



中国国际科技促进会
China International Association for Promotion of Science and Technology

ISTA
eISSN: 3093-7124

国际科技促进

ISTA: International Science & Technology Advancement



eISSN 3093-7124



9 773093 712006

Price: RM30

Volume I Issue I March 2025

中文刊名：国际科技促进
eISSN: 3093-7124
出版语言：华文
期刊网址：<https://journals.zycentre.com/spij>
出版社名称：中宇国际教育中心

Serial Title: ISTA: International Science & Technology Advancement
eISSN: 3093-7124
Language: Chinese
Web: <https://journals.zycentre.com/spij>
Publisher: Zhongyu International Education Centre (M) Sdn Bhd

版权声明 /Copyright

所有发表在《国际科技促进》上的文章的版权归作者所有。作者同时授权出版商对这些文章进行出版、复制、发行和传播。

《国际科技促进》按照“知识共享署名 4.0 国际许可协议”(CC BY 4.0) 来发表已录用的稿件。向《国际科技促进》投稿发表的作者同意将 CC BY 4.0 许可协议应用于其作品。任何人都可以复制、重新分发材料，对材料进行改编、转换和构建新内容，且不限媒体或格式，前提是遵守该许可协议的条款，并正确引用原始来源。

Copyright for all articles published in the International Science & Technology Advancement belongs to the authors. The authors also grant permission to the publisher to publish, reproduce, distribute and transmit the articles. International Science & Technology Advancement publishes accepted manuscripts under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0). Authors submitting papers for publication in International Science & Technology Advancement agree to apply the CC BY 4.0 license to their work. Anyone may copy, redistribute material, remix, transform and construct material in any media or format, provided that the terms of the license are observed and the original source is properly cited.

Zhongyu International Education Centre (M) Sdn Bhd
电子邮箱 /Email: contact@zycentre.com
官方网址 /Official Website <https://zycentre.com/>
地址 /Address: B-03A-15, One South Street Mall, Jalan OS, Taman Serdang
Perdana, 43300 Seri Kembangan, Selangor Darul Ehsan.





国际科技促进

ISTA: INTERNATIONAL SCIENCE & TECHNOLOGY ADVANCEMENT

Editor-in-Chief

Zhou Ji Tsinghua University China
Email : zhouji@tsinghua.edu.cn

Executive Editor - in - Chief

Zhang Shaochun China International Association for
Promotion of Science and Technology China
Email : zsc@ciapst.org

Associate Editor

Zheng Hualin China International Association for
Promotion of Science and Technology China
Email : zhhl@ciapst.org

Editorial Board Members

Thanh Thi Nguyen Monash University Australia
Email: Thanh.Nguyen9@monash.edu

Jian Zhao Northwestern Polytechnical University China
Email : Zhaojian90@u.nus.edu

Vincent Omollo Nyangaresi Jaramogi Oginga Odinga
University of Science & Technology Kenya
Email : vnyangaresi@jouust.ac.ke

CONTENTS



- 01 脑机接口 : 拓展人脑疆界的革命性技术与神经外科学的未来
Brain-Computer Interface: A Revolutionary Technology Expanding the Frontiers of the Human Brain and the Future of Neurosurgery
- 06 基于专利分析的面向 6G 智能超表面技术发展研究
Research on the Development of 6G Intelligent Reconfigurable Surface Technology Oriented Based on Patent Analysis
- 13 面向超导量子芯片的自动化测控系统设计与实现
Design and Implementation of an Automated Measurement and Control System for Superconducting Quantum Chips
- 17 利用 CRISPR/Cas9 技术定点编辑烟草中半胱氨酸转移酶 CY S 基因
Site-specific editing of the cysteine transferase (CYS) gene in tobacco using the CRISPR/Cas9 technology
- 23 基于量子计算的加密方法及抗量子攻击算法的理论研究
Theoretical Research on Encryption Methods Based on Quantum Computing and Quantum-Resistant Attack Algorithm
- 27 磁约束可控核聚变装置的磁体系统综述
Review of the Magnet System for Magnetically Confined Controlled Nuclear Fusion Devices

脑机接口：拓展人脑疆界的革命性技术与神经外科学的未来

赵继宗

国家神经系统疾病临床研究中心 首都医科大学附属北京天坛医院，北京 100070

摘要：脑机接口 (braincomputer interface, BCI) 不仅是一项先进的技术，还代表了一场跨越神经科学、人工智能、计算机科学、哲学与社会学的深刻革命。BCI 的核心价值在于突破大脑与外部世界之间的信息隔阂，赋予人类全新的信息交互能力，并推动智能社会的演进。作为一项颠覆性的科技创新，BCI 从根本上改变了人类与世界互动的方式，其应用将深刻影响人类对认知、意识乃至自我存在的理解。对于神经外科而言，BCI 不仅是一项革命性的治疗手段，更是带来了重塑传统医学范式的契机。从修复神经损伤到调节大脑功能，从增强人的智能到塑造人机融合的未来，BCI 为 神经外科提供了前所未有的可能性。该技术的发展，不仅有助于人们更深入地理解大脑功能，更为未来智能化医疗提供了强有力的支持。BCI 的影响远超医学，它牵动着未来计算模式的变革、智能增强的普及、社会伦理的审视、国家战略的部署、经济发展的动力以及国家安全的保障等各个方面。

关键词：脑机接口；神经外科；神经调控；未来医学；国家战略

Brain-Computer Interface: A Revolutionary Technology Expanding the Frontiers of the Human Brain and the Future of Neurosurgery

Zhao Jizong

National Clinical Research Center for Neurological Diseases, Beijing Tiantan Hospital, Capital Medical University, Beijing 100070 China

Abstract The brain computer interface (BCI) is not merely an advanced technology but also represents a profound revolution spanning neuroscience, artificial intelligence, computer science, philosophy, and sociology. The core value of BCI lies in its ability to break through the informational barriers between the brain and the external world, endowing humans with novel capabilities for information interaction and propelling the evolution of an intelligent society. As a disruptive technological innovation, BCI fundamentally alters the way humans interact with the world, and its applications will profoundly influence our understanding of cognition, consciousness, and even selfexistence. For neurosurgery, BCI is not only a revolutionary therapeutic tool but also an opportunity to reshape traditional medical paradigms. From repairing neural damage to modulating brain functions, from enhancing human intelligence to shaping the future of humanmachine integration, BCI offers unprecedented possibilities for neurosurgery. The development of this technology not only aids in a deeper understanding of brain functions but also provides robust support for future intelligent healthcare. The impact of BCI extends far beyond medicine, influencing the transformation of future computing paradigms, the proliferation of intelligence augmentation, the scrutiny of social ethics, the deployment of national strategies, the dynamics of economic development, and the safeguarding of national security.

keyword brain computerinterface;neurosurgery;neuromodulation;futuremedicine;nationalstrategy

1 引言

自人类文明诞生以来，信息交流方式的变革始终是推动文明进步的引擎。从最初的语言和文字，到后来的计算机和互联网，每一次信息交互方式的革新都带来了社会生产力的飞跃。而脑机接口的出现，则标志着信息交互进入了一个崭新的纪元——大脑与数字世界的直接融合。在脑机接口中，有两个广泛的概念：BCI (brain-computer interface) 和 BMI (brain-machine interface)，二者均旨在建立大脑与外部设备（如计算机、机械臂、假肢等）之间的直接通信通道，绕开传统神经肌肉路径^[1-2]。前者侧重与计算机系统的深度融合（双向交互），而后者侧重机械控制，强调功能替代^[3-4]。为保持术语一致性，本文以“BCI”指代脑机接口技术。

BCI 的发展可追溯至 20 世纪 60 年代的早期实验，最初目的是记录和解码大脑的神经信号^[5]。随着技术的不断进步，尤其是 20 世纪 90 年代基于脑电图 (electroencephalogram, EEG) 非侵入式 BCI 的出现，其应用领域逐渐扩大，特别是在辅助残疾人设备领域，取得了一定应用成果^[6]。进入 21 世纪，随着 Neuralink 等技术公司推动侵入式 BCI 技术的临床试验^[7]，BCI 技术进入了飞跃式发展的新阶段。与此同时，国内“脑科学与类脑研究”重大科技专项也加速了这一领域的布局，力图在全球范围内占据科技竞争的前沿阵地。

BCI 的兴起不仅关乎医学和技术的突破，同样关系到国家的科技竞争力、经济发展以及社会安全。各 国政府纷纷将 BCI 作为国家战略的核心领域之一，通过政策支持和资源投入，力求在未来全球科技竞争中占据主导地位。BCI 的长远影响，不仅限于推动医学进步，还将在社会结构、经济模式、国家安全等层面产生深远的变革。

2 脑机接口的定义与分类

BCI 是一种通过读取大脑电活动，并将这些活动 Med J PUMCH, 2025, 16(2)

转化为外部设备控制信号的技术。其通过信号采集、处理、输出 3 个主要模块，使得大脑能够与计算机或其他电子设备直接进行信息交流与互动^[8]。BCI 不仅可用于神经康复、智能增强，还能够治疗多种神经系统疾病，将成为未来医学领域的核心技术之一。BCI 的应用前景远超医学领域，其在智能增强、认知控制、虚拟现实等领域的潜力亦不容小觑。

根据技术的侵入性，BCI 可分为如下三类：非侵入式 BCI 通过不接触大脑皮层的方式采集大脑信号，如 EEG、功能磁共振或近红外光谱 (near-infrared spectroscopy, NIRS) 等，风险较低，但信号精度较差，适用于智能设备控制和脑波训练等领域；半侵入式 BCI 通过在电极植入硬脑膜外获取神经信号，虽然风险较低，但仍需手术，设备的长期稳定性和耐用性存在挑战；侵入式 BCI 则通过外科手术将电极直接植入大脑皮层或深部脑结构，提供高质量信号，适用于精确神经调控，但伴随手

术风险、设备寿命和免疫排斥等问题^[9]。

目前关于 BCI 的前沿产品主要涵盖以下几种：(1) Neuralink 的硬币芯片 (<https://neuralink.com/>)：由 Elon Musk 领导的 Neuralink 公司开发了一款硬币大小的手术植入设备“Link”，内含电池、芯片组和 1024 个微小电极（图 1A）。为尽可能精确监测脑活动，该设备采用微米级电极丝阵列分散植入颅骨内的特定区域（通常在运动皮层或其他与特定功能相关的脑区），芯片通过无线方式将神经信号传输至外部设备，这些信号被解码为“运动意图”^[7]。(2) Neuroable 的 BCI 增强型耳机 (<https://wwwneurablecom/>)：耳机配备了多个干电极传感器，能够捕捉大脑活动信号，利用机器学习算法实时分析用户的专注度和认知状态（图 1B）。这些传感器集成在耳机中，采用干电极设计，便于佩戴和使用^[10]。其首款产品“Enten”利用先进的数据分析与信号处理技术，优化用户每日的高效专注时段，为用户提供了一种全新的认知健康监测和生产力提升工具，具有广泛的应用前景。(3) Precision Neuroscience 的电极封装膜 (<https://precisionneuro.io/>)：Precision Neuroscience 公司基于微创且可逆的植入式芯片开发了一种用于 BCI 系统的创新材料。其“第七层皮层接口”(layer 7 cortical interface)是一种仅为人类头发 1/5 直径厚度的超薄微电极薄膜，可贴合颅骨下方的大脑皮层且不损伤任何组织（图 1C）。该薄膜包含超过 1024 个微电极，覆盖 1 cm² 的面积。薄膜嵌入于柔性材料中，在神经外科医生植入和移除时不会损伤脑组织，且薄膜材料经过优化，可确保与大脑组织的良好兼容性，减少免疫反应和组织损伤^[11]。(4) Synchron 血管内植入支架 (<https://synchron.com/>)：Synchron 经颈静脉插入，进入大脑的上矢状窦，最终放置于运动皮层附近（图 1D）。这种微创技术避免了开颅手术，具有更高的安全性和便利性。其通过导线将 Stentrode 连接到胸部的接收单元，用于实时传输神经信号，

并将思维转化为无手操作的文本交流、设备控制等，为严

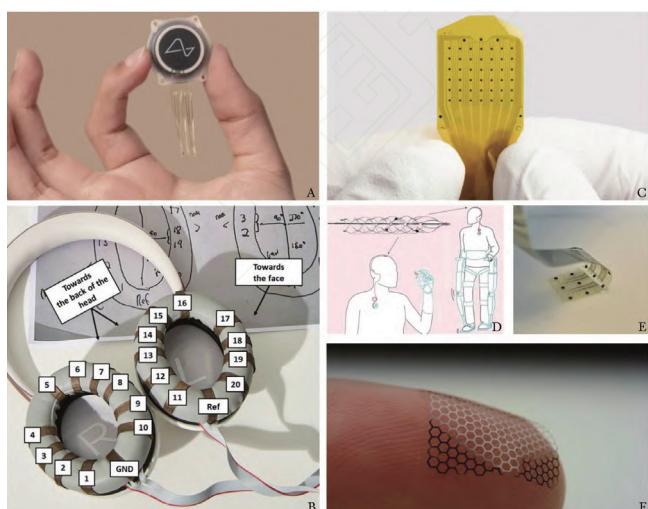


图 1 脑机接口前沿产品展示

重瘫痪患者提供了一种安全、高效且灵活的脑机接口解决方案 [9]。(5) Inbrain Neuroelectronics 的石墨烯芯片 (<https://inbrainneuroelectronics.com/>) : Inbrain 公司在成立前, 已进行了石墨烯芯片的研发, 重点是确保石墨烯材料的生物相容性和稳定性。目前该产品已达到英国药品和医疗产品监管局、美国食品药品监督管理局 (Food and Drug Administration, FDA) 以及 ISO 13485 标准。石墨烯芯片不仅能监测脑活动, 还可进行电刺激, 且信号强度远超传统金属芯片 (图 1E)。Inbrain 计划于 2025 年进行首次人体试验, 该试验将在马德里大学进行, 用于脑肿瘤手术中识别癌细胞组织。(6) Blackrock Neurotech 的 Mesh Lace 数据采集阵列 (<https://blackrockneurotech.com/>): Blackrock Neurotech 自 2004 年起开展人体测试, 旨在帮助患者恢复触觉、肢体运动能力及纯意念控制数字设备等功能。最新项目 “Neuralace” 为网状贴片, 可贴合脑沟回结构, 超大表面积支持 10 000 个神经通道信号采集, 逼近全脑数据覆盖, 减少了免疫反应和炎症, 提高了生物相容性 (图 1F)。该技术还具有可扩展性, 未来可能应用于视觉假体和其他神经疾病治疗。

3 脑机接口在神经外科的突破与应用

BCI 技术不仅改变了大脑与外部世界的互动方式, 更为神经外科领域带来了革命性的变革: 其既是一种突破性的治疗手段, 又为手术技术、诊断体系和康复方式的革新提供了新视角, 极大地拓宽了医学治疗的边界 (表 1)。BCI 的出现, 标志着人类已进入机遇与挑战并存的新时代, 为神经外科医生提供了新的工具, 同时为神经疾病开辟了全新的治疗道路。

3.1 辅助神经功能重建

3.1.1 运动解码与控制

随着 BCI 技术的发展, 神经功能重建迎来了革命性变革。BCI 通过实时解码大脑神经活动信号, 并将其转化为可执行指令, 实现对外部设备的控制, 为神经修复开辟了新路径。瑞士洛桑联邦理工学院的研究采用 BCI 植入装置采集大脑运动指令, 并将其转化为脊髓电刺激信号, 绕过损伤区域, 恢复运动功能, 不仅恢复了大脑指令的传递能力, 还促进了神经重塑与功能恢复, 提供了大脑与肢体的有效连接^[12]。对于脑卒中患者, BCI 技术通过精准捕捉大脑运动信号, 结合功能性电刺激 (functional electrical stimulation, FES), 能够实时调整电刺激频率与强度, 从而实现个性化的康复治疗^[13]。巴西 Walk Again Project 项目的技术方案主要基于 BCI 技术, 通过记录患者大脑中的电活动, 识别其意图并将其转化为行动。该项目通过 EEG 控制外骨骼步态训练, 结合触觉反馈与虚拟现实, 实现了脊髓损伤患者的部分运动功能重建, 并激活了残存神经束的可塑性。BCI 技术的应用显著缩短了传统康复治疗时间, 提高了治疗效果, 通过推动个性化和精准的神经功能恢复, 极大提升了患者的生活质量^[14]。

3.1.2 语言解码与控制

BCI 辅助神经功能重建中的语言解码是一项高度复杂的技术, 涉及神经科学、信号处理、机器学习等多学科交叉。其核心目标是通过解析大脑中与语言相关的神经活动模式, 将抽象的神经信号转化为可识别的语言内容 (如文字或语音), 从而帮助失语症患者

或语言功能障碍者恢复沟通能力。斯坦福团队在 1 例 67 岁肌萎缩侧索硬化患者的大脑体感运动皮层植入 128 个电极阵列, 通过记录神经元活动并结合循环神经网络及语言模型, 实现了 62 词 / min 的文本转换 (125 000 词库错误率为 23~8%, 50 词库错误率降至 9~1%)^[15]。我国张复伦教授团队则在 1 例 47 岁脑干卒中患者感觉运动皮层表面放置 253 个电极, 通过提取高伽马神经信号训练神经网络, 实现 78 词 / min 的文本输出 (1024 词库错误率为 25.5%), 并同步生成合成语音与虚拟化身面部动画。其多模态输出系统支持 119 词库下语音错误率仅为 8.2%, 且通过数字化身提供视觉反馈, 显著提升了沟通维度^[16]。脑虎科技与华山医院合作, 利用侵入式柔性电极实现了全球首个汉语实时解码系统, 支持 142 个常用音节, 解码准确率为 71%, 时延 <100 ms。该技术突破了汉语多音节 (418 个) 和声调 (4 种) 的复杂挑战 (<https://news.science.net.cn/htmlnews/2025/1/536985.shtml>)。上述研究通过不同技术路径 (侵入式电极 / 皮层表面记录) 分别突破脑机接口的速度与准确性边界, 为失语患者提供了接近自然语速的交流可能, 标志着神经工程向临床应用迈出了关键一步。

3.2 术中神经监测与功能保护

神经外科手术, 特别是在脑部肿瘤、脑动脉瘤

和神经损伤修复中, 面临着如何避免损伤脑功能区, 确保患者认知、运动和功能不受影响的巨大挑战。传统神经监测方法虽能反映脑功能状态, 但在实时精确反馈方面仍存在局限。BCI 技术结合神经信号解码, 为术中神经监测与功能保护带来了革命性进展。通过非侵入或半侵入方式, 实时捕捉大脑电活动, 并转化为可操作的数据, 能够帮助外科医生精准识别运动、语言、感觉等关键脑区, 动态调整手术操作, 避免损伤。尤其在复杂的脑部手术 (如肿瘤切除中), 柔性电极贴片技术能够提供实时反馈, 帮助医生避开重要脑区, 确保切除肿瘤的同时最大限度保护脑功能^[17]。BCI 技术不仅能在术中精确保护神经功能, 还能在术后阶段持续监测脑功能恢复进程, 为康复治疗提供更精确的指导。BCI 的引入为神经外科手术带来了前所未有的精准支持, 提升了手术安全性和成功率, 推动神经外科手术向更高水平发展。

3.3 癫痫与帕金森病的精准干预

3.3.1 帕金森病的神经调控

神经调控技术通过向大脑特定区域植入电极进行电刺激, 在帕金森病治疗中取得显著成效。BCI 通过实时监测、闭环调控和精准干预, 显著改善了传统疗法的局限性。在帕金森病

治疗中, BCI 技术使脑深部电刺激 (deep brain stimulation, DBS) 参数根据患者实时神经信号自动调整。传统 DBS 通过高频电刺激抑制基底核区异常活动, 缓解震颤和僵硬。BCI 技术进一步引入闭环系统, 实时监测 β 波 (21 ~ 26 Hz) 活动, 动态调整刺激参数以优化疗效^[18]。这一机制大大提高了治疗效果, 并减少了副作用, 如运动过度和语音困难。BCI 通过实时监测大脑电活动, 结合闭环神经调控系统, 实现对刺激参数的动态调整, 从而提升了治疗效果^[19]。

3.3.2 癫痫的神经调控

在癫痫治疗中, BCI 与迷走神经刺激术结合的

闭环系统可精确捕捉脑电信号, 识别癫痫前兆并自动调整刺激参数, 防止癫痫发作。约翰·霍普金斯大学的研究表明, 该系统能够在癫痫发作前预测异常脑电活动, 进行及时干预, 有效减少发作频率^[20]。2021 年, 浙江大学医学院附属第二医院成功植入了中国自主研发的首个闭环神经刺激器, 用于控制癫痫。该系统通过植入式电极实时采集脑电信号, 利用算法(如小波分析、神经网络)检测癫痫发作前的异常放电模式, 并在发作前或发作初期提供精准电刺激, 有效抑制癫痫发作, 实现了 BCI 干预下的闭环神经刺激。BCI 技术还为医生提供了更丰富的患者数据, 帮助其作出更科学的治疗决策。通过长期监测神经活动数据, 医生可评估患者对治疗的反应, 优化治疗方案。

4 脑机接口在神经系统疾病中的拓展与探索

4.1 阿尔茨海默病与记忆增强

阿尔茨海默病 (Alzheimer's disease, AD) 等神

经退行性疾病长期以来困扰着神经医学领域, 虽然现有药物治疗有一定效果, 但疗效有限。BCI 技术, 尤其是脑神经调控与增强的结合, 为 AD 治疗带来了全新希望。BCI 通过闭环系统精准调节大脑特定区域的神经活动, 能够实时监测脑电波, 根据大脑信号变化进行干预, 不仅能延缓病情进程, 还能恢复部分记忆功能。例如, 通过刺激海马体区域, 增强神经元之间的连接, 促进记忆痕迹的稳定存储, 从而减缓认知衰退^[21]。麻省理工学院的动物实验表明, 刺激海马体特定区域可成功恢复部分记忆功能, 验证了 BCI 在恢复记忆方面的潜力^[22]。尽管 BCI 在 AD 治疗中的前景广阔, 但仍面临挑战。首先, 如何精确定位和调节受损记忆区域, 仍是技术发展的难题。其次, 个体化治疗需克服患者脑部差异, 确保优化治疗方案。

4.2 意识障碍的识别与恢复

意识障碍, 尤其是植物状态和微意识状态患者的治疗, 一直是神经外科领域的挑战。虽然患者的大脑仍有一定的神经活动, 但传统评估方法难以准确评估其意识水平, 导致其康复潜力常被忽视。EEGBCI 技术通过采集和分析脑电活动, 能够实时监测意识障碍患者的神经活动, 帮助识别患者潜在的意识迹象。潘家辉教授团队通过 EEGBCI 成功发现一些植物状态患

