

数字化情境下工程项目沟通网络的结构特征

——基于邮件数据的实证研究

蒋小禾

同济大学经济与管理学院，上海

收稿日期：2022年11月26日；录用日期：2022年12月16日；发布日期：2022年12月28日

摘 要

工程项目的成功与项目参与主体间的有效沟通密切相关，面对新型数字化技术对主体沟通需求及方式的影响，刻画新情境下的工程项目沟通网络内在结构及机制具有重要理论及实践意义。基于工程项目邮件沟通纵向数据及社会网络分析方法，分别从跨阶段、跨主体比较视角对工程项目沟通网络的结构特征进行实证刻画，比较项目不同阶段、不同参与主体的沟通网络结构，定量识别相关因素对入度中心性、出度中心性、接近中心性、中介中心性等影响。研究成果有助于揭示数字化情境下工程项目沟通结构的复杂自组织特征，为沟通网络结构优化提供启示。

关键词

工程项目，沟通网络，邮件数据，社会网络分析法

Structural Characteristics of Communication Networks in Construction Projects in the Digital Context

—An Empirical Study Based on Email Data

Xiaohe Jiang

School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai

Received: Nov. 26th, 2022; accepted: Dec. 16th, 2022; published: Dec. 28th, 2022

Abstract

Effective communication among project participants is essential to the success of a project. Facing the impact of new digital technology on the communication needs and methods of the participants, it is of great theoretical and practical significance to describe the internal structure and mechanism of

the project communication network in the new context. Based on the longitudinal data of email communication of a project and social network analysis method, the structural characteristics of the project communication network are empirically portrayed from the perspective of cross-stage and cross-participant comparison, the structures of the communication network of different stages and different participants of the project are compared, and the impact of relevant factors on degree centrality, indegree centrality, outdegree centrality, closeness centrality, betweenness centrality, etc. is quantitatively identified. The research results are helpful to reveal the complex self-organization characteristics of the communication structure of construction projects in the digital context, and provide inspiration for the optimization of the communication network structure.

Keywords

Construction Projects, Communication Network, Email Data, Social Network Analysis

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

项目参与主体间有效的沟通是工程项目成功的必要条件[1]。复杂关系网络在近 20 年一直是建设领域的研究热点[2]，随着越来越先进的施工技术和复杂的项目需求，建筑行业正变得越来越知识密集化[3]。但相较于其他行业，工程项目组织结构复杂，沟通管理难[4]。鉴于建设项目是典型的临时性多边组织[5]，参与主体众多[6]，项目成员呈明显的异质、分群特征，在工程项目内部关系网络中的嵌入具有临时性，成员间的关系网络呈现明显的复杂和动态特征[7]。面对新型数字化技术对主体沟通需求及方式的影响，利用工程项目沟通过程中的邮件数据，通过实证分析的方法研究工程项目沟通网络的结构特征同时具有理论和实践意义。

2. 文献综述

电子邮件作为一种现代化的沟通方式，跨越了时间和组织内外各部门的空间限制，为关系网络分析提供了新的视角，越来越多的学者利用电子邮件数据研究项目内部的沟通网络。电子邮件和其他技术支持通过组织快速传播知识和信息，并且被认为是对组织实践系统的补充，包括分散决策、工作调换和多任务[8]。现有研究大多采用问卷调查的研究方法[9] [10]，而电子邮件有助于通过非正式网络快速传播信息和知识[11]，可以通过客观地记录沟通对象、沟通时间来克服受访者的回忆偏差[12]。目前，该领域的研究主要聚焦于利用文本挖掘的方法探索邮件沟通[13]、知识共享关系和协作能力的相关关系，并利用社会网络分析方法分析项目参与个体的关系网络结构特征[2] [14] [15]。如 Hossain 和 Wu [16]利用电子邮件数据，在基于项目和跨项目的层次上探索了项目参与者的协作能力与沟通网络结构位置的相关性。

总结来看，尽管在沟通网络等领域中相关方面的研究已经很多，但是在工程项目管理领域，利用邮件沟通数据来研究工程项目沟通网络的相关研究还很少，基于跨阶段、跨主体视角分别进行分析比较的研究就更少。因此利用工程项目邮件沟通数据，对工程项目沟通网络进行实证研究是有必要的，并且具有重大的理论和实践意义。本文利用社会网络分析方法对工程项目沟通关系网络进行上述研究。

社会网络分析方法(Social Network Analysis, SNA)在近年来被广泛运用于建设工程领域[17] [18] [19]

