

KEZAISHENG NENGYUAN GONGDIAN DE
SHUJU ZHONGXIN JIENENG FANGFA YANJIU

可再生能源供电的 数据中心节能方法研究

刘 慧 著

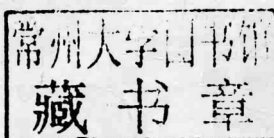


東北大學出版社
Northeastern University Press

可再生能源供电的数据中心 节能方法研究

Research on Energy Conservation of Renewable
Energy Hyper-powered Data Center

刘 慧 著



东北大学出版社

· 沈 阳 ·

© 刘 慧 2017

图书在版编目 (CIP) 数据

可再生能源供电的数据中心节能方法研究 / 刘慧著

— 沈阳 : 东北大学出版社, 2017.12

ISBN 978-7-5517-1748-9

I. ①可… II. ①刘… III. ①再生能源—供电—节能
—方法研究 IV. ①TK01②TM72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 316736 号

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路三号巷 11 号

邮编: 110819

电话: 024-83687331 (市场部) 83680267 (社务部)

传真: 024-83680180 (市场部) 83687332 (社务部)

网址: <http://www.neupress.com>

E-mail: neuph@neupress.com

印 刷 者: 沈阳航空发动机研究所印刷厂

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 170mm×240mm

印 张: 10.75

字 数: 211 千字

出版时间: 2017 年 12 月第 1 版

印刷时间: 2017 年 12 月第 1 次印刷

组稿编辑: 罗 鑫

责任编辑: 李 佳

责任校对: 木 子

封面设计: 潘正一

责任出版: 唐敏智

ISBN 978-7-5517-1748-9

定 价: 48.00 元

前言

preface

在大数据时代，人类社会的计算能力需求呈爆炸性增长。全球数据中心建设步伐明显加快，总量已超过300万个，耗电量占全球总耗电量的1.5%，其高能耗问题已引起社会各界的高度重视。数据中心定义为“多功能的建筑物，能容纳多个服务器以及通信设备。这些设备被放置在一起是因为它们具有对环境的相同要求以及物理安全的需求，并且这样放置便于维护”，而并不仅仅是“一些服务器的集合”。低碳节能的技术可实现数据中心能源效率最大化和环境影响最小化。其中，最重要的一点就是可再生能源的利用。

用于产生电能的一次能源可以分为可再生能源和非再生能源两大类。可再生能源包括太阳能、水力、风力、生物质能、波浪能、潮汐能、海洋温差能等。它们在自然界可以循环再生。在自然界中经过亿万年形成，短期内无法恢复，随着大规模开发利用储量越来越少且总有枯竭一天的能源称为非可再生能源，包括煤、石油、天然气、油页岩等。可再生能源产生的电能通常称为绿色电能，与之对应的非可再生能源产生的电能称为褐色电能或传统电能。绿色电能对环境没有污染，且若考虑环境成本，绿色电能价格低廉，因此，人们更倾向于使用绿色电能。

可再生能源的应用在实际生活中已经成为一个社会普遍关注的焦点。煤炭、石油、风能、水能、太阳能、核能、生物质能等能源虽然都可用于生产电能，但在对环境的影响（是否清洁）及持久性（是否可再生）两方面存在很大的差异。显然，使用可再生的清洁能源来生产电能是一种良好的方式，也符合国家的可持续发展观念，如我国内蒙古等地区广泛利用风能和太阳能。因此，可再生能源蕴含着很大的开发价值。本书将现有技术

及作者自身研究成果相结合，从体系结构、任务管理、热量管理、仿真平

台四个方面对可再生能源供电的数据中心节能方法进行全面深入的阐述，书中所述的节能方法均围绕提高可再生能源利用率这一目的。

本书首先综述了可再生能源供电的数据中心的现有研究和热点问题，随后介绍从支持可再生能源的云数据中心的体系结构、负载管理和热量管理。最后，本书描述了一个支持可再生能源数据中心的模拟软件CloudSimPer (Cloud Simulator Hybrid-powered by Renewable energy)。CloudSimPer在CloudSim基础之上进行增量扩展，在原系统的基础之上，支持自定义的可再生能源的供电模型，支持可再生能源的平稳期、波动期、低产能期，支持自定义的任务调度等功能，为相关科学研究提供仿真验证平台。

