矿井防尘供水管网可靠性分析与优化

王　佩◎著

RELIABILITY ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF DUSTPROOF WATER SUPPLY NETWORK IN MINE

北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

需要全本请访问 www.ertongbook.com

矿井防尘供水管网可靠性分析与优化

王佩　著

北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书是基于作者多年研究成果基础上撰写而成，围绕矿井防尘供水管网的可靠性和优化展开讨论。开篇介绍系统可靠性的一些基本原理和供水管网可靠性的发展历程。主要章节先分析矿井防尘供水管网的机械可靠性和水力可靠性，对现有的管网提出可靠度评价模型。进一步通过分析供水压力和用水量的变化，预测未来一段时间水压和水量的变化，从而采取切实有效的手段提高管网的可靠性。最后改进现有的管路，采取有效的优化方法，保证可靠性的基础上，降低管网的经济费用，并且通过自主编写的水力计算软件来实现管网水力计算和优化的仿真模拟。

本书可供市政工程、安全工程、环境工程和系统工程等专业的科研工作者交流讨论，也可作为相关专业的本科生和研究生教材使用。

版权专有　侵权必究

图书在版编目（CIP）数据

矿井防尘供水管网可靠性分析与优化 / 王佩著. --
北京 : 北京理工大学出版社, 2022.2
ISBN 978-7-5763-1072-6

Ⅰ. ①矿… Ⅱ. ①王… Ⅲ. ①矿井—除尘—给水管道—管网—可靠性—研究 Ⅳ. ①TD714

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2022）第 030960 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司
社　　址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号
邮　　编 / 100081
电　　话 / （010）68914775（总编室）
　　（010）82562903（教材售后服务热线）
　　（010）68944723（其他图书服务热线）
网　　址 / http://www.bitpress.com.cn
经　　销 / 全国各地新华书店
印　　刷 /
开　　本 / 710 毫米 ×1000 毫米　1/16
印　　张 / 13.75
彩　　插 / 2　　责任编辑 / 张鑫星
字　　数 / 244 千字　　文案编辑 / 张鑫星
版　　次 / 2022 年 2 月第 1 版　2022 年 2 月第 1 次印刷　　责任校对 / 周瑞红
定　　价 / 78.00 元　　责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题，请拨打售后服务热线，本社负责调换

前　言

矿产资源是人类赖以生存的生活基础，我国也是矿产资源的最大消费国，随着对矿产资源需求的急剧增加，矿山采掘工作也在不断进行，矿山井下供水管网是矿山日常采掘工作的重要保证。根据《煤矿安全规程》和《金属非金属矿山安全规程》有关规定，矿山井下必须建立完善的防尘和消防供水系统；2012 年原国家安监总局要求全国矿山建立完善监测监控、人员定位、紧急避险、压风自救、供水施救和通信联络等井下安全避险六大系统，其中供水施救系统作为矿井防尘供水管网的辅助，与其可靠稳定运行有密切关系。

矿采过程中产生的矿井粉尘危害很大，其中主要为尘肺病。尘肺病是我国最严重的职业病，据国家卫健委官方公告，截至 2020 年年底，全国报告职业性尘肺病及其他呼吸疾病 14 408 例，其中职业性尘肺病 14 367 例。预防尘肺病的发生最重要的手段就是靠水除尘。矿井供水管网作为防治井下粉尘危害的重要设施，其管网可靠稳定运行是保证综合防尘设施达到预期防尘效果的重要基础。由于矿井供水管网所处的运行环境比较恶劣，要承受高压、高湿和高腐蚀，供水时间长，管网服务年限也要达到几十年，而管网一旦失效，势必造成极大的经济损失，因此必须提高矿井防尘供水管网的安全性和可靠性。

综上所述，进行矿山井下供水系统动态可靠性研究是很有必要的，同时研制出矿山井下动态仿真模拟系统为保证综合供水设施的高效运行，提高矿井抗灾能力，保障矿井的安全生产，具有重要的理论意义和应用前景。

