

# 计算流体力学与实践

西安交通大学 航天航空学院

主讲人：王 嫻

# 课程简介

中文名称：**计算流体力学与实践**

英文名称：**Computational Fluid Dynamics and its Application**

课程编码：**062116**

课程学时：**40**（理论学时：**32**，课外实践：**8**）

课程学分：**2.0**

先修课程：**流体力学**，计算方法，**C或Fortran**语言编程基础

# 课程性质与目的

性质：硕博课

目的：本课程的目的是希望学生对计算流体力学/数值传热学有一个系统深入的理解，掌握扎实的理论基础，和初步具备**解决实际问题的能力**。通过该课程的学习，可为开展科学研究的重要手段-数值模拟技术打好基础。

# 课程内容简介

本课程是面对航天航空、能源动力、机械、化工等研究生专业课程, 课程内容分为**理论部分**（**CFD/NHT算法理论基础及其应用**）及**专题部分**（新型数值方法及**CUDA**高性能计算）两大部分。理论**基础**主要包括有限差分及有限体积法, **应用**则包括**SIMPLE**算法, **HSMAC**算法（程序）, **FLUENT**（自学）。本课程的特点是强调基础、突出应用。通过本课程的学习, 希望学生对计算流体力学有一个系统深入的理解, 掌握扎实的理论基础和具备较强的**解决实际问题的能力**, 为后续进行科学研究打好基础。

# 考核方式

① 平时作业：30%

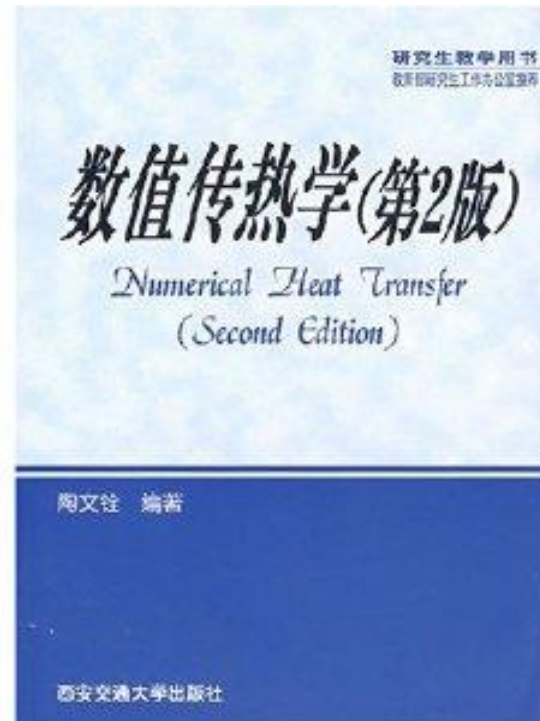
② Project：70%

- HSMAC程序：简单二维算例
- 自选科研相关项目（可用 FLUENT）
- GPU并行：自选程序或LBM程序
- MPI并行：自选程序或LBM程序

**Email : wangxian@xjtu.edu.cn**

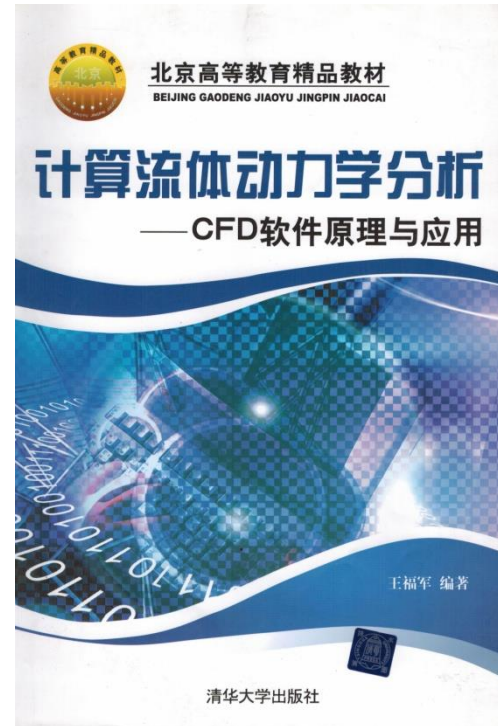
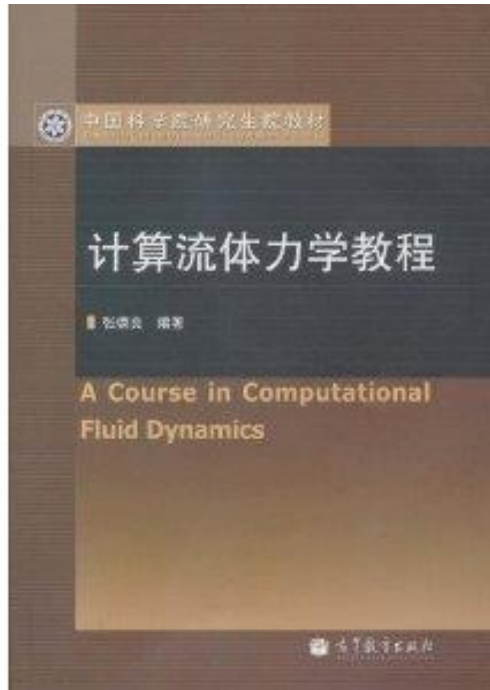
# 参考文献

1. John D. Anderson JR. 著，姚朝晖，周强编译，计算流体力学入门。北京：清华大学出版社，2010.
2. 陶文铨，数值传热学。西安：西安交通大学出版社，2001.



# 参考文献

1. 张德良，计算流体力学教程。北京：高等教育出版社，2010.
2. 王福军，计算流体动力学分析-CFD软件原理与应用，北京：清华大学出版社，2004.



# 讲义下载：交大主页→教师个人主页

西安交通大学  
XIAN JIAOTONG UNIVERSITY

在校学生 | 教职员工 | 校友 | 考生与访客 | 合作者

搜索分类

首页 交大概况 院系设置 组织机构 本科书院 医学教育 科学研究 师资队伍 人才培养 国际交流 图书档案 校友服务 校园生活 信息服务

【双甲子校庆】前轴之“揭秘”校庆部品

双甲子校庆 课程中心 招生网 公开课 科研系统 来华留学 交大校史 虚拟校园 西交拾影 English Version  
它山之石 就业网 信息公开 大仪共享 iTunesU 公派留学 人才招聘 校史故事365 百年薪火

【双甲子校庆】前轴之校庆月重要活动速进  
日期 2016年03月29日  
西安交通大学2016年校庆月重要活动日程安排新鲜出炉，百廿交大等你共同分享双甲子荣光。 [详细]

【双甲子校庆】校庆诗歌朗诵会演绎精彩华章  
日期 2016年03月29日  
3月25日晚，西安交大兴庆堂内激情澎湃，华光璀璨。“情浓两甲子，诗韵颂中华”西安交通大学建校120周年校庆诗朗诵... [详细]

进入新闻网

- 【双甲子校庆】前轴之学院活动看点（一）
- 【双甲子校庆】陕西日报：传承南洋文脉 点亮西部之光
- 中央电视台报道西安交大自主招生新变化
- 西安交大航空宇航科学与技术等12个学位授权点通过评估
- 【双甲子校庆】五所交大学子汇聚西安 共话青春理想
- 【双甲子校庆】西安日报：家国情怀浓郁的交大西迁专家

新竹交通大学校长张惠中来访  
【中国科学报】姚焱：无限风光在险峰

办公自动化  
教师个人主页  
思源WebMail  
思源学生Mail  
校内信息门户  
综合信息服务  
校领导信箱  
教师平台

进入主页新闻栏目

<http://gr.xjtu.edu.cn/web/wangxian/>



# 第一章 计算流体力学简介

# 本章内容

1. 简介
2. CFD在航空航天领域
3. CFD内容
4. CFD商用软件介绍
5. 应用实例
6. 高性能计算与CFD-CAE

# 1.1 流体力学与计算流体力学

**流体力学**，是研究流体（**液体和气体**）的力学运动规律及其应用的学科。主要研究在各种力的作用下，流体本身的状态，以及流体和固体壁面、流体和流体间、流体与其他运动形态之间的相互作用的力学分支。**流体力学是力学的一个重要分支**，它主要研究流体本身的静止状态和运动状态，以及流体和固体界壁间有相对运动时的相互作用和流动的规律。在生活、环保、科学技术及工程中具有重要的应用价值。（**理论分析**）

**计算流体力学**或计算流体动力学，英文Computational Fluid Dynamics，简称**CFD**，是用电子计算机和**离散化的数值方法**对流体力学问题进行**数值模拟**和分析的一个分支。计算流体力学是目前国际上一个强有力的研究领域,是进行传热、传质、动量传递及燃烧、多相流和化学反应研究的核心和重要技术，广泛应用于**航天设计、汽车设计、生物医学工业、化工处理工业、涡轮机设计、半导体设计**等诸多工程领域。（**实际应用**）

