

# 交叉信息研究院

## 学术科研简报

2019 年 1 月 -8 月



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

# 目录

## 人工智能

- 04 计算生物学
- 05 机器学习
- 08 高效率深度强化学习
- 10 前沿架构与智能芯片
- 13 分布式机器学习算法
- 14 网络科学
- 16 计算经济学
- 18 能源经济学
- 19 理论计算机科学

## 量子信息

- 22 量子计算
- 23 量子模拟
- 24 量子纠缠
- 27 量子通信 & 密码
- 30 超导量子计算
- 33 拓扑凝聚态物理

# 人工智能



# 一、计算生物学

主要完成人：曾坚阳研究组（曾坚阳、Ahmed Abbas 等）

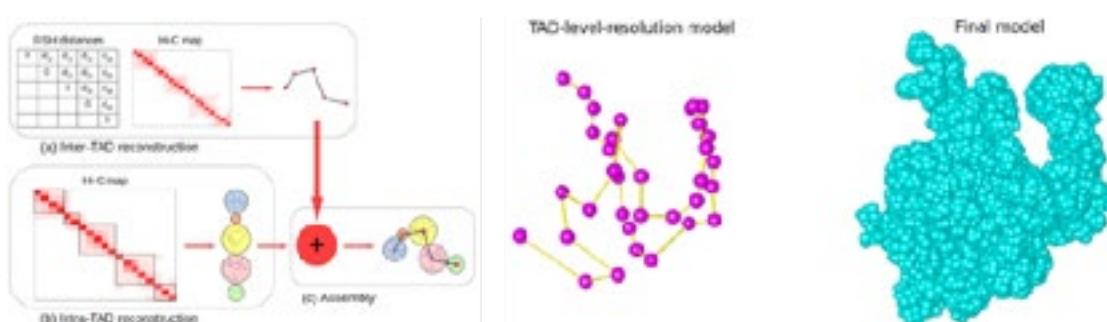
## 开发三维基因组结构重构新方法

大量研究表明，染色体的空间结构与细胞内大多数的生物过程包括基因调控、DNA 复制以及染色体异位等密切相关。因此，三维基因组结构解析对于细胞内生物过程的理解具有十分重要的意义。近年来，染色体构象捕获 (3C) 技术高速发展，通过与高通量测序技术相结合 (Hi-C)，可以直接获得全基因组范围内染色体相互作用图谱。基于染色体相互作用图谱，可以分析出染色体的层次结构并且重构出三维空间结构，从而为下游的分析和实验提供有价值的线索，并且为染色体折叠机制和功能的研究提供帮助。目前，由于 Hi-C 实验的限制，高分辨的三维基因组结构的重构难度较大。

曾坚阳研究组在三维基因组结构的重构方面具有丰富的经验，先后开发出了基于贝叶斯推断和流形学习并结合染色体物理特性的建模方法，相关成果均发表在核心期刊《核酸研究》(Nucleic Acids Research) 上，其中基于流形学习的 GEM 方法被《基因组蛋白质组与生物信息学报》(Genomics, Proteomics & Bioinformatics, 简称 GPB) 评为 2018 年国内生物信息学十大进展之一。

此次曾坚阳研究组发表于《自然》子刊的方法基于上述流形学习的模型首次将 FISH 数据与 Hi-C 数据相结合，极大程度上提高了结构建模的准确性。在该方法中，建模过程分为三个主要的步骤：第一，利用 FISH 数据和 Hi-C 数据来确定拓扑结构域 (TADs) 的相对空间位置；第二，利用 Hi-C 数据提供的几何约束以及多聚体的生物物理性质来确定 TADs 内的结构；第三，将上述两步进行融合，调整优化后得到最终的三维基因组结构。在与之前方法的比较中，该方法将结构的平均相对误差降低了近一半，进一步的下游分析表明，该方法可以准确构建出染色体的基本层次结构。

该成果研究论文：Ahmed Abbas, Xuan He, Jing Niu, Bin Zhou, Guangxiang Zhu, Tszshan Ma, Jiangpeikun Song, Juntao Gao, Michael Q. Zhang, Jianyang Zeng. "Integrating Hi-C and FISH data for modeling of the 3D organization of chromosomes", Nature Communications.



图：三维基因组结构建模的流程图

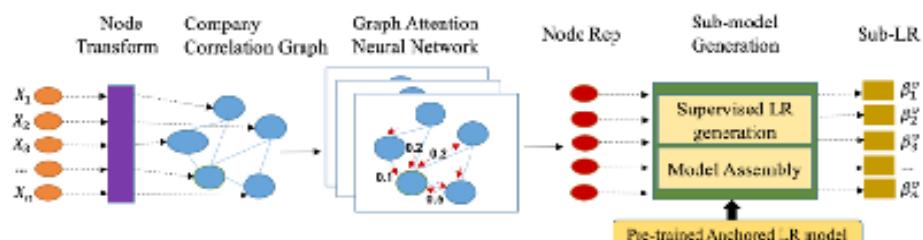
## 二、机器学习

主要完成人：李建研究组（李建、徐进、李志泽等）、徐歲研究组（徐歲、郑顺等）

### 用替代数据预测企业营收

企业营收预测是证券分析和投资决策中的重要组成部分。对于投资而言，最有价值的信息之一就是公司的意外收入，被定义为正式的财报收入与分析师收入预测的共识估计之间的差额。由于是意料之外的收入，表明超出或低于分析师的预期，所以这是影响证券价格走势的非常重要的因素。除了股票市场的常规交易数据和公司的财务报告，近年来，替代数据在金融投资决策中被广泛的应用。李建研究组首次研究了如何利用机器学习方法和替代数据预测公司的意外营收。该研究组提出了一种自适应的主从模块化模型，简称 AMS，以有效利用替代数据进行意外收入预测。李建研究组的 AMS 模型首先在公司图上训练一个主模型，然后使用图神经网络（GNN）捕获公司之间的关系。然后，对于目标公司，该主模型生成一个自适应从模型，然后使用此从模型来预测目标公司的意外收入。AMS 模型具有出色的预测性能，并且具有可解释性，这对于投资经理分析预测结果至关重要。通过使用真实的替代数据集进行的广泛实验，李建研究组证明了此模型相对其他模型的有效性。

该成果研究论文：Jin Xu, Jingbo Zhou, Yongpo Jia, Jian Li, Hui Xiong; "Graph Neural Network Enhanced Adaptive Model for Revenue Prediction with Alternative Data", ICDE 2020.



### 贝叶斯推断的哈密顿蒙特卡洛采样算法

Langevin dynamic 和 Hamiltonian Monte Carlo 这些基于梯度的蒙特卡洛采样算法是贝叶斯推理的重要方法。在大规模数据中，计算全梯度的时间代价是无法承受的。因此，可以使用在 minibatch 上来估计的随机梯度来代替。为了减少随机梯度中噪音的方差，Dubey 等人 [2016] 将标准方差减少技术应用于随机梯度 Langevin dynamics，并获得了理论和实验上的改进。李建研究组将方差减少技巧应用于哈密顿量蒙特卡洛方法，与减少方差的 Langevin dynamics 相比获得了更好的理论收敛结果。此外，该研究组在减少方差的哈密顿蒙特卡罗算法中应用了对称分裂 (symmetric splitting scheme)，可以进一步改善理论结果。该研究组的实验所示，在真实数据集上的贝叶斯回归和分类任务中，减少方差的汉密尔顿蒙特卡洛方法比减少方差的 Langevin 动力学具有更好的性能。

该成果研究论文：Zhize Li, Tianyi Zhang, Shuyu Cheng, Jun Zhu, Jian Li. "Stochastic Gradient Hamiltonian Monte Carlo with Variance Reduction for Bayesian Inference", Machine Learning, 2019.

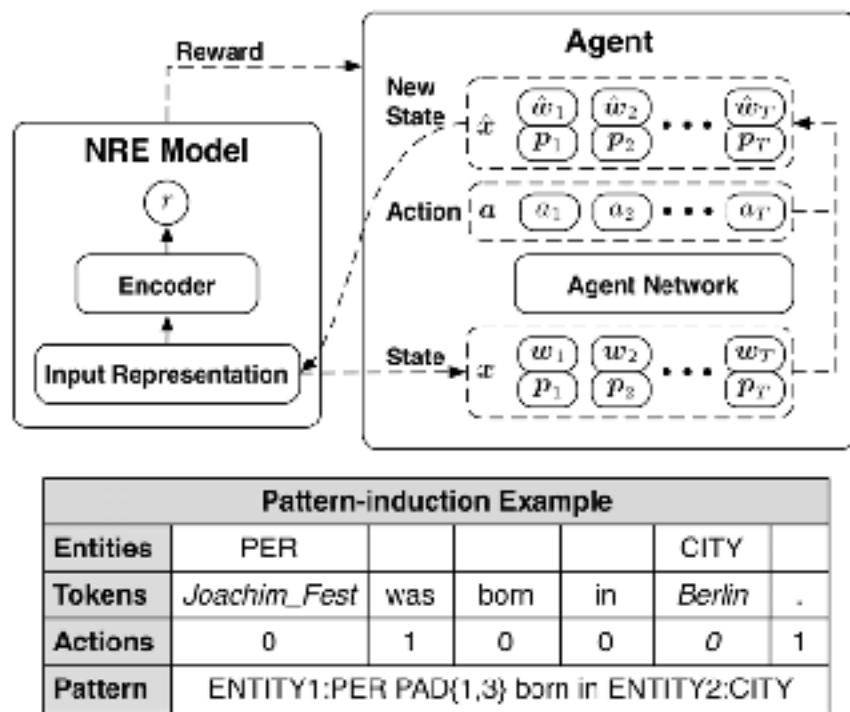
# 面向关系抽取的新型弱监督框架

关系抽取是知识图谱构建的关键任务，在近年来深度学习建模逐渐成熟的大背景下，如何为新的关系抽取任务快速构建高质量训练数据成为亟待解决的重要课题。现有的方案中，远程监督方法虽然通过匹配知识库和文本实现了自动标注，却有着难以忍受的标注噪声。近年涌现的弱监督融合方案通过引入基于模式的标注取得了一定的进展。然而，撰写模式这个高技能的要求阻碍了该方案的快速迁移和泛化。

为了推进关系抽取技术更好更快的落地应用，徐葳研究组提出一种新的弱监督学习范式 DIAG-NRE。该方案

首先利用强化学习从远程监督的噪声数据中自动总结模式。其后，领域专家只需要标注少量的模式匹配样本用于评估模式质量即可。通过让领域专家重新回归简单的标注工作，DIAG-NRE 可实现更轻量级且高效的弱监督学习。实验中，他们在两个大型公开数据集中的 14 个主流关系上验证了新方案的有效性，DIAG-NRE 以可解释的方式实现了模型性能的极大提升。

该成果研究论文：Shun Zheng, Xu Han, Yankai Lin, Peilin Yu, Lu Chen, Ling Huang, Zhiyuan Liu, and Wei Xu. "DIAG-NRE: A neural pattern diagnosis framework for distantly supervised neural relation extraction", In ACL, 2019.



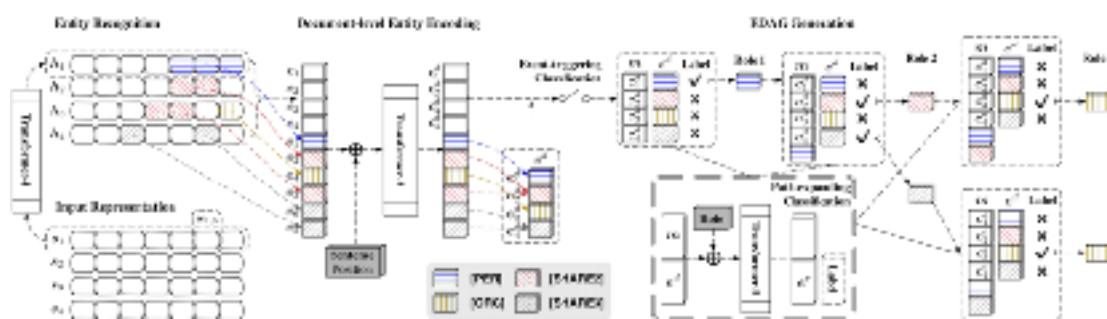
# 首次提出面向文档级别的端到端事件抽取模型

随着大数据、云计算等技术的发展，各行各业都涌现出面向文档的结构化事件抽取需求，比如：金融领域的上市公司风险事件抽取、法律领域的犯罪事实与判决抽取、医疗领域的病症和诊断抽取等等。然而，当前自然语言处理领域的学术研究仍然局限在对句子级别的专家标注数据建模，并且这些模型难以适配实际应用中的文档级别事件抽取需求。

面对这个学术研究与产业需求的巨大鸿沟，徐葳研究组首次提出文档级别的端到端事件抽取框架。该框架创新性的提出了基于实体的有向无环图结构，该结构将复杂困

难的表格填充任务分解为多个简单的自回归式路径拓展任务，在结合实体识别和事件触发分类的基础上实现了从文本序列到表格的端到端建模。此外，他们还基于中国上市公司的公告构建了一个大规模的文档级事件抽取数据集，在验证新方案有效性的同时也为学术领域填补了此方向的数据空白，为进一步的学术研究奠定了基础。

该成果研究论文：Shun Zheng, Wei Cao, Wei Xu, and Jiang Bian. "Doc2EDAG: An end-to-end document-level framework for chinese financial event extraction", In EMNLP, 2019.



