

第三章 计算科学:它的意义、内容和方法

计算科学导论

商建东

sjd@zzu.edu.cn

计算机与人工智能学院
国家超级计算郑州中心

- ◆ 3.1什么是计算科学
- ◆ 3.2学科的基本问题
- ◆ 3.3计算科学发展主线
- ◆ 3.4计算科学的分类与分支学科简介
- ◆ 3.5计算科学与数学和其他相关学科的关系
- ◆ 3.6范型及其科学意义
- ◆ 3.7计算科学的学科形态与核心概念
- ◆ 3.8计算科学的典型方法与典型实例
- ◆ 3.9学科基本工作流程方式及其科学意义
- ◆ 3.10计算科学学科特点、发展规律、趋势及其社会影响
- ◆ 3.11计算科学知识组织结构及其演变
- ◆ 3.12计算机产业发展前景

三个基本的术语：

- **科学**是关于自然、社会 and 思维的发展与变化规律的知识体系。
- **技术**是泛指根据生产实践经验和科学原理而发展形成的各种工艺操作方法、技能和技巧。
- **工程**是指将科学原理应用到工农业生产部门中去而形成的各门学科的总称。

本书中所讲的科学、技术和工程，若非特别说明，均指计算机科学、计算机技术和计算机工程。

3.1 什么是计算科学？

- **计算科学**是对描述和变换信息的算法过程，包括其理论、分析、设计、效率分析、实现和应用的系统的研究。
- **全部计算科学的基本问题是**，什么能(有效地)自动进行，什么不能(有效地)自动进行。本学科来源于对数理逻辑、计算模型、算法理论、自动计算机器的研究，形成于**20世纪30年代**后期。
- **计算不等于数学**，但数学确实起源于对计算的研究。计算的渊源可以深入扩展到数学和工程。数学为计算提供了理论、方法和技术，而工程为实际计算和应用提供了可以能行自动计算的设备，并为更有效地完成计算和应用任务提供了工程方法和技术。
- 早期，**工程与数学长期合作**的一个研究目标一直是试图制造一种能代替人完成计算任务的自动计算机器，而近年来，工程与数学合作的主要目标除了试图制造性能更加优越的计算机器，制造一种能模拟人的思维 and 智能行为的自动计算机器。
- 更好地开发和应用计算机提供工程和技术方法，如维也纳开发方法(VDM)，程序证明技术，演化计算，各种新型计算机体系结构研究，计算可视化与虚拟现实，并行与分布式计算等。

计算科学的研究包括从算法与可计算性的研究，到根据可计算硬件和软件的实际实现问题的研究。这样，计算学科不但包括从总体上对算法和信息处理过程进行研究的内容，也包括满足给定规格要求的有效而可靠的软硬件设计——它包括所有科目的理论研究、实验方法和工程设计。

➤现在，**计算**已成为继**理论**、**实验**之后的**第三种科学形态**

➤数理逻辑

数学的分支，研究推理的科学

一个基础：命题逻辑与谓词逻辑

四个研究领域

集合论

模型论

递归论

构造性数学与证明论

现在更多地从直觉主义逻辑出发，从语法和语义角度刻画逻辑系统

➤ **30年代关于计算模型的研究**

哥德尔的递归函数论

丘奇的 λ 演算

波斯特的符号变换系统(程序设计语言的基础)

图灵的图灵机

➤ **计算机学科是科学还是工程**

IEEE/CS联合小组的结论

计算机科学与计算机工程之间在本质上没有区别

能行性是学科的核心问题

能行性贯穿硬件和软件的理论,方法和技术研究,以及应用研究与开发

➤计算学科的重要学术组织

美国计算机学会(**ACM**)

国际电气、电子工程师学会计算机学会
(**IEEE/CS**)

国际信息处理联合会 (**IFIP**)

美国人工智能协会 (**AAAI**)

各国的计算机学会，人工智能学会

中国计算机学会

➤重要的学术刊物

➤重要的出版社和出版物

➤重要的国际/国内学术会议

3.2 学科的基本问题

➤任何一个学科都是伴随着不断发现问题、解决问题而发展起来的，认识一个学科应该从认识这个学科的问题开始，在一个学科一大类具体问题的基础上，通过分析、研究这类问题共同的特点和本质属性，经过总结、提炼得到的更一般化的抽象的问题，学科中的许多具体问题是某一抽象的基本问题在该具体问题所属领域内的一个具体的实例。

➤在数学中，存在性问题、唯一性问题和稳定性问题就是数学的三个基本问题。

➤计算学科的基本问题有三个：

(1)计算的平台与环境问题；

(2)计算过程的能行操作与效率问题；

(3)计算的正确性问题。

➤ 计算的平台与环境问题

- 为了实现自动计算—计算机的发明
- 为了解题或证明问题本身不可解—计算模型
- 只有构造性计算模型才是能行的
- 模型还必须是确定性的
- 计算平台的使用还必须是方便的—计算环境
- 从某种意义上讲,计算的平台与环境问题包括

- 计算模型
- 计算机体系结构
- 操作系统
- 高级程序设计
- 软件开发工具与开发环境

- 计算过程的能行操作与效率问题
- 理论上的可计算, 但实际上并不一定能行

例: 梵天塔问题

相传印度教的天神梵天在创造地球这一世界时, 建了一座神庙. 神庙里竖有三根宝石柱子, 柱子由一个铜座支撑. 梵天将**64**个直径大小不一的金盘子按照从大到小的顺序依次套放在第一根柱子上, 形成一座金塔. 即所谓的梵天塔, 又称汉诺塔.

