



清华大学交叉信息研究院
Tsinghua University Institute for Interdisciplinary Information Sciences



交叉信息研究院

学术科研简报

2018年7月-12月

目录

智能 + & 金融科技

- 03 黄隆波研究组
- 05 曾坚阳研究组
- 08 吴文斐研究组
- 09 张崇洁研究组
- 10 唐平中研究组
- 12 段然研究组
- 13 李建研究组

量子信息

- 16 量子算法
 - 18 量子纠缠
 - 21 量子密码 & 通讯
 - 24 超导量子计算
 - 29 冷原子量子计算
-

智能 + & 金融科技



一、黄隆波研究组

主要完成人：黄隆波、潘玲、房智轩、汪思为

解决共享单车系统的不平衡性的深度强化学习框架

共享单车为出行提供了一种环境友好型的方式，是一种新型环保共享经济，逐渐成为了人们日常生活的一部分。然而，由于用户出行模式的高度相似性，对于共享单车系统，尤其是无桩共享单车系统（如摩拜、小蓝单车）而言，其中一个严重的问题是供需不平衡性，对服务质量和公司利润都产生了重大影响。因此，如何有效解决供需不平衡性成为共享单车运营商亟待解决的问题。

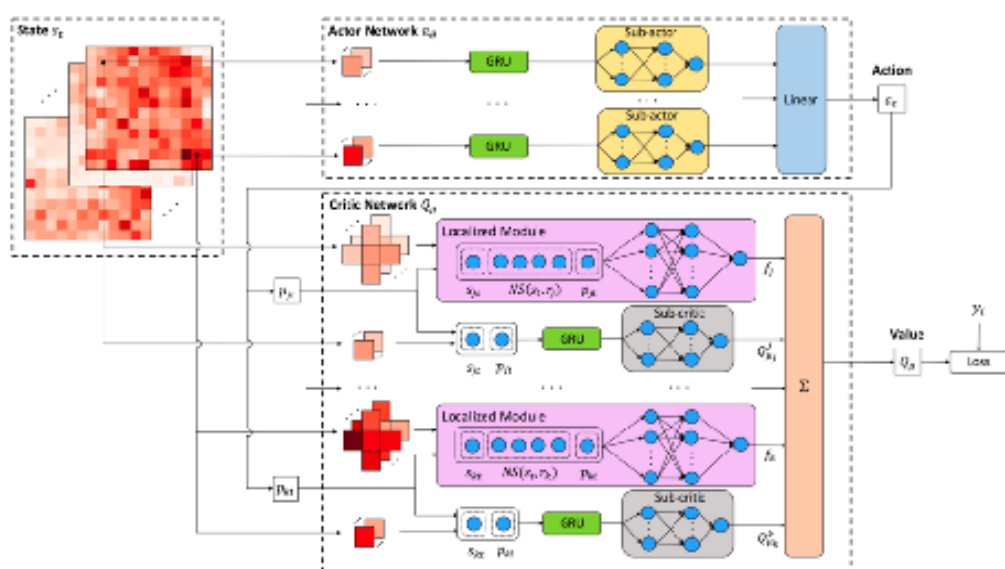
黄隆波研究组提出了一种新的深度强化学习框架，通过向用户发放激励从而重新平衡无桩共享单车系统。该研究组将问题建模成马尔可夫决策过程，考虑了空间和时间特征。基于深度确定性策略梯度的基础上，提出了一种新的深度强化学习算法——

分层强化定价 (Hierarchical Reinforcement Pricing) 算法。

分层强化定价算法通过分治结构来处理复杂的时间特性，并嵌入了局部模块实现对 Q 值的更好估计，从而刻画空间依赖性。

该研究组基于 Mobike 的真实数据集对分层强化定价算法进行性能评估，说明分层强化定价算法在服务质量、车辆分布等的性能表现均优于目前的方法。实验结果也表示分层强化定价算法接近于 24 小时的离线优化，并具有一定的泛化能力，该工作与唐平中研究组合作完成。

该成果研究论文“A Deep Reinforcement Learning Framework for Rebalancing Dockless Bike Sharing Systems” (Ling Pan, Qingpeng Cai, Zhixuan Fang, Pingzhong Tang and Longbo Huang) 发表于 Proceedings of AAAI 2019 上。



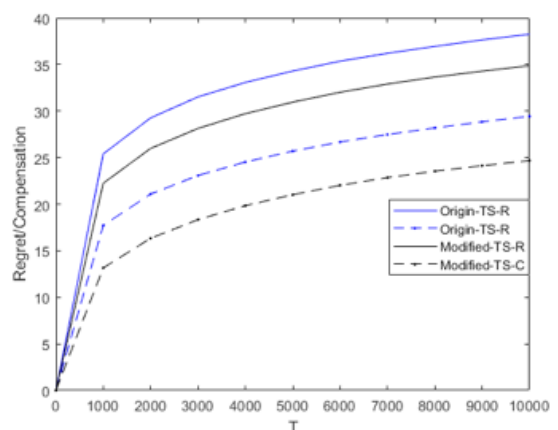
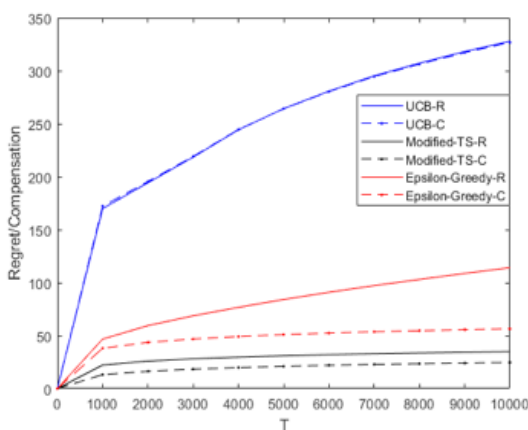
带补偿的多臂赌博机（MAB）模型

多臂赌博机模型近年来被广泛应用于各类互联网应用中，例如在线广告，网上购物，众包（crowd sourcing）等等。因此人们开始越来越关注这个问题，也提出了一系列解决该问题的算法。然而，在实际应用中人们发现，真实情况和模型本身并不相同。因为现实中很多情况是每个用户自己在做决策，而不是由管理者来控制所有人的决定。这也就成为了该模型在实际应用中必须解决的问题。

针对这一点，黄隆波研究组提出了带补偿的多臂赌博机模型。与传统多臂赌博机模型不同的是，在该模型中他们假设每一次做决定的用户都只关心本次决定所带来的收益。在此模型中，如果控制者希望达到整体上的一个最优解，他需要对每个决策者做出

一定量的补偿，从而使得这些决策者按照他的计划行动。他们首先依据模型对现存的一些算法进行了修改，然后进行了对总共损失和补偿的定量分析，发现在这些修改后的算法所需给出的补偿和总体损失大致相同。随后进行的实验分析也证明了这一点。更进一步的，该研究组证明了除非承受整体上极大的损失，否则所需付出的补偿至少需要达到这一水平。该研究结论为多臂赌博机模型在实际的多用户系统中的应用打下了坚实的理论基础。

该成果研究论文“Multi-armed Bandit with Compensation”（Siwei Wang, Longbo Huang）发表于 Proceedings of NeurIPS 2018 上。



二、曾坚阳研究组

主要完成人：曾坚阳、赵诞、贺选、胡海林、万方平、黄维然

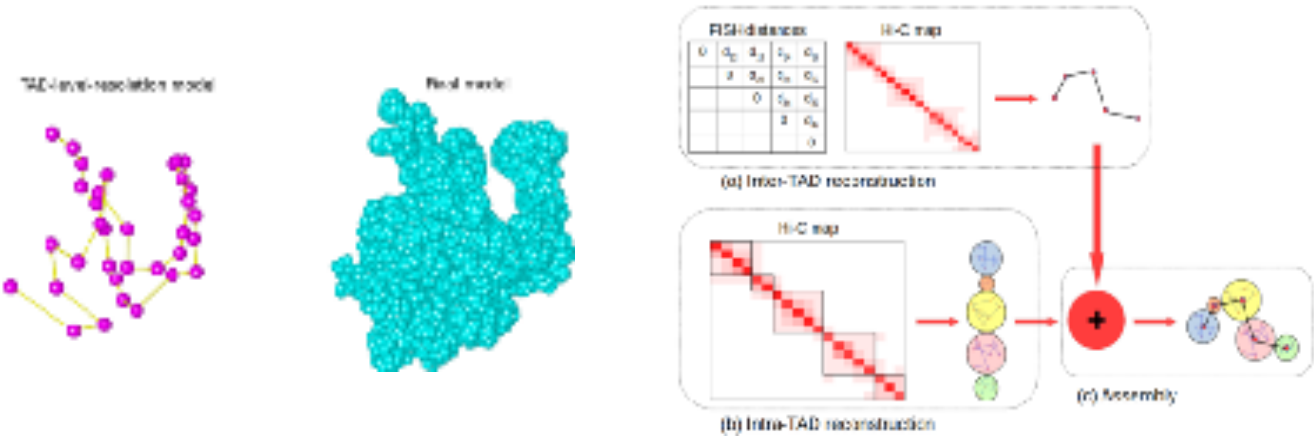
基于 FISH 和 HiC 数据相结合的三维基因组结构重构方法

三维基因组结构是指基因组在细胞核内以特定的三维构象存在的状态，通常反映了染色质内和染色质间的相互作用以及染色质折叠弯曲的情况。三维基因组结构蕴含着非常丰富的信息，与细胞内绝大多数生物过程相关联，异常的三维基因组结构可能导致疾病、癌症的发生。近年来，研究者们通过染色体构象捕获（3C）技术并结合高通量测序技术来获取染色体的相互作用数据（HiC map），根据染色体相互作用的数据以及一些可用的先验信息可以将染色体的空间立体结构重建出来，从而确定不同染色体结构区域对应的功能。

作为在该领域颇有经验的研究组，曾坚阳研究组先后开发出三维基因组结构重构方法，此次更是

在基于流形学习的三维基因组结构重构方法的基础上，基于贝叶斯推断和流形学习的首次提出了将 FISH 数据和 HiC 数据相结合的三维基因组结构重构方法。在新的重构方法中，模型先是利用 HiC 数据重构所有局部范围的三维结构，然后利用 FISH 数据来调整不同局部在整体上的结构，从而完成完整基因组的三维重构。这一方法重构效果明显优于目前已有的其他重构方法。利用该方法重构的三维基因组结构不仅验证了已有的研究结构，同时也发现了超级增强子空间分布的新模式。

该成果研究论文“Integrating Hi-C and FISH data for modeling 3D organizations of chromosomes”发表于 Nature Communications, minor revision 2019 上。



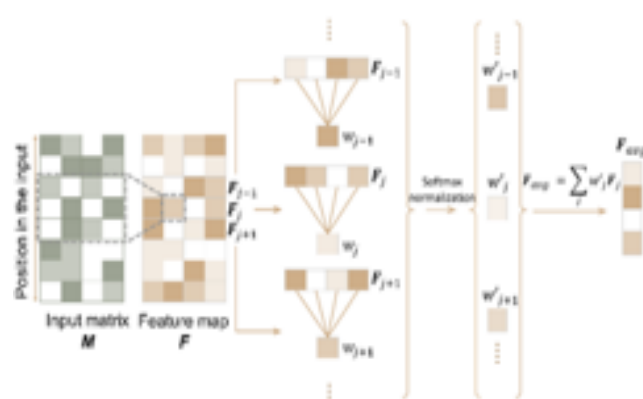
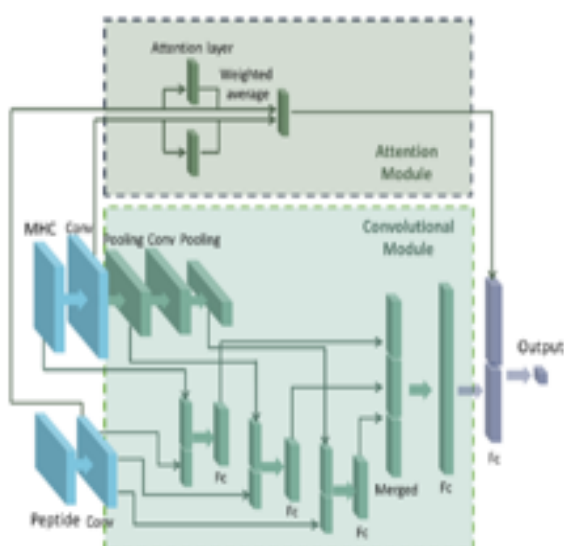
基于注意力的卷积神经网络预测 MHC- 多肽亲和力

抗原多肽的呈递在免疫系统对癌细胞的识别和消除中起到非常重要的作用。癌细胞特有的抗原多肽因此可以被制成癌症疫苗用于癌症的治疗。然而，只有极少数和细胞表面抗原呈递分子 MHC 有高亲和力的多肽能有效的诱发免疫反应，可以被制成疫苗。因此，人们需要高效而准确的工具帮助预测多肽和 MHC 分子的亲和力，以便筛选出最具有抗癌潜力的多肽开发成疫苗。

