

基于知识图谱的物理学术竞赛发展分析

董佳豪¹ 王 瑾^{1,2} 李川勇¹ 孔勇发^{1,2} 潘崇佩^{1,2}

(¹ 南开大学物理科学学院; ² 基础物理国家级实验教学示范中心(南开大学), 天津 300071)

摘 要 国际青年物理学家锦标赛及其本土化后形成的中国大学生物理学术竞赛、中国青年物理学家锦标赛和各地区高校的系列物理学术竞赛在基础物理教学中发挥着越来越重要的作用。本文基于 CiteSpace 可视化软件, 分析了 CNKI 中文数据库、WOS 数据库和 Scopus 数据库中以 PT 系列物理学术竞赛为主题的文献, 运用计量分析方法和知识图谱技术展示了文献的年代分布、关键词共现图谱、时间线图、突现词图谱和研究机构共现图谱等信息, 并结合当前赛事发展探究了知识图谱在追踪赛事发展、物理问题研究与案例分析、基础物理实验教学改革中的应用。

关键词 IYPT; CUPT; 学术竞赛; CiteSpace; 知识图谱

DEVELOPMENT ANALYSIS OF PHYSICS ACADEMIC COMPETITION BASED ON MAPPING KNOWLEDGE

DONG Jiahao¹ WANG Jin^{1,2} LI Chuanyong¹ KONG Yongfa^{1,2} PAN Chongpei^{1,2}

(¹ School of Physics, Nankai University, Tianjin 300071;

² National Demonstration Center for Experimental Physics Education (Nankai University), Tianjin 300071)

Abstract The International Young Physicists' Tournament, the localized China Undergraduate Physics Tournament, the China Young Physicists' Tournament and a series of physics academic competitions in universities in various regions are playing an increasingly important role in basic physics teaching. Based on CiteSpace visualization software, this paper analyzes the literatures extracted from CNKI Chinese database, WOS database and Scopus database with the theme of PT series physics academic competitions, and displays the chronological distribution, the co-occurrence map of keyword, time zone map, salient words and the co-occurrence map of institution of the literatures in the form of econometric analysis and knowledge map. Combined with the development and modernization of contemporary sports events, the application of mapping knowledge in reflecting the situation of sports events, physical problem research and case analysis and basic physics experiment teaching is explored.

Key words IYPT; CUPT; academic competition; CiteSpace; mapping knowledge

收稿日期: 2022-09-10

基金项目: 高等学校教学研究项目(DJZW202010hb); 南开大学实验教学改革项目(21NKSYX02); 国家基础科学人才培养基金项目(J1210027); 南开大学物理基地能力提高项目(J1103208)。

通信作者: 王瑾, 南开大学物理科学学院高级实验师, Wangjin8208@nankai.edu.cn。

引文格式: 董佳豪, 王瑾, 李川勇, 等. 基于知识图谱的物理学术竞赛发展分析[J]. 物理与工程, 2024, 34(2): 38-45, 72.

Cite this article: DONG J H, WANG J, LI C Y, et al. Development analysis of physics academic competition based on mapping knowledge [J]. Physics and Engineering, 2024, 34(2): 38-45, 72. (in Chinese)

国际青年物理学家锦标赛 (International Young Physicists' Tournament, IYPT) 是苏联于 1988 年发起的一项物理赛事, 每年举办一届。2007 年, 来自奥地利维也纳大学的 Dr. Romano A. Rupp 教授被聘为南开大学应用物理学院院长, 并介绍了其作为主办方承办 1999 年 IYPT 的经验。当年, 南开大学李川勇教授等观摩韩国首尔第 20 届 IYPT。2008 年, 由南开大学领队的第一支中国 IYPT 代表队在克罗地亚参赛。2009 年南开大学承办第 22 届 IYPT^[1], IYPT 走进中国。目前, IYPT 和其在中国衍生出来的全国范围的中国大学生物理学术竞赛 (China Undergraduate Physics Tournament, CUPT)、中国青年物理学家锦标赛 (China Young Physicists' Tournament, 简称 CYPT)、省市范围的如江苏省青年物理学家锦标赛 (Jiangsu Yong Physicists' Tournament, JSYPT)、上海市中学生物理学术竞赛 (Shanghai Young Physicists' Tournament, SYPT)、各高校物理学术竞赛等 PT 系列学术竞赛发展迅速, 吸引了越来越多的地区和学校的重视。

科学知识图谱是显示科学知识的发展进程与结构关系的一种图形, 属于科学计量学范畴^[2]。传统的科学计量学图谱以简单的二维、三维图形, 如柱形图、线性图、点布图等表达统计结果, 现代科学知识图谱则以更复杂的三维立体图来显示科学知识的关联性。20 世纪 50 年代加菲尔德 (E. Garfield) 提出^[3]并创建了科学引文索引 (Science Citation Index, SCI), 奠定了当代引文分析的基础。20 世纪 90 年代著名德国科学计量学家克雷奇默 (H. Kretschmer) 开发的关于科学合作的三维空间模型^[4,5]则大大地推动了科学知识图谱的发展。美国德雷塞尔大学华裔科学家陈超美意识到深入研究科学知识图谱并将其应用到科学实践中的巨大潜力, 并开发出了知识图谱的可视化软件 CiteSpace, 其已经在许多领域得到应用^[6]。

