



国际信息工程先进技术译丛

WILEY

绿色网络

Green Networking

(法) Francine Krief 编著
赵军辉 艾渤 孙韶辉 徐晓东 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国际信息工程先进技术译丛

绿 色 网 络

(法) Francine Krief 编著
赵军辉 艾渤 孙韶辉 徐晓东 译



机 械 工 业 出 版 社

本书深入浅出地介绍了绿色网络方面的内容,包括绿色网络的概念、模型、技术和协议。全书共分为9章,分别讨论了网络基础设施的环境影响、绿色有线网络、绿色移动网络、绿色网络技术、认知无线网络、自主绿色网络、绿色终端,并结合实际对绿色网络在工业领域中的应用进行了探索分析。本书概念明确、思路清晰、全面实用,可以使读者能够在较短时间内掌握绿色网络的知识体系。本书包含了大量最新的参考文献,呈现了绿色网络领域的最新进展,是该领域学生、研究者、工程师们的最佳参考资料。

Green Networking/By Francine Krief. ISBN: 978-1-119-99321-6

Copyright© ISTE Ltd 2012

All Rights Reserved. This translation published license. Authorised translation from the English language edition published by John Wiley & Sons Limited. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyright holder.

本书原版由 Wiley 公司出版,并经授权翻译出版,版权所有,侵权必究。本书中文简体翻译出版授权机械工业出版社独家出版,未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

本书封面贴有 Wiley 公司的防伪标签,无标签者不得销售。

图字 01-2013-2591

图书在版编目(CIP)数据

绿色网络/(法)克里芙编著;赵军辉等译. —北京:
机械工业出版社, 2013. 9

(国际信息工程先进技术译丛)

书名原文: Green Networking

ISBN 978-7-111-43139-8

I. ①绿… II. ①克…②赵… III. ①互联网络-基
本知识 IV. ①TP393.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 145859 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
策划编辑:朱林 责任编辑:朱林 版式设计:霍永明
责任校对:佟瑞鑫 封面设计:赵颖喆 责任印制:乔宇
北京铭成印刷有限公司印刷
2013 年 8 月第 1 版第 1 次印刷
169mm×239mm·10 印张·199 千字
标准书号:ISBN 978-7-111-43139-8
定价:48.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066 教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294 机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

译者序

近年来地球面临的环境问题愈发严峻,节能、降耗、减排已成为大势所趋。虽然与其他行业相比,通信业的能耗并不是最严重的,但这并不意味着通信行业就能对此无动于衷。通信网络的正常工作需要大量的通信设备,比如基站、终端设备、传输线路、动力系统和机房等,其数量随着网络规模的扩大而成倍增加,其能耗问题将变得越来越严重。

因此,在能源日益紧缺的今天,如何节能减排、降低能耗成为通信行业的研究热点。将环境共生与可持续发展的思想理念融入到通信网络中,就产生了“绿色网络”这一概念。这一概念的本质就是“以人为本”,在绿色环保生态的基础上追求高品质的通信环境,是一种在整个通信产业链中综合考虑环境影响和资源利用的现代化产业模式。

本书阐述的重点是当前绿色网络领域的关键技术、应用工具、处理算法等。主要包括绿色节能网络(绿色有线网络、绿色移动网络),自适应网络(认知无线网络、绿色自主网络),绿色终端以及绿色网络在工业应用中的研究(智慧城市等)。这种简明的编排方式,既有利于读者全面掌握绿色网络领域的相关知识,也有助于读者清晰地把握绿色网络/绿色通信未来的发展趋势。

翻译本书的目的就是通过介绍绿色网络领域的最新研究成果以及未来发展方向以引导我国读者了解并深入研究此领域方面的知识。全书概念清晰、内容丰富、层次简明,既涉及一定的理论基础,又提供了很多最新的工程技术知识,对广大的研究者和工程师们具有很好的参考价值。

在本书的翻译过程中,北京交通大学赵军辉副教授负责前言和第1~5章的翻译以及全书的统稿工作,北京交通大学艾渤教授负责第6、7章的翻译,大唐移动无线创新技术中心总工孙韶辉博士负责第8章的翻译,中国移动通信研究院的徐晓东博士负责第9章的翻译。北京交通大学钟章队教授对书稿进行了校对。同时为本书提供翻译帮助的还有刘旭、曾龙基、杨涛、杜家娇、潘思悦、张浩、王娇、付雷、芮静,在此一并表示感谢!