本领域的现有方法在许多缺乏实验数据的 MHC 和多肽类型上都并不能取得足够准确的结果。曾坚阳研究组首次使用基于注意力的深层卷积神经网络

解决此问题，显著提升了 MHC- 多肽亲和力预测的准确性。该模型将不同类型 MHC 以及不同长度多肽的数据整合到统一的框架里，具有优越的泛化能力，可以用于预测缺乏训练数据的 MHC 类型与多肽的亲和力。更进一步，该研究组使用模型提取了 MHC- 多肽相互作用中可解读的规律，分析了多肽序列中对 MHC 结合有显著影响的序列特征，为人们深入了解抗原呈递的生物学过程起到了推动作用。

该成果研究论文“ACME: Pan-specific peptide-MHC class I binding prediction through attention-based deep neural networks”发表于 BioRxiv 2018 上。



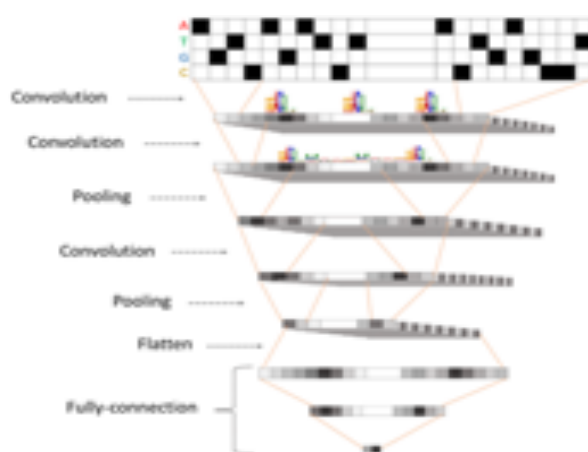
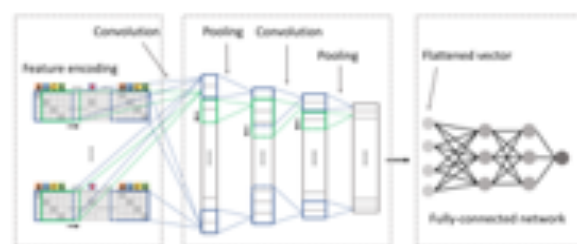
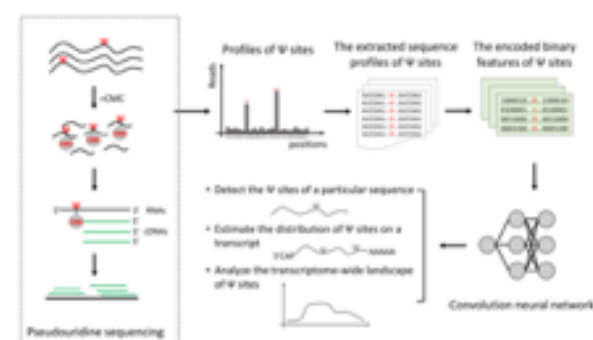
提出利用卷积神经网络对 RNA 碱基假尿苷化和 N6 甲基化进行预测和分析的计算框架

细胞中 DNA 转录出的 RNA 在细胞核和细胞质会发生一百多种不同类型的碱基修饰，包括甲基化和假尿苷化等等，这些修饰不仅能够影响 RNA 自身的命运，对 RNA 功能也具有重要的调控作用。系统的 RNA 修饰研究需要在转录组水平对所有修饰位点进行实验鉴定。近年来，由于高通量测序技术的发展和成熟，许多大规模鉴定 RNA 修饰位点的实验技术被提出，越来越多的修饰位点被鉴定出来。这些实验的数据表明，在通常情况下 RNA 上碱基位点发生修饰需要满足一定的条件，例如对应的 RNA 序列具有某种特定的模式或者 RNA 形成特定的空间结构。

针对现有 RNA 修饰位点鉴定的实验技术具有高成本、耗时长、数据不完整等诸多因素的限制，曾坚阳研究组分别以 RNA 碱基假尿苷化和 N6 甲基

化为研究目标，提出可以设计计算框架来研究 RNA 修饰，以及与之相关的各类因素，并且成功开发出了卷积神经网络模型对碱基修饰位点进行了准确的预测。该模型以修饰位点附近的序列信息作为唯一的输入数据，利用卷积神经网络可以自动提取序列局部和组合的特征的优点，分析出了 RNA 碱基假尿苷化和 N6 甲基化各自的序列特异性。针对 RNA 碱基假尿苷化，该研究组还利用训练好的模型对全转录组进行扫描，找出了高概率发生假尿苷化的位点，并对这些位点进行了系统的分析，在验证现有结论的同时也提出了新的假设，为 RNA 修饰领域的研究提供了便利和重要的线索。

该成果研究论文“MetNet: predicting m6A sites by convolution neural networks”发表于 Methods, 2019 上。



三、吴文斐研究组

主要完成人：吴文斐

针对软件定义网络的事务性更新服务

软件定义网络（SDN）是现代计算机的一种新的体系结构和管理方式。一次 SDN 的网络策略更新往往会涉及到多个设备，这样多设备的更新有其正确性的要求。例如，网络更新过程中报文不能丢失，一次更新需要对中途设备或者控制器崩溃有应对方法。将这些正确性的需求结合起来，吴文斐研究组定义了 SDN 更新的 ACID 原则（原子性、一致性、隔离性、持久性），并且将满足 ACID 原则的网络更新称之为事务性网络更新。

该研究组设计了介于网络控制器和网络应用程序之间的软件层，并将其称为事务性网络更新服务”(Transactional Update Service, TUS)。原子性被定义为一次更新中的若干设备必须同时更新或者同时不更新，TUS 采用日志备份的方法来实现；一致性被定义为一次更新中的若干设备

按照顺序同步或者异步更新，TUS 设计了相应的接口和停等机制来实现；隔离性被定义为若干次更新之间的执行效果需等同于它们按照某一顺序执行的效果，TUS 采用乐观的先执行后检查（冲突回滚）的方法来实现；持久性要求设备更新后新的策略持续生效，TUS 采用执行后检查的方法来实现。图 1、2、3 分别是 TUS 的接口、体系结构和实验效果。

TUS 对于网络管理的贡献是首次将网络 ACID 需求整合在一个系统中实现，解决了四个需求在实现中的相互冲突；同时，在一致性的实现中，对网络设备的状态进行了分类，并提出了保证不同状态的一致性的实现方法。

该成果研究论文“TUS: A Transactional Update Service for SDN Applications”发表于 APSys 2018 上。

Interface	Behaviors in CC	Record in the log
tx.transaction()	start a transaction in "READ" stage	<tx_ID, START>
tx.read(Switch, Match, "ACTION"/"STAT")	read a state and record in read set	<tx_ID, READ, Match, "ACTION"/"STAT">
tx.write(Switch, Match, Action)	Record the actions in write set	<tx_ID, WRITE, Match, Action>
tx.commit(VOLATILE)	mark tx in "VALIDATION" stage	<tx_ID, VALIDATION, VOLATILE>
	mark tx in "WRITE" stage, and execute tx	<tx_ID, WRITE>
	mark tx in "INACTIVE" stage	<tx_ID, INACTIVE>
tx.barrier()	Record a "barrier" in tx space	<tx_ID, BARRIER>

图 1. TUS 编程接口

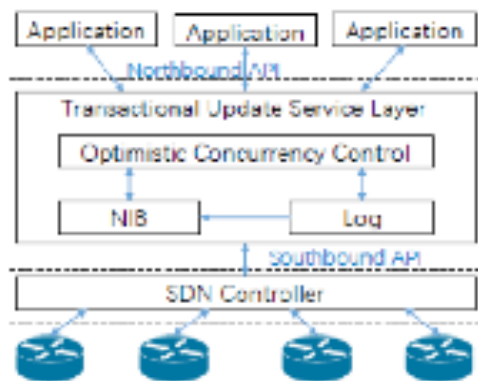


图 2. TUS 体系结构

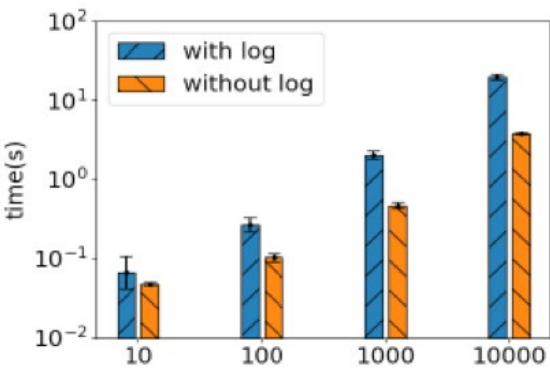


图 3. TUS 中的日志系统的性能测试

四、张崇洁研究组

主要完成人：张崇洁、朱广翔

以物体为导向的深度强化学习框架

深度强化学习在博弈对抗、策略规划、任务调度、自动控制、机器人等领域取得了非常惊人的进展，在某些复杂任务上已经超越人类智能，例如 DQN 在视频游戏上超越了人类专业水平，AlphaGo 在围棋领域击败了顶级选手，OpenAI Five 在多智能体协作与对抗游戏上战胜了职业玩家。然而，现阶段的深度强化学习主要还只局限于模拟环境中的单一场景下。因为它需要大量的数据进行学习，并且学到的知识难以泛化到新的场景（图 1）。

为了解决深度强化学习这一根本性的难题，向通用化人工智能更迈进一步，张崇洁研究组开创性地提出了以物体为导向的深度强化学习框架。该框架在无监督的情况下，能够自动学习物体概念和物

体之间的关系，然后基于物体之间的关系去推断并预测物体的动力学模型（图 2）。更进一步，该研究组提出了多级抽象学习范式，极大地降低了该框架的优化难度，使得学习过程更加稳定且鲁棒（图 3）。该研究组的方法显著地超越了目前的主流模型，实现了可以从少量样本中进行学习，并能将学到的知识泛化到大量新环境，该方法仅仅通过一次学习就可以在大量未见过的场景下直接规划出最优策略。

该成果研究论文“Object-Oriented Dynamics Predictor”、“Object-Oriented Dynamics Learning through Multi-Level Abstraction.”均发表于 NeurIPS 2018 上。

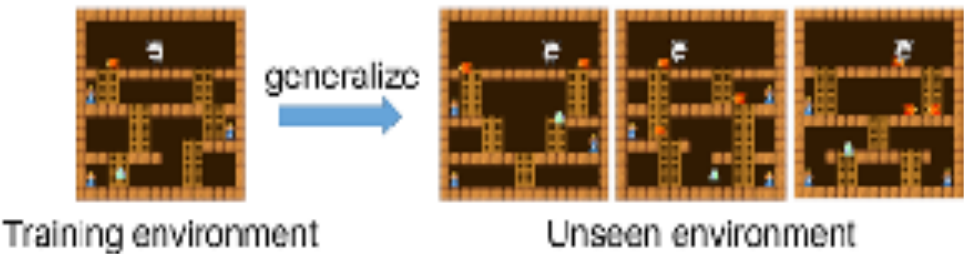


图 1 深度强化学习中的泛化问题

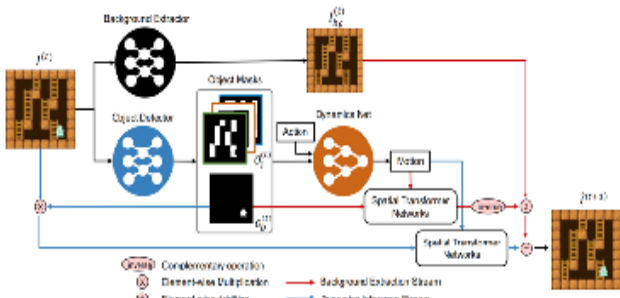


图 2 以物体为导向的深度强化学习框架

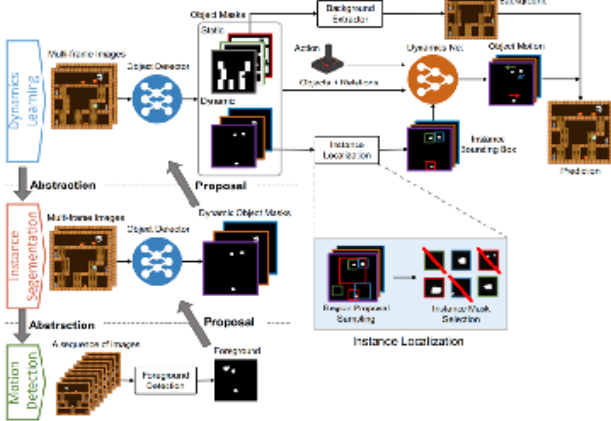


图 3 多级抽象学习范式

五、唐平中研究组

主要完成人：唐平中、彭炳辉、左淞、王志泽、蔡庆芃

对博弈与人工智能的交叉学科展开深入研究

1. Learning the optimal strategy to commit to. Binghui Peng, Weiran Shen, Pingzhong Tang, Song Zuo. AAAI-2019. 该论文突破了传统 stackelberg game 和 security game 中对 attacker (follower) 完全理性的假设，取而代之的是一个神经网络或者 oracle 模型来描述 attacker 的行为，并通过反复 sample 神经网络或者 oracle 获得大量的 attacker 行为数据，从而对 defender (leader) 的最优承诺 (commitment) 进行学习。