PT 系列学术赛事旨在提高学生综合运用所学知识分析解决实际物理问题的能力, 培养学生的开放性思维能力, 使学生的知识、能力和素质得到全面协调发展^[7]。IYPT 每年设置十七道题目, 这些问题往往切入点简单, 物理背景丰富, 适合在高中和大学的基础物理实验教学中推广^[7-11]。此外, 知识图谱技术可以对基础物理实验教学起到

辅助作用, 如林子舰等^[12]曾探讨了知识图谱技术在基础物理实验教学中的应用。

本文试图基于知识图谱技术, 利用 CiteSpace 可视化软件, 对大家感兴趣的 IYPT 问题、当前论文的发文情况、中外研究对比等进行分析, 同时探究其在追踪赛事发展、物理问题研究与案例分析、基础物理实验教学改革等方面的应用。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

我们选择 CNKI 数据库作为中文文献的来源, 选择 WOS 数据库^[13]和 Scopus 数据库^[14]作为外文文献的来源。文献采集的方法为采用数据库高级检索的方法, 对于中文数据库, 在关键词和全文中输入“IYPT”“CUPT”“CYPT”“YPT”“物理学术竞赛”词, 各搜索词条间逻辑关系选择“OR”; 对于外文数据库, 在关键词、主题和全文中输入“IYPT”和“International Young Physicists' Tournament”词, 各搜索词条间逻辑关系选择“OR”。为了保证文献的可用性, 逐一核对检索的文献, 删去不相关的文献, 最终得到 242 篇中文文献和 28 篇外文文献。

1.2 研究方法

本文以可视化软件 CiteSpace6. 1. R3 对收集的文献进行可视化分析。文献的具体处理方法为: (1) 首先将时间切片设置为包含所有文献的时间范围, 切片间隔为 1 年; (2) 选择聚点类型: Author (作者分析)、Institution (机构分析)、Country (国家分析)、Term (词共现分析)、Keywords (关键词) 等; (3) 选择标准: 每个时间切片中选取其中被引频次最高的 50 个词; (4) 本次实验中的样本数据量较少, 因此不进行筛选。如果数据量太多, 可视化图像比较复杂的话, 可以选择“Pruning”对图像进行修剪。

2 结果与分析

2.1 发文量分析

本文对截止到 2022 年 9 月 1 日的 242 篇中文文献按照发表年份进行了分析和绘图。从图 1 中可以看到, 近五年间以 PT 系列竞赛为主题的发文量保持增长态势, 说明 PT 系列竞赛在中国

各高校和中学的影响力越来越大。同时可以发现 2015—2016 年论文增幅达到最大的 14 篇,这与 CUPT 国赛队伍数量增幅一致,在 2015—2016 年期间,国赛参赛队伍增幅达到近年来最大的 16 支^[15];2018 年发文数量达到最大,且近几年一直保持在 30 篇以上的发文量,同时从 2018 年开始,由于参赛队伍大幅增加,CUPT 开始设置区域赛。图 2 给出了 CUPT 参赛队伍数量(2018 年及以后为区域赛参赛队伍总数量)与论文发表数量随时间的变化图,经过计算,两者间的皮尔森相关系数为 0.8916,属于强相关性^[16],说明 CUPT 的规模发展对论文研究发表有较强的促进作用。

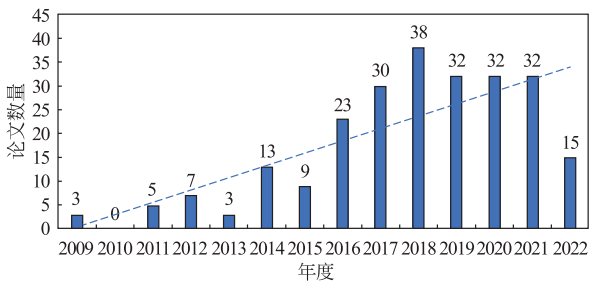


图 1 CNKI 文库中以 PT 系列竞赛为主题的论文数量

2.2 关键词共现图谱分析

表 1 展示了词频排名前 10 的关键词的名称、

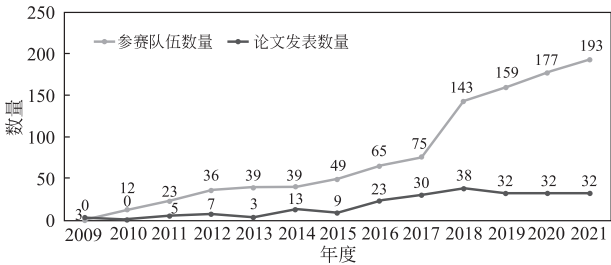


图 2 CUPT 参赛队伍数量与论文发表数量随时间的变化图

引用频次以及中心性。其中,关键词“IYPT”“CUPT”“物理学术竞赛”引用频次最高,分别为 42、31、18,中心性分别为 0.45、0.37、0.09。

表 1 CNKI 文库关键词词频前 10 名

关键词	频次	中心性	关键词	频次	中心性
IYPT	42	0.45	大学物理	7	0.07
CUPT	31	0.37	综合能力	5	0.02
物理学术竞赛	18	0.09	创新能力	5	0.01
热水喷泉	7	0.04	教学模式	5	0.07
物理实验	7	0.05	稳定性	5	0.00

