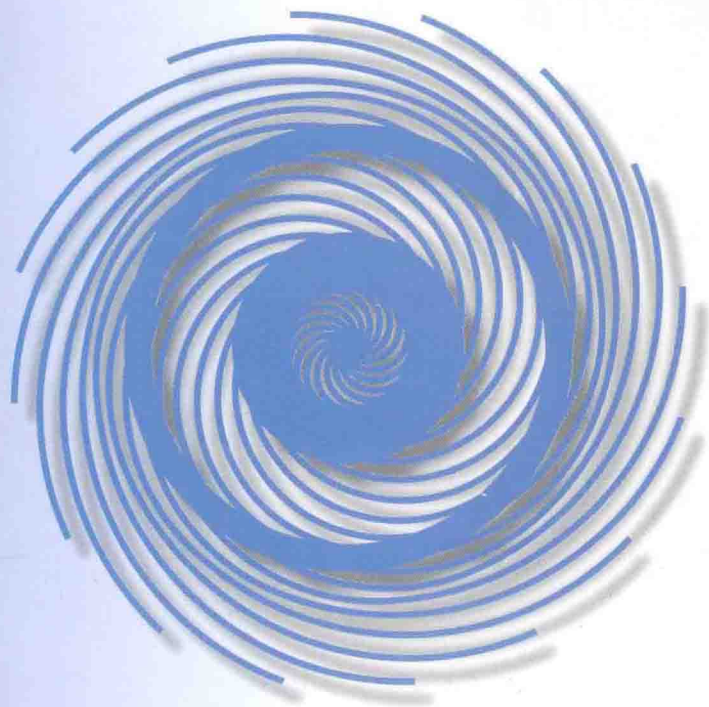


曹义华 编著



高等学校研究生教材

现代直升机 旋翼空气动力学



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

高等学校研究生教材

现代直升机旋翼空气动力学

曹义华 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

旋翼空气动力学是功率型飞行器(包括直升机、螺旋桨飞机及旋翼机等)的空气动力学的核心内容。直升机旋翼空气动力学问题是直升机设计过程中的先导并且是具有全局性影响的重要研究问题。本教材的基本内容是,首先介绍经典旋翼空气动力学的基本理论,然后就现代旋翼空气动力学的先进数值模拟技术作详细论述,最后对旋翼飞行器设计中所遇到的空气动力学问题作实例解算分析;从数学角度介绍数值模拟技术和理论计算方法的原理,在侧重于物理概念的基础上,尽可能地从直升机设计工程的角度阐明直升机旋翼空气动力学的原理和现代前沿研究态势。

本教材适用于高年级本科生或研究生,也可供从事直升机设计与运用工程研究的工程技术人员及其他相关专业人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代直升机旋翼空气动力学 / 曹义华编著. -- 北京:
北京航空航天大学出版社, 2014. 12
ISBN 978-7-5124-1654-3

I. ①现… II. ①曹… III. ①直升机-旋翼空气动力学—高等学校—教材 IV. ①V275

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 289883 号

版权所有,侵权必究。

现代直升机旋翼空气动力学

曹义华 编著

责任编辑 刘晓明

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱: bhpres@263.net 邮购电话:(010)82316936

北京兴华昌盛印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×1 092 1/16 印张:15 字数:384 千字

