**注：填报时括号部分内容删除，正文文字使用宋体小四号，行距18磅。**

2024年度拟提名陕西省自然科学奖项目公示内容

1. 项目名称

图中圈结构研究

1. 提名者及提名意见

提名者：陕西省教育厅

提名意见：

图论是近年来发展十分迅速的一个数学分支。著名图论专家，国际数学联盟前主席Lovasz、匈牙利科学院院士Szemeredi获国际数学大奖Abel奖彰显了图论在数学中的核心地方。圈结构是图论中基础性和前沿性的研究内容，开展的相关研究工作具有重要的理论意义和应用价值。该项目围绕图中的圈结构开展研究工作，主要取得如下成果：第一、通过引入边交换技术，证明了Woodall在1975年关于长圈存在性的猜想。该猜想被Bondy和Murty作为图论领域50个未解决难题收录在经典教科书《Graph Theory with Applications》；第二、创造性地运用切换操作构造出两个特定结构的子图来覆盖整个符号图，从而将圈覆盖长度与符号图边数的比值上界从原有结果11大幅度降到14/3；第三、通过分析图的连通度和临界结构，给出有向图的Bermond-Thomassen猜想k=3时的简短证明，解决了Bang-Jensen等人的公开问题；第四、建立了边着色图中的圈结构与有向图中的有向圈的关系，对Bollobas-Erdos猜想和Gutin-Kim猜想取得突破性进展，并证明了Li-Wang猜想。该项目在图中长圈的存在性、有向图中顶点不交圈的存在性、边着色图中正常圈和彩虹圈的存在性和符号图中圈覆盖研究取得了一系列突破性进展，为图中圈结构问题研究提供了新思路、新方法和新工具。

提名陕西省自然科学奖二等奖

1. 项目简介

该项目属于基础理论研究，所属领域为图论。圈结构是图论中最具基础性和前沿性的研究内容之一，其历史可以追溯到著名数学家哈密尔顿于十九世纪五十年代发明的环球旅行游戏，长期的研究产生了哈密尔顿问题、正常着色圈问题、圈填装问题和圈覆盖问题等大量悬而未决的难题。

十多年来，在 7 项国家自然科学基金项目和 5 项陕西省自然科学基础研究计划项目支持下，团队专注于图中圈结构的研究，在一般图中哈密尔顿圈和长圈的存在性、有向图中顶点不交圈的存在性、边着色图中正常着色圈和彩虹圈的存在性以及符号图中圈覆盖研究方面取得了一系列突破性进展，为图中圈结构问题研究提供了新思路、新方法和新工具。

项目主要科学发现点如下：

1. 彻底解决了 Woodall 提出的关于长圈存在性的猜想

1975 年，英国数学家 Woodall 提出猜想：若 2-连通 n 阶图包含至少 n/2+k 个度不小于 k的顶点，则该图中存在长度不小于 2k 的圈。次年，图论经典教材《Graph Theory with Applications》将该猜想列为图论领域 50 个未解决重要问题之一。该项目引入边交换技术给出了图中指定两个端点长路的存在性的一个新定理；并且作为该定理的一个应用，彻底证明了 Woodall 猜想。相关结果发表在 J. Combin. Theory Ser. B (2021)上，对应代表性论文[2]。

2. 给出了 Bermond-Thomassen 猜想在 k=3 时的新证明，并解决 Bang-Jensen 等人提出的关于顶点不交圈的公开问题

1981 年，Bermond 和 Thomassen（1990 年国际数学家大会特邀报告人）提出猜想：出度不小于2k-1的有向图包含k个顶点不交圈。Bondy和Murty于2008年在其图论教材《Graph Theory》中将该猜想列为图论领域 100 个未解决重要问题之一。目前该猜想仅在 k=1,2,3 时得到证明，该项目引入连通度分析思路并通过对出度临界图结构的深入刻画，给出了Bermond-Thomassen 猜想在 k=3 时的新证明，同时解决了 Bang-Jensen 等人提出的公开问题：围长为 g 最小出度为 gk/(g-1)的有向图是否包含 k 个顶点不交圈。相关结果发表在 SIAM J. Discrete Math. (2019)上，对应代表性论文[7]。

