



structural response

network

disaster simulation lifeline

Ground motion

reliability

生命线工程抗震

——基础理论与应用

李杰 著



科学出版社
www.sciencep.com

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

生命线工程抗震

——基础理论与应用

李 杰 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书共分两部分十二章。第一部分(第一章至第八章)主要论述生命线工程抗震的基础理论;第二部分(第九章至第十二章)重点阐述生命线工程抗震理论在典型生命线工程系统中的应用和城市地震灾场模拟与控制理论的应用。

本书可供土木工程、抗震减灾领域的科技工作者阅读,并可供高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

生命线工程抗震:基础理论与应用/李杰著. —北京:科学出版社,2005
ISBN 7-03-014713-8

I. 生… II. 李… III. 市政工程-抗震设计 IV. TU99

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 128603 号

责任编辑:童安齐 沈 建 / 责任校对:柏连海
责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年1月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2005年1月第一次印刷 印张:14 3/4

印数:1—2 500 字数:275 000

定价:30.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

前 言

生命线工程系统是维系现代城市功能与区域经济功能的基础性工程设施系统。生命线工程抗震研究是工程防灾研究的重要分支之一。这一分支研究的基本目的,是为生命线工程的抗灾设计和灾害防御提供基础理论和技术支持工具。

本书主要内容取材于作者和他的学生们近 15 年来的研究工作成果。全书分为基础理论篇和工程应用篇两大部分。除绪论性质的第一章外,书中第二章至第八章论述生命线工程抗震的基础理论,第九章至第十二章介绍生命线工程抗震理论在典型生命线工程系统中的应用和城市地震灾场模拟与控制理论的应用。

本书的基础理论部分主要沿着地震动、工程结构、工程系统这样一条主线展开。其中第二章为常规地震危险性分析内容;第三章论述工程地震动场的研究进展,在简要介绍确定性场地地震反应分析方法基础上,本书把论述重点放在了以随机波动分析理论为基础的地震动随机场分析之上;第四章介绍生命线工程中埋地管线的抗震性能分析,较为详细地列举了主要的地下管线震害分析方法与抗震可靠性分析方法;第五章概述工程结构的抗震分析理论。书中除了对于常规结构地震反应分析和工程实用抗震可靠性分析算法的论述之外,还重点介绍了新近发展的随机结构地震反应分析的密度演化方法。

生命线工程网络的抗震可靠性分析分为连通可靠性分析与功能可靠性分析两大类,本书各设专章论述。其中第六章为连通可靠性分析,在详细给出经典的网络系统可靠性分析的主要内容基础上,重点介绍了我们发展的递推分解算法,它可以适应于大规模工程网络的分析;第七章是工程网络系统的功能可靠性分析,结合城市供水管网,介绍了最新的一次二阶矩方法和网络拓扑优化分析方面的研究进展。

复合生命线工程系统的地震反应分析是作者在生命线工程研究中思考的基本问题之一。在第八章中介绍了笔者在此课题上的研究进展,包括复合生命线工程系统地震灾害响应的时-场域仿真模型、城市地震灾场的系统控制等内容。

在本书的工程应用篇中,结合区域电力系统、城市供水系统、城市交通系统等,较为系统地介绍了典型生命线工程系统抗震可靠性分析的研究案例。同时,结合两个城市的地震灾场模拟与系统控制背景,展示了复合生命线工程地震反应分析与系统控制的应用实例。

本书各章内容在总体上互相联系,基本构成了生命线工程抗震的基本理论体系。

本书的研究工作是在国家杰出青年科学基金“复杂生命线工程系统地震反应

分析与行为控制理论研究”(编号:59825105)、教育部 21 世纪教育振兴行动计划“长江学者特聘教授专项研究经费”、国家自然科学基金青年基金“地震灾害场的动态集散控制系统模型研究”(编号:59078320)以及原国家科委高技术基础研究项目“城市重大灾害的系统控制理论与应用”等基金资助下完成的。

