

·学科进展与展望·

## 生物电子学的研究与发展

崔大付<sup>1</sup> 张兆田<sup>2</sup> 熊小芸<sup>2</sup> 徐建华<sup>2</sup>

(1 中国科学院电子学研究所, 传感技术国家重点实验室, 北京 100080;

2 国家自然科学基金委员会信息科学部, 北京 100085)

**[摘要]** 信息科学和生命科学是上世纪及本世纪发展最快和影响最大的两门科学, 它们对科学技术的进步和经济发展, 对人类生活方式都将产生深刻而重要的影响, 生物电子学(Bioelectronics)正是由生命科学和信息科学这两个学科交叉渗透而形成的一门新兴学科。本文概述了生物电子学的主要研究内容, 预测未来30年, 信息、生物和纳米技术将是世界技术发展的主流, 多学科交叉和融合为科学技术的更大发展和创新带来契机, 在这样的形势下, 生物电子学将受到高度重视和得到更为迅速的发展。

**[关键词]** 生物电子学, 研究, 发展

生物电子学自20世纪50年代诞生以来, 特别是自集成电路发明以来, 它始终保持着高速发展的势头。随着集成电路集成度的提高和超大规模集成电路的发展接近极限, 元件尺寸将达到纳米级, 相当于分子的尺寸, 由此人们提出以分子作为芯片上最小单元的设想, 这就是分子电子学的由来, 也标志着电子学的研究已进入分子电子学时代。人们提出以分子作为芯片, 所用的分子, 可以是有机化合物低分子、高分子和生物分子。它们具有识别、采集、记忆、放大、开关、传导等功能, 更适合电子学的要求, 由此促进了生物电子学的崛起。近几十年来, 生物电子学的研究领域不断拓宽, 已经展示出广阔的应用前景。但作为一门新兴的学科, 有关它的概念和研究内容, 甚至学科名称都不像成熟的学科那样明确和一致, 因此, 亟待研究、发展与完善。

### 1 生物电子学发展的特点

#### 1.1 多学科高度交叉

生物电子学是以生物学和电子学为代表但又涉及化学、物理、材料及信息技术等许多学科和高新技术相结合的一门交叉学科, 因此生物电子学的介入是双向的: 一方面综合应用电子信息科学和有关工程技术的理论和最新技术, 多层次、全方位地研究生

物和医学问题, 研究生物、人体的结构和功能以及功能与结构之间的相互关系, 使这些领域的研究方式更加精确和科学; 另一方面生命过程中研究所揭示出的许多规律, 特别是经过亿万年进化而形成的生物信息处理的优异特性将会给电子学科以重要的启示, 这不仅会推动电子学的发展, 还将会使信息科学发生革命性的变革。

#### 1.2 发展十分迅速

自从20世纪50年代生物电子学这一概念诞生以来, 它已经取得了显著的发展, 特别是近20年来, 随着各种新原理、新技术和新方法不断地应用到生物电子学的研究中, 生物电子学的发展速度明显加快, 预计在未来10年, 科学技术突破的项目中将有一半以上涉及生物电子学。

#### 1.3 领域不断拓宽

生物电子学这一概念提出时, 主要是面向生物学和电子学的交叉发展, 但随着各学科研究的不断深入, 在生物电子学的发展过程中出现了许多新兴研究领域, 特别是近年生物芯片技术和纳米技术的提出, 使得生物电子学的发展空间更为广阔。

#### 1.4 地位非常重要

生物电子学的研究与发展不仅会大大促进其他

国家自然科学基金资助项目。

本文于2004年3月18日收到。

学科的发展,而且生物电子学的研究内容与生命现象密切相关,对生命科学和医学揭示生命奥秘、探索生老病死的原因有着十分重要的意义;生物电子学在工业、农业和国防等各个领域都有着广泛的应用,因此,欧美和日本等发达国家都投巨资竞相研究、开发这门新科学,目前已成为“电子学与信息技术”中具有战略性、前瞻性、创造性的新兴学科领域。

## 2 生物电子学的研究内容

### 2.1 生物电子学的基础理论的建立和研究

生物电子学作为一门新兴的交叉学科,它应该借助于生物学的理论和技术,综合应用电子学有关工程技术的理论和方法,以形成自身特点和系统的基础理论,但目前对其进行的系统研究尚不够,它的一些基础理论、实验方法和应用技术需要不断建立和进一步完善,许多现象和效应的机理尚需深入研究。

