

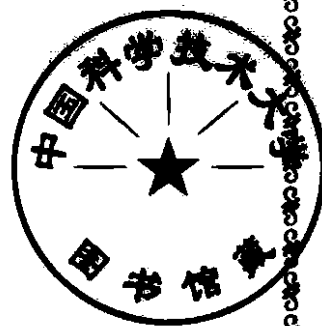
非定常空气动力计算

管德 著

北京航空航天大学出版社

非定常空气动力计算

管 德 著



北京

(京)新登字166号

内 容 简 介

本书主要内容是：非定常空气动力计算的发展；基本约定；Navier-Stokes方程和Euler方程；速度势方程；小扰动速度势方程；线化升力面问题的奇异；亚音速偶极子-马蹄涡网格法；超音速偶极子网格法；组合体的非定常空气动力计算；任意运动的非定常空气动力计算；跨音速小扰动有限差分法等。作者具有丰富的工程实践和教学经验。本书具有较高的学术价值和工程实用价值。

它既可做为高等学校研究生教材，也可做为高级工程技术人员的参考书。

非定常空气动力计算

FEIDINGCHANG KONGQIDONGLI JISUAN

管 德 著

责任编辑 陈桂彬 许传安

北京航空航天大学出版社出版

新华书店总店科技发行所发行 各地书店经售

北京密云县华都印刷厂印装

* * *

850×1168 1/32 印张：8.25 字数：221千字

1991年11月第一版 1991年11月第一次印刷 印数：1500册

ISBN 7-81012-275-4/V·022 定价：5.50元

引 言

本书是作者根据自己多年来在北京航空航天大学讲授《非定常空气动力计算》课程的讲稿整理而成的。

非定常空气动力计算，是气动弹性计算的重要组成部分，也是气动弹性领域中的一个非常活跃的分枝。几十年来，随着飞机设计的需要和计算机能力的提高，非定常空气动力计算有了巨大的发展变化，基于线化理论的三维亚、超音速非定常空气动力计算方法，已在飞机设计部门广泛应用，基于非线性化小扰动方程的三维跨音速非定常空气动力计算方法，已经进入工程应用，基于全位势方程、Euler方程，乃至Navier-Stokes方程的各种非定常空气动力计算方法的研究工作，正在蓬勃发展，本书希望能够适应这种新的情况。

在基本方程的介绍方面，本书从完全气体的Navier-Stokes方程入手，而后，引入理想气体假设，成为Euler方程，再引入无旋假定，成为全位势方程，最后，引入小扰动假定，导出非线性化和线化小扰动方程。这样，力图给读者以略为系统的概念。

在计算方法的介绍方面，本书略去了二维方法和升力线方法，直接从三维方法开始，介绍当今广为应用的典型计算方法。对于线化三维亚、超音速非定常空气动力计算，比较详细地介绍了偶极子网格法；对于三维跨音速非定常空气动力计算，则介绍了基于非线性化小扰动方程的有限差分法。对于二维方法和升力线方法有兴趣的读者，可以很容易地从已有的其他书籍中找到。

作者特别感谢航空航天工业部第六一一研究所的程坤仪高级工程师。她推导了本书的大部分内容。作者曾多次同她讨论，使许多问题更加清晰。没有她的帮助，本书是无法完成的。

作者感谢中国空气动力研究发展中心的张建柏副研究员。他专门向作者提供了关于跨音速有限差分法的详尽资料。

本书肯定有差错和不当之处，希望得到指正。

作 者

1991年5月

符 号 说 明

A	空气动力
$A_0, A_1, \dots$	系数, 见各有关章
$\bar{A}$	广义空气动力
a	音速
$\bar{a}$	加速度
B	$(M_\infty^2 - 1)^{1/2}$
$B_0, B_1, \dots$	系数, 见各有关章
b	翼面弦长
b_0	翼根弦长
C_p	定压比热
C_v	定容比热
$C_0, C_1, \dots$	系数, 见各有关章
c	系数, 见各有关章
$\bar{c}$	翼面相对厚度
c_p	压力系数
Δc_p	压力系数差
D	空气动力影响系数, 类型相关差分算子
E	激励力
$\bar{E}$	广义激励力
e	自然对数的底
$\exp$	指数函数, $\exp(x) = e^x$
F	振型矩阵
$F_0, F_1, \dots$	函数, 见各有关章
$\bar{F}$	体力
f	振型
$\bar{f}$	体力密度

