

绿色计算原理与应用

郭 兵 沈 艳 王继禾 等 著



科学出版社

013033166

TP38
17

绿色计算原理与应用

郭 兵 沈 艳 王继禾 等 著



科学出版社

北 京



北航

C1640235

TP38
17

内 容 简 介

本书详细介绍了绿色计算的基本概念、原理、组成、度量、优化、评价与应用等内容。内容主要包括绿色计算的基本概念、原理、分类、研究内容与发展现状,嵌入式系统的低功耗设计,嵌入式软件的能耗优化与评价,高性能的可定制异构多核体系结构,低能耗的嵌入式操作系统,Internet 的动态能耗优化,绿色软件工程,移动云计算的绿色设计,物联网的绿色设计等。

本书可作为高等院校计算机、电子工程、通信工程、微电子、自动化等专业高年级本科生、研究生和教师的教学参考书,也可作为相关行业从事计算机系统的“绿色化”研究、设计与应用的工程人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

绿色计算原理与应用/郭兵等著. —北京:科学出版社,2013
ISBN 978-7-03-036436-4

I. ①绿… II. ①郭… III. ①计算技术 IV. ①TP3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 008784 号

责任编辑:张海娜 / 责任校对:纪振红
责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝正设计

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 4 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2013 年 4 月第一次印刷 印张:24

字数:482 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

计算机系统经过 60 多年的快速发展和广泛应用,对人类社会进步产生了巨大的推动作用,但“凡事物极必反”,其对环境的一些负面影响也日益显现出来。按行业划分,整个 ICT(information and communication technologies,信息与通信技术)行业是全球第五大耗能行业,与航空业的耗能水平大体相当,而随着移动互联网和云计算等技术应用的日益深入,ICT 行业是能耗增长最为迅速的产业之一。

2005 年以来全球极端天气的频繁出现,导致严重的环境破坏和经济损失,预示气候变化近在眼前,尤其 2012 年极端气候事件比十年前上升五倍,导致粮食价格不断上升,资源、水源争夺激烈,全球经济正陷入“日本式”衰退,更加凸显 ICT 行业“低碳节能”问题的重要性和迫切性。

绿色计算是一种以环境保护为中心的计算模式,与其他计算模式相融合(包括高性能计算、分布式计算、嵌入式计算、社会计算、普适计算和云计算等),从源头上、根本上改进/消除计算机系统的环境不友好方面,追求计算机系统与人、社会、资源、环境和经济发展的和谐关系,避免计算机系统的“过度计算”现象,即过分追求系统的性能,实现计算机系统的环境友好性。绿色计算之“绿”,既有自然、生态含义,更有社会、人文之意,包含“计算的绿色化(green of computing)”和“通过计算的绿色化(green by computing)”两层含义,其目标包括能源和资源的节约,能源和资源的高效利用与循环利用,对人和环境的友好性,即低碳排放与无害,ICT 技术在环境保护领域的应用等。

绿色计算涵盖了各种类型的计算机系统,其中“云计算”数据中心的服务器系统和智能移动的嵌入式计算机系统(如智能手机)节能要求最为迫切。《绿色计算原理与应用》一书从智能移动的嵌入式计算机系统低功耗设计的角度出发,在移动云计算环境下,根据嵌入式系统的典型软/硬件组成结构,自顶向下,对绿色计算进行了层层分解,全面介绍了目前绿色计算的理论研究和工程应用所取得的丰硕成果及最新进展,包括绿色计算的基本原理与研究内容、嵌入式系统的低功耗设计、嵌入式软件的能耗优化与评价方法、高能效的可定制异构多核体系结构、低能耗的嵌入式操作系统、Internet 的动态能耗优化、绿色软件工程、移动云计算的绿色设计以及绿色计算在物联网中的应用等,给不同学科的研究、教学和工程人员提供一

个关于绿色计算的全貌。

总体上看,绿色化的需求将促使信息产业产生颠覆性的变革,导致计算机系统软/硬件设计思想的大转变。绿色计算的研究在我国还比较少,难以满足产业发展和人才培养的需要,大力开展这方面的研究是很有意义的。

中国计算机学会理事长

清华大学教授

Handwritten signature of Zheng Wei in black ink.

