

湍流新理论 及其应用

TUANLIU XINLILUN JIQI YINGYONG

翟庆良 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

湍流新理论及其应用

翟庆良 著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2009

内 容 提 要

本书主要介绍了边层流、湍流形成机理与湍流运动、湍流运动基本方程组、有压管道湍流运动、矩形明渠湍流、平板近壁流、不可压缩流体管道进口段、可压缩湍流管道流动和定常湍流边界层等内容。

本书适合于从事湍(紊)流科研的工作者阅读,也可作为本科和研究生的教学用书,同时对从事冶金、化工、水利专业的工程技术人员也有参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

湍流新理论及其应用/翟庆良著. —北京:冶金工业出版社, 2009. 7

ISBN 978-7-5024-4940-7

I. 湍… II. 翟… III. 湍流—研究 IV. O357

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 109089 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 钱文涛 美术编辑 李 新 版式设计 张 青 孙跃红

责任校对 王永欣 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4940-7

北京印刷一厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2009 年 7 月第 1 版, 2009 年 7 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 14.5 印张; 350 千字; 220 页; 1-1500 册

55.00 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号(100711) 电话: (010)65289081

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	作 者	定价(元)
工程流体力学(第2版)	周亨达	23.00
工程流体力学(第3版)	谢振华 宋存义	25.00
现代流体力学的冶金应用(英文版)	李宝宽	25.00
流体输送设备	王荣祥	45.00
材料传输工程基础	王振峰	42.00
冶金传输原理	沈巧珍	46.00
传输过程基本原理	乐启炽	26.00
冶金传输原理	张先棹	40.00
冶金传输原理基础	沈颐身	49.00
传热学	任世铮	20.00
冶金反应工程学基础	肖兴国	32.00
粉末冶金学	王盘鑫	20.00
钛冶金(第2版)	莫 畏	33.00
钢铁冶金学(炼铁部分)(第2版)	王筱留	29.00
钢铁冶金学(炼钢部分)	陈家祥	35.00
冶金炉料手册(第2版)	刘麟瑞	69.00
冶金炉热工基础(第2版)	贺成林	29.50
粉末冶金原理(第2版)	黄培云	44.50
钢铁冶金概论	李 慧	24.00
钢铁冶金原理(第3版)	黄希祐	40.00
微生物湿法冶金	杨显万	33.00
金银冶金(第2版)	孙 戩	49.00
有色冶金炉	梅 炽	30.00
高炉生产知识问答(第2版)	王筱留	35.00
冶金通用机械与冶炼设备	王庆春	45.00
冶金过程动力学导论	华一新	45.00
有色冶金原理(第2版)	傅崇说	35.00
连续铸钢生产	冯 捷	45.00
高炉喷煤技术	金艳娟	19.00
现代冶金学(钢铁冶金卷)	朱苗勇	36.00

前 言

许多科学和工程问题，无论理论流体力学、工程流体力学、冶金传输原理，还是传热学、传质学等，都会涉及湍流问题，传统采用时均值处理的方法，其实质是掩盖了湍流问题的本质，尤其是普朗特混合长理论用微观分子运动方法来处理宏观湍流问题则显然是不合理的。

本书作者于1957年毕业于大连工学院（现大连理工大学）水利系，从事大学本科及研究生“流体力学”及相关专业教学与科研工作43年。本书是作者多年坚持不懈地思索教学与科研中存在问题建立起的一种解决湍流问题可行的模型和思维方法，从而形成系统的湍流理论，并建立了相应的数学方程。本书写作始于2001年，至2008年9月定稿。目前因作者已离休，无力完成对理论的验证。作者真诚地希望有条件的同仁对书中提出的湍流理论与方程给予实验并验证，对这些理论与公式提出建设性意见或争论，共同为湍流科学发展做出贡献。

本书提出的边层流概念，解决了涡旋产生地带并确定其位置的问题；所提出的湍流形成机理，可较好地描述层流转变为湍流的过程，阐明在湍流区存在着涡旋微团与无旋转的平移微团运动形成的同介质多相流流场；并指出脉动速度与脉动压力只是现象，而不是湍流的本质。

解决湍流问题的关键是如何建立湍流微分方程从而找到湍流场内的速度分布。本书引入建立多相流微分方程的办法，运用系统与控制体相结合，建立不可压缩流体第一输运公式与可压缩流体第二输运公式，并利用它们导出湍流场内运动的微分方程组。