### 三、高效率深度强化学习

主要完成人：张崇洁研究组（张崇洁、李斯源、王芮等）

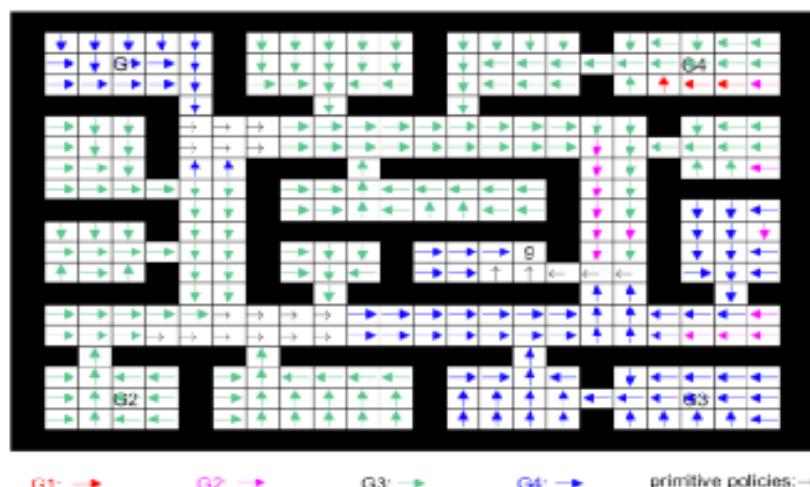
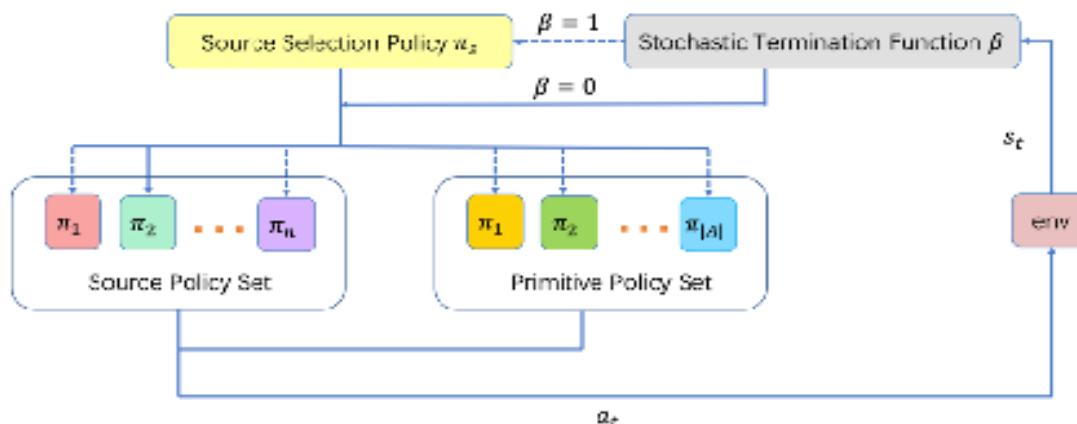
#### 基于情景感知的强化学习策略复用

强化学习在视频游戏以及机器人控制等领域都取得了巨大的成功，但是制约强化学习算法发展的一个很关键的问题是数据利用率。目前的强化学习算法都需要大量数据训练才能学习到一个优秀的策略。但是在一些实际的场景中，比如说自动驾驶，很难采集到海量数据进行训练。人类可以通过学习相关任务时获取的知识快速学习一个新的任务，在强化学习中，我们也可以利用类似的迁移方法来加快学习。

作为该领域的一项突破性进展，张崇洁研究组提出了一种新颖的策略迁移的方法，称为基于情景感知的策

略复用（CAPS）。他们的方法支持多策略复用，成功地学习了在什么情况下哪种源策略最适合复用，以及何时终止其复用。CAPS 可以为源策略选择和目标任务学习提供收敛性和最优性的理论保证。在网格巡航和视频游戏中的实验结果表明，CAPS 显著优于其他最新的策略复用方法，可以实现三倍于其他算法的数据利用率。

该成果研究论文：Siyuan Li, Fangda Gu, Guangxiang Zhu, and Chongjie Zhang. "Context-Aware Policy Reuse", International Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems (AAMAS), 2019.

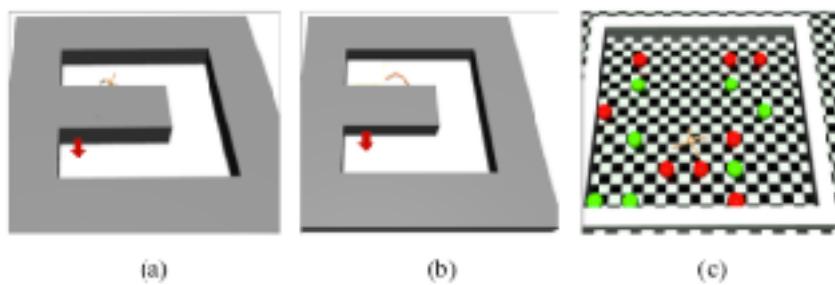
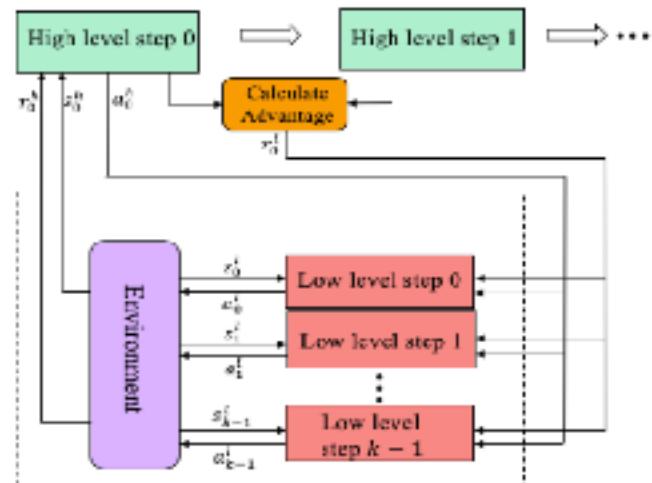


# 基于优势辅助回报的分层强化学习

现实生活中的任务大多是复杂和长程的，因此使用单一的策略很难实现良好的学习效果。分层强化学习是解决这类重要问题的一种有效方式。为了攻克分层强化学习中同步学习这一难题，张崇洁研究组首次提出了一个基于上层优势函数设计底层辅助回报的分层强化学习框架。这种辅助回报可以在不使用特定于任务的通用知识的情况下，高效、同步地学习上层和底层策略。更进一步，他们还从理论上证明，利用这种辅助回报来优化底层策略，将提高

联合策略的外在期望回报。实验结果表明，在物理仿真机器人环境中，他们的算法明显优于其他最新的分层强化方法，而且学习得到的上下层策略都是可迁移的。这一成果为分层强化学习的发展打下了坚实的基础。

该成果研究论文：Siyuan Li, Rui Wang, Minxue Tang and Chongjie Zhang. "Hierarchical Reinforcement Learning with Advantage-Based Auxiliary Rewards", Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS), 2019.



# 四、前沿架构与智能芯片

主要完成人：马恺声研究组（马恺声、张林峰、谭展宏、叶绍凯等）

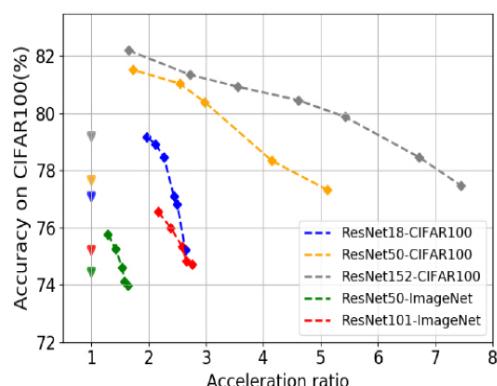
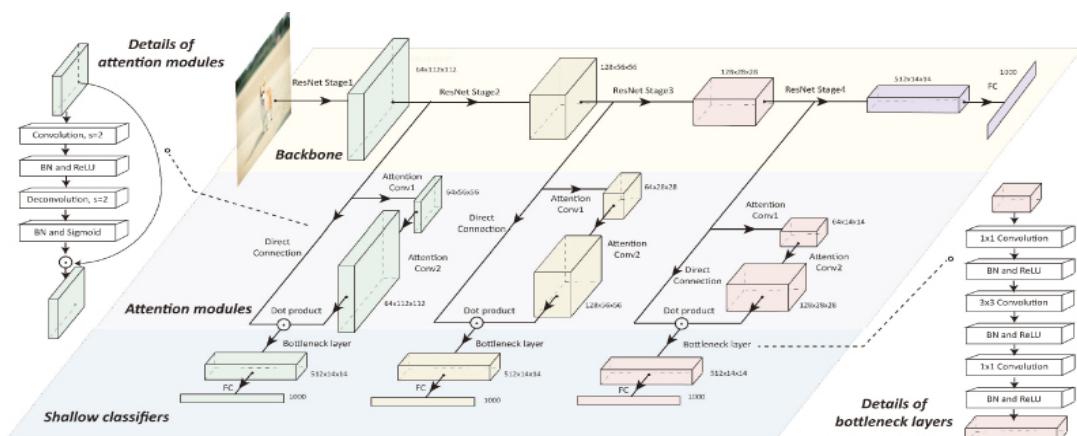
## 一种高效的可伸缩的神经网络

卷积神经网络近年来发展迅速，已经在计算机视觉、自然语言处理等多个领域上取得了突破性的进展。然而，以图像处理为例，卷积神经网络的运作方式与人类的认知过程还存在很大差别。人类的视觉系统对于容易识别的数据可以迅速给出预测结果，对于难以识别的数据则会在较长时间的思考后给出结果，以保证系统整体的响应速度与准确率。然而，卷积神经网络的计算图是固定的，对于不同识别难度的样本，其计算过程完全相同。

马恺声研究组提出了一种高效的、可伸缩的神经网络训练、预测框架。该框架可以帮助神经网络针对于当前输入的数据进行定制化的加速方案。在训练过程中，可伸缩神经网络将网络根据深度划分多组，设置多个分类器，以自蒸馏算法实现多分类器的训练。

同时，通过引入注意力机制，提高神经网络在浅层分类器的性能。在预测阶段，可伸缩神经网络由浅到深使用多个分类器进行预测，在预测结果的置信度大于一定阈值时，终止后续的预测过程，实现加速。同时，还使用遗传算法实现了高效的阈值搜索过程。最终，该算法可以在 ImageNet 数据集上在不损失正确率的前提下，实现 1.99 倍的加速效果。

该成果研究论文：Linfeng Zhang, Zhanhong Tan, Jiebo Song, Jingwei Chen, Chenglong Bao, Kaisheng Ma. "A Scalable Neural Networks Framework Towards Compact and Efficient Models", NeurIPS2019.



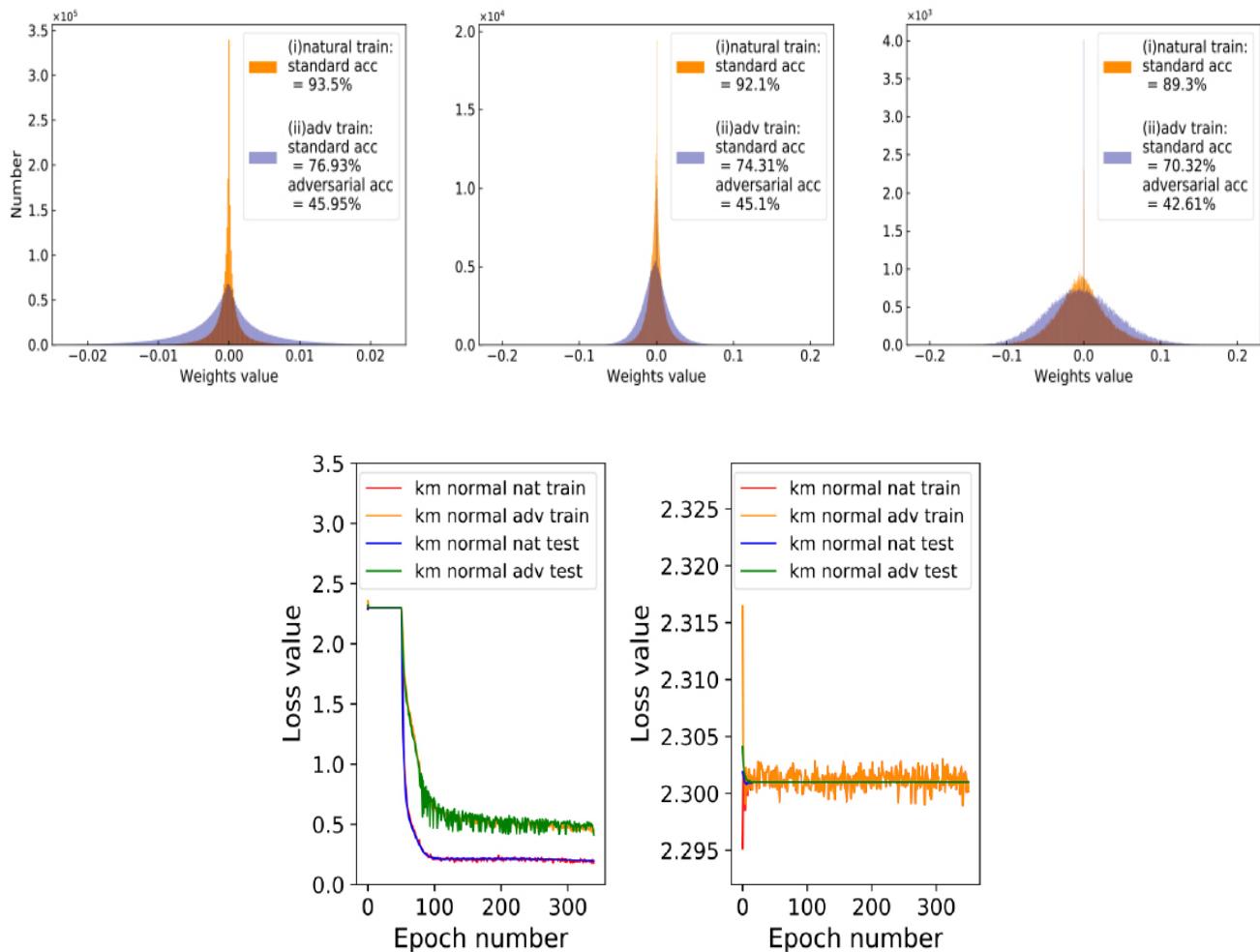
# 首次同时考虑了神经网络剪枝和鲁棒性共存

因为神经网络普遍存在的过参数化，使得将神经网络部署在终端十分耗费资源。通常人们会使用神经网络剪枝使得神经网络变得稀疏，以便于用在终端加速。然而，部署在终端的神经网络更有可能遭到被称为对抗攻击(adversarial attack)的侵害。模型压缩是否损害了模型的安全性？过去只以精度为指标寻找到的稀疏模型是否在对抗攻击下更加脆弱？

