



普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
21世纪交通版高等学校教材

# 道路交通工程系统分析方法

*System Analysis Methods for Highway and Traffic Engineering*

(第二版)

王 炜 陆 建 编 著  
王殿海 裴玉龙 主 审



人民交通出版社  
China Communications Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
21 世纪交通版高等学校教材

System Analysis Methods for Highway and Traffic Engineering

# 道路交通工程系统分析方法

(第二版)

王 炜 陆 建 编著  
王殿海 裴玉龙 主审

人民交通出版社

**21 世纪交通版**  
**高等学校教材(公路与交通工程)编审委员会**

**顾问:**王秉纲 (长安大学)

**主任委员:**沙爱民 (长安大学)

**副主任委员:**(按姓氏笔画排序)

王 炜 (东南大学)

陈艾荣 (同济大学)

徐 岳 (长安大学)

梁乃兴 (重庆交通大学)

韩 敏 (人民交通出版社)

**委 员:**(按姓氏笔画排序)

马松林 (哈尔滨工业大学)

王殿海 (吉林大学)

叶见曙 (东南大学)

石 京 (清华大学)

向中富 (重庆交通大学)

关宏志 (北京工业大学)

何东坡 (东北林业大学)

陈 红 (长安大学)

邵旭东 (湖南大学)

陈宝春 (福州大学)

杨晓光 (同济大学)

吴瑞麟 (华中科技大学)

陈静云 (大连理工大学)

赵明华 (湖南大学)

项贻强 (浙江大学)

郭忠印 (同济大学)

袁剑波 (长沙理工大学)

黄晓明 (东南大学)

符锌砂 (华南理工大学)

裴玉龙 (哈尔滨工业大学)

颜东煌 (长沙理工大学)

**秘 书 长:**沈鸿雁 (人民交通出版社)

# 总 序

当今世界,科学技术突飞猛进,全球经济一体化趋势进一步加强,科技对于经济增长的作用日益显著,教育在国家经济与社会发展中所处的地位日益重要。进入新世纪,面对国际国内经济与社会发展所出现的新特点,我国的高等教育迎来了良好的发展机遇,同时也面临着巨大的挑战,高等教育的发展处在一个前所未有的重要时期。其一,加入WTO,中国经济已融入到世界经济的发展进程之中,国家间的竞争更趋激烈,竞争的焦点已更多地体现在高素质人才的竞争上,因此,高等教育所面临的是全球化条件下的综合竞争。其二,我国正处在由计划经济向社会主义市场经济过渡的重要历史时期,这一时期,我国经济结构调整将进一步深化,对外开放将进一步扩大,改革与实践必将提出许多过去不曾遇到的新问题,高等教育面临加速改革以适应国民经济进一步发展的需要。面对这样的形势与要求,党中央国务院提出扩大高等教育规模,着力提高高等教育的水平与质量。这是为中华民族自立于世界民族之林而采取的极其重大的战略步骤,同时,也是为国家未来的发展提供基础性的保证。

为适应高等教育改革与发展的需要,早在1998年7月,教育部就对高等学校本科专业目录进行了第四次全面修订。在新的专业目录中,土木工程专业扩大了涵盖面,原先的公路与城市道路工程,桥梁工程,隧道与地下工程等专业均纳入土木工程专业。本科专业目录的调整是为满足培养“宽口径”复合型人才的要求,对原有相关专业本科教学产生了积极的影响。这一调整是着眼于培养21世纪社会主义现代化建设人才的需要而进行的,面对新的变化,要求我们对人才的培养规格、培养模式、课程体系和内容都应作出适时调整,以适应要求。

根据形势的变化与高等教育所提出的新的要求,同时,也考虑到近些年来公路交通大发展所引发的需求,人民交通出版社通过对“八五”、“九五”期间的路桥及交通工程专业高校教材体系的分析,提出了组织编写一套21世纪的具有鲜明交通特色的高等学校教材的设想。这一设想,得到了原路桥教学指导委员会几乎所有成员学校的广泛响应与支持。2000年6月,由人民交通出版社发起组织全国面向交通办学的12所高校的专家学者组成21世纪交通版高等学校教材(公路类)编审委员会,并召开第一次会议,会议决定着手组织编写土木工程专业具有交通特色的道路专业方向、桥梁专业方向以及交通工程专业教材。会议经过充分研讨,确定了包括基本知识技能培养层次、知识技能拓宽与提高层次以及教学辅助层次在内的约130种教材,范围涵盖本科与研究生用教材。会后,人民交通出版社开始了细致的教材编写组织工作,经过自由申报及专家推荐的方式,近20所高校的百余名教授承担约130种教材的主编工作。2001年6月,教材编委会召开第二次会议,全面审定了各门教材主编院校提交的教学大纲,之后,编写工作全面展开。

21世纪交通版高等学校教材编写工作是在本科专业目录调整及交通大发展的背景下展开的。教材编写的基本思路是:(1)顺应高等教育改革的形势,专业基础课教学内容实现与土木工程专业打通,同时保留原专业的主干课程,既顺应向土木工程专业过渡的需要,又保持服务公路交通的特色,适应宽口径复合型人才培养的需要。(2)注重学生基本素质、基本能力的

培养,为学生知识、能力、素质的综合协调发展创造条件。基于这样的考虑,将教材区分为二个主层次与一个辅助层次,即基本知识技能培养层次与知识技能拓宽与提高层次,辅助层次为教学参考用书。工作的着力点放在基本知识技能培养层次教材的编写上。(3)目前,中国的经济发展存在地区间的不平衡,各高校之间的发展也不平衡,因此,教材的编写要充分考虑各校人才培养规格及教学需求多样性的要求,尽可能为各校教学的开展提供一个多层次、系统而全面的教材供给平台。(4)教材的编写在总结“八五”、“九五”工作经验的基础上,注意体现原创性内容,把握好技术与教学需要的关系,努力体现教育面向现代化、面向世界、面向未来的要求,着力提高学生的创新思维能力,使所编教材达到先进性与实用性兼备。(5)配合现代化教学手段的发展,积极配套相应的教学辅件,便利教学。