者仍具备一定的认知能力, 这为植物状态的诊断和治疗提供了更加客观的依据^[23]。北京天坛医院的研究进一步结合电刺激与 EEGBCI 技术, 取得了显著临床效果, 部分微意识状态患者在治疗后表现出更高的意识反应, 为意识障碍的早期诊断和干预开辟了新道路^[24]。BCI 除可识别大脑活动外, 还具备实时调控大脑神经活动的能力。通过解码脑电信号, BCI 可在关键时刻通过电刺激激活相关脑区, 促进神经网络恢复。闭环式的干预提高了治疗精度, 并缩短了治疗周期。

4.3 精神疾病的治疗尝试

随着 BCI 与人工智能 (artificial intelligence, AI)

技术的结合, 精神疾病治疗迎来了突破。BCI 能够通过实时监测患者的大脑信号, 捕捉情绪波动、认知失调等特征, 提供个性化的干预方案。抑郁症患者大脑皮层的低频波增加和高频波减少可通过 BCI 解码, 为治疗提供依据。AI 通过深度学习分析大脑信号, 实时调整治疗方案, 不仅能够提升治疗的精准度和时效性, 还能减少药物副作用。BCI 通过经颅电刺激或深部脑刺激对特定脑区进行精准调控, AI 实时分析患者数据, 调整刺激参数, 从而可实现精准干预, 提高治疗稳定性并减少药物依赖。通过实时监测与 AI 算法相结合, 个性化治疗方案能够避免“一刀切”, 满足患者的个性化需求。此外, AI 技术还能提前识别精神疾病风险, 提供早期干预, 改善患者生活质量。

5 当前困难与挑战

BCI 技术在医疗和康复领域的潜力已逐渐显现, 但在实际应用中仍面临一系列挑战, 需要进一步的技术突破、政策支持和伦理审查, 才能推动 BCI 技术在神经系统疾病治疗中的广泛应用。

5.1 信号采集的精确度与稳定性

信号采集是 BCI 系统的核心, 直接影响系统性能

和治疗效果。非侵入式 BCI 通过 EEG 或 NIRS 监测大脑活动, 然而由于头皮和头骨的阻碍, 信号精度有限, 难以在高精度应用, 如运动控制和癫痫发作预警中发挥作用。相比之下, 侵入式 BCI 可提供更高精度的信号, 但面临手术风险、感染及设备老化等问题。因此, 如何平衡非侵入式与侵入式 BCI 的优缺点, 仍是提升系统性能面临的巨大挑战。

5.2 大脑信号的解码与处理

大脑信号解码是 BCI 技术的核心难题。大脑活动

复杂, 涉及运动、感觉、情感、认知等多个层面。现有的机器学习和深度学习算法虽有所进展, 但在实时解码和准确性方面仍面临挑战, 特别是在复杂环境下的稳定性和鲁棒性^[25]。因此, 提升解码算法的准确性和实时性是 BCI 技术应用于临床和其他领域的关键。

5.3 伦理与隐私问题

BCI 技术可能深入到大脑的内在活动, 涉及思

想、情感和记忆等敏感信息, 触及“思想隐私”问题^[26]。如

何保护个人隐私、确保数据的安全和合法使用，是 BCI 面临的重要挑战。BCI 系统需要制定严格的数据保护政策，防止数据泄露、篡改或滥用。同时，BCI 技术的伦理审查机制仍需完善，以避免滥用带来的社会负面影响。

5.4 成本与可及性

BCI 技术研发和应用的成本较高，限制了其在医疗和康复领域的普及。尤其是在低收入国家和地区，BCI 的高成本成为其广泛应用的瓶颈。为使 BCI 技术惠及更多患者，降低成本至关重要。除研发更低成本的设备外，还需要通过政府资助、标准化生产等途径，推动 BCI 的普及。

5.5 临床验证与规范化

尽管 BCI 技术在实验室研究中展现出潜力，但如何将其转化为实际临床治疗，并确保治疗效果的可靠性和安全性仍面临挑战。现有的临床试验和病例研究虽显示 BCI 对部分疾病有效，但缺乏长期效果和安全性的充分数据。因此，加强临床验证，建立统一的 BCI 技术标准和操作流程，是推动 BCI 广泛应用的前提。

6 结束语

BCI 与 AI 的深度融合，正推动神经科学和临床医学进入新世纪。在技术层面，AI 算法的突破显著提升了神经信号解码能力，如 DPAD (dissociative prioritized analysis of dynamics) 算法实现复杂神经模式分离，NeuroXess 公司通过侵入式 BCI 成功输出汉字并操控机械臂；双向闭环系统与柔性电极技术可提前预警癫痫并动态调节神经活动，多模态数据融合框架（如 EEG 眼动协同）则将意念控制精度推至 95% 以上。临床应用中，BCIAI 系统已在运动功能重建、语言生成、意识交互及疾病预测等领域取得突破。AI 驱动的 DBS 动态优化帕金森病症状控制效率达 30%，非侵入式 BCI 结合机器人训练使脑卒中患者康复效果提升 40%。

全球脑机接口产业正处于高速发展阶段，政策引导与技术突破共同推动行业进入爆发式增长期。例如，美国 Neuralink 通过 FDA “突破性医疗器械”认证加速临床转化；而中国信息通信研究院和工信部联合发起成立的“脑机接口产业联盟”主导产学研协同，旨在推动脑机接口技术的科研成果转化、应用场景开拓、供应链建设、技术标准制定、人才培养和创业投融资。未来，高带宽双向接口（纳米柔性电极 + 光遗传学）、类脑 AI 模型及跨学科人才培养是研究趋势，BCIAI 融合不仅将重塑神经外科诊疗范式，更指向“以脑为中心”的精准医学愿景。随着标准完善与政策落地，这一技术有望 10 年内从实验室迈向规模化应用，为人类脑健康与功能增强开辟全新可能。

参考文献：

- [1] Isa T, Fetz E E, Müller K R. Recent advances in brain-machine interfaces [J]. *Neural Netw*, 2009, 22 (9): 1201–1202.
- [2] Hofmann U G, Stieglitz T. Why some BCI should still be called BMI [J]. *Nat Commun*, 2024, 15 (1): 6207.
- [3] Karami M M. Neuroscience and brain-computer interface: bridging medicine and technology for advancing patients care [J]. *Pharmacophore*, 2024, 15 (1): 613.
- [4] Nijboer F, Clausen J, Allison B Z, et al. The Asilomar survey: stakeholders' opinions on ethical issues related to brain computer interfacing [J]. *Neuroethics*, 2013, 6 (3): 541–578.
- [5] Awuah W A, Ahluwalia A, Darko K, et al. Bridging minds and machines: the recent advances of brain-computer interfaces in neurological and neurosurgical applications [J]. *World Neurosurg*, 2024, 189: 138–153.
- [6] 赵继宗. 脑机接口研究现状与展望 [J]. 中华医学信息导报, 2023, 38 (8): 8. Zhao J Z. Current status and prospects of brain computer interface research [J]. *China Med News*, 2023, 38 (8): 8. [7] Musk E, Neuralink. An integrated brain-machine interface platform with thousands of channels [J]. *J Med Internet Res*, 2019, 21 (10): e16194.
- [8] Gao X R, Wang Y J, Chen X G, et al. Interface, interaction, and intelligence in generalized brain-computer interfaces [J]. *Trends Cogn Sci*, 2021, 25 (8): 671–684. [9] He Q H, Yang Y, Ge P C, et al. The brain nebula: minimally invasive brain-computer interface by endovascular neural recording and stimulation [J]. *J Neurointerv Surg*, 2024, 16 (12): 1237–1243.
- [10] Alcaide R, Agarwal N, Candassamy J, et al. EEG-based focus estimation using Neurables Enten headphones and analytics platform [DB/OL]. (20210623)[20240220]. <https://www.biorxiv.org/lookup/doi/10.1101/2021.06.21.448991>.
- [11] Khan S, Mian A, Newaz G. Thin film coatings as electrodes in neuroscience [M] // NAZARPOUR S. Thin Films and Coatings in Biology. Dordrecht: Springer, 2013: 301–330.
- [12] Lorach H, Galvez A, Spagnolo V, et al. Walking naturally after spinal cord injury using a brain-spine interface [J]. *Nature*, 2023, 618 (7963): 1261–133.
- [13] Biasiucci A, Leeb R, Iturrate I, et al. Brain-activated functional electrical stimulation elicits lasting arm motor recovery after stroke [J]. *Nat Commun*, 2018, 9 (1): 2421.
- [14] Kruse A, Suica Z, Taeymans J, et al. Effect of brain-computer interface training based on noninvasive electroencephalography using motor imagery on functional recovery after stroke: a systematic review and meta-analysis [J]. *BMC Neurol*, 2020, 20 (1): 385.
- [15] Willett F R, Kunz E M, Fan C F, et al. A high-performance speech neuroprosthesis [J]. *Nature*, 2023, 620 (7976): 1031–1036.
- [16] Metzger S L, Littlejohn K T, Silva A B, et al. A high-performance neuroprosthesis for speech decoding and avatar control [J]. *Nature*, 2023, 620 (7976): 1037–1046. [17] 邱文灿, 马良, 郭浩月, 等. 植入式脑机接口系统实现、临床进展与技术挑战 [J]. 生物化学与生物物理进展, 2024, 51 (10): 2478–2497.
- Qiu W C, Ma L, Guo H Y, et al. The implementation, clinical progress and technical challenges of implantable brain-computer interface systems [J]. *Prog Biochem Biophys*, 2024, 51 (10): 2478–2497.
- [18] Wang S, Zhu G Y, Shi L, et al. Closed-loop adaptive deep brain stimulation in Parkinson's disease: procedures to achieve it and future perspectives [J]. *J Parkinsons Dis*, 2023, 13 (4): 453–471.
- [19] An Q, Yin Z X, Ma R Y, et al. Adaptive deep brain stimulation for Parkinson's disease: looking back at the past decade on motor outcomes [J]. *J Neurol*, 2023, 270 (3): 1371–1387.
- [20] Li A, Huynh C, Fitzgerald Z, et al. Neural fragility as an EEG marker of the seizure onset zone [J]. *Nat Neurosci*, 2021, 24 (10): 1465–1474.
- [21] Leite J, Morales-Quezada L, Carvalho S, et al. Surface EEG-transcranial direct current stimulation (tDCS)

基于专利分析的面向 6G 智能超表面技术 发展研究

马玉芳

国家知识产权局专利局 专利审查协作天津中心，天津 300300

摘要:智能超表面 (Reconfigurable Intelligent Surface,RIS) 技术作为 5G-Advanced 和 6G 潜在关键技术之一,具备准无源、连续孔径、易于部署、低功耗、软件可编程、宽频响应和低热噪声等优势,能够重新塑造电磁环境,实现多种功能。通过统计分析了面向 6G RIS 技术相关专利的申请量趋势、区域分布及技术创新主体,梳理了 4 个主要分支 RIS 器件、波束赋形、信道估计以及通信感知一体化(Integrated Sensing and Communication, ISAC)的专利技术演进路线,以专利技术演进路线为依托,揭示面向 6G RIS 技术最新的发展趋势及研究热点。通过全球面向 6G RIS 专利的跟踪与分析,充分挖掘了专利中承载的技术信息,发挥了专利信息对国内技术发展的引导作用。

关键词:面向 6G 智能超表面;智能超表面器件;波束赋形;信道估计;通信感知一体化

Research on the Development of 6G Intelligent Reconfigurable Surface Technology Oriented Based on Patent Analysis

Ma Yufang

Patent Examination Cooperation (Tianjin) Center, Patent Office of the National Intellectual Property Administration, Tianjin 300300 China

Abstract Reconfigurable Intelligent Surface (RIS)' as one of the potential key technologies for 5G-Advanced and 6G' boasts advantages such as quasi-passivity' continuous aperture' ease of deployment' low power consumption' software programmability' broad- band response' and low thermal noise. It has the capability to reshape the electromagnetic environment and enable a variety of functions. This study conducts a statistical analysis on the trends in application volume' regional distribution' and key players in technological innovation related to 6G intelligent surface technology patents. Furthermore' it examines the technological evolution paths of three main branches: RIS device' beamforming' channel estimation' and Integrated Sensing and Communication (ISAC). By relying on these patent technology evolution paths' the study uncovers the latest development trends and research hotspots in 6G intelligent surface technology. Through tracking and analyzing global patents focused on 6G intelligent surfaces' the technical information embedded in these patents is fully explored' highlighting the leading role of patent information in domestic technological development.

keyword RIS for 6G; RIS device; beamforming; channel estimation; ISAC

1 引言

RIS 是一种由亚波长尺寸单元按特定空间排布形成的人工电磁结构,可以通过数字编码方式调控电磁波的各种物理特性,如幅度、相位、频率、极化等,其工作原理是通过在表面上集成大量微型天线和电子元件实现对电磁波的动态控制,从而显

著提升无线通信性能。RIS 技术凭借提高通信覆盖、改善定位准确度、提升传输效率、强化通信安全、扩展传输通道和减少干扰等优势,在未来的通信领域中扮演着重要角色,并成为 6G 无线通信的关键技术^[1-2]。随着从万物互联向万物智联的发展,面向 6G RIS 能够提供更高速、更可靠、更智能且

更高效的无线连接及数据处理能力，为 6G 技术的各种应用场景提供强大的技术支持^[3]。

专利是推动科技创新的关键因素，专利公开的详细信息可以促进知识的共享和技术的传播，避免重复研发，加速技术进步。通过对专利数据的深入挖掘和分析，可以揭示技术发展趋势、竞争格局以及潜在的市场机会。企业可以通过专利分析来制定战略决策、优化资源配置、提高创新能力和市场竞争力。政府和研究机构也可以利用专利分析来评估政策效果，指导科技发展规划^[4-5]。杨辰泓等^[6]采用文献分析及其他方法对 RIS 辅助的无线通信技术创新趋势和关键技术进行了分析，但国内外尚无通过专利分析方法对面向 6G RIS 技术的创新趋势进行研究的报道。因此，为更全面地了解国内外面向 6G RIS 技术的发展情况，本文以专利数据为分析对象，对面向 6G RIS 技术的发展现状进行分析，包括专利申请趋势、技术创新主体分析以及重点方向创新态势分析，为面向 6G RIS 技术的发展提供参考。

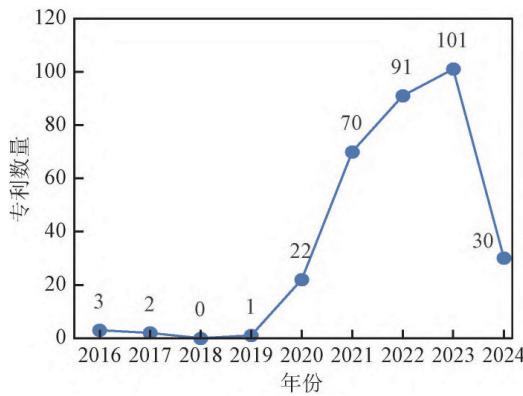
2 数据来源

采用 6G、RIS 等关键词与 RIS 器件、波束赋形、信道估计、ISAC 等关键词进行了组合，并结合分类号 H01Q 等设计了检索式，利用 IncoPat 商业专利数据库^[7]和中国国家知识产权局专利检索及分析系统^[8]完成了专利信息初步检索。对初步检索的专利文献，采用人工浏览手工去噪、去重、分类号筛选识别、关键词筛选和标引等方法^[9]，最终建立 2016—2024 年全球面向 6G RIS 专利数据集，包含 340 项专利（含发明、实用新型、外观设计专利），为本研究提供研究基础和支持依据。由于专利从申请到公开需要 18 个月，部分申请提前公开的通常需要 6 个月，因此 2023 年以后的专利数据仅供参考。在此基础上，对面向 6G RIS 的专利申请趋势、专利布局区域、全球技术创新主体等进行分析。

3 数据分析

3.1 专利申请趋势

如图 1 所示，面向 6G RIS 专利申请目前依然处



于快速增长期。可以看出，面向 6G RIS 的发展大致划分为两个阶段，2020 年之前的萌芽期和 2020 年后的成长期。

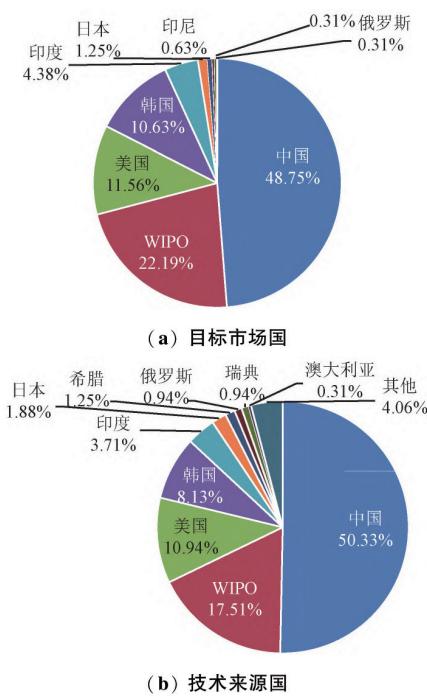
2016—2018 年，专利申请量增长缓慢，全球年专利申请量仅为个位数，属于面向 6G RIS 技术的萌芽期。2020 年 7 月，三星公司发布了首个 6G 白皮书，将 RIS 列为 6G 无线使能技术之一。2021 年 9 月，工信部 IMT-2030(6G) 推进组在 6G 研讨会 RIS 分论坛上正式发布了业界首个《智能超表面技术研究报告》^[10]。从 2020 年起，各大创新主体对该项技术积极投入，专利申请量呈现翻倍增长趋势，全球专利申

请量自 2020 年的 21 项 / 年快速增长至 2023 年的 92 项 / 年。从 2020 开始的 3 年时间中，面向 6GRIS 的专利技术呈飞速增长趋势，原因在于面向 6G RIS 技术应用领域涉及 6G 典型场景的各个方面，是 6G 通信研究的重点技术分支。根据专利申请趋势分析可知，面向 6G RIS 技术正逐渐从萌芽期步入成长期。

3.2 全球专利布局区域专利年度申请趋势

图 2 为面向 6G RIS 专利全球目标市场国与技术来源国分布。通过分析可以了解面向 6G RIS 在不同国家技术创新的活跃情况，从而发现主要的技术创新来源国和重要的目标市场。

目标市场国分布数据以专利发明公开国别为统计指标，技术来源国分布数据以最早优先权国别为统计指标。从专利申请趋势及目标市场国分布来看，中国是目前最大的目标市场国，且专利申请量优势相对明显。虽然面向 6G RIS 技术在全球各大洲都有布局，但其目标市场主要是中国、美国，且申请量排名第一的中国的体量要远高于排名第二的美国。在亚洲地区，韩国的申请量排在第二，印度申请量排在第三，占据了一定的比例。



技术来源国分布与目标市场国专利分布情况大体一致，整体上看是各国创新主体在本土进行专利布局。中国是近年来面向 6G RIS 技术最大的技术来源国，中国创新主体近 5 年中申请了大量与面向 6G RIS 技术相关的专利。近些年，我国推出 6G 相关政策，国内无论是运营商、通信设备供应商均看中 6G 市场，纷纷结合自身已有基础，在面向 6G RIS 技术方面进行相应的研发和专利申请，各大高校也依托自身技术进行相关专利布局。

3.3 技术创新主体分析

为了解面向 6G RIS 领域技术创新主体情况，

分析推动该技术领域发展的重要力量，进一步了解该领域的主要申请人及其整体竞争态势，帮助研究人员调整研发方向和提供研究思路，统计面向 6G RIS 领域前 10 名申请人的专利申请数量，从而更全面地评估主要申请人的知识产权布局，对申请人进行合并统计，遵循的主要原则为：中英文名称的同一法律实体，或同一企业集团的关联企业。合并分析后的面向 6G



RIS 全球专利主要申请人如图 3 所示。

由图 3 可以看出，面向 6G RIS 技术创新主要来自于中国、韩国、美国和瑞典。其中，在专利申请量

排名前 10 的创新主体中，中国有 6 个，分别为杭州腓腓科技有限公司、东南大学、电子科技大学、西安电子科技大学、中兴通讯股份有限公司以及浙江大学；韩国有两个，分别为三星公司和 LG 电子公司；美国有一个，为高通公司；瑞典有一个，为爱立信公司。

高通公司的专利申请量排名第一，共有 29 项专利申请。作为美国的主要创新主体，高通公司在 6G RIS 方面的研究进展显著，已取得一系列重要成就：在硬件研发方面，已经成功研制了两块 16×16 单元的感知型 RIS 硬件；在信道估计和波束成形技术方面，在 RIS 辅助通信传输中的信道估计和波束成形等关键技术方面进行了深入研究；在系统架构和网络部署方面，探索了基于 RIS 的网络控制系统架构，以及 RIS 在网络部署中的应用，包括级联信道解耦、RIS 调控约束解决方案、信道调控和信息调制融合等方面的研究。

杭州腓腓科技有限公司的专利申请量排名第二，共有 17 项

专利申请，作为中国的新兴移动通信设备制造厂商，其专利涉及透射式 RIS 辅助的跌倒检测方法与系统、连续调相 RIS 及其波束赋形和快速波束追踪方法等。波束追踪方法等。

三星公司的专利申请量排名第三，共有 14 项专利申请，在其发布的 6G 白皮书中提到 RIS 是 6G 无线通信的关键使能技术之一，并展示了其在 RIS 技术方面的研究成果。三星公司的研究表明，RIS 能够通过使用超材料表面来改善波束的锐度，并将无线信号导向期望的方向。这有助于减少高频信号（例如毫米波）的穿透损失和阻挡。

除上述排名前三的企业类申请人外，我国高校申请人在 6G RIS 的研究进展显著，东南大学、电子科技大学、西安电子科技大学以及浙江大学在面向 6G RIS 技术方面已储备较多专利技术。

东南大学作为排名第一的高校申请人，在该项技术方面的研发时间以及技术覆盖面较广，东南大学崔铁军院士团队在 6G 研究方面取得了新进展，他们与香港城市大学合作，共同研发了具有边带抑制效应的波导集成时空编码超表面天线。东南大学基于信息超材料的 RIS 技术已入选 IMT-2030(6G) 7 项关键技术备选方案之一^[11]，其研发团队作为该项技术组长，负责在 IMT-2030 框架下推动 RIS 进入未来 6G 国际标准^[12]。

另一重要高校申请人为电子科技大学，其面向 6G RIS 相关的专利申请量仅次于东南大学，电子科技大学的邓龙江院士团队与毕磊教授在非互易超表面领域取得了重要进展，提出并研制了磁性相位梯度型非互易超表面。这种超表面能够实现电磁波相位的任意双向非互易传输，为电磁信息的传输和调控提供了新的功能和范式。

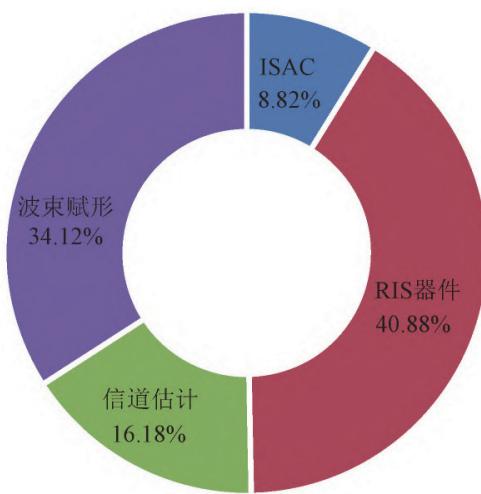
另一重要高校申请人为西安电子科技大学，李龙教授课题组提出了一种高性能联合调制功率放大可编程超表面携能通信系统，通过利用频率正交性和有源功率放大可编程超表面灵活的空间场操控能力，设计了具有 4 种独立相位调控状态的发射机，实现了高效率传输携能通信系统。此外，还有研究通过引入不同能量占比的联合调制方法，实现了高转换效率和高质量通信。