本书结合具体问题，将有因次方程变成无因次方程。依无因次边界条件暂选含有待定参数的速度分布，将其代入无因次方程中，解出待定参数，一般是通解，再将其加上两个系数，并利用进出口条件，确定它们，最后获得满足各方面条件的速度分布，从而得到流体力学中非线性偏微分方程的解。

对于数学问题，总是要先确定定义域；而在流体运动的流场中，管道与渠道进口段或是边界层问题等均存在着理想流体区域和实际流体区域，须用不同的微分方程求解。因此首先要确定定义域范围，也就是确定理想流体与实际流

体运动区域的分界线。本书结合流体运动特点，讲述了确定定义域的方法。

本书对工程湍流问题分析已深入到速度场、涡旋运动速度及其大小、涡旋总量，即涡旋体积分数的计算，这些问题是研究多相流、传热、传质、燃烧等问题的理论基础。

本书作者多年从事大学本科生及研究生流体力学的教学及其科研工作，主讲“理论流体力学”、“工程流体力学”、“冶金传输原理”，内容涉及流体力学、传热学和传质学等方面内容，并在湍流问题和“多相流”的科研方面发表过论文三十余篇，其中三篇入选国际会议，多篇入选“多相流体力学”等全国性会议的论文集。

本书适合于从事湍(紊)流科研工作者阅读，也可作为本科生和研究生的教学用书，同时对从事冶金、化工、水利专业的工程技术人员也有一定的参考价值。本书的读者应具备高等数学及一般工程流体力学的基础。

由于作者的水平所限，书中不妥之处，敬请读者指出。

作 者

2009年2月1日

于沈阳

目 录

1 边层流	1
1.1 边层流区与层外流区的提出	1
1.2 边界层与边层流、层外流的区别	2
1.3 层流边层流与湍流边层流的理论作用	2
1.4 层流边层流	2
1.4.1 层流边层流的形成	2
1.4.2 层流边层流的划分	3
1.5 湍流边层流	5
1.5.1 湍流边层流的定义	5
1.5.2 湍流边层流的划分	6
1.6 概念梳理	8
1.7 连续性问题	8
2 湍流形成机理与湍流运动	10
2.1 概述	10
2.2 层流转变为湍流过程	10
2.2.1 有压管道充分发展段	10
2.2.2 有压管道进口段	14
2.2.3 明渠	14
2.2.4 平板边界层	15
2.3 湍流状态	17
2.3.1 有压管道充分发展段	17
2.3.2 有压管道进口段	19
2.3.3 明渠	20
2.3.4 平板边界层	21
2.4 流态判别方法	22
2.5 能量方程	23
2.6 涡旋直径与转速关系	23
3 湍流运动基本方程组	25
3.1 湍流系统积分方程组	25
3.1.1 系统质量守恒积分方程	25

3.1.2 系统动量守恒积分方程·····	25
3.1.3 系统动量矩守恒积分方程·····	26
3.1.4 系统能量守恒积分方程·····	26
3.2 湍流第一输运公式·····	26
3.3 不可压缩湍流积分方程组·····	28
3.3.1 质量守恒积分方程·····	28
3.3.2 动量守恒积分方程·····	28
3.3.3 动量矩守恒积分方程·····	28
3.3.4 能量守恒积分方程·····	28
3.4 不可压缩湍流微分方程组·····	29
3.4.1 连续性微分方程·····	29
3.4.2 动量微分方程·····	29
3.4.3 动量矩微分方程·····	29
3.4.4 能量微分方程·····	30
3.5 湍流第二输运公式·····	30
3.6 可压缩湍流积分方程组·····	31
3.6.1 质量守恒积分方程·····	31
3.6.2 动量守恒积分方程·····	32
3.6.3 动量矩守恒积分方程·····	32
3.6.4 能量守恒积分方程·····	32
3.7 广义牛顿定律·····	32
3.8 湍流剪应力的分解·····	33
3.9 涡旋公式分解·····	33
3.10 附加剪应力涡旋平移速度及其图解·····	34
3.10.1 附加剪应力以涡旋平移速度表示·····	34
3.10.2 涡旋平移速度图解说明·····	34
3.11 涡旋平行连续相速度公式·····	35
3.12 涡旋垂直无旋流速度公式·····	36
3.13 涡旋平移速度自积·····	37
3.14 附加剪应力以连续相速度表示·····	38
3.15 涡旋平移速度表达式·····	39
3.16 层流不可压缩运动微分方程组·····	39
3.16.1 连续性方程·····	39
3.16.2 动量方程·····	39
3.16.3 动量矩方程·····	41
3.16.4 能量方程·····	43
3.17 层流可压缩运动微分方程组·····	45
3.17.1 连续性方程·····	45
3.17.2 动量方程·····	45