2012年12月3日

前 言

通常,人们认为 ICT 产业是一种科技含量高、资源和能源消耗低、环境污染小的绿色产业。但是,根据 Gartner 公司 2007 年一份名为《绿色 IT:新一波产业冲击》的报告,计算机和通信设备每年碳排放量约占全球碳排放量的 2%。Gartner 公司就用户电脑耗电的电能和服务器搜索一次的耗能进行计算,形象地指出:我们每 Google 一次,耗能相当于烧开半壶水。而随着信息科技应用日益深入,按行业划分,整个 ICT 行业是全球第五大耗能行业,与航空业的耗能水平大体相当,这个数字仍在迅速上升。据中国国家发展和改革委员会(简称发改委)发布的 2010 年各行业耗电量,IT 产业的耗电量位居第五位,是能耗增长最为迅速的产业之一。产生的这些电力消耗,一方面用户需要承担高昂的电费支出,另一方面也严重地影响到城市的能源分配。计算机系统的广泛使用除消耗大量的电力能源外,还对气候、环境等产生间接的不利影响。

从 1946 年开始,计算机系统经过 60 多年的快速发展和全球广泛应用,对人类社会进步产生了巨大的推动作用,但“凡事物极必反”,其对环境的一些负面影响也日益显现出来。“气候变化问题”已由一个科学问题,转为涉及政治、经济、外交等多方面的综合问题。实际上,计算机系统的节能环保问题已受到各国政府、学者和 ICT 业内软/硬件开发商的高度重视与认可,如工业与信息化部组织编制的《电子信息节能技术开发与应用方案推荐目录》和《信息化促进节能减排》方案,中国移动集团公司启动以节能减排为核心的“绿色行动计划”,华为、中兴、诺基亚、爱立信等通信设备公司倡导的绿色通信理念,联想、ARM、AMD、NVIDIA、Intel 等计算机公司倡导的绿色计算模式,DARPA(美国国防部高级研究计划署)于 1999 年启动的 PAC/C(power-aware computing and communications,感功计算与通信)研究计划等。

本书大部分内容是作者和其他学者近年来的研究成果,反映了国内外绿色计算研究和应用的最新进展。全书共九章。第 1 章概述了绿色计算的基本概念、原理、分类、研究内容与发展现状,并对绿色计算的背景及意义进行了简要介绍。第 2 章研究了嵌入式系统的低功耗设计,包括低功耗设计的软/硬件层次划分、系统层的低功耗设计技术、多层次的硬件功耗优化技术、嵌入式系统的电池技术以及功耗优化工具等内容。第 3 章分析了嵌入式软件的能耗优化与评价,包括嵌入式软

件能耗的测量方法与工具、源程序结构级/算法级/软件体系结构级软件能耗的建模与优化技术、软件能耗融合模型、低功耗编译优化方法、嵌入式软件能耗属性与其他质量属性的关系以及嵌入式软件能耗优化方法的评价等内容。第4章论述了高能效的可定制异构多核体系结构,包括面向能耗相关软/硬件划分的层次化控制数据流图建模、基于离散 Hopfield 神经网络的 RTOS 功耗优化、NoC 目录协议能耗分析与建模,以及智能移动终端的异构多核结构与软/硬件划分技术等内容。第5章研究了低能耗的嵌入式操作系统,包括实时任务调度、低能耗调度算法的问题和制约、低能耗任务调度以及低能耗嵌入式操作系统的静态设计等内容。第6章探讨了 Internet 的动态能耗优化,包括 Internet 的能耗特性、Internet 的低能耗技术分类、节点的动态能耗优化、节点间协同的动态能耗优化以及面向 IP over TDM over DWDM 的多层网络能耗优化等内容。第7章阐述了绿色软件工程,包括绿色软件的需求工程、系统设计、绿色软件的设计、构造与编译技术、绿色软件的测试、评价与验证、绿色软件的部署、运行与控制以及绿色软件开发与运行保障的集成与验证平台等内容。第8章分析了移动云计算的绿色设计,包括智能移动终端的协同节能设计、无线通信网络的绿色设计、“云端”的资源管理、分配和服务、“云端”与“终端”的虚拟化技术以及“云端”与“终端”的负载平衡等内容。第9章研究了物联网的绿色设计,包括节点的硬件节能设计、节点的软件节能设计、无线传感网络的节能设计、物联网系统层的节能设计等内容。

