

Railway Network Evaluation Based on Complex Network Analysis

Molin Zhao¹, Lu Chao², Feifei Li³

¹College of Traffic and Transportation, Shanghai Maritime University, Shanghai

²College of Arts and Sciences, Shanghai Maritime University, Shanghai

³College of Logistics Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai

Email: maureen9z@126.com, tmchaolu@shmtu.edu.cn, 407848066@qq.com

Received: Aug. 12th, 2016; accepted: Aug. 26th, 2016; published: Aug. 31st, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

Abstract

Railway network is a typical complex one. Applying the topological properties of the complex networks to the planning and evaluation of railway network can show the network's form and ability visually. Through railway evaluation model, applying the topological theory to the rail network's technical evaluation can ensure a deeper theoretical basis to some indicators of railway network's technical evaluation. Two simple complex networks—North China Rail Network and UK Rail Network, were constructed according to the actual railway network. And, when using the topological properties to evaluate the complex networks, the evaluation result is basically consistent with the actual index.

Keywords

Complex Network, Topological Properties, Railway Network, Evaluation, Railway Transport

基于复杂网络分析的铁路网技术评价

赵墨林¹, 朝 鲁², 李斐斐³

¹上海海事大学交通运输学院, 上海

²上海海事大学文理学院, 上海

³上海海事大学物流工程学院, 上海

Email: maureen9z@126.com, tmchaolu@shmtu.edu.cn, 407848066@qq.com

文章引用: 赵墨林, 朝鲁, 李斐斐. 基于复杂网络分析的铁路网技术评价[J]. 应用数学进展, 2016, 5(3): 560-566.

<http://dx.doi.org/10.12677/aam.2016.53065>

收稿日期：2016年8月12日；录用日期：2016年8月26日；发布日期：2016年8月31日

摘要

铁路交通网是典型的复杂网络，将复杂网络的拓扑性质应用于铁路网规划与评价中可以将铁路网形态、能力直观的展现出来。通过铁路评价模型，将拓扑理论应用到铁路网络技术评价中，能将铁路网技术评价的部分指标有更深刻的理论基础。按照实际铁路网构造了两个简单的复杂网络——中国华北和英国铁路网并主要针对复杂网络拓扑性质加以评价，评价结果与实际基本相符。

关键词

复杂网络，拓扑性质，铁路网，评价，铁道运输

1. 引言

铁路运输在国民经济中占有重要地位，尤其是在旅客运输和重点物资运输上，铁路运输承担了大部分的运量，其重要运输优势不可替代。

在我国，铁路运输规模庞大，无论是从客运货运周转量还是运输繁忙程度均在世界上首屈一指。铁路网是铁路运输的载体，铁路网的规划建设对地方和全国的交通运输系统都有深远意义。近年来，复杂网络理论逐步发展成熟，为铁路网络评价提供了新的研究方法。

我国铁路网络相关研究起步较晚，但近年来研究成果颇丰，上海海运学院教授丁以中[1]研究了综合交通运输网络规划的评价方法，从宏观上提出了交通系统的总体评价。莫辉辉[2] [3]等研究了各种交通方式下交通网衔接的关系网络，提出各种交通运输网络可以按照层次纵向通过网络连接。卫振林[4]等通过将城市道路网和地铁网的复合网络对复合前后的网络拓扑性质进行了对比，发现复合地铁网络的拓扑性质优于复合前的网络。王伟[5]等将铁路网络构建成为物理网、运输网、换乘网三大网络，分别对每一网络的拓扑性质进行了分析。

本文将复杂网络拓扑性质与铁路网评价中的技术评价体系相结合，将复杂网络拓扑性质中有意义的几个性质应用到了铁路网评价体系中。文章还对中国华北、英国两地的铁路交通网用拓扑性质进行分析，比较了中英两国铁路网规划的异同点。

2. 铁路网技术评价方法

铁路是国民经济的大动脉，在交通运输综合体系中占有十分重要的地位。铁路网布局的合理性是关乎国家经济高效发展的重要保障。对铁路网络系统进行评价，有助于对不同地区不同国家的铁路运输系统进行分析，并对未来的铁路规划提供指导方向。

