第 1 章　教学实验项目

1.1　教学计算机系统概述

1.1.1　教学计算机系统系列和总体组成概述

TEC-2000 教学机是由多个型号组成的系列计算机系统，由清华大学计算机系研制，已经通过教育部主持的鉴定，重点用于计算机组成原理课程的教学过程。它的功能设计和实现技术都紧紧围绕着对课程教学内容的覆盖程度和所能完成的教学实验项目的质量与水平进行安排。其突出特点是：

- 硬、软件基本配置比较完整。
- 体现出的知识与技术能覆盖相关课程的主要教学内容。
- 支持的教学实验项目多且水平高。
- 文字与图纸资料相对齐全。
- 具有与在 PC 计算机上用软件实现的功能完全相同的“软的”模拟计算机系统。

硬件实现的和软件模拟实现的两个教学机系统的组成如图 1.1 和 图 1.2 所示。

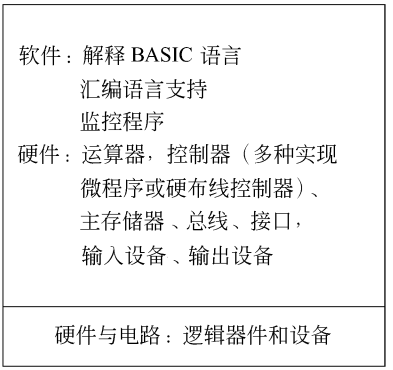

图 1.1　硬件实现的实际计算机系统

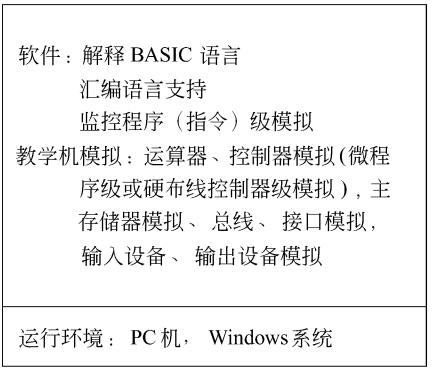

图 1.2　软件实现的模拟计算机系统

从图 1.1 可以看到，该计算机硬件系统组成中，功能部件是完整齐备的，总体组成由图 1.3 给出。运算器、控制器、存储器、输入输出接口、计算机总线等配备齐全，还可以接通 PC 机仿真终端执行输入输出操作，并实现了微程序和硬布线方案的两种控制器。

