

科学发现试错法的实践价值新探

——以 1974—2023 年间诺贝尔物理学奖获奖成果为例

郭思敏¹, 方贤绪²

(1. 合肥工业大学 马克思主义学院, 安徽 合肥 230071; 2. 中国科学技术大学 马克思主义学院, 安徽 合肥 230026)

摘要:通过对 1974—2023 年诺贝尔物理学奖获奖成果中试错法的应用梳理,发现 50 年间有 23 年的获奖成果在发现过程中运用了试错法。根据试错方式的不同,试错法可细分为试错机遇法、试错改进法和试错拓展法三类,在不同科学领域中试错法的适用性有所差异。据此,文章总结出以试错法催生科学发现的三种机制:偶然试错颠覆传统认知、规范试错意外发现新可能、以试错法建立理性转化路径。在新兴科技和复杂性科学发展的背景下,量子计算和人工智能将加速试错实验的前端和后端环节,使试错法在科学实践中重获新生。

关键词:试错法;诺贝尔物理学奖;波普尔;量子计算;人工智能

中图分类号:G321.9

文献标识码:A

文章编号:1008-7699(2025)03-0019-11

一、试错法引领的科学发现浪潮

自 1911 年海克·昂内斯(Heike Kamerlingh Onnes)发现在超导临界温度 4.2K 之下汞具有超导电性以来,科学家分别在单金属元素、A15 结构合金、金属氧化物等不同范围内开展试错探索且频获惊喜,诞生了铜基超导材料、铁基超导材料、镍基超导材料等一系列重要的科学进展。目前,铜基、铁基超导材料均已在常压下跨过 40K 的超导效果界标——麦克米兰极限。2025 年 2 月,由薛其坤院士领衔的研究团队,成功在常压下实现了镍氧化物材料的高温超导电性,使得镍基材料的超导临界温度成功突破了 40K 的麦克米兰极限。在极强的氧化环境下,研究团队需在原子级平滑的基片之上,精确排列镍、氧等原子,构建出厚度仅几纳米的超薄膜,以固定原本需要极高压环境才能稳定存在的原子结构。通过不断调整超薄膜生长的参数和工艺,在试验了一千多片样品之后,团队最终找到了最合适的界面工程方案,成功实现了镍氧化物在常压下的超导电性,为破解高温超导机理这一难题提供了关键突破口。^[1]

超导领域自开创以来,一直是科学界经久不衰的热门领域,从科学发现方法论角度来看,还需思考的是:从 1911 年超导材料的发现到如今薛其坤团队取得的重要进展,是否有一种科学发现的方法贯穿其间,助推科学革命的进程,帮助一代代科学家获得革命性的科学发现?

本文认为,超导领域这种在理论模型研究尚未取得进展的科学发现情境下,先在特定范围内寻找实验材料进行试错,以谋求科学研究突破的方法,实际是一种以波普尔证伪主义思想为理论基础的常见的科学发现方法——试错法应用的体现。卡尔·波普尔(Karl Popper)认为,科学不等同于真理,知识本质上是猜测性的,通过自然选择,不适应的猜测被淘汰,适应性强的猜测被保留,即“试错法(Trail-and-Error Method)”。^[2]试错法的核心在于“猜想与反驳”,本质就是通过试错不断排除错误的猜测从而接近真理。^[3]从科学学的角度来看,试错法在科学发现中的实践价值是否具有普遍性?为此,本文以 1974—

收稿日期:2024-07-25

基金项目:安徽省哲学社会科学规划项目(JS2024AHIS0056);高校“三全育人”综合改革和思想政治能力提升计划项目(sztzsjh-2024-13-3);中央高校基本科研业务费社科项目(JS2024ZSPY0029);合肥工业大学青年教师科研创新启动专项(JZ2024HGQA0132)。

作者简介:郭思敏(1993—),女,安徽合肥人,合肥工业大学马克思主义学院讲师,哲学博士。

2023年50年间诺贝尔物理学奖中的试错法应用为例开展探索。

二、1974—2023年间诺贝尔物理学奖中试错法的实践应用与类型细分

(一)1974—2023年间诺贝尔物理学奖中试错法的实践应用

诺贝尔奖是科学界杰出成就的最高象征,反映着科学研究前沿更迭的风向。一项对诺贝尔自然科学奖的系统性研究将诺贝尔物理学奖获奖研究成果与第二次科学革命、第三次技术革命的重大成果进行对照,发现第二次科学革命的26项重大成果有20项成果、第三次技术革命的11项成果中有5项成果获得过诺贝尔物理学奖。^[4]由于诺贝尔物理学奖获奖研究成果与重要科学发现之间的强关联性,对诺贝尔奖获奖成果的具体科学发现过程、科学发现方法及其影响因素开展研究都显得极具价值。

为全面了解1974—2023年间诺贝尔物理学奖获奖成果的具体科学发现历程,文章以诺贝尔奖官方网站对获奖者的介绍为主要参考,并在中国知网和Web of Science数据库以获奖科学家姓名、获奖成果为关键词检索后,筛选出有关科学发现历程的有效文献作为补充,对1974—2023年诺贝尔物理学奖获奖成果的科学发现过程展开研究发现:50年间,共有23年的获奖成果在发现过程中应用了试错法。将这五十年中平均每十年作为一个阶段进行统计,得到每十年获奖成果中应用试错次数(见图1)在3~6次,可见试错法在催生重要科学发现诞生方面确实发挥着重要作用。

