

85526

基本馆藏

館內閱讀

实验空气动力学原理

H. A. 查克斯 著



國防工業出版社



統一書号：15034·31

定价：(10)2.20 元

实验空气动力学原理

H.A. 查克斯 著

詹永禹 译



国防工业出版社

本書係按航空學院的教學大綱寫成，為實驗空氣動力學課程的教科書。書中研究了空氣動力相似性問題，簡明敘述了空氣動力學的研究方法，陳述了機翼和整個飛機的主要實驗研究結果以及空氣動力性能的工程計算方法。對高速空氣動力學給與了極大的注意。

本書適用於高年級學生。對航空工廠、設計局、空氣動力實驗室的工程技術人員，亦有助益。

本書係由熊承禹同志譯成並經趙世誠同志初校。

Н.А.Закс
ОСНОВЫ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ
АЭРОДИНАМИКИ
Государственное
издательство оборонной промышленности
Москва 1953

本書係根據蘇聯國防工業出版社
一九五三年俄文原譯出

实验空气动力学原理

[蘇] 查克斯著
熊承禹譯

*

國防工業出版社 出版

北京市書刊出版業營業許可證出字第 074 號
北京新中印刷廠印刷 新華書店發行

*

850×1168 1/32 • 117/8 印張 • 311,000 字

一九五六年六月第一版

一九五六年六月北京第一次印刷

印數：1—2,500 冊 定價：(10)2.20 元

前 言

本“实验空气动力学原理”教程，系由作者教授该课的講演整理而成。

同一名称的教程，曾在 1946 年付印，1948 年出版。自第二次世界大战结束以来，过去这些年代里，在航空发展方面，有巨大的进展。现代飞机的飞行速度，已远远超过大战时候的飞机速度。这些成就证实了空气动力学的进步，尤其是实验空气动力学的进步。

自然，实验空气动力学中一系列新的问题，特别是那些涉及高速空气动力学的问题，在第一版里，是不能得到充分讨论的。这就促使了作者从事本书第二版的出版。

本版（第二版）中所讨论的问题，大部分在第一版里完全没有讨论过，或者是很简略地提过。属于这类问题的有：附面层层流区加长了的低阻翼型；在高流速时空气动力学的研究方法；在高亚音速和超音速时压力、速度和 M 数的测量；在亚临界速度、超临界速度和超音速时翼型的空气动力学特性；在亚音速和超音速时流线型旋转体的迎面阻力；高速飞机的机翼（箭形机翼和小展弦比机翼）。和第一版比较起来，还有一些章节是新的，这些章节中谈到机翼空气动力载荷的展向分佈问题，包括梯形机翼、扭转机翼和带有襟翼的机翼，也谈到机翼的最大升力系数的计算问题，包括不带降落襟翼的和带有降落襟翼的机翼。

本书其他章节，都经过重大的教学法修改。在本版中，删节了某些次要问题。

在准备第二版付印时，曾考虑了对本书第一版所提的批评意见。

卡明柯夫 (Г. В. Камюнков) 教授、米尔尼柯夫 (А. П. Мельников) 教授、茹拉夫琴柯 (А. Н. Журавченко) 教授和特卡琴柯 (Я. Е. Ткаченко) 副教授、普茹塔 (В. И. Пулята) 副教授和格魯蒙茨 (Т. А. Грумонца) 副教授等，在審查原稿時提出了許多寶貴意見，謹此向他們表示深忱的謝意。

Н. А. 查克斯

目 錄

前言..... 1

緒論..... 1

第一章 實驗空气动力学中的空气动力系数。 空气动力相似性

- § 1. 坐标系.....13
- § 2. 空气動力系数.....18
- § 3. 由一坐标系到另一坐标系的轉換.....21
- § 4. 空气動力相似性.....22
- § 5. 在相似条件下由模型到实物的轉換.....26
- § 6. 影响空气動力阻力的諸因素.....31
- § 7. 相似准則.....24