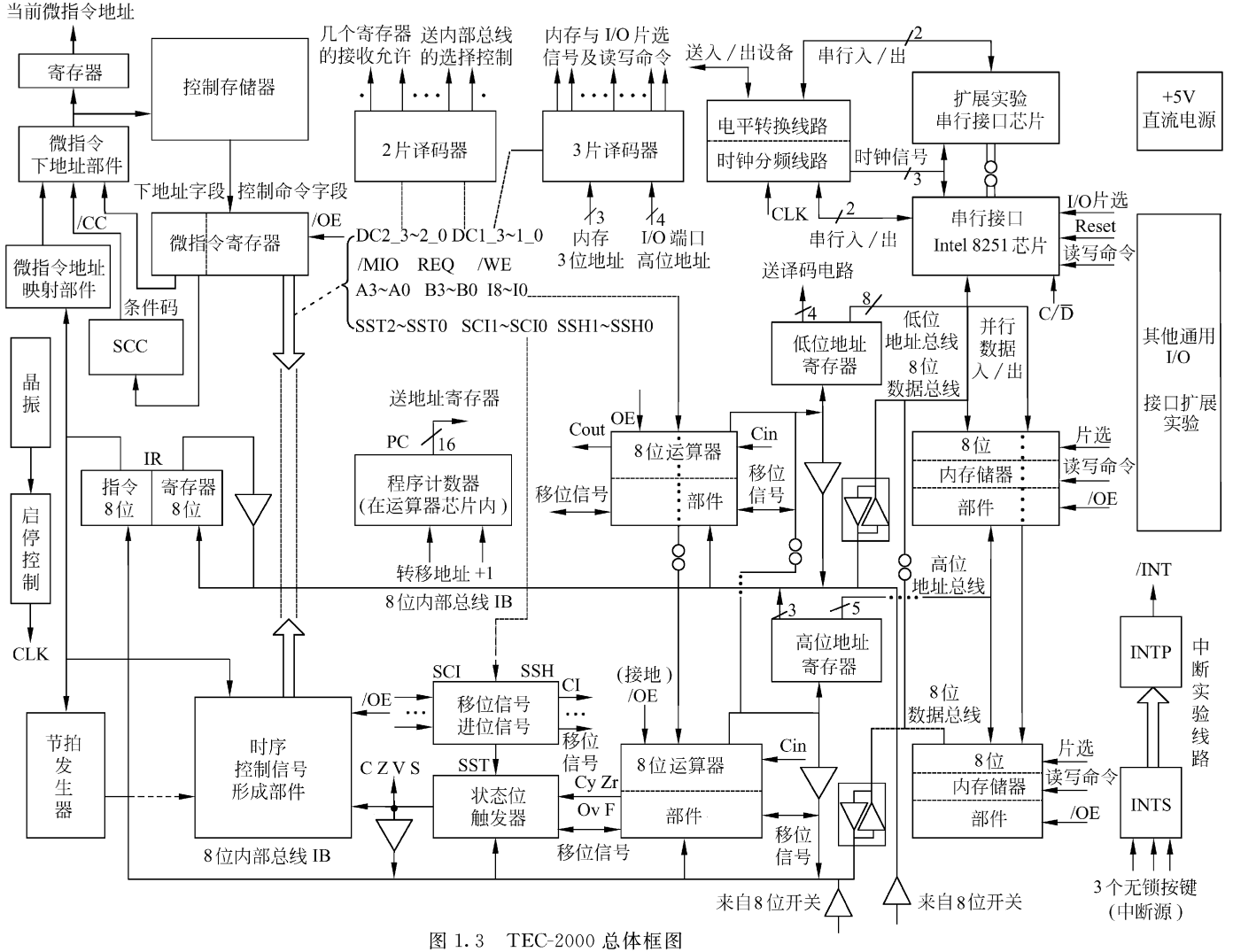

图 1.3　TEC-2000 总体框图

从计算机组成原理课程教学需求的角度看，该计算机软件系统的组成也是完整的。它支持简单的高级语言（包括浮点数据运算和基本函数运算功能）、汇编语言（支持基本伪指令功能）和二进制的机器语言，配有自己的监控程序以及 PC 机仿真终端程序等。毫无疑问，全部软件的源程序代码是宝贵的教学参考资料。

从图 1.2 可以看到，软件实现的计算机系统级模拟和指令级模拟系统可以脱离教学计算机系统，直接在 PC 机的 Windows 平台上运行教学机的程序。在 PC 机上运行教学机的监控程序，其运行效果和在真正的教学计算机上运行是相同的。微程序和硬布线这一级别的模拟软件，可以查看计算机内部数据、指令流动的过程和全部控制信号的运行状态，为学生修改、调试教学机已有的软件功能，并对完成自己新的硬件设计有着重要的辅助作用。

值得一提的是，我们还研制了控制器（微程序或硬布线方案）辅助设计软件，学生可以在 PC 机上使用该软件直接完成设计该计算机的控制器（包括定义指令格式和编码），划分指令执行步骤和每一步的操作功能，确定控制器需要提供的全部控制信号等全部过程，最后系统会自动生成能装入教学计算机硬件系统中实际应用的最终结果文件。学生还可以选用微程序级或者硬布线控制器级的模拟软件系统，对经过辅助设计软件得到的设计结果进行模拟运行，计算机屏幕上会详细显示每一步的运行结果，便于大家尽早地发现问题。由于执行上述控制器设计和模拟运行的整个过程都是在 PC 机上完成的，脱离了实际的教学机系统，因而工作更方便，效率更高，对节省学时、帮助学生加深对控制器组成、设计等方面的理解很有益处。