3. 系统研究了边着色图中彩虹三角形、正常着色圈的存在性

得到了边着色图中存在彩虹三角形的最小色度条件、色度和条件以及边数加色数条件，并刻画了全部极图；给出了二部图版本的 Gallai 定理，即刻画出不含正常着色四圈的边着色完全二部图；建立了边着色图与有向图的关系，基于该关系给出了边着色图的分类和多项式时间的判定算法，从而在禁止单色三角形条件下证明了 Bollobás-Erdős 猜想和Gutin-Kim 猜想；研究了边着色图中顶点不交的正常着色圈，为 Bermond-Thomasson 猜想的解决提供了新思路。相关结果发表在 European J. Combin. (2014) 和 J. Graph Theory (2018, 2020)上, 对应代表性论文[4, 5, 8]。

4. 在符号图的最短圈覆盖研究中取得突破性进展

符号图的最短圈覆盖问题是著名的最短圈覆盖猜想从定向曲面图到非定向曲面图的拓展，与圈双覆盖猜想、Fulkerson 猜想、Tutte 的整数流猜想以及 Bouchet 的 6-流猜想都密切相关。该项目创造性地运用切换操作（switching operation）手段构造出两个特定结构的符号子图来覆盖整个符号图，从而将圈覆盖长度与符号图边数的比值上界从原有结果 11 大幅度降到 14/3。相关论文发表在 J. Combin. Theory, Ser. B (2019)上，对应代表性论文[1]。

按照中国数学会最新发布的数学科技期刊分级，5 篇代表性论文属于 T2 级期刊论文4 篇，T3 级期刊论文 1 篇。论文被 J. Graph Theory、SIAM J. Discrete Math.、European J. Combin.等图论领域权威期刊及理论计算机科学的顶级会议 SODA 引用，施引专家包括中国数学会图论组合分会首任理事长、国家自然科学奖获得者、国家杰出青年基金获得者范更华教授，欧洲科学院院士 Fomin、匈牙利科学院数学所所长Gyori教授，捷克数学会秘书长 Kaiser 教授等。

在该项目支持下，项目组 1 人次入选教育部长江学者奖励计划青年学者项目，1人次获中国运筹学会青年科技奖（每2年1次，每次不超过5人），1人次入选西北工业大学“翱翔新星”计划，1人次入选“南开大学百名学科带头人”计划，2 人晋升教授职称，3人晋升副教授职称，培养博士生 11 人，培养硕士生 15 人。近五年来，项目组成员受邀在中国运筹学会图论组合分会学术年会作大会报告 1 次，受邀在第九届世界华人数学家大会作特邀报告1次，在中国数学会学术年会、中国运筹学会图论组合分会学术年会、第九届全国组合数学与图论大会、第十届海峡两岸组合数学和图论大会、第十一届海峡两岸组合数学和图论大会、韩国高等科研院第 22 届组合数学会等作邀请报告 10 次。

1. 客观评价

成果形成 48 篇论文，按照中国数学会最新发布的数学科技期刊分级，T2 级期刊论文 36篇，T3 级期刊论文 12 篇。其中 5 篇代表性论文都发表在图论方向顶级期刊或权威期刊：J. Combin. Theory, Ser. B (2019, 2021)、J. Graph Theory (2020)、SIAM J. Discrete Math. (2020)以及 European J. Combin. (2014)。

研究成果受到同行广泛关注，作为基础理论研究，5 篇代表性论文被引约百次（Web of Science 86 次，其中他引 52 次；谷歌学术 128 次），引用期刊包括 J. Graph Theory、European J. Combin.、Combin. Probab. Comput.等国际权威期刊。以下选择部分引用详述。

(1) Mazák 在美国《数学评论》上评论代表性论文[1]为：“The structural properties of bridges and generalized barbells proved in the article might be useful for other problems related to covers and flows on signed graphs”。

(2) 中国数学会图论组合分会首任理事长、国家自然科学奖获得者、国家杰出青年基金获得者范更华教授评价代表性论文[1]是 Mácajová, Raspaud, Rollová和 Skoviera 结果的“significantly improved” （代表性引文[2]）。

