



中航工业首席专家
技术丛书

“十二五”国家重点图书出版规划项目
中航工业科技与信息化部组织编写

邓景辉 著

直升机旋翼气动 基础技术

AERODYNAMIC METHODOLOGY
OF A HELICOPTER ROTOR

航空工业出版社

中航工业首席专家技术丛书

“十二五”国家重点图书出版规划项目

直升机旋翼气动基础技术

邓景辉 著

航空工业出版社

北京

内 容 提 要

本书针对现代直升机发展中亟待进一步提高平台性能、飞行品质、动力学特性等旋翼气动基础问题,深入阐述了直升机旋翼流动机理、旋翼气动的基础理论、高效旋翼计算流体动力学数值模拟方法、旋翼噪声的建模与评估、非线性/强耦合气动弹性稳定性分析方法,以及旋翼翼型的优化设计与典型翼型的开发案例。

本书可作为航空院所从事直升机研究和生产的工程技术人员参考与借鉴,以提高我国旋翼自主研发能力,推动直升机旋翼气动技术的发展。

图书在版编目(C I P)数据

直升机旋翼气动基础技术 / 邓景辉著. -- 北京:
航空工业出版社, 2013. 1

(中航工业首席专家技术丛书)

ISBN 978 - 7 - 5165 - 0129 - 0

I. ①直… II. ①邓… III. ①直升机—旋翼—空气动力学 IV. ①V275

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 304710 号

直升机旋翼气动基础技术

Zhishengji Xuanyi Qidong Jichu Jishu

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里 14 号 100029)

发行部电话: 010 - 64815615 010 - 64978486

北京世汉凌云印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2013 年 1 月第 1 版

2013 年 1 月第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

印张: 21.25

字数: 547 千字

印数: 1—2000

定价: 138.00 元

总 序

航空工业被誉为“现代工业之花”，是国家战略性高技术产业，同时也是技术密集、知识密集、人才密集的行业。中国是世界航空产业格局中的后来者，而中航工业作为支撑中国航空工业发展的核心力量，履行国家使命，必须大力推进自主创新，必须在科技创新和知识创新上有所作为。

从2009年开始，中航工业按照航空技术体系，在科研一线技术人员中陆续遴选出近百位集团公司级“首席技术专家”。此举既是集团公司对这些技术人员技术水平和能力的肯定，也意味着集团公司赋予了他们更大的责任和使命。我们希望这些技术专家在今后的工作中，要继续发挥科研技术带头人的作用，更加注重学习和创新，不断攀登航空科技新的高峰；要坚持潜心科研，踏实工作，不断推动航空科技进步；要带队伍、育人才，打造高水平的科研队伍，努力培养更多的高层次专业技术人才，为中航工业的发展做出更大的贡献。

21世纪企业的成功，越来越依赖于企业所拥有知识的质量，利用企业所拥有的知识为企业创造竞争优势和持续竞争优势，这对企业来说始终是一个挑战。正因如此，“知识管理”在航空工业等高科技产业领域得以快速推广和应用。依照这个思路，将首席技术专家们所积淀和升华出来的显性或隐性知识纳入知识管理体系，是进一步发挥其人才效益的重要方式，也是快速提升中航工业自主创新能力的的重要途径。

知识管理理论的核心要义，就是把知识作为一种重要资产来进行管理，正如知识管理的创始人斯威比所说：“知识资本是企业的一种以相对无限的知识为基础的无形资产，是企业核心竞争能力的源泉。”如果专家们把其掌握的各类显性或隐性知识，用书面文字的形式呈现出来，就相当于构建了一个公共资料库，提供了一个交流平台，可以让更多的人从中受益——这就是出版这套“中航工业首席专家技术丛书”的初衷。

集团公司的这近百位“首席技术专家”，基本覆盖了航空工业的所有专业。每位专家撰写一部专著，集合起来，就相当于一个航空工业的“四库全书”，很有意义。在此，我要特别感谢这些专家们，他们在繁重的科研生产任务中，不辞辛劳地撰写出了自己的专著，无私地将自己的宝贵经验呈现给大家，担当起了传承技术、传承历史的责任。

相信这套丛书的出版，会使更多的航空科技工作者从中获益，也希望在一定程度上能助力中航工业的自主创新，对我国航空工业的科技进步产生积极影响。



中国航空工业集团公司董事长

序

旋翼是直升机的关键动部件，旋翼技术是直升机的专有技术，代表了直升机的特色，也是直升机区别于固定翼机的重要标志。旋翼技术复杂，包括气动设计、动力学设计、结构设计、强度设计、材料、工艺、试验和试飞等专业，而气动技术是旋翼设计的基础，也是直升机设计的基础。由中国航空工业集团公司首席技术专家、中国直升机设计研究所邓景辉撰写的《直升机旋翼气动基础技术》一书，是作者结合长期从事的直升机旋翼工程设计和预先研究工作成果的总结。