1.1.2 教学计算机的指令系统和指令格式的设计目标

合理地确定一台计算机的指令系统，无论对计算机厂家还是对最终用户来说都是十分重要的事情，它密切关系着计算机设计与实现的复杂程度和生产成本，以及计算机使用的难易程度和运行效率。对主要用于教学和教学实验目的的计算机，特别是 16 位字长的教学计算机来说，确定其指令系统，更多地应关注它在教学过程中的作用和使用方法，至少应解决好以下几个问题。

- 指令格式和功能的典型性，即选择 DLX 指令集结构，适当靠拢 RISC 机的指令格式，包括尽可能小的指令集、简化的寻址方式等。这样做不仅可以简化教学计算机的结构，实现简单，易于实现指令流水，更重要的是，选用有良好典型性的指令格式和功能，更容易完整地讲解清楚指令系统和控制器设计，有利于教学内容的整体安排。
- 指令系统要有一定的完备程度，给出的指令格式应适当规范，指令分类合理，指令执行步骤容易理解，符合人们通常的编程使用习惯。总之，指令系统要有较好的易学易用性，能确保选用后，方便地设计教学计算机的配套软件。
- 更高的可扩充性，即为学生添加各种新的指令留下比较充足的余地。为此，可以把完整系统中的指令划分为必备的（约 30 条）基本指令（由设计者实现）和待扩展的

(约 20 条)保留指令(由学生设计实现)两大类;在扩展新的指令时,实现手段要适当简单,但要有比较多的设计内容和选择余地,以便更好地培养学生的创新意识和开创能力,有利于深化教学内容。

- 符合教学计算机的特定要求。对 16 位字长的计算机,指令的操作码部分可以选择为固定长度;再结合我们所选用的运算器器件 Am2901 芯片内含 16 个通用寄存器的特点,对寄存器寻址方式使用 4 位的形式地址。如果需要,还可以指定 16 个累加器中的几个为专用的寄存器,以便最大程度地简化教学机硬件组成,简化指令执行流程设计。

遵照上述思路,我们最终确定了教学计算机的指令格式,如图 1.4 所示。这套指令系统支持单字指令和双字指令,第一个指令字的高 8 位是指令操作码字段,低 8 位和双字指令的第二个指令字是操作数地址字段,分别有 3 种用法。

图 1.4　教学机的指令格式

8 位指令操作码(记作"IR15～IR8")中各位的含义如下。

- IR15、IR14 用于区分指令组:0×表示 A 组,10 表示 B 组,11 表示 C、D 组;
- IR13 用于区分基本和扩展指令:0 表示基本指令,1 表示扩展指令;
- IR12 用于简化控制器的实现,暂定该位的值为 0;
- IR11～IR8 用于区分同一指令组中的不同指令(最多 16 条);
- IR11 还用于区分 C、D 组指令(每组最多 8 条):0 表示 C 组,1 表示 D 组。

第一个指令字中的操作数地址字段可以给出:4 位的通用寄存器编号(DR 代表目的寄存器,SR 代表源寄存器),8 位的 I/O 端口地址,8 位的相对变址偏移量。第二个指令字中的操作数地址字段用于给出 16 位的立即数、16 位的直接内存地址,或者 16 位的变址偏移量。

指令系统中包括的全部指令放到第 3 章介绍。

1.1.3　教学计算机的硬件结构和组成设计概述

作为教学和教学实验使用的计算机,其硬件结构和组成设计要比较好地体现出尽可能多的主要教学内容,功能部件应划分清晰、设计合理,它们之间的连接关系应适当规范。

教学计算机运算器部件的设计选用了位片结构的 4 位长度的运算器芯片,内含功能比较合理的 ALU,双端口控制读出、单端口控制写入的 16 个累加器,以及完成乘除法运算的

乘商寄存器等功能部件，在功能和组成两个方面都比较好地体现了运算器部件的教学内容。

在教学计算机控制器部件的设计中，同时实现了微程序和硬布线的两种控制器，通过一个开关简单地完成两种控制器之间的切换。讲课过程通常以一种控制器方案为主，对控制器的组成与设计技术讲明讲透，再用少量学时顺便介绍另外一种控制器方案，这样有利于比较两种控制器的异同之处和各自的优缺点，更可以取得事半功倍的教学效果。设计指令执行步骤时，对于选用中小规模集成电路实现的控制器，为了突出基本原理和减少所用的器件数量，其指令被设计为串行执行，下一条指令必须在当前指令完全结束后才能开始。