本次分析结果共获得 669 个节点,1305 条连线,密度为 0.0058。由图 3 可以看到 IYPT 中的一些热点问题,例如 2014 年第十六题“Magnetic brakes”(磁力刹车),2015 年第三题“Artificial

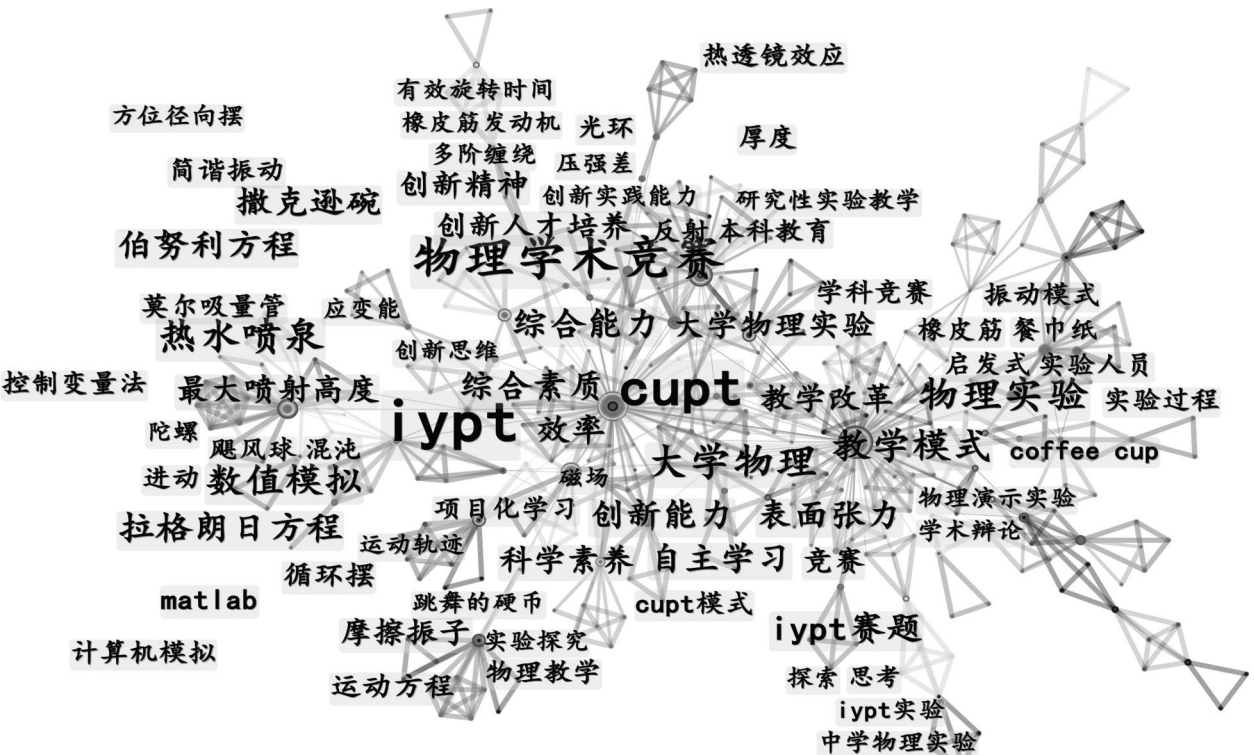


图 3 CNKI 文库关键词共现图谱(主要部分)

Muscle”(人造肌肉),2018 年第十一题“Azimuthal radial Pendulun”(方位径向摆)以及 2019 年第六题“Hurricane Balls”(飓风球)等^[7]。同时可以看到 IYPT 研究中一些常见的关键词。第一类是分析软件,包括“数值模拟”和“Matlab”一词。第二类是物理问题的研究对象,比如“圆盘”一词,1995 年第七题“Three discs”(三个圆盘)、1998 年第三题“Spinning disc”(旋转圆盘)、2003 年第十四题“Rotating disk”(旋转圆盘)、2016 年第十一题“Rolling on a disc”(在圆盘上滚动)、2022 年第二题“Rayleigh disk”(瑞利圆盘)等,均与圆盘的运动相关^[7]。第三类是物理教育,包括“物理教学”“综合素质”“创新能力”等与学生科学素养相关的词汇,这与 PT 系列竞赛设置的宗旨相关,IYPT、CUPT、物理学术竞赛等 PT 赛事重在培养学生创新意识、主动意识、合作意识等综合素质,因此有众多学者在研究如何更好地通过物理竞赛培养学生的科学素养和解决问题的能力^[8,17]。