2015 年 4 月第 1 版 2015 年 4 月第 1 次印刷 印数:2 000 册

ISBN 978-7-5124-1654-3 定价:59.00 元

前 言

《现代直升机旋翼空气动力学》教材旨在使相关专业高年级本科生或研究生通过学习,掌握直升机旋翼空气动力学的研究方法和工程应用的理论基础;也可供从事直升机空气动力学研究的专业技术人员阅读。全书共分11章。第1章在给出严密的定义之后,主要讨论空气动力学的研究内容和研究工具,从直升机的特点和空气动力学的普遍原理出发,介绍了直升机空气动力学的发展概况。第2章~第4章介绍经典旋翼空气动力学的基本理论,包括旋翼动量理论、叶素理论和涡流理论。在介绍了旋翼动量理论,包括垂直上升、悬停、下降,以及平飞、爬升和下滑等状态的表达式之后,给出了诱导速度的普遍规律。第3章的旋翼叶素理论给出了桨叶翼型空气动力学特性,导出了旋翼的拉力和功率;从工程意义上给出了旋翼完善系数和前飞旋翼功率的一般表达式。第4章从Kelvin定理、Helmholtz定律和Biot-Savart定律出发,介绍了垂直飞行和前飞时的旋翼涡流理论以及环量与诱导速度的求解。第5章论述了旋翼自由尾流分析技术的应用问题,从涡动力学基础出发,建立了旋翼自由涡系模型并介绍了旋翼尾迹和直升机其他部件气动干扰的计算方法。第6章介绍了旋翼CFD的理论基础,总结了旋翼CFD数值模拟的大致步骤。第7章介绍了旋翼N-S方程SIMPLE数值模拟方法的原理和步骤,给出了前飞、垂直下降和斜下降旋翼湍流场与气动特性的数值模拟算例。第8章介绍了高分辨率TVD格式及其在旋翼亚、跨声速条件下的应用。第9章介绍了旋翼绕流N-S方程常用的Jameson格式及其相关的其他格式,给出了悬停和前飞旋翼流场的数值模拟算例。第10章从直升机部件间的干扰出发,介绍了旋翼洗流和旋翼/机身/发动机耦合流场分析方法,讨论了旋翼/机身/柱体耦合流场。第11章介绍了旋翼计算声学基础及其分析方法。

本书在编写过程中得到了北京航空航天大学学校领导、教务处领导和北京航空航天大学出版社的大力支持;李天院士审定了书稿,并提出了宝贵的修改意见。此外,本书的完成还得益于作者所在课题组的集体智慧,特别是李国知博士、曹栋和赵明博士做了许多有益的工作,在此表示衷心感谢。

由于作者水平有限,不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

2014年11月

符号表

a_{∞}	升力线斜率
a_0	声速
b	桨叶剖面弦长
c	声速、弦长、桨叶宽度
C_D	阻力系数
C_L	翼型升力系数
$C_{L\max}$	最大升力系数
C_{m0}	翼型零升力矩系数
$\partial C_m / \partial C_L$	力矩系数对升力系数的斜率
C_P, c_p	旋翼功率系数、比定压热容
C_Q	旋翼扭矩系数
C_T	旋翼拉力系数
d	距离
D	旋翼直径
D_{ij}	人工粘性项
D_R	旋翼直径
$d\vec{r}$	封闭曲线 L 的线微元矢量
$d\vec{v}$	微元诱导速度
$dx dy dz$	流体微团的体积
$d\xi$	控制体内的体积微元
e	旋翼水平铰外伸量、总能
e_x, e_y	x, y 方向的单位向量
f	单位质量流体微团上的体积力
h	总焓
J	Jacobian 矩阵

K	湍流脉动动能
k	热传导系数
$\dot{m}$	流体质量流量
Ma	马赫数
Ma_{∞}	来流马赫数
Ma_D, Ma_{MD}	阻力发散马赫数、力矩发散马赫数
Ma_r	传播方向上的马赫数
Ma_{tip}	桨尖马赫数
$\boldsymbol{n}$	边界的单位法向矢量
$\bar{\boldsymbol{n}}$	面法向矢量
N_b	桨叶片数
p	压强、流场的静压
P	动能变化率或旋翼功率
p'	压力修正值
p^*	迭代过程中的新的压力
P_h	悬停时的功率值
Pr_l	层流 Prandtl 数
Pr_t	湍流 Prandtl 数
R	旋翼桨叶半径、气体常数
Re	雷诺数
Re_v	涡雷诺数
r	桨叶上任意一点到桨毂中心的距离
r	径向坐标
$\hat{\boldsymbol{r}}_i$	传播方向的单位矢量
r_{rt}	桨根根切
S	控制面、旋翼作用盘模型任意截面面积
$\vec{S}$	闭曲线 L 围成的面积矢量
S'	动量源项
S_{Φ}	广义源项