马恺声研究组发现，模型压缩和模型安全在某些情况下是互相矛盾的。小的模型无法实现有效的对抗训练，而大的模型又难以被部署在终端。

更进一步，该研究分析了在对抗训练的情景下，前人对于剪枝原理的理解很可能并不准确。该研究发现大的鲁棒模型被使用剪枝压缩后，效果胜于小的鲁棒模型。好的初始化，即便通过 lottery tickets hypothesis 得到的 winning tickets 并不足以使小模型得到和大模型比肩的初始化。该研究将会促使工业界和学术界更加重视在压缩模型的同时考虑模型的安全。

该研究成果论文：Shaokai Ye, Kaidi Xu, Sijia Liu, Hao Cheng, Jan-Henrik Lambrechts, Huan Zhang, Aojun Zhou, Kaisheng Ma, Yanzhi Wang, Xue Lin. "Adversarial Robustness vs Model Compression, or Both?", ICCV2019.



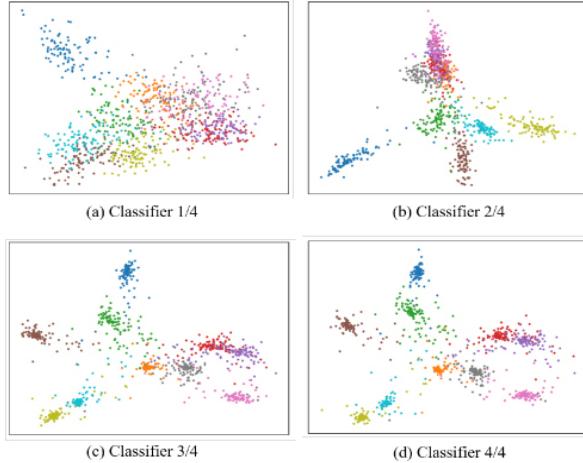
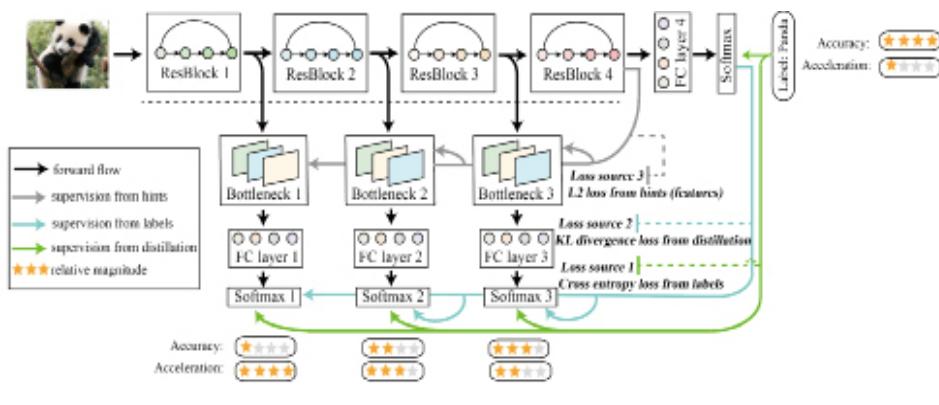
# 自蒸馏算法：一种新型的卷积神经网络训练方法

近年来，许多新型的卷积神经网络结构被不断提出，在部分视觉任务上甚至达到了超过人类的水平。然而，这样的模型往往具有庞大的参数量和计算量，在实际应用场景中，这给运载它的硬件设备带来了难以承受的负担。剪枝、量化等方法可以牺牲一定的模型识别准确率，换来压缩与加速效果。能否在对神经网络压缩加速的同时维持神经网络的识别准确率，甚至提高识别准确率，这一问题已经引起了学术界与工业界的共同关注。

马恺声研究组提出了一种新型的卷积神经网络训练算法 - 自蒸馏算法。该算法根据卷积神经网络的结构针对其训练过程进行改良。在训练过程中，自蒸馏算法将神经网

络按照深度划分为多个部分，每一部分设置基于瓶颈结构的分类器。在训练过程中，深层分类器作为教师模型，浅层分类器作为学生模型，前者预测的结果将会通过知识蒸馏的方法辅助后者的训练，实现网络内部的知识传递。实验结果显示，该方法在 VGG、ResNet、ResNeXt 等多种神经网络，CIFAR100、ImageNet 等多种数据集上均有显著效果。

该研究成果论文: Linfeng Zhang, Jiebo Song, Anni Gao, Jingwei Chen, Chenglong Bao, Kaisheng Ma. "Be Your Own Teachers: Improve the Performance of Convolutional Neural Networks via Self Distillation", ICCV2019.



# 五、分布式机器学习算法

主要完成人：黃隆波研究组（黃隆波、于跃等）

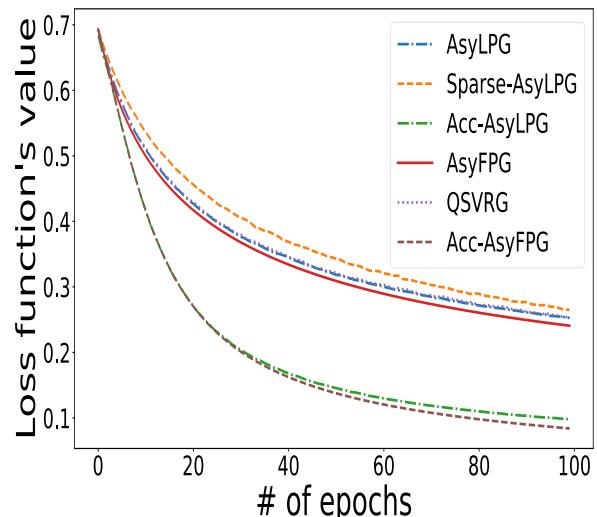
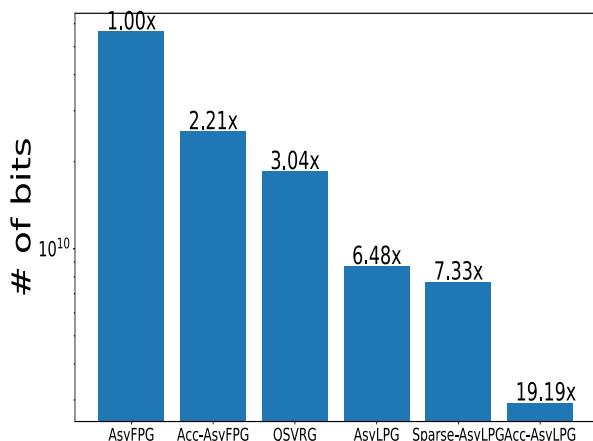
## 实现模型参数和梯度共同压缩的分布式算法

数据并行网络是一种广泛应用的分布式优化网络结构。近年来由于机器学习等应用场景的数据规模和模型复杂度的增加，数据并行网络受到广泛关注。它的基本原理是将耗时的梯度计算分解为多个子任务，并将这些子任务分配给多个机器执行，从而减少训练时间。然而，由于计算需要同步梯度，这种分布式训练在处理大的数据和模型时依然面临着很高的通信开销。

为了降低通信复杂度，黃隆波研究组提出了一种新的 double quantization 机制，该机制压缩了需要传递的模型参数和梯度，通过将全精度的浮点数转变为低精度的定点数表示降低存储的比特数，有效减少通信开销。基于 double quantization 机制，提出了异步算法 AsyLPG，

并分析了压缩带来的精度损失以及算法的收敛速率。在此基础上，该研究组研究了如何将 double quantization 与传统的稀疏化方法结合以及如何泛化到 momentum 加速算法。该成果验证了适度低精度的模型参数和梯度可以在保证训练准确度的前提下减少通信开销。通过在实际测试系统中的测试，展示了新算法在真实数据实验中能将通讯效率提高 2x-19x。

该成果研究论文：Yue Yu, Jiaxiang Wu and Longbo Huang. "Double Quantization for Communication-Efficient Distributed Optimization", Proceedings of the Thirty-third Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS), December 2019.



# 六、网络科学

主要完成人：徐葳研究组（徐葳、李艺）、吴文斐研究组（吴文斐等）

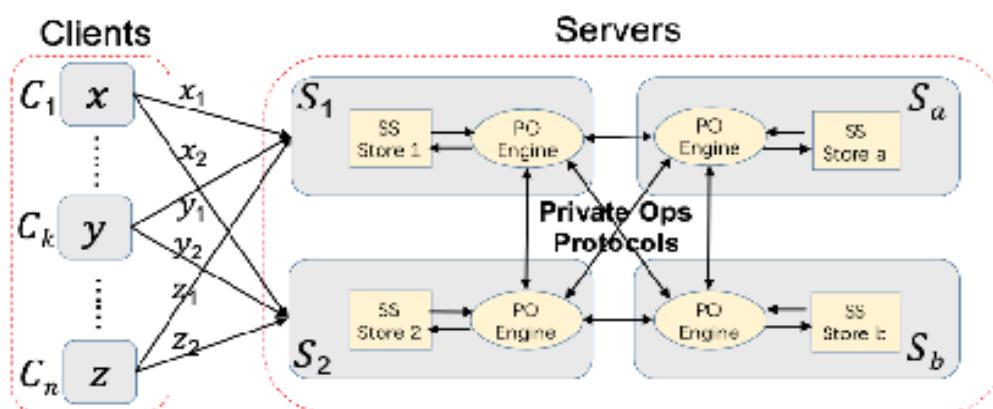
## 实现通用且高效的基于多方安全计算的数据挖掘框架

当今人们在不断探索如何从海量数据中挖掘出有效信息，但对于那种从多方采集数据进行数据挖掘的场景，隐私保护同样是一个很重要的话题。多方安全计算能使得数据拥有者们在不交换原始数据的情况下进行多方协同计算，达到既分项数据又不暴露隐私的目的。三十多年来，研究者们提出和优化了包括混淆电路和秘密分享在内的多种多方安全计算方法，已具备实际应用的潜力。同时学者们还提出了专用于多方安全计算的语言前端，方便非密码学领域的人使用，目前已引起了多个领域的关注。

徐葳研究组设计并实现了一种通用且高效的基于多方安全计算的数据挖掘框架。该框架使用一种全新设计的秘密分享协议，此协议基于秘密分享，能实现高效精确的通用计算，且相对既有的算法而言，该协议的通讯效率是目

前最高的，在计算效率上也因此是目前多方安全计算协议中最快的。协议中的很多参数都经过了系统的对比和仔细的挑选，最大程度地优化了性能。与此同时，该框架还提供与现在主流的数据挖掘编程语言——Python 兼容的编程前端，降低了使用者的门槛。此编程前端还首次提供了能在多方安全计算框架上运行的 Numpy 函数库，极大地方便了数据挖掘领域从业者的使用。该研究不仅给出了一个高效易用的多方安全计算框架的原型，而且指明了未来设计多方安全计算框架的方向。

该成果研究论文：Li, Yi, and Wei Xu. "PrivPy: General and Scalable Privacy-Preserving Data Mining", Proceedings of the 25th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining. ACM, 2019.



