

中国科学院软件研究所学术年会2017

高性能计算  
与  
ACM 的 Gordon Bell 奖

孙家昶

北 京

2017年5月12日

# 报告大纲



高性能计算与软件

大规模并行数值模拟

ACM的Gordon Bell奖

我国获奖有感

# 高性能计算机飞速发展

1P=10<sup>15</sup>

1E=10<sup>18</sup>

P级 (2008) → 10P级 (2011)  
→ 100P级 (2016) ... → E级 (~2020)



2008-2010年

走鹃

(美国)

性能: 1.0PF

结构: CPU-Cell

核数: 12.96万



2010-2011年

天河一号A

(中国)

性能: 2.5PF

结构: CPU-GPU

核数: 18.6万



2011-2012年

京K

(日本)

性能: 10.5PF

结构: CPU

核数: 70.5万



2012年

红杉

(美国)

性能: 17.2PF

结构: CPU

核数: 157万



2012年

泰坦

(美国)

性能: 17.6PF

结构: CPU-GPU

核数: 56万



2013-2016年

天河二号

(中国)

性能: 33.8PF

结构: CPU-MIC

核数: 312万



2016年-今

神威太湖之光

(中国)

性能: 93PF

结构: SW

核数: 1064万

近年来, 工艺、功耗的限制  
导致硬件体系结构日益复杂

# 高性能软件发展迎来新的机遇

## ⌘ 功耗问题成为了高性能计算机发展趋势变化的一大动因

- ❖ 公式：性能  $\propto$  核数  $\times$  主频<sup>3</sup>
- ❖ 提高性能方案1：提高主频
- ❖ 提高性能方案2：提高核数
  - 单核  $\rightarrow$  双核  $\rightarrow$  多核  $\rightarrow$  众核  $\rightarrow$  ...

## ⌘ 硬件发展为软件带来了新的机遇

- ❖ Linux
- ❖ MPI
- ❖ 库
- ❖ 应用软件
- ❖ ...

# 高性能计算是国际竞争一个制高点

2017年3月，美国NITRD网站公布最近美国政府机构专门针对中国神威·太湖之光的系统软件、应用开发和软硬件能力的HPC技术会议，指出美国HPC领导地位变化，探讨未来状况及应对建议（国家安全、经济安全、HPC产业、人才与商业机遇等方面）。



[https://www.nitrd.gov/nitrdgroups/images/b/b4/NSA\\_DOE\\_HPC\\_TechMeetingReport.pdf](https://www.nitrd.gov/nitrdgroups/images/b/b4/NSA_DOE_HPC_TechMeetingReport.pdf)

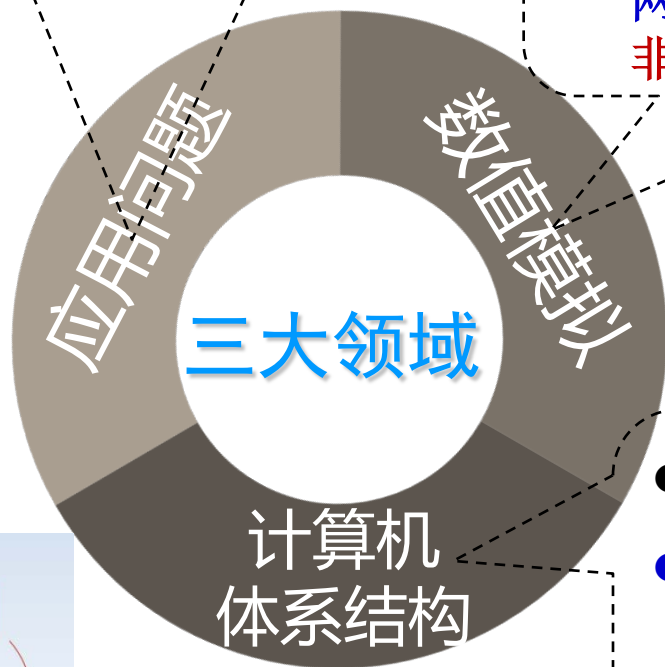
# 中科院“十二五”信息化应用项目（12个）

- N体/流体宇宙学数值模拟研究
- 钛合金组织优化模拟
- 涡分辨率海洋环流模式
- 面向航空航天CFD软件
- 基于多网格谱元法的深部资源探测大规模模拟
- 蛋白质精确模拟大规模并行
- 金属半导体材料光学常数数据库大规模并行计算
- 行星流体动力学大规模并行数值模拟
- 基于高性能计算的个性化医疗应用系统
- 基于张量网络算法的量子多体问题
- 重大地下工程灾害孕育演化并行有限元模拟
- 10万以上CPU核级代码的优化和应用

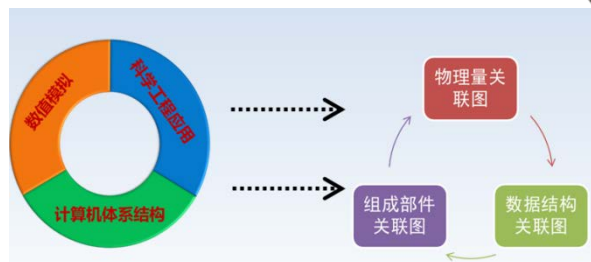
# 高性能计算与计算科学

- 物理量层面，多尺度分层耦合特性
- 非线性系数，空间分布非均衡特性

- 非线性-线性-预处理-迭代循环的分层耦合特性
- 非均匀扭曲、自适应加密导致网格离散在空间分布上的非均衡特性

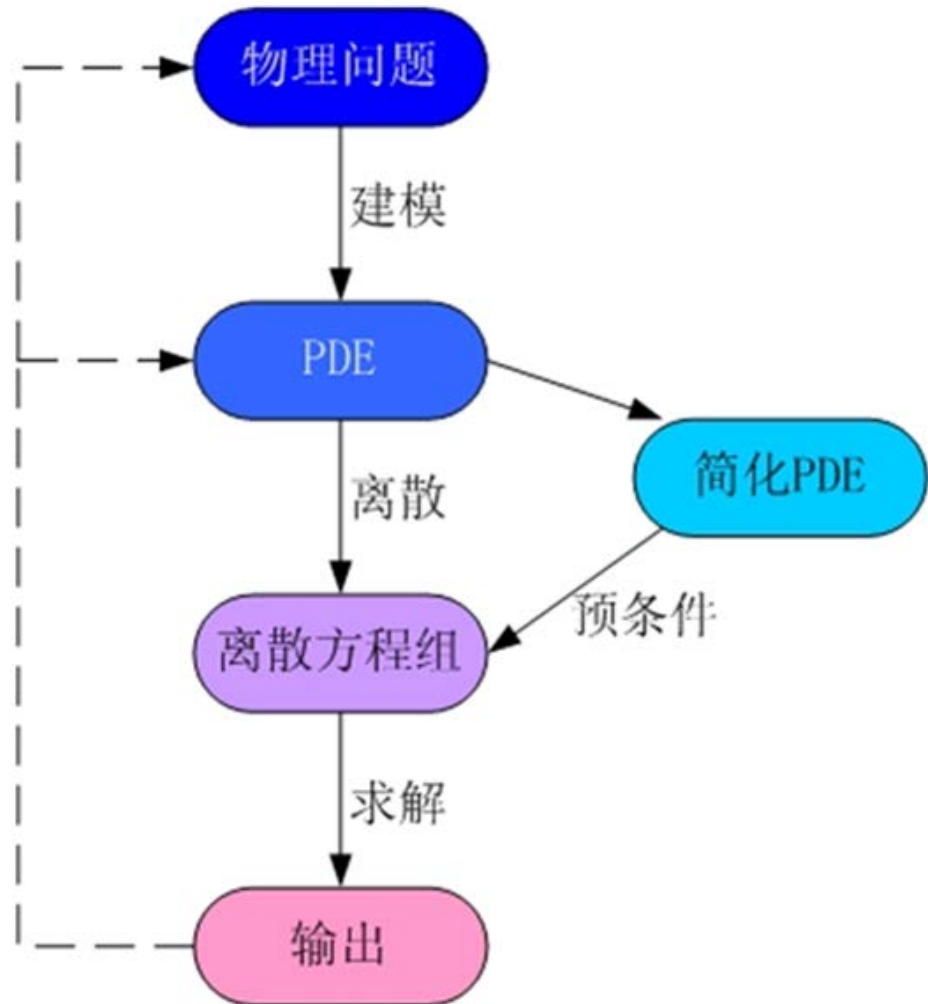


- 规模更大，结构更加复杂  
✓ 国产E级正在研制
- 系统-超节点-节点-核的异构多层次特性
- 计算资源连通图，带有权重空间分布上呈现非均衡性



# 数值模拟的主要流程

- 多物理耦合
  - 区域内耦合
  - 区域间耦合
- 守恒性
  - 质量/动量/能量
- 问题性质
  - 稳态vs非稳态
  - 线性vs非线性
- 网格
  - 规则vs非规则
  - 具有一定结构的非规则
- 时间离散
  - 显式、半隐式
  - 全隐式
  - 长时间积分与步长控制
- 解法器（重点关注）
  - 非：一般代数方程组
  - 预条件子：关键





