

Università degli Studi di Napoli
“Federico II”

Dipartimento di Progettazione Aeronautica

Agostino De Marco

Appunti del corso di

STABILITÀ DINAMICA E QUALITÀ DI VOLO

Draft 2007

DPA

ADAG

Indice

1	Introduzione alla stabilità dinamica ed alle qualità di volo	
1.1	Stabilità dinamica	§1-1
1.2	Qualità di volo	§1-3
1.2.1	Opinioni dei piloti	§1-4
1.2.2	La scala di Cooper-Harper	§1-5
1.2.3	Livelli di qualità di volo e categorie di fase di volo	§1-7
1.2.4	Classi di velivoli	§1-9
1.2.5	Requisiti di qualità di volo	§1-11
1.2.6	Controllo del volo di velivoli moderni	§1-13
1.2.7	Qualità di volo per velivoli con dinamica non convenzionale	§1-15
	Bibliografia	§1-18

Introduzione alla stabilità dinamica ed alle qualità di volo

Lo studio delle prestazioni, la navigazione aerea e la Dinamica del volo sono le tre discipline che costituiscono quella branca dell'ingegneria aeronautica chiamata Meccanica del volo.

Lo studio delle prestazioni dei velivoli è rivolto all'ottimizzazione di particolari traiettorie di volo: il decollo, la salita, la crociera, un dato numero di manovre ed infine la discesa e l'atterraggio.

La navigazione aerea riguarda principalmente lo studio e l'impiego di quelle tecnologie che permettono il raggiungimento di particolari rotte aeree ed il mantenimento di prestabilite traiettorie di volo mediante l'utilizzo della strumentazione di bordo e di segnali terrestri e satellitari.

La Dinamica del volo consiste principalmente nello studio del moto di un velivolo nella breve durata, in risposta alle azioni del pilota sugli organi di governo ed a perturbazioni della traiettoria di volo dovute ad azioni esterne come la turbolenza atmosferica.

1.1 Stabilità dinamica

I moti che interessano in generale la dinamica del volo vanno dalle piccole alle moderate perturbazioni della traiettoria rispetto a condizioni di volo stabilizzate, alle manovre di

grande ampiezza in cui le caratteristiche aerodinamiche del velivolo sono tipicamente non lineari. I primi, in particolare, cioè il moto delle piccole perturbazioni (*small perturbations*) attengono allo studio della stabilità dinamica dei velivoli.

Un moto perturbato si sovrappone ad un cosiddetto “moto di regime”, cioè una condizione di volo equilibrata, ed il suo studio viene condotto prescindendo dall’analisi delle cause che lo hanno provocato. I parametri caratteristici del moto perturbato (velocità, angoli d’incidenza e derapata, assetti longitudinale, trasversale e direzionale, escursioni angolari delle superfici di governo) possono variare in generale con leggi temporali del tipo oscillatorio o esponenziale. In ogni caso il moto perturbato è caratterizzato da uno smorzamento positivo, nullo o negativo a seconda che il velivolo sia *dinamicamente stabile*, *indifferente* o *instabile*.

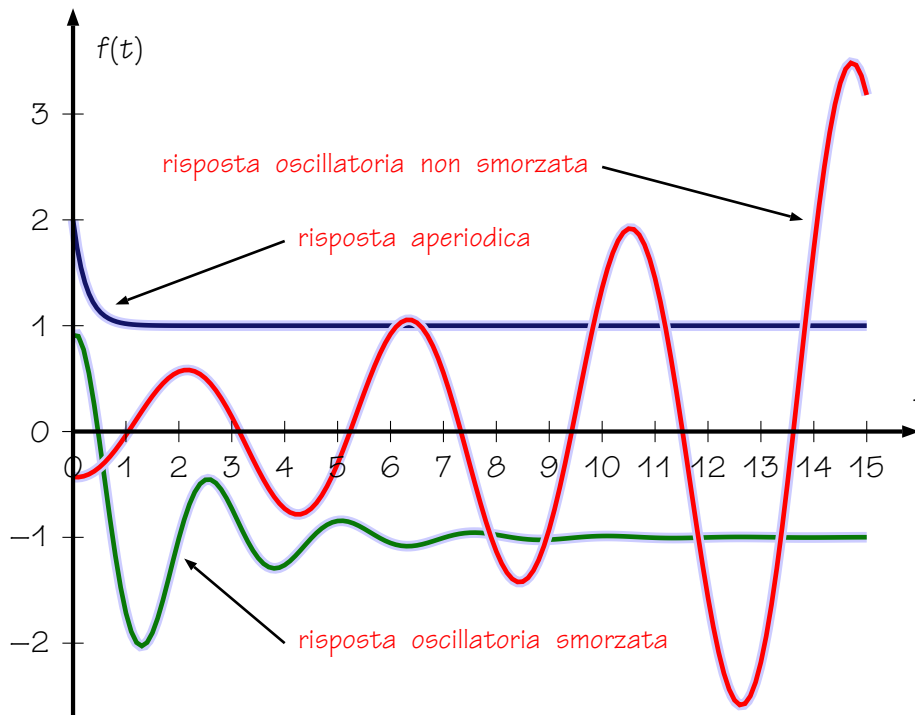


Figura 1.1 Esempio di possibili andamenti nel tempo dei parametri del moto perturbato.

