



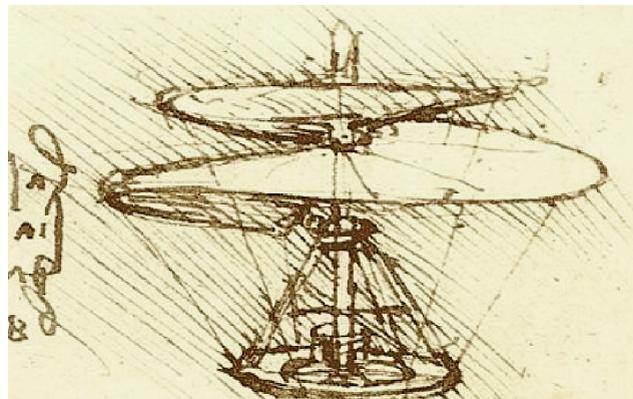
Giovanni Di Giorgio

Teoria del volo dell'elicottero

Aerodinamica – Meccanica del volo



Seconda edizione



Dott. Ing. Giovanni Di Giorgio

Teoria del volo dell'elicottero

Aerodinamica – Meccanica del volo

Seconda edizione



Copyright © MMIX
ARACNE editrice S.r.l.

www.aracneeditrice.it
info@aracneeditrice.it

via Raffaele Garofalo, 133 A/B
00173 Roma
(06) 93781065

ISBN 978-88-548-2573-4

*I diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica,
di riproduzione e di adattamento anche parziale,
con qualsiasi mezzo, sono riservati per tutti i Paesi.*

*Non sono assolutamente consentite le fotocopie
senza il permesso scritto dell'Editore.*

I edizione: novembre 2007
II edizione: giugno 2009

Indice

Prefazione alla seconda edizione	13
Prefazione alla prima edizione	15
Unità di misura	17
Elenco dei simboli	19
Sigle ed abbreviazioni	25
Capitolo 1 Configurazioni degli elicotteri	
1.1 L'elicottero ed il volo verticale	27
1.2 Le configurazioni degli elicotteri	28
1.2.1 Sistemi non convenzionali di generazione della spinta anticoppia	32
1.3 Il rotore ed i comandi di volo	33
1.3.1 Le tipologie costruttive fondamentali del rotore principale e del rotore di coda anticoppia	33
1.3.2 I comandi ed il meccanismo del piatto oscillante	37
 Capitolo 2 Aerodinamica del rotore nel volo in traslazione assiale ed a punto fisso (hover)	
2.1 Introduzione	43
2.2 Teoria impulsiva	43
2.2.1 Volo verticale in salita	44
2.2.2 Volo a punto fisso (hover)	48
2.2.3 Volo verticale in discesa	49
2.2.3 Curve della velocità indotta in volo verticale	51
2.3 Teoria dell'elemento di pala	52
2.3.1 La trazione generata dal rotore, la coppia e la potenza richieste	55
2.3.2 Svergolamento lineare della pala rotore	59
2.3.3 Velocità indotta non uniforme	61
2.3.4 Perdite di radice e perdite all'estremità di pala	63
2.3.5 Figura di Merito	64

