# 弹性模型

## 弹性的发展

由于弹性在降低风险和减轻破坏程度有着显著的作用，近年来针对弹性的研究越来越多，研究的领域也逐渐扩散到了组织领域，社会领域，经济领域以及工程领域等。不同学科的学者对于不同领域的弹性提出了多种研究方法。

弹性（resilience）一词的常用含义是在发生破坏性事件后，实体或系统具有恢复正常状态的能力。正因为弹性定义的宽泛性，使得它可以适用于生态，材料科学，心理学，经济学和工程学等各个领域。

以往的文献提出了很多弹性的定义，大多都相似，且与现在提出的诸多概念类似，比如灵活性（flexibility），生存能力（survivability），敏捷性（agility），鲁棒性（robustness）等。在一些跨学科的研究中，给出了弹性的一些通用定义。例如，Pregenzer将弹性定义为"衡量系统吸收持续和不可预测的变化，并保持其重要功能的能力" [1]。Haimes 将弹性定义为"系统在可接受的范围内承受重大破坏的能力，以及以适当的时间和合理的成本和风险进行恢复的能力" [2]。Allenby和Fink将弹性定义为“系统在面对内部和外部变化时能够维持其功能和结构，并在必要时优雅地退化的能力“[3]。Vugrin将系统弹性定义为：“给定特定破坏性事件（或一组破坏事件）的发生，系统对该事件（或多个事件）的弹性是系统有效减少偏离的程度和持续时间的能力“。该定义的两个要素：系统影响，负面影响。负面影响包括中断对系统造成的负面影响，通过系统目标性能水平与中断性能水平之间的差异来衡量的负面影响，以及恢复所做出的工作量，修复被破坏系统花费的资源量[4]。

弹性的概念也已从特定学科的角度出发，并在包括心理学，生态学和企业等应用领域中得到了广泛应用。以往的文献已经针对弹性的概念提出了多种定义，我们总结了弹性的四个领域：心理，组织，社会，经济，工程，网络。

### 心理弹性

早在上世纪70年代，心理弹性就出现在了早期人类的心理学和精神病学的文献中(Garmezy & Nuechterlein, 1972)。当时对心理学的研究主要集中在精神病理学和功能障碍上。随着对心理弹性的研究，越来越多的文献将注意力集中到了虽然在童年和青年时期遭受多重困难和长期逆境，但还是达到了青少年的标准，并且最终在社会关系，工作绩效等领域表现出正常人水平的个体(Gralinski-Bakker, Hauser, Stott, Billings, & Allen, 2004;) (DiRago & Vaillant, 2007) (Robert J. Sampson & Laub, 1992)。

自20世纪90年代初以来，心理弹性研究的重点已经从识别保护因素转变为理解个体克服其遇到的逆境的过程(Luthar, Cicchetti, & Becker, 2000)。心理弹性的定义是灵活性，以应对不断变化的情境需求和从负面情绪体验中恢复的能力(Block & Kremen, 1996)。具有心理弹性的人在逆境中或者压力中也会有积极的情绪，这也表明这些人理解积极情绪的好处，以便在负面事件中利用这些情绪(Tugade & Fredrickson, 2004)。

随后心理弹性的概念开始不再局限于单个个体，开始扩展到了家庭和社区，在考虑较大群体的适应力时，心理弹性也会考虑更广泛的社会结构。Kumpfer (Kumpfer, 2002) 提出了具有代表性的“个人—环境—过程”的心理弹性模型，将个体在与环境交互的过程中遭遇的风险与挫折抽象为危险因子，认为个体内在的适应性对心理起到保护作用。例如，在家庭文献中，有家庭沟通模式(McCubbin & McCubbin, 1988)，家庭问题的解决和灵活性(Walsh, 1996)，以及家庭身份(Patterson, 2002)。同样的，对于社区弹性的研究也促成了群体概念的发展，如社区意识(Sonn & Fisher, 1998)，社会资本(Kawachi, 1999)，集体效能(R. J. Sampson, Raudenbush, & Earls, 1997)，商业组织(Riolli & Savicki, 2003)，军队(Palmer, 2008)。

之后的心理弹性发展开始关注受到干预时的心理弹性模型。Dunn(Dunn, Iglewicz, & Moutier, 2008)分析了基于幸福感的心理弹性模型，提出帮助医学学生培养在整个职业生涯中维持心理健康的能力，可以促进学生的适应能力和个人成就感，以及提高专业性和患者护理。Maeseele(Maeseele, Verleye, Stevens, & Speckhard, 2008)提出了应对恐怖主义心理弹性模型，认为电视互联网曝光恐怖主义使得人们更加担忧，政府的积极沟通可以很有效帮助人们。

对于弹性的研究，大多采用了定性视角。Galli(Galli & Vealey, 2008)采访了10位现任和前任高级运动员，了解了他们在运动生涯中克服的最困难的逆境（如伤病，状态不佳等）。基于统计分析归纳的结果，提出了运动心理弹性的概念模型。根据该模型，运动员面临的运动逆境导致了一种激励的过程，其中包括和不愉快的情绪斗争，认知和行为相结合的策略。这一过程可以带来了积极的成果，例如学习动力的增加，帮助他人的动力增加。但这项研究还存在许多局限性，比如逆境的类型区分不是很明确，标准过于宽泛，无法深入了解影响弹性的因素。因此Fletchher(Fletcher & Sarkar, 2012)使用更加具体的方法，对12位奥运冠军进行了访谈，并使用开放，轴向和选择性编码的方式分析访谈记录，认为许多心理因素通过影响运动员的自身认知来保护他们免受压力的负面影响。Graber(Graber, Turner, & Madill, 2016)通过对英国409名11至19岁青少年的调查，内容包括亲密友谊的质量，心理弹性，社会的支持以及其他资源，认为心理弹性与亲密友谊的质量呈现显著的正相关关系。Hongshan Ai(Ai & Hu, 2016)通过调查了200名留守女孩和214名留守男孩，内容包括了心理弹性，社会支持和孤独感。采用了层次回归分析方法，表明心理弹性缓和了社会支持与孤独感之间的关联。 当留守儿童报告的心理弹性水平较低时，那些社会支持较低的人比社会支持较高的人感受到的孤独更深。

