

中央人民政府高等教育部推薦
高等學校教材試用本

實驗空氣動力學

上 冊

A. K. МАРТЫНОВ 著
袁 幼 卿 等 譯



商務印書館

中央人民政府高等教育部推薦
高等學校教材試用本



實驗空氣動力學

上 冊

A. K. 馬爾丹諾夫 著
袁 幼 卿 等 譯

商 務 印 書 館

本書係根據蘇聯國防工業出版社 (Государственное издательство оборонной промышленности) 出版的馬爾丹諾夫 (А. К. Мартынов) 著“實驗空氣動力學” (Экспериментальная аэродинамика) 1950 年版譯出的。原書經蘇聯高等教育部審定為高等航空學校教科書。

本書內容敘述了實驗空氣動力學的一些主要問題，如：空氣的物理性質，氣流的概論，空氣動力相似率，測量空氣動力、力矩、壓力和氣流速度的方法，機翼和整架飛機的空氣動力特性等。

本書適用於航空學院學生，也適用於工廠，設計部門和科學院研究的技術人員。

參加本書翻譯工作的，為北京航空學院袁幼卿、王寶貴、顧高樺等三同志。

實 驗 空 氣 動 力 學

上 冊

袁 幼 卿 等 譯

★ 實 用 所 有 ★

商 務 印 書 館 出 版

上海河南中路二一四號

中 國 圖 書 發 行 公 司 發 行

商 務 印 書 館 北 京 廠 印 刷

(53737A)

1953 年 7 月初版 版面字數 187,000

印數 1-1,500 定價 ¥14,000

前 言

由於最近飛機飛行速度的急遽增加，就需要改進空氣動力學的實驗和擴大有關高速氣流的科學研究工作的範圍。同時研究的進展主要是爲了增加最高飛行速度，這不僅沒有使改善飛機其他飛行性能的工作量縮小，相反的，由於飛機新的特性的出現，促進了一連串關於低速氣流的新的實驗研究。結果，最近幾年來科學研究工作得以非常迅速，並全面地發展。

近來，無論在理論方面或在實驗方面都獲得了很大的成就，用實驗數據來證實理論研究所得的結果是愈來愈正確了，亦就是說，理論和實驗的數據日漸在趨向一致。理論的改善就有可能更週詳的、更有根據的去作實驗。於是，理論與實驗的結合就愈加緊密與完善了。因此，近代的實驗空氣動力學總是高度的聯系着理論，每次實驗以前必定經過理論的探討，指出進行實驗的途徑。由於這一點，實驗空氣動力學書中就有必要援引一定數量的理論材料，這些材料對於理解所敘述的一章是必須的。

本書主要是敘述我國（蘇聯）學者們和工程師們的研究結果，其中也有作者自己的若干研究結果。

本書預定作爲高等航空學校飛機製造系的教科書，但亦可供其他專業的學生，航空工廠和研究院的工作人員，以及研究生之用。

作者謹向擔負本書評閱工作的 Н. В. 奧斯托斯拉夫斯基 (Н. В. Остославский) 教授，Г. Ф. 布拉柯 (Г. Ф. Бураго) 教授，Н. А. 柴克斯 (Н. А. Чаке) 副教授和 С. Я. 斯脫里站夫斯基 (С. Я. Стрижевский)

副教授致謝，同時也向 И. М. 雪立白里斯基 (И. М. Серебрянский) 教授致謝，因為他審閱了本書某幾章原稿並提出了許多寶貴意見。

本書的綱要和內容與以前教學實踐中所採用的實驗空氣動力學教程有些不同。謹希讀者對本書提出批評，或則指出各方面的缺點，這對作者今後的工作會有很大的幫助，在此，作者預先致以誠懇的謝意。

序 言

空氣動力學，這是一門比較普遍性科學(如流體力學、非固體力學)中的一部分。一種物體，假如受外力作用時，會引起與外力成正比例的應變(在虎克定律的有效範圍內)，則這種物體稱為固體。而在非固體中，當應變速度無限小的極限情況下，產生應變所需加的力等於零。

非固體可區分為下列三類：1)黏性很大的液體；2)黏性很小的液體；3)氣體。

這三種非固體的區別如下，黏性很大的液體(如很稠的油、甘油、石油)，由於內摩擦力很大，使一固體在其中運動時遭受很大的阻力。而固體在黏性很小流體(如水、酒精、汽油)中運動時所遭受的阻力，較前者小得多。氣體與液體的區別在於有彈性，即使受不大的壓力影響，氣體也會壓縮起來，而液體則是不可壓縮的。