Lo studio analitico della stabilità dinamica comporta la definizione delle equazioni differenziali del moto perturbato. Il numero di tali equazioni è dato dal numero di parametri che definiscono il moto, vale a dire dai gradi di libertà del sistema velivolo.

Nell’analisi delle caratteristiche di stabilità dinamica di un velivolo vengono tipicamente

trascurati gli effetti aeroelastici ed il ritardo con cui si distribuisce la circuitazione del campo delle velocità indotte dal sistema vorticoso alare al variare dell'assetto. L'aeromobile viene cioè considerato rigido e si assumono come gradienti aerodinamici quelli relativi al moto permanente.

Infine i parametri che individuano il moto perturbato del velivolo vengono convenientemente modellati come delle variazioni infinitesime rispetto ai valori che essi assumono ad un dato istante iniziale. Nelle equazioni che verranno ricavate e discusse più avanti vengono quindi trascurati i prodotti e le potenze di detti parametri e delle loro derivate, il che consente di *linearizzare* il sistema di equazioni differenziali. Questa ipotesi è giustificata dal fatto che lo scopo principale dello studio è quello di ricercare se il velivolo tende o meno a ristabilizzare il moto di regime iniziale piuttosto che pervenire ad una esatta determinazione del moto perturbato. Infatti spesso interessa assicurarsi se il velivolo, nelle condizioni di volo e di carico prescelte, risulti o meno dinamicamente stabile, stabilire se il moto perturbato è di tipo aperiodico o periodico ed, in ogni caso, determinare l'entità dello smorzamento. Queste informazioni possono essere ottenute senza il bisogno di integrare le equazioni del moto linearizzate ma ricercando ed analizzando gli autovalori di opportune matrici di coefficienti.

L'integrazione delle equazioni linearizzate risulta comunque relativamente semplice, specie se si dispone di strumenti di calcolo come **MATLAB** e **Simulink**, ed utile in molte circostanze. In particolare la determinazione del moto perturbato è richiesta nell'ambito dell'analisi di sistemi automatici di controllo del volo nei quali la risposta del velivolo è l'input di un opportuno sistema di retroazione accoppiato al controllo tradizionale del velivolo da parte del pilota.

1.2 Qualità di volo

Secondo una famosa definizione dovuta a Cooper ed Harper, due ricercatori americani che hanno contribuito significativamente alla ricerca nel campo dell'analisi del comportamento in

volò dei velivoli, le **qualità di volo** sono quelle caratteristiche di un aereo che determinano la facilità e la precisione con cui un pilota è in grado di portare a termine una prestabilita operazione o missione di volo. Si intuisce che le qualità di volo sono legate in qualche modo alla maniera in cui un dato velivolo risponde ai comandi del pilota ed a disturbi ed azioni esterne come la turbolenza atmosferica, le raffiche, il rilascio di carichi, avarie motore e così via. Ciò che non si intuisce, per il momento, è in che modo si quantifica la qualità di volo di un velivolo.

Come vedremo le qualità di volo sono determinate a partire dalle opinioni dei piloti e pertanto non sono da intendersi come delle caratteristiche esprimibili in termini puramente matematici. Piuttosto, ammesso che si pervenga ad una qualche scala di misura del gradimento delle caratteristiche di maneggevolezza da parte del pilota medio, è evidente che una qualsiasi teoria che permetta di anticipare quale sarà il livello di qualità di volo di un velivolo introduce necessariamente delle ipotesi di lavoro e delle approssimazioni. Sarà dunque necessario in ultima analisi trovare delle conferme attraverso delle prove di volo mirate sul velivolo reale o quanto meno su un simulatore di volo certificato.

Da quanto detto sopra risulta evidente che uno dei compiti della Dinamica del volo è quello di fornire elementi che consentano di attribuire un accettabile livello di sicurezza alle diverse fasi della missione di volo di un velivolo, così come designate dalle prestazioni e dalla navigazione. Un tale ruolo risulta tanto più efficace quanto meglio è suffragato dai progressi nel campo dell'Aerodinamica applicata e dall'affidabilità delle sperimentazioni di volo.

1.2.1 Opinioni dei piloti

Nelle indagini sulle qualità di volo accade che un dato **compito**, detto anche **task di pilotaggio**, deve essere ripetuto con successo un certo numero di volte da parte del pilota sperimentatore. I piloti, non essendo delle macchine, tendono a mostrare una certa variabilità di opinione, oltre che a manifestare una ben precisa capacità di adattamento

legata alla loro esperienza pregressa. Quest'ultima, in particolare, è tale che essi imparino col tempo a fare ciò che viene loro richiesto con il minor impegno cosciente possibile.

Nelle prove di volo un certo compito di pilotaggio può essere raggiunto rapidamente oppure può richiedere molta pratica. Per ottenere una determinata prestazione il carico di lavoro da parte del pilota può quindi essere basso o elevato e le corrispondenti opinioni varieranno conseguentemente da buone a cattive. Si può dire che nella loro essenza delle buone qualità di volo di un velivolo discendono dalla evidenza che la sua risposta è prevedibile durante una manovra ovvero, in altre parole, corrisponde alle aspettative del pilota. Ed infatti i piloti spesso descrivono delle qualità di volo desiderabili con frasi del tipo: "il muso segue la barra".

