



“十三五”国家重点出版物
出版规划项目



复杂系统 弹性建模与评估

李瑞莹 杜时佳 康锐 著



化学工业出版社

非外借



“十三五”国家重点出版物
出版规划项目



复杂系统 弹性建模与评估

李瑞莹 杜时佳 康锐 著



化学工业出版社

·北京·

本书聚焦复杂系统的弹性建模与评估方法,第1章总结评述了关于系统弹性研究的大量已有成果;第2~3章论述了系统弹性模型,包括基于性能函数的系统弹性模型、基于聚合随机过程的多态系统弹性建模;第4~7章论述了系统弹性分析与评估方法,包括面向弹性的部件重要性分析、基于蒙特卡罗的系统弹性评估、扰动识别与系统弹性测评、复杂网络系统弹性规律研究。

本书适合控制科学与工程方向的研究人员和工程技术人员阅读,也适于高校相关专业硕士、博士研究生学习。

图书在版编目(CIP)数据

复杂系统弹性建模与评估/李瑞莹,杜时佳,康锐著.—北京:
化学工业出版社,2019.2

“中国制造2025”出版工程

ISBN 978-7-122-33625-5

I. ①复… II. ①李…②杜…③康… III. ①计算机系统-系统
建模-研究 IV. ①TP303

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第003798号

责任编辑:宋辉

文字编辑:陈喆

责任校对:杜杏然

装帧设计:尹琳琳

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装:三河市延风印装有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张11¼ 字数207千字 2019年6月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888

售后服务:010-64518899

网址:<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:58.00元

版权所有 违者必究

科学是永无止境的，它是一个永恒之谜。

—— 爱因斯坦



“中国制造2025”
出版工程

《“中国制造 2025”出版工程》

编委会

主任

孙优贤（院士）

副主任（按姓氏笔画排序）

王天然（院士） 杨华勇（院士） 吴澄（院士）

陈纯（院士） 陈杰（院士） 郑南宁（院士）

桂卫华（院士） 钱锋（院士） 管晓宏（院士）

委员（按姓氏笔画排序）

马正先 王大珩 王天然 王荣明 王耀南 田彦涛

巩水利 乔非 任春年 伊廷锋 刘敏 刘延俊

刘会聪 刘利军 孙长银 孙优贤 杜宇雷 巫英才

李莉 李慧 李少远 李亚江 李嘉宁 杨卫民

杨华勇 吴飞 吴澄 吴伟国 宋浩 张平

张晶 张从鹏 张玉茹 张永德 张进生 陈为

陈刚 陈纯 陈杰 陈万米 陈长军 陈华钧

陈兵旗 陈茂爱 陈继文 陈增强 罗映 罗学科

郑南宁 房立金 赵春晖 胡昌华 胡福文 姜金刚

费燕琼 贺威 桂卫华 柴毅 钱锋 徐继宁

郭彤颖 曹巨江 康锐 梁桥康 焦志伟 曾宪武

谢颖 谢胜利 蔡登 管晓宏 魏青松

序

制造业是国民经济的主体，是立国之本、兴国之器、强国之基。近十年来，我国制造业持续快速发展，综合实力不断增强，国际地位得到大幅提升，已成为世界制造业规模最大的国家。但我国仍处于工业化进程中，大而不强的问题突出，与先进国家相比还有较大差距。为解决制造业大而不强、自主创新能力弱、关键核心技术与高端装备对外依存度高等制约我国发展的问题，国务院于2015年5月8日发布了“中国制造2025”国家规划。随后，工信部发布了“中国制造2025”规划，提出了我国制造业“三步走”的强国发展战略及2025年的奋斗目标、指导方针和战略路线，制定了九大战略任务、十大重点发展领域。2016年8月19日，工信部、国家发展改革委、科技部、财政部四部委联合发布了“中国制造2025”制造业创新中心、工业强基、绿色制造、智能制造和高端装备创新五大工程实施指南。

为了响应党中央、国务院做出的建设制造强国的重大战略部署，各地政府、企业、科研部门都在进行积极的探索和部署。加快推动新一代信息技术与制造技术融合发展，推动我国制造模式从“中国制造”向“中国智造”转变，加快实现我国制造业由大变强，正成为我们新的历史使命。当前，信息革命进程持续快速演进，物联网、云计算、大数据、人工智能等技术广泛渗透于经济社会各个领域，信息经济繁荣程度成为国家实力的重要标志。增材制造（3D打印）、机器人与智能制造、控制和信息化技术、人工智能等领域技术不断取得重大突破，推动传统工业体系分化变革，并将重塑制造业国际分工格局。制造技术与互联网等信息技术融合发展，成为新一轮科技革命和产业变革的重大趋势和主要特征。在这种中国制造业大发展、大变革背景之下，化学工业出版社主动顺应技术和产业发展趋势，组织出版《“中国制造2025”出版工程》丛书可谓勇于引领、恰逢其时。