# 有状态网络功能的自动建模

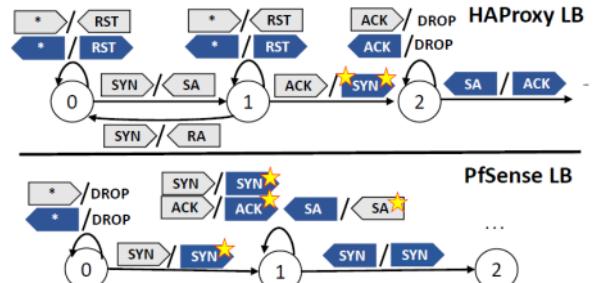
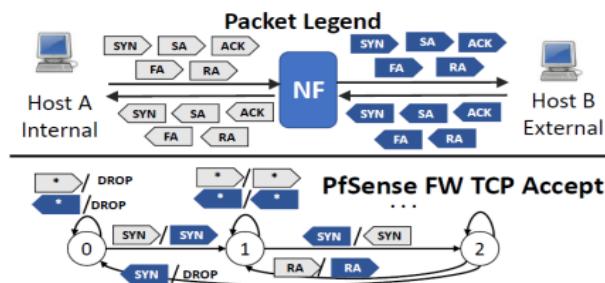
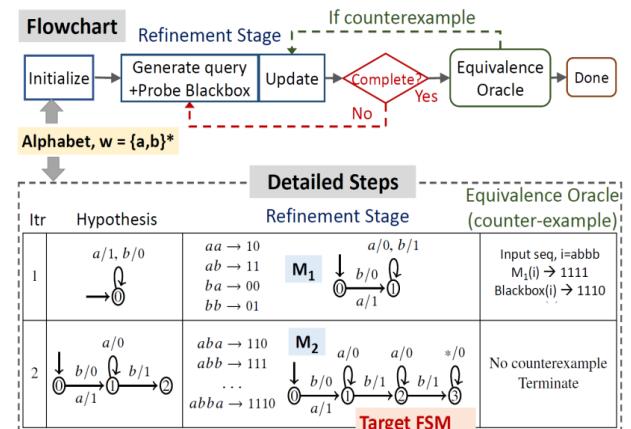
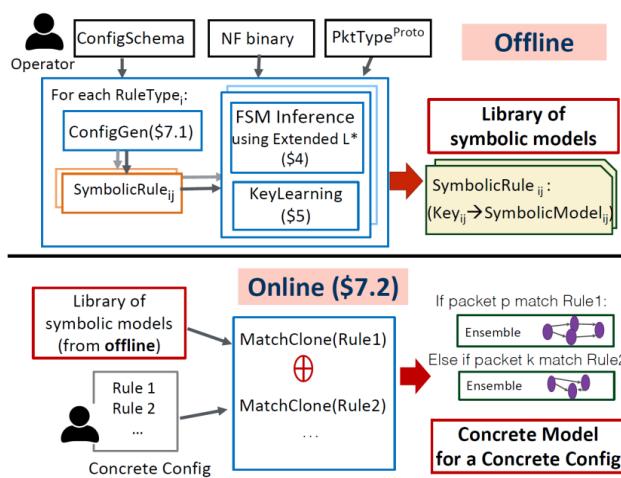
网络功能 (Network Functions, NF) 是一类部署于网络中能够增强其安全性和性能的软件。在网络管理中，网络管理员通常需要建立 NF 行为模型，并以此为基础推断网络全局的行为和网络用户的体验。因此，对一个 NF 建模的准确程度将直接影响网络管理的有效性。实际部署中，网络管理员从 NF 供应商采购黑盒 NF 软件，并不能直接的获得其行为模型，从而影响其网络管理效率。本研究工作的目标是给定一个黑盒 NF，自动、可信的建立其行为模型，该工作的系统被命名为 Alembic。

Alembic 通过三步完成一个 NF 的建模。第一步，对一个 NF 的配置文件进行分析，在子规则独立、每流状态独立的假设下，将其拆分为若干独立的子规则空间；

第二步，选取有代表性的子规则空间，系统地输入若干网络报文，并获取其输出报文，随后执行 L\* 算法，建立有限自动机模型；第三步，利用有限自动机理论中的有限自动机乘法，将子空间中的自动机融合为完整的、能描述 NF 行为的有限自动机。

利用 Alembic，吴文斐研究组完成如下应用：1、验证 NF 供应商所交付的 NF 是否符合标准；2、对接网络验证工具，提供全网验证服务。图 1、2、3、4 分别展示了 Alembic 的系统流程、内核算法、和两个实验结果。

该成果研究论文：Soo-Jin Moon, Jeffrey Helt, Yifei Yuan, Yves Bieri, Sujata Banerjee, Vyas Sekar, Wenfei Wu, Mihalis Yannakakis, Ying Zhang. "Alembic: Automated Model Inference for Stateful Network Functions", NSDI 2019.



# 七、计算经济学

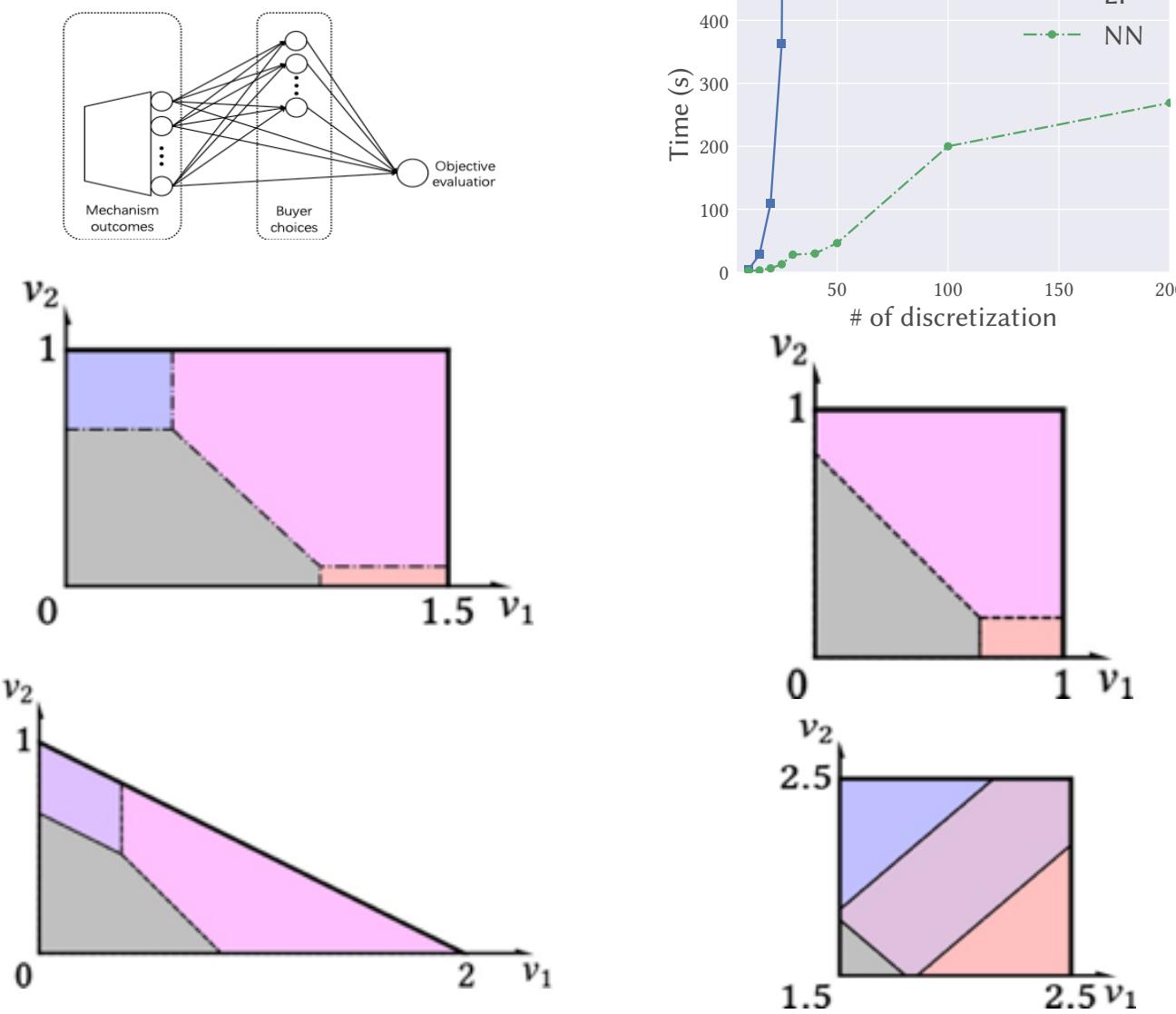
主要完成人：唐平中研究组（唐平中、沈蔚然、陈梦静等）

## 使用神经网络进行自动最优机制设计

在线广告拍卖是百度、谷歌等在线广告平台的主要变现方式，拍卖机制设计也是计算机与经济学交叉领域的核心课题之一。尤其是多物品拍卖的最优机制问题，几十年来一直是该领域的理论难题，传统的分析方法存在设计空间太大，优化困难等挑战。

唐平中研究组提出采用神经网络进行自动最优机制设计的思路，成功应用于多物品、单买家的情形，并得到多种分布下的理论最优机制，部分结果为世界首次发现。该研究采用双网络设计，即机制网络和买家网络，并利用经济学中的显示原理和税收原理，在赋予网络强解释性的同时，大幅简化网络。该研究的有趣之处在于，神经网络输出的数值结果，可以指导研究者进行理论分析，从而得到问题的闭式最优解。

该成果研究论文：Weiran Shen, Pingzhong Tang, Song Zuo. "Automated Mechanism Design via Neural Networks", AAMAS 2019.



# 利用动态定价实现快车平台最优调度

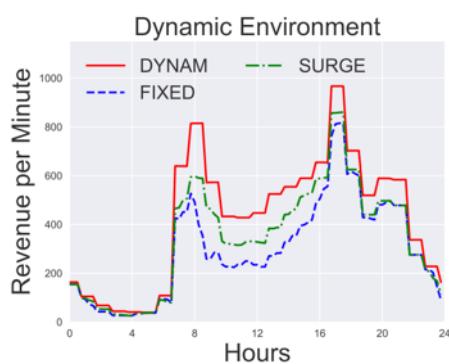
近年来，共享出行作为一种新兴的交通方式已经被大众广泛接受。与传统交通方式相比，共享出行有效地利用闲置交通资源，缓解交通拥堵，但同时共享出行实时调度、动态调价的特点也对共享出行平台提出了前所未有的挑战。不同于现有的共享快车调度算法，唐平中研究组利用经济学方法，通过订单价格指导车辆调度，从而计算出利益最大化的车辆调度和定价策略。

从共享出行平台角度考虑，平台希望通过车辆调度和订单定价手段实现市场利益、社会效益或吞吐量最大化。这个优化问题往往被建立成经典的马尔可夫过程(MDP)问题，其优化目标通常是一个复杂的非凸函

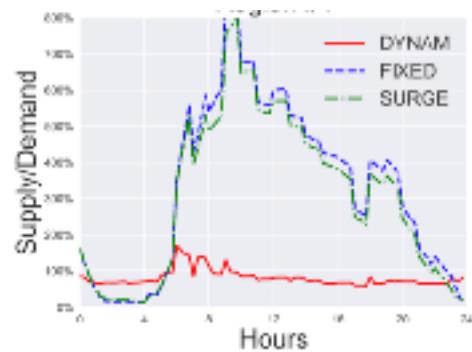
数。唐平中研究组根据问题特点，将原问题的价格变量转化为车流变量，并借用“ironing”技术和经济学中的随机定价，把目标函数转变为关于车流变量的凸函数，从而原MDP问题被简化成凸函数问题，降低问题复杂度。

在实际数据集上模拟，唐平中研究组的最优动态随机定价策略不仅在比传统定价和“峰时定价”获取更多收益，而且也表现出更好的平衡供需的能力。

该成果研究论文：Mengjing Chen, Weiran Shen, Pingzhong Tang, Song Zuo. "Dispatching Through Pricing: Modeling Ride-sharing and Designing Dynamic Prices", IJCAI 2019,



平台收益



某区域供需关系比

# 八、能源经济学

主要完成人：吴辰晔、于洋研究组（吴辰晔、于洋、王魁、汪至祺等）

## 共享经济在电力领域中的应用

共享经济正在深刻改变我们生活的方方面面，那么，共享经济是否可以进一步推动传统产业升级，释放更多的改革红利呢？吴辰晔研究组针对共享经济在电力领域的应用，进行了深度挖掘，吴辰晔在此领域的首篇论文（与加州大学伯克利分校的 Kameshwar Poolla 教授，Pravin Varaiya 教授等人合作），今年正式在 IEEE Transactions on Smart Grid 见刊，见刊仅数月，已经被认定为 ESI 高被引论文。

该篇论文针对工业园区场景进行建模，考虑园区中的企业在面对二阶段分时电价时，如果更好的利用储能设备，降低用电成本。论文指出，对于有意购买储能设备降低用电成本的企业，长期与其他企业共享储能设备可以获得更高的收益，并设计了针对共享储能设备的共享市场机制。然而，由于电力共享受到各类物理约束条件的限制，这使得共享市场相关的各类博弈模型均展现出非凸特性。论文为解决此困难，识别了市场均衡存在的充分条件，并证明了在此条件下，市场均衡

是唯一存在的，且可以使整个系统获得最大的收益。

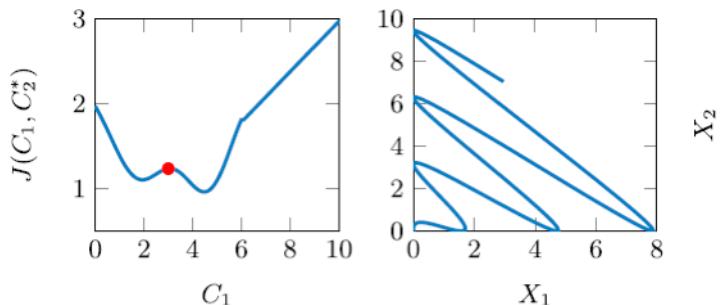
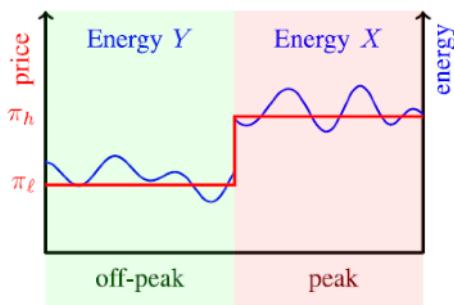
吴辰晔、于洋研究组在此基础上，分别针对三阶段分时电价、单峰分时电价、动态电价等多种不同场景进行拓展，设计储能设备使用的最优策略，以及相关的共享市场机制，目前已有多篇论文再投。

相关文献包括：

[1] Dileep Kalathi, Chenye Wu, Kameshwar Poolla, Pravin Varaiya. "The sharing economy for electricity storage", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 10, No. 1, pp. 556-567, 2019, ESI Highly Cited Paper!