教材建设是教学改革的重要环节之一,全面做好教材建设工作,是提高教学质量的重要保证。本套教材是由人民交通出版社组织,由原全国高等学校路桥与交通工程教学指导委员会成员学校相互协作编写的一套具有交通出版社品牌的教材,教材力求反映交通科技发展的先进水平,力求符合高等教育的基本规律。各门教材的主编均通过自由申报与专家推荐相结合的方式确定,他们都是各校相关学科的骨干,在长期的教学与科研实践中积累了丰富的经验。由他们担纲主编,能够充分体现教材的先进性与实用性。本套教材预计在二年内完全出齐,随后,将根据情况的变化而适时更新。相信这批教材的出版,对于土木工程框架下道路工程、桥梁工程专业方向与交通工程专业教材的建设将起到有力的促进作用,同时,也使各校在教材选用方面具有更大的空间。需要指出的是,该批教材中研究生教材占有较大比例,研究生教材多具有较高的理论水平,因此,该套教材不仅对在校学生,同时对于在职学习人员及工程技术人员也具有很好的参考价值。

21世纪初叶,是我国社会经济发展的重要时期,同时也是我国公路交通从紧张和制约状况实现全面改善的关键时期,公路基础设施的建设仍是今后一项重要而艰巨的任务,希望通过各相关院校及所有参编人员的共同努力,尽快使全套21世纪交通版高等学校教材(公路类)尽早面世,为我国交通事业的发展做出贡献。

21世纪交通版  
高等学校教材(公路类)编审委员会  
人民交通出版社  
2001年12月

# 前 言

随着科学技术的迅猛发展,各学科之间的交叉日趋增强,人们在生产、生活、科研过程中遇到的问题,往往不仅涉及工程技术问题,还涉及社会经济问题、生态环境问题,要解决这些问题必须从结构组成、技术性能、经济效果、社会效果、生态影响等多方面进行综合分析研究。用传统的分析方法来分析这些复杂问题,往往带有很大的片面性,而系统工程分析方法正是从整体上来研究这些问题,使其达到总体最佳的目的。

系统工程学自 20 世纪 50 年代产生以来,已被广泛应用于许多领域,APOLLO 登月计划的成功,显示了系统工程的无比威力,现代数学及计算机技术的发展,为系统工程分析提供了强有力的工具。系统工程分析方法的应用推广,无疑对我国现代化建设具有十分重要的意义。

在以往的道路交通工程的规划、设计、建造和管理中,工程师们已或多或少地应用了一些系统工程方法。笔者希望本书通过对系统工程分析方法的系统论述,能在推进系统工程在道路交通工程中的应用方面有所裨益。

为了便于从事道路交通工程相关工作的读者学习这门技术,本书在内容安排上着重介绍系统分析方法的基本原理、原则和基本方法。在系统分析方法在道路交通工程中的应用方面,力求浅显易懂,而不过分追求应用的深度。全书共分九章并附有习题,第一章介绍系统工程的基本概念、原则;第二章、第三章、第四章介绍确定型系统的优化分析方法;第五章介绍图像模型的优化分析方法;第六章介绍随机型系统的优化分析方法;第七章、第八章介绍系统预测与决策分析方法;第九章介绍工程经济分析方法。

本书是在王伟教授等 2004 年编著出版的《道路交通工程系统分析方法》一书基础上修编而成,入选了“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”。全书由王伟教授、陆建教授统稿,第一章由王伟、陆建撰写,第二、三章由任刚撰写,第四章由马永锋撰写,第五、六章由李文权撰写,第七、八章由陆建撰写,第九章由马永锋撰写。全书由浙江大学王殿海教授、哈尔滨工业大学裴玉龙教授主审。

限于笔者的理论水平及实践经验,书中不妥和错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

王 伟 陆 建  
2011 年 1 月 20 日

# 目 录

<b>第一章 系统工程与系统分析基本概念</b> .....	1
第一节 系统与系统工程.....	1
第二节 系统分析.....	8
<b>第二章 线性规划</b> .....	17
第一节 线性规划问题及其数学模型 .....	17
第二节 线性规划问题的图解法及其几何意义 .....	20
第三节 线性规划问题的基本性质 .....	22
第四节 单纯形法 .....	24
第五节 线性规划在道路交通设计中的应用 .....	36
习题 .....	45
<b>第三章 特殊类型的线性规划</b> .....	49
第一节 运输问题 .....	49
第二节 整数规划 .....	62
第三节 资源分配问题 .....	72
第四节 特殊类型线性规划在道路交通工程中的应用 .....	77
习题 .....	87
<b>第四章 非线性规划及其应用</b> .....	90
第一节 非线性极值问题 .....	90
第二节 一维搜索 .....	93
第三节 无约束极值问题的解法 .....	99
第四节 有约束极值问题及求解.....	103
第五节 非线性规划在道路交通工程中的应用.....	117
第六节 常用非线性规划软件简介.....	120
习题.....	122
<b>第五章 图与网络系统</b> .....	124
第一节 图与网络的基本概念.....	124
第二节 最短路问题.....	130
第三节 网络最大流问题.....	135
第四节 最小费用最大流问题.....	141
第五节 图论与网络在道路与交通工程中的应用.....	143
习题.....	149
<b>第六章 随机服务系统理论——排队论及其应用</b> .....	151
第一节 排队论的基本知识.....	151

