



直升机理论

〔美〕W. 约翰逊 著

ZHISHENGJI LILUN

航空工业出版社

直升机理论

〔美〕W. 约翰逊 著

孙 如 林 译

高义中 徐 宣 校

郭 泽 弘 审校

航空工业出版社

1991

内 容 简 介

本书全面系统的论述了直升机有关理论。主要内容包括：直升机各种飞行状态的动量理论、涡流理论和叶素理论，并且除对正常运行状态外，还对涡环状态、紊流状态和风车状态作了论述。而且还涉及到直升机性能计算和设计。特别以大量的篇幅对旋翼空气动力学和旋翼动力学，尤其对旋翼结构动力学、直升机“地面共振”和颤振等都作了系统详尽的论述。同时对直升机噪声和失速也作了论述。

本书可供直升机和风轮设计人员、高等学校的有关师生、有关科研人员参考。

直 升 机 理 论

〔美〕W. 约翰逊 著

孙 如 林 译

高 义 中 徐 直 校

郭 泽 弘 审校

航空工业出版社出版发行

（北京市和平里小关东里14号）

——邮政编码：100029——

南昌航空工业学院印刷厂印刷

1991年9月第1版

1991年9月第1次印刷

787×1092毫米1/16

印张：45

印数：1-1000

字数：1148.8千字

ISBN 7-80046-237-4/V·050

定价：（平）35.00元，（精）45.00元

序

美国学者W. Johnson 于1980年出版的《直升机理论》一书，是世界范围内直升机学术方面的权威著作。该书博大精深，目前还无出其右者，西方各有关公司、研究单位均奉为经典文献。

原书共分十七章，逾一千页，凡举直升机旋翼空气动力学、旋翼动力学、性能计算、气动弹性力学、飞行力学以至噪声等，皆论述详尽。许多国家包括我国在内的大学直升机专业的研究生课程，都以此书作为主要教材。

我国直升机事业正处于发展的春天。中国直升机设计研究所孙如林等同志发宏愿、花精力，将原著译成中文，供国内直升机界人士参考之用，诚立一大功也。是为序。

王适存

1989年夏，南京航空学院

译 者 的 话

《直升机理论》(Helicopter Theory)一书作者是美国波士顿大学教授W.约翰逊(WAYNE JOHNSON)。

本书全面论述了直升机理论。包括各种飞行状态的理论和计算,重点论述了直升机旋翼空气动力学、旋翼动力学、直升机气动弹性力学、直升机稳定性和操纵性以及失速特性。还论及了直升机气动噪声等,而且,反映了最新直升机研究成果。本书涉及面之广,内容之深,恐非一般书所及。

本书可供从事直升机理论研究工作,直升机设计、制造等工程技术人员,有关院校的师生和从事风能研究、风轮设计人员参考。

本书主译孙如林(1~17章)、译校徐直(1~5章)、高义中(6~17章),审校郭泽弘。在翻译出版过程中得到刘高倬、赵滨生、蒋新桐、王焕业、杨学勤、刘家杰、邵箭、杨俊严、沈亨业、李祖钊、熊宪利、陈文轩等同志的支持和帮助,在此表示深切的谢意。

由于水平有限,译文仍有不妥之处,盼望读者批评指正。

符 号

下面按字母顺序列出的是本书所用的主要符号。仅在一章内出现的符号不包括在其中。本书中常常采取的无因次量，它们是以空气密度、旋翼转速和旋翼半径 (ρ 、 Ω 和 R) 为基础的，参看 1.3 节。