2.3 时间线图与突变词图谱分析

时间线图是关键词共线图谱的另一种时间线表现形式,重点表现了不同时间研究领域的热点及其衍生关系,可以通过图看到在不同时间段受到较多关注的热门问题。图 4 展示了以聚类标签为竖轴、以关键词的时间年份为横轴,得到以 PT 系列竞赛为主题的关键词的聚类时间线图谱。

在 CiteSpace 中可以使用 Burstness 生成突变词图谱。突变词是指在某段时间内爆发,代表了这段时间内的研究前沿和发展趋势的关键词。聚类时间线图谱和突变词图谱都可以反应不同时间研究的热点问题。如图 5 所示,设置伽马 γ 参数为 0.37,关键词突变持续时间最少一年,并显示 16 个突变词,通过调节伽马 γ 参数可以显现更多的突变词。如 2018 年出现突变词“热水喷泉”,反映了 2016 年 IYPT 中第七题“Hot Water Fountain”(热水喷泉);2020 年出现突变词“沙漏”,反映了 2018 年 IYPT 中第十三题“Weighing Time”(计量时间)。

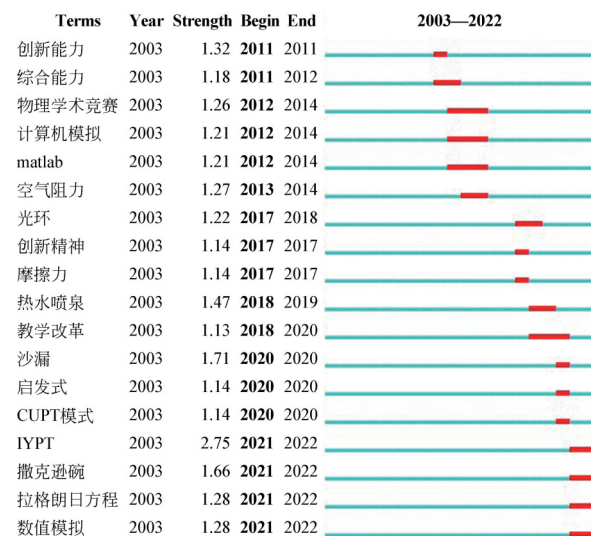


图 5 CNKI 文库突变词图谱

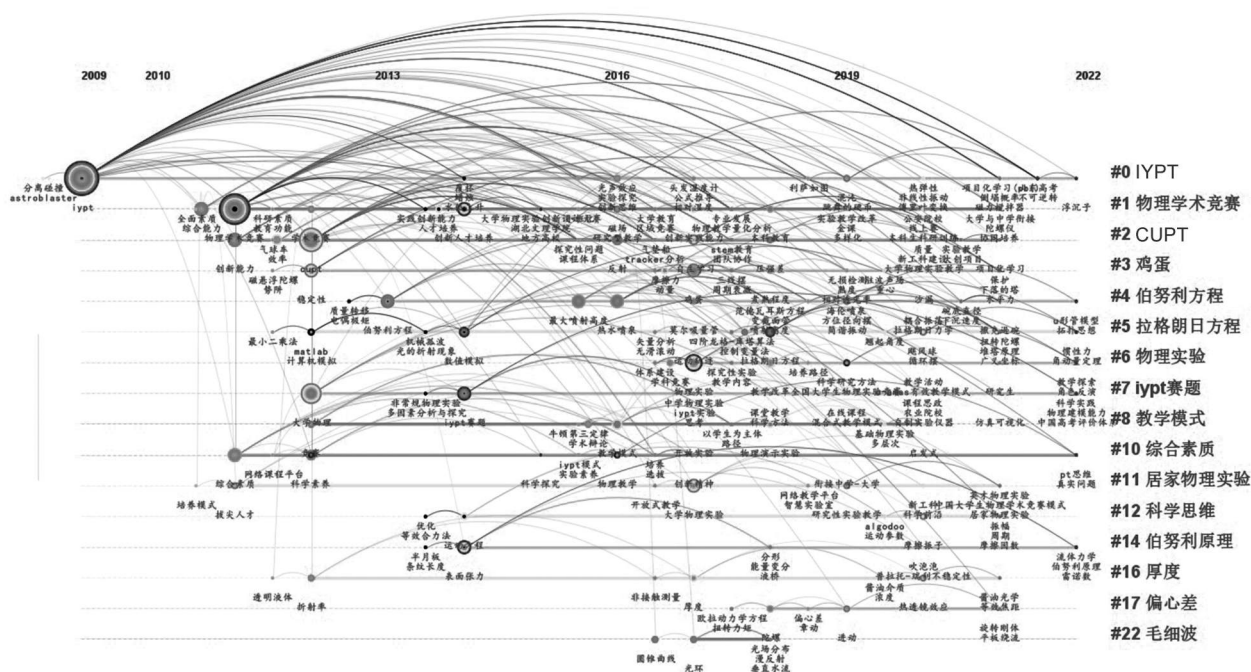