第二章 空气动力学的研究方法

- § 8. 測定空气媒質对空气中運動体的阻力的早期实验.....40
- § 9. 風洞。風洞原理圖.....42
- § 10. 空气動力天秤.....44
- § 11. 机翼空气動力特性实验圖表.....47
- § 12. 力矩曲綫。焦點。压力中心.....53
- § 13. 实验空气動力学曲綫圖应用举例.....60
- § 14. 用以保証对 R 、 F 、 S 和 ϵ 等参数空气動力相似的
專門的風洞和儀器.....66
- § 15. 高速風洞.....70
- § 16. 在高速風洞中实验模型時，計算空气動力系数的公式.....75
- § 17. 在風洞中对 R 与 M 兩准則獲得相似性的实际可能性.....76
- § 18. 阻力的彈道研究法.....79
- § 19. 空气動力实验的另一些方法.....82
- § 20. 光学研究法陰影法和紋影法.....85

§ 21. 光学研究法·干擾法..... 92

第三章 速度和压力的测定。沿气流所流过的物体表面的压力分佈圖

§ 22. 压力計和感压器..... 97

§ 23. 流速的測量.....102

§ 24. 風洞实验段里动压力場的測定.....108

§ 25. 高亞音速飛行中駐點上的压力.....111

§ 26. 高亞音速的測量。对壓縮性和飛行高度的修正。空速表的校正.....113

§ 27. 飛行M數的測量.....117

§ 28. “制動”溫度。基於M數和制動溫度的速度測定.....119

§ 29. 在超音速飛行中，靜压与M數的測定.....121

§ 30. 流向探測器。風洞中气流偏斜度的估計.....124

§ 31. 測量速度的电气儀表.....127

§ 32. 压力沿气流所流过的物体表面的分佈.....129

§ 33. 作用於机翼的力和力矩公式的推演.....133

§ 34. 以压力分佈圖为基础的，空气動力、力矩和空气動力系數的計算.....138

§ 35. 迎面阻力实验測定結果之靜压梯度修正.....145

第四章 附面層与紊流度

§ 36. 附面層結構。轉振點.....148

§ 37. 層流附面層。摩擦係數.....152

§ 38. 紊流附面層。紊流摩擦係數与混合摩擦係數.....160

§ 39. 確定附面層流速分佈情况和轉振位置的实验方法.....167

§ 40. 机翼轉振點的計算求定.....175

§ 41. 附面層的分离.....177

§ 42. 气流紊流度。借熱电空速表之紊流度測定.....179

§ 43. 圓球迎面阻力与R數和气流紊流度的關係.....181

§ 44. 作为紊流度探測器的圓球。紊流尺度比.....184

§ 45. 紊流度对某些物体的空气動力特性的影响。基於大气紊流度之实验結果的整理.....187

§ 46. 变更風洞裡气流原始紊流度的方法.....191

第五章 几何参数和 R 数对翼型和机翼空气动力特性的影响。机翼的最大升力系数

- § 47. 翼型的基本几何特性与翼型族的繪制.....195
- § 48. 翼型几何参数对其空气动力特性的影响.....201
- § 49. 飞机机翼的几何参数.....205
- § 50. 机翼展弦比对其空气动力特性的影响.....207
- § 51. 机翼梯形比对其空气动力载荷展向分佈的影响.....209
- § 52. 机翼扭转对其空气动力载荷分佈的影响.....212
- § 53. 冲量法.....216
- § 54. 机翼型阻用冲量法的实验测定.....221
- § 55. 确定平滑机翼型阻的计算方法.....225
- § 56. 低阻翼型.....228
- § 57. R 数对翼型诸空气动力系数的影响.....232
- § 58. 机翼附面层的控制.....236
- § 59. 机翼的增举设备——附翼.....238
- § 60. 机翼的自障.....248
- § 61. 不用襟翼时机翼 $C_{y_{max}}$ 的计算.....249
- § 62. 用襟翼时机翼 $C_{y_{max}}$ 的计算.....253

第六章 空气压缩性对翼型和机翼诸空气动力特性的影响。高速飞机的机翼

- § 63. 临界 M 数.....259
- § 64. 临界 M 数与翼型几何参数和迎角的关系.....262
- § 65. 在亚临界飞行速度下压缩性对翼型诸空气动力特性的影响.....265
- § 66. 在超临界飞行速度对翼型的诸空气动力特性.....273
- § 67. 有关翼型超音速特性的一些理论数据和实验数据.....277
- § 68. 侧滑对机翼诸空气动力特性的影响.....283
- § 69. 箭形机翼.....291
- § 70. 小展弦比机翼.....299