当前对可再生能源供电的数据中心节能研究，从对传统的风能、太阳能预测，到数据中心耗电模型与供电模型的匹配问题，以及热量管理问题，并未形成一个完整的、系统的研究。由于可再生能源间歇性、不稳定性和不可控性等特性，可再生能源的研究本身就存在一定的挑战。本书系统地对上述问题进行了研究，希望对今后该领域的研究能有借鉴意义。

通过阅读本书，读者能够更加深入地理解可再生能源和数据中心能效优化这一交叉领域的核心技术和学术前沿，帮助读者更加有效地构建绿色数据中心，或对已有的数据中心进行优化，以及开展可再生能源、计算机和绿色计算领域的交叉研究。

作 者

2017年9月

目 录

contents

第1章 绪 论	1
1.1 能耗问题	1
1.2 节能思路	2
1.3 研究内容	5
1.4 本书结构	7
1.5 本章小结	8
第2章 可再生能源供电的数据中心	9
2.1 产电与耗电模型	9
2.1.1 产电模型	10
2.1.2 耗电模型	15
2.2 能源管理	16
2.2.1 容量规划	17
2.2.2 功率控制	20
2.3 负载均衡	22
2.3.1 时间负载均衡	23
2.3.2 空间负载均衡	26
2.4 本章小节	31
第3章 RepCloud: 支持可再生能源的云数据中心	33
3.1 问题的提出	33
3.2 云数据中心能效	34
3.3 RepCloud原理	37

3.4 虚拟机迁移	38
3.4.1 迁移思路	38
3.4.2 网络结构	40
3.4.3 集成可再生能源	43
3.5 任务管理器	45
3.5.1 资源分配	45
3.5.2 工作负载	47
3.5.3 绿色SLA	52
3.6 本章小结	53
第4章 可再生能源感知的跨地域负载平衡	55
4.1 问题的提出	55
4.2 应用程序负载	56
4.3 负载管理思路	60
4.4 跨地域负载均衡	61
4.5 地域内负载集中	66
4.6 仿真实验	69
4.6.1 负载预测	69
4.6.2 可再生能源预测	70
4.6.3 实验设置	71
4.6.4 实验结果	72
4.6.5 讨论	77
4.7 本章小结	77
第5章 数据中心制冷能耗分析和节能方法	79
5.1 问题的提出	79
5.2 关键技术	81
5.2.1 溴化锂太阳能制冷	81
5.2.2 温控结构	81
5.2.3 控制方程	83

5.2.4 相关研究	84
5.3 数据中心建模	86
5.3.1 地板送风	87
5.3.2 机房物理模型建立	88
5.3.3 网格划分	90
5.3.4 Fluent 条件设置	91
5.3.5 模拟结果	95
5.4 功率分配	97
5.5 溴化锂太阳能与送风温度	106
5.6 本章小结	108
第6章 支持可再生能源的云数据中心模拟平台	110
6.1 问题的定义	110
6.2 CloudSim	112
6.2.1 CloudSim 特性	112
6.2.2 CloudSim 层次结构	113
6.2.3 CloudSim 核心类	115
6.2.4 CloudSim 模拟类	116
6.3 CloudSimPer 设计	117
6.3.1 可再生能源供电模型	117
6.3.2 CloudSimPer 初始化	120
6.3.3 虚拟机分配策略	120
6.3.4 任务调度策略	121
6.3.5 任务执行与能耗评估	123
6.4 CloudSimPer 实现	124
6.4.1 可再生能源供电实现	124
6.4.2 CloudSimPer 初始化	125
6.4.3 虚拟机分配策略	127
6.4.4 任务调度策略	128
6.4.5 任务执行与能耗评估	131