我们可以看到对于心理弹性的判别，有两项是必不可少的：逆境和恢复能力。

### 组织领域

为满足企业对快速变化的商业环境做出响应的需求，组织弹性应运而生。对于个体弹性与组织弹性的关系，可以理解为个体组织成员的行为和互动可以导致公司的组织弹性的出现(Morgeson & Hofmann, 1999)。学术界对于组织弹性的定义提出了两种不同的观点，第一种观点是，组织弹性只是一种从意外，不利的情况中反弹的能力，并且从它们中断的地方回归到原始的地点(Rudolph & Repenning, 2002)。例如Sheffi [5]将组织的弹性定义为保持或恢复稳定状态的固有能力，从而使组织在发生破坏性事件或存在持续压力后能够继续正常运行；当组织弹性被视为反弹时，重点通常是应对策略和快速恢复预期绩效水平的能力。组织工作旨在重建公司与新状况之间的联系，同时避免功能失调或倒退行为。这种关于组织弹性的观点是以反弹为导向的，即通过适应性解释和行动来应对压力事件的能力.(Kobasa, Maddi, & Kahn, 1982)。第二种观点，组织弹性不仅仅是恢复，还包括新能力的发展，创造新机会的能力(Freeman, Hirschhorn, & Maltz, 2004)，(Lengnick-Hall & Beck, 2005)。例如Vogus和Sutcliffe将组织的弹性定义为“尽管存在逆境，但组织能够吸收压力并改善功能的能力[6]。第二种观点不仅是回到以往基准，更是将组织弹性视为一个重要因素，使公司能够利用其资源和能力，不止解决当前的困境，而且可以利用机遇，建立成功的未来。因此，组织的弹性与动态竞争相关联，企业吸收复杂性并具备更强的能力。

与组织弹性相关的属性主要有灵活性(Ghemawat & del Sol, 1998)，敏捷性(McCann, 2004)，适应性(Chakravarthy, 1982)。灵活性指能够在相对较短的时间内以较低的成本进行调整。敏捷性指开发和快速应用敏捷和动态竞争行动的能力。适应性指在新环境下快速适应的能力。在现实中，突发事件会触发对弹性的需求，灵活性和敏捷性是公司战略的一部分，使组织可以更新，转换和创造，是组织从内向外的主动扩展。适应性强调了从外向内的需求。

有观点认为公司开发弹性的能力来源于公司的特定组织能力，惯例，实践和流程。公司准确定位自己，采取行动向前发展，并创造多样性和可调节整合的环境(Lengnick-Hall & Beck, 2005)。也有新的观点认为这些组织能力和惯例应该源于个体水平的知识，技能，能力和其他属性的组合，这些属性通过公司的人力资源管理系统进行开发和整合(Lengnick-Hall, Beck, & Lengnick-Hall, 2011)。

Parker(Parker & Ameen, 2018) 研究了面对破坏时公司的弹性能力，提出公司重新配置其资源的能力越强，公司的弹性越大。随着企业规模的减小，企业的弹性会增加。Boin(Boin & Eeten, 2013) 通过研究经历过深度危机的组织来探讨流程与弹性的关系，认为坚持结构良好的安全流程对于组织弹性来说是不够的，危机时的非正常操作也会发挥着重要的作用。Patterson等强调协作式交叉检查可以大大增强组织的弹性[7]。协作交叉检查是一种增强的弹性策略，其中至少两个具有不同观点的组或个人调查其他人的激活以评估准确性或有效性。通过实施协作式交叉检查，可以足够快地检测到错误操作以减轻不良后果。

### 社会领域

社会领域关注的是社区和环境的应变能力。Adger将社会弹性定义为“群体或社区应对因社会，政治和环境变化而导致的外部压力和干扰的能力”[8]。Keck和Sakdapolrak将社会适应力定义为三个维度：应对能力，适应能力和变革能力[9]。Cohen认为社区弹性是作为社区在破坏或危机期间正常运作的能力[10]。Pfefferbaum等将社区适应能力定义为“社区成员采取有意义的，有意识的集体行动来补救问题影响的能力，包括解释环境，进行干预和继续前进的能力”[11]。

### 经济领域

Rose和Liao将经济弹性描述为“使公司和地区避免最大潜在损失的内在能力和适应性响应”[12]。Rose将静态经济弹性称为使实体或系统保持其活动的能力。例如在遇到严重冲击时产生的功能，而动态经济性则定义为系统从严重冲击中恢复以达到稳定状态的速度[13]。Martin将经济弹性的定义更具体地定义为“重新配置的能力，即适应其结构（企业，行业，技术，机构）的能力，以便随着时间的推移维持可接受的产出，就业和财富增长路径。”[14]。

### 工程领域

与其他领域相比，工程领域中的弹性概念相对较新。工程领域包括由工程师设计的与人和技术互动的技术系统，例如电力网络，供应链等。注意，Youn等人将工程弹性定义为系统的被动生存率（可靠性）和主动生存率（恢复）之和[15]。Hollnagel等人认为工程弹性是是系统在出现干扰和无法预测的变化时调整其功能的固有能力[16]。霍纳格尔和序言[16]指出，对于弹性工程来说，了解技术系统的正常功能以及了解其如何失效都很重要。美国机械工程师学会（ASME）[17]将弹性定义为系统在不中断执行系统功能的情况下维持外部和内部中断的能力，或者在功能断开的情况下迅速恢复功能的能力。Dinh等。[18]确定了六个因素来增强工业过程的弹性工程，包括最小化故障，影响的限制，行政控制/程序，灵活性，可控性和及早发现。

