

数值计算方法在空气动力学 中的重要性和可能性*

A. A. 多罗特尼欽

編者按：这篇文章是苏联科学院計算中心主任 A. A. 多罗特尼欽院士在訪华期間在中国科学院力学所所作的报告的簡要記錄。我們认为，这篇报告指出了空气动力学发展中的一个新趋势，即計算技术的广泛应用，在理論与实验的关系、在研究所应着重目的等方面都給我們很大的启发，特此发表，供讀者参考。

今天不准备用复杂的数学公式来折磨大家，只想讲一些計算方法在现代空气动力学上的意义，以說明实验方法和計算方法的相互关系。

近代科学技术的发展要求使用一些新的方法。在从前工程技术中，要設計一个新东西时，需要經過长期試驗和实物的測視工作。近代科学技术发展的特点是經常出現新的东西，并要求能很快得出結果，而旧的方法就来不及应付这样的要求；即使用旧的方法进行研究、設計等实验給出結果的时候，东西本身已經陈旧了。因此，計算方法在近代科学技术中愈来愈占决定性地位。

近代电子计算机創造出来之后，在科学上提供了解决問題的新可能性。过去科学家在研究新的問題时，往往需要很多時間才能解决，故在研究中不得不进行簡化工作，去掉許多非本质的因素，留下几个本质的因素，才能把結果計算出来。Max Planck 就曾讲过：“科学家的本領在于丢掉非本质的因素，而留下几个本质的因素。”当然，排除非本质的因素是重要的，但是在判断本质与非本质这点上，往往是主观的，拋除許多因素所得的結果，只能是初步的近似的估計而已。这样看来似乎是矛盾；就是，一些定量的方面的結果往往是估計的，而定性的結果是从实验中得到的。过去計算工作也作的很多，但是只是用来判断某一些因素在定性方面的影响。过去在設計时，計算也只能提出模型在某一方面需加以改进的意見。近代电子计算机工作速度比现在台式电动计算机要快几千、几万甚至几十万倍。当然这些比較是根据一些假定来进行的。一般計算員要記錄中間結果。在工作很紧张的情况下，每一計算要半分鐘。在电子计算机上如果每秒作几个运算，其中有一半是邏輯运算，計算員在脑袋里工作这时間就不考虑进去。这样估計电子计算机要比計算員快 $15n$ 倍。假如考虑到电子计算机所用計算公式一般与人用的計算公式不一定相同，应该把人的計算速度提高 3 倍，电子计算机便比人快 $\frac{15n}{3} = 5n$ 倍（ n 是每秒钟所作运算次数）。如果用 БЭСМ-2 要比人快 15,000 倍，电子计算机进行一小时的工作，普通人

* 1959年6月3日在力学所作报告的簡要記錄。

三班輪換要計算 5 年,這是一個從量變到質變的例子。有了電子計算機就可以把所有的只要能影響過程的因素都考慮進去,過去傾向於把問題簡化,而現在卻傾向於“複雜化”了,如果對一個過程的基本規律已經了解,利用電子計算機可以得到比實驗更準確的結果,而且把實物測視時間縮減到最短。過去,試驗一個新的東西,從設計到實物測視的過程往往很長,而最後的實物和最初設計可以完全不同——最初設計幾乎一點也沒有保留下來。但是,如果我們利用電子快速計算機,就可以把實物測視階段縮短很多,它的作用只是排除一些象俄國俗話所說的“沒有大害只會咬咬人的小狗”而已。當然並不是說有了計算機就不要實驗工作;現在實驗工作可以分為兩種類型:

1. 一種是建立物理基本規律、測定基本物理常數,這類實驗是任何計算機都不能代替的。

2. 另一種是模型試驗工作;這就是當基本規律已經建立,用量綱分析相似準則可以把在模型上得到的結果推到實物上去。這種試驗無非是解基本方程的工具,因此這種模型實驗工作在原則上可以用電子計算機代替,而且還可以比實驗得出更快、更準確的結果。

