

○○

Copula 熵

Jian Ma and Zengqi Sun. "Mutual Information Is Copula Entropy". In: *Tsinghua Science & Technology* 16.1 (2011). See also arXiv preprint arXiv:0808.0845 (2008), pp. 51–54

$$H_c(\mathbf{x}) = - \int_{\mathbf{u}} c(\mathbf{u}) \log c(\mathbf{u}) d\mathbf{u} \quad (1)$$

○○

摘要

统计独立性是统计学和机器学习领域的基础性概念,如何表示和度量统计独立性是该领域的基本问题。Copula 理论提供了统计相关关系表示的理论工具,而 Copula 熵理论则给出了度量统计独立性的概念工具。本文综述了 Copula 熵的理论和应用,概述了其基本概念定义、定理和性质,以及估计方法。介绍了 Copula 熵研究的最新进展,包括其在统计学的九个基本问题(结构学习、关联发现、变量选择、因果发现、系统辨识、时延估计、域自适应、正态性检验和双样本检验等)上的理论应用。讨论了前四个理论应用之间的关系,以及其对应的深层次的相关性和因果性概念之间的联系,并将 Copula 熵的(条件)独立性度量框架与基于核函数和距离相关的同类框架进行了理论对比,又通过仿真和实际数据实验验证了 Copula 熵的实际优越性。简述了 Copula 熵在理论物理学、天体物理学、理论化学、化学信息学、材料学、水文学、气候学、气象学、环境学、生态学、动物形态学、农学、认知神经学、运动神经学、计算神经学、心理学、系统生物学、生物信息学、临床诊断学、老年医学、精神病学、公共卫生学、经济学、管理学、社会学、教育学、计算语言学、新闻传播学、法学、政治学、军事学、情报学,以及能源工程、食品工程、土木工程、交通运输、制造工程、可靠性工程、化学工程、航空航天、车辆工程、电子工程、通信工程、高性能计算、信息安全、测绘遥感 and 金融工程等领域的实际应用。

1

- 相关粒子系统
 - 平衡态相关粒子系统中熵的推导和计算²

6 / 46

- 变构效应研究
 - 变构效应配位点和激活点热力学耦合模型³
 - 丙氨酸二肽的 C 端和 N 端

7 / 46

- 分子设计
 - 设计具有特定属性的分子结构⁴
 - 有机分子属性 QM9 数据库

⁴[Mario Wieser](#). “Learning Invariant Representations for Deep Latent Variable Models”. PhD thesis. University of Basel, 2020.

- 洪水预报
 - 金沙江流域洪水预报⁶
- 河流相关性
 - 长江上游河段（金沙江、岷江、沱江、嘉陵江）相关性⁷
 - 长江上游河段复合洪水事件分析⁸
- 水沙关系分析
 - 黄河西柳沟河流域径流量和输沙量数据分析⁹

⁶ Lu Chen, Vijay P. Singh, and Shenglian Guo. "Measure of Correlation between River Flows Using the Copula-Entropy Method". In: *Journal of Hydrologic Engineering* 18.12 (2013), pp. 1591-1606, Lu Chen et al. "Copula entropy coupled with artificial neural network for rainfall-runoff simulation". In: *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 28.7 (2014), pp. 1755-1767, 陈佳雷 et al. "一种基于多要素注意力时空图卷积网络的径流预报方法". Pat. CN117151285A. 2023.

⁷Lu Chen and Shenglian Guo. *Copulas and its application in hydrology and water resources*. Springer, 2019.

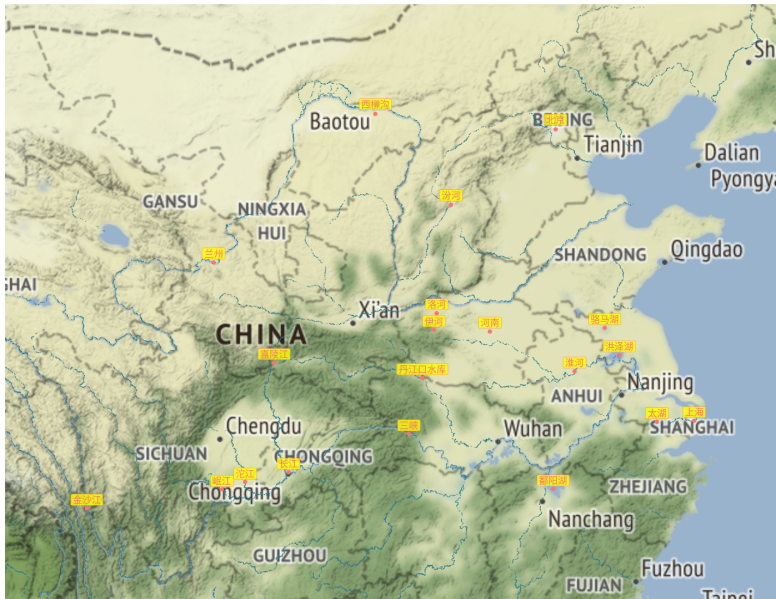
⁸Xu Wang and Yong-Ming Shen. "A Framework of Dependence Modeling and Evaluation System for Compound Flood Events". In: *Water Resources Research* 59.8 (2023), e2023WR034718. DOI: 10.1029/2023WR034718.

