

工程氣體動力學

上 冊

蘇聯M. E. 傑依奇著

52.86
693
1:1

高等学校教学用书

工程氣體動力学

渦輪机的氣體動力学基础

上册

苏联 M. E. 傑依奇 著

徐 华 舫 译

苏联文化部高等教育总局批准作为热力專業教材

32592 107

電力工業出版社



內 容 提 要

這本書里講的是渦輪機通路部分的氣體動力學的一些基本問題。首先扼要地敘述了一元氣流和二元氣流的基本理論，繼而敘述了通路部分特殊的氣體動力學問題；其中順序論述了渦輪機噴管中、迴繞式阻隔件中、引射器中和葉柵中的氣流問題，以及整級渦輪中的氣流問題。書中着重討論了關於噴管、引射器和整級渦輪中氣流的各种不同工作情況；最後講述了研究通路中流動的各种實驗方法。

本書是按蘇聯文化部批准的教學大綱編寫的，供動力學院渦輪機製造專業用作氣體動力學基礎這門課程的教材。

本書對渦輪機製造廠的實驗室和設計科工作的工程技術人員，也有參考價值。

М. Е. ДЕЙЧ

ТЕХНИЧЕСКАЯ ГАЗОДИНАМИКА

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ МОСКВА 1953

工 程 氣 體 動 力 學 上 冊

根據蘇聯國立動力出版社1953年莫斯科版翻譯

徐 華 舫譯

*

235R50

電力工業出版社出版(北京前右街26號)

北京市書刊出版業營業許可證出字第042號

北京市印刷一厂排印 新华書店發行

*

787×1092 $\frac{1}{16}$ 開本·13 $\frac{1}{2}$ 印張·263千字·定價(第8類)1.77元

1955年10月北京第1版

1956年9月北京第2次印刷(1,301—3,330冊)

前 言

在現代，工程氣體動力學所涉及的問題很廣，它包括原動力、航空、噴氣技術和彈道學等各個方面。儘管理論基礎一樣，所依據的方程（流體運動方程）一樣，工程氣體動力學在各方面的使用方法是隨應用的部門、即具體的對象和任務而大不相同。因此，在一本書裏要把現代氣體動力學上已經解決了的一切工程問題全部包括在內，特別是在空氣流體力學這門科學目前發展得特別快的情況下，簡直是不可能的。

本書所敘述的是渦輪機（特別是定置式蒸汽渦輪和燃氣渦輪）通路部分的某些基本氣體動力學問題。本書的材料是我在曾榮獲列寧勳章的以莫洛托夫命名的莫斯科動力學院從一九四四年以來的講課稿。

本書是寫給熱工學院，主要是給動力學院和工科學院的渦輪製造專業氣體動力學基礎課程做教材用的；但在渦輪方面做研究工作或做熱力計算工作的工程師也可以加以利用。

一本書的任務基本上規定了它的內容以及它的材料的安排法。考慮到熱工專業的和熱工工程師在熱力學方面已有很好的基礎，這本書就沒有把專講熱力學基本概念的章節包括在內。同時，書中還相當廣泛地使用了熱力學上的方法，尤其是在熱力圖綫上清晰地分析氣流過程的那種方法用得最多。

前四章講的是一元氣流和平面氣流（二元氣流）的理論基礎。第一、二兩章簡要地講述了理想可壓流體，即所謂等熵氣流的基本理論。第三、四兩章講的是某些不可逆的絕熱流動過程——氣流與外界無熱交往的某些不可逆流動過程。

第五至第八章講的是渦輪通路中一些專門的氣體動力學問題。第五、六兩章中講的是噴管、擠壓器、迴繞式阻隔件和引射器等件的計算法概念。第七、八兩章中講的是渦輪葉柵的實驗研