在本书的编写和四川大学先进嵌入式系统团队的绿色计算研究与开发过程中,一直得到众多国内外专家的亲切关怀。香港理工大学的邵子立副教授,澳大利亚 La Trobe 大学的王殿辉教授,美国肯塔基大学的邱美康副教授,美国加州大学洛杉矶分校(UCLA)的丛京生(Jason Cong)教授,美国加州大学圣地亚哥分校(UCSD)的 Rejesh Gupta 教授,美国 Texas 大学 Dallas 分校的 E. H. M. Sha 教授,美国伊利诺伊大学香槟分校(UIUC)的陈德铭教授,韩国 Kyungwon 大学的 Y. S. Kim 教授,中国台湾大学的郭大维教授,日本筑波大学(University of Tsukuba)的李颀教授,加拿大 St. Francis Xavier 大学的 Laurence T. Yang 教授,上海交通大学的过敏意教授和戚正伟副教授,中国科学院计算技术研究所的徐志伟研究员、刘志勇研究员和孙毓忠研究员,华中科技大学的金海教授和廖小飞副教授,浙江大学的吴朝晖教授、张宏刚教授、陈天洲教授和黄江伟博士,西北工业大学的周兴社教授,北京大学的郭耀副教授,东北大学的邓庆绪教授,国防科学技术大学的廖湘科教授,清华大学的汪东升教授、曹军威教授和陈渝副教授,大连理工大学的李克秋教授,电子科技大学的江维副教授等给了作者很多支持与帮助。本书还从国内外许多关于绿色计算、嵌入式系统低功耗设计、移动计算等高水平著作或与有关专

家的讨论交流中吸取了新的营养,这些著作的作者和专家是杨学军教授、李德毅教授、Lionel Ni 教授、赵伟教授、N. K. Jha 教授、郑纬民教授、林闯教授、牛志升教授、胡事民教授、马华东教授、易会战教授、T. K. Tan 博士、周学海教授、雷霆博士、陈向群教授、赵霞博士、董云卫教授等,谨向上述教授、专家和朋友表示诚挚的谢意。

本书由郭兵、沈艳、王继禾、伍元胜、刘啸滨、刘云本、王毅、段林涛、张文丽、黄武、熊伟等执笔完成,参加本书编写工作的还有陈晓丰、王钦、李鹏、徐阔海、夏俊、马波、张俊涛、刘凡、罗标、张强、张放、王伟男、许莹、程晨等同学。四川大学计算机学院(软件学院)的有关领导和师生为本书的写作提供了宽松的环境和多方协助,在本书编写过程中得到了四川大学计算机学院(软件学院)章毅教授、王俊峰教授、洪玫教授、彭舰教授、唐宁九教授、朱敏教授、邵明松书记、卢莉副书记、秦燕副书记、刘东权教授、蒋玉明教授、何军副教授、杨秋辉副教授、李强副教授和电子科技大学计算机学院熊光泽教授、雷航教授、桑楠教授、罗蕾教授的大力支持和悉心指导,在此表示深深的谢意。