2. Optimal dynamic auctions are virtual welfare maximizers. Vahab Mirrokni, Renato Paes Leme, Pingzhong Tang, Song Zuo. AAAI-2019. 该论文延续了交叉信息院研究生左淞之前对动态机制设计的研究，对最优的动态机制给出了 closed-form 的刻画，证明最优的动态机制都是虚拟社会福利最大化机制。从而扩展了之前静态机制设计中类似的结论。该成果获得了 AAAI-2019 9 分的评审分。

Theorem 3.8 (Formal). *A bank account mechanism is optimal if and only if all the following conditions are satisfied:*

- it satisfies all the basic constraints, (IC), (BI), (BU) and the feasibility constraint (5);
- its allocation rule maximizes the ironed virtual welfare, where the virtual value (before ironing) $\phi(v)$ has the following form:

$$\phi(v) = \alpha_i(v)v_i - \beta_i(v_{-i})\phi_i(v),$$

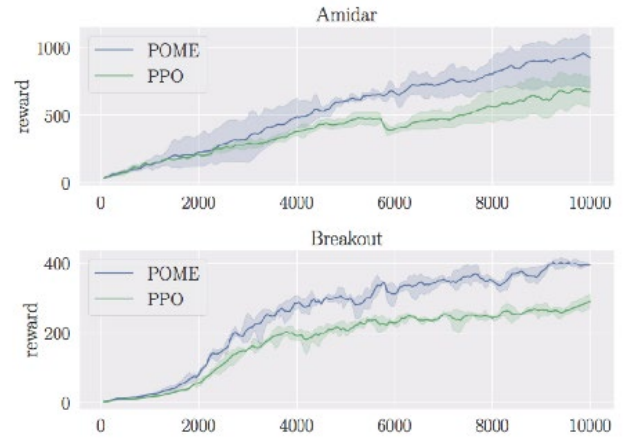
which can be seen as the combination of the Myerson's virtual value and the private value;

- finally, the expected utility of each period ξ is selected optimally, i.e.,

$$\mathbb{E}_b [\beta_i^t(v_{-i}^t)] = 1 \quad \text{or} \quad \xi^t(v_{-i}^t) = 0, \quad \mathbb{E}_b [\beta_i^t(v_{-i}^t)] \leq 1.$$

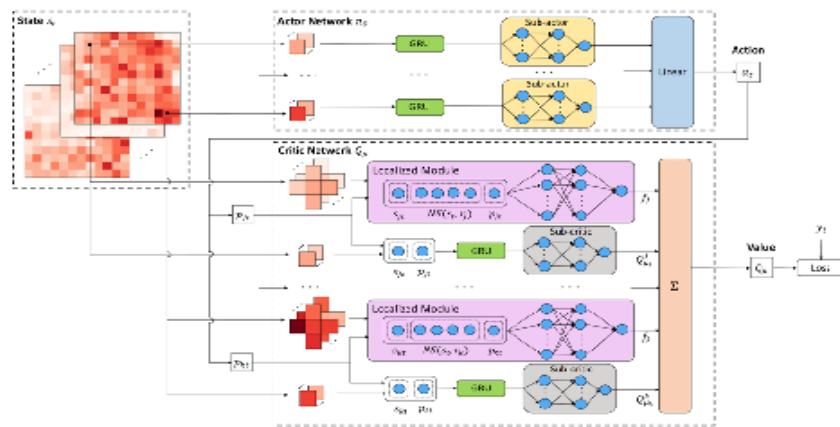
3. Making money from what you know: how to sell information. Shani Alkoby, David Sarne, Pingzhong Tang, Ziheng Wang. AAAI-2019. 该论文为中国以色列国际合作项目的结题报告，发表在 AAAI 这一顶级学术会议。该论文研究的是卖家如何向买家策略性的提供信息以最大化收益。文中给出了理论的最优策略，并通过人类行为学实验证明了这一发现，并同时发现了一些其他的人类行为。

4. Policy optimization with model based exploration. Qingpeng Cai, Qing He, Feiyang Pan, Pingzhong Tang. AAAI-2019. 以往的 policy optimization 往往采用 model free 的方法，在采样复杂性等重要指标上得不到保障，该论文首次提出了用 model based exploration 的方法来进行策略优化，并在 atari 2600 的 49 个 game 上验证了该研究组新提出的算法。



5. A deep reinforcement learning framework for rebalancing dockless bike sharing system. Qingpeng Cai, Longbo Huang, Zhixuan Fang, Ling Pan, Pingzhong Tang. AAAI-2019.

该论文是与黄隆波研究组的师生合作完成。论文研究如何通过深度强化学习的方法对共享单车中行人挑选较远的自行车进行激励，从而达到均衡的共享单车分布和行人的效用最大化。



此外，交叉信息院研究生蔡庆芃还提出了全新的强化学习算法 DVPG，并在多个 benchmark 指标上击败了当前的 start-of-the-art 算法。算法简介如下。

近年来强化学习算法得到了广泛的应用，而确定性梯度算法 (DDPG) 和随机值函数梯度算法 (SVG) 被广泛应用于机器人、自动驾驶等连续控制问题。然而，无模型的 DDPG 算法存在样本复杂性很高的问题，基于模型的 SVG 算法由于是随机策略，存在策略梯度方差很高的问题。

该论文研究了确定值函数梯度这一理论框架，首次给出了确定性策略梯度在无穷视野下的存在性和必要性条

开创性的提出了无穷步视野下的确定性值函数梯度算法 (DVG)，该算法基于模型，在学习中估计奖赏函数和状态转移函数，得到无穷视野下的确定性策略梯度，从而更新策略。通过实验发现，该算法明显优于有穷步视野下的确定性值函数梯度算法，并且和无模型的确定性策略梯度算法互有优劣。

为了进一步平衡 DVG 和 DDPG 算法的方差和误差，该论文采用时间差分的方法综合确定性值函数梯度和确定性策略梯度算法，得到确定性策略值函数梯度算法 (DVPG)，通过在 Mujoco 上的实验证明 DVPG 算法明显好于 DDPG、SVG 等其他 state of art 连续控制算法。

六、段然研究组

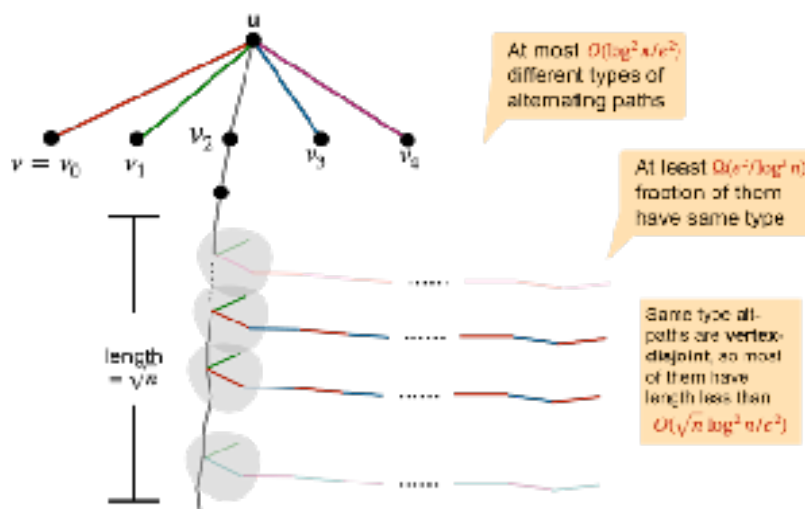
主要完成人：段然、何昊青、张天翼

边染色问题的动态近似算法

简单无向图中的边染色问题是指给出一种边染色方案，使得任意两条同顶点的边颜色都不相同。若图中所有点的最大度数为 Δ ，边染色所需要的最少颜色数为 Δ 或 $\Delta+1$ ，但判断一个图边染色所需要的颜色是 Δ 还是 $\Delta+1$ 是 NP-hard 问题。边染色问题的动态近似算法是指在图中增加或删除一条边时，在一定的更新时间内给出一种使用颜色数近似最优的边染色方案。Viz 在 [1] 中给出了一种需要 $O(n)$ 更新时间， $\Delta+1$ 种颜色的边染色动态近似算法，近年来，研究者们又相继提出了分别需要

$O(\sqrt{\Delta})$ ， $O(\log \Delta)$ 和 $O(\Delta \log n / c)$ 更新时间，需要 $O(\Delta)$ ， $2\Delta-1$ 和 $\Delta+c$ 种颜色的边染色动态近似算法 [2]，[3]，[4]。作为这个问题的突破性进展，段然研究组提出了一种改进的边染色问题动态近似算法，该算法可以在 $O(\log^8 n / \epsilon^4)$ 的均摊更新时间内，以高概率给出一个使用 $(1+\epsilon)\Delta$ 种颜色的边染色方案，这是首个 $\log n$ 的多项式级别更新时间内能达到任意近似比的边染色问题动态近似算法。

该成果研究论文“Dynamic Edge Coloring with Improved Approximation”发表于 SODA 2019 上。



[1] Vadim G Vizing. On an estimate of the chromatic class of a p-graph. Diskret analiz, 3:25–30, 1964.

[2] Leonid Barenboim and Tzali Maimon. Fully-dynamic graph algorithms with sublinear time inspired by distributed computing. Procedia Computer Science, 108:89–98, 2017.

[3] Sayan Bhattacharya, Deeparnab Chakrabarty, Monika Henzinger, and Danupon Nanongkai. Dynamic algorithms for graph coloring. In Proceedings of the Twenty-Ninth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms, pages 1–20. SIAM, 2018.

[4] Yi-Jun Chang, Qizheng He, Wenzheng Li, Seth Pettie, and Jara Uitto. The complexity of distributed edge coloring with small palettes. In Proceedings of the Twenty-Ninth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms, pages 2633–2652. SIAM, 2018.

七、李建研究组

主要完成人：李建、曹玮、王栋、李志泽

一种基于递归神经网络的用于时间序列数据中的缺失值插补的新方法

时间序列被广泛用作许多分类 / 回归任务中。 BRITS 有三个优点：

但在实际问题中，时间序列包含许多缺失值。给定 (a) 它可以处理时间序列中的多个相关缺失值；

多个相关的时间序列数据，如何填写缺失值并预 (b) 它推广到具有非线性动力的时间序列；

测其类别标签？该问题是实际时间序列应用中的核 (c) 它提供数据驱动的估算算法，适用于一般的缺少数

心问题。现有的插补方法通常对基础数据生成过程 据大多数情况。

做了很强的假设，例如线性状态空间的动力演化。 该研究组在三个真实数据集上评估该组的模型，包括

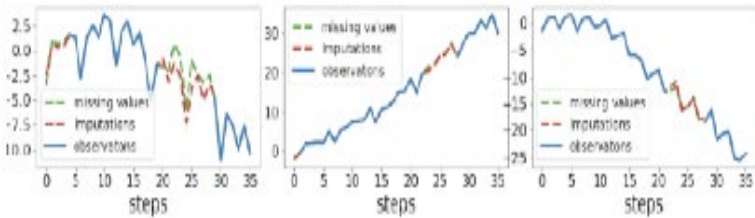
李建研究组提出了 BRITS，一种基于递归神经网络 空气质量数据集，医疗保健数据和人类活动的定位数据。

的用于时间序列数据中的缺失值插补的新方法。该研究 实验表明该研究组的模型在插补和分类 / 回归精度方面都

组提出的方法直接学习双向递归动力系统 中的缺失值， 优于目前最好的方法。

并没有强加任何很强的假设。估算的值被视为 RNN 图 该成果研究论文“BRITS: Bidirectional Recurrent

的变量，并且可以在反向传播期间可以被有效地更新。 Imputation for Time Series” 发表于 NIPS 2018 上。



Method		Air Quality	Health-care
NR	Mean	55.51 (77.97%)	0.461 (65.61%)
	KNN	29.79 (41.85%)	0.367 (52.15%)
	MF	27.94 (39.25%)	0.468 (67.97%)
	MICE	27.42 (38.52%)	0.510 (72.5%)
	ImputeTS	19.58 (27.51%)	0.390 (54.2%)
RNN	STMVL	12.12 (17.40%)	/
	GRU-D	/	0.559 (77.58%)
	M-RNN	14.05 (20.16%)	0.445 (61.87%)
Ours	BRITS-I	12.45 (17.93%)	0.385 (53.41%)
	BRITS	11.58 (16.66%)	0.361 (50.01%)
	RITS	12.19 (17.54%)	0.292 (40.82%)
	BRITS	11.56 (16.65%)	0.278 (38.72%)

