# 计算机体系结构

胡伟武、汪文祥

# 计算机专业的几门"当家"课

- 如何"造"计算机而不是如何"用"计算机
- 硬件(CPU):
  - 计算机组成原理
  - 计算机体系结构
- 软件(OS):
  - 操作系统
  - 编译原理

### 我国IT产业发展不平衡

- 我国IT产业应用发达,基础薄弱
  - 应用: 微信、电商、搜索、电子政务等
  - 基础: CPU、操作系统、数据库
  - "好比在别人的墙基上砌房子,再大再漂亮也可能经不起风雨,甚至会不堪一击"
- 产业主动权比市场占有率更重要
  - 电脑是做芯片的赚钱,手机是做整机的赚钱(下表中单位为亿美元)
  - 华为2017/2018年净利润475/593亿元人民币(主要来自通信设备),不及苹果零头
  - 2017年我国规模以上工业企业平均利润率为6.5%,IT产业平均利润率为5.4%

2017年	销售收入	利 润
联想	453	-1
苹果	2292	484
英特尔	628	96
展鋭	21	_

2018年	销售收入	利 润
联想	510	6
苹果	2656	595
英特尔	708	210
展鋭	16	_

## 我国IT产业人才严重失衡

- 应用型人才充足,基础型人才匮乏
  - Java及JavaScript编程工程师数以百万计,Java/JS虚拟机人才不到百人
  - 熟悉内核的工程师是BAT等网络企业两百万以上年薪猎聘对象
  - 用现成的IP"攒"SOC的人才不缺,设计CPU、GPU等核心IP人才奇缺
- IT教学主要基于国外平台,不熟悉自主平台
  - 中小学信息化教育实际上是"微软培训班"
  - 大学计算机专业主要教学生"用"计算机,而不是"造"计算机
- 研究生教育注重培养写论文的人才,缺少工程能力的培养
  - 积极参与国际学术会议,但缺席国际工程会议(如Java虚拟机)
  - 像Java虚拟机国际会议参会人员多在四、五十岁,有20年以上工程经验

## 能力一旦丧失,再建起来非常困难

- 前苏联在乌克兰的尼古拉耶夫造船厂
  - 前苏联解体时,比"库兹涅佐夫海军元帅号"更先进的"乌里扬诺夫斯克号" 航母大合拢已近尾声,一家挪威公司提出乌克兰制造6艘船舶,但指定要在乌 里扬诺夫斯克号的0号船台,一家美国钢铁公司提出500美元一吨高价收购该航 母的建造用钢并交了定金。等乌里扬诺夫斯克号拆解完毕,两家公司同时违约

### • 运十下马

- 运十下马原因很多,但要和麦道合作,组装麦道飞机需要使用运十占用的工厂也是重要原因。《财富》杂志: "因为上海搞过运十,我们才与上海合作,如果不扳倒运十,美国飞机就不好打进中国"。有关部门制定的大飞机三步走策略落空:第一步,中美合作组装MD80/90;第二步,中外合作研制AE100,2005年服役;第三步,自行设计制造180座飞机,2010年实现
- 恢复能力需要三十年以上:工程能力只能在实践中多轮试错才能形成
  - 我国八十年代还能自主设计计算机,现在从小学到大学都在教如何用计算机