a	桨叶剖面二元升力曲线斜率
A	旋翼桨盘面积, πR^2
A_b	旋翼桨叶面积, $NcR = \sigma A$
B	桨尖损失系数
c	桨叶弦长
C	Theodorsen 升力减效函数
C'	Loewy 升力减效函数
c_d	剖面阻力系数, $D/\frac{1}{2}\rho U^2 c$
C_H	H 力系数, $H/\rho A(\Omega R)^2$
c_l	剖面升力系数, $L/\frac{1}{2}\rho U^2 c$
c_m	剖面俯仰力矩系数, $M_x/\frac{1}{2}\rho U^2 c^2$
C_{M_x}	滚转力矩系数, $M_x/\rho AR(\Omega R)^2$
C_{M_y}	俯仰力矩系数, $M_y/\rho AR(\Omega R)^2$
C_P	功率系数, $P/\rho A(\Omega R)^3$
C_{Pc}	爬升功率损耗
C_{Pi}	诱导功率损耗
C_{Po}	型阻功率损耗
C_{Pp}	废阻功率损耗
C_Q	扭矩系数, $Q/\rho AR(\Omega R)^2$
c_s	音速
C_T	拉力系数, $T/\rho A(\Omega R)^2$
C_T/σ	拉力系数与实度之比
C_Y	Y 力系数, $Y/\rho A(\Omega R)^2$
D	剖面气动阻力, 直升机阻力
e	挥舞铰或摆振铰偏置量
EI, EI_{xx}	挥舞方向弯曲刚度
EI_{xx}	弦向弯曲刚度
f	直升机机身和桨毂的等效阻力面积, $D/\frac{1}{2}\rho V^2$
F_r	剖面径向气动力
F_x	平行于桨盘平面的剖面气动力
F_z	垂直于桨盘平面的剖面气动力

g 重力加速度
 GJ 扭转刚度
 h 旋翼轴高度, 即桨毂中心高出直升机重心的距离
 H 旋翼阻力, 向后为正; 平面内的桨叶气动切力系数 (带有脚标)

I_r 旋翼桨叶特征惯量, 通常为 $\int_0^R m r^2 dr$ 或者为挥舞惯性矩

I_f 桨叶俯仰惯量, $\int_0^R I_\theta dr$

I_{pk} 第 k 阶扭转模态的广义质量, $\int_0^R \xi_k^2 I_\theta dr$

I_{ak}, I_{β_k} 第 k 阶挥舞平面的弯曲模态的广义质量, $\int_0^R \eta_{zk}^2 m dr$

I_x 直升机滚转惯性矩; 挥舞-变距惯性耦合, $\int_0^R x_l r m dr$

I_y 直升机俯仰惯性矩

I_z 直升机偏航惯性矩

I_β 基本挥舞模态的广义质量, $\int_0^R \eta_\beta^2 m dr$

$I_{\beta\alpha}$ 挥舞和桨毂运动的惯性耦合, $\int_0^R r \eta_\beta m dr$

$I_{\beta\xi}$ 挥舞和摆振哥氏力耦合, $\int_0^R \eta_\beta \eta_\xi m dr / (1 - e)$

I_ζ 基本摆振模态的广义质量, $\int_0^R \eta_\zeta^2 m dr$

$I_{\zeta k}$ 第 k 阶摆振平面内弯曲模态的广义质量, $\int_0^R \eta_{\zeta k}^2 m dr$

$I_{\zeta\alpha}$ 摆振和桨毂运动的惯性耦合, $\int_0^R r \eta_\zeta m dr$

I_0 绕变距轴线的剖面惯性矩

I_0 桨叶转动惯量, $\int_0^R r^2 m dr$

k 折合频率, $\omega b/U$ (ω 是频率, b 是翼型半弦长, U 是自由流速度)

k_x 直升机滚转回转半径, $I_x = Mk_x^2$

k_y 直升机俯仰回转半径, $I_y = Mk_y^2$

k_z 直升机偏航回转半径, $I_z = Mk_z^2$

$K_P, K_{P\beta}$ 变距-挥舞耦合, $\Delta\theta = -K_P\beta$ ($K_P = \tan\delta_s$)

向上挥舞时桨距降低为正

$K_{P\zeta}$ 变距-摆振耦合, $\Delta\theta = -K_{P\zeta}\zeta$

后摆时桨距降低为正

K_β 挥舞铰弹性常数

K_ζ 摆振铰弹性常数

K_θ 操纵系统弹性常数

L 剖面气动升力; 直升机滚转力矩稳定性导数 (带有脚标)

l_{tr} 尾旋翼在主旋翼后的距离

m 桨叶下标 $m = 1 \dots N$; 气动力俯仰力矩系数 (带有脚标); 单位长度桨叶质量

M 悬停气动效率, $C_T^{3/2}/\sqrt{2} C_P$; 桨叶剖面马赫数; 包括旋翼在内的直升机质量; 直升机俯仰力矩稳定性导数 (带有脚标); 桨叶气动力挥舞力矩系数 (带有脚标)