6.5 跨地域数据中心仿真	132
6.5.1 评测思路	133
6.5.2 评测方法	134
6.5.3 评测结果	136
6.6 本章小结	141
参考文献	142
后 记	161

第1章 绪 论

为支持无处不在的IT服务,数据中心像公路和电网一样已经成为城市必备的基础设施,兆瓦级的数据中心在吞噬着大量能源的同时也给环境带来沉重的压力,因此数据中心节能研究备受关注。因为可再生能源的环境和经济成本低廉,人们更倾向于采用可再生能源与石化燃料混合为数据中心供电。提高可再生能源利用率,降低石化燃料的使用量,是数据中心节能新目标。然而,可再生能源通常具有间歇性、不稳定性和动态变化性,如何在数据中心中充分利用可再生能源一直是一个难题。

1.1 能耗问题

近些年,IT产业能耗每年增长15%~20%^[1],俨然已经成为能源密集型产业,这就给气候带来严峻压力^[2]。为此,学术界和企业界一直致力于绿色计算研究。现有能耗优化研究或减少能源的使用,降低能耗;或提高能源利用率,增加单位能源完成的计算,提高能效^[3, 4]。但降低能耗并不等于实现了绿色计算,若采用传统电能供电,那么IT设备的碳排放量仍然很高。绿色和平(Green Peace)组织定义实现绿色IT的方式是“高能效加可再生能源”(Green IT = Energy Efficient + Renewable Energy)^[5],充分利用可再生电能才是根本途径。

用于产生电能的一次能源可以分为可再生能源和非再生能源两大类。可再生能源包括太阳能、水力、风力、生物质能、波浪能、潮汐能、海洋温差能等,它们在自然界可以循环再生。在自然界中经过亿万年形成,短期内无法恢复且随着大规模开发利用,储量越来越少且总有枯竭一天的能源称之为非可再生能源^[6],包括煤、石油、天然气、油页岩等。可再生能源产生的电能通常称为绿色电能(Green Power),与之对应的非可再生能源产生的电能称为褐色电能(Brown Power)。绿色电能对环境没有污染,且若考虑环境成本,绿色电能

价格低廉,因此,人们更倾向于使用绿色电能。

数据中心定义为“多功能的建筑物,能容纳多个服务器以及通信设备。这些设备被放置在一起是因为它们具有相同的环境要求以及物理安全需求,并且这样放置便于维护”,而并不仅仅是“一些服务器的集合”^[7]。全球数据中心建设步伐明显加快,总量已超过300万个,耗电量占全球总耗电量的1.1%至1.5%。在国内,数据中心同样发展迅猛,总量已超过40万个,年耗电量超过全社会用电量的1.5%^①。其高能耗问题已引起各国政府的高度重视。能耗是衡量数据中心的一个关键指标,国际上普遍通过应用节能、低碳等技术及先进管理方法建设绿色数据中心,实现能源效率最大化和环境影响最小化。

幸运的是,随着不断下降的工艺制造费用、大规模的投资及政府激励,部署建设可再生能源设备(如太阳能光伏电板和风涡轮)的费用不断降低。越来越多的数据中心正在逐步实现完全或者部分可再生能源驱动。例如GreenHouseData建在美国怀俄明州的风能供电数据中心^②;FaceBook建在俄勒冈州的太阳能数据中心^③;eBay使用30个Bloom Energy的燃料电池来为其在犹他州的数据中心供电^④;Apple将使用太阳能厂和燃料电池站生产60%的电力^⑤,Google也使用风能作为数据中心能源^[8]。很多研究人员也提出了示范性的工程,可以利用太阳能、风能^[9]、燃料电池^[10]、生物质发电^[11]来为数据中心供电。绿色数据中心逐渐得以推广。无论从经济成本还是环境成本角度,大型数据中心均趋向于采用可再生能源和褐色能源混合供电,针对此类数据中心的节能研究也应运而生。

1.2 节能思路

我国地域辽阔,地形多变,蕴藏着极其丰富的可再生能源,主要有太阳能、风能、水力能和生物质能。全国陆地总面积2/3以上地区年日照时数大于

① <http://news.163.com/15/0325/06/ALHI939P00014AEE.html>.

