

Unsteady Aerodynamic Response of Rigid Wings in Gust Encounters

(STO-TR-AVT-282)

Executive Summary

Modern air vehicle operations present a new challenge: controlled flight through highly unsteady aerodynamic environments. Many missions of interest, including cargo pickup/drop-off, reconnaissance, and search and rescue, must take place in unsteady aerodynamic environments. Operations such as unmanned reconnaissance, surveillance, and deliveries in urban environments, helicopter operations in complex terrain, and shipboard flight in airwakes are limited by strong transient wind gusts, coherent structures in air wakes, and other flow disturbances. All of these operations are, of course, regularly carried out today, but are currently limited to relatively benign flow disturbances and conservative operational envelopes. The AVT-282 task group was formed with the goal of extending the state of the art in unsteady lift modeling and prediction in support of the development of robust flight vehicle performance where wind gusts are of the same order of magnitude as the vehicle's flight speed, and where disturbance rejection may be achieved via closed-loop flow control. The focus of this group is on the effect of discrete wind gusts and transient flows on wing performance, and the fluid dynamics of a rigid wing's aerodynamic response to a known disturbance. The specific research goals of the group were to:

- 1) Identify the physical mechanisms by which force and moment transients are produced in large-amplitude gust encounters;
- 2) Develop analytical models to describe the resulting flows and predict aerodynamic forcing;
- 3) Identify mechanisms by which highly separated flows might be controlled to attenuate unsteady responses in a large-amplitude gust encounter; and
- 4) Characterize the magnitude and scales of real-world flow perturbations to define the parameter space over which a transient flow disturbance should be treated as a small perturbation, gust, or quasi-steady flow.

The group first set out to characterize the magnitude and length scales of real-world flow perturbations that would later define the gust encounter parameter space of interest. Using data from previous work in meteorology, flight in airwakes, rotorcraft, wind and tidal turbines, MAVs, UCAVs, vehicles in transition, etc., a parameter space of primary interest was defined as gusts with a length scale of the same order of magnitude as the wing chord, and with speeds of the same order of magnitude as the flight speed of the vehicle. Three canonical gust types were defined: transverse gusts, vortex gusts, and streamwise gusts; and a considerable amount of data were obtained. A typical aerodynamic response for all types of gusts studied consists of a rapid rise in lift to extreme values during the gust encounter with subsequent drop-off as the wing exits the gust. The lift transient experienced by the wing increases with gust strength and wing incidence. Simple predictions of the maximum lift can be derived from the effective angle of attack of the wing at the maximum gust speed, but more accurate and unsteady models of lift require much more nuance. Large transverse or vortex gusts result in massive flow separation, and thus force production is dominated by inviscid effects: circulation shed from the wing and free vorticity in the gust itself. Strong streamwise gusts do not necessarily result in flow separation and thus viscous forces play a larger role. Linear inviscid theories were found to provide reasonable predictions of lift response for gusts much larger than intended but failed in extreme cases. The relationship between the aerodynamic gust response and basic

gust parameters, namely the strength and length scale of the gust, has been explored. These results suggest that future analysis should include the effects of the steepness of the gust profile, the distribution of vorticity in the gust, and the effective camber and pitch rate that is induced on the wing by the gust flow during the encounter.

Réponse aérodynamique instationnaire des ailes rigides confrontées à des rafales de vent

(STO-TR-AVT-282)