图 4 CNKI 文库关键词时间线图

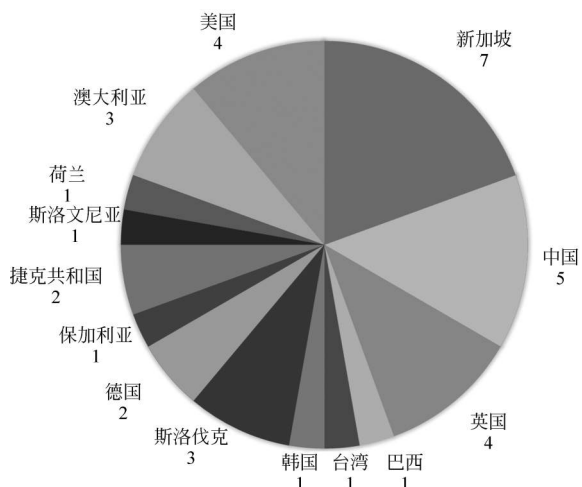


图 8 外文数据库发表论文国家或地区分布

ternational Physicists' Tournament^[19]。目前 IPT 在国内尚未形成 IYPT 的规模,每年由南开大学领队参赛。

外文数据库作者单位共现图谱如图 10 所示。从图中可以看出,外文数据库中尚未形成明显核心学术合作团体和发文单位,成点状和星状分布,其中主要发文单位有 Raffles Institution(莱佛士书院)和 Slovak Acad Sci(斯洛伐克科学院)等。

3 知识图谱分析对物理竞赛和实验探究的辅助作用

3.1 物理教育研究

通过 CiteSpace 对数据库发文的可视化分析,可以增加师生了解 IYPT 的本土化过程,了解系列赛事研究情况比如当前发文量趋势、主要发文合作学术团队、主要发文高校单位等。发文情况也可以从侧面反映竞赛的一些特征:发文量不断增加意味着对 PT 系列竞赛认可度的提高,同时竞赛队伍规模的发展促进了教学论文的发表和相关研究。

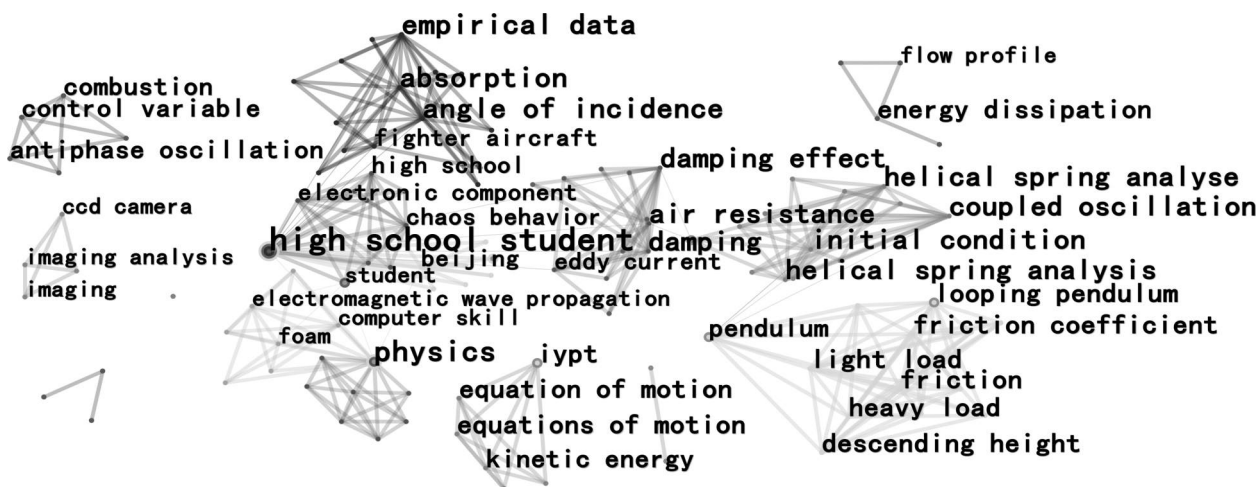


图 9 外文数据库关键词共现图谱(主要部分)

