

**Dimensionierung und Bewertung von
Tragwerken bei Unschärfe –
Lösung des inversen Problems mit Methoden der
explorativen Datenanalyse**

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

an der
Fakultät Bauingenieurwesen

der
Technischen Universität Dresden

eingereichte
DISSERTATION

von
Dipl.-Ing. Martin Liebscher
eingereicht am 6. Juni 2007

Gutachter
Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Möller
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Graf
Prof. Dr.-Ing. habil. Dietrich Hartmann

Kurzfassung und Thesen

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird eine neue Methode zur Bemessung von Tragwerken durch Lösung des inversen Problems unter Berücksichtigung von Daten- und Modellunschärfe vorgestellt. Ausgangspunkt sind unscharfe Entwurfsparameter des Entwurfsraums und A-priori-Tragwerksparameter. A-priori-Tragwerksparameter sind deterministisch oder unscharf, sie können während des Entwurfsprozesses nicht verändert werden. Alle unscharfen Parameter werden mit dem Unschärfemodell Fuzziness als Fuzzy-Größen modelliert. Zur Quantifizierung der Unschärfe der Entwurfsparameter wird der Support unter Berücksichtigung technologisch möglicher und wirtschaftlich sinnvoller Werte festgelegt. Die Abbildung der Fuzzy-Entwurfsparameter und der Fuzzy-A-priori-Tragwerksparameter auf Fuzzy-Ergebnisgrößen erfolgt mit der Fuzzy-Tragwerksanalyse unter Verwendung einer deterministischen Grundlösung. Als deterministische Grundlösung kann jedes beliebige nichtlineare Berechnungsmodell eingesetzt werden.

Durch die Fuzzy-Tragwerksanalyse erfolgt eine Abbildung von Punkten des Eingangsraums auf Punkte des Ergebnisraums. Die Auswertung von Entwurfsnebenbedingungen für alle berechneten Punkte des Ergebnisraums erlaubt die Identifikation zulässiger und nichtzulässiger Punkte im Ergebnis- und im Eingangsraum. Die zulässigen Punkte des Eingangsraums werden mit Clusteranalyseverfahren untersucht. Räumliche Strukturen im Eingangsraum werden aufgedeckt. Aus ihnen werden Entwurfsteilräume abgeleitet. Mit dem Übergang von einer Punktmenge zu stetigen, zusammenhängenden Mengen, den Entwurfsteilräumen, gelingt es, Fuzzy-Entwurfsvektoren zu generieren. Fuzzy-Entwurfsvektoren repräsentieren unscharfe Entwurfsvarianten. Durch Verifikation dieser Fuzzy-Entwurfsvektoren mit der Fuzzy-Tragwerksanalyse können diese auf Zulässigkeit geprüft werden.

Die Auswahl eines optimalen unscharfen Tragwerksentwurfs aus der diskreten Menge zulässiger unscharfer Tragwerksentwürfe wird als diskretes Optimierungsproblem aufgefaßt. Auswahlkriterien sind "Optimaler Entwurf" (Kriterium I), "Robuster Tragwerksentwurf" (Kriterium II) und "Großer Entscheidungsfreiraum" (Kriterium III). Das Kriterium I korrespondiert mit klassischen Optimierungszielen wie minimalen Kosten, minimaler Masse oder maximaler Schlankheit als ästhetischer Anforderung. Die Robustheit eines unscharfen Tragwerksentwurfs wird durch das Kriterium II bewertet. Sie wird durch das Verhältnis der Unschärfe der Eingangsgrößen zur Unschärfe der Ergebnisgrößen oder durch den Abstand der Fuzzy-Ergebnisgrößen von den Entwurfsnebenbedingungen definiert. Die Motivation für das dritte Kriterium ist ein möglichst großer Entscheidungsfreiraum für den Tragwerksplaner, der durch einen maximalen Entwurfsteilraum entsteht. Die Zielfunktion des Gesamtoptimierungsproblems wird durch Kombination der Kriterien I, II, III gebildet. Die einzelnen Kriterien werden in der Zielfunktion durch Wichtungsfaktoren bewertet.

Die Methode zur Clusteranalyse von Punktmengen wurde so erweitert, daß die Klassifikation unscharfer Tragwerksprozesse möglich wird. Durch Klassifikation wird der vorliegende unscharfe Tragwerksprozeß unter den Gesichtspunkten Homogenität und Heterogenität in Prozeßgruppen untergliedert. Jede Prozeßgruppe wird durch einen repräsentativen Prozeß repräsentiert. Verzweigungspunkte im Tragwerksprozeß, die qualitativ unterschiedliches mechanisches Verhalten wie

Stabilitätsversagen oder Entstehen neuer Versagenszonen markieren, werden durch die Klassifikation sichtbar. Die Dimensionierung von Tragwerken wird damit auf den Zeitbereich erweitert.