[2] Kui Wang, Yang Yu, Chenye Wu. "Optimal Electricity Storage Sharing Mechanism for Single Peaked Time-of-Use Pricing Scheme", in submission to IEEE Transactions on Smart Grid, initial submission: Aug. 2019.

[3] Zhiqi Wang, Kui Wang, Yang Yu, Chenye Wu. "An Algorithmic View on Optimal Storage Sizing", in submission to IEEE ISGT NA 2020.



# 九、理论计算机科学

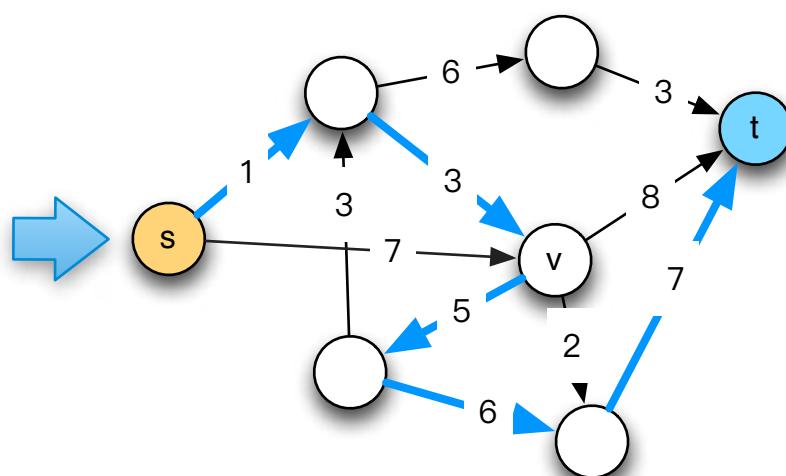
主要完成人：段然研究组（段然、金策、武弘勋、任瀚林、辜勇）

## 所有点间非递减路径问题的更快算法

在有权图上，非递减路径（Nondecreasing Path）是指路径上的边的权值形成一个非递减的关系（如图）。就像在列车时刻表中寻找一种有效的换乘方式使得能够最快到达，一条非递减路径的权值定义为其最后一条边的权值，所以段然研究组希望在每两点间找到权值最小的非递减路径（All-Pair Nondecreasing Path, APNP）。Virginia V. Williams 给出了第一个低于立方时间的 APNP 算法，其时间复杂度为  $\tilde{O}(n^{(15+\omega)/6}) = O(n^{2.896})$ ，其中  $\omega < 2.373$  是矩阵乘法的时间复杂度的指数。去年段然助理教授与研究生章乐、辜勇同学合作发表的论文将这个复杂度改进为  $\tilde{O}(n^{2+\omega/3}) = O(n^{2.791})$  以及  $O(n^{2.78})$ 。因为每两点间瓶颈路问题（All-Pair Bottleneck Path, APBP）可以规约到双层二分图上的 APNP 问题，而目前 APBP 问题的复杂度为  $\tilde{O}(n^{(3+\omega)/2}) = O(n^{2.686})$  [Duan & Pettie 09]，这两个问题是否有相同的复杂度就成了非常有趣而困难的问题。

段然助理教授与计科 81 班武弘勋和计科 60 班金策合作发表的论文将有向图的 APNP 问题的算法时间复杂度改进到  $\tilde{O}(n^{(3+\omega)/2}) = O(n^{2.686})$ ，达到了与 APBP 相同的复杂度，该论文已发表在欧洲理论计算机会议 ICALP 2019。非递减路径问题比其它路径问题的难点在于一条最优（最后一条边最小）的非递减路径的子路径（subpath）不一定是最优的，所以不能简单地将两条路相拼。我们的算法更加精细地设计了分层递归，使得在分块矩阵越来越多时总复杂度不会一直上升。这篇论文还给出了无向图上  $\tilde{O}(n^3)$ -时间的 APNP 算法，也在  $\log n$  因子内达到了最优。

该成果研究论文: Ran Duan, Ce Jin, Hongxun Wu. "Faster Algorithms for All Pairs Non-decreasing Paths Problem", in the 46th International Colloquium on Automata, Languages, and Programming (ICALP '19).



## 高效的多点失效时近似最短路数据

边或点失效时图上的最短路问题是数据结构领域的一个经典难题。因为动态最短路问题目前没有  $O(n^2)$ - 维护时间的数据结构，边或点失效模型（ $d$ -failure model）就更加重要。在这个模型上，对于一个图段然研究组希望建造一个静态的  $\tilde{O}(n^2)$ - 空间的数据结构使得当给定点  $s, t$  和一个点集  $D$  时，数据结构能够快速地回答从  $s$  到  $t$  并且不经过所有  $D$  中的点的距离。对于  $|D|=1$  的情况，已经有空间为  $O(n^2)$  查询，时间为  $O(1)$  的数据结构 [Demetrescu et al. 08, Duan & Zhang 17]；当  $|D|=2$  时，可以做到  $O(n^2 \log^3 n)$ - 空间和  $O(\log n)$ - 时间 [Duan & Pettie 09]，但是思路远远复杂于一点失效时的情况，所以这样的结构很难扩展到  $|D|>2$  的情况。对于  $d$  条边失效时的无向图上的  $(1+\epsilon)$ - 近似最短路，Chechik et al. 在 2017 年给出了空间为  $O(n^2 (\log n / \epsilon)^d \cdot \log W)$  的数据结构，查询时间为  $\tilde{O}(d \cdot \log \log W)$ ，这里边权在  $[1, W]$  范围内。但是因为一个点可能邻接  $O(n)$  条边，无向图上的点失效数据结构要达到这样的复杂度，就会远远复杂于边失效时的情形。最近段然助理教授与计科 60 班任瀚林和研究生辜勇合作给出了第一个  $d$  个点失效时无向图上近似最短路数据结构，其空间为  $n^{2+1/c} \cdot \log W \cdot (\log n / \epsilon)^{O(d)}$ ，查询时间为  $\tilde{O}(d^{2c+6} \cdot \epsilon^{-1} \cdot \log \log W)$ ，其中  $c$  为任意正整数。

该成果研究论文：Ran Duan, Yong Gu, Hanlin Ren. "Approximate Distance Oracles Subject to Multiple Vertex Failures", in submission.

# 量子信息



# 一、量子计算

主要完成人：段路明研究组（段路明、黄园园等）

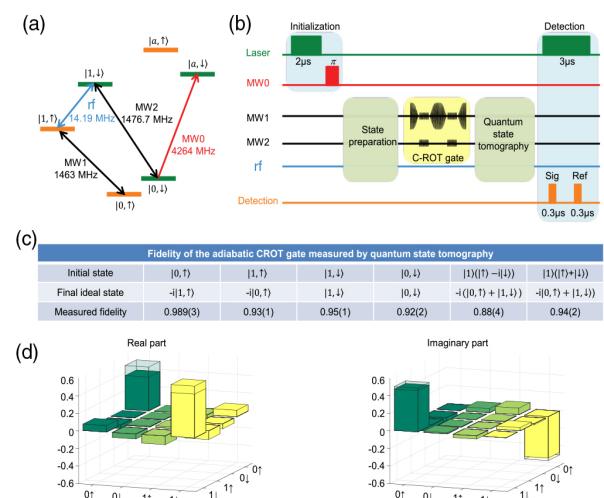
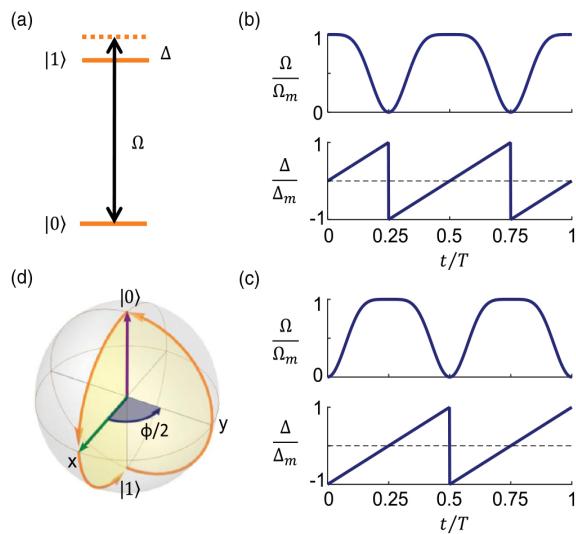
## 在实验中利用固态自旋实现鲁棒的几何量子门

制备一组通用的量子逻辑门是实现量子计算机的最根本要求，基于几何相位实现的量子逻辑门对噪音具有抗干扰性，引起人们广泛关注。目前，使用非绝热方法已经在多个量子系统中实现通用几何量子门，但非绝热演化缺乏对参数变化的鲁棒性，因此需要通过绝热演化来实现一组通用几何量子逻辑门。

通过绝热的控制金刚石缺陷中的固态自旋，段路明研究组在实验中实现了一组通用的单比特及两比特几何量子门。相比于非绝热方法，几何量子计算的绝热方案有其独特的优势，那就是对于参数变化的鲁棒性，这一点在实验室也得到了精准的证明，当驱动场强改变两倍或者驱动场。

失谐项在逻辑门时间逆的范围内振动时，单比特门几乎没有变化。绝热控制技术及其便捷的操作为通过鲁棒几何量子门来实现量子计算提供了很好的模型，这对于存在类似非均匀耦合或者频谱扩散等参数波动噪音的量子信息系统非常重要

该成果研究论文：Huang Y Y, Wu Y K, Wang F, Hou P Y, Wang W B, Zhang W G, Lian W Q, Liu Y Q, Wang H Y, Zhang H Y, He L, Chang X Y, Xu Y and Duan L M. "Experimental realization of robust geometric quantum gates with solid-state spins", Physical Review Letters, 2019, 122(1): 010503.



## 二、量子模拟

主要完成人：段路明研究组（段路明、连文倩等）

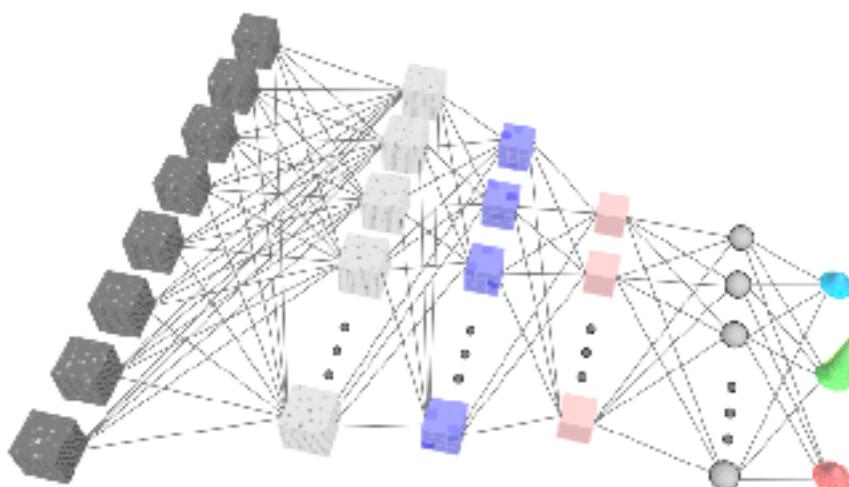
### 机器学习拓扑相在固体量子模拟器中的实验实现

拓扑相的发现改变了现代人们对物质量子相的理解。与传统相不同，拓扑相不符合对称性破缺的范例，相反地，每个对称类中可能有着不同的拓扑相。在实验中，拓扑相的识别通常依赖于测量具有拓扑起源的某些具体参量。例如，为了识别三维 Z2 拓扑绝缘体 (TIs)，可以测量其鲁棒的表面态（如 Dirac 锥）。然而，对于其他拓扑相，提供一个明确的实验上的识别量在技术上是有挑战性的。

机器学习，或者更广泛地说人工智能，为解决这些挑战提供了新的有希望的方案。事实上，它的思想和技术最近已在凝聚态物理学中进行了探索，为机器学习物质的相开辟了一个新的研究前沿。特别是利用监督学习来识别拓扑相的理论方案的提出，在多个领域引起了相当大的关注。该方法的一个显著优点是，神经网络可以直接从局域观测量的原始数据（如自旋结构或局域相关）训练来检测拓扑相，即便拓扑性质具有内在的非局域性。尽管有这些令人兴奋的理论进展，机器学习在研究物质的量子相，特别是拓扑相方面的能力，还没有在实验室中得到证明。

本文中，段路明研究组合作进行了一个实验，验证了神经网络可以被训练来成功的识别拓扑相，即使只用非常少的一部分实验生成的原始数据。利用金刚石氮空位 (NV) 色心的电子自旋，建立了三维手性拓扑绝缘体的哈密顿量模型，并通过量子态层析法得到了动量空间中相应的单粒子密度矩阵。利用实测密度矩阵作为输入数据，研究人员发现一个经过训练的三维卷积神经网络 (CNN) 能够正确识别不同的拓扑相。他们强调这种方法只需要一小部分的数据量，这将大大降低实际实验的成本。实验结果验证了机器学习方法研究拓扑相的可行性，为利用机器学习工具箱对奇异量子相位进行实验检测打开了大门。

该成果研究论文: W.-Q. Lian, S.-T. Wang, S.-R. Lu, Y.-Y. Huang, F. Wang, X.-X. Yuan, W.-G. Zhang, X.-L. Ouyang, X. Wang, X.-Z. Huang, L. He, X.-Y. Chang, D.-L. Deng and L.-M. Duan."Machine learning topological phases with a solid-state quantum simulator", Phys. Rev. Lett. 122, 210503(2019).



