

污水处理

反应器的计算流体力学

范 茏 施汉昌 徐 农 施慧明 编著

C
omputational
Fluid Dynamics of
Wastewater Treatment
Reactor

中国建筑工业出版社

污水处理反应器的计算流体力学

范 茏 施汉昌 徐 农 施慧明 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

污水处理反应器的计算流体力学/范茏等编著. —北京:
中国建筑工业出版社, 2012. 2
ISBN 978-7-112-13858-6

I. ①污… II. ①范… III. ①污水处理—反应器—
计算流体力学—研究 IV. ①X703.1②TQ052.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 254955 号

本书包括了计算流体力学的原理、方法和在不同的污水处理反应器设计中的应用案例, 可为工作在污水处理领域的科技人员提供计算流体力学基础知识, 为环境工程专业的研究生提供一本教学参考书。

责任编辑: 于 莉 田启铭

责任设计: 张 虹

责任校对: 陈晶晶 刘 钰

污水处理反应器的计算流体力学

范 茏 施汉昌 徐 农 施慧明 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

华鲁印联 (北京) 科贸有限公司制版

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 19 字数: 464 千字

2012 年 5 月第一版 2012 年 5 月第一次印刷

定价: 99.00 元

ISBN 978-7-112-13858-6

(21609)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

序

近年来，我国污水处理工程技术得到了迅速的发展，科技人员正在对很多污水处理新工艺和新技术开展深入的研究。污水生物处理的研究涉及反应和传质两个基本领域，国内外对生物反应动力学的研究都较为深入，而对污水处理中流体力学和传质的研究则较为薄弱。流体是水和污水处理反应器中物质和能量传递的主要载体，反应器内的流动特性直接影响反应器的混合过程，制约着反应器的处理效率。因此，为了更深入地理解水和污水处理反应器的特点，更好地发挥其功能，有必要对其流体力学特性进行研究，通过数值模拟获得反应器内流体力学特性是一种十分有效的方法。

本书作者所在的研究组在研究污水处理生物反应器的过程中为了解决反应器构形设计中的技术问题，改善反应器内的流态，提高反应器的传质效率，自 20 世纪 90 年代以来开始对污水处理反应器的流体力学特性开展研究。运用计算流体力学工具先后研究了高效好氧生物流化床反应器、气升式氧化沟、氧化沟倒伞型表面曝气机和二沉池的反硝化污泥上浮问题，积累了一些经验，对改善污水处理反应器的设计和运行有很大作用。基于十余年来运用计算流体力学在水和污水处理工程技术研究中的体会，撰写了《污水处理反应器的计算流体力学》一书，力求从环境工程应用的角度深入浅出地介绍计算流体力学的原理和应用方法。

本书包括了计算流体力学的原理、方法和在不同的污水处理反应器设计中的应用案例，可为工作在污水处理领域的科技人员提供计算流体力学基础知识，为环境工程专业的研究生提供一本教学参考书。

钱 易

2011 年 7 月

前 言

近年,随着污水处理工程技术的发展,对污水处理的理论研究也已经取得了巨大的进展,研究方法从以经验为主转变为包含化学、微生物学、生物工程、流体力学和数学等“基本原理”为基础的研究方法。这些研究方法在计算机技术的支撑下形成了成熟的数值模拟模型和软件。对于进入环境工程和污水处理行业的年轻一代科技人员,迫切需要学习和掌握这些新知识。本书力图以污水处理的研究与工程为背景,介绍计算流体力学的原理、方法和应用案例,为工作在环境工程和污水处理领域的科技人员提供计算流体力学基础知识,为环境工程专业的研究生提供一本教学参考书。

计算流体力学即 Computational Fluid Dynamics,简称 CFD,是从 20 世纪 60 年代中期逐步发展起来的,是一种研究流体流动等物理现象的现代技术,是随着计算机技术而迅速崛起的一门新型科学。运用数学方法通过计算机求解描述流体运动的数学方程,揭示流体运动的物理规律,研究定常流体运动的空间物理特性和非定常流体运动时的时一空物理特性。它是一门由多领域交叉而形成的应用基础科学,涉及流体力学理论、计算机技术、偏微分方程的数学理论、数值方法等学科,是流体力学、数值计算方法以及计算机图形学三者相互结合的产物。计算流体力学技术逐渐从高精尖的航空航天领域发展到广泛应用于与流动和传热相关的各个工程领域,如船舶工程、车辆工程、生态环境、传热以及工业中的化学反应等,显示了计算流体力学强大的生命力。