# 算法的若干挑战 (1)

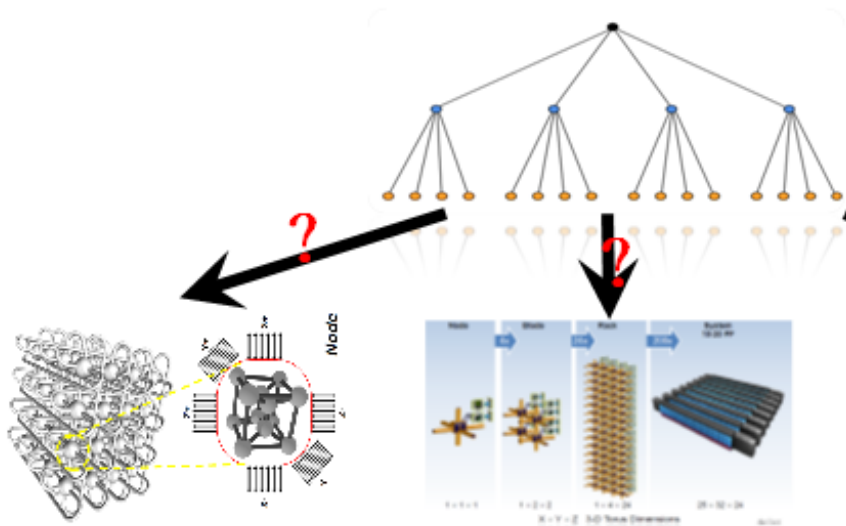
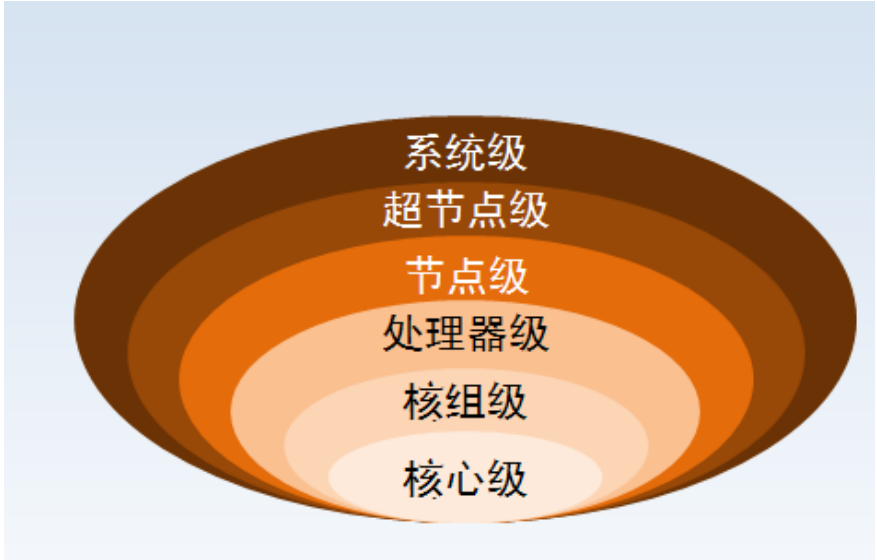
- 并行本性格式 ( 如区域分解 )
- 长时间积分
- 显式-隐式结合格式
- 预条件子解法
- 离散网格 ( 结构<sub>vs</sub>非结构 , 奇点问题等 ) 与异构、众核的映像
- 高分辨率、高波数、高频率、超高维
- 非线性奇异偏微分方程与积分方程
- 非线性PDE特征值问题

# 算法的若干挑战（2）

- 现有有效快速算法（如FFT、FMM）的改造
- 稀疏矩阵算法的改造
  - 模型级：适当增加稠密度以提高精度
  - 实现级
- 随机算法
- 容错算法
- 大数据
- 三个主要误差来源
  - 模型误差（PDE和物理问题）
  - 截断误差（离散误差）
  - 舍入误差（机器误差）

# 偏微分方程数值求解

- 热传导方程
- Helmholtz方程
- Navier-Stokes方程
- 固体力学方程组（弹塑性，断裂）
- 电磁场Maxwell方程
- 量子力学Schrodinger方程
- 粒子输运方程（中子迁移方程）
- 磁流体力学MHD方程
- 某些特殊的微分-积分方程
- ...



**国产100PF级神威计算机：  
基于自主处理器的高  
效能计算机系统研制**

科学工程应用

数理模型

数值模拟算法

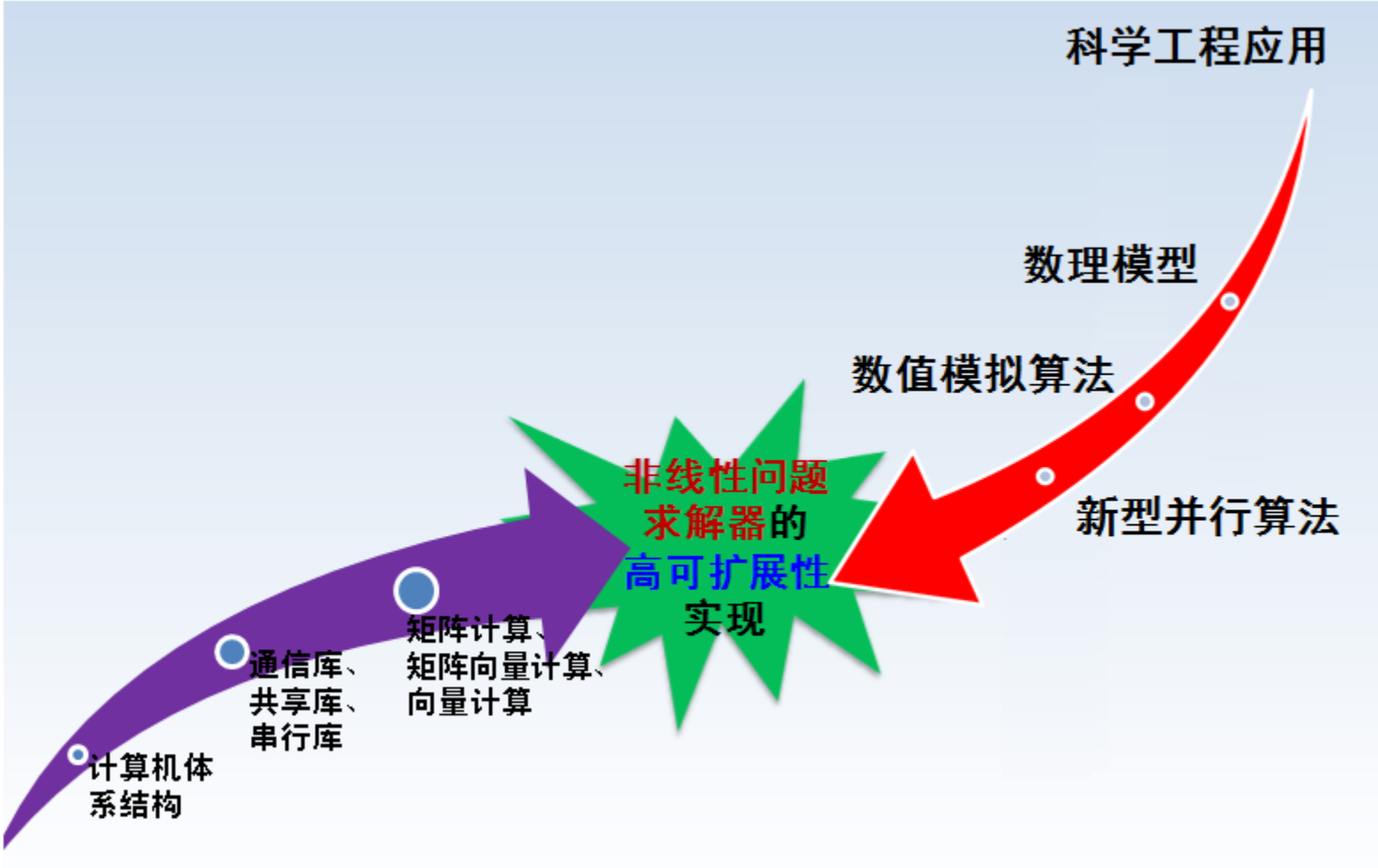
新型并行算法

非线性问题  
求解器的高可扩展性  
实现

矩阵计算、  
矩阵向量计算、  
向量计算

通信库、  
共享库、  
串行库

计算机体  
系结构



# 报告大纲



高性能计算与软件

大规模并行数值模拟

ACM的Gordon Bell奖

我国获奖有感

# 大规模数值模拟的网格

- 三维多面体网格剖分已成为网格剖分研究的主流方向
- 三维多面体及剖分在算法上的本质困难
  - 多面体的表示、分类、细分与质量评估
  - 几何质量标准与物理质量
- 三维网格软件（包括六面体与四面体）（如CUBIT, UG）
- 基于P-E级计算机的PDE问题隐格式求解应用程序（国内PHG, JASMIN, 国际上如PETSc, Hypre, Sundials, SAMRAI等），隐式求解CFD离散化形成的大规模线性代数方程组，可扩展性可达数十万到百万规模，针对迭代算法的可扩展性提升，已成为当前国际的研究热点。
- 用三套网格（应用网格、计算网格、计算机网格）思想争取使得算法可扩展性有新的数量级提高。

# 应用网格举例

- 物理网格
  - 结构力学
  - 弹性组合体（高层建筑、水坝等）
  - 晶体、准晶体网格，如石墨烯六边形网格
- 生物化学网格
  - 基因网络
  - 蛋白质网络
  - 化合物网络
- ...



# 计算机网络格举例：神威太湖之光

*racks*                      *chips*                      *core-groups*    *cores*                      *total number of cores*

