

[Διάγνωση βλαβών σε πληθυσμό ονομαστικά όμοιων δοκών από σύνθετα υλικά με προηγμένες στοχαστικές μεθόδους]

[Στεφανόπουλος Απόλλωνας]

Περίληψη

Η παρούσα εργασία στοχεύει στην διάγνωση βλαβών περιλαμβάνοντας την ανίχνευση, τον καθορισμό θέσης και μεγέθους, σε ένα πληθυσμό ονομαστικά όμοιων δοκών από σύνθετα υλικά μέσω προηγμένων στοχαστικών μεθόδων ανάλυσης σημάτων ταλάντωσης. Για τον σκοπό αυτό, τα χαρακτηριστικά κάθε δοκού (γεωμετρία, υλικά) η οποία τυπικά αντιπροσωπεύει τμήμα αεροκατασκευής, προσομοιώνονται με την χρήση ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, στο λογισμικό ANSYS. Η κατασκευαστική αβεβαιότητα εξαιτίας της χρήσης σύνθετων υλικών προσομοιώνεται γεωμετρικά, με μεταβολή του πάχους της δοκού (20% εύρος μεταβολής από το ονομαστικό πάχος) ενώ οι συνθήκες λειτουργίας κατά την πτήση προσομοιώνονται με διέγερση τύπου τύρβης περιλαμβάνοντας και την επίδραση της διέγερσης που προκύπτει εξαιτίας περιστρεφόμενων τμημάτων. Οι εξεταζόμενες βλάβες τύπου διαμπερούς ρωγμής πλάτους 1 mm, υλοποιούνται σε δύο διαφορετικές θέσεις γεωμετρικά (αφαίρεση υλικού) ενώ για κάθε θέση εξετάζονται 3 διαφορετικά μεγέθη (0.6%, 2%, 3.3% του μήκους). Τα συγκεκριμένα μεγέθη βλάβης επιφέρουν μικρές μεταβολές στα υγιή δυναμικά χαρακτηριστικά, οι οποίες επικαλύπτονται σημαντικά, όταν εξετάζονται υπό την κατασκευαστική αβεβαιότητα που προκύπτει στα δυναμικά χαρακτηριστικά του εξεταζόμενου πληθυσμού, θέτοντας ως πρόκληση την εύρωστη διάγνωση τους στην παρούσα εργασία. Επιπρόσθετα, οι συνθήκες διέγερσης θεωρούνται μη-μετρήσιμες οδηγώντας στην αποκλειστική χρήση σημάτων απόκρισης για την εκτίμηση της Συνάρτησης Μετάδοσης (Transmittance Function), η οποία χρησιμοποιείται ως χαρακτηριστική ποσότητα κατά την διάγνωση, με σκοπό την εξάλειψη της επίδρασης της διέγερσης. Συγκεκριμένα η εκτίμηση και η δυναμική αναγνώριση πραγματοποιούνται με μη-παραμετρικά (Welch) και παραμετρικά μοντέλα (ARX-OLS, IV). Τα πλήρη ή μειωμένα, μέσω της Ανάλυσης Κύριων Συνιστωσών (PCA), διανύσματα των παραμετρικών μοντέλων χρησιμοποιούνται κατά την διάγνωση σε πλαίσιο εργασίας τύπου Πολλαπλών Μοντέλων (Multiple Models), το οποίο εξασφαλίζει την ευρωστία στην κατασκευαστική αβεβαιότητα. Η αξιολόγηση και σύγκριση των δύο εκτιμητριών ως προς την διάγνωση, πραγματοποιείται μέσω 114 Monte-Carlo προσομοιώσεων και αρκετές περιστροφές (rotations) του σετ εκπαίδευσης για την εξασφάλιση της στατιστικής αξιοπιστίας των ευρημάτων. Τέλος τα αποτελέσματα της ανίχνευσης παρουσιάζονται με την χρήση καμπυλών ROC επιδεικνύοντας εξαιρετική απόδοση και για τις δύο εκτιμητρίες (100% επιτυχής ανίχνευση για όλες τις βλάβες σε 0% ποσοστό ψευδοσυναγεμύων). Τα αποτελέσματα του καθορισμού της θέσης και του μεγέθους παρουσιάζονται με την χρήση Confusion Matrices τα οποία κρίνονται πολύ

καλά, σε επίπεδο ακρίβειας, στον καθορισμό της θέσης (82.9% για την ARX-OLS, 82.5% για την IV) όσο και για τον καθορισμό του μεγέθους (72.6% για την ARX-OLS, 73.8% για την IV) της βλαβών.

Λέξεις κλειδιά

[διάγνωση βλαβών σε πληθυσμό, σύνθετες κατασκευές, σήματα ταλάντωσης, Συνάρτηση Μετάδοσης, Στατιστικές Μέθοδοι Χρονοσειρών ανίχνευση, καθορισμός θέσης και μεγέθους]

Abstract

[Damage detection in a population of similar composite beams using stochastic methods]

[Stephanopoulos Apollonas]

The present work aims at damage diagnosis including the detection, location and size characterization, in a population of nominally identical beams made of composite materials through advanced vibration-based stochastic methods. For this purpose, the characteristics of each beam (geometry, materials), which typically represents a part of an aircraft structure, are simulated using a finite element model in ANSYS software. The manufacturing uncertainty due to the use of composite materials is geometrically simulated by varying the beam thickness ($\pm 20\%$ range of variation from the nominal thickness), while the operating conditions during flight are simulated by turbulence-like excitation, including the effects of excitation arising from rotating components. The examined damages of through-the-thickness cracks with a width of 1 mm are geometrically (material removal) implemented in two different positions, and for each location, three different sizes are considered (0.6%, 2%, 3.3% of length). These specific damage sizes result in small variations in the healthy dynamic characteristics, which are significantly overlapped when examined under the manufacturing uncertainty present in the dynamic characteristics of the examined population, posing a challenge for their robust diagnosis in this work. Additionally, the excitation conditions are considered non-measurable, leading to the exclusive use of response signals for estimating the Transmittance Function, which is used as a characteristic quantity in diagnosis to eliminate the effects of the excitation. Specifically, the estimation and dynamic identification are carried out with non-parametric (Welch) and parametric models (ARX-OLS, IV). The full or reduced, via Principal Component Analysis (PCA), model parameter vectors are used in diagnosis within a Multiple Models framework, which ensures robustness to manufacturing uncertainty. The evaluation and comparison of the two estimators regarding diagnosis are performed through 114 Monte Carlo simulations and several rotations of the training set to ensure the statistical reliability of the findings. Finally, the detection results are presented using ROC curves, demonstrating excellent performance for both estimators (100% correct detection rate for all damages at 0% false alarms rate). The results of location and size classification are presented using Confusion Matrices, which are judged very well in terms of accuracy, for both location (82.9% for ARX-OLS, 82.5% for IV) and size (72.6% for ARX-OLS, 73.8% for IV) classification of the damages.

Keywords

[Population-based damage diagnosis, composite structures, vibration signals, Transmittance Function, Statistical Time Series Methods, detection, location and size classification]