运用流体力学的方法研究反应器的水力特性,结合反应器基本原理建立反应器模拟和分析的数学模型,对反应器的设计和运行状况进行分析,将为研究新型水处理反应器和优化设计与运行提供一种新的技术手段。计算流体力学应用于水处理反应器的设计和运行研究,运用数值模拟方法分析反应器内的各种工况状况,提供了对各种复杂工况进行探索和分析的可能性,对于减少实际实验的工作量,节约研究资金和时间,有着重要的价值;同时还有助于解决由于实验技术手段限制,难以进行测试的问题。

本书基于作者多年来运用计算流体力学研究 and 解决水和污水处理中工程技术问题的体会,从环境工程应用的角度介绍了计算流体力学的原理和知识。书的内容包括:计算流体力学的形成与发展、流体力学的基本原理、流体运动方程的数值计算方法、网格系统的概念与生成技术、常用的计算流体力学软件及其使用方法、污水处理反应器中流体力学特性的计算方法、污水处理反应器的流态计算实例、计算流体力学与生物反应动力学的联合应用等。深入浅出地介绍了计算流体力学的原理和在研究水和污水处理工程技术中的应用方法等。

希望此书能帮助环境工程领域的科技工作者和研究生掌握计算流体力学的知识和方法,并将其应用到工程实践中去。

符 号 说 明

A	控制体的边界曲面，—；
A_a	消化池的截面面积， m^2 ；
A_B	流化床底部混合区过流断面面积， m^2 ；
A_d	降流区面积， m^2 ；
A_p	进口管的截面面积， m^2 ；
A_r	升流区面积， m^2 ；
a	分离区锥体间隙， m ；
$\vec{a}$	加速度， m/s^2 ；
a_r	黏性扩散系数，—；
B	流化床底部混合区高度， m ；
b	分离区锥体宽度， m ；
C	泥层中氮气浓度， mg/L ；
C^*	$20^\circ C$ 时饱和水中氧的质量含量， $C^* = 9.0 \times 10^{-6} kgO_2/kg$ ；
C_0	曝气池中水面处的饱和氮气浓度， mg/L ；
C_i	湍流控制方程经验常数， $i=1, 2, 3$ ，—；
C_a	曝气池中某处与大气平衡的饱和氮气浓度， mg/L ；
C_D	曳力系数，—；
C_e	曝气池出水中的氮气浓度， mg/L ；
C_E	氧的输出浓度，—；
C_h	曝气池中水深为 h 处的饱和氮气浓度， mg/L ；
C_H	曝气池底部的饱和氮气浓度， mg/L ；
C_p	曝气池中某处与纯氮气平衡的饱和氮气浓度， mg/L ；
C_s	氮气在水中的饱和浓度， mg/L ；
c	强度因子，—；
c_1, c_2	调节因子，—；
c_p	常数，—；
c_μ	$k-\epsilon$ 模型中的常数，—；
D	直径，(管子的内径)，表曝机叶轮直径， m ；
D_0	氧扩散率， $D_0 = 2.09 \times 10^{-9} m^2/s$ ；
D_1	流化床外筒直径， m ；
D_2	流化床内筒直径， m ；
D_{g1}	无因次轴向膜丝厚度，—；
D_{g2}	无因次错向膜丝厚度，—；

