

国内外超算中心发展模式研究与建议*

冯桂安¹, 林新华^{2,3}

¹ (上海投资咨询公司, 上海, 200003)

² (上海交通大学 高性能计算中心, 上海 200240)

³ (东京工业大学 学术国际情报中心, 日本)

Research and Advices on Development Patterns of Supercomputing Centers in the World*

Gui'an FENG¹, James LIN^{2,3}

¹(Shanghai Investment Consulting Corporation, Shanghai 200003, China)

²(Center for High Performance Computing, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

³(Global Scientific Information and Computing Center, Tokyo Institute of Technology, Japan)

Abstract: We summary the development patterns of Supercomputing Centers (SC) in the US, Japan, and the EU, and compare them with pros and cons in building and operations of SC in China. Furthermore, we analyze the existing bottlenecks and mechanical reasons of SC in results application, talents assembling, and economy promotion, and we also provide advices on management mechanism and policy support for future development of SC in China.

Key words: Supercomputing Center; Development Patterns; High Performance Computing

摘要: 本文通过总结美国、日本、欧洲各国超级计算中心发展模式, 对比分析我国超算中心在建设和运营中存在的优劣势, 剖析其在成果应用、人才聚集以及经济促进等方面存在的瓶颈和机制原因, 进而从管理体制和政策保障等方面提出建议, 为我国超算中心未来发展提供参考。

关键词: 超算中心 发展模式 高性能计算

“天河”系列 4 次问鼎 TOP500[1], 标志着我国超级计算机的研制能力已经可与美日一竞高下, 而软件与应用也正在迎头赶上[2]。本文则从另外一个角度切入, 探讨这些强大机器的“婆家”——超算中心。他山之石, 可以攻玉, 通过了解美日欧超算中心发展模式和历史, 逐渐改变国内“为机器到处找婆家”的现状, 从而实现超算中心的可持续发展。

1 国内外主要超级计算中心基本情况

Top500 是衡量超级计算机发展水平的重要排名, 也是高性能计算发展的风向标。根据 2014 年 6 月发布的第 43 期榜单, 美国进入 Top500 的超级计算机仍保持第一, 但从 2013 年 11 月的 265 个下降到了 233 个。中国继续保持在第二, 数量从 63 个增至 76 个。而日本和英国分别以 30 台并列第三。

1.1 美国

美国是高性能计算领域的霸主, 拥有美国能源部 (DOE) 和美国国家科学基金会 (NSF) 两大体系。在尖端应用方面的代表美国能源部 (DOE) 下属国家实验室, 按照美国国家实验室由政府所有、承包人运营 (简称为“GOCO”) 的管理模式进行运营, 该种模式可以追溯至二战期间开发原子弹的曼哈顿计划[3]。早在上

作者简介: 冯桂安, 男, 国家注册咨询工程师。上海投资咨询公司高级项目经理。主要研究方向为电子政务、高性能计算。gafeng@sicc.sh.cn。林新华, 男, 讲师。上海交通大学高性能计算中心副主任、东京工业大学学术国际情报中心客座准研究员。主要研究方向为高性能计算。james@sjtu.edu.cn。

世纪 80 年代中期, 为了满足各大学及政府机构为促进其研究工作的迫切要求, 美国国家科学基金会 (NSF) 在全美国建立了 6 个超级计算机中心, 如今已成为高校发展超级计算机的典型范例。

此外, 美国还有一批围绕国家核心战略和安全服务的超算中心, 代表有 NASA Ames 研究中心的 Pleiades(21)、Discover(92)和美国空军研究实验室的 Raptor(2013 年 6 月为第 40)。

1.1.1 美国能源部 (DOE)

美国能源部共有 28 个下属实验室, 其中 11 个为国家实验室, 拥有世界级超级计算机的主要有 6 个。其超级计算机体系结构的构思、设计、建造以及运维等方面的能力在世界上无出其右。尽管国家实验室委托大学和企业管理, 但 17 家实验室中有 16 家的研究开发经费 80%以上来自于能源部, 这也反映出实验室的主要任务是能源部支持的长期的、前沿的、高风险的基础性和应用研究。