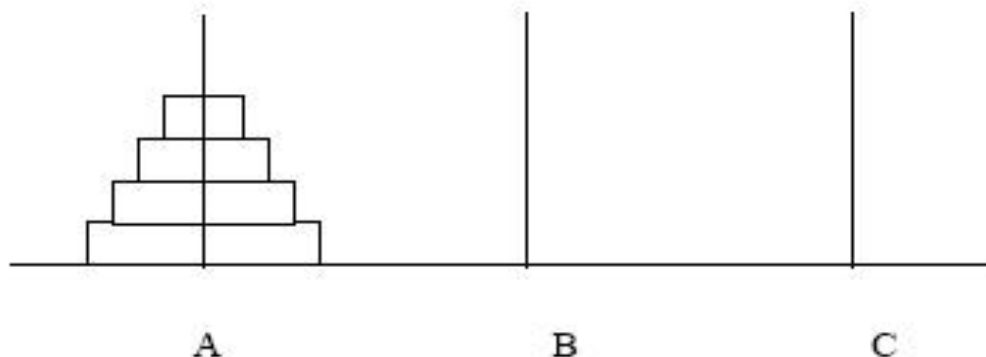


图 2.3 梵天塔

天神让庙里的僧侣们将第一根柱子上的**64**个盘子, 借助第二根柱子, 全部移到第三根柱子上. 同时定下**3**条规则

- 1.每次只能移动一个盘子.
- 2.盘子只能在三根柱子上来回移动, 不能放在他处.
- 3.在移动过程中, 三根柱子上的盘子必须始终保持大盘在下小盘在上

解决该问题的方法是递归解法

将一个较大的问题归约为一个或多个子问题的求解方法

下面用C语言对该问题的求解算法进行描述

```
hanoi(int n,char left,char middle,char right)
{
    if(n==1)
        move(1,one,_,three);
    else
    {
        hanoi(n-1,left,right,middle);
        move(1,left,_,right);
        hanoi(n-1,middle,left,right);
    }
}
```

n表示***n***个盘子的梵天塔问题**left**表示第一个柱子**middle**表示第二个柱子
right表示第三个柱子

因此要完成梵天塔的搬迁需要移动盘子的次数为

$$2^{64}-1=18,446,744,073,709,551,615$$

如果每秒移动一次,一年有**31,536,000**秒,则僧侣们一刻不停地来回搬动也需要花费大约**5,849**亿年的时间.

假定计算机以每秒**1,000**万个盘子的速度进行搬迁则需要花费大约**58,490**年的时间.

➤**计算的正确性问题。**一个计算问题在给出能行操作序列的同时，必须确保计算的正确性，否则，计算是无意义的。

➤针对解决这一基本问题而发展形成一些研究内容与分支学科，例如，程序设计语言的语义学、程序理论(程序描述与验证的理论基础)、程序测试技术、电路测试技术、软件工程技术(形式化的软件开发方法学)、计算语言学、容错理论与技术、**Petri**网理论、**CSP**理论、**CCS**理论、进程代数与分布式事件代数等。

➤计算的正确性问题常可以归结为语言的语义学问题，揭示了语义学在整个学科中的重要地位。

三个基本问题总结

- 首先，**计算的平台与环境问题**可以归结为计算模型问题。根据计算概念的定义，计算模型必须能行。这样，第一个基本问题就常归结为计算模型的能行问题。
- 其次，根据上述分析，**计算过程的能行操作与效率问题**可以归结为基于某一恰当计算模型的算法问题。
- 第三，**计算的正确性问题**也可以归结为能行问题。与上述问题不同，前两个问题是从实际解决问题的角度出发，客观上要求计算模型与算法研究应该注重能行性，而计算的正确性研究客观上并不要求一定要满足能行性，只要能够判定计算是正确的即可。

3.3 计算科学发展主线

围绕学科的基本问题而展开的大量具体研究与发展中形成了学科发展的主流方向与学科发展主线，形成了学科自身的知识组织结构。

3.3.1 计算科学的知识组织结构

- 我们将计算科学的学科内容按照**基础理论**、**基本开发技术**、**应用**以及它们与硬件设备联系的紧密程度分成三个层面，如图3.1所示。
- **第一层面是计算科学的应用层**，它包括人工智能应用与系统，信息、管理与决策系统，移动计算、计算可视化、科学计算等计算机应用的各个方向。
- **第二层面是计算科学的专业基础层**，它是为应用层提供技术和环境的一个层面，包括软件开发方法学，计算机网络与通信技术，程序设计科学，计算机体系结构，电子计算机系统基础。
- **第三层面是计算科学的基础层**，它包括计算的数学理论，高等逻辑等内容。