### 三、量子纠缠

主要完成人：金奇奂研究组（金奇奂、路尧、张帅宁等）、魏朝晖研究组（魏朝晖）

#### 实现任意离子量子比特上的可扩展全局纠缠门

近年来，围绕量子计算与量子模拟的相关量子技术发展已取得诸多重要进展，对于量子系统控制的规模和精确度日益提升，使得量子计算机的实现不再遥不可及。这也正是寻找并填补实现实用性量子计算方法和技术缺失的良好时机。原则上，在量子线路模型下，任何通用量子计算任务都可以分解为一系列单量子比特门和双量子比特纠缠门的组合。然而这种分解所得到的量子线路往往并不是最高效的。某些算法或模拟所需要量子门，特别是双量子比特纠缠门的数量，会随着研究问题的规模增长呈指数量级的增加。因此，建立更高效的多量子比特纠缠操作的方法对于实现实用量子计算必不可少。理论研究中，已有许多研究人员指出了多量子比特纠缠门，特别是其中的全局纠缠门的必要性和实用意义；但在实验领域，目前尚无全局纠缠门的可扩展方案提出。

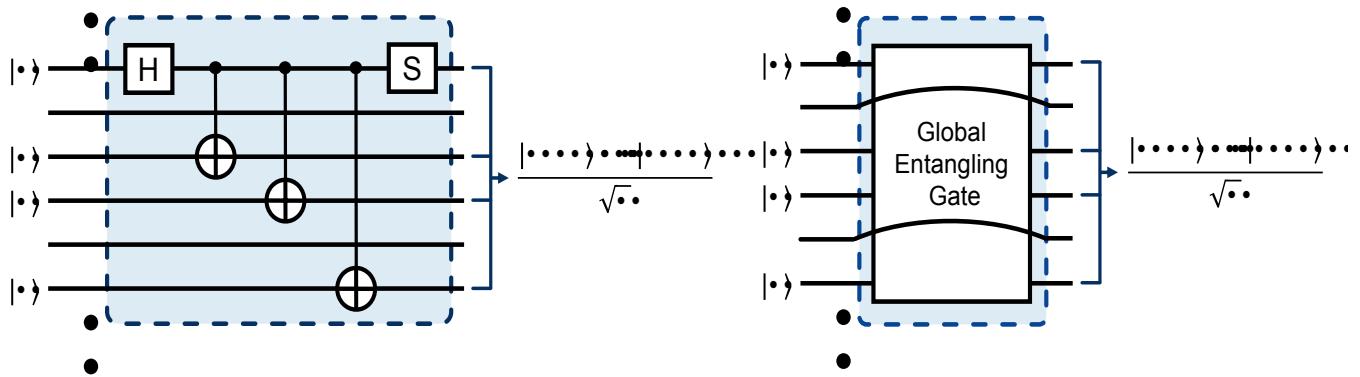


图 1 全局纠缠门可以有效的对量子线路进行化简。图中示例为作用在选定四个量子比特上的全局纠缠门。为了制备四量子比特最大纠缠态，传统量子电路一般需要至少三步双量子比特纠缠门。使用全局纠缠门则仅需一步即可实现所有量子比特的最大纠缠。

本研究提出了一种基于离子阱系统的全局纠缠门实现方案，并在实验系统中对该方案进行了演示与性能测试。本研究所提出方案的关键在于优化与调制激光脉冲的强度和相位，以均匀地驱动所有量子比特间的相互作用。该方案具有良好的可扩展性，可用于未来的大规模量子计算。本研究成功开发完成四量子比特的小规模通用量子计算系统，并基于该系统，在实验上演示了多达四量子比特的全局纠缠门。为了对全局纠缠操作进行基准测试，该团队利用四比特全局纠缠门一步制备了四量子比特的最大纠缠态，并通过保真度测量证明最终的量子纠缠远超过经典边界。与离子阱系统中传统的双比特纠缠门相比，该全局纠缠门有着与其基本相同的操作时长，意味着利用全局纠缠门不仅仅能够减小量子线路的深度，也能够真正缩短线路的运行时间。全局纠缠门的实现方案的建立和良好的实验测试结果表明，多量子比特纠缠门有望成为大规模通用量子计算系统的重要组成部分。

该成果研究论文：Yao Lu, Shuaining Zhang, Kuan Zhang, Wentao Chen, Yangchao Shen, Jialiang Zhang, Jing-Ning Zhang, Kihwan Kim. "Global entangling gates on arbitrary ion qubits", Nature 572, 363 (2019).

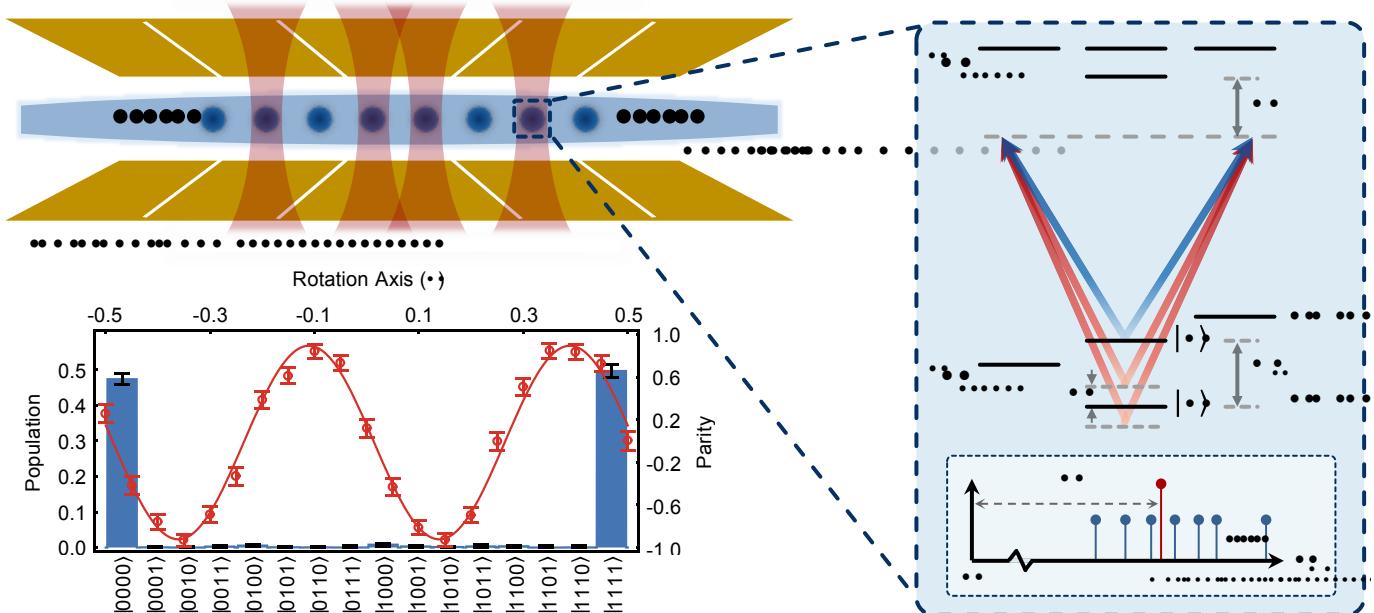


图 2 全局纠缠的实验实现。左上图为基于离子阱的通用量子计算系统示意图。左下图为实验中制备的四量子比特最大纠缠态。

# 对量子纠缠的半设备无关解析定量估计

量子纠缠是量子计算的关键资源，因此对它的理论刻画和实验制备都是该领域的核心研究任务。但是，由于量子纠缠的本质特征和量子实验设备的有限精确度，在实验室对未知量子态的纠缠进行可靠的验证是不容易的事情，可靠的量化估计更是非常困难。为了实现纠缠实验探测的高可靠性，设备无关是一个非常有希望的方法。它的基本想法是基于该量子态完成贝尔实验，然后利用非定域性来判断纠缠的状况。有趣的是，这种判断只需要量子测量提供的经典信息，量子设备的低精度可以不影响结果的可靠性，这个宝贵的性质让此想法很适合被用来对量子纠缠进行可靠验证甚至定量估计。

但是，常见的已有结果是基于非领域性的数值模拟，少有解析的分析，解析的结果更利于我们看到问题的本质，也利于实验采纳。难以给出解析结果的核心原因是

量子关联集合的复杂几何结构，例如非凸，导致较难基于贝尔不等式做出解析的分析。本结果为了解决此问题，提出了非简并贝尔不等式的概念，这种贝尔不等式的共同特征是两个正交的量子态不能用同样的一组量子测量实现接近最大的贝尔不等式违背。该定义为相关问题的研究提供了全新的角度。非简并的这种特征可以用来估计未知量子态的纯度，这是之前不能解析分析的核心困难，从而实现对纠缠度的解析定量估计。并且，这种定义是合理的，可以证明一些常见的贝尔不等式符合此定义。我们预期此解析的结果可以帮助我们在一定程度上改善在量子实验中对纠缠进行定量估计的困难。

该成果研究论文：Zhaohui Wei. "Analytic Semi-device-independent Entanglement Quantification for Bipartite Quantum States", arXiv:1903.05303.

# 四、量子通信 & 密码

主要完成人：段路明研究组（段路明、蒋楠等）、马雄峰研究组（马雄峰、周游、马家俊、赵琦等）

## 首次实现可载 105 量子比特的随机存取量子存储器

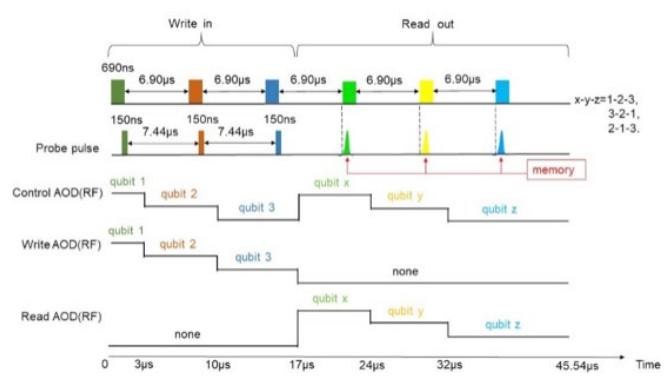
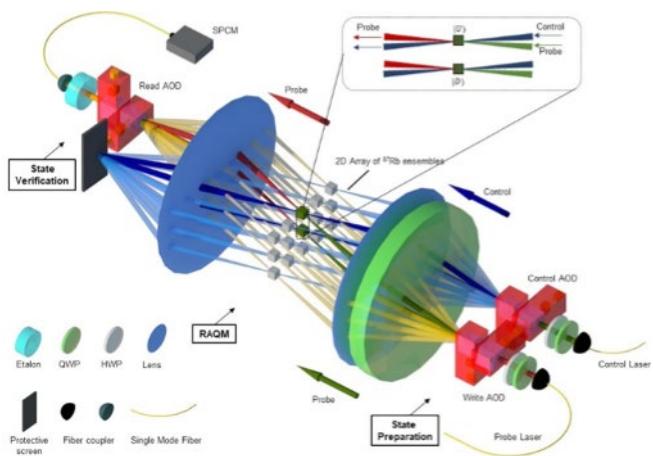
为了实现量子计算和量子通信，具有随机存取性能的量子存储器是非常重要的。这种量子存储器可以同时存储多个量子比特、对存储单元中的量子比特独立寻址，而且对每个存储单元可编程访问。它的物理实现是利用量子中继完成远程量子通信中关键的一环。

量子存储器的写入和读出操作需要在载体上的量子比特和中继器存储的量子比特之间实现良好的量子接口。较为简便的量子接口的实现，是基于原子系综中集体增强效应引起的与信号光脉冲的直接耦合。同时，在原子系综中使用空间模式、时间模式、或角度方向上的多路复用可以非常有效地提高存储器容量。最近的实验，已经通过空间模式的多路复用，在原子系综中实现了几百个存储单元，但仍未证明外部量子信号的随机存取过程。实现一个可编程、且能控制每个单独量子信号的随机存取量子存储器依旧是一个挑战。

段路明研究组近日在可载 105 个量子比特的原子量子存储器中实现了随机存取。在这个存储器中，双轨路径表

示一个量子比特。光量子比特由相邻的弱相干脉冲的两条路径携带。一对相邻位置的存储单元用于存储进入的光量子比特。105 对存储单元的存取保真度都在 90% 以上，大大超过了经典界限，它们之间的串扰误差可忽略不计，这就证实了量子存储过程。该研究组展示了三个量子比特的随机存取过程。通过原子系综与信号光脉冲的耦合，将光量子比特写入多路复用量子存储器中，经过一段可控的存储时间后，再以任意顺序将量子比特读取出来。该研究组测量了随机存取过程的效率和保真度，并证明其保真度远超经典界限。这种大容量的原子量子中继器，在具有随机存取特性后有助于实现多路量子中继器网络，以期未来实现长程量子通讯、光量子网络和需要存储组件的量子计算。

该研究成果论文：N. Jiang, Y.-F. Pu, W. Chang, C. Li, S. Zhang, and L.-M. Duan."Experimental realization of 105-qubit random access quantum memory", npj Quantum Information 5,28(2019).