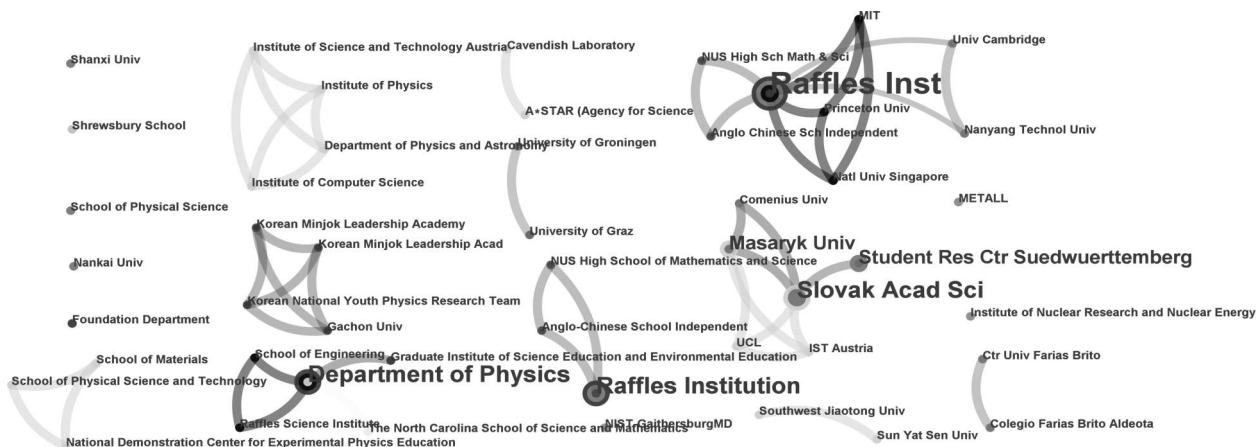


图 10 外文数据库作者单位共现图谱(主要部分)

3.2 物理问题研究

对于受关注度较高的 IYPT 题目,通常会有诸多学者以不同的角度去探讨,形成“百家争鸣”。鉴于 PT 题目的开放性,知识图谱技术有助于将这些观点进行连接,形成知识网络。例如,通过关键词共现图谱可以将各文章的关键词联系起来,而这些关键词通常包含了 IYPT 题目需要考虑的主要因素和切入点。以 2016 年第七题“Hot Water Fountain”(热水喷泉)为例,在 CiteSpace 的共现图谱中选中热水喷泉后得到如图 11(a)所示的分叉图。从中我们可以得到研究这一问题可能的思路。例如“控制变量法”是由于题目要求探究不同参数下喷泉能达到的最大高度,因此总体思路自然需要通过控制变量法验证不同参数的影响。“伯努利方程”“连续性定理”“范德瓦尔斯方程”等从理论上启示分析的切入点,“莫尔吸量管”提示了可能的实验仪器。又如 2020 年第六题“Saxon Bowl”(撒克逊碗),从图 11(b)中可以看到,这一问题的自变量有孔径大小、碗底直径、液体密度等,因变量则有下沉速度、下沉时间等,“伯努利方程”“阻尼项”提示理论分析的切入点和误差修正项。通过知识图谱可视化分析,有利于提高对问题的宏观认识,为我们接下来具体研究奠定基础。

体密度等,因变量则有下沉速度、下沉时间等,“伯努利方程”“阻尼项”提示理论分析的切入点和误差修正项。通过知识图谱可视化分析,有利于提高对问题的宏观认识,为我们接下来具体研究奠定基础。

3.3 基础实验教学改革

IYPT 中有许多实验有趣且物理内涵丰富,适合将其引入实验教学,如 2014 年第十六题“Magnetic Brakes”(磁力刹车)、2018 年第十一题“Azimuthal-Radial Pendulum”(方向径向摆)等。众多高校采用将 IYPT 题目作为教学改革的实验内容,并借鉴 IYPT 和 CUPT 的竞赛模式让学生自由组队并进行实验答辩^[20,21]。基于 CiteSpace 对词频、突变词图谱等的分析可以得到受关注度较高的题目,此类实验研究往往比较透彻,可以优先考虑将此实验引入实验教学当中。由图 4 可知,“光环”曾在 2017 年发生突变,说明人们对相关问题研究热情增加,进而对节点进行分析,通过点击“Node Details”可以了解发文情况。此问题对应第 28 届 IYPT 第 14 题“环绕的光”,陈晨等以此题为例探究了如何将 IYPT 实验融入中学教学以提高学生的综合素质^[22]。

在关键词可视化分析中,我们可以看到不同年份的试题通过关键词连接,这些实验在某些方面具有关联性,可以通过节点分析实现不同实验之间的关联。因此,可以通过已发表论文深入研究该类实验的物理基础和变量因素^[21,22],找到共通的物理原理,并将其作为专题引入实验教学。例如,将 IYPT 中“Bubble crystal(泡泡晶体)”“Light rings(光环)”“Soap membrane filter(肥皂膜过滤器)”“Pulling glasses apart(拉开玻璃)”以及“Heron's Fountain(海龙喷泉)”的试题设置了表面张力现象小专题,方便学生从更多角度认识表面张力^[23]。

4 结语

本文采用可视化分析方法,分析了 CNKI 文库中关于 PT 系列竞赛的论文,对中外数据库的发文情况进行了对比,并介绍了 CiteSpace 在进行关键词共现图谱、时间线图、突变词图谱和作者与作者单位分布等方面的应用。结果表明:(1)从发文量看,近五年发文量保持较高位且呈增长趋势,



(a)



(b)

图 11 关键词的共现图谱

(a) 热水喷泉关键词共现图谱; (b) 撒克逊碗关键词共现图谱

显示了PT系列竞赛影响力的不断增加;(2)从发文作者和发文作者单位上来看,当前已经形成几个核心学术合作团体和核心发文高校单位,但整体上呈星状和点状分布,未形成大的网状结构;(3)在WOS和Scoups外文数据库中,发文量较少,且未形成核心学术团体和核心发文高校单位,但近三年发文量增多。整体来看,PT系列竞赛在各高校和中学受到越来越多的关注,在相关论文发表中出现了一批高产单位和核心作者,发文研究主题和范围广。此外,知识图谱在基础实验教学改革具有良好的辅助作用;通过对关键词的可视化分析,可以得知不同时间段关注的热点和研究材料,引入到实验教学中以提升教学水平。