究結果和葉棚理論中的某些基本問題，以及整級渦輪機的基本問題。第九章講的是研究渦輪通路部分的實驗方法。

實用問題，主要的都是用一元的看法來處理的。對於某些器件在各種不同情況下工作的氣體動力學問題，書中用了相當多的篇幅加以分析。

書中特別着重闡述問題的物理本質以及所得結果之物理意義。本書用了相當大的篇幅介紹實驗資料。

本書所敘述的都是蘇聯學者的研究成果。一部分材料是以莫洛托夫命名的莫斯科動力學院熱機教研室同人的工作成果，其中也有一部分是作者個人的工作成果。

本書的編寫曾得到科學技術碩士斯傑潘諾夫（Г. Ю. Степанов）、科學技術碩士薩莫依洛維奇（Г. С. Самойлович）副教授和科學技術碩士普拉德傑欽斯基（Г. И. Предтеченский）的大力幫助。第7-1節至第7-3節是斯傑潘諾夫寫的；第5-4節和第5-6節是薩莫依洛維奇寫的；第8-6節和第8-7節是普拉德傑欽斯基寫的。薩莫依洛維奇和勃柳陀夫（В. П. Блюдов）副教授在閱讀某些章節的原稿時，提供了很多寶貴的意見。

作者在給渦輪專業講授氣體動力學基礎時，以及在編寫本書時，曾多次听取蘇聯科學院通訊院士、莫斯科動力學院熱機教研室主任謝格里雅也夫（А. В. Щегляев）的寶貴意見。

