

郝柏林 张淑誉 著

39

漫谈物理学和计算机



物 理 学 基 础 知 识 丛 书

科学出版社

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书回顾了物理学与计算机的发展历史,介绍了目前状况,展望了它们的未来。书中着重阐述了物理学和计算机的密切关系以及相互促进的发展过程。作者指出,新的物理学是立足于实验、理论和计算三大支柱之上的科学。电子计算机即将全面进入人类社会生产和科学研究的各个领域,并将彻底改变整个科学事业的方法和进程。

本书内容丰富、材料新颖全面,尤其能使物理学和计算机工作者开阔眼界,从中受益。

此书可供理科大学、物理和计算机专业的科技人员阅读。

物理学基础知识丛书

漫谈物理学和计算机

郝柏林 张淑誉 著

责任编辑 姜淑华

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码 100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1988年7月第一版 开本:787×1092 1/32

1992年12月第二次印刷 印张:6 7/8

印数:3 501—7 500 字数:129 000

ISBN 7-03-000491-4/O · 132

定价:3.20 元

《物理学基础知识丛书》第二届编委会

主 编: 马大猷

副主编: 吴家玮(美籍) 汪 容

编 委: 王殖东 冯 端 陆 埏 杜东生 陈佳圭
赵凯华 赵静安 俞文海 潘桢镛 张元仲
姜淑华

* * * *

本书责任编辑: 吴家玮 陈佳圭

丛 书 序

1978年8月,中国物理学会在庐山召开年会,不少物理学工作者有感于物理学在提高全民族科学文化水平和实现“四化”中的巨大作用,建议中国物理学会与科学出版社合作,编辑出版一套《物理学基础知识丛书》,有计划有系统地普及物理学的基础知识和介绍物理学的新发展。这一倡议当即得到了广泛的响应。为此,中国物理学会理事会进行了认真讨论,积极热情地支持了这一建议,于是,就在风景绮丽的庐山,在中国物理学会和科学出版社的共同主持下,正式成立了本丛书的编委会,讨论和制定了丛书的编辑方针和选题计划,正式开始了丛书的编辑出版工作。

物理学研究物质的运动规律、物质的结构及其相互作用,它是许多科学技术的基础。从本世纪开始,物理学经历了极其深刻的革命,从宏观发展到微观,从低速发展到高速,由此诞生了量子物理学和相对论,并在许多科学技术领域引起了深刻的变革。本世纪以来,物理学在认识和改造物质世界方面不断取得伟大成就,揭开了物质世界一个又一个的奥秘。原子能的利用,使人类掌握了新的能源;半导体科学技术的发展,导致了计算技术和自动控制系统的革命;激光的出现焕发了经典光学的青春;凝聚态物理学的发展,使人们不断创造出

许多性能大大提高的材料……。因此，向广大读者宣传物理学的基础知识以及物理学的新发展，乃是提高全民族科学化水平和实现“四化”的需要。我们编辑出版本丛书的目的，就是试图在这方面贡献一份力量。

本丛书将着重介绍现代物理学的基础知识，介绍物理学的最新发展，要求注重科学性。我们希望作者发扬创新精神，力求做到题材新颖，风格多样，勇于发表独创性、探索性的见解，以活跃读者思路。在文风上则要求做到准确、鲜明、生动、深入浅出、引人入胜，以说透物理意义为主，尽量少用数学公式。

在编辑出版丛书工作中，我们得到了广大物理学工作者的热情支持和鼓励，还得到老一辈物理学家严济慈、钱临照、**陆学善**等同志的热情赞助和关怀。香港科技大学校长吴家玮教授应邀积极参加编委会工作，并约请了美籍学者为丛书撰稿。我们一并在致以谢意。

《物理学基础知识丛书》编委会

前 言

庄子《知北游》中写道：“天地有大美而不言，四时有明法而不议，万物有成理而不说。圣人者，原天地之美，而达万物之理”。现代自然科学工作者，就是这样“原美”、“达理”的圣人。这是意义极其广泛的物理学，它涉及天体、地球、大气、海洋，乃至声、光、热、电和物质结构与转化的许多方面。这样的物理学，是整个现代科学和技术的基础，也是人类文化的重要组成部分。