⁹ Longxia Qian et al. "A New Estimation Method for Copula Parameters for Multivariate Hydrological Frequency Analysis With Small Sample Sizes". In: *Water Resources Management* 36.4 (2022), pp. 1141–1157. DOI: 10.1007/s11269-021-03016-w.

11 / 46

13 / 46

水文学-国内应用地图



气候学

- 气候变化对水文气象变量相关性的影响
 - 美国德州达拉斯地区降水和气温相关性关系分析²⁴
 - 达拉斯市沃斯堡 (Fort Worth) 地区降水和气温观测数据
- 气候评估
 - 欧洲城市气候分类²⁵
 - 欧洲 25 座城市气温和降水数据

²⁴Zengchao Hao and Vijay P. Singh. "Integrating Entropy and Copula Theories for Hydrologic Modeling and Analysis". In: *Entropy* 17.4 (2015), pp. 2253–2280. doi: 10.3390/e17042253.

²⁵Francesca Condino. "La divergenza di Jensen-Shannon nell'algoritmo di clustering dinamico per dati descritti da distribuzioni multivariate". PhD thesis. Università degli Studi di Napoli Federico II, 2009.

气象学

- 大气污染气象成因分析
 - 北京地区气象因素对 PM2.5 浓度的因果关系分析²⁶
 - 北京地区 PM2.5 和气象观测数据
 - PM2.5 浓度预测²⁷
 - 北京地区 PM2.5 和气象观测数据
 - 上海和广州大气污染预测预警²⁸
 - 上海和广州 PM2.5 和气象观测数据
- 气象灾害预测
 - 广西地区台风灾情预测类²⁹
 - 广西地区台风灾害数据

²⁶ Jian Ma. "Estimating Transfer Entropy via Copula Entropy". In: *arXiv preprint arXiv:1910.04375* (2019).

²⁷ Xiaoxuan Wu et al. "Research on PM2.5 Concentration Prediction Based on the CE-AGA-LSTM Model". In: *Applied Sciences* 12.14 (2022), p. 7009. DOI: 10.3390/app12147009, Jieyin Chen. "Short-Term Prediction of PM2.5 Concentration based on Self-Attention Mechanism Improved Temporal Convolution Network". In: *2023 International Seminar on Computer Science and Engineering Technology (SCSET)*. 2023, pp. 528–534. DOI: 10.1109/SCSET58950.2023.00121.

²⁸ Jujie Wang et al. "A novel air quality prediction and early warning system based on combined model of optimal feature extraction and intelligent optimization". In: *Chaos, Solitons & Fractals* 158 (2022), p. 112098. DOI: 10.1016/j.chaos.2022.112098.

²⁹ 陈燕璇, 刘合香, and 倪增华. "基于 Copula 熵因子选取的 PSO-ELM 台风灾情预测模型". In: *气象研究与应用* 40.2 (2019), pp. 7–11.

环境学

- 大气污染传播路径分析
 - 兰州市大气污染传播路径预测³⁰
 - 兰州市环境气象检测网络 2017 年 PM2.5 观测数据
- 火电厂排放污染物管控
 - 火电厂氮氧化物排放浓度预测³¹
 - 宁夏某燃煤电厂运行数据

³⁰ 吴京鹏. “基于图嵌入表示的节点无特征网络链路预测研究”. 硕士学位论文. 西北师范大学, 2022.

³¹ 金秀章, 乔鹏, and 史德金. “基于 VMD-Bayes-Lasso 算法带误差补偿的火电厂 NO_x 浓度软测量”. In: 华北电力大学学报 (自然科学版) (2023).

