

## 装备技术体系网络建模与结构优化方法\*

游翰霖, 李孟军, 姜江, 罗吉利, 徐建国  
(国防科技大学 信息系统与管理学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:**针对装备技术发展管理的重用度和冗余度问题,研究了体系网络建模与结构优化方法。将装备技术抽象为节点,技术关系抽象为边,提出了基于装备技术描述属性框架和技术关系分析的体系网络建模方法;将3种经典的网络社团探测方法应用于装备技术聚类,通过比较评估指标,生成了技术聚类优化方案;基于加权网络中心度算法,识别了对体系冗余影响最大的装备技术。以包含235项激光武器装备技术的技术体系为例,验证了方法的有效性,总结了体系结构的优化结论。

**关键词:**装备技术体系;网络模型;结构优化;技术聚类;冗余探测

**中图分类号:**E917 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2014)06-123-05

## A network modeling and structure optimization approach for technology system of systems

YOU Hanlin, LI Mengjun, JIANG Jiang, LUO Jili, XU Jianguo

(College of Information System and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The approach of network modeling and structure optimization for technology system of systems was researched to solve the problems of reusability and redundancy which are key properties of the development and management of weapon technologies. Abstracting weapon technologies as nodes and abstracting technology relationships as sides, the network modeling approaches based on the description property framework of weapon technologies and the analysis of technology relationships were proposed; three typical approaches of the network community detection were applied to cluster the weapon technologies and the optimization method of technology clustering was generated by comparing the evaluation index of this three approaches; at last, the weapon technologies which are the most influential factors to the redundancy of system were identified at the basis of the centrality measure of weighted networks. A case which includes 235 laser weapon technologies was studied to validate the efficiency of the proposed approach and to summarize the structure optimization method of the system.

**Key words:** technology system of systems; network model; structure optimization; technology clustering; redundancy detection

随着新军事变革的深入,未来战争形态已从单一武器平台的对抗转变为作战体系能力的较量<sup>[1]</sup>。武器装备是作战体系的重要构成要素,作为支撑武器装备各类战术功能的装备技术,对作战体系能力具有重要影响。高新装备技术的涌现推动着先进武器装备系统的发展,引发未来战争中战争形态和作战样式的不断演化。作战体系对高新科技的依赖度不断增加,装备技术的研发与管理在体系力量生成中的作用日益显著。

武器装备的先进性和复杂性不断增长,任何单一的装备技术都无法完全满足战术功能的支撑需求<sup>[2]</sup>。装备技术发展水平对武器装备研发的成本、工期和风险具有重要影响,先进武器装备系统研发方案的制定,要以支撑功能所需的不同类

型装备技术的可行性论证为基础。为满足武器装备功能支撑需求,包含不同类型装备技术和技术关系的装备技术体系成为技术研发与管理研究的焦点。由于科学技术的迅速发展和创新成果应用的扩散,装备技术体系规模急速扩大,技术关系的复杂程度显著提高,体系结构成为影响装备技术体系整体能力和发展演化趋势的重要因素。以提升装备技术体系对重大武器装备战术功能的支撑能力为导向,描述和优化装备技术体系结构,是科学论证武器装备/装备技术研发方案的基础。

### 1 相关研究

近年来,国内外出现了许多技术描述和技术关系分析的研究成果。专利文本作为技术数据的

\* 收稿日期:2014-05-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71331008,71201168)

作者简介:游翰霖(1990—),男,贵州遵义人,博士研究生,E-mail:hlyou1990@hotmail.com;

姜江(通信作者),男,讲师,博士,E-mail:jiangjiangnudt@hotmail.com

重要载体,是技术描述和技术关系分析研究的焦点。Tseng 研究了专利文本数据挖掘技术,提出了基于文本挖掘的技术关键词描述方法,使用关键词共现率识别和度量技术关系<sup>[3]</sup>。Thorleuchter 研究了交叉影响分析(Cross Impact Analysis, CIA),在技术关系定性描述的基础上提出了定量分析方法<sup>[4]</sup>。Chang 基于专利文本中挖掘得到的关键词及其出现频率数据,得到技术描述关键词向量,通过向量欧式空间距离度量技术关系<sup>[5]</sup>。Yoon 从专利文本语义分析的角度研究技术关系,提出了基于“主语-动词-宾语”结构的分析方法<sup>[6]</sup>。创新知识流是技术扩散的重要载体,Hung 基于专利引用数据,提出了描述创新传播的技术关系分析方法<sup>[7]</sup>。