最后,特别感谢国家自然科学基金项目“智能移动嵌入式系统的协同节能关键技术研究”(批准号:61272104)和“嵌入式软件低功耗设计关键技术研究”(批准号:61073045)、四川省杰出青年科技基金项目“嵌入式软件功耗的建模方法研究”(批准号:2010JQ0011)、中国科学院计算技术研究所计算机体系结构国家重点实验室开放课题“嵌入式软件功耗的融合建模方法研究”(批准号:ICT-ARCH201003)、国家 863 计划项目“基于软/硬件划分的嵌入式系统低功耗设计关键技术研究”(批准号:2008AA01Z105)、“嵌入式构件的语义模型及其运行支撑技术的研究”(批准号:2007AA01Z131)、“嵌入式 Linux PDA 手机开发平台”(批准号:2003AAIZ2210)、国家“核高基”重大专项“基于国产软硬件的数字电视终端解决方案及样机研制”(批准号:2012ZX01033-001-003)、“数字电视嵌入式软件平台及产业化”(批准号:2009ZX01039-003-001-002)等项目对本书研究的资助与支持。

绿色计算是一门非常年轻的技术,仍处于快速发展时期,对许多问题作者仍未深入研究,一些有价值的新内容也来不及收入本书。由于作者知识水平有限,书中疏漏之处在所难免,希望各位专家、教授和读者批评指正。

郭 兵

于四川大学计算机学院(软件学院)

2012 年 10 月

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 绿色计算的背景	1
1.2 绿色计算的发展与现状	9
1.2.1 工业界的发展与现状	9
1.2.2 学术界的发展与现状	15
1.3 绿色计算的定义	20
1.4 绿色计算的研究内容	22
1.5 本书的主要工作	28
1.6 本书的组织结构	29
1.7 小结	30
参考文献	30
第 2 章 嵌入式系统的低功耗设计	34
2.1 引言	34
2.2 嵌入式系统的组成	37
2.3 嵌入式系统低功耗设计的软/硬件层次划分	38
2.4 嵌入式系统的系统层低功耗设计技术	42
2.5 嵌入式系统的硬件层低功耗设计技术	48
2.5.1 电路级功耗优化	48
2.5.2 逻辑级功耗优化	51
2.5.3 微结构级功耗优化	53
2.6 嵌入式系统硬件低功耗设计技术的应用	55
2.7 嵌入式系统的电池技术	58
2.8 功耗优化的相关工具	61
2.9 小结	62
参考文献	63
第 3 章 嵌入式软件的能耗优化与评价	66
3.1 引言	66
3.1.1 嵌入式软件能耗优化研究的背景	66

3.1.2	嵌入式软件能耗优化研究的现状	68
3.2	嵌入式软件能耗的测量方法	69
3.2.1	ARM 指令集寻址特征分析	70
3.2.2	ARM 指令周期数的计算	71
3.2.3	ARM 指令能耗层次分类测量	72
3.2.4	仿真实验与分析	74
3.3	嵌入式软件能耗的测量工具	76
3.3.1	嵌入式软件能耗的统计模型	76
3.3.2	指令周期数的计算方法	78
3.3.3	软件能耗仿真器 HMSim	80
3.3.4	仿真实验与分析	83
3.4	源程序结构级软件能耗建模与优化	85
3.4.1	源程序结构级软件能耗模型	85
3.4.2	源程序结构级软件能耗优化方法	93
3.4.3	仿真实验与分析	94
3.5	算法级软件能耗建模与优化	96
3.5.1	算法级软件能耗模型	96
3.5.2	算法特征量的度量	97
3.5.3	算法级软件能耗优化方法	99
3.5.4	基于 BP 神经网络的软件功耗函数拟合方法	100
3.5.5	仿真实验与分析	102
3.6	软件体系结构级软件能耗建模与优化	104
3.6.1	体系结构级软件能耗模型	104
3.6.2	软件体系结构特征量的度量	105
3.6.3	体系结构级软件能耗优化方法	109
3.6.4	BP 神经网络非线性拟合方法	111
3.6.5	仿真实验与分析	112
3.7	软件能耗融合模型	115
3.7.1	融合模型的建立	115
3.7.2	CPI 的度量	115
3.7.3	融合模型的线性拟合方法	116
3.7.4	仿真实验与分析	117
3.8	低功耗编译技术	119
3.8.1	运算型功耗优化技术	119
3.8.2	存储型功耗优化技术	125