(3) 捷克数学会秘书长 Kaiser 教授与 Lukot'ka, Mácajová和 Rollová合作, 在代表性论文[1]的思路基础上，通过研究了比广义哑铃更广的符号欧拉图树的符号圈覆盖, 将该结果14/3 改进为 11/3。其在论文中指出“A refinement of their proof idea leads to the following improvement”（代表性引文[8]）。

(4) 代表性论文[2]完整证明了45年前提出的Woodall猜想，审稿人评价为“the neat proof of the Woodall's conjecture”（审稿意见）。

(5) 代表性论文[2]受到了理论计算机学界的关注，欧洲科学院院士 Fomin 等在理论计算机科学顶级学术会议 SODA 上引用了该论文（代表性引文[5]）。

(6) 德国 Ulm 大学 Ehard 和 Mohr 在代表性成果 [4] 的基础上进一步给出了多个不交的彩虹三角形和彩虹团的存在性的色数条件（代表性引文[4]）。

(7) 代表性论文[5]在 Bermond-Thomassen 猜想验证过程中巧妙引入连通度条件，给出了 k=3 情况的一个全新证明，得到了审稿人的充分肯定：“The new and shorter proof of the case k=3 given in this paper will certainly interest a broad audience”，审稿人称“this is a remarkable paper”（审稿意见）。

(8) 多位学者引用该成果研究了关于有向圈的Caccetta-Häggkvist猜想及其在边着色图中的推广问题（代表性引文[1, 3, 6]）

代表性引文：

[1] R. Aharoni, M. DeVos, R. Holzman, Rainbow triangles and the Caccetta-Häggkvist conjecture, J. Graph Theory 92 (2019) 347-360.

[2] J. Chen, G. Fan, Circuit k-covers of signed graphs, Discrete Appl. Math. 294 (2021) 41-54.

[3] L. Ding, J. Hu, G. Wang, D. Yang, Properly colored short cycles in edge-colored graphs, European J. Combin. 100 (2022) 103436.

[4] S. Ehard, E. Mohr, Rainbow triangles and cliques in edge-colored graphs, European J. Combin. 84 (2020) 103037.

[5] F.V. Fomin, P.A. Golovach, D. Sagunov, K. Simonov, Algorithmic extensions of Dirac’s theorem, Proceedings of the 2022 Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA) pp. 406-416.

[6] S. Fujita, R. Li, G. Wang, Decomposing edge-colored graphs under color degree constraints, Combin. Probab. Comput. 28 (2019) 755-767.

[7] P. Holub, Z. Ryjáček, P. Vrána, S. Wang, L. Xiong, Forbidden pairs of disconnected graphs for 2-factor of connected graphs, J. Graph Theory 100 (2022) 209-231.

[8] T. Kaiser, R. Lukotka, E. Máčajová, E. Rollová, Shorter signed circuit covers of graphs, J. Graph Theory 92 (2019) 39-56.

1. 代表性论文专著目录（不超过8条，其中代表性论文不超过5篇，代表性专著不超过3部）

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 论文专著  名称 | 刊名 | 作者 | 年卷页码 | 发表时间 | 通讯作者 | 第一作者 | 国内作者 | 他引总次数 | 检索数据库 | 知识产权是否归国内所有 |
| 1 | Shortest circuit covers of signed graphs | Journal of Combinatorics Theory Series B | You Lu, Jian Chen, Rong Luo, Cun-Quan Zhang | 2019年134卷164-178页 | 2019-01-01 | You Lu | You Lu | 陆由 | 8 | Web of  Science | 是 |
| 2 | A strengthening of Erdos-Gallai Theorem and proof of Woodall's conjecture | Journal of Combinatorics Theory Series B | Binlong Li, Bo Ning | 2021年146卷76-95页 | 2021-01-01 | Bo Ning | Binlong Li | 李斌龙，宁博 | 1 | Web of  Science | 是 |
| 3 | Vertex-disjoint properly edge-colored cycles in edge-colored complete graphs | Journal of Graph Theory | Ruonan Li, Hajo Broersma, Shenggui Zhang | 2020年94卷476-493页 | 2020-07-01 | Hajo Broersma | Ruonan Li | 李若楠，张胜贵 | 9 | Web of  Science | 是 |
| 4 | Rainbow triangles in edge-colored graphs | European Journal of Combinatorics | Binlong Li, Bo Ning, Chuandong Xu, Shenggui Zhang | 2014年36卷453-459 | 2014-02-02 | Shenggui Zhang | Binlong Li | 李斌龙，宁博，徐川东，张胜贵 | 34 | Web of  Science | 是 |
| 5 | On the number of vertex-disjoint cycles in digraphs | SIAM Journal on Discrete Mathematics | Yandong Bai, Yannis Manoussakis | 2019年33卷 2444-2451.页 | 2019-01-01 | Yandong Bai | Yandong Bai | 白延东 | 5 | Web of  Science | 是 |
| 6 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 7 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 8 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 合 计 | | | | | | | | | 57 |  |  |
|  | | | | | | | | |  |  |  |