$$40 \times 1,024 \times 4 \times 65 = 10,649,600$$

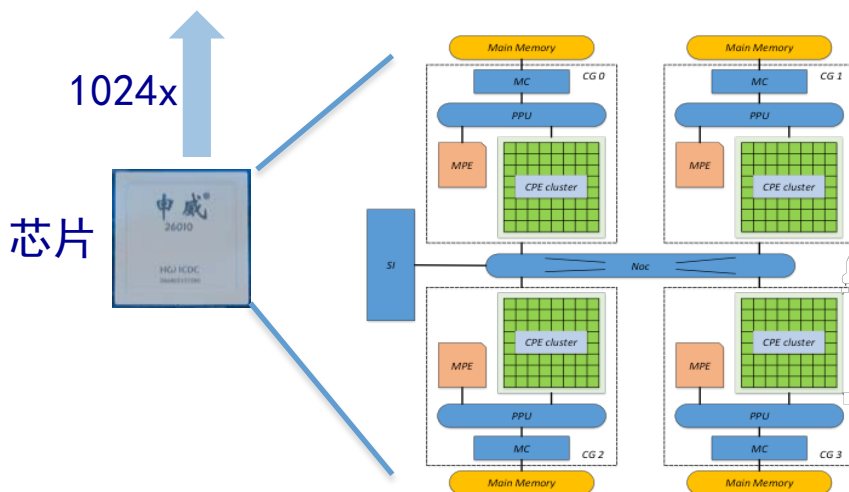
机柜



40x

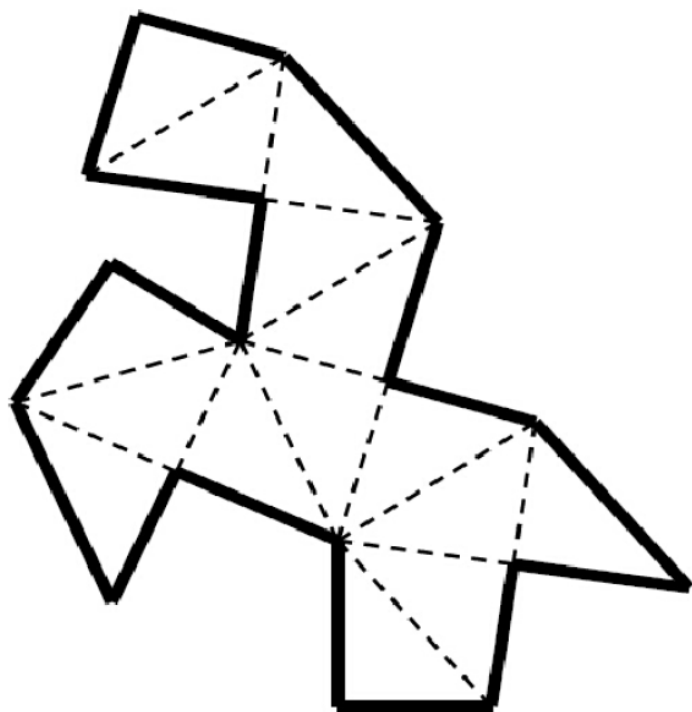


系统

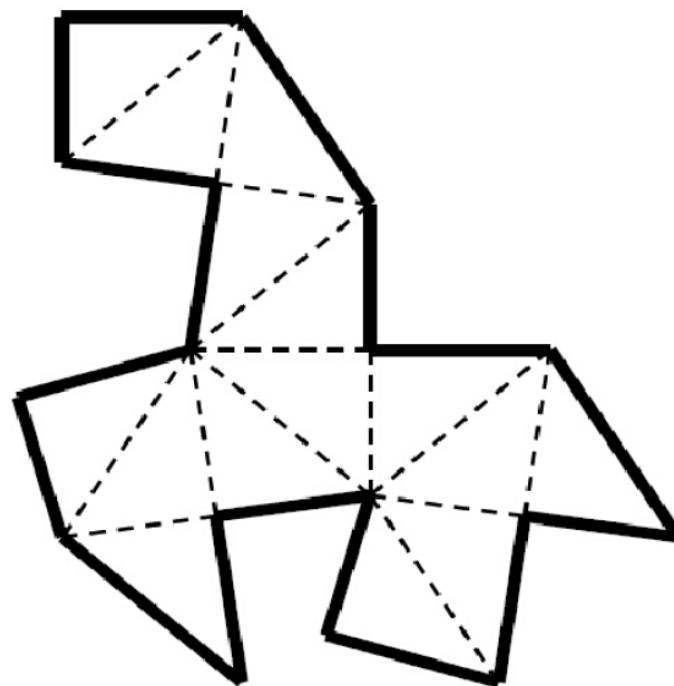


# 计算网格举例一下图是结构化网格还是非结构化网格？

**Horses A and B are not iso-metric, but iso-spectral.**



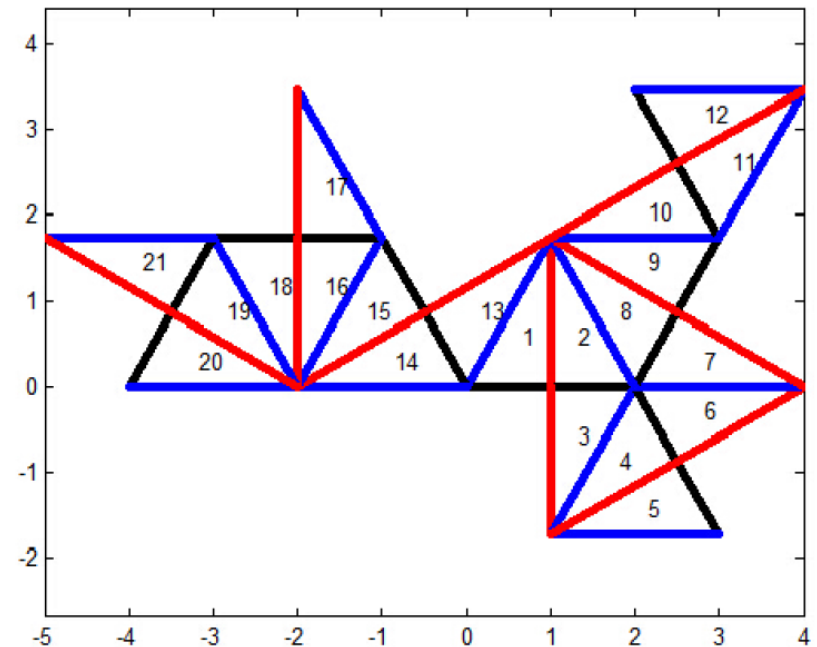
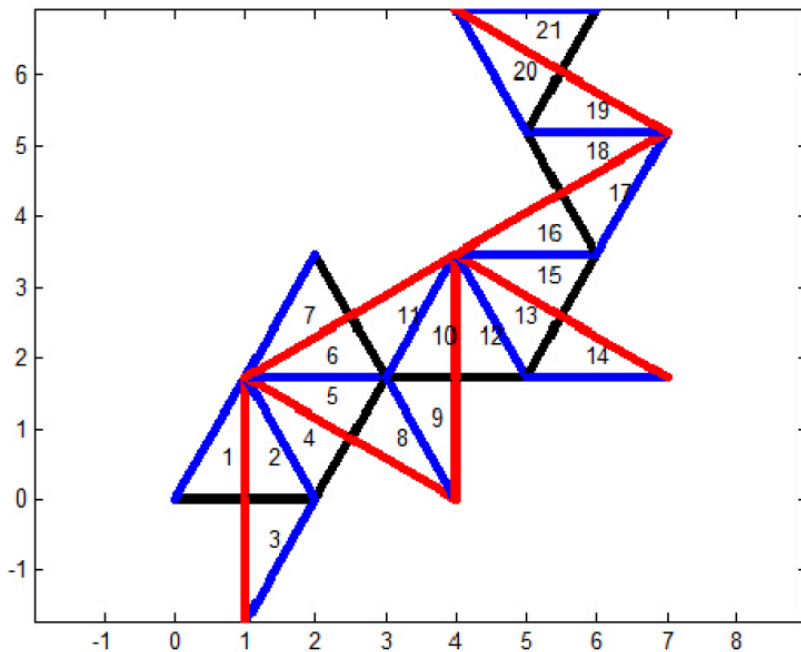
pair 15\_1: A



pair 15\_1: B

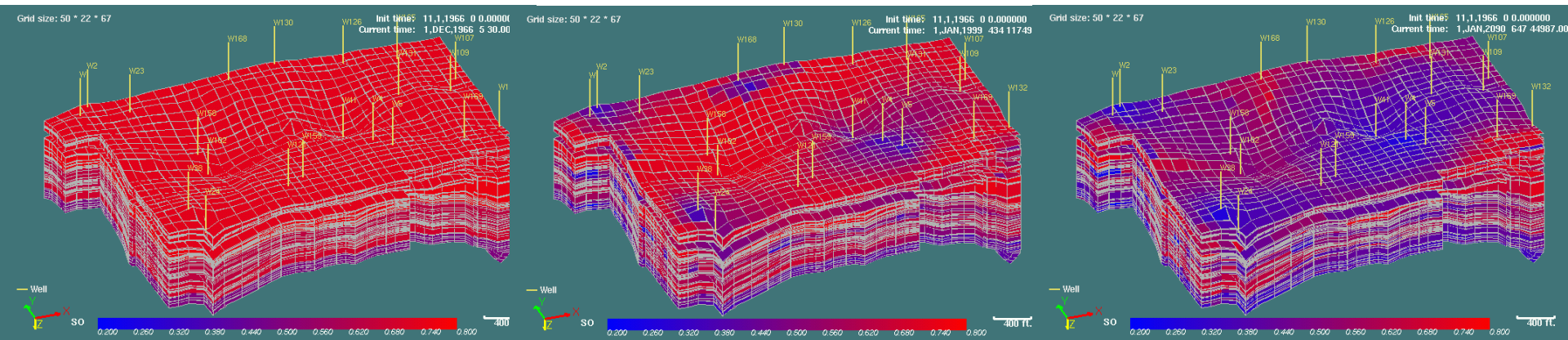
# 计算网格举例—单三角形镜像反演形成的结构化网格

**Remark:** firstly, the original Aye Aye rotates  $150^\circ$  and folds along the yellow edge. Then the new shape moves to coordinate  $(0, 0)$ . If the tiles are reversed, we add minus to the label of the tiles..