对大脑的工作机理、信息处理原理和方法的研究,应侧重研究大脑皮层神经元记忆编码原理,脑的信息处理的方法,以改进现有的计算机和为发明新的生物计算机打下基础;同时脑认知功能、意识及其状态的定量测定技术、人的心理和精神过程等的研究也是非常重要的。

对生物计算机基础理论研究来说,目前,生物计算机尚处在设计和模拟神经元信息加工的计算机的基础阶段,急需加强基础研究。在生物技术领域中,研究DNA、酶和蛋白质等分子的特性并利用基因工程生产生物计算机适用的DNA、酶和蛋白质分子;在电子技术领域中,要确定新型生物元器件性能的测量方法,解决与常规电子元件的接口技术和装置等。目前美国已能将神经细胞和集成电路结合在一起,能够用电子学的方法控制神经细胞的形态和成长,形成所需要的神经网络;备受关注的DNA计算机,已在美国进行了原理试验,深入的研究仍在继续。

对感觉的研究可分为嗅觉、味觉、视觉、听觉和触觉等方面。人的嗅觉细胞约有1亿个,它们是如何能区分几千种气味;而人的味觉细胞有50万个,有感觉酸、甜、苦、咸四种基本味元素,但可以区别各种各样的味道。嗅觉和味觉的工作机理是什么?目前尚不清楚;在视觉认知中,也有一些神秘现象需要去解释,如在人的视觉中对物体大小、形状、颜色和运动速度等的认知,不完全取决于物体在视网膜上所形成的光学图像的大小、形状、颜色和运动速度,

即所谓“视觉不变性”问题,这是什么原因?同脑机能、脑智慧及图像识别机制等的关系如何?

生物电子学要通过一些基础理论的研究,如:研究在微、纳米尺度下分子水平上的电、磁、力、热学等物理现象和效应以及生化反应的机理及规律;研究生命机理及基因工程中的电子学现象;研究脑认知功能及大脑的信息处理原理和方法;研究嗅觉、味觉和视觉的机理与信息处理方法等,以建立和形成生物电子学基本理论体系。

### 2.2 生物信息的采集技术和检测系统

生物信息检测主要是对带有生物结构和特征信息的生物量、化学量和物理量的检测;是对根据生物分子卓越识别能力而设计的生物传感器及其检测系统的研究。

生物信息检测已不满足于宏观水平的描述,而是要在分子水平上采集生物信息,在微观水平上对各种性能指标的精确、定量检测,为生物电子学及其他相关领域的研究提供基本条件和先进手段。

在生物信息的采集技术和检测系统中的关键是生物传感器。因为传统的检测手段往往十分昂贵、缓慢费时、灵敏度又不高,采用生物传感器检测,可以解决这些问题。

生物传感器最早出现要追溯到上个世纪的60年代,1962年英国人Clark发明的酶电极,把生物酶反应同电极信号转换结合起来,是最早的生物传感器;而生物传感器研究的全面展开是在20世纪80年代。

根据生物反应的原理,生物传感器可以分为两种类型:即催化型生物传感器和亲和型生物传感器。它们都是利用生物分子的识别功能与变换器相结合,将生物反应所引起的化学、物理变化转换成电信号。所以任何一个生物传感器都具有两种功能:即:分子识别功能和信号转换功能。这也是生物学和电子学相交叉结合的典范。

生物传感器无论是哪种类型,其分子识别功能材料,都具有专一的选择性;采用固定化技术,将这些功能材料固定在载体上,形成分子识别功能薄膜;信息转换器是一个敏感元件,可采用电化学、光学、热学、声学、压电等多种不同原理工作。把不同的分子识别功能薄膜与不同的信号转换器相结合,就构成多种多样、千变万化的生物传感器,因此,可以说生物传感器种类的发展是无限的。

仿生传感器是以生物体系统为模型的生物传感器,是生物传感器的重要组成部分,也是仿生技术的

主要研究内容,研究能代替和超越生物视觉、嗅觉、味觉、听觉和触觉等功能的仿生传感器,是目前的热课题。

在生物信息检测系统的研究中,特别要提出的是对人工神经网络和信息融合技术的研究。人工神经网络技术要在脑神经科学研究成果的基础上,研究脑神经回路网络的特有结构,研究信息编码、整合、传递、调节和分析处理机制;利用神经网络的自适应学习能力、鲁棒性、容错能力和非线性计算的能力,进行特征识别和人工智能的基础研究和应用研究。在信息融合技术的研究中,高度集成、高度融合、高度智能将成为信息融合系统发展的主线;另外,一体化系统的研究将受到高度的重视,信息融合系统问题的复杂性在于构成一个完整的、闭环的、有效的融合系统。