在本书即将付梓之际,作者深切感谢谢礼立院士、周锡元院士对本书出版的大力推荐;感谢孙钧先生、项海帆先生、沈祖炎先生、范立础先生等师长多年来对作者的关心、教诲和支持;感谢楼梦麟教授、吕西林教授、陈以一教授、顾明教授、李国强教授等同仁长期以来对作者的支持、爱护和帮助。同时,作者特别感谢他的学生们:韩新博士、廖松涛博士、江建华博士、何军博士、陈建兵博士、陈伶俐博士、李建华博士、宋建学博士等,是他们辛勤的劳动使我们共同的事业逐步走向深入。陈建兵博士还为本书做了认真、细致的校对工作。没有上述这些常令我感怀不已的关心、支持和合作,是很难有这本著作的。

最后,作者郑重感谢我的夫人谢闽女士,是她多年来无微不至的关怀和照料使我可以无所牵挂地投身于科学事业,投身于可以有所发现、有所前进的征程。

作者谨识于 同济园

2004 年 11 月

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 区域与城市生命线工程系统	1
1.2 地震灾害与生命线工程	2
1.2.1 1985 年墨西哥地震($M_L=7.8$)	3
1.2.2 1989 年美国 Loma Prieta 地震($M_L=7.2$)	3
1.2.3 1994 年美国 Northridge 地震($M_L=6.8$)	3
1.2.4 1995 年日本阪神大地震($M_L=7.2$)	3
1.2.5 1999 年中国台湾集集大地震($M_L=7.3$)	4
1.3 生命线工程抗震研究中的关键科学与技术问题	4
1.3.1 灾害作用的危险性与灾害作用的空间分布形式	4
1.3.2 生命线工程结构的地震反应机理与分析理论	4
1.3.3 生命线工程结构的抗震可靠性分析	5
1.3.4 大型复杂生命线工程网络的抗震可靠性分析	5
1.3.5 生命线工程的健康监测与性能评价	6
1.3.6 复合生命线工程系统的灾害响应模拟与模拟控制	6
1.4 本书基本内容	6
第二章 地震危险性分析基础	8
2.1 概述	8
2.2 不确定性要素及其反映	8
2.2.1 地震发生时间随机性的反映——地震发生概率模型	9
2.2.2 地震发生地点不确定性的反映——潜在震源区划分	10
2.2.3 地震震级大小的随机性——地震震级概率分布函数	11
2.2.4 地震动传播途径不确定性的简化——地震动衰减关系	13
2.3 地震危险性分析方法	14
2.3.1 点源	14
2.3.2 线源	15
2.3.3 面源	16
2.3.4 地震动超越概率与概率分布函数	17
2.4 地震危险性分析方法的发展	18
第三章 工程场地地震动分析	20
3.1 概述	20

3.2	工程场地地震动分析的一维波动理论	20
3.2.1	波动方程及其解答	21
3.2.2	待定参数的确立	22
3.2.3	频域传递函数	23
3.2.4	反应量的合成	24
3.3	工程场地地震动分析的二维波动数值模拟	25
3.3.1	波动有限元动力方程的建立	25
3.3.2	人工边界条件	30
3.3.3	二维波动数值模拟的实现	34
3.4	工程场地随机波动分析	37
3.4.1	输入地震动的谱特征	37
3.4.2	随机振动分析的虚拟激励法	39
3.4.3	工程场地随机地震动场的数值分析	40
3.4.4	分析实例	42
3.5	随机介质场地地震动随机场分析	44
3.5.1	随机结构分析的扩阶系统方法	44
3.5.2	随机介质场地的波动分析	46
3.5.3	分析实例	49
第四章	地下管线抗震性能分析	51
4.1	地下管线的震害及其影响因素	51
4.1.1	地下管线的震害	51
4.1.2	地下管线的破坏形式	52
4.1.3	地下管线破坏的影响因素	52
4.2	地下管线的地震反应分析	54
4.2.1	静力分析方法	54
4.2.2	简化算法 I——地震波动输入	55
4.2.3	简化算法 II——正弦波动输入	57
4.3	地下管线抗震可靠性分析	59
4.3.1	管线接口变形	59
4.3.2	基于两态破坏准则的管线抗震可靠性分析	60
4.3.3	多态破坏准则的管线抗震可靠性分析问题	62
4.4	地下管线震害率的经验统计	63
第五章	工程结构抗震分析	67
5.1	结构分析模型	67
5.1.1	一般有限元分析模型	67
5.1.2	结构-设备体系的地震反应分析模型	69