在本書的評閱和編輯過程中，科學技術碩士舒姆雅茨基（В. Я. Шумяцкий）副教授提了許多重要的意見。

作者對於上述諸人，以及以莫洛托夫命名的莫斯科動力學院熱機教研室和實驗室的全體同人，謹致深厚的謝意。

作者還要向古赫曼（А. А. Гухман）教授表示誠摯的感謝，他對原稿的某些章節提供了很有價值的意見。

讀者對本書內容和材料安排的任何批評性的意見，作者都將以感激的心情來接受。

目 錄

前 言

緒 論	1
-----	---

第一章 氣體動力學諸基本方程。一元等熵氣流	8
-----------------------	---

1-1. 流動各參數	8
------------	---

1-2. 連續方程	11
-----------	----

1-3. 動量方程在直角座標系三軸綫上的投影	14
------------------------	----

1-4. 能量方程	16
-----------	----

1-5. 一元流動的歐拉方程	17
----------------	----

1-6. 音速	21
---------	----

1-7. 能量方程的幾種形式	25
----------------	----

1-8. 流管任意截面上的各項流動參數	28
---------------------	----

1-9. 速度沿流管的變化。折合流量	35
--------------------	----

第二章 氣體的等熵平面流動	41
---------------	----

2-1. 流体動力學的某些基本概念。渦流及環流。速度環量	41
------------------------------	----

2-2. 流體的位流	49
------------	----

2-3. 压强係數。臨界 M 數	58
--------------------	----

2-4. 按小干擾法計算壓縮性影响	62
-------------------	----

2-5. 按赫里斯齊安諾維奇法作二元氣流的可压性影响修正	67
------------------------------	----

2-6. 儒柯夫斯基定理	70
--------------	----

2-7. 二元超音速氣流	72
--------------	----

2-8. 特性綫網圖	85
------------	----

2-9. 膨脹波的相交与反射	92
----------------	----

第三章 氣流中的衝波	100
------------	-----

3-1. 衝波的形成	100
------------	-----

3-2. 斜衝波的諸方程	102
--------------	-----

3-3. 衝波極綫圖	112
------------	-----

3-4. 熵在衝波中的變化	117
---------------	-----

3-5. 衝波中的損失。波阻。is-圖綫上的衝波極綫圖	119
-----------------------------	-----

3-6. 衝波的相交	123
------------	-----

3-7. 氣流進行分階滯止	131
---------------	-----

3-8. 衝波的反射	136
------------	-----

(a) 衝波在固体壁面上的反射	136
-----------------	-----

(b) 衝波在射流自由边界上的反射	138
-------------------	-----

3-9. 衝波与膨脹波的交互作用	139
------------------	-----

3-10. 錐面衝波	140
第四章 有摩擦的氣流	145
4-1. 有摩擦的一元流。基本方程	145
4-2. 等截面管中的氣體流動	149
4-3. 等截面管中的摩擦損失。實驗數據	153
4-4. 附面層。基本概念	159
4-5. 附面層的積分式	173
4-6. 直壁層流附面層的計算法	176
4-7. 附面層的兩個假想厚度。附面層積分式的另一種形式	180
4-8. 紊流附面層的計算法	183
4-9. 高速下的附面層	190
4-10. 物体在亞音速流與超音速流中的阻力	193
第五章 氣體經收縮形噴嘴和孔口的外射流動。	
迴繞式阻隔件	204
5-1. 收縮形噴嘴	204
5-2. 收縮形噴嘴的各種工作情況	207
5-3. 多級錯置收縮噴嘴中的氣流	217
5-4. 多級錯置噴嘴中的氣流量	225
5-5. 氣流經尖邊緣孔口的外射流動。第二臨界壓強比	229
5-6. 迴繞式阻隔件	236
第六章 拉瓦爾噴管及擴壓器。引射器	244
6-1. 超音速噴管的計算法	244
6-2. 在非計算點上工作的二元拉瓦爾噴管	248
6-3. 錐形拉瓦爾噴管在非計算點上工作。噴管張角的影响	251
6-4. 斜斷口的超音速噴管	270
6-5. 擴壓器	272
(a) 亞音速擴壓器	272
(b) 超音速擴壓器	277
6-6. 引射器	284
6-7. 引射器的各種工作情況	295
6-8. 怎樣選定引射器的幾何參數	307
附 錄	312
氣體動力學函數表($k=1.4$)	312
衝波圖綫	
參考文獻表	317
名詞對照表	320

緒 論

苏联共产党第十九次代表大会的具有歷史意義的決議，擬訂了从社会主义社会过渡到共产主义社会的具体綱領。实行全國電氣化在這個綱領裏佔着很重要的地位。第五個五年計劃規定要大大增加熱力發動機的產量，特別是蒸汽渦輪機的產量將增加一兩倍。

同時還向動力機械製造業提出這樣一個任務：要保證提高他們所生產的熱力發電設備的經濟性和可靠性，同時要簡化機器的構造和製造技術。

在解决这些重大任務的時候，我們應該在研究氣體動力學的基礎上，對葉輪機通路部分的完善度給以極大的注意。

空氣流体動力學——一門關於可壓流体与不可壓流体運動規律的科學——乃是一般力學的一個分支。

可壓流体与不可壓流体的區別在於：不可壓流体在流動中密度簡直沒有變化，而可壓流体是有彈性的，它的密度在壓力或溫度改變時是可以大大變化的。這裏應該指出，一切實際液体都是可壓縮的，但其壓縮性太小，因此，在解流体動力學的問題時，這種壓縮性在大多數情況下可以略去不計。

氣體，正像後面將要說到的那樣，只有在速度很低時，才可以視作不可壓流体，所謂低速，是指和氣體中微弱擾動的傳播速度（音速）比較起來低到不可並比的速度。

空氣流体動力學以力學的基本規律為依據，已經達到了高度的發展，且在現時已經成為与許多獨立的學科有關聯的綜合學問了。

在空氣流体動力學總的綜合學問中，研究氣體以高速流動的各種問題的那一部分，即高速空氣動力學，或稱氣體動力學，對於熱能學是很重要的。

近年來，隨着噴氣技術的發展，特別是航空和砲術中飛行速度的急劇增高，隨着渦輪機（蒸汽渦輪和燃氣渦輪）和壓氣機中工作過程效率的提高，氣體動力學更獲得了特別重要的意義。

空氣流體動力學的產生和發展，和其他部門的科學一樣，是和十九世紀工業與技術的急劇發展有關聯的。這一門力學的創始者是許多學者，這些人兩百多年來不斷地在理論上和實驗中研究流體的運動問題。

理論流體力學的萌芽期可以算作十八世紀中葉，當時俄羅斯科學院兩位卓越的院士列昂納爾德·歐拉（Леонард Эйлер）和但尼耳·柏努利（Даниил Бернулли）以他們的著作奠定了流體運動的理論基礎。

天才的俄羅斯學者羅蒙諾索夫（М. В. Ломоносов）的著作對於空氣流體動力學的發展，起了很大的作用。羅蒙諾索夫的研究成果（物質守恆定律和能量守恆定律）對同時代的列昂納爾德·歐拉的理論已經發生了影響。