3.9 软件能耗属性与其他质量属性的关系	128
3.10 软件能耗优化方法的评价	130
3.10.1 层次灰色评价模型	131
3.10.2 仿真实验与分析	134
3.11 小结	136
参考文献	137
第4章 高性能的可定制异构多核体系结构	140
4.1 引言	140
4.2 高性能的可定制异构多核体系结构的研究现状	140
4.2.1 多核计算加速比及其能耗	140
4.2.2 异构多核系统概述	142
4.3 面向能耗相关软/硬件划分的层次化控制数据流图建模	144
4.3.1 背景介绍	144
4.3.2 PO-HCDFG 的形式化描述	145
4.3.3 PO-HCDFG 的主要内容	146
4.3.4 仿真实验与分析	151
4.4 基于离散 Hopfield 神经网络的 RTOS 功耗优化	153
4.4.1 背景介绍	153
4.4.2 RTOS-Power 划分问题的描述	155
4.4.3 一种离散 Hopfield 神经网络方法	157
4.4.4 仿真实验与分析	159
4.5 NoC 协议能耗分析	163
4.5.1 背景介绍	163
4.5.2 NoC 协议栈及协议能耗的描述	164
4.5.3 NoC 物理层协议的能耗分析	166
4.5.4 基于位置概率分布的目录协议能耗模型	168
4.5.5 仿真实验与分析	170
4.5.6 NoC 协议能耗的进一步讨论	174
4.6 智能移动终端的异构多核结构与软/硬件划分方法	174
4.6.1 C-Core 技术	175
4.6.2 GreenDroid 技术	181
4.7 小结	185
参考文献	185
第5章 低能耗的嵌入式操作系统	189
5.1 引言	189

5.2	实时任务调度	191
5.2.1	实时任务调度算法	193
5.2.2	低能耗调度算法的问题难度和硬件制约	196
5.2.3	最优低能耗调度定理及其证明	198
5.2.4	影响实时调度算法产生能耗的因素	200
5.2.5	基于 DVS 的低能耗任务调度算法	205
5.3	操作系统的功耗管理架构	209
5.3.1	功耗管理架构概述	209
5.3.2	常见的功耗管理架构	210
5.3.3	面向嵌入式系统的结构化统一功耗管理架构	214
5.4	嵌入式 Linux 的节能子系统 CPUFreq	218
5.4.1	CPUFreq 的由来	218
5.4.2	CPUFreq 的设计和使用	219
5.4.3	ondemand governor 的来源及实现	222
5.5	小结	224
	参考文献	224
第 6 章	Internet 的动态能耗优化	226
6.1	引言	226
6.2	Internet 的能耗特性	227
6.2.1	功耗与负载	227
6.2.2	功耗与配置	228
6.2.3	功耗的评价指标	229
6.3	Internet 的低能耗技术分类	230
6.4	节点的动态能耗优化	231
6.4.1	ALR 技术	232
6.4.2	Sleeping 技术	233
6.4.3	ALR 技术与 Sleeping 技术的比较	234
6.5	节点间协同的动态能耗优化	235
6.5.1	单层网络能耗优化	236
6.5.2	多层网络能耗优化	238
6.5.3	节点间协同的动态能耗优化技术面临的挑战	239
6.6	面向 IP over TDM over DWDM 的多层网络能耗优化	240
6.6.1	网络模型及节能机制	240
6.6.2	多层网络能耗优化建模	243
6.6.3	仿真实验与分析	248

