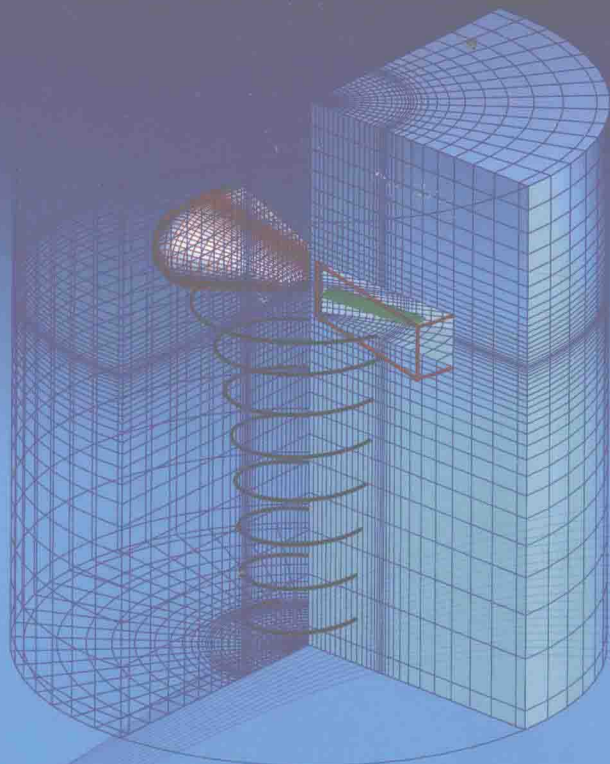


直升机空气动力学丛书 | 招启军 主编

Foundations of Helicopter
Computational Fluid Dynamics

直升机计算流体力学基础

招启军 徐国华 著



科学出版社

直升机空气动力学丛书

直升机计算流体力学基础

招启军 徐国华 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书总结了关于直升机计算流体力学(CFD)基础方法研究方面的最新进展和经验,并结合国内外的已有成果进行了对照。阐述了直升机 CFD 方法的研究进展、计算流体力学基础知识、直升机 CFD 方法中的二维和三维网格生成技术、运动嵌套网格技术、非结构网格技术、滑移网格及其他网格技术,详细介绍了空间离散方法、时间离散方法及求解条件、流场高效推进方法、混合 CFD 方法、动量源方法等,给出了悬停状态、前飞状态直升机旋翼流场、气动特性及旋翼/机身干扰流场的算例结果,并与试验结果和参考结果进行了对比,供读者参考使用。

本书可供直升机设计、风力机设计、螺旋桨设计等专业的本科生、研究生及科研人员参考学习。

图书在版编目(CIP)数据

直升机计算流体力学基础/招启军,徐国华著. —北京:科学出版社, 2016.6

直升机空气动力学丛书

ISBN 978-7-03-048248-8

I. ①直… II. ①招… ②徐… III. ①直升机—流体力学 IV. ①V275

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016) 第 098612 号

责任编辑: 惠 雪 / 责任校对: 王 瑞

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 许 瑞

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

文林印务有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 6 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2016 年 6 月第一次印刷 印张: 20 3/4 彩插: 3

字数: 418000

定价: 128 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

旋翼集拉力、推力和操纵力于一体，是直升机的关键气动部件，对直升机的飞行性能和操纵特性具有决定性作用。与固定翼相比，直升机旋翼工作方式更加独特，除了具有旋转运动之外，还存在挥舞运动、摆阵运动和变距运动，有时这些运动还存在耦合效应。随着直升机前飞速度的增加，在不同方位角，旋翼桨叶剖面的速度差异也随之增大，导致前行桨叶会出现激波/附面层干扰，后行桨叶会出现动态失速等现象，同时还会出现桨/涡干扰等问题，这些现象和问题则对旋翼的流场和气动载荷的分析提出了严峻的挑战。直升机空气动力学三大经典理论——滑流理论、叶素理论和涡流理论，在分析直升机旋翼流场及气动特性中发挥了重要作用，具有广泛的工程应用价值。然而，在针对上述复杂的旋翼空气动力学现象时，特别是对于具有先进气动外形旋翼流动的细节以及全机干扰分析时，这些经典理论则难以解决，因此需要提出新的理论分析方法，于是直升机计算流体动力学 (CFD) 方法就应运而生。