## 对称多体可观测量的有效拆分

多体量子态的制备与检验是量子信息处理中的关键一步。在实际系统中，一般而言，刻画实际制备的量子态与理想目标态之间的保证度，描述实际多体系统的结构，随着系统数的增加而变得困难。而如果对所制备量子态拥有一定的先验知识，特别是对称性的信息，该问题的难度则可能显著降低。

在描述多体量子纠缠系统问题上，马雄峰研究组提出了一种对具有系统置换对称性的多体可观测量进行有效拆分的方法。对于  $N$  个量子比特的系统，该方法只需  $(N+1)(N+2)/2$  个局域测量即可完成。在此基础上，该拆分方法可用于评估未知制备量子态与任一置换对称目标态之间的保真度。此外，对于一些典型的置换对称态，例如 Dicke 态，Greenberger-Horne-Zeilinger 态，W 态，该工作证明了局域测量数量下界为关于量子比特数的线性关系  $\Theta(N)$ ，而利用所提出的拆分方法对此类态的居于测量数可进一步提升为关于  $N$  的线性关系式，从而证明拆分方法对该类态为最优。

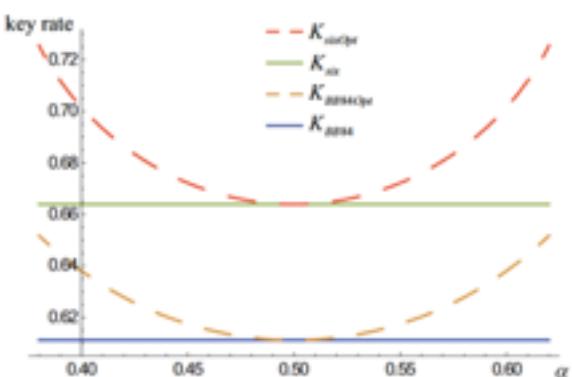
该成果研究论文：You Zhou, Chenghao Guo, and Xiongfeng Ma, “Decomposition of a symmetric multipartite observable”, Phys. Rev. A, 99, 052324 (2019).

## 量子相干性在量子密钥分发中的操作含义

量子相干性作为反映量子叠加效应的一种资源，近期得到了深入的研究，其操作含义在量子测量，量子随机数，量子热力学等任务中得到了广泛的研究。以量子随机数为例，不同相干性的度量（相对熵，Convex hull）直接反映了量子测量结果相对于量子或者经典 Eve 环境下的随机性。然而，量子相干性在两体的量子密钥分发中起到的作用仍然不清楚。

基于量子相干性的工作，马雄峰研究组研究了量子密钥分发协议 (QKD) 中密钥的安全性和量子相干性之间的关系。基于量子相干性的资源理论，工作中系统地分析了如何将系统的相干性度量和 QKD 的安全性联系在一起。该工作通过分析基于纠缠的 QKD 中在 Eve 进行联合攻击 (collective attack) 下的 Alice 和 Bob 测量相干性，给出了 BB84 协议和六态协议的密钥生成率。基于新的密钥生成率公式，该工作展示了在探测器效率失配的环境下对于以前的 Devetak-winter 密钥率公式的改进。

该成果研究论文：Ma J, Zhou Y, Yuan X, et al. "Operational interpretation of coherence in quantum key distribution", Physical Review A, 99(6): 062325(2019).

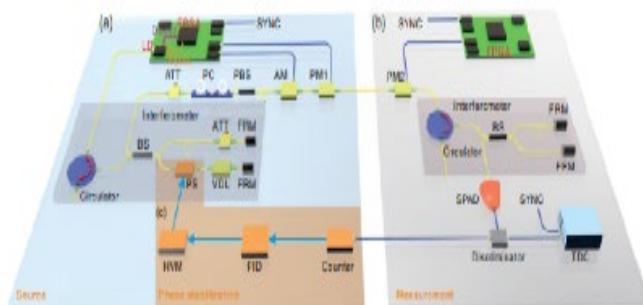


# 利用不可信测量设备的量子相干性验证

相干性是量子信息处理中的一种基本资源，在实际中可以通过相干性验证进行检验。由于实际测量设备的不完美性，通常的相干性验证在实际实验中可能导致错误的验证结果。如何克服测量设备的不完美性，在基于量子相干性的量子信息处理任务中至关重要。

马雄峰研究组与中国科学技术大学潘建伟课题组合作，提出并实验实现一种新型的测量设备无关量子相干性检验方法。该工作对量子比特情形进行了详细讨论，设计了一种利用可信辅助量子态的测量设备无关方案，通过数值模拟说明了进行量子相干性验证的可行性。基于该方案，利用时间区间编码光学系统进行了实验展示，并将诱骗态方法引入到实验，显著提升分辨相干量子态的能力。

该成果研究论文：You-Qi Nie, Hongyi Zhou, Jian-Yu Guan, Qiang Zhang, Xiongfeng Ma, Jun Zhang, and Jian-Wei Pan. "Quantum Coherence Witness with Untrusted Measurement Devices", Phys. Rev. Lett., 123, 090502 (2019).

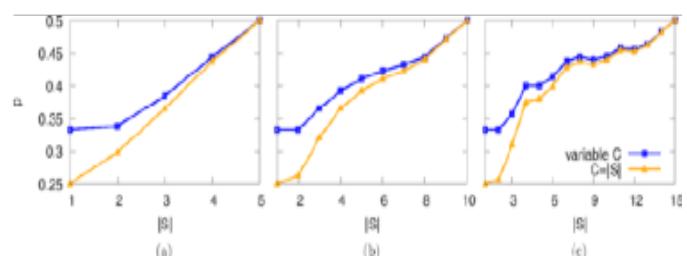


# 高效且鲁棒地探测多粒子类 GHZ 态的方法

纠缠是实现量子信息处理的一类重要资源。检测纠缠的一种广泛使用的手段是纠缠检验，而在这个过程中保证对于所有可分离态，检验算子的测量结果都为正，对于某些纠缠态的测量结果则为负。在实际中，由于希尔伯特空间维数相对于系统尺寸呈指数级增长，使得构建一个有效的多粒子纠缠态的纠缠检验方案是一个非常具有挑战性的问题。对于  $N$  个粒子的类 Greenberger-Horne-Zeilinger (GHZ) 态，最鲁棒的检验方案需要  $N+1$  个局域测量，并且可以容许高达  $1/2$  的白噪声。与之相对的，同样对于类 GHZ 态，最有效的检验方案只需要 2 个局域测量，并且可以容许达  $1/3$  的白噪声。在方案最优的实现效率、测量数量和检验的鲁棒性（最大可容忍白噪声）之间存在着折衷点。

马雄峰研究组提出了一种通过一组局域测量数为  $k$  ( $2 \leq k \leq N+1$ ) 的纠缠检验来研究这个折衷点的方法。考虑对称局域测量时，该方法可以计算在任意给定数量的测量下最大可容忍的噪声。因此，该方案可以为任意给定的白噪声等级设计一个测量数最少的最优检验方案。此外，该方法中所用到的理论分析也可以用于其他具有强对称性的多粒子纠缠态。这个检验方案在实验中易于实现，并且可以应用于不同噪声条件下的多粒子纠缠探测。

该成果研究论文：Qi Zhao, Gerui Wang, Xiao Yuan, Xiongfeng Ma. "Efficient and robust detection of multipartite greenberger-horne-zeilinger-like states", Phys. Rev. A, 99, 052349(2019).



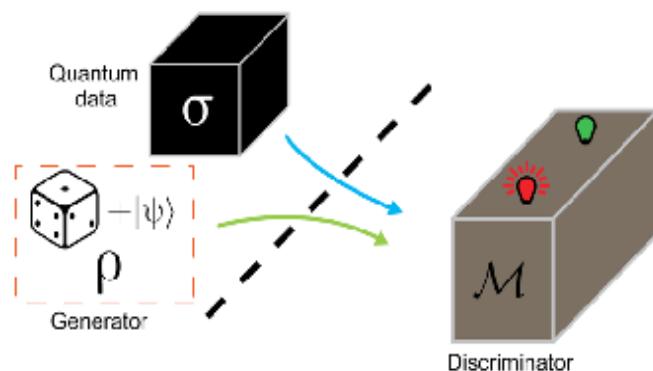
# 五、超导量子计算

主要完成人：孙麓岩研究组（孙麓岩、胡玲、马雨玮、蔡韦州、韩佳秀等）

## 超导系统中实现量子人工智能算法

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。

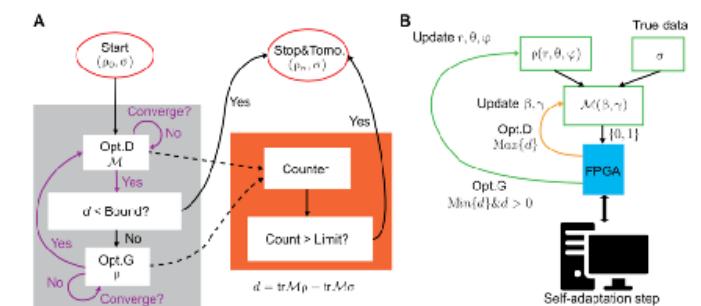
GAN是一类非常重要的生成模型，由Goodfellow等人于2014年提出。GAN在很多方面特别是生成图像、视频等有极为重要的应用。GAN的原理比较简单，可以通过生成图片为例来理解：GAN通常包含两个部分，生成器和判别器。判别器是一个判别图片的网络，它随机接收一张图片，此图片可能来自于训练的数据集(称为真实的)也可能是生成器产生的(称为假的)，它的目标是以最大概率区分图片到底是真的还是假的。生成器是一个生成图片的网络，它的目标是生成尽可能逼真的图片来迷惑判别器。这样，生成器和判别器构成了一个动态的“博弈过程”，博弈的最终结果是生成器可以生成足以“以假乱真”的图片，判别器难以判断生成的图片是不是真实的。



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、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，展示了从量子数据集中学习有用模式的可行性以及量子器件应用于人工智能领域中的巨大潜力。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。

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。

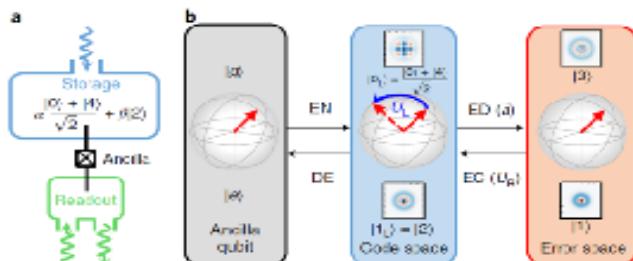
该成果研究论文：L. Hu, S.-H. Wu, W. Cai, Y. Ma, X. Mu, Y. Xu, H. Wang, Y. Song, D.-L. Deng, C.-L. Zou, and L. Sun. "Quantum generative adversarial learning in a superconducting quantum circuit", Science Advances 5, eaav2761 (2019).



# 超导量子系统中实现玻色二项式量子纠错码

众所周知，量子计算机具有在某些问题上（比如大数因子分解和无序数据库搜索）远超经典计算机的运算能力。然而，存储量子信息的物理系统不可避免的会与环境相互作用，受到噪声的影响而失去量子特性。因此，一个实用的可容错量子计算机最终要求对量子纠错码（即逻辑量子比特）实现编解码和纠错，并在纠错保护下进行量子逻辑门操控，从而防止不必要的或不受控制的错误干扰，实现对量子信息的保护。量子纠错被公认为是实现可容错通用量子计算的核心问题，但是这方面的实验进展缓慢，因为其所需的量子实验技术具有非常大的挑战性。当前量子信息处理的一个迫切目标便是实现由量子纠错保护的逻辑量子比特，进而实现对单个逻辑量子比特的操作，并扩展到在多个逻辑量子比特上执行量子算法。

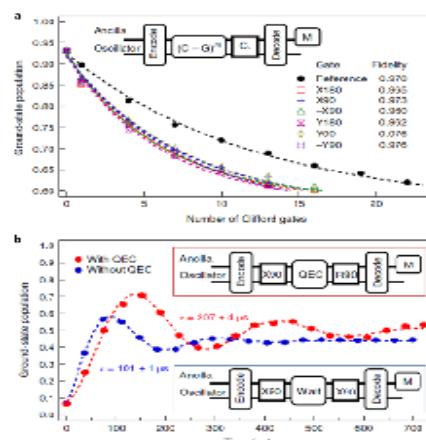
在一般的量子纠错方案中，每个逻辑量子比特由很多个物理比特组成，通过冗余的自由度实现纠错。然而，随着物理比特数目的增加而系统可能发生的错误通道也会增多，同时多物理比特编码的操作需要物理比特之间非局域的相互作用，因此实验上量子纠错和逻辑比特的量子门都很难实现。为了克服这些问题，清华研究组采用了一种基于单个微波谐振子的物理架构，首次在实验上证明了二项式量子纠错码和在纠错保护下的量子门操控。在该方案中，单个微波谐振子的无限大希尔伯特空间提供了有效的冗余自由度来实现量子信息编码，而错误通道的数目保持不变（主要为微波光子的丢失），因此对硬件的要求大大简化，具有非常强的可操作性。



孙麓岩研究组在实验中利用一个辅助超导量子比特与微波光场耦合，实现了基于微波光子数按二项式系数叠加的量子态的编码，通过量子反馈控制有效地对抗微波光子损耗。在实验中，该研究组发展了基于可编程逻辑门阵列的快速、实时量子反馈技术，同时利用接近量子极限的微波放大器实现了量子比特快速、高保真度读取。基于这两项技术，他们实现了对逻辑量子比特的连续量子纠错，将相干时间延长为没有量子纠错时的 2.8 倍；同时，实现了对单个逻辑比特高保真度通用量子门操作，平均门操作保真度为 97.0%；此外，还首次实现了在量子纠错保护下的逻辑比特上的量子操作，演示了 Ramsey 干涉实验，将其相干时间提高了 2 倍。

该实验实现的二项式量子纠错码是近几年来在量子纠错方面的一个重要进展，是实现基于波色子编码的可容错量子计算非常重要的一步。该实验结果也为将来利用量子纠错在逻辑比特层面上进行量子精密测量等方面奠定了基础。

该研究成果论文：L. Hu, Y. Ma, W. Cai, X. Mu, Y. Xu, W. Wang, Y. Wu, H. Wang, Y. Song, C. Zou, S. M. Girvin, L.-M. Duan, and L. Sun. "Quantum error correction and universal gate set operation on a binomial bosonic logical qubit", Nat. Phys. 15, 503 (2019).