第二节	顾客到达分布和服务时间分布	155
第三节	生灭过程	158
第四节	$M/M/1$ 排队系统分析	162
第五节	$M/M/S$ 排队系统分析	169
第六节	其他类型的排队系统	174
第七节	排队服务系统的最优化问题	176
第八节	排队论在道路交通工程中的应用	179
	习题	186
<b>第七章</b>	<b>预测方法</b>	<b>188</b>
第一节	概述	188
第二节	时间序列法	191
第三节	回归分析法	197
第四节	灰色模型法	203
第五节	马尔可夫链法	206
第六节	蒙特卡罗法	209
第七节	神经网络法	210
第八节	其他预测方法	213
第九节	常用的预测分析软件	217
第十节	预测技术在道路交通工程中的应用	220
	习题	226
<b>第八章</b>	<b>决策方法</b>	<b>228</b>
第一节	概述	228
第二节	确定型问题的决策分析	231
第三节	不确定型问题的决策分析	231
第四节	风险型问题的决策分析	234
第五节	决策分析在道路交通工程中的应用	241
	习题	253
<b>第九章</b>	<b>工程经济分析</b>	<b>255</b>
第一节	资金的时间价值	255
第二节	资金等值换算公式	258
第三节	工程项目经济评价指标	263
第四节	项目经济比选方法	269
	习题	275
	<b>参考文献</b>	<b>277</b>



# 第一章 系统工程与系统分析基本概念

## 第一节 系统与系统工程

### 一、系统的概念、特性与形态

系统这一概念来源于人类的长期社会实践,但由于受到科学技术早年历史的影响,系统的概念一直没有受到应有的重视,直到 20 世纪 40 年代才开始在工程设计中应用这一概念。到了 20 世纪 50 年代以后,人们开始把系统的概念逐步明确化、具体化,并在工程技术系统的研究和管理中广泛应用。

所谓系统,是指由相互作用、相互依赖而又能相互区别的若干组成部分(单元)组合而成的具有特定功能的有机整体。这些特征在交通系统中表现得十分突出,图 1-1 所示的城市道路交通综合系统就是一个庞大的动态系统,其状态随时间而不断变化。

一般来说,系统具有以下四个特征。

#### (1) 整体性

系统是由若干个单元组成的,每个单元都具有独立的功能。具有独立功能的单元以及单元之间的相互联系,只有逻辑地统一和协调于系统的整体之中,才能发挥系统的整体功能。因此,即使每个单元并不都很完善,它们也可以综合起来,统一成为具有良好功能的系统。反之,即使每个单元都是良好的,但作为整体却不具有某种良好的功能,也就不能被称为完善的系统。

如城市道路交通系统是十分复杂的,它是由人、车、道路、设施、管理、环境等许多子系统组成的综合性整体,各子系统从属于这个整体,而整个城市道路交通系统又是更庞大的城市系统的子系统。

#### (2) 相关性

系统内各单元之间是相互作用的,在这些单元之间具有某种相互依赖的特定关系。例如,城市道路交通系统是一个大系统,它由道路网、车辆、信号控制系统以及交通规则等单元或子系统组成。在交通控制系统的运行中,这些单元或子系统是相互关联的,它们之间的协调关系使道路上行驶的车辆有条不紊。如果各个组成部分各自为政,那么它们就不能组成互相协调

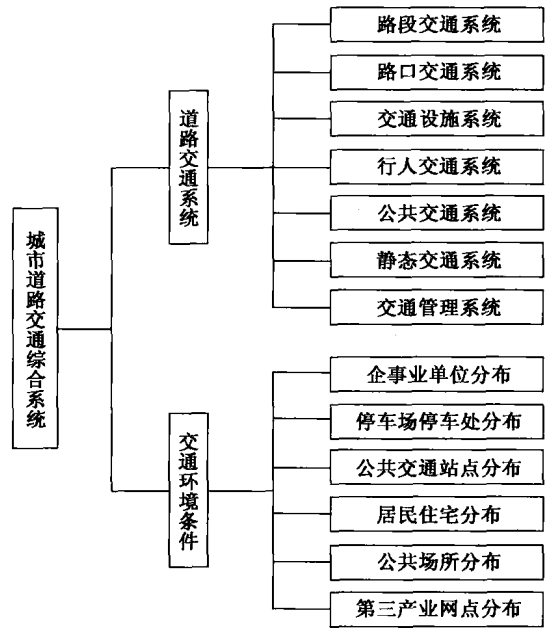


图 1-1 城市道路交通综合系统结构示意图

的系统,势必造成交通混乱。

### (3) 目的性

通常,系统都具有一定的目的性,而系统单元正是按照这种目的组织起来的。例如,在某城市进行道路交通规划,那么从规划目标设计、交通状况调查、现状交通分析、交通需求预测、道路交通网络方案设计、规划方案评价到规划方案实施的整个过程,就形成了一个“城市道路交通规划系统”。该系统的目标可以是在一定的道路交通服务水平下使道路交通建设的投资最少,或者是在一定的道路交通建设投资条件下使建成的道路网络的服务水平最高,或使社会获得的效益最大。

### (4) 环境适应性

系统总是存在于一定的环境之中,与环境不断进行物质、能量、信息的交换。系统必须适应外部环境的变化。如城市交通系统存在于社会环境之中,受周围环境的制约和干扰,并与周围环境相协调。