2.3.6	Procedura di calcolo dei parametri aerodinamici, dei carichi sulla pala e della potenza richiesta	66
2.4	L'effetto suolo	71
2.5	Introduzione alla Teoria vorticosa	72
2.5.1	Richiami di dinamica dei fluidi ideali	74
2.5.2	Relazioni fondamentali applicate al rotore	78
2.5.2.1	Applicazione del Teorema di Kutta-Joukowski	79
2.5.2.2	Velocità indotte dai vortici, la Legge di Biot-Savart	80
2.5.3	Modellazione del rotore in hover e problematiche di calcolo	82
2.5.4	Fenomeni di interazione dovuti ai vortici d'estremità	84
2.5.5	Scia fissata a priori, il modello di Landgrebe in hover	85
Capitolo 3	Dinamica del rotore	
3.1	Introduzione	89
3.2	Assi e piani fondamentali	89
3.3	Il moto di flappeggio della pala	92
3.4	Eccentricità della cerniera di flappeggio e momenti di controllo	95
3.5	Il rotore in volo avanzato: il moto di flappeggio delle pale ed il principio della precessione giroscopica	100
3.6	Moto di brandeggio della pala	102
3.7	Variazione ciclica del passo	103
3.8	Accoppiamenti tra i moti fondamentali della pala	105
Capitolo 4	Aerodinamica del rotore in volo avanzato	
4.1	Introduzione	109
4.2	Teoria impulsiva	110
4.3	Teoria dell'elemento di pala	113
4.3.1	Calcolo delle componenti della velocità del flusso sulla pala rotore	113
4.3.1.1	Regione di flusso inverso	118
4.3.2	Angolo di incidenza locale	119
4.3.3	Le sollecitazioni aerodinamiche sul rotore, equazioni in forma chiusa	121
4.3.3.1	Calcolo della trazione	124
4.3.3.2	Calcolo della resistenza H	128
4.3.3.3	Calcolo della coppia	132
4.4	Coefficienti di flappeggio	134
4.5	Piano di non flappeggio e piano del mozzo	137

4.5.1	Grandezze aerodinamiche riferite al piano di non flappeggio	137
4.5.2	Grandezze aerodinamiche riferite al piano del mozzo	139
4.6	Equilibrio dell'elicottero ed aerodinamica del rotore	141
4.7	Correzione dei risultati della Teoria dell'elemento di pala	145
4.8	Limiti della Teoria dell'elemento di pala	147
4.9	Fenomeni di stallo e compressibilità	147
4.9.1	Terminale di pala a freccia e numero di Mach locale	152
4.10	Cenni sui modelli di scia del rotore in volo avanzato	153
4.11	Aerodinamica computazionale e metodologie avanzate ad approccio multidisciplinare	156

Capitolo 5 L'equilibrio dell'elicottero

5.1	Introduzione	159
5.2	Sistemi di riferimento	160
5.3	Equazioni generali del moto dell'elicottero	162
5.4	Condizioni di equilibrio ('trim') dell'elicottero	167
5.4.1	Trattazione generale dell'equilibrio ('trim')	167
5.5	Momento di reazione del sistema rotore-fusoliera	169
5.6	Trattazione semplificata dell'equilibrio (trim)	171
5.6.1	Equazioni di equilibrio in volo avanzato	171
5.6.2	Espressione della Potenza in volo avanzato orizzontale	177
5.7	Stima rapida delle condizioni di equilibrio longitudinale	179
5.8	Soluzione generale dell'equilibrio ('trim')	183
5.9	L'autorotazione	193
5.9.1	Autorotazione del rotore e manovra di autorotazione dell'elicottero	193
5.9.1.1	Condizione aerodinamica in autorotazione	194
5.9.1.2	Fase finale della manovra di autorotazione ed atterraggio	195
5.9.2	Limitazioni all'autorotazione e Diagramma Quota-Velocità	197
5.9.3	Osservazioni conclusive	198

Capitolo 6 Prestazioni dell'elicottero

6.1	Introduzione	199
6.2	La potenza richiesta totale	199
6.3	Atmosfera standard	200
6.4	Il motore e la potenza disponibile	203