全书以直升机旋翼气动特性基础技术为主线，深入阐述与气动相关的旋翼翼型、旋翼桨叶气动布局、旋翼气动弹性稳定性等问题；重点分析直升机旋翼和翼型的流动机理；构建直升机旋翼气动分析理论模型；形成应用于新一代旋翼翼型设计方法，高性能、低噪声旋翼气动布局设计方法，大变形和强耦合条件下的旋翼气动弹性稳定性分析方法，以及典型翼型的开发案例。

通过理论分析、试验验证、方法研究及案例分析，从不同层面整理、归纳和总结了直升机气动技术的最新研究成果，理论与实践相结合，具有很强的工程使用价值，必将为推动旋翼气动设计技术的提升，实现自主创新能力的跨越式发展，摆脱关键核心技术长期受制于人的被动局面提供有益的帮助。

该书可供直升机界的设计、制造、使用单位技术人员参考之用。值此出版之际，欣然为之代笔作序。



2012 年 12 月于北京

符号表

第 1 章

C_{Lmax}	最大升力系数
Re	雷诺数
Ma_{dd}	阻力发散马赫数
Ma_{tip}	桨尖马赫数

第 2 章

PIV	粒子成像测速仪
r/min	旋翼转速
μ	前进比
ψ_w	方位角
ψ_v	桨尖涡采样时桨叶所处的方位角
C_T	旋翼拉力系数
Φ	扰动势函数
Φ_∞	定常势函数
n	控制点的法向矢量
r	流场中的涡线节点的位置矢量
V_∞	自由流速度
V_{ind}	诱导速度
r_C	涡核半径
δ	湍流黏性系数
ν	运动黏性系数
$\theta_{0.75}$	旋翼总距
θ_{1c}	纵向周期变距角
θ_{1s}	横向周期变距角
a_1	桨盘后倒角
b_1	桨盘侧倾角
ε_r	阻尼因子

第 3 章

n	旋翼转速
C_T	拉力系数

T	旋翼拉力
P_w	旋翼功率
F_{PL}	操纵拉杆载荷
Cp_R	压力系数
$\theta_{0.75}$	总距
q	绝对速度
q_ω	牵连速度
ω	角速度
S	单元的表面积
n	单元外法向矢量
V	控制单元体积
p	压强
ρ	密度
E_r	总转能
H_r	总转焓
μ	黏性系数
μ_t	湍流黏性系数
μ_l	层流黏性系数
$(Pr)_l$	层流普朗特常数
$(Pr)_t$	湍流普朗特常数
q_∞	自由流速度
$\nabla\phi$	扰动速度
q''	诱导速度
ψ	桨叶的方位角
ζ	尾迹寿命角
q''	涡线控制点的诱导速度
Γ	涡线环量
l	涡段长度
r	涡段到诱导点的矢径
ρ	密度
e	能量
Ma	马赫数
α	迎角
Re	雷诺数
α_0	零升力迎角
α_{lj}	临界迎角
C_{Dmin}	最小阻力系数
C_{Lmax}	最大升力系数
M_{Z_0}	零升力矩系数

C_y^α	升力线斜率
k	折算频率
C	翼型长度
f	频率
V	速度

第 4 章

W	守恒型 N-S 方程的状态变量
f_1	守恒型 N-S 方程的对流通量
f_{vi}	守恒型 N-S 方程的黏性通量
μ	黏性系数
ρ	气体密度
p	气体压力
T	气体温度
e	气体单位体积总内能
t	时间
γ	比热比
Ma_∞	来流马赫数
Pr_l	层流普朗特常数
Pr_t	湍流普朗特常数
μ_l	层流黏性系数
J	雅可比矩阵
$\Omega(t)$	控制体
$\partial\Omega(t)$	控制体边界
n	控制体边界外法向单位矢量
dV	体积微元
dS	面积微元
$V_{i,j}$	单元体积
$R_{i,j}$	流入和流出网格单元的净通量
$H_{i-1/2,j}$	网格单元面上的通量张量
S	面积矢量
H_t	单位质量总焓