这些超级计算资源并不只针对能源部内部, 而是通过 INCITE 项目[4]向学术界和工业界免费开放。每年 4 月中旬到 6 月底, 用户可以在线申请。

表 1 美国能源部体系

序号	依托机构	超级计算机 (TOP500 排名)	研究领域
1	劳伦斯利弗莫尔国家实验室 Lawrence Livermore National Laboratory	Sequoia(3) Vulcan(9)	核武器、核安全、天文、能源、人类基因组、气候变化
2	阿贡国家实验室 Argonne National Laboratory	Mira(5)	气候研究、发动机、宇宙、电池
3	橡树岭国家实验室 Oak Ridge National Laboratory	Titan(2)	新能源、气候变化、蛋白质、超新星, 核聚变, 光合作用
4	洛斯阿拉莫斯国家实验室 Los Alamos National Laboratory	Cielo(32)	武器研发、物理、核安全
5	劳伦斯伯克利国家实验室 Lawrence Berkeley National Lab	Hopper(34)	能源、健康、环境
6	桑迪亚国家实验室 Sandia National Laboratories	Red Sky(87)	核武器、核安全、新材料、国家安全

1.1.2 美国国家科学基金会 (NSF)

目前, 美国国家科学基金会 (NSF) 正在推行一项 5 年 12 亿美元名为 XSEDE[5]的项目, 通过与美国 16 所高校及研究机构合作, 为世界各地的科学家提供免费的超算资源。

表 2 美国国家科学基金会体系

序号	依托单位	超级计算机 (TOP500 排名)	备注
1	国家超算应用中心 National Center for Supercomputer Applications/伊利诺伊大学	Blue Water	未参与 TOP500 排名; XSEDE 项目领导者
2	圣地亚哥超算中心 San Diego Supercomputer Center/加州大学圣地亚哥分校	Gordon(158)	为数据密集型应用设计, 大量使用 SSD
3	德州先进计算中心 Texas Advanced Computing Center/德州大学奥斯丁分校	Stampede(7)	大量使用 Intel MIC
4	佐治亚理工大学	Keeneland(130)	
5	计算科学国家研究所	Beacon(--)	2012 年 Green 500 第一

	National Institute for Computational Sciences/田纳西大学		名, 2013年5月TOP500为397名。
--	---	--	------------------------

1.2 日本

长期以来, 日本一直是高性能计算强国, 早在上世纪80年代中期, 日本研发的超级计算机在性能方面就屡次超越美国, 富士通和NEC等制造的向量机甚至一度“倾销”美国本土。但之后日本在超级计算机研发上节节退步。1993年6月的TOP500中, 日本制造的超级计算机占21%, 而最新一期TOP500中只剩下1%。但其在节能技术上仍保持世界领先水平, 尤以两次获问鼎Green500[6]的东京工业大学(东工大)TSUBAME-KFC为代表。

日本的超级计算机研制一直有两股学术理念在竞争: 一是以本土化定制的CPU为载体, 代表为富士通公司为日本理化研究所(理研)研制的K; 另一是采用商业部件组建主机, 代表为东工大的基于CPU+GPU架构的TSUBAME系列。根据日本法律, 后者甚至不属于“超级计算机”。因此在日本短期访问6个月以下的外国人不能使用K, 但可以使用TSUBAME。

日本在高性能计算应用水平很高, 可能仅次于美国, 尤其在地震预测、天气预报、汽车、材料等方面具有较大优势, 并在2011-2012年连续蝉联两届ACM Gordon Bell奖。