D_L	分子扩散项, N;
D_T	湍流扩散项, N;
d	衰减因子, —;
d_1	菱形隔板的上部膜丝厚度和平行隔板的轴向膜丝厚度, m;
d_2	菱形隔板的下部膜丝厚度和平行隔板的错向膜丝厚度, m;
d_h	装有隔板的通道的水力直径, m;
d_p	固体颗粒的直径, m;
E	比能, 焦耳 J;
E_{pq}, E_{qp}	相间质量传递系数, kg/s;
F	外力, N;
F_{AER}	由于曝气产生的氧的质量流率, kgO ₂ /s;
F_{JET}	由于射流产生的氧的质量流率, kgO ₂ /s;
F_{TOT}	离开计算域的氧的总质量流率, kgO ₂ /s;
f	阻力, N;
f_D	频率, Hz;
G	放大因子, —;
G_b	由于浮力产生的湍流动能产生率, kg/(m·s);
G_k	平均速度梯度引起的湍动能的产生率, kg/(m·s);
g	重力加速度, m/s ² ;
H	(流化床和消化池的) 高度, 液体的静压头, m;
H_d	流化床顶部混合区高度, m;
H_i	流化床内筒高度, m;
H_s	内筒与分离区间的距离, m;
H_T	分离区与流化床顶部间距离, m;
h	分离区两层锥体间距离, m;
h_1	隔板 1 与氧化沟液面间的距离, m;
h_2	隔板 2 与氧化沟沟底间的距离, m;
h_{ch}	两种隔板中的通道高度, m;
h_m	入口管和出口管的中点间的垂直距离, m;
J	单位面积的过滤流量, L/(m·h);
K	稠度系数 (consistency coefficient), Pa·s ⁿ ;
K_{La}	氧体积转移系数, s ⁻¹ ;
k	湍流动能, m ² /s ² ;
k_j	传质系数, L/(m·h);
k_{N_2}	氮气生成速度, mg/(L·s);
L	特征长度, 小试气升式氧化沟直段长度, m;
L_1	无因次轴向膜丝间距, —;
L_2	无因次横向膜丝间距, —;
L_d	微分方程算子, —;

L_h	差分方程算子，—；
L_p	入口管和出口管的长度，m；
l_1	菱形隔板的上部膜丝之间的距离和平行挡板的轴向膜丝间的距离，m；
l_2	菱形隔板的下部膜丝之间的距离和平行挡板的错向膜丝间的距离，m；
dl_i	侧面长度（或面积），m（或 m^2 ）；
M	求解域在 x 方向的网格节点数，—；
M_F	叶片到曝气机转轴的力矩， $N \cdot m$ ；
m	气体分布器的个数，—；
$\dot{m}_{pq}$	从相 p 到相 q 的质量传递，kg；
N	求解域在 t 方向的网格节点数，—；
N_r	转速；
n	幂函数的指数，—；
O	截断误差的阶次，—；
P	净能量输入，W；
$\dot{P}$	单位体积的能量输入， W/m^3 ；
Pr	普朗特（Prandtl）数： $Pr=c_p\mu/\kappa$ ，—；
p	压强，Pa；
Δp_i	i 方向的压力降，Pa；
Q	循环液体的体积流率， $m^3 \cdot s$ ；
Q_T	进入理想反应器的流率， m^3/h ；
q	流量密度， $kg \cdot O_2 \cdot m^3/h$ ；
q_w	壁面热通量， W/m^2 ；
R	消化池的半径，m；
$\vec{R}_{pq}$	相间作用力，N；
Re	雷诺数， $Re=\rho UL/\mu$ ，—；
r	管道的半径，m；
$\vec{r}$	旋转坐标系中的位置向量，—；
S	面积（或体积）， m^2 （或 m^3 ）；
S_ϕ	源项，—；
T	泥浆温度，K；
T_0	参考温度，K；
TS	总固体浓度，g/L；
t	时间，s；
t_i	i 方向的纤维厚度，m；
U	速度，m/s；
U_0	初始射流速度，m/s；
$\bar{U}_a$	消化池内的平均速度，m/s；
U_f	自由气流速度，m/s；
U_{gr}	升流区表观风速，m/s；