# 并行油藏数值模拟软件 PRIS

- ⌘ 大规模数值模拟技术
- ⌘ 并行混合预条件子
- ⌘ 高效并行软件实现
- ⌘ 国内首次实现百万网格“夕发朝至”，计算性能5年内提升1600倍



# 高性能扩展数学库（算法库）

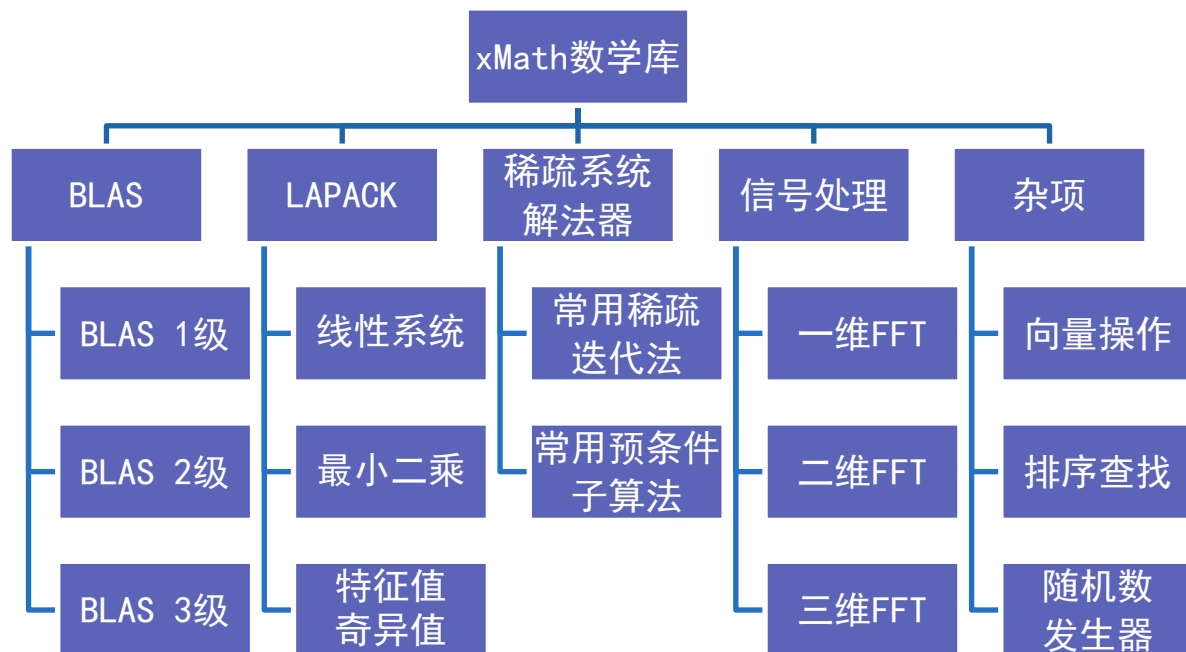
## ⌘ 数学库的研制目标

- ❖ 提供一套标准的功能实现——易用
- ❖ 满足正确性和精度要求——可用
- ❖ 针对目标平台充分性能优化——好用

## ⌘ 数学库研制所需基础

- ❖ 对特定领域的理解——算法选择
- ❖ 丰富的并行编程经验——程序编写
- ❖ 特定目标平台优化经验——性能优化
- ❖ 大型软件工程经验——提高开发效率

## ⌘ 典型扩展数学库结构



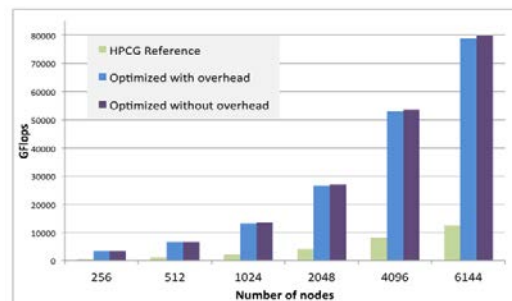
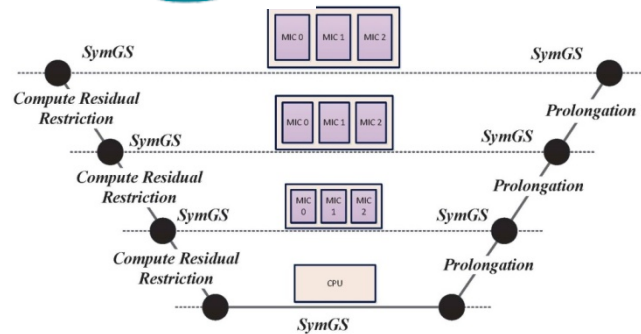
# HPCG优化

## ❧ 超级计算机评测标准

- ❖ TOP500: 基于HPL (Linpack) 稠密矩阵LU分解
- ❖ Green500: HPL性能 ÷ 功耗
- ❖ Graph500: BFS大规模图算法
- ❖ HPCG: 三维Poisson方程稀疏矩阵并行求解

## ❧ 面向天河2等大型异构系统的HPCG优化

- ❖ 提出或改进了异构区域分解、流水线CG、计算-通信重叠、计算-访存重叠等算法或技术
- ❖ 2014. 4: 78Tflops@14.7万CPU核
- ❖ 2014. 6: 50.2Gflops@单异构节点
- ❖ 2014. 11: 623Tflops@整机312万核
- ❖ 为天河2排名HPCG第一做出了贡献



# HPCG优化

- ⌘ 完成于2014. 11月上旬，由国防科大进行测试
- ⌘ 扩展到16000个节点，共312万核， $136*176*176*16000*3=2022$ 亿未知数
- ⌘ HPCG总性能623Tflop/s，超出美国Intel公司的优化版性能（580Tflop/s），帮助国防科大取得2014年度HPCG排行榜第一名

**HPCG**

PRESENTED AT **SC14** NOVEMBER 19, 2014

NUMBER **1**

SYSTEM **Tianhe-2**  
NSCC / Guangzhou

ACHIEVED **0.623**  
Pflop/s

*Jack Dongarra* JACK DONGARRA  
*Michael Heroux* MICHAEL HEROUX  
*Piotr Luszczek* PIOTR LUSZCZEK

IN COLLABORATION WITH **ICL** INNOVATIVE COMPUTING LABORATORY UNIVERSITY OF TRENTO

**Sandia National Laboratories**

SPONSORED BY **UNIVERSITY OF MICHIGAN**

Rank	Site	Computer	Cores	HPL Rmax (Tflops)	HPL Rank	HPCG (Pflops)	HPCG/HPL	% of Peak
1	NSCC / Guangzhou	Tianhe-2 NUDT, Xeon 12C 2.26GHz + Intel Xeon Phi 57C + Custom	3,120,000	33.9	1	.623	1.8%	1.1%
2	RIKEN Advanced Inst for Comp Sci	K computer Fujitsu SPARC64 VIIIfx 8C + Custom	700,000	10.0	2	.100	4.4%	4.2%
3	DOE/OS Oak Ridge Nat Lab	Titan, Cray XK7 AMD 16C + Nvidia Kepler GPU 14C + Custom	560,640	17.6	2	.322	1.8%	1.2%
4	DOE/OS Argonne Nat Lab	Mira BlueGene/Q, Power BQC 16C 1.60GHz + Custom	786,432	8.59	5	.167	1.9%	1.7%
5	Swiss CSCS	Piz Daint, Cray XC30, Xeon 8C + Nvidia Kepler 14C + Custom	115,984	6.27	6	.105	1.7%	1.3%
6	Leibniz Rechenzentrum	SuperMUC, Intel 8C + IB	147,456	2.90	14	.0833	2.9%	2.6%
7	DOE/OS LBNL	Edison, Cray XC30, Xeon, 12c, 2.46GHz + Custom	133,824	1.65	24	.0786	4.8%	3.1%
8	GSIC Center TiTech	Tsubame 2.5 Xeon 6C, 2.93GHz + Nvidia K20x + IB	76,032	2.78	15	.073	2.6%	1.3%
9	Max-Planck	iDataPlex Xeon 10C, 2.8GHz + IB	65,320	1.28	34	.061	4.8%	4.2%
10	CEA/TGCC-GENCI	Curie tinc nodes Bullx B510 Intel Xeon 8C 2.7 GHz + IB	77,184	1.36	33	.051	3.8%	3.1%
11	Exploration and Production Eni S.p.A.	HPC2, Intel Xeon 10C 2.8 GHz + Nvidia Kepler 14C + IB	62,640	3.00	12	.0489	1.6%	1.2%

# 千万核可扩展大气动力学全隐式模拟

美国盐湖城举行的2016年11月17日全球超级计算大会上，该研究成果获得国际高性能计算应用领域最高奖“戈登·贝尔奖”（ACM Gordon Bell Prize）。



ACM  
Gordon Bell Prize  
2016

PRESENTED TO

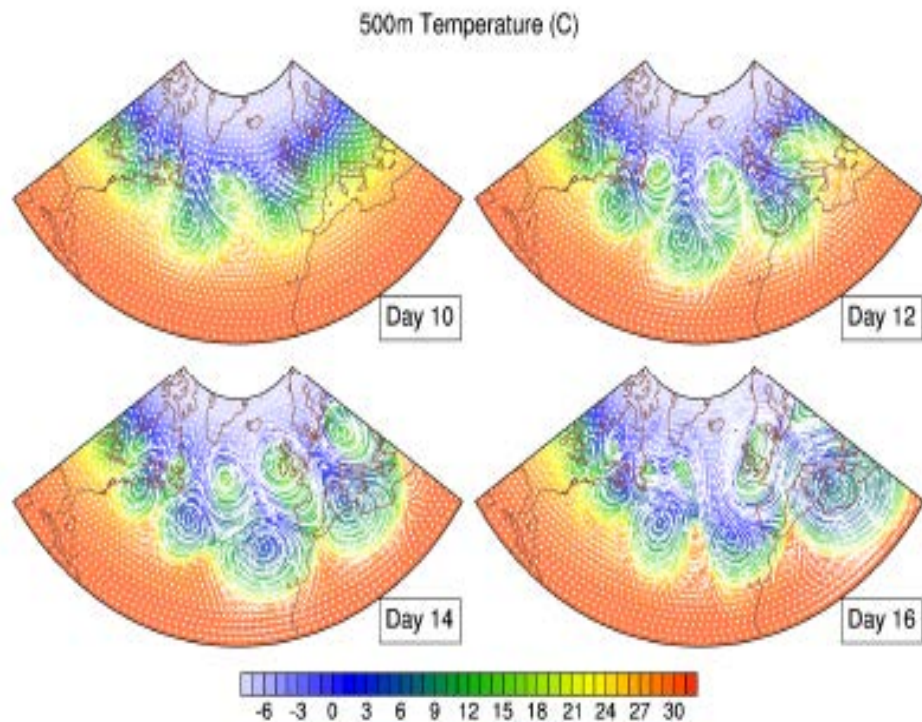
Chao Yang, Wei Xue, Haoshuan Fu,  
Hongtao You, Xinliang Wang,  
Yulong Ao, Fangfang Liu, Lin Gan,  
Ping Xu, Lanning Wang,  
Guangwen Yang, Weimin Zheng

FOR 10M-Core Scalable Fully-Implicit Solver for  
Nonhydrostatic Atmospheric Dynamics