综上所述,本文利用知识图谱技术,展示了物理学术竞赛在物理教育研究、物理问题研究和基础实验教学改革三个方面的突出优点。本文清晰地展示了IYPT、CUPT、CYPT以及各高校物理学术竞赛等PT系列竞赛的发展情况。物理学术竞赛能够有效地培养学生运用知识分析和解决实际问题的能力,促进学生的知识、能力和素养全面协调发展。借助于知识图谱技术,能够帮助研究者更清晰地认识问题发展脉络,了解知识点关联,丰富物理图像,促进物理学生竞赛向基础物理教学中的转化。

参 考 文 献

- [1] 宋峰,李川勇.第22届国际青年物理学家锦标赛在南开大学举行[J].大学物理,2009,28(10):61.
SONG F, LI C Y. The 22nd international young physicist championship was held in Nankai University[J]. College Physics, 2009, 28(10): 61. (in Chinese)
- [2] 陈悦,刘则渊.悄然兴起的科学知识图谱[J].科学学研究,2005(2):149-154.
CHEN Y, LIU Z Y. The rise of mapping knowledge domain [J]. Studies in Science of Science, 2005(2): 149-154. (in Chinese)
- [3] GARFIELD E. Citation indexes for science: A new dimension in documentation through association of ideas[J]. Science, 1955, 122: 108-111.
- [4] KRETSCHMER H. Coauthorship networks of invisible college and institutionalized communities[J]. Scientometrics, 1994, 330(1): 363-369.
- [5] KRETSCHMER H. Types of two-dimensional and three-dimensional collaboration patterns[C]//Proceedings of the Seventh Conference of the International Society for Scientometrics and Informetrics. Colima, Mexico, July 5-8, 1999. Edited by C. A. Macias-Chapula. Universidad de Colima, Colima, Mexico, 1999. 244-257.
- [6] CHEN C. Mapping Scientific Frontiers [M]. London: Springer-Verlag, 2002.
- [7] 国家青年物理学家锦标赛[EB/OL]. <http://iypt.org/Home>.
- [8] 李川勇,王慧田,宋峰,等.中国大学生物理学术竞赛及其对培养学生综合能力的作用[J].大学物理,2012,31(5):1-4.
LI C Y, WANG H T, SONG F, et al. China undergraduate physics tournament and its enhancement of students' comprehensive ability[J]. College Physics, 2012, 31(5): 1-4. (in Chinese)
- [9] 于向遥,曹学伟.由astroblaster引发的对多体碰撞问题的探究[J].大学物理,2009,28(11):51-54.
YU X Y, CAO X Y. Research on collisions of many balls from astroblaster[J]. College Physics, 2009, 28(11): 51-54. (in Chinese)
- [10] 陈玥,周子淇,林美好,等.振荡“星形”水滴的实验研究[J].物理实验,2017,37(11):36-40.
CHEN Y, ZHOU Z Q, LIN M S, et al. Experimental study on the oscillation-star-like water droplet[J]. Physics Experimentation, 2017, 37(11): 36-40. (in Chinese)
- [11] 潘志民,金凯文,潘开欣.关于“小孔成像”的研究[J].物理与工程,2018,28(4):102-108.
PAN Z M, JIN K W, PAN K X. Studies of “pinhole imaging” [J]. Physics and Engineering, 2018, 28(4): 102-108. (in Chinese)
- [12] 林子舰,冯超超,王廷振,等.知识图谱技术在物理实验教学中的应用探讨[J].物理与工程,2020,30(4):88-95.
LIN Z J, FENG C C, WANG T Z, et al. The exploration of the application of knowledge mapping technique on physics experiment teaching [J]. Physics and Engineering, 2020, 30(4): 88-95. (in Chinese)
- [13] WOS数据库[EB/OL]. <https://www.webofscience.com>.
- [14] Scoups数据库[EB/OL]. <https://www.scopus.com>.
- [15] 中国大学生物理学术竞赛[EB/OL]. <https://pt.nankai.edu.cn/cupt/list.htm>.
- [16] 贾俊平.统计学[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [17] 金康,王晓辉,贺庆丽,等.大学生物理学术竞赛对本科生不同方面能力的提升作用[J].大学物理,2020,39(6):59-64.
JIN K, WANG X H, HE Q L, et al. Effect of China Undergraduate Physics Tournament on improving the ability of undergraduates at different aspects[J]. College Physics, 2020, 39(6): 59-64. (in Chinese)
- [18] 吴志山.在IYPT选修活动课中提升学生科学素养[J].物理教学,2015,37(3):29-31.
WU Z S. Improving students' scientific literacy in IYPT elective activity courses [J]. Physics Teaching, 2015, 37(3): 29-31. (in Chinese)
- [19] 国际物理学家锦标赛[EB/OL]. <https://iptnet.info>.
- [20] 钟菊花,顾英俊,章登宏,等.竞赛与教学相融合的开放式物理实验教学探索[J].物理与工程,2017,27(5):99-102.