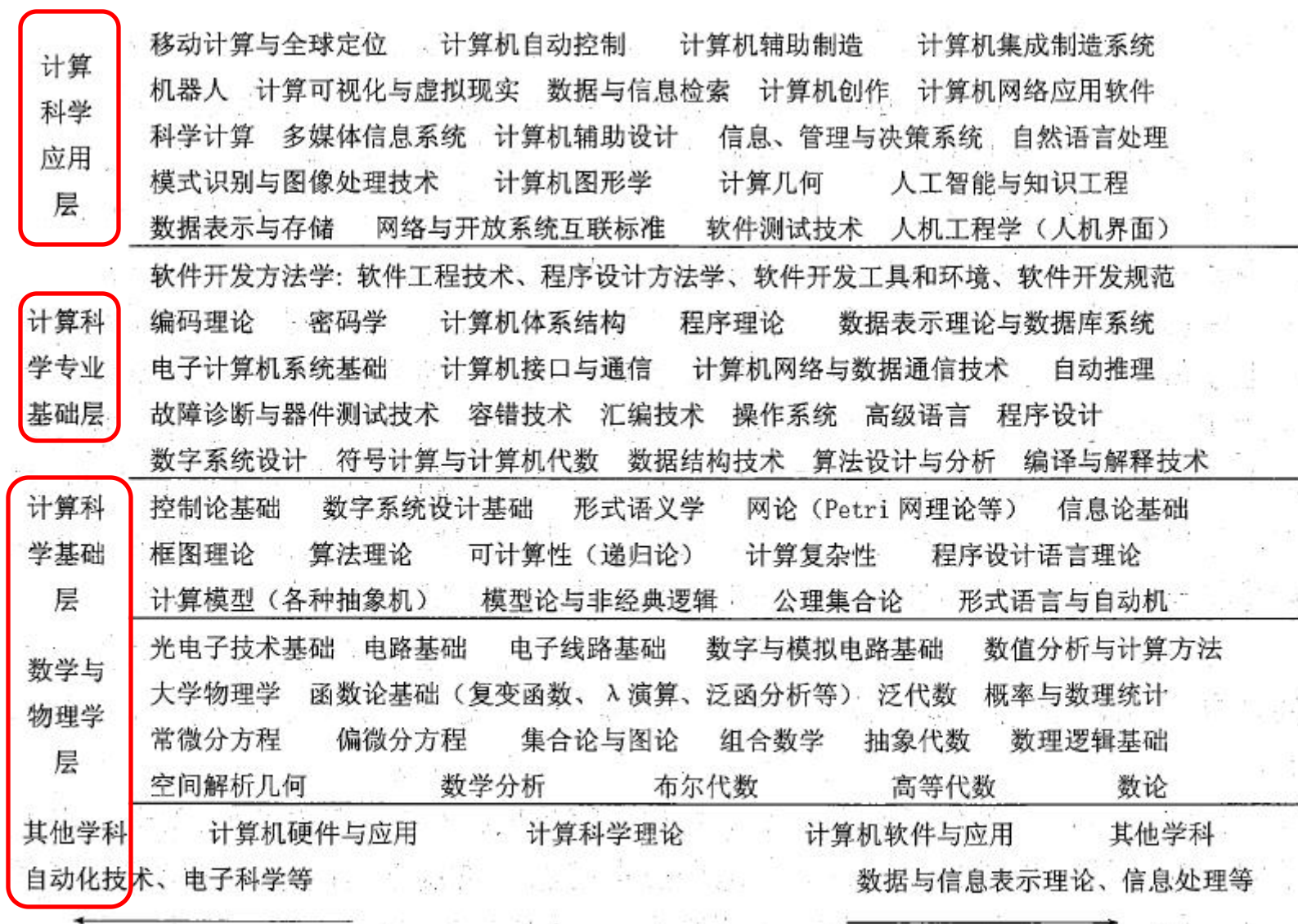


图 3.1

在上述三个层面(计算科学的应用层、专业基础层和基础层)构成的计算科学发展的历程中，不断地追求制造出各种新型计算机系统，拓展和提高计算机的应用领域和应用水平这样两个目标，在基础研究、应用基础研究和技术开发与应用的研究中，学科逐步发展形成了三条相对独立的主线，它们是：

- (1) 计算模型与计算机；
- (2) 计算模型、语言与软件开发方法学；
- (3) 应用数学与计算机应用；

3.3.2 计算模型与计算机

- **1936年**，图灵发表关于可计算数的论文，图灵从一种简单的数学机器(理想计算机)出发来研究计算的概念。**10年**过去，当存储程序式计算机诞生后，人们才逐渐发现他的理论存在巨大的优越性，因为那正是计算科学理论的基础。
- **30年**以后，一由于计算的正确性问题研究的需要，当计算机程序设计语言的语义学和形式语义学研究受到学术界广泛重视时，一人们惊奇地发现，丘奇使用入演算建立递归函数论的研究为形式语义学的发展提供了重要的理论基础和方法论基础。
- 图灵机计算模型的巨大优越性不仅表现在它为存储程序式电子数字计算机提供了重要的设计思想，又因其结构十分简单，操作运算相当基本、功能出乎意料地强大，以过程形式比较准确地刻画了计算这一基本的概念而为学术界广泛关注。
- 多头多带图灵机引起并行计算模型的出现。

计算机

- 第一台采用电子线路技术研制成功的通用电子数字计算机是由美国宾夕法尼亚大学莫尔电工学院的莫克利(C J: W Mauchly)、艾克特(W: J. Eckert)等人在1945年年底设计制造的ENIAC。
- EDVAC方案的主要内容是确定了计算机由（1）运算器，（2）控制器，（3）存储器，（4）输入，（5）输出等五部分组成，明确地反映出现代电子数字计算机的存储程序控制工作原理和基本结构，对以后计算机的发展产生了深远的影响。
- 今天，人们把具有这样一种工作原理和基本结构的计算机统称为图灵一冯·诺依曼型计算机。
- 50年代的计算机，因其主要元器件采用电子管而为人称之为电子管时代，即第一代电子计算机时期。在这一时期，美国计算机的发展实现了三个转变：从军用扩展至民用；从实验室研制进入工业化生产；从科学计算扩展到数据处理。

- 自从第一台通用电子数字计算机**ENIAC**诞生和**EDVAC**方案发表后，美国、英国、前苏联、法国等国家迅速地加快了计算机的研制步伐，一批计算机相继出现，并于**20世纪50年代**形成了生产规模。
- 第一代计算机推向社会后不久，由于晶体管技术的发展和成熟，采用**晶体管**研制第二代电子计算机的工作就已在美国的一些著名实验室进行了。
- **大规模集成电路的出现**，体积小、速度快的第三代计算机一进入用户市场，很快淘汰了晶体管计算机。

3.3.3 计算模型、语言与软件开发方法学

计算模型与语言

计算模型不仅奠定了计算机的诞生，也为计算机语言奠定了基础。

- 每一种语言都有它的词法、文法、语义和语用等四个方面的内容。
- 程序设计语言语义的形式化描述常常是与计算模型联系在一起的。
- 形式语义学中四种语义学研究方法的主要思想和内容。

(1) 操作语义一般被认为是一种过程性描述语义。

(2) 指称语义的基本思想是使语言的每一成分对应于一个数学对象，描述方法并不关心语言成分的执行过程，而只关心语言成分执行后的效果。

(3) 公理语义是在程序正确性公理化证明方法的基础上发展起来的。

(4) 代数语义的提出源于抽象数据类型的研究，其基本思想和方法源于模型论，它将描述语言成分语义的逻辑体系与满足这个逻辑体系的模型区分开来。

如果我们给出这样一个由条件子句与条件语句嵌套构成的语句：

if B1 then if B2 then S1 else S2;

那么，对这个语句，语义上我们应该作下面的哪一种理解呢？

if B1 then {if B2 then S1 else S2} ;

if B1 then {if B2 then S1} else S2;

这的确是一个不能忽视的问题。

{Q} P {R} :

其中，**Q, R**是逻辑(断言)公式，分别为程序**P**的前断言、后断言。**Q**表示程序**P**执行前程序的状态(指影响程序运行的所有变量数据构成的数据状态)必须满足的条件，**R**表示程序运行后所有与输入关联的输出数据构成的数据状态必须满足的条件。