总之,城市道路交通系统是由许多子系统组成的动态系统。在这个大系统中,各子系统都具有其特定的功能和结构。交通环境系统是由交通网以外周围各种复杂的环境因素构成的,它为整个交通系统提供了交通源,同时又是各种交通流的集散点、吸引点及目的地。它使得人们可以根据不同的目的,采用不同的交通手段,按照不同的社会要求,把整个交通系统划分成不同的交通形式。道路交通系统是由很多子系统组成的,这些子系统之间有着极为密切的横向联系。它们的功能特性,就是为人们的交通活动提供必要的物质、技术条件和活动的空间结构。交通环境系统由于它本身的集散性、吸引性,势必要对道路交通系统的运行状态、道路交通容量产生巨大的制约和影响。而道路交通系统中由于车辆运行所形成的交通噪声、交通污染和不同程度的交通拥挤、阻塞以及由于交通所产生的社会效益,又势必对环境系统产生很大的影响。由此可见,它们之间是相互作用又相互依赖的。

在自然界和人类社会中,系统是普遍存在的。根据系统的性质,系统形态可分为以下几类。

#### (1) 自然系统与人造系统

自然系统是指以自然物为组成部分,自然形成的系统,如海洋系统、气象系统、矿藏系统等。人造系统是指由人工造成的各种单元所构成的系统,如人类对自然物质进行加工,造出由各种机器构成的各种工程系统等。

#### (2) 实体系统与概念系统

凡是以矿物、生物、机械、能源和人等实体为构成单元所组成的系统都是实体系统。凡是由概念、原理、原则、方法、制度及程序等概念性的非物质实体所构成的系统称为概念系统,如管理系统、教育系统等。

#### (3) 动态系统与静态系统

动态系统是指系统状态随时间而变化的系统,即系统的状态变量是时间的函数。静态系统则是指表征系统运动规律的数字模型中不含有时间因素的系统,即模型中的变量不随时间而变化。静态系统是动态系统的一种极限状态,即处于稳态的动态系统。

#### (4) 控制系统与行为系统

控制就是为了达到某个目的给对象系统所施加的必要动作。为了进行控制而构成的系统称为控制系统。行为系统是指以完成目的的行为作为构成单元而形成的系统。

在道路交通工程中,实际上存在的系统大多数是自然系统与人工系统复合而成的实体系

统。如道路网络系统、交通控制系统、公路运输系统、交通环境保护系统等,均属于自然—人工复合系统,并且大都是实体系统。

## 二、系统工程

对某一个具体问题的分析,传统的方法往往是把一个事物分解成许多独立的部分来分别研究,人们可以把问题分得很细,然后进行深入的研究。但是这种研究方法往往容易把事物看成是孤立的、静止的,因而所得出的结论只能限制在一定的条件下,只能解决一些简单问题。如果把这些结论放到更大的范围来考察,那么这些结论就可能是片面的,甚至可能是错误的。

近几十年来,由于科学技术的迅猛发展,出现了许多庞大而复杂的系统。例如宇宙开发系统、交通运输系统、钢铁化工联合生产系统、生态环境保护系统、军事指挥系统、社会经济系统等。这些大系统不仅涉及科学技术问题,还涉及社会问题。这些系统常常具有综合性的功能和目标,需要从结构组成、技术性能、经济效果、社会效果、生态影响等多方面来研究考虑,用传统的分析方法来分析这些大系统显然是行不通的。而系统工程正是要从整体上来研究这些系统的共同问题。

由于参与研究和发系统工程学的学者来自不同的领域,各国学者对系统工程有不同的解释。下面列举了美国学者对系统工程所作的定义。

“系统工程学是应用科学知识设计和制造系统的一门特殊工程学”(1969年,美国质量管理学会系统工程委员会)。

“系统工程学是研究由许多密切联系的单元组成的复杂系统的设计科学。设计该复杂系统时,应有明确的预定功能和目标,并使得各个组成单元之间以及单元与系统整体之间有机相连、配合协调,使得系统总体能达到最优目标。但在设计时,要同时考虑到参与系统中的人的因素与作用”(1975年,美国《科学技术辞典》)。

“系统工程学是为了研究由多个子系统构成的整体系统所具有的多种不同目标的相互协调,以期系统功能达到最优,并最大限度地发挥系统组成部分的能力而发展起来的一门科学”(1967年,美国 H·Chestnut)。

系统工程学是一门综合性科学技术,研究的对象是大型复杂系统的设计和运行。它有目的地对新工程对象进行研究与设计,对已有工程对象进行运行、管理与改进,并以达到总体最佳的效果为目标。系统内部的联系是指各种设备与人的有机联系,它们又与环境之间密切联系、相互作用。在时间领域方面,则按照工程的时序综合考虑规划、计划、研究、设计、试验、制造、安装、运行各阶段的相互关系和联系。它既是一门跨专业领域的总体工程学,也是一种思维方法论与工作方法论。它的若干原则也能用于行政管理系统和其他系统,关键在于这些系统能否抽象为一定的模型并求得最优的解答。

系统工程学是一门不属于某一专业的新科学,是对广泛工程领域的探讨。系统工程虽然是一种工程,但它与其他的工程学相比具有如下两个特点。

首先,系统工程不同于机械工程、道路工程、交通工程、化工工程、电力工程等。各门工程学都有其特定的工程物质作为对象,如道路工程的研究对象是道路,交通工程的研究对象是人、车、路。而系统工程的研究对象则不限于某个领域,任何一种物质系统都能成为它的研究对象,而且它的研究对象还限于物质系统,它还可以把各种自然现象、生态、人类、企业和社会等组织体、管理方法和步骤等一切作为研究对象。由于它处理的对象是信息,所以,在国外有些学者认为系统工程是一种“软科学”。