日本没有大型的公共高性能计算平台, 目前的超算中心大都依托于专业研究机构 and 高校。日本的超算中心发展也是走了弯路的。当年地球模拟器统治了TOP500近3年, 但由于不重视高性能计算研究, 没有技术积累, 所以其影响力在机器性能被美国的Blue Gene系列超越后迅速衰退, 甚至都没有后续投入。而同期的东工大TSUBAME团队则依托大学的学科和人才优势, 贯通“前瞻研究->原型系统->生产环境”, 以科研提升高性能计算的系统研制和应用水平。东工大的Satoshi Matsuoka教授在[7]中提及了GSIC中心的发展历史。之后理研在建设K团队时, 注意吸取了地球模拟器的教训, 吸收了TSUBAME团队的经验, 目前也颇见成效, 并争取到了2020年E级计算机的项目。

表3 日本超级计算机分布情况

序号	依托单位	全自研主机	商用部件机	备注
1	日本理化学研究所 Advanced Institute for Computational Science (AICS), RIKEN	K Computer (4)		2011年2次问鼎TOP500
2	国际聚变能研究中心(IFERC) International Fusion Energy Research Centre		Helios (30)	
3	东京工业大学 GSIC, Tokyo Institute of Technology		TSUBAME 2.5 (13) TSUBAME-KFC (435)	CPU+GPU
4	东京大学 Information Technology Center, The University of Tokyo	Oakleaf-FX (36)		
5	高能加速研究机构 High Energy Accelerator Research Organization /KEK		HIMAWARI (68) SAKURA (69)	
6	九州大学 Research Institute for Information Technology, Kyushu University		QUARTETTO (37)	
7	筑波大学 Center for Computational Sciences, University of Tsukuba		COMA (51)	即PACS-IX, CPU+MIC

1.3 欧洲

为了与美日抗衡, 欧洲诸国一方面保持各自在高性能计算软件和应用上的传统优势, 另一方面在欧盟框架下, 积极组织跨国跨区域的合作, 如PRACE[8] (DEISA的后续) 项目就有应对美国XSEDE计划的意味。

目前欧洲内部大致格局是瑞士 CSCS 一马当先，德国的三大、英国的两大国家超算中心紧随其后，后起之秀西班牙的 BSC 正奋起直追。

表 4 欧洲主要超算中心分布情况

序号	依托单位	超级计算机 (TOP500 排名)	备注
1	瑞士国家超算中心 (CSCS) Swiss National Supercomputing Centre	Piz Daint (6) EPFL Blue Brain IV (56)	PRACE 成员
2	英国 Daresbury 国家实验室 Science and Technology Facilities Council - Daresbury Laboratory	Blue Joule(23)	参与 PRACE
3	EPCC/英国爱丁堡大学 University of Edinburgh	DiRAC(33) HECToR(59)	参与 PRACE
4	英国剑桥大学 The University of Cambridge	Wilkes(200) Darwin(289)	英国高校第一
5	德国莱布尼兹超算中心 (LRZ) Leibniz Rechenzentrum	SuperMUC(12)	参与 PRACE
6	德国尤里希研究中心 (FZJ) Forschungszentrum Juelich	JUQUEEN(8) JUROPA(89)	参与 PRACE
7	德国斯图加特超算中心 (HLRS) HWW/Universitaet Stuttgart	HERMIT(44)	参与 PRACE
8	CEA/TGCC-GENCI, 法国	Curie thin nodes(26)	PRACE 成员
9	法国原子能委员会 (CEA) Commissariat a l'EnergieAtomique	Tera-100(35)	
20	CINECA, 意大利	Fermi(17)	PRACE 成员
11	巴塞罗那超算中心 Barcelona Supercomputing Center	MareNostrum(41)	PRACE 成员
12	芬兰科学计算中心 CSC Center for Scientific Computing	Sisu(232)	PRACE 成员