氣體動力學的產生經歷和外彈道學上提出的問題有密切的關係，後來則和蒸汽渦輪中熱力過程的理論有密切的關係。

在氣體動力學發展的初期，它的应用範圍僅限於一些與砲彈在空中飛行有關的問題。還在1745年，當列昂納爾德·歐拉分析球狀子彈的某些阻力實驗數據時，他就給在空氣中作高速運動的物體上的作用力立下了一個相似律^①。結果，歐拉得到了一個計算球在空氣中運動的阻力係數的公式；在這個公式裏，壓縮性的影響是按飛行速度對音速之比（ c/a ）來計算的。然而歐拉沒有想到，進入超音速之後，阻力規律應該起變化，所以他給阻力係數定下的關係式，僅適用於亞音速的運動。

砲彈超過音速時，阻力係數的急劇增大及阻力規律在超音速運動中的改變，首先為俄羅斯陸軍砲兵學院的馬伊葉夫斯基（Н. В. Маиевский）教授所發現，他是用尖頭的柱形砲彈做實驗的。

^① 見佛蘭克爾（Ф. И. Франкль）著：「論歐拉在創立空氣對高速物體的阻力相似律上的發明權」，ДАН 第二十卷，第一號，1950年。

过了些時候，奥地利物理学家馬赫 (Θ. Max) 用实验方法確定了這樣一個關係：音源固定的音波(微弱擾動綫或特性綫)和超音速流綫之間的角度是用速度比 c/a 來表示的。然而，馬赫还没有把這個速度比当作高速運動的主要相似準則看，还没有把這個速度比看作是影响高速運動之物体阻力的一个主要因素。

蒸汽在渦輪机通路部分流動的一些基本問題的解决，一開始就決定於氣體動力学的發展水平。早期第一架能够用到很高的超臨界熱差做功的單級小馬力衝擊式蒸汽渦輪，是古斯塔夫·拉瓦爾 (Густав Лавал) 設計的，他為了獲得超音速氣流發明了拉瓦爾噴管。第一次為拉瓦爾用在蒸汽渦輪上的拉瓦爾噴管，現在在噴氣机發動机和許多別种使用氣流的器械裏已經得到很廣泛的应用。

葉輪机的理論基礎是列昂納爾德·歐拉奠定的。他的出發點是一元的概念，即假定在葉輪机內，氣流一切參數祇沿一個方向有顯著的變化。據此，歐拉推得了工作輪扭矩的基本方程。基於这种假設的理論稱為流股理論(即一元理論——譯者)。歐拉的流股理論後來成了發展各種類型的葉輪机：水力渦輪、蒸汽渦輪、燃氣渦輪、壓氣机和通風机的基礎。

計算蒸汽渦輪，从開始到現在一直是用流股理論做基礎的。在這一理論範圍以內，滿意地解決了許多問題：關於渦輪机的基本性能和各別部分的構造。基於這個理論的計算方法是非常簡單的，而且正如多年來使用蒸汽渦輪的實際經驗所指明的，用这种算法求渦輪机的整体性能時，其結果的精確度是可以接受的。

流股理論雖具有上述這些優點，但它有一個很嚴重的缺點，那就是不能应用它來計算渦輪葉片的準確形狀，因此，也就不能指出提高效率的途徑。

按流股理論算出來的葉輪机總性能(效率、熱量和氣量的單位消耗量)所以能和實驗有很好的吻合，全靠實驗室裏用精細的實驗方法製造葉柵。由於葉片是這樣精製的，渦輪製造廠就掌握了葉柵的修正係數。根據这种係數，就可能相當準確地求出渦輪机通路面積的尺寸以及通路中的損失。

流股理論在蒸汽渦輪的計算上能得到這樣廣泛的應用，是由於它的葉片機構具有兩大特點。照例，在渦輪葉柵中，熱焓能順利地作很大的下降；這時葉柵應該保證氣流得到很大的折轉角度。因為這個緣故，渦輪葉柵的翼型必須具有很大的彎度，葉柵的相對柵隔很小——柵隔等於 0.35 弦長至 0.80 弦長，換句話說葉柵的稠度是很大的。同時，熱焓既有很大的下降，氣流在葉片機構中必達很高的速度。多級渦輪機的通路中， M 數總在 0.3 至 1.7 之間。在這種速度下，壓縮性的影響是必須計及的；在這個問題上如打算用空氣動力學的方法去計算渦輪葉柵，我們會遭遇到很大的困難。尤其因為氣體動力學的方法，直到今天為止，還不能解決複雜的三元氣流問題。而可壓性的影響，在一元流的範圍內，則可以用最簡單的方法計算出來。