T	旋翼拉力、热力学环境温度
TV	总变差
u	气流速度场、 x 方向的速度分量
$u_{i,j}$	速度 x 分量在点 $M(i,j)$ 的值
u_T, u_P, u_R	叶素的水平切向、垂向和径向来流速度分量
u, v, w	流过流体微团中心点的三个速度分量
$\bar{u}$	轴向诱导速度
U_p	桨叶剖面的垂向速度
U_T	桨叶剖面的切向速度
V	远方自由来流速度
v_y	y 方向的速度分量
v	旋翼桨盘处的诱导速度
$\bar{v}$	周向诱导速度
$\vec{V}$	速度矢量
$\vec{V}_{abs}$	在某一瞬间的桨叶位置 (x, y, z, t) 处流场的绝对速度
V_c	旋翼桨盘下降速度
v_h	悬停诱导速度
$\bar{v}_h$	悬停时的旋翼无量纲诱导速度
V_i	当地自由流速度矢量
v_i	与 V_c 对应的诱导速度
V_n	S 面上的法向分速
V_0	自由来流速度
$\bar{w}$	径向诱导速度
$\bar{x}_p$	翼型压力中心与前缘的相对距离
z	轴向坐标
α	桨盘迎角、迎角、亚松弛因子、Oseen 常数
α_D	来流与桨盘平面的夹角
α_0	以几何弦为准的零升力迎角
α_R	来流迎角

α_s	桨盘倾角
α_s	失速迎角
α_*	气动迎角
β_0	锥度角
β_{1c}	纵向挥舞角
β_{1s}	横向挥舞角
Γ	环量
Γ_ϕ	广义扩散系数
γ	空气比热比
δ	相对等效粘性系数
ε	湍流能量耗散率
θ	桨距角
θ_0	总距角
θ_{1s}	纵向变距角
θ_{1c}	横向变距角
θ_{tw}	线性扭转角
Δ	前差算子、拉普拉斯算子
Λ	特征值对角阵
λ	旋翼入流比、谱半径
λ_i	诱导入流比
μ	前进比、空气粘性系数
μ_k	湍流粘性系数
μ_l	分子粘性系数
μ_t	涡粘性系数
μ_e	总粘性系数
ν	运动粘性系数
ρ, ρ_0	空气密度、海平面空气密度
σ	旋翼实度
τ^*	声源发出时刻

τ_{ij}	j 方向的应力作用在垂直于 i 轴的平面上
Φ	流场的速度势
ϕ	叶素剖面的来流角
φ	桨叶剖面安装角
φ_1	桨叶叶尖安装角
φ_0	桨叶根部安装角
$\Delta\varphi$	桨叶负扭度
φ_T	桨叶桨距
ψ	方位角
ψ_w	远尾迹寿命角
ψ_b	桨叶方位角
Ω	旋翼转速
Ω_k	单元体积
Ω_R	转速
ω	涡量
$\vec{\omega}$	流体微团的旋转角速度矢量
∇	后差算子、哈密顿算子
—	无量纲化

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 空气动力学的内容	1
1.1.1 定 义	1
1.1.2 研究问题的类型	3
1.2 空气动力学的研究工具	4
1.2.1 解析工具	4
1.2.2 计算工具	4
1.2.3 实验工具	4
1.3 直升机概况	5
1.3.1 发展简述	5
1.3.2 直升机分类	7
1.4 直升机空气动力学发展概况	8
1.4.1 经典空气动力学理论	8
1.4.2 基于 CFD 技术的旋翼流场模拟	9
1.4.3 旋翼计算声学简介	11
1.4.4 旋翼/机身等多部件的气动干扰简介	12
1.5 旋翼基本参数介绍	12
参考文献	14
第2章 旋翼动量理论	15
2.1 引 言	15
2.2 垂直飞行时的动量理论	15
2.2.1 垂直上升状态	15
2.2.2 悬停状态	17
2.2.3 垂直下降状态	17
2.2.4 诱导速度普遍规律	20
2.3 前飞时的动量理论	21
2.3.1 平飞状态	21
2.3.2 爬升和下滑状态	23
2.3.3 诱导速度普遍规律	24
参考文献	24