综上所述,研究和开发快速、高灵敏、高选择性的新型生物传感器及其配套的集成化、智能化检测系统是当前生物电子学的主要研究内容之一。

### 2.3 生物信息系统的建模与仿真

生物信息系统的建模与仿真可以使已获得的知识抽象化,揭示出规律性,减少某些昂贵的、费时的实验操作,推动生命科学研究中的定量化和模型化,并为各种信息处理方法和信息系统提供新的、有价值的思路和方案。

针对过去孤立地、间断地医学检验和影像诊断,存在难以全面而动态地把握疾病的发生发展问题,目前国内外已对许多生物信息系统进行了建模与仿真,为病理及生理过程的处理及各层次的相互作用提供了可视化平台。人们可以利用快速增长的生物医学数据和信息,模拟细胞、器官、系统、个体和群体的生命过程及机制,实时地看到各种因素和环节的影响及完整的全过程。

对心脏器官的建模与仿真是个典型的研究课题。计算机心脏的仿真模型已成功地仿真了心脏电兴奋时序图、心电图、体表电位图和心外膜电位,建立了心外膜电位与体表电位的关系模型;在高分辨率的三维心脏模型上进行各种医学仿真研究,还可以用在心脏手术导航、介入性心脏治疗中,这种虚拟心脏的研究可为如何维持人类心脏健康提供有价值的参考。

近年来,由于“9·11”恐怖袭击发生,进行个人身份鉴别备受关注。目前普遍研究和使用的生物特征进行识别,其中人脸识别由于无侵害、非接触,对用户直观、自然,不易受环境温度干扰而成为最被认可

和接受的生物特征识别方式。采用生物信息系统的建模与仿真技术,建立三维表面模型的人脸生物特征识别,其主要是为了解决多姿态和光照变化的影响,提高了人脸生物特征识别率,实现自动身份鉴别。由于不存在被窃取、转移、忘记和破解的缺点,而且可靠、方便,已成为研究热点。

另外,生物信息系统的建模与仿真可在分子水平上进行药物分子的设计筛选及基因的功能编码,系统地模拟正常的和异常的生理生化活动,深化对生命过程的理解。

### 2.4 场与环境对生物物质的作用与应用

随着社会和科学技术的迅速发展,研究辐射场(电、磁、声、光、热、射线)与环境(各种污染)对人或生物体中生物物质作用的微观过程、作用机理和产生的结果十分迫切,这对解释各种场生物效应和机理、了解生命过程、开发诊断仪器、提高治疗效果、增强防辐射能力都非常重要。

电磁场和微波对生物物质的作用,作为生物电子学的主要研究内容之一,已研究多年并取得很大进展,形成了生物电磁学、毫米波医学等多个研究领域,同时也提出许多问题亟待探索。如:需要设计精巧的实验方法,从分子水平上证明“非热效应”的作用机理;采用现代检测分析手段,研究中医理论,探索“经络”的奥妙;研究电磁场、微波在生物分子工程和细胞工程上所起的作用;研究电磁场在临床疾病的早期诊断和治疗等方面的应用。

磁场对人或生物体作用具有无痛、无损伤的优点,是应用于治疗、调控人身心健康的重要手段。已经可以利用磁场诱导睡眠,影响人的精神状态,使人兴奋,而达到较长时间处于清醒状态、恢复疲劳、治疗神经疾病等脑功能研究的各个方面,并取得了较好的效果。

近年来,各种场效应用于成像诊断和治疗方面有很大发展,特别是太赫兹(THz)辐射(T辐射)场的应用方面取得了突破性进展。T辐射扫描系统在机场安全和医学成像等领域中的应用备受关注,目前T射线扫描仪已可以用于探测塑料炸药和武器、检验器件制造缺陷、显示癌症形状以及帮助医生精确地切除癌组织等很多方面。

热场应用方面由我国科学家开发成功、并拥有自主知识产权的热断层(TTM)技术,在临床疾病的早期诊断领域显示出广阔的应用前景,已在美国申请专利并被美国国家健康研究院推荐为美国妇女乳腺癌诊断的金标准。