4 技术分支及演进

基于当前面向 6G RIS 技术按照研究热点方向进行归类和分析，绘制相应分支技术发展路线图，以揭示该领域的创新态势。如图 4 所示，面向 6G RIS 技术领域的专利申请主要涉及 RIS 器件、ISAC、信道估计及波束赋形。其中，40.88% 的专利分布在 RIS 器件，34.12% 的专利分布在波束赋形或波束成形技术，16.18% 的专利分布在信道估计，剩余 8.82% 的专利涉及 ISAC。可见，RIS 器件的技术储备最多，而 ISAC 技术则是未来技术突破方向。

4.1 RIS 器件

RIS 器件是一种基于超材料发展起来的新技术构成分析术，由大量 RIS 单元组成，这些单元能够调控入射电磁波



的幅度、相位、极化等电磁特性。RIS 器件几乎是一种被动设备，可以适应或改变发射器和接收器之间的无线电信号，从而实现对无线传播信道的主动智能调控^[13-14]。综上所述，RIS 器件在 6G 技术中扮演着重要角色，通过其独特的电磁调控能力，可以显著提升通信系统的性能^[15]。

在 RIS 器件技术方面，有 139 项相关专利申请，专利申请量在面向 6G RIS 技术专利中排名第一，通过对这些专利进一步分析归类，可以发现 RIS 器件的演进方案主要包括 3 个分支：第一分支，是否有源，包括无源、有源以及混合方式；第二分支，RIS 波束赋形精度，从低精度到高精度；第三分支，从反射到透射。

4.1.1 是否有源

是否有源，包括无源、有源以及混合方式，现有

RIS 大多是准无源的，使得 RIS 反射链路面临固有的“乘性衰落”效应，而有源 RIS 通过在单元上集成成功来放大反射信号，可有效解决上述问题^[16]，RIS 器件是否有源技术发展路线如图 5 所示。

对于无源 RIS 器件，韩国先进科学技术研究院于 2021 年提出“可重构智能表面及其认证方法”(KR1020220138242)。可重新配置的 RIS 设备包括：RIS、多个无源天线，控制器能够控制所述多个无源天线，以在与终端完成相互认证之后，从所述基站接收的下行链路信号反射并发送到所述终端，能够防止对 RIS 的攻击。西安电子科技大学于 2023 年提出“一种基于频率选择表面的无源 RIS 增透膜及其在 5G 通信中的应用”(CN202311136713.6)，增透膜粘贴在室外玻璃 3、室内玻璃 5 媒质两侧，信号由基站发出，经由无源 RIS 传输至室内场馆，所述无源 RIS 表面通过调整辐射单元的反射相位来改变反射主波束的方向。

对于有源 RIS 器件，清华大学于 2022 年提出“基于集中放大架构的有源智能超表面天线”(CN202211570431.2)，基于集

中放大架构的有源 RIS 能实现收发波束独立调控，采用集中放大器既提高发射信号的有效各向辐射功率，又能有效解决大规模分布式放大器引入电路自激问题，相比于无源 RIS 天线，有助于覆盖边缘信号增强和信息传输速率提升。北京电信规划设计院有限公司、中讯邮电咨询设计院有限公司于 2023 年提出“有源动态可调节的智能超表面设备”(CN202320941251.4)，将 RIS 设备与光伏组件有机结合，有效地解决了 RIS 设备的供电问题。

对于有源和无源混合的 RIS 器件，西安电子科技大学信息传输与接入技术研究所先后于 2021 年、2022 年提出申请太阳能自供电的混合可重构智能反射表面方案(CN202110975932.8, CN202210125928.7)，将太阳能电池与有源反射元件集成，解决了其供电问题。相对单独的有源 RIS 来说，可实现夜间正常工作，且实现了通信设备的小型化、节能化、智能化、低成本和减少后期维护成本，符合 6G 通信的绿色节能、智能可控的目标。

4.1.2 RIS 波束赋形精度

为提高 RIS 波束赋形精度，提出了多种高分辨率

RIS 移相方法，可将移相精度从 1 bit 提高到 2 bit 甚至更高，例如多比特。RIS 器件波束赋形精度技术发展路线如图 6 所示。

东南大学提出“一种 1-比特毫米波电控可编程超表面”(CN202210144468.2)；电子科技大学提出一种“一种双通道双线极化 2 比特阵列天线”(CN202310616439.6)，2 bit 的天线单元相比于 1 bit 设计具有更优的阵列辐射性能。安徽大学提出一种“一种 3 bit 双极化相位可调的可重构智能超表面”(CN202210901916.9)，包括多个 3 bit 双极化相位可调的可重构 RIS 单元，每个 3 bit 双极化相位可调的可重构 RIS 单元上分别沿 x、y 轴两个方向上集成了一对变容管，通过控制变容管的两侧电压值可以在 x、y 轴两个方向上实现独立的 3 bit 调相。

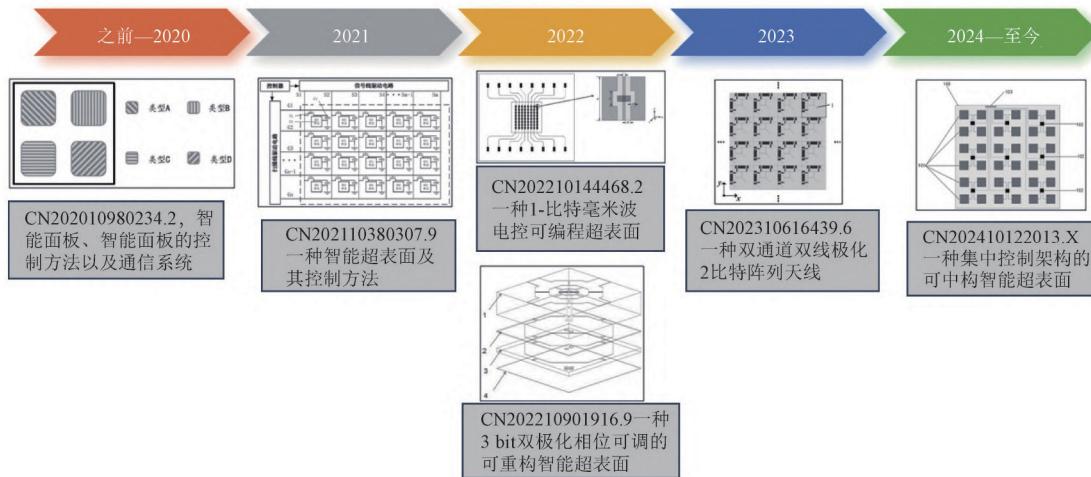
对于多比特技术，中兴通讯股份有限公司于 2020 年提出“智能面板、智能面板的控制方法以及通信系统”(CN202010980234.2)，方案中每一类电磁单元具有对入射电磁波的 K-比特调控功能。

华中科技大学于 2021 年提出“一种智能超表面及其控制方法”(CN202110380307.9)，通过模拟通断电路实现对 RIS 单元的模拟控制，相较于现有技术采用 1 bit 或 2 bit 量化处理的数字控制方式，能够采用更高分辨率的模拟控制，从而减少量化损失，提高控制精度。清华大学提出“一种集中控制架构的可重构智能超表面”(CN202410122013.X)，采用集中控制型 RIS，将用于调节和控制相位的射频开关芯片与天线单元分离。设计了多比特多极化 RIS 天线。

4.1.3 从反射到透射

主流 RIS 是反射式的，近年来出现了透射式

RIS、联合反-透射式 RIS 等新形态，以支持室外 RIS 同时



服务于室内外用户，扩大 RIS 的应用范围^[17]。RIS 器件从反射到透射技术的发展路线如图 7 所示。

反射式 RIS 是 RIS 器件技术专利申请最早且专利数量最多的应用方向。华为提出“无线信号反射器及使用该无线信号反射器的无线通信方法”(WORU21000080)；华中师范大学提出“反射型双极化 1 bit 编码器件、方法以及系统”(CN202211672827.8)；北京邮电大学提出“一种相位可连续调控的大带宽智能反射面”(CN202310867175.1)；浙江大学提出“机械动态可调的电磁波反射面单元及阵列式反射面”(CN202410448437.5)。

对于透射式 RIS，东南大学提出“一种具备滤波功能和调相功能的透射型可重构智能超表面”(CN202311080798.0)；华南理工大学提出“一种宽带惠更斯超表面单元、透射阵列天线及设计方法”(CN202410025197.8)。

对于联合反-透射式 RIS，电子科技大学提出“基于介质超表面的双模式太赫兹波束调控器及方法和应用”(CN202010270800.0)，器件可以通过热控或光控实现两种工作模式：透射模式和反射模式间的动态切换；三星公司提出“包含多个单位单元

的 RIS”，用于向用户设备发送和接收信号的反射/透射可重构配置智能表面；重庆邮电大学提出“一种在透射和反射模式下的多功能多频率复用编码超表面”(CN202310260707.5)，单元结构在全空间模式下具有高性能反射和透射功能。

4.2 波束赋形

RIS 波束赋形对于提升通信质量至关重要。目前主要采用 3 种波束赋形方法^[18]：1 运用交替迭代优化法，该技术通过协同迭代优化的方式找出发射器和 RIS 之间的最优波束赋形权重^[19]；2 以代码为基础的设计波束搜索方式，借助已有的编码集进行启发的波束搜索^[20]；3 依赖于人工智能数据驱动的方案，即用神经网络自动产生需要的 RIS 波束赋形参数^[21]。这些方法各自具有独特的优势，共同推动了 RIS 技术在无线通信领域的应用和发展。RIS 在算法设计方面主要集中在波束赋形于信道估计，

其中波束赋形技术的专利数量占总数的 34.12%(116 项)，专利申请数量排名第二，是面向 6G RIS 技术中的研究热点。波束赋形技术发展路线图如图 8 所示。

LG 电子公司于 2020 年提出“无线通信系统中终端和基站的信号收发方法和装置”(KR1020237011986)，并且涉及用于在无线通信系统中基于大型智能表面(Large Intelligent Surface, LIS)在基站和终端之间进行通信的方法和设备，该方法涉及向 LIS 发送(S3701)同步信道。基于同步信道接收从 LIS 发送的 LIS 登记请求信道(S3703)。基于接收到的 LIS 注册请求信道，向 LIS 发送 LIS 注册完成信道(S3705)。调整 LIS 的反射光束图案(S3707)。基于调整后的 LIS 的反射波束方向图，通过 LIS 向终端发送信号(S3709)。

在通过机械旋转实现波束赋形技术方面，东南大学于 2021 年提出“用于实现动态波束赋形的莫尔超表面”(CN202111569674.X)，动态可调超材料通过机械旋转实现波束扫描和波束形状切换。

为解决传统相控阵功耗高、造价昂贵的问题，杭州腓腓科技有限公司于 2022 年提出“基于可重构折射超表面的信号发射接收方法及装置”(CN202210631523.0)，由于可重构折射超表面不存在馈源遮挡的问题，所以它的辐射效率比传统可重构反射超表面天线的高。

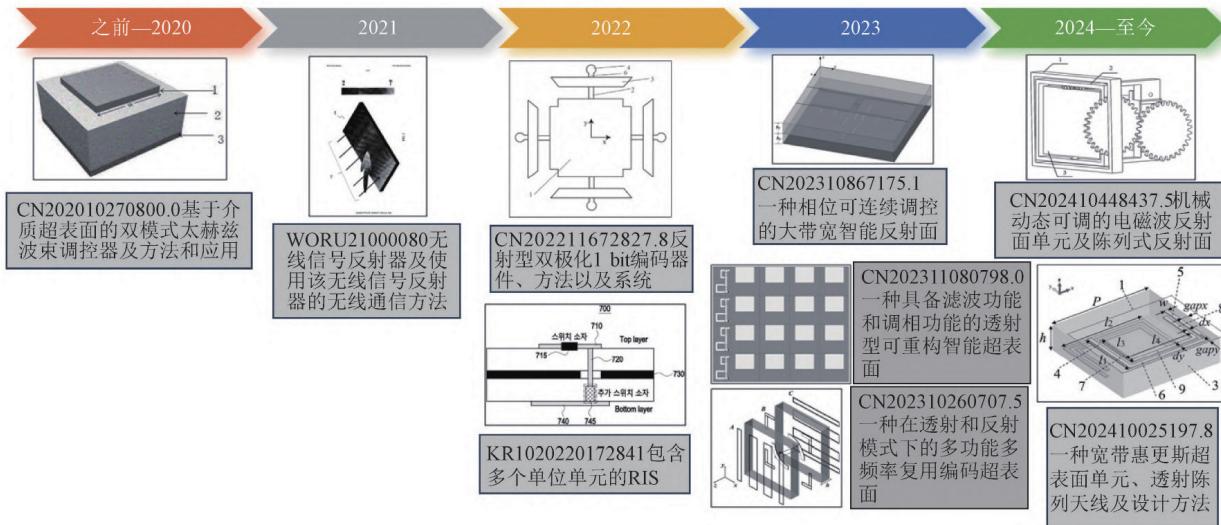
在无源波束性能改善方面，三星公司于 2023 年提出“用于智能反射表面(IRS)辅助的蜂窝系统波信息传输与接入技术

束训练的方法和设备”(WOKR23006045)，该方法使获得的无源波束增益显著更高，能够在参考信号不正交的情况下避免由于同时传输而引起的干扰，并且向终端提供更好的吞吐量。

对于基于码本的波束成形技术，高通公司于 2024 年提出“可重构表面的基于码本的波束成形考虑”(IN202447039313)，该方法能够有效地支持用于可重构表面的基于码本的波束成形考虑。

4.3 信道估计

RIS 通信系统的高效运行，信道估计发挥着关键作用^[22]。



RIS 单元众多 , 准确预测信道仍然是一个技术难题。当前 ,RIS 信道估计算法主要包括两类 : 一是采用基于 RIS 信道的时间和空间特征 , 以降低需要使用的导频信号量 , 进而提高信道估计的效果 ; 二是借助在 RIS 中集成的感测器 (例如毫米波雷达或相机等), 并综合各种信道的物理属性及多源数据进行信道估计^[23] 。这种方法能够提供更为全面的信道信息 , 有助于提高信道估计的准确性。

对于 RIS 在算法设计方面 , 主要集中在波束赋形与信道估计 , 其中信道估计技术的专利数量占总数的 16.18% (55 项) , 是面向 6G RIS 技术非常具有研究价值的领域 , 信道估计的技术发展路线如图 9 所示。

对于应用信道估计算法实现定位 , 诺基亚公司于 2020 年提出 “ 由诸如智能反射表面 (SIR) 的可重新配置反射表面辅助的 UE 定位 ” (US17920954) , UE 对传输进行测量 , 并且可以确定到达角、到达时间或参考信号接收功率的 (一个或多个) 测量 , 和、或确定信道估计。

对于提高无线通信系统的容量和能效 , 华为公司于 2021 年提出 “ 用于智能表面辅助通信中的信道重构的方法和装置 ” (WOUS21045479) , 该方法以低成本的方式有效地重构智能反射面辅助无线通信中

的信道 , 从而提高无线通信系统的容量和能效。对于复杂信道估计的计算复杂度改进 , 韩国电子通信研究院于 2022 年提出 “ 在通信系统中估计信道的方法和装置 ” (US18086276) , 该方法降低了复杂信道估计的计算复杂度 , 提高了基于智能反射面的通信系统的性能。对于通信信道改进场景 , 中国联通于 2023 年提出 “ 一种智能超表面 RIS 的部署方法及测试方法 ” (CN202310943763.9) , 该方法解决了相关技术中存在的 RIS 部署中安装不准确、安装效率低的问题 , 适

4.4 ISAC

作为 6G 技术中具有巨大发展潜力的领域 , ISAC 主要特点

在于软件和硬件设备之间的协作工作 , 这使得它们能共同完成对实体世界及虚拟世界 的感应任务 , 并提供广泛的智能化通信服务^[24] 。此 项创新科技不仅能够在传输数据时捕捉周围环境的信息 , 还可有效提高通信与认知的效果 , ISAC 实现了信息的融合 , 使其相互补充。它不仅可以在相同的频谱上工作 , 还能共享硬件和信号处理模块 , 以提供多样化的感知服务^[25] 。

ISAC 技术专利数量占总数的 8.82% (30 项) , 是目前面向 6G RIS 领域新兴技术方向 , ISAC 技术发展路线如图 10 所示。

ISAC 技术应用场景广泛 , 山西大学于 2022 年提出 “ 一种三维 RIS 辅助的煤矿通感一体化网络优化方法及装置 ” (CN202210033832.8) , 优化煤矿通信网络模型中三维智能地表的反射系数矩阵 , 完成煤矿通信一体化网络的优化。北京邮电大学于 2022 年提出 “ 面向通信感知一体化的智能超表面的波束赋形方法和装置 ” (CN202211412346.3) 。

对于 ISAC 系统的频谱效率及通信速率 , 重庆邮电大学于 2023 年提出 “ 智能反射表面辅助的通信感知一体化系统波束成型方法 ” (CN202310110643.0) , 支持较高的信息速率并保证了系统的探测能力 , 增强了系统通信感知的性能 , 降低了雷达波形对多用户通信的干扰 , 提高了 ISAC 系统的频谱效率。西北工业大学于 2023 年提出 “ 一种可重构智能表面辅助安全传感和通信控制方法及系统 ” (CN202311808740.3) , 该方法根据时变信道状态部署 ARIS, 最大化安全通信速率 , 保证信息的安全传输。将 ARIS 辅助的 ISAC 网络环境建模为马尔可夫决策过程 , 采用深度确定性策略梯度算法优化无人机位置 , 使安全传输速度最大化。

郑州大学于 2024 年提出 “ 一种透射反射双功能可重构智能表面辅助通感一体化的安全通信系统及方法 ” (CN202410153503.6) , 该方法包括建立反射双功能可重构智能表面辅助 ISAC 系统模型。提出了反射双功能可重构智能表面耦合相移来同时实现感知和通信策略 , 并形成了能量分裂

和时间切换的反射双功能可重构智能表面操作协议的有源和无源波束形成相结合的优化问题。北京天坦智能科技有限责任公司于2024年提出“一种融合反射和透射于一体的智能超表面”(CN202410187559.3),利用半无源器件实现全空间的被动波束赋形(即可控通信环境),相比于现有的传统RIS技术,增添了可控透射的功能,并增加了调节与部署的灵活性。

5 结束语

从全球专利分析情况来看,面向6G RIS技术正逐渐从萌芽期步入成长。基于专利信息的分析,对我国政府和研究机构提出以下建议。

目前面向6G RIS技术研发热点情况如下:RIS器件的技术储备最多,RIS器件的研究主要集中在无源、有源以及混合方式3个方面。对于RIS,在算法设计方面,主要集中在波束赋形与信道估计。ISAC技术虽然目前申请量较少,但无疑是未来的技术突破方向。因此,我国政府宜重点支持RIS器件、波束赋形、信道估计、ISAC等领域的技术研发,研究机构也应加强在这些领域的研究深度并申请高价值

专利。我国是最大的目标市场国和技术来源国,专利数量排名领先,面向6G RIS技术也从萌芽期逐渐进入成长期,因而相关领域技术的标准化和产业化是当前需要重点关注的问题。建议推进标准化与产业化进程。加快标准制定:积极参与国际和国内6G RIS技术的标准化工工作,推动形成统一的技术标准和测试规范,为产业化奠定基础。促进产业链协同发展:加强上下游企业的合作,推动形成完整的产业链体系,包括材料供应、设备制造、测试验证等环节,实现协同发展。

参考文献:

- [1] NI X J,EMANI N K,KILDISHEV A V,et al. Broadband Light Bending with Plasmonic Nanoantennas[J]. Science,2012,335:427.
- [2] AIETA F,GENEVET P,KATS M A,et al. Aberration-free Ultrathin Flat Lenses and Axicons at Telecom Wave-lengths Based on Plasmonic Metasurfaces[J]. Nano Letters,2012,12(12):4932–4936.
- [3] NI X,WONG Z J,MREJEN M,et al. An Ultrathin Invisibility Skin Cloak for Visible Light[J]. Science,2015, 349:1310–1314.
- [4] 马克,陈燕,孙全亮.产业技术创新过程中专利竞争情报的领航功能与作用[J].科技促进发展,2017,13 (7):567–572.
- [5] 房华龙,王艳坤.专利技术分析方法探讨[J].中国发明与专利,2011(1):77–79.
- [6] 杨辰泓,桑健,李潇,等.RIS辅助的无线通信:原型验证与实测进展[J].电信科学,2024,40(7):1–12.
- [7] IncoPat.IncoPat 全球专利数据库 [DB/OL].[2024–信息传输与接入技术]
- [8] 中国国家知识产权局.专利检索及分析系统 [DB/ OL].[2024–11–08].<https://pss-system.cponline.cni-pa.gov.cn/conventionalSearch>.
- [9] 马天旗.专利分析:检索、可视化与报告撰写 [M]. 2 版. 北京:知识产权出版社,2021.
- [10] IMT–2030(6G) 推进组. 智能超表面技术研究报告 [R]. 北京:IMT–2030(6G) 推进组,2021.
- [11] IMT–2030 (6G) 推进组. 6G 总体愿景与潜在关键技术 白皮书 [R]. 北京:IMT–2030(6G) 推进组,2021.
- [12] IMT–2030(6G) 推进组. 通信感知一体化技术研究报告 [R]. 北京:IMT–2030(6G) 推进组,2021.
- [13] LI L L,ZHAO H T,LIU C,et al. Intelligent Metasurfaces: Control,Communication and Computing[J]. eLight,2022, 2(7):75–98.
- [14] DAI L L,WANG B C,WANG M,et al. Reconfigurable Intelligent Surface-based Wireless Communications:Antenna Design,Prototyping, and Experimental Results[J]. IEEE Access,2020,8:45913–45923.
- [15] ZHANG Z J,DAI L L. Reconfigurable Intelligent Surfaces for 6G:Nine Fundamental Issues and One Critical Problem[J]. Tsinghua Science and Technology,2023,28(5): 929–939.
- [16] ZHANG Z J,DAI L L,CHEN X B,et al. Active RIS vs. Passive RIS:Which Will Prevail in 6G? [J]. IEEE Transactions on Communications,2023,71(3):1707–1725.
- [17] MU X D,LIU Y W,GUO L,et al. Simultaneously Transmitting and Reflecting (STAR)RIS Aided Wireless Communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications,2022,21(5):3083–3098.
- [18] BRANCATI G, CHUKHNO O, CHUKHNO N, et al. Reconfigurable Intelligent Surface Placement in 5G NR/ 6G:Optimization and Performance Analysis[C] // 2022 IEEE 33rd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). Kyoto:IEEE,2022:1–6.
- [19] YU Z,HU X,LIU C,et al. Location Sensing and Beam-forming Design for IRS-enabled Multi-user ISAC Systems [J]. IEEE Transactions on Signal Processing,2022,70: 5178–5193.
- [20] SUN G C,ZHANG Y Q,HAO W M,et al. Joint Beam-forming Optimization for STAR-RIS Aided NOMA ISAC Systems [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2024,13(4):1009–1013.
- [21] ZHU Q,LI M,LIU R,et al. Joint Transceiver Beamforming and Reflecting Design for Active RIS-aided ISAC Systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023,72(7):9636–9640.
- [22] WU Q,ZHANG S,ZHENG B,et al. Intelligent Reflecting Surface Aided Wireless Communications:A Tutorial[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69 (5) : 3313–3351.
- [23] TANGW K,CHEN M Z,DAI J Y,et al. Wireless Communications with Programmable Metasurface: New Paradigms,Opportunities, and Challenges on Transceiver Design[J]. IEEE Wireless Communications,2020,27(2): 180–187.
- [24] LIU F,CUI Y H,MASOUROS C,et al. Integrated Sensing and Communications: Toward Dual-functional Wireless Networks for 6G and Beyond[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2022,40 (6):1728–1767.
- [25] WANG X, FEI Z, HUANG J, et al. Joint Waveform and Discrete Phase Shift Design for RIS-assisted Integrated Sensing and Communication System Under Cramer–rao Bound Constraint[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2022,71(1):1004–1009.

