

# 数 字 实 验 室

K. H. A. Winkler, J. W. Chalmers, S. W. Hodson,  
P. R. Woodward, N. J. Zabusky

John von Neumann 在 1946 年的一系列讲话中指出：即使在基本原则及主要方程已知的条件下，科学家也要进行复杂的、耗资巨大的实验去观测物理现象，其目的不是要证明一个理论，而是要将理论得出的计算结果转换为直接的测量。在这些讲话中，他也曾由此而预见到高速计算机可应用于解决非线性问题，尤其是流体动力学问题，即用“计算机实验”来代替实验室中实验。

在 von Neumann 的时代，计算机设备尚不能完成此任务。但在四十年后的今天，情况已发生了奇迹般的变化。现有的计算机装置，从个人计算机到巨型计算机中心网络，正在使 von Neumann 的预想变为现实。在最近三十年中，我们已着手在大型计算机上建立一种对物理系统进行模拟的方法，就象在计算机上做实验一样。我们把这些已建立的计算与图示系统看作一个“数字实验室”。

## 一、数字实验与传统的研究方法的比较

数字计算法具有解析理论与实验室实验两方面的特点。象进行解析理论工作一样，数字计算以理论概念为基础，通过解抽象的数学方程来揭示物理系统的行为。在这里，自然界服从的定律是已知的，由它们所控制的物理系统应有什么表现是未知的。但是，数字计算很少用于揭示自然界的基本定律，在这方面计算物理与理论物理有着根本的不同。

虽然数字计算不以发现自然界新的定律为目标，但可用此方法来发现前所未有的现象。在这方面，计算就象是物理实验。在给出了适当

的计算工具以后，研究人员可以用一套控制方程去探索物理系统的行为，并寻找有趣的新效应。每一次计算就是对系统在某一新的或特殊的条件下进行的一次模拟。不断地改变这一条件，进行一次又一次的计算，就会获得对此物理系统的一般行为的印象。这种从特殊到一般的研究方法，与实验室内进行的物理实验是相同的。最终也不一定要得到一个代数的表达式来对其一般性行为进行总的定量描述。

数字实验与实验室实验相同的另一个特点是不可避免地要出现实验的不确定性。实验室测量肯定不会绝对准确，实验者要作出很大的努力，使结果的不确定性尽可能地小。而且一个实验者必须知道它的测量值的可能范围，否则其数据会毫无价值。计算物理学家也是这样，不确定性是他们经常遇到的问题。在程序编译中或在计算机机时内合理地缩小不确定性一直是技术人员的研究课题。除非不确定性可以被控制，计算方法就不能完成揭示新物理现象这一主要的任务。理论物理与此相反，它要求准确求解，但准确结果只能在对实际系统进行极端的理想化后才能获得，因而其应用会大受限制。

## 二、数字实验室及其技术要求

下面的讨论仅限于流体动力学领域内。在这一领域内，参变量之间存在非线性的关系，因此对主要物理方程求解有种种困难，这使得数字计算变得十分重要。

目前，观察实验室内流体行为最常用的办法是用各种专门技术进行照相。流体中各处密

度的变化在黑白照片上会产生灵敏的反应。利用向流体内某特定点引进烟雾的办法有时可观察到流线。如将照片连成影片,则可使流动形象化,即使人直接观察到流体中复杂结构随时间的变化。

从事计算工作的流体动力学工作者很自然地会去用类似的办法将他们自己的工作结果显示出来。这里,屏显示代替了照片,将计算出的大量数据直接输入研究者的视觉系统。这样可以很容易地将计算结果与实验室实验的结果进行比较,同时还可以观察到一些基本的物理现象,如波的相互作用,表面的不稳定性,涡流的产生等等。

例如,人们曾经用计算机模拟 Mach 数为 10000 的人射气流穿过密度为其 10 万倍的气体的实验。观测对象为传播过程中的 Mach 数。如果不用屏显示图象的办法,则极难对这种复杂流动得到什么有价值的结果。但是,仅有屏显示也还不够,因为流动是随时间变化的,必须利用这些显示象制成影片,才能真正看到流动。除了对 Mach 数进行显示外,还进行过对密度、压力、速度、熵及其它流动参变量的显示,结果都很具有启发性。