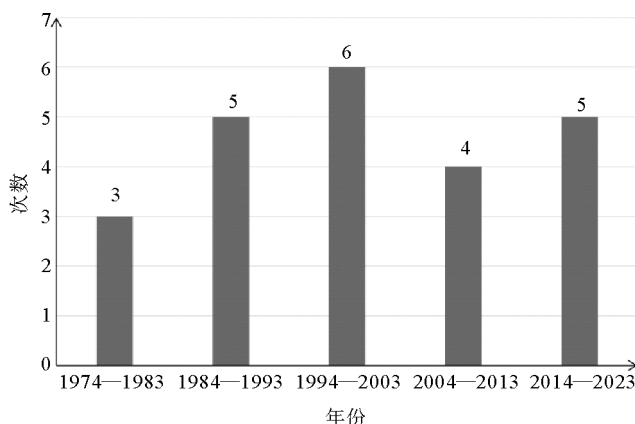


图1 1974—2023年每十年间诺贝尔物理学奖获奖成果中应用试错法次数统计

(二)试错法应用的类型细分及适用性分析

进一步聚焦50年间试错法应用的具体过程发现,同样是应用试错法的科学研究,应用试错法的具体方式、科学试错过程和获得最终发现成果的路径各有不同。为此,进一步对50年间诺贝尔物理学奖获奖成果应用试错法的具体过程开展分类研究,整理记录获奖年份、获奖科学家及应用试错法的科学发现过程,细分为试错机遇法、试错改进法和试错拓展法三种不同类型,再按年代从低到高对试错法应用类型相同的案例进行归类合并,得到表1、表2、表3,下面按分类逐一阐明。

1. 试错机遇法:坚持不懈试错

第一种类型是科学家在坚持不懈试错的过程中由于某种偶然的机遇取得了革命性突破,即“试错机遇法”。在1974—2023年的诺贝尔物理学奖试错法应用案例中,共有7年的获奖成果的试错发现过程可被归入该类型(见表1)。试错机遇类型的科学发现常常被认为与某种“惊喜”“运气”等偶然性因素相关联,机遇的诞生确实有某种偶然的成分,但也与科学家旷日持久、坚持不懈的努力紧密相关。路易斯·巴斯德(Louis Pasteur)曾说:“科学发现有赖于机遇,但却不能完全侥幸的依靠运气。需要掌握丰富的知识储备,培养敏锐的洞察力,一旦机遇出现,就抓住它,从而找到解决问题的线索。”^[10]因此,机遇的到来具有某种偶然性和意外性,但一个能承接住它的心灵所做的准备又是必然的。

试错法带来的革命性的科学发现常常在多种不同情况下产生。一种是当科学家在研究某个完全不同的问题时,意外获得了惊喜的发现。例如表1中1978年诺贝尔物理学奖得主阿诺·彭齐亚斯(Arno Penzias)和罗伯特·威尔逊(Robert Wilson)原计划用一台通讯接收设备改造成的射电天文望远镜来测量银河系内高纬星系的银晕辐射,却在偶然中发现望远镜总测得高于预期值3.5K的温度。为此,两位科学

家展开了为期一年的实验,逐一排除了大气辐射、仪器误差、动物粪便等种种假设,最终确证了宇宙微波背景辐射的存在。^[6]

表 1 诺贝尔物理学奖中“试错机遇”类型的试错法应用案例(1974—2023 年)

(获奖年份)科学家	试错过程
(1974)安东尼·休伊什	休伊什在观测银河系射电时偶然发现一种规律的异常无线电脉冲,试错探索后发现了脉冲星。 ^[5]
(1978)阿诺·彭齐亚斯、罗伯特·威尔逊	两位学者尝试改进天线设备的过程中接收到了来自宇宙的无线电信号“过剩天线噪声”,经过逐一排查,甚至对天线上掉落的鸽子粪便进行清扫后,发现了宇宙微波背景辐射。 ^[6]
(1981)凯·西格巴恩	西格巴恩实验中意外发现某种特定材料受到 X 光照射会释放电子,多次试错后发现将释放出的电子速度用分光计加以测量后,就能精确检测材料的成分构成。 ^[7]
(1987)卡尔·穆勒、约翰内斯·博诺茨	两位学者偶然在期刊上读到法国化学家米歇尔介绍的一种能用作优良金属导体的特殊氧化物,立马尝试使用这种新材料投入实验,发现这种材料在 30K 下出现了超导效应。 ^[8]
(2018)亚瑟·阿斯金	阿斯金在尝试用光镊捕获更小的粒子时,无意中发现样品中的细菌被囚禁在激光束光阱之中。通过改变激光的强度、光束的聚焦方式以及粒子的材料和大小,他反复实验以验证和优化这一现象,从而发现了光镊在生物学研究中的应用。 ^[9]

另一种是科学家在按预期方法进行实验时,苦苦探寻未果,却由于某种意外达成目标。例如自超导现象发现以来,科学家一直在寻找临界温度更高的超导体。1985 年,从事超导材料研究两年未取得任何进展的卡尔·米勒(Karl Alexander Müller)和约翰内斯·贝德诺尔茨(Johannes Georg Bednort)偶然在杂志上读到了一篇关于钇钡铜氧化物的系统性研究文章,文章介绍了这种金属铜氧化物优良的导电性能。米勒和贝德诺尔茨受到启发,用科学界通常认为导电性不佳的铜氧化物开展试错实验,最终成功在 30K 的温度下成功实现超导。^[11]

试错机遇法作为试错法应用的朴素和早期形态,在许多新兴领域最初发端的时候给予了科学家获得突破的科学灵感,例如青霉素的发现,狂犬疫苗的发明,光镊、石墨烯材料的发明都有赖于试错机遇法;而在复杂性科学和大科学蓬勃发展的今天,已经越来越难依靠灵光一现的尝试或随机变量的巧合取得重要突破,试错机遇法带来的革命性科学发现在当下高能物理学、合成生物学、生成式人工智能等涉及大数据运算、大规模科学团队的成熟科学研究领域较为鲜见。

2. 试错改进法:以之前的实验为母版,运用新方法加以改进

第二种类型是科学家在试错过程中与时俱进,不断尝试运用最新的科学实验仪器、科学研究方法、科学组织形态对研究加以改进,以获取理想的研究成果,即“试错改进法”。在 1974—2023 年 50 年间的诺贝尔物理学奖试错法应用案例中,共有 9 年中获奖成果的试错发现过程可被归入“试错改进法”类型(见表 2)。科学发现过程中,一些未取得理想结果的研究往往也经过了精心的设计,有时仅仅是受限于特定瓶颈,例如仪器精度或材料强度不足。随着科学的整体进步,如果科学家能依托不断更新的科研方法或实验手段,坚持不懈进行试错,就很有可能取得理想的实验成果,这也是用试错法获得新的科学发现的重要方式。

采用试错改进方法最具代表性的是集成电路的发明者杰克·基尔比(Jack Kilby),他是一名企业的技术员而非学者,但他坚持不懈地依托新材料新技术改进研究的精神最终帮他解决了许多知名学者都没能克服的难题。

