
Abstract

This thesis presents the development, validation, and application of methods for the estimation of wing loads, aeroelasticity and mass properties in conceptual design. In advanced design studies, designers rely typically on handbook methods and simple physics-based approaches. Such methods are common due to their flexibility, simplicity, and low computational costs. Nevertheless, when facing new configurations or technologies with expected significant aeroelastic effects, not many simple conceptual design methods are available. This work closes this gap by providing the conceptual aircraft designer with three novel methods: 1) a simple physics-based wing weight estimation approach, 2) a set of accurate wing Weight Estimating Relationships (WERs), and 3) a semi-empirical wing flutter speed estimation method. All methods are validated extensively with actual aircraft data and higher-fidelity results.

The physics-based wing weight estimation method is semi-analytical making use of simple numerical extensions. The complexity is kept as low as possible while still capturing most effects of interest. Static aeroelastic effects on the lift distribution, gust response, aeroelastic divergence, and aileron reversal are accounted for. The novel wing Weight Estimating Relationships (WERs) developed are of the typical form found in conceptual design handbooks. Nevertheless, instead of using sparse historical data, the WERs are developed from space filling design of experiments performed with the physics-based method. Validation with more than 25 conventional aircraft shows a standard deviation about 50% lower than comparable methods. Both the physics-based method and the WERs developed are also applicable to advanced concepts such as: forward swept wing, high aspect ratio, strut-braced wing, tailless, and twin fuselage. The semi-empirical wing flutter estimation approach proposed consists of simple analytical equations developed from first principles and dimensional analysis of the flutter equations. Empirical regressions of several higher-fidelity results are applied. The method is useful in quickly estimating the wing flutter speed of new concepts.

All methods developed are applied in the conceptual design study of a next-generation short-range aircraft with entry into service in 2045. Several concepts are evaluated including: conventional tube and wing, advanced tube and wing with high aspect ratio and laminar flow, forward swept wing, strut-braced wing, forward swept strut-braced wing, tailless, and twin-fuselage. The developed methods allow the fast initial sizing and comparison of several advanced concepts and technologies. Detailed concept development and documentation is presented showing important characteristics of the advanced concepts and technologies.

Kurzfassung

Diese Dissertation stellt die Entwicklung, Validierung und Anwendung von Verfahren zur Abschätzung von Lasten, Aeroelastik und Gewicht von Tragflügeln im Konzeptentwurf dar. In Entwurfsstudien neuer Flugzeugen werden typischerweise Handbuchverfahren und vereinfachte, auf Physik basierende Methoden angewendet. Solche Verfahren sind üblich wegen ihrer Flexibilität, Einfachheit und niedrigen Rechenkosten. Trotzdem, wenn konfrontiert mit neuen Konfigurationen oder Technologien mit voraussichtlich, ausgeprägten, aeroelastischen Effekten, stehen nicht viele, einfache Konzeptentwurfsverfahren zur Verfügung. Diese Arbeit versucht diese Lücke durch die Bereitstellung von drei neuartigen Verfahren für den Konzeptentwurfsingenieur zu schließen: 1) ein einfaches, physikbasiertes Verfahren zur Flügelmassenabschätzung, 2) ein Satz genauer, parametrischer Gleichungen zur Flügelmassenabschätzung, und 3) ein semiempirisches Verfahren zur Abschätzung der Flattergeschwindigkeit von Tragflügeln. Alle Verfahren werden umfangreich mit Flugzeugdaten oder mit Verfahren höherer Genauigkeit validiert.

Das physikbasierte Flügelmassenabschätzungsverfahren ist semi-analytisch mit einfachen numerischen Erweiterungen. Die Komplexität wird so niedrig wie möglich gehalten, dennoch werden die relevanten Effekte von Interesse abgedeckt. Statische aeroelastische Effekte auf die Auftriebsverteilung, Böenantwort, aeroelastische Divergenz und Querruderumkehr werden berücksichtigt. Die entwickelten Gleichungen zur Abschätzung von Flügelmassen sind in der typischen Form anderer Handbuchgleichungen der Literatur. Statt mit dünnen, historischen Daten, werden die Massenabschätzungsgleichungen mit Daten aus einer Versuchsplanung mit dem physikbasierten Verfahren erstellt. Eine Validierung mit mehr als 25 konventionellen Transportflugzeugen zeigt eine Standardabweichung um ca. 50% geringer als vergleichbare Methoden. Sowohl das physikbasierte Verfahren als auch die parametrischen Gleichungen zur Massenabschätzung sind auch für unkonventionelle Konzepte anwendbar, wie z.B. vorwärts gepfeilter Flügel, hoch gestreckter Flügel, abgestrebter Flügel, schwanzlose Flugzeuge und Doppelrumpfkongzepte. Das entwickelte, semiempirische Flatterabschätzungsverfahren besteht aus einfachen, analytischen Gleichungen, die auf Grundprinzipien und auf einer Dimensionsanalyse der Flattergleichungen basieren. Empirische Regressionen von Ergebnissen aus Verfahren höherer Genauigkeit werden angewendet. Die Methode ist nützlich für die schnelle Abschätzung der Flattergeschwindigkeit neuer Konzepte.

Alle entwickelten Verfahren werden in der Konzeptentwurfstudie eines neuen Kurzstreckenflugzeugs für das Jahr 2045 angewendet. Verschiedene Konzepte werden ausgewertet: konventioneller Flügel, hoch gestreckter Flügel mit

Laminarströmung, vorwärts gepfeilter Flügel, abgestrepter Flügel, vorwärts gepfeilter und abgestrepter Flügel, schwanzloses Flugzeug und Doppelrumpfkonzept. Die entwickelten Methoden ermöglichen eine schnelle, erste Dimensionierung und den Vergleich vieler Konfigurationen und Technologien. Ausgearbeitete Vorentwürfe und ihre Dokumentation zeigen wichtigen Eigenschaften der neuen Konzepten und Technologien.