Zur Effizienzsteigerung der Fuzzy-Tragwerksanalyse werden auf neuronalen Netzen basierende Antwortflächenverfahren eingesetzt. Die neuronalen Netze sind sowohl bei der initialen Abbildung der Fuzzy-Entwurfsparameter und der Fuzzy-A-priori-Tragwerksparameter auf die Fuzzy-Ergebnisgrößen als auch bei der Verifikation der Fuzzy-Entwurfsvektoren einsetzbar. Damit wird die Lösung des inversen Problems auch für sehr komplexe Tragwerke mit nichtlinearer Charakteristik möglich.

Thesen

1. Ein Tragwerk wird durch Tragwerksparameter beschrieben. Diese sind Entwurfsparameter, welche im Entwurfsprozeß festgelegt werden sollen, und A-priori-Tragwerksparameter, die während des Entwurfsprozesses nicht verändert werden können.
2. Entwurfsparameter und A-priori-Tragwerksparameter können deterministisch oder unscharf sein. Alle Parameter werden mit dem Unschärfemodell Fuzziness modelliert. Die Unschärfe der Entwurfsparameter wird unter Berücksichtigung technologischer und wirtschaftlicher Aspekte festgelegt.
3. Die Abbildung der Fuzzy-Entwurfsparameter und der Fuzzy-A-priori-Tragwerksparameter auf Fuzzy-Ergebnisgrößen erfolgt mit der Fuzzy-Tragwerksanalyse unter Verwendung einer deterministischen Grundlösung. Als deterministische Grundlösung kann jedes beliebige nichtlineare Berechnungsmodell eingesetzt werden.
4. Durch die Fuzzy-Tragwerksanalyse erfolgt eine Abbildung von Punkten des Eingangsraums auf Punkte des Ergebnisraums. Die Auswertung von Entwurfsnebenbedingungen für alle berechneten Punkte des Ergebnisraums erlaubt die Identifikation zulässiger und nichtzulässiger Punkte im Ergebnis- und im Eingangsraum.
5. Die zulässigen Punkte des Eingangsraums werden mit Clusteranalyseverfahren untersucht. Strukturen im Eingangsraum werden aufgedeckt. Aus ihnen werden Entwurfsteilräume abgeleitet.
6. Mit dem Übergang von einer Punktmenge zu stetigen, zusammenhängenden Mengen, den Entwurfsteilräumen, gelingt es, Fuzzy-Entwurfsvektoren zu generieren. Fuzzy-Entwurfsvektoren repräsentieren unscharfe Entwurfsvarianten.
7. Durch Verifikation dieser Fuzzy-Entwurfsvektoren mit der Fuzzy-Tragwerksanalyse können diese auf Zulässigkeit geprüft werden.
8. Die Auswahl eines optimalen unscharfen Tragwerksentwurfs aus der diskreten Menge zulässiger unscharfer Tragwerksentwürfe wird als diskretes Optimierungsproblem aufgefaßt.
9. Bei nichtstationären Problemen müssen Methoden zur Bewertung des Tragwerksverhaltens auf den Zeitbereich erweitert werden.
10. Erweiterte Clusterverfahren erlauben die Unterteilung (Klassifikation) unscharfer Tragwerksprozesse unter den Gesichtspunkten Homogenität und Heterogenität in Prozeßgruppen. Jede Prozeßgruppe wird durch einen repräsentativen Prozeß repräsentiert.
11. Verzweigungspunkte im Tragwerksprozeß markieren ein qualitativ unterschiedliches mechanisches Verhalten wie Stabilitätsversagen oder Entstehen neuer Versagenszonen. Die Detektion von Verzweigungspunkten wird ebenfalls durch fortentwickelte Clusterverfahren ermöglicht.

Design and Assessment of Structures Under Uncertainty – Solving the Inverse Problem with Methods of the Explorative Data Analysis

Summary

A novel method for designing structures is presented in this thesis. As its kernel feature, the inverse problem is solved under consideration of data uncertainty and model uncertainty. Uncertain design parameters in the design space and prior structural parameters form the initial basis. Prior structural parameters are deterministic or uncertain; they cannot be modified within the design process. All uncertain parameters are modeled as fuzzy quantities. This is realized with the aid of the uncertainty model *fuzziness*. The uncertainty of design parameters is quantified under consideration of possible and reasonable values for an economical and technological realization. The mapping of the fuzzy design parameters and the fuzzy prior structural parameters to the fuzzy result quantities is carried out by means of a fuzzy structural analysis in conjunction with a deterministic fundamental solution. Any arbitrary nonlinear computational model can be implemented as deterministic fundamental solution.