Synthèse

Les opérations des véhicules aériens modernes présentent un nouveau défi : le vol contrôlé dans des environnements aérodynamiques extrêmement instationnaires. De nombreuses missions d'intérêt, incluant l'enlèvement/le largage de cargaison, la reconnaissance et les opérations de sauvetage, doivent avoir lieu dans des environnements aérodynamiques instationnaires. Des opérations telles que la reconnaissance, la surveillance et les livraisons sans pilote dans les environnements urbains, les opérations d'hélicoptères sur un terrain complexe et le vol depuis un navire dans les sillages aériens sont limitées par les fortes rafales de vent transitoires, les structures cohérentes au sein des sillages aériens et d'autres perturbations d'écoulement. Toutes ces opérations sont, bien entendu, régulièrement menées de nos jours, mais se limitent à des perturbations d'écoulement relativement bénignes et des domaines opérationnels nécessairement prudents. Le groupe de travail AVT-282 a été formé dans le but de faire progresser l'état de la technique de modélisation et prédiction de la portance instationnaire afin d'aider au développement de performances robustes des véhicules aériens, dans lesquelles les rafales de vent sont du même ordre de grandeur que la vitesse de vol du véhicule et dans lesquelles le rejet des perturbations peut être obtenu par un contrôle de l'écoulement en boucle fermée. Ce groupe se concentre sur l'effet des rafales de vent discrètes et des écoulements transitoires sur les performances de la voilure et la dynamique des fluides de la réponse aérodynamique d'une aile rigide à une perturbation connue. Les objectifs de recherche précis du groupe étaient : (1) identifier les mécanismes physiques qui produisent les forces et moments transitoires lors de la rencontre de rafales de grande amplitude ; (2) élaborer des modèles analytiques pour décrire les écoulements qui en résultent et prédire le forçage aérodynamique ; (3) identifier les mécanismes par lesquels des écoulements fortement détachés pourraient être contrôlés pour atténuer les réponses instationnaires lors de la rencontre d'une rafale de grande amplitude ; et (4) caractériser l'ampleur et l'échelle des perturbations en conditions réelles, pour définir le domaine des paramètres dans lequel des modèles de rafales existants peuvent être appliqués.

Le groupe s'est d'abord attaché à caractériser les échelles d'ampleur et de longueur des perturbations d'écoulement en conditions réelles, qui définiraient ensuite le domaine d'intérêt des paramètres de rencontre d'une rafale. À l'aide de données de précédents travaux portant sur la météorologie, le vol dans les sillages aériens, les voilures tournantes, les aérogénérateurs et turbines marémotrices, les MAV, les UCAV, les véhicules en transition, etc., un domaine de paramètres d'intérêt principal a été défini. Il se compose de rafales d'une longueur ayant le même ordre de grandeur que la corde de l'aile et d'une vitesse du même ordre de grandeur que la vitesse de vol du véhicule. Trois types de rafales canoniques ont été définis (les rafales transversales, les rafales tourbillonnaires et les rafales longitudinales) et une quantité considérable de données a été obtenue. Une réponse aérodynamique classique pour tous les types de rafales étudiés consiste en une hausse rapide de la portance jusqu'à des valeurs extrêmes pendant la rencontre de la rafale, suivie d'une chute lorsque l'aile sort de la rafale. La portance transitoire rencontrée augmente en fonction de la force de la rafale et de l'incidence sur l'aile. De simples prédictions de la portance maximale peuvent être déduites de l'angle d'attaque réel de l'aile à la vitesse maximale de la rafale, mais les modèles de portance plus précis et instationnaires nécessitent beaucoup plus de nuances. Les grandes rafales transversales ou tourbillonnaires provoquent un détachement massif d'écoulement ; la production de force est donc dominée par les effets non visqueux : la circulation chassée depuis l'aile et la vorticité libre de

la rafale en soi. Les fortes rafales longitudinales n'entraînent pas obligatoirement de détachement d'écoulement, ce qui signifie que les forces visqueuses jouent un rôle plus important. Le groupe de travail a déterminé que les théories non visqueuses linéaires fournissaient des prédictions raisonnables plus grandes que prévu de la réponse en portance pour les rafales, mais échouaient dans les cas extrêmes. La relation entre la réponse aérodynamique à une rafale et les paramètres de base de la rafale – à savoir l'échelle de force et de longueur de la rafale – a été étudiée. Ces résultats suggèrent que les analyses futures devraient inclure les effets de la profondeur du profil de rafale, la répartition de la vorticité au sein de la rafale et la cambrure et le tangage réels induits sur l'aile par l'écoulement de la rafale pendant la rencontre.