# 1.1 计算流体力学

基础：计算数学、近代流体力学和计算机科学

工具：高速大容量计算机为工具

途径：数值模拟、可视化处理

目的：实现对各种流动现象的准确分析和预报

数值传热学： Numerical Heat Transfer NHT

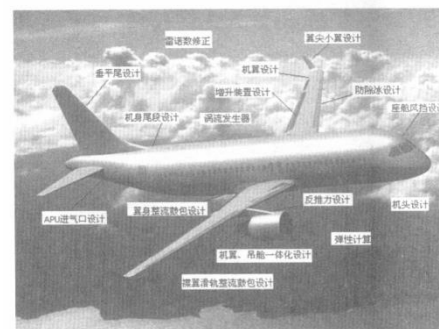
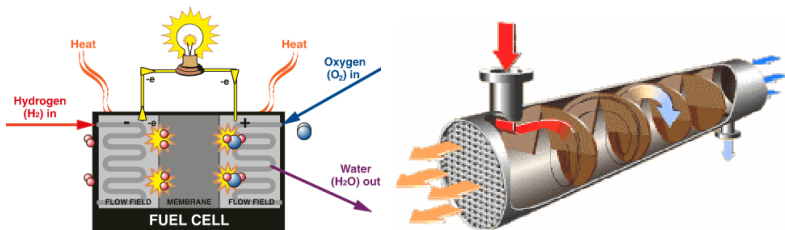
# 1.1 计算流体力学

## CFD/NHT 的研究内容：5M + A

### Machine、Mesh、Method、Mechanism、Mapping Application

- **Machine**: 计算机，CFD/NHT的硬件基础；
- **Mesh**: 计算网格，网格划分是整个数值计算的基础和前提；
- **Method**: 计算方法，CFD/NHT中最活跃的领域；
- **Mechanism**: 流动机理，CFD/NHT最终目的是获得流动传热结果以及与之相对应的机理→分析问题、解决问题、设计；
- **Mapping**: 流动显示；
- **Application**: 应用，即CFD/NHT的最终目的是在以航天航空为代表的众多工业领域得到良好应用。

# 1.1 计算流体力学



## CFD-NHT 应用范围极广:

- 航空航天：外部流动、热防护、燃气轮机。。。
- 能源环境：换热器、噪声、污染、燃烧、水利建设、石油工业。
- 化工：反应、燃料电池、食品、化妆品、粉体工程。。
- 自然灾害：天气预报、台风、海啸、沙尘暴。。。。
- 交通工具设计：汽车、火车、飞机。。。。
- 机电系统：MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems), 散热元件。。。。
- 医学：呼吸过程、血液流动、人体内的化学反应。。。。

## 1.2 计算流体力学的发展概况

### 初创阶段（1965-1974年）

研究主要内容为解决CFD中一些基本理论问题，如模型方程（湍流、传热、辐射、气体-颗粒作用、化学反应、燃烧等）、数值方法（差分格式、代数方程求解等）、网格划分、程序编制与调试、确定算法的可靠性、精确性等。

## 1.2 计算流体力学的发展概况

### 走向工程应用阶段（1975-1990年）

数值算法在这一阶段得到充分的发展和完善。出现一批高阶精度的数值算法。**CFD**开始面向一些新的学科领域：高超声速流动、湍流、多相流、非牛顿流、化学反应流、燃烧、轰爆等。如何使**CFD**在工程实践中得到广泛应用。计算程序没有通用性，只能自己开发，自己使用。



## 1.2 计算流体力学的发展概况

### 工程设计与开发研究应用快速发展期（1991年-）

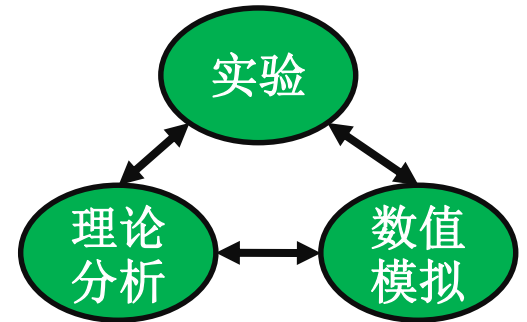
计算程序软件化：软件公司纷纷推出功能齐全、经济实用的**商业软件**。前后处理（网格及可视化）得到快速发展。

基础研究，特别是数值算法方面，进展不很显著。

**大规模高性能计算**发展迅速（实际问题的需求）。

# 1.3 计算、理论、实验流体力学的关系

实验现象和理论分析是数值模拟的基础，计算结果又必须由实验现象和理论分析来验证。



## 1.理论分析 (Theoretical solution)

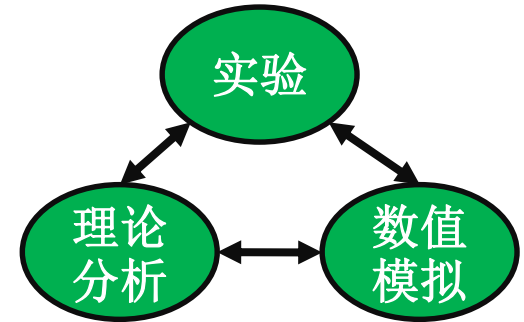
重要性不容低估；

为检验数值计算的准确性提供了比较依据。

## 2.实验测定 (Experimental solution)

基本研究手段:现象观察；物性测定；考核依据

# 1.3 计算、理论、实验流体力学的关系



## 3.数值模拟 (Numerical solution)

数值模拟是多学科交叉领域，在探索未知、促进科技发展和国防安全等方面具有不可替代的作用。

随着计算机资源的日益丰富与强大，作用与重要性越来越大。

历史上，1985年西欧共同体曾经将**PHEONICS**列为对共产党国家禁运的产品。

# 1.3 计算、理论、实验流体力学的关系

天气预报—数值模拟是唯一的方法



大尺度涡



热带风暴“Cris”的卫星云图

# 1.3 计算、理论、实验流体力学的关系

## 超声速跨大气层飞行器的设计

◆ 现状：地面实验设备、风洞不存在高超声速飞行器所涉及的所有流态，没有同时可以模拟跨大气层飞行器所经历的高马赫数和高温流场风洞。

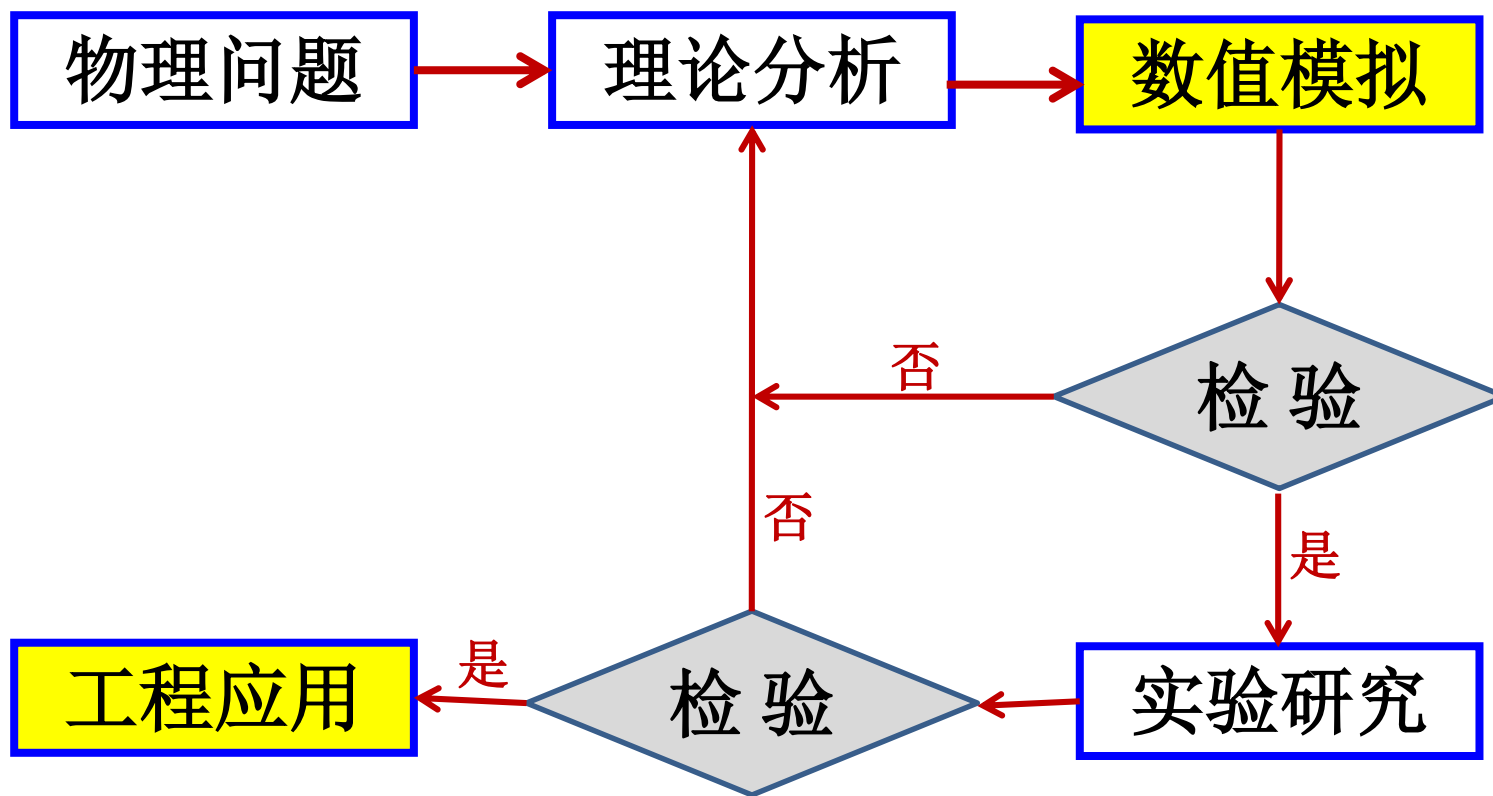
◆ 设计手段：计算流体力学。



只有当计算流体力学发展到能对飞行器外流和发动机内流实现完全三维流场的快速、精确可靠的数值模拟的时候，这一天才会成为现实。

# 1.3 计算、理论、实验流体力学的关系

综合设计法:



# 1.3 计算、理论、实验流体力学的关系

	优点	缺点
实验	<ul style="list-style-type: none"><li>物理现象和测试结果<b>可靠</b></li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>设备要求高、设计制造周期长</li><li>真实模拟物理问题困难</li><li>测试仪器调试复杂</li><li>只能得到<b>有限</b>的实验数据</li><li><b>实验经费庞大</b></li></ul>
理论	<ul style="list-style-type: none"><li>物理概念清晰</li><li>物理规律能公式化</li><li>物理规律简洁</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>分析只能适用于<b>简单</b>的流动</li><li>非线性问题分析十分困难</li></ul>
计算	<ul style="list-style-type: none"><li>适用于线性及<b>非线性</b>问题</li><li>能处理<b>复杂</b>的流动问题</li><li>能得到流动的<b>全过程</b></li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>计算模型和结果<b>可靠性不易检验</b></li><li>边界数值处理复杂</li></ul>

# 1.4 验证与确认

数值模拟可信度研究：

验证：Verification

确认：Validation

V & V 研究

计算机**辅助**工程

CAE: computer **aided** engineering

验证：对**计算模型**求解精度进行评估，即在给定的计算精度范围内，计算模型反应概念模型程度的论证关系。验证过程不考虑计算结果和物理问题的关系。

确认：是通过与实验现象对比，来对**计算结果**精度进行评估。确认考虑计算结果和实验结果之间的关系。



## 2 CFD在航空航天领域

航空航天领域主要涉及以下学科：

**固体、结构力学**（飞行器在工作环境中结构、变形、所受应力、外形设计、材料等）；

**流体力学与传热学**（气动性能、噪声、复合传热、外形设计，热防护，热管理等）；

**控制系统**

## 2 CFD在航空航天领域

- 1970 年代， 飞机设计主要依赖风洞实验

YF-17研制， 风洞实验13, 500小时

- 1980年代， CFD逐渐发展， 部分取代实验

YF-23， 风洞实验5, 500小时， CFD计算15, 000机时



## 2 CFD在航空航天领域

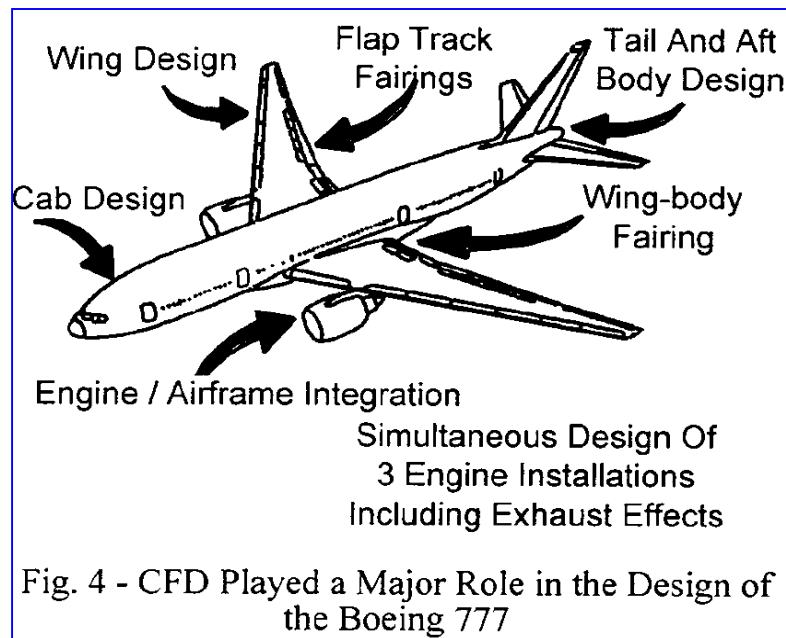
- 90年代，CFD 在飞机设计中发挥了主力作用

波音777， CFD占主角

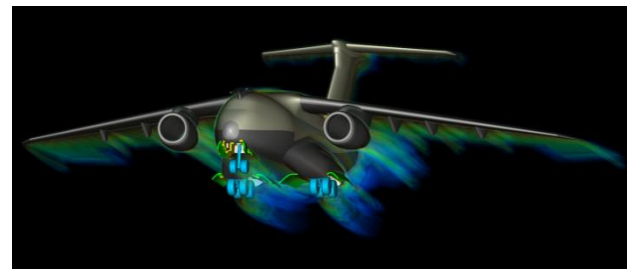
- 2000 之后，CFD 取代了大部分风洞实验

波音787：全机风洞实

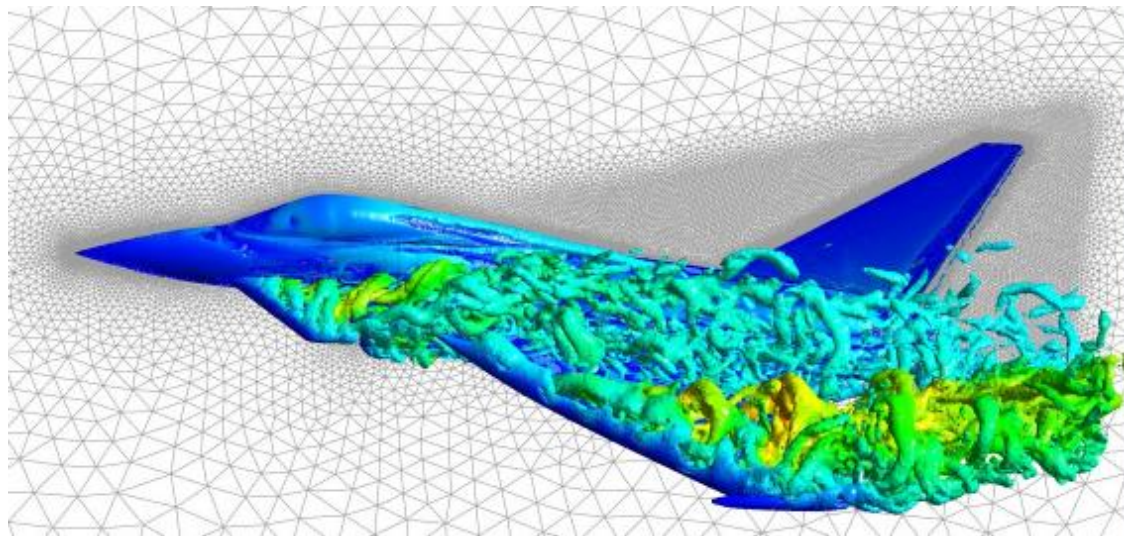
验仅3次



## 2 CFD在航空航天领域



- 航天领域，CFD发挥着实验无法取代的作用  
实验难点：复现高空高速流动条件



### 3 CFD/NHT内容

#### 算什么??

- ◆ 压力场 → 应力、升阻力系数、激波、噪声。。。
- ◆ 速度场 → 应力、漩涡。。。
- ◆ 温度场（能量场） → 热应力、导热换热、对流换热、辐射换热、沸腾蒸发、相变。。。
- ◆ 浓度场（质场） → 掺混、扩散。。。

### 3 CFD/NHT内容

#### 数值解的基本思想 (基于连续介质假设)

把原来在空间与时间坐标中连续的物理量的场 (如速度场、温度场、浓度场等), 用一系列有限个离散点 (称为节点, node) 上的值的集合来代替; 通过一定的原则建立起这些离散点上变量值之间关系的代数方程 (称为离散方程, discretization equation); 求解所建立起来的代数方程以获得所求解变量的近似值。

### 3 CFD/NHT内容

怎么算??

- ◆ 控制方程 → 连续方程、动量和能量方程
- ◆ 边界条件 → 决定物理问题，即在算什么

绕波音747  
的流动

亚声速风洞  
流动

绕风车的流  
动

控制方程相同  
流场不同

Why???