生态学

- 动物运动轨迹分析
 - Cylcop 算法包³²

³²Florian H. Hodel and John R. Fieberg. "Cylcop: An R Package for Circular-Linear Copulae with Angular Symmetry". In: *bioRxiv* (2021), p. 2021.07.14.452253, Florian Hodel. *cylcop: Circular-Linear Copulas with Angular Symmetry for Movement Data*. CRAN. R package version 0.2.0. 2022. URL: <https://cran.r-project.org/package=cylcop>.

- 动物形态学
 - 鱼类形态相似度研究³³
 - GatorBait 海洋鱼类外形数据库
 - 鲍鱼生长过程的形态学研究³⁴
 - UCI 鲍鱼数据集

³³Francisco Escolano et al. "The mutual information between graphs". In: *Pattern Recognition Letters* 87 (2017), pp. 12–19. DOI: 10.1016/j.patrec.2016.07.012.

³⁴Soumik Purkayastha and Peter X.K. Song. "Asymmetric predictability in causal discovery: an information theoretic approach". In: *arXiv preprint arXiv:2210.14455* (2022).

- 作物产量预测
 - 气候变化对我国南方两季稻产量的影响及对策³⁵
 - 南方（江南和华南）54 个地点未来气候变化数据和作物数据

³⁵ **Ziya Zhang et al.** "Impact of climate change and planting date shifts on growth and yields of double cropping rice in southeastern China in future". In: *Agricultural Systems* 205 (2023), p. 103581. DOI: 10.1016/j.agsy.2022.103581.

- 运动神经学
 - 分析运动的肌肉组合协同策略³⁹
 - 伸手运动时肌肉 sEMG 数据
 - 自主运动肌肉疲劳状态 sEMG 数据
- 计算神经学
 - 神经元可塑性建模⁴⁰
 - 神经网络信息传输关系分析⁴¹

⁴¹ Ari Pakman et al. "Estimating the Unique Information of Continuous Variables in Recurrent Networks". In: *Advances in Neural Information Processing Systems* (2021).

- 生物心理学
 - 情绪刺激下心跳诱发脑电位的时间交互现象⁴²
 - 用于情绪分析的生理信号 DEAP 数据集

⁴² Liesa Ravijs. "Revealing temporal interactions around the heartbeat-evoked potential modulated by emotional perception". MA thesis. Ghent University, 2019.

生物学

● 系统生物学

- 生物信号调控和传导⁴³
 - 癌症分子机制数据
- 生物现象动态网络结构和功能⁴⁴
 - 酵母细胞周期数据

● 生物信息学

- 分析基因数据，研究生命和疾病机理⁴⁵
 - 肝炎病毒感染治疗基因表达谱数据
- 筛选与癌症有关的变异基因⁴⁶
 - cBioPortal 癌症基因组数据
 - 美国亚利桑那州立大学癌症基因组数据
- 单细胞测序基因调控网络构建⁴⁷
 - DREAM3 的 Ecoli 数据和小鼠胚胎早期血液发育的单细胞测序数据

⁴³Agata Charzyńska and Anna Gambin. "Improvement of the k-NN Entropy Estimator with Applications in Systems Biology". In: *Entropy* 18.1 (2015), p. 13.

⁴⁴Farzaneh Farhangmehr et al. "An information-theoretic algorithm to data-driven genetic pathway interaction network reconstruction of dynamic systems". In: *2013 IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine*. 2013, pp. 214–217.

⁴⁵Mario Wieser et al. "Inverse Learning of Symmetries". In: *Advances in Neural Information Processing Systems*. Vol. 33. 2020, pp. 18004–18015.

⁴⁶Qiang Wu and Dongxi Li. "CRISA: An Interactive Gene Selection Algorithm for Cancers Prediction Based on Copy Number Variations". In: *Frontiers in Plant Science* 13 (2022), p. 839044. DOI: 10.3389/fpls.2022.839044.

⁴⁷竺政彤. "基于单细胞测序数据构建基因调控网络的方法研究". 硕士学位论文. 内蒙古农业大学, 2023.

医学 I

- 临床医学

- 心脏病诊断⁴⁸

- UCI 心脏病数据

- 糖尿病病情管理⁴⁹

- 美国 Health Facts 糖尿病救治网络数据

- 癌症预后⁵⁰

- UCI 肺癌数据

- SEER 数据库乳腺癌临床数据

⁴⁸ Jian Ma. "Variable Selection with Copula Entropy". In: *Chinese Journal of Applied Probability and Statistics* 37.4 (2021). See also arXiv preprint arXiv:1910.12389 (2019), pp. 405–420.