声场在医学上的应用也有重要进展,利用超声声束的可汇聚性和穿透性等特点,实现高强度聚焦超声治疗。超声波透过体表后,聚焦在人体内的病灶上,声强达到 $(10^2\text{--}10^3\text{kW})/\text{cm}^2$ ,温度在短时间内上升到 $65^\circ\text{C}$ 以上,从而使区域内组织产生不可逆转的凝固性坏死,而周围正常组织及全身无任何损伤和副作用,从而达到治疗目的。为此要研究电子相控阵聚焦和束控技术、聚焦和定位换能器及其一体化和无损测温技术等。

环境对生物物质的作用和影响的研究也越来越受到关注。

### 2.5 分子电子学与纳米生物学

分子与生物分子电子学,通常称为分子电子学(Molecular electronics),它的一个重要目标是研制出由分子器件构造的并行分布式仿生智能信息处理系统,要为新一代信息处理系统开辟一条新的途径。

另外,分子电子学研究把有机功能分子或生物活性分子组装起来,制成微型功能单元,实现信息的获取、转换和执行等功能。日本研究的细胞计算机、美国研制的血管清洗细胞机器人、荷兰研究的微型光电图像分子器件以及英国研究的超微光电生物传感器都是分子电子学研究的成果。

目前分子电子学正在研究分子器件的工作机理和设计方法;分子器件的制造技术,主要是分子组装技术和刻蚀技术;研制分子器件所需的具有自我复制、修复和特异性识别能力的生物材料;研究分子接口,解决蛋白质分子膜和导体形成接触界面上电子转移的问题以及分子器件的应用。

近年来,迅速发展的纳米技术为分子电子学的发展带来了新的动力,“纳米生物学”或称“纳米生物医学”是纳米科学技术研究的重要组成部分。它的特点是基于纳米尺度下的表征、测量和操纵技术,解决对单个生物大分子的研究,是分子电子学的发展和延伸。

纳米生物学在纳米尺度下研究生物大分子、细胞器等生物体的结构、功能以及动态生物过程;研究生物大分子的复制、修复和调控等方面的生物过程;研究对分子进行操作、检测、控制与改性的技术;研制纳米尺度机器人、纳米给药系统、纳米分子追踪系统、纳米生物传感器和纳米分子执行器,是当前的研究热点。

### 2.6 生物医学信息学

现代信息技术,特别是计算机技术和网络技术为生物医学信息学的研究提供了一个快捷的手段,

构建了一个技术平台;运用信息理论和技术处理和解决生物信息学、医学信息学中所提出的相关问题。

生物信息学是把基因组 DNA 序列信息分析作为源头,找到基因组序列中代表蛋白质和 RNA 基因的编码区;阐明基因组中大量存在的非编码区的信息实质,破译隐藏在 DNA 序列中的遗传语言规律,从而认识代谢、发育、分化、进化的规律。

在基因测序方面,自 1995 年科学家破译了全长为 180 万核苷酸的嗜血流感杆菌基因组以来,到目前已有大约 60 个微生物和若干真核生物的完整基因组完成测序。2001 年,科学家又公布了人类基因组的绝大部分序列,即人类基因组的工作草图。伴随着基因组研究的不断深入,相关信息出现了爆炸性增长,迫切需要对海量生物信息进行处理,基因组研究最终是要把生物学问题转化成对数字符号的处理问题。要解决这样的问题就必须发展新的分析理论、方法、技术、工具;研究基因数据结构和数据库存储所需的理论和技术;另一方面要完成对基因密码为主的分子信息进行破译,研究基因网络的机理与功能,研究基因如何进行表达和表达的量化,研究生物分子反应的调控途径和代谢途径,研究系统生物学,进行多单元、不同层次的整合等。

不少疾病与基因突变或基因多态有关,而更多的疾病则是环境(包括致病微生物)与人类基因相互作用的结果。随着人类基因组计划的深入,可以有效地判定各种疾病的分子机制,进而发展合适的诊断和治疗手段。为此,构建与疾病相关的人类基因信息数据库(包括 SNP 数据库);发展有效地分析基因分型数据的生物信息学算法,特别是研究 SNP 数据与疾病和致病因素相关的计算方法是重要的。