### 1. 数字传输的技术要求

若要对一个流体动力学实验进行模拟并使计算结果形象化,必须处理数目巨大的数据,计算中需将被模拟的流体分为大量的小块(或计算区域)。使每一区域内结构简单,局域动力学问题可以计算。这样,每一个区域内允许的流动复杂程度越高,计算区域就需要得越少。我们工作中所用的是分段抛物线方法。此方法在一个区域内所允许的复杂性相对来说要高一些。若用其它方法进行同等精度的计算,则所产生的数据阵容会更庞大。

为缩减单词字长,我们将流体密度缩写为  $\rho$ , 流体压强为  $P$ , 分块体积为  $V$ , 速度分量为  $u_x, u_y$ 。仅对此五个基本的参变量,在一个有四个程序处理机的 Cary X-MP 型计算机上,持续的数据产生率为 3.74Mbit/s, 其中 Mbit 的定义为  $1024 \times 1024\text{bit}$ 。

若再增加一台计算机,则计算的参变数可达 15 个,如熵、速度、动力发光强度等。

将这些参变量的有关数据送至显象装置,这又会产生一额外的数据流。另外,有时需将某一特殊点的情况加以放大,这也会增加数据产生率。尽管我们及时将数据中明显的冗余位去掉,以提高数据传输与存贮的效率,但是一个典型的数字实验的数据产生率仍会在 5—10 Mbit/s 这一数量级。若一台极大孔径的射电望远镜在其脉冲数据率状态下连续工作,它产生的数据量也还不及我们的数字实验室所用数据量的十分之一。

我们在数字实验室内输入程序并在屏上观察计算结果,但计算本身在远离数字实验室的主机上进行。因此,从主机至数字实验室的流通渠道上需要有 10Mbit/s 的输送速度,否则由于存贮位数不够,数据堆积,会使实验无效。

### 2. 数据存贮的要求

从上面的分析可知,一个典型的数字实验会产生 5—10Gbit 的数据,若再考虑数据间的相互影响,则数字实验室必须有至少 10Gbit 的快速随机存取的存贮装置。新研制的 8mm 盒式数字录相带每盒可存 2Mbit 数据,5 小盒便可存下一个数字实验的全部数据。用原有的 6250bit/in 的磁带,需 60 盘。

将数据从档案存贮器中取出与存入的速度也是个重要的、必须考虑的因素。在现有的传输速度下,从一个模拟实验转至另一个需用半天多的时间。这一速度太慢。但在现今技术发展的情况下,更高的传输速度是可望达到的。

### 3. 数据成象的要求

在数字实验室中,我们期望将计算所得结果变为可以直接观察的形象。因此我们将计算结果转化为显示屏上的图案。通过对图案的识别,加上我们的抽象与综合能力,就可以得到一些很重要的东西。

人类视场的分辨率、色分辨率及人类脑-眼系统的观察频率的限度可概括为每秒 8—12 个画面,每个画面上有  $3600 \times 3600$  小块影象,其中每一小块包含有 18bit 的彩色信息。这相当

于每秒几个千兆字节的数据传输速率。目前成象技术中实际采用的是每片  $1280 \times 1024$  个小图形的影象,其中每个小图形有 24 bit 的彩色信息。这可显示较为复杂的图象,在同一时间内,可展示出不只一个流动参变量。

但是,这种带有 24bit 彩色信息的显示画面耗值昂贵,通常只用带有 8bit 彩色信息的二维平面显示。我们从计算网络中某一参变量数值构成的二维数组中得到影象,影象的构成需有少量的计算及大量的输入输出工作,且可由另一相对廉价的机器来完成。