1.4 中国

我国关于高性能计算发展战略[9]主要由国家科技部主导，纳入国家高技术研究发展计划(863 计划)，以 5 年为周期，通过部省（市）合作计划开展主机研制工作。

根据最新一期 TOP500，我国公开拥有 P 级以上计算能力的超算中心有 6 家单位，分别是：国家超级计算广州中心、国家超级计算天津中心、国家超级计算深圳中心、国家超级计算济南中心、国家超级计算长沙中心和中国科学院过程所。

曾作 863 第一轮高性能计算机研制计划的布局，中国科学院超算中心（北京）和上海超算中心分别拥有 150T 和 200T 的高性能计算机。目前中国科学院超算中心（北京）将与北京市合作升级已有高性能计算平台，计算规模约为 1P。

目前第三轮高性能计算机研制规划正在研究中，预计计算性能将达到“天河二号”的 3 倍，将成为迈向 E 级计算的重要一步。

表 5 国内主要超算中心情况[10]

序号	单位	主机规模	配用电量	主要应用领域	备注
----	----	------	------	--------	----

1	国家超级计算 广州中心	33.9PF (1), 天 河二号	主机 17.8MW	生命科学、材料科学、大气 科学、地球物理、宇宙	Top500 连续 3 次 排名世界第一
2	国家超级计算 天津中心	4.7PF(14), 天 河 1A	主机 4.3MW	石油勘探、高端装备研制、 生物医药、新能源、新材料、 气象预报、动漫设计等科学 研究和工程计算	面世时排名世界 第一
3	国家超级计算 深圳中心(深圳 云计算中心)	1.2PF(28), 曙 光	主机 3.6MW	高性能计算: 天文, 海洋, 核电、工程等香港、澳门、 广东用户; 云计算: 鹏云系统, 市民, 政府, 中小企业	电信运行商合 作、100G 带宽; 4.3 万平米总建 筑
4	国家超级计算 济南中心	1PF(46), 神威 蓝光+100TF, 浪 潮	神威蓝光主 机 1MW, 其 它 1MW	海洋环流、天气预报, 生物 医药、农业生态、金融计算 等	神威蓝光全自 主, 水冷, 低功 耗
5	国家超级计算 长沙中心	1PF (48), 天河 1A 湖南方案	主机 2MW,	公共服务中心, 云计算中心, 灾备中心; 1/4 的资源用于 舆情监测	湖南省、国防科 大、湖大共建
6	中科院网络中 心超算(北京)	~1PF (尚未排名)	未知	面向中科院体系, 服务科学 研究各领域	中科院内部研究 所计算资源体系 建设
7	上海超算中心	200TF (292), 曙光	主机 1.3MW	公共服务平台	在国内开展服务 时间最长、范围 最广

2 国内外超级计算中心发展特点

超算中心有助于吸引更多的优秀科学家、工程师、研究人员聚集到超算中心开展工作, 随之带来的好处包括通过研发更具竞争力的产品以及服务从而促进经济的发展, 同时加强本国的安全和国防力量[11]。虽然世界各国对超算中心所带来的成效都有普遍的认同, 但由于发展条件的差异, 国际超算中心与我国超算中心在建立和发展上呈现出不同的特点。

2.1 国际超算中心发展特点

目前国际上典型的超算中心发展模式有两种: 股份制和政府直属, 由相应的国家研究机构自主管理或委托管理。虽然运营管理模式不同, 但建设和运营资金主要来源于政府。美国和欧洲的超级计算中心分别为这两种模式的代表。

表 6 美国超级计算中心运营模式

建设资金来源	运营资金来源	隶属关系	运营管理模式	典型中心
联邦政府 州政府	联邦政府 州政府 依托单位	隶属于国家重点实 验室 依托于大学的研究 机构	中心自主管理	劳伦斯利弗 莫尔(LLNL) 伊 利 诺 斯 (NCSA)

表 7 欧洲超级计算中心运营模式[12]

建设资金来源	运营资金来源	运营管理模式	典型中心
欧盟 中央政府 地方州政府	欧盟项目 中央政府部委 地方州政府 依托单位 企业	股份制 董事会负责决策 执行委员会负责运营管理	芬兰（CSC） 巴塞罗那（BSC） 斯图加特（HWW）