面向超导量子芯片的自动化测控系统设计与实现

范智强, 王卫龙, 岳峰, 王立新, 杨梦迪

信息工程大学, 河南 郑州 450001

摘要:随着量子比特规模的扩大,人工标定量子比特成本巨大且效率低下,因此量子测控的自动化工作势在必行。针对此问题,构建一个自动化量子测控的系统框架,包括测控实验、数据处理和决策判断等3个模块,以及测控实验库、数据处理函数库、测控经验库和测控数据库等4个数据库,并基于此完成单比特性质的自动化标定。对24个量子比特进行读取门和单比特门的标定,总共耗时2.7 h,平均每比特耗时6.75 min,效果上达到了平均单比特门保真度99.28%、读取保真度78.6%的水平。

关键词:量子计算;量子测控;量子门表征;自动化;量子测控系统

Design and Implementation of an Automated Measurement and Control System for Superconducting Quantum Chips

Fan Zhiqiang, Wang Weilong, Yue Feng, Wang Lixin, Yang Mengdi

Information Engineering University, Zhengzhou 450001, Henan Province China

Abstract As the scale of quantum bits expands, manual calibration of quantum bits becomes costly and inefficient. Therefore, the automation of quantum measurement and control is imperative. A frame work for automated quantum measurement and control is constructed in this work, including 3 modules such as measurement and control experiment, data processing and decision judgment, and 4 databases such as measurement and control experiment library, data processing function library, measurement and control experience library and measurement and control database. The automated calibration of single-qubit properties is completed based on this framework. The calibration of readout gates and single-qubit gates for 24 quantum bits is accomplished in a total of 2.7 h, averaging 6.75 min per qubit. An average single-qubit gate fidelity of 99.28% and a readout fidelity of 78.6% is achieved.

keyword quantum computing; quantum measurement and control; quantum gate characterization; automation; quantum measurement and control system

1 引言

超导量子计算是当前实现量子计算最主流的技术路线之一,其中量子比特数目及性质是评价超导量子计算性能的重要指标。2023年12月4日,美国IBM公司发布的Condor^[1]超导量子处理器是当前规模最大的超导量子处理器,包含1121个量子比特;另一款Heron^[2]处理器采用固定频率加可调耦合

器的架构,拥有133个量子比特,是当前

性能最好的超导量子处理器。即使如此,当前超导量子芯片的比特规模仍然相对较小,远未达到实际应用所需的规模。随着未来比特数目的不断扩展,依赖人工的调试变得越来越不可取。因此,自动化标定技术的发展将是推动超导量子计算发展的必要条件,这项技术可以有效推动超导量子计算在实际应

用中发挥作用。

自动化量子测控将自动化技术和量子技术相结合，实现对超导量子芯片的精确测量和控制，核心技术包括智能化控制算法、量子误差校正技术^[3-4]、量子机器学习^[5]和优化算法^[6-7]的应用、自动化测量技术的研发等。这些技术的发展将推动超导量子计算系统实现更智能化、高效化的量子门操作、测量和控制，从而提高量子计算系统的稳定性和准确性。目前，自动化量子测控发展仍受许多因素的制约，如量子芯片和量子测控硬件的不完美性，并且还受到热噪声^[8]、振动噪声、光子噪声^[9]等系统误差和不稳定因素的影响。此外，量子系统的高维度、量子纠缠和量子噪声增加了量子控制和测量的复杂性，从而对自动化测控的算法和软件提出了更高的要求。由于量子系统的复杂性和不确定性，结果的验证和解释需要面对诸如误差分析、模型验证、实验重复性等方面困难。

自动化测控的发展可以划分为不同阶段：流程贯通阶段、效果优化阶段、彻底代替人工测控阶段、超越人工阶段。当前自动化量子测控的发展总体正处于第1与第2阶段。文献^[10]利用最优脉冲工程算法对金刚石中电子自旋量子操作进行闭环迭代校正，在min的时间尺度上实现了高达98%的自旋布居数反转的自主校准保真度，在h的时间尺度上实现了高达0.98(±2%)的单量子比特π/2旋转的自主校准保真度。文献^[11]提出一种基于深度强化学习的超导电路自动校准方法，使用深度确定性策略梯度技术，实现了最高92%的平均保真度。在设备厂商和开源测控系统方面，本源量子^[12]宣称支持超导量子芯片的自动化测试功能和校准功能。QubiC^[13-14]称实现了自动化量子比特性质表征，构建门优化协议，在劳伦斯伯克利国家实验室的transmon类型的量子比特上取得较高的保真度，单比特和两比特Clifford门失真度分别为4.9(1.1)×10⁻⁴和1.4(3)×10⁻²。

根据量子测控的物理逻辑，构建一个自动化测控的框架，包括测控实验、数据处理和判断决策等3个模块，以及根据实际需要构建的测控实验库、数据处理函数库、测控经验库和测控数据库等4个库。基于此自动化测控框架，构建面向固定频率—可调耦合超导量子芯片的自动化校准程序。在同时对24个

量子比特的校准中，耗时总计2.7 h，提升10.5个百分点的平均读取保真度和5.58个百分点的单比特平均保真度，分别达到78.6%和99.28%的水平。

2 量子测控自动化系统设计

自动化测控系统分为测控实验、数据处理、决策判断等3个部分，如图1所示。整个自动化测控系统通过这3个部分的协同配合，实现对量子芯片的全方位表征、监测、控制和管理。自动化量子测控系统实现的关键在于构建4个库：测控实验库、数据处理函数库、测控经验库和测控结果数据库。

2.1 测控实验库

测控实验库是自动化量子测控系统中的一个重要组成部分，用于存储各种实验方案和参数设置。这些实验方案包括不同的量子态制备方法、量子比特之间的相互作用方式、测量方案等。实验库中存储的信息可以帮助系统在进行实验时快速选择合适的实验方案，从而提高实验的效率和准确性。测控实验库的结构和示例如表1所示。

2.2 数据处理函数库

数据处理函数库包含了各种用于处理实验数据的算法和工具。这些函数可以包括数据滤波、噪声校正、数据拟合、特征提取等。通过使用数据处理函数库中的算法，系统可以对实验采集到的数据进行有效处理，从而提取出有用的信息并准确地进行数据分析。

波形寻峰是一种常用的信号分析方法，用于识别信号中的峰值或极值点。该方法通常通过计算信号的一阶导数或二阶导数来寻找信号的极值点，然后根据设定的阈值或其他条件来确定峰值点。在量子测控中，寻找谐振腔频率、量子比特驱动频率等参数采用的就是波形寻峰的方法。

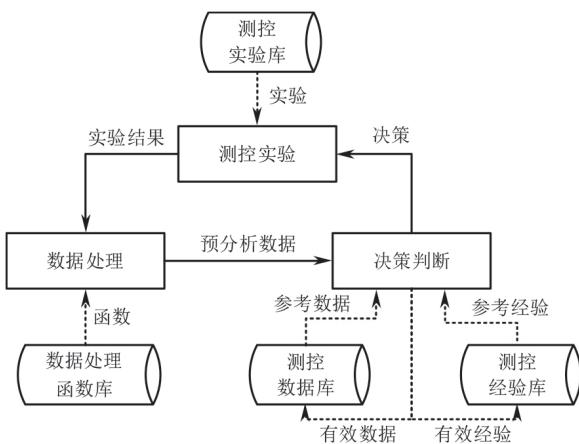
波形拟合是一种利用数学模型来描述信号波形的方法。通过选择合适的数学函数模型，可以对信号波形进行拟合，并得到模型参数。常用的波形拟合方法包括最小二乘拟合、非线性拟合和重构和信号特征提取等应用，在量子测控中主多项式拟合等。波形拟合可以用于信号去噪、信噪比于Rabi振荡、能量弛豫、相位弛豫等实验。

聚类分析是一种将数据集划分为不同类别的方法，用于发现数据集中的内在结构和模式。在信号分析中，聚类分析可以用于将信号波形划分为不同的类别或群组，从而识别信号中的不同特征和模式。常用的聚类分析方法包括K均值聚类^[15]、层次聚类^[16]和密度聚类^[17]等。聚类分析可以帮助识别信号中的异常点、趋势和周期性等特征，在量子测控中主要用于分析SingleShot实验。

2.3 测控经验库

测控经验库中存储了量子测控领域测控的经

验知识和规则，它们不仅可以来源于已有的文献和研究成果，还可以来自于实际工程师在量子测控系统设计、操作和维护过程中积累的宝贵经验。工程师在实际工作中所获得的经验



知识和解决问题的技巧，经过整理和归纳后可以成为测控经验库中的重要内容，为自动化量子测控系统提供实用的指导和建议。测控经验库不仅可以融合学术界的最新研究成果，还可以结合实际应用场景中的经验，为系统的智能化和实用性提供更全面的支持。测控经验库结构和示例如表2所示。

2.4 测控数据库 测控结果数据库用于存储实验过程中获得的数据

各种数据和结果。数据中包括量子比特数据、量子门数据和历史数据等，它们记录了量子计算实验中的关键信息和结果。测控结果数据库的建立可以帮助系统对实验过程进行追溯和分析，从而为后续的实验设计和优化提供参考。

量子比特数据指的是对量子比特的状态进行描述和记录的数据。在自动化量子测控系统中，量子比特数据可以包括量子比特的初始状态、演化过程中的状态变化、以及最终的测量结果等。这些数据对于量子计算实验的设计、执行和分析非常重要，可以帮助研究人员了解量子比特的状态演化情况，评估量子门操作的效果，以及进行量子算法的验证。

量子门数据记录量子门操作相关信息，包括单比特门、双比特门和测量门等。单比特门用于对单个量子比特进行操作，例如X门、Y门、Z门等；双比特门用于实现两个量子比特之间的相互作用，例如受控非门(Controlled-NOT Gate, CNOT门)、交换门(SWAP Gate, SWAP门)等；测量门用于对量子比特进行测量，获取量子比特的状态信息。量子门数据记录的信息为量子计算实验提供关键的操作指导和结果分析。测控数据库表3所示。

3 自动化校准程序实现

3.1 测控实验模块 测控实验模块是本程序设计的核心部分，主要包括内容如下。

1) 腔频谱扫描是用于研究量子比特与谐振腔

相互作用的实验方法。通过扫描微波信号的频率，观察谐振腔中的光子共振吸收，从而得到腔的频谱特性，包括腔的谐振频率、带宽和色散等。

2) 量子比特频谱扫描是用于研究量子比特的能级结构和频率特性的实验方法。通过调节微波信号的频率，观察量子比特的能级跃迁和共振吸收，从而得到量子比特的频谱特性。

3) Rabi振荡^[18]是用于研究量子比特与外加微波场相互作用的实验方法。通过施加微波脉冲，观察量子比特的能级跃迁和Rabi振荡现象，从而得到量子比特与微波场相互作用的程度和频率特性。

4) 能量弛豫是用于研究量子比特的能量弛豫时间(寿命)的实验方法。通过对量子比特施加激发脉冲，观察其能级的自发衰减过程，可以得到量子比特的能量寿命和弛豫时间。

5) 相位弛豫是用于研究量子比特的相位稳定性和相位弛豫

时间的实验方法。通过对量子比特施加相位激发脉冲，观察其相位的演化过程，可以得到量子比特的相位弛豫时间和相位稳定性。

6) SingleShot^[19]是用于测量单个量子比特的态区分依据的实验方法。通过测量得到量子比特处于不同状态时的信息，利用聚类的方法分析不同状态的特征信息，从而得到单个量子比特态区分的依据。

7) 单比特门 RB^[20]是用于研究单比特量子门操作的性能和稳定性的实验方法。通过施加一系列单比特门操作，观察量子比特的状态演化，从而得到单比特门操作的保真度和误差率等性能指标。

8) DRAG^[21]是一种用于减少超导量子比特中泄漏误差的技术。它通过在量子比特的驱动脉冲中添加额外的调制信号来实现。这种额外的调制信号被设计为与主要的驱动信号有一定的相位差，以抵消驱动信号导致的非共振跃迁，从而减少泄漏误差。DRAG技术的应用可以提高量子门操作的准确性和保真度，是量子计算中重要的误差校正技术之一。

3.2 数据处理模块 本系统主要用到的信号分析手段包括波形寻峰、波形拟合和聚类分析。

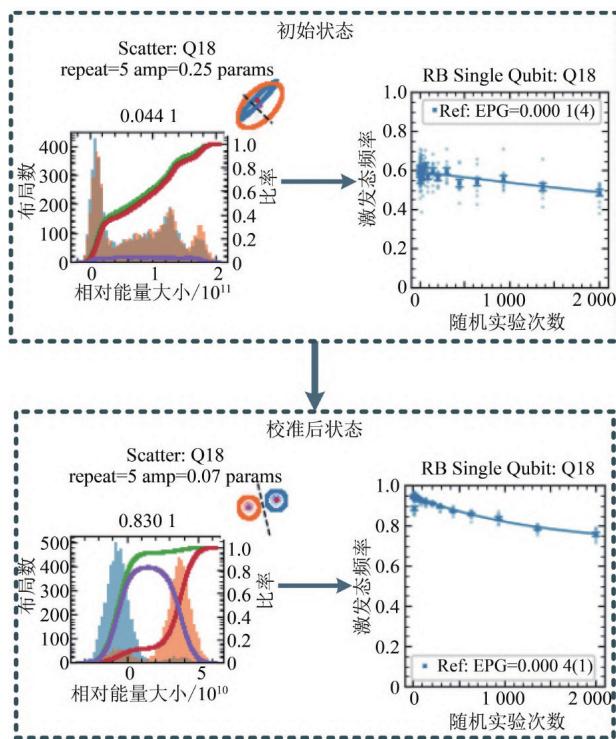
判断决策模块 在自动化测控中，判断决策模块的任务是基于数据处理模块产生的特征信息，对当前的量子系统状态进行判断，并根据判断结果制定下一步的操作策略。该模块的功能在量子比特性征中尤为重要。例如，在量子比特频谱扫描实验中，判断决策模块可以根据量子比特的能级跃迁特征，判断当前量子比特的能级结构和频率特性，从而决定下一步的实验步骤和实验参数设置。在Rabi振荡实验中，判断决策模块可以根据Rabi振荡的频率和幅度特征，判断量子比特与外加微波场的相互作用强度，进而决定下一步的Pi脉冲参数设置。

判断决策模块通常会结合预先设定的决策规则或者算法，对数据处理模块提供的特征信息进行分析和判断。这些决策规则或算法可以基于测控经验、统计学方法、机器学习等技术，以实现对系统状态的准确判断和合理决策。在量子比特性征中，由于量子系统的复杂性和噪声干扰的存在，判断决策模块的设计和优化对于实验结果的准确性和稳定性至关重要。

4 实验效果

自动化量子测控系统采用定频—可调耦合的芯片结构，对24个量子比特进行一系列实验。单比特校准过程示例如图3所示。这些实验包括腔频谱、量子比特频谱、TimeRabi、PowerRabi、DRAG、SingleShot以及单比特RB实验。通过这些实验，系统对单比特和测量门进行了表征，并采用波形寻峰、波形拟合和聚类分析等数据处理函数进行实验数据的处理。

在判断决策方面，系统基于测控经验构建了判断决策流程，通过分析和处理实验数据，以及结合测控经验，对实验参数进



行调整和优化，以提高实验结果的准确性和稳定性。最终，该系统实现较好的自动校准性能。采用 33 个实验序列，耗时 2.7 h 完成对 24 个量子比特的自动校准，平均单比特自动校准花费 6.75 min。读取区分度分析、读取保真度分析、单比特门保真度分析如图 4~ 图 6 所示。校准前读取区分度平均 36.1%、最大 76.4%，校准后区分度平均 57.1%、最大 88.1%，平均提升 21 个百分点、最大提升 78.8 个百分点；校准前读取保真度平均 68.1%、最大 88.2%，校准后读取保真度平均 78.6%、最大 94.1%，平均提升 10.5 个百分点、最大提升 89.4 个百分点，自动校准成功率达到 66.67%。校准前平均单比特门保真度 93.7%，校准后平均单比特门保真度 99.28%，平均提升 5.58 个百分点、最大提升 39.93 个百分点，自动校准成功率达到 66.67%。

5 结语

本系统实现了一定规模量子比特的自动化高效操作和测量，保真度和效率较人工标定有可观的提升，为量子信息处理和量子计算的实验研究提供了重要的支持。接下来，可以通过以下几种方式来优化和改进自动化测控系统。首先，引入更先进的数据分析技术，例如增强学习算法和深度学习模型等，以提高系统对复杂数据的处理能力和分析精度。其次，扩展系统功能，使其能够自动进行单双比特门的标定。最后，提升判断决策的智能化水平，以提高系统状态的识别能力和决策准确性，例如可以探索引入强化学习算法来实现系统的自主决策和优化，以提高系统的智能化水平和自适应能力。未来的自动化

量子测控技术将更加智能化、高效化，这需要量子物理、自动化控制、计算机科学等多个学科领域的合作，共同推动自动化量子测控技术的发展。

参考文献：

- [1] GAMBETTA J. The hardware and software for the era of quantum utility is here[EB/OL].[2024-01-16]. <https://research.ibm.com/blog/quantum-roadmap-2033>.
- [2] CHOI C Q. IBM's quantum leap:the company will take quantum tech past the 1000-qubit mark in 2023[J]. IEEE Spectrum, 2023, 60(1):46–47.
- [3] CHIAVERINI J, LEIBFRIED D, SCHAETZ T, et al. Realization of quantum error correction[J]. Nature, 2004, 432(7017):602–605.
- [4] GEORGESCU I. 25 years of quantum error correction[J]. Nature Reviews Physics, 2020, 2(10):519–519.
- [5] ALLCOCK J, ZHANG S Y. Quantum machine learning [J]. National Science Review, 2019, 6(1):26–28.
- [6] GIANNELLI L, SGROI P, BROWN J, et al. A tutorial on optimal control and reinforcement learning methods for quantum technologies[J]. Physics Letters A, 2022, 434: 128054.
- [7] VINTERRO. OptimalControl[M]. Boston, USA:Birkhäuser, 2010.
- [8] SAULSON P R. Thermal noise in mechanical experiments[J]. Physical Review D, 1990, 42(8):2437–2445.
- [9] BERTET P, CHIORESCU I, BURKARD G, et al. De phasing of a superconducting qubit induced by photon noise[J]. Physical Review Letters, 2005, 95(25):257002. [10]FRANK F, UNDEN T, ZOLLER J, et al. Autonomous calibration of single spin qubit operations[J]. npj Quantum Information, 2017, 3(1):48.
- [11]BAUTISTA M G, YAO Z J, BUTKO A, et al. Towards automated superconducting circuit calibration using deep reinforcement learning[C] // Proceedings of 2021 IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI. Tampa, USA:IEEE, 2021:462–467.
- [12]本源量子. 超导量子芯片测试表征系统解决方案 [EB/OL].[2024-01-11]. https://originqc.com.cn/product/zh/so_lution/system/0.
- [13]XU Y L, HUANG G, BALEWSKI J, et al. Automatic qubit characterization and gate optimization with qubic[J]. ACM Transactions on Quantum Computing, 2022, 4(1):3.
- [14]XUYL, HUANGG, FRUITWALAN, et al. QubiC2.0:an extensible open-source qubit control system capable of mid-circuit measurement and feed-forward[DB/OL].[2023-09-19][2024-01-16]. <https://arxiv.org/abs/2309.10333>.
- [15]SINAGA K P, YANG M S. Unsupervised K-means clustering algorithm[J]. IEEE Access, 2020, 8:80716–80727. [16]MURTAGH F, CONTRERAS P. Algorithms for hierarchical clustering:an overview[J]. WIREs Data Mining and Knowledge Discovery, 2012, 2(1):86–97. [17]BHATTACHARJEE P, MITRA P. A survey of density based clustering algorithms[J]. Frontiers of Computer Science, 2020, 15(1):151308.
- [18]MARTINIS J M, NAM S, AUMENTADO J, et al. Rabi oscillations in a large Josephson-junction qubit[J]. Physical Review Letters, 2002, 89(11):117901. [19]WALTER T, KURPIERS P, GASPARINETTI S, et al. Rapid high-fidelity single-shot dispersive readout of superconducting Qubits[J]. Physical review applied, 2017, 7:054020.
- [20]KNILL E, LEIBFRIED D, REICHLE R, et al. Randomized benchmarking of quantum gates[J]. Physical Review A, 2008, 77(1):012307.
- [21]王腾辉. 超导量子比特与绝热快速捷径在量子模拟和量子门中的应用 [D]. 杭州：浙江大学，2018.