[20]用以研究沟通网络的结构特征[8] [21]。SNA 被用于分析建设工程管理中各种关系的结构特性[22]。沟通与个人获取信息和资源的能力密切相关[23] [24]。度中心性是 SNA 中代表一个节点的直接连接数量的常用指标，即个人发送电子邮件或接收电子邮件的数量。度中心性可以作为个人接触的信息多样性的一个指标，度中心性越高，该员工直接接触的其他人的数量就越高[25]。具有高度中心性的个人通常与组织中的其他人联系更紧密，拥有更高的成员权益，在工作中更不容易离职。他们更多的参与和与他人更经常的交流使他们成为组织中更有价值的成员和未来提供援助的来源[26] [27]。在工程项目沟通网络中，入度中心性可以反映个人的受欢迎程度[28]，出度中心性可以反映个人的活跃程度[29]。接近中心性度量一个节点到其他所有节点的距离，被视为反映独立于控制的指标[30]。中介中心性是指经过某节点的最短路径数目，可以反映个人作为沟通的中心并控制沟通的程度[25]。文中涉及变量见表 1。

Table 1. Summary of study variables

表 1. 变量描述

名称	描述
度中心性	节点在沟通网络中建立联系的数量，包括入度中心性和出度中心性。入度中心性测度项目参与人员收到的电子邮件总数，代表受欢迎程度；出度中心性测度发送电子邮件总数，代表活跃程度。
接近中心性	某一节点与其他节点之间的接近程度，测量一个点到其他所有点的距离，测度独立于控制的潜力。
中介中心性	经过某节点的最短路径数目，测度控制沟通关系的潜力。
从业经验	项目参与人员在建筑行业的从业经验，1 = 少于 5 年，2 = 5 至 10 年，3 = 10 年以上。
岗位	项目参与人员是否处于项目经理岗位，0 = 项目经理，1 = 工程师。
所属参与方	项目人员在项目中所属的组织，1 = 业主方，2 = 设计方，3 = 施工方，4 = 其他参与方。

3. 研究数据收集与处理

本文研究数据收集于上海市某大型复杂项目建设过程中的邮件沟通平台，项目参与人员在该平台上完成了大部分沟通过程。该方法比较于问卷调查方法有显著的优点，克服了问卷调查中个人偏好带来的

Table 2. Codes of organizations

表 2. 组织编码

组织名称	组织编码
Project client	O
Client operation consultant team	O-O
Client project management team	O-P
Client cost consultant team	O-C
General Designer	D-G
Foundation pit designer	D-FP
Civil defence designer	D-CD
General Contractor-North	G-N
Subcontractor-Steel Structure-North	S-SN
Construction supervisor-North	V-N
供应商	P-CP

误差[31]。数据收集从 2018 年 11 月截至 2021 年 1 月, 历时 27 个月, 共收集 11,162 封邮件。在数据收集期间, 该项目完成设计阶段并进入施工阶段, 设计阶段自 2018 年 11 月至 2019 年 8 月共 9 个月, 从此进入施工阶段, 直至邮件收集结束月份 2021 年 1 月共 18 个月, 该项目仍在施工过程中。

针对初始邮件样本的筛选, 现有研究有以下几种处理方式: 对所有邮件样本进行分析[32]、对 6 封及以上双向发送的邮件进行分析[33]以及对 4 封及以上双向发送的邮件进行分析[3]。为确保数据的完整性, 本文选取所有的邮件样本进行后续的数据分析。在该项目邮件沟通平台上, 共 297 名员工参与使用, 经过筛选, 与项目无关人员发送或回复的邮件数据被剔除, 邮件沟通整体网络剩余节点 221 个。

为便于后续数据分析工作的开展, 作者根据人员所属的不同参与方和组织, 为参与组织和每位参与人员进行编码。具体编码格式在表 2、表 3 中作部分展示。

Table 3. Codes of personnel
表 3. 人员编码

人员	人员编码
缪**	D-FP3
罗**	O-5
陈**	G-N3
金*	C-S2
阎**	P-C4
李*	V-N2
.....	

4. 工程项目沟通网络的结构特征分析

考虑后续数据分析工作, 为便于理解工程项目参与人员各属性占比情况, 对参与人员的工作经验、岗位、所属参与方进行分类。其中工作经验以项目参与人员从业年限代表, 分为 3 类: (工程项目工作年限)少于 5 年、5~10 年、大于 10 年; 工作岗位分为工程师和项目经理; 所属参与方分为业主方、设计方、施工方和其他参与方。各属性占比如表 4 所示。

Table 4. Attributes of personnel
表 4. 人员属性

变量	分类	数量	占比
从业经验	少于 5 年	22	9.95
	5 至 10 年	94	42.53
	大于 10 年	105	47.51
岗位	工程师	122	55.20
	项目经理	99	44.80
参与方	业主方	50	22.62
	设计方	155	70.14
	施工方	4	1.81
	其他参与方	12	5.43