随着计算机能力和数值计算方法的发展，可以通过计算流体动力学方法对旋翼流场和气动特性进行数值计算与分析。由于 Navier-Stokes 方程是从反映流体本质的基本方程出发对旋翼流场进行求解的，考虑了气体的黏性、压缩性，因而能充分地捕捉旋翼流场，尤其是跨音速流动的细节，这对于研究具有先进气动外形旋翼的绕流以及与机身等产生的相互干扰等问题是至关重要的，因此，CFD 方法在直升机空气动力学的研究中逐步崭露头角，并且应用越来越广泛。然而，与固定翼 CFD 方法相比，直升机旋翼 CFD 方法的研究难度更大，主要体现在：旋翼桨叶存在复杂的耦合运动，这给生成高质量计算网格带来困难；由于旋翼流场中同时存在可压流动与不可压流动、非定常附着流与分离流，这对空间离散格式、主控方程和湍流模型的选取增加了难度；与此同时，由于数值耗散的存在降低了旋翼桨尖涡产生及输运的模拟精度，这将直接影响旋翼气动特性和旋翼/机身干扰流场的模拟结果。针对这些难点，国内外学者展开了系统而深入的研究，提出了很多解决方案，进而推动了直升机 CFD 方法的发展。其中以招启军教授和徐国华教授为代表的团队研究成果斐然，建立了多个独创性的理论和方法，发表了几十篇高水平文章。他们提出的这些独创性的理论和方法已在直升机 CFD 方法的工程领域中应用，并发挥重要的作用。

尽管当前已出版诸多 CFD 方面的教材和专著，但是由于直升机旋翼 CFD 方法的研究难点较多，进展缓慢，因此目前国际上尚未出版有关介绍直升机 CFD 方

法的专业书籍,《直升机计算流体动力学基础》的出版填补了该领域的空白。该书在系统介绍直升机 CFD 方法的同时,详细展现了作者及其团队的诸多最新的研究成果,比如有特色的高效运动嵌套网格方法、混合 CFD 方法、非定常动量源方法等,给出了具有知识产权的直升机 CFD 代码(CLORNS),并通过系统的算例验证以及与国外相关软件和方法的对比,表明了该代码的先进性。

该书内容翔实、文笔流畅,具有严谨的科学学风、新颖的前沿动态和完整的学术体系。全书较全面地反映了直升机 CFD 方法的最新进展,深入浅出、层次分明,并有丰富的应用实例,具有较高的可读性和借鉴性。该书对直升机设计、风力机设计、螺旋桨设计等相关研究人员有较大的参考价值。该书的首次出版将大大推动我国直升机空气动力学的发展和应用,也将为世界直升机空气动力学的发展和应用做出重要贡献!因此,我向广大读者推荐此书。

陈作砥

2016 年 5 月

前 言

随着计算机性能的提高和数值计算方法的发展,直升机计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 方法在直升机空气动力学的发展和应用中起到了越来越重要的作用。但到目前为止,国际上还没有出版关于直升机 CFD 方法的专业书籍,为了满足先进直升机技术发展的需求,迫切需要系统介绍直升机 CFD 方法的参考资料。由于缺乏这方面的资料,在为本科生和研究生开设的“直升机 CFD”专业课中,作者一直没有找到合适的教材,多是参考了通用的 CFD 专业教材和专著,以及作者及其团队在直升机 CFD 方面多年积累的学术和科研成果。尽管这样基本完成了相关的教学任务,但总感觉缺少系统性和全面性,为此作者早有想法整理一部关于直升机 CFD 的参考书。经过作者及研究生们多年的辛苦研究,最终促成了这部书的出版,力求为我国直升机事业增光添彩。

考虑到旋翼的运动特点和工作方式,本书既适合直升机设计专业,也适合风力机设计、螺旋桨设计等专业的本科生、研究生及科研人员参考学习。作者根据自己的科研成果和教学经验以及与学生们的讨论结果,反复推敲,凝练出本书的主要内容,并请教多位专家学者,力图使这部书做到科学先进、内容实用、简明扼要。