6.4.1	Il regime operativo del rotore principale	204
6.4.2	Configurazione costruttiva del motore turbo- albero a turbina libera (free shaft turbine engine)	205
6.4.3	Il sistema rotore/trasmissione/motore	207
6.4.4	Prestazioni del motore installato: le potenze disponibili	209
6.5	Prestazioni in hover	211
6.5.1	Le potenze richieste P_{RP} e P_{rc} nel volo a punto fisso (hover)	211
6.5.2	Resistenza verticale dell'elicottero	212
6.5.3	Quota massima di hovering	214
6.6	Prestazioni in salita verticale	215
6.7	Prestazioni in volo traslato orizzontale	216
6.7.1	Le potenze richieste P_{RP} e P_{rc}	216
6.7.1.1	La resistenza parassita D_f in volo orizzontale	218
6.7.2	La potenza necessaria totale in volo orizzontale	221
6.7.2.1	Velocità massima in volo livellato	225
6.7.2.2	Autonomie di volo	226
6.7.2.3	Correzioni della potenza richiesta per stallo e compressibilità	228
6.8	Prestazioni in volo traslato in salita ed in discesa	229
6.8.1	La potenza necessaria P_{RP} nel volo traslato in salita	229
6.8.2	Ratei ed angoli di salita, quote di tangenza	230
6.8.3	La potenza necessaria P_{RP} nel volo traslato in discesa	234
6.9	Prestazioni in autorotazione	234
6.10	Analisi di missione	236
6.10.1	Peso al decollo ed in atterraggio	236
6.10.2	Impostazione dello studio di missione	238

Capitolo 7 Stabilità e controllo; introduzione alla Dinamica del volo dell'elicottero

7.1	Introduzione	241
7.2	Stabilità statica e stabilità dinamica	242
7.3	Stabilità statica	242
7.3.1	Stabilità al disturbo di velocità	243
7.3.2	Stabilità al disturbo di 'incidenza'	243
7.3.3	Stabilità direzionale (disturbo d'imbardata)	244
7.4	Stabilità dinamica	244
7.4.1	Teoria delle piccole perturbazioni	247
7.4.2	Introduzione delle derivate di stabilità	249

7.4.3	Osservazioni sul metodo di studio delle piccole perturbazioni	251
7.5	Stabilità dinamica longitudinale e latero-direzionale in hover	252
7.5.1	Stabilità dinamica longitudinale	252
7.5.1.1	Equazioni del moto, rappresentazione agli stati	253
7.5.2	Stabilità dinamica latero-direzionale	258
7.6	Stabilità dinamica longitudinale e latero-direzionale in volo avanzato	261
7.6.1	Stabilità dinamica longitudinale	261
7.6.2	Stabilità dinamica latero-direzionale	264
7.7	Controllo dell'elicottero	265
7.7.1	Stabilità, Controllo e Qualità di volo	265
7.7.2	Controllo longitudinale in hover; approccio ad un grado di libertà	266
7.7.3	Controllo latero-direzionale in hover; approccio ad un grado di libertà	268

Capitolo 8 Manovre a traiettoria curva in un piano orizzontale e in un piano verticale

8.1	Introduzione	269
8.2	Virata corretta stabilizzata	269
8.2.1	Cenni sulle virate	272
8.2.2	Momenti precessionali d'inerzia nella manovra di virata	272
8.2.3	Potenza richiesta in virata corretta	272
8.3	Richiamata stabilizzata	273

Capitolo 9 Elicotteri con due rotori controrotanti coassiali o in tandem

9.1	Introduzione	275
9.2	Elicotteri con due rotori controrotanti coassiali	275
9.2.1	Applicazione della Teoria impulsiva al volo a punto fisso	275
9.2.2	Caratteristiche generali dell'elicottero	278
9.2.3	Equilibrio dell'elicottero intorno all'asse velivolo Z	281
9.3	Elicotteri con due rotori controrotanti in tandem	282
9.3.1	Descrizione generale e definizioni	282
9.3.2	Applicazione della Teoria impulsiva e della Teoria dell'elemento di pala al volo a punto fisso	284
9.3.3	Applicazione della Teoria impulsiva al volo in avanzamento livellato	287

9.3.4	Dati sperimentali	289
9.3.5	Condizione di equilibrio longitudinale dell'elicottero	289
9.3.6	Osservazioni sulla Stabilità	292
9.3.6.1	Stabilità al disturbo di velocità	292
9.3.6.2	Stabilità dinamica a comandi bloccati in hover	293
Appendice A	Definizioni dei coefficienti adimensionali del rotore	295
Appendice B	Atmosfera ISA	296
Appendice C	Richiami sulla trasformata di Laplace	297
	Indice delle figure	299
	Indice delle tabelle	304
	Bibliografia	305
	Indice analitico	309