《“中国制造2025”出版工程》丛书是紧紧围绕国务院发布的实施制造强国战略的第一个十年的行动纲领——“中国制造2025”的一套高水平、原创性强的学术专著。丛书立足智能制造及装备、控制及信息技术两大领域，涵盖了物联网、大数

据、3D 打印、机器人、智能装备、工业网络安全、知识自动化、人工智能等一系列的核心技术。丛书的选题策划紧密结合“中国制造 2025”规划及 11 个配套实施指南、行动计划或专项规划，每个分册针对各个领域的一些核心技术组织内容，集中体现了国内制造业领域的技术发展成果，旨在加强先进技术的研发、推广和应用，为“中国制造 2025”行动纲领的落地生根提供了有针对性的方向引导和系统性的技术参考。

这套书集中体现以下几大特点：

首先，丛书内容都力求原创，以网络化、智能化技术为核心，汇集了许多前沿科技，反映了国内外最新的一些技术成果，尤其使国内的相关原创性科技成果得到了体现。这些图书中，包含了获得国家与省部级诸多科技奖励的许多新技术，因此，图书的出版对新技术的推广应用很有帮助！这些内容不仅为技术人员解决实际问题，也为研究提供新方向、拓展新思路。

其次，丛书各分册在介绍相应专业领域的新技术、新理论和新方法的同时，优先介绍有应用前景的新技术及其推广应用的范例，以促进优秀科研成果向产业的转化。

丛书由我国控制工程专家孙优贤院士牵头并担任编委会主任，吴澄、王天然、郑南宁等多位院士参与策划组织工作，众多长江学者、杰青、优青等中青年学者参与具体的编写工作，具有较高的学术水平与编写质量。

相信本套丛书的出版对推动“中国制造 2025”国家重要战略规划的实施具有积极的意义，可以有效促进我国智能制造技术的研发和创新，推动装备制造业的技术转型和升级，提高产品的设计能力和技术水平，从而多角度地提升中国制造业的核心竞争力。

中国工程院院士

潘雲鶴

前言

在可靠性研究的初期，常常把系统简化为“正常”和“故障”两种状态（即系统“二态性”），并在此基础上开展可靠性建模、设计、分析、评估的理论和研究方法研究。随着研究的不断深入，人们发现复杂系统在“正常”和“故障”两种状态之间还存在 $1\sim n$ 种性能降级状态，“多态系统”的概念随之被提出。这种离散多态系统的抽象，很大程度上扩展了可靠性研究范围。然而，还有很多系统具有连续多态性，例如网络的流量、连续控制系统的输出等。这一类系统仅仅靠现有的可靠性理论难以全面刻画系统的整体特性。

系统弹性，关注系统对扰动的承受和恢复能力，其度量的基础是系统性能在扰动前后的变化，尤其适用于连续多态系统。因此从最初接触“弹性”这一概念开始，我们就认为它是系统可靠性概念在性能维度上的延展。我们的兴趣油然而生：系统弹性有什么表现规律？系统弹性由何而来？如何从解析、仿真、试验的角度实现对系统的弹性评估？等等。在这些问题的牵引下，我们从2013年起开始开展系统弹性的研究工作，在国家自然科学基金项目和企业合作项目支持下取得了一些成果。

本书聚焦复杂系统的弹性建模与评估方法，第1章总结评述了关于系统弹性研究的大量已有成果；第2~3章论述了系统弹性模型，包括基于性能函数的系统弹性模型、基于聚合随机过程的多态系统弹性建模；第4~7章论述了系统弹性分析与评估方法，包括面向弹性的部件重要性分析、基于蒙特卡罗的系统弹性评估、扰动识别与系统弹性测评、复杂网络系统弹性规律研究。本书的主要内容来源于国家自然科学基金项目61773044“弹性建模与分析：从部件到系统”和71601010“基于聚合随机过程的多状态可修系统弹性建模与分析”的研究成果。