In definitiva, data la variabilità di opinione e le capacità di adattamento dei soggetti, ciò che ragionevolmente si può arrivare a determinare è una elevata probabilità che determinate caratteristiche di un velivolo siano ritenute soddisfacenti dalla maggior parte dei piloti. Ciò conferma l'idea che ben poco nel campo dello studio delle qualità di volo può ritenersi assolutamente certo. Infatti, trattandosi di statistiche che riassumono dati soggettivi, va osservato che un dato evento catastrofico associato ad una qualità di volo non correttamente diagnosticata potrebbe verificarsi anche dopo migliaia di ore di volo durante le quali il velivolo può non mostrare difetti apprezzabili.

1.2.2 La scala di Cooper-Harper

Comunque si tenti di approcciare il problema, le opinioni dei piloti finiscono per determinare le qualità di volo dei velivoli e possono quindi incidere sui tempi di sviluppo e di certificazione. Mentre la misura in volo delle caratteristiche di stabilità risulta relativamente semplice, al più dipendente da una più o meno buona pianificazione delle manovre da richiedere al pilota, dalla tecnologia dei sensori e dalle tecniche di analisi dei segnali acquisiti, al contrario la quantificazione di un dato intrinsecamente soggettivo come l'opinione dei piloti è tutt'altro che banale.

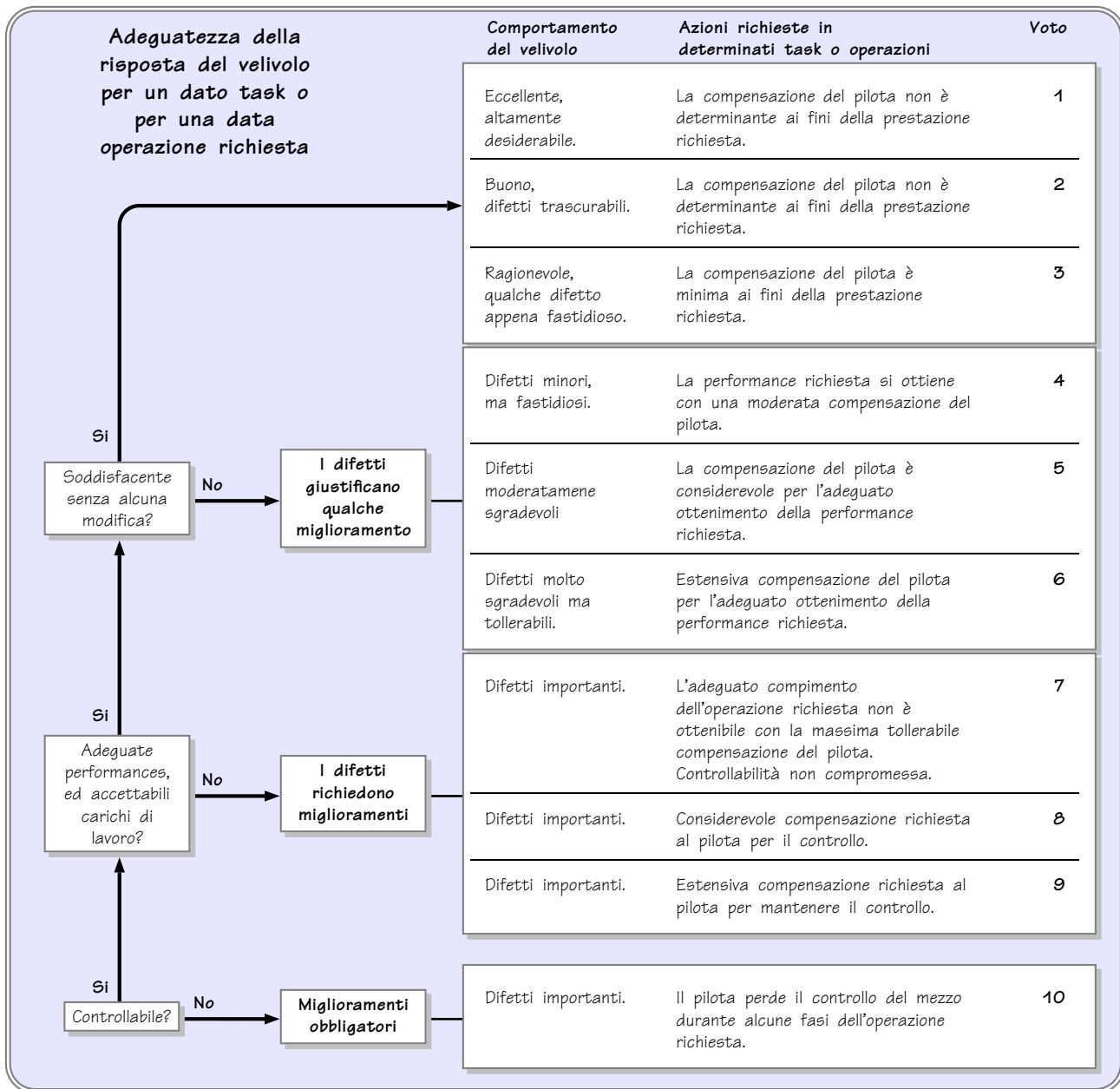


Figura 1.2 La scala di valutazione delle qualità di volo proposta da Cooper e Harper nel 1969.