本书的翻译得到了国家自然科学基金(61172073)、中央高校基本科研业务

费专项资金(北京交通大学,2013JBZ001)、教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-12-0766)和轨道交通控制与安全国家重点实验室(北京交通大学)自主研究课题(RCS2011ZT003)的资助。此外,由于译者水平有限,加之时间仓促,译文中难免存在不妥之处,敬请读者不吝指正。

赵军辉
北京交通大学

作者中文版序

本书着眼于绿色网络这一新的研究范式，这是当前网络领域的工程师、学者、研究员和工业界人士等的重要研究课题。事实上，由于能源成本不断增加，减少全球 CO₂ 排放量以保护环境的需求不断增强，减轻通信基础设施对环境的影响至关重要。

本书介绍了绿色网络领域的最新研究进展以及未来发展方向，包括绿色节能网络(绿色有线网络、绿色无线网络、绿色移动网络)、自适应网络(认知无线网络、绿色自主网络)，以及绿色终端和绿色网络在工业应用中的探索(智慧城市等)。

二十多位从事绿色网络领域的研究员和工程师们参与了该书的编写工作，该书的首次出版是以英文和法文形式。现在该书已译为中文，显示了绿色网络这一研究领域的影响力。我非常感谢机械工业出版社将该书引入中国，并很荣幸地被译成中文。最后，对于赵军辉博士的辛勤工作，我致以深深的谢意。

弗朗辛·克里芙
波尔多综合理工学院
于法国

前 言

在人类的生活中信息与通信技术 (Information and Communication Technology, ICT) 逐渐变得无处不在, 人们对 ICT 的直观印象则基本是其对生产力与人类福祉的巨大贡献。然而随着降低二氧化碳 (CO_2) 排放量以保护环境的需求逐渐增大, 能源成本的持续增高, ICT 技术中的碳足迹 (能源消耗) 成为焦点问题。今天, ICT 的能耗大概占据全球 2% 的温室气体排放量 (等同于全球民航业的排放量); 在重工业发达的国家中, 这一数据则高达 10%。此外, ICT 能耗正以每年 15% ~ 20% 的速度增长。大量新的 ICT 应用, 如 HDTV (高清电视)、无处不在的网络覆盖、3G/3G + 流量的增加、即将到来的 4G/LTE 网络, 都暗示了 ICT 的能耗在短期内是不可能下降的。

然而以目前的情况看来, 能量使用效率远没有达到最优化。通信网络通常是庞大而复杂的, 而且存在相当的设计冗余。即使系统未处于高负荷状态或者根本没有工作时, 大量的网络设施仍消耗了相当的能量, 比如说蜂窝网络中基站在某些空闲时段消耗的能量。

绿色网络是一个新萌生的理念。这一概念包含了所有用来减少 ICT 过程中温室气体排放的方法和措施。

本书的目的旨在概述所有用来提高网络能量效率和限制碳足迹的机制与方法。其中的有些方案已经得到应用——尤其是在移动网络中; 其他的则需要进一步研究。最后, 本书提出了一些对未来研究与可行方向的建议。

本书是最早讨论绿色网络领域研究现状与进展的著作之一, 共包括三大部分, 9 章内容。

第 1 章介绍 ICT 电力节能中的问题, 尤其是电信基础设施的节能。因为它们 CO_2 排放量正愈加增大。

接下来的部分 (第 2 ~ 4 章) 探讨了通信网络中的能量效率, 其中每一章分别介绍一种特定的技术。它们共同组成了本书的第一部分, 称为“迈向绿色网络”。

第 2 章研究了有线网络中的能耗增益。有线网络是指网络已设计完成并且基础设施固定。这些通信网络常常是庞大复杂并且高冗余的。因此, 在其上节能的潜力是巨大的。这一章给出了多种优化能耗的策略——特别是高效节能的绿色路由策略。有线通信链路的能耗模型相对容易, 而无线网络则不是如此, 因为射频信号的处理是十分耗能的。此外在电信行业各种各样的主体中, 移动网络运营商是如今主