# 课程介绍

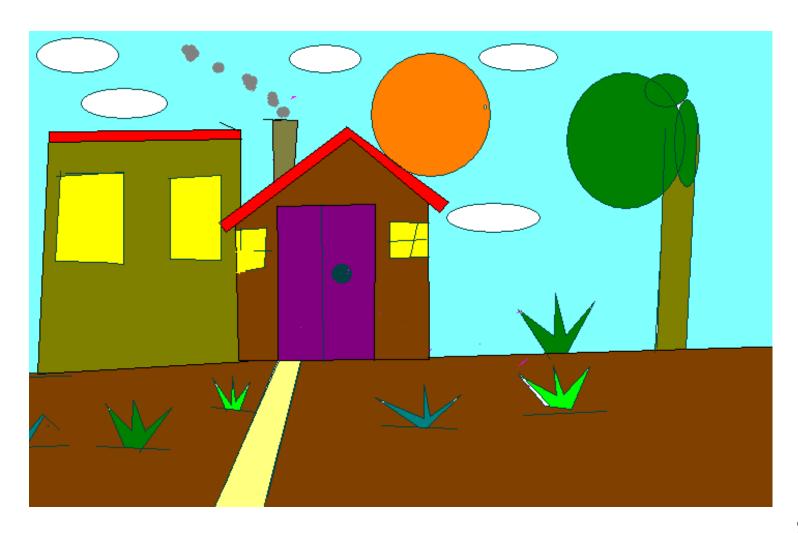
- 对计算机CPU的认识
- 本课程的目的
- 本课程内容和要求

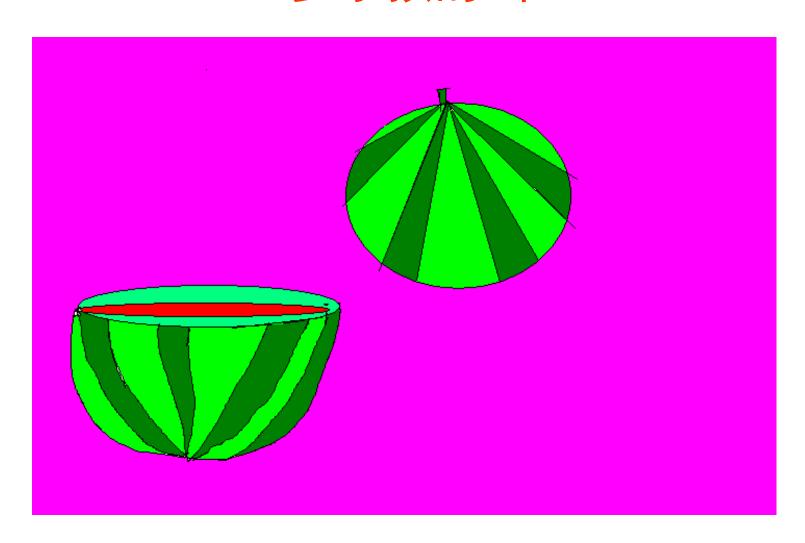
### 什么是CPU

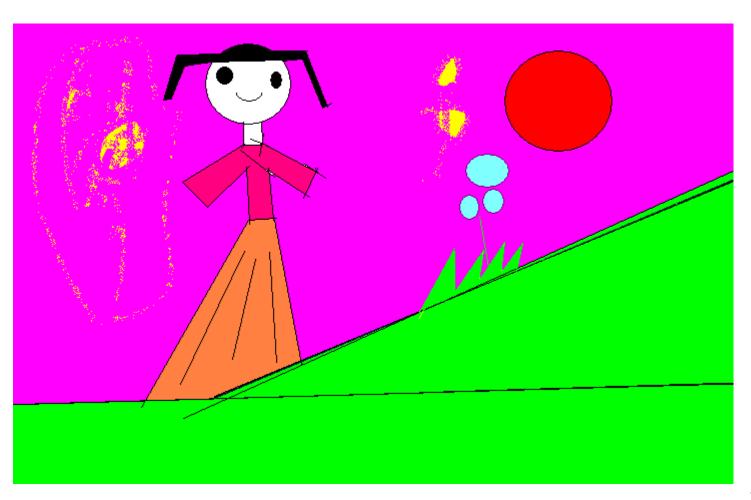
- 一个6岁小孩的答案
  - CPU就是在一张纸上画一些方块,
  - 然后用线和箭头把这些方块连起来,
  - 再写上几个字,涂上点颜色,
  - 最后一烧,烧出一个亮晶晶的小方块
- 我们比她多知道些什么?

