



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών
Μονάδα Παράλληλης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής &
Βελτιστοποίησης

Συζυγείς Μέθοδοι για Τυρβώδεις Ροές, με Εφαρμογή στη
Βελτιστοποίηση Μορφής ή Τοπολογίας και στο Στιβαρό
Σχεδιασμό

Διδακτορική Διατριβή

Ευάγγελος Μ. Παπουτσής-Κιαχαγιάς

Επιβλέπων : Κυριάκος Χ. Γιαννάκογλου
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, 2013

Η παρούσα διδακτορική διατριβή ασχολείται με τη μαθηματική ανάπτυξη, τον προγραμματισμό και την πιστοποίηση συζυγών (adjoint) μεθόδων για τον υπολογισμό (πρώτης και υψηλότερων τάξεων) παραγώγων ευαισθησίας συναρτήσεων-στόχων στους τομείς της αερο/υδροδυναμικής καθώς και την ένταξη των τελευταίων σε αλγόριθμους βελτιστοποίησης. Παρουσιάζονται μέθοδοι που βασίζονται στη συνεχή και τη διακριτή συζυγή τεχνική, με έμφαση στην πρώτη. Εξετάζονται ακαδημαϊκά και βιομηχανικά προβλήματα βελτιστοποίησης μορφής (shape optimization) με εφαρμογή, μεταξύ άλλων, στη βελτιστοποίηση επιβατικών αυτοκινήτων και στροβιλομηχανών, σε προβλήματα τοπολογίας (topology optimization) καθώς και σε προβλήματα βελτιστοποίησης σε αβέβαιο περιβάλλον (στιβαρός σχεδιασμός, robust design).

Ως προς τη βελτιστοποίηση μορφής στη μηχανική των ρευστών, διερευνάται η σημασία της παραγωγής μοντέλων τύρβης, τόσο χαμηλών όσο και υψηλών αριθμών Reynolds, για χρονικά μόνιμες, ασυμπίεστες ροές. Συγκεκριμένα, επεκτείνεται η συνεχής συζυγής μέθοδος ώστε να καλύπτει ροές που διέπονται από το μοντέλο τύρβης k-ε χαμηλών αριθμών Reynolds των Launder-Sharma. Δίνεται έμφαση στην επίδραση που θα είχε ενδεχόμενη παράλειψη της παραγωγής των εξισώσεων του μοντέλου (η ευρύτητα χρησιμοποιούμενη παραδοχή της "παγωμένης τυρβώδους συνεκτικότητας") στη διαδικασία της βελτιστοποίησης μορφής. Επιπρόσθετα, αναπτύσσεται και υλοποιείται η συνεχής συζυγής μέθοδος για το μοντέλο υψηλών αριθμών Reynolds των Spalart-Allmaras, για πρώτη φορά στη βιβλιογραφία. Τέλος, χρησιμοποιείται η εικονική εξίσωση για τον υπολογισμό αποστάσεων από τα στερεά τοιχώματα και αναπτύσσεται η συζυγής της, ώστε η τελική μορφή των παραγώγων ευαισθησίας να καταστεί ανεξάρτητη των παραγώγων των αποστάσεων ως προς τις μεταβλητές σχεδιασμού.

Σημαντικό κομμάτι της διατριβής αποτελεί η μετέπειτα εφαρμογή των μεθόδων αυτών και του

