

Universität
Rostock



Traditio et Innovatio



Parametric Model Order Reduction of Miniaturized Energy Harvesting Modules

Dissertation to obtain the academic degree of

Doctor of Engineering (Dr.-Ing.)

from the Faculty of Computer Science and Electrical Engineering at the
University of Rostock

submitted by

Chengdong Yuan, born on the 10th of April, 1992, in Shanghai, China

Rostock, April 27, 2024

Abstract

Energy harvesting is a technique that carries the potential to provide a lifetime power supply to wireless sensors, and has attracted widespread attention in the last two decades. An energy harvester collects various types of ambient energy, e.g., solar, thermal, or vibration, and transforms them into electrical energy. With the development of numerical modeling techniques, performing the design and optimization processes of the energy harvesters in finite element method (FEM)-based software is state-of-the-art. Simulating these finite element (FE) models reduces the cost of fabricating prototypes, thereby speeding up the development cycle.

Conventionally, simulations of multi-physics energy harvesters are performed on a discrete FE grid whose size can easily exceed 100,000 degrees of freedom (DOF), i.e., using ordinary differential equations (ODEs), due to the complex structure of the harvester. Moreover, in the design optimization process, in order to investigate the impact of different design parameters on the performance of the energy harvesters, parametric studies are computed on the large-scale FE models. Both lead to an increased requirement for modern computers to have the capacity to handle large-scale engineering models. In addition, real-time simulation of an energy harvester within a system-level model is prohibitive if full models are used directly. Hence, reducing the model size and performing parametric studies at the reduced-order model (ROM) level is a cornerstone of efficient energy harvester modeling and simulation.

This thesis presents the application of mathematical model order reduction (MOR) and parametric model order reduction (pMOR) methods for the generation of accurate compact models of thermoelectric, piezoelectric, and electromagnetic energy harvesters. Differing from conventional non-parametric MOR approaches, e.g., Arnoldi algorithm, multivariate moment matching-, matrix interpolation (MI)-, and algebraic parameterization (AP)-based pMOR methods are used to construct a parametric reduced-order model (pROM), enabling the preservation of the predefined parameters, e.g., boundary conditions, material properties, or geometrical parameters, in symbolic form within a pROM and their adjustment within system-level simulations in order to design optimizations.

Furthermore, in the case study of the thermoelectric energy harvester model, the methodology of using the pROM results is introduced in order to optimize the substructure model. For stable ROM generation of piezoelectric energy harvester models, stability-preserving MOR methods are developed and combined with the MI-based pMOR method to construct stable pROMs. Finally, computational efficiency and the performance of both MI- and AP-based pMOR methods are investigated and compared. The results obtained in this thesis lead to the successful validation and adaptation of these pMOR methods for more realistic industrial FE energy harvester models. Appropriate scripts are developed to create pROMs automatically to handle the geometrical parameters.

Zusammenfassung

Energy Harvesting ist eine Technik, die das Potenzial hat, drahtlose Sensoren über ihre gesamte Lebensdauer mit Strom zu versorgen. Sie hat in den letzten zwei Jahrzehnten viel Aufmerksamkeit auf sich gezogen. Ein Energy Harvester sammelt verschiedene Arten von Umgebungsenergie, z.B. Licht-, Wärme- oder Vibrationsenergie, und wandelt sie in elektrische Energie um. Mit der Entwicklung numerischer Modellierungstechniken ist die Durchführung der Entwurfs- und Optimierungsprozesse von Energy Harvestern in Finite-Elemente-Methode-basierter Software Stand der Technik geworden. Die Simulation der Finite-Elemente-Modelle reduziert die Kosten für die Herstellung von Prototypen und beschleunigt so den Entwicklungszyklus.

Konventionell werden die Simulationen von FE-Modellen auf einem diskreten Gitter durchgeführt, dessen Größe aufgrund der komplexen Struktur leicht 100.000 Freiheitsgrad bzw. gewöhnliche Differentialgleichungen überschreiten kann. Darüber hinaus werden im Rahmen der Designoptimierung parametrische Studien an großen FE-Modellen durchgeführt, um die Auswirkungen verschiedener Designparameter auf die Leistung des Energy Harvesters zu untersuchen. Beides führt zu einem erhöhten Bedarf an modernen Computern, die große technische Modelle verarbeiten können. Zudem ist die Echtzeitsimulation des Energy Harvesters zusammen mit einer Schaltung auf Systemebene rechnerisch aufwendig, wenn vollständige Modelle direkt verwendet werden. Die Verkleinerung des Modells und die Durchführung parametrischer Studien von Modellen reduzierter Ordnung ist daher ein Meilenstein für eine effiziente Modellierung und Simulation von Energy Harvestern.

In dieser Arbeit wird die Anwendung von Methoden der mathematischen Modellordnungsreduktion (MOR) und der parametrischen Modellordnungsreduktion (pMOR) zur Generierung präziser kompakter Modelle von thermoelektrischen, piezoelektrischen und elektromagnetischen Energy Harvestern vorgestellt. Im Unterschied zu konventionellen nicht-parametrischen MOR-Ansätzen, z.B. dem Arnoldi-Algorithmus, werden multivariate Moment-Matching-, Matrix-Interpolations- (MI) und algebraische Parametrisierung (AP) basierte pMOR-Methoden verwendet, um ein parametrisches Modell reduzierter Ordnung (pROM) zu konstruieren. Dieses Vorgehen ermöglicht, die vordefinierten Parameter, z.B. Randbedingungen, Materialeigenschaften oder geometrische Parameter, in symbolischer Form innerhalb eines pROM zu erhalten und sie innerhalb von Simulationen auf Systemebene für Design-Optimierungen zu ersetzen.

Darüber hinaus stellen wir in der Fallstudie des thermoelektrischen Energy-Harvester-Modells eine Methodik vor, pROM-Ergebnisse zur weiteren Optimierung des FE-Substrukturmodells zu verwenden. Für die stabile ROM-Generierung der piezoelektrischen Energy-Harvester-Modelle werden stabilitätserhaltende MOR-Methoden entwickelt und mit der MI-basierten pMOR-Methode kombiniert, um stabile pROMs zu konstruieren. Schließlich

werden die Berechnungseffizienz und die Leistung der MI- und AP-basierten pMOR-Methoden untersucht und verglichen. Die in dieser Arbeit erzielten Ergebnisse ermöglichen eine erfolgreiche Validierung und Anpassung dieser pMOR-Methoden an realistische FE-Modelle von Energy Harvestern. Entsprechende Skripte werden entwickelt, um automatisch pROMs zur Behandlung der geometrischen Parameter zu erstellen.