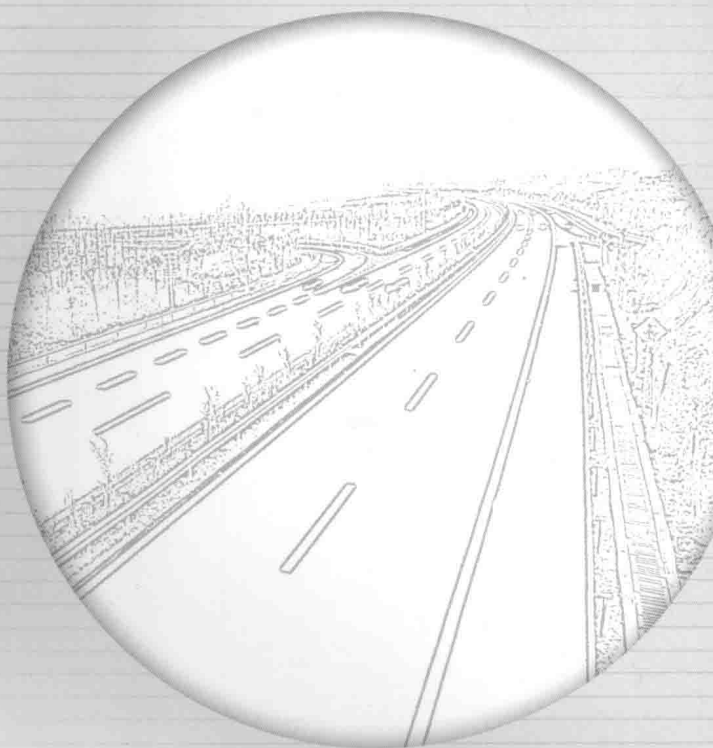




交通版普通高等教育规划教材



JIAOTONG
XITONG
FENXI

交通 系统分析

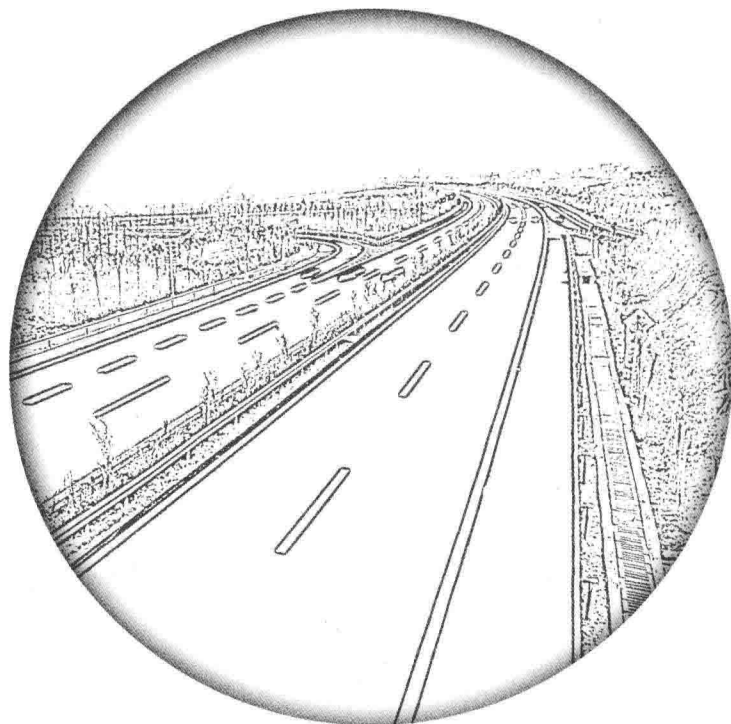
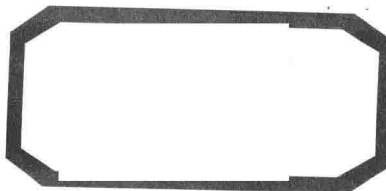
冯树民 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.



交通版普通高



JIAOTONG
XITONG
FENXI

交通 系统分析

冯树民 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书详细介绍了系统分析的理论方法,同时探讨了各种方法在交通系统中的应用。全书共分16章,全面涵盖了系统组成、系统性能、系统安全、系统间关系、系统演化与控制等系统分析的各个方面。

本书可作为高等院校交通类专业高年级本科生及研究生教材,也可作为交通领域研究者参考用书,同时可为其他领域研究者提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

交通系统分析 / 冯树民著. — 北京:人民交通出版社股份有限公司, 2016.7

ISBN 978-7-114-13111-0

I. ①交… II. ①冯… III. ①交通系统—系统分析
IV. ①U491.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第135656号

书 名: 交通系统分析

著 作 者: 冯树民

责任编辑: 崔 建

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京盈盛恒通印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 13.5