铁路网按网络[6]大类可划分为地理网和运营网。地理网是中国铁路线路网的具体体现。运营网按运输性质划分为客运网和货运网和客货运网，按线路类型可划分为高速铁路网，普速铁路网，重载铁路网。按线路等级划分，可划分为干线铁路网和支线铁路网。本文选取的铁路网是干线铁路网，包括高速铁路和普通铁路。

铁路网技术评价就是对铁路网络从技术因素方面分析网络的内部结构和功能，以验证规划方案的合理性。

本文将铁路网技术评价内容分成两个大类[7] [8]，全面地评价铁路网规划的合理性。

第一大类称为铁路网适应能力,是对整个铁路网的表宏观分析和对外结合的能力的评价。铁路网适应能力研究线网密度是否达到全部路网或局部路网所覆盖地域的发展需要。这需要考虑研究地域范围内的城乡人口数量、城乡经济发展状况、铁路线分布情况、与各种交通方式衔接的水品和铁路运输供给间的关系。

第二大类称为铁路网运输能力,反映铁路网在运作过程中的工作水平。通过研究铁路网中节点联结程度,可达性,线路效率等指标,可以发现并对比不同路网的运输能力,是对铁路网系统的内在能力分析。

通过对这两大类路网能力进行具体分析,就可以科学地总结铁路网络规划的合理性。

3. 基于网络拓扑性质的铁路网技术评价模型构建

铁路网评价模型的载体是铁路网。根据铁路网的特性,可以把铁路网当做复杂网络进行分析。将铁路干线轨道看作网络中节点的边,一般地,无论是复线铁路还是单线铁路,列车都是双向运行的,所以铁路网的图为无向图。将铁路站点所在的城镇当作网络中的节点,假如同一个城市有多个铁路车站,视为同一节点,两节点间的铁路无论单线复线还是四线,都看作一条边,突出网络的拓扑性质,以此构成复杂网络。

将铁路网构成的复杂网络应用到铁路网技术评价体系中的铁路网运输能力评价中,可以根据网络拓扑性质对铁路网进行技术评价。

复杂网络有如下几个拓扑性质[9]-[13]。

1) 节点度和度分布

节点度在铁路网中是一个铁路枢纽或城市向外部扩散的铁路线条数。节点度的分布是反应各铁路站点城市向外部扩散铁路的条数分布情况,可以大致反映出各铁路站点城市的枢纽地位。

2) 平均路径长度和网络直径

铁路干线网中,路径长度可以有两种定义。第一种可以定义为线路的实际运营长度,用来反映列车从始发站到终点站的实际运营距离。第二种可以定义为节点间线路段的个数,用来反映列车从始发站到终点站历经的站点个数。网络直径是指铁路网中任意两站点间路径长度的最大值。

3) 聚类系数

聚类系数 C 用来描述网络中节点的聚集情况,一个节点 i 的聚类系数是指它所有相邻节点之间连边的数目占可能的最大连边数目的比例,整个网络的聚类系数 C 就是所有节点 i 的聚类系数 C_i 的平均值。

4) 节点介数和节点紧密度

铁路干线网节点的介数定义为网络中经过该站点的最短路径的数目。它反映了节点在网络中的枢纽地位,可以通过计算各节点的介数指标来分析铁路干线网络各节点的中心枢纽地位。铁路网中由于运输技术限制,最短路径往往不能随意选择,介数本文不考虑。往往有固定的节点紧密度是指网络中某节点到达所有其他节点的距离之和的倒数,铁路网已有连通度概念,故本文不考虑。

采用层次分析法,可以对每一类大的路网能力通过几个指标进行表达,并且通过数学模型体现出来。

4. 基于复杂网络拓扑性质的铁路网评价

铁路网适应能力是铁路与国土资源、人口、其他交通运输方式相互结合的能力。取决于铁路本身的技术指标和铁路线涉及区域内人口和国土资源的总合。可以通过以下 6 个指标进行表达。

