

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2010.02.004

基于复杂网络的城市轨道交通网络可靠性研究

陈菁菁

(上海申通轨道交通研究咨询有限公司 上海 201103)

摘 要 通常的可靠性理论难以有效分析城市轨道交通网络的可靠性。鉴于复杂网络理论对大量现实网络实证研究的有效性,以及城市轨道交通网络作为现实世界网络的典型实例与其他网络具有相似性,应将城市轨道交通网络相关问题的研究归为复杂网络的研究范畴。引入复杂网络的可靠性测度指标,从网络的适应性、稳定性和有效性三方面来构建城市轨道交通网络可靠性的衡量指标,将原先基于设施设备的可靠性研究拓展至基于交通系统管理者和使用者的全局性研究。

关键词 城市轨道交通网络 复杂网络 可靠性测度

中图分类号 F512.3 **文献标志码** A

文章编号 1672-6073(2010)02-0018-04

城市轨道交通网络是由大量相互作用的单元构成的复杂系统,在一定的规则下产生有组织的行为,呈现动态的变化和演化过程,并且具有与外界相互作用的开放性。城市轨道交通网络表现出既有不确定性,又有一定的内部自组织原则的特性,不能简单地将城市轨道交通网络的问题归为随机网络或规则网络的问题来研究。

1 城市轨道交通网络可靠性分析的难度

1.1 大系统与小样本

城市交通网络系统是一个错综复杂的大系统。概率论是可靠性最主要的理论基础,其中的大数定律决定了在可靠性试验或数据分析时,必须有足够的样本量。对于城市轨道交通系统而言,网络可靠性的研究还刚刚

起步,研究的基础很薄弱,特别是在我国的各个城市,轨道交通仍然处于集中建设时期,具有一定规模的网络还未形成,实际的样本数据匮乏,样本数据少的问题极为突出。因此,如何在小样本条件下确定系统的可靠性参数是一个迫切需要解决的问题。

1.2 模糊性

由于可靠性数据较少,特别是在方案论证和系统设计的早期阶段,由于分析和评定的失效数据样本小,基于大样本数据的概率模型和统计方法难以适用。目前,往往采用专家经验等定性信息的形式来描述系统的可靠性,如“该城市轨道交通网络的可靠度不太高”等,这种描述本身就存在模糊性,难以用基于概率论的可靠性分析与评定方法来处理。

常规的可靠性理论是建立在二态假设和概率假设基础上的。二态假设是指系统只有两种极端状态,完全正常或完全失效。概率假设则要求满足事件明确加以定义、大量样本存在、样本具有概率重复性、不受人为因素影响 4 个条件。

城市轨道交通网络作为一个系统运行,其工作状态就存在模糊性,很难满足二态假设,难以用基于概率论的可靠性分析与评定方法来处理。某些系统工作状态的正常或不正常,在外延上难以定义明确的界限,具有模糊的概念,如网络中的部分线路已失效,但整个网络并不完全失效,系统可以降级运行等,用二值逻辑和统计方法难以处理,二态假设无法精确描述,具有模糊性。

1.3 建模困难

可靠性评估的数学模型应该正确地反映系统中各个部分之间的内在联系,准确描述系统的实际运行情况。在系统的复杂性与精确性描述之间,由于城市轨道交通网络是由许多分系统、线路、车站、设施设备组

收稿日期: 2009-10-10 修回日期: 2009-11-20

作者简介: 陈菁菁,女,博士,工程师,主要研究城市轨道交通运营安全与可靠性, cjh@yaho.com.cn

基金项目: 国家自然科学基金 (50478105)

成的,同时又需要考虑自然环境、社会环境或人为事件多种随机因素的影响,给系统可靠性的建模和分析带来巨大困难。从技术层面上讲,要得到这些随机因素的统计性质十分困难。同时,要准确描述这些随机因素之间的相互关联和交互作用,往往难以得到实用的交通模型。对于城市轨道交通网络而言,其可靠性指标的解析表达式往往并不存在。

1.4 计算的复杂性

城市轨道交通网络系统的规模大,模型所考虑的因素多。在理论上,其可靠性评估是非线性、多约束、高维数的,具有随机不确定性和模糊不确定性特征的数学求解问题,目前在数学上还没有现成的解法。因此,如何在精度与计算量之间进行适当的平衡,如何寻求快速有效的计算方法,都是需要进一步研究的问题。