字 数: 327千

版 次: 2016年7月 第1版

印 次: 2016年7月 第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-13111-0

定 价: 26.00元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

前言

PREFACE

系统科学以系统作为研究对象。它给自然科学、技术科学和工程技术提供了一种跨越学科界限,从整体上分析问题、处理问题的新思想、新理论、新方法,推动了科学技术的发展、经济的增长和社会的进步。系统科学正向越来越多的领域和行业渗透,并已取得了辉煌的成绩。

系统分析是系统科学的应用分支学科,它用系统观点从相互联系中考察一个系统,是运用系统方法解决问题的过程。交通系统的特点是规模大、结构复杂、影响因素众多,对其进行规划设计、控制管理必然要运用系统分析的理论与方法。

本书将理论与实践相结合,进行系统分析与交通系统的合成与交叉研究,完善系统分析的理论方法,同时拓展其在交通系统中的应用范围。全书共 16 章,第 1 章为概述,第 2 章至第 4 章为系统组成分析,第 5 章、第 6 章为系统性能分析,第 7 章到第 9 章为系统安全分析,第 10 章至第 13 章为系统(子系统)间关系分析,第 14 章至第 16 章为系统的演化与控制。

本书的编写要感谢国家 863 计划的资助。在编写过程中参阅了大量的国内外资料、著作,吸收了同行们辛勤的劳动成果,在此向他们谨表谢意。另外,衷心地感谢参与和支持本书出版的所有人员。

科学技术不断发展,社会也不断进步,系统分析的理论及其在交通领域的应用还有许多问题没有完全解决,甚至有些方面还是空白。限于作者水平,本书还存在许多缺点和不足,希望广大读者批评指正。

作者
2016 年 4 月

目录

CONTENTS

第1章 系统分析	1
1.1 系统	1
1.2 交通系统	2
1.3 系统分析	3
第2章 系统结构分析	5
2.1 系统要素	5
2.2 系统的结构模型	5
2.3 解释结构模型	7
2.4 决策试验和评价实验法	11
2.5 城市客运交通系统结构	13
第3章 系统环境分析	15
3.1 系统环境的界定	15
3.2 系统环境分析方法	16
3.3 城市交通系统环境分析	18
3.4 大背景分析法	20
第4章 系统边界分析	24
4.1 系统边界	24
4.2 交通边界	25
4.3 界壳理论	26
4.4 交通环境系统界壳	28
第5章 系统功能分析	31
5.1 系统功能	31
5.2 系统功能分解	32
5.3 系统功能实现程度度量	33

5.4	系统功能的非协调发展	33
第6章	系统状态分析	35
6.1	系统状态描述	35
6.2	交通状态的概念和特征	35
6.3	交通状态的等级	37
6.4	交通状态识别	38
6.5	交通状态预测	39
第7章	系统风险分析	40
7.1	风险及分类	40
7.2	风险分析	42
7.3	交通系统风险分析	47
7.4	风险预警	50
第8章	系统可靠性分析	52
8.1	可靠性模型与方法	52
8.2	路网可靠性	55
8.3	公交线网可靠性	58
第9章	系统脆弱性分析	64
9.1	系统脆弱性及评价	64
9.2	道路交通运输网络脆弱性及影响因素	66
9.3	道路交通网络脆弱性评估	68
第10章	系统协调分析	73
10.1	系统发展分析	73
10.2	数据包络分析法	76
10.3	有序度评价法	80
10.4	协调发展系数法	86
第11章	系统聚类分析	91
11.1	系统相似性	91
11.2	聚类分析过程	95
11.3	聚类结果检验	96
11.4	常用聚类分析算法	99
11.5	公交线路分类	104
11.6	枢纽城市聚类选择	105
第12章	系统竞合分析	110
12.1	竞合理论	110
12.2	常规公交与轨道交通的竞合分析	111
12.3	公交线路的竞合关系研究	114
第13章	系统耦合分析	125

13.1	系统耦合理论	125
13.2	耦合度与耦合关联度模型	126
13.3	港口与城市经济系统耦合度分析	127
13.4	城市化与交通运输耦合发展分析	130
第 14 章	系统演化分析	138
14.1	系统演化规律	138
14.2	基于耗散结构理论的都市圈交通体系演化研究	140
14.3	公共客运交通结构演化模型	150
14.4	系统可持续	155
第 15 章	不确定系统分析	163
15.1	不确定信息	163
15.2	不确定规划方法	163
15.3	鲁棒优化理论和方法	165
15.4	敏感性分析	174
15.5	四阶段交通需求预测模型不确定性传递分析	180
第 16 章	系统控制分析	193
16.1	系统控制理论	193
16.2	交通系统控制	196
16.3	交通诱导控制	201
参考文献		206

第 1 章 系统分析

1.1 系 统

自然界和人类社会中的很多事物并不是孤立存在的,而是相互制约和相互联系的,它们形成了各式各样的系统。系统间可以相互包含与被包含,可以互相交叉与融合。

我国著名科学家、系统工程的倡导者钱学森给系统下的定义为:系统是由相互作用、相互依赖的若干组成部分结合成的具有特定功能的有机体,而且这个系统本身又是它所隶属的一个更大系统的组成部分。