真正导致各种特定形式解的是边界  
条件（有时加上初始条件）

### 3 CFD内容

## 怎么算??

非定常、三维、可压缩黏性流动控制方程（守恒性）：

连续方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0$$

动量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \mathbf{V}) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \mathbf{V}) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \mathbf{V}) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \end{aligned}$$



### 3 CFD内容

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left[ \rho \left( e + \frac{V^2}{2} \right) \right] + \nabla \cdot \left[ \rho \left( e + \frac{V^2}{2} \right) \mathbf{V} \right] \\ &= \rho \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K \frac{\partial T}{\partial y} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \frac{\partial (up)}{\partial x} - \frac{\partial (vp)}{\partial y} - \frac{\partial (wp)}{\partial z} \\ &+ \frac{\partial (u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial (u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial (v\tau_{xy})}{\partial x} \\ &+ \frac{\partial (v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial (v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial (w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial (w\tau_{yz})}{\partial y} \\ &+ \frac{\partial (w\tau_{zz})}{\partial z} + \rho \mathbf{f} \cdot \mathbf{V} \end{aligned}$$

能量方程

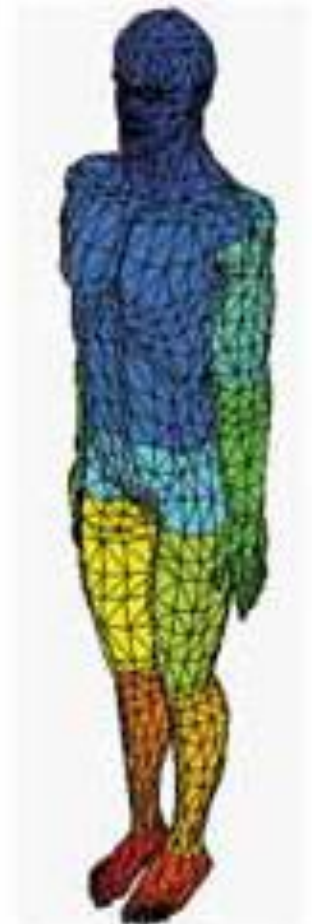
**解析解 无法得到!!!**

## 3 CFD内容

怎么算??

### 数值解

- 求解区域划分成网格
- 离散控制方程
- 在每个网格上迭代求解，求出每个网格点上的压力、密度、速度、温度等
- 数值解不是精确解，准确度与离散精度，网格数目等众多因素有关。计算（模拟）指导工程

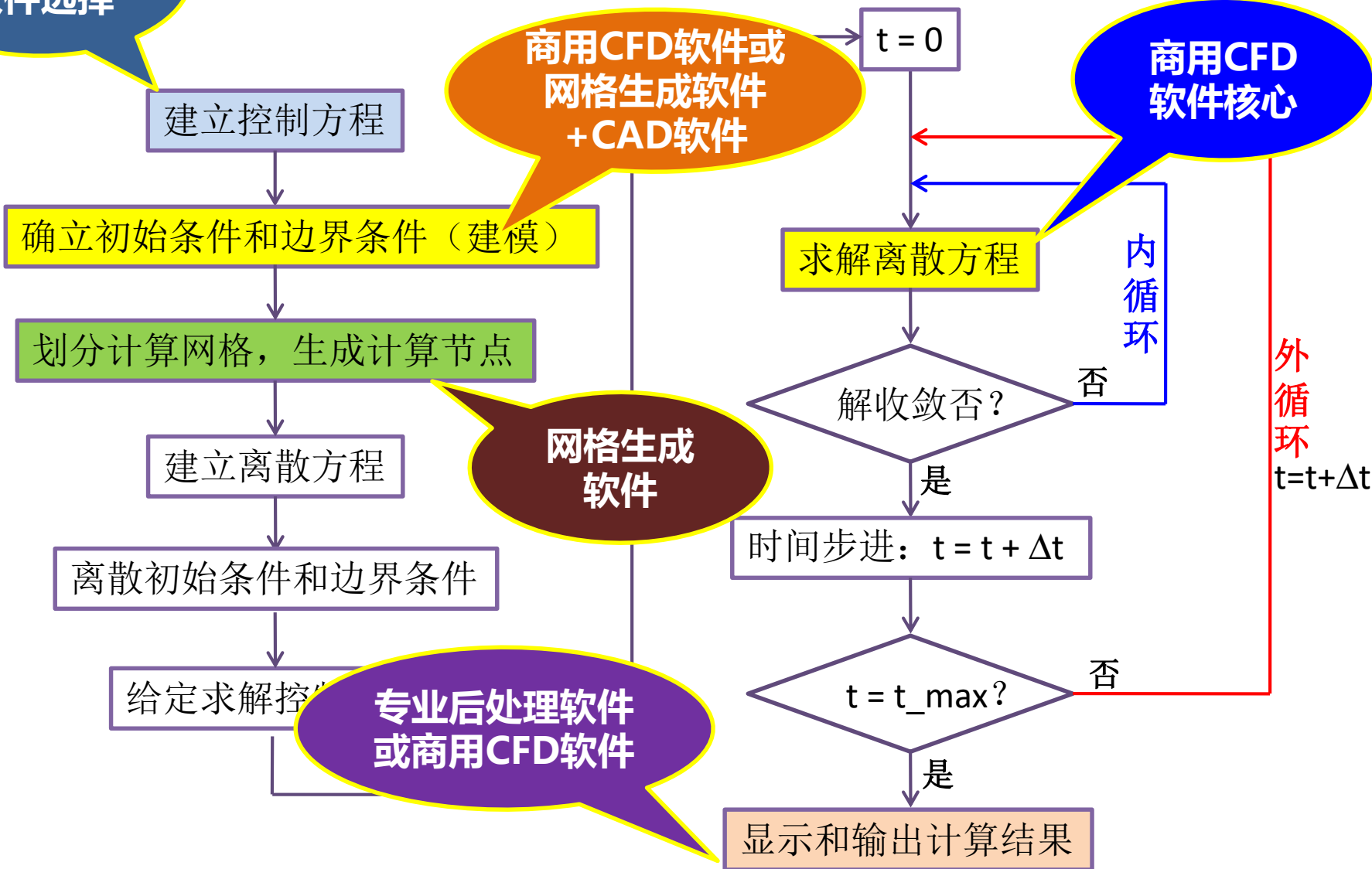


Computational  
Human Body Model

# 求解过程

商用CFD  
软件选择

内循环：代数方程组的迭代求解循环  
外循环：时间步进（非稳态工况）



## 4.1 常用计算流体力学CFD 软件

**CFX**

**FLUENT**

**STARCD**

**PHOENICS**

**PowerFlow**

- ◆ 功能比较全面，适用性强，几乎可以求解工程界中的各种复杂问题；
- ◆ 具有比较易用的前后处理系统和其他CAD及CFD软件的结构能力，便于用户快速完成造型、网格划分等工作。同时，还可让用户扩展自己的开发模块；
- ◆ 具有比较完备的容错机制和操作界面，稳定性高；
- ◆ 可在多种计算机，多种操作系统，包括并行环境下运行。

## 4.1 常用CFD软件

### PHOENICS

- 世界上第一套计算流体动力学与传热学的商用软件；
- Parabolic Hyperbolic Or Elliptic Numerical Integration Code Series；
- 目前由CHAM公司开发；
- 有CAD接口，几乎可以读入任何CAD软件的图形文件；
- 有Windows和Linux版本，有并行版本；
- 网址：<http://www.cham.co.uk> 和 <http://www.phoenics.cn>

### CFX

- 第一个通过ISO9001质量认证的商业CFD软件，在航空航天、旋转机械、能源、石油机械化工、机械制造、汽车、生物技术、水处理、冶金、环保等领域有6000多全球用户；
- 由英国AEA Technology 公司开发，2003年被**ANSYS**公司收购；
- 有自己的前处理模块**ICEM** CFD生成网格，并可集成在CAD环境中；
- 网址：<http://www.ansys.com> 和 <http://www.ansys.com.cn>

# 4.1 常用CFD软件

## STARCD

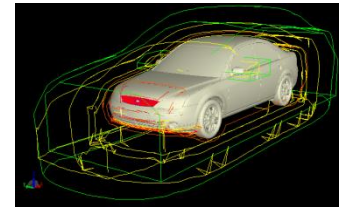
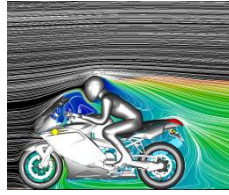
- 由英国帝国学院提出，1987年由英国CD-adapco集团公司开发；
- Simulation of Turbulent flow in Arbitrary Region；
- 有自己的前处理器、求解器和后处理器；
- 前处理器-Prostar具有较强的CAD建模功能，与当前流行的CAD/CAE软件有良好的接口；
- 后处理器具有动态和静态显示计算结果的功能；
- 具有多种网格划分技术，多种边界条件，适应复杂计算区域；
- **多级透平模拟常用工具（流体机械）**；
- 提供了与用户的接口，用户可根据需要编制Fortran子程序；
- 网址：<http://www.cd-adapco.com> 和 <http://www.cdaj-china.com>