$\dot{m}$ 穿过桨盘的流量质量 (动量理论)

m_a 剖面气动力俯仰力矩

M_b 桨叶质量, $\int_0^R m dr$

M_f 气动力俯仰力矩

M_F 气动力挥舞力矩

M_L 气动力摆振力矩

M_{tip} 桨尖马赫数, $\Omega R/c_s$

M_x 旋翼桨毂滚转力矩, 向后退边为正

M_y 旋翼桨毂俯仰力矩, 向后为正

$M_{1.0.0}$ 前行桨尖马赫数

N 桨叶片数; 直升偏航力矩稳定性导数 (带有脚标)

N_* 挥舞-动力学纵-横耦合参数, $N_* = (\nu_c^2 - 1)/(-\gamma M_s^2) = (8/\gamma)(\nu^2 - 1) + K_P$

N_F 桨根挥舞方向力矩

N_L 桨根摆振方向力矩

p 声压

P 旋翼轴功率

P_k 第 k 阶扭转模态的广义坐标 (P_0 是刚性变距自由度)

Q	旋翼轴扭矩, 当需要外扭矩来转动旋翼时为正; 桨叶气动力扭矩或摆振力矩系数 (带有脚标)
q_k, q_{zk}	第 k 阶挥舞平面弯曲模态的广义坐标
q_{xk}	第 k 阶旋转平面弯曲模态的广义坐标
r	桨叶或桨盘径向坐标
R	旋翼半径; 桨叶径向气动切力系数 (带有脚标)
s	特征值或 Laplace 变量
S_b	桨叶一次惯性矩, $\int_0^R r m dr$
S_r	桨根切向力
S_x	在平面内的桨根切力
S_z	桨根垂直切力
S_i	挥舞模态的一次矩, $\int_0^R \eta_i m dr$
S_c	摆振模态的一次矩, $\int_0^R \eta_c m dr$
t	时间
T	旋翼拉力, 向上为正; 桨叶气动拉力系数 (带有脚标)
T/A	桨盘载荷
T/A_b	旋翼桨叶载荷
U	剖面合速度, $(u_T^2 + u_P^2)^{1/2}$
u_G	纵向阵风速度分量
u_P	垂直于桨盘平面的桨叶剖面空气速度
u_R	桨叶剖面径向空气速度
u_T	与桨盘平面相切的桨叶剖面空气速度
v	旋翼诱导速度 (向下穿过桨盘为正)
V	旋翼或直升机相对空气速度
v_G	横向阵风速度分量
v_h	理想的悬停诱导速度, $\sqrt{T/2\rho A}$
w	在尾迹远处的旋翼诱导速度
W	直升机总重
w_G	垂直方向阵风速度分量
x	旋翼不旋转坐标轴, 向后为正; 桨叶在摆振平面内的位移; 桨叶弦向坐标
X	直升机纵向力导数 (带有脚标)
x_A	桨叶气动中心在弦向位于变距轴之后的偏置量
x_B	直升机刚性机体的纵向自由度
X, Y	

x_h	桨毂纵向位移
x_1	桨叶重心在弦向位于变距轴之后的偏置量
y	旋翼不旋转坐标轴, 向右(前行边)为正
Y	旋翼侧向力, 向前行边为正; 直升机侧向力稳定性导数(带有脚标)
y_B	直升机刚性机体横向自由度
y_b	桨毂横向位移
z	旋翼不旋转坐标轴, 向上为正; 桨叶挥舞平面的位移
Z	直升机垂直力稳定性导数(带有脚标)
z_B	直升机刚性体垂直方向自由度
z_b	桨毂垂直方向位移
α	桨叶剖面迎角; 桨盘平面迎角; 向前倾斜为正
α_x	桨毂滚转扰动
α_y	桨毂俯仰扰动
α_z	桨毂偏航扰动
$\alpha_{1, 270}$	后退桨尖迎角
$\alpha_{\mu+0.4, 270}$	$r/R = \mu + .4$ 和 $\psi = 270^\circ$ 处桨叶迎角
β	桨叶挥舞角(向上为正)
β_P	预锥角
β_0	锥度角
β_{1c}	桨尖平面纵向倾斜角, 向前为正
β_{1s}	桨尖平面横向倾斜角, 向后行边为正
γ	桨叶 Lock 数, $\rho a c R^4 / I_b$
Γ	桨叶附着涡环量
$\delta_0, \delta_1, \delta_2$	剖面阻力展开式中的系数, $c_d = \delta_0 + \delta_1 \alpha + \delta_2 \alpha^2$
δ_3	变距-挥舞耦合, $(K_P = \tan \delta_3)$
ξ	桨叶摆振角, 与旋翼旋转方向相反为正
ξ_P	预摆角
η, η_β	基本挥舞模态的模态形状
η, η_ζ	基本摆振模态的模态形状
η_k, η_{z_k}	第 k 阶挥舞平面的弯曲模态的模态形状
η_{x_k}	第 k 阶摆振平面的弯曲模态的模态形状
θ	桨叶俯仰或桨距角, 抬头为正
θ_B	直升机刚性机体俯仰自由度
θ_{con}	桨距操纵输入(总距和周期变距)
θ_e	弹性扭转变形
θ_{FP}	飞行轨迹角, 爬升速度 $= V \sin \theta_{FP}$
θ_{tw}	线性扭转率
θ_0	总距桨距角
θ_{1c}	横向周期变距桨距角