U_{Gr}	曝气强度, $m^3/(m \cdot h)$;
U_{in}	进口速度, m/s ;
U_{Lr}	表观向上流动速度, m/s ;
U_8	流体的平均速度, m/s ;
u	x 方向的速度, m/s ;
u^*	x 方向的无量纲速度, $u^* = u/U_0$, —;
u_{av}	通道内的速度, m/s ;
u_m	x 方向的平均横向速度, m/s ;
u_{m0}	中心速度值, m/s ;
V	消化池体积, m^3 ;
v	y 方向的速度, 进气速度, m/s ;
v^*	y 方向的无量纲速度, $v^* = v/U_0$, —;
$\vec{v}$	相平均速度, m/s ;
$\vec{v}_{dr,k}$	漂流速度, m/s ;
v_{cd}	滑移速度, m/s ;
$\vec{v}_p$	进口管的平均速度, m/s ;
v_{pq}	相对相间速度, m/s ;
v_s	表观速度, m/s ;
$\vec{v}_r$	相对速度, m/s ;
w	z 方向的速度, m/s ;
w^*	z 方向的无量纲速度, $w^* = w/U_0$, —;
α_k	相含率, —;
α	多孔介质内的空气气含率, —;
β	粒子加载率, —;
$\dot{\gamma}$	剪切率, s^{-1} ;
θ	流动接触角度, $^\circ$;
ρ	密度, kg/m^3 ;
ν	剪切黏度, m^2/s ;
μ	黏度, $Pa \cdot s$;
μ_t	湍流黏度, $Pa \cdot s$;
μ_w	清水的黏度, $Pa \cdot s$;
ε	湍动耗散率, $m^2 \cdot s$;
ε'	射流曝气器产生的两相射流中气体的体积分数, —;
η	非牛顿流体黏度, $Pa \cdot s$;
$\vec{\omega}$	角速度向量, rad/s ;
λ	激光波长, m ;
κ	传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$;
K	von Karman 常数 (0.4187), —;
λ	第二黏度, $Pa \cdot s$;

λ_q	相 q 的体积黏度, m^2/s ;
Ψ	流函数, m^3/s ;
φ	相角, rad ;
ϕ	变量, —;
ϕ_{ij}	应力应变模量, N ;
s	柯朗 (Courant) 数, —;
s_k 、 s_ϵ	湍流动能 k 和耗散率 ϵ 对应的普朗特 (Prandtl) 数, —;
τ	剪切力, Pa ;
$\overline{\tau}$	应力张量, Pa ;
τ_{cd}	弛豫时间, s ;
τ_t	湍流脉动时间, s ;
τ_w	壁面剪应力, Pa ;
Γ	叶轮表面剪切力引起的力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$;
χ_p	松弛时间, s ;
ξ	涡量, —。
下标	
c	连续相 (液相);
d	分散相 (固相);
m	混合物;
G	气相;
L	液相;
r	柱坐标系坐标, 径向方向;
z	柱坐标系坐标, 轴向方向;
θ	柱坐标系坐标, 切向方向。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 计算流体力学的形成与发展	1
1.1.1 计算流体力学简介	2
1.1.2 计算流体力学的产生	2
1.1.3 计算流体力学的发展	3
1.2 废水处理中的流体力学问题	7
1.3 数值模拟的应用前景与局限性	8
1.3.1 数值模拟的局限性	9
1.3.2 数值模拟的发展前景	9
本章参考文献	11
第 2 章 流体力学的基本原理	14
2.1 描述流体运动的基本方法	14
2.1.1 基本思想	14
2.1.2 拉格朗日方法	14
2.1.3 欧拉方法	14
2.2 流体力学的基本方程	15
2.2.1 基本方程介绍	15
2.2.2 可压缩的 Navier-Stokes 方程	18
2.2.3 Euler 方程	20
2.3 牛顿流体的 Navier-Stokes 方程	20
2.3.1 无质量力的不可压缩流体流动	21
2.3.2 不可压缩流体二维流动的流函数方程和涡量方程	22
2.3.3 不可压缩流体二维流动的压强泊松方程	23
2.4 流动控制方程的守恒形式	23
本章参考文献	24
第 3 章 流体运动方程的数值计算方法	25
3.1 数值计算的基本原理	25
3.1.1 数值模拟的概念	25
3.1.2 离散化的概念	25
3.1.3 离散化方程的结构	26
3.2 有限差分法	26