1948 年,威廉·肖克利(William Shockley)发明了晶体管,使得电子设备更加轻量 and 高效。^[21]随着电路系统规模逐步扩大,晶体管已不足以解决日趋精细复杂的大型电子电路中的所有问题。20 世纪 50 年代,科学家开始尝试消除电路中单一电子元件之间的连接,然而生产出的集中连接电路在性能上还不如传统电路,导致大部分学者放弃了研究。为了解决这一问题,基尔比大胆设想将所有包含电容、电阻、二

极管和晶体管的电子电路集成在一个极端微型化的硅片中。1958 年,一种新型的照相印刷技术问世,它正好可以帮助基尔比在硅片表面印出复杂精密的图案。历经多次改进材料样品和连接工艺,基尔比在芯片材料锗晶体方面取得了研究进展,找到了将电容电阻镶嵌在硅片上的新方法,最终成功研发了微型电子电路。^[17]大胆的科学假设、敏锐的科学判断和锲而不舍、不畏艰险的逐步改进过程,基尔比为试错法的成功实践提供了值得学习的典范。

表 2 诺贝尔物理学奖中“试错改进”类型的试错法应用案例(1974—2023 年)

(获奖年份)科学家	试错过程
(1985)克劳斯·冯·克利青	克利青历经多次试错,最终尝试在 1.5K 的极低温度和 18.9T 的强磁场下对半导体结构的霍尔电阻进行了测量时,成功发现了整数量子霍尔效应。 ^[12]
(1986)恩斯特·鲁斯卡	鲁斯卡经反复对比实验发现,相对同样焦距来说,包铁壳的线圈需安装的匝数要比不包铁壳的线圈少得多。1932—1933 年间,鲁斯卡和合作者进一步改进了显微镜的制造材料。 ^[13]
(1995)弗雷德里克·莱恩斯	莱恩斯提出假设:在探测器灵敏度足够的情况下,也可以采用原子核反应堆做中微子源。莱恩斯先在汉福特反应堆上进行试测成功后,又转到功率更大的反应堆上进行实验。 ^[14]
(1996)戴维·李、道格拉斯·奥谢罗夫、罗伯特·理查德森	三位科学家受到金属超导理论的启发后尝试设计了一个低温衡器,利用玻氏法将装有 3HE 的容器冷却至 2MK,之后观察到了 3HE 变为超流体的过程。 ^[15]
(1998)罗伯特·劳克林、霍斯特·施特默、崔琦	在位于新泽西州的贝尔实验室研究二维费米气体模型时,自创了调制掺杂的新实验方法,将以前仅适用于硅的二维电子系统,拓展到可以适用于砷化镓。 ^[16]
(2000)赫伯特·克勒默、若雷斯·阿尔费罗夫、杰克·基尔比	基尔比设想用一片硅做出一套完整电路,当时同业都觉得是天方夜谭。在锗晶体材料试验取得成功之后,基尔比开始使用硅晶体材料寻找制造集成电路的新方法。 ^[17]
(2001)埃里克·康奈尔、卡尔·韦曼、沃尔夫冈·凯特纳	韦曼为在碱原子中实现玻色-爱因斯坦凝聚,尝试采用原子阱囚禁和激光冷却技术来进行实验。1995 年 6 月,经过不断尝试改进,最终实现了铷原子的玻色-爱因斯坦凝聚。 ^[18]
(2002)雷蒙德·戴维斯、小柴昌俊	小柴昌俊持续 30 年通过埋在井中的装有液体的容器来研究,探测到 2000 个中微子。小柴昌俊建造了一台装有 2140 吨水的更大的中微子探测器,探测到来自太阳的中微子。 ^[19]
(2006)约翰·马瑟、乔治·斯穆特	马瑟改进了传统的地面测量微波背景辐射方法,在马瑟的建议之下美国宇航局组建了 1000 多人的大科学团队来实施 COBE 卫星项目的研究。 ^[20]

试错改进法的运用往往与科学实验仪器的巨大进步、科研团队规模的扩大以及新科研方法的出现有关,例如大科学时代的到来为中微子的发现和 COBE 卫星项目的大规模试错提供了巨大帮助,原子阱囚禁和激光冷却技术对玻色-爱因斯坦凝聚的成功发现提供了不可或缺的实验条件。

3. 试错拓展法:拓展试错范围

第三种类型是通过拓展试错范围来获取突破的试错方法。这里的拓展试错范围可能包含多个方面,例如通过尝试诸多材料、多种制备方式,或扩大实验范围等方式来追求变化,以期能够在更大的范围内进行试错探索。在 1974—2023 年间的诺贝尔物理学奖试错法应用案例中,共有 12 年的获奖成果发现过程可被归入“试错拓展法”(见表 3)。拓展试错范围的研究方法最为典型的应用出现在材料学研究或其他与材料密切相关的研究中。例如在 1988 年,艾尔伯·费尔(Albert Fert)发现,在铁、铬相间的多层膜电阻中,微弱的磁场变化即可导致急剧的电阻变化,其变化幅度是通常情况的十几倍。20 世纪 90 年代,许多科学家又通过实验陆续将巨磁阻效应推广至铁/铝、铁/金、钴/铜等纳米结构的多层膜中,由此巨磁阻效应开始在磁存储原件上得到广泛应用。^[24]

在复杂性科学日益发展的当下,这里的扩展更可能是指扩展试错实验的范畴,即对实验进行进一步扩充和发展。以 2022 年诺贝尔物理学奖得主为例,三位科学家的研究都是对彼此在量子领域实验范畴的一种试错扩展。约翰·克劳泽(John Clauser)第一次用实验证明了两个近距离的粒子可以纠缠,之后他

又进行了三次更大范围的实验,逐步扩展和确证了之前的成果;阿兰·阿斯佩(Alain Aspect)扩展了克劳泽的实验范围,以更高速率发射电子进行实验,证明了贝尔不等式在量子领域不成立;而安东·塞林格(Anton Zeilinger)在更大范围内多次开展了证明贝尔不等式不成立的实验,三位科学家的试错实验逐步扩展,证明了量子理论的完备性,也为将来制造大规模量子纠缠设备提供了有价值的参考。^[29]