从城市轨道交通网络自身而言,呈现出“随机有控、有控随机”的复杂特性,在网络化运营条件下,外部因素的影响使得城市轨道交通网络可靠性的研究更加复杂。目前,采用常规的可靠性理论来研究,一方面现实情况与理论假设相差甚远,无法有效、直观地描述现实问题;另一方面,不能从网络的层面对问题进行全局性的研究。

2 复杂网络理论在交通运输研究领域的运用

2.1 复杂网络理论

复杂网络理论是各种看上去互不相同的复杂网络之间的共性和处理相关问题的普适方法。复杂网络理论从实际网络结构的统计特征出发,揭示网络特性与网络行为之间的互动关系,构建网络模型,帮助人们理解这些统计性质的实际意义与产生机理,预测网络行为,进而考虑改善优化网络行为的对策。

20世纪 60年代以来,随机图论一直是研究复杂网络结构的基本理论,但绝大多数实际的网络结构并不是完全随机的。从 20世纪末开始,由于计算机数据处理的飞速发展,科学家们对大量的真实网络,比如电力网络、计算机互联网、食物链网络、演员关系网、科学家合作网络等作了大量实证性的研究,表明这些看上去各不相同的网络之间有着许多惊人的相似之处。科学家们发现,大量的真实网络既不是规则网络,也不是随机网络,而是具有与前两者皆不相同的统计特征的网络。这样的一些网络被科学家们叫做复杂网络 (complex networks),对于它们的研究标志着复杂网络研究新纪元的开始。

复杂网络理论的研究不再局限于数学领域,正渗

透到数理学科、生命学科和工程学科等众多不同领域。学者们开始关注节点数量众多、连接结构复杂的实际网络的整体特性,对复杂网络定量和定性特征的科学理解,已经成为网络化时代科学研究中一个极其重要的挑战性课题,甚至被称为“网络的新科学”^[1]。

2.2 印度的铁路网络

文献 [2]研究了印度铁路网络的小世界网络特征。印度铁路网络是客流量相当密集的网络,8 000多个车站,开行列车数有 10 000列。研究表明,该网络的累积度分布 $F(k) = \int_k^\infty p(k)dk$ 近似服从幂律分布, $F(k) = \exp(-\alpha k)$,其中 $\alpha = 0.0085$,呈衰减趋势,如图 1(a)所示;该网络的平均簇聚系数 $C \approx 0.69$,簇聚系数与累积度呈反比,对数衰减趋势如图 1(b)所示。

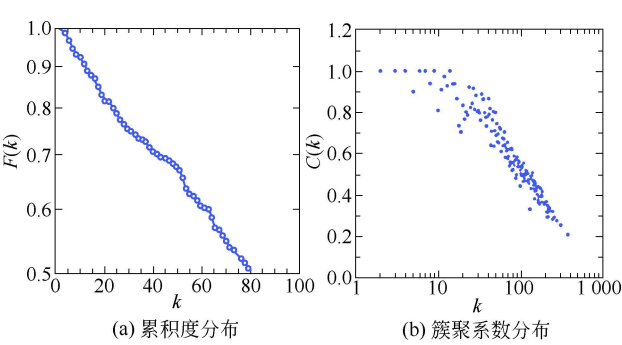


图 1 印度铁路网络的小世界网络特征^[2]

2.3 波士顿的地铁网络

文献 [3]研究美国波士顿地铁网络 (见图 2)的网络效率,将美国波士顿地铁系统抽象为由 124条边和 124个节点构成的网络,并以两车站间的实际地理距离作为两点间边的权值,求得其全局效率 E_{glob} 和局部效率 E_{loc} ,如表 1所示。从数据分析,波士顿的地铁网络全局效率较高,而局部效率较低,说明系统在网络完备的状态下连通性和运行质量较好,可是系统的容错性能较差,而在地铁网络和地面公交整合的网络中,局部



图 2 波士顿地铁网络

效率得到了很大的提高。这一结论真实地反映了波士顿公共交通网络的现实状况。

表 1 波士顿公共交通网络的效率^[3]

网络类型	全局效率 E_{glob}	局部效率 E_{loc}
地铁网络	0.63	0.03
地铁网络+地面公交	0.72	0.46

国内外的学者将复杂网络理论运用于交通网络的研究,在交通网络特征和网络运行效率等方面已经取得了一些初步的成果。而且,城市轨道交通网络作为现实世界的复杂网络,可以看做是由大量的车站和连接车站间的线路组成的网络。在该网络上,也表现出与其他网络类似的现象,比如线路间相关关联、延误在网络中的传播现象,网络的可靠性与网络结构和功能相互影响等。因此,采用复杂网络理论对城市轨道交通网络进行研究是可行的。