3.2.1	有限差分法的基本概念	26
3.2.2	一般的有限差分格式	27
3.2.3	模型方程的差分逼近	32
3.2.4	差分方法的理论基础	34
3.2.5	稳定性分析方法	37
3.2.6	空间离散方法	41
3.3	有限体积法	42
3.4	SIMPLE 算法	45
3.4.1	交错网格	45
3.4.2	动量方程	47
3.4.3	压力与速度的修正	49
3.4.4	压力修正方程	49
3.4.5	SIMPLE 算法	50
3.4.6	SIMPLE 算法的改良型	52
3.5	有限元法和谱方法	53
3.5.1	有限元法	53
3.5.2	谱方法	56
3.6	确定边界条件的方法	57
	本章参考文献	61
第 4 章	网格系统的概念与生成技术	63
4.1	物理坐标系中的网格	63
4.2	贴体坐标变换	64
4.3	结构性计算网络的生成	64
4.3.1	代数法	65
4.3.2	保角变换生成法	66
4.3.3	椭圆型微分方程生成法	67
4.3.4	双曲型微分方程生成法	68
4.3.5	抛物线型微分方程生成法	68
4.4	分区结构网格	69
4.5	非结构网格和混合格网	70
4.5.1	非结构网络的生成	70
4.5.2	结构/非结构混合格网	73
4.6	自适应笛卡尔网格	74
4.7	网络疏密的调整	74
	本章参考文献	77
第 5 章	常用的计算流体力学软件及其使用方法	78
5.1	计算流体力学软件的发展	78

5.1.1	计算流体力学软件的产生	78
5.1.2	计算流体力学软件发展简介	79
5.1.3	计算流体力学软件在我国的应用	80
5.2	常用计算流体力学软件简介	80
5.2.1	常用计算流体力学通用软件的结构	81
5.2.2	CFD 通用软件采用的基本解法和离散格式	83
5.2.3	CFD 通用软件采用的湍流模型	85
5.2.4	CFD 通用软件的基本选用原则	86
5.2.5	常用计算流体力学软件	86
5.3	FLUENT 软件使用方法初步	92
5.3.1	FLUENT 软件的主要特征及结构	92
5.3.2	FLUENT 软件求解的问题及求解步骤	93
	本章参考文献	95
第 6 章	废水处理反应器中流体力学特性的计算方法	98
6.1	目标的确定与模拟结构的创建	98
6.1.1	目标的确定	98
6.1.2	模拟结构的创建	98
6.2	网格的生成与调整	99
6.3	边界的处理与边界条件设置	101
6.3.1	壁面边界条件	101
6.3.2	流体条件	103
6.4	模型的选择与计算	103
6.4.1	模型的选择	103
6.4.2	计算	104
6.5	对模拟结果的分析与后处理	104
6.5.1	绘制等高线和等高面	104
6.5.2	绘制速度向量图	105
6.5.3	显示颗粒轨迹	107
6.5.4	$x-y$ 图	108
6.5.5	动画	109
6.5.6	Report 命令	110
	本章参考文献	110
第 7 章	废水处理反应器的流态计算实例	111
7.1	氧化沟的流态模拟与实验验证	111
7.1.1	氧化沟的小试模型及试验简介	111
7.1.2	氧化沟的数学模型	112
7.1.3	氧化沟的模拟结果分析及实验验证	115