第 5 章

E	总能
H	总焓
μ	黏性系数
k	热传导系数
T	绝对温度

γ	比热比
μ_t	湍流黏性系数
μ_l	层流黏性系数
$(Pr)_l$	层流普朗特常数
$(Pr)_t$	湍流普朗特常数
$Q^l_{i,j,k}$	流出控制体所有网格面的净通量
A_{Roe}	Roe 平均雅可比矩阵
$Q^l_{i,j,k}$	非黏性通量
$Q^n_{i,j,k}$	黏性通量
$R(W^{m+1})$	残值
Δt	物理时间步长
τ	伪时间
$c_{i,j,k}$	当地声速
$q_{ri,j,k}$	单元中心处的相对速度
$S^l_{i,j,k}$	面积矢量
q	流速
q_∞	自由流速度
$\nabla\phi$	扰动速度
q^n	诱导速度
ψ	桨叶的方位角
ζ	尾迹寿命角
Γ	涡线环量
l	涡段长度
r	涡段到诱导点的矢径
ρ	密度
e	能量
N_s	涡线的数目
N_c	涡线上的节点数
N_a	桨叶方位角步长数
Ma	马赫数
C_L	升力系数
L	字符串长度
Δ_r	求解精度
w_i	权系数
$\phi(r)$	径向函数
r^i	欧氏距离

第 6 章

BVI	桨 - 涡干扰
-----	---------

HSI	高速脉冲
ρ_0	未扰动介质的密度
c	声速
u_n	运动物体表面径向速度
v_n	运动物体表面法向速度
$\delta(f)$	狄拉克·德尔塔函数
$H(f)$	海维赛德函数
$\delta(g)/4\pi r$	格林函数
$\frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j}$	广义交叉导数
T_{ij}	莱特希尔应力张量
dS	声源的微元面积
θ	声源面法向与声发射方向的夹角

第 7 章

$C_{N_\alpha}(Ma)$	马赫数下的升力曲线斜率
ΔC_N^α	迎角阶跃激励下的翼型剖面的法向力
ΔC_M^α	迎角阶跃激励下的翼型剖面的变距力矩
$C_{N_n}^C$	环量法向力
$C_{N_n}^I$	非环量法向力
C_N^q	迎角变化率阶跃激励下的翼型剖面垂直力
$C_{N_n}^p$	附着流情况下总的垂直力系数
$C_{Ma_n}^C$	环量变距力矩
$C_{Ma_n}^I$	非环量变距力矩
C_{Ma}^q	迎角变化率阶跃激励下的翼型剖面变距力矩
$C_{Ma_n}^p$	附着流情况下总的变距力矩系数
C_{C_n}	非定常弦向力系数
C_{D_n}	非定常压阻系数
Ma	马赫数
β	普朗特-格劳厄特压缩性修正因子
$\phi_\alpha^C(S)$	对应于环量部分的指数函数
$\phi_\alpha^I(t)$	对应于非环量部分的指数函数
S	时间的无量纲化参数
V	翼型剖面速度
c	弦长
$X_n, Y_n, D_n, D_n^q, D_{p_n}$	缺损函数
f	基希霍夫定常后缘分离模型后缘分离点
K_0, K_1, K_2	基希霍夫定常后缘分离模型力矩拟合系数

α_f	基希霍夫非定常后缘分离模型有效迎角
f''	基希霍夫非定常后缘分离模型后缘分离点
$C_{N_n}^f$ 、 $C_{Ma_n}^f$ 、 $C_{C_n}^f$	基希霍夫非定常后缘分离模型垂直力、力矩、弦向力系数
C_N 、 C_{Ma}	动态失速下的总垂直力系数、变距力矩系数
λ	格劳厄特入流模型总入流比
μ	格劳厄特入流模型前进比
λ_i	格劳厄特入流模型诱导入流比
α_s	格劳厄特入流模型桨盘前倾角
C_T	拉力系数
ψ	方位角
x	无量纲桨叶展向坐标
k_x 、 k_y	线性入流模型系数
$r_W(\psi, \phi)$	尾迹几何形状
ζ	尾迹寿命角
ϕ	尾迹几何方位角
r_b	桨叶上径向站点 r 处的位置矢量
μ	自由流速度矢量
$D(\psi, \phi)$	自诱导速度引起的尾迹畸变
λ_i	迁移速度
K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4	预定尾迹模型参数
Δv	诱导速度的影响系数
$\lambda_{ij}(r_i, \psi_j)$	桨盘上各站点的诱导速度
Γ_0 、 Γ_1	高速飞行下的双峰尾迹模型外、内侧峰环量
X_B 、 Y_B 、 Z_B	机体坐标
X_H 、 Y_H 、 Z_H	桨毂坐标
X 、 Y 、 Z	桨叶坐标
ξ 、 η 、 ζ	桨叶剖面坐标
T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5 、 T_6	坐标转换矩阵
M_G 、 M_{FC} 、 M_{FF} 、 M_T	重力力矩、离心力力矩、惯性力矩、外载力矩
I_e	桨叶对挥舞铰处的惯性矩
S_e	桨叶对挥舞铰处的静矩
e	桨叶挥舞偏置量
β 、 $\dot{\beta}$ 、 $\ddot{\beta}$	挥舞角、挥舞角速度、挥舞角加速度
M_A	气动力引起的力矩
M_{man} 、 M_q 、 M_p	俯仰和滚转角速度引起的惯性矩
M_k 、 M_{kq} 、 M_{kp}	俯仰和滚转角速度引起的科氏力矩
q 、 p	俯仰角速度、滚转角速度
r_{C0}	涡的起始涡核半径
ν	运动黏性系数