系统具有如下特征:

(1)整体性。系统是由两个或两个以上可以相互区别的要素,按照作为系统所应具有的综合整体性而构成的。

(2)相关性。组成系统的要素是相互联系、相互作用、相互依存又相互制约的,系统中每个要素的存在都依赖于其他要素的存在,系统中任一要素的变化都将引起其他要素的变化乃至整个系统的变化。

(3)目的性。通常系统都具有某种目的,要达到既定目的,系统都具有一定功能,而这正是区别不同系统的标志。

(4)环境适应性。任何一个系统都存在于一定的物质环境之中,必然要与外界环境产生物质、能量和信息的交换,外界环境的变化必然引起系统内部各要素之间的变化。

系统的限界和功能是由人们按一定的目的和需要来定义和规定的。例如可以将路基、市政、路面、照明、绿化、交通设施定义为道路工程系统,研究道路整体的设计与施工;可以将交通设施、交通管理政策、交通规则定义为交通管理系统,研究最优的交通通行策略;也可以将道路工程系统和交通管理系统统一定义为道路交通系统,研究道路的规划、设计、管理的一体化,见图 1-1。

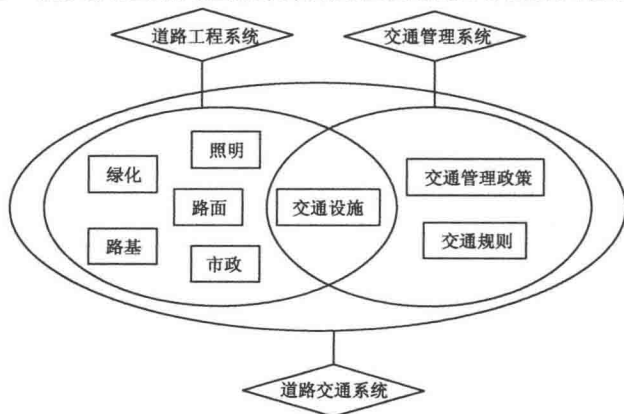


图 1-1 道路交通系统的构成

对于城市公共交通系统,既可以按种类分类定义为地铁系统、BRT 系统、常规公交系统、出租车系统,也可以按组成不同定义为交通工具系统、交通网络系统、交通场站系统、交通管理系统,具体见图 1-2。

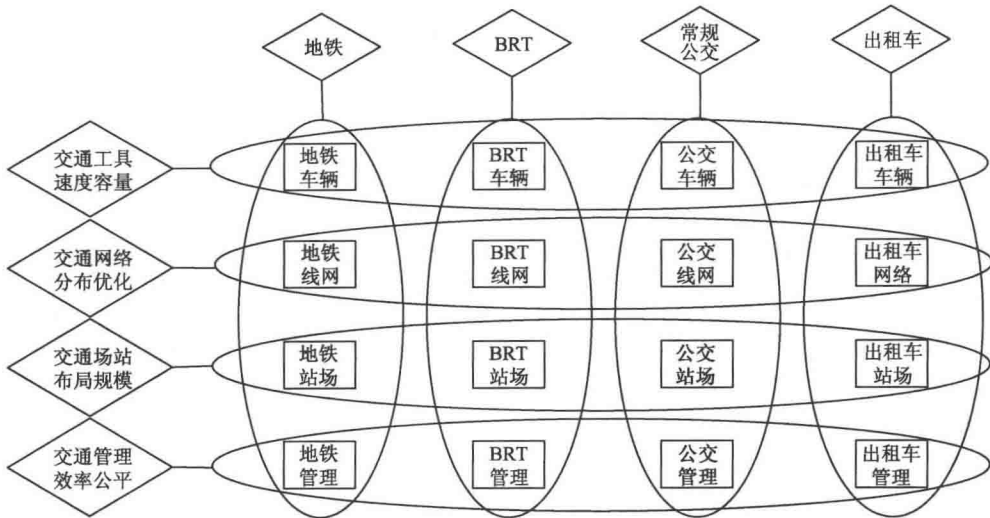


图 1-2 城市公共交通系统的构成

1.2 交通系统

交通系统是人类社会大系统的组成环节,是一个复杂、开放的大系统,由人、车辆、线路和环境组成。人是交通系统的主体,包括驾驶员、乘务员、管理人员、维修人员、行人、乘车人等;车辆是交通系统的主要部分,包括通用车辆、专用车辆;线路包括公路、快速路、主干路、次干路、支路等;人、车辆、线路构成了交通系统的内部结构,交通系统的外部环境包括交通站场、社会环境、土地利用等。构成交通系统的基本要素既是相对独立的,又往往以组合的形式出现,各类要素中有一类是寻求得到系统服务的需求因素,另一类则是对系统的扩展和运行起制约作用的供给因素。