通过总结国际先进的超算中心建设和运营管理经验，可以看到，国际超级计算中心发展呈现以下特点：

1、发展高性能计算技术是国家战略，但应用高性能计算则由超算中心依托单位决定。从美日欧的经验来看，几乎没有仅提供公共服务性质的高性能计算创新平台，超级计算中心往往依托于国家级科研机构或高校。

2、科学研究人员是支撑高性能计算中心的主体，设施运维人员规模则不断缩小。由于国际高性能计算中心依托国家实验室或研究所，在超算中心人员的结构上多以研究人员为主。超算中心人员构成中运维比例变小，而在逐步增加依托高性能计算的专业领域研究人员。

3、国际超算中心承担的应用目标决定其硬件资源的配置规模。由于计算机部件升级换代的频率较高，为解决高性能计算资源的需求与应用水平的差异，国际上的高性能计算中心有些采用 2-3 年就对计算资源进行部分更新的策略。

2.2 我国超算中心发展的成效和瓶颈

通过国家科技部 863 支撑计划中关于超级计算机研制规划，依托主机研制厂商和开展部省（市）合作协议，我国在超级计算中心建设方面已建立了相对固定的模式，从三个角度确立新建布局超级计算中心的战略，分别为政治意愿、资金保障、技术支持。

政治意愿：我国通过部省（市）合作协议确立超级计算中心的建设计划。国家科技部代表国家科技战略对主机性能设定目标，实现国际科技竞争的目标。地方政府则希望超算中心能成为区域科技发展的功能载体，为其聚集人才、创新科技并推动经济发展。

资金保障：国家科技部通过 863 专项资金配套主机研发厂商进行主机研发投入，地方政府除参与主机研制之外，还承担超算中心后续运维资金的保障。

技术支持：国防科大、江南计算所、曙光集团以及浪潮集团等，已不同程度得掌握了国际领先的超级计算机的研发和集成技术，保证了我国在国际超级计算机性能竞赛中持续领先。

通过多年的滚动发展，超算中心已成为我国科技创新的重要功能载体，有力的带动了一大批重大科研和工程项目的推进，成为我国面向国际发展科技和信息技术的重要基础设施及交流平台。

1、超算中心成为我国科技创新和产业振兴重要的基础设施和合作交流平台。长期以来，主要发达国家对我国高性能计算行业一直进行种种技术交流限制。公共性服务平台的超算中心的建立，将高性能计算从原先隐蔽的领域逐步向公众开放，有力支撑了一大批重大科技项目的研究和工业项目的研究，为我国开展科技创新和产业提升提供了重大推进力。

2、我国通过超算中心开展公共计算资源服务的模式，带动了我国高性能计算用户应用水平的逐步提升。以上海超算中心为例，通过 10 年多的运维和管理，将原来 30 余个用户发展到 300 多个，促进了高性能计算在各个领域应用需求的提升。

3、超算中心在我国的普及和发展积累培养了一支专业化的高性能计算研发团队。超级计算机由于其计算资源的领先性，往往在架构设计、核心部件、配套设施等方面拥有专业的需求。目前国防科大、江南计算所、曙光集团和浪潮集团等多家单位已具备了研制世界领先超级计算机的研发实力和集成能力。

4、我国超算中心长期以来坚持公共性服务平台的属性，在客观上减少了科研机构、研究院所和企业自主建设计算中心所造成的资源重复投入，发挥了公共服务平台集约化的建设效果。

与此同时，也应当看到目前我国超算中心在建立方面虽然已形成特定模式，研制主机长期占据 Top500 榜首，但在高性能计算领域的竞争方面，依然存在几个基本状态[13]：首先，西方国家在信息技术领域的