本书共分 12 章,第 1 章简要介绍了直升机 CFD 方法的发展;第 2 章介绍了计算流体力学基础知识;第 3 章~第 5 章主要介绍了翼型的二维结构网格生成方法、旋翼及机身的三维结构网格生成方法、运动嵌套网格技术以及用于直升机流场计算中的其他网格技术,包括非结构网格、滑移网格、变形网格、聚合多重网格及自适应网格方法等;第 6 章~第 9 章分别介绍了直升机旋翼流场的控制方程、空间离散方法、时间离散方法及求解条件和高效推进方法等;第 10 章和第 11 章分别介绍了具有直升机 CFD 特点的混合 CFD 方法和动量源方法;第 12 章是在前面章节的基础上,较系统和全面地介绍直升机 CFD 方法在旋翼流场、气动特性及旋翼/机身干扰中的算例计算及验证结果,包括作者团队的一些最新研究成果,特别是关于旋翼及机身三维网格生成方法、高效的运动嵌套网格技术、非定常动量源方法、混合 CFD 方法以及具有自主知识产权的 CLORNS 代码等。

直升机 CFD 的发展始于 20 世纪 70 年代初,从最初的小扰动方程出发,逐步到全位势方程、Euler 方程和 Navier-Stokes 方程的发展阶段,目前已有学者开始挑战 LES 方法及其应用。针对直升机 CFD 方法研究,国内外数以百计的学者们贡献了他们的智慧,留下了很多耀眼的方法和经验,使作者及其团队能够如沐甘霖般学习和成长。我国是从 20 世纪 90 年代开始逐步开展对该领域的研究,其中以西

北工业大学乔志德教授为代表的团队和以中国空气动力研究与发展中心陈作斌研究员为代表的团队等率先对其进行研究，为作者团队的快速发展指明了方向，在此一并表示感谢。感谢南京航空航天大学直升机学科带头人高正教授对作者及团队的指导和帮助。感谢南京航空航天大学空气动力学系陆志良教授、陈红全教授、夏健教授、周春华教授、王江峰教授等在 CFD 方法研究方面给予的指导。感谢中国直升机设计研究所陈平剑研究员和林永峰研究员等人的指导和鼓励。此外，由于参考文献资料较多，且作者和研究生们学习和参考的时间跨度较长，虽然在书中需要引用的部分已经基本注明，但如有疏忽或遗漏，请原创作者多多包涵，并请及时告诉我们，定将改进。

由于直升机 CFD 方法尚处于不断发展中，本书主要阐述基于有限体积方法进行 CFD 问题的分析和研究。有限差分方法和有限元方法也是处理 CFD 问题的有效方法，但由于篇幅有限，暂未给出这两种方法的介绍，未来改版中拟将包含这方面的内容。

感谢我国著名直升机空气动力学家王适存教授的引路和指导，仅以此书献给王教授诞辰 90 周年。

本书的出版得到了江苏高校品牌专业建设工程一期项目、国家自然科学基金(10602024, 10872094, 11272150)、预研基金、国家级重点实验室基金等项目资助，以及中国直升机设计研究所等单位相关项目的支持和帮助。

在这本书的撰写过程中，得到作者团队成员的大力支持，在此特别感谢他们，没有他们的创造性思维和辛勤劳动，这部书很难付梓。他们分别是史勇杰副教授、王博博士、赵国庆博士、李鹏博士、倪同兵博士生、王清博士生、马砾博士生、印智昭硕士、朱秋娴硕士、朱明勇硕士、吴琪硕士和尹江离硕士等。其中，赵国庆博士在旋翼运动嵌套网格方法等方面有独到的创新，并且与印智昭硕士、尹江离硕士一起帮助作者完成了统稿、校对工作。此外，还要特别感谢科学出版社惠雪编辑为这部书的出版付出的辛勤工作。

由于作者水平有限，本书的内容在系统性和深入性方面依然存在很多不足之处，错误在所难免。恳请读者及专家能够及时给予批评指正，并对此表示感谢。在未来的改版中，将根据读者反馈和自我认识的提高进一步完善本书内容。