這裏應該指出，渦輪機的通路部分由於具有上述的特點（葉柵的稠度很大），用流股理論就能滿意地解決一個重要的問題：決定氣流走出葉柵時的平均指向。此外，一元流的圖綫還使我們得以用比較簡單的方法計算渦輪機在各種情況下的工作。

偉大的俄羅斯學者儒柯夫斯基(Н. Е. Жуковский)和恰普雷金(С. А. Чаплыгин)的經典著作，對於空氣流體動力學的發展起了很大的作用。空氣流體動力學發展上新的巨大的飛躍，是和他們兩個人的名字緊緊地聯在一起的。

儒柯夫斯基和恰普雷金所研究出來的機翼理論，對於空氣流體動力學是一個鉅大的貢獻，這個理論為航空事業的發展創造了必要的條件。

儒柯夫斯基是機翼舉力學說的奠基人。

在茹柯夫斯基的許多卓越著作中，有一部螺旋槳渦流論，已成為研究葉輪機氣動計算法的堅固基礎。

儒柯夫斯基又是實驗空氣動力學的創始人，他是許多空氣動力學實驗室的組織者，他是蘇聯最大的中央空氣流體動力學研究院(ЦАГИ)的創辦人。

儒柯夫斯基和恰普雷金在機翼和翼型葉柵方面的著作，以及

他們在平面截面(即在葉輪机的某個半徑 r 上取一圓截面，然後展開，把半徑 r 處的流動當作平面流看——譯者)的假定之下對葉輪机作用原理所做的研究，對於葉輪机氣體動力學的發展起了決定性的作用。

儒柯夫斯基創始的俄羅斯空氣流體動力學學派培養出了一批卓越的專家。在蘇聯學者赫里斯齊安諾維奇(С. А. Христианович)、拉佛蘭傑夫(М. А. Лаврентьев)、凱耳賓施(М. В. Келдыш)、柯慶(Н. Е. Кочин)、陀羅德尼麥(А. А. Дородницын)、斯傑奇金(Б. С. Стечкин)、謝陀夫(Л. И. Седов)等院士和洛強斯基(Л. Г. Лойцянский)、佛蘭克爾等教授的著作中，已經解決了可壓流體力學的基本問題。蘇聯在解決渦輪机製造中所提出的許多實際問題上，已經廣泛地應用了空氣流體動力學上的成就。

儒柯夫斯基和恰普雷金的典型研究中有許多成果，直到最近才廣泛地應用在渦輪机的製造上。例如，儒柯夫斯基關於定值環量的空氣螺旋計算法，到了1945年才為烏瓦羅夫(В. В. Уваров)教授用來設計蒸汽渦輪和燃氣渦輪的長葉片。

恰普雷金那篇成為氣體動力學(作為一門獨立科學)基礎的論文[論氣體射流](1902年)，將近三十年很少有人去研究它。直到1930年，人們才開始對這篇論文作創造性的領會，並作了進一步的發展。最近幾年來，隨著噴氣技術的發展，恰普雷金這些研究的價值就特別大了。

恰普雷金這篇論文的主要觀念建築在可壓流與不可壓流的對比關係上。這使他得以用引入新變數的法子，把氣體的運動方程改變成很簡單的形式。他所用的新變數——速度的矢量值和速度的矢量角——是和氣流的物理圖畫有直接關聯的。恰普雷金的方法(速度面法)，現在在研究可壓流體流過物體這方面的研究上，大大地推廣了。氣體動力學方面的一切新研究，包括可壓流體流經葉柵的位流論文，都開始以恰普雷金的方程為依據。恰普雷金的方法，現在已經推而及之於超音速流，並且在研究最困難的混合流(有亞音速區也有超音速區的氣流)上，也在廣泛應用着。使

大有成效的恰普雷金法得到這樣進一步的發展，其功績是屬於整個蘇聯氣體動力學方面的學者的。

赫里斯齊安諾維奇院士和許多其他蘇聯學者的著作，解決了亞音速氣流流過翼型葉柵時的許多重要問題，並且詳細地研究了超音速氣流的許多特性。

儒柯夫斯基和恰普雷金關於葉輪機葉柵的理論計算法，在許多蘇聯學者的文章裏得到了進一步的發展。在這方面，柯慶院士，謝陀夫院士，洛強斯基教授，西莫諾夫(Л. А. Симонов)教授，勃拉赫(Э. Л. Блах)教授和其他一些學者的文章有很大的貢獻。