利用社会网络分析软件 UCINET 对邮件沟通网络进行描述性分析, 其程序 Netdraw 使得邮件沟通网络节点和边可视化。为了更直观地展示各个节点的所属参与方, 人员编码 O-开头代表业主方, 在网络图中以圆形表示; D-与 C-开头为设计方, 以方形表示; G-开头为施工方, 以钻石形表示; V-开头为监理方, 以正三角形表示; P-开头为供应商, 以倒三角表示。为进一步展示各参与人员在沟通网络中的活跃程度 [30], 参与人员的度中心性以节点大小表示。图 1 展示了邮件沟通网络的结构。

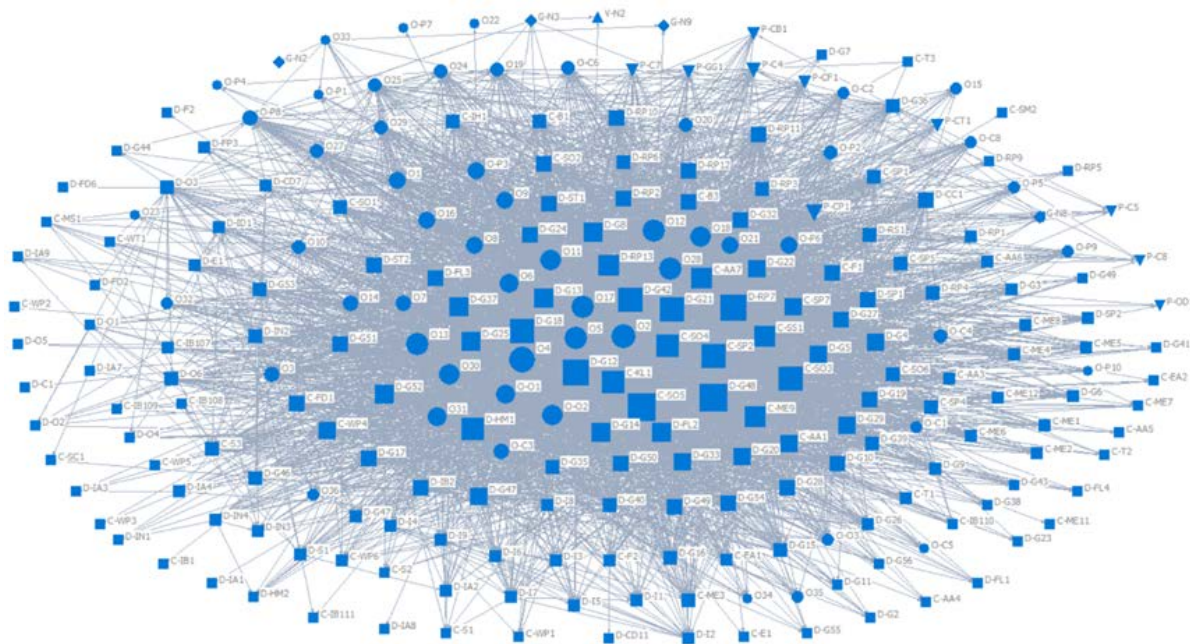


Figure 1. Overall network of project communication

图 1. 工程项目整体沟通网络

该网络模型能够直观地展示项目参与人员之间的沟通, 其中业主方和设计方占据沟通网络的中心, 并且直观来看节点大小较大, 说明度中心性相比于其他参与方要更高, 但工程项目不同阶段的沟通、不同参与方的沟通之间具体的差异, 还需进行深入一步的分析。

4.1. 工程项目沟通网络的跨阶段结构特征比较

为比较工程项目沟通网络的跨阶段结构特征, 结合本项目的实际情况, 将项目设计阶段和施工阶段的沟通网络数据分别进行处理。首先, 利用 Netdraw 分别绘制工程项目沟通设计阶段和施工阶段网络, 如图 2、图 3。

通过对比发现, 在项目开始施工前, 圆形所代表的业主方和正方形所代表的设计方占据了邮件沟通网络的全部, 此时施工方和其他参与方尚未加入沟通网络。而在项目开工后, 业主方和设计方仍占据网络的主要位置, 施工方和其他参与方处于沟通网络的边缘位置。为进一步刻画工程项目沟通网络设计阶段和施工阶段的差别, 利用 t-检验方法来验证两者之间指标的差异。由于入度中心性、出度中心性和度中心性不服从正态分布, 可能导致参数估计的偏差, 因此对这三个指标取自然对数来获得正态分布的数据。t-检验结果如图 4。