招启军

2016 年 4 月

符 号 表

a	音速
a_{1s}	桨盘后倒角
b_{1s}	桨盘侧倒角
A, B, C	雅可比矩阵
C_d	阻力系数
C, c	翼型弦长
C_l	升力系数
C_m	力矩系数
C_p	比定压热容或压强系数
d	距离
dr	微元的径向距离
dS	微元面积
D	阻力、人工黏性通量或对角矩阵
dF	桨叶剖面对气流的作用力
dT	剖面拉力
dQ	剖面阻力
e	单位质量气体总能量
E_r	总转能
e_r, e_ψ, e_ζ	桨盘圆柱坐标系三个方向矢量
e_ξ, e_η, e_ζ	桨盘直角坐标系三个方向矢量
e_n, e_ψ, e_s	桨叶偏转坐标系三个方向矢量
F'_Δ	气流作用在微面处的力
F''_Δ	微面为三角形时气流作用的力
F_v	黏性通量
F_c	对流通量
$F_{v,T}$	湍流模型黏性通量
$F_{c,T}$	湍流模型对流通量
h	单位质量气体总焓能
K_e	单元刚度矩阵
l	B-L 模型混合长度

L	升力或下三角矩阵
L, M, N	旋翼桨叶坐标系下对流量
Ma_{tip}	桨尖马赫数
$\mathbf{n} = (n_x, n_y, n_z)$	面单位法矢
N_b	桨叶片数
p	压强
Pr_l, Pr_t	层流和湍流的普朗特系数
Q	源项
q	旋翼桨叶坐标系下守恒变量
Q_T	湍流模型源项
q_i	热通量
r	位置矢量
R	桨叶半径
R^+, R^-	黎曼不变量
$R_{i,j,k}$	流场残值
s	熵
$S_{i,j,k}^I$	单元面积矢量
$\mathbf{S} = (S_x, S_y, S_z)$	动量源项
t	物理时间
Δt	时间步长
T, T_∞	温度、自由流温度
T	旋翼桨叶坐标系下源项通量
v_i, v_j, v_k	各个方向上的速度
U	上三角矩阵
$\mathbf{V}_s = (U_s, V_s, W_s)$	桨盘直角坐标系下的速度分量
$\mathbf{V} = (u, v, w)$	绝对速度
$\mathbf{V}_r = (u_r, v_r, w_r)$	相对速度
$\mathbf{V}_\Omega = (u_\Omega, v_\Omega, w_\Omega)$	旋转速度
V_∞	自由来流速度
V_n	边界法向速度
V_t	边界切向速度
V_β	剖面挥舞速度
$V/V_{i,j,k}$	单元体积
V_O, V_R, V_Z	气流速度在周向、径向和垂向的分量
W	守恒变量

$x, y, z / X, Y, Z$	坐标
X_c, Y_c, Z_c	旋翼旋转中心在计算域内的坐标
X_s, Y_s, Z_s	桨盘直角坐标系下的坐标
y^+	第一层壁面距离, 无量纲
α	迎角
α_s	桨盘迎角
β	挥舞角
β_0	挥舞锥度角
β_{1c}	后倒角
β_{1s}	侧倒角
β_*	来流角
γ	比热容
Γ	环量
δ_{ij}	Kronecker 符号
δW	虚功
ε	小量常数
ζ	尾迹涡龄角
θ	变距角
θ_0	总距角
θ_{1c}	横向周期变距
θ_{1s}	纵向周期变距
λ	第二黏性系数
μ	分子黏性系数、旋翼前进比
μ_∞	自由流黏性系数
μ_l, μ_t	层流、湍流黏性系数
$\tilde{\nu}$	动力黏性系数
ρ	密度
τ	伪时间
τ_{ij}	黏性应力
ϕ	速度势
ψ	方位角
ω	角速度矢量
Ω	控制体旋转角速度或旋翼角速度
$ \Omega $	涡量值
Ω_{ij}	旋转张量

∂x_k	不同方向位置偏导数
$\partial \Omega$	控制体表面积
$()_w$	物面值
$()_\infty$	无穷远值
$()^n$	第 n 次迭代

