题为《一种类脑计算系统层次结构》的论文,填补了类脑计算系统领域完备性理论与相应的类脑计算系统层次结构方面的空白。

这是一年多来,清华团队在类脑计算领域继“天机芯”和多阵列亿阻器存算一体系统之后于《自然》正刊发表的第三篇文章,也是国内计算机体系结构领域首篇《自然》论文。

为类脑计算系统领域提供 准绳

如果说,图灵完备性是通用计算机领域的圭臬,那么类脑计算完备性则是希望也能够为类脑计算系统领域的发展提供一个准绳。

通用计算领域有两个著名概念,一个是图灵完备性,另一个是冯诺依曼体系结构。前者用来衡量计算系统是否能够用来解决通用计算问题,后者则是通用计算机运作的体系结构,该结构具有存储部件与计算部件分离、程序与数据统一存储等特性。这两个基本概念几乎构建起了目前所有处理器、计算机、手机等设备的基本架构。

然而,现有类脑计算系统研究却没有这样的理论架构。类脑计算软硬件间的高度耦合阻碍了它们在独立发展的同时互相兼容的可能性,如何突破这一局面,扩展类脑计算系统的应用场景?这成了团队下决心要解决的重点问题。

通用计算领域的图灵完备性和冯诺依曼体系结构都是非常基础、大家也非常熟悉的概念,以至于很多人都不会意识到,对于新兴的类脑计算系统领域,这是一个需要首先解决的问题。计算机系研究员张悠慧说。

从传统通用计算机的设计哲学和方法论中汲取灵感和经验,团队针对类脑计算不像通用计算注重每一个计算过程的精确而更注重结果拟合的特性,提出了对计算过程和精度约束更低的类脑计算完备性概念,并且设计了相应的类脑计算机层次结构、图灵完备的软件模型、类脑计算完备的硬件体系结构以及位于两者之间的编译层。

另外,通过构造性转化算法,任意图灵可计算函数都可以转换为类脑计算完备硬件上的模型,这意味着,类脑计算系统也可以支持通用计算,极大地扩展了类脑计算系统的应用领域,也使类脑计算软硬件各自独立发展成为可能。

通俗来讲,完备性可以回答系统能够完成什么、功能边界在哪里等问题。研究完备性,可以为软硬件系统的解耦、划分不同研究领域间的任务分工与接口提供理论基础,我们的研究聚焦完备性理论研究,先回答基本的问题。张悠慧说。

交叉学科的 火花,成就《自然》三连发

这一突破,是学科交叉的成果。类脑计算属于交叉研究领域,涉及脑科学、电子、微电子、计算机、自动化、材料以及精密仪器等多个学科。学科交叉意味着研究中需要集各科之所长,但是专业壁垒却增加了学科之间互相理解、协同配合的难度。如何让一个生物学家不必深入钻研计算机理论却依然能理解进并将自己的专业前沿成果结合到类脑计算当中?这是交叉研究项目面临的现实问题。

《自然》杂志审稿人说,这项研究使得相关研究领域间的任务分工与接口更为清晰,有利于不同学科的研究人员专注于其专业领域,促进协同发展。

2019年,一辆自行车成为网络热点。这辆无人自行车可实时感知周围环境,自己保持平衡骑行。而它的大脑,正是施路平教授团队研制的“天机”(Tianji)人工通用智能芯片。这款由中国自主研制的芯片,更是全球首款异构融合类脑芯片。2019年8月1日,它登上了最新一期《自然》杂志的封面。

而此次文章的发表,意味着清华大学相关团队在一年多的时间内完成了类脑计算领域《自然》正刊三连发。从“天机芯”登上《自然》封面开始,到2020年初的文章(微纳电子系吴华强教授团队与合作者),至此一文,上述论文分别从异构融合的新型类脑计算芯片与系统、基于忆阻器件的神经形态芯片,以及类脑计算完备性与系统层次结构等角度完成了类脑计算领域的首次实现。

事实上,只有不让研究人员分心,专于所长,推动各个具体学科领域的技术突破,才能为类脑计算提供更加坚实的基础和支持。

施路平教授团队的研究面向新型类脑计算芯片与系统,是在面向人工通用智

能的应用方面开展工作,可以说是我们工作的牵引。而吴华强教授团队在新器件、新工艺层面的创新,则是我们工作的推动。对于我们研究的计算机系统结构而言,两者都是重要的支撑。张悠慧说:我们很荣幸能参与其中,进一步探索计算理论和计算机系统架构的问题。