6.7 小结	253
参考文献	254
第7章 绿色软件工程	258
7.1 引言	258
7.2 绿色软件及绿色软件工程	259
7.2.1 绿色软件	259
7.2.2 绿色软件工程	261
7.3 绿色软件工程过程模型	261
7.3.1 Shenoy 绿色软件工程过程模型	262
7.3.2 GREENSOFT 参考模型	264
7.4 绿色软件的需求工程	266
7.5 绿色软件的系统设计	267
7.5.1 HS/HA 并行软件架构	268
7.5.2 功率感知软件架构	268
7.6 绿色软件的设计、构造与编译技术	270
7.7 绿色软件的测试、评价与验证	274
7.7.1 绿色软件的测试	274
7.7.2 绿色软件的评价与验证	275
7.8 绿色软件的部署与开发运行保障工具	276
7.8.1 绿色软件的部署	276
7.8.2 绿色软件开发与运行保障的集成与验证平台	279
7.9 小结	279
参考文献	280
第8章 移动云计算的绿色设计	283
8.1 引言	283
8.2 智能移动终端的协同节能设计	285
8.2.1 智能手机硬件体系结构及节能设计	287
8.2.2 智能手机软件体系结构及节能设计	296
8.3 无线通信网络的绿色设计	298
8.3.1 基于 proxy 的移动设备节能技术	299
8.3.2 基于云计算的移动设备节能技术	299
8.4 “云端”的资源管理	300
8.4.1 数据存储体系结构	301
8.4.2 数据资源管理	303
8.5 “云端”与“终端”的虚拟化技术	317

8.5.1 “云端”的虚拟化技术	317
8.5.2 “终端”的虚拟化技术	322
8.6 “云端”的并行任务调度算法及编程模型	324
8.7 数据中心的制冷系统和电力系统	327
8.8 小结	330
参考文献	330
第9章 物联网的绿色设计	333
9.1 引言	333
9.2 无线传感器网络能量管理策略	335
9.2.1 无线传感器网络能量管理概述	335
9.2.2 无线传感器网络节点级能耗分析和管理	336
9.2.3 无线传感器网络网络级能耗管理	340
9.3 无线传感器网络节能动态任务分配	341
9.3.1 问题描述	341
9.3.2 节能动态任务分配算法	344
9.3.3 仿真实验与分析	346
9.4 基于预测的无线传感器网络动态功耗管理	347
9.4.1 动态功耗管理引言	347
9.4.2 传感器节点的状态模型	348
9.4.3 基于灰色模型的动态功耗管理算法设计	352
9.4.4 仿真实验与分析	354
9.5 无线传感器网络能量有效的簇头选择	357
9.5.1 簇头选择引言	357
9.5.2 基于模糊逻辑的簇头选择	360
9.5.3 仿真实验与分析	364
9.6 小结	366
参考文献	366

第 1 章 绪 论

1.1 绿色计算的背景

根据美国 In-stat 公司的市场调查,截至 2011 年年底,全世界各种计算机系统(包括通用的台式机系统、专用的嵌入式计算机系统和大型的服务器系统)的保有量超过了 70 亿台,且数量继续呈快速增长的势头,其中在用的 PC 机已经超过 10 亿台,预计到 2015 年时还将翻倍。在正常工作状态下,当前主流配置的 PC 机功率大致在 200W 左右,嵌入式计算机系统(简称嵌入式系统)的平均功率为 30W 左右,一天按 10h 工作时间计算,那么 70 亿台计算机(按 10 亿台台式机和 60 亿台嵌入式系统保守计算)一天消耗的电力平均为 38 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$,相当于三峡年发电量 847 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 的 4.49%。如果按 1 度($\text{kW} \cdot \text{h}$)电收费 0.5 元人民币计算的话,全球计算机用户一年要交纳的电费为 6935 亿元人民币^[1]。