例如：

Q:得到10元钱;**R:**打回一瓶酒;

{Q}P: S1;S2;...;Sn; {R}其中**S1,S2,...,Sn**是程序**P**的语句

四种语义学方法的表述形象地进行如下描述：

操作语义:

$$\{d_0 \mid Q(d_0) = \text{true}\} \quad P: \quad S_1 \ ; \ S_2; \ \dots \ ; \ S_n; \ \{d_n \mid R(d_n) = \text{true}\}$$

$\uparrow \qquad \qquad \uparrow \qquad \qquad \uparrow$
抽象机

用一台每一个操作在语义上完全清楚的抽象机跟踪、模拟程序中语句对程序的数据集合的操作，通过对程序状态的刻画来表述程序的语义。

指称语义:

$$\{d_0 \mid Q(d_0) = \text{true}\} \quad P: S_1 ; S_2; \dots ; S_n; \{d_n \mid R(d_n) = \text{true}\}$$
$$\begin{array}{ccc} & \uparrow & \uparrow \\ f_1 & & f_2 \\ & \uparrow & \\ & f_n & \end{array} \qquad \text{定值函数}$$

引入严格的语义函数，针对程序语言的每一条语句，给出对应的函数演算规则，这样，就可以根据程序的输入和每一条依次执行的语句，确定对应的函数的值，以此确定程序的语义。

公理语义:

$$\{Q\} \quad P: \{Q_1\}S_1\{R_1\}; \{Q_2\}S_2\{R_2\}; \dots; \{Q_n\}S_n\{R_n\}; \{R\}$$

设法根据程序的每一条语句，由前断言和语言语句对应的推导规则，以及逻辑推理规则，包括代换推导规则导出后断言。

代数语义:

$\{d_0 \mid Q(d_0) = \text{true}\} \quad P: S_1 ; S_2 ; \dots ; S_n ; \{d_n \mid R(d_n) = \text{true}\}$

$\uparrow \quad \uparrow \quad \uparrow$

$\{R_1, R_2, \dots, R_m\}$

代数操作规则

需要给出对应语言语句定义的代数操作规则，并且要证明这样一套规则在逻辑上语法和语义是一致的，也就是要给出代数操作系统的逻辑模型（证明可靠性与完备性）。

特别是代数语义，从{Q:得到10元钱}到{R:打回一瓶酒}的方式方法是很多的，例如，一个人完全可以走路去，走路回来，用5元钱买一瓶酒，另外5元钱自己吃了零食;也可以是来回都走路，买了一瓶10元的好酒;也可以是坐车去，坐车回，买一瓶8元钱的稍好一点的酒;.....。问题是我们到底想要哪一种打酒的操作？

软件开发方法学

➤程序设计语言的研究与发展在产生了一批成功的高级语言之后，其进一步的发展开始受到程序设计思想、方法和技术的影响，也开始受到科学计算、程序理论、软件工程、人工智能等许多方面特别是实用化方面的影响。

➤有大量的学术论文可以证明，由高级语言的发展派生的各种思想、方法、理论和技术触及到了计算科学的大多数学科方向，但内容上仍相对集中在语言、计算模型和软件开发方法学方面。

3.3.4应用数学与计算机应用

- ❖ 凡是与计算机使用相关联的领域都可纳入计算机应用的范畴。
 - ❖ 要使用计算机来代替人进行计算，就得首先研究计算方法和相应的计算机算法，进而编制计算机程序。
 - ❖ 小波理论的发展使得通过小波变换进行数据信息压缩的效果大大改善，从而推动了该方向取得重要的进展。
 - ❖ 数值计算方法就成为最早的应用数学分支与计算机应用建立了联系。
 - ❖ 在计算机应用领域，科学计算是一个长久不衰的方向。
 - ❖ 几何学是数学的一个分支，它实现了人类思维方式中的形数结合。在计算机发明之后，人们自然很容易联想到用计算机来处理图形的问题，由此产生了计算机图形学。计算机图形学是使用计算机辅助产生图形并对图形进行处理的科学。
- 人工智能
数据挖掘
专家系统
科学计算可视化
虚拟现实，计算机辅助设计，计算机图形学
密码学

3.3.5 学科发展带给我们的启示

- 应用数学与计算机应用学科发展主线各方向上的研究工作，都与应用数学有着密切的联系。从学科的发展可以总结得到一条定律：**理论上，凡是可以计算机来处理的问题及其处理过程，都可以用应用数学来描述。**
- 随着计算科学发展的不断深化，许多需要高深数学知识和计算机专业知识的软硬件开发却不是什么人都能胜任的，这也正是高科技发展及其产品开发的显著特点和诱人之处。
- 人工智能领域所讨论的智能计算明显存在三条完全不同的认识理念指导下的发展道路：

- (1) 第一条是人工智能的认知心理学派的发展道路；
- (2) 第二条是人工智能逻辑学派的发展道路；
- (3) 第三条是演化智能计算学派的发展道路；

在计算机软硬件产品的开发道路中，目前比较普遍的途径主要是三条：

- ❖第一条是通过剖析其他公司的产品，仿制并加以改进；
- ❖第二条是购买其他国家的专利技术，生产同类产品；
- ❖第三条是从公开出版的刊物上通过分析、挖掘、研究、创新，掌握新技术，以此为基础开发新产品。

第三条路是最有希望后来居上的，并产生巨大经济效益的光明之路，当然也更为艰难，需要科技人员有良好的素质。

高科技的飞速发展和激烈的竞争已经不允许发展中国家再走过去那种引进、消化、仿制、改进的老路，科学研究和技术开发必须建立在全面创新的认识和机制之上。

3.4 计算科学的分类与分支学科简介

3.4.1 构造性数学基础(数理逻辑、代数系统、图论、集合论等)

在数学发展史上，有三项重要发现对数学科学的发展产生了深远的影响：

- 一是解析几何的发明，它使数学思维实现了形状与数量之间的沟通；
- 二是微积分的发明，它使数学思维进入了无限小分析领域；
- 三是群论的发明，开创了代数研究的新纪元，即从局部性的字母与结构的计算研究转向更为抽象的系统结构的整体性分析研究。