据了解,清华大学对学科交叉要求极高的类脑计算研究高度重视,坚持有组织的科研,于2014年9月创立由7家院系联合而成的类脑计算研究中心,精仪系施路平教授担任中心主任。中心融合了脑科学、电子、微电子、计算机、自动化、材料以及精密仪器等学科,进行全方位类脑智能研究。

尽管文章从投稿到最终发表经历了不

到一年的时间,但这项成果的产生并不是一蹴而就的。在类脑计算系统设计和编译技术上,团队就已经在过去几年的不懈研究中打下了坚实的基础,加之此前清华在类脑领域新进展的借鉴与启发,都为这次类脑计算完备性和类脑计算系统层次结构的提出,提供了技术和方法上的支持。

### 小团队的 大项目

在学科 大咖 的支持和青年 后浪 的努力下,这个 小团队 最终做成了类脑计算系统理论与原型构建的 大项目。

从今年春节前夕投稿,到8月上旬正式被接收,论文的两轮修改都是在疫情期

间完成的。整个审稿过程无法在线下交流讨论和开展实验,对于团队而言无疑是一个挑战。但从另一个角度看,因为疫情期间哪儿也去不了,我们能更加潜心和专一地去做好这一件事。张悠慧说。

研究小组努力克服交流不便、实验数据处理困难等问题,对文章的实验设计做了较大补充与改进。

一开始审稿人认同我们研究问题的意义,但是并不理解我们对于研究问题的解决思路,对于是否有必要进行底层的计算理论设计,审稿人提出了质疑。计算机系博士后渠刚说,但是通过对整体行文逻辑、文章内容和原型实验的反复斟酌修改,以及对研究思路和质疑点的一一反馈,审稿人最后认同了我们的设计理念。

今年刚毕业的博士生李宇是完成计算完备性相关工作的关键主力,因为在科研方面的优异表现,他的博士论文也被评为清华大学优秀博士论文。另一位文章的共同第一作者是精仪系的张伟豪,师从施路平教授的他提出了能够充分利用类脑计算完备性的硬件抽象体系结构与映射方法,施路平教授的另一位博士生王冠睿则负责了全部硬件工作。大家各取所长,共同搭建起了类脑计算系统的层次结构。

70多页的反馈文件,一次又一次地讨论、修改、迭代,见证了团队一步一步迎难而上的努力。当审稿人说我们的研究明确了不同领域的分工和接口,将对类



张悠慧与学生们在开组会。 清华大学供图

脑计算的交叉研究产生积极作用时,我真的很受鼓舞,感觉到自己研究的东西是十分有意义的,也是被类脑计算社区所认可的。渠刚说。

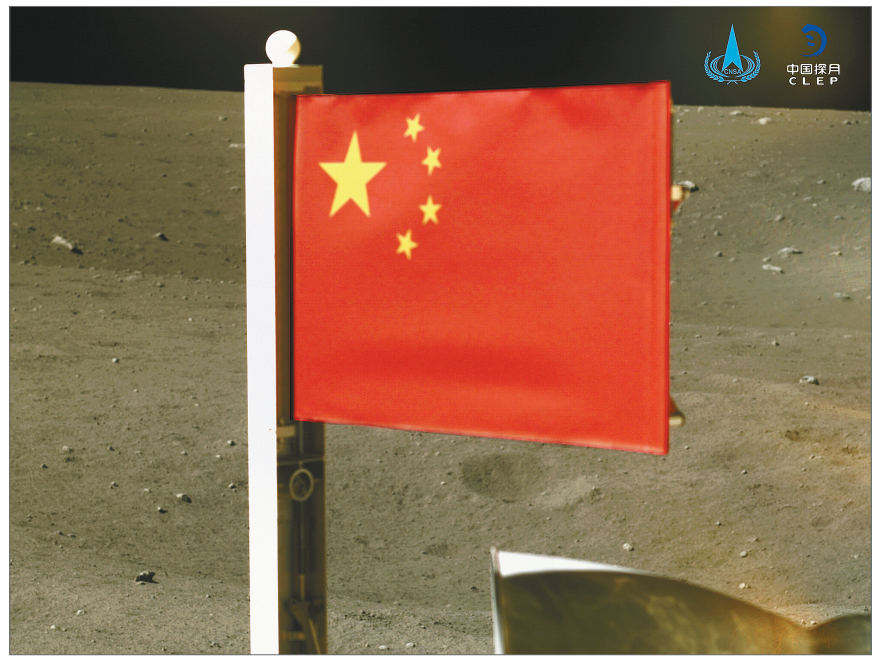
施路平表示,未来,在理论层面,团队将更关注类脑应用的 神经形态特性,并希望最终建立起一个与图灵完备相对应的全新类脑计算理想范式;在系统层面,团队将依托计算机系高性能超算与芯片方面的雄厚实力,研发受脑启发的支持通用计算的新型计算机系统结构与芯片。