第七章 旋轉体、發动机短舱、机身以及其他飞机元件的迎面阻力。飞机極綫圖的繪制

- § 71. 亞音速飛行中，流綫型旋轉体的迎面阻力.....306
- § 72. 在高亞音速時發动机短舱与机身的迎面阻力.....310

§ 73.	在超音速時流綫型旋轉體的阻力·····	313
§ 74.	機翼和飛機的昇力和迎面阻力。飛機各部的干擾·····	320
§ 75.	在減低個別元件迎面阻力中，整流罩所起的作用·····	323
§ 76.	機翼和尾翼迎面阻力系數的計算·····	328
§ 77.	散熱系的迎面阻力·····	332
§ 78.	飛機各個別部分的迎面阻力·····	334
§ 79.	迎面阻力的總彙和飛機極綫圖的繪制·····	328
§ 80.	$c_y = f(\alpha)$ 曲綫的繪制·····	343

第八章 飛機空氣動力穩定性和操縱性

§ 81.	有關飛機穩定性和操縱性的概念·····	345
§ 82.	飛機縱向靜穩定曲綫圖·····	347
§ 83.	飛機側向靜穩定性圖表·····	355
§ 84.	舵面樞軸力矩和駕駛桿（脚蹬）上的力·····	358
§ 85.	角式補償、軸式補償和內補償·····	360
§ 86.	隨動補翼與配平補翼·····	364

緒 論

1. 空气动力学的基本任务

为了計算飛機強度、研究它的穩定性和它的飛行数据（最大速度、爬昇速度、航程等等），就必須知道：飛機在飛行中要受到哪些空气动力和力矩作用，以及这些力是怎样沿着飛機各部的表面分佈的。研究物体与流过物体的空气之間的力的相互作用，就是空气动力学的基本任务。

当空气动力学，作为一种实用科学还未曾成熟，而飛機構造家們还在盲目工作的时候，企圖制造一个能夠飛行的重於空气的飛行器，在很多情况下都終於失敗了。作成的飛行器不是不能起飛，便是离地之后丧失穩定性而碰碎，或是由於強度不夠而在空中崩裂。

只有在創造了空气动力学以后，才可能像設計任何机器一样，合理地設計飛機。

2. 空气动力学的理論和实验方向

要正確地了解、研究和創造性地發展任何一門科学，必須对自然發展的法則、科学本身發展的法則，有清晰的概念。

如果認識到了某些自然法則，就可以巧妙地运用这些法則为社会謀福利。对客观存在的自然法則的認識，是以观察、以細心研究並以现实自然現象的理論綜合为基础。

空气动力学，和任何其他研究自然法則的科学一样，同时向着理論和实验两个方向發展。这两个方向具有不可分离的联系；

它們互相充實，彼此增補，並且都是飛機計算的基礎。

現實的自然現象十分複雜，有時並不可能作嚴格的理論分析。空氣動力學所碰到的那些格外複雜的現象，便完全屬於這種情況。因此，理論空氣動力學不得不就已知的方面加以提煉，並離開現實條件，不以現實現象本身作為研究對象，而以其簡化後的物理模型（Модель）作為研究對象。這些模型要保持住現實現象的一切主要方面，但並不包含那些徒使理論分析複雜，而對於所研究的問題又無關緊要的方面。例如，在理論空氣動力學的一些問題里，空氣被假設為既不可壓縮又無黏性的流體，在另一些問題里，却假設為可壓縮但無黏性的流體，在第三種問題里，則假設為不可壓縮而有黏性的流體，而在第四種問題里，則假設為既可壓縮又有黏性的流體。

自然，如果經過簡化的物理模型愈加全面地包含着所研究現實現象的主要方面，則理論結果便會愈加符合實際情形，以經驗、以觀察、以現實現象的實驗研究為基礎的理論，會有助於揭露這些現象的發展規律。