弹性的研究也扩展到了我们比较关注供应链方面。Lee(Lee, 2004)提出了供应链弹性的标准：第一，对突发需求和供应变化的迅速做出反应；第二，随市场结构和战略演化的适应能力；第三，成员内部组成联盟，以便考虑自身利益的同时考虑到整个供应链的利益。Haywood (Haywood & Peck, 2003) 在研究供应链时发现供应链发生变化时更容易受到攻击，因此他们建议强化供应链在变化期的管理是增强供应链弹性的关键。Muckstadt(Muckstadt, Murray, Rappold, & Collins, 2001)提出了增强供应链各个成员之间的合作关系和强度，通过减少运营环境的不确定性来增强供应链的弹性。赵林度(赵林度, 2009) 将细胞弹性的思想引入供应链风险管理体系中，深入研究了供应链细胞弹性模型，提出“供应链弹性={自适应能力 + 自修复能力}”，其中自适应能力又包括了适应能力和学习能力。

李永红(李永红 & 赵林度, 2010) 基于供应链风险弹性分析方法，构建了描述供应链弹性系统形变的数学模型，并通过仿真软件对结果进行验证，认为供应链需要各个成员共同合作塑造供应链弹性，控制系统形变，才能获得供应链优势的持续增长。Kong(Kong & Xiang, 2008)在分析供应链风险源以及相应的管理决策的基础上，构建了一个形成弹性供应链的框架，指出知识管理资源，企业响应管理以及企业可见度和计划编制是获得弹性的关键。Pettit (Pettit, Fiksel, & Croxton, 2010) 介绍了一种新的供应链弹性框架，以帮助企业应对变化，认为供应链弹性可以从漏洞和能力两个方面进行评估，弹性区被定义为漏洞和能力之间的理想平衡。Macdonald等验证弹性对公司绩效和整个供应链的影响[19]。

### 网络弹性

Gaudiot(Gaudiot & Najjar, 1990)首次把网络弹性定义为网络中的潜在失效连接的概率ｐ，即网络以概率１－ｐ保持连接时失效的最大结点数。提出网络弹性和相对网络弹性的度量作为网络容错的概率度量。Liu(Liu & Ji, 2009)把网络弹性定义为失效发生时丢失通信量的百分比。Sterbenz(Sterbenz等, 2010)根据网络的特点把网络弹性定义为在面临故障和挑战的时候网络可以提供并保持一定服务水平的能力。吴俊(吴 & 谭, 2005)认为在一定约束下网络可以承受的最大节点或边的移除比例为网络的抗毁性，并提出了网络抗毁性的两个测度：容错度和抗攻击度。Salles(Salles & Marino, 2012)提出了利用网络弹性的参数来增加网络的鲁棒性，通过在网络的拓扑中提供可替换的元件增加网络的弹性。Gallos(Gallos & Fefferman, 2015) 研究了通过节点移除来破坏复杂网络的问题，表明了这些破坏后的集群通常会彼此接近，并提出了算法，可以在尽可能短的周期内恢复网络的功能，及时停止损害。

## 弹性模型

通常，弹性评估程序可分为两大类：定性和定量。定性方法倾向于在没有数学描述符的情况下评估系统弹性的方法，它包含两个子类别：（i）概念框架，（ii）提供对不同定性方面的专家评估的半定量指标弹性。定量方法包括两个子类别：（i）提供针对领域的度量方法来对对应领域的弹性进行度量的一般方法，（ii）基于结构的建模方法，用于对弹性组成部分的特定领域进行建模[20]。以下是简单的图表示。