空氣動力學是非固體力學中的一部分，它研究氣體的運動，以及氣體和在氣體中運動的固體之間的相互作用。它又可分為理論空氣動力學、實驗空氣動力學、飛機空氣動力學和工業空氣動力學等幾部分。

理論空氣動力學，按其性質來說，基本上是應用數學和應用力學。這項課程爲了便於在數學上說明它所研究的現象起見，是以現象“模型”(модели явлений)作爲根據，亦即把所研究的現象簡化。

它的優點在於有高度的系統性及嚴整性。缺點是由於簡化，在很多情況下，與實驗結果有差別。最近，理論空氣動力學中有專門研究高速氣體流動的章篇叫做氣體動力學。

實驗空氣動力學研究現象的本身，而不是研究簡化後的現象，它綜

合實驗所得的結果，所以是一門實驗係數的科學。這項課程不同於理論空氣動力學的，主要是具有物理的特性。

飛機空氣動力學研究各種飛行器的飛行情況，並研究出它們的氣動力的計算方法。

工業空氣動力學研究在國民經濟中應用到空氣動力學的各種問題，特別是研究通風、鼓風機和控制空氣等問題。

實驗空氣動力學並不是孤立的一門科學。它不單與理論空氣動力學有密切的關係，因為從理論空氣動力學中可以獲得使它正確的研究實驗材料的方法，並且確定一般原則性的研究方向，同時，它也與飛機空氣動力學也有密切的關係，因為實驗空氣動力學和飛機空氣動力學所研究的主題（航空問題）是相似的。

實驗空氣動力學的課程應使學生熟悉實驗的方法，並且培養他們具有批判地運用各種實驗方法的能力。

這課程還要使學生熟悉基本的實驗的結果，以便使未來的工程師能明確的建立起關於飛機空氣動力學規律性及數字的概念。

最後，在這課程中還應該敘述一些理論，以便使實驗作得更正確，總結實驗的結果，應用到各種實際問題中去。

假如不考慮個別的，例如，伽利略（Галилей 16—17 世紀）所作的研究，則在十九世紀末葉，非固體流動的實驗研究原是落後於當時已達到相當完善的理論研究。但是，由於技術的蓬勃發展，在十九世紀首先就創始了水力學，以後在二十世紀才有實驗空氣動力學出現。航空的產生和飛速發展的需要，大大地促進了實驗空氣動力學的發展。在其發展過程中最顯著的特點，是由過去的單獨研究轉變為集體研究。如果理論空氣動力學是研究家單個兒在寂靜的辦公室裏創造出來的，那末實驗空氣動力學的發展需要有許多的科學工作者共同工作，還要有強

大的動力裝備。但是，這門年青的科學起先還是靠着天才的研究家們單獨努力工作的結果向前推進的。

俄國的科學家在實驗空氣動力學發展中起了卓越的作用。

М. В. 羅蒙諾索夫(М. В. Ломоносов)在 1751 年就已創造出風速表——測量風速的儀器。這種儀器到後來大為推廣。三年以後，他又研究把儀器帶到大氣上層去的直昇飛機。在科學院的會議上，他曾把這模型展覽過。

М. В. 婁加迄夫(М. В. Рыкачев)在上世紀七十年代間，曾作過一系列的實驗，研究飛行器的傾斜面與所生昇力的關係。當時，婁加迄夫所假想能實現的飛機，也是直昇飛機的一種。

Д. И. 門得列業夫(Д. И. Менделеев)在十九世紀八十年代研究過液體的阻力，並且指出了，可以用水來測出氣流對物體之阻力。

當時，А. Ф. 莫查依斯基(А. Ф. Можайский)——世界上第一架飛機的創造者——廣泛地作了飛行模型的實驗，並且研究怎樣去確定螺旋槳的效率、機翼的昇力和飛機的其他許多重要性。