研究工作者對某一現象的特徵的正確概念，歸根結底可能總是由經驗中獲得的。偉大的研究工作者的特異之點，總是善於觀察自然現象，善於分析它們的本質及其相互聯繫。

例如，大家都知道，天才的俄羅斯科學家尼古拉·葉果羅維奇·儒考夫斯基（Никлай Егорович Жуковский）的機翼昇力定理，便是以機翼與渦相當的概念為基礎的。

儒考夫斯基之所以能夠藉助相當於機翼的渦系而使一飛翔天空的機翼模型化，正是由於他細心研究了氣流流過物體的情況，特別是由於他觀察了同事聶日丹諾夫斯基（С.С.Неждановский）的風箏實驗的結果，關於後面這點，列以本生（Л.С.Лейбензон）院士現已證明。確立了流過像飛機機翼之類物體的氣流的客觀法則之後，儒考夫斯基得出了他那有名的機翼昇力定理，而這個定理便是機翼理論和空氣螺旋槳理論的基礎。

空氣螺旋槳工作的物理形態是儒考夫斯基空氣螺旋槳理論的

基礎，那是儒考夫斯基基於在莫斯科大学和莫斯科高等技術學校兩處的實驗室里，多次觀察螺旋槳附近空氣的運動情況，並且根據對螺旋槳在水裡工作情況的觀察結果而綜合出來的。

總之，物理實驗歸根結底總是每種技術理論的基礎。可是，應當承認，理論一經成立之後，它就有獨立發展的可能，並且可能推測一些新的，尚未從實驗得知的結果。這些結果的實驗印證，便作為修正理論之用。另一方面，在實驗過程中，可能會出現一些新的事實，足以推動理論進一步發展等等。由此可見，知識的不斷發展，是以理論與實驗的緊密聯繫和相互影響為基礎的。

使科學探討基於預先建立的原則性理論的這種科學研究途徑，是最正確的途徑。

雖然如此，人們有時寧願採用另一種方法，就是擬定可能解決所研究問題的一切方式，並按照這些方式，同時進行大量的性質上無所差異的實驗，指望其中某一種方式，恰好給出所提問題的答案。

第一種方法，實驗與理論密切聯繫的方法，是我們祖國（蘇聯）科學的特殊標誌。第二種方法則往往為美國人所採用，這種方法既費金錢，技術上又比第一種更複雜，只不過不需要研究人員有高度的技術水平而已。

尤列也夫（В.Н.Юрьев）院士，用下述關於蘇聯和美國在空氣螺旋槳計算方法研究上的例子，說明了第一種方法的優越性。

在俄羅斯，是首先（在觀察流過螺旋槳的空氣運動的基礎上）創立了螺旋槳理論，然後用按照這些理論作成的螺旋槳，進行試驗，校驗這些理論；而在經過適當的修正之後，又用同樣程序重新來校驗。例如，儒考夫斯基的漩渦理論便是這樣確定下來的，它不僅可以在實踐中適用於螺旋槳計算，而且還可應用於風扇和風力發動機計算，總共只要精細地研究兩個按這個理論制成的螺旋槳，也就行了。

與此相反，在美國斯坦弗大學里，美國研究人員曾經實驗了150個以上一切可能形式的螺旋槳。然而他們所盲目進行的實驗，

除了在螺旋槳模型的空气动力特性轉換为实在螺旋槳的空气动力特性方面，也許作出过一些个别結論之外，並沒有能夠作出任何一般性的結論。

除了为闡明某种現象的物理本質而進行的实验(物理性实验)之外，还得進行实验來確定理論所建立的数量关系。因为，在絕大多數情况下，理論必須照顧的不是实际現象本身，而是它的簡化形态，得自理論的和得自实验的数量結果之間，往往發生分歧。

以实验为基础，可以在理論公式里引入相应的修正(实验系数)，使这些公式適用於实际計算。

可是必須指出，由於空气动力学所研究的現象十分复雜，其中很多現象，到目前为止，完全还未能建立令人滿意的理論，暫時还必须利用單純的实验关系。

上述各点，决定了实验空气动力学对航空發展的重大意义。在目前，实验空气动力学已經發展到可以作为一个独立的科学部門來研究了。它研究在气流所流过的物体上空气气流的力的作用，其方法或者是把模型安在特殊裝置——風洞里，來進行研究模型上的这种力的作用，或者是对所研究对象——飛機、直昇机、飛艇等等，直接任飛行中進行研究。