θ_{1s}	纵向周期变距桨距角
$\theta_{.75}$	75%半径处总距桨距角
λ	旋翼流入比 $(V \sin \alpha + v)/\Omega R$, 向下穿过桨盘为正
λ_c	爬升流入比
λ_i	诱导流入比, $v/\Omega R$
λ_x	诱导速度纵向变化的系数
λ_y	诱导速度横向变化的系数
λ_0	旋翼平均诱导速度
μ	旋翼前进比, $V \cos \alpha/\Omega R$
ν, ν_β	桨叶基本挥舞模态的旋转自然频率
ν_c, ν_{pe}	计及变距-挥舞耦合的有效挥舞频率, $\nu_c^2 = \nu^2 + (\gamma/8)K_p$
ν_k, ν_{2k}	第 k 阶挥舞平面的弯曲模态的自然频率
ν_{xk}	第 k 阶摆振平面的弯曲模态的自然频率
ν_t	桨叶基本摆振模态的旋转自然频率
ξ_k	第 k 阶弹性扭转模态的模态形状
ρ	空气密度; 展向积分时桨叶径向坐标
σ	旋翼实度, $Nc/\pi R$
ϕ	剖面来流角, $\tan^{-1} u_F/u_T$
ϕ_B	直升机刚性机体的滚转自由度
ψ	桨叶或桨盘的方位角; 无因次时间, Ωt
ψ_B	直升机刚性机体的偏航自由度
ψ_m	第 m 片桨叶的方位 ($m = 1 \cdots N$)
$\omega, \omega_0, \omega_\beta$	刚性变距运动的自然频率 (操纵系统刚度)
ω_k	第 k 阶弹性扭转模态的自然频率
Ω	旋翼转速 (弧度/秒)

下 标 和 上 标

$0, 1c, 1s \cdots nc, ns \cdots \infty$	周期函数的正弦/余弦傅里叶级数表达式的谐波
$0, 1c, 1s \cdots nc, ns \cdots N/2$	傅里叶坐标变换的自由度 (总数 N)
c	爬升
cp	操纵平面
h	悬停
HP	桨毂平面
i	诱导
m	桨叶下标, $m = 1$ 到 N
mi	主旋翼
NFP	无变距平面
O	翼型
X, Y	

$\bar{p}$	废阻
P	由滚转速率引起的直升机稳定性导数
q	由俯仰速率引起的直升机稳定性导数
r	由偏航速率引起的直升机稳定性导数
TPP	桨尖平面
tr	尾旋翼
u	由纵向速度引起的直升机稳定性导数
v	由横向速度引起的直升机稳定性导数
w	由垂直方向速度引起的直升机稳定性导数
β	由桨叶挥舞位移引起的旋翼气动力
$\dot{\beta}$	由桨叶挥舞速度或桨毂角运动引起的旋翼气动力
ξ	由桨叶摆振位移引起的旋翼气动力
$\dot{\xi}$	由桨叶摆振速度或桨毂偏航运动引起的旋翼气动力
θ	由桨叶变距运动引起的旋翼气动力
$\dot{\theta}$	由桨叶变距速率引起的旋翼气动力
λ	由桨毂垂直方向速度或诱导速度扰动引起的旋翼气动力
μ	由桨毂在摆振平面内的速度引起的旋翼气动力
$()^{\cdot}$	$d()/dt$ 或 $d()/d\psi$
$()'$	$d()/dr$
$()^*$	归一化: 旋翼桨叶惯量都用 I_0 除, 而直升机的惯量都用 $1/2 NI_0$ 除