在這許多科學家——實驗空氣動力學的創始者——之間特別要提到的 К. Э. 采奧柯夫斯基(К. Э. Цолковский)。十九世紀末葉他在伽路界(Калуга)城建造了第一個風洞——用人造氣流來進行空氣動力實驗的裝置。雖然由於缺乏物質的支援，采奧柯夫斯基的實驗裝置是那麼簡陋，但是依然得出許多重要的結論。足夠證明他所研究出的彎承受面遠較平面要優越。這個結論後來誤認為是德國學者李林達爾(Лилленталь)所創的，事實上後者得到這結論遠較采奧柯夫斯基為晚。

如上所述，二十世紀有許多學者(科學團體的組織者)從事研究工作，因而，實驗空氣動力學獲得重大的成就。其中最光輝的範例就是偉大的俄國科學家，列寧尊稱為“航空之父”尼古拉·葉格羅維契·茹

闊夫斯基，他是規模巨大的技術學校和空氣動力學實驗室網的創始者。在 Н. Е. 茹闊夫斯基周圍有很大的一批學生，他們主要都是莫斯科高等技術學校學生和滑翔小組的成員。在這滑翔小組中培養出許多大科學家 and 優秀的航空工程師。

在俄國，空氣動力學實驗室首先是由 Н. Е. 茹闊夫斯基創立的。一九〇四年他在莫斯科附近庫寄尼 (Кучино) 創立了研究院。在這研究院作了許多重要的研究。一九〇二年在莫斯科大學成立了空氣動力學實驗室，一九〇六年又在莫斯科高等技術學校成立了實驗室。這些實驗室在俄國航空史上起着很大的作用。除此以外，莫斯科高等技術學校實驗室培養出來的許多 Н. Е. 茹闊夫斯基的學生，建立了許多實驗室。

一九一〇年列寧格勒的工業學院也建立了空氣動力學實驗室。

但是，我國（蘇聯）的航空事業一直到偉大的十月革命後才能得到生長和飛速的發展。

由於蘇聯政府對科學研究給予物質上和精神上的支持，對科學工作者們的關切，以及與沙皇時代所承襲下來的，盲目摹倣外國的樣式作鬥爭的結果，使實驗空氣動力學得以迅速地發展。在我國很多的城市中都建立有航空專業 (авиационная специализация) 的研究院和新型高等學校，同時舊大學裏也設立了這樣的專業。後來，出現了莫斯科 С. 奧爾忠尼則航空學院的實驗室，這些實驗室是在莫斯科高等技術學校實驗室的基礎上發展起來的，在莫斯科成立了 Н. Е. 茹闊夫斯基軍用航空工程學院的空氣動力學實驗室，列寧格勒和其他地方亦都紛紛建立了實驗室。

一九一八年，根據列寧的指示，把全蘇聯最大的幾個空氣動力學實驗室都在莫斯科集中為茹闊夫斯基中央流體動力研究院 (ЦАГИ) 內。

這許多實驗室有着很大規模的實驗設備，聚集了科學工作者，因此能够解決現代航空中所發生的一切複雜問題。中央流體動力研究院的創始者茹闊夫斯基去世後，就由雪爾基·阿力克雪葉維契·夏伯雷金起來主持。他著了許多卓越的科學著作，特別是高速氣流方面的著作，因此，他能當之無愧的稱為氣體動力學的創始者。雖然，C. A. 夏伯雷金本人專門研究理論，不搞實驗空氣動力學，但是，他在建設和組織中央流體動力研究院新的實驗室時作了許多工作。

實驗空氣動力學中最主要進行實驗的設備就是風洞。在設計風洞基本圖形方面，榮譽應當歸於我國的許多學者。上世紀九十年代K. Θ. 采奧柯夫斯基所造的風洞，是世界上第一個最簡單的風洞，用離心式風扇推動空氣流動。茹闊夫斯基和他的學生一起設計了有封閉壁的風洞圖樣，在這風洞裏空氣不是像采奧柯夫斯基風洞那樣在壓力的作用之下（利用風扇）而推動的，而是抽吸的。A. H. 杜伯列夫（A. H. Туполев）建議把風洞通道轉過 180° （稱為回路擴散段），這觀念在近代大多數風洞中得到廣泛採用。B. A. 斯列沙列夫（B. A. Слесарев）第一個建議用完全密封的風洞，近代高速風洞就是按照它的觀念做成的。後來，B. H. 尤列也夫（B. H. Юр.ев）提出，把風洞分叉成兩個回復通道的思想。由此可見，近代風洞大多數的組成部份都是根據我國科學家們的思想作為基礎的。