另一方面，“数”和“算”在物理学中从来具有特殊重要的意义。物理学不满足于定性地说明现象、或者简单地用文字记载事实，它要求尽可能准确地从数量关系上去掌握自然规律。各类物理测量的精确程度，一向是物理实验水平的重要标志。实验和理论在小数点后面的原则差异，曾经不止一次地导致物理学的突飞猛进。想一下水星近日点的进动，氢原子光谱线的兰姆位移，连续相变临界指数测量值对平均场理论的偏离，……看来极为细小的数值差别，曾经对现代物理学的发展起了何等巨大的推动作用！

物理学的发展提出了人类历史上从未有过的大规模计算课题，计算手段必须革命。物理学为计算手段的革命提供了物质基础，计算机的出现又彻底改变了物理实验室的面貌和

理论物理工作者的生活方式，它带来了新的物理学。计算过程和计算机本身还有它自己的物理学。物理学和计算机这两大领域，从 20 世纪 40 年代初以来互相促进的发展过程，已经把我们带进了一个新的时代。物理学作为纯实验科学的时期早已结束，物理学仅仅作为实验和理论密切结合科学的时代也正在过去。新的物理学，立足于实验、理论和计算三大支柱之上，正在为人类提供着认识自然，改造自然的无穷无尽的威力。

面向 21 世纪的物理工作者，再不能满足于用算法语言编几段程序，或者为实验设备配置几处“接口”。他们还应当对计算机和计算科学有更多了解。这也将是一切科学技术工作者文化修养的一部分。这本小书，当然既讲不全物理学，也说不尽计算机。我们的想法是，回顾一点历史，介绍一些现状，再稍为展望未来。只要在读者心中，引起进一步学习物理学和计算机的愿望，这本书就算起到了作用。

在物理学和计算机这两个辽阔领域中，我们各处一隅，挂一漏万顾此失彼之处，自然在所难免。在此恳切地希望读者对本书提出批评。

郝柏林

（中国科学院理论物理研究所）

张淑誉

（中国科学院物理研究所）

1987年3月于北京

目 录

第一章 从“结绳记事”到卡片计算机.....	1
人类有史以来进行过多少次算术运算?——曼哈顿计划——卡片计算机——什么因素限制了计算速度——数的进制和存贮	
第二章 用真空管和延迟线制造的电子计算机.....	13
“逻辑控制”:一问便知是天才——“蛤蟆”继电器和逻辑电路——真空管“开关”——记忆屏幕和延迟线存贮器——内部程序控制的冯·诺伊曼计算机——一张假想的“机器指令”表——磁性存贮元件——我国的第一台电子计算机	
第三章 “于无声处听惊雷”——半导体的崛起.....	44
没有用武之地的半导体——电子能带、 p 型和 n 型半导体——半导体器件的崛起——MOS和硅“平面工艺”——半导体逻辑电路——半导体存贮器——SSI, MSI, LSI, VLSI和ULSI	
第四章 现代计算机大厦.....	73
计算机和“算计”机——软、硬、虚、实的关系——计算机语言——操作系统——巨机不巨 微机不微——从单机到网络	
第五章 物理学家的好助手.....	100
实验控制和数据采集——NIM, CAMAC和VMEbus——高能物理实验——从头算起——计算机“代数”——物理学中的人工智能	
第六章 计算机带来的物理学.....	123

费米-巴斯塔-乌勒姆“实验”——“孤子”和“孤波”——遍历问题和“反RAM”定理——非线性系统中的混沌现象——分子动力学和“长尾巴”行为——“夸克禁闭”和“渐近自由”——计算物理和实验数学的诞生

第七章 计算方法中的物理学..... 147

人工粘滞性——采样定理和测不准关系式——由演化过程计算定态分布——重要性抽样法——NP 完备问题和“自旋玻璃”