La **scala di Cooper-Harper** rappresenta un tentativo razionale di formalizzare le opinioni dei piloti nei confronti di un dato velivolo in merito a prefissati task di volo. Tali opinioni vengono ridotte a dei “livelli di gradimento”. In pratica il pilota, dopo un certo numero di sessioni di prove in volo, dà un punteggio ad una data caratteristica di maneggevolezza del velivolo o alla capacità che esso ha di effettuare un prefissato compito o missione.

Il percorso decisionale utilizzato dai piloti per formarsi un'opinione sul velivolo è quello

mostrato in fig. 1.2 (a partire dalla sinistra in basso). Al voto finale in scala di Cooper-Harper il pilota perviene dopo essere stato sottoposto ad un numero di decisioni binarie (Si/No) che portano ad un voto corrispondente alla sua opinione. A valle di ciascuna decisione binaria il pilota raffina via via il livello di dettaglio della propria opinione, quindi del possibile voto finale, a seconda del grado di compensazione richiesta. La **compensazione**, nel gergo dei piloti, è la correzione cosciente e vigile che il pilota è costretto ad effettuare rispetto ad una data azione iniziale sui comandi. Dunque nella scala di Cooper-Harper la compensazione va intesa come la quantità di impegno aggiuntivo e di attenzione richiesti al fine di mantenere un determinato livello di prestazione allorché il velivolo nella particolare situazione di volo, presenta qualche difetto non esegue esattamente ciò che il pilota si aspetta.

Come si vede dalla tabella di fig. 1.2 il pilota può arrivare ad esprimere un voto da 1 a 10. Il punteggio 1 corrisponde ad un giudizio “Eccellente” della particolare caratteristica di volo. Punteggi via via crescenti corrispondono al progressivo deterioramento del comportamento dinamico del velivolo fino al caso in cui, per il determinato compito di volo richiesto, il voto è pari a 10 ovvero il velivolo è instabile e non controllabile.

1.2.3 Livelli di qualità di volo e categorie di fase di volo

Una scala come quella di Cooper-Harper, di ben 10 diversi livelli di opinione, è spesso considerata eccessiva per la raccolta di dati soggettivi sulle qualità di volo dei velivoli. È probabilmente per questo motivo che le specifiche militari americane riguardanti le qualità di volo richieste ad un velivolo si riferiscono invece più semplicemente a dei “livelli” di gradimento. I livelli sono comunque definiti a partire dal punteggio basato sulla scala di Cooper-Harper e sono in sostanza tre: il “livello 1”, corrispondente a un punteggio da 1 a 3, il “livello 2”, corrispondente a un punteggio da 4 a 6, ed il “livello 3”, corrispondente a un punteggio da 7 a 9. I livelli di qualità di volo sono riassunti in tab. 1.1. Nella pratica si usa dire anche che il punteggio 10 della scala di Cooper-Harper corrisponde ad

Tabella 1.1 Livelli di qualità di volo in relazione ai punteggi della scala di Cooper-Harper.

Punteggio su scala di Cooper-Harper	Livello di qualità di volo	Definizione
1, 2, 3	①	Qualità di volo ritenute adeguate per la fase di volo o missione
4, 5, 6	②	Qualità di volo ritenute adeguate ma con un non trascurabile carico di lavoro del pilota
7, 8, 9	③	Qualità di volo tali che il velivolo possa essere controllato durante la fase di volo richiesta dalla missione ma con eccessivo aumento del carico di lavoro del pilota ed eventuale impossibilità di terminare la prova come desiderato

un “livello 4”.

Non deve comunque sorprendere che il livello di qualità di volo assegnato da un pilota ad un velivolo dipende in qualche modo dal tipo di compito o manovra che egli ha effettuato con tale mezzo per formarsene un’opinione. Per chi non ha mai pilotato un velivolo può essere forse più semplice immaginare come la guidabilità di un autoveicolo possa essere giudicata da un conducente. Ad esempio, il comportamento di una certa automobile può essere considerato eccellente in autostrada per tragitti di non breve durata ed a velocità di percorrenza sostenute. Lo stesso autoveicolo può tuttavia essere considerato scadente quanto a facilità di parcheggio in spazi limitati o a maneggevolezza in situazioni di traffico poco scorrevole.

Al contempo è necessario mettere sempre in relazione l’opinione del pilota, quindi la qualità di volo, al tipo di operazione di volo richiesto. Ad esempio l’opinione di uno stesso pilota su un dato velivolo potrà essere molto negativa per quanto riguarda il comportamento in situazioni di decollo eppure molto soddisfacente o più che buona per quanto riguarda il suo comportamento in atterraggio o magari in manovre coordinate e graduali effettuate in fasi di salita, crociera o discesa.