$G(i\omega)$	Fourier变换
$G, \bar{G}$	基本解时间函数
g	结构阻尼系数
H	热能, 导纳
$\bar{h}$	总能量
$I_0, I_1, \dots$	积分, 见各有关章
i	$\sqrt{-1}$
$J_0, J_1, \dots$	积分, 见各有关章
$K, K_1, K_2,$ K_{10}, K_{20}	核函数
$\bar{K}$	广义刚度
k	减缩频率
k_1	频率参数
l	翼面展长, 网格展向积分变量
l_B	体的长度
l_j	网格 j 的 $1/4$ 弦线长度
M	Mach数
m	质量
$m', \bar{m}'$	偶极子强度
n	法线方向
O, o	座标原点
P	任意点
$P_0, P_1, \dots$	系数, 函数, 见各有关章
ΔP	体的非定常空气动力
$\Delta \bar{P}$	$\Delta P / [(1/2) \rho_\infty U_\infty^2]$
Δp	压力差
$\Delta p'$	单位长度上的压力差
Q, q	源(汇)强度
$\bar{Q}$	热量

q	广义位移
R	气体常数
$R, R', \bar{R}$	距离
$\bar{R}', r, r_1$	
R_B	体半径
R_e, I_m	实部, 虚部
S	面积, 物面方程
$\bar{S}$	无量纲物面方程
$S.P.$	奇异部分
s	熵, Laplace变量
T	绝对温度, 周期, 无量纲时间
t	时间, 积分变量(见有关章)
U	速度
u, v, w	x, y, z 向的气流
V	马蹄涡引起的扰动速度
W	无量纲下洗速度
X, Y, Z	变换座标, 见各有关章
x, y, z	直角座标
x_i, y_i, z_i	接收点(下洗点)座标
x_j, y_j, z_j	扰动点座标
$\bar{x}^n$	第 n 阶中值
Δx	网格平均弦长
Z	阻抗
α	角度
β	$(1 - M_\infty^2)^{1/2}$
Γ	涡强度
γ	比热比
δ	厚度参数, 单位脉冲函数, 差分算子

$\delta_0, \delta_1, \dots$	可变系数, 见各有关章
ξ, η, ζ	变换座标, 见各有关章
Λ	任意方向
λ	展向参数, 积分变量 (见有关章)
μ	粘性系数, Mach角
ν	厚度参数
Π	面力
π	面力密度
ρ	气体密度
Σ	积分区域
σ	体积
τ	时间, 积分变量 (见有关章)
τ_{ij}	粘性应力
χ	翼面后掠角
ε	小量, 见各有关章
$\Phi, \overline{\Phi}, \tilde{\Phi}$	速度势, 见各有关章
$\tilde{\Phi}, \phi, \phi'$	
Ψ, ψ	加速度势, 上反角
Ω	角速度
ω	频率
$\bar{\omega}$	$\omega/a\beta^2$
脚注	
∞	远前方
c, t	翼面弯度, 厚度
e, i	外部, 内部
l_e, t_e	前缘, 后缘
l, r	左, 右
n, s, Δ	法线方向, 切线方向, 任意方向

R, I	实部, 虚部
S, N	定常, 非定常
x, y, z	x, y, z 方向
W, B, I	翼, 体, 干扰区
上, 下	上, 下表面
物, 气	物体, 气流