第3章 旋翼叶素理论	25
3.1 引言	25
3.2 桨叶翼型	25
3.2.1 桨叶翼型几何参数	26
3.2.2 桨叶翼型空气动力学特性	26
3.2.3 桨叶翼型设计	30
3.3 垂直飞行时的叶素理论	31
3.3.1 旋翼拉力和功率的微分形式	31
3.3.2 旋翼拉力和功率的积分形式	33
3.3.3 旋翼拉力的近似解析式	34
3.3.4 旋翼功率的近似解析式	34
3.3.5 完善系数	34
3.4 基于叶素-环量理论的拉力系数	35
3.5 基于叶素-动量组合理论的拉力系数	36
3.6 前飞时的叶素理论	37
3.6.1 旋翼拉力和功率的积分形式	38
3.6.2 旋翼拉力和功率的近似解析式	38
3.6.3 旋翼功率的一般表达式	39
参考文献	40
第4章 旋翼涡流理论	42
4.1 引言	42
4.2 基本概念	42
4.2.1 Kelvin 定理	42
4.2.2 Helmholtz 定律	43
4.2.3 Biot - Savart 定律	43
4.2.4 涡与环量	44
4.3 垂直飞行时的涡流理论	45
4.3.1 儒氏旋翼涡系模型	45
4.3.2 儒氏旋翼诱导速度	46
4.3.3 非儒氏旋翼涡系模型	52
4.3.4 非儒氏旋翼诱导速度	52
4.4 前飞时的涡流理论	53
4.4.1 旋翼涡系模型	53
4.4.2 旋翼诱导速度	53
4.4.3 桨叶附着涡环量的求解	54
参考文献	54

第 5 章 旋翼自由尾流分析技术	56
5.1 引 言	56
5.2 涡动力学基础	56
5.3 自由涡系模型	57
5.3.1 旋翼桨叶涡系模型	57
5.3.2 旋翼尾迹模型	58
5.3.3 旋翼桨尖涡模型	59
5.3.4 涡核扩散模型	59
5.4 桨叶附着涡环量求解	60
5.5 远尾迹涡丝控制方程	61
5.6 远尾迹涡丝控制方程的求解	62
5.6.1 远尾迹周期边界条件	62
5.6.2 PIPC 松弛迭代法求解过程	63
5.7 自由尾迹/面元法的耦合模型算例	65
5.7.1 求解方法	65
5.7.2 涡/面干扰	66
5.7.3 算例分析	66
参考文献	67
第 6 章 旋翼 CFD 理论基础知识	69
6.1 引 言	69
6.2 适合旋翼的流体力学控制方程组	69
6.2.1 连续性方程	69
6.2.2 动量方程	72
6.2.3 能量方程	74
6.2.4 控制方程的选择形式	75
6.3 控制方程的离散化	75
6.3.1 有限差分法(FDM)	75
6.3.2 有限体积法(FVM)	77
6.4 网格生成简介	78
6.4.1 椭圆网格生成实例	80
6.4.2 多区重叠网格(嵌套网格)简介	82
6.5 结 论	85
参考文献	85
第 7 章 旋翼 N-S 方程 SIMPLE 数值模拟方法	87
7.1 引 言	87

7.2 SIMPLE 算法	87
7.2.1 交错网格技术	87
7.2.2 SIMPLE 算法基本假设	89
7.2.3 SIMPLE 算法基本步骤	90
7.2.4 SIMPLE 算法的简单算例	90
7.3 SIMPLER 算法简介	91
7.4 代数方程组的求解	93
7.5 前飞旋翼湍流场的数值模拟算例	94
7.5.1 流场控制方程	94
7.5.2 动量源项	95
7.5.3 算例方案描述	96
7.5.4 前飞流场分析	97
7.5.5 前飞性能预测	99
7.6 垂直下降旋翼湍流场的数值模拟算例	101
7.6.1 桨盘压差源项计算	102
7.6.2 垂直下降算例方案描述	103
7.6.3 模型旋翼悬停算例验证	105
7.6.4 垂直下降算例流场分析	106
7.6.5 垂直下降性能预测	110
7.7 斜下降旋翼湍流场的数值模拟算例	112
7.7.1 计算模型及方法	112
7.7.2 旋翼升阻气动特性	114
7.7.3 单片桨叶压力场随周期的变化	115
7.7.4 孤立旋翼流场分析	117
7.7.5 旋翼/机身组合流场分析	118
参考文献	119
第8章 旋翼 TVD 数值模拟方法	120
8.1 引言	120
8.2 TVD 格式的概念和性质	120
8.2.1 TVD 的概念	120
8.2.2 TVD 的性质	121
8.3 TVD 格式的构造	121
8.3.1 一阶 TVD 格式	121
8.3.2 二阶 TVD 格式	122
8.3.3 高阶 TVD 格式简介	127
8.4 对一维和多维方程组的推广	127