在教学计算机存储器部件的设计中，出于简化和容易实现的目的，选用静态存储器芯片设计内存储器系统，包括了只读存储区(ROM，存放监控程序等)和随机读写存储区(RAM)两部分。特定情况下，可以支持多体存储器的低位地址交叉编址技术。

在教学计算机总线部件设计中，选用单总线结构，数据总线、地址总线和控制总线比较简单，既可以保证教学机的正常运行，又体现出总线设计的基本原理。

关于计算机中的接口线路，教学计算机提供了 2 路串行接口(Intel 8251)，可以接入 PC 机作为教学计算机的仿真终端完成输入输出操作；作为扩展实验内容，也可以通过在一个 40 芯的器件插座上插上其他标准接口线路(例如 Intel 的 8255、8253 等)并适当接线，完成常用接口线路的输入输出操作。

在教学计算机系统中，实现并提供了简明、常规的中断处理能力。

用于教学目的的计算机系统，在具体的硬件实现方面与一般的商用计算机有着某些明显不同，至少表现在如下 3 个方面。

首先是要满足“处处可见”的要求，不仅全部部件和全部器件要采用全暴露形式，计算机运行过程中各种数据和控制信号的状态及其时空关系也要容易观察，这对于学生完成教学实验、掌握计算机组成与设计技术是必不可少的。因此，教学机的线路板上设置了大量的开关和指示灯，以及适当的跳接线插针、插孔等。这也带来了另一个要求，即设备要具有可靠性和更高的抗破坏性，换句话说，要能够尽量降低学生实验过程时常会发生的错误对教学机的损坏程度，还要容易维修，这是教学计算机设计与实现过程中的难点之一。

其次，在教学计算机的实现中，要给出尽可能高的可扩展性，即可以方便地修改已有设计，或者增加新的功能。限制太多，留的选择余地太少，会严重影响教学实验的水平和质量；若保留选择的余地过多，不仅难以实现，还会使教学实验难度增大，反过来也难以保证教学实验质量。如何在这二者之间进行平衡取舍，无疑是留给设计者的又一大难题。对于这一问题，我们更强调选择余地适当多留一点，通过加强实验指导，详细描写实验说明，让学生开展一些有创意的教学实验内容，来增强学生的创新意识和自主学习的能力。

最后，要考虑教学计算机系统能够体现出多大的知识面，即涵盖多大范围的主要教学内容。为了兼顾不同院校的教学安排及“计算机组成”和“计算机体系结构”两门课程的实验需求，我们把教学计算机系统做成了一个系列产品。

从字长划分，教学计算机可以实现 8 位字长，也可以实现 16 位字长。难能可贵的是，它们是在同一个印制电路板上实现的。换言之，只要教师具备相应的知识和技术能力，把 16 位的教学计算机作为参照，重新设计并组装成 8 位字长的计算机是可行的。当然，这已经是具有完全不同的指令系统、不同的硬软件组成的两套计算机，可以用在“计算机组成原理”课程的教学过程中，也可以用于课程设计，甚至作为学生的毕业设计题目都是可行的。

从选用的器件划分，主要选用中小规模集成电路实现 CPU 系统。在教学计算机的设计与实现中，总体上基于传统的手工设计的方式，在体现计算机组成的原理性知识的同时，在很多场合都涉及了数字逻辑电路和逻辑设计的具体知识，更接近计算机实现的线路逻辑的底层，是比较传统的教学内容和实验安排。

从计算机系统的完整性划分，目前国内多数的计算机组成的教学实验是在硬件裸机装置上完成的，上面没有配备必要的软件系统，计算机组成被作为一门“纯正的”硬件课程来看待，这显然是很过时的做法，与国外先进的教学安排相差甚远。我们则坚持把硬软件配置比较完整的教学计算机系统用于教学实验，汇编语言程序设计、简单的操作系统雏形（监控程序）、不同层次的软件模拟等应该在“计算机组成原理”课程中占有适当的地位。