目 录

序

前言

符号表

第 1 章 绪论	1
1.1 直升机旋翼空气动力学概述	1
1.2 直升机 CFD 研究进展	3
1.2.1 位势方程的发展及应用	3
1.2.2 Navier-Stokes 方程的发展及应用	4
1.2.3 旋翼 CFD/CSD 耦合方法的发展	7
1.2.4 国内直升机 CFD 研究概况	8
1.2.5 旋翼 CFD 方法中的网格技术	9
1.3 本书的研究脉络	10
参考文献	12
第 2 章 计算流体动力学基础知识	17
2.1 流体力学控制方程	17
2.1.1 基本假设	17
2.1.2 控制方程	19
2.1.3 Navier-Stokes 方程与 Euler 方程	22
2.1.4 流体力学控制方程的性质	23
2.1.5 小扰动和全位势方程	28
2.2 有限差分理论基础	28
2.2.1 差分格式建立基础	29
2.2.2 差分格式及其构造	31
2.2.3 差分格式的性质	34
2.2.4 数值耗散与数值色散	37
参考文献	38
第 3 章 网格生成方法	39
3.1 二维翼型结构网格分类	40
3.2 翼型构型的参数化方法及表面点加密方法	42

3.3	基于代数法的初始网格生成	44
3.3.1	常用的代数法	44
3.3.2	CLORNS 代码中的二维旋翼翼型初始网格生成方法	47
3.4	二维翼型网格的椭圆型偏微分方程生成方法	49
3.4.1	网格坐标变换	49
3.4.2	泊松方程的差分离散	52
3.4.3	源项的确定方法	54
3.4.4	泊松方程生成网格结果	56
3.5	其他网格生成方法	59
3.5.1	双曲型偏微分方程法	59
3.5.2	抛物型偏微分方程法	61
3.6	三维桨叶网格生成方法	61
3.6.1	参数化桨叶网格生成方法	62
3.6.2	三维泊松方程法生成桨叶网格	67
3.7	围绕复杂外形的三维结构网格生成	69
3.7.1	抛物型法向外推法	70
3.7.2	三维网格生成结果	72
	参考文献	73
第 4 章	运动嵌套网格技术	75
4.1	嵌套网格技术概述	75
4.2	直升机常用运动嵌套网格系统	76
4.2.1	二维翼型动态失速运动嵌套网格系统	76
4.2.2	三维旋翼运动嵌套网格系统	77
4.2.3	倾转旋翼机全机贴体嵌套网格系统	78
4.3	点和单元的位置关系判别方法	79
4.3.1	角度求和法	79
4.3.2	表面矢量法	80
4.4	挖洞方法	80
4.4.1	“Hole-map”方法	80
4.4.2	“透视图”方法	81
4.4.3	“扰动衍射”方法	84
4.4.4	挖洞方法的对比	87
4.5	插值方法与贡献单元搜索方法	88

4.5.1	线性插值	88
4.5.2	“Inverse-map”方法	89
4.5.3	最小距离方法	93
4.5.4	伪贡献单元搜寻法	95
	参考文献	97
第 5 章	其他网格技术	99
5.1	非结构网格	99
5.1.1	生成方法	99
5.1.2	非结构网格在直升机 CFD 中的应用	104
5.1.3	混合网格	107
5.2	滑移网格	109
5.2.1	基本概念	109
5.2.2	主要难点	110
5.2.3	计算流程	112
5.3	变形网格	112
5.3.1	代数方法	113
5.3.2	弹簧网格方法	114
5.4	聚合多重网格	117
5.4.1	主要概念	117
5.4.2	主要过程	118
5.4.3	应用举例	118
5.5	自适应网格方法	120
5.5.1	自适应网格的数据结构	121
5.5.2	初始网格生成	122
5.5.3	网格的加密及稀疏	122
5.5.4	网格自适应的应用	123
	参考文献	128
第 6 章	旋翼流场的控制方程	130
6.1	旋翼的运动与坐标变换	130
6.1.1	运动坐标系	130
6.1.2	坐标变换	131
6.1.3	旋翼变距坐标系下的角速度矢量表达	132
6.2	垂直飞行状态旋翼流场求解的控制方程	132