目前供水管网的可靠性研究大部分围绕市政管网展开，本书借鉴市政供水管网的可靠性分析方法，在矿井防尘供水管网上进行试验。矿井防尘供水管网与市政管网最大的不同是管网呈树状并且以静压供水为主，因此结合矿井供水

管网的实际情况进行模型修正，力求提出矿井防尘供水管网的一套可靠性评价方法和优化手段。本书是通过可靠性分析、相似实验研究、矿井供水管网优化设计系统仿真建模，在满足各用水地点所需水量、水压并兼顾其他设计目标的前提下，追求管网建造和运行总费用的最小值。

全书共8章。第1章绪论；第2章进行矿井供水管网机械可靠性分析；第3~4章进行矿井供水管网水力可靠性分析；第5~6章分别从供水压力和用水量两方面进行预测，构建预测模型，提升未来一段时间供水管网的可靠性；第7~8章建立矿井供水管网可靠性评价及优化仿真模拟系统，并进行实例应用从而验证系统的有效性。

本书是作者在多年来完成博士点基金《矿山井下供水管网动态可靠性及系统仿真研究》以及近几年的研究成果的基础上撰写完成。

本书在写作过程中得到了多位同门的帮助。北京科技大学蒋仲安教授对整个书籍的结构和写作做出了很大的贡献。安徽工业大学邓权龙老师对第2章可靠性研究提供了新的方法、北京科技大学05级博士侯晓东对第6章和第8章提供了丰富的资料和案例、北京科技大学11级硕士施蕾蕾对第2~5章均全程参与撰写和实验，还有首都经济贸易大学的王洁教授对书稿进行了很多审核工作，在此一并表示感谢。

