

高等学校教学用书

空气动力学

上册

H. C. 阿尔然尼可夫 著
B. H. 馬尔采夫

高等教育出版社

高等學校教學用書



學 力 動 氣 空

上 冊

H. C. 阿爾然尼可夫 著
B. H. 馬爾采夫
張炳暄 張桂聯 王震華 譯

高等教育出版社



高等学校教学用书



空气动力学

下册

H. C. 阿尔然尼可夫, B. H. 馬尔采夫著
張炳暄 沈元譯

高等教育出版社



本書係根據蘇聯國立國防工業出版社 (Государственное издательство оборонной промышленности) 出版的阿爾然尼可夫 (Н. С. Аржаников) 和馬爾采夫 (В. Н. Мальцев) 合著 “空氣動力學” (Аэродинамика) 1952 年版譯出。原書經蘇聯高等教育部審定為高等航空學校教科書。

本書按照蘇聯高等教育部批准的航空學院用的教學大綱寫成，是理論空氣動力學的教科書。第一部份論述不可壓流體的空氣動力學，以及基本的概念。第二部份論述高速度空氣動力學(氣體動力學)。

本書適用於航空學院高年級的學生，也適於航空工廠及設計部門中工程技術人員參閱。

參加本書上冊譯校工作的有北京航空學院張炳暄、張桂聯、王震華等三位同志。

空 氣 動 力 學

上 冊

H. C. 阿爾然尼可夫等著

張 炳 暄 等 譯

高等教育出版社出版

北京琉璃廠一七〇號

(北京市書刊出版業營業許可證出字第〇五四號)

新華印刷廠印刷 新華書店總經售

書号15010·155 开本350×1168 $\frac{1}{32}$ 印張5 $\frac{12}{16}$ 字數169,000

一九五四年七月北京第一版

一九五六年七月北京第三次印刷

印數3,001—4,000 定價(10)¥1.00

本書系根据苏联國立國防工業出版社 (Государственное издательство оборонной промышленности) 出版的阿尔然尼可夫 (И. С. Аржанников) 和馬尔采夫 (В. Н. Мальцев) 合著“空气动力学” (Аэродинамика) 1952 年版譯出。原書經苏联高等教育部審定为高等航空学校教科書。

本書按照苏联高等教育部批准的航空学院用的教学大綱寫成，是理論空气动力学的教科書。第一部份論述不可压流体的空气动力学，以及基本的概念。第二部份論述高速度空气动力学 (气体动力学)。

本書适用于航空学院高年級的学生，也适用于航空工厂及設計部門中工程技術人員参閱。

本書暫分上下册出版。

空 气 动 力 学

下 册

И. С. 阿尔然尼可夫, В. Н. 馬尔采夫著

張炳暄 沈允譯

高等教育出版社出版

北京琉璃廠一七〇號

(北京市書刊出版業營業許可証出字第〇五四號)

京華印書局印刷 新華書店總經售

書號210(課201) 開本850×1168 1/32 印張9 7/16 字數244,000

一九五五年一月北京第一版

一九五六年三月北京第二次印刷

印數2,001—2,500 定價(¥) 1.42

序

榮獲列寧勳章的、以奧爾忠尼啓則(Орджоникидзе)命名的莫斯科航空學院飛機製造系所講授的“空氣及氣體動力學”教程,是本書之基礎。

由於飛機速度的增長,蘇聯的航空科學,尤其是空氣動力學,無論在實驗或理論研究方面,都獲得了非凡的發展。

因此,最近幾年內,“空氣及氣體動力學”課程的教學大綱也有很大的變動,這反映了在理論空氣動力學和實驗空氣動力學的領域中,蘇聯學者的新的研究成果。

作者在敘述全部材料時,力圖說明儒可夫斯基(Н. Е. Жуковский)及恰普雷金(С. А. Чаплыгин)所奠定的祖國的空氣動力學學派,在空氣動力學創造及發展中,所起的巨大作用,以及蘇聯學者在解決現代高速空氣動力學的一些主要的原則性問題方面,所獲得的優先地位。

本書係根據教學大綱所寫成,供航空學院飛機製造系使用。但同時對同類專業的學生,也是一本有益的書,甚至可作為航空工廠設計局及科學研究院中工作人員的參考書。

作者向卡緬可夫教授(Г. В. Каменков)、馬爾丹諾夫教授(А. К. Мартынов)、努仁教授(С. Г. Нугин)、普加脫副教授(В. И. Пугач)和列別捷夫副教授(А. А. Лебедев)致深切的謝意,他們在審閱初稿時,曾給予寶貴的指示。