⁴⁹ Radko Mesiar and Ayyub Sheikh. "Nonlinear Random Forest Classification, a Copula-Based Approach". In: *Applied Sciences* 11.15 (2021), p. 15. DOI: 10.3390/app11157140.

⁵⁰ Jian Ma. "Copula Entropy based Variable Selection for Survival Analysis". In: *arXiv preprint arXiv:2209.01561* (2022), 付金露. "基于特征选择的乳腺癌患者预后模型研究". 硕士学位论文. 江西财经大学, 2023.

医学 II

● 临床医学

- 白内障术后角膜水肿风险预测⁵¹
 - 临床白内障超声乳化手术患者数据
- 主动脉瓣置换手术射血分数分析⁵²
 - 临床主动脉瓣置换手术前后射血分数数据
- 脑肿瘤医学影像组学诊断模型构建⁵³
 - 重庆医科大学附属第一医院、西南医院和四川省肿瘤医院脑肿瘤患者数据
- 基于脉搏波的高血压和糖尿病健康状态分类⁵⁴
 - 高血压和糖尿病患者脉搏波数据

⁵¹Yu Luo et al. "Research on Establishing Corneal Edema after Phacoemulsification Prediction Model Based on Variable Selection with Copula Entropy". In: *Journal of Clinical Medicine* 12.4 (2023), p. 1290. DOI: 10.3390/jcm12041290.

⁵²S.M. Sunoj and N. Unnikrishnan Nair. "Survival Copula Entropy and Dependence in Bivariate Distributions". In: *REVSTAT-Statistical Journal* (2023). URL: <https://revstat.ine.pt/index.php/REVSTAT/article/view/560>.

⁵³潘红宇. "基于影像组学与深度学习的脑肿瘤图像分类研究". 硕士学位论文. 西南大学, 2023.

⁵⁴汤宇飞. "基于脉搏波的糖尿病和高血压诊断算法研究". 硕士学位论文. 中国矿业大学, 2023.

医学 III

● 认知医学

● 认知能力评估 / 痴呆症筛查⁵⁵

- 北京和天津痴呆症老年人数据

● 运动医学

● 运动能力评估 / 跌倒风险预测⁵⁶

- 天津和成都跌倒人群老年人数据

● 重复经颅磁刺激对帕金森病改善神经机制分析⁵⁷

- 帕金森患者经颅磁刺激前后 EEG 数据

● 精神病学

● 抑郁症患者识别⁵⁸

- 江苏常州抑郁症青少年患者 EEG 数据

⁵⁵ Jian Ma. "Predicting MMSE Score from Finger-Tapping Measurement". In: *Proceedings of 2021 Chinese Intelligent Automation Conference*. See also bioRxiv 817338 (2019). 2022, pp. 294–304.

⁵⁶ Jian Ma. "Predicting TUG score from gait characteristics based on video analysis and machine learning". In: *Proceedings of 2023 Chinese Intelligent Automation Conference*. See also bioRxiv 963686 (2020). 2023, pp. 1–12, Jian Ma. "Associations between finger tapping, gait and fall risk with application to fall risk assessment". In: *arXiv preprint arXiv:2006.16648* (2020).

⁵⁷ 李润泽 et al. "重复经颅磁刺激改善帕金森病运动症状的脑功能网络分析". In: *生物化学与生物物理进展* 50.1 (2023), pp. 126–134.

⁵⁸ 张婷婷 et al. "基于 Couple 熵的抑郁症相干性反馈指标提取". In: *电子测量技术* 45.9 (2022), pp. 160–167.

- 新冠肺炎流行病 (COVID19)
 - 发热症状疑似病人筛查诊断⁵⁹
 - 新冠临床数据
- 高血压
 - 高血压关联基因研究⁶⁰
 - ELEMENT 数据集

⁵⁹Radko Mesiar and Ayyub Sheikh. "Nonlinear Random Forest Classification, a Copula-Based Approach". In: *Applied Sciences* 11.15 (2021), p. 15. DOI: 10.3390/app11157140.

⁶⁰ Soumik Purkayastha and Peter X.K. Song. "Asymmetric predictability in causal discovery: an information theoretic approach". In: *arXiv preprint arXiv:2210.14455* (2022).