(下转第72页)

- from countries along the “the Belt and Road”[J]. *Journal of World Education*, 2021, 6: 23-26. (in Chinese)
- [2] “一带一路”沿线国家来华留学现状, CCG 研究[EB/OL]. (2019-8-19)[2022-3-14]. https://www.sohu.com/a/334877394_828358.
- [3] 李洁, 孙进. 中国高校全英文授课项目留学生的就读体验调查——北京师范大学的个案研究[J]. *教育学报*, 2014, 10(6): 110-117.
LI J, SUN J. The survey of international students' study experience of English-taught MA program in Chinese higher institutions: A case study of Beijing Normal University[J]. *Journal of Educational Studies*, 2014, 10(6): 110-117. (in Chinese)
- [4] 陆宇, 李光球, 陈华, 等. 留学生电路分析实验全英文教学研究与实践[J]. *实验室研究与探索*, 2016, 35(11): 170-173.
LU Y, LI G Q, CHEN H, et al. Research and practice of English teaching of experiment of circuit analysis for foreign students[J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2016, 35(11): 170-173. (in Chinese)
- [5] 何芳丽, 程健琳, 曹朝晖, 等. 医学院校留学生生物化学实验教学改革初探[J]. *教育教学论坛*, 2018, 17: 273-274.
HE F L, CHEN J L, CAO Z H, et al. The first exploration of reformation of biochemistry experimental teaching in medical colleges[J]. *Education Teaching Forum*, 2018, 17: 273-274. (in Chinese)
- [6] 张伦. 大学物理实验全英文教学模式的探讨及展望[J]. *大学物理实验*, 2020, 32(1): 119-122.
ZHANG L. Exploration and prospect of the teaching model of physics experiment course for undergraduates in English[J]. *Physical Experiment of College*, 2020, 32(1): 119-122. (in Chinese)
- [7] 教育部财政部国家发展改革委关于深入推进世界一流大学
- 和一流学科建设的若干意见[EB/OL]. (2022-1-29)[2022-3-10]. http://www.moe.gov.cn/srcsite/A22/s7065/202202/t20220211_598706.html
- [8] 吴平, 张师平. 国际班工科物理实验课程[C]. 2013 年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会论文集. 太原: 中国物理学会教学委员, 2013: 85-86.
- [9] 于建勇. 物理实验教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2018.
- [10] YOUNG H D, FREEDMAN R. *Sears and Zemansky's University Physics: 1*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [11] YOUNG H D, FREEDMAN R. *Sears and Zemansky's University Physics: 2*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [12] 邱春荣, 黄整. 大学物理实验双语教程[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2010.
- [13] 唐晋生. 大学物理实验: 双语教学用书[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [14] 吕洪凤. 大学物理实验[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2013.
- [15] 史金辉, 邢健, 张晓峻, 等. 大学物理实验双语教程[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2014.
- [16] 武颖丽, 李平舟. 大学物理实验[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2016.
- [17] 付浩, ESMOND A B. 大学物理实验[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [18] BARTSCH R A, COBERN K M. Effectiveness of Power-Point presentations in lectures[J]. *Computers & Education*, 2003, 41(1): 77-86.
- [19] 谭义东, 陈旭. 教育技术应用的美学升华探析——以 PowerPoint 多媒体教学课件为例[J]. *高教论坛*, 2011(11): 48-51.
TAN Y D, CHEN X. Aesthetic sublimation of education technology application [J]. *Higher Education Forum*, 2011(11): 48-51. (in Chinese)
- (上接第 45 页)
- ZHONG J H, GU Y J, ZHANG D H, et al. Open education exploration in undergraduate physics experiment by incorporation of physics tournament into the elementary course[J]. *Physics and Engineering*, 2017, 27(5): 99-102. (in Chinese)
- [21] 张俊武. 将 CUPT 题目作为应用目标, 纳入科研训练和实验物理技术课程[J]. *物理实验*, 2017, 37(3): 35-36.
ZHANG J W. Taking CUPT topics as application objectives and incorporating them into scientific research training and experimental physics technology courses[J]. *Physics Experimentation*, 2017, 37(3): 35-36. (in Chinese)
- [22] 陈晨, 陆建隆. 将 IYPT 实验融入中学物理教学的理论思考与实践探索[J]. *物理教师*, 2017, 38(3): 22-26.
CHEN C, LU J L. Theoretical thinking and practical exploration of integrating IYPT experiment into middle school physics teaching[J]. *Physics Teacher*, 2017, 38(3): 22-26. (in Chinese)
- [23] 王槿, 朱江, 李文华, 等. 启发式的多层次居家物理实验设计探索[J]. *物理实验*, 2020, 40(4): 31-37.
WANG J, ZHU J, LI W H, et al. Exploration on the heuristic multi-leveled home-based physics experiment design[J]. *Physics Experimentation*, 2020, 40(4): 31-37. (in Chinese)