要的能量消耗者。

第3章讨论了移动网络的环境影响与减少它们能耗的必要性。鉴于无线接入网络是最耗能的,本章主要讨论了用来减少无线接入网络能耗的方法。接着引出另外两项用来减少温室气体排放的优化利器:第一个着眼于移动网络的工程建设方面;第二个则与移动网络的组件和架构有关。

第4章首先引入了Internet存储器数据中心的能耗量,并强调了数据中心的计算能力和使用量。然后关注低能耗接入网络,可以看到两个节能的解决方案:微微蜂窝基站和网格网络。最后,本章强调了虚拟化技术,该技术有利于达到更好的网络复用,减少不必要的硬件资源需求。

接下来3章的主要内容是提高网络效益。它们组成了本书的第二部分,名为“迈向智能绿色网络和可持续终端”。随着新科技带来成倍的用户增加,收益也会更大。

第5章讨论了用于应对无线频谱资源匮乏的新生无线通信概念——认知无线网络。由于其灵活性和能够自适应调整通信参数,认知无线电技术可以使无线设备更加节能。本章提出了几项未来可能的研究方向。

第6章将自主网络的概念应用于绿色网络。这样虽然外界条件是变化的,但绿色网络具有了自组织和自适应的高效操作。首先,引入4个自主功能:自我配置、自我优化、自我保护和自我修复。随后分别描述和举例它们对绿色网络的贡献,并举出了两个特定的例子:能量受限的无线传感器网络和有助于减少温室气体排放的智能电网。

第7章研究了通信终端生命周期对环境的影响。这种影响,虽然远比其他工业影响小,但考虑到移动电话与智能手机的高换代率,它们导致的资源浪费是无法忽视的。此外,未来必将是一个更加环境友好的数字社会,我们必须减少电子产品带来的环境影响,因为电子产品将在未来社会中占据重要位置。如果产品的生命期延长,那么这种负面影响将大大减小。本章提出了一个有趣的改善途径:设计一种可以重置的硬件系统以此来延长它们的生命期。如今,幸而有回收率较高的可重置硬件电路的发明,这一方法变得简单易行。

本书的最后一部分名为“绿色网络工业应用的研究项目”,主要包括两章。前一章由电信运营商撰写,后二章由一个专精于ITC产品与系统的团队撰写。

在与全球变暖的斗争中,移动运营商一直在寻找降低他们设备能耗的办法。当然,能耗的减少必须以不影响QoS为基本前提。

第8章描述了关于基站睡眠模式机制的研究项目,以及此时基站对整个移动网络能耗的影响。这是能够显著减少能耗的方法之一。在通信网络的发展过程中,睡眠模式应用广泛。如传统的蜂窝网络和由小区组成的异构网络。睡眠模式能在某些情况下获得显著的能效增益,但对QoS会有一定的影响。

智慧城市可以看做是绿色网络在工业中的实际应用。

第9章提出了智慧城市的概念，这一概念要求研发新一代具有强烈绿色环保意识的城市基础设施。未来，大量的设备将会相互连接——传感器、触发器、摄像机、基站、数据中心、指挥中心、用户智能终端等。这些设备必须使用高效节能技术。这一章概述了有助于减少设备能耗的不同策略：低功耗通信协议、无线传感器网络、低能耗处理器、传感器网络在节能政策制定中的应用。本章以一个使用这些方案来达到能源管理的实例结尾。

有关绿色网络的问题是如今网络研究的核心问题，也是我们亟待解决的问题。我们仍需要做大量的工作以减少协议、通信网络和网络设备的能耗，同时不影响 QoS。

碳足迹将是 ICT 研究与开发工程师持续关注的焦点。通过限制不合理的能耗行为，优化我们住房与城市的能量使用效率，ICT 在节能的同时对全球 CO₂ 的减排做出了贡献。