### 三、我们现有的数字实验室

图 1 给出了我们于 1986 年在 Los Alamos 国家实验室建成的数字实验室的结构。明尼苏达大学的巨型计算机研究室也建成了与此类似的系统,所用的硬件与软件也大多相同。这一实验室选用的设备是原有的,但也给将来的发展留了余地。我们在操作方面进行了中等程度的改进,已比现在的巨型计算机和彩色显象之间的数据传输速率提高了三至四个数量级。现在可以平稳地显示出  $1024 \times 1024 \times 8\text{bit}$  的 800 个屏面象,速度到每秒 8 个画面;或者是  $512 \times 512 \times 8\text{bit}$  的 3200 个象,速度达每秒 30 个画面。这需要有 60Mbit/s 的持续数据传输率。

数据计算在巨型计算机中心进行,而数据形象化过程在一个当地可以控制的影象辅助处理机上进行。这样可以在巨型计算机不停顿的情况下重复对观察结果的显示。

影象辅助处理机由一个双信息处理机,一个画面处理机,一套四个实时盘与 16 个系统盘构成,总共约有 12Gbit 的存贮能力。这一系统可存贮各种长度的影片达 100 部。影象辅助机与工作机间用一根长 300 ft 的双向电缆相连接,持续传输速率为两个 27Mbit/s。屏显示象的质量标准一般都超过国家电视标准规范给出的 15—40 倍。

科学工作站与影象辅助机间通过一个

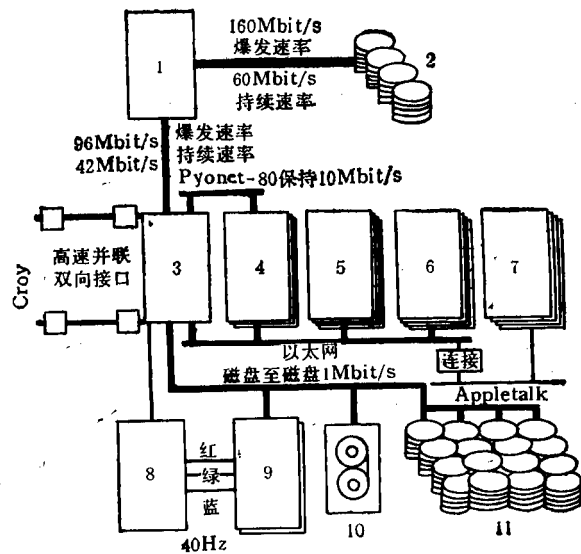


图 1 数字实验室方框图

1—Gould IP8500 影象处理机; 2—四个 250-Mbyte 实时数字磁盘; 3—Gould PN9080, 16 Mbyte, 2CPU, 一个系统; 4—Sun, 3/160c, 16 Mbyte, 三个系统; 5—Sun 3/50, 8 Mbyte, 四个系统; 6—IBM PC/AT, 16Mbyte, 四个系统; 7—Apple Mac, 1Mbyte, 四个系统; 8—Matrix, 3000 彩色图形记录仪; 9—Tek 4128 图形终端, 两个系统; 10—6250-bit/in 磁带, 125in/s, 3—Mbit/s(磁带至磁盘的数据传送速率); 11—16 个 858-Mbyte 磁盘, 96-Mbit/s 爆发, 42-Mbit/s (持续, 且输入与输出并进)

ETHERNET 链相连接。在工作站得到一个  $1024 \times 1024 \times 8\text{bit}$  的象约需 10s。若能改进接口,则可期望将此时间缩短为 1s。

目前,进一步提高实验室工作能力的另一重要条件是要获得一个高速度、高容量的数据存贮与检索系统,以便与现有的磁盘控制系统相匹配。目前用的数字激光盘传输速率低且耗值昂贵,不能满足我们的需要。但新的技术可能会提供更高的存贮密度。

影象画面处理机与双信息处理机间的 42 Mbit/s 持续传输速率的连接是我们专门研制的硬件。

### 四、“数字实验”一例

J. F. L. Hass 和 B. Sturtevant 观测到了不同密度的不同气体的圆柱状及球状气泡在空

气中的冲击波。此实验的目的是研究当一个冲击通过一不均匀介质时产生涡流的一般过程。在对实验结果拍出的黑白照片上,可以很清楚地看到气泡的崩溃及柱状气泡产生的旋涡对或由球状气泡产生的环状涡流。