表 3 诺贝尔物理学奖中“试错拓展”类型的试错法应用案例(1974—2023 年)

(获奖年份)科学家	试错过程
(1990)杰尔姆·弗里德曼、亨利·肯德尔、理查·泰勒	弗里德曼大胆提出假设:用电子和质子做非弹性散射实验,然后延伸到深部非弹性散射。这一假设被理论物理学家否定。多次试错后,弗里德曼发现了深度非弹性散射现象。 ^[22]
(1993)拉塞尔·赫尔斯、约瑟夫·胡顿·泰勒	赫尔斯、泰勒以惊人的毅力和工作热情顺利完成了 140 平方度天区的观测和资料处理,在当时脉冲星仅有 100 颗的情况下,一下子发现了 40 颗脉冲星。 ^[23]
(2007)艾尔伯·费尔、彼得·格林贝格	费尔用分子束外延法制备了一种纳米磁性多层膜,观测到了巨磁阻效应。格林贝格用多种材料试错开展薄层磁效应研究,最终发现了铁-铬-铁层内的反铁磁耦合现象。 ^[24]
(2010)安德烈·海姆、康斯坦丁·诺沃肖洛夫	物理学家普遍不相信有可以使石墨烯稳定存在的方法。历经多次尝试,两位科学家最终采用一种特质的胶带反复剥离高定向热解石墨,从而得到了可以稳定存在的石墨烯。 ^[25]
(2011)布莱恩·施密特、亚当·里斯、索尔·博尔马特	博尔玛特等科学家原本想证实宇宙在减速膨胀,然而通过一系列试错实验,研究团队发现高红移处的 Ia 型超新星竟然比预想的更暗,这证明了宇宙其实是在加速膨胀中。 ^[26]
(2014)赤崎勇、天野浩、中村修二	赤崎勇在大多数科学家放弃了蓝色发光二极管的研究时,坚持不懈试错,终于制备出氮化镓晶体,之后又无意发现电流注入会使得晶体发光增强,发明了高效蓝色发光二极管。 ^[27]
(2016)大卫·索利斯、邓肯·霍尔丹、迈克尔·科斯特利茨	三位学者打破了同行认为在二维及以下系统中,温度大于绝对零度时不可能发生相变的观点,经过多番尝试,最后他们采用让同行感到吃惊的拓扑学作为研究工具,发现了拓补相变。 ^[28]
(2022)阿兰·阿斯佩、约翰·克劳泽、安东·塞林格	克劳泽发展了贝尔的想法,开展了一个实际的实验。阿兰修复了克劳泽的实验缺陷。通过精密地改进实验工具和进行一系列的试错实验,塞林格开始使用纠缠量子态。 ^[29]
(2023)皮埃尔·阿戈斯蒂尼、费伦茨·克劳斯、安妮·吕利耶	科学家都认为耗费大量能量产生一点点光脉冲是一种“笨办法”。吕利耶仍坚持高次谐波的研究,1988 年她利用红外激光驱动惰性气体产生了高次谐波。 ^[30]

试错拓展法的应用符合当下新兴技术井喷带来的新材料、新范畴、新模式不断涌现的科学发展现状,为高能物理学、纳米材料科学等新兴科技领域的发展作出了重要贡献。

4. 试错法在科学实践中应用的适用性分析

试错法作为一种科学实践方法,其适用性与研究领域的特征密切相关。通过对 1974—2023 年诺贝尔物理学奖案例的梳理,可以发现试错法在特定科学研究领域中表现出显著的有效性。

第一类是理论尚未成熟的探索性科学研究领域。当某一领域内缺乏成熟的理论框架或唯象模型时,科学家难以通过逻辑推演或数学建模直接预测实验结果,此时试错法成为了突破认知边界的重要工具。这类研究通常处于科学探索的前沿,其核心问题尚未被现有理论完全覆盖。例如在铜基、铁基超导体研究中,传统 BCS 理论无法解释高温超导现象,且缺乏有效的理论预测模型。科学家只能通过反复试错不同材料组合,结合实验参数的调整,逐步逼近目标,这正是理论缺位下试错法的典型应用。

第二类是涉及复杂系统与多变量交互研究的科学领域。当研究对象涉及多因素、非线性或动态交互的复杂系统时,理论建模难度极高。此时,试错法可通过分阶段实验逐步缩小变量范围,从局部优化中寻求整体突破。例如克劳斯·克利青(Klaus Klitzing)在研究整数量子霍尔效应时,需协调极低温、强磁场与半导体结构的复杂关系。^[12]这些变量间的相互作用难以通过理论精确描述,试错法则成为了平衡实验条件的关键手段。

第三类是实验进展受限于工具精度或方法创新的科学领域。当实验技术或仪器精度尚未达到最佳

状态时,通常以试错实验的渐进式优化来替代实验技术的飞跃式突破。例如雷纳·韦斯(Rainer Weiss)团队在引力波探测器的研发初期,因激光干涉仪的灵敏度不足而多次失败,后通过改进探测器结构,例如增加干涉臂长度、优化镜面材料等方式,逐步提升干涉仪的信号捕捉能力。^[31]

第四类是新兴交叉学科领域的科学范式探索。在量子信息、合成生物学等新兴交叉学科中,成熟的科学研究范式尚未确立,运用试错法可通过多路径尝试快速积累经验,为理论建构提供实证基础。例如2022年诺贝尔物理学奖得主阿兰·阿斯佩(Alain Aspect)在量子力学研究中,通过提高粒子发射速率、优化测量协议等方法,逐步扩展实验范围,在缺乏完备理论支撑的情况下,以试错法确证了贝尔不等式的破缺。^[29]戴维·索利斯(David J. Thouless)在二维系统中发现拓扑相变时,缺乏现成的数学工具,通过试错法引入拓扑学概念,重构了研究范式。^[28]

值得注意的是,试错法并非万能工具。在经典力学一类理论高度成熟的领域中,其应用效率可能低于演绎推理;而在高能物理对撞实验等大科学领域中,试错成本可能过高。然而,在前范式阶段,试错法通过允许失败、鼓励创新和积累意外发现,始终是突破认知边界的关键引擎。正如波普尔所说:“知识的增长是永不完备的猜想与反驳的辩证过程”^[3]在未知转化为已知的理性通路上,试错法既是权宜之计,也是必然选择。