一般来说,交通系统可以分为载体子系统(包括各类交通网络、场站和交通工具)、运输子系统(包括运输方式的构成及运输组织管理等)以及交通管理子系统等。交通大系统的外部环境同样也可以划分成若干子系统(包括地理环境、城市形态与规模、土地利用及社会经济环境等)。子系统具备以下特征:一是子系统由各个要素组成;其次,子系统有独立的内在构成方式和运行机制;此外,子系统之间存在相互依存与互为制约的关系,任何一个子系统同时作为另一个子系统的外部环境条件而存在。

城市交通系统的功能是为居民的出行活动提供必要的条件,将居民的各种出行活动有机地联系在一起。人们对交通的要求呈现出多样化需求,城市交通工具和交通方式相应地进入多样化时代。同时,鉴于地面土地资源的限制,城市交通充分向地下和空中发展,最终形成了多形式、多层次、立体化的综合交通体系。城市居民出行可以根据需要选择不同的交通方式:轨道交通(包括地铁、轻轨、磁悬浮、有轨电车)、地面常规公交、私人小汽车、出租车、摩托车、自行车、步行等。各种交通方式之间合理衔接、相互协作,完成城市繁忙的运输任务。城市内

部交通与城市对外交通方面,航空、铁路、水运、公路与市内交通等的衔接也由无序走向有序。

随着城市的现代化及汽车工业的迅速发展,汽车数量迅猛增长,城市内部人与物的空间运动规模也达到空前水平,城市交通越来越复杂,矛盾越来越尖锐,城市内部交通已处于一种饱和或超饱和状态。伴随而来的是众多城市普遍存在的交通问题:

(1)严重的交通拥堵让人不堪忍受。汽车交通非凡的运载能力和机动性,使得城市居民在日常生活中对汽车交通产生了过分的依赖,然而随着城市内汽车拥有量的猛增,城市道路上开始发生频繁的交通拥堵。如今,交通拥堵已经成为世界各大城市的一大难题,带来了巨大的经济损失和环境危害。

(2)频频发生的交通事故成了现代文明的洪水猛兽。汽车交通事故频频发生,数量猛增,随着社会机动化程度的提高,交通安全问题一直困扰着世界各国。

(3)城市交通成了环境的主要杀手之一。汽车在使用过程中,大量有害物质和噪声的释放,污染了生态环境。当前城市交通引起的空气污染与交通噪声已成为城市环境污染的主要原因之一。

近年来,城市交通发展呈现以下的新趋势:

(1)限制(控制)小汽车,优先发展公共交通。交通研究者和决策者逐渐认识到小汽车已成为城市交通拥堵的重要因素,各国政府纷纷采取各种有力措施,力图控制小汽车的发展,限制小汽车的使用。实行优先发展公共交通的城市交通战略,从公共交通的各方面进行改进和提高,提升城市公共交通的运输效率,有效调整城市的交通结构。

(2)加强交通管理,积极采用新技术。各国大力提倡道路“渠化管理”,希望能够通过先进的交通管理手段,使城市交通处于畅通无阻的理想状态。已实现汽车化的发达国家,开始探索交通需求管理,试图通过对交通“源”的管理有效地解决城市交通问题。欧美国家提出了“智能运输系统”全新的交通模式,试图彻底改善城市交通状况。

(3)积极推进城市交通的可持续发展。考虑到能源的限制和用地资源的有限性,城市规划师和交通工程师提出了城市交通可持续发展的理念。

1.3 系统分析

分析是指利用某种方法或者工具,将一事物加以解析,以便了解其内部构造和组织的过程。系统分析是一种根据客观事物所具有的系统特征,从事物的整体出发,着眼于整体与部分、整体与结构及层次、结构与功能、系统与环境等的相互联系和相互作用,求得优化的整体目标的现代科学方法。

系统分析强调运用系统的理论与方法来分析问题、解决问题。系统分析强调的是一种运用方法解决问题的过程,任何一种处理形态,只要是运用系统的方法,有组织地分析问题,符合系统分析的精神,均可以称之为系统分析。

系统分析方法与传统的分析方法不同,传统的“分析程序”是“分析—综合”,即先分析后综合,这是一种单向思维。系统分析的程序是“综合—分析—综合”,分析与综合之间存在着反馈,是双向思维,即先从整体出发,对事物进行综合研究,然后以综合为指导,对事物的组成部分进行分析,探讨其内在联系,最后以分析为基础又回到整体的综合研究。

系统分析的核心内容有两个:其一是“问题诊断”,即找出问题及其原因;其二是“开处

方”,即提出解决问题的最可行方案。

系统分析的定义可描述为:利用科学的分析工具和方法,分析和确定系统的目的、功能、环境、费用与效益等问题;抓住系统中需要决策的若干关键问题,根据其性质和要求,在充分调查研究 and 掌握可靠信息资料的基础上,确定系统目标,提出为实现目标的若干可行方案;通过模型进行仿真试验,优化分析和综合评价,最后整理出完整、正确、可行的综合资料,从而为决策提供充分依据。