Definire correttamente dei compiti di pilotaggio è molto importante ai fini della raccolta

e della formulazione di statistiche sulle qualità di volo dei velivoli di diverse tipologie. Per molti anni i compiti di pilotaggio da richiedere ai piloti sono stati suddivisi in **categorie di fase di volo** (*flight phase categories*). Queste categorie, dette “Categoria A”, “B” e “C”, sono descritte nella tab. 1.2 come riportato in [6, 2, 5].

Tabella 1.2 Definizioni di categorie di fasi di volo.

Categoria	Fase di volo
A	Non terminali, che non richiedono tipicamente manovre rapide e controllo preciso da parte del pilota
B	Non terminali, caratterizzate da manovre graduali senza eccessiva precisione da parte del pilota (crociera, salita, ecc.)
C	Terminali, che richiedono un accurato controllo della traiettoria da parte del pilota (decollo e atterraggio)

Oggi queste definizioni rimangono ancora utili per poter classificare le opinioni dei piloti in ordine ai compiti di pilotaggio e vengono ancora utilizzate nei programmi di sviluppo progettuale dei velivoli. Tuttavia un approccio moderno prevede una pianificazione di prove di volo o di simulazioni di volo basata su definizioni più rigorose e dettagliate dei compiti di pilotaggio. Addirittura in tali contesti il termine *flight phase categories* è soppiantato dal termine *mission task elements* e, conseguentemente, il voto che il pilota è portato ad esprimere (*pilot rating*) a proposito di un dato velivolo è molto più affidabile che nel passato.

1.2.4 Classi di velivoli

Per finire, non sorprende il fatto che anche le dimensioni e la tipologia dei velivoli in prova ha un effetto significativo sulle qualità di volo attese dal pilota e sul voto, in particolare, che egli darà alle sue varie caratteristiche di maneggevolezza. Anche in questo caso ci si può aiutare pensando alla circostanza forse più comune che è quella della guida di

diversi autoveicoli. Ad esempio, una data caratteristica di guida che un conducente è chiamato a giudicare può essere ritenuta appena soddisfacente se la macchina in prova è un'automobile familiare o un'utilitaria. La stessa caratteristica sarà magari ritenuta inaccettabile per una macchina sportiva o un'auto da corsa. Al contrario, un automezzo pesante che esprimerà quello stesso livello di prestazione di guida sarà giudicato eccellente in merito a quella particolare caratteristica di guidabilità.

Analogamente, delle determinate caratteristiche di maneggevolezza che tipicamente risultano eccellenti se riscontrate per un grande velivolo da trasporto corrisponderanno probabilmente ad un livello scadente se riscontrate per un velivolo militare da combattimento o acrobatico. Ne risulta che i velivoli, al fine di tener conto dell'influenza che la loro tipologia e le loro dimensioni hanno sull'opinione dei piloti, vengono anche classificati per dimensione e corrispondente livello di manovrabilità. In particolare, essi vengono suddivisi in **classi** a seconda della loro tipologia (definita sostanzialmente in base a dimensioni e peso), tab. 1.3.

Tabella 1.3 Classi di velivoli per la classificazione delle qualità di volo.

Classe di velivolo	Tipologia
I	Leggeri, piccole dimensioni
II	Peso medio, medie dimensioni
III	Grandi dimensioni e peso
IV	Elevata manovrabilità

L'opinione dei piloti su una data caratteristica di maneggevolezza può anche essere influenzata significativamente dal fatto che durante una campagna di prove, mirate ad ottenerne una votazione, può risultare evidente quanto buona o cattiva sia anche una delle altre qualità di volo del velivolo. Se per esempio è necessario che il pilota si concentri particolarmente per compensare la scarsa controllabilità longitudinale in un certo

task di pilotaggio, egli tenderà ad essere più sensibile o a tollerare poco delle eventuali oscillazioni latero-direzionali. Quando si accertano le qualità di volo dei velivoli è prassi fare l'assunzione che se il pilota, nel suo processo decisionale, per qualche motivo tende a degradare la sua opinione su una qualità di volo, egli non tenga conto di eventuali peggioramenti di altre caratteristiche di maneggevolezza. Questa è anche una dote che i piloti colaudatori imparano a sviluppare col tempo. Quanto più sono capaci di concentrarsi ed isolare il proprio giudizio su una data caratteristica tanto più saranno ritenuti affidabili dagli sperimentatori.

1.2.5 Requisiti di qualità di volo

Nel 1980 furono introdotte da parte di enti militari americani delle normative, raccolte sotto la sigla MIL-F-8785C, riguardanti velivoli caratterizzati da dinamiche convenzionali, destinate a fissare dei requisiti in termini di qualità di volo. Nel 1990 questi requisiti e le corrispondenti normative, MIL-STD-1797, furono estesi a velivoli di nuova concezione caratterizzati da dinamiche non convenzionali. Ciò fu dovuto principalmente all'impatto che hanno avuto sulla percezione dei piloti i nuovi sistemi integrati di controllo del volo (fly-by-wire).