1. 主要完成人情况（不超过6人）

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 姓名 | 排名 | 行政职务 | 技术职称 | 工作单位 | 完成单位 | 对本项目贡献 |
| 张胜贵 | 1 | 无 | 教授 | 西北工业大学 | 西北工业大学 | 与李斌龙、宁博等合作研究了着色图中彩虹三角形的存在性，给出了彩虹三角形存在的色度条件和色数条件。与李若楠等合作研究了边着色图中的顶点不交圈问题，并发现了该问题与Bermond-Thomassen猜想之间的关系。对应代表性成果 [3,4]。 |
| 陆由 | 2 | 无 | 教授 | 西北工业大学 | 西北工业大学 | 圈覆盖是图论研究的前沿内容。该项目聚焦符号图的最短圈覆盖问题，创造性地运用切换操作手段构造出两个特定结构的符号子图来覆盖整个符号图，将圈覆盖长度与符号图边数的比值上界从原有结果 11 大幅度降到 14/3。该思路在后续的圈覆盖和整数流研究中被广泛应用，推动了圈覆盖和整数流的研究发展。 |
| 李斌龙 | 3 | 无 | 教授 | 西北工业大学 | 西北工业大学 | 与第一完成人张胜贵、第四完成人宁博合作研究了着色图中彩虹三角形的存在性，给出了彩虹三角形存在的色度条件和色数条件。与第四完成人宁博合作完整证明了英国数学家Woodall于1975年提出的关于长圈存在性的猜想。对应代表性成果 [2,4]。 |
| 宁博 | 4 | 无 | 副教授 | 南开大学 | 西北工业大学 | 与第一完成人张胜贵、第三完成人李斌龙合作研究了着色图中彩虹三角形的存在性，给出了彩虹三角形存在的色度条件和色数条件。与第三完成人李斌龙合作证明了英国数学家Woodall于1975年提出的关于长圈存在性的猜想。对应代表性成果 [2,4]。 |
| 白延东 | 5 | 无 | 副教授 | 西北工业大学 | 西北工业大学 | 在度条件下有向图中顶点不交圈问题研究中取得重要进展。对应代表性成果 [5]。 |
| 李若楠 | 6 | 无 | 副教授 | 西北工业大学 | 西北工业大学 | 完成了代表性论文[3]，首次研究了边着色图中的顶点不交圈问题，并发现了该问题与 Bermond-Thomassen 猜想之间的关系。 |

1. 主要完成单位情况（不超过3个）

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 完成单位 | 排名 | 对本项目主要贡献（限600字） |
| 西北工业大学 | 1 | 其中第一完成单位注册地或登记地必须为在陕的组织 |
|  | 2 |  |
|  | 3 |  |

1. 完成人合作关系说明
2. 张胜贵（第一完成人）与李斌龙（第三完成人）、宁博（第四完成人）合作完成代表性论文[4]
3. 张胜贵（第一完成人）与李若楠（第六完成人）合作完成代表性论文[3]
4. 李斌龙（第三完成人）于宁博（第四完成人）合作完成代表性论文[2]
5. 陆由（第二完成人）、李斌龙（第三完成人）、白延东（第五完成人）、李若楠（第六完成人）合作完成项目：国家自然科学基金面上项目“符号图的整数流”（11871793）