除理論空氣動力學和理論氣體動力學方面獲得了鉅大的成就之外，蘇聯的空氣動力學方面的學者們還順利地解決了許多實用問題，其中包括工業上使用的許多器械——管子及葉輪機的基本通路部分中的流体流動問題。

最近十年來，蘇聯的熱能學發展得特別快。

兩個先進的葉輪機製造廠(列寧格勒斯大林金屬工廠和哈爾科夫基洛夫汽輪發電機製造廠)在戰爭期間製成了許多種高壓高速的渦輪機。現在正在大規模製造使用超高初始參數值的蒸汽的渦輪機。第一部功率為150 000瓩，轉速為每分鐘3000轉、初始壓強為170絕對大氣壓的蒸汽渦輪是列寧格勒斯大林金屬工廠設計製造的。

戰後我們(蘇聯)渦輪機製造業發展的特點，是工廠和學術方面的渦輪專家緊密的聯系，並努力應用蘇聯在理論空氣動力學上、實驗空氣動力學上以及氣體動力學上的成就，以進一步提高渦輪機通路部分的效率。在兩個主要的科學研究所——以波耳祖諾夫命名的中央鍋爐汽輪機研究所、以捷爾仁斯基命名的全蘇熱工研究所裏，在以莫洛托夫命名的莫斯科動力學院、和以加里寧命名的列寧格勒多科性工業大學等高等學校裏，以及在工廠的實驗室裏，都廣泛地開展了對於渦輪機和壓氣機通路部分的研究工作。把這些研究的成果貫徹到葉輪機的實際設計工作中去，就提高了

渦輪設備的經濟性。

最近在燃氣渦輪和渦輪式噴氣發動機方面所獲得的成就，迫使我們要對蒸汽渦輪機的某些計算理論和方法重加考慮。經驗說明，大力推廣燃氣渦輪設備的嚴重障礙在於這種發動機不經濟；不經濟的原因很多，其中有一個原因就是葉輪機通路部分的氣動性能不夠好，特別是壓氣機通路部分的氣動性能更差。提高渦輪機和壓氣機通路部分的效率是個困難問題，這就促使人們努力對葉片——渦輪葉柵和壓氣機葉柵做實驗上和理論上的研究。

同時應該着重指出，多年來關於蒸汽渦輪機的研究、設計和使用經驗，已經在燃氣渦輪上廣泛地應用了，這就大大地減輕了對於定置式燃氣渦輪設備和渦輪式噴氣發動機某些基本問題的研究。

現在關於通路部分的研究正在緊張進行，其目的是要給葉輪機的氣動計算法及設計法由一元流理論進而轉變為以較複雜的三元流理論為依據，打下結實的基礎。

目前，通路部分的許多重要問題是依靠許多實驗數據用近似法解決的，這些實驗數據應該經過系統的整理。研究這些方法，並整理這些實驗資料是工程（實用）氣體動力學的研究範圍，或者更確切些說，是工程氣體動力學中的一個分支——葉輪機氣體動力學的研究範圍。

第一章 氣體動力學諸基本方程。

一元等熵氣流

1-1. 流動各參數

我們知道，靜止氣體的狀況是為壓強 p 、密度 ρ 和溫度 T 這三個狀況參數所標定的。熱力學裏這三個狀況參數之間有一定的關係存在。在理想氣體裏，這個關係是一個很簡單的狀況方程

$$\frac{p}{\rho} = gRT, \quad (1-1)$$

式中 g ——重力加速度，因次是公尺/秒²。

R ——氣體常數，因次為公斤·公尺/公斤·度。

公式(1-1)裏的壓強單位用公斤/公尺²，密度用 公斤·秒²/公尺³，溫度 T 用絕對溫標(°K)。

空氣的氣體常數①

$$R = 29.27 \frac{\text{公斤} \cdot \text{公尺}}{\text{公斤} \cdot \text{度}}.$$

過熱水蒸汽的氣體常數(近似的)