一种基于减少方差的近似随机梯度算法

李建研究组分析了随机梯度算法在优化非凸非光滑的目标函数的收敛速度。这里目标函数由非凸分量的总和，以及不可微的凸分量给出。

该研究组提出了一种基于减少方差的近似随机梯度算法，称为 ProxSVRG +。该算法是 ProxSVRG 算法的变体 [Reddi et al. NIPS2016]。该研究组的主要贡献在于对 ProxSVRG + 的分析。该研究组的分析结果可以得到目前的几个现有算法的收敛结果（根据随机梯度 oracle 调用次数和 proximal 操作的次数），并改进 / 推广了一些方法。特别的，ProxSVRG + 推广了 SCSG 算法 [Lei et al. NIPS2017] 给出的最佳结果。另外，ProxSVRG + 比 SCSG 更直接，并且分析更简单。

此外，ProxSVRG + 在有 mini-batch 情况下的比 proximal 梯度下降 (ProxGD) 更优，这部分地解决了 [Reddi et al. NIPS2016] 中提出的开放性问题。

最后，对于满足 Polyak-Lojasiewicz (PL) 条件的非凸函数，该研究组证明了 ProxSVRG + 实现了全局线性收敛速度而无需重启。在 PL 条件下，该研究组证明了 ProxSVRG + 始终不比 ProxGD 和 ProxSVRG / SAGA 差，并且有时优于它们（并推广了 SCSG 的结果）。本文在机器学习旗舰会议上被选为 spotlight 论文。

该成果研究论文“A Simple Proximal Stochastic Gradient Method for Nonsmooth Nonconvex Optimization”发表于 NIPS 2018 上。

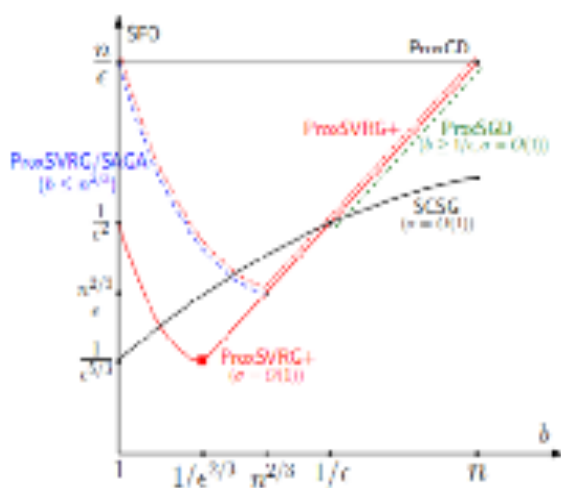


Figure 1: SFG complexity in terms of minibatch size b

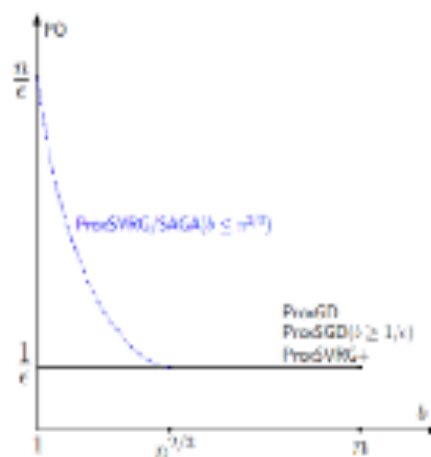


Figure 2: PO complexity in terms of minibatch size b

量子信息



一、量子算法

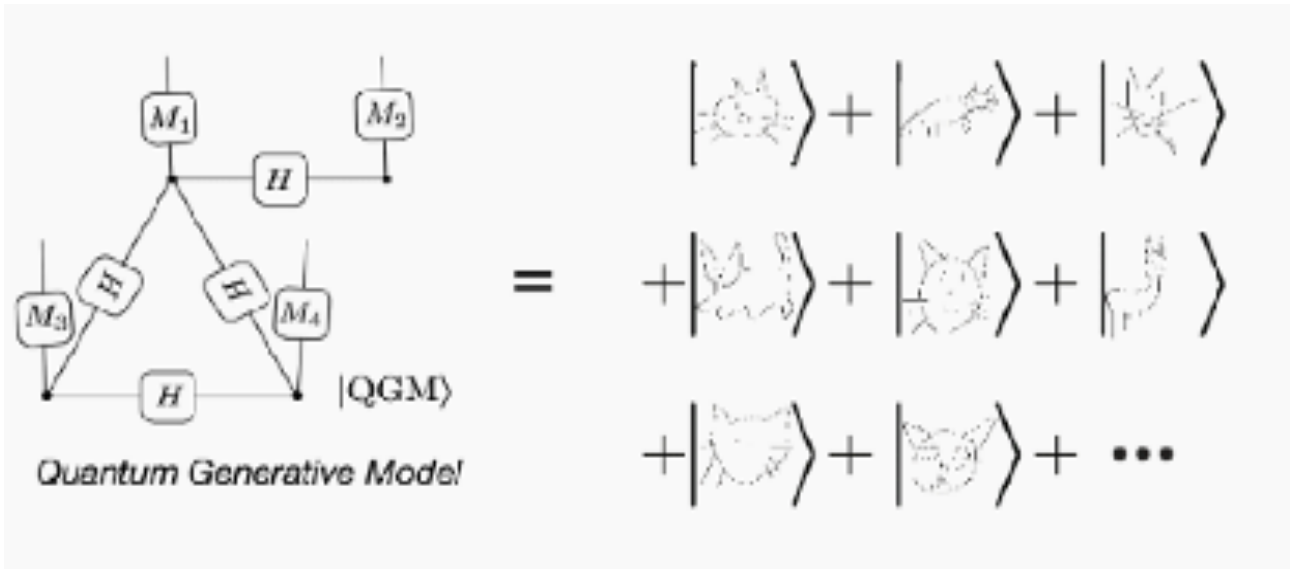
指数加速量子机器学习算法

主要完成人：段路明、郜勋

段路明研究组发现具有指数加速的量子机器学习算法，展示了量子计算机在人工智能研究领域中的巨大潜力。

人工智能研究的突破依赖于更强大的计算机和更高效的算法，基于量子并行原理的量子计算机提供了一种与经典超算完全不同的计算方式，能否用量子计算机来加速人工智能算法是一个很自然的问题。但是量子计算机并非对各种问题自动拥有量子加速，加速的可能性依赖于针对特定问题精巧的量子算法设计。量子计算机研究的一个核心方向是在重要应用领域找到具有指数加速可能的算法。指

数加速不同于经典超算中的常数倍加速，它的特点是，加速的倍数随着问题的规模（例如输入比特的数目）以指数函数形式迅速增长。指数加速赋予了量子计算机一种无与伦比的超能力，但这种超能力并非在各应用领域普遍存在。事实上，迄今发现的具有指数加速可能的量子算法只有寥寥几个，每个具有指数加速能力的量子算法的发现，都是量子计算机研究的重要突破，往往开拓量子计算机的一大应用领域。



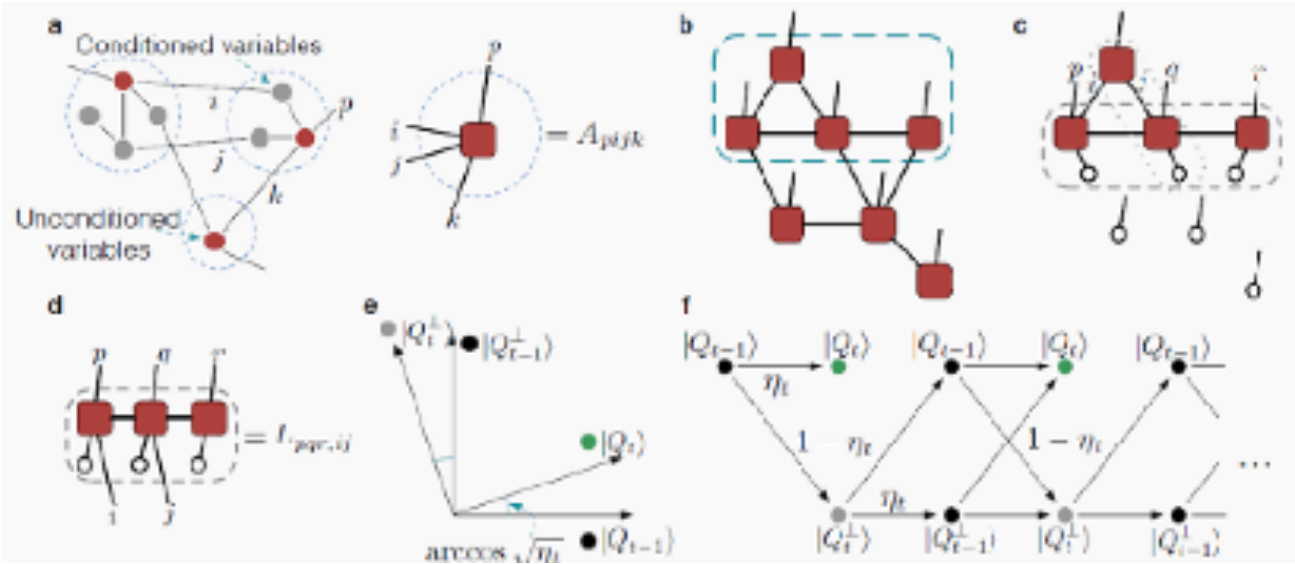
量子生成模型示意图

段路明研究组发现了一种具有指数加速可能的基于生成模型的量子机器学习算法。机器学习是人工智能领域近期最成功的方法，通过机器学习算法，计算机能够从数据中自动寻找并学习到特定的模式和规律，并最终将其推广到未知的数据加以利用。如今机器学习已经在计算机视觉、自然语言处理、自动驾驶、游戏对抗等诸多领域有了十分广泛的应用。生成模型是机器学习中一类非常重要的模型。它通过一种全局的眼光看待数据集，是对所有数据共同概率分布的刻画，一般用来生成与实际数据有相同模式的人造数据，在诸多机器学习任务中有着不可替代的作用，例如近期热门的生成对抗网络（GAN）即属于经典的生成模型。

段路明研究组首次提出了一种基于优化多体量

子纠缠态的量子生成模型，并证明了该量子生成模型在学习能力与预测能力方面都存在指数加速。量子生成模型中，经典图中表示概率的参数由正实数扩大至复数域，这种新的量子图模型所需的参数个数相比于经典图模型（包括贝叶斯网络、马尔科夫随机场、玻尔兹曼机、深度信念网络等）有指数量级的减少，这对于生成模型来说，在空间和时间的效率上都是巨大的优势。段路明研究组提出了能实际有效利用这种新型图模型的启发式量子机器学习算法。此算法将生成模型的推断和训练问题，转化成量子多体哈密顿量的基态制备问题，并由此可以证明量子算法的指数加速。

该成果研究论文“A quantum machine learning algorithm based on generative models”发表于 Science Advances 上。



基于量子生成模型的机器学习算法示意图

二、量子纠缠

UNOT 门对经典和量子关联的运算效果

主要完成人：Kihwan Kim、Mile Gu、Vlatko Vedral、Jayne Thompson、张宽、马家俊、张翔

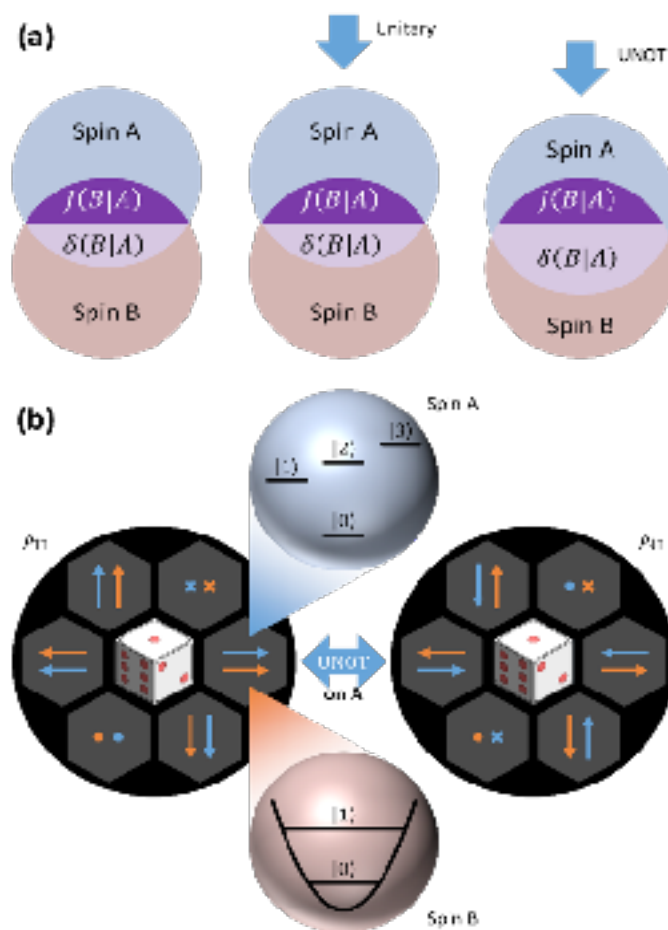


图 1: (a) UNOT 门可以保持两个自旋之间的经典关联不变，却可以改变其间的量子关联。这种改变是被基本的数据处理不等式所禁止的。(b) 我们利用包含两个自旋的系统来模拟 UNOT 门的效果。这两个自旋一个被编码于囚禁离子的内部自由度，另一个被编码于离子简谐振动的运动自由度。