生物信息学还利用基因组中编码区的信息进行蛋白质空间结构的模拟和蛋白质功能的预测,并将此类信息与生物体和生命过程的生理生化信息相结合,进行蛋白质、核酸的分子设计、药物设计和个体化的医疗保健设计的研究令人关注。如:研究非编码基因的识别和分析方法,因为编码蛋白质的基因只占人类基因组的约 3%,其余 97%左右的 DNA 序列目前仍不清楚功能,这些非编码基因对生命过程具有重大作用;研究蛋白质折叠机理和规律,它与疯牛病、老年痴呆症等疾病以及基因复制和重大遗传疾病的进化机制息息相关。

近年来数字化医院的理念已经被广泛接受,生物医学信息学研究备受重视,实现生物医学信息分析的可视化、量化、网络化、远程化和家庭化。

研究发展数字化医院,建立医院信息系统,包括:医学影像存储和通讯系统、检验信息系统、临床监护信息系统、远程医疗系统、计算机辅助诊断系统、计算机专家系统、医学知识库等的关键技术等;在我国对中医、中药信息现代化研究,尤其是中医诊断、治疗专家系统,中药组成元素分析系统等方面的研究中特别受到关注。

### 2.7 生物芯片与微全分析系统

生物芯片是现代生物技术与电子技术相结合的产物,它的意义不仅在于扩大现有常规电子元器件的功能、种类和使用范围,而且会使电子工业与生物医学科技经历一次巨大的变革。

生物芯片技术是随着人类基因组计划的实施发展起来的新兴技术,纵观当前的生物芯片技术,依据芯片结构及工作机理不同,通常可以分为两大类:即微阵列芯片(Microarray chip)和微流体芯片(Microfluidic chip)。

微阵列芯片主要包括基因芯片、蛋白质芯片、细胞芯片、组织芯片等,其中基因芯片是微阵列芯片中最先实现商品化的产品,目前市场上出现的微阵列芯片大多数是基因芯片;蛋白质芯片是微阵列芯片研制中极有潜力的一种芯片,因为它是从蛋白质水平去了解和研究各种生命现象。

微流体芯片,在美国通常又称为实验室芯片(Lab On a Chip, LOC),在欧洲通常称为微全分析系统(Micro Total Analytical System,  $\mu$ TAS)。

微流体芯片是采用微电子机械系统技术,即MEMS技术,在硅片、玻璃或其他材料基片上加工、构建微型生物化学分析单元和系统,具有对样品驱动、控制、筛选、纯化、计量、扩增、反应、检测等功能,以实现无机离子、有机物质、蛋白质、核酸以及其他生化组分的准确、快速和高通量信息的检测。按其功能不同,可以分为样品处理芯片、生化反应芯片(PCR芯片、杂交芯片等)和检测芯片(毛细管电泳芯片、电化学芯片、SPR芯片等),以及把上述三种不同功能的芯片集成化,制成微全分析系统芯片,实现检测过程的连续化和一体化。这项研究已形成一个崭新的BioMEMS研究领域,也是MEMS技术中发展最快的领域;这种微型生物芯片和微分析系统与传统的分析系统相比具有:小型便携、分析速度快(可以提高2—3数量级)、所需样品量少(只需几微升,甚至纳升级)、污染大大减少(可以采用一次性使用器件)、实现临床实时分析、性能价格比高、便于批量生产制造等很多优点,把生物医学分析仪器的性能水

平和制造技术发展到一个崭新的阶段,在药物筛选、疾病诊断、生物信息遥测和基因检测分析等方面有广泛的应用前景。

### 2.8 生物医学仪器

生物医学仪器的研究主要包含生物医学检测诊断仪器、生物医学治疗仪器和生物医学监护、管理仪器以及现代生物电子学分析仪器。

生物电子学分析仪中的近场共聚焦光学显微镜、单分子操作系统(如:光镊系统、单分子切割系统、单分子拾取系统等)、STM刻蚀系统、AFM分析系统等是近年来研发热点。

生物医学检测诊断仪器种类很多,近来特别重视多道电生理记录仪、生物医学成像系统和分子影像系统的研制。21世纪多道电生理记录仪已发展到16道、32道生理信号,生理记录仪记录的参数由以前记录单一的心电信号变成记录血压、血氧、心电、心率、阻抗呼吸、体温等多种生理参数,并且具备完善的术后资料分析处理功能,能自动生成图文一体化的诊断报告,为复杂心脏疾病的介入治疗提供了可能;生物医学成像系统类别很多,脑功能成像系统就有:fMRI、PET、EEG、EMG、EOG、TMS、X-CT等,一个脑认知成像平台包括磁共振成像、正电子发射断层成像、高分辨脑磁图、高分辨脑电图、透头颅磁刺激系统和光脑成像系统等;而分子影像系统要在分子水平上给出影像,可以得到蛋白质活动状态的超精细图像,不仅是诊断系统,也是分析系统。