尽管,目前尚未有运用复杂网络理论对交通网络可靠性研究的成果发表,但是可以预言,通过对交通运输网络复杂性的深入探讨,将对交通运输网络可靠性的研究产生不可估量的影响^[4]。

复杂网络理论建构了从微观到宏观的桥梁,研究网络中节点与边的微观性质,研究网络的几何性质与网络的效率、稳定性等宏观性质之间的关系,正是复杂网络研究的核心内容。从复杂网络的角度研究城市轨道交通网络的可靠性,是对城市轨道交通状况更准确、更全面的评价,不仅从一般网络可靠性的角度来研究城市轨道交通网,而且还将网络的特殊拓扑结构纳入到考察范围中来,从而形成了较为完整的概念模型。这比以往所采用的可靠性指标(如准点率、故障率等)更具网络特性。

3 复杂网络可靠性的测度

对随机故障的鲁棒性和对蓄意打击的脆弱性,是复杂网络系统的最基本、最重要的特征之一。在复杂网络系统可靠性的研究中,通常采用网络生存性来衡量随机性事件下网络的可靠性,用网络抗毁性来衡量蓄意打击下网络的可靠性。因此,复杂网络系统的可靠性测度主要有 3 种:生存性、抗毁性和有效性。

生存性 (survivability)是在随机破坏(主要是网络部件的自然失效)下系统的可靠性,主要反映随机性破坏和网络拓扑结构对系统可靠性的影响。生存性是通过将图论和概率论结合起来而提出的概念,是任何网络都具有的最基本特性。

抗毁性 (invulnerability)是指系统在蓄意破坏下的可靠性,主要反映系统在蓄意破坏下是否仍然能够提供一定程度的服务,它假定“破坏者具有关于网络结构的全部资料,并采用一种确定的破坏策略”。增强抗毁性,可以有效地避免因各种灾害造成的大面积瘫痪事件。

有效性 (availability)是一种基于业务性能的可靠性,主要反映在网络运行过程中或系统的部件失效情况下,满足业务性能要求的程度,研究网络在正常状态或部分元件失效的情况下能够发挥多大功能。例如,网络部件失效造成质量指标下降、平均延时增加、线路拥挤等现象。

4 城市轨道交通网络可靠性的测度

城市轨道交通网络可靠性是指:在城市轨道交通网络化运营的条件下,城市轨道交通系统在正常情况和紧急情况下所具有的应变能力和承受能力,即能够保证在地震和火灾等重大灾害或突发事件(如客流骤增、设备故障、施工或恶劣天气等)发生时,网络处于可以接受的服务水平的能力。借鉴复杂网络可靠性测度指标——网络生存性、抗毁性和有效性,在城市轨道交通可靠性的研究中,可称之为网络的适应性、稳定性和有效性。

4.1 网络的适应性

城市轨道交通网络的适应性是指:在一定服务水平下(即最低可接受服务水平)网络线路间的可达性,也就是在随机事件情况下,网络中部分线路失效时网络的连通性。网络的适应性是网络可靠性研究的重要内容之一,它是网络运行过程中网络连通性的量度。

网络的适应性是城市轨道交通网络在随机事件下网络连通可靠性的度量,借鉴复杂网络的网络连通概率可靠性指标,采用网络的连通概率和相对连通率两个指标来考察城市轨道交通网络中线路间的相互连通可靠性。网络的连通概率一方面反映了随机事件下,网络中不同线路失效后网络的连通状态,另一方面反映了网络中各条线路在网络的连通性方面起到的作用。相对连通率反映了随机事件下,网络中不同线路失效后网络连通性变化的程度。

以上海轨道交通网络(见图 3)为例,该网络正常运行情况下,网络的连通概率为 51.85%,表明网络中平均有半数的线路是相互连通的。单线失效情况下,网络平均连通概率为 40.33%,网络平均相对连通率为 0.7;也就是说,该网络在单条线路失效的情况下,网络连通性的平均水平为 40.33%,较正常运行状态降低 30%。