通用非门（UNOT 门）指的是一种可以将任意指向的量子自旋翻转至其相反方向的操作。金奇旻研究组近期的工作表明，当系统中存在可被观测的量子关联时，该操作会违反基本的数据处理不等式。由于该操作在真实物理系统中是被禁止的，金奇旻研究组发展了一系列基于离子阱平台的新技术来在实验上模拟 UNOT 门的非物理效应。该研究组利用这些效应来解释量子理论中一个非常令人费解的现象，即相比于一对同向排列的自旋，一对反向排列的自旋可以传递更多的信息。金奇旻研究组的结果为量子信息科学提供了重要的理论和实验进展。一方面，该结果提供了一种可操作的方式来解释，

为什么当翻转一个经典比特是理所当然的可行时，翻转一个量子比特却是物理上禁止的。一个直观的例子是，仅当系统中存在可观测的量子关联时，UNOT 门才会表现出非物理的行为。另一方面，该结果展现了第一个可以模拟任意精度 UNOT 门的实验，这与先前的所有研究形成了鲜明的对比。先前的研究受限于标准量子理论的约束，即使没有任何其他损失的情况下，也仅仅只能对 UNOT 门进行一定精度的近似。

该成果研究论文“Operational effects of the UNOT gate on classical and quantum correlations”发表于 Science Bulletin 上。

世界上最大的 NOON 纠缠态

主要完成人：Kihwan Kim、段路明、张静宁、张君华、严马可、吕定顺

NOON 态是 N 个全同玻色子的一种最大纠缠态，可达到相位估计的海森堡极限（相位不确定度反比于粒子数，而非粒子数的平方根），在量子精密测量等领域有重要应用。金奇奂研究组提出了一种基于 Jaynes-Cummings 相互作用的确定性制备声子任意 NOON 态的方案。此前对于 NOON 态的制备，在光子系统中仅有概率性的方案，而在声子系统中仅有不可扩展的方案。该研究组在实验上实现了 $N=1\sim 9$ 的 NOON 态的制备，并创新性的利用不同

声子模式间的干涉操作检验了态制备的保真度，同时在实验上测量了所制备的 NOON 态的相位估计不确定度，确认超过经典极限，达到海森堡极限。该方案还可以很方便的移植到腔量子电动力学系统或光机械系统中。

该成果研究论文“NOON States of Nine Quantized Vibrations in Two Radial Modes of a Trapped Ion”发表于 Physical Review Letters 上。

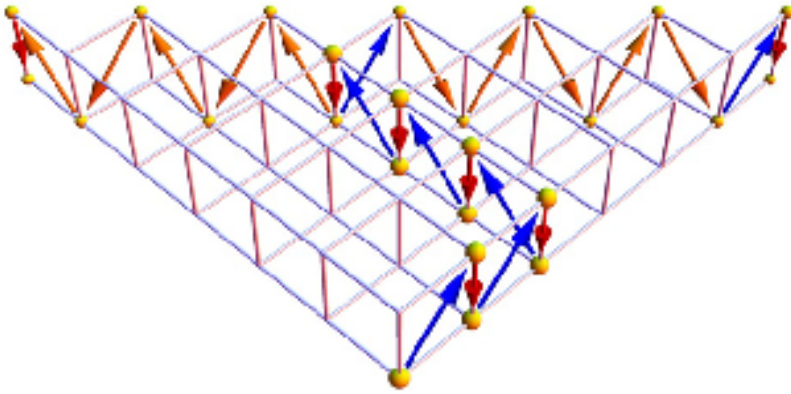


图 1: $N=6$ 的 NOON 态制备序列。在由自旋、X 和 Y 振动模式构成的三维希尔伯特空间中，上层与下层分别代表和、X 和 Y 轴分别代表 X 和 Y 振动模式。红箭头表示载波跃迁，蓝箭头表示蓝边带跃迁，绿箭头表示复合脉冲操作。箭头上的数字表示操作顺序。

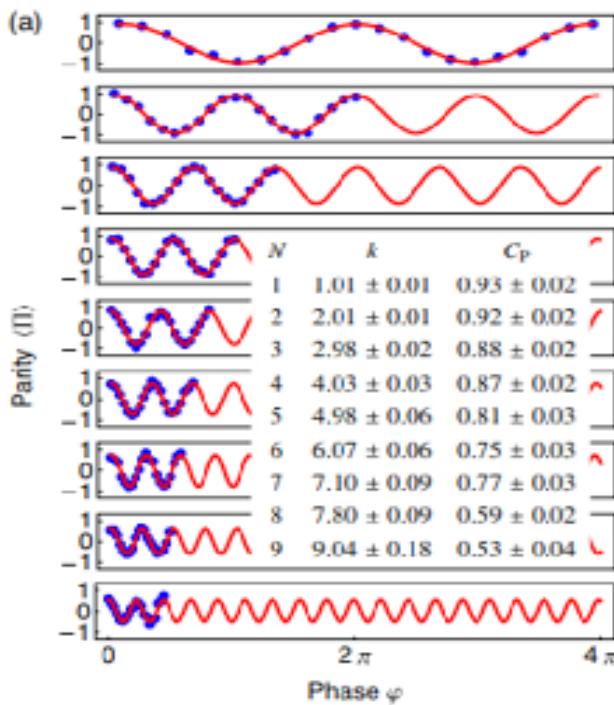


图 2 生成的 $N=1-9$ 的 NOON 态奇偶震荡。(a) 蓝色的点是实验数据，红线是拟合曲线。(b) $N=7$ ，相位为 0 的 NOON 态输出模式的蓝边带时间演化及其拟合曲线。(c) 相对应的声子分布 P_n 。

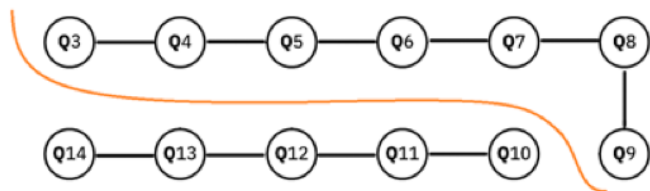
IBM 超导量子云平台可实现 16 量子比特纠缠态

主要完成人：尹璋琦、王远皓

姚班王远皓与中国工程物理研究院研究生院李颖副研究员、尹璋琦助理研究员及加拿大圭尔夫大学的曾蓓教授合作，远程登录 IBM Q 量子云平台，验证了其制备量子纠缠态的能力，并将平台上所有 16 个物理量子比特制备到量子纠缠态。

2016 年 5 月，IBM 宣布了 5 个量子比特量子云平台上线，提供给全世界的研究人员免费访问。一年后，IBM 的 16 量子比特的量子云平台上线。对于近期出现的量子计算云平台，人们迫切想要了解其计算能力。量子纠缠是量子物理独有的效应，也是量子计算实现加速的重要条件。如果一台量子计算机只能制备纠缠程度很低的量子态，它能实现的计算也很有限，可以用经典计算机有效模拟。因此，除门保真度（gate fidelity）之外，制备量子纠缠态的能力也是量子计算的一种重要评价指标。

为了测试 IBM Q 上具有 16 个物理比特的芯片 ibmqx5 制备量子纠缠态的能力，王远皓等人进行了一系列的实验以尝试在芯片上制备 16 比特的图态（graph state）。其有很好的特性，局域的测量只会影响图上与之相连的最近邻的量子比特跟它的纠缠。

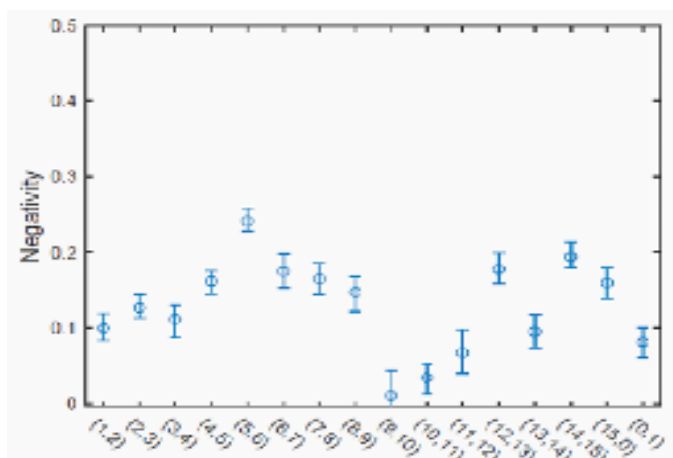


图一：对 16 个物理比特一个可能的分割

图态对局域的噪声和测量都是比较强壮的，有望做出较大的量子纠缠态。如果实际得到态是一个分离态（biseparable state），那么将存在一个物理比特集合上的分割，使得得到的量子态可以写成分割两侧直积态的混合。而如果存在这样的分割，必然存在一个分割两侧的不纠缠的子系统。

因此，姚班王远皓等人对实验得到的 16 量子比特图态中 16 个 4 比特的子系统进行了态层析（quantum tomography），并利用部分转置判据（PPT criterion）证明了它们是纠缠的。这意味着所制备的图态不会从这个 4 比特的子系统中分开。遍历所有可能，排除掉所有的可分态情况之后可以推断，该芯片上的量子态是一个使用了所有物理比特的纠缠态。尽管该纠缠态与目标图态之间的保真度（fidelity）不高，这项工作展示了 IBM 设备上产生真正量子效应的能力。

该成果研究论文“16-qubit IBM universal quantum computer can be fully entangled”发表于《npj Quantum Information》上。



图二：各子系统的负度（negativity）：如果任一子系统不是纠缠的，其负度是 0。

三、量子密码 & 通讯

突破传输距离极限的相位匹配量子密钥分发协议

主要完成人：马雄峰、曾培、周泓伊

马雄峰研究组提出了一种新型相位匹配量子密钥分发协议并进行了严格的安全性分析，该协议能够在现有装置下显著提高量子密钥的生成速率，特别在远距离传输时该方案可以突破其他量子密钥分发协议所面临的传输距离极限。

量子密钥分发（Quantum key distribution）利用量子物理基本原理，可为通信双方产生理论上无条件安全的随机密钥，保证了信息传输过程中的安全性。如何克服传输损耗从而提高密钥速率、传输距离是量子密钥分发协议理论和实验研究的核心问题。量子信道的传输效率通常用通过率 η 来刻画，即一个光子能够经发送端（Alice）顺利通过量子信道达到接收端（Bob）并且被探测到的概率。在离散变量量子密钥分发协议中，一般采用单光子进行密钥信息编码，因而单光子在信道中的损耗意味着密钥信息的丢失。因此，通过率 η 是密钥产生速率的自然上界。可以严格证明，在所有的 Alice 向 Bob 发送信号的协议中，其密钥产生速率 R 存在一个上界，为量子信道通过率 η 的线性函数，即 $R \leq O(\eta)$ 。在光纤量子密钥分发中，由于量子信道通过率随着传输距离的增加而指数衰减，该上界严重限制了量子密钥分发协议在远距离条件下的密钥生成速率。

最近，英国剑桥东芝实验室研究组提出了新型的相位编码测量设备无关量子密钥分发协议，该协议对现有的相位编码协议做出了改进，展示了突破通过率的线性函数 $O(\eta)$ 上界的可能性。然而，该协议仍然缺乏一个严格的安全性证明。在上述研究基础上，马雄峰研究组推广并提出

证明了其安全性，这也是世界上首个对突破线性函数密钥率上界 $O(\eta)$ 的证明。在常规的相位匹配量子密钥分发协议中，Alice 和 Bob 各自制备相干态的激光脉冲并且将密钥信息 $\kappa_a, \kappa_b \in \{0, 1, \dots, d-1\}$ 编码到相干态的相位中，然后将衰减后的激光脉冲发送给一个不受信任的测量端 Eve。理想情况下，Eve 应该进行光子干涉测量并公布结果。这样的干涉测量将匹配 Alice 和 Bob 相干光的相位，使得密钥信息 κ_a, κ_b 产生关联。