δ	湍流黏性系数
Ω	旋翼转速
R_c	桨叶翼型起始半径
R	桨叶半径
N_s	桨叶分段数目
Γ_{ni}	第 i 条尾随涡的环量
Γ_{bi}	桨叶第 i 单元的附着涡环量
V_{bound}^{ind}	附着涡对控制点的诱导速度
V_{near}^{ind}	尾随涡对控制点的诱导速度
V_{tip}^{ind}	桨尖涡对控制点的诱导速度
V_{man}	旋翼滚转角速度引起控制点速度
V_{∞}	自由来流速度
$V_{c,j}$ 、 V_{β} 、 V_{θ}	控制点的刚体运动速度、挥舞速度、变距引起速度
$\bar{e}_{11}$ 、 $\bar{e}_{12}$ 、 $\bar{e}_{13}$	线应变
k_1 、 k_2 、 k_3	角应变
x_1 、 x_2 、 x_3	桨叶曲线坐标
w_1 、 w_2 、 w_3	桨叶剖面上任意一点的翘曲变形
ϵ_{11} 、 γ_{12} 、 γ_{13} 、 ϵ_{22} 、 γ_{23} 、 ϵ_{33}	格林-拉格朗日应变张量
u 、 v 、 w 、 ϕ	桨叶弹性轴上一点的拉伸、摆振、挥舞、扭转位移
ζ 、 β 、 θ	欧拉角
σ 、 ε	应力、应变
ω	简谐频率
G^* 、 G' 、 G''	复模量、储能模量、耗能模量
K^* 、 K' 、 K''	复刚度、弹性刚度、阻尼刚度
C_{eq}	等效黏性阻尼系数
δ	损耗角
η	无量纲损耗因子
F 、 F_{cn} 、 F_{sn}	力、傅里叶展开力的余弦与正弦项系数
X 、 X_{cn} 、 X_{sn}	位移、傅里叶展开位移的余弦与正弦项系数
N	滞弹性位移场的个数
Ω_i	第 i 个滞弹性位移场的松弛时间
G_u	材料的剪切模量
c_i	第 i 个滞弹性位移场与弹性位移场间的耦合系数
σ_i^A 、 ε_i^A	第 i 个滞弹性位移场的滞弹性应力、滞弹性应变
$p(x, t)$	切向分布载荷
f	黏弹性材料的瞬态弹性响应
$H(t_k)$	一次近似的雅可比矩阵
$g(t_k)$	一次近似的雅可比常数项

θ_{tw}	桨叶预扭
$\bar{\omega}_{\beta 1}$	一阶挥舞频率
$\bar{\omega}_{\xi 1}$	一阶摆振频率
$\bar{\omega}_{\theta 1}$	一阶扭转频率
$C_{\xi 1}$	一阶摆振结构阻尼

第 8 章

ω_i	NURBS 曲线描述翼型的每个控制点的权因子
$p(u)$	NURBS 描述翼型曲线坐标
d_i	NURBS 描述翼型的控制顶点坐标
$N_{i,k}(u)$	定义在节点矢量上的 k 次规范 B 样条基函数
μ	克里金模型中的全局常数
y	克里金模型估计值公式中采样点的响应矢量
r	克里金模型估计值公式中被估计点与采样点的相关矢量
$f_{\min}$	采样点中目标函数的最小值
μ_l	层流黏性系数
μ_t	湍流黏性系数
δ_{ij}	克罗内克符号
L^*	特征长度
ρ	气体密度
p	气体压力
T	气体温度
e	气体单位体积总内能
t	时间
γ	比热比
Ma_∞	来流马赫数
Pr_l	层流普朗特常数
Pr_t	湍流普朗特常数
Re	雷诺数
C_{Lmax}	最大升力系数
C_L	升力系数
C_D	阻力系数
Ma_{dd0}	零升阻力发散马赫数
t/c	相对厚度