社会科学 I

● 经济学

- 扶贫政策效果评估，用于政策目标人口鉴别⁶¹
 - 2018 年政府贫困家庭状况普查数据（四川省和河南省）
- 议价机制中的互惠行为和时间效应⁶²
 - eBay 的 Best Offer 平台数据
- 产业链内部相关性分析⁶³
 - 国内畜禽养殖产业链主要上市企业股票价格数据
- 投资者情绪分析⁶⁴
 - 中国新能源汽车上市公司的百度搜索数据

⁶¹Qingsong Shan and Qianning Liu. "Binary Trees for Dependence Structure". In: *IEEE Access* 8 (2020), pp. 150989–150998. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3017529. 罗良清 et al. "中国贫困治理经验总结：扶贫政策能够实现有效增收吗？". In: *管理世界* 38.2 (2022), pp. 70–83. Haonan Zhang, Jiapeng Dai, and Yousaf Ali Khan. "Poverty improvement policies and household income: Evidence from China". In: *Heliyon* (2023), E21442. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e21442.

⁶²Leonie Bossemeyer. "Machine Learning for Causal Discovery with Applications in Economics". MA thesis. Ludwig-Maximilians-Universität München, 2021.

⁶³韦颖璐. "基于 pair-copula 熵的相关性度量". 硕士学位论文. 苏州大学, 2021.

⁶⁴Muye Han and Jinsheng Zhou. "Multi-Scale Characteristics of Investor Sentiment Transmission Based on Wavelet, Transfer Entropy and Network Analysis". In: *Entropy* 24.12 (2022), p. 1786. DOI: 10.3390/e24121786.

社会科学 II

● 管理学

● 商品期货价格预测⁶⁵

- 国家统计局猪肉价格数据和大连商品交易所大豆期货价格数据

● 单周期库存管理⁶⁶

- 大众朗逸汽车销售数据

● 中国企业海外并购影响因素分析⁶⁷

- Wind 数据库经济数据

● 社会学

● 分析教育、职业和收入上的性别不平等问题⁶⁸

- 美国国家成年人收入调查数据（1994 年）

⁶⁵Wuyue An, Lin Wang, and Dongfeng Zhang. "Comprehensive commodity price forecasting framework using text mining methods". In: *Journal of Forecasting* 42.7 (2023), pp. 1865–1888. DOI: 10.1002/for.2985.

⁶⁶Yu-Xin Tian and Chuan Zhang. "An end-to-end deep learning model for solving data-driven newsvendor problem with accessibility to textual review data". In: *International Journal of Production Economics* (2023), p. 109016. DOI: 10.1016/j.ijpe.2023.109016.

⁶⁷王琳君. "中国企业海外并购的影响因素和绩效评价研究". 博士学位论文. 中国科学院大学, 2022.

⁶⁸Jian Ma. "Causal Domain Adaptation with Copula Entropy based Conditional Independence Test". In: *arXiv preprint arXiv:2202.13482* (2022).

社会科学 III

● 教育学

● 高中数学成绩与其他学科成绩相关性分析⁶⁹

- 某市 2013 级理科学生高一、高二期末成绩和高三两次模考成绩

● 计算语言学

● 城市热线派单系统知识图谱构建⁷⁰

- 济南市民热线数据

● 新闻传播学

● 上海新冠疫情下的公众情绪变化⁷¹

- 微博平台“上海疫情”主题数据

● 法学

● 社区属性与社区犯罪关系分析⁷²

- 美国社区与犯罪数据集

⁶⁹ 柳琼. “基于 Copula 和 MI 理论的相关性度量及其应用研究”. 硕士学位论文. 三峡大学, 2018.

⁷⁰ 陈作海, 钱恒, and 高永超. “一种基于知识图谱的城市热线派单方法及系统”. Pat. CN115860436A. 2023.

⁷¹ Bowen Zhang et al. “Changes in Public Sentiment under the Background of Major Emergencies – Taking the Shanghai Epidemic as an Example”. In: *International Journal of Environmental Research and Public Health* 19.19 (2022), p. 12594. DOI: 10.3390/ijerph191912594.

⁷² Mario Wieser. “Learning Invariant Representations for Deep Latent Variable Models”. PhD thesis. University of Basel, 2020.