3. 17. 3 动量矩方程	46
3. 17. 4 能量方程	48
3. 18 湍流不可压缩运动微分方程组	49
3. 18. 1 连续性方程	49
3. 18. 2 动量方程	50
3. 18. 3 动量矩方程	54
3. 18. 4 能量方程	59
3. 19 湍流可压缩运动微分方程组	61
3. 19. 1 连续性方程	61
3. 19. 2 动量方程	62
3. 19. 3 动量矩方程	63
3. 19. 4 能量方程	67
4 有压管道湍流运动	71
4. 1 湍流圆形管道断面速度分布	71
4. 2 湍流圆形管道涡旋体积分数 φ 分析	72
4. 2. 1 涡旋产生横向运动条件	72
4. 2. 2 涡旋产生横向运动地带	73
4. 2. 3 涡旋产生横向运动的频率 f	73
4. 2. 4 涡旋体积分数 φ 计算公式推导	73
4. 3 圆形管道湍流度确定方法	75
4. 4 湍流矩形管道断面速度分布	76
4. 5 湍流矩形管道涡旋体积分数 φ 分析	77
4. 5. 1 涡旋产生频率 f	78
4. 5. 2 粗糙分布密集型涡旋体积分数 φ 公式	78
5 矩形明渠湍流	80
5. 1 断面速度分布	80
5. 2 边层流界面位置确定	81
5. 3 涡旋旋转速度确定	83
5. 4 确定涡旋体积分数 φ 计算公式	84
6 平板近壁流	86
6. 1 平板近壁流流态判别准数	86
6. 2 明渠层流近壁流	87
6. 3 明渠湍流近壁流	89
6. 4 有压管道平板近壁层流运动	91
6. 5 有压管道近壁湍流运动	93

7 不可压缩流体管道进口段	96
7.1 层流圆形管道进口段	96
7.1.1 运动控制方程与边界条件	96
7.1.2 初步确定进口段速度分布	97
7.1.3 确定进口段长度	99
7.1.4 确定理想流体与实际流体运动分界线 $\delta(x)$	99
7.1.5 最终确定速度分布	99
7.1.6 压力变化公式	100
7.2 层流矩形管道进口段	100
7.2.1 运动控制方程及边界条件	101
7.2.2 实际流体运动区速度分布初选	103
7.2.3 理想流体与实际流体分界线方程	103
7.2.4 确定理想流体与实际流体分界线 δ_y 和 δ_z	104
7.2.5 确定进口段长度的方法	107
7.2.6 流体速度分布最后确定	108
7.2.7 压力变化	109
7.3 不可压缩湍流圆形管道进口段	109
7.3.1 运动控制方程与边界条件	109
7.3.2 进口段速度分布	111
7.3.3 确定进口段长度 L 与 α	112
7.3.4 最后确定实际流体运动区速度分布	113
7.3.5 确定理想流体与实际流体分界线 $\delta(x)$	113
7.3.6 压力变化 (无因次)	114
7.3.7 实际流体运动区断面平均速度与位置	114
7.3.8 边层流界面上涡旋旋转速度	115
7.3.9 边层流界面上涡旋径向速度 u_r^*	116
7.3.10 涡旋体积分数 φ	116
7.3.11 解决进口段问题的第二种方法	116
7.4 不可压缩湍流矩形管道进口段	119
7.4.1 运动控制方程与边界条件	119
7.4.2 速度分布	121
7.4.3 进口段长度	124
7.4.4 理想流体与实际流体运动分界线 $\delta(x, y, z)$	127
7.4.5 压力变化	128
7.4.6 实际流体运动区断面平均速度与位置	129
7.4.7 边层流界面上涡旋旋转速度	130
7.4.8 边层流界面涡旋横向分速度	130
7.4.9 涡旋体积分数 φ	130