利用 CRISPR/Cas9 技术定点编辑烟草中半胱氨酸转移酶 CY S 基因

包雪梅^{1,2,4} 李云³ 曹东³ 刘宝龙³ 王洪伦^{1*} 宗渊^{3*}

1 中国科学院藏药研究重点实验室, 西宁, 810001; 2 青海师范大学教育学院, 西宁, 810016;

3 中国科学院西北高原生物研究所, 青海省作物分子育种重点实验室, 西宁, 810001;

4 中国科学院大学, 北京, 100049* 共同通信作者

摘要:为研究半胱氨酸转移酶(CY S)基因对烟草生长发育及花青素合成的影响,在烟草中建立CRISPR/Cas9基因编辑体系,构建双靶点CRISPR/Cas9基因编辑载体p35S-H-CYS,利用农杆菌介导的遗传转化体系获得CY S烟草突变体,通过碱基测序和RT-qPCR检验CY S基因敲除效果,分析靶位点序列突变类型。结果表明,3个突变体株系在靶位点发生了基因突变,突变类型包括碱基插入、碱基替换,其中,靶位点1可以更有效地与靶位点结合,靶位点2处产生2个碱基替换,均为氨基酸同义突变。RT-qPCR结果表明,突变体株系中CY S基因的相对表达量均显著低于野生型烟草($P<0.01$)。与野生型对比,CY S-1、CY S-2和CY S-3突变体株系中CY S基因转录水平倍数分别为0.31、0.45和0.34。敲除CY S基因后对烟草株高、叶形等表型未见明显影响,而突变体烟草中花青素含量均有不同程度的提高,其中,CY S-1突变体株系中花青素含量为野生型的1.3倍,显著高于野生型烟草($P<0.05$),说明CY S基因会抑制花青素的合成,该结果与先前转录组结果相符。本研究通过CRISPR/Cas9基因编辑技术对CY S基因设计2个靶位点进行定点编辑,以烟草为转化受体,为进一步研究CY S基因功能提供了重要的材料基础。

关键词:烟草; CY S; CRISPR/Cas9; 基因编辑; 突变体

Site-specific editing of the cysteine transferase (CYS) gene in tobacco using the CRISPR/Cas9 technology

Bao Xuemei 1, 2, 4, Li Yun 3, Cao Dong 3, Liu Baolong 3, Wang Honglun 1*, Zong Yuan 3*

1 Key Laboratory of Tibetan Medicine Research, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China;

2 College of Education, Qinghai Normal University, Xining 810016, China;

3 Qinghai Key Laboratory of Crop Molecular Breeding, Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China;

4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China * Corresponding authors,

Abstract In order to study the effects of cysteine transferase (CYS) gene on the growth, development and anthocyanin synthesis in tobacco, we established CRISPR/Cas9 gene editing system in tobacco and constructed a double target CRISPR/Cas9 gene editing vector P35S-H-CYS. CYS tobacco mutant lines were obtained by Agrobacterium-mediated genetic system, the CYS gene knockout effect was tested by base sequencing and RT-qPCR, the mutation types of target genes were analyzed. Sequencing results showed that 3 mutant lines had gene mutations at target sites, including base insertion and base replacement. Target site 1 could bind to target

site more effectively, and target site 2 produced two bases mutations, both synonymous mutations of amino acids. RT-qPCR results showed that the relative expression level of CYS gene in mutants were significantly lower than the wild type tobacco ($P < 0.01$). Compared to wild type, the multiple of gene transcription levels were 0.31, 0.45 and 0.34. The knockout of CYS gene had no significant effect on tobacco plant height and leaf shape, but the anthocyanin content in the mutant tobacco were increased in different degrees. The content of anthocyanin in CYS-1 mutant was 1.3-fold, which was significantly higher than that of wild type ($P < 0.05$). These results indicated that CY S gene can inhibit anthocyanin synthesis, which was consistent with the previous transcriptome analysis results. In this study, CRISPR/Cas9 gene editing technology was used to design two target sites for targeted editing of CYS gene. Using tobacco as the transformation receptor provided an important material basis for further study of the function of CYS.

keyword Tobacco; CYS; CRISPR/Cas9; Gene editing; Mutant

1 引言

黑果枸杞 (*Lycium ruthenicum* Murray) 为茄科 (Solanaceae) 枸杞属 (*Lycium* L.) 多年生灌木, 是中国“药食两用”的重要特色资源。黑果枸杞在民族医药、营养食品和荒漠生态系统恢复等方面都具有重要作用 (Wang et al., 2018)。黑果枸杞富含花青素, 其中, 矮牵牛素衍生物含量最高 (Zhang et al., 2019)。黑果枸杞花青素生物合成代谢广受国内外学者关注, 转录因子 MYB、bHLH 和 WD40 通过形成 MBW 复合物调节结构基因的表达来调控花青素的生物合成 (He et al., 2020; Wen et al., 2021)。

本研究前期从黑果枸杞中克隆了与花青素合成代谢相关的 R2R3-MYB 转录因子基因 LrA N2, 并对 LrA N2 基因进行了功能验证, LrA N2 过表达烟草呈现紫色表型, 花青素含量显著升高 (Zong et al., 2019b)。将 LrAN2 紫色转基因烟草与野生型烟草 ‘Samsun’ 进行了转录组分析 (Zong et al., 2019a), 结果表明, 半胱氨酸转移酶 (CY S) 在紫色烟草中表达量下调最显著。课题组对烟草 CY S 基因进行克隆, 并进行生物信息学分析, 为 CY S 基因的功能研究提供参考依据 (罗香怡等, 2021)。目前, 烟草中 CY S 基因的生物功能尚未深入研究, 仍需进一步补充和完善。

半胱氨酸蛋白酶对调控植物的生长发育有重要的作用, 其主要参与了植物种子贮藏蛋白的降解, 根、茎、叶等组织器官的衰老、死亡等过程 (莫黎杰等, 2021), 并参与植物对各种胁迫的反应, 如干旱、病原体感染等 (罗香怡等, 2021)。McLellan 等 (2009) 发现半胱氨酸蛋白酶的表达在拟南芥叶片衰老过程中显著增加, 同时, 有助于拟南芥的发育和抗病。NtCP1 与其他衰老相关的半胱氨酸蛋白酶具有高度的相似性, 是 AtSAG12 的同源蛋白, 只在衰老的叶片中表达, 可以作为烟叶衰老的特异性分子标记基因 (Beyene et al., 2006)。除拟南芥和烟草等模式植物外, 在其他植物中, 也发现了参与调控叶片衰老的半胱氨酸蛋白酶, 如辣椒 CaCp (Xiao et al., 2014)、水稻 OsSAG39

(Liu et al., 2010)、甘蓝 SAG12 (Ahlawat and Liu, 2021) 等。

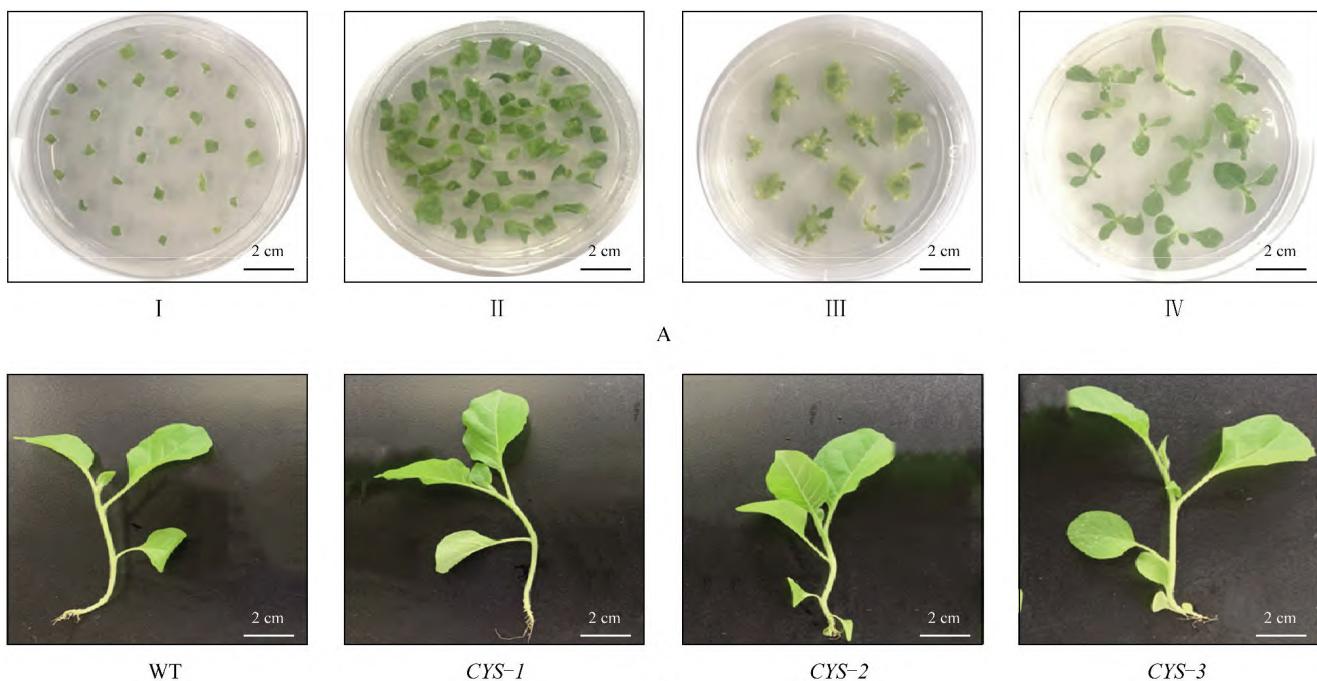
CRISPR/Cas9 系统是细菌和古细菌适应性免疫的防御系统, 保护其免受病毒等的侵入 (Bortesi and Fischer, 2015), 由成簇的规律间隔短回文序列组成 (Jinek et al., 2012)。因其具有低成本、高效率和多基因编辑等优势, 因而被广泛应用于各种作物中。烟草是一种传统的模式植物和重要的经济作物, CRISPR-Cas9 基因编辑技术在烟草基因组的定向编辑研究中也得到了广泛的应用。冯吉等 (2021) 利用 CRISPR/Cas9 基因组编辑技术定向敲除了烤烟 ‘K326’ 中控制烟碱合成和转运的 5 个基因, CRISPR/Cas9 技术能够高效定向敲除烟碱关键基因, 获得低烟碱烟草。张思琦等 (2020) 利用 CRISPR/Cas9 技术定向编辑了高香气烤烟品种 8306 中的 CPS2 基因, 获得 CPS2 突变体。此外, CRISPR/Cas9 技术在烟草中还通过定向编辑核基因 atp2 (赵重燕等, 2020)、5-磷酸脱氧木糖糖还原异构酶 NtDXR (谢小东等, 2019)、NtPDS 和 Nt-PDR6 (Gao et al., 2015) 等多个基因进行有效突变, 为 CRISPR/Cas9 技术在烟草中的功能研究的应用奠定了基础。

本研究利用 CRISPR/Cas9 基因编辑技术, 对课题组前期克隆得到的半胱氨酸转移酶 (CY S) 基因, 设计 2 个靶位点进行定点编辑, 以烟草为转化受体, 获得了烟草 CY S 突变体, 为 CY S 基因在烟草中的功能探究和培育烟草新品种提供参考依据。

2 结果与讨论

2.1 NtCYS 的基因编辑载体的构建及转化

以华南农业大学刘耀光课题组提供的 pYL-CRISPR/Cas9-MH 基因编辑载体为框架, 将设计的 NtCYS 基因编辑靶点序列克隆到 sgRNA 上游, 编辑载体质粒转化大肠杆菌 DH5 α 感受态细胞, 挑取单克隆进行菌落 PCR, 条带大小约为 500 bp, 符合预期大小, 选择阳性单克隆送生工测序, 获得 NtCYS 的基因编辑载体 p35S-H-CY S, 将该载体质粒转化至农杆菌 LBA4404, 菌落 PCR 鉴定阳性单克隆, 摆菌后侵染烟草。



2.2 NtCYS 基因编辑载体转化的编辑效果验证及突变体检测

利用根癌农杆菌介导法侵染烟草，共培养基暗培养 2 d (图 1A-I)，转入分化培养基培养 7 d (图 1A-II)，潮霉素抗性分化培养基培养 14 d (图 1A-III)，切幼苗转入生根培养基直至生根(图 1A-IV)，生根后炼苗、移栽。以突变体株系 gDNA 为模板，使用引物 CY S-F、CY S-R 扩增 CYS 基因，共得到 3 株阳性苗，命名为 CYS-1、CY S-2、CY S-3，3 株阳性苗与野生型烟草相对比，株高、叶形等表型上未见明显差异 (图 1B)。

为验证 CY S 是否被成功编辑，对突变体基因序列进行扩增并进行测序分析。碱基序列对比结果显示 (图 2)，CYS-1、CYS-2、CYS-3 的两个靶点处均发生编辑，CY S-1 在靶点 1 处

插入 1 个单碱基 G，在靶点 2 处发生 2 个碱基替换 (G 替换为 C, A 替换为 G)，CY S-2、CY S-3 在靶点 1、靶点 2 处均发生了碱基替换 (G 替换为 A, G 替换为 C, A 替换为 G)。氨基酸序列对比结果显示 (图 3)，CYS-1 基因起始密码子 (ATG) 后 33 和 34 个碱基之间插入 “G”，碱基序列发生移码突变致使该蛋白在 71 个氨基酸处翻译提前终止。CY S-2、CY S-3 在靶点 1 处，因发生碱基替换 (G 替换 8146Molecular Plant Breeding 为 A)，致使氨基酸由 V(缬氨酸) 变为 I(异亮氨酸)，在靶点 2 处，2 个碱基替换均为同义突变，此外，CYS-2 与 CYS-3 在 275bp 处有碱基突变，CYS-2 编码 C (半胱氨酸)，CY S-3 编码 S (丝氨酸)，氨基酸差异可能会导致基因功能差异。

2.3 花青素含量测定

| | | |
|----------|---|-----|
| CYS | -CCT-GTTGGTGTCCTCCCC- | |
| CYS-1 | ATGAGTTACTACAATCAACAAACACCCCT-GTTGGTGTCCTCCCCGCAAGGATATCCACCGGAAGGTTACCCCTAAGGCATACCCACCACGGGG | 100 |
| CYS-2 | ATGAGTTACTACAATCAACAAACACCCCT-GTTGGTGTCCTCCCCGCAAGGATATCCACCGGAAGGCTACCCAAAGGACGCATACCCACCACGGGG | 100 |
| CYS-3 | ATGAGTTACTACAATCAACAAACACCCCT-GTTGGTGTCCTCCCCGCAAGGATATCCACCGGAAGGCTACCCAAAGGACGCATACCCACCACGGGG | 100 |
| 靶点 1 | | |
| Target 1 | | |
| CYS | TACCCACAAACAGGGTTACCCACCACAGGGGTACCCCTAACAAAGGTTACCCCTCAAGGGTACCCCTCCCCAGTATGGTGCTCCACCCCTCAACAAACAAAC | 200 |
| CYS-1 | TACCCACAAACAGGGGTACCCACCACAGGGGTACCCCTAACAAAGGTTACCCCTCAAGGGTACCCCTCCCCAAATATGGTGCTCCACCCCTCAACAAACAAAC | 200 |
| CYS-2 | TACCCACAAACAGGGGTACCCACCACAGGGGTACCCCTAACAAAGGTTACCCCTCAAGGGTACCCCTCCCCAAATATGGTGCTCCACCCCTCAACAAACAAAC | 200 |
| CYS-3 | TACCCACAAACAGGGGTACCCACCACAGGGGTACCCCTAACAAAGGTTACCCCTCAAGGGTACCCCTCCCCAAATATGGTGCTCCACCCCTCAACAAACAAAC | 200 |
| CYS | AGCAACAACTGGTAGCACTGGCTTCATGGAAGGATGTTGGCTGCACITGCTGTTGCTGCTCTAGATGCATGCTTCTGA | 283 |
| CYS-1 | AGCAACAACTGGTAGCTGGCTTATGGAAGGATGTTGGCTGCACITGCTGTTGCTGCTCTAGATGCATGCTTCTGA | 283 |
| CYS-2 | AGCAACAACTGGTAGCTGGCTTATGGAAGGATGTTGGCTGCACITGCTGTTGCTGCTCTAGATGCATGCTTCTGA | 283 |
| CYS-3 | AGCAACAACTGGTAGCTGGCTTATGGAAGGATGTTGGCTGCACITGCTGTTGCTGCTCTAGATGCATGCTTCTGA | 283 |
| 靶点 2 | | |
| Target 2 | | |

Figure 2 Base sequence analysis

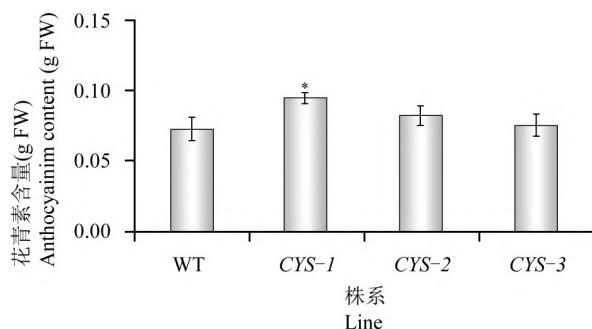
| | | |
|-------|--|----|
| CYS | MSYYNQQQPFIGVPPPQGYPPGYPKDAYPPPGYPQQGYPQQGYP | 50 |
| CYS-1 | MSYYNQQQPFIGCSPARISTGRLPKGRIPTTGVPTTGVPSTRLE | 50 |
| CYS-2 | MSYYNQQQPFIGVPPPQGYPPGYPKDAYPPPGYPQQGYPQQGYP | 50 |
| CYS-3 | MSYYNQQQPFIGVPPPQGYPPGYPKDAYPPPGYPQQGYPQQGYP | 50 |
| CYS | PQ--GYPQQQGYGAPPQQQQQQSGSTGFMEGCLAALCCCCLDA | 94 |
| CYS-1 | SSRVPSPPIWCSTPSTTTATIW----- | 75 |
| CYS-2 | PQ--GYPQQQGYGAPPQQQQQQSGSTGFMEGCLAALCCCCLDA | 94 |
| CYS-3 | PQ--GYPQQQGYGAPPQQQQQQSGSTGFMEGCLAALCCCCLDA | 94 |

为验证 CY S 基因与花青素生物合成是否有关, 对野生型 (WT) 与突变体 (CYS-1, CYS-2, CYS-3) 烟草中的花青素含量进行了测定。结果显示, CY S-1、CY S-2 和 CY S-3 突变体株系中花青素含量均高于野生型烟草, 其中, CY S-1 花青素含量显著高于野生型 ($P<0.05$), 是野生型烟草花青素含量的 1.3 倍 (图 4)。

2.4 RT-qPCR

根据实验室前期克隆得到的 CY S 基因序列, 以 NtA ctin 为内参基因, 对野生型 (WT) 和突变体 (CY S-1, CY S-2 和 CY S-3) 烟草中 CY S 基因的相对表达量进行 RT-qPCR 检测。), 以野生型烟草为对照, CY S-1、CY S-2 和 CY S-3 突变体株系中 CY S 基因转录水平倍数分别为 0.31、0.45 和 0.34, 均显著低于野生型 (WT) ($P<0.01$)。

1.5 二级结构及其蛋白质跨膜分析将 CYS 原序列及其编辑基因 CYS-1、CYS-2 和 CYS-3 氨基酸序列导入 SOPMA 在线软件进行二级结构分析, CYS-1、CYS-2 和 CYS-3 二级结构的主要结构形式与 CYS 有较大差异, 其中, CYS-1 因移码突变导致氨基酸翻译提前终止, 致使其二级结构发生较大改变, 其主要结构形式为无规卷曲 (87.32%) 和延伸链 (12.68%)。而 CYS-2 与 CYS-3 的氨基酸突变未改变其二级结构, 主要结构形式为 α -螺旋 (20.43%)、无规卷曲 (68.82%)、延伸链 (4.3%) 以及 β -转角 (6.45%)。使用 TMHMM-2.0 在线软件分析 CYS、CYS-1、CYS-2 和 CYS-3 蛋白的跨膜区, 结果显示, 所有蛋白质的跨膜螺旋数量 (Number of predicted TMHs) 均为 0, 初步预测, 这 4 种蛋白质均在膜外进行作用, 不具有跨膜区。



3 讨论

根据 L rA N2 过表达紫色烟草与野生型烟草转录组结果中差异基因的表达, 以此了解 LrAN2 过表达烟草与野生型烟草差异基因的表达情况。以野生型烟草为参照, 在 39 个下调基因中, CL16576.Contig3_All 基因下调最为显著, log2FoldChange 为 6.02。利用 NCBI, 对 CL16576.Contig3_All 进行同源比对, CL16-576.Contig3_All (CYS) 基因为半胱氨酸蛋白酶同源序列。LrA N2 过表达紫色烟草中参与花青素合成相关的结构基因均被激活, 均为上调表达, 而 CY S 下调最显著, 因此, 本研究采用 CRISPR/Cas9 基因编辑技术, 对 CY S 基因进行基因编辑, 以此判断 CY S 基因是 Molecular Plant Breeding 否对烟草的生长发育和花青素的合成有影响。近年来, CRISPR/Cas9 基因编辑技术发展迅速 (2021), 实验所用 TA 克隆载体购自北京全式金生物可更快速、高效、精准地对目的基因进行敲除。为了技术有限公司; 大肠杆菌感受态细胞 DH5a 和农杆菌 3.2 sgRNA 设计及载体构建简单快速鉴定 CRISPR/Cas9 编辑体的基因型, 大多数学者选择双靶点编辑 1 个基因, 当 1 个 DNA 序列上有 2 个位置发生双链断裂后, 中间的片段可能发生丢失 (Brooks et al., 2014; Srivastava et al., 2017; 张扬等, 2020)。双靶点敲除单个基因是一种易于检测且高效的基因编辑方法 (张扬等, 2020)。Watanabe 等 (2017) 利用 CRISPR/Cas9 基因编辑技术对双氢黄酮醇 -4- 还原酶 -B (DFR-B) 进行靶点编辑, 以牵牛花作为受体, 结果发现 75% 的牵牛花开白花, 花青素含量下降。CRISPR/Cas9 介导的敲除 NtMY B4a 下调了 NtPA L、NtC4H、Nt4CL、NtCHS、NtCHI、NtF3H 等结构基因的表达, 降低了烟草花青素含量, 烟草花瓣颜色变淡 (Luo et al., 2020)。因此, 本研究利用 CRISPR/Cas9 基因编辑技术完成了对 CY S 基因敲除, 看其是否会对烟草植株的生长和花青素的生物合成造成影响。结果表明, 本研究共获得 3 个突变体, 这 3 个突变体株系均实现了基因编辑, 第一个靶点的突变频率为 100%, 突变类型涉及碱基插入、碱基替换等, 而 CYS-1 突变体在起始密码子 (ATG) 后 33 和 34 个碱基之间插入 “G”, 碱基序列发生移码突变致使该蛋白在 71 个氨基酸处翻译提前终止。而 CY S-2、CY S-3 在靶点 1 与靶点 2 处均发生了碱基替换, 致使存在 2 个氨基酸差异。RT-qPCR 结果表明, CYS-1、CYS-2、CY S-3 突变体株系中 CY S 基因相对表达量均显著低于野生型 (WT), 这与 CRISPR/Cas9 成功敲除 CYS 基因结果相一致。综上所述, 通过设计两个靶位点, 可以实现对 1 个基因的高效敲除。同时, CY S 基因编辑后, 突变体与野生型烟草相对比, 株高、叶形等表型

