

层流边界层

[苏联] Л. Г. 洛强斯基 著



国防工业出版社

层 流 边 界 层

〔苏联〕Л. Г. 洛强斯基 著

王殿儒、朱宗厚、沈金山 译



国防工业出版社

1965

出版者的話

层流边界层是边界层理論的一个重要組成部分。本书总结了五十多年来层流边界层理論方面的主要成就,并从基本理論出发,对它作了全面的叙述。

本书的对象主要是空气动力学方面的科学技术人員和高等院校教师。此外,对高等院校有关专业的高年級学生來說,它也是一本良好的参考书。

郭永怀先生在百忙中对譯稿提出了宝贵的意見,在此表示感謝。

ЛАМИНАРНЫЙ ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ
〔苏联〕Л. Г. Лойцянский
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО ФИЗИКО-
МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ 1962

层流边界层

王殿儒、朱宗厚、沈金山 譯

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可証出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

国防工业出版社印刷厂印装

850×1168 $1/32$ 印張 16 410 千字

1965 年 6 月第一版 1965 年 6 月第一次印刷 印数: 0,001—2,000 册

統一书号: 15034·850 定价: (科八-1)3.30 元

目 录

序	7
引言	9
第一章 普朗特方程及其精确求解的一些最简单情形	13
§ 1 边界层和外流	13
§ 2 普朗特方程的推导	17
§ 3 普朗特-米澤斯 方 程	24
§ 4 平板边界层 (布拉修斯 問 題)	27
§ 5 沉浸射流問題	36
§ 6 普朗特-米澤斯方程对沉浸射流問題的 应 用	41
§ 7 沉浸射流沿固体平面的傳播	44
§ 8 物体后面的气动力遗迹	51
§ 9 表面上的边界层分离	56
§ 10 位移厚度及其对压力分布的影响	60
第二章 普朗特方程对某些类型問題的精确解	66
§ 11 边界层外緣速度的幂分布	66
§ 12 “直綫”速度剖面	76
§ 13 布拉修斯-霍瓦思問題的多参数 类 型	81
§ 14 湯立和格尔特利-威廷的精确解 类 型	88
第三章 近似单参数法	91
§ 15 某些总的想法	91
§ 16 动量积分条件	92
§ 17 卡門-波耳豪 津 法	96
§ 18 卡門-波耳豪津法的应用 范 围	101
§ 19 卡門-波耳豪津法的 推 广	102
§ 20 特性函数的确定	106
§ 21 单参数法方程的綫性化	111
§ 22 其他近似法概述	113

第四章 非定常二維(平面)边界层	119
§ 23 物体运动起始阶段的边界层問題	119
§ 24 突然作平移匀速运动的物体上的边界层	122
§ 25 柱体的匀加速运动	127
§ 26 速度随時間按幂規律变化的情形	130
§ 27 平板非定常纵向繞流	135
§ 28 近似单参数法的应用	139
§ 29 与动量方程无关的一些方法的应用	146
第五章 軸对称二維边界层	149
§ 30 被軸向繞流长旋成体上的边界层	149
§ 31 长旋成体上的定常和非定常边界层实例	152
§ 32 斯捷帕諾夫-曼格勒 变换	157
§ 33 二維定常边界层的单参数計算法	159
§ 34 向非定常边界层情形的推广	162
§ 35 細长旋成体上的边界层; 柱体的軸向繞流	164
§ 36 按单参数法計算横向曲率的影响	173
§ 37 在沉浸空間的圓截面射流	177
第六章 三維軸对称边界层	184
§ 38 圆盘在无限粘性流体中的匀速旋轉	184
§ 39 用外罩限制的圆盘的匀速旋轉	188
§ 40 在均质軸向流中旋轉圆盘上的边界层	194
§ 41 由靜止状态开始旋轉的圆盘上的边界层	203
§ 42 突然作匀速螺旋运动的旋成体上的边界层	208
§ 43 扭轉射流在沉浸空間的傳播	212
§ 44 在沉浸空間里的徑向-隙縫扭轉 射 流	218
§ 45 旋流式噴射器的流体动力模型	225
第七章 三維边界层理論的某些問題	232
§ 46 滑动机翼上的空間边界层	232
§ 47 旋轉柱形机翼上的空間边界层	240
§ 48 空間边界层对外流的逆向影响	247
§ 49 斜向来流中的旋轉圓柱体	250
§ 50 在任意正交坐标系中的三維边界层方程	260