此实验曾由 J. M. Picone 及 J. P. Boris 在海军实验室首次进行模拟。他们抓住了实验流体的宏观特点,但结果析象程度不够,不能研究流动的细节。

我们所采用的分段抛物线方法可使析象能力大为提高,因此可以详细地研究冲击气泡的相互作用。

描述可压缩气体的 Euler 方程组的积分形式如下:

$$\partial/\partial t \int_V \rho dV + \int_{\partial V} \rho(\mathbf{u} \cdot d\mathbf{S}) = 0,$$

$$\begin{aligned} \partial/\partial t \int_V \rho \mathbf{u} dV + \int_{\partial V} \rho \mathbf{u}(\mathbf{u} \cdot d\mathbf{S}) \\ + \int_{\partial V} P d\mathbf{S} = 0, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \partial/\partial t \int_V E dV + \int_{\partial V} E(\mathbf{u} \cdot d\mathbf{S}) \\ + \int_{\partial V} P(\mathbf{u} \cdot d\mathbf{S}) = 0, \end{aligned}$$

这里  $\rho$  表示气体密度,  $E$  为动能与内能之和,  $P$  为气体压强,  $\mathbf{u}$  为速度,  $\partial V$  为体积  $V$  的边界面。此方程组可用来描述流动参变量中的突变情况,如激震阵面、触点断续及滑线等。我们用分段抛物线方法求这些方程的数值解,将方程化为质量、总能量及线性矩守恒的形式。

如果我们认为某一段时间内会发生令人感兴趣的现象,那么就可以选出这段时间内的计算结果,并转变为画面在屏上显示出来。

我们的计算机实验具有研究较高的 Mach 数的冲击的能力。实验中入射冲击的 Mach 数为 2。正是在这较强的冲击之下,我们观察到了在气泡后面的一个很强的、不断增大的、超声速的环状涡流。

我们在数字实验中建立了一套参数,并通过计算网络的应用及数字误差项的引进来考虑粘滞效应。

实验中另一明显结果是给出了沿气泡表面

波纹的生长。开始时表面平滑,厚度大于三个小区域的距离。冲击波的人射立即将此表面压缩为约一个小区域厚。对于气泡的前表面,存在着 Richtmyer-Meshkov 不稳定性,而侧表面,更多地是 Kelvin-Helmholtz 不稳定性。在流体的边界处,冲击加速会产生一个瞬时的等效引力,从密度较大的流体指向密度较小的流体。在这方面,数字实验结果与物理上的实验结果相符。

## 五、发现新现象

上述实验还证明了数字实验与真实的物理实验一样,能够引导我们去发现意外现象。这里我们发现一个 Mach-3 振荡冲击在一个密度大于空气 2.86 倍的气泡上,就产生了一个非常强的持久的超声速环状涡流。此涡流恰好在入射冲击波后面,并沿对称轴运动。实验结果的图形使它的详细结构清晰可见:一个由弥散的高熵热气形成的核在环状旋涡内超声速旋转,并有一与其速度发散方向垂直的冲击波。在旋涡中心,气体沿对称轴获得很大的加速度,中心气体与周围空气发生超声速撞击会产生一个振荡,被加速的气体会被猛然压缩于此振荡区内。此振荡也将传入周围空气,比初始的冲击波传播还快,可形成结点、滑移线和成对出现的、旋转方向相反的小旋涡。

实验中还对冲击波与超声速环状涡流的相互作用进行了研究。结论是:超声速环状涡流是一个稳固的结构,至少在二维计算时是如此。在二维计算中,我们需假设系统有严格的对称轴。在更严格的关于涡流环稳定性的计算中需加一非轴对称的微扰,即需要进行三维模拟。

## 六、未来的数字实验室

以上谈到了数字实验在近期取得的巨大进展。然而,正如我们已经指出的那样,用我们现有的数字实验仍有很多问题不能解决。我们仍

(下转第 312 页)