其次,系统工程不仅涉及工程系统,还涉及非工程系统,不仅涉及技术因素,还涉及社会、生态甚至心理因素,所以它的研究和运用不仅涉及自然科学和技术科学,还涉及社会科学,特别是需要把它们结合起来。

系统工程作为一门独立的学科,具有它自己独特的思想方法、理论基础、程序体系和方法论。但是,当前系统工程还正在发展中,尚未形成完善的理论体系和方法论。系统工程思考方法通常称为系统方法,它是在对系统的概念、系统的基本构成及各种形态作了深入研究的基础上,把对象作为整体系统来考虑、掌握、分析、设计、制造和使用的基本思想方法。系统工程也具有自己独特的工程程序体系,虽然在实际运用时,由于对象不同、运用的人各异,所采用的具体程序步骤会各不相同,但其程序体系的一般原则具有普遍意义。

以图 1-2 所示的道路交通安全管理系统工程为例,道路交通安全管理系统是由人、车、路、环境、管理等要素构成的动态复合系统。

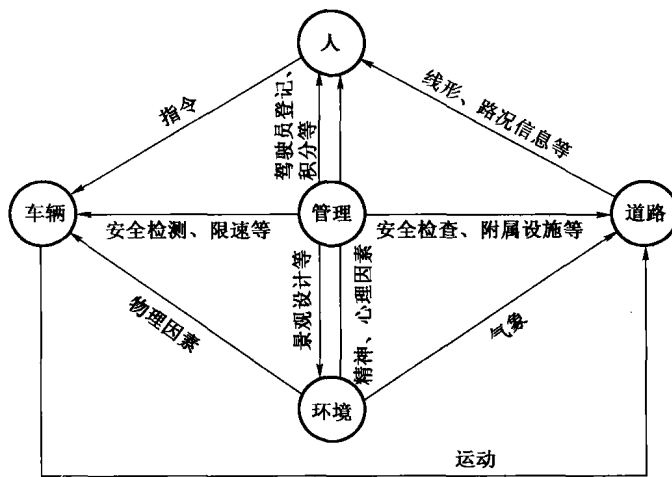


图 1-2 人、车、路、环境、管理组成的道路交通安全管理系统工程

在图 1-2 中所示的系统中,驾驶员从道路和环境两个要素中获取信息,这些信息综合到驾驶员的大脑中,在管理行为的约束下,经大脑判断形成动作指令,该指令通过驾驶员的操作行为使汽车在道路上产生相应的运动,运动后汽车的运行状态和道路、环境的变化又作为新的信息反馈给驾驶员,完成行驶过程。系统中的“管理”则协调着系统中人、车、路、环境之间的相互关系,并且各要素及其相互间的配合关系会随时间不断地变化。因此可以认定,道路交通系统是由人、车、路、环境、管理 5 个要素构成的动态复合系统,各个要素既具有自身的特性,又相互联系、相互作用,构成了完整的道路交通系统。该系统中,所谓“人”主要包括驾驶员、乘客以及行人;“车”包括机动车和非机动车;“路”包括高速公路、一级公路、二级公路等,以及各级城市道路;“环境”包括气候条件、沿途景观等;“管理”包括对人、车、路、环境的管理,它协调着系统中其他要素间的关系,对道路交通系统的安全运行起着至关重要的作用。

系统工程具有自己独特的方法论,其方法体系的基础就是运用各种数学方法、计算机技术和控制理论来实现系统的模型化和最优化,进行系统分析和系统设计。

总之,系统工程方法论的基本特点可归纳如下。

#### (1) 研究方法上的整体性

整体性就是要把系统当作一个整体,不要“见木不见林”。系统既然是由各个单元按一定方式组成的,就不能孤立地只考虑其中一个部分。一个系统可以分成许多个子系统,而

这个系统本身又可能是一个更大的系统的组成部分或子系统。常常会有这样的情况:从局部看来是有利的方案,从整体看来可能是不利的;而从整体看来是有利的方案,对于其中某些局部可能是不利的。这就要求有整体观点、全局观点。上面提到的这种整体性是从空间来看的,而从时间上来看,我们也要把一个系统的研制、建立与使用过程当作一个整体,从全过程来衡量和处理问题,不能只抓住一个片段或阶段,特别要从发展上看问题。由于一个系统从规划到使用经历的时间很长,而科学技术发展得又很快,考虑不周则会在花费很长时间和很大代价后由于技术陈旧而失去系统的使用价值。因此,在处理任何一个系统时,首先要注意它的整体性。

### (2) 应用技术上的综合性

当前新的发展趋势是一个大规模的复杂系统往往不是一个单纯的技术系统,它会涉及许多社会的、经济的因素,构成一个复杂的社会—技术系统或社会—经济系统,促使自然科学、技术科学和社会科学日益紧密地结合在一起。这就是系统工程在解决社会—技术系统时所表现出来的一个重要特点。

因此,在考虑一个系统时,应该时时想到它是一个综合体,其中不仅有技术问题,还有经济问题,甚至社会、生态等问题。技术问题本身也是物流、能流、信息流交织在一起形成的。各种因素互相制约,有时还会出现矛盾,必须综合地加以考虑。例如技术性能与成本的关系、产品与副产品(包括环境污染)的关系、必要性与可能性等,都必须从各方面综合考虑,在多种方案中选择最可行的方案。由于系统工程问题的多样性和综合性,这就要求在处理这些问题时应该综合使用各门科学技术的理论、方法和工具。系统工程的这个特点也是它成为一门边缘科学的原因之一。

### (3) 处理问题上的科学性

在处理系统工程问题时,应该尽可能做到正确、严密。系统工程中的概念和原则是本质,数学方法是手段,为了准确地运用概念和原则,应该尽可能运用数学工具。因此,在建立系统的数学模型并进行最优化时,要充分利用现代数学方法和现代科学技术。