在一些新技術領域中,如原子能、噴氣技術、自動化這些方面的发展与電子計算機差不多,发展是同时的。很難想象,沒有電子計算機,它們能得到象目前这样的发展。在一些已經有多年历史的科学技术中情况便不同了,他們已經形成了本身的研究方法,一般只能作很粗糙的計算工作,因此,他們對於使用電子計算機不很信任。由於惰性,他們的這種方法被保留下來,在這些方面,電子計算機的应用也正在為自己開辟道路。如果將電子計算機应用進行些宣傳,這些方面要求計算機的工作就會增加很多。空氣動力學可以說是古老的科學部門之一,已經建立了一套實驗方法,但是由於飛行速度的提高,模型試驗愈來愈昂貴,建立跨聲速達二米直徑的風洞所要求的電量相當於十個大的紡織廠,而用風洞進行跨聲速試驗的結果準確度不高,現在計算技術已經進入了這個領域。

現在空氣動力學已經達到了這樣一個極限,用 Euler 方程和 Navier-Stokes 方程得到的相似律,已經不大靠得住了。在高速、高溫氣流中,要考慮氣體的化學組成的變化,這裡出現了分離和電離現象,出現了新的相似律準則。在這個階段以前,過去主要的特徵數是雷諾數和馬赫數,而在新的過程中;除了它們以外,還要考慮其他的準則。目前很難建立一個風洞能照顧到所有的相似準則,因此計算方法在空氣動力學中的应用不僅快和便宜,而且是不可避免的,在另外一些高溫高速的氣體基本規律還未算清楚的情況下,只有等待此規律得出之後並有了一套計算方法時電子計算機才能發揮作用。因此,現在空氣動力學的发展有两个主要方面:

(1) 進行一些物理的基本規律實驗;

(2) 找出解基本運動方程的計算方法。

今後模型試驗的意義已不象過去那樣;過去是利用來獲得一些空氣動力參數(如象由實驗得到的舉力系數、阻力系數),然後根據相似準則推到實物上去,而今後模型試驗只是用來驗證計算是否正確。鑑於這一點,沒有必要建立一些巨型風洞,因為它們並不能給出所要求的結果。

現在舉例來說明用計算方法得到的結果:首先,一般空氣動力學問題:繞任意形狀的物體空間非定常流動問題在電子計算機上還是不能解決的。因此,空氣動力學工作者向

电子计算机设计工作提出这样要求,建立每秒运算 50~100 万次计算机,只有这样才能解决上述问题。至于平面定常问题、轴对称问题、一维不定常问题(两个独立变数),利用电子计算机已取得很好结果。另一方面,关于计算三维定常问题、二维非定常问题已经进行了一些尝试,不过目前在计算机上解决这些问题还是比较困难的。关于这方面的工作,在苏联有两个方面:(1)把偏微分方程变成常微分方程;(2)用差分方法。近代高速空气动力学的解的特点是其中出现间断(激波),因此要求电子计算机含有间断解的准确计算

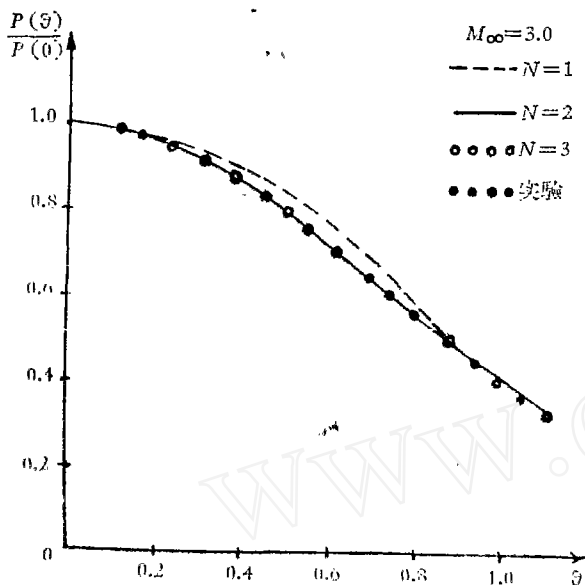


图1 当无穷远处来流的 M 数为 $M_{\infty} = 3$ 时,绕圆柱的表面压力分布与实验结果的比较

方法。我们用差分法来解决空泡问题得到的结果常常是很可怜的,有时看来收敛性也很好,但并不收敛为真正的解。比如有些守恒关系(流量、动量)不满足。有鉴于此,有一些数学家、物理学家认为用差分代替微分不应是任意的,而必须从积分守恒观念出发,从积分守恒观念出发后,用差分法就可以得到比较好的结果。顺便指出,使用这种方法,即使我们的网格分得很粗,都可以得到很准确的结果,以致使一些不善于用物理观念想问题的数学家也感到惊奇。利用这种积分关系的方法对于所有数学问题都适用,对椭圆、抛物线、双曲线甚至混合型也能用,这种方法特别是对解脱体激波绕