目 录

符号	(Ⅺ)
----------	-----

第一章 绪 言

1.1 直升机	(1)
1.1.1 直升机的旋翼	(2)
1.1.2 直升机型式	(4)
1.1.3 直升机的运行	(4)
1.2 历史	(5)
1.2.1 直升机的发展	(5)
1.2.2 参考文献	(10)
1.3 符号	(10)
1.3.1 因次	(10)
1.3.2 桨叶的物理描述	(10)
1.3.3 桨叶空气动力学	(11)
1.3.4 桨叶运动	(11)
1.3.5 旋翼迎角和速度	(12)
1.3.6 旋翼力和功率	(12)
1.3.7 旋翼桨盘平面	(13)
1.3.8 NACA的符号	(13)

第二章 垂 直 飞 行 I

2.1 动量理论	(14)
2.1.1 作用盘	(14)
2.1.2 悬停状态的动量理论	(15)
2.1.3 爬升状态的动量理论	(16)
2.1.4 悬停功率损耗	(17)
2.2 悬停气动效率(品质因素)	(17)
2.3 扩展的动量理论	(18)
2.3.1 悬停或爬升状态的旋翼	(19)
2.3.2 尾迹里的旋流	(21)
2.3.3 由于型阻扭矩的旋流	(23)
2.4 叶素理论	(24)
2.4.1 叶素理论发展的历史	(24)

2.4.2 用于垂直飞行的叶素理论	(25)
2.4.2.1 旋翼拉力	(27)
2.4.2.2 诱导速度	(27)
2.4.2.3 功率和扭矩	(28)
2.5 叶素和动量的结合理论	(29)
2.6 悬停性能	(30)
2.6.1 桨尖损失	(30)
2.6.2 由于非均匀入流和桨尖损失引起的诱导功率	(32)
2.6.3 桨根切除区	(32)
2.6.4 桨叶平均升力系数	(33)
2.6.5 等效实度	(33)
2.6.6 理想旋翼	(34)
2.6.7 最优悬停的旋翼	(35)
2.6.8 扭转和尖削的影响	(36)
2.6.9 悬停极曲线例子	(36)
2.6.10 桨盘载荷、展向载荷及环量	(38)
2.7 涡流理论	(38)
2.7.1 旋翼及其尾迹的涡流图象	(39)
2.7.2 作用盘的涡流理论	(40)
2.7.3 有限片桨叶	(42)
2.7.3.1 最优旋翼的尾迹结构	(43)
2.7.3.2 Prandtl 的桨尖载荷解	(44)
2.7.3.3 Goldstein 的螺旋桨分析	(46)
2.7.3.4 在低入流旋翼上的应用	(46)
2.7.4 非均匀入流(数值法的涡流理论)	(47)
2.7.5 参考文献	(48)
2.8 参考文献	(48)

第三章 垂直飞行 I

3.1 垂直飞行状态的诱导功率	(50)
3.1.1 垂直飞行的动量理论	(51)
3.1.2 轴向飞行状态旋翼的气流情况	(53)
3.1.2.1 正常工作状态	(53)
3.1.2.2 涡环状态	(53)
3.1.2.3 紊流状态	(54)
3.1.2.4 风车制动状态	(54)
3.1.3 诱导速度曲线	(55)
3.1.3.1 悬停性能	(56)
3.1.3.2 自转	(56)

3.1.3.3 涡环状态	(57)
3.1.4 参考文献	(57)
3.2 垂直下降状态的自转	(58)
3.3 垂直爬升飞行	(61)
3.4 垂直阻力	(62)
3.5 悬停状态双旋翼间的干扰	(64)
3.6 地面效应	(66)

第 四 章 前 飞 I

4.1 前飞状态的动量理论	(68)
4.1.1 旋翼诱导功率	(68)
4.1.2 前飞状态下的爬升、下降和自转	(71)
4.1.3 桨尖损失系数	(72)
4.2 前飞状态的涡流理论	(73)
4.2.1 经典涡流理论的结果	(73)
4.2.2 前飞状态诱导速度的变化	(75)
4.2.3 参考文献	(76)
4.3 前飞状态双旋翼间的干扰	(77)
4.4 前飞状态的地面效应	(80)