② https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_power_in_Wyoming 2017.

③ <http://www.datacenterknowledge.com/archives/2011/04/16/facebook-installs-solar-panels-at-new-data-center/>.

④ <http://www.datacenterknowledge.com/archives/2012/06/21/ebay-bloom-boxes-will-power-utah-data-center/>.

⑤ <http://www.datacenterknowledge.com/archives/2017/01/26/huge-reno-solar-farm-in-the-works-for-apple-data-center/>.

2200h, 属于太阳能资源丰富地区。西藏、青海、新疆、甘肃、宁夏、内蒙古属于世界上太阳能资源最丰富的地区之一。此外, 我国的风能资源丰富, 陆地可开发利用的风能资源约2.5亿kW, 加以海上风能资源, 共计有约10亿kW的资源潜力^[12]。我国正在大力促进可再生能源的开发, 例如, 2013年起, 国家不断出台鼓励光伏发电和并网的政策, 国内市场快速启动, 使中国一跃成为世界上最大的风电和太阳能市场。大量可再生能源转换的电能, 为国防、工业、民用和公共交通设施提供电力保障。数据中心作为新型的用电设施, 也广泛采用绿色和传统电能混合供电的方式。

节能是数据中心所面临的一个巨大挑战。一方面, 计算机完成运算要消耗大量电能, 另一方面, 计算机消耗的电能大部分转化为热量, 而这又需要更多的电能来冷却系统^①。使一个系统以较少的耗电量做更多的工作, 即提高“Performance per watt”, 是现有节能研究的主要目标。不同于传统数据中心的性能优化和能耗优化, 可再生能源混合供电数据中心节能研究需区分电能的来源, 考虑产电能源的可再生性及对环境的影响等, 从另外一个崭新的角度展开数据中心能耗优化研究, 即“优化数据中心可再生能源利用率, 减少褐色能源使用量”。

可再生能源产电通常具有间歇性、不稳定性和动态变化性, 如风能受风速的影响、太阳能受温度和光照的影响, 而且难以预测, 充分用绿色电能供电颇具挑战。绿色电能无法独立供电, 有时需要褐色电能补足, 有时会浪费大量绿色的电能。以太阳光为例, 若太阳能在某时刻产电大于数据中心的能源需求, 那么, 就会浪费掉一部分绿色电能^②; 太阳能在某时刻产电小于数据中心的能源需求, 那么就需要使用褐色电能补足。当然, 最理想的情况是绿色电能被100%使用, 且无需褐色电能补足。

在可再生能源混合供电的数据中心中, 计算机集群的“耗电-时间”曲线未必与可再生能源的“产电-时间”曲线吻合(见图1.1实测数据), 因此, 势必存在两部分的能源浪费: 无法充分利用的绿色电能和额外需要补充的褐色电能。通常情况下, 人们难以控制可再生能源的产电特征, 但是可以调整数据中心的耗电特征, 以减少能源浪费。直观上, 现有研究均通过硬件或软件方法,

① 可以通过水冷、风冷等方式冷却, 也可以将热能收集再利用, 甚至可以采用TEG(热电转换器)装置将热能转化为电能。数据中心热量管理是一个前沿交叉课题。

② 可以选择将多余的电能进行储存, 目前主要有三种储存方法: 蓄电池、电力回馈(Net Metering)及蓄水储电。然而, 这三种方法均会产生电能损失, 且储存代价较高。