流问题很有效。而这个问题的有很大的实用意义,因为在高超飞行中,空气动力特性受头部影响最大,现有上百篇空气动力学文献在考虑这个问题。美国在正问题(给定几何形状求激波形状和流场)方面工作不多,更多的是在反问题上,即事先假定激波形状反过来求被绕流物体的形状。当苏联这种方法发表之后,美国不仅在正问题上而且在其他问题上也广泛采用。

现在我们来举绕圆柱体的脱体激波问题^[1]为例, O. M. Белоцерковский 进行了一级、二级、三级近似计算,其压力分布结果如图(1)所示。图(1)表明二级近似与三级近似大部分重合,只是在尾部上不符合,图(1)中的实验数据是 Kim Chul-soo 的实验结果^[2],证明理论计算和实际结果很符合。

当然对于实际有兴趣的不是平面问题而是迴转体钝头的绕流问题,上面提到的方法可以应用,而且用一阶近似就可以得到准确结果。

还有一个以前意想不到的结果,通过计算得到声速线的形状和以前想象的不同:在图2中表示了过去想象的声速线及超声速区域中的特性线和用新方法算出来的结果之间对比。

这一结果开始大家都不相信,甚至于 Kim Chul-soo 由实验得出的结果和我们计算机上得出的相似,可是他自己当时没有把握,认为是实验误差。后来,在理论上也证明了这

些声速线和激波与物体表面形成的角度是应该象我们计算出来的那样。

此外, 在原子能物理中计算问题要比这些问题复杂得多。在空气动力学中虽然问题比较简单些, 但计算方法今后肯定愈来愈重要, 特别是空气动力学问题如喷管流动、扩压管流动之类, 此外, 还有迴轉体问题, 尖劈的跨声速流动问题都已在电子计算机上顺利地获得解决。

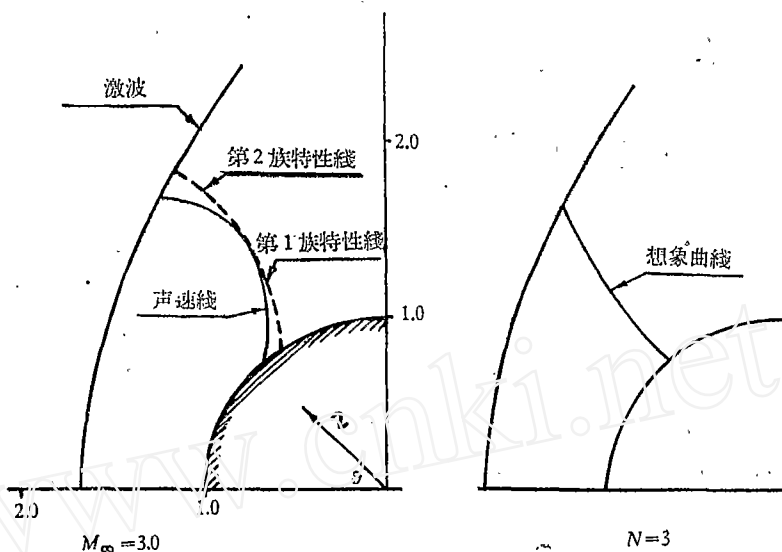


图2 当无穷远处来流的 $M_{\infty} = 3$ 时, 用三级近似所给出的流动情况

我愿号召中国空气动力学家注意到电子计算机理论计算工作在发展空气动力学上的重要性。

参 考 文 献

- [1] Белоцерковский, О. М., Расчет обтекания кругового цилиндра с отходящей ударной волной. Вычислительная Математика, № 3, 1958.
- [2] Kim Chul-soo., Experimental Studies of Supersonic Flow Past a Circular Cylinder, *J. Phys. Soc. Jap.*, II, No. 4, 1956.