由于作者水平有限，时间紧迫，错误实属难免，恳请读者批评指正。如有疑问，欢迎来信交流：wangpei@cueb.edu.cn。

著　者

需要全本请访问 www.ertongbook.com

彩　插

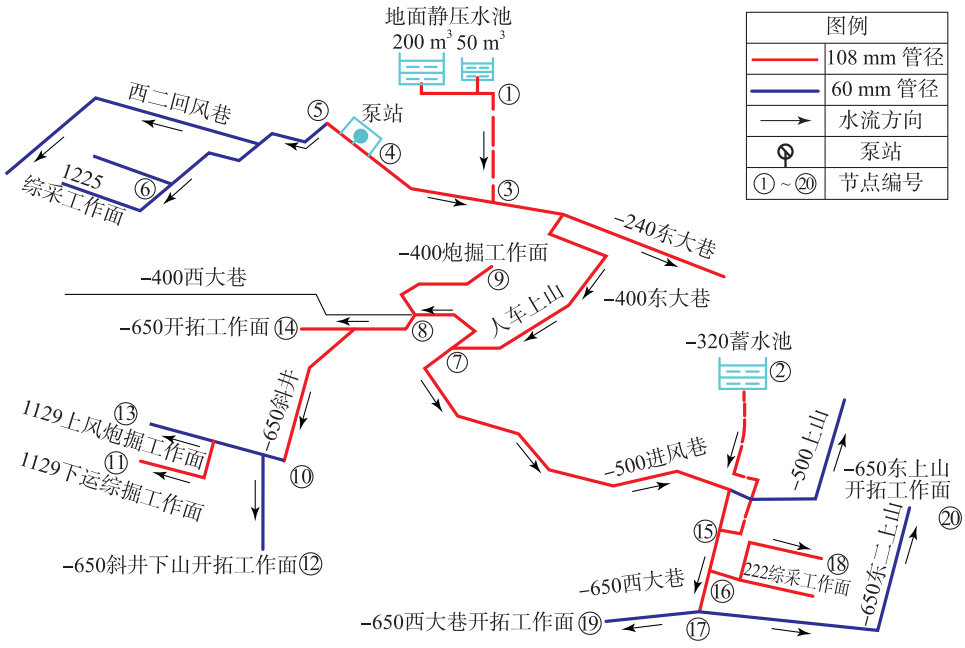
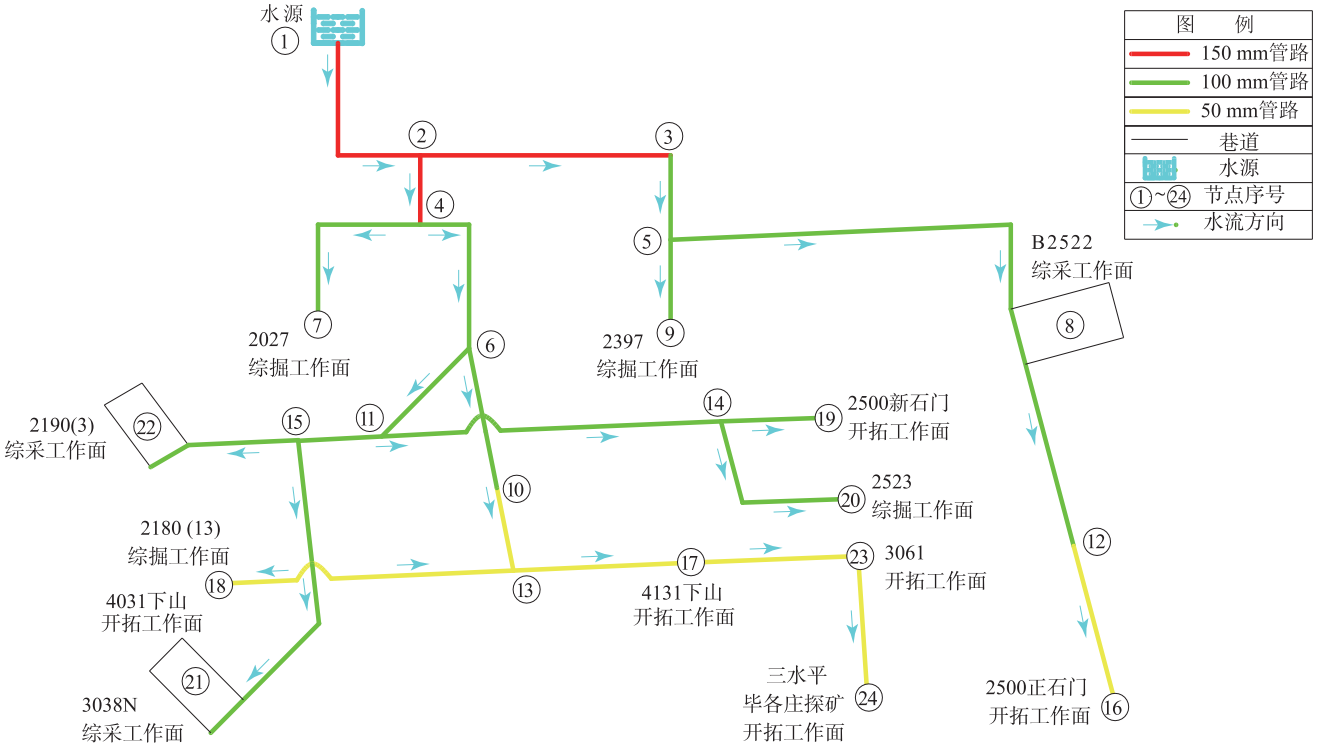


图 2－4　A 仓矿供水管网系统简化图



① 井下水池	⑧ B2522综采工作面	⑯ 2500正石门	⑱ 4031下山	⑳ 2523综掘工作面	㉒ 2190(3)综采工作面	㉔ 三水平毕各庄探矿
⑦ 2027综掘工作面	⑨ 2397综掘工作面	⑰ 4131下山	⑲ 2500新石门	㉑ 3038N综采工作面	㉓ 3061开拓工作面	