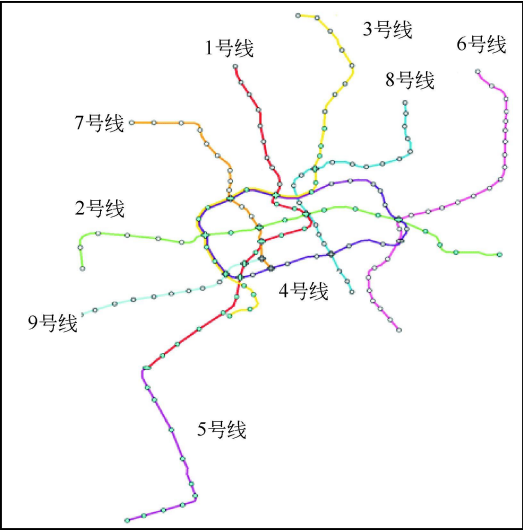


图 3 上海城市轨道交通近期规划网络

4.2 网络的稳定性

城市轨道交通网络稳定性的实质是：研究那些发生概率微小但后果非常严重的事件对城市轨道交通网络运营可靠性的影响或损害程度。例如：危及到公共安全的破坏事件，或是发生在大型换乘枢纽长时间的延误，都会对网络运营可靠性造成不可估量的影响。

网络稳定性的研究在关注网络整体的可靠性的同时，也关注网络节点和边的可靠性，要保障城市轨道交通网络运营的安全和可靠性，我们应该更关注网络中关键的“核心节点”。通过节点重要性的评估找出那些重要的核心节点，重点保护这些“核心节点”来提高整个网络的稳定性。在复杂网络理论中，节点的重要性主要可以通过节点的度数、介数和网络凝聚度来评估。以上海轨道交通网络（见图 3）为例，3 线换乘站节点度数为 6 介数大于 4 000，网络凝聚度为 0.000 25；单线车站节点度数为 2 介数小于 1 000，网络凝聚度为 0.000 23。可见 3 线换乘站节点的重要性高于单线车站节点。

4.3 网络的有效性

不论是网络的适应性还是稳定性，其实质都是从网络的连通性这一角度对网络可靠性进行的描述，研究重点在于不同性质的突发事件下网络性能的保证程度，而有效性则是研究网络功能的发挥程度。

城市轨道交通网络的有效性是指：在网络运行状态下或某些线路失效的情况下网络服务功能的水平，它取决于网络中车站和线路对客流需求变化的适应能力。更直观的表述可以是：城市轨道交通网络运营可以为乘客提供的运输服务的效率，或者是当网络中某

条线路或某段线路失效后剩余运行网络的服务效率。城市轨道交通网络的有效性，主要是通过网络行程时间的可靠性和网络运输能力的可靠性两方面来反映。

网络行程时间的可靠性是通过网络在部分线路失效后的运行状态下，网络平均最短行程时间的变化来考察的。以上海轨道交通网络（见图 3）2 号线失效的情况为例，网络平均最短行程时间由正常状态的 27.6 min 变为 28.7 min，说明该网络在 2 号线失效后，网络中其他线路乘客出行的平均时间将增加近 4%。网络运输能力的可靠性则可采用网络输送能力饱和度来衡量。以上海轨道交通网络为例，正常状态下网络输送能力饱和度 $S=0.9$ ，说明该网络具有一定的运输能力的冗余度。

5 结论

鉴于复杂网络理论对大量现实网络实证研究的有效性，以及城市轨道交通网络作为现实世界网络的典型实例与其他网络具有相似性，城市轨道交通网络相关问题的研究应归为复杂网络的研究范畴。

城市轨道交通网络是一个复杂的随机动态系统，因此借鉴在其他复杂网络可靠性研究中取得的成果，并结合轨道交通自身和网络化运营的特点，引入复杂网络可靠性测度指标，从网络的适应性、稳定性和有效性三方面来构建衡量指标是可行和有效的。采用复杂网络理论来研究城市轨道交通网络的可靠性问题，突破了原先基于设施设备的可靠性研究，拓展至基于交通系统管理者和使用者的全局性研究，更有助于实际运营管理工作。

参考文献

[1] 汪小帆, 李翔, 陈关荣. 复杂网络理论及其应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.

[2] Sen P, Dasgupta S, Chatterjee A, et al. Small world properties of the Indian railway network [J]. Physical Review, 2003, 67(3): 1-5.

[3] Latora V, Marchiori M. Is the Boston subway a small world network? [J]. Physica a Statistical Mechanics and Its Applications, 2002, 314(1/2/3/4): 109-113.