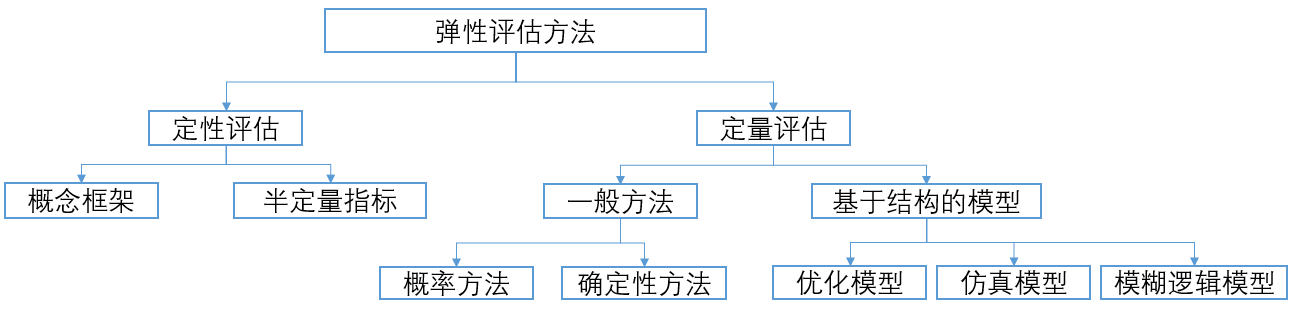


图1.1 弹性评估方法

### 定性评估：

#### 概念框架

概念框架构成了评估系统弹性的大多数定性方法，在研究中，学者们会针对具体的问题提出相关的弹性要素来进行弹性能力的评估。例如，Speranza[21]开发了一个概念框架来分析人们生活的弹性，即“人们拥有的资源和他们为谋生所采取的策略。”该框架提供了弹性三个维度的一些属性：缓冲能力（系统可以承受的变化量），自我组织能力（通过固有的社会结构出现的社会）和学习能力（适应能力）。弹性联盟提出了一个评估社会生态系统弹性的通用框架[22]，该框架由七个步骤组成：（i）定义和了解正在研究的系统，（ii）确定适当的规模来评估弹性，（iii）确定系统的驱动力以及外部和内部可能出现的干扰，（iv）识别系统中的关键成员，包括管理者和普通人，（v）为识别必要的恢复活动来开发概念模型，（vi）实施步骤v的结果以告知决策者，以及（vii）合并上一步的结果。Sterbenz等提出了通信网络的弹性力和生存能力的框架，还提出了一项包括弹性的调查[23]。他们的研究结果表明，防御，检测，诊断，修复，完善和恢复的六个因素有助于设计可扩展到其他领域的弹性网络。该框架仅提供了概念上的见识，并未量化系统的弹性。在保证国土安全的背景下，Kahan等人使用八项指导原则提出了一个广泛的系统弹性概念框架：（i）威胁和危害评估，（ii）稳健性，（iii）减轻产生后果，（iv）适应性，（v）与风险相关的计划，（vi ）以风险为依据的投资，（七）目的的统一，以及（八）范围的综合[24]。Labaka等人提出了一个与一般管理层密切合作确定的整体弹性框架。他们提出的框架包括两种弹性类型：内部弹性和具有弹性策略的外部弹性[25]。Shirali等从安全文化角度发现了七个弹性指标，包括：进度延迟，安全委员会，会议有效性，安全教育，工人的参与，权限，安全训练[26]。同时还发现，弹性测量取决于四个管理因素，集中或分散控制系统，变更管理，风险管理和事故分析，对安全性的管理承诺。

#### 半定量指标

半定量指标方法一般构建一组有关弹性系统特征（如敏捷，冗余等）的问题，从专家意见中评估特征并以某种方式进行汇总，进而得到评估的弹性。

在具体的研究中，学者会构建多个与问题相关的弹性变量，进行评估，以便之后的工作。例如，Cutter等首先确定了社区与自然灾害有关的36个弹性变量，包括冗余、敏捷和稳健性等[27]。然后，根据政府来源的数据观察，每个变量的得分介于 0 和 100 之间。这36个变量分成5个组，包括经济、基础设施、社会、社区资本和机构，每个分组的分数使用其包含变量的平均值计算，而总分是通过计算所有变量分数的平均值来计算的。Pettit等提炼了工业供应链中弹性的两个关键驱动因素：（i） 供应链的脆弱性水平，以及（ii） 供应链承受的中断程度和从中断中恢复的能力[28]。作者通过提供一套152个问题来衡量供应链的脆弱性和能力，这些问题分为脆弱性的六个部分和能力的15个部分。每个因素的重要性由决策者加权，最后使用加权和计算对问题的答复。

### 定量评估

#### 一般方法

##### 概率方法

Chang和Shinozuka引入了一种评估弹性的概率方法，其衡量标准有两个：（i） 性能损失和（ii） 恢复时间[29]。弹性能力的定义是，中断后初始系统性能损失的概率小于可接受的最大性能损失，而完全恢复的时间小于可接受的最大中断时间。以上定义在公式（1）体现。其中为系统性能可以接受的最大损失，表示了对于的性能标准，为最大可接受的恢复时间，表示中断的程度。

 （1）

Chang和Shinozuka应用了这种方法来衡量地震后基础设施和社区的弹性，但它也可以应用于任何其他系统和中断。提出指标的显著特征是承认弹性量化的不确定性。

Ayyub 考虑了老化对系统的影响，定义了一个随机弹性指标[30]。系统性能定义为系统强度和系统负载之间的差异。此指标中弹性的两个维度是鲁棒性和机智性。该指标由公式（2）显示。其中是事件发生的时间， 是系统故障的时间， 是恢复的时间， 是系统故障的持续时间， 是系统恢复的持续时间。

（2）

其中故障系数是鲁棒性和冗余性的性能指标，由公式（3）计算得到，恢复系数是由恢复性的性能指标，由公式（4）得到。故障时间是根据概率密度函数来计算。Ayuub通过分别引入故障系数和恢复系数，分别模拟了鲁棒性与冗余比以及机智性与快速性的比率。

 （3）

（4）

##### 确定性方法

Bruneau等在民用基础设施中众所周知的弹性三角模型中定义了弹性的四个维度：（i）健壮性，系统的强度或其在存在破坏性事件的情况下防止损害通过系统传播的能力，（ii）速度，在中断发生后系统恢复到其原始状态的速度或速率或至少可接受的功能水平；（iii）机智，应用材料（即信息，技术，物理等）的能力水平）和人力资源（即劳动力）来应对破坏性事件，以及（iv）冗余，系统在多大程度上将破坏的可能性和影响降到最低[31]。

之后Bruneau提出了一个确定性的静态指标，用公式（5）测量社区在地震中的弹性损失。发生中断的时间是，而社区返回到正常中断前状态的时间是 。可以用来表示由不同种类型的性能度量组成的时间时的社区基础结构质量。

 （5）

在这种方法中，将削弱后的基础结构质量与恢复期间的已计划基础结构质量 （100） 进行比较。可以用图2的阴影区域表示。较大的 RL 值表示弹性较低，而较小的 RL 表示弹性越高。此方法的特征是它的一般适用性。虽然这种方法在这篇文献中用于地震背景，然而，它可以扩展到许多系统，因为质量是一个普遍的概念。因此，其普遍适用性是弹性三角形指标的一个重要优势。