对设计、施工阶段的网络密度、度中心性、接近中心性、中介中心性进行独立样本 t 检验。两阶段相比, 施工阶段的出度中心性、度中心性、中介中心性在显著性 $p < 0.1$ 水平大于设计阶段。证明施工阶段发送邮件数更多、沟通更密集, 在沟通方面的控制力更强。

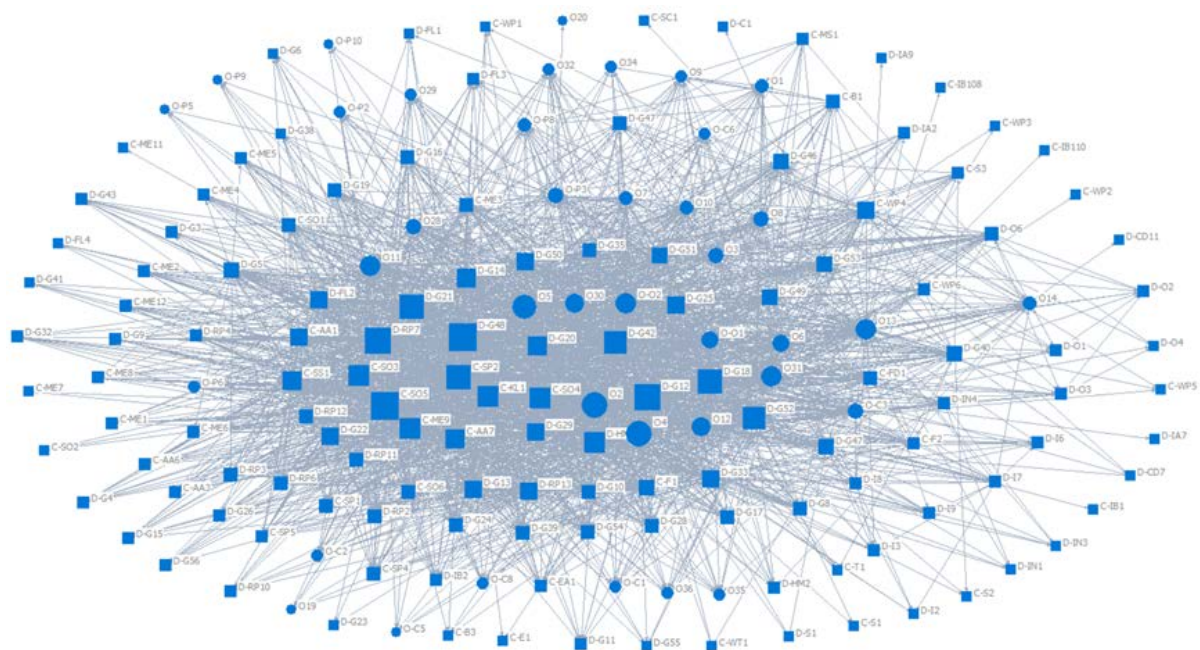


Figure 2. Project communication network in design stage
图 2. 工程项目设计阶段沟通网络

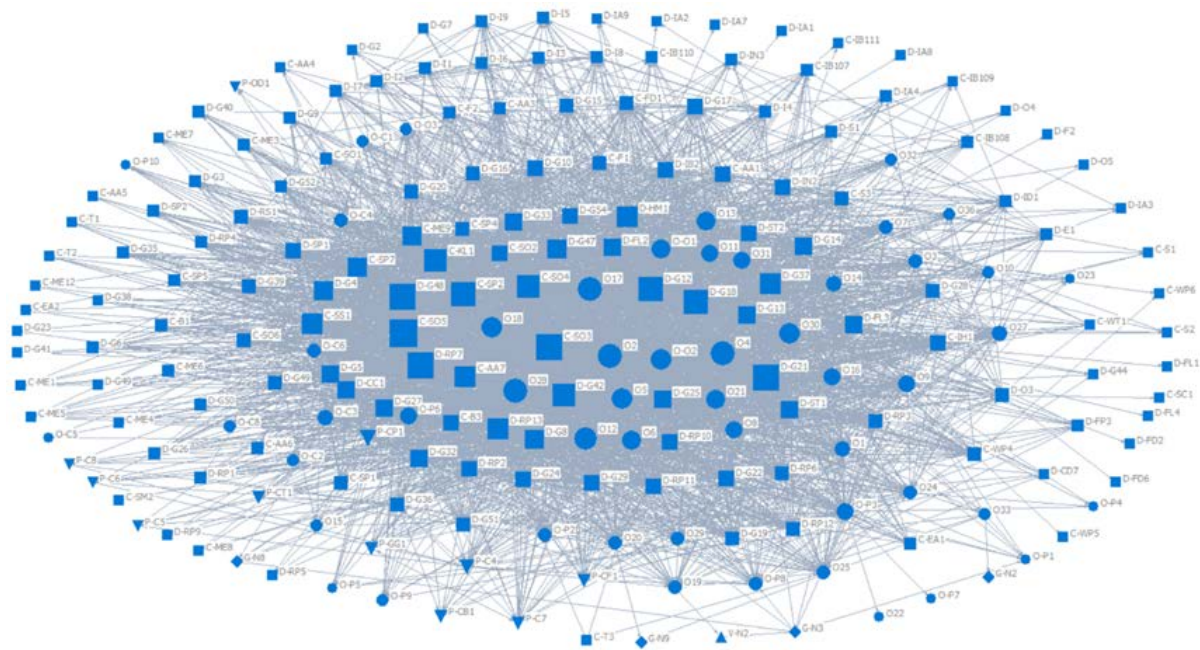


Figure 3. Project communication network in construction stage
图 3. 工程项目施工阶段沟通网络

4.2. 工程项目沟通网络的跨主体结构特征比较

对业主方、设计方、施工方和其他参与方的指标进行方差分析，具体分析结果如图 5。为确定各组之间的差异，进行 Tuckey’s HSD 检验，检验结果如表 5。分析结果显示，业主方的入度中心性要显著高于设计方和其他参与方，与施工方相比没有显著差别；出度中心性、度中心性，各参与方没有显著差别；

业主方的接近中心性显著高于施工方、其他参与方，与设计方相比没有显著区别；设计方的接近中心性显著高于施工方，与业主方和其他参与方没有显著差别；业主方的中介中心性显著高于设计方和其他参与方，与施工方没有显著差别。其余指标各参与方均无显著差别。