[4] 高自友, 吴建军, 毛保华, 等. 交通运输网络复杂性及其相关问题的研究 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2005, 5(2): 79-84.

[5] Wu J J, Gao Z Y, Sun H J, et al. Urban transit as a scale free network [J]. Mod Phys Lett B, 2004, 18(19/20): 1043-1049.

(编辑: 曹雪明)
(下转第 30 页)

业曾一度被定位为纯粹的建设和运营的非盈利性机构。正是地铁的建设与运营成本由政府财政承担,企业缺少了追求效益、追求利润的动力,企业的经营管理目标与现代企业的差别较大,这就影响到企业的管理模式和发展模式。但是随着社会制度的日渐完善,地铁企业除承担重要的社会责任外,企业内部的经济责任日益受到重视,企业的管理越来越遵循现代企业制度管理的理念,企业本身在不断追求可持续发展的动力。因此,在管理模式上,应对照香港地铁“自主经营、自负盈亏”的企业经营理念,在强调社会责任的同时,追求企业效益的最大化,确保国有资产的保值和增值。多年来,通过不断的努力,深圳地铁已经逐步形成了融建设、运营、物业开发为一体的发展模式,并按照此模式初步形成了企业管理模式。

3.3 在技术上突破差异性束缚

深圳地铁与香港地铁在建设上采用的技术和方法存在着不同,设备的技术标准和材质也存在差异,信号系统、通信系统等智能系统,还有安装、装修、检修、调试等都不尽相同,因此某个环节或因素的差异会影响对标的实际效果。例如:香港地铁的列车发车间隔为 60 s 深圳地铁在现有的设备条件、技术标准和运营条件下暂时难以实现,也就是说,这个标杆指标对深圳地

铁来说就是虚指标。又如:香港地铁已经形成了网络化运营管理,而深圳地铁目前还处在单线运营阶段,两者在运营条件和环境上存在着较大的差异。因此,单独对一些具体的技术指标对标没有实际意义,应加强技术创新,放弃单一指标对标的理念,以运行效率为标杆,提升整体运营水平。

4 结论

企业的对标管理,既不是简单的模式照搬,也不是简单的指标复制,在对标管理过程中,一定要对企业的差异性环境进行认真的对比分析,找出企业之间的共同点和不同点,突破理念、文化、技术、管理等束缚,采取积极的、有针对性的对标管理措施,引导企业成长,挖掘潜力,实现跨越,真正把深圳地铁打造成行业内的优势企业,从而达到对标的目的。

参考文献

[1] 张丙生. 构建对标长效机制提升企业综合竞争力 [J]. 冶金财会, 2007(8): 24—25.
[2] 陈依新. 香港地铁的经营与管理 [J]. 城市公共交通, 2000(3): 23—25.
[3] 香港地铁公司. 追求卓越的质量经营 [J]. 中国质量, 2005(10): 34—37.

(编辑: 曹雪明)

On the Research and Practice of Benchmarking Management of Shenzhen Metro Considering Environmental Differences
Xia Changqing

(Shenzhen Metro Group Co., Ltd., Shenzhen 518026)

Abstract: The deviation of benchmarking management often arises from enterprises ignoring environmental differences. By taking Shenzhen metro and Hong Kong MTR as examples, this paper analyses the differences between Shenzhen and Hong Kong in social culture, enterprise internal management, government policies, investment and financing. It also illustrates how Shenzhen metro promotes competitiveness by learning from Hong Kong MTR and by breaking the restraints of the outworn concept, culture, technology, and management, etc.

Key words: urban rail transit; benchmarking management; Shenzhen metro; Hong Kong MTR; environmental difference

(上接第 21 页)

Reliability Study on Urban Rail Transit Network Based on Complex Network Theories
Chen Jingjing

(Shanghai Shentong Rail Transit Research & Consultancy Co., Ltd., Shanghai 201103)

Abstract: Conventional reliability theories are difficult to perform a successful analysis on urban rail transit network reliability. Since the complex network theory is effective for the research of real networks, and urban rail network is a typical example similar to other networks, the study on relative problems of urban transit network should be included in the extent of the research of complex networks. By introducing the measure of reliability, establishing the reliability criterion for urban rail transit network in terms of the adaptability, stability, validity of network, the research can be developed from local study based on infrastructure and equipment to global study based on managers and users of communication system.

Key words: urban rail transit network; complex networks; measurement of reliability