7.1.4	小结	122
7.2	新型气升式氧化沟的设计与优化	123
7.2.1	氧化沟的改进	123
7.2.2	新型气升式氧化沟的基本结构	123
7.2.3	气升式氧化沟的初步设计与优化	124
7.2.4	气升式氧化沟的小试及流体力学特性模拟研究	133
7.2.5	气升式氧化沟流动特性的中试试验和模拟研究	141
7.3	生物流化床中流化特性的模拟计算	150
7.3.1	流化床的结构	150
7.3.2	计算流体力学模拟方程	152
7.3.3	流化床内流动状况的模拟	152
7.3.4	不同结构参数流化床反应器的模拟	158
7.3.5	不同形式气体分布器对流化床的影响	164
7.3.6	小结	166
7.3.7	内循环生物流化床内三相流动的模拟	167
7.4	运用计算流体力学优化生物载体分离区的结构参数	171
7.4.1	含载体分离区流化床模型的建立	171
7.4.2	流动模型	172
7.4.3	实验简介	173
7.4.4	模拟结果与讨论	174
7.4.5	小结	180
7.5	二次沉淀池的数值模拟	181
7.5.1	计算流体力学在二次沉淀池研究中的作用	181
7.5.2	流体模型和模拟方法	181
7.5.3	结果与讨论	183
7.5.4	结论	189
7.6	计算流体力学在 A ² O 工艺污水处理厂运行控制中的应用	189
7.6.1	流态对生物反应池的影响	189
7.6.2	计算流体力学技术在小红门污水处理厂的应用	190
7.6.3	静态模拟: A ² O 生物反应池流态及污泥相体积分布	191
7.6.4	动态模拟: 进水传质	194
7.6.5	结论与展望	197
	本章参考文献	198

第 8 章	膜技术和厌氧反应器与计算流体力学	201
8.1	膜技术与计算流体力学	201
8.1.1	膜技术简介	201
8.1.2	CFD 在膜组件优化中的应用	202
8.1.3	膜生物反应器的流体力学特性	212

8.2 厌氧消化与计算流体力学 221

8.2.1 厌氧生物反应器中的流体力学问题 221

8.2.2 模型选择 222

8.2.3 模拟步骤 223

8.2.4 结果与讨论 224

8.2.5 结论..... 232

本章参考文献 232

第 9 章 废水处理中充氧设备的流态计算 236

9.1 深水型表面曝气机的模拟优化 236

9.1.1 深水型表面曝气机的简介 236

9.1.2 模拟方法简介 237

9.1.3 计算结果 239

9.1.4 后处理 244

9.1.5 与小试实验的比较 245

9.1.6 结论..... 246

9.2 射流曝气器的模拟计算 247

9.2.1 射流曝气器简介 247

9.2.2 研究对象 248

9.2.3 研究方法 249

9.2.4 结果与讨论 251

9.2.5 结论..... 258

本章参考文献 259

第 10 章 计算流体力学与生物反应动力学的联合应用 261

10.1 流体力学问题对生物反应的影响 261

10.2 计算流体力学与生物反应动力学联合运用的方法 262

10.2.1 计算流体力学与生物反应动力学结合的必要性..... 262

10.2.2 计算流体力学与生物反应动力学联合运用的方法 262

10.3 二沉池反硝化污泥上浮过程的模拟 263

10.3.1 污泥上浮过程的计算流体力学模拟 263

10.3.2 二沉池中反硝化过程的模拟 275

本章参考文献 289

第 1 章 绪 论

1.1 计算流体力学的形成与发展

随着过程工业的发展，会出现各种不可预见的难题，特别要指出的是，有关可持续发展和污染的问题将会对我们的工作产生越来越重要的影响，找出科学的解决这些问题的方法，将会对整个人类做出重要贡献。因此，理解我们周围人造的和自然的环境，尤其是介乎二者之间的环境，如污染在城市中的变迁，自然界的雪崩，是很重要的。影响我们对此理解的一个重要领域就是流体力学^[1]。

自从 1687 年牛顿定律公布以来，直到 20 世纪 50 年代初，研究流体力学的主要方法有两种：一是实验研究，二是理论分析，利用简化的流动模型假设，给出所研究问题的解析解或简化方程。理论工作者在研究流体运动基本规律的基础上，提出了各种简化流动模型，给出了一系列解析解和数值方法。这些研究成果推动了流体力学的发展，奠定了今天计算流体力学的基础^[2]，计算流体力学也逐渐成为处理流体力学问题的第三种方法^[3]。

计算机参与下的分析技术促进了很多领域的工程设计。计算流体力学就是这样一门技术，它促进了包括传热、传质和化学反应在内的流动现象的分析，主要利用基于迭代方法的网格技术，通过求解反映物理现象的数学方程来完成。同时，也可以采用实验和理论方法。