§ 51	空間边界层的某些共同性质; 次流定理	263
§ 52	两平面交綫附近的空間边界层	265
第八章	单质或非单质气体的高速边界层	271
§ 53	气体边界层理論的一些特点	271
§ 54	粘性完全气体的基本运动方程	273
§ 55	气体边界层方程的两种基本形式	277
§ 56	边界层方程的应用范围	286
§ 57	彼此間有化学反应的气体混合物流动中的边界层方程	291 ✓
第九章	不可压缩流体的溫度边界层和扩散边界层	301
§ 58	被纵向繞流平板上的溫度边界层	301
§ 59	有纵向压差时的溫度边界层	305
§ 60	給定物体表面溫度分布的溫度边界层	309
§ 61	被纵向繞流旋成体上的溫度边界层	313
§ 62	纵向流中长柱体上的溫度边界层	317
§ 63	旋轉圆盘上的溫度边界层	321
§ 64	热层流射流在沉浸空間的傳播	328
§ 65	溫度边界层的近似計算法	331
§ 66	等溫边界层中的层流扩散	337
§ 67	扩散边界层的实例	339
第十章	纵向气流中平板上的层流边界层	343
§ 68	粘性系数与溫度成綫性关系时平板上的定常边界层	343
§ 69	普朗特数等于 1 时平板的纵向繞流	354
§ 70	克罗科方程	359
§ 71	米澤斯-普朗特变量的应用	366
§ 72	表面溫度变化时平板上的层流边界层	370
§ 73	边界层与超音速流的相互作用	376
§ 74	突然作匀速运动的无限平板上的非定常現象	380
§ 75	輻射对絕對透明气体边界层內溫度分布的影响	387
§ 76	計及滑移时微稀薄气体对平板的纵向繞流	389
第十一章	常压边界层	397
§ 77	纵向超音速流中錐体上的层流边界层	397
§ 78	激波管壁面上边界层的形成	404
§ 79	气体介质中的层流射流	414

§ 80	在气体中迅速旋轉的圆盘上的层流边界层	417
§ 81	徑向-隙縫层流气体射流沿固壁的傳播	420
§ 82	自由徑向-隙縫扭轉射流	428
§ 83	气体平衡离解时的边界层	432
§ 84	有磁場时离解和电离气体的边界层	437
第十二章 給定外緣压力分布的边界层		445
§ 85	在 $\sigma = 1$ 和低 M_∞ 时絕热表面上的边界层	445
§ 86	在 $\sigma \neq 1$ 和任意 M_∞ 时的边界层	452
§ 87	由气体边界层方程向完全相应于不可压缩流体边界层方程形式的变换	459
§ 88	在散热表面情形下修正变换的应用	469
§ 89	在任意外流速度分布和物体表面有散热情形下的边界层近似計算法	478
§ 90	空气离解对旋成体头部热交换的影响	487
人名索引		505

层 流 边 界 层

〔苏联〕Л. Г. 洛强斯基 著

王殿儒、朱宗厚、沈金山 译



國防工業出版社

1965

目 录

序	7
引言	9
第一章 普朗特方程及其精确求解的一些最简单情形	13
§ 1 边界层和外流	13
§ 2 普朗特方程的推导	17
§ 3 普朗特-米澤斯 方程	24
§ 4 平板边界层 (布拉修斯 問題)	27
§ 5 沉浸射流問題	36
§ 6 普朗特-米澤斯方程对沉浸射流問題的 应用	41
§ 7 沉浸射流沿固体平面的傳播	44
§ 8 物体后面的气动力遗迹	51
§ 9 表面上的边界层分离	56
§ 10 位移厚度及其对压力分布的影响	60
第二章 普朗特方程对某些类型問題的精确解	66
§ 11 边界层外緣速度的幂分布	66
§ 12 “直綫”速度剖面	76
§ 13 布拉修斯-霍瓦思問題的多参数 类型	81
§ 14 湯立和格尔特利-威廷的精确解 类型	88
第三章 近似单参数法	91
§ 15 某些总的想法	91
§ 16 动量积分条件	92
§ 17 卡門-波耳豪 津 法	96
§ 18 卡門-波耳豪津法的应用 范 围	101
§ 19 卡門-波耳豪津法的 推 广	102
§ 20 特性函数的确定	106
§ 21 单参数法方程的綫性化	111
§ 22 其他近似法概述	113