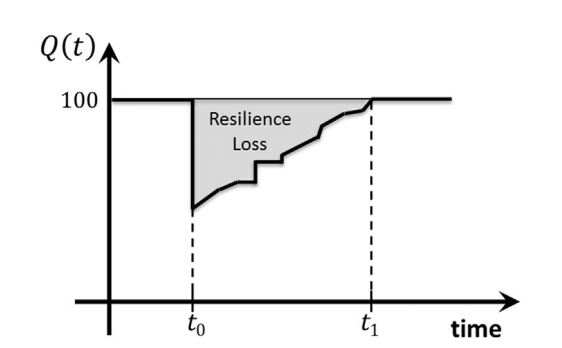


图2 弹性损失的测量

Rose [13] 将经济弹性定义为"实体或系统在发生中断时以功能方式维护系统的能力"。此指标测量系统输出避免下降的比率和系统输出的最大可能下降，如图3所示。公式6中提供的指标被归类为确定性静态模型，其中 是非中断和预期中断的系统性能的差异，是非中断和最差情况下中断系统的差异性能。由于中断情况的深度，强度并不能精确评估，所以针对性能下降的程度一般来说很难预测。

 （6）

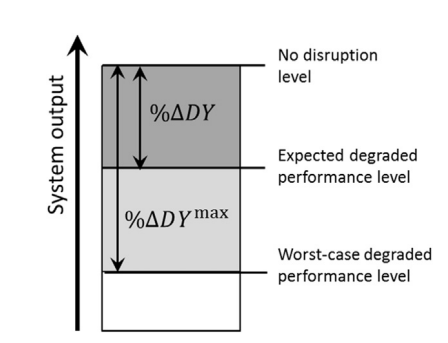


图3 静态经济弹性量化

Wang等人提出了一个衡量企业信息系统弹性的指标[32]。在公式（7）中定义，其中是企业信息系统中的操作次数，是恢复操作的需求时间，是操作的完成时间，是操作 的重要性。

 （7）

当所有功能都可以在需求时间内恢复时，此弹性度量值可以采用大于 1 的值，并且此指标的值越大，意味着系统更具弹性。此指标的主要限制是假定恢复操作数和操作数已知，而实际上系统正在处理未知情况。

#### 基于结构的模型

##### 优化模型

Faturechi等人提出了一个计算和优化机场弹性的数学模型，旨在最大限度地提高机场跑道和滑行道网络的弹性[33]。在公式（8）中，表示了在预算与维修时间的限制下的机场弹性，表示了在航班类型s和调动方式w（离开或到达）的原始需求，表示了在跑道配置g，调动方式w，航班类型s的活动路径p的集合，表示了在情景下，调动方式w，飞机类型s沿路径p的流量，表示了设备类型的集合。

 （8）

提出的数学模型，考虑到时间、物理、业务、空间、资源和预算限制，将中断事件后起飞和着陆能力快速恢复到中断前的能力水平。研究的主要特点是在随机整数模型中考虑到准备和恢复活动。

Jin等提出了一个两阶段的随机规划模型，用于分析城市公共交通网络的弹性[34]。在研究中，将城市交通网络的弹性定义为在发生破坏性事件后的网络可以满足城市需求的比例。如公式（9）所示，表示交通网络的弹性，是起点到终点组的集合，表示中断事件之后的一段时间内在起点终点组w下可以满足的需求，正常情况下起点终点组w下的总的需求。

 （9）

##### 仿真模型

Virginia等人提出了一种用于仿真供应链弹性的动态仿真方法[35]。在控制工程领域中常用的时间绝对误差积分（Integral of Time Absolute Error，ITAE）被用作弹性的度量。研究中使用的仿真模型试图捕获ITAE的最小值，该值与最佳响应和恢复相对应。如公式 所示， 表示了时间的误差，表示了时间的积分乘以绝对的误差，用来表示对弹性的度量。如果系统没有达到稳态或有严重的错误，那么就会趋于无限大，也代表着去发弹性。



Adjetey-Bahun等人使用时间相关的仿真模型来测量铁路运输系统的弹性[36]。通过模拟一组突发性事件来进行建模。如公式 所示，表示在时间t车站s的正常乘客流量，表示运营商可以应付的车站s在时间t的流量，表示时间t车站s在干扰中的乘客流量，表示车站s的绩效指标，用来表示对弹性的度量。



##### 模糊逻辑模型

Azadeh等人通过模糊认知图评估了工程弹性的因素[37]。作者使用模糊认知图来描述工程弹性能力的九个因素之间的因果推理：团队合作、意识、准备、学习文化、报告、灵活性、冗余、管理承诺和容错能力。模糊认知图可以由模糊图形结构表示，并通过神经网络和模糊逻辑方法获得。如公式 所示，其中表示了因素在时间对系统弹性的影响，是一个阈值函数确保得到的结果在之间，表示了因素在时间对系统弹性的影响，表示了因素的关系权重。



Aleksic等人提出了一种评估组织弹性的模糊模型，使用模糊语言变量表达组织弹性因素的相对重要性[38]。如公式 所示，其中表示流程p内潜在因素的弹性，表示组织内业务流程p的弹性，表示了组织的整体弹性。





## 引用

[1] Pregenzer A. Systems resilience: a new analytical framework for nuclear nonproliferation. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories; 2011.

[2] Haimes YY. On the definition of resilience in systems. Risk Anal 2009;29(4):498–501

[3] Allenby B, Fink J. Social and ecological resilience: toward inherently secure

and resilient societies. Science 2000;24(3):347–64.

[4] Vugrin ED, Warren DE, Ehlen MA, Camphouse RC. A framework for assessing the resilience of infrastructure and economic systems. In: Gopalakrishnan K, Peeta S, editors. sustainable infrastructure systems: simulation, modeling, and intelligent engineering. Berlin: Springer-Verlag, Inc.; 2010.