本书第1~2章、第5~7章由李瑞莹副教授撰写，第3章由杜时佳博士撰写，第4章由康锐教授撰写，全书由康锐教授策划和统稿。靳崇、张龚博、董强、马文婷等同学为本书的编写提供了帮助。虽然作者在本书撰写过程中尽了最大的努力，但是由于水平有限，不妥之处在所难免，敬请读者不吝指正。

著 者

第1章 概述

- 1.1 弹性的概念与内涵 / 2
- 1.2 弹性的度量 / 4
 - 1.2.1 确定型度量 / 4
 - 1.2.2 概率型度量 / 9
- 1.3 弹性建模与分析 / 11
 - 1.3.1 弹性模型 / 11
 - 1.3.2 弹性分析 / 12
- 参考文献 / 17

第2章 基于性能函数的系统弹性模型

- 2.1 研究背景 / 22
- 2.2 问题描述 / 22
- 2.3 弹性度量 / 24
- 2.4 串联与并联系统的弹性建模与分析 / 25
 - 2.4.1 串联系统弹性建模 / 25
 - 2.4.2 并联系统弹性建模 / 26
 - 2.4.3 串联与并联系统弹性分析 / 27
- 2.5 网络系统弹性分析 / 31
 - 2.5.1 网络系统弹性分析方法 / 31
 - 2.5.2 网络系统弹性分析案例 / 32
- 2.6 应用：分布式发电系统 / 39
- 参考文献 / 42

第3章 基于聚合随机过程的多态系统弹性建模

- 3.1 研究背景 / 45
- 3.2 聚合随机过程及相关理论 / 46
 - 3.2.1 聚合随机过程的起源与发展 / 46
 - 3.2.2 聚合随机过程的本质与研究 / 48
 - 3.2.3 相关概念与理论基础 / 50

- 3.3 一般化多态系统弹性建模与分析 / 52
 - 3.3.1 系统模型与假设 / 52
 - 3.3.2 系统弹性建模与指标推导 / 53
 - 3.3.3 数值算例 / 57
- 3.4 两类具体多态系统弹性建模 / 59
 - 3.4.1 基于负载-容量模型的多态系统弹性分析 / 59
 - 3.4.2 恢复时间可忽略的多态系统弹性分析 / 61
- 参考文献 / 63

第4章 面向弹性的部件重要性分析

- 4.1 研究背景 / 67
- 4.2 弹性度量 / 68
 - 4.2.1 系统弹性极限和塑性行为 / 68
 - 4.2.2 考虑塑性的系统弹性度量 / 70
- 4.3 基于弹性的重要性分析 / 72
 - 4.3.1 重要性指标定义 / 73
 - 4.3.2 重要性分析方法 / 75
- 4.4 案例 / 77
- 参考文献 / 82

第5章 基于蒙特卡罗的系统弹性评估

- 5.1 研究背景 / 85
- 5.2 蒙特卡罗方法简介 / 85
 - 5.2.1 基本思想 / 86
 - 5.2.2 求解过程 / 86
 - 5.2.3 优点 / 87
- 5.3 问题描述 / 88
- 5.4 弹性度量 / 89
 - 5.4.1 系统弹性度量 / 89
 - 5.4.2 关键性能参数选取和归一化 / 93
 - 5.4.3 供应链网络的弹性度量 / 93
- 5.5 基于蒙特卡罗的弹性评估 / 95
 - 5.5.1 仿真模型 / 95
 - 5.5.2 基于蒙特卡罗的弹性评估流程 / 98
 - 5.5.3 误差分析 / 99
- 5.6 案例 / 100
 - 5.6.1 案例描述 / 100
 - 5.6.2 弹性计算过程 / 103
 - 5.6.3 弹性评价结果 / 105
 - 5.6.4 不同供应链网络弹性对比 / 107
- 参考文献 / 110

第6章 扰动识别与系统弹性测评

- 6.1 研究背景 / 114
- 6.2 弹性度量 / 115
 - 6.2.1 确定型弹性度量方法 / 115
 - 6.2.2 系统关键性能参数选取与性能归一化 / 116
- 6.3 扰动识别 / 118
 - 6.3.1 扰动信息线索表 / 118
 - 6.3.2 扰动识别过程 / 122
- 6.4 给定扰动下系统弹性测评方法 / 123
 - 6.4.1 定义测试场景 / 123
 - 6.4.2 正常情况下的性能监控 / 124
 - 6.4.3 确定扰动注入方法 / 124
 - 6.4.4 扰动注入与性能监控 / 125
 - 6.4.5 弹性计算 / 126
- 6.5 案例 / 126
 - 6.5.1 问题描述 / 126
 - 6.5.2 扰动识别 / 127
 - 6.5.3 弹性测评 / 128
 - 6.5.4 影响分析 / 132
- 参考文献 / 134