上未发现明显变化, 而突变体烟草中花青素含量较野生型烟草均有所提高, 尤其是 CYS-1 突变体烟草中, 的方式, 将第二轮 PCR 胶回收产物克隆到终载体

花青素含量显著高于野生型 ($P<0.05$), 结合 LrA N2 过表达紫色烟草和野生型烟草差异基因表达情况, 初步推断, CY S

基因有可能会抑制烟草中花青素的合成代

CRISPR/Cas9 表达载体的构建：采用边切边连 35S-H，反应体系：第二轮 PCR 胶回收产物 1.5 μL。本研究的顺利开展验证了 CY S 基因对烟草花青素的生物合成代谢具有一定的抑制作用，这为黑果枸杞 LrA N2 基因的表达调控提供更丰富的理论基础。

4 材料与方法

4.1 试验材料

本研究以‘Samsun’烟草为试验材料，CYS 基因序列由本课题组前期克隆和分离获得（罗香怡等，菌感受态细胞 LBA4404 购自生工生物工程（上海）股份有限公司；BsaI 限制性内切酶、T4 DNA 连接酶、PrimeSTARR Max DNA Polymerase R045A 均购自宝生物（大连）有限公司。载体 pYLCRISPR/Cas9 由华南农业大学刘耀光课题组惠赠。

根据转录组测序数据，结合本研究前期的研究，选定半胱氨酸转移酶基因 CY S，使用在线软件 CRI-SPR-P 2.0 (<http://crispr.hzau.edu.cn/CRISPR2/>) 设计靶点接头引物，本研究中使用的所有引物均由生工生物工程（上海）股份有限公司合成。

接头制备：将每个靶点的正反向接头引物稀释至 10 μmol/L，反应体系为 1 μL 正引物、1 μL 反应物，加 ddH2O 至 10 μL，反应条件是 90 °C 30 s，自然冷却，获得双链结构的靶片段。

gRNA 表达盒制备：采用边切边连的方式，将两个靶点片段连入 Atu3 中间载体上，反应体系 (10 μL)：Atu3 1 μL (20 ng)，退火后的接头引物 1 μL，T4 DNA 连接酶 0.3 μL，T4 DNA 连接酶 Buffer 0.3 μL，BsaI 限制性内切酶 0.3 μL，BsaI 限制性内切酶 Buffer 1 μL，ddH2O 补至 10 μL，反应程序：37 °C 5 min，20 °C 5 min，进行 5 个循环。选取边连产物 (1 μL) 作为后续扩增模板，第一轮 PCR 扩增选择上游引物 (U-F) 和下游引物 (gRNA-R) 作为 PCR 引物。将第一轮 PCR 产物稀释 10 倍，用通用引物 B'、BL 及 B2'、BL 进行第 2 轮 PCR 扩增，1% 琼脂糖凝胶电泳 (150 V, 30 min) 检测 PCR 产物，切胶并进行回收。

载体 35S-H 质粒 0.5 μL，BsaI 限制性内切酶 0.5 μL，BsaI 限制性内切酶 Buffer 1.5 μL，ddH2O 补至 14.5 μL，37 °C 酶切 10 min 后，再加 T4 DNA 连接酶 0.5 μL，T4 DNA 连接酶 Buffer 0.8 μL，反应条件为 37 °C 2 min，10 °C 3 min，20 °C 5 min，共 15 个循环。

转化大肠杆菌：将连接产物通过热激法转化至大肠杆菌感受态细胞 DH5a，在 LB 固体抗性培养基 (100 mg/L 卡那霉素) 上涂板，37 °C 培养 12~18 h，挑取单克隆，使用 CY S-bF、CY S-dR 引物进行菌落 PCR 鉴定，阳性单克隆送至生工生物工程（上海）股份有限公司测序，测序正确的单克隆于 37 °C，200 r/min 条件下摇菌 12~18 h，使用天根 TIANprep Mini Plasmid Kit 质粒小提试剂盒（离心柱型，#DP103-02）提质粒，备用。

4.2 利用根癌农杆菌介导法侵染烟草

将重组表达质粒 p35S-H-CY S，采用冻融法导入根癌农杆菌感受态细胞 LBA4404，在含有抗性 (100 mg/L 卡那霉素，100 mg/L 利福平) 的 LB 固体培养基上于 28 °C 培养 48 h 后挑取单克隆，利用引物 CYS-F、CYS-R 进行菌落 PCR 鉴定，挑取阳性单克隆在含有上述抗生素的 LB 液体培养基中于 28 °C、200 r/min 条件下摇菌 48 h 左右，OD 值为 0.8 时，采用叶盘法进行烟草遗传转化 (Horsch et al., 1985)，培养基为潮霉素 (10 mg/L) 抗性。采用 DNAsecure Plant Kit 新型植物基因组 DNA 提取试剂盒（离心柱型）提取 T0 代转基因烟草叶片 DNA，利用引物 CY S-F、CY S-R 进行 PCR 扩增筛选植株，确定阳性植株，PCR 反应体系为 50 μL，其中 DNA 模板 2 μL，2×santaq PCR Mix 25 μL，引物各 1 μL，ddH2O 21 μL。PCR 反应程序：94 °C 预变性 5 min；94 °C 变性 30 s，58 °C 退火 30 s，72 °C 延伸 1 min；72 °C 终延伸 10 min，30 个循环。

4.3 烟草 CYS 突变体的检测

利用引物 CYS-F、CYS-R 扩增 CYS 基因序列，PCR 产物胶回收后，连接到 pEasyBlunt 克隆载体，转化大肠杆菌 DH5a，37 °C 培养 12~18 h 后，进行菌落 PCR 鉴定，并送至生工生物工程（上海）股份有限公司进行测序。利用 AlignX 软件对克隆序列及 CY S 参考基因序列进行比对分析，并进行碱基差异统计。

4.4 花青素含量的测定

称取约 0.3 g 野生型、突变体烟草叶片，加入 0.1% HCl 水溶液，避光条件下提取 24 h，在 530、657 nm 处测定提取溶液的吸光度值 (A530, A657)，根据公式 $Q = (A530 - 0.25 \times A657) / M$ (Q 表示花青素含量，M 表示称取烟)。

5 结束语

采用天根 RNAprep Pure 多糖多酚植物总 RNA 提取试剂盒（离心柱型，Cat.#DP441）对野生型烟草 (WT) 和突变体 (CYS-1, CYS-2 和 CYS-3) 的总 RNA 进行提取，浓度测定仪 Nanodrop 用以总 RNA 浓度测定，1.0% 琼脂糖凝胶电泳 (150 V, 30 min) 用以检测总 RNA 的质量。使用 PrimerScriptTM RT Master Mix (Perfect Real Time) (TaKaRa, Code No.RR036A) 将上述提取的总 RNA 反转录为 cDNA，并稀释 100 倍作为模板，选择 NtActin 作为内参基因，CYS-F、CYS-R 作为荧光定量 PCR 引物，以野生型烟草为对照，进行 RT-qPCR 实验。CYS 基因的相对表达量采用 $2^{-\Delta\Delta Ct}$ 法计算 (Jiang et al., 2020)，3 次生物学重复。

致谢本研究由青海省基础研究计划项目(2021-ZJ-955Q)资助。

参考文献：

- Ahlawat Y., and Liu T., 2021, Varied expression of senescence-associated and ethylene-related genes during postharvest storage of Brassica vegetables, *Int. J. Mol. Sci.*, 22(2): 839.
- Beyene G., Foyer C.H., and Kunert K.J., 2006, Two new cysteine proteinases with specific expression patterns in mature and senescent tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) leaves, *J. Exp. Bot.*, 57(6): 1431–1443.
- Bortesi L., and Fischer R., 2015, The CRISPR/Cas9 system for plant genome editing and beyond, *Biotechnol. Adv.*, 33(1): 41–52.
- Brooks C., Nekrasov V., Lippman Z.B., and Van Eck J., 2014, Efficient gene editing in tomato in the first generation using the clustered regularly interspaced short palindromic repeats/CRISPR-associated9 system, *Plant Physiol.*, 166 (3): 1292–1297.
- Feng J., Cheng L., Cai C.C., Sun G.W., Sun J.G., Yang J.P., Li J. P., and Chen Z.G., 2021, CRISPR/Cas9-mediated targeted mutagenesis and functional analysis of nicotine-related genes in *Nicotiana tabacum*, *Zhongguo Yancaoxue (Chinese Tobacco Science)*, 42(2): 84–90. (冯吉, 程玲, 蔡长春, 孙光伟, 孙敬国, 杨锦鹏, 李建平, 陈振国, 2021, 基于CRISPR/Cas9技术的烟草烟碱相关基因敲除及功能研究, 中国烟草科学, 42(2): 84–90.)
- Gao J.P., Wang G.H., Ma S.Y., Xie X.D., Wu X.W., Zhang X.T., Wu Y.Q., Zhao P., and Xia Q.Y., 2015, CRISPR/Cas9-mediated targeted mutagenesis in *Nicotiana tabacum*, *Plant Mol. Biol.*, 87(1–2): 99–110.
- He Q., Wu J.Q., Xue Y.H., Zhao W.B., Li R., and Zhang L.G., 2020, The novel gene BrMYB2, located on chromosome A07, with a short intron 1 controls the purple-head trait of Chinese cabbage (*Brassica rapa* L.), *Hortic. Res.*, 7: 97.
- Horsch R.B., Fry J.E., Hoffmann N.L., Eichholtz D.A., Rogers S.G., and Fraley R.T., 1985, A simple and general method for trans-ferring genes into plants, *Science*, 227(4691): 1229–1231.
- Jiang T., Zhang M.D., Wen C.X., Xie X.L., Tian W., Wen S.Q., Lu R.K., and Liu L.D., 2020, Integrated metabolomic and transcriptomic analysis of the anthocyanin regulatory networks in *Salvia miltiorrhiza* Bge. flowers, *BMC Plant Biol.*, 20: 349.
- Jinek M., Chylinski K., Fonfara I., Hauer M., Doudna J.A., and Charpentier E., 2012, A programmable dual-RNA-guided DNA endonuclease in adaptive bacterial immunity, *Science*, 337(6096): 816–821.
- Liu L., Zhou Y., Szczecina M.W., Li X.H., and Lin Y.J., 2010, Identification and application of a rice senescence-associated promoter, *Plant Physiol.*, 153(3): 1239–1249.
- Luo Q., Liu R.X., Zeng L.G., Wu Y.Y., Jiang Y., Yang Q., and Nie Q., 2020, Isolation and molecular characterization of NtMYB4a, a putative transcription activation factor involved in anthocyanin synthesis in tobacco, *Gene*, 760: 144990.
- Luo X.Y., Gao J.M., Liu M.H., Cao D., Zong Y., Liu B.L., and Wei L., 2021, Bioinformatics analysis of cysteine transmembrane gene CYS in transgenic tobacco, *Fenzi Zhiwu Yuzhong (Molecular Plant Breeding)*, 19(15): 4873–4879. (罗香怡, 高洁铭, 刘明慧, 曹东, 宗渊, 刘宝龙, 魏乐, 2021, 转基因烟草中半胱氨酸跨膜基因 CY S 生物信息学分析, 分子植物育种, 19(15): 4873–4879.)
- McLellan H., Gilroy E.M., Yun B.W., Birch P.R.J., and Loake G. J., 2009, Functional redundancy in the *Arabidopsis* Cathepsin B gene family contributes to basal defence, the hypersensitive response and senescence, *New Phytol.*, 183(2): 408–418.
- Mo L.J., Liu X.T., Li H., and Lu H., 2021, On the function of plant cysteine protease in plant growth and development, *Shengwu Jishu Tongbao (Biotechnology Bulletin)*, 37 (6): 202–212. (莫黎杰, 刘夏瞳, 李慧, 陆海, 2021, 植物半胱氨酸蛋白酶在植物生长发育中的功能研究, 生物技术通报, 37(6): 202–212.)
- Srivastava V., Underwood J.L., and Zhao S., 2017, Dual-targeting by CRISPR/Cas9 for precise excision of transgenes from rice genome, *Plant Cell Tiss. Organ Cult.*, 129(1): 153–160.
- Wang H.Q., Li J.N., Tao W.W., Zhang X., Gao X.J., Yong J.J., Zhao J.J., Zhang L.M., Li Y.Z., and Duan J.A., 2018, *Lycium ruthenicum* studies: molecular biology, phytochemistry and pharmacology, *Food Chem.*, 240: 759–766.
- Watanabe K., Kobayashi A., Endo M., Sage-Ono K., Toki S., and Ono M., 2017, CRISPR/Cas9-mediated mutagenesis of the dihydroflavonol-4-reductase-B (DFR-B) locus in the Japanese morning glory *Ipomoea (Pharbitis) nil*, *Sci. Rep.*, 7(1): 10028.
- Wen C.H., Tsao N.W., Wang S.Y., and Chu F.H., 2021, Color variation in young and senescent leaves of Formosan sweet gum (*Liquidambar formosana*) by the gene regulation of an-thiocyanin biosynthesis, *Physiol. Plant.*, 172(3): 1750–1763.
- Xiao H.J., Yin Y.X., Chai W.G., and Gong Z.H., 2014, Silencing of the CaCP gene delays salt-and osmotic-induced leaf senescence in *Capsicum annuum* L., *Int. J. Mol. Sci.*, 15(5): 8316–8334.
- Xie X.D., Gao J.P., Li Z.F., Zhang J.F., Wei P., Luo Z.P., Wang C., Wu M.Z., Zhai N., and Yang J., 2019, Application of multigene editing system mediated by CRISPR/Cas9 to *Nicotiana tabacum*, *Zhongguo Yancaoxue (Acta Tabacaria Sinica)*, 25(4): 72–80. (谢小东, 高军平, 李泽锋, 张剑锋, 魏攀, 罗朝鹏, 王晨, 武明珠, 翟妞, 杨军, 2019, CRISPR/Cas9介导烟草多基因编辑体系的应用, 中国烟草学报, 25(4): 72–80.)
- Zhang G., Chen S.S., Zhou W., Meng J., Deng K., Zhou H.N., Hu N., and Suo Y.R., 2019, Anthocyanin composition of fruit extracts from *Lycium ruthenicum* and their protective effect for gouty arthritis, *Ind. Crops Prod.*, 129: 414–423.
- Zhang S.Q., He J., He L.X., Xue G., Sun J.T., Li X.H., Duan D. W., and Xu S.X., 2020, CRISPR/Cas9-mediated targeted mutagenesis and function analysis of CPS2 in *Nicotiana tabacum*, *Yancao Keji (Tobacco Science & Technology)*, 53 (5): 17–25. (张思琦, 何佳, 贺凌霄, 薛刚, 孙聚涛, 李晓辉, 段杜薇, 徐世晓, 2020, 基于CRISPR/Cas9技术的烟草CPS2基因敲除及功能分析, 烟草科技, 53(5): 17–25.)
- Zhang Y., Huang W.F., Zhou F., and Lin Y.J., 2020, A simple, fast and efficient method of constructing dual-target CRISPR/Cas9 vector, *Huazhong Nongye Daxue Xuebao (Journal of Huazhong Agricultural University)*, 39(3): 9–18. (张扬, 黄维峰, 周菲, 林拥军, 2020, 1种简单快速高效的双靶点CRISPR/Cas9载体构建方法, 华中农业大学学报, 39(3): 9–18.)
- Zhao C.Y., Bao H.H., Wu Y.R., Du K.H., Li S.C., Yang Z.A., and Yang F., 2020, CRISPR/Cas9 vector construction of atp2 gene and genetic transformation in tobacco, *Fenzi Zhiwu Yuzhong (Molecular Plant Breeding)*, 18(21): 7056–7061. (赵重燕, 暴会金, 仵亚汝, 杜康华, 李顺成, 杨正安, 杨飞, 2020, 烟草atp2基因CRISPR/Cas9载体构建与遗传转化, 分子植物育种, 18(21): 7056–7061.)
- Zong Y., Li S.M., Xi X.Y., Cao D., Wang Z., Wang R., and Liu B.L., 2019a, Comprehensive influences of overexpression of a MYB transcripotor regulating anthocyanin biosynthesis on transcriptome and metabolome of tobacco leaves, *Int. J. Mol. Sci.*, 20(20): 5123.
- Zong Y., Zhu X.B., Liu Z.G., Xi X.Y., Li G.M., Cao D., Wei L., Li J.M., and Liu B.L., 2019b, Functional MYB transcription factor encoding gene AN2 is associated with anthocyanin biosynthesis in *Lycium ruthenicum* Murray, *BMC Plant Biol.*, 19: 169.

基于量子计算的加密方法及抗量子攻击算法的理论研究

张尚哲

黑龙江大学 黑龙江 150080

摘要:本文探讨了量子计算对现代信息安全技术的影响,特别是对传统加密方法的威胁。量子计算的并行处理能力和 Shor 算法使得传统加密方法面临被破解的风险。为应对这一挑战,本文介绍了基于量子计算的新型加密方法,包括量子行走(QW) 和基于量子纠缠的加密方案,以及抗量子攻击的加密算法(PQC)。详细讨论了 NTRUEncrypt 和 Lattice-based 加密算法的计算原理和优缺点,并分析了这些新型加密方法在信息安全中的应用和前景。

关键词:量子计算;量子加密;抗量子攻击算法;信息安全

Theoretical Research on Encryption Methods Based on Quantum Computing and Quantum-Resistant Attack Algorithm

Zhang Shangzhe

Heilongjiang University, Heilongjiang 150080 China

Abstract This paper explores the impact of quantum computing on modern information security technologies, especially the threat to traditional encryption methods. The parallel processing capability of quantum computing and Shor algorithm make traditional encryption methods face the risk of being cracked. To address this challenge, this paper introduces novel cryptographic methods based on quantum computing, including quantum walking (QW) and quantum entanglement based cryptographic schemes, as well as quantum attack-resistant cryptographic algorithms (PQC). The computing principles, advantages and disadvantages of NTRUEncrypt and Lattice-based encryption algorithms are discussed in detail, and the application and prospect of these new encryption methods in information security are analyzed.

keyword quantum computing; Quantum encryption; Anti-quantum attack algorithm; Information security

1 引言

加密技术是现代信息安全的基石,广泛应用于数据传输、存储和通信中。随着计算能力的提升,特别是量子计算的出现,传统加密方法如 RSA 和 AES 面临着前所未有的破解风险。量子计算的并行处理能力和 Shor 算法使得这些传统方法可能在量子计算机面前不堪一击^[1]。因此,探索基于量子计算的新型加密方法成为亟待解决的重要课题。

2 量子计算的基本原理

量子计算利用量子比特 (Qubits) 进行计算。与传统比特不同,量子比特可以同时处于多个状态,这使得量子计算具有强大的并行处理能力。量子计算的两个重要特性——叠加 和纠缠,使其能够解决许多传统计算无法有效处理的问题。量子算法如 Shor 算法和 Grover 算法正是基于这些特性,能够显著提升计算效率,同时也使得量子计算在解决某些特定问题时表现出极

大的优势。

(1) 叠加原理 量子叠加原理是量子力学的核心概念之一。它描述了量子系统可以同时处于多个状态的特性。这与经典物理学中的概念完全不同。在经典物理中，一个系统只能处于一种确定的状态，但在量子力学中，一个量子系统可以同时处于多个状态的叠加态。量子叠加原理允许量子比特处于多个状态的组合，而不仅仅是 0 或 1 的单一状态。这一特性使得量子计算机可以同时处理大量数据，从而提高计算效率。例如，一个 n 个量子比特的系统可以同时表示 2^n 个状态。

(2) 纠缠原理

量子纠缠是指两个或多个量子系统在相互作用后，即使它们相隔很远，依然表现出高度相关的量子态。这种纠缠态无法用经典物理学来解释。量子纠缠揭示了两个或多个量子比特之间存在的一种特殊关联，使得其中一个量子比特的状态变化会立即影响到其他纠缠量子比特的状态，无论它们之间的距离有多远。这一特性被用来设计高效的量子通信和计算协议，是量子加密技术的重要基础。

3 基于量子计算的加密方法

量子计算基于量子位的叠加态和纠缠态，能够在并行计算和非线性问题上表现出强大的计算能力。加密方法利用这些特性，可以执行在经典计算机上无法实现的复杂计算。在加密计算方面，量子计算可以在不泄露任何信息的情况下，对加密的量子数据执行任意的量子计算。在图像加密方面，量子计算可以利用量子行走 (Quantum Walks) 的非线性混沌特性进行图像加密，比传统方法具有更高的安全性^[2]。在密钥分发方面，量子加密结合了量子算法和传统的对称加密算法，这种优势使其可以实现更高效的密钥分发和管理。

4 基于量子纠缠的加密方法

量子纠缠态可以用于实现更加复杂的加密方案。通过量子纠缠，双方可以共享一个纠缠态对，当一方对其量子比特进行测量时，另一方的量子比特状态也会相应确定。这种特性可以用于设计高效的量子加密通信协议，确保通信过程的安全性和隐私性。在此方面，主要使用 Ekert(E91) 协议。Ekert 协议由 Artur Ekert 在 1991 年提出，利用量子纠缠和贝尔不等式来保证密钥分发的安全性。协议中，Alice 和 Bob 共享一对纠缠态光子，分别对其进行测量。由于纠缠态的特性，测量结果之间存在关联，这种关联被用于生成共享密钥。窃听者的干预会破坏纠缠态的关联，从而被检测到^[3]。

5 抗量子攻击的加密算法

为了应对量子计算的威胁，研究者们提出了多种抗量子攻击的加密算法 (PQC)。这些算法主要基于数学问题，如

格问题和多变量多项式问题，目前尚未被量子算法有效破解^[4]。NTRUEncrypt 和 Lattice-based 加密方法是其中较为典型的例子，这些方法利用复杂的数学结构提供高安全性，并且在传统计算机上仍然保持较高的计算效率^{[5][6]}。

5.1 NTRUEncrypt

NTRUEncrypt 是一种基于格理论的公钥加密算法，其安全性依赖于在格上找到短向量的困难性。NTRUEncrypt 具有计算效率高、密钥生成速度快等优点，且目前尚无有效的量子算法能够破解这一问题。

NTRUEncrypt 算法依赖于多项式环和卷积的概念。其核心是对多项式进行模多项式的运算，这种结构可以有效地提供安全性和效率。

多项式环 :NTRUEncrypt 使用一个多项式环 R，其中的多项式系数取模一个整数 q。

卷积积 : 多项式的卷积用于加密和解密过程。这种运算提供了一种混淆机制，使得破解密文变得极为困难。

NTRUEncrypt 加密算法的具体流程如下：

(1) 密钥生成
选择两个小多项式 f 和 g，其中 f 应具有逆元 fp 和 fq；计算 $fp * f \equiv 1 \pmod{p}$ 和 $fq * f \equiv 1 \pmod{q}$ ；

计算公钥 $h = fq * g \pmod{q}$ ；

公钥为 h，私钥为 (f, fp)；

(2) 加密算法

选择一个随机的小多项式 r 作为随机化因子；明文消息 m 编码为一个多项式；

计算密文 $e = r * h + m \pmod{q}$ ；

(3) 解密算法

计算 $a = f * e \pmod{q}$ ；

将 a 的系数限制在 $[-q/2, q/2]$ 范围内，得到 a' ；计算明文 $m = fp * a' \pmod{p}$ ；下面将通过使用一个简单的参数集来更详细地阐述