第八章 计算机受到的物理限制..... 163

最快能多快？——最小能多小？——可以不消耗能量进行计算吗？——发热和冷却——联线问题——有没有量子限制？

第九章 物理学和未来的计算机..... 180

微结构物理和波函数工程——光计算机——超导计算机——并行计算的兴起——元胞自动机

第十章 没有结束的话..... 204

第一章 从“结绳记事” 到卡片计算机

人类的生产技术和文化科学，是按照越来越快的“加速度”规律发展的。50 万年前生活在周口店附近的“北京人”已经知道用火。10 万年前生活在同一地区的“山顶洞人”，已经会制作颇为精致的石器、骨器和装饰品。1953 年在我国西安半坡村发现的古代母系氏族社会遗址，由碳同位素 ^{14}C 含量测定，其上层距今约 5 600 年，下层约 6 700 年。半坡遗址发现的陶器口沿上，刻有形状规则的符号 22 种，共 113 个，其中 |、||、+、×…等等可能是计数用的符号。

到了近几百年，这个加速发展的过程就更为明显。牛顿力学距今不过 300 年（1686 年牛顿向英国皇家学会提出了报告，第二年出版了《自然哲学之数学原理》这部经典著作）。完整的电磁理论距今不到 120 年（1873 年麦克斯韦发表了《电磁论》一书）。然而，1818—1820 年才发现了电流的磁效应，1881 年就首次由发电厂向伦敦城供电。1887 年才发现电磁波，1895—1896 年就发明了无线电报。可是最能说明这种加速发展的，莫过于 20 世纪以来计算技术的进步，而这又是与物理学提出的要求和提供的支持分不开的。我们现在就从一个似乎不着边际的问题开始，回顾这个计算机和物理学相辅相成

的发展过程。

人类有史以来进行过多少次算术运算？

算术运算指的是加、减、乘、除这些“四则”运算。更复杂的运算如开平方、开立方、求三角函数、解微分方程……，可以设法化成无穷多次算术运算（只满足于一定精确度时，用有限次算术运算就够了）。有许多问题是永远也不可能给出准确答案的。人类有史以来进行过多少次算术运算，就是这样的问题。然而，有时候不难对答案作一些粗略的估计，得出它的“上界”、“下界”或者“数量级”。这是物理学家们想问题时常用的方法。我们现在不妨来估计一下，人类有史以来所作过的算术运算最多不会超过多少次，也就是它的“上界”。

原始人在没有数的概念以前当然谈不上进行算术运算。古埃及象形数码大约出现在公元前 2500—3000 年。我国自甲骨文中出现数字符号，迄今至少有 4 000 年，而这些符号中包括了十进制数字和百、千、万等单位。研究中国科学技术史的著名英国学者李约瑟曾经指出：“总的说来，商代的数字系统是比古巴比伦和古埃及同一时代的字体更为先进、更为科学的。”我们若不考虑世界各大洲文化发展的不平衡性，可以认为人类进行算术运算的历史不超过 5000 年。

一年有 365 天，假定每人每天进行 100 次算术运算（作为几千年的平均值，这肯定是一个“上界”）。按多少人算呢？1987 年 7 月 11 日全球人口达到 50 亿。世界人口的大量增

长，只是近一两个世纪的事情。如果说 5000 年来，平均每天有半亿人曾进行算术运算，那一定是过高的估计。把上面这些估算合并到一起，就可以看出人类有史以来所作过的全部算术运算，决不会超过下面这个数字

$$5000 \text{ 年} \times 365 \text{ 天/年} \times 0.5 \times 10^8 \text{ 人/天} \times 10^2 \text{ 次/人} \approx 10^{16} \text{ 次}$$

这个数字可能估高了 1000 倍，但这并不重要。它只是告诉我们，人类所作过的算术运算总次数远远达不到现代自然科学所遇到的一些“大数”，例如 10^{40} 或 10^{80} （量子力学的创始人之一狄拉克，曾经讨论过物理学中怎样出现了这样的大数）。有一条数学定理说，有上界必有上确界。只要估算时有更多的科学根据（例如知道了 5000 年来的人口变化曲线），就可以使估计结果降下来一些，更接近“上确界”一些，即使人们永远也不知道这个“上确界”究竟是多少。