作为工程科学的系统工程,它是千百年来人们对生产实践的总结。在人类历史上,人们在从事复杂的工程建设时,已经开始摸索到了一些系统工程的方法。早在公元前 250 年,李冰父子带领四川劳动人民修筑都江堰,把分洪、引水、排沙巧妙地结合起来,这种思想便是系统工程方法。在北宋真宗时期,皇宫失火,丁谓主持修复,其中清理废墟、挖土烧砖、运输建筑材料等工作都很繁重,丁谓提出了一个方案:在皇宫前的大街挖河取土烧砖,解决了取土问题;然后放水入河,用船运输建筑材料,解决了运输问题;再在竣工后将废砖碎瓦回填,修复大街,解决了废墟清理问题。这种一举三得的施工方案便是一种系统工程方法。

但是,系统工程作为一门独立的学科,还是在 20 世纪 50 年代,在总结了第二次世界大战以来军事、经济以及尖端技术发展开发系统的经验的基础上建立起来的。阿波罗(Apollo)登月计划的成功,显示了系统工程的无比威力,现代计算机与信息科学的发展,为系统工程的推广提供了有力的工具。近年来,系统工程的研究范围已由传统的工程领域扩大到工农业、交通运输、能源等部门的规划、设计领域,以及城市建设、水利资源利用、生态环境保护、国民经济发展规划等社会经济领域。

## 三、系统工程的基本处理方法

一个系统从开始建立到成功地投入使用,按时间顺序可分为下述三个阶段。

### (1) 系统规划阶段

这一阶段的主要任务是定义系统的概念,明确建立系统的必要性,在此基础上确定系统的目的和目标。同时,提出系统应具备的环境条件和估计系统所需的各种制约条件。最后制订系统开发计划书。计划书中除包含上述内容外,还应包含系统建成的期限、系统投资限额等内容。

### (2) 系统设计阶段

该阶段中,首先是对系统进行概略设计,其主要内容是各种替代方案的建立,然后进行系统分析。系统的替代方案是指具有相同功能的、可以相互替换的一组方案。系统分析的项目包括系统的目的、替代方案、费用和效益、模型及评价基准等,在系统分析的基础上确定系统设计方案,据此对系统进行详细设计。

### (3) 系统制造和运行阶段

在这一阶段,首先是对系统设计中的一些与系统有关的关键项目进行试验和试制,在此基础上进行必要的改进,并进行工艺设计。然后正式投入制造、安装、调试,同时讨论系统的运行方法和维护方法。最后,根据已制订的运行、维护方法投入运行,在运行的基础上讨论系统的调整和改进工作。

上述系统工程处理步骤可用图 1-3 所示的流程框图来表示。系统工程的工作步骤是根据多年来系统工程的实践总结出来的,不同领域的系统工程研究人员,对系统工程的阶段和步骤的划分有不同的看法,上述步骤仅供参考。

所谓系统工程的基本处理方法,就是根据系统的概念与系统的基本组成和性质,把研究对象作为系统来进行分析,对分析结果加以综合,综合后产生的就是系统的设计,然后再对这个系统的设计方案进行评价,如图 1-4 所示,这样反复进行,直到能有效地实现预定目标为止。

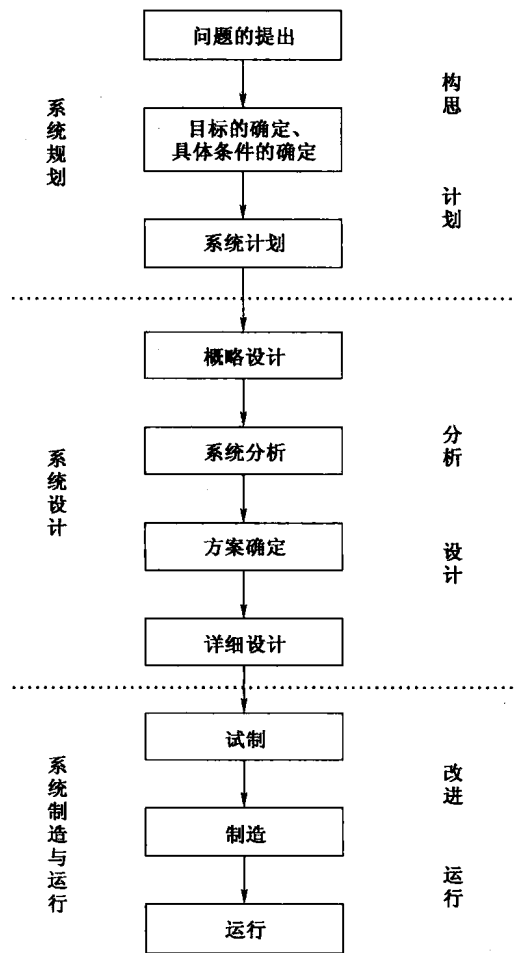


图 1-3 系统建立流程图

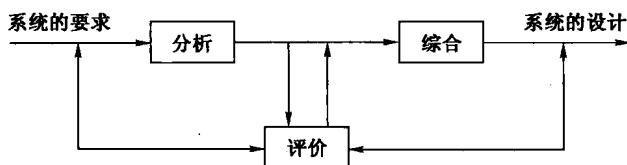


图 1-4 系统工程基本处理方法框图

所谓系统分析,是指为了把对象系统的目的等要求事项最优地予以完成,应用各种分析方法对系统进行模拟、计算,从而获得系统设计所必需的信息。在分析过程中,每次结果都要同

制订的评价标准作比较,在考虑环境条件的情况下,按照比较后的差距反复进行分析,直到满足评价要求为止,然后转入综合。所谓综合,是指根据分析与评价结果确定系统的构成方式和动作方式,从而做出系统的设计。最好能有多种设计方案,然后按评价标准从不同的观点和角度反复进行综合评价。系统综合评价的目的在于从技术和经济两个方面对设计出来的各个方案进行比较,选出技术先进、经济合理的方案。这种反复过程实际上是一种信息反馈过程。