# 4.1 常用CFD软件

## FLUENT

- 由美国FLUENT公司于1983年推出的CFD软件；
- 目前功能最全面、适用性最广、国内使用最广泛的CFD软件之一；
- 使用GAMBIT作为前处理软件，可读入多种CAD软件的三维几何模型和多种CAE软件的网格模型；
- 可让用户定义多种边界条件，提供用户自定义子程序功能；
- 有Windows和Linux版本，有并行版本；
- 公司还有专用软件包，如专门用于粘弹性和聚合物流动模拟的POLYFLOW，专门用于电子热分析的ICEPAK，专门用于分析搅拌混合的MIXSIM、专门用于通风计算的AIRPAK等；
- 网址：<http://www.FLUENT.com> 和 <http://www.hikeytech.com>

# PowerFlow



- EXA公司于1992年成立于美国伯灵顿，目前在斯图加特、慕尼黑、巴黎、伦敦、底特律、波士顿和东京、大阪设有技术中心，中国分公司于今年6月成立；
- 多个软件包 PowerFLOW®, PowerCLAY, PowerTHERM, PowerCOOL, PowerSPECTRUM;
- **其核心流体动力学产品 PowerFlow采用了与传统连续介质力学方法完全不同的LBM (Lattice Boltzmann Method) 方法；**
- 利用大型的硬件集群（HPC），可以对完整的CAD设计模型无需简化直接进行流体气动及噪声计算，并获得高度精确的结果；
- 价格昂贵（一般用上百个cpu做计算，年租几十万美金），目前暂无教育版本；
- PowerFlow产品自从开发成功以来，在短短5年时间里，已经被丰田、本田、大众、奥迪等几乎所有著名汽车厂商选用作为主要流体计算工具。PowerFlow为这些厂商基本替代了绝大部分价格昂贵的风洞试验和散热、噪声试验，并且销售额每年在以40%的高速递增；
- 主要应用：
  - 汽车：气动阻力外形设计及优化、气动噪声和整车散热、发动机散热、除霜、刹车冷却；
  - 高速铁路机车：气动阻力外形设计及优化、气动噪声和整车散热、发动机散热、刹车冷却；
  - 建筑设计：虚拟风洞试验；
  - 船舶武器设计：水下武器阻力外形设计及优化、水动噪声计算。
- 网址：<http://www.exa.com/> 和 <http://www.exa.com/powerflow.html>



## 4.2 常用网格系统生成软件（前处理软件）

### 网格系统生成软件 Grid System

Gambit

Gridgen

GridPro

Geomesh

ICEM CFD

Hypermesh

TrueGrid

- ◆ 使用方法大同小异，各个软件间往往能够共享所生成的网格文件；
- ◆ 除自己提供几何建模功能外，还允许用户利用CAD软件（如AutoCAD、Pro/ENGINEER）先生成几何模型，然后再导入到网格软件中进行网格划分。

## 4.2 常用网格系统生成软件（前处理软件）

### ICEM CFD

- 主要包括CAD几何建模处理，网格生成处理，网格优化处理以及网格输出处理四大模块，每一模块又根据不同需要分成独立的几个模块；
- 丰富的几何接口，支持Unigraphics、Pro/engineer、SolidWorks等直接接口；支持多种格式的文件导入，支持格式化的点数据；
- 具有强大的几何模型创建和修改功能。
- 几何小面无关性。自动忽略几何模型的缺陷及多余的细小特征；
- 自动生成表面、体网格划分；
- 强大的六面体网格生成技术，快速生成以六面体为主的网格；
- 四/六面体混合网格生成技术，三棱柱与非结构化网格之间采用金字塔网格，先进的O型网格技术；
- 灵活地建立拓扑结构，既可以自顶向下建立，也可以自下而上的建立。

## 4.2 常用网格系统生成软件（前处理软件）

### GAMBIT

- 专用的前处理软件包；用来为CFD模拟生成网格模型；
- 所生成的网格，可供多种CFD程序或商用CFD软件所使用；
- 3个主要功能：构造几何模型、划分网格、指定边界；
- 提供多种网格单元，可生成结构网格、非结构网格和混合网格等多种类型的网格；
- 有良好的自适应功能，能对网格进行细分或粗化，或生成不连续网格、可变网格和滑移网格；
- 提供几何建模功能，只要模型不太复杂，可直接完成几何建模；
- 对复杂的三维CFD问题，GAMBIT建模并不是很有效，需要借助专门的CAD软件来完成几何建模；
- 开放性软件。不仅体现在输入方面，还体现在输出方面。能为多种软件提供网格。

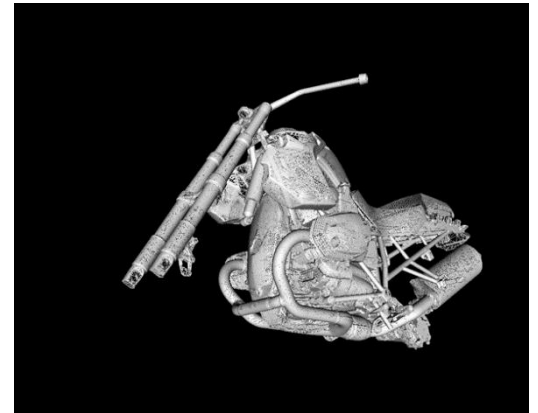
## 4.3 CFD后处理（可视化）软件

CFD - CAE 商用软件:

前处理软件（建模、网格生成）

+ 求解器（解控制方程NSE、LBE等）

+ 后处理软件（结果可视化）



**TECPLOT**

**POV-ray**

**Paraview**

**MicroAVS**

# 计算流体力学的求解过程

1. 建立所研究问题的物理**模型**，在将其抽象为数学、力学模型之后确定要分析的几何体的空间影响区域；
2. 建立整个几何体与其空间影响区域，即计算区域的**CAD模型**，将几何体的外表面和整个的计算区域进行空间**网格划分**。网格的稀疏以及网格单元的形状都会对以后的计算产生很大的影响。不同的算法格式为保证计算的稳定性和计算效率，一般对网格的要求也不一样；

\* 数学模型的建立是理论研究的课堂，一般由理论工作者完成

# 计算流体力学的求解过程

3. 加入求解所需要的**初始条件和边界条件**，入口与出口处的边界条件一般为速度、压力条件；
4. 选择适当的**算法**，设定具体的控制求解过程和精度的一些条件，对所分析的问题进行求解，并且保存数据文件结果；
5. 选择合适的**后处理器**读取计算结果文件，分析并且显示出来。

# 高性能计算及其在计算流体力学中的应用

西安交通大学  
航天航空学院  
王 嫻

wangxian@mail.xjtu.edu.cn

# 内 容

高性能计算简介

GPU高性能计算

并行计算

高性能计算在计算流体力学中的应用



# 高性能计算

## High Performance Computing (HPC)

- ◆ 通常使用**很多处理器**（作为单个机器的一部分）或者某一集群中组织的几台计算机（作为单个计算资源操作）的计算系统和环境；
- ◆ 有许多类型的HPC系统，其范围从标准计算机的**大型集群**，到高度专用的硬件；

# 高性能计算

## High Performance Computing (HPC)

◆大多数基于集群的HPC系统使用**高性能网络互连**，比如那些来自 InfiniBand 或 Myrinet 的网络互连；**网络性能和传输速率**



# 高性能计算

◆ 高性能计算作为第三大科学方法和第一生产力的地位与作用被广泛认识，并开始走出原来的科研计算向更为广阔的商业计算和信息化服务领域扩展。更多的典型应用在**电子政务、石油物探、分子材料研究、金融服务、教育信息化和企业信息化**中得以展现。而作为**普通百姓的衣食住行**，我们在刷卡购物、打电话、听天气预报、出门坐车时也已经在享受高性能计算所带来的准确与方便。

# 高性能计算

- 气象领域

“真实大气实验室”