Fuzzy structural analysis yields a point-to-point mapping that associates points in the design space with points in the result space. The evaluation of the design constraints for all computed points in the result space allows the identification of permissible and non-permissible points in the result space as well as in the design space. The permissible points in the design space are investigated with the aid of cluster analysis procedures. Hyper-spatial structures in the design space are discovered from which design subspaces are deduced. This transition from a discrete point set to continuous connected sets, which are the design subspaces, provides the basis for generating fuzzy design vectors. Fuzzy design vectors represent uncertain design variants. A subsequent verification of the fuzzy design vectors in a fuzzy structural analysis provides information about their permissibility.

The selection of an optimum uncertain structural design from the discrete set of permissible uncertain design variants is considered as a discrete optimization problem. Selection criteria are: "Optimum Design" (Criterion I), "Robust Structural Design" (Criterion II), and "Comfortable Decision Margins" (Criterion III). Criterion I corresponds with traditional optimization objectives such as minimum cost, minimum mass, or maximum slenderness as a requirement of esthetics. The robustness of an uncertain structural design is assessed with the aid of Criterion II. It is defined either as the ratio of the uncertainty of the input quantities to the uncertainty of the result quantities or as the distance between the fuzzy result quantities and the design constraints. The motivation for Criterion III is to provide the construction engineer with comfortable decision margins, which are obtained with a maximum extend of the design subspace. The objective function of the overall optimization problem is formulated as a combination of Criteria I, II, and III. The importance of the individual criteria is expressed by weighting factors in the objective function.

The method of cluster analysis of point sets has been extended to enable the classification of uncertain structural processes. This classification subdivides the original uncertain structural process into particular process groups utilizing the aspects of homogeneity and heterogeneity. Each process group is characterized by a representative process. Branching points—also often considered as bifurcation points—in the structural process, which may characterize, for instance, the initialization of different mechanical behavior modes, bifurcation leading to stability collapse, or the development of new failure zones, become visible in the result of the classification. The dimensioning of structures is extended to the time domain.

Response surface methods based on neural networks are employed to improve the numerical efficiency of fuzzy structural analysis. The neural networks can be utilized in the initial mapping of fuzzy design parameters and fuzzy prior structural parameters to fuzzy result quantities as well as in the verification of fuzzy design vectors. This allows the solution of the inverse problem in case of complex nonlinear structures.

Theses

1. A structure is described by structural parameters. These are design parameters which are specified within the design process and prior structural parameters which cannot be modified within the design process.
2. Design parameters and prior structural parameters may be deterministic or uncertain. All parameters are modeled with the uncertainty model fuzziness. The uncertainty of design parameters is quantified under consideration of possible and reasonable values for an economical and technological realization.
3. The mapping of the fuzzy design parameters and the fuzzy prior structural parameters to the fuzzy result quantities is carried out by means of a fuzzy structural analysis in conjunction with a deterministic fundamental solution. Any arbitrary nonlinear computational model can be implemented as deterministic fundamental solution.
4. Fuzzy structural analysis yields a point-to-point mapping that associates points in the design space with points in the result space. The evaluation of the design constraints for all computed points in the result space allows the identification of permissible and non-permissible points in the result space as well as in the design space.
5. The permissible points in the design space are investigated with the aid of cluster analysis procedures. Hyper-spatial structures in the design space are discovered from which design subspaces are deduced.
6. This transition from a discrete point set to continuous connected sets, which are the design subspaces, provides the basis for generating fuzzy design vectors. Fuzzy design vectors represent uncertain design variants.
7. A subsequent verification of the fuzzy design vectors in a fuzzy structural analysis provides information about their permissibility.
8. The selection of an optimum uncertain structural design from the discrete set of permissible uncertain design variants is considered as a discrete optimization problem.
9. In order to allow the assessment of non-stationary structural behavior, methods have to be extended for analysis in the time domain.
10. The extended methods of cluster analysis enable the subdivision of the original uncertain structural process into particular process groups utilizing the aspects of homogeneity and heterogeneity. Each process group is characterized by a representative process.
11. Branching points in the structural process, which may characterize, for instance, the initialization of different mechanical behavior modes, bifurcation leading to stability collapse, or the development of new failure zones, become visible in the result of the classification. The dimensioning of structures is extended to the time domain.