把上述系统工程的基本处理方法具体化,就是在系统工程中最常使用的系统分析、系统设计方法。这种方法不但用于系统设计阶段,还可用于系统规划阶段及系统制造与运行阶段,从而求得系统的合理规划、系统的最优制造方法及系统的最优运行方式。

该方法大致可分为三个步骤,即系统分析、系统设计以及系统的综合评价。

以道路设计的系统工程分析过程为例,说明系统工程基本处理方法。

若计划在某两地之间修建一条道路,用系统工程方法分析,其过程大致可用图 1-5 来表示。

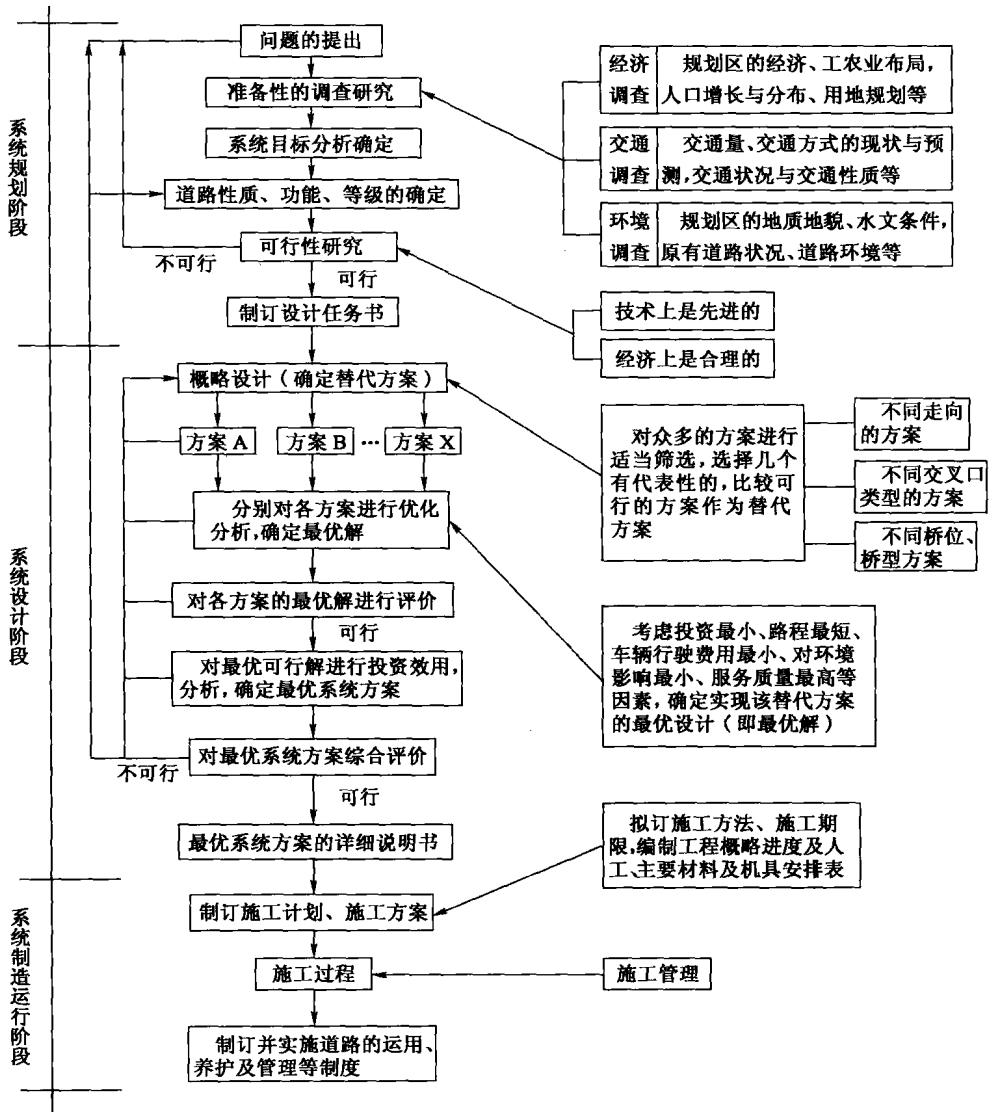


图 1-5 道路设计的系统工程分析过程框图

在规划阶段,主要的任务是进行可行性研究,论证是否有建造道路的必要,若有必要,则制订道路设计计划。这一工作是在经济调查、交通调查、环境调查的基础上进行的。

在设计阶段,其主要任务是选定替代方案,对替代方案进行优化分析,通过对优化分析结果的评价,确定最优设计方案,并制订最优方案的详细说明书。

一组替代方案选定后,对每一替代方案来说,在该替代方案规定的控制条件下,还可以有许多设计方法。例如,要求建造的一条道路是跨越某河流的两城市间连接干道。通过概略设计后,选用A、B、C三个方案为替代方案(图1-6)。方案A为直接连接甲、乙两城市,路线最短,但需建一座斜交桥;方案B的桥位与河流正交,但路线相应增加;方案C是利用旧路,对原有道路进行改造,其路线最长。对每一替代方案,通过考虑桥位、线形标准、路面结构、附属设施等,还可以提出许多小方案,而系统优化分析就是通过对这些因素考虑,使该替代方案达到最优设计(即框图中的最优解),再通过对这些替代方案最优设计的比较、评价,就可确定系统的最佳设计方案。