通过调整“耗电-时间”曲线，减小非重叠部分的面积，以节约褐色电能，充分利用可再生能源。

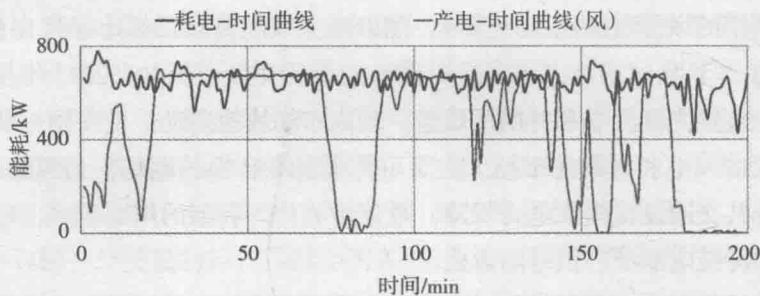


图 1.1 “耗电-时间”曲线和“产电-时间”曲线的不匹配

将可再生能源混合供电的数据中心节能目标归结为以下三点：① 最大化可再生能源利用率；② 最小化能源成本；③ 最小化碳排放量。现有研究对上述三个目标各有侧重，事实上，三者不同程度地有所重合。充分利用可再生能源，减少褐色能源的使用，就可以节约电力成本，并且减少碳排放量。但在某些场合，三者又会有所冲突，比如当公共电网电力价格便宜时能源成本低，但碳排放量未必降低；或充分利用站内可再生能源发电成本很高，但能够充分利用可再生能源，且有着很低的碳排放量。根据上文描述，若不考虑复杂的成本分析，本书将节能目标归结为“产电和耗电曲线的匹配”，与现有研究是一致的。

如图 1.2 所示，为实现产电和耗电曲线的匹配，通常会采用两种方法：一种称为能源管理，即通过能源规划和功率控制来最大化利用能源，该方法位于数据中心的资源层；一种是负载均衡，即通过软件方法改变计算机的工作负载以适应能源特征，资源层负载均衡可通过虚拟机的放置和迁移实现，计算层的负载均衡可通过任务的调度和迁移实现，服务层的负载均衡可通过请求分发实现。本书将在第 2 章介绍上述方法。



图 1.2 节能方法和位于的层次

1.3 研究内容

本书介绍可再生能源混合供电的数据中心节能方法,以达到提高可再生能源利用率、降低传统能源使用量的双重目标。书中内容着重于以下三个方面。

首先是任务管理方法。数据中心从用户接收到的任务类型有很多,不同类型的任务的能耗特性不同,例如,CPU密集型任务消耗CPU资源较多,能耗峰值高,而I/O密集型任务消耗磁盘和网络资源较多,能耗峰值相对较低。任务管理是对任务生命周期的控制,解决“选择何种任务执行”,“任务在哪个节点上执行”“何时开始执行”“何时暂停执行”等一系列任务生命周期相关的问题。

任务管理会导致任务推迟执行,按照对时间的敏感性,任务通常又分为延迟容忍型和延迟敏感型两种。对于延迟容忍型任务,研究如何管理才能在满足截止期限的情况下,尽可能多地使用可再生能源;而对于延迟敏感型任务,研究如何管理才能降低传统电能的使用量从而降低电费和对环境的不良影响。任务管理还要考虑实时性要求,需在时间序列上快速地确定任务的特性和对任务的管理方法,动态的任务管理是一个挑战。具体研究包括:

- 任务队列预测:任务管理首先要确定任务最佳资源需求和节点资源占有情况,因此,良好的任务预测和任务队列特性的预测,是任务管理的基础。
- 任务调度:在任务充足的情况下,任务调度算法从队列中合理选择任务执行。任务调度是一种较小粒度的能耗调整,当产电减少的时候选择较少的任务执行,或较小能耗的任务执行,反之则反。使耗电模型尽可能地匹配产电模型。
- 任务分发:任务分发决定任务在哪些节点上执行,通过调整任务和节点之间的对应关系,可以最大程度地减少节点的数量,缩减能耗。或者结合资源分配技术以调整能耗。
- 任务缓存:任务缓存是一种较大粒度的能耗调整,可以在产电低谷时将队列中的任务或正在执行的任务“休眠”以降低能耗,正在执行的任务“休眠”时还需要考虑中间结果和状态的持久化;在产电高峰时,可以“唤醒”这些任务。