6.3	前飞状态旋翼非定常流场的控制方程	138
6.4	湍流模型	139
6.4.1	Baldwin-Lomax 湍流模型	140
6.4.2	Spalart-Allmaras 湍流模型	141
6.4.3	SST 湍流模型	143
	参考文献	145
第 7 章	空间离散方法	146
7.1	控制方程离散	146
7.2	控制体单元几何信息	147
7.2.1	二维网格单元	147
7.2.2	三维网格单元	148
7.2.3	偏导数计算方法	150
7.3	空间离散的 Jameson 中心格式	150
7.4	空间离散的高阶插值格式	152
7.4.1	MUSCL 插值格式	153
7.4.2	WENO 插值格式	154
7.5	AUSM 类格式	157
7.6	Roe 格式	159
7.7	旋转通量的计算	161
	参考文献	162
第 8 章	时间离散方法及求解条件	163
8.1	显式时间推进	163
8.2	隐式时间推进	164
8.3	双时间推进	167
8.4	边界条件	169
8.4.1	虚拟网格技术	169
8.4.2	周期性边界条件	169
8.4.3	动量理论推导的边界条件	170
8.4.4	远场边界条件	171
8.4.5	物面边界条件	173
8.5	初始条件	174
	参考文献	174
第 9 章	高效推进方法	176
9.1	焓阻尼方法	176

9.2	隐式残值光顺方法	177
9.3	多重网格方法	178
9.3.1	多重网格方法原理	179
9.3.2	多重网格方法在求解 N-S 方程中的应用	183
9.3.3	多重网格方法的实施	184
9.3.4	多重网格方法的应用	185
9.4	并行计算方法	186
9.4.1	并行术语及影响并行的因素	188
9.4.2	程序并行化步骤及性能优化方法	190
9.4.3	OpenMP 并行程序设计	192
9.4.4	MPI 并行程序设计	195
9.5	低速预处理方法	199
9.5.1	低速预处理方法原理	199
9.5.2	低速预处理方法的验证	204
	参考文献	205
第 10 章	混合 CFD 方法	207
10.1	全位势方程的求解	207
10.1.1	控制方程	207
10.1.2	求解方法	208
10.2	自由尾迹方法的求解	209
10.2.1	尾迹涡线的控制方程	210
10.2.2	涡元的诱导速度	210
10.2.3	涡核修正	211
10.2.4	涡线的离散	212
10.2.5	尾迹的迭代求解	213
10.3	N-S方程/全位势方程/自由尾迹方法	214
10.3.1	信息传递	215
10.3.2	计算流程	216
10.3.3	算例及结果分析	217
10.4	黏性涡粒子方法及求解	221
10.4.1	涡运动控制方程	221
10.4.2	涡量场的离散	221
10.4.3	涡量输运方程的求解方法	222

10.4.4	加速算法	224
10.5	VVPM/N-S 混合 CFD 方法的建立	226
10.5.1	混合方法的实现	226
10.5.2	计算域间的信息变换	226
10.5.3	耦合方法的计算流程	228
10.5.4	算例分析	228
	参考文献	231
第 11 章	动量源方法	233
11.1	定常动量源方法	233
11.1.1	坐标系转换	234
11.1.2	动量源项推导	235
11.1.3	带有动量源项的流场求解	238
11.2	非定常动量源方法	241
11.2.1	Rajagopalan 方法	241
11.2.2	Kim 和 Park 方法	242
11.2.3	BFMS 方法	243
11.2.4	不同非定常动量源方法对比	246
11.3	动量源方法的应用	247
11.3.1	在直升机旋翼中的应用	247
11.3.2	在倾转旋翼中的应用	251
11.3.3	在涵道尾桨中的应用	253
	参考文献	257
第 12 章	直升机 CFD 方法的验证	259
12.1	CLOMNS 代码介绍	259
12.1.1	CLOMNS 代码架构	260
12.1.2	CLOMNS 代码各模块流程图	262
12.2	旋翼悬停流场的模拟	263
12.2.1	桨尖涡的模拟	263
12.2.2	气动特性的模拟	266
12.2.3	性能对比	272
12.3	旋翼前飞流场的模拟	279
12.3.1	旋翼操纵量配平	279
12.3.2	桨尖涡的模拟	280