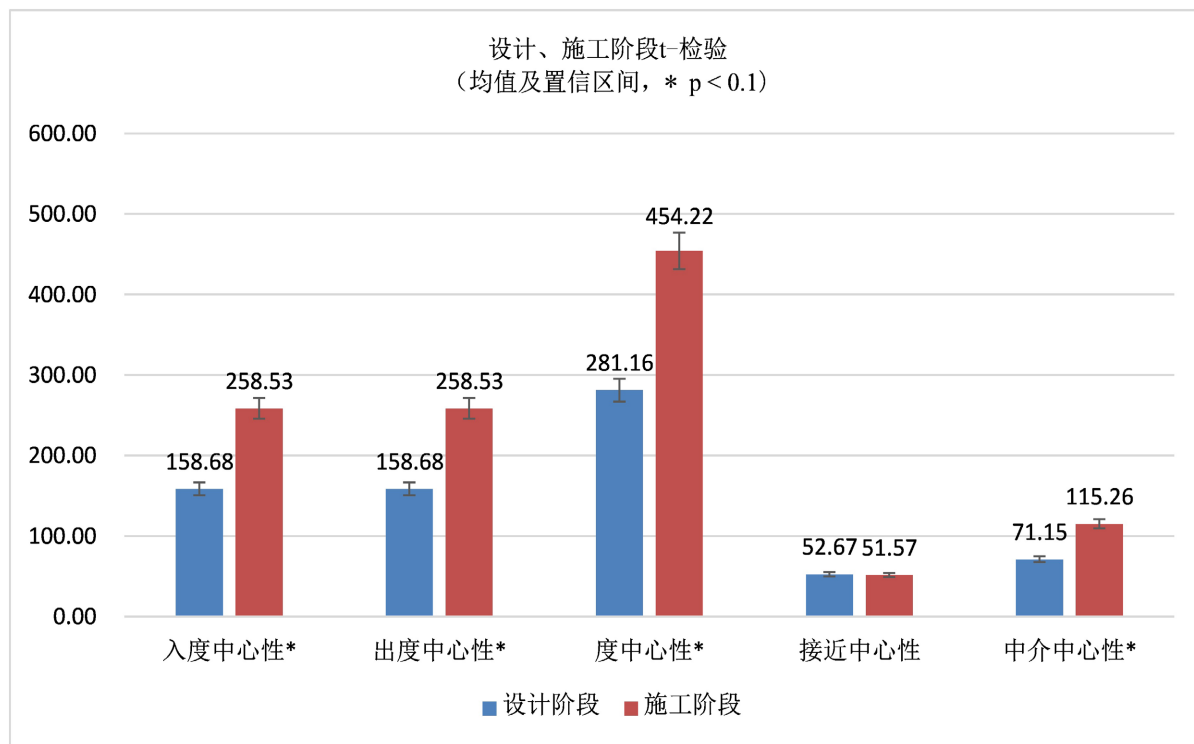


Figure 4. T-tests for design and construction stage

图 4. 设计、施工阶段 t-检验

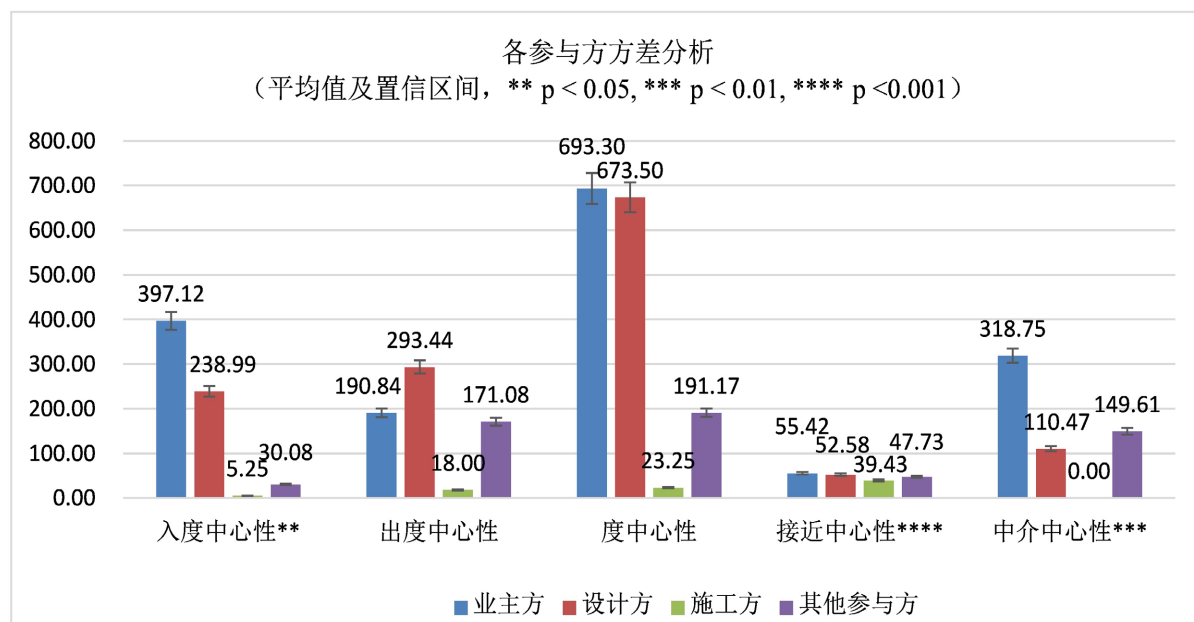


Figure 5. ANOVA for all participants

图 5. 各参与方方差分析

Table 5. ANOVA for owner, designers, contractors and others
表 5. 业主方、设计方、施工方和其他参与方方差分析

变量		平方和	自由度	均方	F	显著性	平均值	事后检验(Tukey HSD)				
								业主方	设计方	施工方	其他参与方	
入度中心性	组间	1,902,278.693	3	634,092.898	3.793	0.011	业主方	397.120	-	*	**	
	组内	36,276,815.940	217	167,174.267			设计方	238.990	*	-		
	总计	38,179,094.633	220				施工方	5.250		-		
							其他参与方	30.080	**		-	
出度中心性	组间	741,163.354	3	247,054.451	0.292	0.831	业主方	190.840	-			
	组内	183,662,399.800	217	846,370.506			设计方	293.440		-		
	总计	184,403,563.154	220				施工方	18.000		-		
							其他参与方	171.080			-	
度中心性	组间	4,254,898.263	3	1,418,299.421	0.657	0.579	业主方	693.300	-			
	组内	468,548,811.700	217	2,159,211.114			设计方	673.500		-		
	总计	472,803,709.963	220				施工方	23.250		-		
							其他参与方	191.170			-	
接近中心性	组间	1372.896	3	457.632	7.520	0.000	业主方	55.419	-		***	**
	组内	13,206.115	217	60.858			设计方	52.584		-	***	
	总计	14,579.011	220				施工方	39.428	***	***	-	
							其他参与方	47.727	**			-
中介中心性	组间	2,024,893.139	3	674,964.380	4.425	0.005	业主方	318.746	-	***		*
	组内	33,101,340.110	217	152,540.738			设计方	110.469	***	-		
	总计	35,126,233.249	220				施工方	0.000			-	
							其他参与方	149.608	*			-