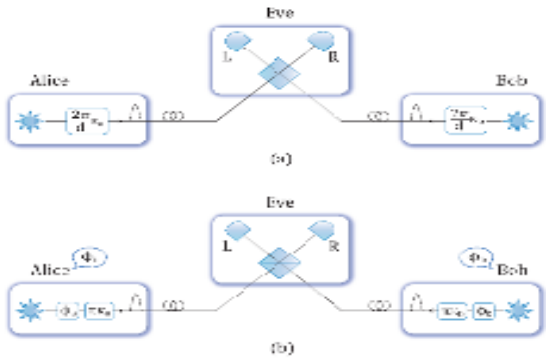


图 1 相位匹配量子密钥分发协议示意图。通信双方将密钥信息编码在相干态的相位中，并交给 Eve 进行干涉测量 (a) 相位匹配量子密钥分发协议的一般情况，每次编码的密钥为 d 维。(b) $d=2$ 并附加相位随机化的情况。

在这个新协议中，Alice 和 Bob 在发送弱相干光之前引入额外的随机相位 φ_a, φ_b 。在 Eve 公布测量信息后，Alice 和 Bob 公布随机相位信息并进行后选择。经过严格的协议安全性分析以及考虑所有实际因素的数值模拟后，该研究组发现新协议的密钥产生速率在传输距离大于 250 公里的时候可以显著超越线性密钥率上界（图 2）。在传输距离大于 300 公里的时候，该协议的密钥率能够比原始的测量设备无关量子密钥分发协议高出 4~6 个数量级。这项工作对于进一步拓展量子密钥分发协议的传输距离具有重大的实际应用价值。

该成果研究论文“Phase-matching quantum key distribution”发表于 Physical Revview X 上。

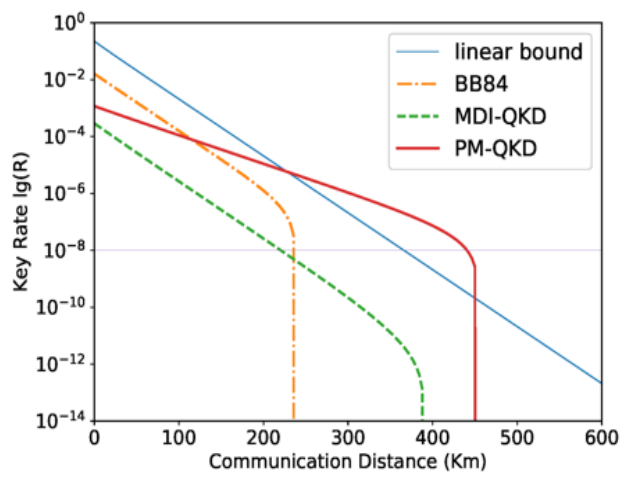


图 2 相位匹配量子密钥分发协议 (PM-QKD) 密钥率与传输距离关系的数值模拟图。在传输距离达到一定程度时新协议密钥率可以超越已有的密钥率上界，并显著高于现有其他量子密钥分发协议。

设备无关的随机数产生

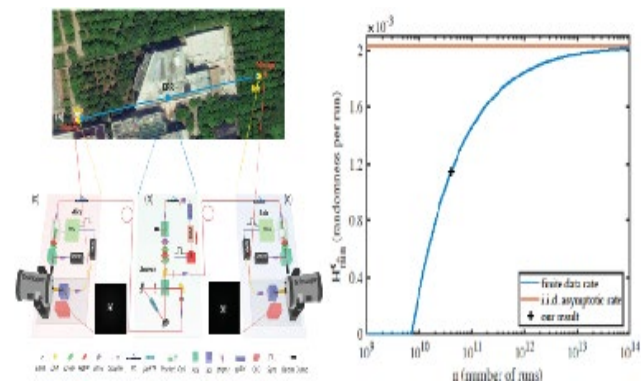
主要完成人：马雄峰、赵琦

贝尔测试提供了验证区分量子力学和经典局域隐变量理论的实验手段。贝尔测试的特点在于其结论不依赖于物理理论的假设。然而为了实现贝尔测试需要克服各种实验漏洞。几个著名的漏洞是局域性漏洞，探测效率漏洞和随机选择基矢漏洞。局域性漏洞和探测效率漏洞可以通过提高实验装置的精度来克服。由于并不存在不依赖于物理假设的随机数，随机选择基矢漏洞无法从物理上彻底地解决，然而实验中可以通过更为复杂、精妙的手段在一定程度上消除随机选择基矢漏洞。马雄峰研究组参与实现了第一个使用星光作为随机数输入的贝尔不等式无漏洞违背实验。

除此之外，贝尔测试的违背也可以被用来产生量子随机数。随机数在人们的日常生活和科学研究中都有着重要应用，如数值模拟、博彩、人工智能、

通信安全等领域。经典随机数的获取来自于软件算法实现或经典热噪声，它们都不是真随机数，而是比较难预测的伪随机数。量子力学的基本原理从根本上改变了这一局面，它具有经典物理中所不具有的内禀随机性，从而可以制造出真正的随机数发生器。为了进一步加强量子随机数的安全性，马雄峰研究组研究了基于贝尔不等式违背的设备无关（自检测）随机数产生方案。该随机数方案不需要对设备的内部工作原理进行任何假设，从而被认为是安全性最高的随机数产生装置。实现无漏洞的完全设备无关的量子随机数产生器在实验上和理论上都具有极高的难度，实验中探测器效率问题是阻碍贝尔不等式违背随机数实用化的主要困难。马雄峰研究组与实验小组合作对设备无关的随机数产生方案进行了安全性分析，同时针对现有光学系统特点对实验中一些重要参数进行了优化，最终实现了无漏洞设备无关的量子随机数产生器。此项研究提供了更为安全可靠的随机数，将在数值模拟和密码学等领域得到广泛的应用，为未来新的随机数安全标准打下基础。

该成果研究论文“Device- independent quantum random-number generation”发表于 Nature 上。



左图为星光作为随机数输入的贝尔不等式无漏洞违背实验装置图。右图为设备无关量子随机数产生方案中不同实验轮数、不同假设下成码率。

相干探测的随机性量化

主要完成人：马雄峰、周泓伊、曾培

相干探测包括零差探测 (homodyne detection) 和外差探测 (heterodyne detection)，它们被广泛应用在连续变量量子信息的研究中。以量子随机数发生器为例，一些量子随机数发生器方案采用连续变量光源和相干探测的技术，例如测量激光相位涨落，真空涨落等。这些随机数发生器方案相比于传统的基于单光子探测的方案，可以使得随机数生成速率显著提升，例如从 Mbps 提升至 Gbps。这主要得益于相干探测采用光电探测器，可以不受单光子探测器死时间的制约，并且光电探测器的高带宽可以允许较高的采样频率。

目前为止所有基于相干探测的工作（例如量子密钥分发或者量子随机数发生器），都做了如下假设：本地谐振子的行为按经典力学刻画，本地谐振子的强度足够高使得相干探测的输出结果看作一个连续分布。然而在这种假设下一个连续分布可能会

导致在量化随机性时得到发散的结果，因此对相干探测的一个严格的量子力学的刻画可能是我们更好的理解随机性的本质。另一方面在先前的工作中随机性刻画大多采取经典的香农熵或者最小熵函数。近年来提出的量子相干性理论被证明可以用作量子随机性的刻画，因此利用量子相干性资源理论可以对相干探测的随机性进行更严谨和规范的量化。马雄峰研究组通过完全采用量子力学刻画相干探测，用无穷维量子相干性来解释相干探测中随机性的产生，并给出了全新的随机性量化方法。该方法相比于传统的近似方法更加精确。结合具体实验参数，给出了真空涨落随机数发生器的随机数产生速率的数值模拟，和上下界。新的随机性量化方法有望应用于连续变量量子密钥分发的安全性分析中。