5.1.3	多点地震动输入的结构动力分析模型	71
5.2	确定性结构地震反应分析	73
5.2.1	线性加速度算法	73
5.2.2	广义 α 算法	76
5.3	随机结构地震反应分析	78
5.3.1	概率守恒原理	78
5.3.2	随机结构地震反应分析的概率密度演化方程	81
5.3.3	求解概率密度演化方程的数值方法	83
5.4	基于设计反应谱的结构抗震可靠性分析	87
5.4.1	一致地震激励下的结构	87
5.4.2	多点地震动输入时的结构	90
第六章	工程网络抗震可靠性分析(I)——连通可靠性	96
6.1	引言	96
6.2	系统可靠性分析基础	97
6.2.1	图论的若干基本概念	97
6.2.2	系统的结构函数与简单系统的可靠度	100
6.3	经典最小路方法	102
6.3.1	邻接矩阵法	103
6.3.2	深度优先搜索与 P. M. Lin 方法	104
6.3.3	网络系统可靠度分析及其复杂性	105
6.4	不交最小路方法	106
6.5	求解大型网络连通可靠性的递推分解法	109
6.5.1	宽度优先搜索法	109
6.5.2	边权网络系统的递推分解算法	109
6.5.3	点权网络系统分析	114
6.5.4	多源点多汇点网络系统	115
6.6	相关失效网络可靠度分析	116
6.7	网络可靠性分析的 Monte-Carlo 算法	117
第七章	工程网络抗震可靠性分析(II)——功能可靠性	119
7.1	引言	119
7.2	供水管网功能分析基础	119
7.3	地震后带渗漏管网的功能分析	121
7.4	供水网络抗震功能可靠性分析	124
7.4.1	均值一次二阶矩方法	125
7.4.2	验算点法	127
7.5	基于功能的网络优化设计	130

7.5.1	优化参数的选择	130
7.5.2	供水管网优化问题的提法	131
7.5.3	网络优化中的遗传算法	131
7.5.4	供水管网基于抗震功能可靠性的拓扑优化	137
第八章	复合生命线工程系统	141
8.1	复合生命线工程系统及其研究发展概况	141
8.2	复合生命线工程系统灾害响应模拟	143
8.2.1	离散事件动态系统仿真的基本原理	143
8.2.2	复合生命线工程系统的模拟	145
8.2.3	复合生命线工程系统综合灾害响应的时-场域仿真模型	146
8.2.4	仿真收敛与仿真统计	146
8.3	复合生命线工程系统灾害响应模拟的 Petri 网建模	148
8.3.1	经典 Petri 网	148
8.3.2	非自主有色 Petri 网	150
8.3.3	复合生命线工程系统地震灾害响应模拟	151
8.4	城市地震灾场的系统控制	153
8.4.1	基于系统结构行为分析的控制	153
8.4.2	基于投资行为的系统控制	155
8.5	城市地震次生火灾分析	157
8.5.1	城市地震次生火灾仿真	157
8.5.2	地震次生火灾扑救过程划分及统计参数	158
第九章	区域电力系统抗震可靠性分析	160
9.1	区域电力系统及其地震灾害	160
9.2	高压电气设备抗震可靠性分析	162
9.2.1	计算模型	162
9.2.2	具有柔性节点的有限元方法	162
9.2.3	抗震可靠性分析步骤	164
9.2.4	分析实例:SW ₆ -220 型少油断路器	164
9.3	高压电气主接线系统抗震可靠性分析	166
9.3.1	变电站电气主接线系统的基本类型	166
9.3.2	电气主接线系统抗震可靠性分析准则	168
9.3.3	电气主接线系统抗震可靠性分析模型	169
9.3.4	高压电气主接线系统分析实例	171
9.4	区域电力网络系统抗震可靠性分析	172
第十章	城市供水系统抗震可靠性分析	175
10.1	城市供水系统及其地震灾害	175