8 可压缩湍流管道流动	131
8.1 可压缩湍流圆形管道进口段分析	131
8.1.1 运动控制方程与边界条件	131
8.1.2 可压缩湍流管道无进口段	135
8.2 可压缩湍流管道进口段	137
8.2.1 可压缩湍流圆形管道进口段	137
8.2.2 可压缩湍流矩形管道进口段	145
8.3 可压缩湍流变质量流量管道流动	156
8.3.1 等温圆形管道	156
8.3.2 绝热圆形管道	159
8.3.3 等温矩形管道	165
8.3.4 绝热矩形管道	169
9 定常湍流边界层	183
9.1 定常层流平板边界层	183
9.1.1 无压力变化层流平板边界层	183
9.1.2 有压力变化层流平板边界层	186
9.2 不可压缩湍流无压力变化平板边界层	191
9.2.1 运动控制方程与边界条件	191
9.2.2 确定边界层厚度 $\delta(x)$ 与速度分布	192
9.2.3 边层流厚度 $Y_B(x)$	193
9.2.4 边层流界面上涡旋旋转速度与垂直于流向的速度	194
9.2.5 涡旋体积分数 φ	194
9.3 不可压缩湍流有压力变化平板边界层	194
9.3.1 运动控制方程与边界条件	194
9.3.2 运动控制方程与边界条件无因次化	195
9.3.3 建立流量守恒方程	196
9.3.4 确定速度分布	197
9.3.5 理想流体与实际流体运动分界线 $\delta(x)$	198
9.3.6 确定参变量 n	198
9.3.7 理想流体与实际流体速度对接	199
9.4 可压缩湍流无压力变化平板边界层	199
9.4.1 运动控制方程与边界条件	200
9.4.2 运动控制方程与边界条件无因次化	201
9.4.3 确定边界层内速度分布	203
9.4.4 确定温度分布	205
9.5 可压缩湍流有压力变化平板边界层	206
9.5.1 流场情况分析	206

9.5.2 运动控制方程与边界条件	207
9.5.3 确定速度分布	211
9.5.4 确定速度边界层厚度 $\delta(x)$	211
9.5.5 确定温度分布	214

1 边 层 流

1.1 边层流区与层外流区的提出

在分析层流充分发展管段断面速度分布时可知，其断面流过的流体平均速度为 v_0 。由于流体存在着黏性，紧贴壁面的流体微团受到壁面的摩擦切力作用，故微团平移动能全部转化为旋转动能，其转向依主流方向而成顺时针旋转。先转动起来的微团，又带动相邻的微团成逆时针方向转动，这样各微团之间形成类似主动轮与被动轮的关系，主动轮转向为顺时针方向，被动轮转向为逆时针方向，主动轮与被动轮直径、转速近似相等，而转向相反，这样，在紧贴壁面就呈现出原地转动的一层流体，如图 1-1-1 所示。

由于紧贴壁面的相邻两微团原地转动且方向相反，造成流经它们表面的流体微团不能转动；但因为它们只原地转动，也会对来流产生阻力作用，使来流平移速度降低很多，形成一层只有平移运动的流层，如图 1-1-1 上平行线所示，称为微团平移层。微团平移层速度很小，因而对经过它表面速度大的流体微团也产生阻力，此力仍然以剪力方式作用，故使平移运动来流的部分动能转变为旋转动能，形成既有平移又有旋转运动的流层。依此类推，出现如图 1-1-1 所示的单一平移及平移与旋转流层相间的流谱。这样，流区厚度可以通过断面平均速度 v_0 与断面速度分布曲线交点 c 确定，如图 1-1-2 所示，过 c 点作平行于壁面的直线，其线下则是此流区范围，称之为边层流区。该区域内的流体为边层流。