其次是热量管理方法。数据中心节能研究需要考虑制冷的能耗问题。实际上,数据中心的能耗不仅仅来源于服务器的计算能耗(包括处理器、磁盘、网

络设备等的能量消耗), 还包括制冷能耗。其中, 制冷开销是最为主要的部分^[13, 14], 接近所有能耗开销的 50%^[15, 16]。数据中心内部的计算设备能耗高, 转化并耗散了大量内能。这部分内能必须通过制冷设备及时地搬运到室外。以 IBM 的 blue-Gen/L 和 TACC's Ranger 为例, 虽然其制冷效率相比之前的技术有所改善, 其冷却率仍分别为 1 : 1.5 (即每消耗 1.5W 计算功率, 需要额外 1W 功率进行冷却) 和 1 : 2.5^[13]。此外, 需要将数据中心的温度严格控制在合理范围内。首先, 数据中心温度过高会严重影响设备的可靠性。Little Blue Penguin Cluster 的经验数据^[17] 及 Arrhenius Time-to-Fail 模型^[18] 都表明, 温度每升高大约 10℃, 设备的故障率就会翻倍。要控制设备的故障率必然要求将温度控制在可接受范围内。其次, 温度的升高反过来会增加计算机电子元件的功耗^[19]。为保证设备工作在正常温度下, 往往需要大量的冷却设施及制冷能耗, 如图 1.3 所示^[20]。单纯地减少服务器计算能耗, 而不综合考虑温度的均衡性及对制冷的影响, 具有一定局限性。热量管理是指以控制设备温度、减少数据中心制冷能耗为目的, 对温度、气流等物理参数进行管控的一系列软硬件方法。热量管理综合考虑计算能耗与制冷能耗, 为节能提供了新的思路。本书涉及的热量管理的最主要功能可以概括为三点: ① 合理控制温度, 提高设备的可靠性。② 尽量减少热点 (Hot Spot) 的产生。由于最小化峰值温度与最小化制冷能耗之间具有等价性^[21], 因此, 减少热点有助于提高制冷效率, 减少制冷能耗。③ 热量管理要实现可再生能源可感知, 充分利用可再生能源产电, 减少褐色电力的投入。

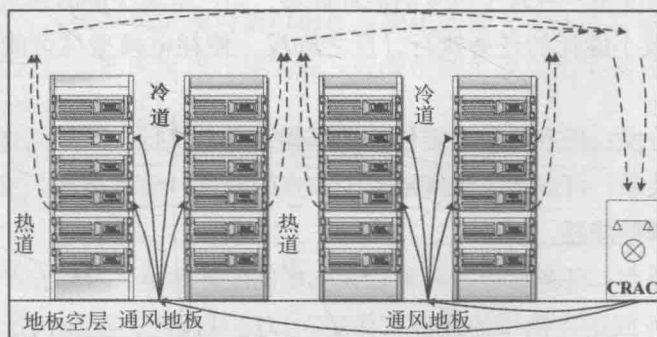


图 1.3 数据中心基本温控结构

最后为仿真平台。众所周知, 数据中心是一个容纳上万台服务器及通信设备的建筑物, 规模巨大, 因此, 与数据中心相关的研究都需要大量的仿真实

验, 一个好的仿真环境必不可少。CloudSim 是墨尔本大学开发的数据中心仿真平台, 但不支持可再生能源混合供电的仿真。本书基于 CloudSim, 设计和实现一个支持可再生能源混合供电数据中心仿真平台, 命名为 CloudSimPer (Cloud Simulator Hybrid-powered by Renewable energy)。