第四章 非定常二維(平面)边界层	119
§ 23 物体运动起始阶段的边界层問題	119
§ 24 突然作平移匀速运动的物体上的边界层	122
§ 25 柱体的匀加速运动	127
§ 26 速度随時間按幂規律变化的情形	130
§ 27 平板非定常纵向繞流	135
§ 28 近似单参数法的应用	139
§ 29 与动量方程无关的一些方法的应用	146
第五章 軸对称二維边界层	149
§ 30 被軸向繞流长旋成体上的边界层	149
§ 31 长旋成体上的定常和非定常边界层实例	152
§ 32 斯捷帕諾夫-曼格勒 变换	157
§ 33 二維定常边界层的单参数計算法	159
§ 34 向非定常边界层情形的推广	162
§ 35 細长旋成体上的边界层; 柱体的軸向繞流	164
§ 36 按单参数法計算横向曲率的影响	173
§ 37 在沉浸空間的圓截面射流	177
第六章 三維軸对称边界层	184
§ 38 圆盘在无限粘性流体中的匀速旋轉	184
§ 39 用外罩限制的圆盘的匀速旋轉	188
§ 40 在均质軸向流中旋轉圆盘上的边界层	194
§ 41 由靜止状态开始旋轉的圆盘上的边界层	203
§ 42 突然作匀速螺旋运动的旋成体上的边界层	208
§ 43 扭轉射流在沉浸空間的傳播	212
§ 44 在沉浸空間里的徑向-隙縫扭轉射流	218
§ 45 旋流式噴射器的流体动力模型	225
第七章 三維边界层理論的某些問題	232
§ 46 滑动机翼上的空間边界层	232
§ 47 旋轉柱形机翼上的空間边界层	240
§ 48 空間边界层对外流的逆向影响	247
§ 49 斜向来流中的旋轉圆柱体	250
§ 50 在任意正交坐标系中的三維边界层方程	260

§ 51	空間边界层的某些共同性质; 次流定理	263
§ 52	两平面交綫附近的空間边界层	265
第八章	单质或非单质气体的高速边界层	271
§ 53	气体边界层理論的一些特点	271
§ 54	粘性完全气体的基本运动方程	273
§ 55	气体边界层方程的两种基本形式	277
§ 56	边界层方程的应用范围	286
§ 57	彼此間有化学反应的气体混合物流动中的边界层方程	291 ✓
第九章	不可压缩流体的温度边界层和扩散边界层	301
§ 58	被纵向繞流平板上的温度边界层	301
§ 59	有纵向压差时的温度边界层	305
§ 60	給定物体表面温度分布的温度边界层	309
§ 61	被纵向繞流旋成体上的温度边界层	313
§ 62	纵向流中长柱体上的温度边界层	317
§ 63	旋轉圆盘上的温度边界层	321
§ 64	热层流射流在沉浸空間的傳播	328
§ 65	温度边界层的近似計算法	331
§ 66	等温边界层中的层流扩散	337
§ 67	扩散边界层的实例	339
第十章	纵向气流中平板上的层流边界层	343
§ 68	粘性系数与温度成綫性关系时平板上的定常边界层	343
§ 69	普朗特数等于 1 时平板的纵向繞流	354
§ 70	克罗科方程	359
§ 71	米澤斯-普朗特变量的应用	366
§ 72	表面温度变化时平板上的层流边界层	370
§ 73	边界层与超音速流的相互作用	376
§ 74	突然作匀速运动的无限平板上的非定常现象	380
§ 75	輻射对绝对透明气体边界层内温度分布的影响	387
§ 76	計及滑移时微稀薄气体对平板的纵向繞流	389
第十一章	常压边界层	397
§ 77	纵向超音速流中錐体上的层流边界层	397
§ 78	激波管壁面上边界层的形成	404
§ 79	气体介质中的层流射流	414