3.4.2 计算的数学理论(计算理论、高等逻辑、形式语言与自动机、形式语义学等)

所谓计算的数学理论是指一切关于能行性问题的数学理论的总和。

主要涉及计算理论（可计算性与计算复杂性）、高等逻辑(模型论与各种非经典逻辑)、形式语言与自动机、形式语义学、Petri网理论、通信顺序进程(CSP)、通信系统演算(CCS),演算、进程代数(PA)、分布式事件代数(DEA)，等等。

3.4.3 计算机组成原理、器件与体系结构(计算机原理与设计、体系结构等)

计算机组成原理与设计是计算机发展的一个主流方向。这一方向的主要任务是根据各种计算模型研究计算机的工作原理，并按照器件、设备和工艺条件设计、制造具体的计算机硬件系统。

3.4.4 计算机应用基础(算法基础、程序设计、数据结构、数据库基础、微机原理与接口技术等)

计算机应用基础知识包括算法基础、程序设计、数据结构、数据库基础、微机原理与接口技术等。这些内容的简要介绍可参看第一章和3.4.6节。

3.4.5 计算机基本应用技术(数值计算、图形学与图像处理、网络、多媒体、计算可视化与虚拟现实、人工智能等))

计算机应用主要包括数值计算，信号处理技术，图形学与图像处理技术，网络技术，多媒体技术，计算可视化与虚拟现实技术，人工智能技术，信息系统设计技术，决策支持系统技术，办公自动化技术，计算机仿真技术，计算机辅助设计、测试、制造、教学等辅助系统。

3.4.6 软件基础(高级语言、数据结构、程序设计、编译原理、数据库原理、操作系统原理、软件工程等)

软件是计算科学一个较大的学科门类，包括众多的分支学科方向，主要有高级程序设计语言、数据结构理论、程序设计原理、编译程序原理与编译系统实现技术、数据库原理与数据库管理系统、操作系统原理与实现技术、软件工程技术、程序设计方法学、各种应用软件等。

3.4.7 软件开发方法学(并行与分布式计算机系统、智能计算机系统、软件开发方法学等)

软件开发方法学我们已经在前面的内容中介绍了其主要内容，这里要指出的是，高起点的软件开发方法学的主要基础是新一代计算机体系结构、高等逻辑、形式语义学、计算模型理论以及算法基础，许多逐步成熟起来的形式化软件并发方法将陆续进入实用阶段，以软件开发工程方法和软件开发工具的形式出现。

3.5 计算科学与数学和其他相关学科的关系

3.5.1 为什么说数理逻辑和代数是计算科学的主要基础

(1) 首先,从计算模型和可计算性的研究来看,可计算函数和可计算谓词(一种能够判定其真值的断言或逻辑公式)是等价的,相互之间可以转化。计算可以用函数演算来表达,也可以用逻辑推理来表达。

(2) 实际计算机的设计与制造中,使用数字逻辑技术实现计算机的各种运算的理论基础是代数和布尔代数。布尔代数只是在形式演算方面使用了代数的方法,其内容的实质仍然是命题逻辑。

(3) 从计算机程序设计语言方面考察,语言的理论基础是形式语言、自动机与形式语义学。而形式语言、自动机和形式语义学所采用的主要研究思想和方法来源于数理逻辑和代数。

(4) 在计算机体系结构的研究中,像容错计算机系统、Transputer计算机、阵列式向量计算机、可变结构的计算机系统的结构及其计算模型等都直接或间接同逻辑与代数密不可分。

(5) 从计算机各种应用的程序设计方面考察,任何一个可在存储程序式电子数字计算机上运行的程序,其对应的计算方法首先都必须是构造性的,数据表示必须离散化,计算操作必须使用逻辑或代数的方法进行。

(6) 高等代数和一般抽象代数只解决了个体对象为简单个体的论域上的大量运算问题,但是对具有结构特征和属性成分的复杂个体的论域上的运算问题,有必要发展泛代数和高阶逻辑理论。

3.5.2 计算科学与其他相关学科的关系

- 计算科学可以在几乎所有的学科领域，甚至我们日常生活的各个方面找到应用，原因是计算(作广义理解)确实是人类最基本的智力活动之一。
- 计算科学的发展也必然受制于其他科学技术的发展，这早已为计算机发展的历史所证实。
- 与计算科学联系最紧密的学科是哲学中的逻辑学，数学中的构造性数学，电学中的(微)电子科学。随着超大规模集成电路技术和体系结构技术的发展，在计算机设计和半导体集成电路设计制造之间早已进行了严格的专业分工，即计算机的整机设计和体系结构设计。
- 计算机、控制与通信三者之间的结合代表了今后一个时期新兴工业科学技术发展的一个方向。计算技术与控制技术很好地结合以支持产业升级、自动机器人、智能控制等，计算技术与通信技术如何很好地结合以支持分布式计算、分布式移动计算、分布式容错计算、分布式信息安全等，控制技术与通信技术很好地结合以支持远程遥控、自动目标跟踪等。

3.6 范型及其科学意义

范型就是科学方法论。

科学方法论涉及三个方面的问题：如何看待研究的对象？如何发现新的知识和如何证明新知识的真理性？

实际上，亚里士多德和穆勒等人许多哲学研究的工作说明了两个问题：
第一个问题：如果从评价科学知识的角度看问题，我们需要对新知识的真理性进行科学的评价；
第二个问题：如果是从发现知识的角度认识世界，那么，我们需要的是建立一整套的方式和方法，解决如何去发现新知识。