*Vicki L. Kenesa*  
ACM PRESIDENT

*Vicki L. Kenesa*  
AWARDS COMMITTEE CO-CHAIR

*John W....*  
AWARDS COMMITTEE CO-CHAIR

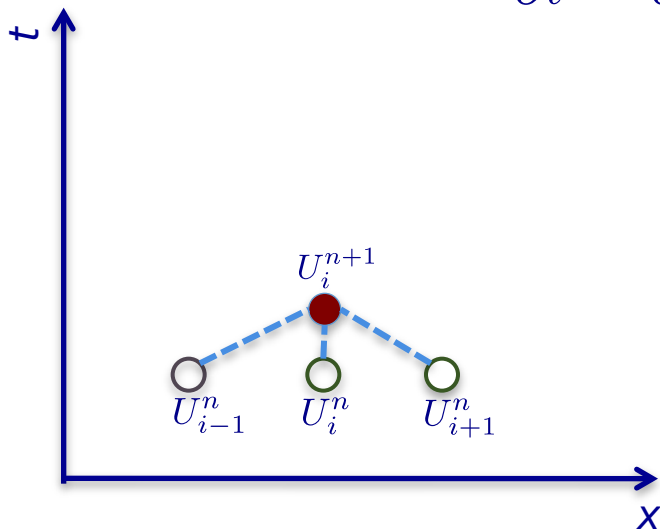




# 技术特色1：隐式解法

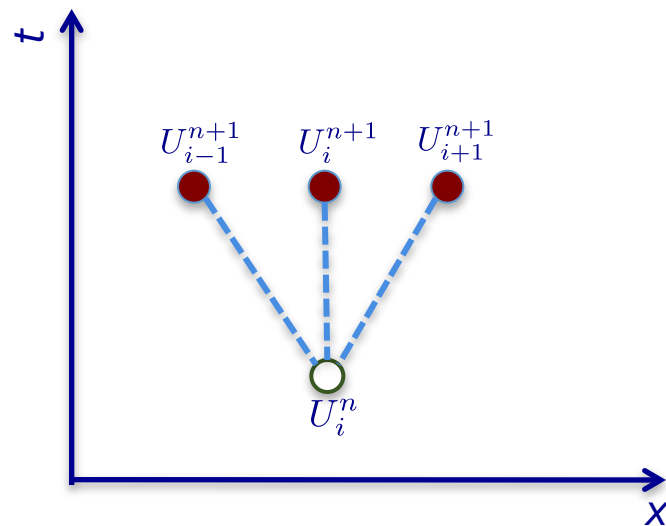
⌘ 比如，求解热传导方程

$$\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0$$



显式方法:

- 优点：容易并行
- 缺点：受CFL稳定性条件制约、误差积累



隐式方法:

- 优点：不受CFL稳定性条件制约
- 缺点：并行难度大

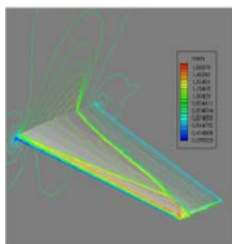
举例：气象局GRAPES，油藏模拟IMPES

# 隐式求解器设计

目前国际上隐式求解器最大可扩展到157万核，  
并且不支持主流异构众核系统

## 国际上隐式求解器的世界纪录情况

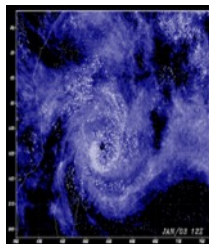
空气动力学



1999

3千核  
ASCI 红  
(CPU集群)  
227GF

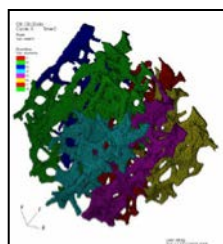
气候气象



2002

5千核  
地球模拟器  
(向量机)  
26TF

固体力学

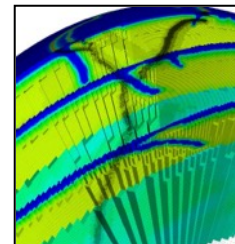


2004

4千核  
ASCI 白  
(CPU集群)  
0.5TF

•••••

地幔



2015

157万核  
红杉  
(CPU集群)  
0.69PF

注：上述工作均曾获得“戈登·贝尔”奖（Gordon Bell Prize）

# 技术特色2: 预条件子 (1978年-今)

## ⌘ 预条件子 (Preconditioner) —— “催化剂”

### 求解线性方程组的预条件子方法

- 方程组与特征值问题是科学计算研究与解法器的两大重要内容
- 求解线性方程组的预条件子方法引入30年 ( Chandra [1978, Yale PhD Thesis], Eisenstat-Schultz [1981])  
已在计算方法与实际应用取得巨大成功
- 预条件子方法基本思想是把原始的病态方程组

$$Au = f \quad (1)$$

变换为等价方程组

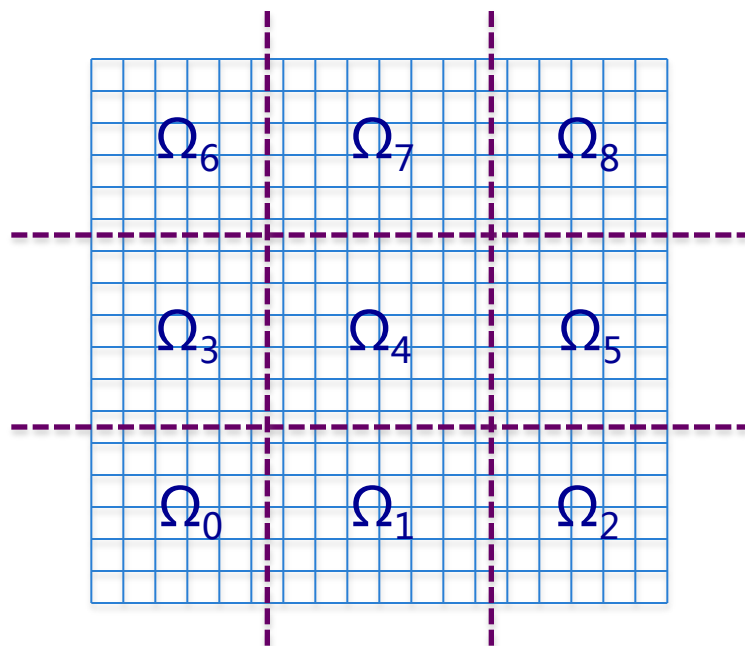
$$BAu = Bf \quad (2)$$

的求解, 以期改善条件数  $\kappa(BA) \ll \kappa(A)$  加速迭代

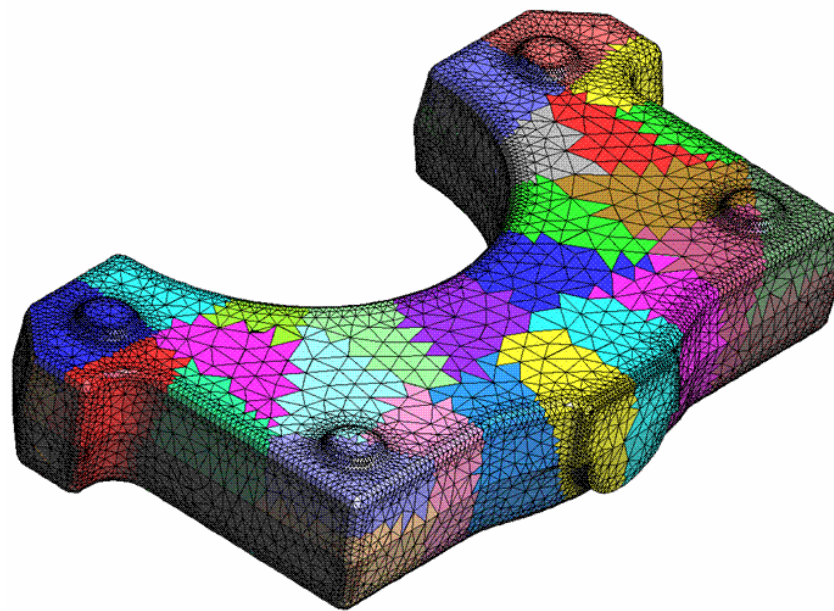
- 预条件子方法成功的三个要素
  - 1.  $B \approx A^{-1}$  (如区域分解, 多重网格, 稀疏近似逆)
  - 2.  $Bu = f$  工作量小, 有快速算法
  - 3. 适合现有的软硬件环境

# 技术特色3：区域分解（1987年-今）

⌘ 区域分解算法（DDM）是求解数学物理方程的主流并行算法，已经历经30年发展



结构网格上  
DDM示意图



非结构网格上  
DDM示意图

## ⌘ 高性能计算与大数据有重要的内在联系

- ❖ 降维：矩阵大小、矩阵秩、特征结构等
- ❖ 特征分解
- ❖ 奇异值分解
- ❖ 低秩修正
- ❖ 稀疏矩阵
- ❖ 有限域上的矩阵
- ❖ 0/1矩阵
- ❖ ...

# 报告大纲



高性能计算与软件

大规模并行数值模拟

ACM的Gordon Bell奖

我国获奖有感

## ⌘ ACM每年颁发若干奖项

- ACM A. M. Turing Award (图灵奖)
- ACM Gordon Bell Prize (高性能计算戈登·贝尔奖)
- ACM-IEEE CS Eckert-Mauchly 奖 (计算体系结构)
- ACM Paris Kanellakis 理论与实践奖
- ACM Grace Murray Hopper 奖 (杰出青年计算机科学家)
- SIAM/ACM计算科学与工程奖
- ...

# 中国人首次获得ACM冠名奖项



编号: 2017-NLC-KTJS-0385

## 检索报告

国家图书馆科技查新中心

2017年5月3日



编号: 2017-NLC-KTJS-0385

## 检索报告

检索课题: Association for Computing Machinery (简称 ACM)12 个指定奖项中标为“China”的获奖人员情况

委托单位: 中国科学院软件研究所

检索网址: [http://awards.acm.org/award\\_winners](http://awards.acm.org/award_winners)

检索奖项: “ACM A.M. Turing Award”  
“ACM Prize in Computing”  
“ACM-IEEE CS Eckert-Mauchly Award”  
“ACM Grace Murray Hopper Award”  
“ACM Gordon Bell Prize”  
“ACM Paris Kanellakis Theory and Practice Award”  
“ACM-IEEE CS Ken Kennedy Award”  
“ACM Eugene L. Lawler Award”  
“ACM AAI Allen Newell Award”  
“SIAM/ACM Prize in Computational Science and Engineering”  
“ACM Software System Award”  
“ACM Athena Lecturer Award”

主要策略: 在各奖项中限定 Region = “Asia”, 并查阅获奖人员详细信息

检索年限: 不限

检索时间: 2017年5月3日

检索人: 肖璟波、鲁玥

检索结果:

根据委托人要求, 在 ACM 网站“Award Winners”页面检索 ACM 12 个指定奖项, 获奖人员详细信息标识为“China”的共 13 人, 详见下表, 获奖人员详细信息见附件。

联系电话: 010-88545237 邮箱: kjck@nlc.cn



表 标识为“China”的获奖人员

No.	Award	Year	Name	Region	Country
1	ACM Gordon Bell Prize	2016	Yang, Chao	Asia	China
			Xue, Wei	Asia	China
			Fu, Haohuan	Asia	China
			You, Hongtao	Asia	China
			Wang, Xinliang	Asia	China
			Ao, Yulong	Asia	China
			Liu, Fangfang	Asia	China
			Gan, Lin	Asia	China
			Xu, Ping	Asia	China
			Wang, Lanning	Asia	China
			Yang, Guangwen	Asia	China
			Zheng, Weijun	Asia	China
2	ACM A. M. Turing Award	2000	Yao, Andrew.C	Asia	China