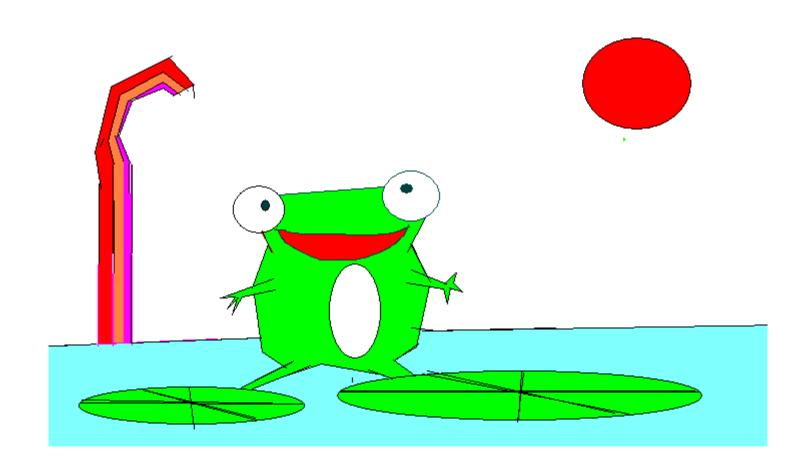
# 会用计算机不稀奇

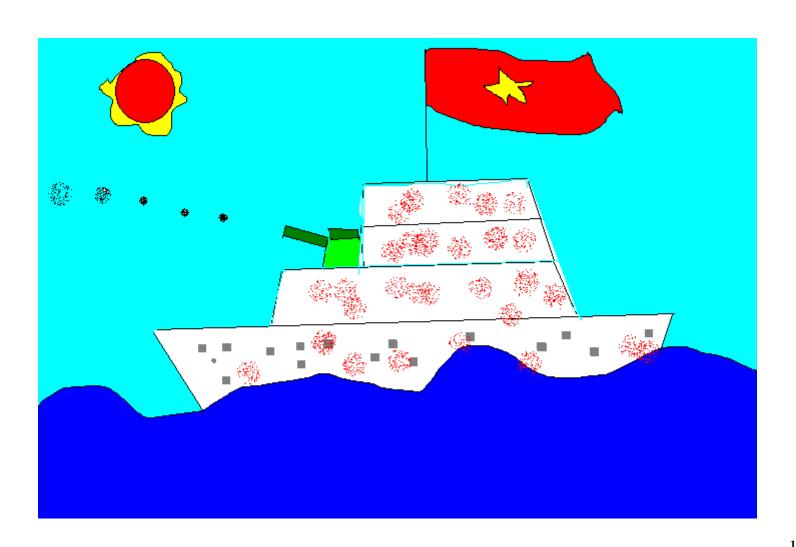












# 8岁小孩用计算机编的 报纸



主编:胡文尧

2003年10月6日早期-

### 为中华崛起而读书

尼亚共民生一些光中的被重合家, 品金国人民物理的标业组. 周星共13岁影年,因家里贫困,只好常用意业全家,建位父亲抗防告读书。

他父帝他下火车时,抱着一片繁华的市区场。"没非不要抓住里去然,这里是外国

周星典一章都着他父的话,为什么在中国土地上的这类结方,中国人都不晓去! 他 佛英雄会婚个女女。

一个国旗长、他的了一个好朋友。一包到班界维持了。

注单确实与其他丝含不同,使各种手奇特。例上的特人中,中国人似少。如此,从 前面传来唯变声,他何些过去看,在些参阅11前,一个农场被被的强灾,或在向两个多。 其制度的中国型势民体,身边运动着两个型等气势的域人。他特许了一种维明自了。这一 位如女的支充被举人的汽车机死了。中国举参对权不知由举人,运动中国人统得了效量。 周围的中国人部企业才平、心怀证义成的周延典拉着周举上前规划监督。"为什么不利 能继人!"温馨气势地站进伏。"小孩子摆开心!这是给养法物的复数!"伏克克里站。