- 32 / 46

工程学 I

● 能源工程

- 能源网络管理，研究天气因素与能源网络的耦合⁷⁶
 - 北方某地区能源系统运行数据
- 光伏发电功率预测⁷⁷
 - 澳大利亚 Yulara 地区光伏电站数据
- 风电机组工况划分⁷⁸
 - 广东某海上风电场 SCADA 数据
- 电力负荷预测⁷⁹
 - 摩洛哥缔头万 (Tétouan) 城电力消费数据
 - 美国亚利桑那居民建筑综合能源负荷 2018 年数据
- 风光储协同规划⁸⁰
 - 某工业园区风光火储联合发电系统

⁷⁶ Xueqian Fu et al. "Uncertainty analysis of an integrated energy system based on information theory". In: *Energy* 122.122 (2017), pp. 649–662.

⁷⁷ 朱正林 and 张冕. "基于 AO 优化 VMD-CE-BiGRU 的光伏发电功率预测". In: *国外电子测量技术* 41.10 (2022), pp. 56–61.

⁷⁸ 崔双双 and 孙单勋. "分工况下风电机组各变量相关性研究". In: *综合智慧能源* 44.12 (2022), pp. 49–55.

⁷⁹ Jian Ma. "Identifying Time Lag in Dynamical Systems with Copula Entropy based Transfer Entropy". In: *arXiv preprint arXiv:2301.06037* (2023), Qin Yan et al. "Short-term prediction of integrated energy load aggregation using a bi-directional simple recurrent unit network with feature-temporal attention mechanism ensemble learning model". In: *Applied Energy* 355 (2024), p. 122159. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.122159.

⁸⁰ 董海艳 et al. "一种含源荷时序相似度约束的源储协同规划配置方法". Pat. CN114421538A. 2022.

工程学 II

● 能源工程

- 电网频率稳定性预测⁸¹
 - 贵州电网数据
- 用户线损贡献分析⁸²
 - 辽宁电网数据
- 配电网拓扑辨识⁸³
 - 接入风机和光伏的家庭负荷配电网仿真数据
- 电价预测⁸⁴
 - 2017 年美国 PJM 电力市场电价数据
- 电力系统宽频振荡影响因素和传播路径分析⁸⁵
 - 直驱风机并网系统和含风电场的四机两区系统仿真数据

⁸¹Peili Liu et al. "Frequency Stability Prediction of Power Systems Using Vision Transformer and Copula Entropy". In: *Entropy* 24.8 (2022), p. 1165. DOI: 10.3390/e24081165.

⁸²Wei Hu et al. "Research on User Loss Contribution Calculation of High-Loss Distribution Area Based on Transfer Entropy". In: *2022 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*. 2022, pp. 499–502. DOI: 10.1109/CICED56215.2022.9929052.

⁸³秦超 and 潘毓笙. "一种基于时空特征的配电网拓扑辨识方法". Pat. CN117154679A. 2023.

⁸⁴Xiaoping Xiong and Guohua Qing. "A hybrid day-ahead electricity price forecasting framework based on time series". In: *Energy* (2022), p. 126099. DOI: 10.1016/j.energy.2022.126099.

⁸⁵冯双 et al. "一种电力系统宽频振荡影响因素和传播路径分析方法". Pat. CN114977222A. 2022, 冯双 et al. "基于 Copula 传递熵的设备级和网络级宽频振荡传播路径分析及振荡源定位方法". In: *电工技术学报* (2023). DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.230873.

- 能源工程
 - 锂电池容量估计⁸⁶
 - NASA 锂电池退化数据
 - 能效异常原因诊断⁸⁷
 - 空压机系统运行数据

⁸⁷ [Jian Ma](#). "Root Cause Analysis on Energy Efficiency with Transfer Entropy Flow". In: *arXiv preprint arXiv:2401.05664* (2024).

- 交通运输
 - 大件货物运输方案制定⁹¹
 - 大件货物运输案例数据
 - 航空和高铁票价影响因素分析⁹²
 - 京沪高铁和航空票价数据
 - 城市轨道交通客流分析和预测⁹³
 - 苏州市轨道交通系统客流时序数据

⁹¹黄达.“基于模块链构建的大件货物多式联运方案研究”.博士学位论文.北京交通大学,2021.

⁹² 许罗豪 et al. “基于熵与回归树的票价影响因素研究”. In: 综合运输 45.6 (2023), pp. 125–130.

⁹³王升.“基于多源数据的城市轨道交通系统客流分析与预测”.硕士学位论文.东南大学,2022.