目 录

译者序

作者中文版序

前言

第 1 章 网络基础设施的环境影响	1
1.1 引言	1
1.2 定义与度量	3
1.3 有线网络节点能耗状态	4
1.4 学术界和工业界的倡议	5
1.5 未来发展的视角和启示	6
1.6 参考文献	7
第一部分 迈向绿色网络	9
第 2 章 迈向绿色有线网络	9
2.1 引言	9
2.2 能量消耗模型	10
2.3 节能方案	13
2.3.1 传输层协议及应用	13
2.3.2 通信链路	15
2.4 节能路由问题	17
2.4.1 能量消耗模型	17
2.4.2 问题的形式化	18
2.4.3 实验结果	20
2.5 小结	25
2.6 参考文献	26
第 3 章 迈向绿色移动网络	33
3.1 引言	33
3.1.1 蜂窝无线网络的趋势：降低能耗	33
3.1.2 绿色蜂窝网络的定义和需求	33
3.2 绿色通信网络的进程和协议	35
3.2.1 无线接口技术	35
3.2.2 自适应通信量的网络行为	36

3.2.3 基于延迟的通信量聚合	37
3.2.4 存储、传输和中继转发	37
3.2.5 MS 与 BTS 的组合优化	37
3.2.6 能源优化切换	37
3.2.7 基站间协同	38
3.2.8 无线接入网容量和网络核心节点的增加	39
3.3 绿色网络工程架构	39
3.3.1 中继和多跳	39
3.3.2 自组织网络	40
3.3.3 网络规划	40
3.3.4 微小区与多接入模式网络	41
3.3.5 全 IP 和扁平化架构	42
3.3.6 智能天线——减少基站数量	42
3.3.7 基站间协作	42
3.4 绿色网络的组成与结构	43
3.4.1 低功耗放大器	44
3.4.2 消除馈线和光纤网络	44
3.4.3 太阳能和风能	44
3.4.4 双收发机技术	45
3.4.5 冷却技术	45
3.5 小结	45
3.6 参考文献	45
第4章 绿色通信网络	49
4.1 引言	49
4.2 数据中心	50
4.3 无线通信网络	51
4.4 陆地通信网络	55
4.5 低功耗绿色网络	58
4.6 虚拟化在“绿色”技术中的角色	60
4.7 小结	61
4.8 参考文献	62
第二部分 迈向智能绿色网络和可持续终端	63
第5章 绿色通信网络中的认知无线电	63
5.1 引言	63
5.2 认知无线电：概念和标准	64

5.2.1 标准化的发展	65
5.2.2 研究项目和成果	66
5.3 认知无线电中的各种“绿色通信”定义	67
5.3.1 减少无线电频谱污染	67
5.3.2 减少个人暴露	67
5.3.3 减少设备能耗	68
5.4 认知无线电中的“清洁”方案	68
5.4.1 频谱和健康的解决方案	68
5.4.2 设备/设施层面的措施	69
5.4.3 通信参数的优化	70
5.4.4 未来研究途径及展望	71
5.5 应用案例：“智能建筑”	73
5.6 小结	74
5.7 参考文献	75
第6章 自主绿色网络	76
6.1 引言	76
6.2 自主网络	76
6.3 自我配置	77
6.3.1 绿色网络中自我配置的重要性	77
6.4 自我优化	78
6.4.1 绿色网络的自我优化	79
6.5 自我保护	81
6.5.1 管理政策保护	81
6.5.2 能源来源保护	83
6.5.3 通信保护	85
6.6 自我修复	86
6.6.1 无线传感器网络的应用	87
6.6.2 智能电网中的应用	88
6.7 小结	89
6.8 参考文献	89
第7章 可重构的绿色终端：迈向可持续电子设备	95
7.1 可持续电子设备	95
7.2 电子产品对环境的影响	97
7.2.1 电子产品的生命周期	97
7.2.2 微电子制造	99