第 五 章 前 飞 I

5.1 前飞状态的直升机旋翼	(81)
5.2 前飞空气动力学	(91)
5.3 旋翼气动力	(93)
5.4 前飞状态的功率	(98)
5.5 旋翼挥舞运动	(102)
5.6 前飞状态性能和挥舞的算例	(107)
5.7 对假设的评述	(110)
5.8 桨尖损失和桨根切除	(111)
5.9 桨叶的重力力矩	(111)
5.10 线性入流变化	(112)
5.11 高阶谐波挥舞运动	(114)
5.12 型阻功率和径向流动	(116)
5.13 具有铰链弹簧的挥舞运动	(121)
5.14 挥舞铰偏置	(125)
5.15 无铰旋翼	(129)
5.16 万向接头式和跷板式旋翼	(130)
5.17 变距-挥舞耦合	(132)
5.18 直升机的力、力矩和功率平衡	(135)

5.19 摆振运动	(139)
5.20 反向流动	(142)
5.21 压缩性	(146)
5.22 尾旋翼	(147)
5.23 数值解	(148)
5.24 参考文献	(148)

(94)

第六章 性 能

6.1 悬停性能	(157)
6.1.1 悬停和垂直飞行的需用功率	(157)
6.1.2 爬升和下降	(158)
6.1.3 可用功率	(158)
6.2 前飞性能	(159)
6.2.1 前飞时的需用功率	(159)
6.2.2 前飞时的爬升与下降	(161)
6.2.3 D/L 的公式	(161)
6.2.4 旋翼的升力和阻力	(162)
6.2.5 P/T 的公式	(163)
6.3 直升机性能参数	(164)
6.3.1 悬停性能	(164)
6.3.2 悬停时的最小功率负荷	(164)
6.3.3 平飞时的需用功率	(166)
6.3.4 爬升与下降	(167)
6.3.5 最大速度	(168)
6.3.6 最大飞行高度	(168)
6.3.7 航程与续航时间	(169)
6.4 其它的性能问题	(170)
6.4.1 旋翼机功率的确定	(170)
6.4.2 旋翼轴角度的确定(有尾桨时)	(171)
6.5 性能计算的改进	(172)
6.6 参考文献	(172)

第七章 设 计

7.1 旋翼的类型	(178)
7.2 直升机类型	(179)
7.3 初步设计	(181)
7.4 直升机的速度限制	(182)
7.5 发动机停车后的自转着陆	(184)
7.6 直升机阻力	(187)

7.7 旋翼桨叶翼型选择	(188)
7.8 旋翼桨叶的翼型阻力	(191)
7.9 参考文献	(193)

第八章 旋翼系统的数学问题

8.1 傅里叶级数	(196)
8.2 谐波量的求和	(197)
8.3 谐波分析	(199)
8.4 傅里叶坐标转换	(200)
8.4.1 自由度的变换	(200)
8.4.2 运动方程的变换	(203)
8.5 旋翼运动的特征值与特征矢量	(207)
8.6 线性、周期系统的分析	(209)
8.6.1 线性常系数方程	(211)
8.6.2 线性周期系数方程	(213)

第九章 旋翼动力学 I

9.1 斯图姆-柳维叶 (Sturm-Liouville) 理论	(219)
9.2 挥舞平面的运动	(221)
9.2.1 刚体挥舞	(221)
9.2.2 挥舞平面内的弯曲	(222)
9.2.3 不转坐标系	(226)
9.2.4 弯矩	(227)
9.3 旋转平面内的运动	(228)
9.3.1 刚体挥舞与刚体摆振	(228)
9.3.2 旋转平面内的弯曲	(230)
9.3.3 旋转平面与挥舞平面弯曲	(232)
9.4 扭转运动	(234)
9.4.1 刚体变距-挥舞	(234)
9.4.2 结构上的变距-挥舞和变距-摆振耦合	(237)
9.4.3 扭转与挥舞平面弯曲	(240)
9.4.4 非旋转坐标系	(246)
9.5 桨毂反力	(246)
9.5.1 旋转载荷	(247)
9.5.2 不转载荷	(251)
9.6 旋翼轴运动	(255)
9.7 挥舞-摆振-扭转耦合运动	(260)
9.8 旋翼桨叶弯曲模态	(260)
9.8.1 带扭转桨叶的工程梁理论	(260)