LWE 加密算法：

第一步：选择参数 $N = 5$, $q = 32$, $p = 3$ ；第二步：选择多项式 $f = 1+x+x^2-x^3$, $g = 1-x-x^2+x^4$ ；

第三步：计算公钥 $h = fq * g \pmod{q}$ ；

第四步：选择随机多项式 $r = 1-x+x^2$ ；第五步：编码消息 $m = 1+x$ ；

第六步：加密得到 $e = r * h + m \pmod{q}$ ；第七步：计算 $a = f * e \pmod{q}$ ，然后解密得到 $m = fp * a \pmod{p}$ ；

5.2 Lattice-based

加密算法 基于格理论的加密算法利用格问题的复杂性来提供安全性。常见的格问题包括短整数解问题 (SIS) 和学习带误差问题 (LWE)。这些问题在量子计算机上仍然难以解决，因此被认为是抗量子攻击的有效方法。

LWE 加密算法的具体流程如下：

(1) 密钥生成

选择一个随机矩阵 $A \in \mathbb{Z}_n \times m$; q 选择一个随机向量 $s \in \mathbb{Z}^n$ 作为私钥; q 计算公钥 $b = As + emodq$, 其中 e 是一个小误差向量;

(2) 加密算法

第一步: 选择参数 $q = 257$, $n = 4$, $m = 6$;

第二步: 选择随机矩阵 $A = \begin{pmatrix} 3 & 4 & 1 & 5 & 6 & 2 \\ 1 & 3 & 5 & 7 & 2 & 4 \\ 6 & 5 & 4 & 3 & 2 & 1 \\ 7 & 2 & 5 & 4 & 1 & 3 \end{pmatrix}$;

第三步: 选择私钥向量 $s = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{pmatrix}$;

第四步: 计算公钥 $b = A^T s + e \bmod q$, 其中 e 是小误差向量;

第五步: 选择随机向量 $r = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 1 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{pmatrix}$;

第六步: 编码消息 $m = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$;

第七步: 加密得到 $c = Ar + m \bmod q$;

第八步: 计算 $m' = c - br \bmod q$, 然后取模 p 得到明文;

6 量子加密算法的比较与分析

6.1 NTRUEncrypt 加密算法的优缺点

NTRUEncrypt 基于格理论的复杂性, 具有抵抗量子计算攻击的能力。相比传统的公钥加密算法, 如 RSA 和 ECC, NTRUEncrypt 在加解密速度方面表现出色, 尤其在嵌入式系统和移动设备上更为高效。这主要归功于其独特的数学结构, 能够在相对较低的计算资源消耗下完成复杂的加解密操作。

NTRUEncrypt 对量子计算攻击具有显著的抗性。传统加密算法在量子计算机面前可能变得脆弱, 但 NTRUEncrypt 由于其基于格的结构, 在理论上能够抵御量子计算机的 Shor 算法攻击。这使得 NTRUEncrypt 成为未来抗量子加密的有力候选者之一。此外, NTRUEncrypt 的密钥大小相对较小, 在资源受限的环境中(如智能卡和物联网设备等)非常实用, 这进一步提升了其应用价值^[7]。

然而, NTRUEncrypt 也存在一些缺点。其数学基础较为复杂, 理解和实现起来可能比其他加密算法更具挑战性。这种复杂性可能导致在实际应用中出现错误, 从而影响系统的安全性。此外, NTRUEncrypt 曾经受到专利保护, 这限制了其在某些应用中的自由使用。尽管一些专利已经过期, 但历史上的专利问题仍可能影响一些开发者的选择。

6.2 Lattice-based 加密算法的优缺点

Lattice-based 加密算法的安全性同样基于格问题的计算复杂性, 能够抵御量子计算攻击。尤其是 LWE 相关算法在实际使用中表现其高效性, 尤其适合在资源受限的环境中使用, 如嵌入式设备和物联网。传统的公钥加密算法, 如 RSA 和 ECC, 依赖于整数分解和离散对数问题, 这些问题可以通过 Shor 算法在量子计算机上有效解决。然而, 格问题如最短向量问题(SVP)和误差学习问题(LWE)被认为在量子计算机上也难以解决, 这使得 lattice-based 加密算法在未来量子计算机出现时仍能保持安全^[8]。

此外, Lattice-based 加密算法具有高度的理论安全性。它们的安全性通常基于最坏情况难度假设, 这意味着破解这些加密算法在最坏情况下是极其困难的。这一特性为这些算法提供了强大的安全保障, 并使其在面对未知攻击时更具鲁棒性。Lattice-based 加密算法具有灵活性和多功能性。它们不仅可以用于传统的加密和签名, 还可以用于更复杂的应用, 如完全同态加密, 这种加密允许在密文上执行计算而无需解密, 从而在云计算和数据隐私保护中具有重要应用前景^[9]。

然而, Lattice-based 加密算法也面临一些挑战。首先是实现复杂性和效率问题。尽管在理论上这些算法具有高效性, 但在实际实现中, 尤其是在硬件和嵌入式系统中, 实现高效且安全的格基加密仍然是一个技术难题。需要仔细优化算法和硬件架构以平衡安全性和性能。此外, Lattice-based 算法的密钥和密文的大小也是一个重要问题。与传统的公钥加密算法相比, Lattice-based 算法往往需要更大的密钥和密文存储空间, 这在资源受限的环境中可能成为一个瓶颈。

6.3 基于量子行走的加密技术的优缺点

基于量子行走的加密技术具有显著的优缺点。在安全性方面, 量子行走加密技术利用量子力学的基本原理, 如测不准原理和不可克隆定理, 使其在对抗潜在攻击方面具有天然优势。研究表明, 量子行走可以生成更难以破解的加密密钥, 从而增强安全性。此外, 传统的加密方法在大型量子计算机面前将不堪一击, 而基于量子行走的加密方法能抵御量子计算机的攻击, 为未来提供安全保障。量子行走还能提高量子密钥分发的效率, 优化密钥生成过程, 使其更加快速且安全。量子行走的非线性特性使其在生成加密密钥和设计加密算法方面非常强大, 有助于构建更复杂和安全的加密协议。

然而, 这种技术在实际应用中也存在一些显著的缺点。首先, 量子行走加密技术的实现复杂度较高, 需要先进的量子计

算硬件和技术支持，这对当前的技术水平提出了很高的要求。此外，要实现量子行走加密，需要高质量的量子通信网络和相关基础设施，这对广泛应用仍具有挑战性。量子行走算法的复杂性可能导致实际计算中的资源消耗大，尤其是在大规模应用中，可能需要大量的计算资源和时间。

6.4 Ekert(E91) 协议的优缺点

E91 协议的一个显著优点是其利用了纠缠态的特性，这意味着 Alice 和 Bob 可以通过测量纠缠态粒子来生成共享的密钥，而不必直接传输密钥本身。这种方法使得窃听者 Eve 无法在不被发现的情况下截获和复制量子态，因为任何对量子态的观察都会不可避免地引入扰动并改变其状态，从而暴露窃听行为。通过测量 Bell 不等式，Alice 和 Bob 可以检测到任何试图窃听的行为，如果 Bell 不等式被破坏，则说明存在窃听者，密钥的安全性得到了保证。

但是，E91 协议的实现也面临一些技术挑战。生成和维持纠缠态在现实中是复杂的，尤其是在存在噪声和衰减的通信信道中。已有研究表明，去极化噪声和广义幅度阻尼是主要的影响因素，去极化噪声比广义幅度阻尼更容易解纠缠，这表明 E91 协议对广义幅度阻尼更为鲁棒。

E91 协议在噪声环境下的安全性分析也非常重要。已有研究表明，在集体旋转噪声环境中，E91 协议可以有效检测到窃听行为，尽管噪声水平接近 0.5 时，窃听者可能获取约 50% 的密钥，但总体上协议仍然保持安全^[10]。除此之外 E91 协议具有自检能力。研究者提出了一种公平采样测试方案，旨在检测使用偏差样本来模拟 Bell 不等式表观违反的窃听企图。该测试是本地和非破坏性的，可以在密钥生成过程中随时由 Alice 或 Bob 单独执行。

7 结束语

量子计算的快速发展对传统加密技术提出了严峻挑战，但也为新型加密方法的发展提供了契机。本文探讨了量子计算对传统加密方法的影响，并分析了几种基于量子计算的新型加密方法。尽管量子加密技术尚处于发展初期，但其无条件安全性和抗量子攻击能力为未来的信息安全提供了新的方向。随着量子计算技术的不断进步，量子加密技术有望在未来数字时代中发挥至关重要的作用。

参考文献：

- [1] 刘安航, 李浩昱, 关佳, 等. 基于量子计算原理的 Shor 算法优越性验证 [J]. 物理实验, 2022, 42(04):7–12.
- [2] 刘升, 张雄, 赵春柳. 基于量子行走的彩色多图像加密 [J]. 中国计量大学学报, 2024, 35(01):129–136+151.
- [3] 张雨欣. 量子密集编码的安全性分析 [D]. 北京邮电大学, 2020.
- [4] 尹安琪, 汪定, 郭渊博, 等. 可证明安全的抗量子高效 口令认证密钥交换协议 [J]. 计算机学报, 2022, 45(11):2321–2336.
- [5] 王焰. 基于 NTRUEncrypt 的安全多方多项式数据计算的研究 [D]. 杭州电子科技大学, 2023.
- [6] WANG X, XU G, YU Y. Lattice-Based Cryptography: A Survey[J]. Chinese Annals of Mathematics, Series B, 2023, 44(06):945–960.
- [7] 贺婧楠, 张振飞. 基于 NTRU 的加密及签名算法研究 [J]. 信息安全学报, 2019, 4(02):29–36.
- [8] S. E M, V. A K, A. S N, et al. Post-Quantum Cryptosystems: Open Problems and Solutions. Lattice-Based Cryptosystems[J]. Journal of Applied and Industrial Mathematics, 2024, 17(4):767–790.
- [9] Li J, Yan M, Peng J, et al. A lattice-based efficient certificateless public key encryption for big data security in clouds[J]. Future Generation Computer Systems, 2024, 158255–266.
- [10] Naik, Peterson, White, et al. Entangled state quantum cryptography:eavesdropping on the ekert protocol[J]. Physical review letters, 2000, 84(20):4733–6.

磁约束可控核聚变装置的磁体系统综述

张家龙^{1, 2}, 宋彭^{1, 2}, 瞿体明^{1, 2*}

1. 清华大学机械工程系, 北京市 海淀区 100084;

2. 清洁高效透平动力装备全国重点实验室(清华大学机械工程系), 北京市 海淀区 100084

摘要:【目的】磁约束可控核聚变方案被视为未来解决全球能源问题的重要途径,作为磁约束聚变装置的核心元件,磁体在产生和维持等离子体稳定状态中起着关键作用。为此,对国内外典型磁约束可控聚变装置的磁体结构和规格进行了综述。【方法】回顾了聚变磁体从铜基到低温超导乃至高温超导的技术演变,系统归纳了各类典型聚变装置的磁体系统结构及其性能参数。同时,探讨了当前磁体研发过程中面临的技术挑战,并对未来发展进行了展望。【结论】磁体技术的进步对于提升聚变装置性能和加速实现聚变能源的商业化至关重要。随着高温超导材料的应用和新型磁体设计的不断优化,聚变能源的实用化正逐步向现实迈进。

关键词:可控核聚变;高温超导材料;新能源;聚变能源;磁约束聚变;托卡马克;聚变磁体;超导体

Review of the Magnet System for Magnetically Confined Controlled Nuclear Fusion Devices

Zhang Jialong^{1, 2}, Song Peng^{1, 2}, Qu Timing^{1, 2*}

1. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China;

2. State Key Laboratory of Clean and Efficient Turbine Power Equipment (Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China

Abstract [Objectives] Magnetic confinement fusion is regarded as a critical solution to future global energy challenges. As the central component of magnetic confinement fusion devices, magnets play a crucial role in generating and sustaining plasma stability. A review of the magnetic system structures and specifications in representative magnetic confinement fusion devices worldwide was provided. [Methods] The technological evolution of fusion magnets was reviewed, from copper-based to low-temperature superconducting, and finally to high-temperature superconducting magnets. The structure and performance parameters of magnetic systems in various typical fusion devices were summarized systematically. Additionally, the technical challenges in magnet development were explored and an outlook on future development trend was offered. [Conclusions] Advances in magnet technology are vital for enhancing the performance of fusion devices and accelerating the commercialization of fusion energy. With the increasing application of high-temperature superconducting materials and continuous optimization of magnet designs, the practical realization of fusion energy is becoming increasingly feasible.

keyword magnetic confinement controlled nuclear; high-temperature superconducting material; new energy; fusion energy resource; magnetic confinement fusion; Tokamak; fusion magnet; superconductor

1 引言

能源是现代文明发展及经济增长的重要基础,其产生、分配和利用已经成为世界政治以及经济结构中不可或缺的重要组成

部分^[1]。当下人类所开采利用的能源当中,超过80%都直接或间接来自不可再生的化石燃料,包括煤、石油、天然气等^[2]。然而这些燃料不仅会在燃烧过程中释放出二氧化碳等影响生态

环境的温室气体，也无法满足未来社会中经济增长对于能源的巨大需求。因此，清洁、经济、可持续的能源来源已经成为现代社会所面临的一大挑战。

为了应对能源短缺与环境问题，许多国家都开启了对新型低碳能源结构的探索与布局。以风能、太阳能为代表的可再生能源以及核裂变能源虽然能够在一定程度上缓解能源危机，但也各自存在相应的缺点，并不能满足未来社会对于可持续低碳能源的长期需求^[3]。而随着近代物理学研究的不断深入，可控核聚变能源作为一种清洁、高效并且原料广泛的新型能源逐渐进入了人们的视野，也被认为是未来有希望彻底解决能源问题的重要途径^[4]。

2 磁约束可控聚变

核聚变又称核融合，其过程可以简单概述为，在极端条件下，原子核克服核间势垒，发生碰撞融合，并伴随大量能量释放的过程^[5]。在实现上其通常可根据粒子约束形式分为磁约束、惯性约束和引力约束3种类型^[2]。其中磁约束聚变方案凭借其稳定性和技术基础成熟等多重优势，成为当下研究最为广泛，以及未来最有可能推进聚变能源商业发电的可控聚变方式。

磁约束方案是一种利用强磁场对其内部带电粒子进行运动约束的聚变形式。在磁场中，带电粒子会在洛伦兹力的作用下被束缚于磁场线上，围绕磁场线做螺旋运动，其中既包含了垂直磁场方向的圆周运动，也包括了沿磁场方向的直线运动^[6]。目前磁约束方案装置类型主要有磁镜、仿星器和托卡马克^[7]。这3种装置分别基于不同的设计理念与方案来实现对带电粒子的运动约束，并在各自领域中取得了不同程度的进展。

2.1 磁镜在弱磁场区域沿磁力线做螺旋运动的带电粒子

子往往会在强磁场区域被反射，这种现象被称为磁镜效应^[6]。磁镜作为一种开放式约束系统，整体形状呈圆柱形，两端通过额外线圈提高磁场强度，以实现粒子反射、限制逃逸的作用^[8-9]，如图1所示。然而，实际中磁镜只能反射垂直速度分量较大的粒子，而沿磁场线方向速度分量较大的粒子则难以被磁镜端部反射，从而逃脱约束，引发终端损失，在粒子约束上并未取得显著成效。但由于磁镜装置具有 β (等离子体压力与磁压力之比)值高，等离子体温度高及构造简单等优势，在过去几十年中，关于磁镜的改进工作仍在推进^[10]。

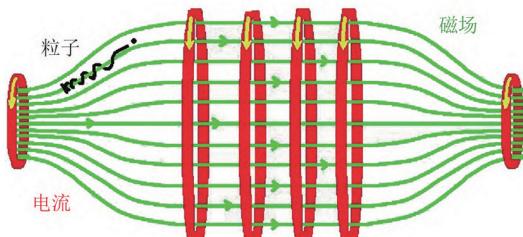


图1 磁镜效应示意图

2.2 仿星器

仿星器最早由Spitzer^[11]于1958年提出，是聚变研究初期最主要的等离子体装置之一。该装置整体呈环状，由一系列线圈环向排列而成，基于完全闭合的环向磁场线来消除因终端损失带来的粒子逃逸问题，并通过外加螺旋绕组产生极向磁场以平衡环向场不均匀性引起的粒子偏移现象^[12]。最终，由极向场(polloidal field, PF)与环向场(toroidal field, TF)叠加形成一个完全包含在环形约束室中的螺旋磁场，实现对其内部带电粒子的运动约束，如图2所示。然而，在实际开发中，仿星器的复杂线圈结构对于加工精度有着极高要求，这也成为了制约其发展的重要因素^[6]。

2.3 托卡马克

托卡马克^[13]是当下研究最为广泛、也是未来最有可能实现可控核聚变的聚变装置。其名称Tokamak由俄语单词“环形、真空室、磁、线圈”的词头组成，由前苏联科学家阿齐莫维齐等人于20世纪50年代提出。与仿星器类似，托卡马克装置同样由一系列环向场线圈周向排列而成，用于生成闭合的环向约束磁场。放电时，由中央螺线管/欧姆加热(central solenoid/ohmic heating, CS/OH)线圈的变化磁通激励等离子体产生环向电流，该环向电流产生的极向磁场分量与环向磁场耦合，形成约束等离子体的磁场构型，并保障磁面闭合态^[6, 14]。此外，其还需要极向场线圈来抵消等离子体电流回路及等离子体压力所引起的膨胀力，并保持等离子体形状与稳定性，相关原理结构。

在磁约束可控核聚变装置中，产生约束磁场的磁体系统扮演着核心角色，其磁场强度与均匀性对于整个装置的性能与效率均有着重要影响。在磁约束可控核聚变的研究过程中，磁体系统的设计和优化是一项复杂而又重要的任务。本文以托卡马克磁约束聚变装置为中心，介绍了聚变磁体系统的发展历程和现状，分析了当前超导磁体在研发中的技术挑战。

3 铜基托卡马克磁体系统

3.1 T-3 托卡马克装置

1968年，前苏联研究团队在新西伯利亚召开的第三届核聚变国际会议上，汇报了基于铜基磁体的T-3托卡马克装置在等离子体温度、密度以及约束时间等方面取得的重要进展，引起了巨大反响，美国、日本以及欧盟在内的众多国家纷纷跟进研究，掀起了世界范围内对于托卡马克装置的研究热潮^{[15][16-20]}。

3.2 美国TFTR装置

托卡马克聚变试验反应堆(Tokamak fusion test reactor, TFTR)项目于1974年由美国原子能委员会批准，获资3.14亿美元，在普林斯顿等离子体物理所(Princeton Plasma Physics Laboratory, PPPL)开启建造，耗时近10年。TFTR于1982年12月首次成功产生等离子体，并于1983年春季创下托卡马克最长等离子体能量约束时间的世界纪录^[21]。

TFTR的磁体系统均采用水冷式无氧铜导体制造，其环向

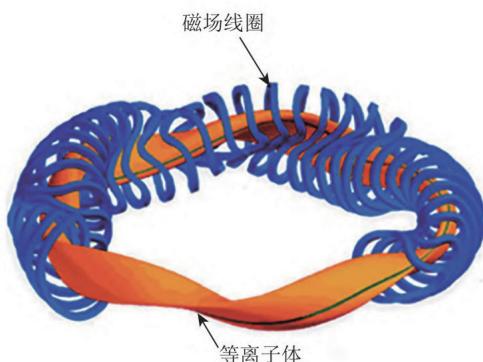


图2 仿星器中线圈配置

场磁体由 20 个圆形线圈周向均匀排列而成, 如图 4 所示。每个线圈内部都包含了超过 457 m 的铜导体, 并绕制总匝数为 44 的双饼线圈, 安装于金属钛壳体之中, 能够承载 73.3 kA 的电流, 并在等离子体中心处产生 5.2 T 的环向磁场^[17]。同时, 其采用壁厚 0.762 mm 的跑道型截面薄壁钢管, 并将其钎焊进导体凹槽内部, 为导体冷却提供了水冷通道, 能够确保导体最高温度限制在 65.56 °C 以内^[22]。

TFTR 极向场磁体由 4 组独立线圈组成, 包含超过 860 匝水冷铜导体, 总重约 80 t。不同线圈各司其职, 欧姆加热 (ohmic heating, OH) 线圈主要用于产生和维持等离子体电流; 平衡场 (equilibrium field, EF) 线圈提供了等离子体维持径向平衡所需的大部分磁场; 水平场 (horizontal field, HF) 线圈将等离子体垂直定位于真空容器内; 可变曲率 (variable curvature, VC) 线圈主要用于控制等离子体截面形状^[23]。各线圈间独立供电、相互配合, 实现了从等离子体电流产生到维持以及控制的全过程。

TFTR 于 1997 年 4 月进行了最后一次运行^[24], 其服役期间完成了近 8 万次等离子体放电, 不仅超额实现了大部分预定科学与技术目标, 还验证了等离子体磁约束方案的有效性, 为后续托卡马的研究提供了技术经验。

3.3 欧洲联合环装置

欧洲联合环 (joint European torus, JET) 是一座建设在英国卡勒姆核聚变中心的磁约束聚变反应堆, 由欧洲多国共同合作完成^[25-26], 形貌如图 5 所示。该项目始建于 1970 年, 并于 1983 年如期运行, 成功产生等离子体。在 1997 年, JET 又利用氘和氚燃料混合物创造了最接近科学盈亏平衡的世界纪录, 产生了 16 MW 的聚变功率, 同时注入了 24 MW 的热能来加热燃料, 能量增益 Q 值达到 0.67^[27]。

JET 装置的环向磁场由 32 个 D 型线圈共同产生, 这些线圈均采用水冷铜导体绕制, 并基于串联方式实现电路间连接^[28]。每个 D 型线圈由 2 个单饼线圈组合而成, 每层包含 12 匝铜导体, 可承载 67 kA 电流, 并在等离子体中心处产生 3.45 T 的环向磁场^[29]。此外, 铜导体上还配置了 2 个沿截面对称放置的

冷却通道, 导体内所有匝都平行于冷却通道, 并与水流方向相同, 确保了高效的导体冷却。线圈外壳则由奥氏体球墨铸铁制成, 并通过了疲劳与断裂力学的严格测试^[20]。

JET 极向场磁体中包含了 4 种类型线圈^[20], 根据功能可简单分为欧姆加热线圈和等离子体形位线圈。欧姆加热线圈由 8 个直径为 2 m 的独立线圈组成, 形成了 1 个 6 m 高的中心螺线管, 能够产生 13 T 的交变磁场, 用于驱动等离子体电流。形位线圈则布置于 TF 磁体结构上, 最大直径可达 14 m, 具备 40 kA 通流能力, 承担着等离子体形状与位置的控制任务^[26]。同环向场线圈类似, 所有极向场线圈均使用水冷铜导体, 并基于环氧树脂浸渍玻璃带和聚酰亚胺带完成绝缘^[20]。

JET 是欧洲最为成功的合资项目之一, 也是通往聚变反应堆的重要一步, 其作为 20 世纪七八十年代中等尺寸托卡马克与国际热核聚变反应堆 (international thermonuclear experimental reactor, ITER) 之间的桥梁, 为 ITER 的科学实验提供了参考和借鉴。