尽管目标远大,道阻且长,但日积跬步,终将到达千里之外。至于是否能实现最初的梦想,时间会给所有的努力一个答案。施路平说。

零距离

## 五星红旗再次闪耀月球

### 揭秘国旗展示系统的3个 1



中青报 中青网记者 邱晨辉

旗开月表,五星闪耀。

12月4日,经过科研团队的数据接收和处理,国家航天局公布了探月工程嫦娥五号探测器在月球表面国旗展示的照片。这是继嫦娥三号、四号任务后,五星红旗又一次展现在月球表面,同时也是五星红旗第一次月表动态展示。

12月3日23时10分,嫦娥五号上升器从月面起飞,携带月球样品成功进入预定环月轨道,这是我国首次实现地外天体起飞。点火起飞前,嫦娥五号着上组合体实现月面五星红旗展开。

与嫦娥三号、嫦娥四号以及玉兔月球车上的国旗采用喷涂方式不同,这次嫦娥五号探测器亮出的国旗是一面真正的织物版旗帜。这一次,也是我国在月球表面首次实现五星红旗的 独立展示。

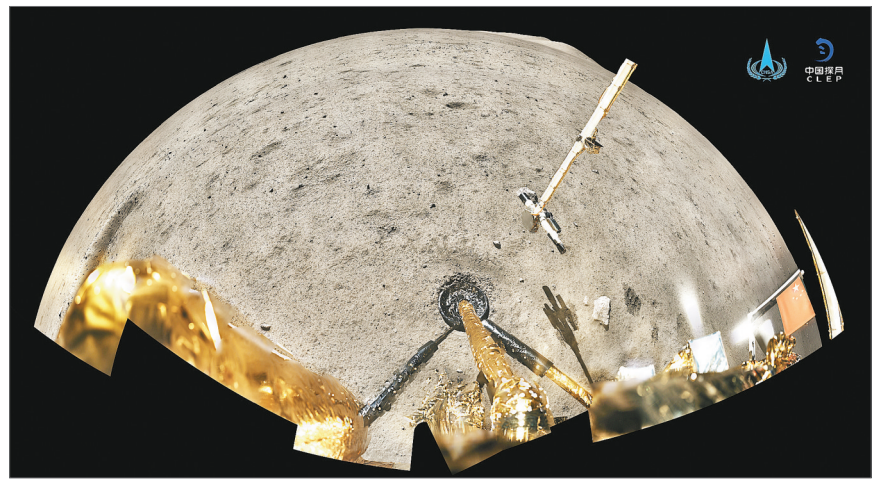
中国航天科技集团航天三江九部科研人员告诉记者,这面闪耀月球的五星红旗展示系统重量只有1公斤,在正负150摄氏度的温差下仍能 保持本色。照片中嫦娥 手中的国旗在阳光的照耀下,呈现出一抹鲜艳的 中国红。

### 选材时间超1年

国旗展示系统项目指挥马威说,宇宙环境有很强的电磁辐射,加上月球表面有着正负150摄氏度的温差,普通国旗难以在月球上使用。

他告诉记者,国旗展示系统是舱外单机系统,自运载火箭抛掉整流罩后,从地月转移轨道进入月球轨道,再到探测器着陆在月球上,它都一直暴露在极端恶劣环境中。科研人员通过试验发现,如果把地球上使用的国旗放在月球上,它的颜色在很短时间就会褪色、串色,甚至分解。

在国旗展示系统立项初期,科研团队就设计了多种国旗展示形式,有记忆合金展示方案、伺服升旗方案、机构展示方案等通过卷轴形式展开国旗的方式,也有通



左图:嫦娥五号着陆器和上升器组合体全景相机拍摄五星红旗在月面成功展开。右图:嫦娥五号着陆器和上升器组合体全景相机环拍成像,五星红旗在月面成功展开,此外,图像上方可见已完成表取样的机械臂及采样器。 国家航天局供图