除此之外，我们特别设计了计算机控制器（含微程序控制器和硬布线控制器）辅助设计软件。该软件将以导航方式指明控制器的设计流程，引导学生逐项完成必要的设计，包括定义指令系统、划分指令执行步骤和每一步实现的功能、选择有关控制信号等，并把原来完全的手工设计过程中那些机械重复的微指令编码、微指令地址安排，以及书写硬布线控制器的每一个控制信号的逻辑表达式等琐碎的劳动交由计算机自动完成，极大地提高了教学实验的工作效率和设计质量。学生可以通过运行模拟软件系统，检查辅助设计的结果，尽快地找出设计中的错误。正确的设计结果可以被直接装入实际的硬件系统中，通过运行最终设计的硬件教学计算机系统，查看实际运行效果。设计过程和操作运行步骤密切相关，环环紧扣，使学生在探索中学习，油然而生的成就感将激励他们不断前进。

1.1.4 软件模拟实现的教学计算机系统

把已经用硬件实现的教学计算机系统的全部功能，通过软件模拟的办法在 PC 机上再次实现出来，是我们做出的重大努力之一。我们通过网上查询，并与已经出国的人员直接交流，了解到国外有一些著名的大学，在“计算机组成原理”课程的教学过程中，选用了软件模拟的方式完成多项教学实验。其优点是使用方便，变动设计的灵活性强，可以比较容易地对比不同设计方案对计算机执行性能影响的程度，不使用专用硬件设备完成教学实验，实验成本也会比较低，不要求专职的人员管理硬件教学实验室等。这样做还有一个很大的好处，即授课与辅导教师更容易与学生交互。当然，这种做法也有缺点，学生学习硬件课程的整个过程，不接触（拥有）自己可以设计与修改的硬件设备，更多的体会集中到计算机的功能设计部分，难以对线路与逻辑设计部分、计算机的硬件实现等部分有所收获。如何权衡硬件的教学计算机系统和软件模拟的教学计算机系统在课程教学中的作用，可能是仁者见仁，智者见

智，一时也难有结论。对此，我们采取的措施是同时实现这样两部分内容，并且同时使用在教学过程中，使它们发挥不同的作用，通过教学实践来探索更好的解决问题的途径。为了更便于比较，做到更好的资源复用，我们在设计与实现软件模拟的教学计算机系统的过程中，采取了两项措施：

- 坚持与硬件实现的教学计算机系统保持尽可能高的一致性。为此，模拟软件使用的信息，例如监控程序的执行码、微程序控制器的微程序的二进制编码文件等，与硬件教学机系统中使用的完全相同。这样，辅助设计产生的设计结果，既可以直接用于模拟，也可以直接用于写到硬件教学机的部件中，确保二者之间有最好的一致性。
- 在模拟软件的设计中，比较准确地按照硬件系统的主要功能部件实现模拟，确保硬件实现的与软件模拟现实的系统有良好的对照关系，希望在教学过程中可以得到更好的教学效果。

实现的模拟系统，模拟的重点集中到两个层次上。

一个层次是指令级模拟。模拟的最小单位是一条机器指令，根据得到的指令的具体内容计算出这条指令的执行结果。这个模拟软件的运行对象是机器指令组成的程序，运行结果将显示在计算机的屏幕上。当被运行的程序对象是监控程序时，实际上就是在模拟监控程序的执行过程，可以执行每一个监控命令，其效果与在真实教学计算机上运行监控程序是一样的，此时也可以说是在执行教学计算机系统一级的模拟，可以建立并运行汇编程序，也可以建立并运行 BASIC 等语言的程序。

另一个层次是微体系结构级模拟。模拟的最小单位是一条指令的一个执行步骤，对微程序控制器而言它是一条微指令，对硬布线控制器而言则是指令的一个节拍。这个模拟软件的运行对象也是机器指令组成的程序，运行结果将显示在计算机的屏幕上，但它有两种不同的运行方式：连续运行和单步运行。在连续运行方式下，在计算机屏幕上见到的运行效果和前一个层次上的运行效果是一样的，只是运行速度要慢得多，因为要模拟计算每一条指令的每一个执行步骤的结果，经过几个模拟步骤才计算出一条指令的运行结果，PC 计算机的计算量要增大很多。在单步运行方式下，在计算机屏幕上将显示指令的这个执行步骤的有关运行结果，包括指令寄存器的内容、指令所处的执行步骤、地址总线、数据总线、各个累加器的内容、运算器的输出结果和标志位的结果、状态寄存器的内容、控制器全部控制信号的当前状态等完整的信息，主要用于查看、理解、分析计算机内指令执行的真实情况，这对于检查自己新增加的控制器功能（扩展的新指令的执行过程）的正确性是很有帮助的。