从程序共享表,周星典心情极沉重,他常常吃在食前商程序共为商业运共重要。 沉

一次、控战共进大家上展、周围举门。"你们为什么读书?"有的说。"为明礼司 读书。"有的话。"为我舍可读书。"有的话。"为父母可读书。"有的话。"为护徒 可读书。"当场到周基典的时候,是治教有力益国等。"为中岛之眼包可读书!" 校长 **是除了,他没料到,一个十几的菜子,食料这样大的之气。** 

周星去在沈阳像小量的三年中,最多成绩的各名打造家。他的作文曾被造影名里。 作为小学生的模式作文、运输编写成本书里。

15 岁形年,周基典以优异或统令理武革南州中华、形时、伯父的全省自任园境、他 数别用专得目、美量的数据分别。 第一直领卖数额中、企场目的费、但基础是为压量数 相信成,他在民上认为所讲,资外阅读大量并移、实现了来含的知识,他的身份或数型。 品金的第一。金校师会都被敬重他,就他品品学典代的好学生、学校为了武士他,宣称 免去他的学杂会,他成为南洋中学唯一的一个免会年。

周星共在中少年时期、为中华之间改多力读书、以后、各名为了这个目标、他自我 丝工作。 凭乳丝米酸了染血精力。 

### 三荣书层

### 三株书医为治代末部并统内部处理名的

一条彩色、色彩诗绘书品一位"枝方草 资料 微量的人"。各述12至17度在全线中,就全 **克文物保存充好、其中为每所总统、可包约** 念席、食育基下到为是企业位、各边总位在 宝上会,并点是各过会每用过的原物,点上 有色过点子刺下的一个"早"字。一次因上学生 到,各地在井泉上到了一个"马"中,以激扬自 巴拉对上量.







大量主道:在明明集 在会员 在上于蓝色、如上

可是有效、发而是物势、静而是物势、衰而是物势、危 而可能移。他考太竞、并有体统、知识失巧、例还就多。 古之教明明等于关下等、先为英国、教育英国等。 SAZZ, KAZZZ, SAZA, KAZAS, SI 来心,就成果心态、先进来电,就进来电池、先起来知。 物格可分別型、対型可分配法、企業可分心理、心

重可后身体,身体可含实产、安产可含两治、同治可含

金为如本、金为如之或者。

自关学以至于众人。一名赞以他会为本、艾本凯可 京治会否念,其所正合称,而其所称会正、桑之存在。

启前着鱼大块人家自小时候不喜欢全书。\$\$\$\$\$\$、到数上去问题。」 一类,家自天没有各上学,在农上东省市,四季季,不知不觉。 到了维外、感知的阳光、放换的小岛、超风越慢的成束使染白重双不已。 "这么好的关气,如果整天在度单读书多经常足了" 工

点角点看,在一个破弃图17日,鱼者一个诸头自反的全统统。 五在唐一相照子战组的铁件。宋白龙过去,"金统统,生在战什么?" 」 "我要在这样物件会成一个绣龙针。" 全线线的放头,对象自 美了美,接着天保下头牵绑身着。 4.

"绣龙针""杂白美物。"品丝衣服用的绣龙针鸡""土

"古品、铁粹这么姓、什么时候被会成绩独的感觉特视了"工

全线结反复杂色。"流水可以含石、品心可以移山、物件为什 在不能会或透透处计模1 " 上

"甘品、学的年纪这么大了!" 工

"只要我下的功会比别人准,没有做不到的存物。" 工 全线线的一番话、小家会技术性、光品量会之后、其类常选注 学、每天的学习各种别用功、终于成了全部千古的特征。 上

**读感。** 凭金数什么事情,只要有包心,一次会成功的,功克不负有。

我们的同学、如果在学业上统认真、拥力、有包心、成绩好一点品没有 均凝的.