$$R = 47.1 \frac{\text{公斤} \cdot \text{公尺}}{\text{公斤} \cdot \text{度}}.$$

狀況方程裏也可以不用密度 ρ ，而用氣體的比重或比容。

密度、比重和比容三者之間有下列顯見的關係：

$$\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{1}{g\nu},$$

式中 γ ——比重；

① 在許多場合下，把狀況方程(1-1)裏的兩個常數合成一個是很方便的，即把這個方程寫成：

$$\frac{p}{\rho} = \bar{R}T, \quad (1-16)$$

式中 $\bar{R} = gR$ ，因次為公尺²/秒²·度。

v ——比容。

氣體流動的時候，各狀況參數就不僅是氣體的物理特性，而且也是氣流的動力學特性。一般說來，流場上由一點到另一點，由此一瞬間到下一瞬間，這些狀況參數都要變的。所以， p, ρ, T 都決定於所在點的位置和時間，應該都作點參數來求。

在流動的理想氣體的每一點上，這三個狀況參數彼此的聯結關係仍是狀況方程(1-1)。在許多重要的實用場合裏， p, ρ, T 三個參數之間的關係往往得表為較複雜的關係式。談到實際氣體的物理屬性，那末分子的體積和分子間的相互作用力就都不能略去了。這兩個因素特別是在氣體的壓強很高，因而一定容積裏分子的濃度很高時，尤其顯得重要。這時，狀況方程裏就得包含有氣體體積(密度)和壓強的修正因數在內。

這樣說來，在一般的非定型流動裏，氣體各狀況參數都是座標與時間的函數：

$$\left. \begin{aligned} p &= p(x, y, z, t), \\ \rho &= \rho(x, y, z, t), \\ T &= T(x, y, z, t), \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

式中 x, y, z ——點的三座標：

t ——時間。

可壓流體的流動問題，最後必歸結為，求氣流中的物體與流體之間的相互作用力(體外流動)，或在內部流動(管流或槽流)的情況下，便歸結為求氣流的能量平衡關係。無論它是哪一種流動，都要求出流動的運動學圖畫，即流動的速度場。這也就是說，除了(1-2)的關係之外，還應該求氣體微團的各分速，這些分速也都是座標與時間的函數。氣體微團由這一點到另一點，由此一瞬間到下一瞬間，它的速度是變化的。因此，速度在三座標軸上的三投影可以表為這樣三個方程：

$$\left. \begin{aligned} u &= u(x, y, z, t), \\ v &= v(x, y, z, t), \\ w &= w(x, y, z, t), \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

式中 u ——速度矢 $\vec{c}$ 在 x 軸上的投影;

v 和 w —— y 和 z 兩軸上的投影。

實際流体(粘性流体)的流動參數中還有粘性在內, 粘性也是點參數。

大家知道, 粘性係數

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{\partial c}{\partial n}}, \quad (1-4)$$

式中 τ ——作用在物面上的摩擦力, 公斤/公尺²;

$\frac{\partial c}{\partial n}$ ——該摩擦面上某指定點的法向速度坡度, 其因次是

$$\frac{1}{\text{秒}}。$$

粘性係數的因次是公斤秒/公尺²。

一般的實際氣體, 粘性係數應是溫度和壓強的函數。不過, 在很大的壓強變化範圍內, 粘性係數的變化極微, 所以壓強的關係可以略去不計。於是, 粘性係數就只是溫度的函數了。各種氣體的粘性係數對溫度的變化公式都是由實驗得出來的。

這裏要指出, 公式(1-4)所示的牛頓的摩擦定律, 只在層流時是對的。如果流態是紊流, 那末摩擦係數就完全是另一個樣子了, 它對應於另外一種複雜得多的內摩擦關係。

這一章我們只講沒有摩擦力存在的氣體流動。

要解決前面所提到的那個基本問題, 必須找出作為座標及時間的函數的 u, v, w , 以及 p, ρ, T 各量。這裏只講定型氣流, 上述那些氣流的參數都只要根據座標 x, y 和 z 求出。

解問題時, 我們提有六個基本方程: 動量在 x, y, z 三座標軸上的三個投影方程, 質量守恒方程, 能量守恒方程, 狀況方程。本章裏只講無熱交換、無熱傳導、無摩擦的定型氣流。

這種流動當然只是實際流動的理想化模型。在實際流動裏有摩擦, 有溫度坡度, 相鄰的氣流微團之間有內在熱交換。

然而利用可壓流這樣的簡化模型, 在氣體動力學裏確佔很重