开发模拟软件需要注意选择运行平台。鉴于已经把 Windows 系统作为仿真终端的运行环境，因而全部模拟软件系统也都要统一到这一平台之上。

1.1.5 教学计算机在教学过程中的作用

这一教学计算机系统的组成和设计技术，作为教学内容的实例有很强的典型性，修改或扩展已有功能便可以比较好地满足教学实验的要求；硬件实现的计算机系统可以用于现场

的真实硬件系统的教学实验，软件模拟实现的计算机系统方便检查硬件和软件设计的正确性。

“计算机组成原理”是计算机系本科生必修的最重要的专业基础课程之一，课程在整个教学安排中占有很重要的地位。“计算机系统结构”课程也是计算机系本科生重要的专业课程之一，但系统结构课程的教学实验却不容易落实。应该清醒地看到，国内对于计算机硬件为主的课程的定位尚不够准确，教学过程中还存在一些模糊认识，或由于条件上的限制采取了一些不够进取的办法，这一切严重地影响教学质量，从长远看，这对我国信息产业的发展是不利的。

对硬件为主的课程定位不够准确，主要表现在一种“喜软怕硬”的心理，认为计算机硬件（尤其是“计算机组成原理”课程）难教更难学，于是采取适当躲避的态度对待之，极端一点的，直接说“计算机组成原理”课程没有用。显而易见，如果计算机专业的本科生连计算机组成原理这样一些专业基础知识都不具备，如何更好地学习后续的专业课程呢？还能发展成为计算机专业人士吗？更不要说成为高级专门人才了。

对课程的模糊认识之一，认为“计算机组成原理”是纯硬件课，把它和计算机软件系统截然分开，而不是把它作为完整计算机系统的组成部分之一来合理安排教学内容，这是国外30多年前就已舍弃的陈旧做法。模糊认识之二，认为计算机基础硬件不再重要，以为主要应该讲解高档计算机中最新出现的技术和最新进展，殊不知这些最新出现的技术和最新进展都是在基本原理上发展而来的，轻视专业基础知识，最终架设的知识结构只能是空中楼阁，更不符合大学通才教育的要求。

条件上的限制，主要表现在缺乏必要的、能比较好地满足教学实验要求的教学实验设备，使教学过程更多地建立在课堂授课的方式下，缺乏必要的教学实验支持，这对于技术性和工程性很强的课程来说几乎成为灾难性的问题。引申一步看，还包括大部分年轻任课教师所具有的知识结构基本上也只限于书本知识，缺乏设计和实现一台真实一点的计算机基本硬、软件系统的经历，一时还难以完全满足教学的实际需要。长此以往，培养高素质的计算机专业的高级人才将难以保证。

我们的观点是，解决上述问题的出路之一，在于建设被广泛接受和认可的、高质量的教学资源，包括体现最新水准的高质量的教材，形象生动的教学课件（教学教案），研制并合理配备能覆盖主要教学内容、具有良好教学实验性能的教学实验设备和软件模拟系统。

“计算机组成原理”课程在清华大学计算机系的教学改革思路是，从课堂教师讲授为主、学生完成验证性的教学实验为辅的传统教法，改变成为在精简课堂授课内容的基础上，开创一项以计算机完整的硬、软件系统的工程设计与实现的课题研究为重要支撑手段的新的教学途径，尽量做到：

- 从学生听课为主的被动接收知识的学习方式，转变成结合课题研究与工程设计来主动学习，给学生更多自由支配的时间，充分发挥学生自主学习的积极性；
- 从传授知识为主变为传授知识与培养能力并重的教学模式。清华大学关注开创意