系统分析大致可以分为研究对象描述、研究系统评价、问题状况分析三个环节。其中研究对象描述是研究系统评价的前提和基础,研究系统评价则是系统分析的关键,问题状况分析是在系统评价的基础上对系统现有问题进行分析。系统分析过程如图 1-3 所示。

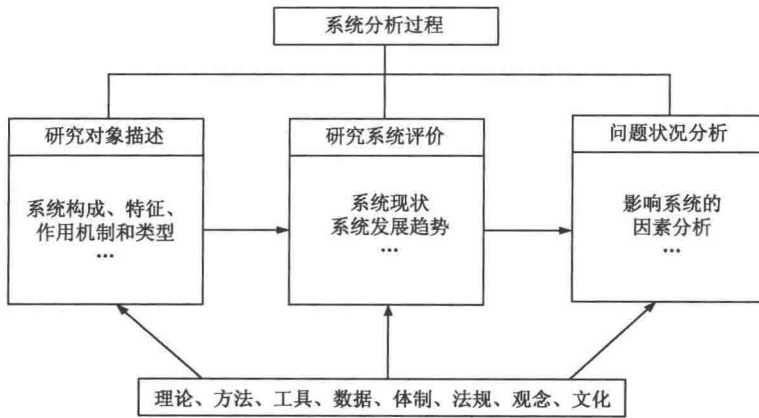


图 1-3 系统分析过程

系统分析的特点是整体性、综合性、最优化和量化。

(1)整体性是系统分析的基本出发点。把整体作为研究对象,认为各种研究对象、事件及过程都不是杂乱无章的偶然堆积,而是一种合乎规律的由各要素组成的有机整体。这一整体的性质和规律只存在于组成其各要素的相互联系和相互作用之中,而各组成部分孤立的特征和个别活动的总和不能反映出整体的功能或特征。组成总体的各部分具有总体的配合性与均衡性,系统不单纯是各部分的简单拼凑,它具有总体的特定功能和特定的特征。

(2)综合性是系统分析的另一主要特征。一方面,认为任何整体(系统)都是一些要素为特定目的而组成的综合体;另一方面,对任何对象的研究,都必须从成分、结构功能、相互联系方式、历史发展等方面分项并综合地去研究。

(3)最优化,在系统分析中即是“一个系统,两个最优”。一个系统是指以系统为研究对象,要求全面地、综合地考虑问题;两个最优是指系统的目标是总体效果最优,同时实现该目标的具体方法或途径也要求达到最优。

(4)系统分析还有量化的特点。在运用系统科学方法处理问题时,常通过数学工具和数学模型使问题得以量化的精确表述。

第 2 章 系统结构分析

2.1 系统要素

在研究复杂的大系统时,对其进行系统分析之初,可能连问题是什么还不清楚,经过反复研究讨论,初步弄清楚了目标是什么,问题在哪里,所研究的系统包括哪些要素,系统所处的环境是怎样的,逐步形成了概念模型。这种模型明确了问题的所在,划分了系统的边界,大体上确定了目标和约束条件。实际上,这时系统的结构和功能已经逐渐形成了一定的认识,这种对于系统问题不断认识的过程可以用图 2-1 描述。

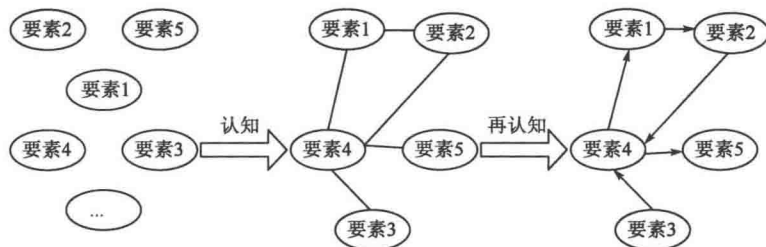


图 2-1 系统的认知过程

要素是组成系统的各个部分或成分,是系统最基本的单位,也是系统存在的基础和实际载体。要素决定着系统的结构、功能、性质、属性、特点等,同时也就决定系统的本质。

划分要素是认识系统、把握系统的最基本的手段。通过划分,使得系统中要素区分得当,既能准确地反映系统的特征,又易于认识系统各方面的变化规律。

在一个稳定的系统中,要素在构成系统并决定系统时,要形成一定的结构。一方面要素之间相互独立,相互依存,存在差别性;另一方面要素之间又按一定的规则相互作用,通过一定结构与系统整体发生联系。毫无结构的要素的堆积,并不同于系统,也形成不了系统。