- 石油勘探

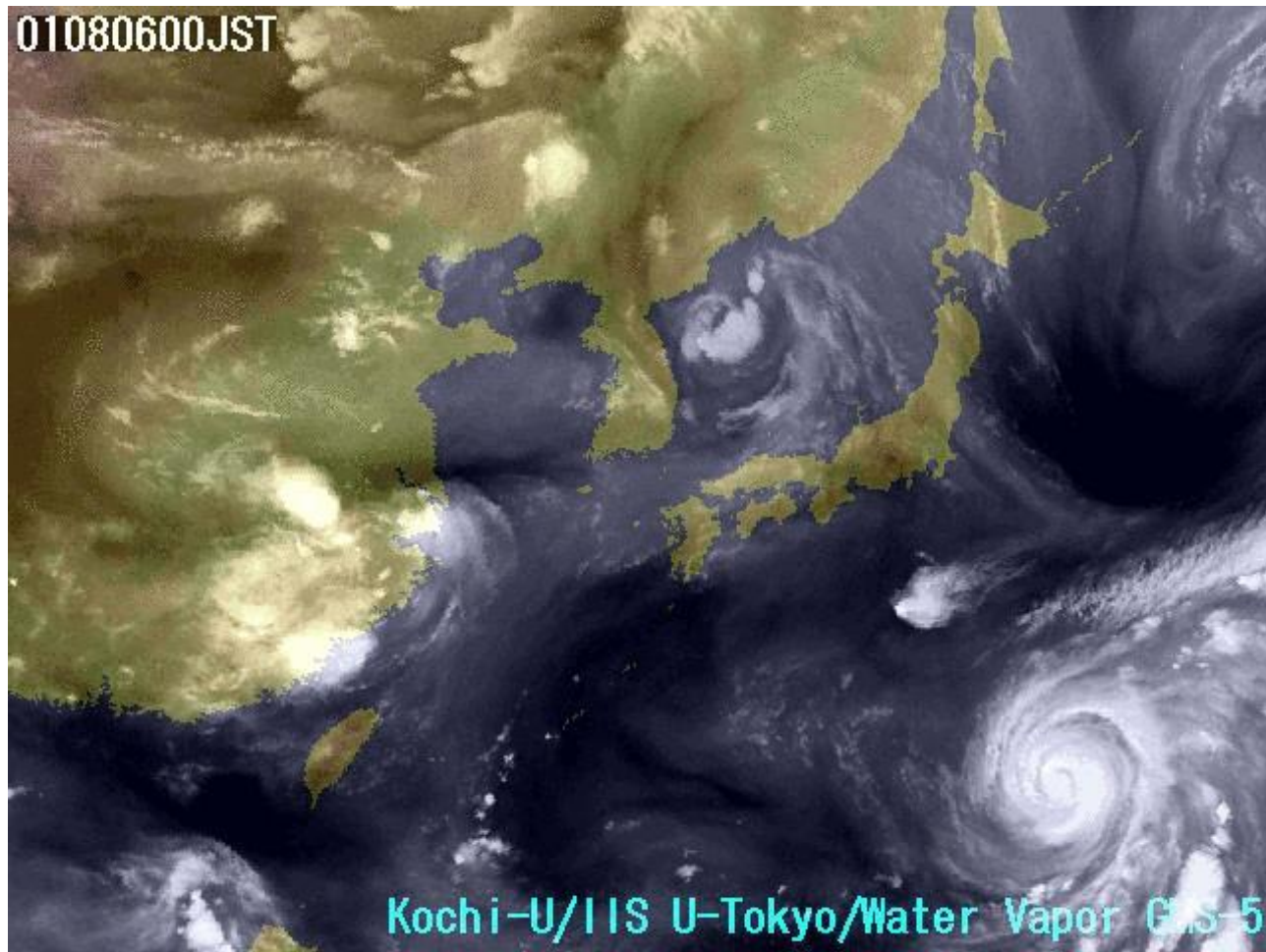
大规模地震数据处理

- 材料科学

计算材料科学

- 其它

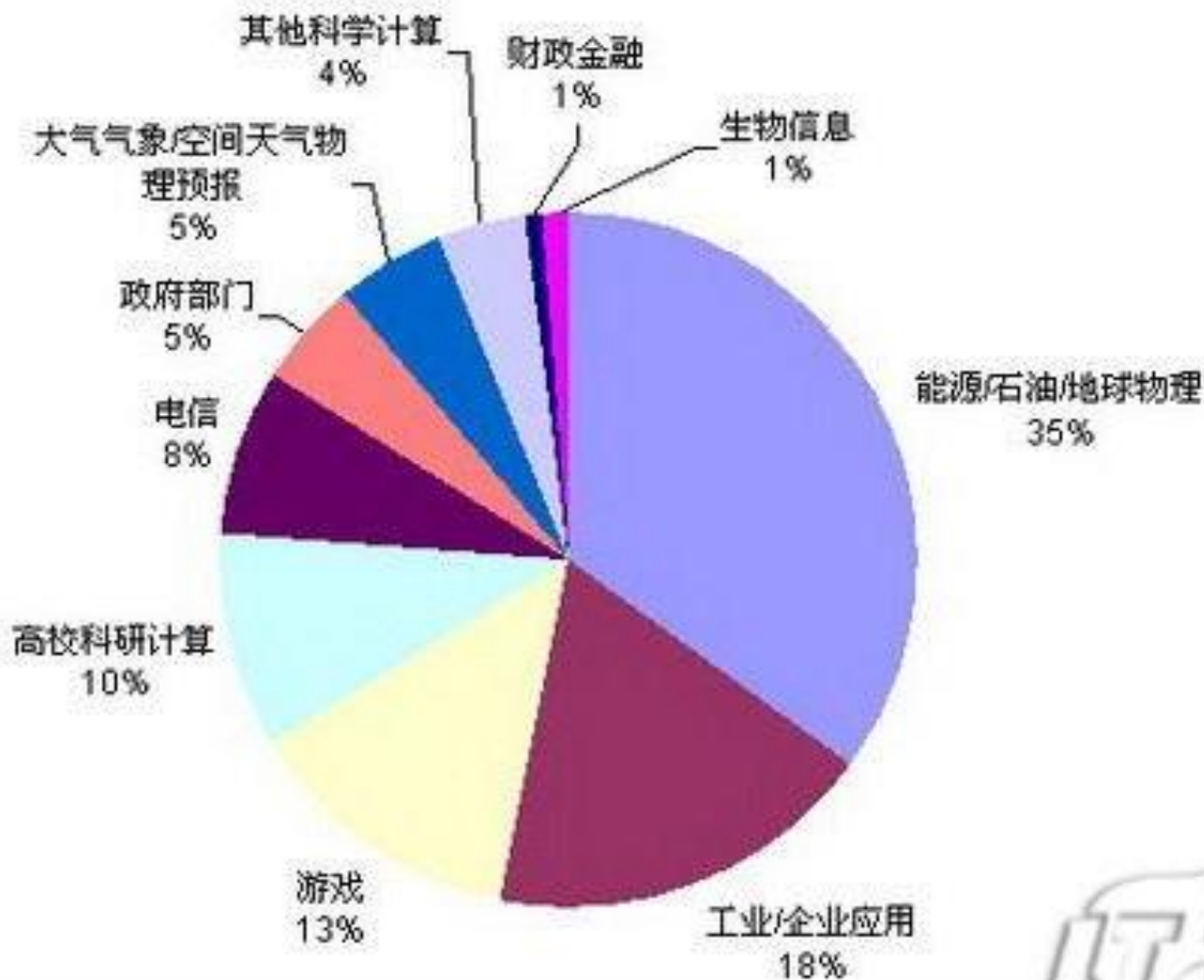
生物、电信、游戏、娱乐



数值天气预报水平的高低已成为衡量世界各国气象事业现代化程度的重要标志。美国国家大气研究中心与科罗拉多大学合作，采用了IBM蓝色基因超级计算机来仿真海洋、天气和气候现象，并研究这些现象对农业生产、石油价格变动和全球变暖等问题的影响。日本科学家研制成功了代号为“地球模拟器”的超级计算机，其主要目的就是要提供准确的全球性天气预报，使各个国家和地区更好地防御暴风雪、寒流和酷暑期的到来。

# 高性能计算

## HPC应用领域



	Rank	System	Cores	Rmax (TFlop/s)	Rpeak (TFlop/s)	Power (kW)
中国神威太湖之光	1	<b>Sunway TaihuLight</b> - Sunway MPP, Sunway SW26010 260C 1.45GHz, Sunway , NRCPC National Supercomputing Center in Wuxi China	10,649,600	93,014.6	125,435.9	15,371
中国天河二号	2	<b>Tianhe-2A</b> - TH-IVB-FEP Cluster, Intel Xeon E5-2692 12C 2.200GHz, TH Express-2, Intel Xeon Phi 31S1P , NUDT National Super Computer Center in Guangzhou China	3,120,000	33,862.7	54,902.4	17,808
	3	<b>Titan</b> - Cray XK7, Opteron 6274 16C 2.200GHz, Cray Gemini interconnect, NVIDIA K20x , Cray Inc. DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	560,640	17,590.0	27,112.5	8,209
	4	<b>Sequoia</b> - BlueGene/Q, Power BQC 16C 1.60 GHz, Custom , IBM DOE/NNSA/LLNL United States	1,572,864	17,173.2	20,132.7	7,890
	5	K computer, SPARC64 VIIIfx 2.0GHz, Tofu interconnect , Fujitsu RIKEN Advanced Institute for Computational Science (AICS) Japan	705,024	10,510.0	11,280.4	12,660
	6	<b>Mira</b> - BlueGene/Q, Power BQC 16C 1.60GHz, Custom , IBM DOE/SC/Argonne National Laboratory United States	786,432	8,586.6	10,066.3	3,945
	7	<b>Trinity</b> - Cray XC40, Xeon E5-2698v3 16C 2.3GHz, Aries interconnect , Cray Inc. DOE/NNSA/LANL/SNL United States	301,056	8,100.9	11,078.9	4,233
	8	<b>Piz Daint</b> - Cray XC30, Xeon E5-2670 8C 2.600GHz, Aries interconnect , NVIDIA K20x , Cray Inc. Swiss National Supercomputing Centre (CSCS) Switzerland	115,984	6,271.0	7,788.9	1,754
	9	<b>Hazel Hen</b> - Cray XC40, Xeon E5-2680v3 12C 2.5GHz, Aries interconnect , Cray Inc. HLRS - Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart Germany	185,088	5,640.2	7,403.5	3,615
	10	<b>Shaheen II</b> - Cray XC40, Xeon E5-2698v3 16C 2.3GHz, Aries interconnect , Cray Inc. King Abdullah University of Science and Technology Saudi Arabia	196,608	5,537.0	7,235.2	2,834