目 录

第一章	非定常空气动力计算的发展.....	(1)
第二章	基本的约定.....	(7)
2.1	讨论的对象	(7)
2.2	坐标系	(7)
2.3	气体运动的描述	(8)
2.4	流场参数	(10)
2.5	完全气体	(14)
第三章	Navier-Stokes方程和Euler方程	(15)
3.1	概述	(15)
3.2	连续方程	(15)
3.3	运动方程	(17)
3.4	能量方程	(19)
3.5	状态方程	(22)
3.6	应力 π 的处理	(22)
3.7	Navier-Stokes方程	(23)
3.8	理想气体	(27)
3.9	Euler方程	(27)
3.10	初始条件和边界条件.....	(28)

第四章 速度势方程	(30)
4.1 概述	(30)
4.2 正压气体	(30)
4.3 无旋运动	(31)
4.4 速度势	(35)
4.5 加速度势	(36)
4.6 绝热流动, 等熵流动	(36)
4.7 速度势方程	(37)
4.8 初始条件和边界条件	(42)
4.9 压力系数	(45)
4.10 其他参数	(46)
第五章 小扰动速度势方程	(47)
5.1 小扰动假定	(47)
5.2 速度势方程、物面条件、压力系数表达式的简化	(50)
5.3 速度势方程、压力系数表达式的进一步简化	(57)
第六章 线化速度势方程求解的基本思路	(65)
6.1 概述	(65)
5.2 叠加原理	(65)
6.3 弯度问题和厚度问题	(66)
6.4 线化升力面弯度问题的提法	(69)
6.5 速度势基本解	(77)
6.6 压力偶极子	(82)
6.7 谐振荡情况	(84)
6.8 基本解叠加的基本思路	(88)
6.9 基本解的选择示例	(88)
第七章 线化升力面问题的奇异积分方程	(91)

7.1	概述	(91)
7.2	加速度势同速度势的关系	(91)
7.3	奇异积分方程	(92)
7.4	奇异积分方程的解法概述	(96)
第八章 亚音速偶极子-马蹄涡网格法		(100)
8.1	概述	(100)
8.2	核函数 K	(103)
8.3	物面法向运动速度和空气动力影响系数	(115)
8.4	空气动力影响系数的定常和非定常部分	(117)
8.5	空气动力影响系数的非定常部分 D_{1ij} 和 D_{2ij}	(119)
8.6	空气动力影响系数的定常部分 D_{0ij}	(129)
8.7	对称性处理	(139)
8.8	应用示例	(140)
第九章 超音速偶极子网格法		(142)
9.1	概述	(142)
9.2	核函数 K	(144)
9.3	下洗和空气动力影响系数	(150)
9.4	空气动力影响系数 D_{ij} 的计算	(151)
第十章 组合体的非定常空气动力计算		(158)
10.1	翼-翼组合	(158)
10.2	翼-体组合	(162)
10.3	体的非定常空气动力	(166)
10.4	影响系数 D_{WB} 和 D_{IB}	(169)
10.5	应用示例	(172)

第十一章 任意运动的非定常空气动力计算.....(176)

- 11.1 任意运动的各种形式.....(176)
- 11.2 动气动弹性方程的各种形式.....(178)
- 11.3 频率域计算.....(179)
- 11.4 时间域计算.....(185)
- 11.5 Laplace域计算.....(190)

第十二章 跨音速小扰动有限差分法.....(195)

- 12.1 概述.....(195)
- 12.2 跨音速流动的某些特点.....(196)
- 12.3 跨音速小扰动非线性速度势方程.....(198)
- 12.4 边界条件和初始条件.....(201)
- 12.5 有限差分法的基本思路.....(204)
- 12.6 差分表达式.....(208)
- 12.7 时间积分.....(213)
- 12.8 二维低频差分方程.....(215)
- 12.9 交替方向隐式差分 (ADI) 方法.....(217)
- 12.10 边界条件的嵌入.....(219)
- 12.11 三维坐标变换和网格系统.....(226)
- 12.12 三维差分方程.....(235)
- 12.13 非定常空气动力计算.....(238)
- 12.14 应用示例.....(241)
- 参考文献.....(245)