10.2	城市供水管网抗震连通可靠性分析实例	176
10.3	城市供水管网抗震功能可靠性分析实例	178
第十一章	城市交通系统抗震可靠性分析	181
11.1	影响震后交通功能的要素	181
11.2	震后路段通行概率计算模型	181
11.2.1	路段单元的通行概率	182
11.2.2	桥梁的通行概率	183
11.3	城市道路交通系统抗震可靠性分析实例	185
第十二章	城市地震灾场的模拟与控制	190
12.1	引言	190
12.2	城市地震灾场模拟实例	190
12.2.1	供水系统	190
12.2.2	交通系统	191
12.2.3	消防系统	191
12.2.4	通信系统	192
12.3	城市地震灾场系统控制实例	194
12.3.1	第一阶段控制	194
12.3.2	第二阶段控制	196
12.3.3	第三阶段控制	196
12.3.4	第四阶段控制	197
附录	布尔代数基本知识	199
参考文献		203

Contents

Preface

Chapter 1 Introduction	1
1.1 The district and urban lifeline engineering systems	1
1.2 Earthquake disaster and lifeline engineering	2
1.2.1 Mexico earthquake in 1985 ($M_L=7.8$)	3
1.2.2 Loma Prieta earthquake in America in 1989 ($M_L=7.2$)	3
1.2.3 Northridge earthquake in America in 1994 ($M_L=6.8$)	3
1.2.4 Kobe earthquake in Japan in 1995 ($M_L=7.2$)	3
1.2.5 Chichi earthquake in Taiwan China in 1999 ($M_L=7.3$)	4
1.3 Key problems in researches on lifeline earthquake engineering	4
1.3.1 Hazard and space distribution of disaster action	4
1.3.2 Earthquake response mechanism of lifeline engineering structures	4
1.3.3 Seismic reliability evaluation of lifeline engineering structures	5
1.3.4 Seismic reliability evaluation of large scale lifeline engineering networks	5
1.3.5 Health monitoring and performance evaluation of lifeline engineering	6
1.3.6 Disaster response and simulation-based control of combined lifeline engineering systems	6
1.4 Contents of the monograph	6
Chapter 2 The Fundament of Seismic Hazard Analysis	8
2.1 Introduction	8
2.2 The uncertain factors and their descriptions	8
2.2.1 Randomness of time of the earthquake; the probabilistic model for earthquake occurrence	9
2.2.2 Uncertainty of location of the earthquake; determination of the potential earthquake source region	10
2.2.3 Randomness of magnitude of the earthquake; the probability distribution function of the earthquake magnitude	11
2.2.4 Simplification of the uncertainty in propagation of the ground motion; attenuation relationship of the ground motion	13
2.3 The seismic hazard analysis method	14
2.3.1 The point source model	14
2.3.2 The line source model	15

2.3.3	The surface source model	16
2.3.4	The exceedance probability and the probability distribution function of the ground motion	17
2.4	History and notes on seismic hazard analysis methods	18
Chapter 3	The Ground Motion Analysis of Sites	20
3.1	Introduction	20
3.2	The one-dimensional wave theory for the ground motion analysis	20
3.2.1	The wave equation and its solution	21
3.2.2	Determination of the undetermined parameters	22
3.2.3	The transfer function in the frequency domain	23
3.2.4	Synthesis of the response quantity	24
3.3	The two-dimensional wave numerical simulation of the ground motions	25
3.3.1	The FEM dynamic equation of wave propagation	25
3.3.2	The artificial boundary conditions	30
3.3.3	Realization of the two-dimensional wave numerical simulation	34
3.4	The stochastic wave analysis of engineering sites	37
3.4.1	The spectral properties of the input ground motion	37
3.4.2	The pseudal-excitation method in the random vibration theory	39
3.4.3	The numerical analysis of random ground motion field	40
3.4.4	Case studies	42
3.5	Analysis of the random ground motion field	44
3.5.1	The expanded order system method for stochastic structural analysis	44
3.5.2	The wave analysis of engineering sites with random media	46
3.5.3	Case studies	49
Chapter 4	Seismic Performance Evaluation of the Underground Pipelines	51
4.1	Earthquake damages of the underground pipelines	51
4.1.1	Earthquake damages of the underground pipelines	51
4.1.2	Failure patterns of the underground pipelines	52
4.1.3	Factors influencing failure of the underground pipelines	52
4.2	Seismic response analysis of the underground pipelines	54
4.2.1	The static analysis method	54
4.2.2	Simplified algorithm I : earthquake wave input	55