然而，上面那样的估计只是在 1943 年以前才有意义。因为 40 年代初，人类的计算能力发生了一次突变。电子计算机的时代开始了。当读者看到这几行文字时，人类每一天进行的算术运算，已经超过 10^{16} 次。这样的突飞猛进，要从第二次世界大战时期的“曼哈顿计划”讲起。

曼 哈 顿 计 划

1939 年爱因斯坦在一批物理学家的推动下，上书美国总统罗斯福，建议着手研究原子武器。这一项现代物理学成果向工程技术转化的重大任务，不久就在“曼哈顿计划”的名义

下开始秘密进行(曼哈顿是纽约市中心的一个岛名)。曼哈顿计划集中了一批优秀的物理学家、数学家和工程师。当时理论研究的负责人是汉斯·伯特(H. Bethe)。原子弹的许多设计数据都不能事先在实验室中测量,而必须靠理论计算得到。有一次,伯特和著名的数学家冯·诺伊曼(J. Von Neumann)坐下来估计他们所面临的计算量时,发现它或许要超过人类有史以来所进行的全部算术运算。这是一个当时几乎无法克服的难题。于是,人们想起了国际商业机器公司(简称IBM公司,本书还要多次提到这家公司)生产的卡片计算机。

原来在第二次世界大战之前,伯特曾经参观过哥伦比亚大学一位天文学家的研究室。那位教授高兴地向他表演了刚从IBM公司租用来的一台卡片计算机。那时人们早已放弃求解三体问题的无望企图,改为直接用数值方法去解描述日、地、月运动的微分方程。这样作,连其它遥远行星的影响都不难考虑在内。但是,数值工作量超乎人力所能及,只得求助于当时最先进的计算手段。不过这并没有使“纯”理论家伯特发生多大兴趣。只是在几年后,面对着复杂的中子扩散问题,伯特伤透了脑筋。曼哈顿计划的另一位参加者恰好是从哥伦比亚大学来的,于是他提议试用卡片计算机,伯特便欣然同意了。

卡 片 计 算 机

19世纪后半叶,从世界各国向北美的移民迅速增加。当时美国每隔10年进行一次人口普查。1880年普查的数据用

人工处理了 7 年，才得出结果。估计 1890 年的普查数据到 1900 年，也就是下一次人口普查的时候，还不能处理完毕。正是在这个尖锐的矛盾的驱使下，布法罗城的统计员赫勒里斯 (H. Hellerith, 现在 FORTRAN 算法语言中表示字符串的 nH 符号就是纪念他的) 发明了卡片计算机。

借助赫勒里斯的卡片计算机，1890 年人口普查的数据，只用两年多时间就处理完了，虽然人口总数比上一个 10 年增加了 1200 万。赫勒里斯在 1896 年成立了一家报表机公司，它是 IBM 公司 (1924 年) 的前身之一。

卡片计算机是一种复杂的电机设备。大量数据要事先穿在卡片上，按规定的步骤顺序处理。这是一种在手工控制下，专门完成特定任务的“固定程序”计算机。经过许多次改进，在 30 年代形成了“卡片程序计算机”。不仅原始数据穿在卡片上，而且计算步骤即“程序”也穿在卡片上。这是一种“外部程序控制”计算机。

其实，人类已经发明过许多种外部程序控制的机器设备。例如，纺织工业中用来编织各种花纹图案的机器，就是这样工作的。今天到我国的纺织工厂去参观，还能够看到大量这类织机，它们在又宽又长的穿孔纸带控制下编织出美丽的织锦或壁毯。

IBM 公司在 30 年代生产的卡片计算机是如此复杂，通常没有公司的技术人员协助安装，用户都无法使机器运转起来。曼哈顿计划的领导人按照伯特的请求，立即向 IBM 公司租用了一台卡片计算机，同时下令调来一位正在军队中服役的

IBM 技术人员。当这位技术人员进入机房时,吃惊地发现,那台复杂的机器已经在正常运转。原来几位年轻的理论物理学家,包括后来得了诺贝尔奖的费曼,已自己动手开箱,根据说明书进行了安装,并且调试成功。这在卡片计算机的历史上是绝无仅有的一次。那几位青年物理学家很快变为计算机积极分子。他们之中好几位后来成了计算物理学的先驱。当时有一位青年对于卡片计算机过分入迷,每天摆弄机器不止。为了使研究原子弹的计算正常进行,人们不得不把他暂时调出机房。