第7章 复杂网络系统弹性规律研究

- 7.1 研究背景 / 138
 - 7.1.1 基于网络拓扑参数的弹性度量 / 138
 - 7.1.2 基于网络性能参数的弹性度量 / 143
 - 7.1.3 复杂网络弹性规律研究 / 146
 - 7.1.4 小结 / 147
- 7.2 弹性度量 / 148
- 7.3 弹性评估 / 149
 - 7.3.1 流量模型建立 / 149
 - 7.3.2 节点扰动策略 / 149
 - 7.3.3 弹性仿真评估 / 151
- 7.4 案例分析 / 152
 - 7.4.1 复杂网络拓扑生成 / 153
 - 7.4.2 基于序参量的流量生成 / 156
 - 7.4.3 基于扰动行为的弹性分析 / 157
 - 7.4.4 基于恢复行为的弹性分析 / 162
- 参考文献 / 166



第1章

概述

“弹性 (resilience)”一词源自拉丁文“resiliere”，意为回弹。该词最早由生态学家 Holling 引入生态学领域，用于“衡量系统可持续性、吸收变化和扰动后维持种群关系的能力”，之后这一概念逐渐扩展到心理学、组织管理、工程系统等领域，广泛用于评价个体、集体或系统承受扰动以及扰动后的恢复能力。通常，系统可能遭受的扰动可分为两类：①源于自然灾害、人为攻击的外部扰动 (external disruption)；②源于内部故障的系统性扰动 (systemic disruption)。显然，系统受扰动后产生的功能中断或性能下降，若不能得到及时有效的恢复，则可能产生相当大的损失。

自然灾害、流行病、恐怖袭击、设备故障和人为失误都可能对组织/系统的连续运行造成潜在的、严重的威胁，这些极端自然事件和技术事故之后伴随的灾害和危机的发生，都显示出传统风险评估和管理的局限性，在风险的背景下，弹性已被作为常规风险管理的补充和替代方案进行了讨论。为了应对如此多的大规模意外事件，弹性分析成为大型复杂基础设施系统的最佳决策，同时也可作为对于复杂系统自适应管理具有重要意义的风管理分析的补充。

各国政府现已开始广泛重视“弹性”研究，并在电力系统、给水网络、通信网络和交通网络等复杂工程系统中开展了研究与应用。

1.1 弹性的概念与内涵

目前为止还没有形成统一的弹性定义，我们针对电力系统、通信网络、交通网络等典型工程系统对象检索了高被引和综述性文献，将其中关于弹性的定义和特性记录在表 1.1 之中。

表 1.1 弹性在不同系统对象中的定义与特性

对象	定义	主要特性	文献来源
工程系统	系统弹性是系统被动生存率(可靠性)和主动生存率(恢复)的总和	<ul style="list-style-type: none"> • 可靠性 • 恢复 	Youn 等(2011) ^[1]
	弹性是系统在面临错误或挑战时保持可接受运行的能力	不中断服务的能力	Madni 和 Jackson (2009) ^[2]
基础设施系统	基础设施的弹性是降低破坏性事件的量级和/或持续时间。一个弹性系统的效能取决于其预测、吸收、适应以及快速恢复自一个潜在破坏性事件的能力	<ul style="list-style-type: none"> • 预测能力 • 吸收能力 • 适应能力 • 快速恢复能力 	Berkeley 和 Wallace (2010) ^[3] (政府报告)