并非包含在事物中的所有东西都是它的要素。例如,认为细胞是构成生物体的要素那是毫无意义的。如果在电子显微镜下研究生物体的每一个细胞,甚至都不会知道这个生物是什么,因为细胞并不具备该生物的本质特征。要研究系统的构成要素,必须着眼于系统的本质特征,从系统的根本特性来划分要素。

系统包含的要素有时会有很多,为得到最为显著的要素,可以采用问卷调查法或德尔菲方法等,从中筛选出有显著影响的要素。

2.2 系统的结构模型

结构是指事物的组成部分及其各部分之间的组成方式和相互关系,结构是事物本质特征

的反映。世界上的一切事物都是由各种要素按一定的方式组合而成的,在一定条件下相同元素不同的量,或者相同量不同的组合方式,就会形成不同的结构。

系统的结构是指系统内部各个组成要素之间相对稳定的联系方式、组织秩序及其时空关系的内在表现形式,是系统保持整体性以及具有一定功能的内在根据。系统结构反映了系统的各个要素是如何联系成为整体的,它反映了系统的有序性特征。

系统的结构模型是一种描述系统的各要素之间以及系统与环境之间相互关系的模型。需要通过确定系统各要素之间的关系是否存在,来建立系统的结构模型,一些难以量化的系统常采用这种模型加以描述。这里所说的关系,既包括因果关系、顺序关系、联系关系、隶属关系,也包括优劣关系等。

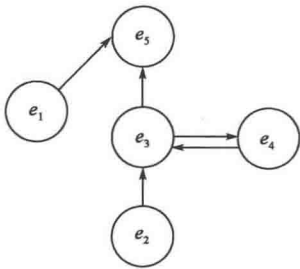


图 2-2 系统要素影响关系图

系统的结构模型描述的是系统各要素之间有无联系,一种最方便的方式是利用图形。图是由一些节点和一些边组成的,每一个要素的圆圈便是节点,表示影响的线段便是边。由于这种作用和影响是有方向的,并用箭头表示作用方向,所以这种图称为有向图。

例如某一系统的要素之间的影响关系如图 2-2 所示。

除了用图形表示系统的结构之外,还可以使用与有向图相对应的矩阵来表示系统的结构,其中最直接的一种称为邻接矩阵。如图 2-2 可以用下面的矩阵描述:

$$\begin{matrix}
 & e_1 & e_2 & e_3 & e_4 & e_5 \\
 \begin{matrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \\ e_5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}
 \end{matrix}$$

如果系统 S 有 n 个要素:

$$S = (e_1, e_2, \dots, e_n)$$

则邻接矩阵为:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

其中矩阵的元素:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{当 } e_i \text{ 对 } e_j \text{ 有影响} \\ 0, & \text{当 } e_i \text{ 对 } e_j \text{ 无影响} \end{cases}$$

也就是说,在结构模型图中有从 e_i 到 e_j 的箭头,则 a_{ij} 为 1; 否则为 0。

假设有系统 $S = (e_1, e_2, \dots, e_n)$, 若 $R = (r_{ij})_{n \times n}$, 且

$$r_{ij} = \begin{cases} 1 & e_i \text{ 可达 } e_j \\ 0 & e_i \text{ 不可达 } e_j \end{cases}$$

那么,称矩阵 $R = (r_{ij})_{n \times n}$ 为 S 的可达矩阵。

若 A 为邻接矩阵, $I = (e_{ij})_{n \times n}$ (其中 $e_{ii} = 1, e_{ij} = 0, i \neq j$) 为单位矩阵,则由邻接矩阵加上单位矩阵可经过布尔矩阵计算求得可达矩阵。具体方法如下:

令 $A_1 = A + I, A_2 = A_1^2 = (A + I)^2 \cdots A_r = (A + I)^r R = (r_{ij})_{n \times n}$ 。若 $A_1 \neq A_2, A_2 \neq A_3, \cdots, A_{r-1} \neq A_r$, 而 $A_r = A_{r+1}$, 则可达矩阵 $R = A_r$ 。

目前比较常用系统的结构建模方法是,通过对可达矩阵进行级别划分,从人们辨识要素间关系开始,通过讨论、推演、分析,直到得出已经层次化了的结构模型图为止。这是一套完整的建立结构模型的方法。

2.3 解释结构模型

解释结构模型(ISM)是为分析复杂系统的结构模型而开发的一种系统分析方法。基于有向图和矩阵,利用专家的经验 and 知识把复杂系统分解成若干要素,利用人们的实践经验和相关技术手段,确定要素之间的关系,然后通过计算机对要素的关系矩阵进行一系列分析,将系统构造成一个多级递阶的结构模型,再与专家的认知模型比较、修改、……直到一致。

ISM 是用于分析和揭示复杂关系结构的有效方法。它可将系统中各要素之间复杂的、零乱的关系分析成清晰的多级递阶的结构模型,以提高对问题的认识和理解,广泛适用于认识和处理各类系统的问题。它非常适用于变量众多、关系复杂而结构不清晰的系统的分析。