In genere per la certificazione di un velivolo non vengono richieste necessariamente delle qualità di volo di livello 1 per tutte le circostanze possibili. Il livello di qualità di volo richiesto per un dato velivolo in una particolare situazione dipende dalla corrispondente posizione dello stato del velivolo nell'involuppo di volo. Come è noto, si distinguono tipicamente tre involuppi di volo di un velivolo. L'**involuppo di volo operativo**, cioè l'insieme di tutti i possibili compiti di volo che il velivolo incontra nelle normali missioni giornaliere. L'involuppo operativo raccoglie in pratica quelle situazioni di volo per cui il velivolo è stato progettato, ad esempio il decollo, l'atterraggio, la salita e così via. L'**involuppo di volo di servizio**, che include il primo, ed è definito dalle barriere di servizio, come la quota di tangenza di servizio o la velocità massima. Infine l'**involuppo di volo ammissibile**, che include i primi

due e comprende anche quelle situazioni di volo possibili ma non operative come lo stallo, l'avvitamento o altre situazioni estreme.

Uno "stato normale" è definito come una qualsiasi condizione di volo operativa di un velivolo. Esso ha una corrispondente configurazione operativa, in termini di posizione dei flap, peso, posizione del baricentro e così via. Uno "stato di avaria" (*failure state*) è uno stato normale che viene modificato dal malfunzionamento di uno o più componenti. Gli stati di avaria vengono a loro volta classificati a seconda di una corrispondente probabilità che essi si verifichino.

In generale, per tutti gli stati normali di un velivolo che rientrano nell'involuppo di volo operativo è sempre richiesto un livello 1 di qualità di volo. Le qualità di volo richieste in corrispondenza di stati di avaria arrivano in qualche caso anche al livello 2, in accordo con la probabilità di occorrenza del particolare stato. Per stati di avaria ad alta probabilità di occorrenza le qualità di volo richieste rimangono comunque al livello 1. Un'avaria che con alta probabilità si verifica più di una volta ogni 100 voli può essere associata a qualità di volo non peggiori del livello 2. Delle qualità di volo di livello 3 sono permesse soltanto se lo stato di avaria ha la probabilità di accadere meno di una volta ogni 10000 voli. In alcuni casi si accetta che delle qualità di volo di stati normali possano degradare dal livello 1 al 2 in presenza di severa turbolenza.

Uno degli inconvenienti nel campo dell'analisi delle qualità di volo è legato al fatto che alcuni requisiti espressi in termini soggettivi, come ad esempio il seguente:

"gli effetti combinati del centraggio, della stabilità del velivolo e dei gradienti di forza non devono produrre delle caratteristiche sgradevoli per il pilota"

come recita uno dei regolamenti suddetti, presentano il problema di non fornire alcuna guida su come il progettista debba intervenire perché essi siano soddisfatti. Inoltre un altro problema evidente è che il progettista non può effettivamente verificare se il velivolo soddisfa dei prefissati requisiti soggettivi finché lo sviluppo della macchina non ha raggiunto

uno stadio sufficiente di avanzamento in corrispondenza del quale il pilota può effettuare almeno un volo simulato.

Varie esperienze e ricerche in questo settore hanno confermato che sussiste una buona correlazione fra alcune caratteristiche di risposta del velivolo ai comandi in *ciclo aperto* e le opinioni dei piloti riguardo al comportamento del velivolo in *ciclo chiuso*. Il termine “ciclo aperto” si riferisce proprio alle condizioni che sono oggetto di studio della stabilità dinamica: una volta applicata una legge di comando si immagina di congelare la posizione delle superfici di governo e si assiste all’evoluzione libera del moto. Il termine “ciclo chiuso” si riferisce alle condizioni reali di volo in cui il pilota rappresenta l’elemento che chiude il ciclo di controllo.

Questa circostanza prospetta dei notevoli vantaggi, il primo dei quali è che i requisiti specificati in termini di risposte in ciclo aperto del velivolo *non* sono evidentemente soggetti all’interpretazione e alla variabilità di comportamento dei piloti. Un secondo vantaggio è che questi requisiti sono normalmente traducibili in termini di parametri di disegno caratteristici del velivolo.

Riassumendo, le specifiche riguardanti le qualità di volo rappresentano un tentativo di raggiungere un obiettivo intrinsecamente soggettivo, il gradimento del pilota, attraverso un insieme di requisiti soggettivi, come quello citato sopra, ed oggettivi, che impongano degli intervalli di variazione di alcuni parametri di progetto.

1.2.6 Controllo del volo di velivoli moderni

La dinamica del moto di un velivolo è condizionata significativamente dalle sue caratteristiche di stabilità e controllo. Queste ultime dipendono in gran parte dalle caratteristiche aerodinamiche della particolare configurazione dell’aeromobile ed il progettista ha dunque la possibilità di scegliere la geometria ottimale in relazione al tipo di risposta dinamica desiderata per date leggi di comando. Classicamente si ritiene che un buon comportamento in volo di un velivolo sia garantito da buone caratteristiche di stabilità quindi da un buon

design aerodinamico.

Nell'aeronautica moderna, in cui i velivoli presentano inviluppi di volo più ampi di quelli del passato e sono dotati di dispositivi automatici di controllo, *Automatic Flight Control Systems* (AFCS), un buon design aerodinamico non è più strettamente sinonimo di buone caratteristiche di controllo. Ciò è dovuto al fatto che il sistema velivolo comprende oggi anche il sistema di controllo del volo, *Flight Control Systems* (FCS), e quindi la dinamica di quest'ultimo influenza la dinamica del sistema complessivo, fig. 1.3.