1) 铁路网密度

铁路网密度 HD 是单位国土面积铁路线长度,为了使路网密度的实际意义更加明确,特别规定线路长度按照轨道长度计算。路网密度越大,铁路网的覆盖能力越大。

$$HD = \frac{\sum_1^n r_i}{S} \quad (1)$$

式中, S 是路网覆盖面积, r_i 是第 i 条铁路通道的轨道长度。

2) 铁路网运输能力适应度 δ

路网运输能力适应度是路网实际运力 V 与路网总运力 C 的比值。

$$\delta = \frac{V}{C} = \frac{\sum_1^n V_i l_i}{\sum_1^n C_i l_i} \quad (2)$$

式中, V_i 是第 i 条铁路通道的交通量, C_i 是第 i 条铁路通道的通行能力, l_i 是第 i 条铁路通道的长度, n 为网络中通道总数。

3) 铁路网 k 公里人口覆盖率

表示在 k 公里范围内可乘车的人口占铁路网覆盖范围内总人口的比例。比例越高, 路网的人口覆盖能力就越强。

4) 综合供给均衡系数

综合供给均衡系数是评价网络运输结构配置合理性的指标, 它反映运输通道内运输总需求在各运输方式间的分布离散程度。

5) 国土系数模型

用于确定铁路网发展水平与人均国民生产总值等经济指标的关系。

6) 网络覆盖形态

路网的覆盖形态直接影响沿线居民出行和生产活动的便利性, 覆盖面越广, 深度越深, 覆盖形态越好。

铁路网运输能力是在已有的铁路网技术条件下的能力体现。可以通过以下几个指标表达。

1) 节点度和度分布

实际意义是铁路连通城市连接铁路的条数和各个城市的枢纽地位。

2) 连接率

连接率是铁路网络中边数与节点数的比值。

$$\beta = \frac{e}{v} \quad (3)$$

e 为边的个数, v 是节点数。

3) 铁路网连通度

路网连通度反映节点的连通程度。

$$D_n = \frac{L_n / \theta}{\sqrt{AN}} \quad (4)$$

L_n 表示铁路网总里程, θ 是表述铁路线弯曲程度的变形系数, 通常取 1.1 到 1.3。 N 表示区域面积, A 表示节点个数。

4) 铁路运输网络可达性

运输网络可达性定义为从路网中某一个节点出发到另外一个节点的距离, 时间, 或费用大小, 反映了路网内节点的通达便利性。在铁路网构成的复杂网络中, 把上述距离, 时间, 费用作为边权附加在复

杂网络中, 就可以按路径长度表示这些指标, 并且使网络直径、网络平均路径长度的意义加以扩展。

5) 铁路网聚类系数

铁路网聚类系数是指城市节点相邻的城市节点间实际连边数与最大连边数之比。铁路网聚类系数越大, 其运输越灵活。

5. 基于复杂网络拓扑性质的铁路网评价应用

文选取两个铁路运输网络系统, 分别是中国华北铁路干线网和英国铁路干线网[14]。

中国华北地区总人口 1.68 亿人(2012 年常住人口), 总面积 47.16 万平方公里。华北铁路网覆盖北京市、天津市、河北省、山西省、内蒙古自治区包头、呼和浩特、乌兰察布三市。其中高速铁路(按照国际上定义高速铁路为运营速度在 200 公里以上的铁路)有京津城际、京沪高铁、京广高铁、包集第二双线、京广高铁、津秦客运专线、石太客专、大西客专, 干线铁路有京沪线、京广线、京承线、京包线、同蒲线、京原线、京哈线、石太线、石德线、京九线、太焦线、张集线、京哈线、大秦线、邯长线、太中银铁路、京秦线。

中国华北铁路网选取的节点一般是枢纽节点(节点度大于 2)和城市人口 50 万以上的中等大小城市或地级市。包括北京、天津、石家庄、保定、邢台、廊坊、邯郸、衡水、唐山、秦皇岛、承德、沧州、太原、大同、朔州、原平、吕梁、临汾、长治、运城、呼和浩特、包头、集宁、德州。

英国铁路干线网络与我国华北地区铁路网的相同之处在于都有一个大型铁路枢纽和几个重要铁路枢纽。英国国土面积 24.41 万平方公里, 总人口 64,447,000 人(2014 年年中)。英铁路总长达 1.66 万公里。