§ 80	在气体中迅速旋轉的圓盘上的层流边界层	417
§ 81	徑向-隙縫层流气体射流沿固壁的 傳 播	420
§ 82	自由徑向-隙縫扭轉 射 流	428
§ 83	气体平衡离解时的边界层	432
§ 84	有磁場时离解和电离气体的边界层	437
第十二章 給定外緣压力分布的边界层		445
§ 85	在 $\sigma = 1$ 和低 M_∞ 时 絕热表面上的边 界 层	445
§ 86	在 $\sigma \neq 1$ 和任意 M_∞ 时的 边 界 层	452
§ 87	由气体边界层方程向完全相应于不可压缩流体边界层 方程形 式的变换	459
§ 88	在散热表面情形下修正变换的应用	469
§ 89	在任意外流速度分布和物体表面有散热情形下的边界层 近似 計算法	478
§ 90	空气离解对旋成体头部热交换的影响	487
人名索引		505

序

边界层理論的迅速发展，特别是由于出现了高速和高温气体的空气动力学和热力学的新問題以后，使得目前在本領域內編写出一本比較簡明的教科书是极其困难的。同时，考虑到在解决边界层理論的新問題时，层流边界层經典計算方法有着重大的意义，正因为如此，本书除了叙述层流边界层理論外，也还涉及层流边界层理論的某些專門問題。例如具有吹出或吸入的多孔表面边界层問題。至于談到层流边界层內气体和液体运动的稳定性問題，由于它与层流运动向湍流运动过渡的理論有密切联系，当然可以而且应该认为屬於湍流边界层理論，作者希望将来用一本专著来闡明这个理論。本书內容的如此选择，使我們一方面能够更深入地和系統地討論层流边界层理論的最基本的問題；另一方面又能叙述这个理論的一系列新問題。

本书前三章叙述定常平面边界层理論，其中既包括精确解的方法，也包括近似解的方法。第四章叙述非定常平面边界层理論的經典問題和某些現代問題的精确解法和近似解法。第五章討論細长旋成体軸向繞流的二維軸对称的定常和非定常問題，以及未扭轉的圆柱射流問題。第六章研究因物体旋轉运动而使問題复杂化的軸对称繞流問題，以及討論扭轉圆柱射流和錐形噴管里的扭轉边界层問題。第七章叙述最簡單的三維边界层問題的基本解法，并闡明空間边界层的某些共同性质。

本书前七章屬於不可壓縮流体的单质等溫层流边界层理論。第八章推导高速和高温气体的层流边界层一般方程；稀薄气体的和有化学变化的气体混合物的边界层專門方程也在这里討論。

第九章討論在溫差和混合物濃度变化均不大的条件下，应用

上述方程最简单的个别情形，精确地和近似地求解不可压缩流体中关于混合物传热和扩散的平面和空间问题。

第十章叙述在不考虑和考虑辐射影响的条件下，高速气流的定常和非定常平板层流边界层理论，也讨论了小稀薄度气体的情形，这时绕流物体表面的温度边界条件和速度边界条件相应于气体的“滑移”状态。

在第十一章内，讨论与平板纵向绕流运动不相同的常压边界层实例。这些实例是：超音速轴向流动中锥体表面上的边界层问题；激波通过处的激波管壁上的边界层问题；气体中快速旋转的圆盘表面上的边界层问题；超音速射流中的边界层问题；以及在高超音速流场中当气体平衡离解时和在外磁场内电离气体运动时的平面边界层问题。

第十二章叙述在物体表面为绝热的条件下和有散热的条件下，当外流中有纵向压力变化时的边界层计算方法。这里，特别注意把气体边界层问题归结为与其相应的不可压缩流体问题的方法（多罗德尼秦方法及其改型），使气体边界层终于能利用本书开始时所叙述的简单计算方法。至于在脱体激波后面区域内钝头旋成体上的高超音速边界层问题，本章所作出的解法不强求达到完备的程度，而我们提出它的目的只是想说明：导弹以高超音速进入稠密大气层时，研究者希望弄清楚导弹头部边界层内现象的真实物理状况，这是他们所面临的困难。