围绕第一个问题，人们可以从科学知识系统的结构进行考察。

■研究知识系统的结构，可以将科学知识分成经验(科学)知识、理论(科学)知识和计算(科学)知识三部分。

■一门科学作为一个知识系统，是对其对象领域中事物的本质、发展与变化规律的揭示，也即最一般的联系的把握和表达。

■所谓科学知识系统的逻辑结构，是指“逻辑部件”及其联系。这些系统特征从不同的角度反映了这个逻辑结构的合理性。

(1)一元性：对于一个客观的实在对象，只有惟一的一种逻辑结构作为对它的认识。

(2)简单性：对其对象领域中事物的本质、发展与变化规律的揭示，逻辑结构应该是简单的。

(3)内部一致性：即无矛盾性。

(4)外部相容性：是指人们获得的经验知识同这个已经确立的科学知识系统的逻辑结构之对应部分之间没有矛盾。

(5)稳定性：只有当它的逻辑结构具有很好的稳定性时，才可能在引入科学知识成分时获得进一步的深入发展。

围绕第二个问题，需要研究科学探索的方法。

➤科学方法论被认为是一门系统探究科学研究所特有的方法，分析、检查它成功或合理的依据的学问。

➤将科学方法描述为:一套解决科学问题的一般的规则系统，也是一般化的“套路”。

➤日常生活中做事，总是能够把事情处理得比较好的人，必然有一种“套路”。

无论是学习、分析知识的认知活动，还是发现知识、发展科学的认知活动，都有着一种“套路”，这种“套路”就是范型。

➤范型包含作为从事科学活动的精神价值观，作为文化活动的工作形态，作为探索世界奥秘和解决实际问题的方法工具，作为检验和构建科学理论体系真理性的本体论基础。

为了保证科学探索的合理性，需要有一套更一般性的原则和标准。

➤计算科学包含了理论、抽象、设计三个学科形态作为方法工具，学科基本问题、学科发展主线、核心概念、典型方法、典型实例、学科基本工作流程方式等内容构成了它的主要内容;作为检验和构建科学理论体系真理性的本体论基础，范型包含了对于各种元数学、元概念、元方法的讨论。

➤每一个学科都有其自身的基本问题、学科发展主线、学科知识组织结构、学科形态、核心概念、典型方法、典型实例和学科基本工作流程方式。

3.7 计算科学的学科形态与核心概念

理论、抽象和设计是计算科学三个基本的学科形态。所谓学科形态，是指从事该领域工作的文化方式。

第一种形态是理论

- (1) 对研究对象的概念抽象(定义);
- (2) 假设对象的基本性质和对象之间可能存在的关系(定理);
- (3) 确定这些性质和关系是否正确(证明);
- (4) 解释结果(与计算机系统或研究对象形成对应)。

第二种形态是抽象，或称模型化

- (1) 确定可能世界(环境)并形成假设;
- (2) 构造模型并做出预言;
- (3) 设计实验并收集数据;
- (4) 分析结果。

第三种形态是设计，即工程设计

- (1)叙述要求;
- (2)给定技术条件;
- (3)设计并实现该系统或装置;
- (4)测试和分析该系统。

在计算科学的发展中，有一批在各个分支学科中重复出现的概念。**核心概念**是计算科学重要思想、原则、方法、技术过程的集中体现，有助于在学科的深层统一认识计算机科学。

核心概念是方法论的重要组成部分，一般具有如下特点：

- (1)在本学科的不少分支学科中经常出现，甚至在学科中普遍出现;
- (2)在计算科学理论、抽象和设计这三个过程的各个层面上都有许多示例;
- (3)在理论上具有可延展和变形的作用，在技术上具有高度的独立性。

核心概念分类

(1) 计算模型与能行性

计算模型 (**Computational Model**), 可计算性(**Computability**), 计算复杂性 (**Computational Complexity**), 最优性(**Optimum**), 相似性与对偶性 (**Similarity and Duality**)

(2) 抽象与构造性描述

论域与计算对象(**Domain and Computing Object**), 枚举(**Enumeration**)与有穷表示(**Finite Representation**), 分层与抽象的级(**Hierarchy and Levels of Abstraction**), 内涵与外延(**Intension and Extension**), 递归(**Recursion** , 归纳(**Induction**), 自由与约束(**Freedom and Restriction**);

(3) 系统特征

相容性(**Consistency**), 完备性(**Completeness**), 单调性(**Monotoneity**), 透明性(**Transparence**), 容错与安全性(**Fault-Tolerant and Security** , 开放性(**Openness**), 稳定性(**Stability**), 健壮性(**Robustness**);

(4) 计算方法

折衷(Coomise), C Analogy), 推导(Inference and Expansion); 分解(Decomposition), 集成(Integration), 类比 or Reasoning), 变换(Transformation, 扩展(Extension

(5) 实现技术

类型(Type), 进程与线程(Process and Thread), 顺序与并发(Sequence and Concurrent), 软计算结点(Agent), 关联(Binding)与实例化(Instantiation), 现役(的)(Active), 虚拟(的)(Virtual), 编码(Coding), 模式匹配(Pattern Matching), 分权(Branching), 合一(或通代)(Unification), 循环与迭代(Loop and Iteration), 重用(Reuse), 协议(Protocol), 规范与标准化(Standardization) 。

3.8 计算科学的典型方法与典型实例

典型方法与典型实例是属于方法论的内容。

典型方法

内涵与外延是哲学的两个基本概念。所谓内涵是指一个概念所反映的事物的本质属性的总和，也就是概念的内容。外延是指概念所界定的所有对象的集合，即所有满足概念定义属性的对象的集合。

例题：奇数与偶数的定义。

奇数与偶数的外延定义：

$\{1, 3, 5, 7, 9, \dots\}$

$\{2, 4, 6, 8, 10, \dots\}$

奇数与偶数的内涵定义：

$\{x | x \in \mathbb{N} \ \& \ (x \bmod 2) = 1\}$

$\{x | x \in \mathbb{N} \ \& \ (x \bmod 2) = 0\}$

构造性方法是整个计算科学学科最本质的方法。这是一种能够对论域为无穷的客观事物按其有限构造特征进行处理的方法。

例题：谓词逻辑系统中合式公式的定义。（构造性定义）

- (1) $F(a_1, \dots, a_n)$ 是合式公式。其中， a_i 是表示不空论域中个体的形式符号，即个体词；
- (2) 如果 A 是合式公式，则 $\neg A$ 是合式公式；
- (3) 如果 A 和 B 是合式公式，则 $[A \wedge B]$ ， $[A \vee B]$ ， $[A \rightarrow B]$ ， $[A \leftrightarrow B]$ 是合式公式；
- (4) 如果 $A(a)$ 是合式公式， a 在其中出现， x 不再其中出现，则 $\forall x A(x)$ ， $\exists x A(x)$ 是合式公式。