第一章 非定常空气动力计算的发展

非定常空气动力计算是动气动弹性计算中的重要组成部分。

气动弹性力学是研究空气动力和弹性力交互作用的学科。气动弹性问题可以分成静气动弹性问题和动气动弹性问题两大类，见图1-1。

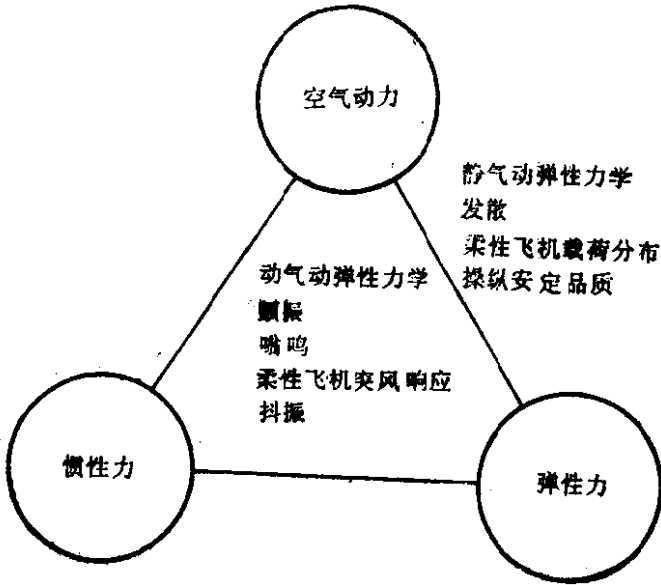


图1-1 气动弹性三角形

静气动弹性问题只涉及空气动力和弹性力的交互作用，如柔性飞机的载荷分布和操纵安定品质，以及发散等。

动气动弹性问题则涉及空气动力、弹性力和惯性力的交互作用，如柔性飞机对大气紊流的响应和抖振响应，以及颤振、嗡鸣等。

动气动弹性计算，需要两个方面的基础数据。一是结构动力特性，二是非定常空气动力特性。这两方面基础数据的可靠性，就决定了动气动弹性计算的可靠性。

因此，在回顾非定常空气动力计算的发展过程之前，先看一下气动弹性力学的发展，是令人感兴趣的。

气动弹性力学的发展，是同飞机设计的需要，以及计算、试

验条件的可能分不开的。

从固定翼飞机问世的第一天起，就遇到了气动弹性问题。

1903年，Langley的单翼机在做有动力的首次飞行时，就因为机翼折断而坠落在Potomac河中，事后才认识到，这是典型的机翼扭转发散。

第一次世界大战初期，Handley Page轰炸机又因为机身扭转刚度不够，发生了尾翼颤振。

为了分析这些问题，开始了第一批的飞机气动弹性研究。G. Brewer在1913年发表了关于Langley飞机机翼扭转发散的研究报告。F. W. Lanchester和L. Bairstow, A. Fage在1916年发表了关于Handley Page轰炸机尾翼颤振的研究报告。

二十年代，单翼机问世。对于扭转发散和颤振的研究，也取得了新的进展。1922年，A. Baumhauer和C. Koning提出了用质量平衡的方法防止操纵面颤振。1926年，H. Reissner提出了解决机翼扭转发散问题的措施。二十年代末，H. G. Küssner, W. J. Duncan, R. A. Frazer建立了机翼颤振的理论基础。1934年，Th. Theodorson获得了翼面——操纵面组合的二维不可压流谐振荡空气动力的精确解，建立了解析求解翼面颤振问题的有效方法。