三、试错法催生科学发现的三种关键机制

(一)以偶然的试错发现颠覆传统的认知和理论

通过试错法取得突破性进展的科学家往往经历了突破思维惯性的过程。首先,他们往往已在某一固定科学领域钻研许久,对领域内规范的科学研究方法和模式已非常熟悉,在经历了多次尝试失败之后,他们往往重新审视科学问题,并提出了某个大胆的假设,对这一大胆的假设进行试错实验,往往也需要耗费大量的心血;另外,这样的尝试对一个成熟领域的研究来说有些惊世骇俗,因此业内往往并不看好。这种科学共同体内的意见并没有左右科学家,他们仍然敢于对大胆的假设进行试错和尝试,并最终取得了革命性的科学进展。

超导领域一系列理论及应用的发展史是以偶然的试错发现颠覆传统的认知和理论的典型案例。每一次在传统的发现道路上难寻突破之后,颠覆性的科学进步往往是由试错法所带来:1911年超导材料的发现是革命性的突破,此后科学家在单金属元素领域内反复探索,难以寻求到使超导临界温度上升的途径,直到博伦(B. Boren)对A15晶体结构的金属化合物研究取得了突破^[32];之后科学家又对A15晶体结构的金属化合物逐一探索,但难以寻求到突破麦克米兰极限的超导临界温度,直到米勒和贝德诺尔茨对原本被物理学界认为是绝缘体的金属氧化物的超导效应进行研究,才在科学界掀起了新一轮提升超导临界温度的热潮。^[11]

(二)按规范理论试错意外发现新的可能

有时,即使没有天才的假设或偶然的灵机一动,科学家在常规的科学研究道路上进行试错探索,也能获得启发性的研究思路,从而取得突破性的研究进展。这一突破性研究进展的诞生,实际也是常规科学积累到一定阶段,科学家逐渐感到利用现有的范式难以应对当前科学环境中的问题。当然,仅凭某位科学家的一己之力完成科学范式转换是困难的,多数情况下,看似科学家仍在规范的研究道路上探索,实际在科学系统内,所有的科学领域都在试错的过程中不断进化,试错的研究方法本身在这一过程中也得到了发展。

氧气的发现和对氧气性质的正确解释是一项革命性的科学进步,这其中涉及燃素说的旧范式破产和氧气学说新范式的兴起,共有三位科学家在依循规范理论的试错进程中与这一革命性的科学发现相遇。然而,科学领域中的范式转变却注定是一个复杂的,在不断试错中逐渐筛选成形的过程。英国科学家约瑟夫·普利斯特列(Joseph Priestley)最先观察到了蜡烛在氧气中爆燃的异常现象,然而作为已有科学范

式“燃素说”的坚定支持者,他并未尝试对“燃素说”这一范式进行修正。^[33]同样作为“燃素说”的拥趸,卡尔·舍勒(Carl Wilhelm Scheele)虽也笃信和拥护燃素说,但他通过大量杰出的实验成果,构筑了否定燃素说、建立氧气学说的范式转换基础。^[34]1774年,安托万·拉瓦锡(Antoine Laurent de Lavoisier)采用了多种不同的物质进行实验,发现燃烧发生的密封容器在燃烧前后质量不变,应当是空气中某种物质参加了燃烧反应,导致物质燃烧后重量增加。据此,拉瓦锡推翻了燃素学说,为燃烧的氧化学说建立奠定了基础。^[35]

因此,我们可以这样理解科学实践中沿规范科学理论试错取得突破性进展的必然性:每个科学发现领域都是试错进化的最前沿,这些科学领域的存在本身也可以说是一种试错,试错探索中细分的各类科学问题是进化环境中的小生境,它们会不断进步和选择,最后改变整个科学环境,因此,从常规科学的积累到取得革命性的突破是一个在试错过程中不断动态筛选、逐渐被排除和改造的过程,沿规范探索的进阶,革命性的科学发现最终也会被试错法逐渐筛选出来,而事实上,这也是大多数科学家取得重要科学突破的规范性道路。

(三)将未知转化为已知的理性路径

在应用试错法进行科学发现的过程中,科学家的工作是提出假设和合乎逻辑的检验假设。在提出假设的阶段,并不严格要求逻辑的分析,或者如波普尔所说,科学哲学不在这里进行逻辑的分析。关于一个新的思想或大胆假设最初是如何产生的问题,经验心理学提出了多种解释,然而对科学哲学家来说,更重要的是如何将这种新的知识灵感或不确定的假设转化为明确的科学知识和科学发现。是什么逐渐赋予了科学假设理性和正当性,使得科学问题从获得一个假设性质的猜测到关联一个合乎逻辑的解答?波普尔认为,最重要的是对于假设反复的试错检验过程。

2014年诺贝尔物理学奖得主赤崎勇发现蓝色发光二极管的过程就是这样一个一步步将难以实现的科学假设转化为理性科学发现成果的过程。20世纪70年代初,利用氮化镓研制蓝色发光二极管被认为是一个大胆的梦想。日本名古屋大学的赤崎勇(Isamu Akasaki)教授凭借试错精神,进入了这一研究领域。1974年,他首次利用分子束外延法制备出了单晶的氮化镓薄膜,但这一薄膜的表面质量很差,无法使用。基于该成果,他申请到了一项研究基金,制造了10 000个蓝光LED元件进行实验。尽管这些元件上有许多裂纹和缺陷,但还是有一部分是高质量、厚度均匀的微晶体。^[36]于是,赤崎勇又重新从基础的材料制备阶段开始试错,共耗时两年,进行了超过1 500次的试错实验,研发了针对衬底表面的低温沉积缓冲技术,通过多次改变材料合成方法、增加材料纯度等方式,终于成功制备出了蓝光LED。^[27]