同時作者也感謝莫斯科航空學院的研究生科特略爾(Я. М. Котляр)、薩捷可娃(Г. С. Садекова)和奧爾洛夫(Р. А. Орлов)對本書付印工作的幫助。

作者非常感謝所有提出任何意見,或指出了個別缺點的同志們,因為這樣就幫助進一步改善了此書。

緒 言

空氣動力學是研究不可壓縮流體和可壓縮流體（可包括空氣）運動規律的科學。

空氣動力學的對象是，研究空氣運動的規律，研究在所流經的物體上的空氣作用力。

將空氣看作不可壓流體來研究，就使一系列流體動力學上，用來研究不可壓流體運動規律的方程式、一般定律與方法，亦存在於空氣動力學中。因此，這門空氣動力學的科學領域，常常稱為流體空氣動力學。

飛機以高速度來飛行，是近代航空上的特點。當運動速度能與音速相比擬時，空氣的壓縮性嚴重地影響到運動的特性。因此，高速空氣的運動規律，就與低速的運動規律不相同。高速空氣動力學，通常稱為氣體動力學，是一門研究可壓縮流體（氣體）運動的科學。

空氣動力學是航空的理論基礎，也是近代飛機和其他飛行器的基本氣動計算的基礎。

上 冊 目 錄

序	i
緒言	ii
第一章 蘇聯——空氣動力學的誕生地	1
§ 1 十八世紀和十九世紀中，俄羅斯流體空氣動力學的發展	1
§ 2 儒可夫斯基和恰普雷金——近代空氣動力學的創造人	3
§ 3 蘇聯科學家在空氣動力學發展中的領導作用	10
第二章 流體空氣動力學的基本概念	16
§ 1 流體的概念、質量密度和重量密度	16
§ 2 流體的分類	17
§ 3 流體給定點上的流體動力壓力的概念	21
§ 4 流體中作用力的分類	21
§ 5 理想流體中，壓力與方向無關	22
第三章 流體運動學	24
§ 1 歐拉法	24
§ 2 拉格朗日法	26
§ 3 流體運動的分類	27
§ 4 流線	28
§ 5 連續方程式	33
§ 6 速度環量	36
§ 7 流體微團的運動	37
§ 8 位流	44
§ 9 笛卡兒座標中，位流的連續方程	47
§ 10 平面極坐標中，不可壓流體位流的連續方程	47
§ 11 位流中的速度環量	48

§ 12	流函數	50
§ 13	位流疊加法	53
§ 14	均勻直線流動	54
§ 15	直角內的流動	55
§ 16	點泉和點潭	58
§ 17	偶極點	61
§ 18	旋渦	63
§ 19	繞過圓柱體無環量的流動	66
§ 20	繞經圓柱體帶環量的流動	70

第四章 理想流體的流體動力學基礎 73

§ 1	理想流體的歐拉運動微分方程	73
§ 2	理想流體的葛羅米柯運動微分方程	77
§ 3	起始條件和邊界條件	78
§ 4	運動微分方程的積分	81
§ 5	柏努利方程應用在空氣上的限度	86
§ 6	二元旋渦內外部的壓力分佈情況	90

第五章 旋渦的基本理論 93

§ 1	渦線的概念	93
§ 2	渦管	94
§ 3	斯托克斯定理	95
§ 4	環量不變的湯姆遜定理	98
§ 5	海爾姆霍茲的幾個旋渦定理	102
§ 6	畢奧——薩瓦爾關於旋渦影響的公式	105
§ 7	決定一般情形下旋渦影響的問題	108
§ 8	歐拉——達朗伯疑題	110
§ 9	儒可夫斯基定理	112