3. 在实验空气动力学發展中苏联科学家所起的作用

在航空理論的創造和發展中，特別是在理論空气动力学的創造中，我們祖國科学家所起的卓越作用，已經举世週知了。一提到像罗蒙諾索夫(М.В. Ломоносов)、欧拉(Л. Эйлер)、伯努里(Д. Бенулли)和門得列也夫(Д.И. Менделеев)这些科学家的名字，便足以使人深信，还远在俄罗斯軍官莫查依斯基(А.Ф. Можайский)所作的世界上第一架飛機，在上世紀的八十年代，完成第一次飛行的很早以前，俄罗斯科学家們，便已經从事於理論空气动力学問題的研究了。

然而在实验空气动力学領域內，無疑的优先地位同样是屬於我們祖國科学家們这个事实，人們却还不那样熟悉。

在國外，實驗空氣動力學的創造，往往是與法國工程師歐菲爾（Эйфель）的名字聯繫起來的。他利用他建造的一個塔來從事原始的空氣動力學實驗；他從塔上扔下各式各樣的模型，模型上裝有測力計，藉測力計來測量作用於模型上的空氣動力（1900年）。

其實，遠在歐菲爾以前，在俄羅斯就已經進行過大規模的空氣動力學實驗了。

第一次飛行設備的實驗研究，應當是 М. В. 羅蒙諾索夫在研究一個不大的飛行機器的構造時所作的實驗，其目的是要將儀表昇入高空，以便研究大氣上層。

在 1871 年，俄羅斯航海家米哈伊爾·阿列克山得羅維奇·雷卡契夫（Михаил Александрович Рыбачев）（後來他成了院士和總物理天文台台長），在“航海論文集”（“Морской сборник”）上，發表了一篇淵博的論文，題目是“在空氣中旋轉的螺旋槳的首次昇力實驗”。雷卡契夫當時想作一架直昇機，他的這些實驗，便是為取得直昇機計算的原始數據而作的。雷卡契夫企圖在他自己所作的實驗里確定：使一定尺寸的螺旋槳轉動所需的功率，以及借這種螺旋槳能把多重的載重昇上天空。雖然雷卡契夫所得的數量估計，還並不準確。可是畢竟是他首先研究了確定旋轉螺旋槳昇力的方法。此外，他用自己的實驗光輝地証實了空氣阻力與速度的平方和物體的特性面積成比例的定律。

大約在 М. А. 雷卡契夫實驗研究的同一時期，Д. И. 門得列也夫曾經從事於一物體在媒質中運動時，媒質對物體所生阻力的研究。他在彼得堡大學實驗室里，曾作過物體在空氣媒質中的下落實驗，由於這些實驗，使低速時阻力與速度成平方的定律得到了實驗的証實，並且得以建立阻力與媒質密度之間的关系。在 Д. И. 門得列也夫的主要著作“論流體的阻力與航空”里，曾經記載了這些實驗。

在上世紀末期，偉大的俄羅斯冶金學家德米特利·康士坦丁諾維奇·契爾諾夫（Дмитрий Константинович Чернов）也曾經研究過空氣動力學問題。他最先注意到凸翼型的優點，在凸翼型

上“……上面的大气压力減少了，使昇力能增加得同样多”。在机翼上裝置后来所謂开縫的主意，也是契尔諾夫提出的，而它的理論則是后来由查普雷金院士給出的。

俄罗斯技术协会会员費道罗夫 (Е.С.Федоров)，在1891年曾經对空气气流以不同的迎角流过时，在各种不同大小和各种不同形狀的表面上所生的压力的測定方面，進行了有意义的实验。他是在露天里迎風進行实验的。尽管設備簡陋，他畢竟还是从实验里發現了，在同一迎角之下，凸表面的昇力大於平面的昇力，并且还發現了，表面的昇力系随迎角的增大而增高，而当迎角約为 20° 时，則达到最大值。