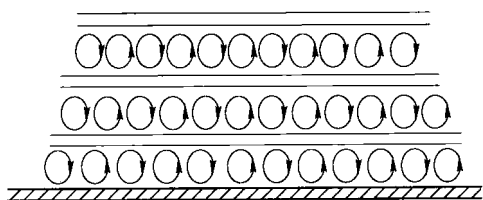


图 1-1-1 边层流内微团运动示意图

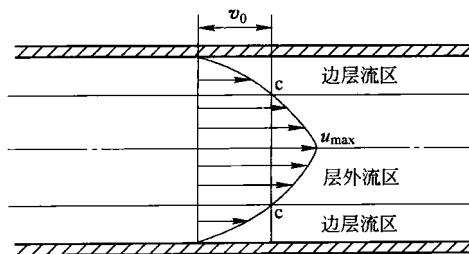


图 1-1-2 边层流区与层外流区示意图

边层流区中各层流体微团成层状运动，各层流体微团互不混杂。边层流区之外的流区称之为层外流区。

根据质量守恒原则，通过管道各断面流量应为常量，而边层流区的速度均小于平均速度 v_0 ，为保证断面流量不变，必须加大层外流区的流速。流体微团旋转速度不能反映流量，所以只能加大层外流区流体微团的平移速度，由此根据质量守恒原则在建立数学模型时，设层外流区流体微团只具有平移速度而无旋转速度，这也就是层外流区的流谱的特点。

能量守恒原则，过去在管道流动中应用过，为保持能量守恒，一切能量损失由压力下

降来提供；在能量互相转化时，压能可以转化为位能，也可以转化为动能，如文德利水表就是根据压能转化为动能的原理制造的。

现在遇到的问题是壁面对开始就具有断面平均速度 v_0 的微团施以剪切力作用，使它变成原地旋转涡旋而失去平移速度。一个物体的动能应该包括平移与转动两个方面，而且两者之间可以互相转化。这当然可以理解为在平移动能全部转化为旋转动能的过程中，能量损耗由压力损失来提供。而旋转动能不能反映流量，这样造成断面上流量减少。可是根据流量守恒定律，沿流程各断面上流量必须相等，由此引起管中心处的速度增加到 $u_{\max} = 2v_0$ ，以保持流量不变。那么管中心增加的速度 v_0 从何而来呢？由于压能可以直接转化为平移动能，所以增加的速度是由压力下降转化而来。

通过以上分析，压能不仅在沿程断面变化时转化为平移动能，而且在同一个断面上，也会间接地转化为旋转动能。

综上所述，层流边层流区中平移与平移兼有旋转运动流层相间存在，各层之间流体微团互不混杂。层外流区为平移运动流层，各平移流层的微团互不混杂，即层外流区的所有流体微团只有平移运动而无旋转运动。

谈到这里，读者可能要问，有没有湍流边层流问题与湍流层外流问题。回答是有，但本章暂不详述，只有讲完第2章湍流形成机理后，才能回答这个问题。

1.2 边界层与边层流、层外流的区别

边界层与边层流、层外流在应用领域上有所不同，具体区别如下：

边界层是将流场划分为理想流体与实际流体，以便分别应用理想流体与实际流体运动微分方程来研究它们。

但边界层仅应用于绕流物体与潜体运动的问题。它不能应用于明渠和管道流动。

而边层流、层外流可以应用于任何流场，也就是说，所有流场均存在着边层流区与层外流区。即使研究边界层问题也存在着边层流区与层外流区，只不过在研究边界层内的边层流区的界限划分上，又必须依靠边界层方法解决实际流体与理想流体的分区问题，然后应用实际流体运动微分方程解决边界层内各断面速度分布问题，否则无法得出边层流的范围。

1.3 层流边层流与湍流边层流的理论作用

边层流和层外流是任何流场中客观存在的，它们是根据三大守恒定律推导分析出来的，为今后流体运动研究提供了方便。

层流边层流为层流转化湍流的机理分析提供依据；湍流边层流为建立湍流运动微分方程提供了可能性，并为传热传质、多相流理论分析提供了理论基础。

1.4 层流边层流

流场不同，划分边层流范围和方法也有所差异。现分别对有压管道进口段、平板边界层和明渠三种流场加以讨论。

1.4.1 层流边层流的形成

无论哪种流体流动情况，均有进口段流层形成问题，但其形成过程和机理都是一样

的。现以平板层流边界层成因为例进行说明。

层流平板边界层成因可以认为, 由于速度为 u_0 的来流, 具有动力黏度 μ , 使它受到壁面对它的剪力作用, 流体微团由平移运动转变为原地旋转运动。由于流体是由微团组成, 旋转为顺时针, 必然影响相邻的微团朝逆时针方向旋转, 结果壁面上出现方向相反、相间微团旋转层的原地运动, 如图 1-4-1 所示。