图 4-4　B矿防尘管网原始简化图

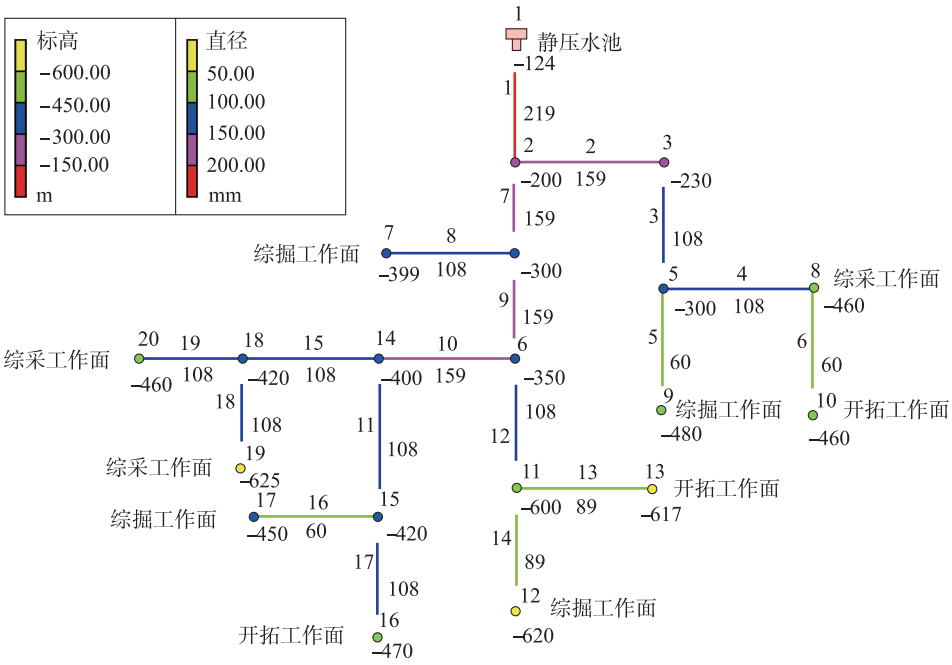


图 4－5　EPANETH 建立管网模型

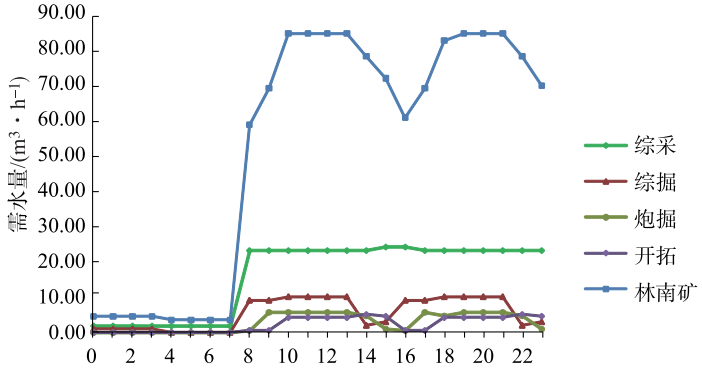


图 5－6　A 仓矿井下一天用水量情况

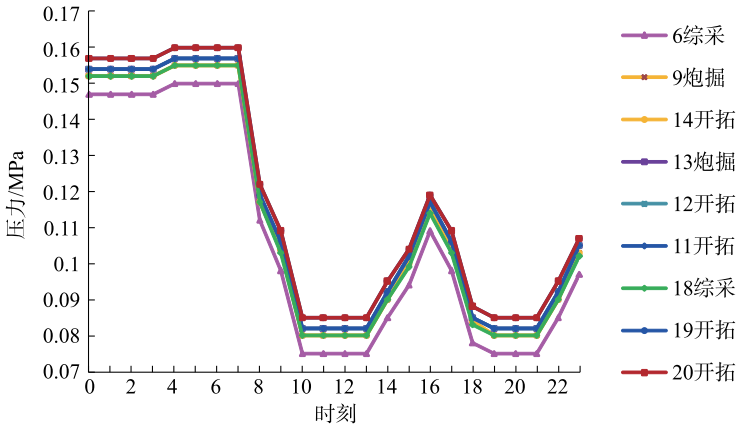


图 5－7　模型管网用水点 24 h 压力变化曲线

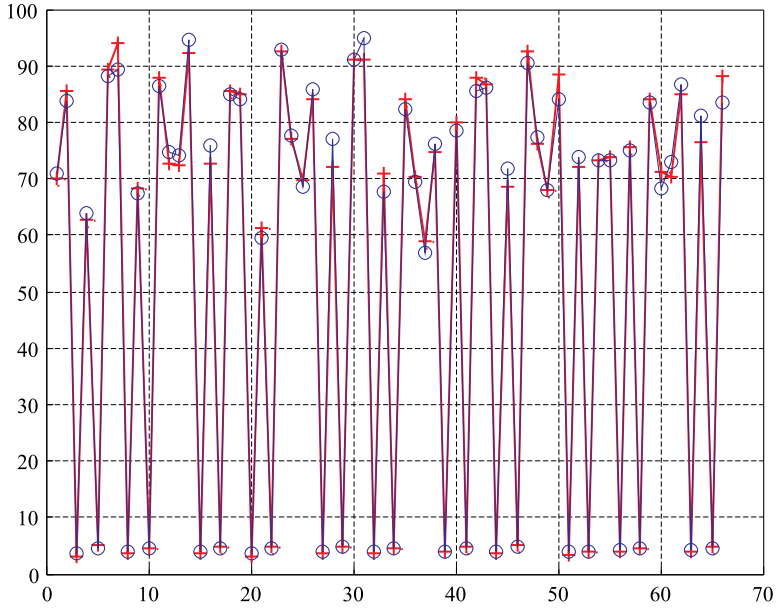


图 6－18　PSO-BP 模型测试样本的实际结果与目标结果拟合效果

目　录

第 1 章　绪论 …… 001

1.1　系统可靠性分析基础 …… 002
1.1.1　系统可靠度研究方法 …… 002
1.1.2　可靠度基本原理 …… 003
1.1.3　可修复系统的可靠度 …… 006
1.2　供水管网可靠性发展历程 …… 007
1.3　小结 …… 009

第 2 章　矿井防尘供水管网机械可靠性分析 …… 011

2.1　矿井防尘供水管网故障分析 …… 013
2.1.1　管网故障类型 …… 013
2.1.2　管网故障主要原因 …… 014
2.1.3　管网故障相关参数 …… 014
2.2　评价指标体系的建立 …… 016
2.2.1　选取评价指标的原则 …… 016
2.2.2　建立指标体系的程序 …… 017
2.2.3　评价指标的确定 …… 018
2.3　评价指标分析及量化 …… 018
2.3.1　管道属性 …… 018
2.3.2　水力因素 …… 020
2.3.3　水质因素 …… 020

2.3.4 外部因素 …… 022