装备技术研发与管理研究既有技术研究的普适共性,也有因军事应用背景而产生的特性。美国国防部体系结构框架 2.0 中包含了装备技术的元模型描述框架,提出了指导装备技术研发论证的一般性准则和流程<sup>[8]</sup>。刘新亮使用元模型描述和多智能体体系仿真方法,研究了技术引入对武器装备体系影响的评估方法<sup>[9]</sup>。常雷雷提出了“使命-任务-能力-系统-技术”的装备技术映射关系逐层分解结构<sup>[1]</sup>,得到了基于支撑武器装备需求牵引的装备技术体系关系梳理方法,如图 1 所示。

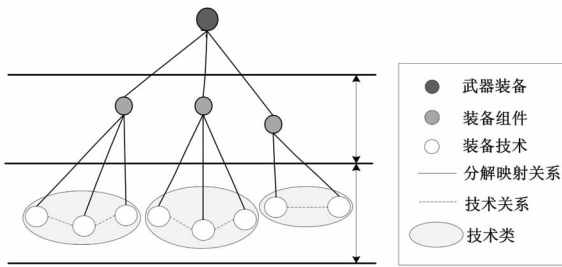


图 1 现有装备技术分解方法

Fig. 1 Available analysis approach of weapon technology

现有的装备技术分解方法基于支撑武器装备需求角度来梳理技术关系,能够简洁客观地描述装备技术在满足外部需求的属性。由于分解方法采用树状层级结构,单纯从武器装备支撑需求角度来梳理装备技术和技术关系,不仅忽略了来源于其他描述属性的技术关系,难以全面刻画装备技术体系,而且在体系描述中也存在技术识别冗余、关系分析遗漏和技术聚类不合理等缺陷,如图 2 所示。

## 2 技术关系分析

技术关系分析是体系网络建模的重要数据来

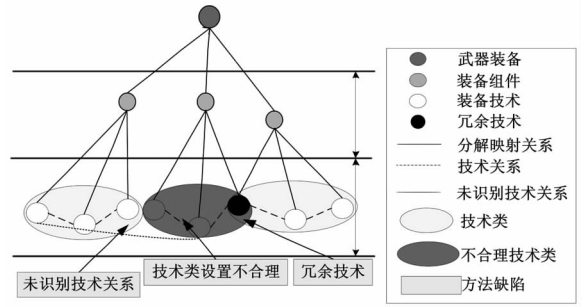


图 2 现有装备技术分解方法的缺陷

Fig. 2 Drawbacks of the analysis approach

源,也是体系结构优化的基础。本文主要关注两种类型的技术关系:1)来源于支撑武器装备属性的技术应用关系;2)来源于技术组分属性的技术相似关系。

由于装备技术具有专业性和复杂性,准确梳理各类技术的所有属性难以完成,获取相应的属性信息更加困难。装备技术文本是体系描述信息的重要数据来源,结合专家经验,挖掘和整理所需技术属性描述关键词能够有效地满足体系描述与建模的数据需求。基于关键词的技术描述和技术关系分析方法已在相关研究成果中被验证和应用<sup>[3,5]</sup>。本文根据建模和分析需求选择对应的装备技术描述属性,从装备技术文本数据中获取支撑装备属性描述关键词和技术组分属性关键词,分析技术应用关系和相似关系,构建对应的网络模型。装备技术体系描述与建模流程如图 3 所示。

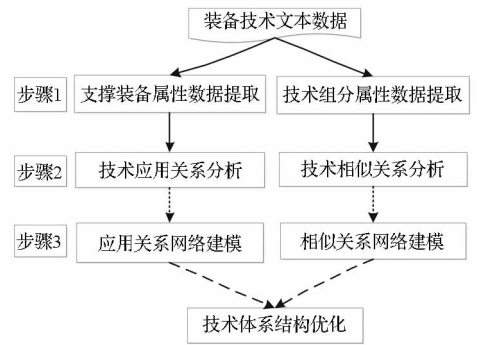


图 3 装备技术体系描述与建模流程

Fig. 3 Description and modeling process of technology system of systems

### 2.1 技术应用关系分析

支撑武器装备是描述装备技术外部需求的属性信息。根据主要装备类型名称,生成属性描述关键词字典。引入专家经验,选择各装备技术对应的支撑装备关键词,并判断两两关键词相对重要度。整理得到描述关键词组及其对应的权重向量。具体步骤如图 4 所示。