随着“云计算(cloud computing)”模式逐渐得到全球市场的认可,针对服务器系统的能源消耗情况,IDC 公司最近对数据中心(data center)服务器的调查结果显示,当前国内外正在使用的大量 X86 服务器或 Non-X86 Unix 服务器,平均功率为 1000W 左右,目前数据中心的能耗成本约占总运营成本的 50%,其中有近 50%为冷却设备所消耗。由于数据中心大容量、高强度地使用各种服务器及其配套设备,提供各种关键的“7×24”数据计算和存储服务,使得单台服务器每天消耗的电力能源远高于台式机系统和嵌入式系统,而数据中心真正的耗能大户是 UPS 电源、配电系统、制冷系统等配套设施。虽然服务器系统绝对数量相对较小,但数据中心用户也面临能源消耗日益严重的问题。到 2012 年,美国各类服务器的数量达到 2000 万台,一年所需电费将超过 157.68 亿美元,其中还不包括配套空调所需的电力。以 Google 公司为例,根据爱迪生电气协会(Edison Electric Institute)的数据,截至 2010 年年底,Google 公司耗电 23 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$,相当于 20.7 万户美国家庭一年的用电量。如果按每度电 0.09 美元计算的话,Google 公司每年交纳的电费就达到 2.07 亿美元。同时,IDC 的研究表明,服务器增加的同时,配套用电量将会呈指数级上升。在机房设计布局不合理的情况下,冷却部分所占用的能耗比例将更高。

2010 年 5 月,命名为“星云(Nebulae)”的超级计算机,由中国厂商曙光(Dawning Information Industry)的 TC3600 刀锋服务器所组成,是第三套打破全球千兆

次浮点运算速度纪录的系统,在当时全球前五百超级计算机排行榜(Top 500 Supercomputers Rank)上排名第二。该机采用 Intel 的 X5650 处理器,搭配 NVIDIA 的 Tesla C2050 绘图处理器作为加速器。Intel 与 NVIDIA 最新款处理器的结合,是让该系统具有优异效能的主要因素。而 NVIDIA 绘图处理器省电表现也较佳,配备了 4640 颗 Tesla 芯片的“星云”功耗为 6.32MW。根据最新资料,目前全球前五百大超级计算机的平均功耗为 397kW,平均电源效率则为 195MFLOPs/W,较一年前的 150MFLOPs/W 改善不少。

通常,人们一般认为 ICT 产业是一种科技含量高、资源和能源消耗低、环境污染小的绿色产业。但是,根据 Gartner 公司 2007 年一份名为《绿色 IT:新一波产业冲击》的报告^[2],计算机和通信设备每年碳排放量约占全球碳排放量的 2%。而随着信息科技应用日益深入,按行业划分,整个 ICT 行业是全球第五大耗能行业,与航空业的耗能水平大体相当,这个数字仍在迅速上升。Gartner 公司就用户电脑耗费的电能和服务器搜索一次的耗能进行计算,形象地指出:我们每 Google 一次,耗能相当于烧开半壶水。据统计 2010 年美国计算机系统的电力消耗占到全部电力消耗的 2%,而据我国发改委发布的 2010 年各行业耗电量,IT 产业的耗电量位居第五位,是能耗增长最为迅速的产业之一。产生的这些电力消耗,一方面用户需要承担高昂的电费支出,另一方面也严重地影响到城市的能源分配。计算机系统的广泛使用除消耗大量的电力能源外,对环境还将产生下列不利影响^[3]:

(1) 大气影响堪忧。除了计算机系统散热对大气的影响外,生产计算机系统所需能源带来的大气污染更令人担忧,这些污染物将会对城市大气造成严重的破坏,而弥补这些破坏则需要付出更多的人力和资金成本。目前我国的电力供应仍主要依赖于火电厂,而火电厂工业锅炉燃烧产生的污染物是破坏大气的主要因素之一。环境专家估算,如果采用燃煤发电,生产 1 度电需要消耗 0.4kg 标准煤、4L 净水,并产生 0.272kg 粉尘、0.997kg 二氧化碳和 0.03kg 二氧化硫的排放。2011 年我国计算机、彩电和手机分别达到了 3.2 亿台、1.2 亿台和 11.3 亿部,均列世界第一,以我国 2011 年拥有 PC 机数量 3.2 亿台来计算,每台 PC 机每天工作 10h,一年将耗电 2336 亿 kW·h,相应需要消耗 934.4 亿 kg 标准煤、9344 亿 L 净水,并产生 635.39 亿 kg 粉尘、2328.99 亿 kg 二氧化碳和 70.08 亿 kg 二氧化硫的排放。如果按照目前国际碳交易市场价每年 30 欧元/t,中国 PC 机用户每年将缴纳 2.1 亿欧元碳排放税。因此,计算机系统不但同 Internet 网络相连,而且同电力网络紧密相连,其运行产生了严重的环境影响,如图 1.1 所示。

