

# Quantitative Assessment of Resilience in Complex Systems

**Doctoral Thesis**

**Author(s):**

Tang, Junqing

**Publication date:**

2019

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000353417>

**Rights / license:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

DISS.-NO. ETH 25935

**QUANTITATIVE ASSESSMENT OF RESILIENCE IN  
COMPLEX SYSTEMS**

A dissertation submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES OF ETH ZÜRICH  
(Dr. sc. ETH Zürich)

presented by

Junqing Tang

M.Sc., Imperial College London & University College London

born on 18 June 1991

citizen of China

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. H.R. Heinemann, examiner

Prof. Dr. L.C. Tang, co-examiner

Prof. Dr. N. Chen, co-examiner

2019

## ABSTRACT

---

Complex systems, such as financial systems and infrastructure systems, are facing an increasing number of disruptions, either external (e.g., financial crisis and natural disasters) or internal (e.g., degradation, aging, and ill performance). Many previous works have dedicated to the question of how to measure the resilience in these complex systems. To date, system resilience can be assessed in various ways, i.e., qualitative or quantitative, summative or formative, and target-based or purpose-based. This thesis focuses on quantitative methods and makes contributions on filling research gaps and improving the up-to-date toolkits in three categories of resilience assessment tools, namely (1) Performance-based metrics; (2) Network-based approaches; And (3) Probability-based graphic models.

For performance-based metrics, critical system functions, such as tolerance thresholds for different level of degradation, are absent in the construction of these tools, and the metrics' applicability in complex performance is less developed. Therefore, Chapter 2 aims to develop a generic resilience metric for quantitative assessment based on system functions and test its strength in the complex performance of stock markets. The proposed metric satisfactorily characterized the markets' resilient behaviors and had comparative advantages throughout the analysis.

In network-based studies, one of the significant missing links in network resilience (specifically in temporal networks) is the relationship between the resilience of individual components (nodes or edges) and the dynamic interdependence of networks (dynamic changes in the topology of temporal networks). Thus, Chapter 3 and 4 was designed in a progressive manner where Chapter 3 acts as a pilot study, aiming to characterize individual resilience using complex network approach and explore the descriptive strength of multiple associated factors. Chapter 4 is a further study, aiming to develop a set of statistical models to identify individuals' resilient performance in a networked environment and perform in-depth analyses and forecasts. Taking London stock exchange as study objective, Chapter 3 found that the survivability resilience of individual stocks was correlated with node degree and node strength. This was further confirmed by Chapter 4, whose results showed that the survivability resilience could be described and approximated by degree-related centrality measures. In addition, the statistical models proposed in Chapter 4 offers an effective tool that can be used to predict different individual stock's resilient performance in the networked market.

Lastly, Chapter 5 proposes a hierarchical Bayesian network model with ontologically identified interdependence among resilience functions and system qualities. Based on current literature, the ontology-oriented Bayesian networks have been rarely applied to model system resilience, and the investigations on the dynamic resilience are still needed. Therefore, Chapter 5 aims to develop a probability-based graphic model to quantify the dynamic resilience. The chapter takes Beijing's road transportation system as a case study and studies the dynamic resilience of the system from 1997 to 2016 by fusing multi-source and heterogeneous urban data. The analysis found that Beijing's road system was not as resilient as expected, with the probability of being resilient between 50% and 70%. Moreover, the critical system qualities that mostly affect its dynamic resilience have been identified as well. The model proposed in this chapter is a promising tool for resilience assessments.

The main value of this thesis is to improve our understandings about how to effectively measure and quantify resilience in complex systems with complex performance, dynamic interdependence, massive system topology, and probability caused by uncertainties. The thesis enriches the state-of-art assessing methods in resilience research by exploring possible measures and methodologies in quantitative approaches. The specific findings of each chapter can be useful and heuristic for researchers, policy-makers, shareholders, and practitioners in the field. However, in the final chapter, the author has acknowledged some limitations and outlook of this thesis which can be addressed in future works.