由此可见,试错法构筑起了由灵感的激发和释放到有逻辑的知识成果构建完成之间的理性通路,通过试错检验的过程,能够将部分灵感和假设成功转变为科学知识。在科学发现的具体过程之中,试错法提供了一个科学检验程序的逻辑框架,在这一框架内,科学家从检验某种特殊的科学现象开始,逐渐上升到某种有普遍性的理性规律。与此同时,正如波普尔所说,要实现这一过程,必须要基于科学家对于所研究问题的“倾心之爱(Einfühlung)”^{[37]294},这种倾心之爱一方面塑造了科学家对于问题本身的兴趣和灵感,另一方面也强调科学家对于探寻某一类问题执着的坚持和全力以赴的科学品格,必须是在这种科学精神的指引下,利用试错法从未知走向已知的通路才能达成。

四、新兴科技发展背景下试错法的拓展创新

传统的试错方法面临着工作量过于庞大、人力物力资源过量消耗等问题,同时试错的效率也不能满足当下复杂性科学发展的需求。在量子计算与机器学习高速发展的今天,大数据的运用和模拟实验方法的诞生,以及自动从试错实验数据中获得抽象理论发现的方法将使得试错法的运用更具优势。

(一)量子计算的发展带来的试错法算力优势

在新兴科技和复杂性科学快速发展的当下,利用量子计算机特有的算力优势,能够对经典算法进行

指数级加速,实现超高速并行运算。使用量子计算机开展模拟试错实验,能够在短时间内实现低成本大量试错的目标。

在化学、生物医药、材料科学等领域,量子计算能够突破经典计算机的算力瓶颈,实现大规模高精度的模拟实验计算。以化学领域为例,在化肥制造中需要进行固氮反应,固氮的有效性是全世界农业生产中最常见的限制因素,而细菌具有进行固氮反应的能力,在一项最新研究里,研究者尝试用细菌在常温常压下将 N_2 转化为 NH_4 ,以达到节省能源的目标。然而,这项实验的瓶颈在于难以穷尽所有实验选项,模拟固氮反应已经超过目前超级计算机的算力极限。美国科学院院刊发表的一项研究显示,在中等规模的量子计算机上模拟各类细菌在常温常压下的固氮反应,有望让科学家对现有的哈伯制氨法进行改进,解决困扰科学界已久的化学肥料制造工艺的改进问题。^[38]

在药物研制的过程中,利用量子计算机模拟出数以万亿的分子构成后,科学家就能够直接在其中进行试错选择,省去人工试错组合药物分子结构过程中繁琐的计算和实验工序,显著提升新兴药物研究的速度。量子计算公司 1QBit 与埃森哲联合,为百健制药公司开发了首个由量子计算驱动分子应用程序,能够明显提升药物化学分子设计效率,从而辅助复杂神经系统疾病的药物研发。^[39]使用量子计算技术,也可以为患者定制个性化的医疗服务,记录所有个体的基因组用来预测和分析药物对个体带来的影响,为患者定制有针对性的药物处方。这些工作如果用传统试错法开展,需要进行不计其数的复杂计算和实验,而将试错法与量子计算机结合后,将能更轻松的推动精准医疗实现。^[40]

未来,伴随量子处理器运算能力的发展和集成程度的增加,量子计算与试错法结合,将能模拟出结构更复杂的大分子,同时获取更加精准的模拟试错化学实验结果,这一模拟方法也将极大地推动化学、药物、材料科学及可再生能源等领域的研究。^[41]

(二)机器学习发展背景下的试错法应用优势

传统试错法只是发现的前半部分,在得出结果后能否成功完成科学发现还取决于科学家自身的知识储备和理论总结的能力。利用机器学习算法能够将试错法得到的数据进行结构化处理和应用,甚至可以自动生成科学概念和科学理论,这将大大拓展试错法使用的范围。

运用基于机器学习的自动科学发现方法对试错数据进行建模处理,能够发掘人类科学家难以发现的隐藏结构和相关性,规避人工提取数据特征的局限,显著提升传统试错法的科学发现效率。^[42]苏黎世联邦理工大学的科研人员构建了基于表征学习方法的神经网络结构,采用量子比特的特征、日心体系、阻尼摆、角动量守恒四个系统作为研究案例,无需科学家对实验数据进行整理、归纳和提炼,神经网络可以自动将大量的实验数据压缩成简单的表征,利用这些表征作出推测,从单纯的实验数据中归纳出成熟的科学规则和理论,加速试错法后期理论的选择和处理过程。^[43]

在基础物理领域,试错法与机器学习方法相结合能够加速基础实验数据的处理速率,在极大程度上缩短科学发现获得的时间。以对量子引力效应、广义相对论、黑洞成因研究具有特殊价值的引力波为例,借助越来越先进的物理学手段,引力波仪器的灵敏度逐渐提升,科学家探测到了越来越多的引力波,机器学习算法能够更快速的处理收集到的大量引力波数据,利用卷积神经网络对一些连续引力波、超新星坍塌的爆发引力波和二元结的引力波进行范围更广的试错探索。^[44]

机器学习方法还可以在试错法中扮演另一个重要的角色,帮助完成一些人工难以完成的较为复杂和困难的检验工作。一些机器学习领域的研究人员尝试运用函数模拟器对试错实验数据重新对理论假设开展曲线拟合的检验。学者王东挖掘了 1887 年迈克尔逊—莫雷实验和光行差实验的观测数据,基于科学界曾经提出的以太相关理论构建两种不同的理论假设,发现用机器学习方法根据不同理论假设训练出的两个模型基本相似,这帮助科学家认识两条规律,一是,不同参照系间的光路径变换并不符合伽利略变换;二是,如果在没有预设以太的情况下也可以得到相似模型,那么以太假说存在的意义也许就不像科学家想象中那么重要。从这一方面来看,采用机器学习方法来检验一些曾经难以进行检验的理论假设,也

能够大大提升试错法应用的范围和效率。^[43]

利用机器学习方法对试错法中的数据进行挖掘还能够纠正人类认识的偏见。在科学史上,常常会出现某位科学家由于执着信奉某一经典理论而对试错中出现的新的科学现象视而不见的现象。利用机器学习方法进行试错,就能够纠正这一基于认知偏见而产生的问题,帮助科学家更好地获得科学发现。加州大学和清华大学的科学家设计了一个实验,构建 RNN 神经网络来研究基本粒子的概率密度与势能这两组数据之间的关系,最终得到了薛定谔方程,该方程就是免除偏见,依据已有数据能建构出的最好模型,反映出机器学习方法的认知纠偏优势。^[45]