2.3.5 管理因素 …… 022
2.4 评价指标权重的分配 …… 023
2.4.1 指标权重的概念 …… 023
2.4.2 确定指标权重的原则 …… 024
2.4.3 指标权重的确定方法 …… 025
2.4.4 指标权重的计算 …… 028
2.5 评价指标隶属函数的确定 …… 032
2.5.1 确定隶属函数的原则 …… 032
2.5.2 确定隶属函数的一般方法 …… 033
2.5.3 评价指标隶属函数的选取 …… 034
2.5.4 评价指标隶属函数的确定 …… 035
2.6 评价指标多层次模糊综合评价 …… 038
2.6.1 二级模糊综合评价 …… 038
2.6.2 一级模糊综合评价 …… 039
2.7 基于模糊综合评价法的矿井防尘供水管网机械可靠性评价 …… 039
2.7.1 工程实例概况 …… 039
2.7.2 基于模糊综合评价法的机械可靠性评价 …… 041
2.8 基于未确知测度理论的矿井防尘供水管网可靠度预测 …… 043
2.8.1 未确知测度理论 …… 044
2.8.2 求解步骤 …… 046
2.8.3 实例应用 …… 048

第3章 矿井防尘供水管网水力仿真分析模型研究 …… 051

3.1 矿井防尘供水管网水力分析理论基础 …… 052
3.1.1 管网分析计算基础方程 …… 052
3.1.2 管网水头损失计算 …… 053
3.2 矿井防尘供水管网水力仿真分析方法 …… 055
3.2.1 管段方程法 …… 057
3.2.2 节点方程法 …… 057
3.2.3 环方程法 …… 059
3.3 矿井防尘供水管网水力仿真分析模型建立 …… 060
3.3.1 基于混合节点－环方程法的矿井防尘供水管网水力分析模型 …… 061