Eine zunehmende Anzahl von Gefahren bedroht komplexe Systeme, beispielsweise Finanz- und Infrastruktursysteme. Die Gefahren sind einerseits extern, die sich beispielsweise als Naturgefahren oder Finanzkrisen zeigen, und andererseits intern in Form von Alterung oder Degradierung, usw. Eine große Anzahl früherer Forschungsarbeiten ging der Frage nach, wie sich die Resilienz derartiger Systeme quantifizieren lässt. Dabei entstand eine ganze Palette von Ansätzen, die sich mit Spannungsfeldern charakterisieren lassen: qualitativ oder quantitativ, summarisch oder systematisch, zielorientiert oder pragmatisch. Die vorliegende Dissertation greift die Herausforderung der quantitativen Methoden zur Resilienz Charakterisierung auf und bezweckt, Methoden in drei Bereichen zu verbessern: (1) Skalare Metriken zur Charakterisierung der Systemleistungsfähigkeit, (2) Netzwerk-Metriken, und (3) probabilistische Metriken, basierend auf Netzwerkmodellen.

Die wesentliche Lücke bei den skalaren Resilienzmetriken liegt darin, dass die meisten Methoden kritische Systemfunktionen, die in komplexen Systemen essenziell sind, vernachlässigen, womit ihre Anwendbarkeit für komplexe Systeme beschränkt ist. Kapitel zwei dieser Dissertation entwickelte eine generische Resilienzmetrik, die auf Systemfunktionen aufbaut. Eine kritische Beurteilung der entwickelten Metrik geschah anhand eines großen Datenbestandes über das Verhalten von Firmen in Aktienmärkten. Es zeigte sich, dass die entwickelte Metrik geeignet ist, um die dynamische Entwicklung der Resilienz eines großen Firmennetzwerks dynamisch zu charakterisieren.

Die dynamische Wechselwirkung zwischen der Resilienz eines einzelnen Systemelements und der Resilienz eines Gesamtsystems ist kaum untersucht. Dies gilt insbesondere für Fälle, in denen sich die Netzwerke und ihre Topologie dynamisch verändern. Kapitel drei und vier nahmen diese Herausforderung auf mit dem Ziel, die Resilienz eines einzelnen Systemelements quantitativ zu beschreiben und mit den Methoden der komplexen Netzwerktheorie mit der Systemebene zu verbinden (Kapitel 3). Kapitel vier entwickelte mehrere statistische Modelle, um die Resilienz-Leistungsfähigkeit eines einzelnen Systemelements in einer vernetzten Umgebung zu charakterisieren. Die Anwendung der Methoden auf einen Datenbestand der Londoner Aktienbörse ergab, dass die Überlebensfähigkeit eines Systemelements (Firma, charakterisiert durch Aktienkurs) mit dem Vernetzungsgrad – gemessen als Anzahl Verbindungen mit anderen Knoten – und der Stärke dieser Verbindungen korreliert. Die Studie ergaben im Weiteren, dass auch die sogenannte Zentralität, d. h. die Bedeutung eines individuellen Systemelements für das Gesamtsystem, eine gute Approximation für die Charakterisierung der Resilienz erlaubt.

Resilienz ist ein Verbundkonzept, das auch von bekannten Konzepten der Zuverlässigkeitstheorie abhängt. Kapitel fünf nahm die Herausforderung auf, den Beitrag verschiedenster Systemeigenschaften zur systemischen Resilienz mit einem ontologischen Modell zu beschreiben. Es zeigte sich, dass derartige Ontologie-Ansätze im Resilienz Bereich noch wenig entwickelt sind. Dabei ging es darum, das Ontologie-Netzwerk mit einem probabilistischen Graphenmodell (Bayes-Netzwerk) derart zu beschreiben, dass sich die dynamische Veränderung der System Resilienz charakterisieren lässt. Das Transportsystem von Beijing diente dazu, die dynamische Resilienz zwischen 1997 und 2016 zu untersuchen und zu charakterisieren. Einerseits zeigte sich, dass die Resilienz – gemessen mit probabilistischen Größen – lediglich zwischen 0.5 und 0.7 lag, und

andererseits ließen sich Systemeigenschaften identifizieren, welche für die Resilienz des Gesamtsystems kritisch sind.

Die vorliegende Dissertation leistet einen Beitrag, um die Resilienz von komplexen Systemen besser verstehen und charakterisieren zu können, wobei sich Systemeigenschaften wie Topologie, dynamische Abhängigkeiten und Unsicherheiten explizit berücksichtigen lassen. Die Arbeiten basieren auf mehreren quantitativen Werkzeugen, die eine systematische Analyse und Charakterisierung ermöglichen. Die Ergebnisse der Arbeit sind sowohl für die Forschung, als auch für Infrastruktur-Praktiker und Entscheidungsträger relevant. Die Dissertation schließt mit einer Synthese, in der auch offene Fragen und Herausforderungen dargestellt sind.