7.2.3 电子产品的使用	102
7.2.4 电子废物	103
7.3 减量,再利用,再循环和重构	103
7.3.1 减量,再利用,再循环	103
7.3.2 基于FPGA的重构	105
7.4 可重构终端举例	109
7.5 小结	112
7.6 参考文献	112
第三部分 绿色网络工业应用的研究项目	118
第8章 移动网络基站睡眠模式:介绍及评价	118
8.1 动力	118
8.2 把宏小区基站置于睡眠模式	118
8.2.1 基站收发器的结构	118
8.2.2 BTS的能耗模型	119
8.2.3 将基站置于睡眠模式的准则	120
8.2.4 图解睡眠模式:2G/3G异构网络	120
8.2.5 睡眠模式的实施	122
8.3 微小区异构网络的睡眠模式	123
8.3.1 小型蜂窝小区的能量效率	124
8.3.2 将小型蜂窝基站置于睡眠模式	125
8.4 技术实施的总结和思考	126
8.5 参考文献	127
第9章 绿色网络之工业应用:智慧城市	129
9.1 简介	129
9.2 智慧城市和绿色网络	129
9.3 智慧城市相关技术	131
9.3.1 低功耗通信协议	131
9.3.2 无线传感器网络的应用	133
9.3.3 低能耗处理器	137
9.3.4 异类传感器的系统集成	143
9.4 小结	146
9.5 参考文献	147

第 1 章 网络基础设施的环境影响

1.1 引言

在过去的 10 年中，对于 ICT 成本的讨论已经愈演愈烈。这些讨论是由一系列问题引发的：生态、经济、政治和社会议题等。为减少 ICT 的碳排放，降低其增长速度，“绿色 IT”的概念应运而生。

ICT 的环境代价是一个热点问题，因为其争议性很大。值得注意的是 ICT 占用了全世界 10% 的电力以及 2% 的能耗，且这种趋势在加重。这种估计是保守的，预计 ICT 能耗在未来 10 年内将以 10% 的年增长率增长[EPA 07]。在法国，每年 ICT 的能耗大概在 55 ~ 60TW · h，相当于终端应用 13.5% 的能耗[TIC 08]。从经济角度来看，在法国，每 1kW · h 电力是 0.10 法郎，相当于每年花费 90 万法郎。而这些数据还只是直接耗电量，生产、运输和产品回收等消耗并没有计算在内。

如 GeSI(全球电子可持续发展协会)指出(见图 1.1)，这种持续性增长的势头是如此旺盛以至于到 2020 年 ICT 将会排放 1.43Gt 的 CO₂，这包括设备运转碳排放量 1.08Gt，设备生产、运输和回收碳排放量 0.35Gt。这将占到全球碳排放总量的 2.7% [GES]。

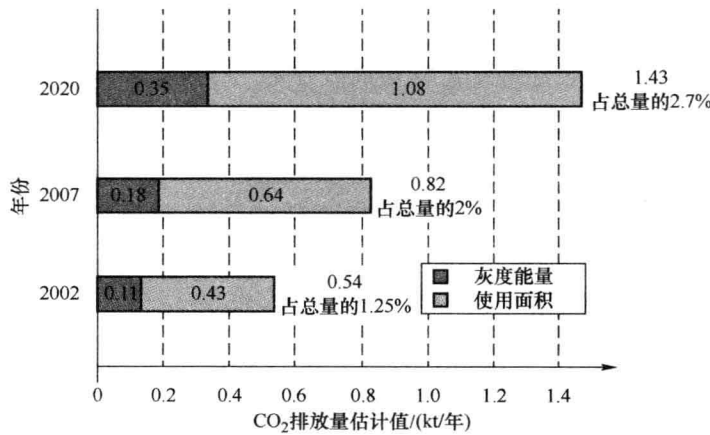


图 1.1 ICT 产业 CO₂排放量变化趋势：2002 ~ 2020 年[GESI]

建设可持续发展的 ICT 产业对人类而言非常重要。看似 ICT 问题与人们日常生活中减少 CO₂ 排放，能量消耗等并没有什么关联。但是每一次因特网连接，每一

次社交网络使用，每一次搜索引擎服务和每一次视频浏览都是有代价的——人们认识到这种代价是有益的，即为了减少以后的代价。因此使用 ICT 服务的人们是有责任的，而且必须成为未来改变的积极参与者。