整整工作相比,每景整工作或排皮、只有互联目扩张 点。可是每个互联目的耳朵,含我睁开醒的的时候,是是 🛴 贝克运术可选了: 🛒 爱见些些血症并以前委并, 有一次, 我忍不住的爸爸。"爸 📩

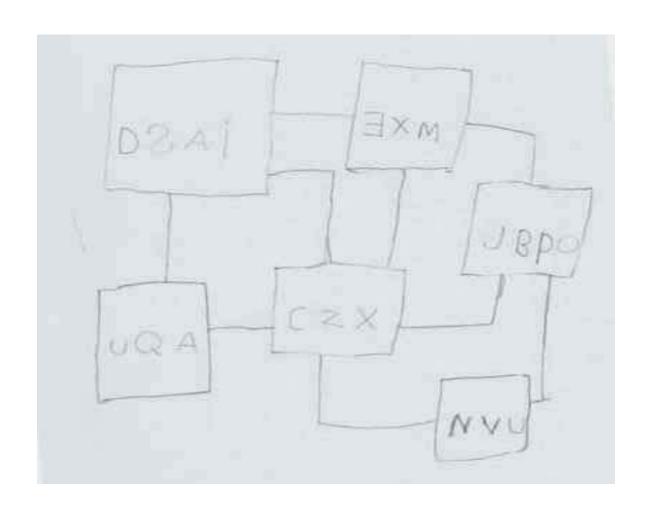
"那你在不用关关学习呀!"