国家图书馆科技查新中心 (盖章)

2017年5月3日

联系电话: 010-88545237 邮箱: kjck@nlc.cn



# 戈登·贝尔奖

- ⌘ 作为国际高性能计算领域最有影响力的奖项
- ⌘ 奖励并行计算的主要进展，奖励高性能计算应用于科学、工程和大规模数据分析的创新
- ⌘ 奖项主要针对如下三种情况颁发
  - 前所未有的计算能力
  - 计算可扩展性的突破
  - 大幅缩短重大科学或工程问题的计算时间

# 戈登·贝尔奖

- ⌘ 1987年开始颁发，最初每年可颁发给多个团队
- ⌘ 2012年起，每年仅奖励一个团队
- ⌘ 三十年间，总共奖励了58项工作
  - 绝大部分来自美国和日本，少量来自欧洲
  - 涉及石油、气象气候、材料、海洋、电子、天文、航空航天等领域
  - 代表该领域一段时间内计算方法或计算能力的突破

# 戈登·贝尔奖报奖流程

- ⌘ 每年的4月中旬前提交申报材料
- ⌘ 由评审委员会遴选不超过6项入围成果，
- ⌘ 入围团队修改申报材料7月提交
- ⌘ 经最后的现场报告答辩后，于每年11月的国际超级计算大会（Supercomputing Conference）公布

# 戈登·贝尔奖评审专家组成

## ⌘ 美国国家实验室

- NASA 阿姆斯研究中心
- Sandia 国家实验室
- Lawrence Berkeley 国家实验室
- Arognne 国家实验室
- ...

## ⌘ 日本东京工业大学

## ⌘ 往届获奖者

# 戈登·贝尔奖本届评奖委员会成员

- Subhash Saini , 美国NASA 阿姆斯研究中心
- Mike Heroux , 美国Sandia 国家实验室
- Adolfy Hoisie , 美国太平洋西北国家实验室
- Satoshi Matsuoka , 日本东京工业大学
- Keshav K. Pingali , 美国康奈尔大学

# 我国获得2016年戈登·贝尔奖



此前29年会上颁发的戈登·贝尔奖一直被美、日垄断，从未有过中国团队入围获奖。

# 我国获得2016年戈登·贝尔奖

⌘ 奖项名称：“千万核可扩展大气动力学全隐式模拟”

⌘ 获奖单位：

- 中国科学院软件研究所（杨超 等）
- 清华大学（薛巍 等）
- 国家并行计算机工程技术研究中心（尤洪涛）
- 北京师范大学（王兰宁）
- 国家超级计算无锡中心（付昊桓 等）

# 获奖项目：千万核可扩展大气动力学全隐式模拟

- ⌘ 设计了一套基于改进的区域分解、多重网格和不完全矩阵分解技术的新型求解器计算模型和算法
- ⌘ 国际上首次研制出一套具有千万核扩展能力、适应于神威等众核体系结构特征的全隐式求解器软件
- ⌘ 并在非静力大气动力学模拟中取得良好应用效果
- ⌘ 借助于中国科学院软件研究所自主研发的xMath高性能扩展数学库软件
- ⌘ 研究团队通过技术攻关，完成了求解器在“神威太湖之光”上的移植、调试和优化工作




# 评奖委员会评价



“戈登·贝尔”奖评奖委员会主席、美国NASA的塞尼博士说：“在我本人看来，‘戈登·贝尔奖’就是高性能计算领域的诺贝尔奖。隐式求解器的模拟能力大幅度超越显式求解器，令人印象深刻”。

“戈登·贝尔”奖评奖委员会副主席、日本东京工业大学松岗聪教授说：“这是中国首次在自主研发的超级计算机上开展自主应用，充分体现了工作的卓越；这项工作具有极高质量，此前从未有过在如此大规模下进行显、隐式求解器对比的研究，且展示了全隐式求解器在计算能力方面的优势”……“当前中国已经赢得了超算领域最重要的指标，比如全球超算500强；赢得‘戈登·贝尔’奖最终表明中国在全球超算领域已经成为领导者之一，…成果会对科学和产业应用领域产生重大影响”。

# 国家自然科学基金委员会基金要闻



**国家自然科学基金委员会**  
National Natural Science Foundation of China

公开 公平 公正

首页 | 基金新闻 | 信息公开 | 基金指南 | 项目资助 | 国际合作 | 出版物 | 下载中心 | 办事大厅 | 基金网群

当前位置: 首页 >> 基金要闻 >> 基金要闻

## “千万核可扩展大气动力学全隐式模拟”研究获戈登·贝尔奖 (Gordon Bell Prize)

日期 2016-12-01 来源: 数理科学部 作者: 赵桂萍 雷天刚 孟庆国 【大 中 小】 【打印】 【关闭】

在国家自然科学基金项目(项目编号: 91130023, 91530103, 91530323)的资助下, 中国科学院软件研究所、清华大学、国家并行计算机工程技术研究中心、北京师范大学和国家超级计算无锡中心合作的“千万核可扩展大气动力学全隐式模拟”研究取得重要进展。最近在美国盐湖城举办的2016年度世界超级计算大会上, 该研究成果获得由美国计算机学会(Association for Computing Machinery, 简称ACM)颁发的国际高性能计算领域最高学术奖项——戈登·贝尔奖(Gordon Bell Prize), 实现了我国在该奖项自1987年设立以来零的突破, 成为我国高性能计算应用发展的一个新的里程碑。

世界超级计算大会是高性能计算领域的顶级学术会议, 每年吸引1万余人参加。此前29年会上颁发的戈登·贝尔奖一直被美、日等国垄断, 从未有过中国团队入围获奖。作为此次获奖成果的第一完成人, 中国科学院软件研究所杨超研究员自2007年起, 率领其研究团队在面向大气动力学模拟的全隐式求解器并行计算模型、算法和软件研究方面耕耘近十年, 历经蓝色基因L、曙光5000A、深腾7000、天河一号、天河二号等国内外多代系统考验, 最终在国产“神威太湖之光”这一配备了国产众核处理器的世界顶级超算系统上取得突破。团队设计了一套基于改进的区域分解、多重网格和不完全矩阵分解技术的新型求解器计算模型和算法, 在国际上首次研制出一套具有千万核扩展能力、适应于神威等众核体系结构特征的全隐式求解器软件, 并在非静力大气动力学模拟中取得良好应用效果。借助于中国科学院软件研究所自主研发的xMath高性能扩展数学库软件, 研究团队通过技术攻关, 完成了求解器在“神威太湖之光”上的移植、调试和优化工作。经测试, 该隐式求解器在处理器扩展规模、浮点计算性能、最大求解问题规模 and 实际模拟能力等方面相对于国际最高水平均取得数倍至一个数量级的提升, 成为相关领域国际上最领先的研究成果。

戈登·贝尔奖评奖委员会主席、美国国家航空航天局艾姆斯研究中心的苏博哈什·塞尼博士说: “在我本人看来, ‘戈登·贝尔奖’就是高性能计算领域的诺贝尔奖”。他高度评价了这项获奖工作, “隐式求解器的模拟能力大幅度超越显式求解器, 令人印象深刻, 我们仔细阅读了评奖论文, 认为研究工作最终得奖实至名归。”

戈登·贝尔奖评奖委员会副主席、日本东京工业大学的松岗聪教授对此项工作进行了深入点评, “作为评委, 这是我见过的最令人印象深刻的工作之一, 是中国首次在自主研发的超级计算机上开展自主应用, 充分体现了工作的卓越; 这项工作具有极高质量, 此前从未有过在如此大规模下进行显、隐式求解器对比的研究, 且展示了全隐式求解器在计算能力方面的优势; 在项目初评阶段我们收到了此工作的评奖论文后就已经觉得印象深刻, 此后收到的更新稿更是超出想象。”就此项研究工作的意义, 松岗聪强调, “当前中国已经赢得了超算领域最重要的指标, 比如全球超算500强; 赢得‘戈登·贝尔奖’最终表明中国在全球超算领域已经成为领导者之一, 看一下中国提交的项目, 入围的项目和最终获奖项目, 这些都是会对科学和产业应用领域产生重大影响的项目。”

该项成果是数学、计算机与应用领域完美结合的范例。此次获奖将极大地提升我国高性能计算应用领域研究人员团结协作挑战世界水平高难度问题的信心, 成果有望将超高可扩展并行计算模型、算法和软件的核心技术应用到地球环境、航空航天、能源勘探、工业制造等更多大型科学与工程计算领域, 具有重大的科学、经济和社会价值。

版权所有: 国家自然科学基金委员会 京ICP备0500282号  
Copyright 2005 NSFC, All Right Reserved

国家自然科学基金委员会在官方网站《基金要闻》中评价：该成果是**数学、计算机与应用领域完美结合的范例**。有望应用于地球环境、航空航天、能源勘探、工业制造等更多大型科学与工程计算领域，具有**重大科学、经济和社会价值**。

# 入选2016年中国十大科技进展新闻

成果入选由两院院士评选的“2016年中国十大科技进展新闻”



由中国科学院、中国工程院主办，中国科学院学部工作局、中国工程院办公厅、中国科学报社承办，中国科学院院士和中国工程院院士投票评选的2016年中国十大科技进展新闻、世界十大科技进展新闻，2016年12月31日在京揭晓。此项年度评选活动至今已举办了23次。评选结果经新闻媒体广泛报道后，在社会上产生了强烈反响，使公众进一步了解到国内外科技发展的动态，对宣传、普及科学技术起到了积极作用。



1. 发射世界首颗量子科学实验卫星“墨子号”
2. 全球最大单口径射电望远镜落成启用
3. 长征五号首飞成功
4. 神舟十一号飞船返回舱成功着陆
5. 领衔绘制全新人类脑图谱
6. 我国首获超算应用最高奖
7. 率先破解光合作用超分子结构之谜
8. “海斗”号无人潜水器创造深潜纪录
9. 利用超强超短激光成功获得“反物质”
10. 首次揭示水的核量子效应