该成果研究论文“Randomness quantification of coherent detection”发表于 Physical Review A 上。

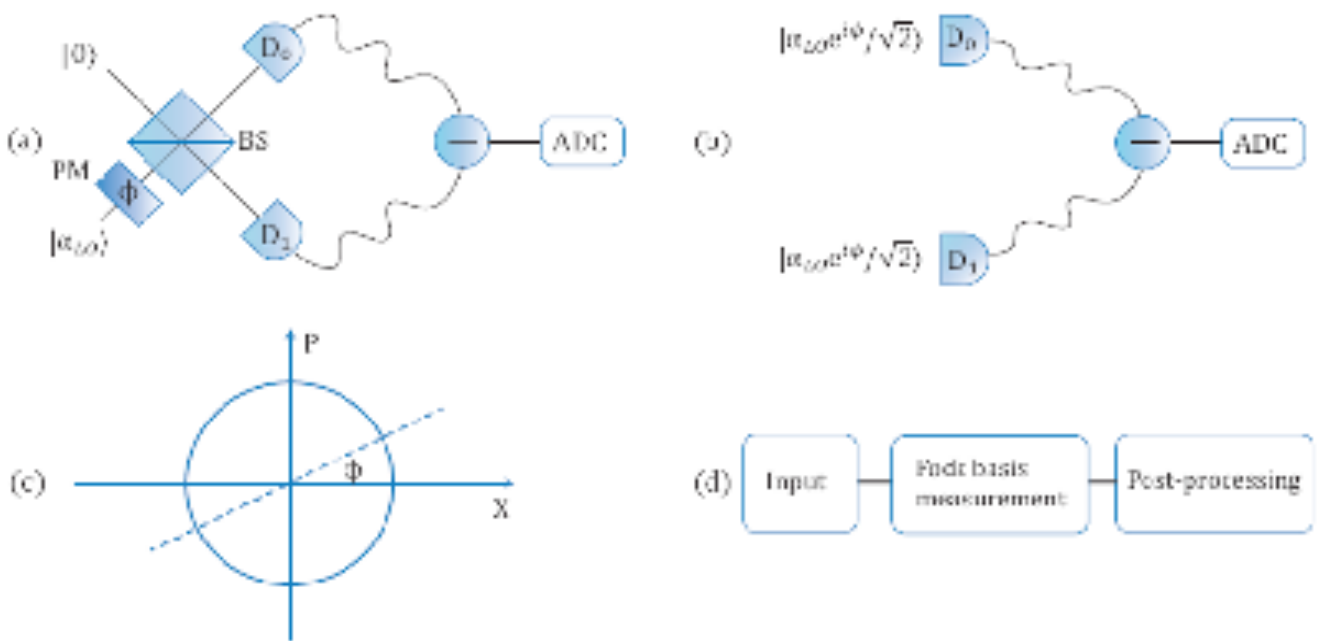


图 3 (a) 实际零差探测装置 (b) 等效零差探测装置 (c) 零差探测相空间表示 (d) 真空涨落随机数流程图

四、超导量子计算

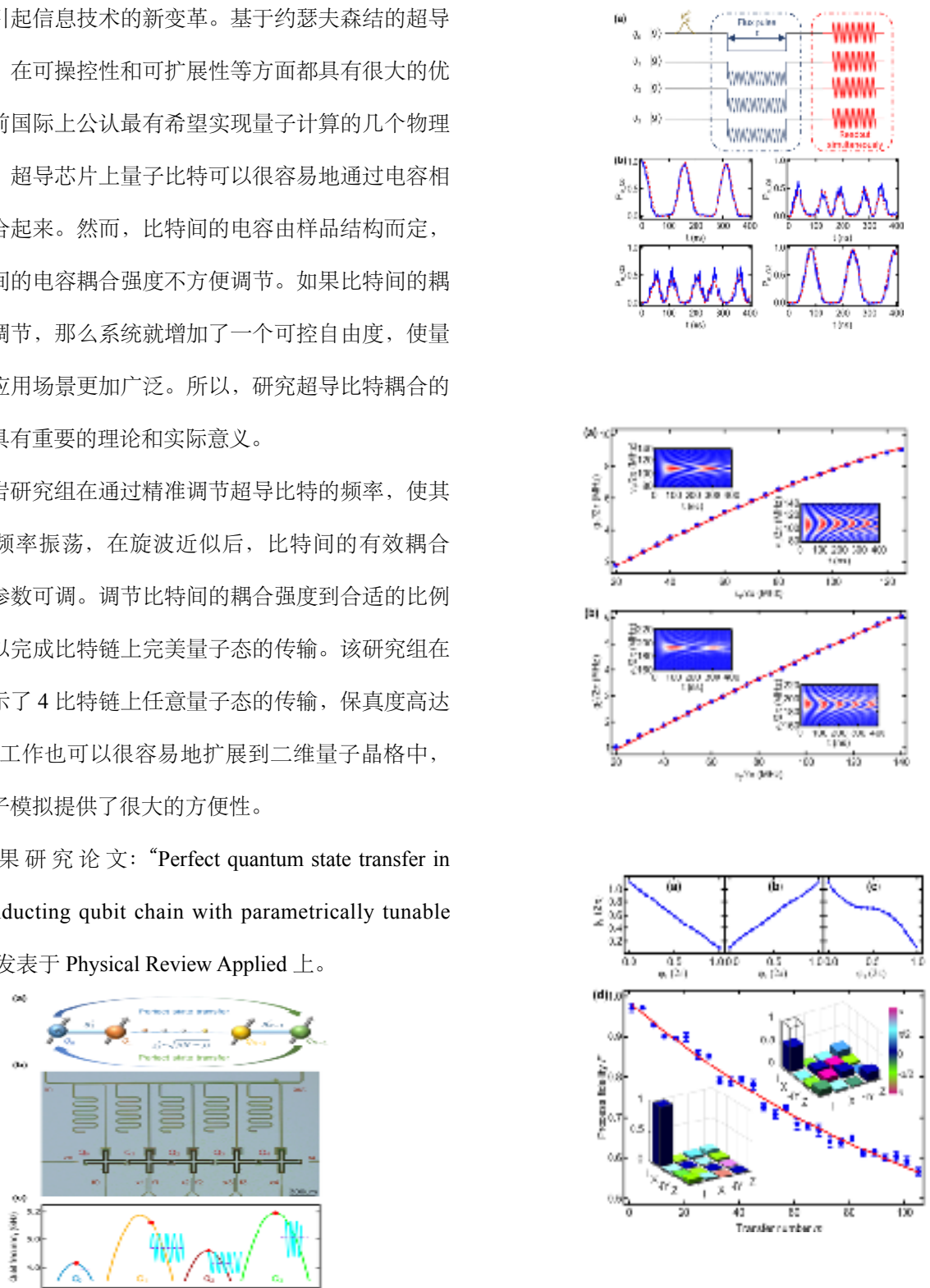
通过调节量子比特间的耦合强度实现在一维量子比特链上任意量子态的完美传输

主要完成人：孙麓岩、尹璋琦、宋祎璞、李薛刚、马雨玮、韩佳秀、徐源、蔡伟州

量子计算机具有经典计算机无法比拟的计算能力，它的实现将引起信息技术的新变革。基于约瑟夫森结的超导量子比特，在可操控性和可扩展性等方面都具有很大的优势，是目前国际上公认最有希望实现量子计算的几个物理系统之一。超导芯片上量子比特可以很容易地通过电容相互作用耦合起来。然而，比特间的电容由样品结构而定，因此比特间的电容耦合强度不方便调节。如果比特间的耦合强度可调节，那么系统就增加了一个可控自由度，使量子模拟的应用场景更加广泛。所以，研究超导比特耦合的可控调节具有重要的理论和实际意义。

孙麓岩研究组在通过精准调节超导比特的频率，使其以一定的频率振荡，在旋波近似后，比特间的有效耦合强度变得参数可调。调节比特间的耦合强度到合适的比例后，就可以完成比特链上完美量子态的传输。该研究组在实验中演示了 4 比特链上任意量子态的传输，保真度高达 99.2%。该工作也可以很容易地扩展到二维量子晶格中，为二维量子模拟提供了很大的方便性。

该成果研究论文：“Perfect quantum state transfer in a superconducting qubit chain with parametrically tunable couplings”发表于 Physical Review Applied 上。



在超导电路中演示和乐量子门操作的新方法

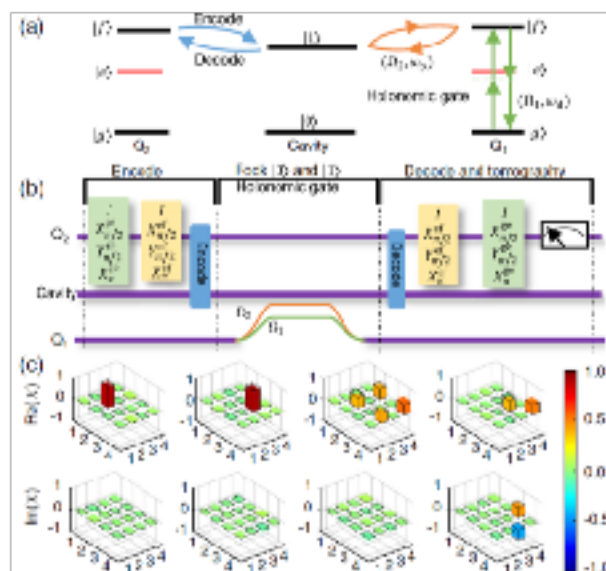
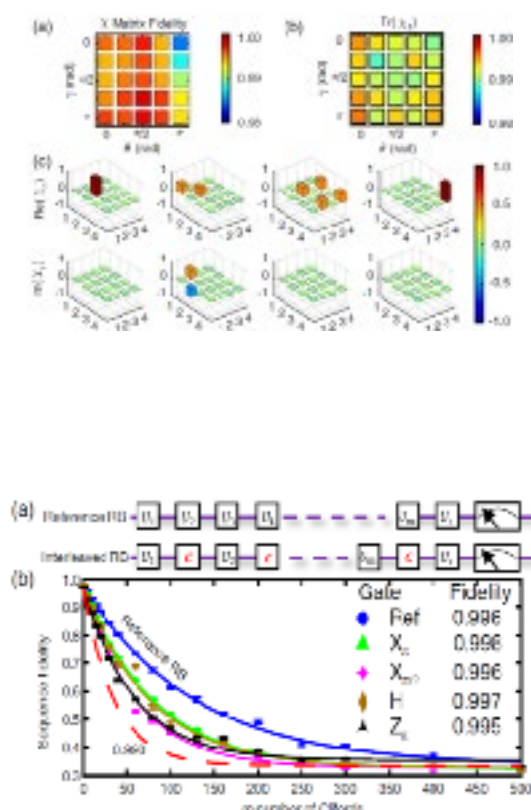
主要完成人：孙麓岩、尹璋琦、徐源、蔡伟州、马雨玮、穆相豪、胡玲

基于约瑟夫森结的超导量子比特，在可操控性和可扩展性等方面都具有很大的优势，是目前国际上公认的最有希望实现量子计算的几个物理系统之一。众所周知，对操控噪声不敏感的高保真量子逻辑操控是实现大规模量子计算的关键。几何量子计算是利用几何相位来实现量子逻辑门操作的量子计算策略，其特点是利用几何位相的整体几何性质来避免某些局域无规噪声的影响，从而实现高保真度的量子逻辑门。因此，基于阿贝尔和非阿贝尔几何相位的几何与和乐量子操控是量子物理和量子信息领域中非常重要的研究课题。

利用这样一种抗噪音的几何相位，孙麓岩研究

组在超导量子比特与经典微波光场的相互作用系统中，通过哈密顿量的单圈演化，同时实现了对超导比特和微波光子的任意非绝热和乐单比特量子门，门保真度分别达到99.6%和97.8%。由于该演示实验方案一次演化即可实现任意的单比特量子门，因此该方法能够简化实际量子计算中所需的门操作的个数。该研究工作结果可望在通用量子计算等量子信息领域发挥重要作用。

该成果研究论文：“Single-Loop Realization of Arbitrary Nonadiabatic Holonomic Single-Qubit Quantum Gates in a Superconducting Circuit”发表于 Physical Review Letters 上。



基于超导量子系统的任意量子比特信道生成

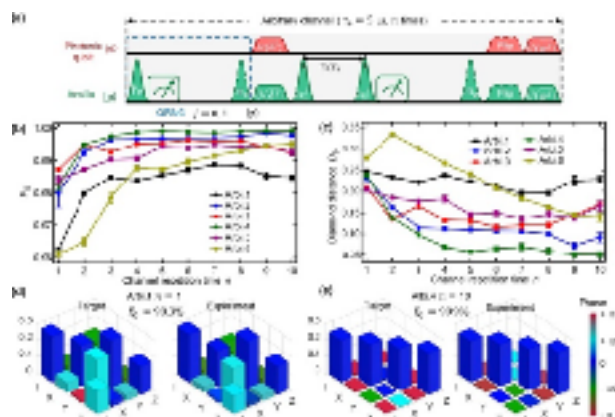
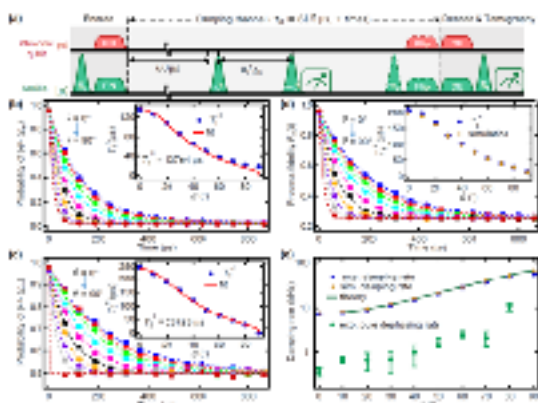
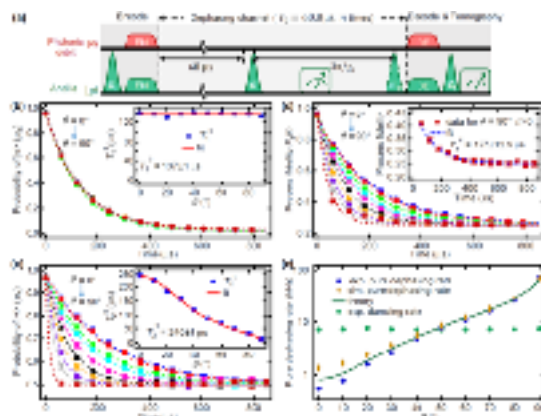
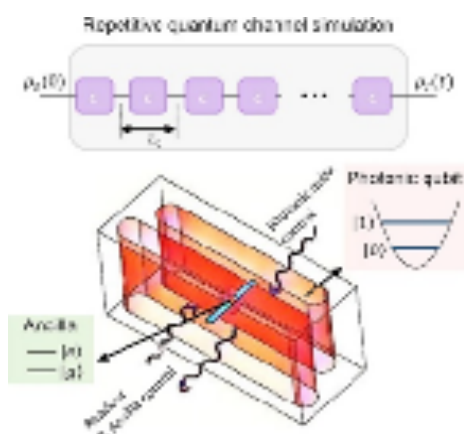
主要完成人：孙麓岩、宋祎璞、王海艳、胡玲、穆相豪、蔡伟州、马雨玮、徐源

开放量子系统的演化和控制是量子力学和量子信息理论的研究基础。由于环境的影响，实际物理系统中量子比特的演化不再是么正演化，而是用量子信道来描述。在实验中对量子信道的研究不仅可以加深对开放量子系统演化的理解，还可以提高对开放量子系统控制的能力，有助于量子信息和量子计算的研究。因此，如何实现对单个量子比特的任意操控，即实现量子比特任意量子信道的生成，具有非常重要的意义。

交叉信息研究院孙麓岩研究组与中国科学技术大学邹长铃合作，在超导量子系统中实现了量子比特的任意量子信道的生成，实现了单比特的任意操控。通过一个三维超导微波腔和超导 transmon 量子比特耦合的实验系

统，将超导微波腔视为目标量子比特，将超导 transmon 作为辅助量子比特，可以实现任意量子信道的模拟。该研究组采用了一种新颖的实验方案来实现开放量子系统的完全操控，仅仅需要一个辅助量子比特和实时量子反馈技术。该方案还可以进一步推广到更高维度的量子系统的信道生成，节省量子资源。这种基于实时量子反馈技术的量子信道生成，可以确定性的模拟任意物理环境中量子态的演化或制备任意量子态，在量子计算和量子模拟中具有重要意义和广泛应用前景。

该成果研究论文：“Experimental repetitive quantum channel simulation”发表于 Science Bulletin 上。



在超导系统中实现量子人工智能算法

主要完成人：孙麓岩、邓东灵、宋祎璞、王海艳、胡玲、吴书豪、蔡伟州、马雨玮、穆相豪、徐源

交叉信息研究院孙麓岩、邓东灵研究组与中国科学技术大学邹长铃研究组合作，在超导系统中首次实验实现了量子生成对抗学习，展示了量子器件应用于人工智能领域中的可行性及巨大潜力。

人工智能的核心是机器学习，而生成式对抗网络 (GAN, Generative adversarial Networks) 是近年来机器学习领域最具前景的方法之一。一般说来，机器学习的模型大体可以分成两类：生成模型 (Generative model) 和判别模型 (Discriminative model)。举个简单的例子，给定一张图片，判断这张图片里的动物是猫还是狗，这是判别模型；给定一系列狗的图片，要求生成一张新的，不在已有数据集里的狗的图片，这是生成模型。