(2) 建筑资源消耗。计算机系统对建筑资源的分配有一定影响,计算机系统及其配套设施所占空间不断膨胀,使得企业和机构的办公和机房面积也被迫不断加大。目前有 10%的企业和机构不得不升级其电力和空调设施,这将带来更大的办公面积需求,另外还有 41%的企业和机构在三年内将面临同样的问题。

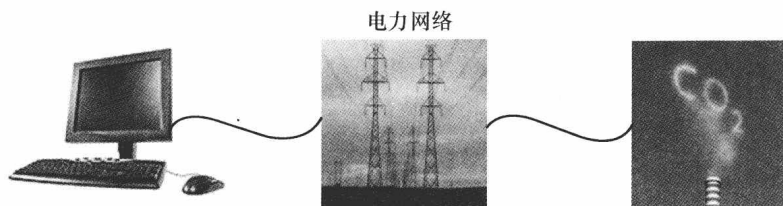


图 1.1 计算机系统广泛使用产生的一些负面环境影响

(3) 维护成本巨大。企业拥有计算机系统的数量不断加大,随之带来的是高昂的维护成本。同时,计算机系统数量的增加,使得企业的系统软件许可证费用和应用软件开发费用也不断增加。

(4) 人力资源浪费。计算机系统的增加导致企业需要雇用更多的技术人员开发、维护和保养这些设备。

(5) 回收再利用成本高,循环机制亟待构建。目前计算机系统设备中都采用了一些有毒材料(如电路板中的铅和镉、CRT 中的氧化铅和钡、开关和平板屏幕中的水银以及印刷电路板和线缆中经过溴化处理的阻燃剂)和一些难以降解的材料(如塑料部件),这些材料提高了报废设备的回收再利用成本,并增大了环境污染的风险。Gartner 公司在 2007 年的一份报告中指出,全球今后每年将有超过 1.8 亿台 PC 机“退役”,但其中 20% 的电脑将会被直接送往垃圾站填埋,这将造成严重的环境破坏^[1]。Gartner 公司统计 2010 年全球 PC 出货量 3.766 亿台,开支将达 2454 亿美元。更新频率为 3 年,全球每年将遗弃至少 2 亿台 PC 机,损失 2000 亿美元。此外,国际绿色和平组织 2005 年进行的一次调查中发现,美国大多数被回收再生利用的计算机被非法送往中国和印度等发展中国家的分解场,从而导致这些国家的环境遭到污染。中国电信行业 2009 年用户数达到 7.26 亿户,每月 800 万速率增加新用户。更换手机的频率为 8~12 个月,而中国废旧手机的回收率仅为 1%。由此,中国每年将遗弃高达 7 亿部手机,或者扔掉至少 3500 亿元/年(每部手机平均价格 500 元计)。随着欧盟计算机环保标准在 2008 年夏季生效以及美国越来越多的州开始通过环保法规,制造商和用户将面临对减少有毒物质和回收再利用的强制性要求,无形中加大了 IT 产品的使用成本,将彻底地改变 IT 产品的设计理念。

(6) 不可自循环性和在线演化能力。硬件方面,在摩尔定律驱动下每年有数以千万计的“落伍”处理器连同其所附的计算系统被抛弃等待“销毁”,而不是通过自适应自演化出新结构来自循环再利用;软件方面,地球上每时每刻有千百万的人在写永远不会“重用”的代码,而硬件的换代也加速了“软件”的死亡,因为不能自适应地演化以适应新硬件结构和新需求从而不能自循环再利用。如果我们思考硬件和软件“生产”中对地球资源的高昂“消耗”,有必要设计可循环的绿色计算(green