注：*p < 0.1, **p < 0.05, ***p < 0.01, ****p < 0.001。

5. 结论与讨论

本文以社会网络视角，从跨阶段、跨主体两个角度分析了工程项目沟通网络的结构特征，扩展了社会网络分析在工程项目领域的认识。实证分析得到结论如下：

- 1) 以跨阶段视角来看，对比设计阶段和施工阶段的沟通网络，施工阶段的入度中心性、出度中心性和度中心性要高于设计阶段，表明施工阶段的沟通频率更高，收发邮件数更多，沟通更密集。设计阶段和施工阶段的接近中心性没有显著差别，表明设计阶段和施工阶段的沟通网络中，参与人员独立性的高低没有显著区别。与设计阶段相比，施工阶段的中介中心性更高，表明在施工阶段，信息的传递更依赖于某几个成员。
- 2) 以跨主体视角来看，施工方、监理方和供应商从施工阶段开始加入邮件沟通之中，而业主方和设计方在设计阶段和施工阶段都占据了工程项目沟通网络的中心位置。从图 5 来看，业主方、设计方、施工方和其他参与方的入度中心性、接近中心性和中介中心性存在显著差别，而出度中心性和度中心性没有显著差别。通过表 5 的事后检验可知，业主方的入度中心性要显著高于设计方和其他参与方，表明业主方收到的邮件更多，获取了项目中最多的信息；而与施工方相比，虽然业主方的入度中心性平均值要

高于施工方,但两者在统计学意义上没有显著差别。业主方的接近中心性要显著高于施工方和其他参与方,设计方的接近中心性要显著高于施工方,表明与施工方相比,业主方和设计方在沟通过程中更加独立于其他参与人员的沟通行为的控制,信息的接收与传递较为自由。业主方的中介中心性要显著高于设计方和其他参与方,表明业主方处于最多人员的沟通捷径之上,对工程项目沟通网络中信息资源的控制程度更大,占据沟通网络中的主导地位。

总结来看,利用工程项目邮件沟通数据,通过社会网络分析方法以跨阶段、跨主体视角研究工程项目沟通网络的结构特征,有助于对比分析工程项目不同阶段的沟通网络特征,研究不同项目参与人员在沟通网络中的地位,也有助于提高工程项目沟通效率,从而提高工程项目绩效。

参考文献

- [1] Thomas, S.R., et al. (1998) Critical Communications Variables. *Journal of Construction Engineering and Management*, **124**, 58-66. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(1998\)124:1\(58\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1998)124:1(58))
- [2] Zheng, X., et al. (2016) Review of the Application of Social Network Analysis (SNA) in Construction Project Management Research. *International Journal of Project Management*, **34**, 1214-1225. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2016.06.005>
- [3] Wen, Q. and Qiang, M.S. (2016) Coordination and Knowledge Sharing in Construction Project-Based Organization: A Longitudinal Structural Equation Model Analysis. *Automation in Construction*, **72**, 309-320. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.06.002>
- [4] 余雯婷, 李希胜. 基于 BIM 技术的建筑设施管理信息提取与应用[J]. 土木工程与管理学报, 2016, 33(1): 85-89.
- [5] Winch, G.M. (2009) *Managing Construction Projects*. John Wiley & Sons, Hoboken.
- [6] 陈桂香, 李明月. 社会网络视角下基于 BIM 的复杂工程组织沟通网络[J]. 土木工程与管理学报, 2019, 36(5): 13-18.
- [7] Pryke, S., et al. (2018) Self-Organizing Networks in Complex Infrastructure Projects. *Project Management Journal*, **49**, 18-41. <https://doi.org/10.1177/875697281804900202>
- [8] Bresnahan, T.F., Brynjolfsson, E. and Hitt, L.M. (2002) Information Technology, Workplace Organization, and the Demand for Skilled Labor: Firm-Level Evidence. *The Quarterly Journal of Economics*, **117**, 37. <https://doi.org/10.1162/003355302753399526>
- [9] Pandit, B., et al. (2018) Fostering Safety Communication among Construction Workers: Role of Safety Climate and Crew-Level Cohesion. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **16**, 71. <https://doi.org/10.3390/ijerph16010071>
- [10] Xie, C., et al. (2010) A Case Study of Multi-Team Communications in Construction Design under Supply Chain Partnering. *Supply Chain Management: An International Journal*, **15**, 363-370. <https://doi.org/10.1108/13598541011068279>
- [11] Sundararajan, A., et al. (2013) Research Commentary—Information in Digital, Economic, and Social Networks. *Information Systems Research*, **24**, 883-905. <https://doi.org/10.1287/isre.1120.0472>
- [12] Bernard, H.R., Killworth, P. and Sailer, L. (1981) Summary of Research on Informant Accuracy in Network Data and the Reverse Small World Problem. *Connections*, **4**, 11-25.
- [13] Wen, Q., et al. (2019) Finding Top Performers through Email Patterns Analysis. *Journal of Information Science*, **46**, 508-527. <https://doi.org/10.1177/0165551519849519>
- [14] Chinowsky, P. and Taylor, J.E. (2012) Networks in Engineering: An Emerging Approach to Project Organization Studies. *Engineering Project Organization Journal*, **2**, 15-26. <https://doi.org/10.1080/21573727.2011.635647>
- [15] Park, S., et al. (2020) Understanding Work Teams from a Network Perspective: A Review and Future Research Directions. *Journal of Management*, **46**, 1002-1028. <https://doi.org/10.1177/0149206320901573>
- [16] Hossain, L. and Wu, A. (2009) Communications Network Centrality Correlates to Organisational Coordination. *International Journal of Project Management*, **27**, 795-811. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2009.02.003>
- [17] Park, H., et al. (2011) Social Network Analysis of Collaborative Ventures for Overseas Construction Projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, **137**, 344-355. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000301](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000301)
- [18] Liu, Y., et al. (2022) What Leads to the High Capital Cost of Prefabricated Construction in China: Perspectives of Stakeholders. *Engineering, Construction and Architectural Management*. <https://doi.org/10.1108/ECAM-06-2021-0538>