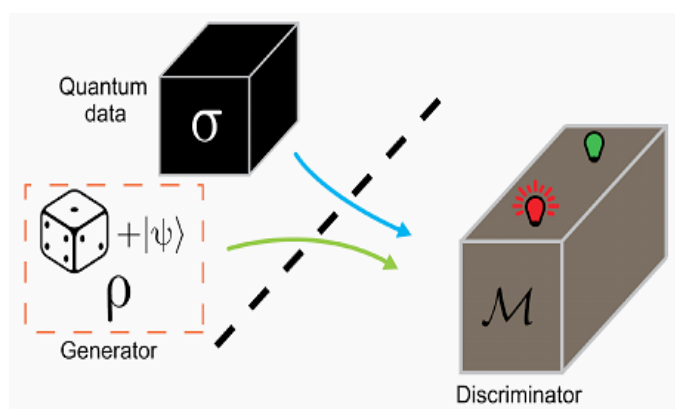


图1 量子生成对抗网络示意图

GAN 是一类非常重要的生成模型，由 Goodfellow 等人于 2014 年提出。GAN 在很多方面特别是生成图像、视频等有极为重要的应用。GAN 的原理比较简单，可以通过生成图片为例来理解：GAN 通常包含两个部分，生成器和判别器。判别器是一个判别图片的网络，它随机接收一张图片，此图片可能来自于训练的数据集（称为真实的）也可能是生成器产生的（称为假的），它的目标是以最大概率区分图片到底是真的还是假的。生成器是一个生成图

片的网络，它的目标是生成尽可能逼真的图片来迷惑判别器。这样，生成器和判别器构成了一个动态的“博弈过程”，博弈的最终结果是生成器可以生成足以“以假乱真”的图片，判别器难以判断生成的图片是不是真实的。

量子生成对抗网络 (QGAN, quantum generative adversarial network) 基本原理与经典的 GAN 是一样的，区别在于这里生成器和判别器是由量子器件或者量子网络构成，训练用的数据集也可以是量子数据（如量子态等）。孙麓岩研究组与合作者在超导系统中首次实现了 GAN，展示了从量子数据集中学习有用模式的可行性。在此实验中，生成器由一个能以一定概率分布产生量子态系综的超导量子线路组成，判别器是一个可以做投影测量的量子器件，训练用的真实数据集由一个量子通道模拟器产生。

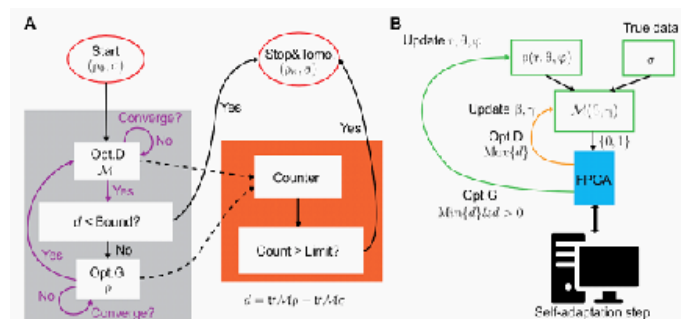


图2 量子生成对抗网络实验方案图

实验结果表明，通过多轮对抗学习后，生成器产生的量子数据越来越逼近真实的量子数据，最终达到平均 98% 以上的保真度，从而使得判别器无法区分生成器产生的数据。此实验为今后研究中等尺度量子器件在机器学习方面的量子优势打下铺垫，可能对量子人工智能领域的发展产生深远影响。

该成果研究论文：“Quantum generative adversarial learning in a superconducting quantum circuit” 发表于 Science Advances 上。

对超导体 - 量子点 - 超导体混合纳米线系统中的安德列夫束缚态密度进行直接实验测量

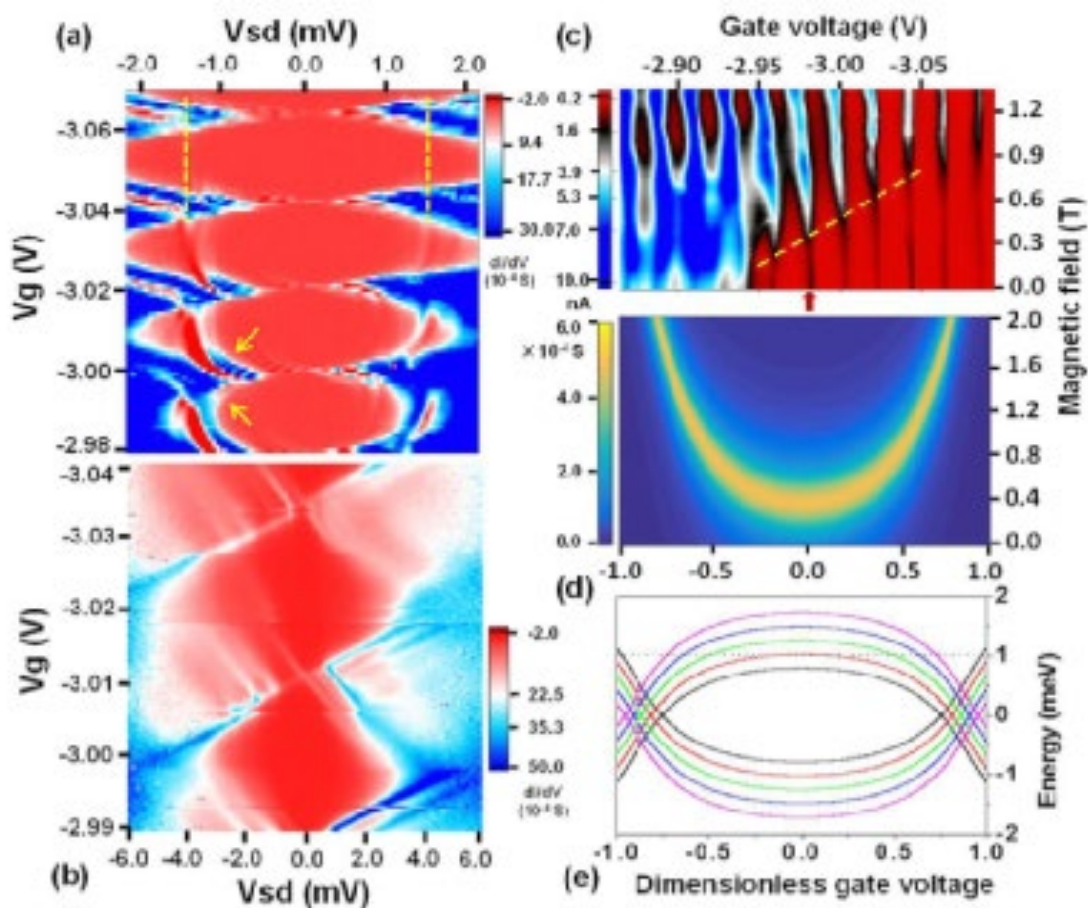
主要完成人：宋祎璞、张宏毅、王海艳、孙麓岩、段路明、马玉林、蔡天琦、韩玺月

超导量子比特的主要构成 - 约瑟夫森超导结通常由两个近邻的超导体通过弱连接耦合而成。当两个超导体通过纳米线弱连接时，弱连接的半导体纳米线提供了使用栅极电压调节耦合强度的可能性，可以通过调制超导电流的方式实现超导量子比特频率的调节。这种新型超导体 - 半导体量子器件因其独特的性质和应用前景而备受关注，其应用于超导量子比特的可能性及其性能取决于超导结内由安德列夫束缚态 (ABSs) 微观输运而产生的邻近效应。

段路明、宋祎璞研究组对超导体 - 量子点 - 超导体混合纳米线系统中的安德列夫束缚态密度进行了直接实验测量。在混合系统的输运谱中，观察到由超导关联引起的、

硬邻近诱导产生的超导间隙。由于量子点中电导通过 ABS 束缚态的输运而产生，在磁场较低的情况下，随着磁场的增加，ABS 态的能量达到外加偏压设定的阈值后，共振电流会得到增强和扩展。在高磁场情况下，当费米能级达到朗道能级的简并点时，出现电导极大值，导致库仑阻塞振荡的窄宽交替模式中出现电导峰。该结果为基于超导体 - 半导体约瑟夫森结的超导量子比特应用提供了可靠的实验参考。

该成果研究论文：“Andreev bound states in a few-electron quantum dot coupled to superconductors” 发表于 Physical Review B 上。



五、冷原子量子计算

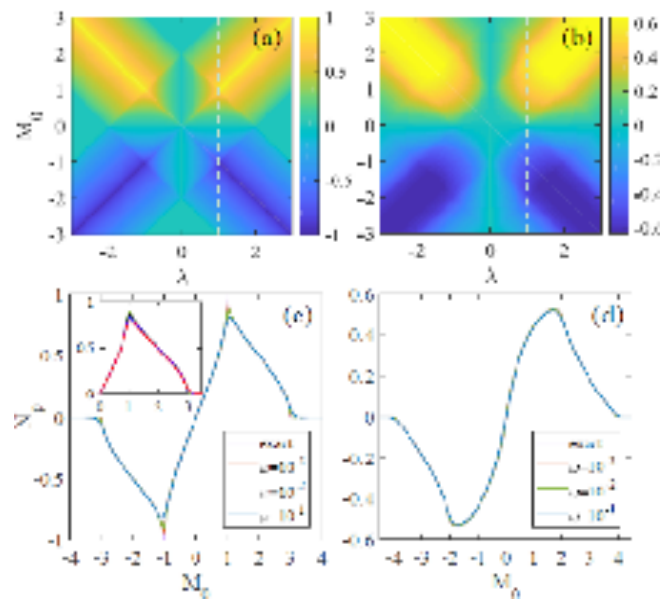
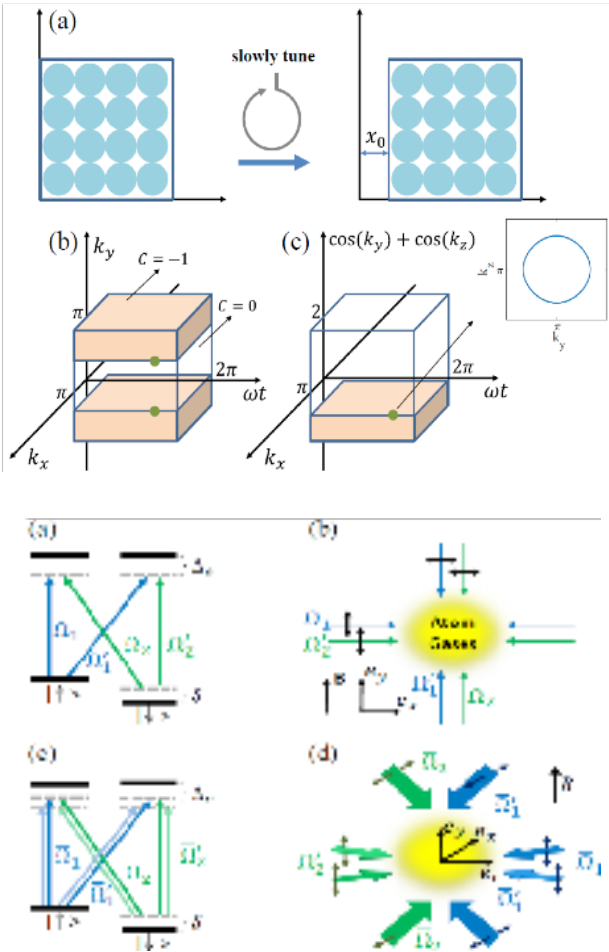
首次提出高维系统中连续可调的拓扑泵浦

主要完成人：徐勇、段路明、杨炎彬

1983 年，Thouless 提出一种一维拓扑系统，在缓慢调制系统参数一个周期后，该系统的电子输运是量子化的，这种现象被称 Thouless 泵浦。该现象起源于系统的拓扑性质：如果把时间看作一个维度，Thouless 泵浦是一种动力学的二维量子霍尔效应。该泵浦是量子化的，因此不可调。另一方面，三维的外尔半金属和 nodal line 半金属等无能隙拓扑相近年来得到广泛研究。三维外尔半金属也具有拓扑霍尔效应，但不是量子化的。如果存在外尔半金属或者 nodal line 半金属的动力学对应，那么就有可能实现无能隙的拓扑泵浦，该泵浦在一个周期输运的粒子数不是量子化的，而且可以通过调节系统参数连续调节泵浦的输运量。

徐勇研究组首次提出该种连续可调的拓扑泵并提出了其在冷原子中的实现方案。如果把时间当成一个维度，这种拓扑泵对应于动力学的外尔点和四维外尔节点环，它们的拓扑性质由时间与准动量构成的参数空间中的第一陈数保护。该研究组通过数值模拟系统在哈密顿量不同变化频率下的时间演化，说明零能隙导致的非绝热效应随着变化频率减小而趋于零，同时还研究了退相干效应对泵浦的影响。该研究组进一步提出了在自旋轨道耦合的高维冷原子气体中实现和观测这种连续可调的拓扑泵浦的实验方案。

该成果研究论文：“Continuously tunable topological pump in high-dimensional cold atomic gases”发表于 Physical Review B 上。





清华大学
Tsinghua University



交叉信息研究院
Institute for Interdisciplinary
Information Sciences

Edited by Kailin Li

Reviewed by Xiamin Lv