αναπτυχθέντος λογισμικού σε βιομηχανικά προβλήματα βελτιστοποίησης μορφής. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η ελαχιστοποίηση της οπισθέλκουσας σε πρωτότυπο αυτοκίνητο ευρωπαϊκής αυτοκινητοβιομηχανίας χρησιμοποιώντας τις RANS (Reynolds-Averaged Navier Stokes) εξισώσεις με το μοντέλο τύρβης χαμηλών αριθμών Reynolds των Spalart-Allmaras, το αναπτυχθέν λογισμικό για την εύρεση παραγώγων ευαισθησίας και τεχνικές παραμόρφωσης πλέγματος. Επιπρόσθετα, το αναπτυχθέν λογισμικό χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό των αεροδυναμικά ευαίσθητων περιοχών (χάραξη χαρτών ευαισθησίας) ως προς τον θόρυβο που γίνεται αντιληπτός από τον οδηγό. Επιπλέον, ακολουθώντας τη συνήθη προσέγγιση της βιομηχανίας για την ανάλυση της ροής χρησιμοποιώντας το DES (Detached Eddy Simulation) μοντέλο τύρβης των Spalart-Allmaras σε συνδυασμό με συναρτήσεις τοιχώματος, προτείνεται διαδικασία για τη χάραξη χαρτών ευαισθησίας ως προς την ασκούμενη άνωση στον πίσω άξονα του οχήματος, χρησιμοποιώντας τη συνεχή συζυγή τεχνική. Έμφαση δίνεται στη μείωση του υπολογιστικού κόστους και της απαιτούμενης μνήμης ώστε η διαδικασία να ολοκληρώνεται σε χρόνο αποδεκτό για τη βιομηχανία. Παράλληλα, αναπτύσσονται δυο νέοι συζευγμένοι αλγόριθμοι επίλυσης των συζυγών εξισώσεων με στόχο την επιτάχυνση της σύγκλισης και την αύξηση της ευστάθειας του συζυγούς επιλύτη σε βιομηχανικές εφαρμογές.

Το αναπτυχθέν λογισμικό εφαρμόζεται επίσης για τον σχεδιασμό δρομέα υδροστροβίλου τύπου Francis. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται η συνεχής συζυγής μέθοδος για τον υπολογισμό παραγώγων ευαισθησίας ως προς την κάθετη μετατόπιση των οριακών κόμβων του πλέγματος για διάφορες συναρτήσεις κόστους που περιλαμβάνουν: επιθυμητές κατανομές ταχύτητας στην έξοδο του δρομέα, αλλαγή του υδραυλικού ύψους ώστε να ταιριάζει με το επιθυμητό σημείο λειτουργίας και εξάλειψη ενδεχόμενης σπηλαιώσης στην επιφάνεια του δρομέα.

Ως προς τη βελτιστοποίηση τοπολογίας, η οποία οδηγεί στον αρχικό σχεδιασμό αεροδυναμικών μορφών υπολογίζοντας τη βέλτιστη κατανομή ενός τεχνητού πεδίου πορώδους, η παρούσα διατριβή επεκτείνει το μαθηματικό υπόβαθρο της συνεχούς συζυγούς μεθόδου ώστε να καλύπτει 3D ασυμπίεστες ροές με το μοντέλο υψηλών αριθμών Reynolds των Spalart-Allmaras, σε συνδυασμό με περιορισμούς που χρησιμοποιούνται συχνά από τη βιομηχανία. Το αναπτυχθέν λογισμικό εφαρμόζεται στη βελτιστοποίηση τοπολογίας ενός αγωγού κλιματισμού επιβατικού αυτοκινήτου και στον σχεδιασμό ενός θαλάμου plenum οχήματος πανεπιστημιακού διαγωνισμού ταχύτητας.

Παρά τη χρήση των χαμηλού κόστους συζυγών μεθόδων, η διαδικασία της βελτιστοποίησης μπορεί να αποδειχθεί χρονοβόρα λόγω του αριθμού των απαραίτητων κύκλων βελτιστοποίησης για τη σύγκλιση του αλγορίθμου. Στοχεύοντας στη μείωση του συνολικού χρόνου βελτιστοποίησης/σχεδιασμού, αναπτύσσεται και εφαρμόζεται για πρώτη φορά στη βιβλιογραφία της βελτιστοποίησης τοπολογίας η μέθοδος Newton με αποκοπή (truncated Newton). Αυτή χρησιμοποιεί προβολές του Εσσιανού μητρώου σε διανύσματα για να προσεγγίσει τη δεύτερης τάξης διόρθωση των μεταβλητών σχεδιασμού. Τα ανωτέρω γινόμενα υπολογίζονται μέσω συνδυασμού της συνεχούς συζυγούς μεθόδου και της μεθόδου ευθείας διαφορίσης.