Nella sua accezione moderna la Dinamica del volo studia dunque l'evoluzione dei velivoli intesi non più come semplici configurazioni aerodinamiche ma come sistemi nei quali hanno luogo interazioni più o meno complesse tra dispositivi di controllo automatico, pilota, aerodinamica e risposta dinamica.

Il *Flight Control System* è generalmente costituito da un numero di sensori in movimento, da uno o più microcomputer controllori, da dispositivi di attuazione, cioè di movimentazione delle superfici di governo e di parti meccaniche della linea di comando, e da altri particolari sistemi collegati all'hardware di controllo. Si intuisce allora che lo studio della dinamica del sistema complessivo Velivolo/FCS diventa un'attività multidisciplinare alla quale si prestano i metodi di analisi tipici dell'ingegneria dei controlli. Lo studio riguarderà in generale un sistema dinamico di una certa complessità del quale il velivolo è da considerarsi come un sottosistema. Nell'individuazione del modello matematico del sistema complessivo in termini di *funzioni di trasferimento*, quelle che riguardano il velivolo tradizionale sono anche dette *funzioni di trasferimento aerodinamiche*. Con una rappresentazione di questo tipo la stabilità e le caratteristiche dinamiche del velivolo vengono agevolmente interpretate ed analizzate con l'ausilio di potenti strumenti di calcolo ben noti ai progettisti di sistemi di controllo.

1.2.7 Qualità di volo per velivoli con dinamica non convenzionale

Come detto in precedenza, le qualità di volo di un velivolo sono quelle proprietà che determinano la facilità ed il grado di efficacia con cui esso risponde ai comandi del pilota nell'esecuzione di una data manovra o per l'ottenimento di una data prestazione (*flying and handling qualities*), determinate in base ad una collezione di dati soggettivi quali sono le opinioni dei piloti.

Dal punto di vista del progettista, quando si viene ad analizzare il possibile comportamento in volo del velivolo, viene posta una domanda semplice ma importante: quali caratteristiche di risposta deve avere l'aeromobile per essere considerato soddisfacente dal pilota medio? La risposta dipende dal tipo di interazione tra il pilota ed il sistema di governo del velivolo ed è un argomento di ricerca da parecchi anni. Non è raro assistere oggi a cicli di progetto di velivoli che subiscono dei ritardi per difficoltà dovute al mancato ottenimento in volo di date caratteristiche di stabilità e controllo.

Come visto sopra, sono i piloti collaudatori che in definitiva accertano e determinano le qualità di volo dei velivoli in base a delle procedure di prova molto dettagliate e mirate ad ottenere la più alta affidabilità possibile del risultato. Grazie alle sperimentazioni ed ai documenti prodotti negli anni scorsi dalle agenzie governative e militari americane e da un numero di aziende costruttrici è possibile oggi mettere in relazione le opinioni dei piloti sulle qualità di volo con le caratteristiche oggettive di stabilità statica e dinamica.

Il modo in cui un pilota percepisce le qualità di volo e di maneggevolezza di un velivolo può essere interpretato con l'ausilio della fig. 1.3. Nella schematizzazione proposta le linee continue rappresentano flussi di segnali di tipo fisico, meccanici o elettrici, mentre le linee tratteggiate rappresentano delle percezioni sensoriali dirette o indirette da parte del pilota (*sensory feedback*). La fig. 1.3 è stata proposta da Cook [3] e pone una distinzione tra qualità di volo e qualità di maneggevolezza (*handling*). Le prime sono percepite e riportate dal pilota come una descrizione sia qualitativa che quantitativa, in base alla

scala di di Cooper-Harper, di quanto soddisfacentemente l'aeroplano porta a compimento un prestabilito compito di volo (una data manovra, il raggiungimento di una data quota, il raggiungimento ed il mantenimento di una data rotta). Le seconde sono invece ciò che il pilota percepisce in ordine all'adeguatezza della risposta del velivolo nella breve durata a determinati comandi.

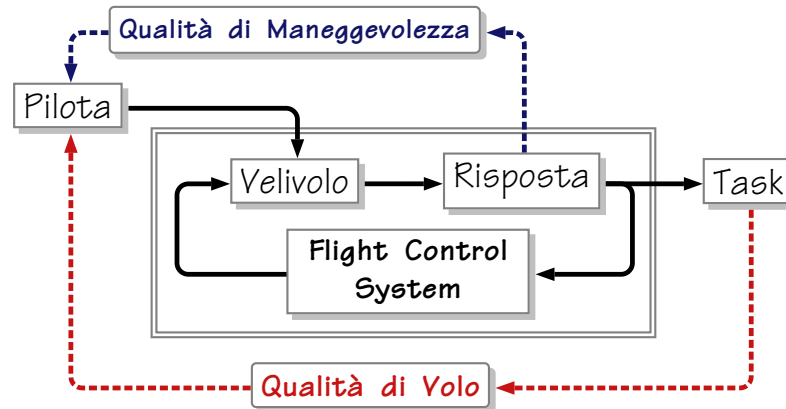


Figura 1.3 Percezione delle qualità di volo da parte del pilota per un velivolo non fly-by-wire.