[5] Sheffi Y. The resilience enterprise: overcoming vulnerability for competitive

enterprise. Cambridge, MA: MIT Press; 2005.

[6] T.J. Vogus and K.M. Sutcliffe, Organizational resilience: toward a theory and research agenda. In: Proceedings of the IEEE international conference on systems, man and cybernetics; 2007. p. 3418–422.

[7] Patterson ES, Woods DD, Cook RI, Render ML. Collaborative cross-checking to enhance resilience. Cogn Technol Works 2007;9(3):155–62.

[8] Adger WN. Social ecological resilience: are they related? Prog Hum Geogr 2000;24(3):347–64.

[9] Keck M, Sakdapolrak P. What is social resilience? Lessons learned and ways forward Erdkunde 2013;67(1):5–19.

[10] O. Cohen, D. Leykin, M. Lahad, A. Goldberg and L. Aharonson-Daniel, The conjoint community resiliency assessment measure as a baseline for profiling and predicting.

[11] Pfefferbaum B, Reissman D, Pfefferbaum R, Klomp R, Gurwitch R. Building resilience to mass trauma events. In: Doll L, Bonzo S, Nercy J, Sleet D, editors. Resilience engineering: concepts and precepts. New York: Kluwer Academic Publishers; 2005

[12] Rose A, Liao SY. Modeling regional economic resilience to disasters: a computable general equilibrium analysis of water service disruptions. J Reg Sci 2005;45(1):75–112.

[13] Rose A. Economic resilience to natural and man-made disasters: multidisciplinary origins and contextual dimensions. Environ Hazard 2007;7(4):383–98.

[14] Martin RL. Regional economic resilience, hysteresis and recessionary shocks. J Econ Geogr 2012;12:1–32.

[15] Youn BD, Hu C, Wang P. Resilience-driven system design of complex engineered systems. J Mech Des 2011;133:10

[16] Hollnagel E, Woods DD, Leveson N. Resilience engineering: concepts and precepts. Aldershot, UK: Ashgate; 2006.

[17] American Society of Mechanical Engineers (ASME). Innovative Technological Institute (ITI). Washington, D.C.: ASME ITI, LLC; 2009

[18] Dinh LTT, Pasman H, Gao X, Sam Mannan M. Resilience engineering of industrial processes: principles and contributing factors. J Loss Prev Process Ind 2012;25:233–41

[19] Macdonald J R, Zobel C W, Melnyk S A, et al. Supply chain risk and resilience: theory building through structured experiments and simulation[J]. International Journal of Production Research, 2018, 56(12): 4337-4355.

[20] Hosseini S, Barker K, Ramirez-Marquez J E. A review of definitions and measures of system resilience[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2016, 145: 47-61.

[21] Speranza C I, Wiesmann U, Rist S. An indicator framework for assessing livelihood resilience in the context of social–ecological dynamics[J]. Global Environmental Change, 2014, 28: 109-119.

[22] Resilience alliance. assessing resilience in social-ecological systems: a practitioners workbook, 1 2007a.

[23] J.P.G. Sterbenz, E.K. Cetinkaya, M.A. Hameed, A. Jabbar and J.P. Rohrer, Modeling and analysis of network resilience. In: Proceedings of the IEEE COMSNETS, Bangalore, India; 2011

[24] Kahan J H, Allen A C, George J K. An operational framework for resilience[J]. Journal of Homeland Security and Emergency Management, 2009, 6(1).

[25] Labaka L, Hernantes J, Sarriegi J M. Resilience framework for critical infrastructures: An empirical study in a nuclear plant[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2015, 141: 92-105.

[26] Shirali GHA, Mohammadfam I, Motamedzade M, Ebrahimipour V. Moghimbeigi. Assessing resilience engineering based on safety culture and managerial factors. Process Safy Prog 2012;30(1):17–8.

[27] Cutter SL, Berry M, Burton C, Evans E, Tate E, Webb JA. place based model for understanding community resilience to natural disasters. Glob Environ Change 2008;18(4):598–606.

[28] Pettit TJ, Fiksel J, Croxton KL. Ensuring supply chain resilience: development of a conceptual framework. J Bus Logist 2010;31(1):1–21

[29] Chang SE, Shinozuka M. Measuring improvements in the disaster resilience of communities. Earthq Spectra 2004;20(3):739–55

[30] Ayyub BM. Systems resilience for multihazard environments: definition, metrics, and valuation for decision making. Risk Anal 2014;34(2):340–55.

[31] Bruneau M, Chang SE, Eguchi RT, Lee GC, O’Rourke TD, Reinhorn AM, et al. A framework to quantitatively assess and enhance the science the seismic resilience of communities. Earthq Spectra 2003;19(4):733–52.

[32] Wang JW, Gao F, Ip WH. Measurement of resilience and its application to enterprise information systems. Enterp Inf Syst 2010;4(2):215–23.

[33] Faturechi R, Levenberg E, Miller-Hooks E. Evaluating and optimizing resilience of airport pavement networks. Comput Oper Res 2014;43:335–48

[34] Jin J G, Tang L C, Sun L, et al. Enhancing metro network resilience via localized integration with bus services[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2014, 63: 17-30.

[35] Spiegler V L M, Naim M M, Wikner J. A control engineering approach to the assessment of supply chain resilience[J]. International Journal of Production Research, 2012, 50(21): 6162-6187.

[36] Adjetey-Bahun K, Birregah B, Châtelet E, et al. A simulation-based approach to quantifying resilience indicators in a mass transportation system[C]//ISCRAM. 2014.