第六章 複變函數的理論, 應用來研究理想流體的二元流動 ... 116

§ 1	複位	116
§ 2	複速度	116

§ 3 幾個最簡單的流動例子	117
§ 4 渦對的運動	124
§ 5 渦鏈	127
§ 6 渦街的概念	128
§ 7 繞過圓柱體的流動	129
§ 8 複速度的殘值	131
§ 9 儒可夫斯基——恰普雷金壓力合力的定理	134
§ 10 恰普雷金壓力合力的力矩定理	136
第七章 二元機翼理論	142
§ 1 等角轉輪的概念	142
§ 2 幾個最簡單的等角轉輪的例子	146
§ 3 反形轉輪	150
§ 4 儒可夫斯基轉輪式	155
§ 5 儒可夫斯基——恰普雷金翼型	156
§ 6 儒可夫斯基——恰普雷金翼型的圖解作法	159
§ 7 決定儒可夫斯基——恰普雷金理論翼型的舉力的大小	160
§ 8 決定儒可夫斯基——恰普雷金翼型上舉力所生的力矩	166
§ 9 幾種理論翼型	170
§ 10 計算任意形狀翼型的力及力矩	173
§ 11 薄翼理論	179
§ 12 確定繞任意形狀翼型的位流(努仁法)	186
第八章 射流和渦流阻力理論	190
§ 1 流經物體的射流流型、有射流形成的流經平板的流動	190
§ 2 旋渦阻力的概念	199

下 冊 目 錄

第九章 黏性流體運動的基本理論	205
§ 1 不可壓縮黏性流體的運動微分方程	205
§ 2 流動相似的概念	213
§ 3 相似的基本準則	218
§ 4 圓管中黏性流體的層流	224
§ 5 紊流的概念	228
§ 6 二元管和圓管中的紊流	235
第十章 附面層	242
§ 1 附面層的概念	242
§ 2 附面層微分方程	245
§ 3 附面層的積分關係式	251
§ 4 平板上層流附面層的計算	254
§ 5 二元平板上紊流附面層的計算	260
§ 6 二元平板混合附面層的計算	263
§ 7 曲面上的附面層	265
§ 8 曲面層流附面層的計算	271
§ 9 決定曲面上層流附面層到紊流附面層的轉捩點 (多羅德尼津——勞鎔斯基法)	281
§ 10 曲面上紊流附面層的計算(勞鎔斯基法)	284
第十一章 有限翼展機翼理論	289
§ 1 有限翼展機翼的氣動力模型	289
§ 2 有限翼展機翼的下洗和誘導阻力的概念	292
§ 3 誘導速度和下洗流 $[\Gamma = \Gamma(z)]$	294
§ 4 作用在機翼上的力。誘導阻力 $[\Gamma = \Gamma(z)]$	296
§ 5 有限翼展機翼的基本積分—微分方程	298
§ 6 沿機翼翼展環量分佈的近似計算法	300

§ 7 決定機翼的舉力及誘導阻力。一個展弦比的無扭轉機翼換算到另一個的公式	306
§ 8 有限翼展機翼最有利的平面形狀	310
§ 9 用努仁法來解機翼的積分微分方程	314
第十二章 熱力學的基本知識	323
§ 1 氣態方程	323
§ 2 熱力學第一定律	324
§ 3 比熱	325
§ 4 熱焓	328
§ 5 熱力學第二定律・熵	328
第十三章 氣體動力學的基本微分方程組	332
§ 1 問題的提法與氣體動力學基本方程	332
§ 2 能量方程	334
第十四章 一元等熵氣體流動	338
§ 1 一元等熵氣體流動的基本關係式	338
§ 2 氣體流動的速度與其氣流形狀的關係	346
第十五章 正衝波理論	355
§ 1 正衝波理論的基本關係式	355
§ 2 正衝波時的壓縮與等熵壓縮的比較	364
§ 3 壓力波的傳播速度・音波	368
§ 4 正衝波後駐點上的壓力	369
第十六章 二元超音速氣流	372
§ 1 二元等熵氣流有位的準則	372
§ 2 二元氣體位流的基本微分方程	374
§ 3 流動平面上的特性線	376
§ 4 速度平面上的特性線	379
§ 5 利用等熵橢圓，按照給定的速度矢量，來決定氣流平面上和速度平面上特性線方向的方法。	386
§ 6 用特性線法來決定二元超音速氣體的位流的速度場	388
§ 7 經凸鈍角的超音速流動	394