# 三维非静力动力学方程

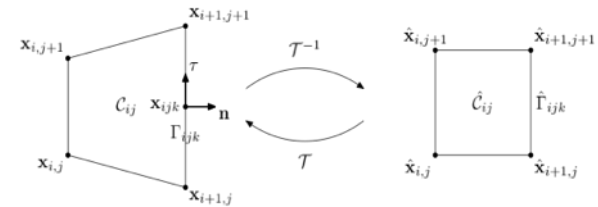
## ⌘ 方程的基本形式

$$\left\{ \begin{array}{ll} \frac{\partial \rho'}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0, & \text{Continuity equation} \\ \frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \otimes \mathbf{v}) + \nabla_H \bar{p} + \nabla p' + \rho' g \mathbf{z} + 2\rho \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v} = 0, & \text{Momentum equation} \\ \frac{\partial (\rho e_T)'}{\partial t} + \nabla \cdot ((\rho e_T + p) \mathbf{v}) = 0 & \text{Energy equation} \\ \frac{\partial (\rho q)'}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho q \mathbf{v}) = 0 & \text{Moisture equation} \end{array} \right.$$

where  $\rho' = \rho - \bar{\rho}$ ,  $p' = p - \bar{p}$ ,  $(\rho e_T)' = \rho e_T - \bar{\rho} \bar{e}_T$ ,  $(\rho q)' = \rho q - \bar{\rho} \bar{q}$   
 $\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} = -\bar{\rho} g$ ,  $\bar{p}$  is decided by the equation of state from  $\bar{\rho}$ ,  $\bar{\mathbf{v}}$  and  $\bar{e}_T$

## ⌘ 离散格式

- ❖ 基于高度的 Gal-Chen 地形追随网格
- ❖ 基于 AUSM+up 的有限体积格式
- ❖ 支持二阶显式 Runge-Kutta 和 全隐式 Rosenbrock 时间积分方案



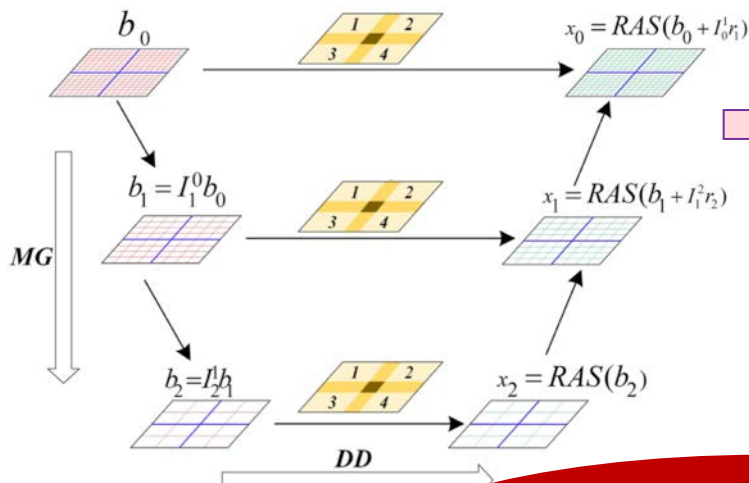
# 如何扩展至1000万核？

⌘ 主要技术突破：千万核可扩展隐式求解器

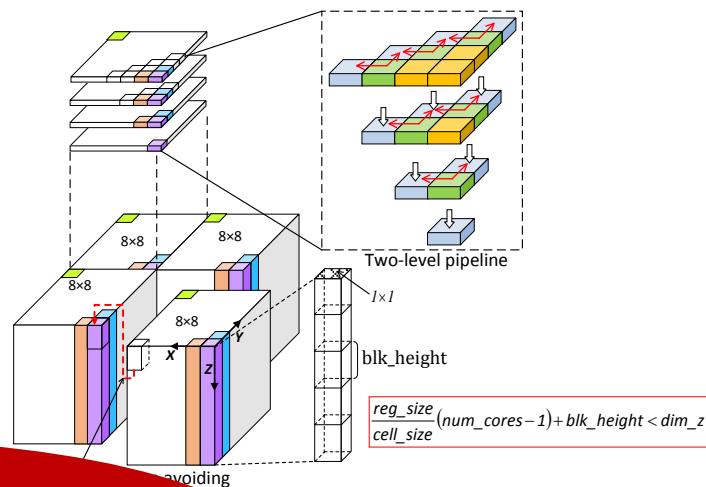
进程级并行： $O(10\text{万})$

线程级并行： $O(100)$

DD-MG K-cycle算法



几何流水线ILU算法

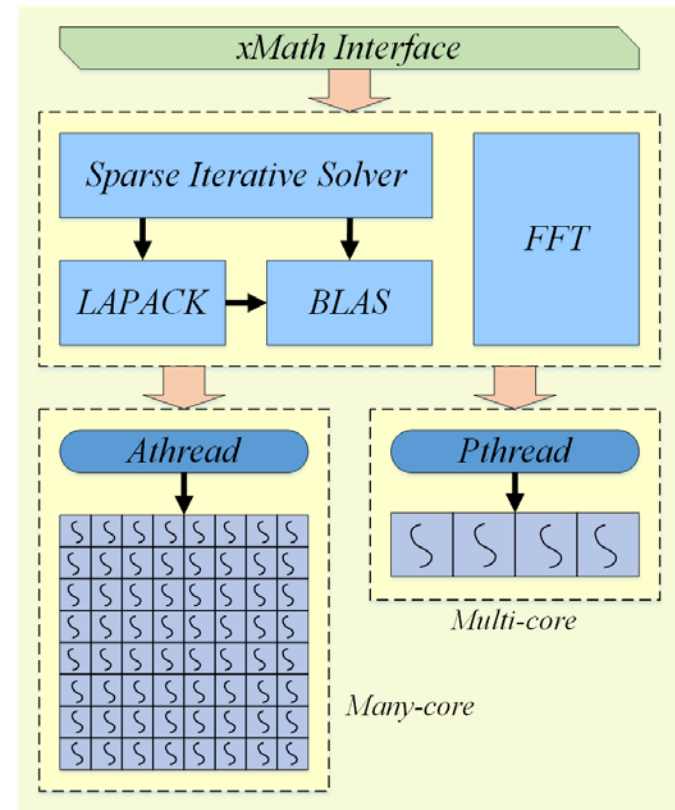


世界首个千万核可扩展隐式求解器

# 新一代高性能数学库：xMath

## ⌘ xMath

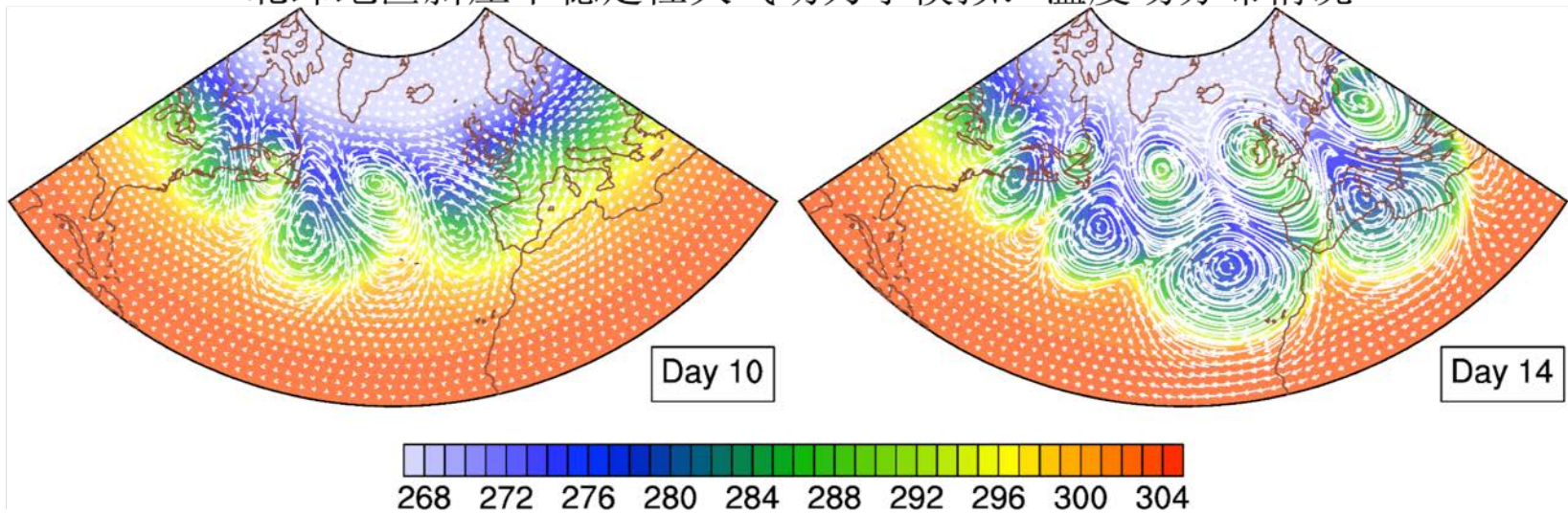
- ❖ 与商业库保持接口一致
  - MKL, ACML等
- ❖ 4个主要模块
  - BLAS、LAPACK、FFT、稀疏
- ❖ 为神威 CPU 量身定制
  - 汇编级、指令级、访存优化
  - MPEs : Pthreads并行
  - CPEs : Athread并行
- ❖ 版本发布历史
  - V0.9a : 2016.01.01发布
  - V1.0b : 2016.06.20发布
- ❖ 支撑两个GB奖入围应用
  - 高分辨率相场模拟
  - 中尺度大气模拟



# 高分辨率测试算例

## ⌘ Moist beta-plane baroclinic instability (斜压不稳定性实验)

北纬地区斜压不稳定性大气动力学模拟：温度场分布情况



Temperature (in K) distribution at 500m-level

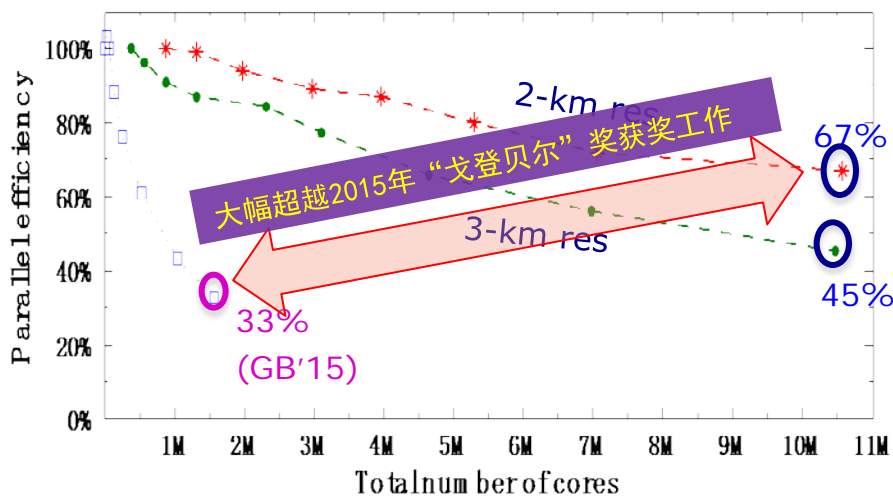
10-km res, dt=1200s, 16K core-groups (1/10 machine): 4.1 SYPD