需要全本请访问 www.ertongbook.com

3.3.2 矿井防尘供水管网水力仿真建模所需信息 …… 063
3.3.3 矿井防尘供水管网水力分析模型准确度的影响因素 … 065

第 4 章 矿井防尘供水管网水力可靠性分析 …… 067

4.1 矿井供水管网水力可靠性定义 …… 068
4.2 水力可靠性评价模型的建立 …… 069
4.2.1 水力模拟的约束条件 …… 069
4.2.2 节点可用水量 …… 071
4.2.3 节点水力可靠度 …… 072
4.2.4 节点概率可靠度 …… 073
4.2.5 管网可靠度 …… 073
4.3 拟蒙特卡罗法 …… 074
4.3.1 原理 …… 074
4.3.2 误差估计和收敛速度 …… 074
4.3.3 低偏差序列 …… 075
4.3.4 拟蒙特卡罗法求解流程 …… 078
4.4 实例应用一 …… 079
4.4.1 EPANETH 管网模型建立 …… 079
4.4.2 拟蒙特卡罗法预处理 …… 081
4.4.3 拟蒙特卡罗法求解 …… 083
4.5 实例应用二 …… 086
4.5.1 EPANETH 管网模型建立 …… 086
4.5.2 拟蒙特卡罗法模拟 …… 088
4.6 影响可靠性的原因分析 …… 090

第 5 章 矿井防尘供水管网水力可靠性相似实验研究 …… 093

5.1 概述 …… 095
5.1.1 供水管网物理模型构建理论研究现状 …… 095
5.1.2 供水管网物理模型试验研究现状 …… 096
5.2 矿井防尘供水管网相似实验模型构建理论 …… 097
5.2.1 模型构建基本方程 …… 097
5.2.2 管段相似的基本理论 …… 098
5.2.3 动力相似准则数 …… 100
5.2.4 管流变态相似理论 …… 104

5.3 实验室模型管网的构建 …… 106
5.3.1 实验室模型变态相似数的确定 …… 106
5.3.2 管网相似模型的验证 …… 109
5.3.3 实验室管网的构建 …… 113
5.4 模型管网压力分布规律实验研究 …… 114
5.4.1 实验准备 …… 114
5.4.2 模型管网压力分布规律实验研究 …… 116
5.4.3 实验结果验证 …… 122

第6章 矿井防尘供水管网用水量预测 …… 129

6.1 用水量预测模型分析 …… 131
6.2 基于时间序列分析法的防尘管网用水量预测 …… 133
6.2.1 时间序列分析法 …… 133
6.2.2 模型建立 …… 134
6.2.3 实例应用 …… 137
6.3 基于神经网络法的防尘管网用水量预测 …… 143
6.3.1 BP 神经网络 …… 143
6.3.2 粒子群优化算法 …… 147
6.3.3 PSO – BP 算法 …… 150
6.3.4 基于 PSO – BP 的用水量预测模型的构建 …… 151
6.3.5 实例应用 …… 155

第7章 矿井防尘供水管网优化设计 …… 161

7.1 常用优化算法简介 …… 163
7.1.1 模拟退火算法 …… 163
7.1.2 人工神经网络 …… 164
7.1.3 混合蛙跳算法 …… 164
7.1.4 遗传算法 …… 165
7.2 矿井防尘供水管网优化设计目标 …… 167
7.2.1 管网优化设计原则 …… 167
7.2.2 管网优化设计目标 …… 169
7.3 矿井防尘供水管网优化设计模型的建立 …… 170
7.3.1 目标函数 …… 170
7.3.2 约束条件 …… 172