"吴如道水村身,不理则道。" 整整的特殊重要了我,让我觉得最为这是一种形象。 我快乐的希腊在知识的海岸里。 整整食品投资内的排槽。

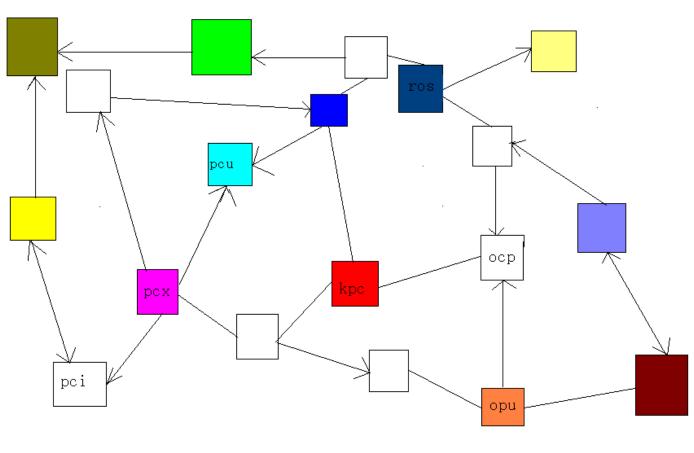
月前你一个人, 我得

又建去了。有几个 小明。"一个。" 美 父亲。"\$4\$\$\$话

# 一个5岁小孩设计的CPU

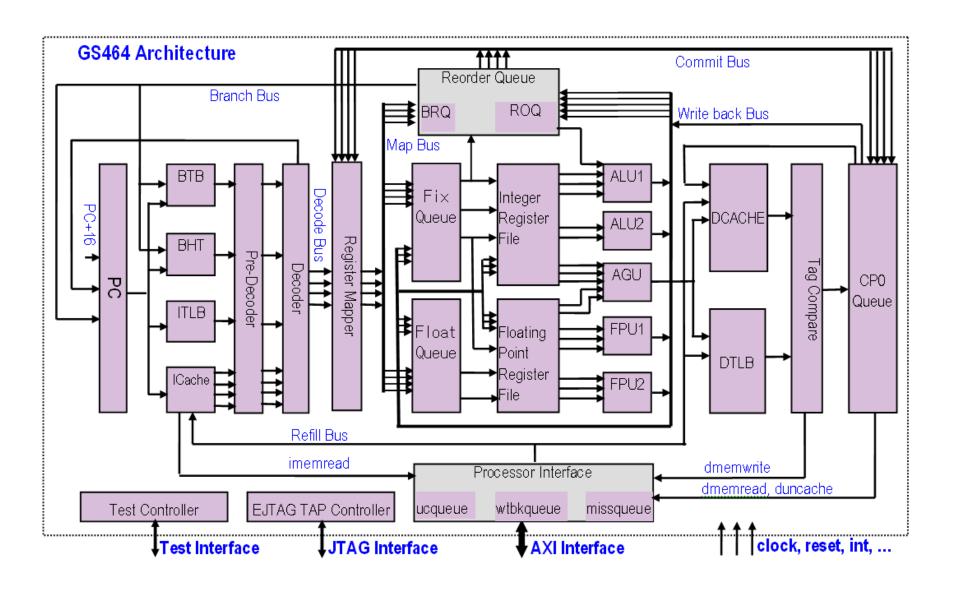


# 8岁孩子的设计



我的CPU

## 我的设计



# 这几个设计有什么不同?

## 本课程内容和要求

- 就从我按下键盘翻一页幻灯片讲起
  - 为什么我按一下键盘能够翻一页幻灯片?
  - 从按一下键盘到翻一页幻灯片经过了什么过程?包括应用程序、操作系统、硬件系统、处理器、以及晶体管?
  - 程序的运行和晶片中的电子的流动之间的关系?
  - 在上述过程中涉及的重要量化指标(性能、功耗、成本)的关系?
- 这些是本课程希望回答的问题
  - 知其然,还要知其所以然

## 上知天文、下知地理

- 计算机系统结构的位置
  - 居于系统软件和逻辑电路之间
- 计算机体系结构的演变
  - 1950-60年代: Computer Arithmetic
  - 1970-80年代: Instruction Set Architecture
  - 1990年代后: CPU, Memory, I/O, Multiprocessors……
- 从界限清晰到界限不清晰
  - ISA: RISC、CISC=>Transmeta、Itanium、虚拟机
  - 逻辑和电路: 晶体管=>晶体管+连线

应用、操作系统、编译系统 计算机系统结构(性能、价格、功耗) 逻辑设计、电路设计、工艺制造

### 国科大《计算机体系结构》课程设置

- 本科《计算机体系结构基础》: 主要强调基础性和系统性
  - 作为软硬件界面的指令系统结构,包含CPU、GPU、南北桥协同的计算机硬件结构, CPU的微结构,并行处理结构,计算机性能分析等五部分主要内容。
- 硕士《计算机体系结构》: 主要介绍CPU微结构
  - 包括指令系统结构、二进制和逻辑电路、静态流水线、动态流水线、多发射流水线 、运算部件、转移猜测、高速缓存、TLB、多核对流水线的影响等
- 博士《高级计算机体系结构》: 主要强调实践性
  - 通过设计真实的(而不是简化的)CPU,运行真实的(而不是简化的)操作系统, 对结构设计、物理设计、操作系统做到融会贯通

## 系列课程的特点

- 一是系统性,体系是"系统的系统",很难就体系结构本身讲体系结构,需要做到对体系结构、基础软件、电路和器件的融汇贯通。
- 二是基础性,计算机体系结构千变万化,但几十年发展下来沉淀下来的原理性的东西不多,希望从体系结构快速发展的很多现象中找出一些内在的本质的东西。
- 三是实践性,计算机体系结构是实践性很强的学科,要设计在"硅" 上运行而不是在"纸"上运行的体系结构。因此课程作业和实验强调 实践性。