巨大优势地位没有变；其次，美国在超级计算机的研制和应用上的主导地位没有变；第三，世界各国在超级计算机领域加大竞争的态势没有变。

从目前各地超算中心运营情况来看，未来发展仍存在诸多挑战：

1、高性能计算应用缺少国家研究战略的导向性，国家级的计算资源规划与地方级的政府自我管理存在脱节。深圳、济南等新兴的国家超算中心均以上海超算中心的运营模式作为蓝本，以地方政府投资建设加财政补贴运营的模式进行建设运营，但应用规模与地方科研需求并不完全相符。我国基础科研的投入和水平决定了对超算中心的投入必须是一项长期过程，因为工业企业生产技术和工业化设计水平达到一定程度后，才会产生对高性能计算资源的大量需求，而我国工业化水平难以在近期带动对高性能计算的大规模需求。

2、超算中心市场化和公益性难以兼顾，发展瓶颈将在第一代主机升级换代集中体现。高性能计算资源主要服务于科学计算。科学计算是一项长期投入，我国的基础科研投入和水平决定了该部分的资源投入是一项长期的过程。以上海超算中心为例，虽然市场化运作取得了初步成效但远不足以满足主机更新换代的建设资金需求。工业企业对公共性的高性能计算资源的需求是建立在自建相应平台的经济性比较上的。少量需求完全可以通过自建平台实现。无论在汽车、钢铁、核电等领域，工业企业生产技术和工业化设计水平达到一定程度后，才会产生对高性能计算资源的大量需求。我国尚处于发展中阶段，工业的核心竞争力在于劳动力资源的相对丰富，而非创新性的工业设计能力，因此，难以释放较大规模的需求。可以预见，当现有超算中心主机在面临 3-5 年的淘汰周期的时候，如何评价现有平台的效益，如何进一步利用存量资源，何时进行再投入的投资，将考量地方政府的决策。

3、围绕超级计算机为核心的独立核算体系造成计算资源与应用研究相互脱节。科研人员长期以来以外部人员的身份参与超算中心的运作，导致和主机服务人员合作黏性不足，难以带动高性能计算人才集聚和团队的培养。公共性的服务平台固然存在资源集聚共享的优势，但较难提供优秀的高性能计算人才的成长环境。缺乏应用导向的超算中心，无法承担起培养具有核心竞争力的高性能计算人才的重任。

4、超算中心对维护计算资源可用性的重视度高于计算资源的实用性，导致计算资源的使用与回报考量不足。为了鼓励用户依托公共服务平台创新，目前的超算中心一方面做优服务，另一方面采用远低于市场价格进行服务，以实现超级计算机使用率的提升，但对实际重大问题的研究推进成效重视度不足。

5、以微电子为主推动信息技术发展的时代已不复存在，而信息技术的发展和应用的强劲势头没有减退。我国要慎重研究微电子的发展战略。我国长期大量投入微电子研发，成效与投入不相匹配，原因在于工艺线和许多知识产权都是国外的，市场与软件是国外产品统治。因此要谨慎对待计算速度即代表发展水平的单一化评价体系。

3 推进我国超算中心发展的建议

从国际超级计算中心发展趋势来看，超级计算资源作为一种稀缺性资源，是重要的国家战略资源，体现的是国家对基础科学和新兴产业的自主创新支持，需要得到政府财政性资金的长期支持。为进一步促进我国超算中心的可持续发展，建议从国家战略和地方政府的角度，进一步完善超算中心发展的基础环境：

1、要对超算中心所承担的高性能计算服务与地方政府的任务进行有序引导，让优质的计算资源向重大科学挑战问题、向重大工程问题的求解靠拢，实现高性能计算设计与使用的协调发展。