4.2.3	Simplified algorithm II: Sine wave input	57
4.3	Seismic reliability evaluation of the underground pipelines	59
4.3.1	Deformation of joints of the pipelines	59
4.3.2	Seismic reliability evaluation of the underground pipelines based on two-state failure criterion	60
4.3.3	A note on the seismic reliability evaluation of the underground pipelines considering multi-state failure criterion	62
4.4	The empirical statistics of earthquake damage rate of the under- ground pipelines	63
Chapter 5	Seismic Analysis of Engineering Structures	67
5.1	Structural analysis models	67
5.1.1	The general finite element models	67
5.1.2	Seismic response analysis model for the structure-equipment system	69
5.1.3	Structural dynamic analysis model with multi-support earthquake excitation	71
5.2	Deterministic structural seismic response analysis	73
5.2.1	The linear acceleration method	73
5.2.2	The generalized method	76
5.3	Seismic response analysis of stochastic structures	78
5.3.1	The principle of preservation of probability	78
5.3.2	The probability density evolution equation for seismic response analysis of stochastic structures	81
5.3.3	Numerical solving algorithm for the probability density evolution method	83
5.4	The design response spectra based seismic reliability evaluation of structures	87
5.4.1	Structures under uniform excitation	87
5.4.2	Structures under multi-support earthquake excitations	90
Chapter 6	Seismic Reliability Evaluation of Engineering Networks (I): The Connectivity Reliability	96
6.1	Introduction	96
6.2	The fundament of system reliability analysis	97
6.2.1	Some elementary concepts in the graph theory	97
6.2.2	The structure function of a system and the reliability of simple systems	100

6.3	The traditional shortest path method	102
6.3.1	The adjacency matrix method	103
6.3.2	Depth-first search and the P. M. Lin method	104
6.3.3	Reliability evaluation of networks and its computational complexity	105
6.4	The disjoint shortest path method	106
6.5	The recursive decomposition algorithm for connectivity reliability evaluation of large networks	109
6.5.1	The breath-first search method	109
6.5.2	The recursive decomposition algorithm for evaluation of edge-weighted network systems	109
6.5.3	Evaluation of node-weighted network systems	114
6.5.4	The multi-source-multi-terminal systems	115
6.6	Reliability evaluation of networks with correlated failure	116
6.7	The Monte Carlo simulation for reliability evaluation of networks	117
Chapter 7 Seismic Reliability Evaluation of Engineering Networks (II):		
	The Functional Reliability	119
7.1	Introduction	119
7.2	The fundament of functional analysis of water supply pipeline networks	119
7.3	Functional analysis of pipelines with leakage after earthquake	121
7.4	Seismic functional reliability evaluation of water supply networks	124
7.4.1	The first-order second-moment method	125
7.4.2	The checking-point method	127
7.5	Function-based optimal design of engineering networks	130
7.5.1	Selection of the parameters for optimization	130
7.5.2	Description of optimization of the water supply networks	131
7.5.3	The gene algorithm for optimization of the networks	131
7.5.4	The seismic functional reliability based topologic optimization of the water-supply networks	137
Chapter 8 The Compound Lifeline Engineering Systems		
8.1	The compound lifeline engineering systems and the state-of- the-art researches	141

8.2	The disaster response simulation of compound lifeline engineering systems	143
8.2.1	Principles of simulation of the discrete event dynamic systems	143
8.2.2	Simulation of the compound lifeline engineering systems	145
8.2.3	The time-field domain simulation model for comprehensive disaster response of the compound lifeline engineering systems	146
8.2.4	Simulation convergence and simulation statistics	146
8.3	The Petri-net modeling of the compound lifeline engineering systems	148
8.3.1	The classic Petri-net	148
8.3.2	The non-auto colored Petri-net	150
8.3.3	Seismic disaster response simulation of the compound lifeline engineering systems	151
8.4	System control of the urban earthquake disaster field	153
8.4.1	The control based on analysis of structural behavior of systems	153
8.4.2	The system control based on investment behavior	155
8.5	Analysis of the urban post-earthquake fire	157
8.5.1	Simulation of the urban post-earthquake fire	157
8.5.2	Analysis of the post-earthquake fire fighting process	158
Chapter 9	Seismic Reliability Evaluation of District Electric Power Systems	160
9.1	The district electric power system and the earthquake damages	160
9.2	Seismic reliability evaluation of high-voltage electric equipment	162
9.2.1	Analysis models	162
9.2.2	The finite element method with semi-rigid connections	162
9.2.3	Procedures for seismic reliability evaluation	164
9.2.4	Analysis examples; the SW6-220 oil-minimum circuit breaker	164
9.3	Seismic reliability evaluation of the high-voltage electric main wirings	166
9.3.1	Basic types of transformer substation	166
9.3.2	The criterion for seismic reliability evaluation	168
9.3.3	The model for seismic reliability evaluation	169
9.3.4	Analysis example	171
9.4	Seismic reliability evaluation of the district electric power system	172