Ως στιβαρός σχεδιασμός ορίζεται η διαδικασία σχεδιασμού/βελτιστοποίησης αεροδυναμικών σχημάτων σε ένα εύρος συνθηκών λειτουργίας. Για την ποσοτικοποίηση της συμπεριφοράς ενός αεροδυναμικού σχήματος σε εύρος συνθηκών λειτουργίας απαιτείται ο υπολογισμός της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης συναρτήσεων-στόχων. Στη παρούσα διατριβή χρησιμοποιείται η δεύτερης τάξης μέθοδος των στατιστικών ροπών (Second-Order Second-

Moment method) που απαιτεί τον υπολογισμό παραγώγων ευαισθησίας της συνάρτησης-στόχου, πρώτης και δεύτερης τάξης ως προς τις αβέβαιες μεταβλητές. Η ελαχιστοποίηση της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης της συνάρτησης-στόχου με αιτιοκρατικές μεθόδους απαιτεί τον υπολογισμό μέχρι και τρίτης τάξης παραγώγων ευαισθησίας. Στην παρούσα διατριβή παρουσιάζεται ένας αποδοτικός συνδυασμός της μεθόδου ευθείας διαφόρισης και της συζυγούς τεχνικής για τον υπολογισμό των ανωτέρω παραγώγων.

Λέξεις κλειδιά: Υπολογιστική Ρευστοδυναμική, Συνεχής και Διακριτή Συζυγής Μέθοδος, Συζυγή Μοντέλα Τύρβης, Βελτιστοποίηση Μορφής και Τοπολογίας, Μέθοδοι Newton με αποκοπή, Στιβαρός Σχεδιασμός, Παράγωγοι Ευαισθησίας Υψηλής Τάξης

Δημοσιεύσεις του έργου της διατριβής

- A.S. Zymaris, D.I. Papadimitriou, E.M. Papoutsis-Kiachagias, K.C. Giannakoglou and C. Othmer. “The continuous adjoint method as a guide for the design of flow control systems based on jets”. Engineering Computations, 30(4), 2013.
- E.A. Kontoleonos, E.M. Papoutsis-Kiachagias, A.S. Zymaris, D.I. Papadimitriou and K.C. Giannakoglou. “Adjoint-based constrained topology optimization for viscous flows, including heat transfer”. Engineering Optimization, DOI:10.1080/0305215X.2012.717074, 2012.
- E.M. Papoutsis-Kiachagias, D.I. Papadimitriou and K.C. Giannakoglou. “Robust design in aerodynamics using 3rd-order sensitivity analysis based on discrete adjoint. Application to quasi-1D flows”. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 69(3): 691-709, 2012.
- K.C. Giannakoglou, D.I. Papadimitriou and E.M. Papoutsis-Kiachagias. “The continuous adjoint method: Theory and industrial applications”. Von Karman Institute Lecture Series, 2012.
- K.C. Giannakoglou, D.I. Papadimitriou, E.M. Papoutsis-Kiachagias, I.S. Kavvadias and C. Othmer. “Continuous adjoint methods in shape, topology, flow-control and robust optimization”. Open Source CFD International Conference, London 2012.
- D.I. Papadimitriou, E.M. Papoutsis-Kiachagias and K.C. Giannakoglou. “Topology optimization in fluid dynamics using adjoint-based truncated Newton”. European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2012), Vienna, Austria, September 10-14, 2012.
- E.M. Papoutsis-Kiachagias, E.A. Kontoleonos, A.S. Zymaris, D.I. Papadimitriou and K.C. Giannakoglou, “Constrained topology optimization for laminar and turbulent flows, including heat transfer”. Evolutionary And Deterministic Methods For Design, Optimization And Control, CIRA, Capua, Italy , 2011.
- E.M. Papoutsis-Kiachagias, D.I. Papadimitriou and K.C. Giannakoglou, “Discrete and continuous adjoint methods in aerodynamic robust design problems”. CFD and Optimization 2011, an ECCOMAS Thematic Conference, Antalya, Turkey, 23-25 May, 2011.
- C. Othmer, E.M. Papoutsis-Kiachagias and K. Haliskos, “CFD optimization via sensitivity-based shape morphing”, 4th ANSA & μETA International Conference, Thessaloniki, 2011.