生物医学治疗仪器要研究传统中医治疗仪,也要发展现代的治疗方法和新技术。例如开发一种深度激光针灸仪,实现对机体准确、深层的(达到皮下12.5—37.5毫米)多方位刺激,有效地革新传统激光针灸技术;纳米智能药丸是新型治疗系统,是目前国际上最为看好的抗肿瘤药物之一,它能提高肿瘤药物的特定靶向输送能力。有一种智能药丸采用树枝状高分子纳米材料,把致死剂量的抗癌药物输送到癌细胞中,而不对正常细胞造成伤害,具有识别癌细胞、诊断癌症、确认肿瘤位置和输送药物等功能;正在研制一种磁性靶运载体(MTCs)将药物导入动脉,磁场导航,把药物送到特定病灶上。国外正在研究人工视网膜植入术,将阵列微电极视觉脑芯片植入眼球后部,微电极阵列能把视觉信息转换成电子脉冲以刺激相邻的神经节细胞,神经节细胞通过视神经把信息传入大脑,使患者能感知到图像,给盲人带来福音。目前正在采用MEMS技术,研制微型无线内窥镜、肠道机器人、血管机器人以及纳米尺度下的

分子马达、纳米机器人等构成新一代微型机器人诊断、治疗和手术系统。

### 3 结束语

21世纪是生命科学世纪,生物电子学作为一门面向21世纪的新兴学科,其发展前途不可估量、发展前景十分诱人,特别是随着纳米技术、基因工程和生物芯片等新兴技术的不断出现和应用,生物电子学迎来了新的发展机遇。它的研究与发展不仅会大

大促进电子学、计算机、物理、化学、信息论、控制论等学科的发展,而且对研究生命科学、揭示生命奥秘有着十分重要的意义。我们应当予以高度重视,根据我国国情和国力,在中长期科技发展战略与发展规划中,有重点地选择和开展一些课题的跟踪与创新,争取在一些领域取得突破性的成果。

致谢:本文撰写过程中得到刘盛纲院士、赵松年研究员等多位专家学者的关心和指导,在此表示衷心感谢。

## RESEARCH AND DEVELOPMENT OF BIOELECTRONICS

Cui Dafu<sup>1</sup>    Zhang Zhaotian<sup>2</sup>    Xiong Xiaoyun<sup>2</sup>    Xu Jianhua<sup>2</sup>

(1 State Key Laboratory of Transducer Technology, Institute of Electronics, CAS, Beijing 100080;

2 Department of Information Science, NSFC, Beijing 100085)

**Abstract** The development of information science and life science as two important areas have caused remarkable influence on science progress and economic development; and even change distinctly human life in countless ways. Bioelectronics is just a novel subject, which is developed from information science and life science. In this paper, major research field of bioelectronics and its development current are discussed. It is pointed out that in future 30 years, information, biology and nano-technology will become the key of the technology development and their greater progress will be brought with the cross of sciences. Thus, bioelectronics will draw more attention and gain greater development in the future.

**Key words** bioelectronics, research, development

·资料·信息·

## 中国学者创立的新学科——可拓学

一个由中国学者创立的新学科——可拓学,历经20多年的研究与发展已初具规模。它是由我国学者蔡文研究员于1983年创立的一门原创性横断学科,以形式化的模型,探讨事物拓展的可能性以及开拓创新的规律与方法,并用于解决矛盾问题。

1988年以来,国家自然科学基金委员会管理科学部连续以6个科学基金项目支持广东工业大学可拓工程研究所进行这项原始性创新研究,管理科学

部和其他科学部还资助了清华大学、浙江大学、华东理工大学等其他院校7个可拓学的项目。这些项目有力地保证了可拓学的生存,并促使其健康迅速地发展,为该学科的初创形成提供了基本条件。可拓学成长发展的实践证明,中国人有能力进行原始性创新研究,国家自然科学基金是支持源头创新研究的有力保证。

(宣传处 供稿)