Rank	System	Cores	Rmax (TFlop/s)	Rpeak (TFlop/s)	Power (kW)
1	<b>Summit</b> - IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.07GHz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband , IBM DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	2,397,824	143,500.0	200,794.9	9,783
2	<b>Sierra</b> - IBM Power System S922LC, IBM POWER9 22C 3.1GHz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband , IBM / NVIDIA / Mellanox DOE/NNSA/LLNL United States	1,572,480	94,640.0	125,712.0	7,438
3	<b>Sunway TaihuLight</b> - Sunway MPP, Sunway SW26010 260C 1.45GHz, Sunway , NRCC National Supercomputing Center in Wuxi China	10,649,600	93,014.6	125,435.9	15,371
4	<b>Tianhe-2A</b> - TH-IVB-FEP Cluster, Intel Xeon E5-2692v2 12C 2.2GHz, TH Express-2, Matrix-2000 , NUDT National Super Computer Center in Guangzhou China	4,981,760	61,444.5	100,678.7	18,482
5	<b>Piz Daint</b> - Cray XC50, Xeon E5-2690v3 12C 2.6GHz, Aries interconnect , NVIDIA Tesla P100 , Cray Inc. Swiss National Supercomputing Centre (CSCS) Switzerland	387,872	21,230.0	27,154.3	2,384
6	<b>Trinity</b> - Cray XC40, Xeon E5-2698v3 16C 2.3GHz, Intel Xeon Phi 7250 68C 1.4GHz, Aries interconnect , Cray Inc. DOE/NNSA/LANL/SNL United States	979,072	20,158.7	41,461.2	7,578
7	<b>AI Bridging Cloud Infrastructure (ABCI)</b> - PRIMERGY CX2570 M4, Xeon Gold 6148 20C 2.4GHz, NVIDIA Tesla V100 SXM2, Infiniband EDR , Fujitsu National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) Japan	391,680	19,880.0	32,576.6	1,649
8	<b>SuperMUC-NG</b> - ThinkSystem SD530, Xeon Platinum 8174 24C 3.1GHz, Intel Omni-Path , Lenovo Leibniz Rechenzentrum Germany	305,856	19,476.6	26,873.9	
9	<b>Titan</b> - Cray XK7, Opteron 6274 16C 2.200GHz, Cray Gemini interconnect, NVIDIA K20x , Cray Inc. DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	560,640	17,590.0	27,112.5	8,209
10	<b>Sequoia</b> - BlueGene/Q, Power BQC 16C 1.60 GHz, Custom , IBM DOE/NNSA/LLNL United States	1,572,864	17,173.2	20,132.7	7,890

中国神威太湖之光

中国天河二号

# 高性能计算

- 2016年6月20日，在法兰克福世界超算大会上，国际TOP500组织发布的榜单显示，“**神威·太湖之光**”统登顶榜单之首，不仅速度比第二名“天河二号”快出近两倍，其效率也提高3倍。
- 2016年11月14日，中国“神威·太湖之光”以较大的运算速度优势轻松蝉联冠军。算上此前“天河二号”的六连冠，中国已**连续4年占据全球超算排行榜的最高席位**。
- 2017年6月19日，在德国法兰克福召开的ISC2017国际HPC大会上，“神威·太湖之光”超级计算机以每秒 12.5亿亿次的峰值计算能力以及每秒9.3亿亿次的持续计算能力，再次斩获世界超级计算机排名榜单TOP500第一名。本次夺冠也实现了我国国产超算系统在世界超级计算机冠军宝座的首次**三连冠**，国产芯片继续在世界舞台上展露光芒。
- 2017年11月13日，新一期全球超级计算机500强榜单发布，中国超级计算机“神威·太湖之光”和“天河二号”连续第四次分列冠亚军，且中国超级计算机**上榜总数**又一次反超美国，夺得第一。
- 2018年11月12日，全球超级计算机500强榜单在美国达拉斯公布，神威太湖之光排名第三。



# 2018中国HPC排名 TOP10

神威太湖之光

天河二号

天河一号

序号	研制厂商/单位	型号	安装地点	安装年份	应用领域	CPU核数	Linpack值 (Tflops)	峰值 (Tflops)	效率%
1	国家并行计算机工程技术研究中心	神威太湖之光/Sunway SW26010 260C 1.45GHz*40960/自主网络	国家超级计算无锡中心	2016	超算中心	10,649,600	93,015	125,436	74.2
2	国防科大	天河二号升级系统(Tianhe-2A)/TH-IVB-MTX Cluster, Intel Xeon E5-2692v2 12C 2.2GHz, TH Express-2, Matrix-2000	国家超级计算广州中心	2017	超算中心	427,008	61,445	100,679	61.0
3	国防科大	天河一号A/7168x2 Intel Hexa Core Xeon X5670 2.93GHz + 7168 Nvidia Tesla M2050@1.15GHz+2048 Hex Core FT-1000@1GHz/私有高速网络80Gbps	国家超级计算天津中心	2010	超算中心	202,752	2,566	4,701	54.6
4	国家并行计算机工程技术研究中心	神威E级原型系统, SW26010+260C 1.5GHz, SW-Net	国家超级计算济南中心	2018	超算中心	266,240	2,556	3,130	81.5
5	曙光	曙光TC6000/3008*Intel Xeon Gold 6142/EDR Infiniband	中国气象局	2017	科研	50,816	2,547	4,230	60.2
6	国防科大	国防科技大学E级高性能计算机原型系统	国家超级计算天津中心	2018	超算中心	196,608	2,469	3,146	78.5
7	曙光	曙光TC6000/3008*Intel Xeon Gold 6142/EDR Infiniband	中国气象局	2018	科研	48,128	2,435	4,004	60.8
8	浪潮	浪潮 NF5288M5 GPU 集群	网络公司	2018	互联网/云计算	2,624	2,287	4,890	46.8
9	曙光	曙光E级原型机/1024*Hygon 7185/512*Hygon DCU/200Gb 6D-Torus	国家超算中心	2018	超算中心	65,536	2,274	3,198	71.1
10	国防科大	天河二号A/1792x IntelXeon E5-2692 + 2688 Intel Phi 3151P/TH Express-2	山西吕梁云计算中心	2014	云计算	21,504	2,071	3,075	67.4

# 高性能计算

## 中国超算发展状况



- ◆ TOP100中31台是**CPU+GPU体系架构**；
- ◆ 厂商份额方面，中科曙光、联想分别以**40台**超算系统入围并列第一，其中曙光更是第**9次**蝉联该榜单桂冠。
- ◆ **100%**为国产高性能计算机系统，国外厂商无一台入围。这是中国超算 **TOP100**榜单第一次实现“全国产”。
- ◆ 从应用领域来看，“大数据/机器学习”仍是当下超算的应用热点，**TOP100**的超算系统中共有**27台**系统用于大数据分析与机器学习；用于科学计算的系统今年强势回归，数量由去年占比仅**11.3%**上升至今年的**14%**。

# 高性能计算

## 中国超算发展状况



- ◆ 2012年，国家超级计算济南中心以国家并行计算机工程技术研究中心**全**  
**国产神威蓝光**力夺得中国TOP100第二名，Linpack性能795.9TFlops，峰值  
1.07PFlops，**神威蓝光是我国历史上首台全国产的千万亿次超级计算机**，  
2012年9月16日安装在山东省的国家超级计算济南中心。（目前，中国比美  
国和日本等世界技术领先者使用的最先进的芯片制造技术落后三代）

# 高性能计算

## 中国超算发展状况



◆ **神威·太湖之光** 超级计算机是由国家并行计算机工程技术研究中心研制、安装在国家超级计算无锡中心的超级计算机。安装了**40960**个中国自主研发的“**申威26010**”众核处理器，该众核处理器采用**64**位自主申威指令系统，峰值性能为**12.5**亿亿次/秒，持续性能为**9.3**亿亿次/秒。“神威·太湖之光”超级计算机的芯片将在**2018**年内实现商用，具有完全自主知识产权的“**申威26010**”芯片所组装的小型服务器，一颗芯片的计算能力就能够达到**3**万亿次/秒。