Le qualità di volo e di maneggevolezza sono assolutamente interdipendenti e probabilmente inseparabili. Le qualità di volo sono legate al tipo di compito di volo richiesto mentre quelle di maneggevolezza riguardano soprattutto le reazioni del velivolo alle particolari azioni del pilota (*short-term response*).

Come si vede dalla fig. 1.3, per velivoli dotati di dispositivi automatici di controllo del volo (*stability augmented airplanes*) esiste un condizionamento indiretto delle percezioni del pilota da parte del particolare tipo di FCS.

Negli ultimi decenni un numero crescente di velivoli ha adottato la tecnologia *fly-by-wire* (FBW). In tali velivoli, al contrario di come tradizionalmente avviene per velivoli di piccole dimensioni, la barra o il volantino e la pedaliera non sono collegati direttamente alle superfici di governo attraverso semplici organi meccanici. Quando il pilota di un velivolo FBW aziona un comando, un segnale elettrico viene mandato in input ad un computer centralizzato e da questo partono un numero di segnali destinati ad altrettanti attuatori per il movimento delle superfici di governo. Lo smistamento dei segnali avviene secondo un

opportuno algoritmo di controllo che si basa sull'acquisizione, da parte di un numero di sensori di bordo, delle variazioni di velocità del vento relativo, assetto, velocità assoluta, e posizione dell'aeromobile.

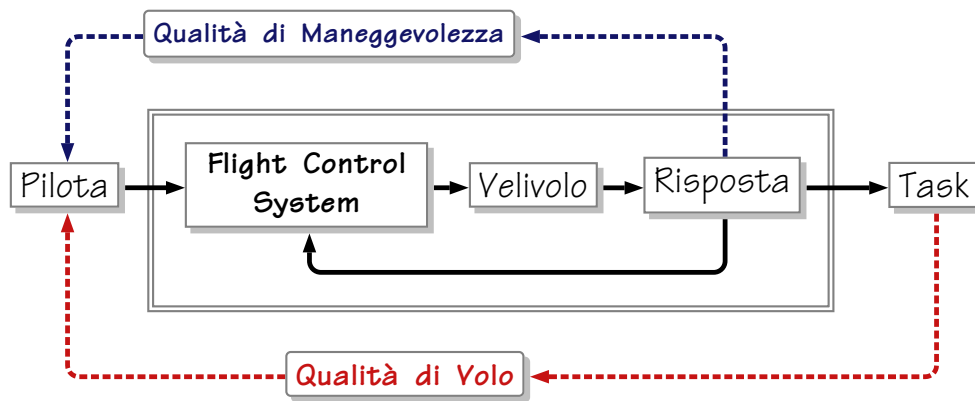


Figura 1.4 Percezione delle qualità di volo da parte del pilota per un velivolo fly-by-wire in cui il flight control system è integrato nella gestione dei comandi.

La fig. 1.4 presenta una schematizzazione della percezione delle qualità di volo di un velivolo FBW. In tal caso il FCS è integrato nel flusso di segnali che vanno dal pilota alla risposta cioè è interposto tra l'azione derivante da una decisione del pilota e l'effettiva escursione delle superfici di governo. Inoltre le caratteristiche di risposta dinamica del FCS assumono un'importanza maggiore ai fini della determinazione delle qualità di maneggevolezza e navigabilità.

La percezione da parte del pilota delle qualità di volo è in definitiva influenzata da parecchi fattori. Tra questi si annoverano le caratteristiche di stabilità statica e dinamica e gli indici di efficacia dei comandi della particolare configurazione aerodinamica. Ma ugualmente importanti nei moderni velivoli risultano essere la dinamica del FCS, le caratteristiche di risposta alla turbolenza atmosferica e, anche se con effetti meno tangibili, il design interno del cockpit. Quest'ultimo fattore comprende il disegno dei comandi (*inceptor design*), dei sistemi di visualizzazione, del tipo di indicatori e, persino, l'angolo di visuale (*field of view*) realizzato in cabina.

Non meraviglia che la quantificazione da una parte e l'analisi dall'altra delle qualità di volo è un compito estremamente difficile da realizzare. Al contempo è chiaro che è

necessario stabilire una modalità per stimare le qualità di volo al fine di poterne avere delle indicazioni nelle fasi di analisi e di sviluppo del progetto di un velivolo. Ciò sarà discusso in un capitolo successivo, dopo aver presentato le equazioni linearizzate del moto e le caratteristiche di stabilità dinamica di un velivolo.

Bibliografia

- [1] M. Calcara, Elementi di dinamica del velivolo, Edizioni CUEN, Napoli, 1988.
- [2] Mengali G., Elementi di Dinamica del Volo con Matlab, Edizioni ETS, Pisa, 2001.
- [3] Cook M. V., Flight Dynamics Principles, Arnold, 1997.
- [4] Etkin B., Dynamics of Flight, Stability and Control, John Wiley & Sons, 1982.
- [5] Phillips W. F., Mechanics of Flight, John Wiley & Sons, 2004.
- [6] Nelson R., Flight Stability and Automatic Control, McGraw-Hill, 1989.