### 国旗展示系统重1公斤

过折扇形式展开国旗的方式,但通过高低温试验后发现,只有卷轴形式展开的国旗比较平整,不会出现褶皱等情况。

随之而来的问题是,如何保证国旗展开时拥有足够的强度,能保持平整?研制团队在研究中发现,有些纤维材料的强度很高,但染色性能较差,染色性能较好的纤维材料,强度又达不到要求。

研制团队一边地毯式查阅文献资料,一边广泛开展调研论证,携手国内优势单位开展关键技术联合攻关。

五星红旗展示系统技术负责人程昌说,科研团队在选材上花费的时间就超过1年,最终挑选出了二三十种纤维材料,然后通过做包括热匹配性,耐高低温、防静电、防月球尘埃等在内的物理试验,科研团队最终决定采用某新型复合材料。

他告诉记者,这种材料既能满足强度要求,又能满足染色性能要求,从而保证国旗能够抵御月表恶劣的环境,做到不褪色、不串色、不变形。

国旗展示系统项目负责人李云峰说,嫦娥五号国旗展示系统的重量只有1公斤,研制团队围绕整个系统在减重问题上下了大量工夫,不仅材料要轻量化,而且还要对设备进行瘦身。面对月表恶劣的温差环境,也对国旗展示系统的工艺设计、集成设计提出了很高要求。

国旗展示系统立项时,研制团队先后论证过采用四级杆、三级杆和二级杆来作为国旗的方案,但考虑到复杂性和重量等原因,最终选择使用二级杆的方式来呈现。

李云峰说,之所以采用杆系结构方案,是因为它在航天系统里算比较成熟的技术,包括卫星、飞船等航天器的太阳能电池帆板展开,使用的都是杆系结构,其目的就是保证可靠性。

另外,为了控制整个国旗展示系统的重量,研制团队还对结构进行了优化设计,在选取耐高温、抗严寒材料的基础上尽量

## 嫦娥五号秘籍:两吨多的胖小伙如何追上小姑娘

张宇 中青报 中青网记者 邱晨辉

12月6日5时42分,嫦娥五号上升器成功与轨道器和返回器组合体交会对接,并于6时12分将样品容器安全转移至返回器中。这是我国首次实现月球轨道交会对接,也是跨越38万公里的首次 太空牵手。

在环月轨道运行的嫦娥五号轨道器和返回器组合体,体重大达2.3吨左右,如何和体重量仅有400公斤左右的上升器成功 牵手,来看嫦娥五号探测器的专属秘籍。

### 最需要的是心态 冷静

看到心仪的对象出现时,小胖子轨道组合体有些激动,但仍竭力让自己冷静下来,分步骤、分阶段地向上升器靠拢。轨道组合体为自己设置了4个停泊点,分别来观察自己与上升器的姿态和状态,是否一切是按照预期方案进行,50公里、5公里、1公里、100米,每一次停泊观察,都是对最终靠近时间和地点的精确把握。

越到最后,轨道组合体反而更加冷静,飞快进行精准计算和调整。

### 最重要的是积累 实力

小胖子能有如今冷静精准的判断,来源于中国航天在交会对接方面的深厚积累。据中国航天科技集团五院专家介绍,在中国太空探索的历程中,近地轨道交会对接技术正在快速发展

升器在上升过程中成功 瘦身 到400公斤左右,以更苗条的身姿冲入环月椭圆轨道。小姑娘通过与轨道组合体之间巧妙的沟通方式 远程导引,进行4次轨道控制,进入环月轨道上,在预定的交差点,停留在轨道组合体前方50公里处。

在进入交差点后的4个小时,轨道组合体就开始用更加亲近的沟通方式 远程导引与上升器进行沟通,双方通过自己携带的敏感器,即微波雷达交换信息,轨道组合体开始主动向上升器靠近。