(三)新兴科技驱动的试错法与真实科学实践中试错法的区别与关联

量子计算与机器学习的兴起,为试错法注入了新的方法论内涵。计算模拟实验、自动生成理论等技术手段,既是对传统试错法的延伸与革新,也展现出与真实科学环境中试错实践的深刻差异与内在关联。

基于前沿技术的计算模拟试错方法能够突破实验条件的约束,实现试错效率的指数级提升,这一效率优势在材料筛选、药物分子设计等领域尤为显著。然而,模拟试错的“高效”有时需以牺牲物理真实性为代价。首先,依赖于量子技术的计算模拟实验仍不可避免的面临量子噪声等因素干扰,隔离量子噪声已成为亟待解决的科学问题。其次,计算模拟实验高度依赖预设的物理方程与参数,而这些模型往往是对复杂现实的简化,简化过程可能会引发计算结果出现偏差。最后,从量子尺度到宏观性能的多尺度模拟可能面临严重的计算精度损失,例如在蛋白质折叠的计算模拟研究中,跨尺度外推的误差累积可能使得模拟结果无法真正指导现实中的药物设计。

此外,传统试错法中,理论构建依赖于科学家的直觉与经验积累。例如,赤崎勇通过 1 500 次实验才锁定氮化镓薄膜的低温缓冲层工艺,其成功离不开对材料缺陷模式的长期观察。而机器学习方法可直接从海量试错数据中提取隐藏规律,这种由数据到理论的直达路径,突破了人类认知的归纳瓶颈。然而,机器学习虽能快速生成理论假设,但其黑箱特性可能导致理论生成“知其然不知其所以然”。例如用 RNN 神经网络虽能推导出薛定谔方程,却无法解释波函数坍缩的物理本质。^[45]相比之下,真实试错环境中科学家通过微观表征建立的认知,则兼具现象描述与机理阐释的双重深度。因此,必要情况下,需在机器学习生成理论的基础上,再由人类科学家运用思维分析方法对科学原理加以深入阐释。

新兴技术驱动的试错法不是对真实科学实践的替代,而是对其的拓展与增强。量子模拟突破了试错条件的客观约束,机器学习增益了人类认知的归纳过程,但二者仍需以真实实验为锚点,确保科学发现的客观性与可解释性。新兴技术并未颠覆试错法的认识论根基,而是赋予其更高效的实践工具。

五、结语

在科学发现过程中,试错法凭借独特的容错性及创造性优势,为自由的科学灵感提供了发展空间,推动了科学发展与社会变革。本文基于诺贝尔奖官网介绍及知网、Web of Science 数据库文献,梳理了 1974—2023 年诺贝尔物理学奖获奖成果发现历程,发现 50 年间有 23 年的获奖成果应用了试错法。按具体方式和路径不同,试错法可细分为试错机遇法、试错改进法和试错拓展法,在不同科学实践领域内,试错法的适用性有差异。试错法的应用都构成了促进突破性科学发现诞生的多重机制:一是科学家进行规范性试错的时候由于操作方法或实验步骤等意外因素遭遇了新的科学事件;二是在科学理论充分积累的基础上,认识到了某一试错产生的科学事件与现有科学范式的悖反和矛盾;三是将潜藏在科学家脑中的非理性思维,通过试错法假设—反驳—验证的科学思维策略建构成了符合科学逻辑的、成功的具有颠覆性的理论。传统的试错方法需要人工进行繁琐的多次实验,且常常局限于解决科学家自身擅长的某个领域的问题。量子计算和机器学习方法的引入,将加速试错实验的前端环节并辅助理论生成的后端环节,使得充满启迪、高容错性的科学灵感与严谨高效的大规模数据分析方法相结合,在新的科学环境中更加广泛、深入的发挥效用。

致谢:本研究在构思及修改过程中得到了导师中国科学技术大学徐飞教授的倾力指导、鼓励和支持,特此致谢!

参考文献:

- [1] ZHOU G D, LV W, WANG H, et al. Ambient-pressure superconductivity onset above 40 K in $(\text{La, Pr})_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ films[J]. Nature, 2025, 640: 641-646.
- [2] 刘军大, 谭扬芳. 证伪和“证实”的统一——为卡尔·波普尔诞辰百周年而作[J]. 甘肃社会科学, 2003(1): 58-61.
- [3] 卡尔·波普尔. 猜想与反驳[M]. 傅季重, 纪树立, 译. 上海: 上海译文出版社, 1986.
- [4] 欧阳楠. 诺贝尔自然科学奖与人类发展[C]//中国科学院中国现代化研究中心. 科学与现代化. 北京: 中国科学院中国现代化研究中心, 2011(2): 111-124.
- [5] 温学诗, 吴鑫基. 已获辉煌 继续辉煌——脉冲星研究的科学意义[J]. 现代物理知识, 1995(4): 459-467.
- [6] 刘树勇. 从央斯基到彭齐亚斯和威尔逊——纪念宇宙背景微波辐射发现 26 周年[J]. 大学物理, 1991(10): 38-40.
- [7] 吕吉尔. 瑞典物理学家凯·西格巴恩[J]. 世界科学, 2007, 9(9): 46.
- [8] 梁国钊. 超导研究突破的方法论启示[J]. 科学学研究, 1990, 8(3): 11-18.
- [9] 本刊综合. 交叉学科结硕果——解读 2018 年诺贝尔奖三大自然科学奖[J]. 发明与创新(大科技), 2018(11): 16-19.
- [10] 刘大椿. 科学活动论[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2009.
- [11] BEDNORZ J G, MÜLLER K A. Possible high T_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O system[J]. Zeitschrift für physik B condensed matter, 1986, 64: 189-193.
- [12] 虞跃. 量子霍尔效应和诺贝尔物理学奖[J]. 科学, 1999, 51(1): 55-57.
- [13] 董树忠. 看见原子——扫描隧道显微镜的发明和发展[J]. 科学, 1994, 46(3): 54-56.
- [14] 顾以藩. τ 轻子的发现和电子反中微子的首次观察——1995 年诺贝尔物理学奖介绍[J]. 物理, 1996, 25(3): 129-133.
- [15] 陈颖健, 杨雪岐. 2003 年诺贝尔科学奖解析物理篇[J]. 国外科技动态, 2003(11): 10-14.
- [16] 林晓满. 1998 年诺贝尔物理学奖[J]. 现代物理知识, 1999(2): 6-7.
- [17] 浦根祥. 杰克·基尔比——集成电路的开拓者[J]. 自然辩证法通讯, 2002, 24(5): 69-78+96.
- [18] 张昌达. 玻色—爱因斯坦凝聚和重力测量——2001 年诺贝尔物理学奖评介[J]. 地质科技情报, 2001, 20(4): 107-110.
- [19] 施郁. 诺贝尔奖委员会的错误: “幽灵粒子”中微子是如何现身的[J]. 科学, 2019, 71(5): 45-49.
- [20] 王进萍. 太空守望者——记 2006 年诺贝尔物理学奖获得者约翰·马瑟和乔治·斯穆特[J]. 物理, 2006, 35(11): 975-978.
- [21] 袁传宽. 信息化社会的推手——“晶体管之父”肖克利[J]. 人物, 2009(3): 58-64.
- [22] 诺贝尔奖得主杰尔姆·弗里德曼在台湾畅谈粒子物理研究心得[EB/OL]. [2017-11-17]. <http://www.joyfulphysics.net/index.php/archives/152/>.
- [23] 李宗伟. 脉冲双星 PSR1913+16—1993 年诺贝尔物理学奖[J]. 大学物理, 1994, 13(3): 1-6.
- [24] 刘要稳. 巨磁电阻效应及其应用和发展[J]. 科学, 2008, 60(4): 16-19.
- [25] 崔同湘, 吕瑞涛, 康飞宇, 等. 从石墨烯的制备及其应用研究进展看 2010 年度诺贝尔物理学奖[J]. 科技导报, 2010(24): 23-28.
- [26] 张凯程, 王晓锋. 宇宙的“标准烛光”: Ia 型超新星的观测与理论[J]. 科学通报, 2015(1): 2-15.
- [27] 周程. 个人兴趣与社会需求共同驱动型科技突破——赤崎勇何以能获得 2014 年诺贝尔物理学奖[J]. 科学与管理, 2014, 34(5): 3-9.
- [28] 施郁. 拓扑相变与物质拓扑相的理论发现——2016 年度诺贝尔物理学奖成果简介[J]. 科技导报, 2016, 34(24): 414-419.
- [29] The Nobel Prize. Press release[EB/OL]. [2023-10-3]. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2023/press-release>.
- [30] The Nobel Prize. Award ceremony speech[EB/OL]. [2023-1-31]. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2022/ceremony-speech/>.
- [31] 秦雪. 从大学辍学生到发明引力波探测器——雷纳·韦斯访谈录[J]. 世界科学, 2016(10): 50-55.

- [32] CHU C W, HOR P H, MENG R L, et al. Superconductivity at 52.5 K in the lanthanum-barium-copper-oxide system[J]. Science, 1987(4788):567-569.
- [33] 王鲁琛. 最后的燃素说卫士——普利斯特利的氧气发现及其对燃素说的捍卫[D]. 上海: 东华大学, 2020.
- [34] 傅国家. 氧气的发现问题[J]. 科学导报, 2015, 00(15):336.
- [35] 本刊编辑部. 21世纪将被LED灯照亮[J]. 大众科学, 2014(11):16-18.
- [36] 周程. 坚持到底是赤崎勇的成功之道[N]. 中国科学报, 2014-10-17(6).
- [37] 章士嵘. 科学发现的逻辑[M]. 北京: 人民出版社, 1986.
- [38] HOFFMAN B M, LUKOYANOV D, YANG Z Y, et al. Mechanism of nitrogen fixation by nitrogenase: The next stage[J]. Chemical reviews, 2014(8):4041-4062.
- [39] COVA T, VITORINO C, FERREIRA M, et al. Artificial intelligence and quantum computing as the next pharma disruptors [J]. Methods in molecular biology, 2022, 2390:321-347.
- [40] 崔丹丹, 刘科梅, 刘源, 等. 量子化学计算在天然抗氧化物研究中的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(2):320-327.
- [41] KANDALA A, MEZZACAPO A, TEMME K, et al. Hardware-efficient variational quantum eigensolver for small molecules and quantum magnets[J]. Nature, 2017, 549:242-246.
- [42] SEGLER M H S, PREUSS M, WALLER M P. Planning chemical syntheses with deep neural networks and symbolic AI[J]. Nature, 2018, 555:604-610.
- [43] 王东. 机器学习与科学发现的逻辑刍议[J]. 北京航空航天大学学报(社会科学版), 2021, 34(2):99-104.
- [44] DEIANA A M, TRAN N, AGAR J, et al. Applications and techniques for fast machine learning in science[J]. Frontiers in big data, 2022(5):787421.
- [45] WANG C, ZHAI H, YOU Y Z. Emergent schödinger equation in an introspective machine learning architecture[J]. Science bulletin, 2019(17):1228-1233.

Practical Value of the Trial-and-Error Method in Scientific Discovery: An Analysis of the Results of Nobel Prize in Physics During 50 Years

GUO Simin¹, FANG Xianxu²

(1. School of Marxism, Hefei University of Technology, Hefei 230071, China;

2. School of Marxism, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: By analyzing the application of trial-and-error method in the Nobel Prize-winning achievements in physics from 1974 to 2023, the article finds that the trial-and-error method has been utilized in the discovery process in 23 of the 50 years. According to the different ways of trial-and-error, trial-and-error method can be subdivided into three categories: trial-and-error for opportunity, trial-and-error for improvement and trial-and-error for expansion. The applicability of trial-and-error method varies in the practice of different scientific fields. Accordingly, the article summarizes three mechanisms of promoting scientific discovery by trial-and-error method: Accidental trial-and-error subverts traditional cognition, normative trial-and-error accidentally discovers new possibilities, and trial-and-error method helps establish new theories. In the context of emerging technologies and the development of complexity science, quantum computing and artificial intelligence will accelerate the front-end and back-end aspects of trial-and-error experiments and revitalize the role of trial-and-error method in scientific practice.

Key words: trial-and-error method; Nobel Prize in Physics; Popper; quantum computing; artificial intelligence

(责任编辑:傅 游)