8.4.1 一维方程组的推广	128
8.4.2 多维方程组的推广	128
8.5 算例:旋翼流场 Euler 方程 Jameson/TVD 数值模拟	128
8.5.1 主控方程	129
8.5.2 数值方法	130
8.5.3 结果分析	131
参考文献	136
第 9 章 旋翼绕流 N-S 方程数值计算方法	138
9.1 引 言	138
9.2 Jameson 格式	138
9.2.1 标量人工粘性的中心差分方法	138
9.2.2 各向异性的人工粘性	139
9.2.3 矩阵人工粘性模型	140
9.3 TVD 格式	141
9.3.1 TVD 的概念	141
9.3.2 单调格式、保单调格式和 TVD 性质的充分条件	141
9.3.3 显式一阶 TVD 格式举例	143
9.4 一种 Jameson/TVD 混合格式	143
9.4.1 N-S 方程和通量修正法	143
9.4.2 旋翼流场 N-S 方程 Jameson/TVD 数值模拟方法	146
9.5 Jameson 格式与其他格式	148
9.5.1 积分形式下的旋翼流动控制方程	148
9.5.2 空间离散格式	152
9.5.3 悬停旋翼流动的数值模拟	161
9.5.4 前飞旋翼流动的数值模拟	169
参考文献	174
第 10 章 旋翼洗流和旋翼/机身/发动机耦合流场分析	177
10.1 引 言	177
10.2 旋翼洗流分析	177
10.3 旋翼/机身干扰流场	179
10.3.1 “作用盘”假设	179
10.3.2 N-S 方程直接模拟	179
10.4 旋翼/机身/发动机耦合流场	186
10.5 旋翼/机身/柱体耦合流场	191
10.5.1 旋翼/机身耦合流场	191
10.5.2 机身/柱体耦合流场	194

参考文献	198
第 11 章 旋翼计算声学基础	200
11.1 引言	200
11.2 Ffowcs Williams - Hawkings 方程和 Kirchhoff 理论	200
11.2.1 Ffowcs Williams - Hawkings 方程	200
11.2.2 Kirchhoff 理论	200
11.3 两种方法的比较	201
11.4 桨涡干扰噪声的模拟	209
11.5 计算流体力学方法	212
参考文献	214
习题与思考题	216
附录 彩图页	219

第1章 绪论

1.1 空气动力学的内容

1.1.1 定义

空气动力学是力学的一个分支,主要研究物体和空气之间有相对运动时,即物体在空气中运动或物体不动而空气流过物体时(类似于风洞试验),空气的运动规律及作用力(空气内部的和空气对物体的)所服从的规律,具体包括气体做相对运动情况下的受力特性、气体流动规律和伴随发生的物理化学变化。传统意义上的空气动力学,指的都是飞行器的空气动力学,尤其是指普通固定翼飞机的空气动力学;而本书从直升机特有的属性出发,论述直升机空气动力学的基本内容和一些前沿进展。

1. 起源

空气动力学导源于流体力学,流体力学是物理学的一个重要分支,它主要研究流体本身的静止状态和运动状态,以及流体和固体界壁间有相对运动时的相互作用和流动的规律。流体力学可分为流体静力学和流体动力学:前者研究的是流体静止时,其中的作用力;后者研究的是流体运动时,其运动规律和作用力的规律。飞行器空气动力学则是流体动力学应用于研究飞行器运动的进一步发展。

研究飞行器在大气中的运动规律,或者说飞行器之所以能在大气中做持续的飞行,全靠空气给它的反作用力,通俗地说,就是空气的升力托住飞机的重量,使之不坠落;不过,空气还同时给予飞机一个阻力,阻碍它的前进。因此,要想使飞机飞得好,就需要研究空气动力学,这是不需多说的。对于直升机来说,其升力的产生主要来自旋翼的旋转,而旋转的桨叶又导致相对气流的分布不均(比如前飞状态下的直升机旋翼,其前行桨叶遭遇激波而后行桨叶面临失速),其空气动力学特性十分复杂。可以说,旋翼空气动力学是直升机空气动力学的核心内容,又是直升机飞行力学等其他研究课题的重要基础。