### 最紧要的是耐心 等待

12月1日,嫦娥五号着陆器和上升器组合体(以下称 着上组合体)与轨道器和返回器组合体(以下称 轨返组合体)分离,顺利落月,开展 挖土 和封装工作。

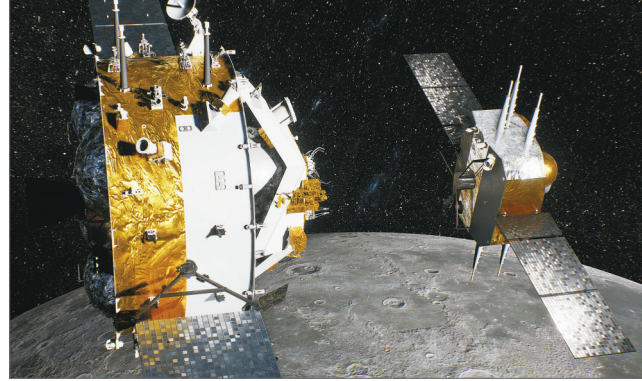
与此同时,轨返组合体则在环月轨道上继续飞行,安静、耐心地等待与载月壤的上升器再次见面。

重达2.3吨的小胖子 轨返组合体一边数着星星,一边算着与上升器再次见面的日子,在两天时间内完成4次调相控制,在月球圆形轨道上 啾啾啾 地完成长跑。

胖小伙很有耐心,在与上升器再次见面前,作好最充分的准备,力争以最帅气的姿态等待上升器的到来。

### 最巧妙的是沟通 灵犀

体重量有800公斤左右的小姑娘 上



嫦娥五号上升器与轨道器和返回器组合体交会对接效果图。

2012年6月,神舟九号与天宫一号对接成功,标志着我国首次载人交会对接任务的成功。2013年6月,神舟十号与天宫一号顺利进行了第一次交会对接和一次航天员手控交会对接。

这些都标志着我国近地轨道交会对接技术的成熟。飞船是在近地轨道上完成与空间站的交会对接,通信距离相对较近,并且能够得到导航卫星的定位帮助,地面控制的精度更高。

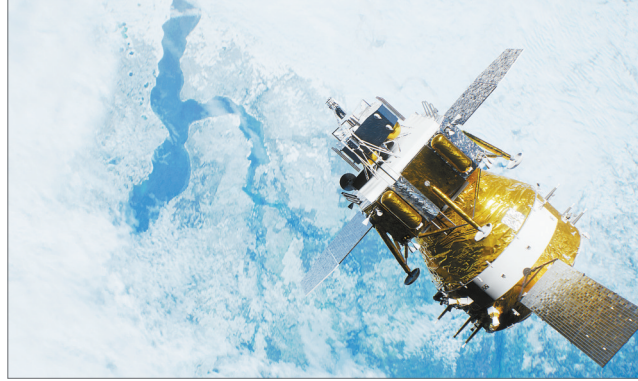
而这一次,嫦娥五号轨道组合体要在距离地球38万公里的环月轨道上 追逐 上升器,这就对控制系统提出了更高的要求,嫦娥返回组合体要能够适应更大的偏差,在没有任何干预的情况下全自主地做出向心仪对象 靠近的各个决策,这不仅在国内首次,也是国际首次。

### 最牢靠的是细节 细致

载人飞船与空间站交会对接,是在近地轨道上采用撞击式的方法完成,此次小胖子却要采用更加浪漫的方式,与上升器 牵手 对接。

轨道组合体身上安装了3个对接机构主动件,又称 抱爪,在运动过程中完全贴近上升器,主动用 抱爪 紧扣上升器身上的对接机构被动件,将上升器 拉入 怀中,完成这次亲密的 抱紧式 交会对接。

轨道组合体重达2.3吨,在运行过程中稍有不慎就会将身姿轻盈的上升器 撞飞,这需要小胖子对于速度、位置都有极为细致的把握,对微重力环境、热环境等有极为细致的考虑,用极高的控制精度来保



中国航天科技集团八院供图

证任务的完成。五院专家表示,不仅交会对接的过程精巧细致,交会对接的产品设计也极为精密。在多器之间月球样品的通转转移,对各分系统的设计精度、装配精度和制造精度提出了更高的要求,在进行指标分配时,装配精度要达到毫米级,制造精度要达到微米级。

为此,五院总体设计部研制团队要攻克装配环节多、精度测量难、精度调整要求高等难关。仅以样品舱的舱盖为例,产品经历了总体设计部机构分系统团队的8年打磨,堪称嫦娥五号探测器的 终极藏宝箱。现在,两吨多重的胖小伙儿已经追上了心仪的小姑娘,后续,让我们一起期待嫦娥五号探测器携带月球 土特产 重新回到地球的怀抱。