Л. Г. 洛强斯基

1961年7月23日列宁格勒

引 言

五十年的时间，对科学发展的历史来说是一个不长的时期，如果说边界层理论在1954年庆祝自己五十周年的时候已作为现代流体空气动力学的一个重要的独立领域而形成的话，那末这仅仅是因为气体力学和液体力学这个比较年青学科的发展从来也没有离开过那些最重要的技术部门所提出的任务，这些部门有：飞机制造业、造船业、动力机器制造业、发动机制造业、直到最近的火箭制造业等。

在1904年普朗特建立了层流流动的边界层理论基本方程。此后不久，边界层理论就被成功地用于计算摩擦阻力（布拉修斯在1907年），这是在流体空气动力学历史上第一次用有根据的方法来合理地计算摩擦阻力，而以后大约经过二十年的时间，层流边界层理论又被成功地应用于物体表面散热的理论计算。在1921年卡门提出了层流和湍流边界层的简单的近似计算方法，由于此方法所提供的重大贡献，使边界层理论的概念很快地在工程界中流行起来，并在各种实际应用中占据了应有的地位。

由于普朗特（1926年）和卡门（1930年）研究出简单的半经验湍流运动定律，这就使边界层理论有可能推广到湍流边界层、射流和物体后的遗迹等情形中去。

边界层理论的基本方程出现后不久，除解决平面定常问题外，还解决了一些最简单的空间（长旋成体的二维轴对称绕流）定常和非定常问题。然而非定常问题的精确解法只是在最近才完成。同样，把空间边界层理论推广到非细长旋成体情形和一般三维流情形的工作也拖了很长一段时间：从勒维-塞维塔的最初著作（1929年）直到现在。

高速气体的边界层理論方面的著作对解决現代实际問題具有重大的意义。一些最简单問題的个别解法早在三十年代就出现了，如布澤曼、克罗科、卡門-錢学森、弗兰克利等人的解法。在1942年，多罗德尼秦建議把气体的边界层方程轉化为与不可压缩流体的边界层方程相近似的形式，以后許多学者(斯提瓦特森、霍瓦思)又作了某些改进，这些工作对現代边界层理論这个重要部分——高速气体边界层理論的进一步发展起了很大的推动作用。在1939年克罗科提出了另一种求解方法，它是基于利用纵向速度分量作为变量的方法。

由上可見，边界层理論的純流体动力学問題已得到了发展，这些問題有：速度場、摩擦阻力和压差阻力、物体外繞流时的升力等的确定，以及流体流經管道时入口段的計算等等。与此同时，按数学含义彼此相近的热和扩散問題也获得了发展。

边界层理論的迅速发展是属于最近十五年来事情，这是由于飞行速度向超音速和高超音速过渡所引起的。現代航空和火箭技术的这个发展阶段，对設計师和科学家提出了很多新的綜合性的物理問題，属于这些物理問題的有：物体在稠密的低空和在稀薄的高空大气层里运动时的阻力，覆盖在物体头部的固态物质的加热、熔化或升华，以及这个物质的消耗(燒蝕)等現象。

当空气通过物体头部附近形成头部强激波时，由于在高温下发生气体分子的离解，以及随之而来的在物体头部附近原子的复合，使空气的化学成分产生不均匀性，从而引起了附加热量，这个热量和通过导热和热輻射方式加进来的热量一起形成火箭头部的严重加热，这种加热使火箭有毀坏的危險。这些現象的物理-化学过程很复杂，而与溫度按分子自由度分布的不均匀性有关的弛豫現象更进一步增加了这个过程的复杂性，这就使現代边界层理論同气体分子运动論接近了，現代边界层理論必須从气体分子运动論那里取得一些宏观規律，即运动气体的各参数同它的基本的热力学和物理-化学性质之間的宏观規律，否則就不可能提出边