在获取描述关键词信息后,定义关键词匹配

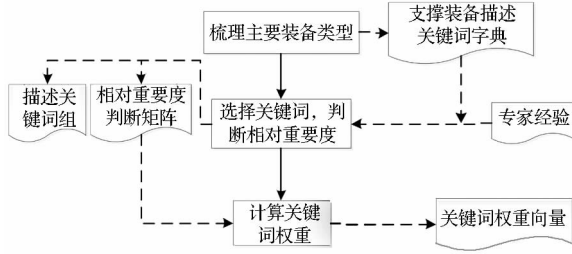


图 4 装备技术支撑装备属性描述信息获取流程

Fig. 4 Obtaining process of weapon attribute description

度  $MatchRate$  和设置是否存在技术关系判断条件的模糊度  $FR$ , 计算规则如下:

规则 1:  $MatchRate \in [0, 1]$ , 若两项技术描述关键词完全不同, 则  $MatchRate = 0$ ; 反之, 若关键词及对应权重完全相同, 则  $MatchRate = 1$ 。

规则 2: 匹配的关键词数量越多, 权重越大, 则  $MatchRate$  值越高。

规则 3:  $FR$  值越大, 判断技术关系存在的条件越宽松。

最后, 举例说明分析技术应用关系的算法。假设技术  $tech_A$  的描述关键词向量为  $KG_A = \{keyword_1, keyword_2, keyword_3\}$ , 对应权重向量为  $W_A = \{w_1, w_2, w_3\}$ ; 技术  $tech_B$  的描述关键词向量为  $KG_B = \{keyword_1, keyword_4, keyword_3, keyword_5\}$ , 对应权重向量为  $W_B = \{w_4, w_5, w_6, w_7\}$ 。则  $tech_A$  和  $tech_B$  的关键词匹配度:

$$MatchRate_{AB} = \min(w_1, w_4) + \min(w_3, w_6) \quad (1)$$

基于专家经验, 从  $[0, 1]$  区间中选择合适的  $FR$  值, 计算技术应用关系匹配度下限  $MatchRate_U$ :

$$MatchRate_U = (\max_N(MatchRate) - \min_N(MatchRate)) \times (1 - FR) \quad (2)$$

若  $MatchRate_{AB} \geq MatchRate_U$ , 则  $tech_A$  和  $tech_B$  之间的应用关系  $TR_{AB}^A$  存在。

## 2.2 技术相似关系分析

技术组分是描述装备技术内部功能的属性信息。已有的研究显示, 形态分析 (Morphology Analysis, MA) 提供了基于关键词的技术功能描述方法<sup>[10]</sup>。与支撑装备属性不同, 技术组分属性描述涉及不同类型的关键词, 需要构建标准化的描述框架。结合文本挖掘技术, 技术组分属性描述框架构建步骤如图 5 所示。

技术组分属性描述关键词信息获取方法和关键词匹配度  $MatchRate_1$  算法与 2.1 节介绍的对应方法相同, 在此不再赘述。

与技术应用关系不同, 技术相似关系不只一

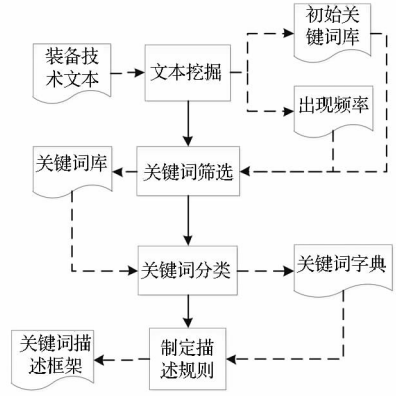


图 5 技术组分属性描述框架构建流程

Fig. 5 Construction process of component attribute description

种, 设置两类模糊度  $FR_1$  和  $FR_2$ , 且  $FR_1 \leq FR_2$ 。定义两项装备技术可能存在的 4 种相似关系:

① 雷同关系: 装备技术名称相同。

② 严重相似关系: 装备技术名称不同, 且

$$MatchRate_1 \geq (\max_N(MatchRate_1) - \min_N(MatchRate_1)) \times (1 - FR_1) \quad (3)$$

③ 一般相似关系: 装备技术名称不同, 且

$$MatchRate_1 \geq (\max_N(MatchRate_1) - \min_N(MatchRate_1)) \times (1 - FR_2)$$

$$MatchRate_1 \leq (\max_N(MatchRate_1) - \min_N(MatchRate_1)) \times (1 - FR_1) \quad (4)$$

⑤ 无相似关系: 装备技术名称不同, 且

$$MatchRate_1 \leq (\max_N(MatchRate_1) - \min_N(MatchRate_1)) \times (1 - FR_2) \quad (5)$$

## 3 装备技术体系结构优化

基于装备技术应用关系和相似关系, 构建侧重属性不同的两类网络模型。根据网络模型结构, 分析技术聚类结果, 识别冗余装备技术, 优化装备技术体系结构。

### 3.1 装备技术聚类分析

装备技术聚类分析的目标是探测得到内部关系紧密、外部关系稀疏的技术聚类方案, 与复杂网络社团探测研究目标相同<sup>[13]</sup>。基于分析得到的技术应用关系, 构建技术应用网络模型, 引入网络社团结构评估指标和社团探测方法, 对技术聚类结果进行评估和筛选。

根据技术应用网络模型性质, 选取无向无权

网的模块度  $Q$  作为评估指标<sup>[13]</sup>,其计算方法如式(6)所示。 $Q$  值越大,技术聚类方案越好。

$$Q = \frac{1}{2m} \sum_{i,j=1}^n \left( A_{ij} - \frac{k_i k_j}{2m} \right) \delta(C_i, C_j) \quad (6)$$

$A_{ij}$ 代表网络模型邻接矩阵的各个元素, $n$  是网络包含节点个数, $m$  是边的条数。 $k_i$  代表第  $i$  个节点的度数, $C_i$  是社团编号,而  $\delta(C_i, C_j)$  是模块度计算引入的参数,其计算方法如式(7)所示。

$$\delta(C_i, C_j) = \begin{cases} 1, & C_i = C_j \\ 0, & C_i \neq C_j \end{cases} \quad (7)$$

难以找到适用于所有网络结构的社团探测算法。本文应用 3 类比较经典的社团探测算法:着眼边介数的 Girvan-Newman 算法<sup>[14]</sup>、基于拉普拉斯矩阵的谱平分算法<sup>[15]</sup>以及以模块度为优化目标的启发式优化算法<sup>[16]</sup>。比较 3 类方法生成聚类方案的最大模块度,选取最优技术聚类方案。

### 3.2 冗余装备技术识别

冗余装备技术是指两项(或两项以上)存在相似关系的装备技术。从保证体系可靠性出发,保持适当的冗余度是合理而必要的。但若体系冗余度过高,将导致研发资源的浪费。因此,在体系结构优化中,需要识别出对体系冗余影响最大的冗余装备技术。

雷同、严重相似和一般相似关系在冗余装备技术识别中的作用不同,在构建相似关系网络模型时,将 3 类关系抽象为不同权重的连接边。在分析网络模型节点冗余度时,既要考虑连接边的数量,也要考虑连接边的属性<sup>[11]</sup>,识别算法如下所示。

规则 1:若节点与雷同关系边相连,将其识别为完全冗余技术。

规则 2:若网络模型包含  $N$  个节点,严重相似关系边权重为 2,一般相似关系边权重为 1,计算节点  $Node_i$  冗余度指标  $K_i$ <sup>[12]</sup>。

$$K_i = \sum_{j=1}^N a_{ij} \quad (8)$$

规则 3:冗余技术识别率  $\rho$ ,将冗余度最高的  $CT$  项技术识别为严重冗余技术:

$$CT = \min(X), X \geq \rho \times N \text{ and } X \in N^+ \quad (9)$$

## 4 实例研究

本文实例研究来源于装备预研技术的部分数据,旨在通过体系结构优化,提高装备技术预研管理的科学性。实例包含 235 项激光装备预研技术的编号、名称、支撑装备描述关键词和技术组分描述关键词。在项目研究中开发了装备技术体系信