Chapter 10 Seismic Reliability Analysis of the Urban Water Supply Systems 175

10.1 The urban water supply system and the earthquake damages 175

10.2 Case study on seismic connectivity reliability evaluation 176

10.3 Case study on seismic functional reliability evaluation 178

Chapter 11 Seismic Reliability of the Urban Transportation System 181

11.1 The factors influencing post-earthquake functions of the transportation system 181

11.2 Analysis model for post-earthquake passing probability of the road segments 181

11.2.1 Passing probability of the road segment element 182

11.2.2 Passing probability of the bridges 183

11.3 Analysis example of seismic reliability evaluation of the transportation system 185

Chapter 12 Simulation and Control of the Urban Earthquake Disaster Field 190

12.1 Introduction 190

12.2 Case study on simulation of the urban earthquake disaster field 190

12.2.1 Water supply systems 190

12.2.2 Transportation systems 191

12.2.3 Firefighting systems 191

12.2.4 Communication systems 192

12.3 Case study on system control of the urban earthquake disaster field 194

12.3.1 The control at the first stage 194

12.3.2 The control at the second stage 196

12.3.3 The control at the third stage 196

12.3.4 The control at the fourth stage 197

Appendix Elementary Boolean Algebra 199

References 203

第一章 绪 论

1.1 区域与城市生命线工程系统

电力系统、交通系统、通信系统、城市供水、供热、供燃气系统……在现代社会中,这些工程系统与人们的生活息息相关,因之被形象地统称为生命线工程系统。若作进一步地阐述,生命线工程系统可以被定义为维系现代城市功能与区域经济技术功能的基础性工程设施系统。

生命线工程系统具有共性的基本特征之一是它们大多以一种网络系统的形式存在,且在空间上覆盖一个很大的区域范围,如高压输电网络、区域交通网络、城市供水管网等等。网络系统的功能不仅与组成系统的各个单元的功能密切相关,而且与各个单元之间的联系方式(主要表现为网络拓扑特征)密切相关。这种共性特征使得对于生命线工程的考察与分析必须借助于系统分析的手段进行。

生命线工程系统的第二个显著特征是各类生命线系统都是由一批工程结构构成的,工程结构是生命线工程系统的客观载体。例如:在电力系统中,存在电厂主厂房、高压输电塔、各类变电站建筑等等,即使是高压输电设备(如各类电容互感器、绝缘子、断路器等),也可以视为是一类工程结构;在城市供水系统中,存在供水泵房、水处理水池、输水管线等各类工程设施;其他如交通系统中的道路与桥梁、通信系统中的枢纽建筑与通信设备,无一不具有工程结构的基本特征。生命线工程系统中的结构可以统称为生命线工程结构,其抗灾性能、健康状态、耐久性等是决定生命线工程系统能否良好地发挥功能的重要因素。

生命线工程系统的第三个显著特征是不同类型的生命线工程系统在功能上往往具有耦联性,如电力系统运行状态的良好与否可以影响到城市供水系统正常功能的发挥,交通系统、输油系统功能是否正常可能影响到电力系统的运行状态等。在强烈灾害发生时(如强烈地震、台风灾害等),这种耦联作用甚至更加显著和广泛。当把不同生命线工程系统放在一起,作为一个大系统考察其中的相互影响与总体特征时,可以称之为复合生命线工程系统。

当然,从其他不同的角度考察,也可以发现生命线工程系统所具有的其他共性特征。本书主要从结构工程角度着眼,将生命线系统作为一类工程结构系统加以考察。因此,生命线系统所具有的其他特征就不再一一列举了。

从结构工程角度对生命线系统的灾害响应加以系统研究,起源于 20 世纪 70 年代中期。1971 年,美国圣费尔南多地震使旧金山市的基础工程设施遭到重创,地