综上所述, 本书涉及可再生能源混合供电的数据中心节能方法。通常情况下, 可再生清洁能源的产电量与数据中心的电能需求不能够吻合, 要么产电量供过于求, 要么产电不足供不应求。因此, 需要分两种情况分别讨论: ①绿色电能产电过量时间段内, 有两种可行的应对方法: 或抛弃或储存。使用电池进行储藏或者通过蓄水进行储电是有代价的, 因此, 抛弃也未尝不是一个选择。本书不涉及如何高效地存储电量, 而是涉及“如何在产电过剩时间段内通过功耗调整 and 任务管理, 尽量多地将能源转换为计算能力, 减少或消除浪费的绿色电能”。②绿色电能产电不足时间段内, 会采用传统电能补足的方法。若考虑环境成本, 传统电能的价格要远高于绿色电能。为了减少传统电能的使用, 本书介绍“如何在产电过剩时间段内通过功耗调整 and 任务管理, 进入一种低功耗低性能的状态, 尽量少地使用补足的传统电能”。此外, 节能方法还需满足上下文不变性。上下文是指数据中心的硬件环境、任务环境、服务质量和供电环境, 该上下文不能因节能方法而改变, 比如, 增加或减少节点, 调整待执行任务的规模, 改变任务的执行算法等。

1.4 本书结构

本书主要内容为: 可再生能源混合供电的数据中心节能研究综述, 数据中心体系结构, 面向任务管理的节能方法, 面向热量管理的节能方法, 以及集成可再生能源的数据中心模拟软件。详细内容如下:

第1章: 绪论;

第2章: 综述主流的可再生能源供电的数据中心节能方法;

第3章: 介绍 RepCloud, 一种支持可再生能源的云数据中心体系结构;

第4章: 介绍一种可再生能源感知的跨地域负载均衡方法, 属于任务管理方法的一种;

第5章: 介绍可再生能源感知的数据中心热量管理方法, 提出与数据中心物理环境和热力学环境设计相关若干经验性规则;

第6章: 介绍 CloudSimPer 模拟平台, 以及采用 CloudSimPer 实现数据中心

的任务建模、任务执行模拟和能耗模拟，给出部分代码，并对跨地域数据中心任务调度算法进行了仿真。

1.5 本章小结

综上所述，本书主要内容为：给定可再生能源特征、硬件环境和任务属性等上下文，通过功耗调整、任务管理和热量管理等方法，在上下文不变的前提下调整数据中心能耗，使其满足在一定时间内“减少绿色电能的浪费，降低传统电能的消耗”的目标。数据中心节能不仅能够减少能源的浪费，降低数据中心的整体运营成本，而且还能降低二氧化碳、二氧化硫等损害环境的气体排放，利于社会的可持续发展。

书中所述内容有着较强的学科交叉和探索研究背景。在能源领域，可再生能源的利用一直是一个备受关注的问题。我国有着丰富的风能、太阳能和地热资源，都属于可再生能源的范畴。但目前风电和火电并网使用会出现“弃风限电”的问题，大规模风电消纳一直都是世界性难题。2012年辽宁省风电运行限电比例达到10%以上，辽宁西部和内蒙古东部为主的电网弃风电量为34亿千瓦时^[22, 23]。风电消纳的主要难题除了经济和地域问题，从技术角度来看是可再生能源的间歇性与电力消纳的不匹配，其他可再生能源也存在类似问题。书中涉及的内容恰为在数据中心用电这一特定的应用场景解决缓解这一问题，本书很多成果均为能源领域和计算机领域参与人员合作研究。

书中内容可以推广至可再生能源供电的大型数据中心。企业相关生产人员可参考本书选择合适的技术构建绿色数据中心或对现有数据中心能耗进行优化；新能源和绿色计算相关的人员可参考本书了解数据中心和能耗优化的基本原理和现有研究成果；学生读者可通过学习本书全面了解可再生能源条件下的数据中心节能；同时，本书也适用于对数据中心构建技术拥有浓厚兴趣的读者，让读者对新能源和数据中心节能相关的国内外研究成果有整体全面的了解。