第二次世界大战中，空军已经成为一个重要的军种。军用飞机型别之多，生产量之大，达到了惊人的程度。提高飞机的飞行速度，成为当时空战中制胜的一个重要手段。随之而来的，是一系列的操纵面、调整片颤振事故的发生。

但是，和今天的高性能飞机相比，那时的飞机，毕竟还是低速飞机。而且，翼的相对厚度较大，体的细长比较小。所以，飞机结构基本上是按强度要求设计的，气动弹性要求，还只处于校核性的地位。

其次，那时的飞机，机翼都是大展弦比的平直翼，平面形状比较单一。有可能制订具体的刚度规范和设计手册，

再者，那时的计算能力也很低。连二维不可压流中的翼面颤振计算的工作量，都被认为是惊人的繁重。

所以，那时的气动弹性工作的思路，大体上是，对于按强度要求设计的飞机结构，按刚度规范进行检查，对于不满足要求的情况，再做详细的气动弹性计算或试验。

第二次世界大战以后，喷气式飞机大量投入使用，飞行速度进入了高亚音速区。对于这种飞机，翼的平面形状应该说仍然比较单一，多是中等展弦比、中等后掠角的后掠翼。但是，翼的相对厚度减小，相对刚度水平下降。这时，飞机的某些部件是以气动弹性要求为设计条件。如后掠翼往往会以保证一定的副翼效率为设计条件。这时，就需要详细的气动弹性计算或试验。

当飞机进入超音速飞行以后，飞机的空气动力布局出现了多种多样的形式，如图1-2。这些飞机的翼面相对厚度更小，体的

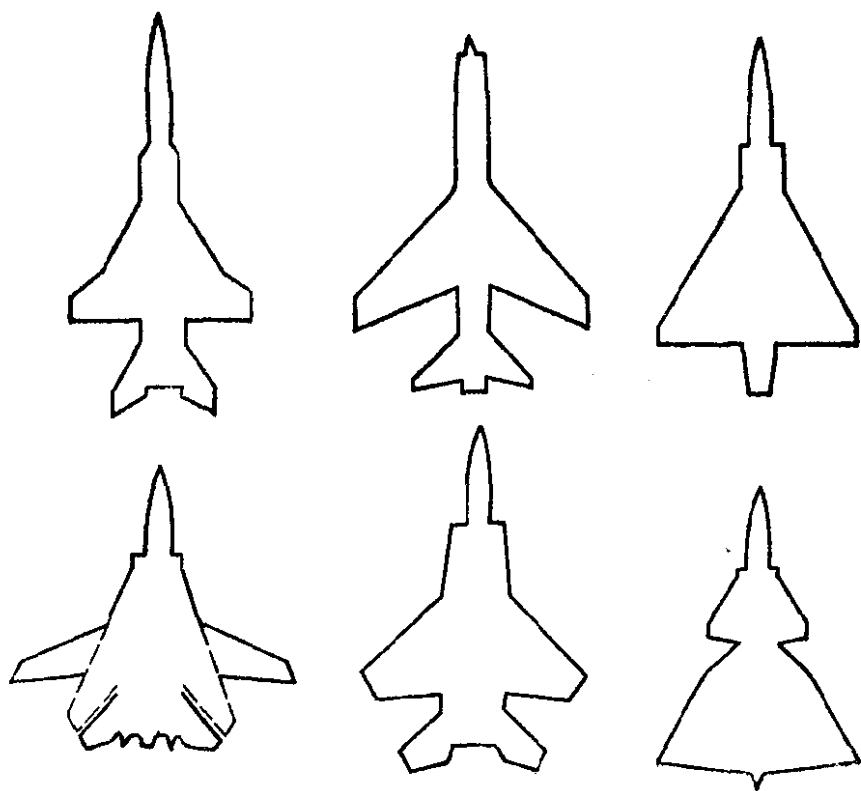


图1-2 飞机空气动力布局的多样化

细长比加大。于是，以气动弹性要求为设计条件的部件，越来越