公理化方法也是计算科学的一种典型方法。它能帮助学生认识一个系统如何严格表述，认识到完备性和无矛盾性对一个公理系统的重要性，认识每一条公理深刻的背景，独立性和它的作用。

例题：(斐波那契序列)

设有一个数的集合 $S = \{0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, \dots\}$ ，对任意给定的正整数 x ，试设计一个判别 x 是否在 S 中的算法。

$$f_0 = 0$$

$$f_1 = 1$$

$$f_n = f_{n-1} + f_{n-2}, \quad n \geq 2$$

构造性方法以递归、归纳和迭代技术形式为其代表形式之一。

公理化方法也是计算科学的一种典型方法

1889年皮亚诺提出了自然数公理系统。下面我们用公理化方法来定义自然数。这个公理系统一共有五条公理。令 N 表示自然数的集合，于是有：

- (1) 0 是自然数，即 $0 \in N$ ；
- (2) 每个自然数 n 均有一个确定的后继 n^+ ；
- (3) 没有以 0 为后继的自然数；
- (4) 若 $n^+ = m^+$ ，则 $m = n$ ，即每个自然数有且只有一个自然数作为其后继；
- (5) 若子集 $S \subseteq N$ ，且具有如下性质：
 - $0 \in S$ ；
 - 若 $n \in S$ ，那么 n 的后继 $n^+ \in S$ ；

则 $S = N$ 。

公理化方法的主要作用有以下几条：

- (1)具有分析总结学科知识的作用。
- (2)可把一门科学的基础分析得清清楚楚。
- (3)在科学方法论上有示范作用。

如给定一组公理和若干形式推导规则，要保证今后的推理是正确的，必定涉及到这样一些问题：

❖第一，这组公理的选择本身是否合理，并足以概括研究领域的最基本的知识？选择公理的依据是什么？

❖第二，这组公理是否本身存在矛盾？针对公理系统将来研究的范围，在合理的解释下，这些公理是否存在矛盾？能否保证这组公理在合理的解释下不存在矛盾？怎么保证？

❖第三，若干推导规则本身是否充分地反映了该领域中事物变化的更一般的规律，它们确实是可以从该领域事物变化规律的进一步抽象中得到规律？是否存在某种不合理性？怎么检验？

❖第四，形式上的推导是否与逻辑上的推理保持一致？

❖第五，公理系统对客观规律的描述是基于二值逻辑还是其他非二值逻辑？

.....

快速原型方法是计算科学的典型方法。

其主要内涵是:在软件的开发中,随着程序代码量的日渐庞大,开发费用和周期的不断增长,人们迫切需要对软件开发中引入的新思想、新原理和采用的新方法、新技术的可行性进行验证,通过验证过程提出改进意见、为实际产品的工程技术开发提供原理性的指导。

演化方法也是计算科学的典型方法。

在一些文献上也叫进化方法。演化方法的主要思想是,针对具体的问题,首先找到解决该问题的办法(或算法、程序、电路等)或一个初步的解,然后通过各种有效的技术方法改进解决问题的办法(或算法、程序、电路等)或解。

另一种典型方法是所谓的展开与归约方法。

展开与归约是一对技术概念，是在处理实际事务的过程中对两个相向的处理活动所作的一般化的方法学概括。

不难理解，“自顶向下”的程序设计方法是一种展开方法，“自底向上”的语法分析方法，语义约化方法都是归约方法的实例。

典型方法之所以重要，不仅在于它能深刻地揭示学科的基本规律和各主科目之间内在的联系，而且在于它能启发人们更深入地思考学科的一些基本问题，培养学生的创造性能力和科学研究能力。

典型实例

所谓**典型实例**是指那些反映学科某一方面内在规律和典型问题本质内容的实例。典型实例也是方法论的重要组成部分，由于它们往往以简化形式深入浅出地表达学科深奥的科学规律和学科典型问题的本质内容，因此，**在学科研究中常常被用来辅助说明思想、原理、方法和技术，用来比较思想、理论、方法和技术的优劣。**显然，典型实例在计算科学发展中具有重要的作用。

例题： 哲学家共餐问题。

设有5个哲学家围坐一张桌。圆桌上放有一盘可自动添加的面条，每2个人之间放有1根筷子，共5根筷子。进一步假设每个哲学家的活动均为一个重复下面动作的进程：

- (1) 思考问题；
- (2) 饿了；
- (3) 拿左手的筷子；
- (4) 拿右手的筷子；
- (5) 吃面条；
- (6) 放右手的筷子；
- (7) 放左手的筷子；
- (8) 重新转到思考问题状态(1)。

问:怎样协调五个哲学家的活动，才能保证每一个哲学家都能按照他们的进程正常地活动，不致发生某个哲学家因吃不到面条而被饿死。

死锁，制定规则实施资源调度。

例20一组典型实例。

停机问题，哲学家共餐问题，饮料问题，最小费用流问题，可满足性问题，货郎担问题，生产与消费问题，文法的二义性问题，上下文语义问题，最小生成树问题，阿克曼函数，鞍点问题，子集和数问题，确定性自动机与不确定性自动机的等价问题，八皇后问题，九宫排定问题，三个中国人算法，证比求易算法，0/1背包问题，作业调度问题，路由选择问题，图的最小覆盖问题，荷兰国旗问题，等等。

3.9 学科基本工作流程方式及其科学意义

◆ 每一个学科都有其**基本问题**、**学科发展(主流)方向**、**学科发展主线**、**学科知识组织结构**、**学科形态**、**核心概念**、**典型方法**、**典型实例**，这些内容不仅能够帮助我们很好地认识一个学科，而且，也能帮助我们在学科研究与开发中较好地开展工作。

◆ 能够借助上述内容总结得到一套从事这个学科工作更为具体一些的方式方法，也就是**基本工作流程方式**。

计算科学学科的基本工作流程方式：

◆我们认为，对现实世界中被研究的对象进行抽象，建立必要的基本概念，运用数学工具和方法对其进行基础和应用基础研究，研究(对象)概念的基本性质、概念与概念之间的关系，由此揭示对象发展变化的内在规律，为实验设计和工程设计实现提供方法和技术，并开展实验和工程设计与实现工作是计算科学学科的基本工作流程方式。