息管理与结构优化原型系统,通过系统中人机交互界面,设置应用关系模糊度  $FR = 0.5$ 。构建应用关系网络如图 6 所示。

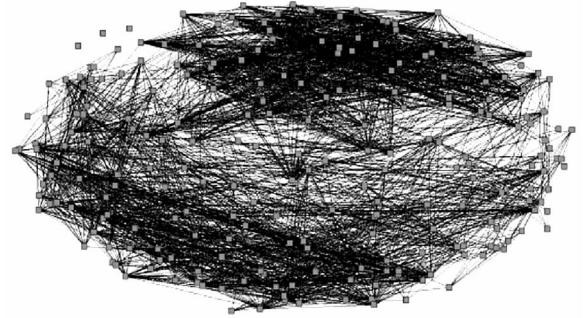


图 6 技术应用关系网络模型

Fig. 6 Network model of technology application relationships

分别使用 Girvan-Newman 算法、谱平分算法和启发式优化算法探测技术应用关系网络模型社团结构,各算法所得最优探测方案的模块度对比分析如图 7 所示。

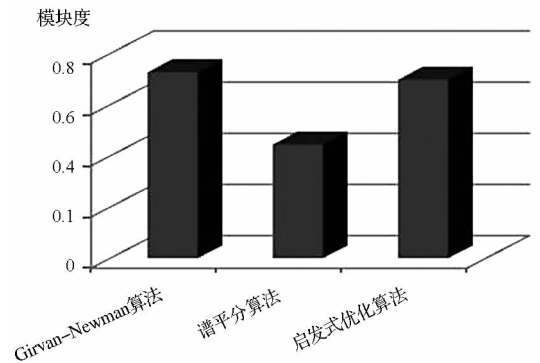


图 7 聚类方法评估指标对比

Fig. 7 Evaluation index values of technology clustering results

从图 7 可知,Girvan-Newman 算法能够得到模块度最大的聚类方案,最适合于激光装备预研技术应用关系模型的聚类分析。选取最优聚类方案如图 8 所示。

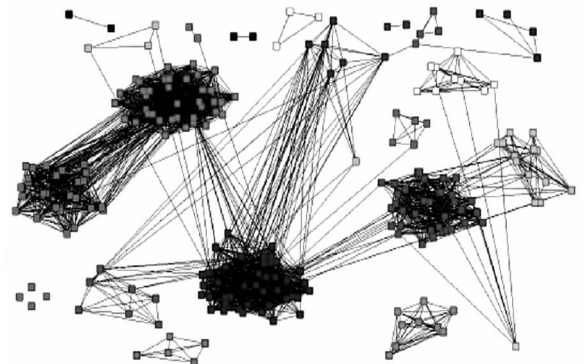


图 8 最优技术聚类分析结果

Fig. 8 Best result of the technology clustering

经过人机交互迭代,在系统中设置严重相似

关系模糊度  $FR_1 = 0.1$ , 一般相似关系模糊度  $FR_2 = 0.25$ 。构建相似关系网络如图 9 所示。

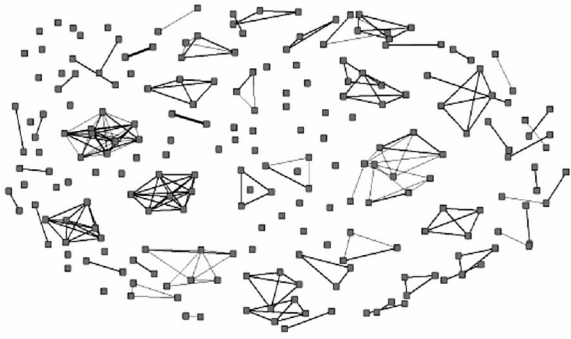


图 9 技术相似关系网络模型

Fig.9 Network model of technology similarity relationships

基于网络模型数据,在系统中设置冗余技术识别率  $\rho = 0.03$ ,识别出装备技术体系中存在的冗余技术如表 1 所示。

表 1 冗余装备技术列表

Tab.1 Redundant technology list

技术编号	冗余类型	冗余度
1105010100	完全冗余	-
1121070400	完全冗余	-
1106010101	完全冗余	-
1128030204	完全冗余	-
1123070401	严重冗余	13
1128030202	严重冗余	13
1128030201	严重冗余	13
1128030104	严重冗余	13
1128020202	严重冗余	13
1128010303	严重冗余	13
1112060501	严重冗余	12
1112060204	严重冗余	12