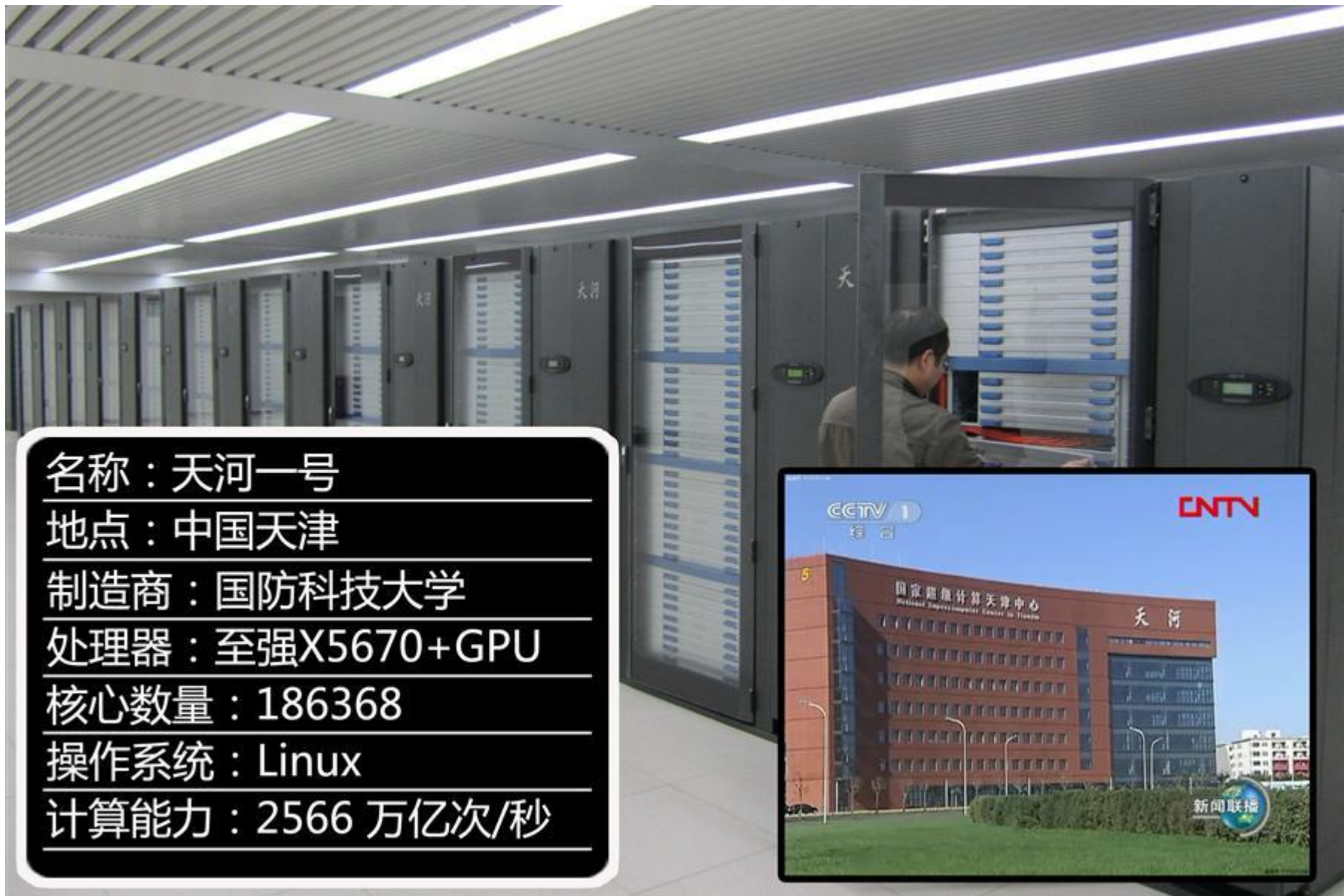
◆ **2018年10月18日**，中国超算**Top100**榜单发布，神威太湖之光以**125.43PFLOPS**的计算水平位居第一位。**2018年11月12日**，全球超级计算机**500**强榜单在美国达拉斯公布，神威太湖之光排名第三。

# 高性能计算

## 中国超算发展状况



- ◆ 中国超算的国产化情况：“天河”系列的国产化程度是70%左右，济南超算中心的“神威蓝光”超级计算机能达到85%以上，“神威·太湖之光”的处理器则是全国产的。
- ◆ 我国科研人员依托“神威·太湖之光”超级计算机的应用成果首次荣获“戈登·贝尔”奖，实现了我国高性能计算应用成果在该奖项上零的突破。



名称：天河一号

地点：中国天津

制造商：国防科技大学

处理器：至强X5670+GPU

核心数量：186368

操作系统：Linux

计算能力：2566 万亿次/秒





2010年10月23日，国际TOP500作者之一、美国田纳西大学Jack Dongarra教授和Beowulf之父LSU Thomas Sterling教授、数学软件分会副理事长迟学斌研究员、秘书长张云泉研究员等现场考察天河1A

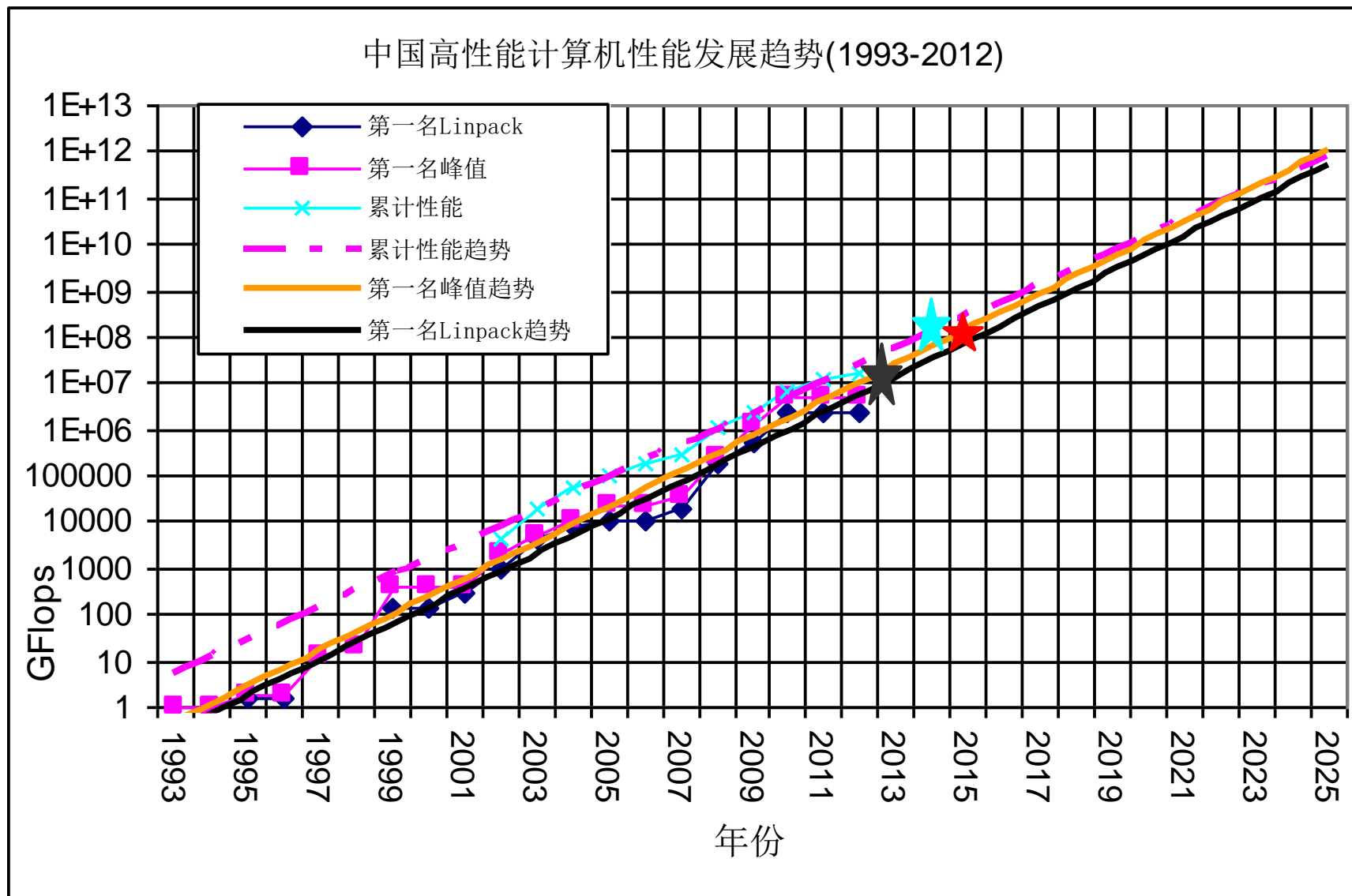




## 神威蓝光现场考察和审核



# 中国TOP100性能发展趋势



# 高性能计算

## Conference



全球超级计算大会是全球超级计算产业的顶级盛会，被誉为HPC届的“奥斯卡”。该会议迄今有23年历史，聚集了来自世界各地的科研机构、大学、厂商等，同时也是全球各顶尖IT厂商展示新产品、新技术的竞技场。本届会议上，浪潮将与全球各领域的知名IT厂商等共同出席并分享其最新的前沿研发成果。

2011年全球超级计算大会SC11将于北京时间2011年11月12日-18日在美国西雅图举办，浪潮将成为唯一中国超算厂商代表参展。



天河1号 560万亿次  
CPU+GPU混合系统



联想深腾7000/106万亿次



单精度千万亿次的  
GPU系统 Mole-xx

目标：每秒 1摩尔  
次浮点运算  
←  
(1 mole=6.02\*10<sup>23</sup>)



曙光5000A/160万亿次



美洲虎/1700万亿次