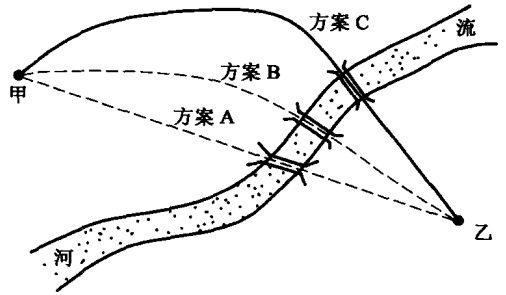


图 1-6 替代方案示意图

在施工运行阶段,其主要任务是施工计划、施工管理和竣工通车后的养护及管理,并使之优化。

## 第二节 系统分析

### 一、系统分析的基本概念

系统工程的研究对象是组织化的复杂的大系统。这种大系统的特征之一就是在系统中存在着许多矛盾的因素和不确定因素。因此,对其应采取相应的措施,确保相关的重大问题能够正确地决策。实践证明,要最优地进行系统设计,对系统有关的重大问题进行正确的决策,其关键步骤是系统分析。所以,系统分析在整个系统建立过程中起着极其重要的作用。

在本章第一节中已经提到,所谓系统分析,就是为了使系统的目的能最好地实现,通过模拟、计算来确定应该如何构成系统。具体地说,系统分析是由步骤和技巧构成的,它的最终目的是为决策者提供作决策的依据。为了给决策者提供判断最优系统方案所需的信息和资料,系统分析人员必须使用科学的分析工具和方法,对系统的目的、功能、环境、费用、效益等进行充分的研究,并搜集、分析和处理有关的资料和数据,据此建立若干替代方案和必要的模型,进行仿真试验,把试验、分析、计算的各种结果同早先制订的计划进行比较和评价,最后整理成完整、正确与可行的综合资料,作为决策者选择最优系统方案的主要依据。

由此可知,系统分析的目的在于:通过分析比较各种替代方案的费用、效益、功能和可靠性等各项技术经济指标,得出决策者决策所必需的资料和信息,以便最后获得最优系统方案。系统分析的目的可以用图1-7表示。

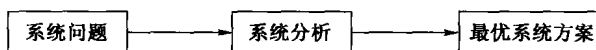


图 1-7 系统分析的目的



系统分析实质上就是在明确系统目的的前提下,分析和确定系统所应具备的功能和相应的环境条件。抓住系统的某些需要决策的关键问题,根据问题的性质和要求,相应地建立有关模型,并根据需要对有关模型进行仿真试验,对所得信息进行反馈,从而使系统设计所需的资料和信息不断完善和充实,以保证最优方案的选择。

现以如下的管道运输系统分析为例,说明系统分析的特点。

(1)系统开发对象:原油运输系统。

(2)系统开发目标:每天由阿拉斯加的油田向美国本土运送 200 万桶原油。

(3)系统开发环境:油田处于北极圈内,海湾长年处于冰封状态,陆地更是常年冰冻,最低气温达  $-50^{\circ}\text{C}$ 。

(4)提出的问题是:应如何设计原油运输系统,才能达到系统的目标?

(5)系统方案设计:

方案 1 由海路用油船运输。

方案 2 用带加温系统的输油管运输。

(6)系统分析:

对于方案 1,其优点是每天仅需要 4~5 艘超级油轮即可满足运量的要求,比铺设油管节省费用。存在的问题是:第一,要用破冰船引航,这样既不安全又增加费用。第二,起点和终点都要建造大型油库,这又是一笔巨额花费。第三,考虑到海运可能受到海上风暴的影响,油库的储量应在油田日产量的 10 倍以上,才能保证需求量的供应。归结起来,方案 1 的主要问题是:不安全、费用大、无保证。

对于方案 2,其优点是可以利用成熟的管道输油技术。存在的问题是:第一,要在沿途设加温站,这样会导致管理复杂,而且要供给燃料。然而,运送燃料本身又是一件相当困难的事情。第二,加温后的输油管不能简单地铺在冻土里,因为冻土层受热后会起管道变形,甚至造成断裂。为避免这种危险,有一半的管道需要用底架支撑,这样,架设管道的成本费用要比铺设地下油管高出 3 倍。

是否有其他更好的方案呢?

(7)系统进一步分析——提出第一个竞争方案:

方案 3 有人提出将含有 10%~20% 氯化钠的海水加到原油中去,使在低温下的原油成为乳液状,且能畅流,这样就可以用普通的输油管道运输了。这个方案获得了很高的评价,并且取得了专利。其实,这一原理早已用于制作汽车的防冻液,而将其运用到这个工程中来,是一个有价值的创造。

那么,是否还有其他更好的方案呢?

(8)系统进一步分析——提出第二个竞争方案:

方案 4 将天然气转换为甲醇以后再加到原油中去,以降低原油的熔点,增加流动性,从而用普通的管道就可以同时输送原油和天然气了。

这个方案的提出,充分体现了系统工程方法的综合性和与各种专业知识的相关性。这个方案是由系统分析人员马斯登和胡克提出来的,他们对石油的生成和变化有着丰富的经验和知识。他们注意到,埋在地下的石油最初是油气合一的,这时它们的熔点非常低,经过漫长的年代以后,油气才逐渐分开。与方案 3 相比,方案 4 更好。第一,不需要运送无用的附加混合剂——海水;第二,不需要另外铺设天然气管道。一个管道,既运气又运油,可谓一举两得。