续表

对象	定义	主要特性	文献来源
电力系统	弹性指电力系统能抵御破坏,并能于事后快速恢复的能力	<ul style="list-style-type: none"> • 抵御 • 快速恢复 	Coaffee(2008) ^[4]
	弹性指电力系统对于扰动事件的反应能力	<ul style="list-style-type: none"> • 事前准备与预防 • 过程中抵御、吸收、响应以及适应 • 事后快速恢复 	别朝红等(2015) ^[5]
	系统弹性是在意外的干扰下系统降低其影响的量级和持续时间的能力。电力信息物理系统弹性是在给定的负载优化方案下系统能为用户提供持续电流的能力	<ul style="list-style-type: none"> • 降低影响的能力 • 持续供电能力 	Arghandeh等(2016) ^[6]
通信网络	弹性指在面临故障和挑战的时候网络可以提供并保持可接受的服务	<ul style="list-style-type: none"> • 防御 • 发现 • 补救 • 恢复 	Sterbenz等(2010) ^[7]
	弹性指在受到攻击、大规模灾难和其他故障时,网络能够提供可接受的服务	<ul style="list-style-type: none"> • 防御 • 检测 • 补救 • 恢复 	Sterbenz等(2013) ^[8]
交通网络	弹性指对给定的网络配置,可以在规定的恢复成本(预算、时间和物理)内满足灾后预期的需求	<ul style="list-style-type: none"> • 冗余 • 适应(如恢复活动) 	Chen和Miller-Hooks(2012) ^[9]
	弹性指扰动或灾难发生后能维持运行或快速恢复	<ul style="list-style-type: none"> • 鲁棒性 • 快速性(恢复) 	Mattsson和Jenelius(2015) ^[10]
工业过程系统	弹性指意外情况发生时,能最大限度地减少损失并使操作恢复正常	<ul style="list-style-type: none"> • 防御 • 恢复 	Dinh等(2012) ^[11]
供应链	弹性指系统受到扰动后返回原始状态或达到新的更理想状态的能力	<ul style="list-style-type: none"> • 可设计 • 跨公司合作 • 敏捷(快速响应) • 增强 	Christopher和Peck(2004) ^[12]
	弹性指从中断反弹的能力	<ul style="list-style-type: none"> • 响应 • 恢复 	Sheffi和Rice(2005) ^[13]
	弹性指供应链为突发事件做好准备,中断后响应以及恢复到能在结构和功能上提供可持续的连接的能力	<ul style="list-style-type: none"> • 完好性 • 响应 • 恢复 	Ponomarov和Holcomb(2009) ^[14]
	弹性指反应、应对、适应或抵御突发事件的能力	<ul style="list-style-type: none"> • 完好性 • 响应 • 恢复 • 增长 	Hohenstein等(2015) ^[15]

从表 1.1 中可知,虽然“弹性”的定义没有统一,但大都是相似的,都关注于系统对扰动的承受和恢复能力^[16,17],其关键属性可以概括为预测、抵抗、吸收、适应、恢复几个方面。图 1.1 概括了系统的弹性行为:系统在 t_0 时刻受到扰动,由此产生性能降级,之后通过恢复措施,使其性能逐渐恢复到原始状态或新的稳定状态。系统对扰动的预测、抵抗、吸收、适应和恢复能力,决定了性能降级和恢复过程。

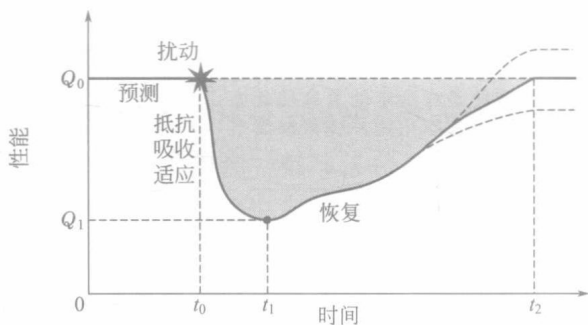


图 1.1 系统受扰动后的弹性行为(示意)

1.2 弹性的度量

在对工程系统进行弹性设计时,设计人员必须能够定量评估不同设计方案的弹性水平,以便做出最佳的设计决策。因此,弹性度量是弹性工程实践的基础环节,其在定义工程系统弹性以及在工程设计中进一步应用弹性概念方面起着重要作用。尽管人们已经在不同的工程学科开展了弹性度量的探索研究,但由于弹性应用的多样化,目前的弹性度量方法并没有标准化。因此,弹性度量研究仍是一个具有挑战性的问题。从弹性的定义出发,目前已有的系统弹性度量通常围绕系统性能降级程度与快速恢复性展开,一般可分为确定型度量和概率型度量两类^[18]。

1.2.1 确定型度量

确定型弹性度量来源于美国多学科地震工程研究中心(multidisciplinary center for earthquake engineering research, MCEER)对城市基础