### 什么是计算机体系结构

- 计算机体系结构(Computer Architecture)是描述计算机各组成部分及 其相互关系的一组规则和方法,是程序员所看到的计算机属性。
  - 计算机体系结构主要研究内容包括指令系统结构(Instruction Set Architecture, 简称ISA)和计算机组织结构(Computer Organization)。
  - 微体系结构(Micro-architecture)是微处理器的组织结构,并行体系结构是并行计算机的组织结构。
  - 冯诺依曼结构的存储程序和指令驱动执行原理是现代计算机体系结构的基础。

### 计算机体系结构的表现方式

- 计算机体系结构可以有不同层次和形式的表现方式。
  - 计算机体系结构通常用指令系统手册和结构框图来表示,结构框图中的方块表示计算机的功能模块,线条和箭头表示指令和数据在功能模块中的流动,结构框图可以不断分解一直到门级或晶体管级。
  - 计算机体系结构也可以用高级语言如C语言来表示,形成结构模拟器,用于性能评估和 分析。
  - 用硬件描述语言(如Verilog)描述的体系结构可以通过电子设计自动化(Electronic Design Automation,简称EDA)工具进行功能验证和性能分析,转换成门级及晶体管级网表,并通过布局布线最终转换成版图,用于芯片制造。

# 本科《计算机体系结构基础》主要内容

- 第一部分:引言(第1章)
  - 体系结构研究内容、主要性能指标、发展趋势以及设计原则
- 第二部分:作为软硬件界面的指令系统结构(第2-4章)
  - 指令反映了结构设计者对应用和基础软件的深刻理解,不仅仅是操作编码
  - 指令系统结构、特权态指令系统结构、软硬件协同
- 第三部分: CPU、GPU、南北桥协同的硬件结构(5-7章)
  - 冯诺依曼结构的具体体现,CPU、GPU、内存、IO之间是如何协同的
  - 计算机硬件结构、计算机接口及总线、计算机系统上电启动过程
- 第四部分: CPU的微结构(第8-9章)
  - 建立指令系统和晶体管之间的"桥梁",硕士课程的重点内容
  - 运算器设计、指令流水线(控制器设计)
- 第五部分:并行处理结构(第10-11章)
  - 现代计算机通过多层次的并行性开发来提高性能
  - 应用程序的并行行为、多核处理器

# 硕士《计算机体系结构》主要内容

- 第一部分: 计算机体系结构基础
  - 01、计算机系统结构基础
  - 02、二进制与逻辑电路
  - 03、指令系统结构
- 第二部分: 指令流水线
  - 04、静态流水线
  - 05、动态流水线
  - 06、多发射与动态调度
- 第三部分: 重要功能模块
  - 07、功能部件设计
  - 08、转移及转移猜测
  - 09、CACHE及存储层次
  - 10、存储管理
- 第四部分:多核结构
  - 11、多处理器结构与并行处理
- 第五部分:实践是最好的课堂
  - 12、介绍龙芯10个设计失误

# 教材与参考书

- 教材
  - 《计算机体系结构》(第二版):清华大学出版社
- 参考书
  - 《计算机体系结构基础》(第三版): 机械工业出版社
  - 《MIPS设计透视》: 北航出版社
  - 《数字集成电路---设计透视》:清华大学出版社

# 辅导老师

- 辅导老师
  - 吴瑞阳: wuruiyang@loongson.cn

# 作业与考核

- 本课程的学习任务较重
  - 平时作业: 33分(共11次作业,每次3分)
  - 期末考试: 67分
  - 作业: 一周内上交为有效,不得打印
  - 考试方式:课堂闭卷,70%题目是作业题
  - 辅导老师会定期讲解作业答案
- 多数作业不是对课堂内容的复习,而是对课堂内容的延伸
  - 所以不要抱怨"这道题老师没讲过"
  - 小学是老师抱着爬山,中学是老师牵着手爬山,大学是跟在老师后面爬山,硕士 是顺着老师指的方向自个爬,博士是老师指定一座山自己找方向爬