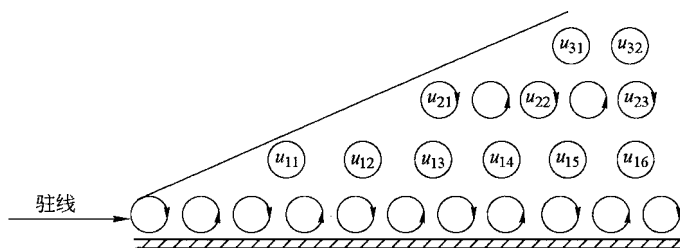


图 1-4-1 边界层形成机理示意图

来流微团正对就地旋转层时, 形成驻线。当紧贴驻线上层的来流微团流经几个原地旋转微团并受其阻力影响后, 开始明显减速, 所以 $u_{11} < u_0$ 。来流微团以 u_{11} 前进, 继续累积式地受到壁面上原地旋转微团的阻力作用, 使来流微团速度连续地下降, 则 $u_{11} > u_{12}$, 结果形成一层只有平移运动的微团, 而且速度很低。为什么微团不旋转呢, 如图 1-4-2 所示, 壁面上原地旋转的相邻微团, 转向相反, 使得对上层流体微团不能显示转动作用; 又因为壁面上原地旋转微团没有平移速度, 对其上层平移运动的来流虽然起阻力作用, 但因原地旋转微团是流体, 而不是壁面, 形成阻力小些, 结果使其上形成一层只有很低平移速度的流层。

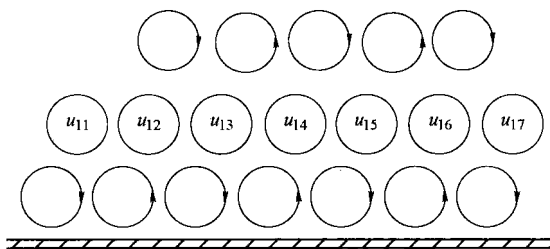


图 1-4-2 平移层形成原因示意图

只有平移运动流体微团构成的流层, 其速度低于其上层来流速度, 因而对其上层流体起着切力作用, 由于是运动着的流体, 其切力比壁面对流体的作用小些, 结果使来流产生旋转, 但不能使其失去全部平移速度, 所以出现一层既有平移又有旋转的流层。

根据板长不同, 依照上述推论, 可以得到相应的不同层数的平移流层与平移兼旋转流层相间的边界层。

1.4.2 层流边界层的划分

1.4.2.1 层流平板边界层

本书所谈流动为定常流, 而且是不可压缩流体。平板边界层为理想流体, 其速度均

为 u_0 。

假设已知层流边界层厚度变化表达式以及层内速度分布函数，并依此将它们绘于图 1-4-3。由此计算出沿板长不同断面上层内的平均流速 v_{01} 、 v_{02} 等，它们各自与所在断面速度分布曲线有一交点，如 b、c 等，连接 a、b、c 等点，得一曲线 abc，其线下就是边层流区，其外就是层外流区。

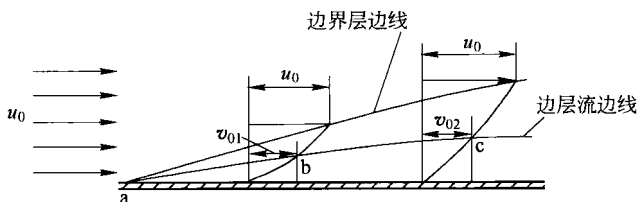


图 1-4-3 层流平板边界层内边层流区示意图

1.4.2.2 有压圆管层流进口段

讨论仍限定为不可压缩流体定常流运动。理想流体与实际流体分界线以及实际流体区速度分布规律，将在第 7 章确定，根据它们，可以在相应条件下绘出理想流体与实际流体运动分界线，以及各断面的实际流体区的速度分布。管道流动特点是流量沿流程各断面保持不变，断面平均速度与各断面速度分布各有交点，将这些交点连成曲线，即曲线 abcd，其下则为边层流区，如图 1-4-4 所示，其外为层外流区。层外流区又分为实际流体区与理想流体区，边层流区边线与理想流体、实际流体的分界线之间为实际流体层外流区；理想流体与实际流体分界线之外为理想流体层外流区。