ISM 方法可以利用系统内要素之间已知的凌乱的关系,揭示出系统的内部结构。它的基本方法是,先用矩阵和图形描述各种已知的关系,在此基础上再进一步推导出系统解释结构的特点。基本步骤如下:

(1)生成邻接矩阵 A 。首先分析当前系统由哪些因素构成,并将需要分析的因素编号,如编号为 $s_i (i = 1, 2, \cdots, n)$ 。然后根据各个因素之间的影响关系生成邻接矩阵。

(2)生成可达矩阵 R 。通过对邻接矩阵与同阶单位矩阵的布尔运算得到可达矩阵。

(3)确定各个因素的层级。为了从可达矩阵得到层级有向图,定义可达集合 $R(s_i)$ 和先行集合 $A(s_i)$ 。可达集合是指从 s_i 出发可能到达的全部因素集合。先行集合是指所有可能达到 s_i 的因素集合。求出集合 $R(s_i) \cap A(s_i)$, 为因素 s_i 能到达而且又能够达到 s_i 全部因素集合。若 $R(s_i) \cap A(s_i) = R(s_i)$, 则 $R(s_i)$ 集合中的因素是全部因素中的最高层级。确定有向图中的最高层级后,可将最高层级的元素从可达矩阵中删除,然后将剩下的因素按照同样的方法确定出其中的最高层级,以此类推,一直到确定了系统中所有因素所在的层级为止。

(4)建立解释结构模型图。在找出各个因素层级的基础上,把第一级因素放在最下层,在它的上面放第二级的因素,直到把所有的因素都放到它们相应的层次上。然后用有向图的形式来表示整个系统因素的层次关系,就会形成整个系统完整清晰的结构图。

例如,分析城市轨道交通网络的抗毁性影响因素。将城市轨道交通网络抗毁性定义为,在一定时间范围和特定环境下,整个城市轨道交通网络在发生自身故障或受到外界破坏影响后,还能够保持其网络效率和满足客流运输需求的能力。城市轨道交通网络中某个或某些节点或线路被破坏,必然是轨道交通网络存在内部或外部的某种诱因而引起的,这些诱因就是城市轨道交通网络抗毁性的影响因素。

把城市轨道交通网络抗毁性的影响因素分为内部影响因素和外部影响因素两大类,

如图 2-3 所示。

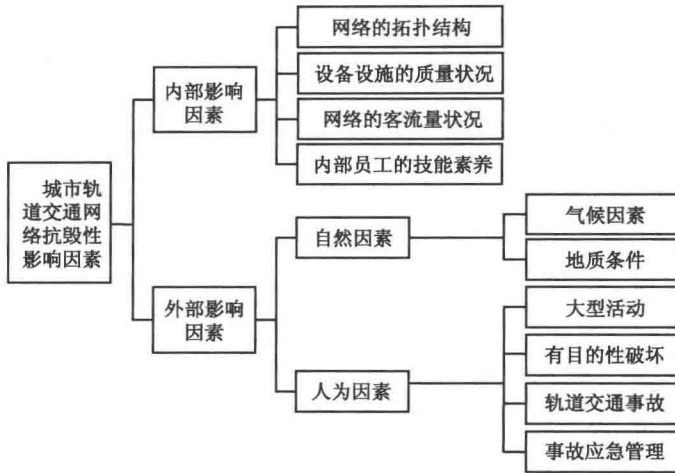


图 2-3 城市轨道交通网络抗毁性影响因素的分类

每种影响因素对轨道交通网络抗毁性的影响方式、影响规律和影响程度各不相同,即使是同一种因素,在不同的情况下对轨道交通网络的影响程度也不相同,而且在很多情况下,这些影响因素之间并不是相互鼓励的,常常存在伴生、因果等关系。因此需要建立轨道交通网络抗毁性相关影响因素的解释结构模型,来识别这些因素之间的层次结构关系。

2.3.1 生成邻接矩阵

邻接矩阵描述因素之间的两两因果关系,即直接关系。将影响因素按照顺序分别命名为 $s_1、s_2、s_3、s_4、s_5、s_6、s_7、s_8、s_9、s_{10}$ 。然后根据各相关因素之间的相关关系,按照邻接矩阵的构造规则,生成如下所示的邻接矩阵。

$$R = \begin{matrix} & s_1 & s_2 & s_3 & s_4 & s_5 & s_6 & s_7 & s_8 & s_9 \\ \begin{matrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ s_4 \\ s_5 \\ s_6 \\ s_7 \\ s_8 \\ s_9 \\ s_{10} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

2.3.2 生成可达矩阵

对于邻接矩阵,通过布尔算法求得可达矩阵。

$$M = \begin{matrix} & s_1 & s_2 & s_3 & s_4 & s_5 & s_6 & s_7 & s_8 & s_9 & s_{10} \\ \begin{matrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ s_4 \\ s_5 \\ s_6 \\ s_7 \\ s_8 \\ s_9 \\ s_{10} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