在斯大林五年計劃的年月，隨着航空的發展，研究基礎日益發展並鞏固了，科學幹部日益成長，我國實驗空氣動力學也就得到飛速的發展。

近代航空事業的飛速地發展着，擺在實驗空氣動力學面前的問題是愈來愈多。特別是，許多問題都產生在建造高速飛行的飛機過程中。當作這方面工作時，飛機製造設計師每完成一段工作，都要認真地經過

實驗來檢查。由此很清楚地可以看到，實驗空氣動力學在近代航空事業中所起的主要作用。

上册 目錄

前言

序言

第一章 空氣及其性質	1
第一節 大氣	1
第二節 空氣成份	3
第三節 空氣的物理性質	4
第四節 國際標準大氣	11
第二章 空氣流動的各主要定律	18
第一節 空氣動力學中的現象“模型”	18
第二節 流體運動的各主要定律	24
第三節 高近音速時的伯努里方程式	32
第四節 賴伐爾管	40
第五節 超音速流動	51
第三章 實驗空氣動力學中所採用的座標軸及主要的符號	70
第一節 實驗空氣動力學中的座標軸系	70
第二節 氣動力係數	74
第三節 氣動力係數的應用	81
第四章 實驗空氣動力學中的相似律	89
第一節 關於相似的概念	89
第二節 相似現象的基本公式	92
第三節 計算黏性力時的相似律	95
第四節 計算重力時的相似律	98
第五節 計算媒質壓縮性時的相似律	100
第六節 計算週期現象時的相似律	103
第七節 完全相似與部份相似 因次法的應用	105

第五章 空氣動力實驗方法	111
第一節 空氣動力實驗的基本方法	111
第二節 當物體以直線運動時物體的空氣動力研究	112
第三節 飛行實驗	114
第四節 旋臂機	115
第五節 風洞	117
第六節 氣動力天秤	138
第七節 流線譜	150
第六章 流動流體中測量壓力和速度	166
第一節 測量靜壓力	167
第二節 普通氣壓計和測微氣壓計	169
第三節 測量流速值	175
第四節 氣流方向的研究	191
第五節 沿物體表面的壓力分佈	193
第七章 附面層與紊流	199
第一節 層流附面層	200
第二節 紊流	211
第三節 附面層分離時物體的臨界阻力	218
第四節 紊流附面層	226
第五節 附面層從層流狀態變為紊流狀態	232
第六節 物體表面粗糙度對附面層的影響	234

實驗空氣動力學

第一章 空氣及其性質

第一節 大氣

大氣乃是地球外包的氣層。它是由各種氣體混合而成，而這些氣體也就是大氣中的空氣。大氣高度不可能很正確地確定，因為它逐漸地過渡到宇宙空間。

表示有空氣存在的發光現象，發現在很高的高空，約在 1000 公里處。由於空氣摩擦而生的殞星發光現象可在低得很的高空中，約 150 公里處發現。

噴氣式發動機問世以來，航空所及的飛行高度範圍大為擴大，因而，研究大氣已是件興趣很濃厚的事了。

與現代航空密切有關的大氣低層叫做對流層和同溫層。對流層中之氣團受地球散熱和地形的影響呈現着不斷對流之狀態，溫度和壓力隨着高度增加而降低。在對流層中有雲，雨雪和暴風雨。對流層的高度由其溫度的終止降減來確定。赤道上高度為最高，可達 17—18 公里，在二極處為最低，達 8 公里，同時，這個數值是依據年時和其他許許多多的因素而變動。在歐洲和北美洲人口相當衆多的地帶的緯度處，對流層高度為 11 公里。

對流層之上為同溫層，它的特點是溫度固定，平均是 -56.5°C 。

然而，同溫層中溫度從 25 公里高度起開始增高（詳見下面），在這層中壓力隨着高度的增加而繼續下降。

對流層和同溫層之間有一寬 1—1.2 公里的中間層，叫做休止層（тропопауза）。

近來，主要是蘇聯科學家的著作提出了許許多多新的東西，使我們能對高氣層的知識更精確了。

對流層中熱平衡由水蒸汽來調節，當轉為同溫層時水蒸汽之數量就急驟下降。而同溫層熱平衡則由數量很大的臭氧來調節。由於水蒸汽和臭氧熱量平衡時溫度是不同的（臭氧熱平衡溫度較高），所以有臭氧存在的區域（即 22—25 公里高度處），可設想空氣溫度會升高。事實上也是如此，從 25 公里高度起空氣溫度就在升高，在 45 公里處達到 $+40^{\circ}\text{C}$ 。45 公里以上溫度重新又降低，在 70 公里高度時氣溫降到最低為 -50°C 。