-
- [19] Wang, X.M., He, N.J. and Li, X.K. (2022) Social Network Analysis of the Construction Community in the Anti-Epidemic Emergency Project: A Case Study of Wuhan Huoshenshan Hospital, China. *Engineering, Construction and Architectural Management*. <https://doi.org/10.1108/ECAM-08-2021-0724>
- [20] Senaratne, S. and Ruwanpura, M. (2015) Communication in Construction: A Management Perspective through Case Studies in Sri Lanka. *Architectural Engineering and Design Management*, **12**, 3-18. <https://doi.org/10.1080/17452007.2015.1056721>
- [21] Zhang, L.M. and Ashuri, B. (2018) BIM Log Mining: Discovering Social Networks. *Automation in Construction*, **91**, 31-43. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.03.009>
- [22] Dogan, S., et al. (2015) Assessing Coordination Performance Based on Centrality in an E-mail Communication Network. *Journal of Management in Engineering*, **31**, Article ID: 04014047. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000255](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000255)
- [23] Sarker, S., et al. (2014) The Role of Communication and Trust in Global Virtual Teams: A Social Network Perspective. *Journal of Management Information Systems*, **28**, 273-310. <https://doi.org/10.2753/MIS0742-1222280109>
- [24] Lomi, A., et al. (2014) The Focused Organization of Advice Relations: A Study in Boundary Crossing. *Organization Science*, **25**, 438-457. <https://doi.org/10.1287/orsc.2013.0850>
- [25] Wasserman, S. and Faust, K. (1994) *Social Network Analysis: Methods and Applications*. Cambridge University Press, Cambridge. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511815478>
- [26] Feeley, T.H. (2000) Testing a Communication Network Model of Employee Turnover Based on Centrality. *Journal of Applied Communication Research*, **28**, 262-277. <https://doi.org/10.1080/00909880009365574>
- [27] Sparrowe, R., et al. (2001) Social Networks and the Performance of Individuals and Groups. *Academy of Management Journal*, **44**, 316-325. <https://doi.org/10.2307/3069458>
- [28] Trier, M. (2008) Research Note—Towards Dynamic Visualization for Understanding Evolution of Digital Communication Networks. *Information Systems Research*, **19**, 335-350. <https://doi.org/10.1287/isre.1080.0191>
- [29] Zemljic, B. and Hlebec, V. (2005) Reliability of Measures of Centrality and Prominence. *Social Networks*, **27**, 73-88. <https://doi.org/10.1016/j.socnet.2004.11.010>
- [30] Freeman, L.C. (1978) Centrality in Social Networks Conceptual Clarification. *Social Network*, **1**, 215-239. [https://doi.org/10.1016/0378-8733\(78\)90021-7](https://doi.org/10.1016/0378-8733(78)90021-7)
- [31] Brennecke, J. and Stoemmer, N. (2018) The Network-Performance Relationship in Knowledge-Intensive Contexts—A Meta-Analysis and Cross-Level Comparison. *Human Resource Management*, **57**, 11-36. <https://doi.org/10.1002/hrm.21823>
- [32] Hossain, L. and Wu, A. (2009) Communications Network Centrality Correlates to Organisational Coordination. *International Journal of Project Management*, **27**, 795-811. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2009.02.003>
- [33] Adamic, L. and Adar, E. (2005) How to Search a Social Network. *Social Networks*, **27**, 187-203. <https://doi.org/10.1016/j.socnet.2005.01.007>