实验研究、理论分析和计算流体力学三种方法的优缺点比较列于表 1.1 中。尽管三种方法各有优缺点，但计算流体力学以其能快速、经济的对设计进行评估；可以通过变量、可比的研究改进设计；能揭示重要但隐蔽的流动特征；可以模拟太危险以至于不能操作的实验；节省费用等优点，得到越来越多的应用，受到越来越多的重视。

三种方法的比较^[3] 表 1.1

方 法	优 点	缺 点
实验	现实可行	需要实验设备； 放大的问题； 需要校正； 测量困难； 操作费用高
理论	通常可以用公式的形式给出清楚、通俗的信息	局限于简单的结构和物理现象； 通常仅用于处理线性问题
计算流体力学	没有线性的限制； 可以处理复杂的物理现象； 可以得到流动随时间的变化	有截断误差； 边界条件的问题； 计算机的花费也很高

1.1.1 计算流体力学简介

计算流体力学，即 Computational Fluid Dynamics（简称 CFD），是一种研究流体流动等物理现象的现代技术，是随着计算机技术迅速崛起的一门学科。

我们知道，自然界中的任何流动都必须满足 3 个守恒定律，即：质量守恒、动量守恒和能量守恒。这些基本定律可由积分或偏微分形式的数学方程组表示，如欧拉方程（Euler 方程），纳维—斯托克斯方程（Navier-Stokes 方程，简称 N-S 方程），但这些方程的分析解很难得到。利用数值方法通过计算机求解描述流体运动的数学方程，揭示流体运动的物理规律，研究定常流体运动的空间物理特性和非定常流体运动时的时—空物理特性，这样的学科称为计算流体力学^[2]。它是一门由多领域交叉形成的应用基础学科，涉及流体力学理论、计算机技术、偏微分方程的数学理论、数值方法等学科，是流体力学、数值计算方法以及计算机图形学三者相互结合的产物^[4]。计算流体力学通常将方程中的积分或偏微分项用离散了的代数式表示，通过求解这些代数式得到某时刻、某地点的离散点的数值解。

通过上面的介绍也可以看出，计算流体力学具有以下特征：

- ①具有一定边界条件或（和）初始条件的控制方程；
- ②计算域（所求问题的结构）；
- ③网格或节点的产生；
- ④离散所需的数值方法；
- ⑤产生的差分方程或代数方程的求解。

同时也可以看出，流体运动状态可用一组数学物理方程组（Navier-Stokes 方程）精确描述，然而由于方程的高度非线性和多尺度效应，不要说精确求解，即使是完全数值解的获得，在计算机出现以前也是可望而不可即的。因此，所有的计算流体力学程序都是用代数差分方程来代替基本的微分方程（质量方程、动量方程、能量方程，或化学组分平衡方程），这样就可以对方程进行数值求解，这就是离散化的过程。数字计算机的出现使对这些方程得出数值解成为可能。商业计算流体力学软件则采用了更加友好的输入界面，普通的工程师即使没有流体力学的具体知识，也可以使用这些软件。

1.1.2 计算流体力学的产生

在第二次世界大战前，由于当时的计算要用手算，单独的一个解就需要大量的工作，大多数问题的解都是分析解或经验解，很少有人用数值方法求解问题。计算机出现以后，得到数值解所需要的常规计算就可以很容易地进行了^[3]。

随着第一台计算机的产生，以宇航领域要求对高超声速飞行器绕流场研究为工程背景，集计算数学、计算物理、计算机软硬件技术为一体的新型学科——计算流体力学应运而生。作为一种重要的计算机模拟技术，它是随着计算技术和宇航飞行器的发展逐步形成的。它的兴起促进了实验研究和理论分析方法的发展，将实验研究与理论分析方法联系起来，为简化流动模型的建立提供了更多的依据，使很多简化方法得到了发展和完善。

关于计算流体力学产生的真正时间，或者说与计算流体力学相关的重要计算方法的出现时间，没有定论。大多数人认为最早期的重要工作是 Richardson^[5] 1910 年完成的，他在伦敦皇家学会的演讲中提出了用点迭代数值求解拉普拉斯方程和双调和方程的方法，并明