2. 飞行器及旋翼

直升机是飞行器大家庭中的一员,直升机空气动力学隶属空气动力学的研究范围,因此,先来讨论飞行器的定义。飞行器(vehicle)一词意指由某种方式联结在一起的变形体的任意组合所构成的任一种飞行的物体。例如:步枪弹丸是最简单的一种飞行器,空天飞机则是较为复杂的飞行器。而旋翼(rotor),也称主旋翼,是直升机上产生升力的主要旋转部件,同时也可可为直升机提供推进力和操纵力。因而直升机空气动力学就是阐明直升机(主要是它的旋翼)与周围空气相互作用的空气动力现象、研究直升机在不同飞行状态下的气动载荷,以及估算直升机飞行性能和分析直升机的飞行品质的一门学科。

3. 运 动

在定义了飞行器及旋翼之后,再来看看“运动”一词意味着什么。毕竟空气动力学研究的是飞行器与空气相对运动时的作用规律。通常将运动划分为几类。

(1) 整体运动

- ① 飞行器质心的轨迹;
- ② 飞行器整体的旋转运动(姿态运动)。

(2) 精细运动

- ① 旋转部分和枢接部分,如发动机、陀螺、旋翼及气动操纵面的运动;
- ② 弹性结构的变形运动,如机翼的弯曲和扭转,旋翼桨叶的挥舞、摆振和扭转;
- ③ 液体的晃动。

上述这种划分对于飞机、火箭、导弹和直升机的设计和运用工程问题来说是必要的,要研究这些运动也是重要的。众所周知,空气动力学问题是飞行器设计和运用工程中带全局性的重要研究问题。对它的分析需要很宽的知识面和深入的各学科知识。为了能推导出公式并求解有关问题,必须依靠工程科学中的好几门基础学科,其相互关系如图 1.1 所示。

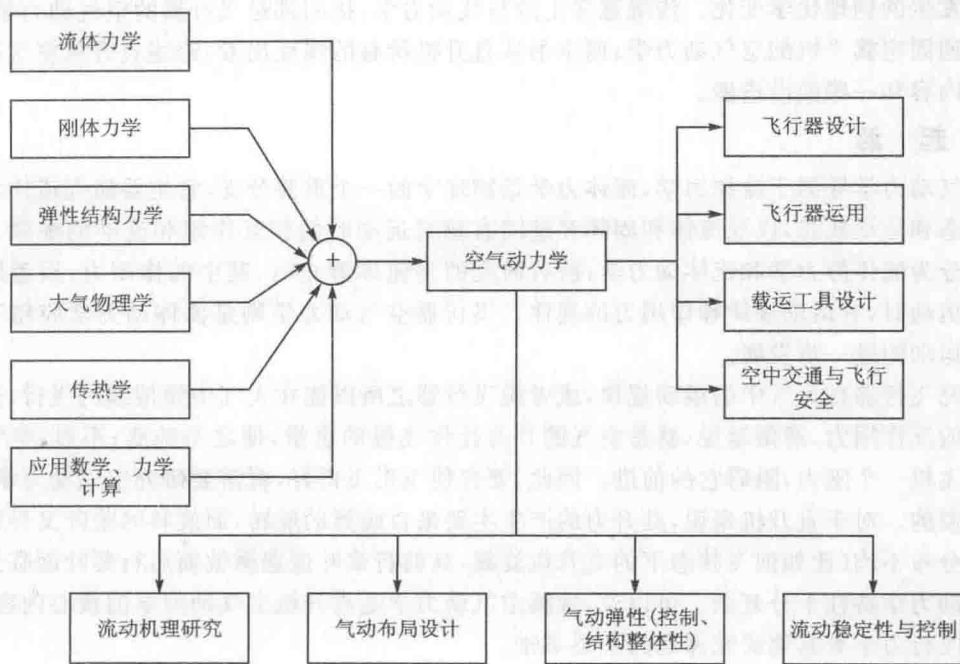


图 1.1 学科关系方框图

在各类飞行器、各类运动以及各种介质中,空气动力学或流体力学的普遍方程(连续方程、动量方程和能量方程)与基本解法是相通的。尽管本书归属于直升机空气动力学,但是在诸多问题的阐述上尽量从飞行器的一般性出发,之后再就直升机的特殊性展开讨论。

牛顿运动定律建立了诸外力与合成运动之间的关系。就航空飞行器而言,对空气动力这一外力场的估算和测量是研究其他类问题(诸如飞行动力学、飞行控制)的先决条件。图 1.2 示出了机翼气动力问题概貌。由该图可知,单独机翼的气动问题所需考虑的参数变化范围已