在如今社会每天必不可少的强大工具和服务的背后，运行着庞大的负责处理和通信的基础设施：因特网和社交网络的跨国家跨平台服务、银行等系统分布着上百万个数据中心，很多时候它们构建成“云”；我们的通信网络包括有线技术和无线技术（光纤、铜线、卫星、Wi-Fi 和 GSM），文字、图像、视频不断涌向通信信道，其本质就是大量信息比特。如果因特网流量保持 60% 的年增长率，这其中大部分增长来源于娱乐活动（线上游戏、更高分辨率的音频/视频点播等），那么到 2025 年全球范围内将会有超过 400Tbit 的流量流动。

网络运营商是电子行业中最耗电的主体之一。在 2011 年，意大利电信(TEL)估计它的电力消耗占意大利总电力消耗的 1% (2008 年占 0.7%)。类似地，英国电信估算英国的网络运营商能耗占到 0.7% (2.3TW · h)，和日本 NTT 宣布的比例相似。这些数字包括了所有消耗电力的地方——从总部到网络基础设施以及配套的数据中心。其中 65% 的电力被网络消耗（座机和移动电话），而数据中心消耗了 10%。然而，这些数据并没有包含终端设备的电力消耗。在法国，一个由 IDATE(IDA) 开展的研究结果表明电信部门消耗的电力在 2012 年为 8.5TW · h (2008 年为 6.7TW · h)。这些消耗主要分布在基础设施（有线和无线网络：46%）、家庭用户 ADSL (24%)、有线及无线终端 (18%)。请注意在 2012 年法国所有家庭用户总耗能量约是 3.3TW · h。

由通信网络产生的 CO₂ 排放量正持续增长，如 GESI 的研究结果（见图 1.2）。宽带网络的影响开始增长（从 3% ~ 14%），移动网络虽然百分比增加相对较少（从 43% ~ 51%），但是其绝对排放量翻了一番，而外围基础设施则从 12% 增长到 20%。只有窄带网络未来的碳排放量预期会减少，这将为其他类型的网络减轻压力。IDATE 指出，欧洲每个移动手机用户要对每年 17kg 的 CO₂ 排放量负责，而座机和网络用户则需要对 44kg 的 CO₂ 排放量负责。

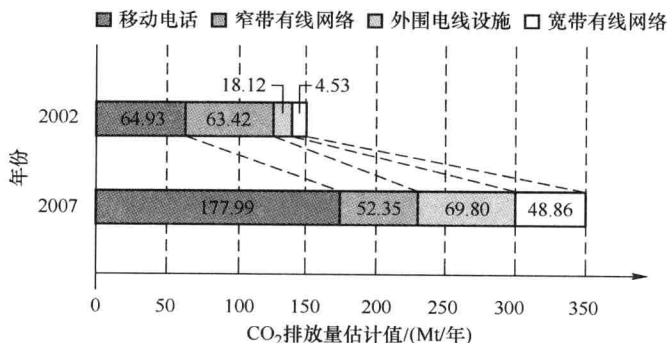


图 1.2 网络 CO₂ 排放量

1.2 定义与度量

能量消耗的计算是时间(以 s 为单位)乘以瞬时功率(以 W 为单位)。能量的表示方式是 $W \cdot s$ 或者 $J(1J = 1W \cdot s)$ 。从这个定义可以看出,减少能耗的方法是要么减少耗能时间(更快的运行速度),要么降低功率(提高部件的效率以及增加它们的用途)。

我们认为 ICT 设施(服务器、存储器、网络等)的耗能形式有两种:

——静态耗能:即仪器闲置时的能量消耗(如一个未进行数据传输的路由器、一个没有进行任何服务的服务器等)。

——动态耗能:机器运行时消耗的能量。

ICT 的基础设施由两部分组成:硬件与软件。因此当我们研究它们对环境的影响时,两方面都进行研究是必要的。进行测量、计算、分析时,有时需要分别考虑这两方面,而有时联合考虑则更方便。

为了比较软件和硬件基础设备,我们必须定义某种“尺度”——一个通用的对比度量标准:能耗便是这样的一个度量,但是它还不够明确细致。显然,我们必须考虑研究对象的特性,比如它是计算设施还是通信设施。