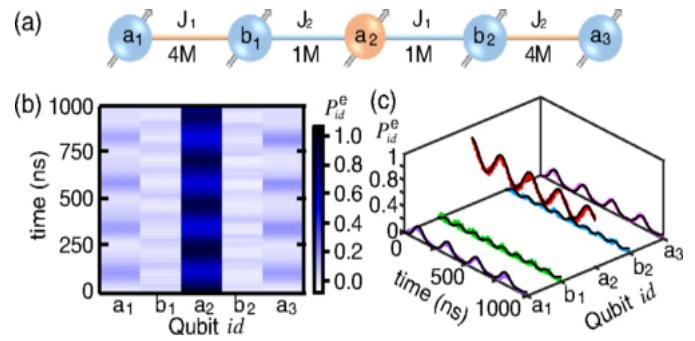
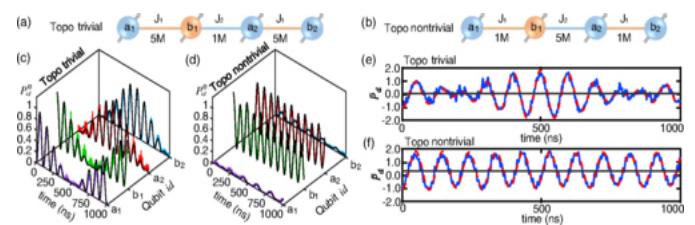
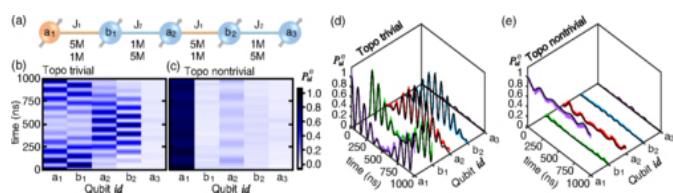
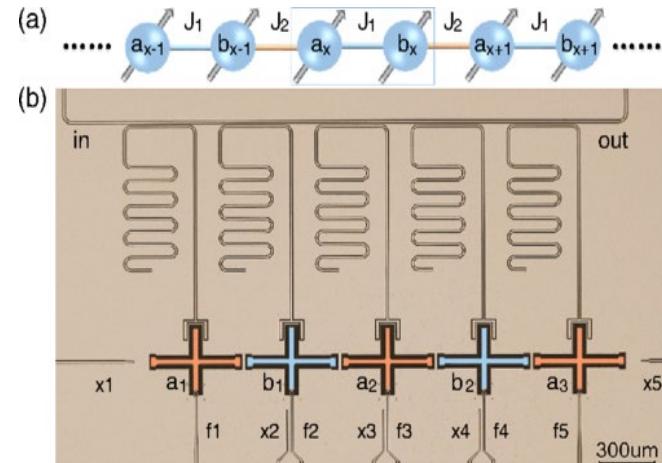
# 一维超导量子比特链上观测到拓扑绝缘体物态

拓扑物态是一种新的物质态，它主要由拓扑不变量和拓扑边缘态来表征。寻找拓扑物态是当前的一个研究前沿，受到了大家的广泛关注。这是因为拓扑物态除了对理解物质的奇异态有很重要的意义外，也可以用来实现拓扑量子计算。量子计算要求量子器件能够保护脆弱的量子态免受外界环境的干扰，而拓扑物态对外部的扰动具有很强的抗干扰性。

在冷原子、光子晶格、声子晶格、以及超导量子电路等人造系统中，人们已经在搜索和观测拓扑现象方面取得了重大实验进展。然而之前还没有在量子比特阵列体系中观测到拓扑绝缘体物态。孙麓岩研究组与合作者在一维量子比特链中实现了这一点。在这个工作中，该团队首次实验性地在超导量子比特链中实现了耦合强度可调的自旋

链模型，并观测到了拓扑绝缘体物态。通过对超导量子比特频率的参数调制，该团队展示了量子比特链可以灵活地调节到平庸或非平庸拓扑绝缘体物态。通过监测量子比特链中单激发量子态的动力学演化，该团队不仅测量了拓扑不变量，还观测了拓扑边缘态和缺陷态。该团队的实验展示了可调节的超导量子比特链作为探索非相互作用和相互作用的对称保护拓扑物态的通用平台的巨大潜力。

该研究研究成果论文：W. Cai, J. Han, Feng Mei, Y. Xu, Y. Ma, X. Li, H. Wang, Y. P. Song, Zheng-Yuan Xue, Zhang-qi Yin, Suotang Jia, and Luyan Sun. "Observation of Topological Magnon Insulator States in a Superconducting Circuit", Phys. Rev. Lett. 123, 080501 (2019).



# 六、拓扑凝聚态物理

主要完成人：徐勇研究组（徐勇、杨炎彬等）

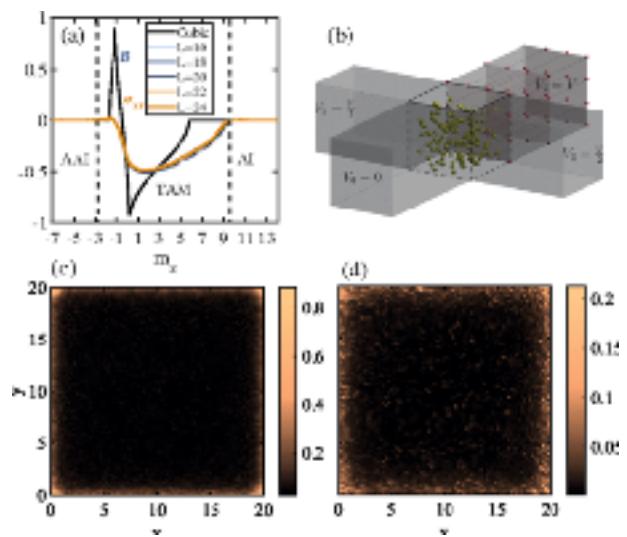
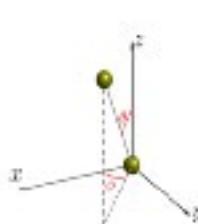
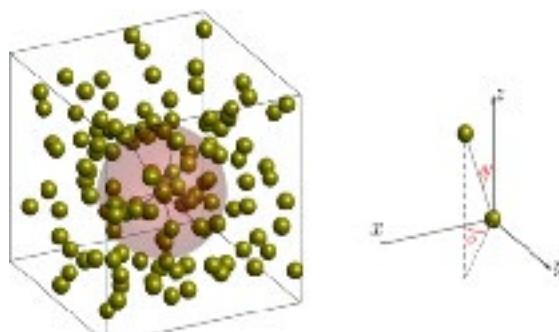
## 非晶拓扑金属

外尔半金属是一种在动量空间能带中具有外尔点的三维拓扑材料，其拓扑性质可以用动量空间中闭合曲面的陈数来刻画。这种拓扑性质导致表面态的存在，并产生反常霍尔效应。外尔半金属属于晶体，具有晶格平移对称性。但是，自然界中很大一部分材料属于非晶，例如玻璃，并没有平移对称性。那么，一个很重要的问题是非晶材料是否具有类似外尔半金属的拓扑态。事实上，最近研究表明非晶态系统中可以存在拓扑绝缘体。

徐勇研究组通过构造一个简单的哈密顿量，在具有完全随机分布格点的三维非晶态系统中发现了拓扑金属相。这种非晶拓扑金属具有非零态密度，并具有表面态及反常霍尔效应。与传统的外尔半金属相比，非晶拓扑金属破坏

了晶格平移对称性，无法定义动量空间的陈数，而需要用 Bott index 和霍尔电导率来表征其拓扑性质。通过对能带结构和输运性质的研究，他们发现该非晶拓扑金属态具有扩散金属的行为，同时发现在非晶系统中也会存在 Anderson 局域化的现象。最后，他们讨论了一个基于 RLC 电路的实验方案来实现这个模型并测量其表面态。该研究结果为进一步探索非晶态系统中的无能隙拓扑态奠定了基础。

该成果研究论文：Yan-Bin Yang, Tao Qin, Dong-Ling Deng, L.-M. Duan, and Yong Xu. "Topological Amorphous Metals", Phys. Rev. Lett. 123, 076401 (2019),

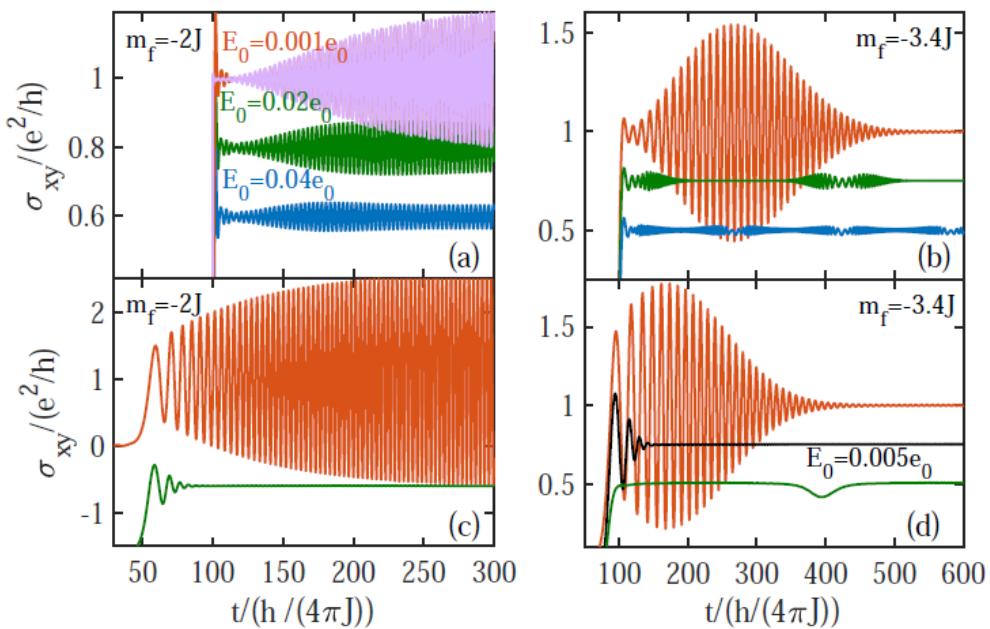


# 非平衡态动力学中拓扑霍尔效应的平衡化方法

非平衡动力学在研究热化、相变等过程中起着至关重要的作用。目前，非平衡动力学在拓扑系统中的研究引起了广泛的关注。其中的原因是在冷原子实验中，通常需要将系统制备在拓扑平庸态，然后通过调控参数将其变成拓扑非平庸态。但是，研究表明，这种调控虽然可以改变系统哈密顿量的拓扑不变量，但并不会改变态的拓扑不变量。这为测量拓扑相变带来了很大的困难。另外一个思路是通过很慢地调控系统参数，观测其霍尔电导。但之前的研究发现，无论调控多慢，霍尔电导总会产生很强的震荡，这也为测量和调控带来了困难。之前的研究通过引入非相干过程来消除这种震荡，但是引入该过程不仅困难还会不可

避免地带来原子数损失。另一个方面，对于外尔半金属，虽然可以通过调控系统参数来控制其霍尔电导，但是霍尔电导随着系统参数地变化也会出现很强的震荡。最近，徐勇研究组发现通过在调控系统参数之前将电场适度调大，则可以完全消除震荡。该方案在实验操作中非常简单。另外，该方案还可用于调控外尔半金属，从而实现连续调控霍尔电导。该研究为在冷原子中观测霍尔效应奠定了基础。

该成果研究论文：Yong Xu and Ying Hu. "Scheme to Equilibrate the Hall Response of Topological Systems from Coherent Dynamics", Phys. Rev. B 99, 174309 (2019).



The background of the image features a minimalist, abstract design composed of overlapping blue and white geometric shapes. The shapes include various sized circles, triangles, and irregular polygons that create a sense of depth and movement. The colors are soft, pastel-like blues and whites, set against a plain white background.

Edited by Kailin Li

Reviewed by Xiamin Lv