第十七章 斜衝波理論	401
§ 1 斜衝波的概念	401
§ 2 斜衝波後面氣體參數的確定	402
§ 3 超音速氣流折轉角和斜衝波波前位置的關係	404
§ 4 衝波極線	406
第十八章 亞音速氣流中翼型和機翼的理論	412
§ 1 臨界 M 數(M_{cr})的概念	412
§ 2 亞臨界區域內翼型的近似理論(線化法)	414
§ 3 爲了研究高亞音速氣體流動用的恰普雷金方程	420
§ 4 赫利斯基阿諾維奇方法	424
§ 5 繞任意翼型亞音速流動的布拉果近似理論	432
§ 6 壓縮性對於機翼誘導速度的影響	439
§ 7 可壓縮流體亞音速流動中的有限翼展機翼	442
§ 8 跨臨界區域繞翼型的流動。布拉果波阻力計算法	445
§ 9 跨臨界區域翼型的空氣動力特性	449
第十九章 超音速氣流中翼型及機翼理論的基礎	457
§ 1 沿硬邊界面上,線化超音速的氣體壓縮與膨脹流動的概念	457
§ 2 超音速流動流經平板的線化理論	463
§ 3 超音速流動流經薄翼的線化理論	465
§ 4 超音速流動中較準確的翼型理論	469
§ 5 關於超音速氣流流經由直線段所組成的翼型問題的精解	475
§ 6 當平板側置於超音速氣流中,作用在無窮長平板上的氣動力	478
§ 7 處理超音速流動中有限翼展機翼的問題	482
§ 8 菱形平面機翼	486
參考書目	492

第一章 蘇聯——空氣動力學的誕生地

§ 1 十八世紀和十九世紀中，俄羅斯流體空氣動力學的發展

蘇聯不僅是莫查依斯基 (Александр Федорович Можайский) 所發明的第一架飛機的誕生地，也是航空科學的誕生地。

偉大的俄羅斯學者羅蒙諾索夫 (Михаил Васильевич Ломоносов) (1711—1765)，在其著作“空氣彈力的研究”中，曾根據了空氣的分子構造，來研究空氣的基本特性。

以這些研究為基礎，羅蒙諾索夫研究並製造了直昇飛機，使自製的氣象研究儀器升入高空作試驗。因而，羅蒙諾索夫是世界上第一個指出了重於空氣的機器飛行可能性的人。

俄羅斯科學院研究員歐拉 (Л. Эйлер) (1707—1783) 和柏努利 (Д. Бернулли) (1700—1783) 的著作，曾奠定了十八世紀中研究不可壓縮流體運動的理論基礎，亦即流體動力學的基礎。

歐拉在其卓越的著作“流體運動的一般原理”中，第一個導出了所謂理想流體的基本運動微分方程，給連續介質力學中最重要的一門——流體動力學——打下了基礎。

柏努利發現了流體空氣動力學的基本定律，該定律發表在他的著作“流體動力學”內 (1738)，它確定了不可壓流動中壓力和速度的關係，而現今已推廣到可壓縮流體的情形中去了。

十九世紀下半期，俄羅斯院士雷卡且夫 (М. А. Рыкачев) 花了很多

的精力，從事研究航空及空中航行的問題，他作了一系列研究螺旋槳舉力的試驗。1871年，發表了一篇文章“首次試驗空氣中旋轉的螺旋槳上的舉力”，在這文章中，他擬製了測定旋轉的螺旋槳上舉力的方法。

天才的俄羅斯學者門德列夫(Дмитрий Иванович Менделеев)，對俄羅斯空中航行及航空的發展，起很大的影響。門德列夫極重視空中航行及航空的發展，費了很多精力從事研究空氣動力學上的問題。

1875年，門德列夫提出了一個想法，必須要用帶有密閉艙的同溫層氣球，來研究上層的大氣。1878年8月7日，他親自坐着氣球升空一次。

1888年，在他的一封信中寫着“在現在和將來，空中航行均可分為兩類，一類屬於氣球，一類屬於空氣動力機”。門德列夫預見了重於空氣的飛行器的飛行。他說道“就自然本身早已指出了這一類的空中航行，因為比空氣重的鳥類，也就是一種空氣動力機”。想掌握空中海洋的思想，使門德列夫集中注意力到空氣阻力問題上去。他的著作“論流體阻力和空中航行”是非常值得注意的。門德列夫在這著作中，不但深刻地批判和分析了舊有的阻力理論，並且指出了在測定流線型物體的摩擦阻力時，黏性所起的重大作用。偉大的俄羅斯空氣動力學家儒可夫斯基教授，對這著作有很高的評價，他寫道“門德列夫關於流體阻力的基本的專題報告，就是至今仍是造船、空中航行和彈道學研究人員的主要參考資料”。