7.4 矿井供水管网目标函数的求解 …… 174

第8章 矿井供水管网可靠性评价及优化仿真模拟系统开发及应用 …… 179

8.1 系统组成及特点 …… 181
8.2 系统设计与实现 …… 182
8.2.1 主界面 …… 183
8.2.2 管网建模与水力计算模块 …… 184
8.2.3 机械可靠度评价模块 …… 188
8.2.4 水力可靠度评价模块 …… 189
8.2.5 管网优化计算模块 …… 190
8.3 实例应用一 …… 193
8.3.1 管网现状 …… 193
8.3.2 管网优化设计方案 …… 194
8.4 实例应用二 …… 198
8.4.1 防尘用水量计算 …… 198
8.4.2 优化模型求解参数设置 …… 201
8.4.3 防尘管网优化设计方案 …… 201

参考文献 …… 204

第 1 章　绪　　论

|1.1 系统可靠性分析基础|

系统可靠性表示系统在规定条件下和规定时间内完成规定功能的能力。系统可靠性是一个定性指标，很难用一个特征量表示，而且它还具有随机性。因此进行系统的可靠性分析，需要进行定量分析。系统在规定条件下和规定时间内，完成规定功能的概率称为可靠度，是一个定量指标。由于系统是由一系列具有某种特定功能的基本组件组成的，系统可靠度理论主要是确定系统可靠度与组件可靠度之间的关系，要研究系统可靠度首先要明确系统中各组件可靠度以及在运行过程中它们之间的相互关系。

1.1.1 系统可靠度研究方法

研究系统可靠度的数学方法，包括解析法（状态空间模型、故障树分析法）和模拟法（又称 Monte Carlo 法）等。这几种方法各有不同特点：

1. 状态空间模型

状态空间模型又称马尔可夫模型，是估算系统可靠度时所采用较为广泛的方法。对于不可修复系统，可求出系统的可靠度（或不可靠度）；对于可修复系统，可求出系统的可用度（或不可用度）以及其他特征量。马尔可夫模型可以描述系统状态转移的过程。状态空间法不仅能计算双状态独立元件系统的

可靠度，还能计算多状态非独立元件系统的可靠度，除故障（或正常）概率的稳定值外，还可求得系统故障频率、持续时间和暂态概率等系统可靠度指标，具有较大的灵活性。

2. 故障树分析法

故障树分析法即为 FTA，是一种特殊的树状逻辑因果关系图，是近些年发展起来的用于大型复杂系统可靠度和安全性分析的一种工具。故障树是顶点和边的集合，由顶点与边连起来而不包含闭合回路。带有方向的边发源于顶点而形成树，所以故障树也称逻辑树。故障树分析法的优点是提供了一种系统的方法来阐明各元件和子系统发生故障的因果关系，迅速发现系统中最重要的故障和薄弱环节，为改善与评估系统的可靠度提供了定性与定量的根据。当分析复杂系统故障时，这种方法特别有利于发现用其他方法不能鉴别出的故障组合。对于不易找到或不可能找到逻辑图的系统，故障树分析法将是一种很有用的方法。它可用于可修复与不可修复系统稳定的故障概率计算。

3. 模拟法（Monte Carlo 法）

模拟法（Monte Carlo 法）是按照一定的步骤，在计算机上模拟随机出现的各种系统状态，即用数值计算方法模拟一个实际的过程，并从大量的模拟实验结果中统计出系统的可靠度数值。它是使用随机数量来模拟数学与物理问题，以求其近似解的一种通用方法。模拟法的应用范围较广，而在某些情况下，模拟法是唯一可用的方法。随着计算机技术的发展，此法近年来应用极广。

1.1.2 可靠度基本原理

1. 可靠度基本函数

可靠度研究发源于对机械、电子元器件产品的可靠度研究，随着各种工业系统复杂程度的增加，可靠性理论作为系统工程的一个重要部分，几乎已在所有工业系统中得到广泛应用。

本章开头曾经介绍过可靠性的定义，即指产品在规定条件下和规定时间内，完成规定功能的能力。产品不能完成规定功能，称为故障（或失效）。可靠度一般用概率表示，也可根据实际需要，用平均无故障时间或平均无故障率来表示。对于供水管网，可靠度一般采用概率表示。

1）可靠度

指产品在规定条件下和规定时间内，完成规定功能的概率。因此可知，产