在上世紀的九十年代，雅尔柯夫斯基 (И.О.Ярковский) 曾經在確定空气阻力方面，作过廣泛的实验。由整理上千个圖表所得的結果，他証實了空气阻力系与其速度之平方和物体的面積成正比，並且確定，当气流方向成水平时，总空气动力的垂直分力与其水平分力之比，等於表面与空气气流方向間所成傾角之余切。

有名的俄罗斯科学家康士坦丁·埃杜阿尔多維奇·柴柯夫斯基 (Константин Эдуардович Циолковский) 曾經在空气和气体动力学的發展方面，作了巨大貢獻。他在研究反作用运动和全金屬飛船構造的同时，还研究了重於空气的飛行器的理論和計算。“論利用机翼飛行問題”这一巨著 (1891年)，完成了他的理論探求和他的廣泛实验。这个著作，得到了儒考夫斯基極高的評價。

只有在創造出風洞以后，实验空气动力学才能建立牢固的基礎。所謂風洞，便是借以取得人工空气流的特殊設備。俄罗斯的第一个風洞，是在上世紀的九十年代，由 К.Э.柴柯夫斯基建成的。

不論在理論和实验空气动力学方面，其最光輝的發展階段，都是和尼古拉·叶果洛維奇·儒考夫斯基的名字，分不开的。

远在上世紀末期，Н.Е.儒考夫斯基在从事理論研究的同时，便已着手於空气动力实验，而当他在莫斯科大学建成風洞 (1902年) 以后，这些实验的範圍便特別廣泛了。这一風洞具有 75×75 厘米的正方形剖面，足以獲得每秒 9 公尺以下的流速。在大学的風

洞里，最先按照廣泛的計劃，開始了系統的空气动力学研究。在同一大学實驗室里，儒考夫斯基安裝了供直昇机状态下的螺旋槳（無前進速度的螺旋槳）試驗之用的儀器。

如所週知，航空實踐的萌芽，標誌着本世紀的開端。航空的重要，要求將空气动力学方面的理論和實驗研究，與以廣泛的傳播。1904年，在H. E. 儒考夫斯基領導下，莫斯科庫奇諾（Кучино）地方，建立了一個專門空气动力学研究院，裝設了一個直徑1.2公尺的相當大的風洞。

庫奇諾空气动力学研究院的風洞，不僅在苏联，就是在國外，也是舉世咸知的。必須指出，這個研究院，在歐洲，是這種類型的首創。在此後五年（1909年），歐菲爾和拉都（Эйфель и Рато）實驗室，才在巴黎創建起來，而哥廷根的潑蘭沱實驗室，還要遲些。

在1909年末期，H. E. 儒考夫斯基在莫斯科大学里建立了一個新風洞，直徑16米，已足以獲得每秒20公尺以下的流速。

也就在1909年，H. E. 儒考夫斯基組成了莫斯科大学高等技術學校的空气动力学實驗室。在這個實驗室里，曾建造兩個風洞：一個150×30厘米矩形剖面的和一個1米直徑圓剖面的。兩風洞里的空气气流速度都達到每秒20米。除風洞以外，該校還裝置了一個由工程師斯列沙來夫（В. А. Слесарев）新建的旋臂机，以及其他各種設備。

在莫斯科大学高等學校里，大批天才學生團結在H. E. 儒考夫斯基的週圍，他們當中的很多人，後來都在航空科學的各種不同領域中，成了最偉大的專家。其中有：尤列也夫（Б. Н. Юрьев）院士，由於他在空气螺旋槳、直昇机和實驗空气动力学方面的研究，而舉世聞名；有名的苏联飛機設計家屠波列夫（А. Н. Туполев）院士；斯傑奇肯（В. С. Стечкин）院士；維青肯（В. П. Ветчинкин）教授等等。

H. E. 儒考夫斯基、С. А. 查普雷金和其他很多科學家們的一切極重要的發現，組成了一個空气动力学發展的时代。這些發現，是和莫斯科大学、庫奇諾研究院和莫斯科大学高等學校三處的