那时最快的卡片计算机,可以在 7 秒钟内完成一次乘法。这对于计算中子扩散或是爆轰波的传播还是太慢了,于是人们只得并行使用许多台各种各样的计算设备,夜以继日地连续工作。就是在这紧张的计算环境里,数学家冯·诺伊曼一方面看到了用数值方法解决重大实际问题的前景,另一方面在思考着如何才能大幅度地提高运算速度。事情的转折发生在美国东部一个名叫阿伯丁的火车站上。1944 年夏天,在这里等车的冯·诺伊曼偶然遇见了正为美国阿伯丁弹道实验室从事计算的年轻数学家哥德斯坦 (H. H. Goldstine)。不过在介绍这一转折之前,我们得先看一下限制计算速度提高的“卡脖子”地方在哪里。

什么因素限制了计算速度

早在出现电子计算机之前,人类也曾经完成过一些规模

较大的计算。这包括大地三角测量和天文测量数据的处理，以及后来船舶和飞机设计的计算等等。伟大的数学家高斯曾经花了10年心血领导完成了汉诺威王国的大地测量。他在1822年写信给一位朋友说：“我经过三个月艰苦工作，这几天刚刚完成了一项最小二乘法计算，它包含55个未知数和300个条件方程。”后来在印度进行的大地测量，涉及88个未知数和2500个条件方程，整个计算持续了两年之久。

这类大规模计算通常要借助一些机械或电机械设备，由一批计算员来实现。如果观察一下某个计算员的工作过程，它大致包含以下步骤。首先要设计一张纵横表，它反映出每一步基本运算的手续和得出最终结果的顺序，以及保证结果正确性的纵横交叉的检验办法。然后在表中特定的行或列里填上原始数据，再按行或按列照表计算，例如，把第一列每个数求平方填入第三列，把第二列的每个数求正弦填入第四列，再把第三列的每个数乘上第四列中相应的数填入第五列，等等。计算中要用到两类工具：求平方或者正弦函数，可以查阅有关的数学用表（例如，1814年初版，以后多次再版过的《巴罗表》）；两数相乘可以使用算盘或手摇计算器。

上面的描述包含了大规模计算过程许多主要环节的雏形。第一，那张画着表格的大纸起着“存贮器”的作用，原始数据、中间和最终结果都“存”在上面；它同时也记录了反映计算过程的“程序”。第二，算盘或者手摇计算器是“运算器”。第三，《巴罗表》是一种数据库，其中保存着过去的大量计算结果；从库中查阅现成数据，可以提高当前计算的效率。第四，

计算员起着“中央控制器”的作用，他决定每一步作什么，把那个数从表中“读”出来，拨到手摇计算器上，算完之后再“写”回“存贮器”的那一列中去，等等。

在上面各个环节中，仅仅提高一两个环节的速度，其作用是不大的。把手摇计算器换成现在市面上常见的电子计算器，完成一次乘法的时间可以缩短几千倍，但整个计算过程并不能显著加快。这是因为看表填数这些“读”、“写”操作很慢，或者说存贮器的存取周期太长。存取周期，至今仍是限制电子计算机速度的重要因素。

类似地，计算员思考和作出决定的时间也不可能很快。每一秒钟想好并完成一步运算，就差不多快到“头”了。可见提高计算能力的另一个关键，是要对计算过程实行自动的逻辑控制。计算过程一旦开始，就要避开一切人为干预，自动运行到终点。请读者特别注意这里出现的“逻辑控制”一词，因为这是现代电子计算机的核心概念之一。

总之，在计算过程的各个环节中，只要有一个环节太慢，它就成为细细的“瓶颈”，限制了整个计算速度。

数的进制和存贮

怎样用机械或电气元件来保存数码，这是设计任何自动计算装置之前必须解决的问题，而它又和所用的“进制”有密切关系。

人类天生双手十指。“搬着手指头”计数，使十进制成了