3.4 日本 JT-60 装置

JT-60 (Japan Torus-60) 与欧洲的 JET、美国的 TFTR 齐名, 被誉为世界三大托卡马克, 其主要目的是为了实现等离子体临界条件^[13, 30-31]。JT-60 于 1978 年 4 月开启实际建设工作, 并最终于 1985 年 4 月得以完成, 总共耗资约 2 300 亿日元^[32-33], 形貌如图 6 所示。

JT-60 环向场磁体由 18 个线圈组成, 这些线圈均匀排列在距其中心轴线 3.32 m 处位置, 能够产生约 4.5 T 的环向磁场。单个 TF 线圈由 2 个单饼线圈组成, 每项包含 36 匝水冷导体, 并根据应用场景采用不同规格材料。靠近中心柱的高应力区域采用含银 0.2% 的无氧铜 (oxygen-free copper, OFC), 冷加工率为 40%, 而远离中心柱的低应力区域采用冷加工率为 20% 的 OFC, 二者基于钎焊完成连接并构成导体完整匝, 封装于高锰非磁性钢壳中^[19]。此外, 每匝导体内部都布置有水冷通道, 能够有效地维持导体冷却, 并确保温升一致。

JT-60 的极向场磁体由 5 种不同类型的线圈组成, 均采用与 TF 线圈相同的导体材料, 并各自具备不同功能。每个线圈均由若干串联的绕组单元构成, 每个单元包含数匝导体, 并被包裹在大约 5 mm 厚的绝缘材料中。导体冷却则通过焊接在其周围的槽内水流完成, 实现对其温度的有效控制^[34]。

截至 2018 年, JT-60 仍然保持着聚变三重积分以及等离子体温度最高值的世界纪录^[35], 其推进与实施对未来聚变堆设计提供了不可或缺的科学基础^[13]。目前其已被拆解并改进为世界上最大的超导托卡马克装置 JT-60SA, 由日本和欧盟联合运营, 并开展新一轮的聚变研究^[36]。

3.5 美国 Alcator C-Mod 装置

Alcator C-Mod 是 Alcator 系列的第三座托卡马克装置^[37], 作为一台紧凑型托卡马克, 其曾凭借着极高的环向约束磁场而闻名。Alcator C-Mod 装置的概念于 1985 年被提出,

后经美国能源部批准，由美国麻省理工学院 (Massachusetts Institute of Technology, MIT) 等离子体科学与聚变中心开启建设，并于 1992 年实现首次放电^[38]。

Alcator C-Mod 的环向场线圈总共包含 120 匝矩形导体，被均匀排列成 20 束子单元，所有导体 Alcator 的极向场线圈系统包含 3 个 OH 线圈以及 5 对 PF 平衡线圈，用于提供欧姆驱动、平衡场和等离子体形状控制^[37, 40]。除 EF4 线圈对安装在外部圆柱结构上外，其余平衡 PF 线圈对 (EF1、EF2、EF3 和 EFC) 均安装在 TF 磁体内部的真空容器上，并采用 Nomex 和环氧树脂进行热固化实现绕组间绝缘，基于电成形技术完成端子与线圈间的连接^[18, 41]。欧姆加热线圈由 OH1、OH2L 和 OH2U 三部分组成，均采用硬拉铜条堆叠绕制在 TF 线圈内腿上，OH1 沿其长度方向延伸，而 OH2U 和 OH2L 则分别绕在螺线管上、下部 1/4 处，均可沿其轴向自由移动，并在内外表面处通过液氮预冷，可承载最高 50 kA 电流^[18, 42]。

Alcator C-Mod 服役期间 (1992—2016 年)，总共完成了超过 35 000 次等离子体放电，启动可靠率达到 80%，并保持着磁约束聚变装置体积平均等离子体压力的世界纪录^[38]。

3.6 中国环流器三号装置

作为我国专门从事磁约束聚变以及等离子体

研究的科研机构，核工业 585 所 (现核工业西南物理研究院) 自建立以来，先后研发了 20 多种不同类型的聚变研究装置，其中包括中国环流器一号装置 (HL-1, 1984)、中国环流器新一号装置 (HL-1M, 1995)、中国环流器二号 A 装置 (HL-2A, 2002) 以及中国环流器三号装置 (HL-3, 2020) 等^[43-44]。

HL-3(前称 HL-2M) 装置作为 HL-2A 的改造升级装置^[45-46]，是我国自主研发的新一代先进磁约束核聚变实验研究装置，如图 8 所示。该装置线圈系统均采用铜导体水冷线圈绕制而成，其中，TF 线圈由 20 个具有 D 型轮廓的比特板式结构线圈串联组成^[47]，采用可拆卸结构，能承载最高 191 kA 电流，对应产

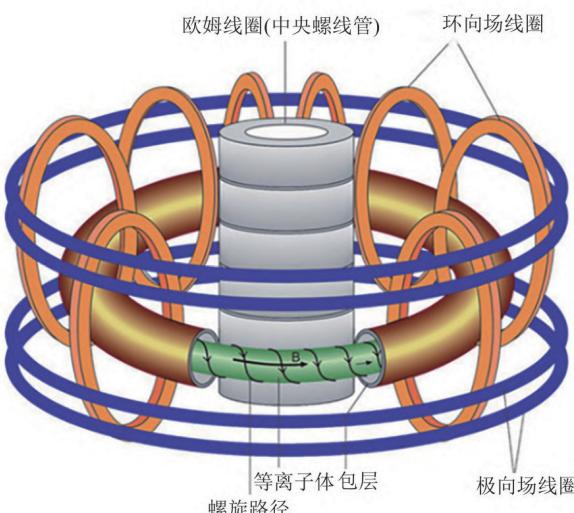


图3 托卡马克装置概念图

生的最大环向场为 3.0 T。每个 TF 线圈内部包含了 7 匝导体，每匝由 L 形中心段导体、上横段导体以及外弧段导体 3 段组成，均由冷轧铜合金板经精密机械加工而成。各匝线圈中的相同部分通过环氧玻璃纤维布粘接为一体，不同分段之间用可拆卸接头进行连接^[16, 48]。冷却上，其采用预埋焊方案，在铜合金板侧面加工出 U 型槽，并将薄壁钢管焊入其中，形成冷却水管道，基于主动流量控制确保 TF 线圈运行温度低于 90 °C^[16, 49]。

HL-3 的极向场线圈系统由 8 个 CS 线圈和 8 对上下对称的 PF 线圈组成，均放置于 TF 线圈与真空室之间^[46]。其中：PF1—PF4 线圈同轴放置，形成一个筒状集成体 (靠近 CS 线圈外侧)；PF5—PF8 线圈位于装置大环外侧，采用多匝盘式绕制结构。各线圈匝数为 26 或 28 匝不等，并布有 2~3 条水冷管道^[16, 50]。CS 线圈由 2 项子线圈组成，每项绕有 48 匝导体。2 组 CS 线圈相互交错嵌套螺旋绕制在 TF 线圈中心柱上，最高可承载 220 kA 电流。CS 线圈和 PF 线圈合计可提供 14Vs 的最大极向磁通变化量^[16]。

HL-3 装置于 2023 年首次实现了等离子体电流为 1 MA 的高约束模式运行，刷新了中国磁约束聚变装置的运行纪录^[51]，并在 2024 年的首轮国际联合试验中首次发现并实现了一种特殊的先进磁场结构，对提升核聚变装置的控制运行能力具有重要意义^[52]。

4 低温超导托卡马克磁体系统

4.1 T-7 托卡马克

1979 年，苏联建造了世界上第一台低温超导托卡马克 T-7 装置^[53]，将超导磁体技术引入聚变领域，为聚变装置的设计和运行提供了重要支持和创新。超导磁体不仅能产生较高的约束磁场，还能在长时间运行下节省大量电力，有效改善长脉冲稳态运行，大大提升聚变能源的转化效率与能源输出，进一步加速全人类对于聚变领域的探索进度。

4.2 国际热核聚变实验堆

国际热核聚变实验堆 (international thermonuclear experimental reactor, ITER) 是一项国际合作项目，最早由美苏首脑提议，并最终于 2006 年正式启动，由包括中、美、俄在内的 7 方成员联合资助与推进，建设成本超过 150 亿欧元^[54]。该项目计划建造一个可自持燃烧的托卡马克聚变实验堆，目标聚变功率达到 500 MW，能量增益突破 10^[55]。ITER 的基础建设开始于 2013 年，原计划于 2025 年完成建设并正式开始等离子体试验^[56]，而根据 ITER 理事会最新版项目时间表，ITER 装置建设将推迟，计划于 2033 年实现全等离子体电流，并在 2034 年开始开展完整研究活动^[57]。

ITER 计划建设全超导磁体系统，预计能够产生 15 MA 等离子体电流及 11.8 T 峰值磁场。TF 线圈与 CS 线圈在高场环境下使用 Nb3Sn 超导体，其余线圈则使用 NbTi 超导体。2 类导体均考虑管内电缆导体 (cable-in-conduit conductors,

CICC) 结构，采用多级缆线缠绕在中央冷却螺旋管周围，并基于 4.5 K 超临界氦实现冷却^[58]。TF 线圈绕组由 7 个双饼线圈组成，每个双饼线圈内部都包含一个 316LN 不锈钢材质的 D 型径向板，板的两侧加工有精细的半圆形槽口以适配导体绕制。导体上通过缠绕多层 Kapton- 玻璃纤维实现表面绝缘，并由焊接到位的盖板将其固定在径向板上^[59]。整体绕组最终采用环氧树脂真空压力浸渍工艺进行绝缘固化，并被放置于 316LN 不锈钢壳体中完成磁体组装^[59]。

ITER 的 PF 线圈通过柔性联板或滑动支架安装于 TF 线圈壳体之上^[58]。每个线圈均基于双饼方案进行绕制，并通过生产不同规格的导体电缆以满足其位置磁场需求^[60]。导体接头均布置在线圈的外侧，能够有效节约空间，并降低交流损耗。其内侧 CS 线圈由 6 个独立绕组模块垂直叠加而成，并通过预载结构悬挂在 TF 线圈的顶部，底部则基于滑动连接结构实现定位。各模块均采用四饼或六饼线圈绕制方案，可独立通电，能够承载 40~45 kA 电流。所有极向场线圈的电气绝缘系统均由多层聚酰亚胺薄膜以及玻璃浸渍环氧树脂组成，该结构能够有效缓解方形导体压缩条件下在角落处产生的应力集中^[59]。

ITER 代表着国际核聚变研究的顶尖合作，它的建设和试验将为人类掌握聚变能源的奥秘、迈向无尽清洁能源的未来奠定坚实的基石。

4.3 中国聚变工程实验堆

中国聚变工程试验反应堆 (China fusion engineering test reactor, CFETR) 是我国自主设计研制并联合国际合作的重大科学工程，旨在验证聚变的可行性，并为未来商业化聚变堆的建设提供基础。其概念设计已于 2014 年完成^[61]，过程设计于 2017—2020 年由 CFETR 设计团队开展^[62]，计划于 2035 年前完成建设，并于 2050 年开展试验。

CFETR 采用全超导磁体设计，所有线圈导体均采用多级电缆模式，内部包含独立中央冷却管道，基于超临界氦强制流方式进行冷却。该装置计划能够产生 13.78 MA 的等离子体电流，并提供 6.5 T 中心磁场^[14]。16 个 TF 线圈均采用 D 型恒张力结构设计，由 6 个弧段和 1 条直线实现近似拟合^[63-64]。其中 TF 线圈绕组根据所处场强大小划分了 3 个区域，并计划采用不同的导体材料，由低场到高场分别采用 NbTi 型、ITER 级 Nb3Sn 以及高性能 Nb3Sn 超导体进行绕制。各场区和线圈间通过内部和外部接头实现串联，绕组整体通流能力预计可达 95.6 kA/匝^[62]。线圈绕组基于在 2008 年 6 月成功产生等离子体。

KSTAR 具备全超导磁体系统，包含 16 个环向场 D 型线圈和 14 个极向场线圈，能够产生 2 MA 的等离子体电流，并在等离子体中心处提供 3.5 T 的约束磁场^[74]。TF 线圈内部绕组由 8 个单饼线圈组成，均采用 Nb3Sn 型 CICC 导体绕制，不含内接头，并基于 4.5 K 超临界强制流氦气实现导体内部冷却^[75]。在导体绝缘上，通过使用多层经真空压力浸渍后的 S- 玻璃布，

对导体及绕组表面进行包覆，为其提供了优质的高压绝缘层。整个绕组最终被放置于 316LN 不锈钢焊接而成的线圈壳体中，并采用环氧材料进行绝缘固化后完成组装。此外，其通过采用盖板型冷却方案，将冷却管钎焊进壳体内表面，进一步保障了线圈整体的结构和热稳定性^[75]。

KSTAR 极向场磁体系统由 4 对 CS 线圈以及 3 对外部 PF 线圈组成，能够产生并维持 2 MA 的等离子体电流长达 20 s^[76]。CS 线圈以及其中 1 对外部 PF 线圈采用 Nb3Sn 型 CICC 导体，剩余 2 对 PF 线圈则使用 NbTi 的型 CICC 导体。所有线圈均基于内部导冷方案，并通过与环向场磁体结构配合实现最终安装与支撑^[77-78]。

KSTAR 作为全球首批全超导托卡马克，在长达十多年的运行过程中对超导托卡马克装置的运行和等离子体物理学的发展做出了重大贡献，在长脉冲高温等离子体约束上屡次突破世界纪录，其试验数据与建设经验也将为 ITER 项目的推进提供强有力的支持^[79]。

5 结论

1) 托卡马克装置自 20 世纪 50 年代提出以来，经历了从铜基磁体到低温超导磁体，再到高温超导磁体的跨越式发展，展现出其在未来能源探索领域的强大潜力和无限可能。磁体技术的不断进步，显著提升了托卡马克装置性能并推进等离子体相关研究进展，促使新一代托卡马克装置向更紧凑、高效和商业化方向发展。

2) 以仿星器装置为代表的其他类型磁约束聚变装置，在高温超导材料以及先进制造工艺的加持下，不断促进技术创新与性能突破。磁体阵列、激光刻蚀、混合原位增减材制造等前沿创新技术方案的提出，为新一代聚变装置的设计和实验提供了更多的解决方案和可能性。

3) 超导磁体技术的引入虽然有效改善了磁约束可控核聚变装置的磁场性能，增强了装置的稳定性和控制精度，但诸如高应力、低温冷却、失超保护等在内的一系列难点问题也给聚变磁体系统的设计、制造和运行带来了挑战。

4) 近年来，各国政府及私营企业正积极开展聚变产业战略布局，展示出聚变能源发展的积极态势与广阔前景，形成了全球范围内积极推动核聚变技术发展与商业化转型的热潮，核聚变能源开发进入新的发展阶段。随着国际合作的深化与关键技术的不断突破，核聚变能源的开发也将逐步从理论研究阶段迈向实际应用阶段。

参考文献

- [1] 杨宇, 于宏源, 鲁刚, 等. 世界能源百年变局与国家能源安全[J]. 自然资源学报, 2020, 35(11):2803–2820.
YANG Y, YU H Y, LU G, et al. Interview on the unprecedented changes of energy geopolitics and national energy security[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(11):2803–2820.

- [2] 王腾.超导磁体技术与磁约束核聚变[J].南方能源建设, 2022, 9(4):108–117.
- WANG T. Superconducting magnet technology and magnetic confinement fusion[J]. Southern Energy Construction, 2022, 9(4):108–117.
- [3] 万宝年.我国磁约束聚变研究进展和展望[J].中国科学基金, 2008, 22(1):1–7.
- WAN B N. Recent progress and perspective of magnetic confined fusion in China[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2008, 22(1):1–7.
- [4] 李倩.典型托卡马克装置环向场线圈电磁模拟分析[D].成都:电子科技大学, 2009.
- LI Q. Electromagnetic simulation analysis of the toroidal field coil in typical Tokamak devices[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009.
- [5] WALKER M L, DE VRIES P, FELICI F, et al. Introduction to Tokamak plasma control[C]//2020 American Control Conference (ACC).Denver, United States:IEEE, 2020:2901–2918.
- [6] 王乃彦.聚变能及其未来[M].北京:清华大学出版社, 2001.
- WANG N Y. Fusion energy and its future[M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2001.
- [7] BARBARINO M.A brief history of nuclear fusion[J]. Nature Physics, 2020, 16(9):890–893.
- [8] ONGENA J, KOCH R, WOLF R, et al. Magnetic–confinement fusion[J].Nature Physics, 2016, 12(5):398–410.
- [9] POST R F. Sixteen lectures on controlled thermonuclear reactions[M]. United States: University of California Radiation Laboratory, 1954.
- [10] HUANG C, LI L.Magnetic confinement fusion:a brief review[J]. Frontiers in Energy, 2018, 12(2):305–313.
- [11] SPITZER L.The stellarator concept[J].The Physics of Fluids, 1958, 1(4):253–264.
- [12] 陈凤翔.一个不可或缺的真相:聚变能源如何拯救地球 [M].北京:科学出版社, 2020.
- CHEN F X.An indispensable truth:how fusion power can save the earth[M]. Beijing:Science Press, 2020.
- [13] 李建刚.托卡马克研究的现状及发展 [J].物理, 2016, 45(2):88–97.
- LI J G.The status and progress of Tokamak research [J].Physics, 2016, 45(2):88–97.
- [14] SHARMA R G. Superconductivity: basics and applications to magnets[M]. Cham:Springer, 2015.
- [15] 张继明.典型托卡马克装置环向场线圈受力—结构分析 [D].成都:电子科技大学, 2009.
- ZHANG J M.Force–structure analysis of the toroidal field coil in typical Tokamak devices[D].Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009.
- [16] 刘晓龙,李广生,邹晖,等.HL–2M 装置环向场线圈的工程研制与调试 [J].核聚变与等离子体物理, 2021, 41(S1):312–315.
- LIU X L, LI G S, ZOU H, et al.Engineering development and commissioning of the toroidal field coils of the HL–2M device[J].Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2021, 41(S1):312–315.
- [17] BELL M G.Magnetic fusion energy[M].Cambridge: Woodhead Publishing, 2016.
- [18] IRBY J, GWINN D, BECK W, et al.Alcator C– mod design, engineering, and disruption research[J]. Fusion Science and Technology, 2007, 51(3): 460–475.
- [19] YOSHIKAWA M.An overview of the JT–60 project[J]. Fusion Engineering and Design, 1987, 5(1):3–8. [20] HUGUET M, DIETZ K, HEMMERICH J, et al. The JET machine: design, construction, and operation of the major systems[J].Fusion technology, 1987, 11(1):43–70.
- [21] NEILSON G. Magnetic fusion energy: from experiments to power plants[M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2016.
- [22] SMITH G E, PUNCHARD W F B. TFTR toroidal field coil design[C]//1977 Symposium on fusion research project.United States.1977.
- [23] PRINCETON UNIVERSITY P P L. Tokamak fusion test reactor[M]. Princeton: Princeton University, Plasma Physics Laboratory, 1983.
- [24] VON HALLE A. Final operations of the Tokamak fusion test reactor (TFTR) [C]//1997 17th IEEE/NPSS Symposium Fusion Engineering (Cat-No–97CH36131). San Diego, CA, USA:IEEE, 1997:65–69.
- [25] GIBSON A. The JET project: a step towards the production of power by nuclear fusion[J]. 第 45 卷 第 6 期 发电技术 1011 Naturwissenschaften, 1979, 66(10):481–488.
- [26] REBUT P H. The joint european torus (jet) [J]. The European Physical Journal H, 2018, 43(4/5):459–497.
- [27] NORDLUND K H.European research roadmap to the realisation of fusion energy[M]. Munich: EUROFUSION, 2018.
- [28] WESSON J. The science of jet[R/OL]. (2014–11–01) [2024–05–23]. <https://scipub.euro-fusion.org/wp-content/uploads/2014/11/JETR99013.pdf>.
- [29] LAST J, BERTOLINI E, HUGUET M, et al. Upgrading the JET magnet system for 7MA plasma[J]. Fusion Technology, 1989, 15(2P2A):267–274.
- [30] KISHIMOTO H, AIKAWA H, OIKAWA A, et al. Construction and testing of JT–60[J]. Fusion Engineering and Design, 1987, 5(1):9–25.
- [31] YOSHIKAWA M, TOMABECHI K. JT–60 project and its present status[J]. Nuclear Technology–Fusion, 1983, 4(2P2):299–307.
- [32] SHIMOMURA Y, SHIMIZU K, HIRAYAMA T, et al. JT–60 program[J]. Journal of Nuclear Materials, 1984, 128:19–25.
- [33] KIKUCHI M.The large Tokamak JT–60:a history of the fight to achieve the Japanese fusion research mission[J].The European Physical Journal H, 2018, 43(4):551–577.
- [34] SHIMIZU M, OHKUBO M, YAMAMOTO M, et al. Design, fabrication and performance test of JT–60: structural and thermal aspects[J]. Nuclear Engineering and DesignFusion, 1986, 3(3):249–264.
- [35] KIKUCHI M, TEAM J. Plasma physics found in JT – 60 Tokamak over the last 20 years[C]//2009 AIP Conference Proceedings. Kuala Lumpur (Malaysia): AIP, 2009:161–167.
- [36] BARABASCHI P, KAMADA Y, SHIRAI H, et al. Progress of the JT–60SA project[J]. Nuclear Fusion, 2019, 59(11):112005.
- [37] FAIRFAX S. Alcator C–MOD[C]//1991 14th IEEE/ NPSS Symposium Fusion Engineering. San Diego, CA, USA:IEEE.1991:656–661.
- [38] MARMAR E. Alcator C–Mod (Final Technical Report) [R]. Cambridge, MA (United States): Massachusetts Inst.of Technology (MIT), 2018.
- [39] BURKE W, KANOJIA A, STILLERMAN J. Real– time high–field measurements of joint resistance in the Alcator C–Mod TF coil[C]//2015 IEEE 26th Symposium on Fusion Engineering (SOFE). Austin, TX, USA: IEEE, 2015:1–5.
- [40] HUTCHINSON I, BOIVIN R, BOMBARDA F, et al. First results from Alcator – C – MOD[J]. Physics of Plasmas, 1994, 1(5):1511–1518.
- BECKER H, BESEN M, CHILDS R, et al. Engineering features of the Alcator C–Mod Tokamak[C]// 1987 Twelfth Symposium on Engineering Problems of Fusion Research. Monterey, CA, USA: IEEE, 1987:11–14.
- FAIRFAX S A, MONTGOMERY D B. Anatomy of the PF magnet failure in Alcator C–MOD[C]//1993 15th IEEE/NPSS Symposium Fusion Engineering. Hyannis, MA, USA:IEEE, 1993:399–403.



Zhongyu International Education Centre (M) Sdn Bhd
B-03A-15, One South Street Mall, Jalan OS, Taman Serdang Perdana,
43300 Seri Kembangan, Selangor Darul Ehsan.
+60 11-3978 7006