2006 年, 铁路总客运量为 464.97 亿人公里; 总货运量为 221 亿吨公里。铁路干线分别是 Carlisle To Leeds、Carlisle To Newcastle、Birmingham To Norwich、Liverpool To Leeds Via Manchester、Manchester To Sheffield、Glasgow To Edinburgh Route、Cross Country Route、East Coast Main Line、Great Eastern Main Line、Great Western Main Line、Midland Main Line、West Coast Main Line、High Speed 1。在这些线路里, 一号高铁时速 186 英里(300 公里每小时), Cross Country Route、East Coast Main Line、Great Western Main Line、Midland Main Line、West Coast Main Line 5 条线路运营时速均为 125 英里(201 公里每小时), 是高速铁路。

英国干线铁路网选取英国 20 万人口以上城市和铁路枢纽节点城市和海峡隧道西出口, 包括 Bristol、Birmingham、Sheffield、Leeds、York、London、Doncaster、Newcastle、Edinburgh、Ipswich、Norwich、Cardiff、Leicester、Nottingham、Liverpool、Manchester、Glasgow、Derby、Peterborough、Brighton、Coventry、Carlisle、Crewe、Preston、Channel Tunnel。

为了使对比结果更加明确, 两个铁路网络都选取 25 个节点, 同时恰好满足中国华北和英国的铁路网重要节点的完整选取。

下面介绍铁路网技术评价体系中有关网络拓扑性质计算结果对比分。

1) 度和度分布

计算中出现了度为 1 的点, 并不符合选取路网节点的实际节点度数, 所以可以对部分边缘节点进行加度数处理, 使其符合实际路网情况(本文未改进)。计算得到中国华北地区平均节点度是 2.64, 英国的平均度是 3.04.25 个节点度分布如图 1 所示。

无论从平均度还是高度数节点的数量可以看出英国铁路干线网节点度整体水平高于中国华北地区。这使得英国铁路运输能力较强。

本文节点选取均为枢纽和大型城市, 假如将节点扩充至全部车站, 节点度为 2 的点将大幅增加, 其节点度分布符合幂律分布。

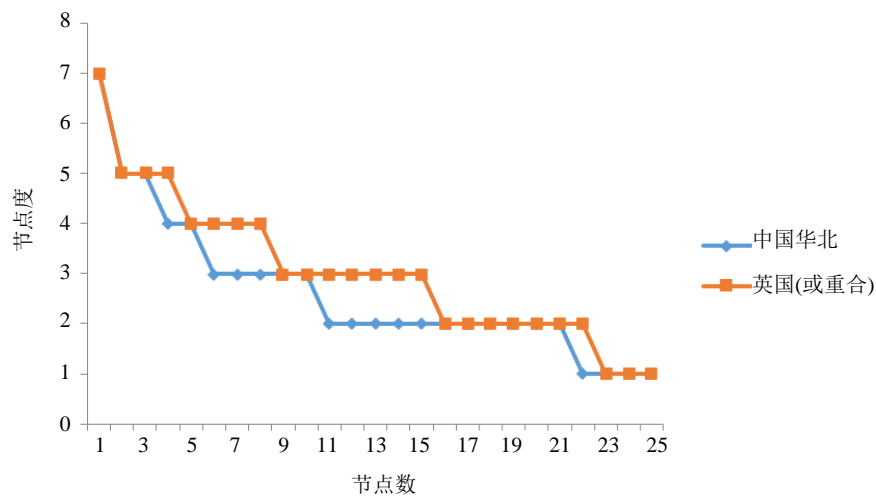


Figure 1. Node degree distribution

图 1. 节点度分布

2) 连接率 β

中国华北铁路网总节点数 25 个, 边 33 条。英国干线铁路网有节点 25 个, 边数 38 条。 $\beta_{\text{中国华北}} = 1.32$, $\beta_{\text{英国}} = 1.52$ 。英国干线铁路网的连接率更高, 总体网络更加完善。

3) 运网可达性

通过平均路径长度反映这种路网性质。经过计算中国华北铁路网的平均路径长度为 3.34333, 网络直径是 8 (包头至德州)。英国铁路网平均路径长度为 3.17667, 网络直径为 8 (Edinburgh to Cardiff)。总体看来, 英国较中国华北地区更加狭长, 在平均路径长度上却占有优势, 表明其路网布局比较合理。