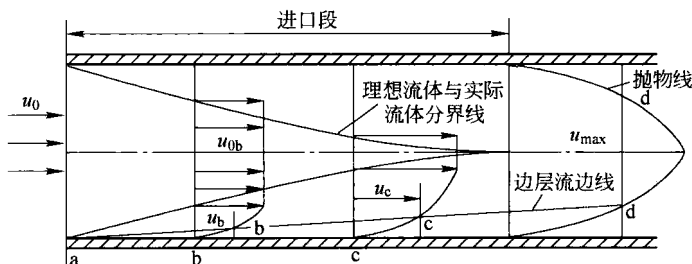


图 1-4-4 层流管道进口段边层流区示意图

1.4.2.3 明渠层流充分发展段

壁面对流体运动影响是有限的，从边界层理论足以说明这一点。但明渠又与边界层流不同，它有自由面，按此特点明渠又有低水位与高水位之分。低水位时，壁底影响可以到达自由水面，高水位时，壁底对流体运动影响不能到达水面。

明渠在工程上可按断面形状分为矩形和梯形等，关于不同断面上的速度分布均在第 5 章讨论，这里仅仅作定性的描述，用以说明边层流区划定方法。

明渠特点为有自由面，水深一定，流量一定。绘出断面速度分布，过断面平均速度与其交点作一平行于水面的直线，如图 1-4-5 所示，该线以下为边层流区，其外为层外流区。

高水位与低水位明渠有所不同，在高水位时，首先要确定渠底对流体运动的影响范

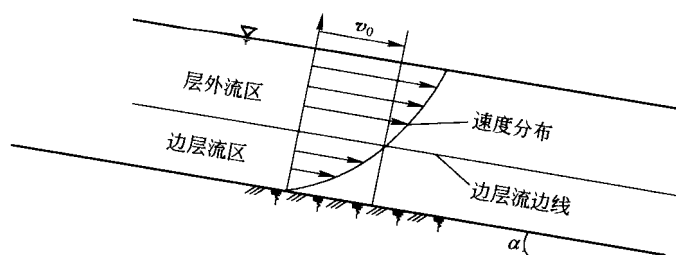


图 1-4-5 层流低水位明渠边层流区划分示意图

围。这个范围可以通过求解进口段边界层曲线而得到。这里仅作定性分析。
高水位明渠边层流区划定方法如图 1-4-6 所示。

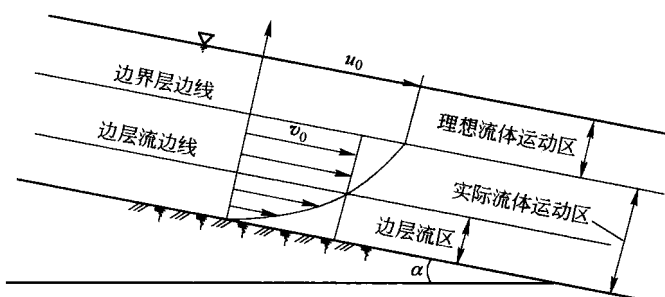


图 1-4-6 层流高水位明渠边层流区划分示意图

高水位明渠边层流特点是层外流区分为两区：一区是边层流边线与边界层边线之间的实际流体区；另一区是边界层边线与自由水面之间的区域，这个区是理想流体区域。

1.5 湍流边层流

1.5.1 湍流边层流的定义

以上谈的均为层流边层流问题，同样也有湍流边层流问题。湍流边层流是在层流转化为湍流后出现的，要把这个问题彻底弄清楚，须研究完第 2 章湍流形成机理后才能深入理解。现仅仅定性地讲述其与层流边层流的区别。

湍流边层流是指在湍流的流场情况下近壁存在的边层流区，其“边”是指近壁，其“层”是指流体微团运动是成层状，各层间的流体微团互不混杂。湍流边层流厚度随湍流强度增加而变薄。无论怎么薄，至少存在三层，如图 1-5-1 所示，即紧贴壁面的原地旋转层，其相邻两个微团转向相反；贴于其上的平移流层，其流体微团只有平移运动；此层之上是平移兼旋转流层，该层微团既有平移运动又有旋转运动，相邻流体微团的旋转方向也相反。凡是顺时针转向的为主动微团，逆时针转动的为被动微团，但它们的直径和转速相等。所有微团运动，无论有否旋转，均在所在流层中运动，没有互相混杂的现象。从这个意义来讲，边层流是属于层流性质。

湍流边层流区之外，也有层外流区，它与层流时层外流区有本质的差别。根据湍流的相应强度，有相应的具有垂直于主流方向分速度的涡旋微团，从边层流边界上不断地进入