虽然已经提出了很多度量标准,但其仍在发展,这表明关于此项的研究仍处于婴儿期。

这里,我们将介绍几个已经提出的度量,但并不穷举。

——Flops/W:表示最高功率($1\text{Flops} = 1$ 次浮点运算/s),用每秒的浮点运算数表示。这种度量方法测量了机器的最大功率,对超级电脑和高性能计算很有用,如 Green500 系列[GRE a]。

——J/bit:表示处理每 bit 信息量所需的能量。这种度量方法可用于计算、存储和通信方面。因此,在网络设备中我们可以分别弄清楚每个部件处理和传输 1bit 信息所需要的能量。

——PUE(能量使用效率):代表了计算和信息处理设备的能效。这是注入数据中心的能量和机器使用能量的比值(这样排除了能量损耗、散热等因素)。现代数据中心的 PUE 在 1.1 ~ 2 之间。这种度量方法在测量机器功率时包括了计算、存储和通信各个模块的影响。

——CUE(碳使用效率):指 CO_2 排放量的影响。与前面的度量方法相比,CUE 考虑了数据中心使用能量的类型。该度量以每 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 多少 CO_2 (单位:kg)来计算。CUE 与其他几项度量不同,因为它考虑的是环境影响而不是电力消耗。类似地,如 WUE(水使用效率)和 ERE(能量复用效率)的度量方法让我们能够在环境方面对设备进行比较。请注意,直到现在,还没有度量方法综合考虑了设备的生产与回收。PUE、CUE、ERE 等度量是由 Green Grid 集团提出的[GRE b]。

在接下来的内容中，我们重点讨论互联网络上的基础设备。因此，我们常用的度量主要与能源本身以及信息比特的能量函数有关。

1.3 有线网络节点能耗状态

评估互联网络的能量消耗可不是一件轻松的事，我们必须协调一系列对网络中活动设备的瞬时功率的测量。测量这些功率就是一个挑战，测量的质量、准确性和测量频率取决于使用的测量仪器。然而，由一个外部测量仪器测得的整个设备的功率和分别测量各个模块测得的功率，有着不同的精度和质量。这两种测量方法在已有文献中都得到了探讨。

一个更难测量的任务是测量某次通信的能耗，因为我们必须考虑到很多设备能够同时处理多个数据流，资源分配影响到了能耗状态。

有关网络的能量消耗的研究比较少。在 2008 年，Asami 等人[ASA 08]以日本为对象，研究表明即使使用低能耗电子设备，2030 年时 IP 路由的能量消耗也将超过日本的电力生产总量。

在 2010 年，Zhang 等人[ZHA 10]研究了光纤网络。以 2009 年的数据作为基础，作者估计到 2017 年光纤网络的能量消耗将会增长 120%。

Bolla 等人[BOL 10]估计了意大利的有线网络在 2015 年~2020 年之间的能耗。结果如表 1.1 所示，17, 500, 000 家庭网络用户耗能占到了总能耗的 79% (1,947GW · h/年)。这项基础研究清晰地展示了最需要学术研究和培养节能意识的地方。

表 1.1 不同类型网络的能耗百分比

	每台机器的耗能/W	机器数量	占总耗能百分比(%)
家庭	10	17, 500, 000	79
存取网络	1, 280	27, 344	15
地铁/交通运输	6, 000	1, 750	<5
核心网	10, 000	175	<1

在 2008 年，Tucker 等人[TUC 08]计算了不同通信量级别下 (Mbit/s, Gbit/s, Tbit/s) IP 路由的能耗区别。他们推断出了一个公式，将以 W 为单位的能耗 (P) 和以 Mbit/s 为单位的链路容量 (C) 连接起来： $P = C^{2/3}$ 。一个 1Tbit/s 路由的能耗大概是 10000W，而一个 1Gbit/s 路由的能耗是 100W。因此，一个 1Gbit/s 的路由传输 1bit 需要 100nJ 的能量，而 1Tbit/s 的路由需要 10nJ 的能量。

在同样的研究中，该作者又研究分析了光纤路由器不同部件的耗能。这项研究与一篇有关光学开关的研究[TUC 07]重新被关注有关。我们注意到这两个研究都指出：

- 用于电力供能和冷却的能量占 35%；
- 用于控制层面 (主要用于路由表的刷新) 的能量占 10%；