[37] Azadeh A, Salehi V, Arvan M, Dolatkhah M. Assessment of resilience engineering factors in high-risk environments by fuzzy cognitive maps: a petrochemical plant. Saf Sci 2014;68:99–107.

[38] Aleksić A, Stefanović M, Arsovski S, et al. An assessment of organizational resilience potential in SMEs of the process industry, a fuzzy approach[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013, 26(6): 1238-1245.

李永红, & 赵林度. (2010). 基于弹性模型的供应链风险响应分析. 系统管理学报, (5), 563–570.

吴俊, & 谭跃进. (2005). 复杂网络抗毁性测度研究. 系统工程学报, (02), 128–131.

赵林度. (2009). 基于细胞弹性模型的供应链弹性分析. 物流技术, 28(1), 101–104.

Ai, H., & Hu, J. (2016). Psychological resilience moderates the impact of social support on loneliness of “left-behind” children. Journal of Health Psychology, 21(6), 1066–1073. https://doi.org/10.1177/1359105314544992

Block, J., & Kremen, A. M. (1996). IQ and ego-resiliency: conceptual and empirical connections and separateness. Journal of Personality and Social Psychology, 70(2), 349–361.

Boin, A., & Eeten, M. J. G. van. (2013). The Resilient Organization. Public Management Review, 15(3), 429–445. https://doi.org/10.1080/14719037.2013.769856

Byoun, S. (2011). Financial Flexibility and Capital Structure Decision (SSRN Scholarly Paper No. ID 1108850). Rochester, NY: Social Science Research Network. 取读于 从 https://papers.ssrn.com/abstract=1108850

Chakravarthy, B. S. (1982). Adaptation: A Promising Metaphor for Strategic Management. Academy of Management Review, 7(1), 35–44. https://doi.org/10.5465/amr.1982.4285438

DiRago, A. C., & Vaillant, G. E. (2007). Resilience in inner city youth: Childhood predictors of occupational status across the lifespan. Journal of Youth and Adolescence, 36(1), 61–70. https://doi.org/10.1007/s10964-006-9132-8

Dunn, L. B., Iglewicz, A., & Moutier, C. (2008). A Conceptual Model of Medical Student Well-Being: Promoting Resilience and Preventing Burnout. Academic Psychiatry, 32(1), 44–53. https://doi.org/10.1176/appi.ap.32.1.44

Fletcher, D., & Sarkar, M. (2012). A grounded theory of psychological resilience in Olympic champions. Psychology of Sport and Exercise, 13(5), 669–678. https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2012.04.007

Freeman, S. F., Hirschhorn, L., & Maltz, M. (2004). The Power of Moral Purpose: Sandler O’Neill & Partners in the Aftermath of September 11th, 2001. Organization Development Journal; Chesterland, 22(4), 69–81.

Galli, N., & Vealey, R. S. (2008). “Bouncing Back” from Adversity: Athletes’ Experiences of Resilience. The Sport Psychologist, 22(3), 316–335. https://doi.org/10.1123/tsp.22.3.316

Gallos, L. K., & Fefferman, N. H. (2015). Simple and efficient self-healing strategy for damaged complex networks. Physical Review E, 92(5), 052806. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.92.052806

Gamba, A., & Triantis, A. (2008). The Value of Financial Flexibility. The Journal of Finance, 63(5), 2263–2296. https://doi.org/10.1111/j.1540-6261.2008.01397.x

Garmezy, N., & Nuechterlein, K. (1972). Invulnerable Children - Fact and Fiction of Competence and Disadvantage. American Journal of Orthopsychiatry, 42(2), 328-+.

Gaudiot, J., & Najjar, W. (1990). Network Resilience: A Measure of Network Fault Tolerance. IEEE Transactions on Computers, 39(2), 174–181. https://doi.org/10.1109/12.45203

Ghemawat, P., & del Sol, P. (1998). Commitment versus Flexibility? California Management Review, 40(4), 26–42. https://doi.org/10.2307/41165963

Graber, R., Turner, R., & Madill, A. (2016). Best friends and better coping: Facilitating psychological resilience through boys’ and girls’ closest friendships. British Journal of Psychology, 107(2), 338–358. https://doi.org/10.1111/bjop.12135

Gralinski-Bakker, J. H., Hauser, S. T., Stott, C., Billings, R. L., & Allen, J. P. (2004). Markers of Resilience and Risk: Adult Lives in a Vulnerable Population. Research in Human Development, 1(4), 291–326. https://doi.org/10.1207/s15427617rhd0104\_4

Haywood, M., & Peck, H. (2003). Improving the management of supply chain vulnerability in UK aerospace manufacturing (卷 130). 发表於 Proceedings of the 1st EUROMA/POMs Conference.

Holling, C. S. (1973). Resilience and Stability of Ecological Systems. Annual Review of Ecology and Systematics, 4(1), 1–23. https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245

Jabareen, Y. (2013). Planning the resilient city: Concepts and strategies for coping with climate change and environmental risk. Cities, 31, 220–229. https://doi.org/10.1016/j.cities.2012.05.004

Kawachi, I. (1999). Social capital and community effects on population and individual health. 收入 N. E. Adler, M. Marmot, B. McEwen, & J. Stewart (编), Socioeconomic Status and Health in Industrial Nations: Social, Psychological, and Biological Pathways (卷 896, 页 120–130). New York: New York Acad Sciences.