第 9 章

IB	背景网格沿周向的网格点数
Δr	背景网格展向的分段长度

Δy	背景网格轴向的分段长度
$\Delta \psi$	背景网格周向的分段长度
$\mathbf{r} (x, y, z, t)$	旋翼网格上任意一点在绝对坐标系下的位置
$\mathbf{r}^0$	初始时刻旋翼网格节点的空间位置
$\mathbf{M}$	转换矩阵
$\mathbf{R}_{\psi(t)}$	旋转矩阵
$\mathbf{R}_{\beta(t)}$	挥舞矩阵
$\mathbf{R}_{\theta(t)}$	变距矩阵
θ	变距角
β	挥舞角
ψ	方位角
C_p	桨叶表面压强系数
V	前飞速度
R	桨叶半径
Ma_{tip}	桨尖马赫数
μ	前进比
y_y	涡线与旋翼平面之间的高度距离
$C_L \cdot Ma \cdot Ma$	BVI 载荷
C_L	升力系数
Re	雷诺数

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 旋翼专用翼型	(1)
1.2 旋翼气动布局	(3)
1.3 旋翼气动噪声	(6)
1.4 旋翼气动弹性稳定性	(7)
第 2 章 旋翼尾迹与流场	(9)
2.1 旋翼尾迹流动机理	(9)
2.1.1 旋翼流场 PIV 测量系统	(9)
2.1.2 烟流发生器及其示踪粒子	(11)
2.1.3 2m 旋翼典型案例的试验与分析	(11)
2.1.4 4m 旋翼典型案例的试验与分析	(27)
2.2 旋翼流场理论分析	(36)
2.2.1 旋翼流场的理论建模	(36)
2.2.2 理论计算与试验的对比分析	(40)
第 3 章 旋翼桨叶与翼型表面流动机理	(42)
3.1 旋翼桨叶表面流动机理	(42)
3.1.1 旋翼桨叶表面压力测量试验	(42)
3.1.2 旋翼桨叶表面压力分布分析	(55)
3.2 旋翼翼型流动机理	(65)
3.2.1 翼型流动试验	(65)
3.2.2 理论与试验对比分析	(86)
第 4 章 旋翼翼型设计理论与建模	(112)
4.1 概述	(112)
4.2 翼型气动性能分析理论与建模	(113)
4.2.1 翼型气动性能	(113)
4.2.2 空间离散	(116)
4.2.3 流场求解	(118)
4.2.4 多重网格求解加速	(118)
4.2.5 求解条件	(119)
4.2.6 湍流模型	(122)

4.2.7 转换模型	(123)
第5章 旋翼桨叶气动布局设计理论与建模	(125)
5.1 概述	(125)
5.2 旋翼流场的数值模拟	(125)
5.2.1 黏性区域	(125)
5.2.2 势流区域	(132)
5.2.3 自由尾迹模型	(132)
5.2.4 区域之间的信息传递	(132)
5.2.5 计算域分区及网格生成	(133)
5.2.6 计算流程图	(134)
5.3 桨叶气动布局优化设计	(134)
5.3.1 外形优化设计理论	(134)
5.3.2 优化方法	(139)
第6章 旋翼噪声分析理论与建模	(142)
6.1 概述	(142)
6.1.1 旋翼气动噪声的分类	(142)
6.1.2 旋翼气动噪声的分析方法	(142)
6.2 FW-H 方程理论公式推导	(143)
6.2.1 旋翼旋转噪声的求解	(144)
6.2.2 四极子噪声的求解	(146)
6.3 基希霍夫方程理论公式推导	(148)
6.3.1 基希霍夫方程形式	(148)
6.3.2 悬停状态下的基希霍夫方法	(149)
6.3.3 前飞状态下的基希霍夫方法	(149)
6.3.4 基希霍夫计算流程图	(149)
第7章 旋翼气动弹性稳定性分析理论与建模	(150)
7.1 概述	(150)
7.1.1 旋翼气动力理论建模的发展	(150)
7.1.2 旋翼结构动力学建模的发展	(154)
7.1.3 旋翼气动弹性稳定性求解方法的发展	(156)
7.2 旋翼气动建模	(157)
7.2.1 二维翼型非定常气动力计算方法	(157)
7.2.2 稳态自由尾迹计算方法	(164)
7.2.3 瞬态自由尾迹建模	(185)
7.3 旋翼结构动力学建模	(196)
7.3.1 复合材料大变形梁建模方法	(196)