## 5 结论

本文从装备技术体系特性和发展趋势出发,结合现有体系结构生成方法的缺陷,提出了基于网络模型的结构优化方法。引入专家经验,提出了两类侧重属性不同的网络模型构建方法。对比分析应用网络社团探测结果,得到了使用 Girvan-Newman 算法生成的技术聚类最优方案,从而增强技术体系研发的重用性。基于加权网络中心度评估,识别出不同类型和不同冗余度排序的装备技术,为技术体系整体冗余度调整提供了参考。

实例分析展示和验证了本文提出的方法的有效性。前期开发的原型系统以良好的人机交互性迭代验证了计算机分析结果与专家经验。得出的

结构优化结论能够有效辅助装备技术管理决策。

在下一步研究中,将继续梳理不同装备技术在支撑武器装备中存在的不同类型关系,深入探索武器装备体系与装备技术体系间的相互影响。识别出对作战体系能力具有重大影响的关键技术,为提升装备技术体系能力提供对策建议。

## 参考文献 (References)

- [1] 常雷雷. 武器装备体系技术贡献度评估方法研究[D].长沙:国防科技大学,2010.  
CHANG Leilei. Method research on technology contribution rate evaluation of weapon system-of-systems[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. (in Chinese)
- [2] Chang L L, Lu Y J, Zhao Q S, et al. Technology system of systems: concepts and hierarchical structure[C]//Proceedings of IEEE International Conference of System of Systems Engineering, Genoa, Italy,2012: 269 - 275.
- [3] Tseng Y H, Lin C J, Lin Y I. Text mining techniques for patent analysis[J]. Information Processing and Management, 2007, 43(5): 1216 - 1247.
- [4] Thorleuchter D, Van den Poel D, Prinzie A. A compared R&D-based and patent-based cross impact analysis for identifying relationships between technologies[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2010, 77(7): 1037 - 1050.
- [5] Chang P L, Wu C C, Leu H J. Using patent analysis to monitor the technological trends in an emerging field of technology: a case of carbon nanotube field emission display[J]. Scientometrics, 2010, 82(1): 5 - 19.
- [6] Yoon J, Kim K. Identifying rapidly evolving technological trends for R&D planning using SAO-based semantic patent networks[J]. Scientometrics, 2011, 88(1):213 - 228.
- [7] Hung S W, Wang A P. Examining the small world phenomenon in the patent citation network: a case study of the radio frequency identification (RFID) network [J]. Scientometrics, 2010, 82(1): 121 - 134.
- [8] United States Department of Defense. Department of defense architecture framework 2.0 [S/OL]. (2009 - 05 - 28). <https://www.us.army.mil/suite/page/454707>, 2009.
- [9] 刘新亮. 技术引入对武器装备体系能力影响的评估方法研究[D].长沙:国防科技大学,2009.  
LIU Xinliang. A methodology for impact evaluation of technology infusion on the capability of weapon system of systems [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009. (in Chinese)
- [10] Yoon B, Park Y. A systematic approach for identifying technology opportunities: keyword-based morphology analysis[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2005, 72(2): 145 - 160.
- [11] Opsahl T, Agneessens F, Skvoretz J. Node centrality in weighted networks: generalizing degree and shortest paths[J]. Social Networks, 2010, 32(3): 245 - 251.
- [12] Bagler G. Analysis of the airport network of India as a complex-weighted network [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Application, 2008, 387(2): 2972 - 2980.
- [13] Newman M E J. Detecting community structure in networks[J]. The European Physical Journal B, 2004, 38(2): 321 - 330.
- [14] Newman M E J, Girvan M. Finding and evaluating community structure in networks [J]. Physical Review E, 2004, 69(2): 026113.
- [15] Newman M E J. Community detection and graph partitioning[J]. Europhysics Letters,2013,103(2):28003.
- [16] Newman M E J. Fast algorithm for detecting community structure in networks[J]. Physical Review E, 2004, 69(6): 066133.