Kobasa, S. C., Maddi, S. R., & Kahn, S. (1982). Hardiness and health: A prospective study. Journal of Personality and Social Psychology, 42(1), 168–177. https://doi.org/10.1037/0022-3514.42.1.168

Kong, X., & Xiang, Y. (2008). Creating the Resilient Supply Chain: The Role of Knowledge Management Resources. 收入 2008 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (页 1–4). https://doi.org/10.1109/WiCom.2008.1617

Kumpfer, K. L. (2002). Factors and Processes Contributing to Resilience. 收入 M. D. Glantz & J. L. Johnson (编), Resilience and Development: Positive Life Adaptations (页 179–224). Boston, MA: Springer US. https://doi.org/10.1007/0-306-47167-1\_9

Lee, H. L. (2004). The triple-A supply chain. Harvard Business Review, 82(10), 102–112, 157.

Lengnick-Hall, C. A., & Beck, T. E. (2005). Adaptive Fit Versus Robust Transformation: How Organizations Respond to Environmental Change. Journal of Management, 31(5), 738–757. https://doi.org/10.1177/0149206305279367

Lengnick-Hall, C. A., Beck, T. E., & Lengnick-Hall, M. L. (2011). Developing a capacity for organizational resilience through strategic human resource management. Human Resource Management Review, 21(3), 243–255. https://doi.org/10.1016/j.hrmr.2010.07.001

Liu, G., & Ji, C. (2009). Scalability of Network-failure Resilience: Analysis Using Multi-layer Probabilistic Graphical Models. IEEE/ACM Trans. Netw., 17(1), 319–331. https://doi.org/10.1109/TNET.2008.925944

Luthar, S. S., Cicchetti, D., & Becker, B. (2000). The Construct of Resilience: A Critical Evaluation and Guidelines for Future Work. Child Development, 71(3), 543–562. https://doi.org/10.1111/1467-8624.00164

Maeseele, P. A., Verleye, G., Stevens, I., & Speckhard, A. (2008). Psychosocial resilience in the face of a mediated terrorist threat. Media, War & Conflict, 1(1), 50–69. https://doi.org/10.1177/1750635207087625

McCann, J. (2004). Organizational Effectiveness: Changing Concepts for Changing Environments. HR. Human Resource Planning; New York, 27(1), 42–50.

McCubbin, H. I., & McCubbin, M. A. (1988). Typologies of Resilient Families: Emerging Roles of Social Class and Ethnicity. Family Relations, 37(3), 247–254. https://doi.org/10.2307/584557

Morgeson, F. P., & Hofmann, D. A. (1999). The Structure and Function of Collective Constructs: Implications for Multilevel Research and Theory Development. Academy of Management Review, 24(2), 249–265. https://doi.org/10.5465/amr.1999.1893935

Muckstadt, J. A., Murray, D. H., Rappold, J. A., & Collins, D. E. (2001). Guidelines for Collaborative Supply Chain System Design and Operation. Information Systems Frontiers, 3(4), 427–453. https://doi.org/10.1023/A:1012824820895

Palmer, C. (2008). A Theory of Risk and Resilience Factors in Military Families. Military Psychology, 20(3), 205–217. https://doi.org/10.1080/08995600802118858

Parker, H., & Ameen, K. (2018). The role of resilience capabilities in shaping how firms respond to disruptions. Journal of Business Research, 88, 535–541. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2017.12.022

Patterson, J. M. (2002). Integrating Family Resilience and Family Stress Theory. Journal of Marriage and Family, 64(2), 349–360. https://doi.org/10.1111/j.1741-3737.2002.00349.x

Pettit, T. J., Fiksel, J., & Croxton, K. L. (2010). ENSURING SUPPLY CHAIN RESILIENCE: DEVELOPMENT OF A CONCEPTUAL FRAMEWORK. Journal of Business Logistics, 31(1), 1–21. https://doi.org/10.1002/j.2158-1592.2010.tb00125.x

Riolli, L., & Savicki, V. (2003). Information system organizational resilience. Omega, 31(3), 227–233. https://doi.org/10.1016/S0305-0483(03)00023-9

Rudolph, J. W., & Repenning, N. P. (2002). Disaster Dynamics: Understanding the Role of Quantity in Organizational Collapse. Administrative Science Quarterly, 47(1), 1–30. https://doi.org/10.2307/3094889

Salles, R. M., & Marino, D. A. (2012). Strategies and Metric for Resilience in Computer Networks. Comput. J., 55(6), 728–739. https://doi.org/10.1093/comjnl/bxr110

Sampson, R. J., Raudenbush, S. W., & Earls, F. (1997). Neighborhoods and violent crime: A multilevel study of collective efficacy. Science, 277(5328), 918–924. https://doi.org/10.1126/science.277.5328.918

Sampson, Robert J., & Laub, J. H. (1992). Crime and Deviance in the Life Course. Annual Review of Sociology, 18, 63–84.

Sonn, C. C., & Fisher, A. T. (1998). Sense of community: Community resilient responses to oppression and change. Journal of Community Psychology, 26(5), 457–471. https://doi.org/10.1002/(SICI)1520-6629(199809)26:5<457::AID-JCOP5>3.3.CO;2-7

Sterbenz, J. P. G., Hutchison, D., Çetinkaya, E. K., Jabbar, A., Rohrer, J. P., Schöller, M., & Smith, P. (2010). Resilience and survivability in communication networks: Strategies, principles, and survey of disciplines. Computer Networks, 54(8), 1245–1265. https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.03.005

Tugade, M. M., & Fredrickson, B. L. (2004). Resilient individuals use positive emotions to bounce back from negative emotional experiences. Journal of Personality and Social Psychology, 86(2), 320–333. https://doi.org/10.1037/0022-3514.86.2.320

Walsh, F. (1996). The Concept of Family Resilience: Crisis and Challenge. Family Process, 35(3), 261–281. https://doi.org/10.1111/j.1545-5300.1996.00261.x

Zhang, W. J., & van Luttervelt, C. A. (2011). Toward a resilient manufacturing system. CIRP Annals, 60(1), 469–472. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.03.041