◆其中，抽象(主要指抽象化过程)是理论、抽象和设计三个基本学科形态中最重要的一個形态，它是连接学科科学研究与工程应用开发研究的重要环节。

套路与范型：

有了学科的基本问题、学科发展(主流)方向、学科发展主线、学科知识组织结构、学科形态、核心概念、典型方法、典型实例、学科基本工作流程方式，认识学科和开展学科研究与开发的“套路”变得清晰起来，库恩所提出的范型的概念在计算科学学科获得比较准确的定位。

例题：找出用于**RSA**编码法中的一个合适的大整数。

假设现在没有素数或质数的概念，按照**RSA**编码法的要求，我们希望找到一个**32**位左右的大整数，用于编码。我们希望**n**是两个很大的自然数**p**和**q**的乘积，即 **$n=pq$** ，显然，**p**和**q**分别都不能再含有因子，否则密码很容易被别人破译。

如果**p**和**q**都是素数，那么，**p**和**q**的乘积值**n**除了**p**和**q**这两个素数因子之外将不再包含任何大于**1**，小于**n**的自然数因子。此外，要使密码不易被对方破译，**p**和**q**这两个数应该比较相近，即位数比较一致。弄清楚了这些，找到**p**和**q**应该是没有什么问题的。

例题：以进程为基础的操作系统的发展历程。

CPU和内存等资源不能充分利用的矛盾暴露了出来。当他们对操作系统的运行程序进行了某种抽象之后，产生了进程的概念，系统地研究了进程的性质和进程与进程之间的关系，由此形成了一整套的进程理论。

这些实例清楚地表明了计算科学工作者如何沿用**学科基本工作流程方式**来开展工作，解决问题。毋庸置疑，学科基本工作流程方式的科学示范意义是深远的，因为它是学科范型的核心内容。

3. 10 计算科学学科特点、发展规律、趋势及其社会影响

计算科学是在数学和电子科学基础上发展起来的一门新兴学科。它既是一门理论性很强的学科，又是一门实践性很强的学科。

数学是计算科学的主要基础，以离散数学为代表的应用数学和构造数学是描述学科理论、方法和技术的主要工具，而微电子技术和程序技术则是反映学科产品的主要技术形式。

计算科学学科特点

- (1) 抽象描述与具体实现相分离；
- (2) 计算模型在整个学科发展中所起的不可替代的独特作用；
- (3) 数据与信息表示；
- (4) 数学是计算科学的基础；
- (5) 一旦研究工作走向深入，研究内容就会变得比较复杂；

发展规律

- ❖一方面，对计算模型和各种新型计算机体系结构、人工智能的研究将不断进行下去；
- ❖另一方面，围绕着各种科学计算和数据处理的计算机应用问题，软件开发方法学，特别是并行与分布式软件开发方法学研究以及某些计算机基本应用技术，如演化计算技术将成为未来学科发展的主线。

趋势及其社会影响

- ❖计算科学不仅促进了各行各业的发展，影响和改变着人类的生存方式和生活习惯，例如，互联网、人工智能、大数据分析、机器人制造等等。
- ❖使其他学科不同程度地出现加速发展的态势，极大地影响和改变着人们的价值观念和对许多事物的认识。

3. 11 计算科学知识组织结构及其演变

在计算科学发展的早期，大约在**20世纪30年代至50年代末**，对计算科学研究的主流方向主要集中在**计算模型、计算机设计、高级语言和科学计算**方面。

20世纪60年代、70年代是计算科学蓬勃发展的时期，这一时期的发展有三个显著特点：

其一是学科研究和开发渗透到社会生活的各个方面，广泛的应用需求推动了学科持续高速发展；

其二是经过大量的实践，人们开始认识到软件和硬件之间有一个相互依托，互为借鉴以推动计算机设计和软件发展；

其三是人们也开始认识到计算机理论和工程技术方法两者缺一不可，且常常是紧密地结合在一起的。

计算科学学术研究机构将会逐步把研究重点集中在以下几个新的综合方向上：

- (1) **新一代计算机体系结构**。该方向包括神经元计算、计算机设计与制造、网络与通信技术（含信息安全技术）、大容量存储设备的研究、容错理论、算法理论、计算模型内容等；
- (2) **并行与分布式软件开发方法学研究**。该方向包括数理逻辑、计算理论（包括算法理论）、式语义学、高级语言与程序设计理论（包括程序设计方法学）、系统软件设计、软件工程、容错理论等内容；
- (3) **人工智能理论及其应用**。该方向包括数理逻辑、高等逻辑、算法理论、知识工程、神经元计算、人工智能高级语言与人工智能程序设计等内容；
- (4) **计算机应用的关键技术**。主要将围绕计算可视化与虚拟现实，计算几何，科学计算这几个重点方向开展工作，并带动数据库技术、计算机图形学、自然语言处理与机器翻译、模式识别与图像处理等方向发展。

公共知识体系

对这四个综合方向研究的重点内容作分析，结合国外顶尖学术刊物发表的与上述方向研究内容有关的学术论文，不难得出，它们共同的基础都趋向集中在数理逻辑（指高等逻辑）、形式语义学、新一代计算机体系结构、算法设计与分析、计算模型与计算理论这五个专业基础之上。

学科未来发展的主要方向和四大核心专业基础

从目前的学科的整体发展情况来看，计算模型与体系结构，软件开发方法学与计算机应用技术是学科未来发展的主要方向，而计算理论（包括算法理论）、体系结构、高等逻辑与形式语义学是支撑学科未来主要方向发展的四大核心专业知识基础。

3. 12计算机产业发展前景

硬件方面

国家正在进一步加大投融资与科技研发的力度，大力发展自己的超大规模集成电路、芯片制造业，在大力扶持下，我国在计算机集成电路芯片的设计与制造方面已经取得了重大突破，可以预见，随着芯片生产国产化水平的提高，我国计算机软硬件的制造和生产必将进入一个快速发展的新周期，前景非常光明。

软件方面

应用软件：不断拓展应用范围，不断加大产品维护、升级换代和新项目、新产品开发的投入，实行滚动发展，保持技术领先的地位和市场主导的作用。

系统软件：操作系统、编译软件、安全软件等