4) 聚类系数 C

中国华北铁路网总体聚类系数为 $C_{\text{中国华北}} = 0.0845$, 英国铁路干线网总体聚类系数 $C_{\text{英国}} = 0.1224$, 说明英国干线铁路网在运输上更加灵活。

以上是复杂网络拓扑性质在铁路网评价方面的应用, 通过拓扑性质的分析, 从数据上展示了两套铁路网系统的不同运输性质。在铁路适应能力评价上由于涉及拓扑性质较少, 本文不做对比。

从总体上看, 英国铁路干线网在布局上有着更高的运输能力。中国华北地区和英国铁路网在选取时就考虑了相同节点数, 和差别不大的覆盖面积, 所以对比可行性较高。在覆盖面积上, 华北地区接近英国的一半, 人口是英国的 2.5 倍, 但在铁路网密度上有较大的差距, 所以在路网技术评价中的相关指标上有了明显的体现。我国铁路建设高速发展, 不仅要提高干线的运输能力, 还要加快城际铁路的建设, 使路网优化更加合理。

6. 总结与展望

复杂网络拓扑性质能够和铁路网技术评价较好的结合起来, 较好的描述铁路网络中难以观察到的内在问题。在研究中并未考虑边权点权。假如将边权定义为距离, 则可更好地从形态上对路网进行分析。将边权定义为铁路运输能力, 则可以对铁路的运输网进行深入分析。点权可以是城市人口经济实力, 也可以是海港空港等属性。这样的分析方法可以扩展到航空、海运和公路运输中。

基金项目

国家自然科学基金/National Natural Science Foundation of China (11571008)。

参考文献 (References)

- [1] 丁以中. 交通运输网络规划综合评价方法[J]. 上海海运学院学报, 2000, 21(1): 6-21.
- [2] 莫辉辉, 王姣娥, 金凤君. 交通运输网络的复杂性研究[J]. 地理科学进展, 2008, 27(6): 112-120.
- [3] 陈伟, 修春亮, 柯文前, 俞肇元, 魏冶. 多元交通流视角下的中国城市网络层级特征[J]. 地理研究, 2015, 34(11): 2073-2083.
- [4] 卫振林, 甘杨杰, 赵鹏. 城市复合交通网络的若干特性研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15(1): 106-111.
- [5] 王伟, 刘军, 蒋熙, 王莹. 中国铁路网的拓扑特性[J]. 北京交通大学学报, 2010, 34(3): 148-152.
- [6] 赵伟, 何红生, 林中材, 杨孔庆. 中国铁路客运网网络性质的研究[J]. 物理学报, 2006, 55(8): 3906-3911.
- [7] 朱高峰. 交通运输网络理论探讨[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [8] 聂英杰. 中长期铁路网规划技术评价指标体系的研究[J]. 铁道勘察, 2011(2): 86-89.
- [9] 唐芙蓉. 中国铁路交通网络的拓扑研究及客流分析[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(6): 935-940.
- [10] Taylor, P.J., Evans, D.M., Hoyler, M., *et al.* (2009) The UK Space Economy as Practised by Advanced Producer Service Firms: Identifying Two Distinctive Polycentric City-Regional Processes in Contemporary Britain. *International Journal of Urban and Regional Research*, **33**, 700-718. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1468-2427.2009.00857.x>
- [11] Sienkiewicz, J. and Holyst, J.A. (2005) Public Transport Systems in Poland: From Bialystok to Zielona Gora by Bus and Tram Using Universal Statistics of Complex Networks. *Acta Physica Polonica B*, **36**, 1771-1778.
- [12] 吕豪. 基于距离范式的华北铁路网扩展方案评价研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [13] 王倩, 曾俊伟, 钱勇生, 广晓平. 基于复杂网络的西北地区铁路换乘网连通可靠性分析[J]. 铁道运输与经济, 2016, 38(3): 57-61.
- [14] 张务栋, 张绍飞, 冯春萍, 吴建藩. 中国和外国铁路网发展模式的比较研究[J]. 世界地理研究, 1994(2): 1-90.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>