同溫層中空氣沒有垂直方向的對流，雲幾乎沒有，暴風雨也完全沒有。同溫層中與對流層中空氣流動的區別在於前者的流動很有系統和規律。同溫層的低層（有時叫做近同溫層）中流動速度為每秒 35 公尺。19—22 公里高度中經常的氣流速度下降到每秒 6—8 公尺，隨後又重新增加。根據觀察高處發光雲層的結果，知道流動速度在 40 公里高度處達到每秒 70 公尺，在 60 公里高度為每秒 140 公尺，80 公里高度處達到每秒 160 公尺。

用普通儀器來測量很高高空的流速是不可能的，因為那裏的空氣密度非常小。

目前認為 80 公里高度為同溫層上限。從 80 公里高度以上為電離層（ионосфера）。這個名稱來自“離子”——所謂帶有正電或負電的質子。低大氣層中空氣壓力相當大，負電質子不可能持續得久。電離層

高度中，空氣很稀薄的情形下，帶有負電的質子——負離子——能存在得很久。由於如此，80 公里那樣的高空地帶（電離層）離子數量就大大地增加。

接近電離層上限，即 80 公里高度處，由 70 公里高度重又昇高的空氣溫度此時大約達到 -10°C 。在電離層中空氣溫度激增；每公里高度增加 $8-10^{\circ}\text{C}$ 。由於這樣的昇高在 90 公里處溫度已達到約 $+100^{\circ}\text{C}$ 。170—180 公里高度處溫度約達到 $+700^{\circ}\text{C}$ ¹⁾。

最高的大氣層叫做外大氣層（*экзосфера*）——大氣到行星空間的過渡區域。外大氣層沒有明顯的界限，通常在 500—1000 公里範圍內。

研究 36 公里高空以下的大氣是用直接探測法，使用探測氣球和同溫層氣球（有密封艙，體積很大的氣球）。若在 36 公里高度以上確定大氣性能，要用下列各間接法：確定殞星開始發光和熄滅的高度，音測法，研究無線電波的反射和觀察高層雲的發光現象等等。

第二節 空氣成份

空氣對運動的阻力隨着空氣的稀薄而減少，因此，飛行高度的增加很惹人注意。同時，目前大部份所用的航空發動機的工作媒質還是空氣。因而，除了要注意到任一高度中空氣稀薄的程度以外，我們還需注意到空氣成份是否能適用於發動機。

海平面上空氣容積成份如下：

氮(N_2)	78.03%
氧(O_2)	20.99%
氬(Ar)	0.94%

1) 應當注意到，雖然空氣具有如此高的溫度，但由於媒質密度微小，使物體加熱得很小。

碳酸氣(CO_2).....	0.03%
氫(H_2)	0.01%
氖(Ne)	0.00123%
氦(He)	0.0004%

以上列舉的空氣成份是指乾燥的空氣；通常空氣成份中摻雜有水蒸汽，其數量與氣候情況，地域特性以及其他等等原因有關。海平面上水蒸汽容積量平均為1.2%。

用探測氣球和同溫層氣球探測空氣成份，其結果是：19公里高度以下空氣成份可以認為是不變的。而從19公里到100公里高度間空氣成份也改變得很小。

最近，還有人認為，大氣高層大半是氫（在110公里高度處為98.1%）。然而，分析了大氣高層的發光現象知道那裏的空氣成份也類似低層的空氣成份，都是以氮、氧為主。

第三節 空氣的物理性質

壓力

作用在物體上的力可以分為：

- 1) 容積力或質量力，即作用在每一微體上，並與其容積成比例的力。重力、離心力即屬於此類。
- 2) 表面力，即法向或切向作用於表面，並與表面大小成比例的力。

一非固體（液體或氣體），處於平衡狀態，其任一微小表面所承受的表面力，是與表面垂直，並指向體積內部，若取其單位面積上的此種表面力，則所得的法向應力叫做壓力。

大氣壓通常用氣壓計來測量，用若干公厘水銀柱表示，並用符號