# 大规模测试情况

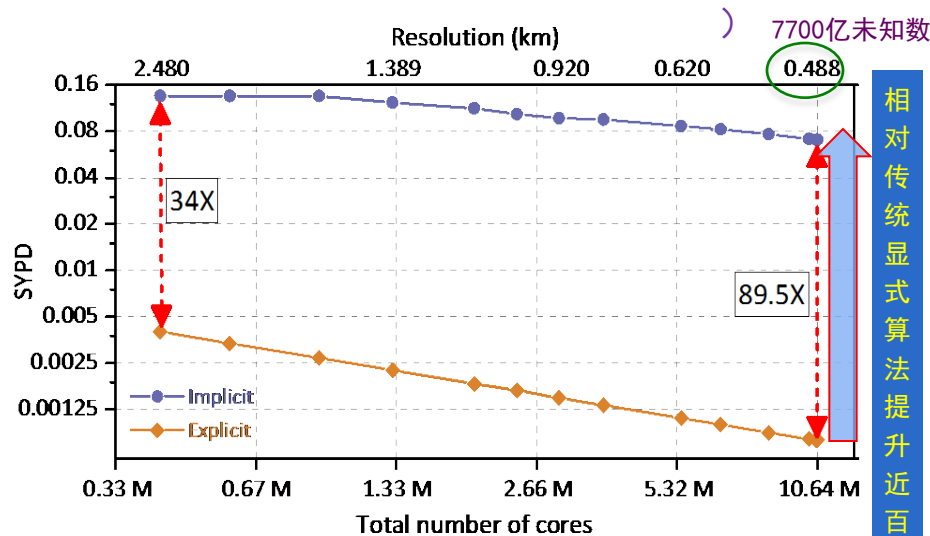
指标	模式	此前最高	我们
模拟能力 (3km分辨率)	美国FV3	0.16年/天	1.01年/天
最大水平分辨率	日本NICAM	870米	488米

3公里水平分辨率下模拟能力达到1.01年/天 (FV3为: 0.16年/天)

最大实现488米水平分辨率模拟 (NICAM为870米)



强可扩展性测试



弱可扩展性测试

相对传统显式算法提升近百倍



# 戈登·贝尔奖关注点

⌘ 今年我国入围三项，最终得奖一项

➤ 为什么？

⌘ 国内关注点

➤ 机器的利用率，高flops

➤ 真实应用的应用评价

⌘ 戈登·贝尔奖更关注

➤ 影响面大的算法突破

➤ 高性能计算机软硬件关键技术的突破

# 报告大纲



## ⌘ 国家基金委重大项目“并行计算机与并行算法”（1989-）

- 首席科学家：冯康、夏培肃
- 体系结构组：韩承德
- 算法组：孙家昶

# 难忘的运10 (2013)



还去科学院计算所请来了孙家昶同志进行计算机编程，在双方都发挥了各自的专长和相互紧密配合之下，经孙家昶同志日以继夜的3个多月辛勤工作，我们首次共同完成了运10首个计算机设计的部件理论图——前机身外形理论图。继之，运10全部外形理论图都采用了计算机进行设计，它节省了大量画模线的人员及其相应的劳动工作量和时间，并提高了外形数据的精确度，这一做法开创了我国大规模使用计算机进行飞机理论外形设计的先河。

## 图书在版编目(CIP)数据

难忘的运10—中国第一架大型喷气客机研制纪实/王惟翰主编.  
—上海:上海文化出版社,2012.12  
ISBN 978-7-80740-996-1

I. ①运… II. ①王… III. ①纪实文学—作品集—中国—当代  
IV. ①D25

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第301925号

## 出版人

王 刚

责任编辑

吴志刚

美术设计

张 翔

## 书名

难忘的运10—中国第一架大型喷气客机研制纪实

出版发行

上海文化出版社

地址:上海南京东路74号

网址:www.cshw.com

邮购部:200020

印刷

上海交大印务有限公司

开本

787×1092 1/18

印张

27.5

字数

380千字

版次

2013年3月第1版 2013年3月第1次印刷

印数

1—4210册

图书书号

ISBN 978-7-80740-996-1/I·642

定价

48.00元

邮费

4.00元

读者

如发现本书质量问题请与印刷厂质量科联系

T: 021-54743287

## 第三部分 峥嵘岁月

达天线功率损失就大。当初，雷达组设计人员提出要求运10雷达罩前端当量半径为400毫米。后来，我们收集了相关飞机的当量半径后发现，当时的三义载、波音707飞机其该值均小于300毫米。经协调，最终确定运10飞机的雷达罩前端当量半径为300毫米。

## 四、各方合作、取长补短——计算机应用

过去飞机制造过程中的工艺准备都是采用：外形理论图设计→画模线→生产样板→制造模具→制造工具→零部件生产→总装→试飞这样一个流程。但对当时运10要求的研制进度和缺乏模线绘制人员的矛盾非常突出，正好在运10最初开始设计时，三机部625所的黄致远和王无总两位同志来708工程设计组主动向我介绍用计算机设计飞机外形理论图的特点，既可用于数控机床加工零件，又可省去画模线时反复修形的繁杂和漫长过程。这是我第一次了解到计算机的“神奇”，并当即向马凤山同志进行了汇报。在取得马总同意后，正式开始用计算机进行运10前机身的外形设计试验。同时他们还

还去科学院计算所请来了孙家昶同志进行计算机编程，在双方都发挥了各自的专长和相互紧密配合之下，经孙家昶同志日以继夜的3个多月辛勤工作，我们首次共同完成了运10首个计算机设计的部件理论图——前机身外形理论图。继之，运10全部外形理论图都采用了计算机进行设计，它节省了大量画模线的人员及其相应的劳动工作量和时间，并提高了外形数据的精确度，这一做法开创了我国大规模使用计算机进行飞机理论外形设计的先河。

## 五、行之有效的解决办法

碰到疑难问题怎么办？好在当时在设计组内普遍流行着一股良好的学风和三结合、民主讨论、敢于创新等一系列好作风，克服了大家缺乏经验这个难关。

(一) 三结合——弥补了知识和经验的不足

运10设计开始不久，受叶帅的指示，民航调拨了一架波音707飞机给设

## 运10

## 2. 运10飞机前机身外形是怎样设计出来的

吴晋波

1970年9月20日，我随172厂共70人来到上海参加708工程设计组工作。我的主要任务是负责运10飞机包含驾驶舱外形在内的前机身外形设计工作。运10飞机前机身外形是一个完全由我们自行设计，符合国际标准的我国第一架大型喷气客机上的外形。刚接到这个任务的时候，也深感难度很大。但是，通过我们不懈的努力，终于圆满地完成了任务。

民用飞机前机身外形设计时要考虑的因素很多，包括：机组成员的数量及位置、驾驶员的视野、驾驶舱的容积、设备的多少和布置、如何使外形光顺流线减少飞行时阻力、尽可能做到美观而有特色，等等。

但最为重要的是保证飞机的飞行安全。与飞行安全关系最为重要的关键因素是，驾驶员要有良好的各个方向的视野。可以毫不夸张地说，民用飞机前机身设计的核心和首要任务是使驾驶员具有良好的视界来保障飞行安全。

## 一、困难的环境

我们是在1970年的9月中旬突然接到通知，要在三天之内火速赶到上海，去参加落实毛主席“上海可以搞飞机”的决策而提出的708工程，即在上海研制一架民用飞机的工作。但是到了上海，我们就发现我们所面临的环境是十分困难的。

(一) 政治上不信任

当时正处于“文革”高峰时期，我们中许多人，包括干部和普通设计人员，在不久前还刚刚从批判对象中解放出来，大家头上还戴着“臭老九”的紧箍圈，生怕由于技术上的失误会被扣上“破坏分子”、“反革命”帽子而永世不得翻身。

210

213

## ⌘ 中国科学院软件研究所高性能计算团队成立20年

- 长期坚持隐式求解器并行计算模型、算法和软件研究方面耕耘
- 历经国产曙光1000-5000系列、日立高性能系列、IBM蓝色基因、深腾1800 , 6800 , 7000、天河一号、天河二号等国内外多代系统考验
- 最终在国产“神威太湖之光”这一配备了国产众核处理器的世界顶级超算系统上取得突破

# 与国内外顶尖团队长期协作

- ⌘ 耶鲁大学计算机系（预条件子算法）
- ⌘ 明尼苏达超级计算机研究所（MSI）（并行计算）
- ⌘ UCLA数学院（区域分解）
- ⌘ 日立超级计算机（SR8000伪向量机）
- ⌘ 科罗拉多大学计算机系（Newton-Krylov-Schwarz算法）
- ⌘ 中科院计算所曙光团队
- ⌘ 国防科大天河团队
- ⌘ 国家并行计算机工程技术研究中心神威团队

# 高性能计算 承上启下

## ⌘ 上接应用模型

- 物理模型
- 数学模型
- 计算模型

## ⌘ 算法研究、应用软件与数学库

## ⌘ 下接最新机器特性

- 异构体系结构
- 通信机制 ( MPI、OpenMP... )
- 向研制方反馈信息

# 培养高水平年轻化创新团队

- ⌘ 国际高水平环境中培养
- ⌘ 国家重大项目攻关中培养
- ⌘ 1996年曙光1000并行特征值攻关团队
  - 物理所 王鼎盛
  - 生物物理所 陈润生
  - 软件所 孙家昶、迟学斌、邓建新, 曹建文
- ⌘ 软件所团队2001年获国家科技进步二等奖
- ⌘ 日立数学库 迟学斌、李玉成、张云泉、张林波, 朱鹏 等
- ⌘ 并行油藏模拟软件 ( PRIS、数学库 )



建议我所十三五研究方向增加

国家重大科学装置  
与  
重大项目中的软件研制

谢谢所内三位院士  
现任所领导  
及在座各位！