设施遭受地震灾害的弹性研究^[19]，后来又应用到了通信、电力等其他领域，可以说是研究应用最多、影响最为广泛的弹性度量。下面分别简述各个度量方法^①。

(1) 弹性损失

“弹性损失 (resilience loss)”这一指标是 MCEER 研究组的 Bruneau 等在文献 [19] 中提出的，其定义了一个归一化的系统性能曲线 $Q(t)$ [$0 \leq Q(t) \leq 100\%$]，并用性能损失函数的积分表达系统弹性损失 (图 1.2)：

$$\mathbb{R}_B = \int_{t_0}^{t_1} [1 - Q(t)] dt \quad (1.1)$$

式中， t_0 为扰动发生时刻； t_1 为系统性能完全恢复时刻。

(2) 基于性能积分的弹性

随后，Cimellaro 等 (2010)^[20] 在“弹性损失”的基础上，提出了采用系统受扰动后其性能函数在整个恢复过程中的积分这一弹性度量方法 (图 1.2)：

$$\mathbb{R}_C = \int_{t_0}^{t_1} Q(t) dt \quad (1.2)$$

与“弹性损失”相比，基于性能积分的弹性度量实际计算了扰动发生后到完全恢复前的“残余性能”。

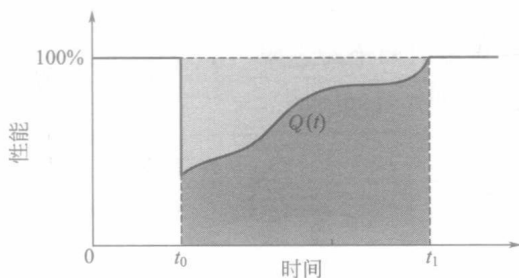


图 1.2 弹性损失与基于性能积分的弹性度量

(3) 基于性能积分比的弹性

Reed 等 (2009)^[21] 又在性能曲线 $Q(t)$ 的基础上，提出将性能函数的积分与恢复时间之比定义为系统弹性，即系统受扰动后性能函数下的面积所占系统未受扰动时性能函数下全部面积的比例 (图 1.3)：

① 本书将所有弹性表达符号统一为 \mathbb{R} 。

$$\mathbb{R}_R = \frac{\int_{t_s}^{t_e} Q(t) dt}{t_e - t_s} \quad (1.3)$$

式中, t_s 和 t_e 为任意两个时间点。Reed 等 (2009)^[21] 给出的这一弹性度量实际就是 $t_s \sim t_e$ 时间范围内的平均残余性能。

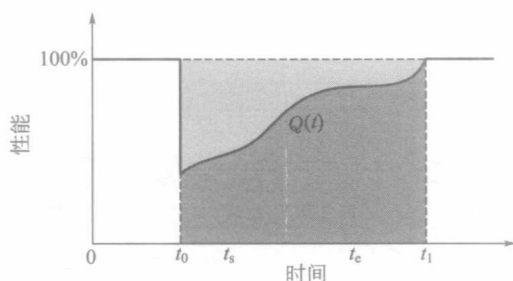


图 1.3 基于性能积分比的弹性度量

(4) 基于预测三角的弹性

考虑到不同系统的恢复时间不同, 上述弹性度量很难对不同时间尺度下的系统弹性进行比较, 同时为了减少对性能指标实时监测的依赖以便对系统弹性进行预测, Zobel (2011)^[22] 提出了基于几何关系的简化算法, 其采用一个长时间区间 T_u (性能函数的恢复时间绝对上限), 记性能函数在恢复时间绝对上限 (T_u) 时间内的梯形面积与 T_u 之比为弹性预测值, 即 (图 1.4):

$$\mathbb{R}_Z = \frac{T_u \frac{Q_1 T}{2}}{T_u} \quad (1.4)$$

式中, T_u 为一个长时间段; Q_1 为预测的系统性能降级; T 为预测的恢复时长。该度量假设系统在扰动开始时刻 t_0 性能就会降低到最低点, 且性能开始以恒定速度恢复, 无论如何系统的恢复时间不会超过 T_u 。Zobel (2011)^[22] 给出的这一弹性度量实际就是对扰动发生后 T_u 内的平均残余性能进行度量。通过假设长时间区间 T_u , 任意两个系统的弹性基准一致, 这使得不同的弹性计算结果有了比较基础。针对连续扰动事件, Zobel 等 (2014)^[23] 又对该算法进行了扩展。

(5) 基于 $0 \sim T$ 时间内性能积分比的弹性

Ouyang 等 (2012 和 2015)^[24,25] 也考虑到时间尺度的一致性, 并对 MCEER 提出的弹性度量进行了改进, 将其度量的时间区间从扰动