2.3.3 进行级间分解

按照解释结构模型的方法,对可达矩阵进行级位划分并建立重排序的可达矩阵。首先根据可达矩阵列出每个因素的可达集 $R(s_i)$ 、先行集 $A(s_i)$ 和 $R(s_i) \cap A(s_i)$,找出第 I 级最高级因素,如表 2-1 所示,第 I 级最高级因素 $L_1 = [s_1, s_3]$ 。接下来,从可达矩阵中划去所有最高级因素所在的行和列,也就是 s_1 和 s_3 ,再从余下的可达矩阵中寻找第 II 级最高因素,可得 $L_2 = [s_5, s_6, s_7, s_8, s_9]$ 。以此类推,可以得到 $L_3 = [s_2, s_{10}]$, $L_4 = [s_4]$ 。

级间分解计算过程

表 2-1

元素 (s_i)	可达集 $R(s_i)$	先行集 $A(s_i)$	交集 $R(s_i) \cap A(s_i)$	层次
1	1	1,4,6,8,10	1	I
2	2,3,9	2,4	2	
3	3	2,3,4,5,7,9,10	3	I
4	1,2,3,4,5,6,9,10	4	4	
5	3,5	4,5,10	5	
6	1,6	4,6,10	6	
7	3,7	7	7	
8	1,8	8	8	
9	3,9	2,4,9	9	
10	1,3,5,6,10	4,10	10	
2	2,9	2,4	2	
4	2,4,5,6,9,10	4	4	
5	5	4,5,10	5	II
6	6	4,6,10	6	II
7	7	7	7	II
8	8	8	8	II
9	9	2,4,9	9	II

续上表

元素 (s_i)	可达集 $R(s_i)$	先行集 $A(s_i)$	交集 $R(s_i) \cap A(s_i)$	层次
10	5,6,10	4,10	10	
2	2	2,4	2	III
4	2,4,10	4	4	
10	10	4,10	10	III
4	4	4	4	IV

2.3.4 建立解释结构模型

根据级间分解的结果,建立系统要素的递阶结构模型,并根据可达矩阵的相互影响关系连接有影响关系的因素,即可得到城市轨道交通网络抗毁性影响因素的解释结构模型,如图 2-4 所示。

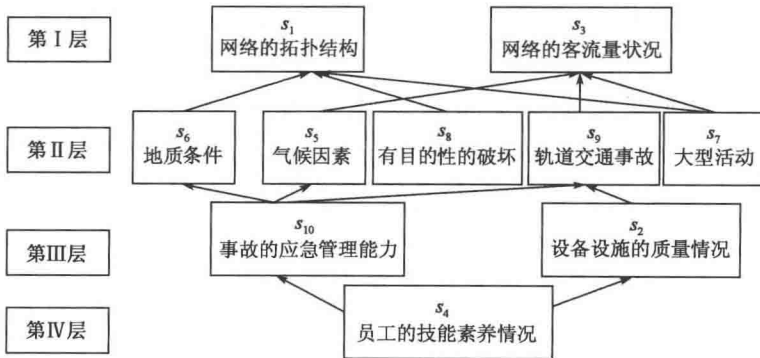


图 2-4 城市轨道交通网络抗毁性影响因素的解释结构模型

利用解释结构模型进行轨道交通抗毁性影响因素的分析,有助于把影响因素间的复杂关系层次化和条理化。轨道交通网络抗毁性影响因素解释结构模型的分析结果说明:

(1)在这些影响因素中,轨道交通网络拓扑结构和客流量状况是对轨道交通网络抗毁性最直接、最基本的影响因素,这两个影响因素是影响轨道交通网络抗毁性的内因,它们受到下一级因素的影响,其他的影响因素都是通过它们才能够影响轨道交通网络抗毁性。也就是说,轨道交通网络拓扑结构和客流量状况从根本上决定着轨道交通网络的抗毁性。

(2)城市轨道交通网络抗毁性的中层影响因素是气候条件、地质条件、大型活动、有目的性的破坏、轨道交通事故。这些因素都是影响轨道交通网络抗毁性的内因,它们是通过影响轨道交通网络拓扑结构和轨道交通网络客流量的大小的变化来影响轨道交通网络抗毁性的。

(3)城市轨道交通网络抗毁性的深层次影响因素包括设备设施的质量状况和对事故的应急管理能力。保证设备设施的质量,加强对设备设施的运行状态进行检测可以有效地降低轨道交通事故的严重程度;建立健全应急管理的组织体制,完善应急管理的运行机制和优化应急管理的保障等提高事故的应急管理的能力,可以有效地预防事故的发生,保障事故得到高效、快速的处理,这些对提高轨道交通网络抗毁性都有很大作用。

(4)最下层的影响因素是员工的技能素养状况。提高员工的技能素养,可以提高事故的