工程学 IX

● 航空航天

- 飞行器总体参数分析和优化¹⁰⁵
 - 美国喷气战斗机总体设计参数数据
- 卫星在轨健康状态监测¹⁰⁶
 - 真实卫星遥测数据
 - NASA 公开的 SMAP 和 MSL 数据集
- 涡扇发动机健康状态监测¹⁰⁷
 - NASA 格林中心引擎性能退化模拟数据
- 机场间航班延误因果关系分析¹⁰⁸

● 车辆工程

- CAN 总线入侵检测¹⁰⁹
 - 现代汽车 YF 索纳塔 CAN 数据

¹⁰⁵ Baby Alpettiyil Krishnankutty, Rajesh Ganapathy, and Paduthol Godan Sankaran. "Non-parametric estimation of copula based mutual information". In: *Communications in Statistics - Theory and Methods* 49.6 (2020), pp. 1513–1527. DOI: 10.1080/03610926.2018.1563180.

¹⁰⁶ Hao Liu et al. "Data-driven identification model for associated fault propagation path". In: *Measurement* 188 (2022), p. 110628. DOI: 10.1016/j.measurement.2021.110628, Zefan Zeng et al. "Satellite Telemetry Data Anomaly Detection Using Causal Network and Feature-Attention-Based LSTM". In: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 71 (2022), pp. 1–21. DOI: 10.1109/TIM.2022.3151930.

¹⁰⁷ 贾如侠. "涡扇发动机故障预测及剩余寿命分析方法研究". 硕士学位论文. 哈尔滨师范大学, 2023.

¹⁰⁸ 吴格 et al. "一种因果关系分析方法及装置". Pat. CN110766314A. 2020.

¹⁰⁹ Sheng Gao et al. "Attack Detection for Intelligent Vehicles via CAN- Bus: A Lightweight Image Network Approach". In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* (2023), pp. 1–13. DOI: 10.1109/TVT.2023.3296705.

金融工程 I

- 投资组合优化
 - 股票资产相关性网络分析¹¹⁶
 - 沪深 A 股指数、沪深 300 指数数据
 - ST 股票分类¹¹⁷
 - A 股市场 ST 股票数据
- 金融问题建模
 - Copula 函数模型选择¹¹⁸
 - 标普 500 指数数据
- 股票相关性建模
 - R-vine copula 结构建模¹¹⁹
 - 德国 DAX 指数数据
 - 中证五大行业指数数据

¹¹⁶ Qitong Wang. "Social Networks, Asset Allocation and Portfolio Diversification". MA thesis. University of Waterloo, 2015, 廖轶楠. "基于 Copula 熵选股及集成神经网络预测的投资组合管理研究". 硕士学位论文. 南京信息工程大学, 2023.

¹¹⁷ 朱仲儿. "多种机器学习方法的股票分类预测". 硕士学位论文. 上海师范大学, 2022.

¹¹⁸ Rafael Calsaverini and Renato Vicente. "An information-theoretic approach to statistical dependence: Copula information". In: *EPL (Europhysics Letters)* 88.6 (2009), p. 68003. doi: 10.1209/0295-5075/88/68003.

¹¹⁹ Fadhah Amer Alanazi. "Truncating Regular Vine Copula Based on Mutual Information: An Efficient Parsimonious Model for High-Dimensional Data". In: *Mathematical Problems in Engineering* 2021 (2021), p. 4347957, 王念鸽. "基于互信息的 Vine Copula 模型的高频数据投资组合风险测度研究". 硕士学位论文. 浙江财经大学, 2023.

- 量化金融工具箱 MLFinLab¹²⁰
- 金融系统性风险
 - 行业风险溢出效应分析¹²¹
 - 我国股票市场 11 个行业交易数据
 - 金融脆弱性度量¹²²
 - 沪深 300 指数股票数据
- 信用风险评价
 - 信用风险卡模型建立¹²³
 - 信用卡客户数据
- 金融产品价格预测
 - 基于因果关系的迁移学习价格预测模型构建¹²⁴
 - 国际主要金融指数、能源期货价格和农产品价格数据

¹²⁴Dabin Zhang et al. "A novel deep transfer learning framework with adversarial domain adaptation: application to financial time-series forecasting". In: *Neural Computing and Applications* (2023). DOI: 10.1007/s00521-023-09047-1.

My Golf



Enjoy the Power of Copula Entropy!