1880年12月，按照門德列夫的提議，在俄羅斯技術協會中成立了專門的空中航行部。

門德列夫大力支持在空中航行及航空領域中的祖國發明家們，其中也包括了莫查依斯基，喬爾可夫斯基(К. Э. Циолковский)等。

就這樣，1887年，門德列夫大力協助了全世界第一架飛機的發明者莫查依斯基，而在1890年，又幫喬爾可夫斯基，把他設計的全金屬飛船，提交俄羅斯技術協會，喬爾可夫斯基的著作，在發展近代噴氣技術

中，起了特別大的作用。

§ 2 儒可夫斯基和恰普雷金——近代空氣動力學的創造人

祖國空氣動力學的產生和發展，是與其創造者，祖國科學的泰斗，最偉大的俄羅斯學者——儒可夫斯基和恰普雷金的名字分不開的。

我國科學界有此天才的學者，儒可夫斯基教授，他以數學、理論力學、應用力學、高空力學、流體和空氣動力學領域中所作的基本研究，豐富了我國的科學。

這偉大俄羅斯學者的才幹的特點，是在其科學研究中，能把理論與工程上的實踐結合起來。

偉大的學者和工程師儒可夫斯基所起的作用，在其最親近的學生恰普雷金院士紀念儒可夫斯基的講演中說得很清楚：“儒可夫斯基教授所完成的道路是極偉大的。他以自己光輝的和強有力的個性，精通了高深的數學知識和工程科學。他最好地把科學和技術聯繫起來，他幾乎是一所大學。”

自十九世紀最後的十年以來，卓越的俄羅斯學者儒可夫斯基，把其創造性的愛好研究的智慧，集中到完全新的、僅僅只有在萌芽的、但蘊藏着極大發展前途的航空技術上去。

當時已經有許多先進的俄羅斯發明家和學者，在航空領域中獲得了很顯著的成就。

莫查依斯基設計的飛機，已完成了世界上第一次的飛行。門德列夫也發表了空中航行方面著名的研究結果。天才的試驗家聶日達諾夫斯基（С. С. Неждановский）進行了盒形紙鳶和滑翔機的飛行研究，他的研究在許多方面超過了德國滑翔家奧多、李林達（Отто Лилиенталь），以及其他人員的成就。

作為航空理論基礎的空氣動力學，成為儒可夫斯基所喜愛研究的一門科學。

由於儒可夫斯基在此領域中的偉大成就，他是全世界最巨大的、並且佔主導地位的祖國空氣動力學學派之創造人。

上世紀九十年代中，儒可夫斯基致力於飛行問題，研究鳥的翱翔和滑翔機的一些問題，他是航空事業各方面的宣傳者和組織者。他參加了世界代表大會，在俄羅斯組織了航空會議，並且在俄羅斯各個城市和社會組織中，進行公開的講演。在此期間，他寫了一系列的著作，其中包括“飛行原理”（1890），“論鳥類的翱翔”（1892），“論最有利的飛機傾斜角”（1897）等。在“論鳥類的翱翔”的著作中，儒可夫斯基研討了滑動飛行的問題，並嚴格地證明了翻筋斗的可能性，二十二年以後，有名的俄羅斯飛行員聶斯吉羅夫（П. Н. Нестеров）實現了筋斗飛行。“儒可夫斯基的這一著作，遠超過他們的時代，後來成為所有滑動飛行動力學的基礎，只有到那時才得到很高的評價。”〔列本宋院士（Л. С. Лейбензон）〕。

當時，理論力學不能解釋飛機機翼產生舉力的原因。飛機是盲目地製造，沒有一點應有的氣動計算。

1905—1910 年內，出現了一些儒可夫斯基的輝煌著作，在這些著作中，他第一個解釋了產生支持在空中飛行的舉力的根源。1905 年，儒可夫斯基給莫斯科數學協會，報告了自己著名的關於舉力與環量間關係的定理。這一發現使儒可夫斯基的名字永垂不朽。

1912—1918 年間，儒可夫斯基創造了自己有名的螺旋推進器的理論，把數十年來全世界的試驗家和理論家所不能解決的問題，全部解決了。該著作是二十世紀空氣動力學上最卓越著作之一。

在“飛機動力學簡述”（1916），“飛機空氣動力學計算”（1917），“飛機縱向穩定性的動力學研究法”（1920）等後期的作品中，儒可夫斯基打下了空氣動力計算和飛行動力學的基礎，後來由其最親近的學生尤列也夫院士（Б. Н. Юрьев），維特契金（В. П. Ветчинкин）教授，以及斐絲諾夫（В. С. Пыинов），儒拉夫欽哥（А. Н. Журавченко），奧斯脫斯拉夫斯