2、培养高性能计算领域的领军人物，加强超算中心与高校联手，实现超算中心与本地高性能计算人才的培养和输送，促进高性能计算人才在超算中心的聚集。

3、在布局承担国家或地方重大科研方向的同时，需要继续维持一定规模的公共计算资源服务功能。加强对超级计算中心研究任务的筛选，以提高高性能计算的实用度。

同时，建议从以下两个层面加强政策的组织和协调：

a. 国家战略层面

1、相较开展超级计算机的性能竞争之外，开展全国性的高性能计算应用规划布局的需求更为紧迫。应从国家战略层面，对高性能计算服务于地方的任务进行有序引导，让优质资源向重大科学挑战问题、向

重大工程问题靠拢。

2、对高性能计算发展国家战略开展多部门协同，从科技研发、产业布局、应用示范等方面，促进高性能计算的普及发展，维持一定规模的公共计算资源服务功能，降低超级计算机的使用门槛，普及高性能计算知识，推进高性能计算的深入应用。

3、应建立国家层面与地方政府联合对高性能计算长期投入的机制，统筹建设资金和运营资金，继续从科研经费管理体制的角度入手，进一步提高地方在高性能计算领域的财政性资金利用效率。

b. 地方政府支持层面

1、建议地方政府在开展超级计算中心建设的同时，进一步加强对超算中心后期运行发展的相关政策的制度保障，促进超级计算中心的可持续发展。

2、对科学研究计算资源，建议政府采用集中购买高性能计算服务方式，并形成可考核、可量化的、有限度的支持科学研究的方式，形成财政对高性能计算支持的长效机制。

3、对科技管理部门支持的科学研究和创新开发专项中，对高性能计算有需求的科研项目，以政策安排的方式，指定由中心提供计算资源，为项目工作提供高性能计算支撑。

4、在信息产业扶持方面，设立高性能计算研究和相关软件开发的项目预算，持续支持高性能计算的研究和创新，支持高端应用软件的开发工作。

4 结束语

本研究通过对当前国内外超级计算中心的总结，发现应用效率、人才聚集以及经济带动等方面已成为我国超算中心发展的软肋。针对这些问题，本文建议不仅超算中心自身需要总结提升，建设模式、组织机制以及政策保障等外部环境更需要改进。

由于作者水平有限，对于高性能计算中心的研究也处于探索阶段。不妥之处，希望同行专家不吝批评指正。

致谢 本文初稿成于大约一年前，之后同行们给予了许多宝贵建议和帮助，在此一并对他们表示感谢，尤其是东京工业大学 Satoshi Matsuoka 教授、中科院计算所张云泉研究员、上海超级计算中心王普勇副主任和剑桥大学高性能计算中心主任 Paul Calleja 博士。

References:

- [1] TOP500, <http://www.top500.org>
- [2] 卢宇彤, 天河二号吾问吾答, 2014 年, <http://goo.gl/WeguAT>
- [3] 赵俊杰, 美国能源部国家实验室的管理机制, 《全球科技经济瞭望》2013 年 第 7 期
- [4] DOE INCITE Program, <http://www.doeleadershipcomputing.org/>
- [5] XSEDE, <https://www.xsede.org/>
- [6] Green500, <http://www.green500.org/>
- [7] Jeffrey S. Vetter, eds. Contemporary High Performance Computing: From Petascale toward Exascale, Chapman & Hall/CRC Computational Science, Apr 2013
- [8] PRACE, <http://www.prace-ri.eu/>
- [9] 钱德沛, 国家高性能计算发展现状, 第三届中国科研信息化发展研讨会, 2014 年
- [10] 张云泉, 2013 年中国高性能计算机发展现状分析与展望, 科研信息化技术与应用, 2013 年第 4 期
- [11] Earl C. Joseph, Chirag Dekate, Steve Conway. How nations are applying high-end Petascale Supercomputers for innovation and economic advancement in 2012. August 2010, IDC #236541, Volume:1
- [12] 张晓欣, 适合自己的才是最好的—欧洲三大计算中心运营模式之比较, 高性能计算发展与应用, 2013 年第 3 期
- [13] 周兴铭. 中国超级计算机: 国运与国策. 瞭望东方周刊. 2014 年 7 月