

**研 究 生 ( 数 据 中 心 技 术 ) 课 程 论 文 ( 报 告 )**

**题目：数据中心能耗优化研究综述**

|  |  |
| --- | --- |
| 学 号 | **M202073382** |
| 姓 名 | 杨溢 |
| 专 业 | 电子信息 |
| 课程指导教师 | **施展、童薇** |
| 院（系、所） | **武汉光电国家研究中心** |

2020年12月20日

数据中心能耗优化研究综述

杨溢

**摘要** 随着互联网规模的不断扩大以及互联网在人们日常生活中所扮演的角色日益重要，为了满足人们对互联网服务的要求，一个又一个数据中心如道路和电网，已经成为城市必不可少的基础设施。与此同时，兆瓦级的数据中心带来了巨大的能源消耗，不仅带来了了巨大的经济成本，而且还对环境造成了巨大影响。为了解决数据中心巨大能源消耗带来的经济上和环境上的压力，数据中心能源优化问题的研究成为了近些年来各方关注的焦点，由于可再生能源的绿色性和成本低的特点以及近些年来各国在可再生能源上的研究和使用取得了不错的成绩，一种依靠可再生能源和化石能源混合供电的数据中心逐渐出现在大众的视野中，提高这种数据中心的能源使用效率成为数据中心能耗优化的一个新方向。但是，由于目前可再生能源技术还不够成熟，加上其所具有的不稳定性的特点，使得实现数据中心高效利用可再生能源成为了一个难题。除此之外，对于传统的化石能源供电的数据中心，因为对于传统化石能源的研究目前日趋成熟，在能源上优化的空间不大，因此如何提高数据中心的工作效率成为了传统数据中心能耗优化的一个重要方向。本文综述了近年来在数据中心能耗优化上的一些研究成果，本文先是介绍了能耗优化的基本思路，然后分别介绍了参考的3篇文献中针对能耗优化的方案和实现效果，最后根据这3篇文献的研究成果，分别提出了针对传统数据中心能耗优化和混合供电数据中心能耗优化的一些可能的解决办法。

**关键词** 传统数据中心 混合供电数据中心 工作效率 可再生能源 能耗优化

**Review of energy consumption optimization in data center**

**Yangyi**

**Abstract** With the continuous expansion of the scale of the Internet and the increasingly important role of the Internet in people's daily life, in order to meet people's requirements for Internet services, one data center after another, such as roads and power grids, has become an essential infrastructure of the city. At the same time, it has a huge impact on the economy and the environment. In order to solve the economic and environmental pressure brought by the huge energy consumption of data center, the research on energy optimization of data center has become the focus of attention of all parties in recent years. Due to the green and low cost characteristics of renewable energy, as well as the good achievements in the research and use of renewable energy in recent years, one kind of renewable energy and fossil energy has been developed The data center of energy hybrid power supply is gradually emerging in the public's field of vision. Improving the energy efficiency of this kind of data center has become a new direction of energy consumption optimization of data center. However, due to the current renewable energy technology is not mature, coupled with its unstable characteristics, making the efficient use of renewable energy in data center has become a problem. In addition, for the data center powered by traditional fossil energy, because the research on traditional fossil energy is becoming more and more mature, there is little space for energy optimization, so how to improve the work efficiency of data center has become an important direction of energy consumption optimization of traditional data center. This paper summarizes some research results on energy consumption optimization of data center in recent years. Firstly, this paper introduces the basic idea of energy consumption optimization, and then introduces the scheme and implementation effect of energy consumption optimization in three references. Finally, according to the research results of these three references, this paper puts forward energy consumption optimization for traditional data center and hybrid power supply data center Some possible solutions to this problem.

**Key words**: traditional data center, hybrid power supply, data center, work efficiency, renewable energy, energy consumption optimization

# 1 引言

在当今全球经济都在逐渐向数字化转型的时代，数据中心作为数字经济的核心基础设施，成为了各国推动经济发展的关键点，就我国而言，从2012年到2019年，我国累计增加了2.3万个数据中心，增长率为45%，已建成的超大型、大型数据中心数量占比达到12.7%。将近二分之一的增长率以及超大型数据中心的占比说明了数据中心对国家经济增长起到的强大推动力。但是越来越多的数据中心在各个地区的建设发展也引来了社会对其环境保护与资源消耗的担忧，由于数据中心的配套建设涉及众多设备，包含了[电力设备](https://bg.qianzhan.com/report/detail/86be4b26a2444c74.html" \t "https://bg.qianzhan.com/report/detail/300/_blank)、[空调设备](https://bg.qianzhan.com/report/detail/ac68f43de6fe4fa9.html" \t "https://bg.qianzhan.com/report/detail/300/_blank)、网络设备等，而能源的消耗包括了IT设备、制冷设备、供配电系统和照明设备，光是IT设备和制冷设备就占到了能源消耗的80%，因此对电力的消耗巨大。据国际环保组织绿色和平与华北电力大学最新发布的《点亮绿色云端：中国数据中心能耗与[可再生能源](https://bg.qianzhan.com/report/detail/5892eb3713a843d2.html" \t "https://bg.qianzhan.com/report/detail/300/_blank)使用潜力研究》数据显示，2018年，我国数据中心用电总量已经超过了上海全社会用电总量(1566.7亿千瓦)，为1608.89亿千瓦时，占中国全社会用电量的2.35%，占第三产业用电量的14.9%;2023年中国数据中心总用电量将达到2667.92亿千瓦时，年复合增长率达到10.64%。除了耗电量高之外，数据中心使用的大比例化石能源所带来的空气污染与碳排放问题也尤为突出。2018年，全中国数据中心使用火电约为1171.81亿千瓦时，排放了9855万吨的二氧化碳、2.34万吨的二氧化硫、2.23万吨的二氧化物和0.49万吨的烟尘。

因此，对于数据中心的能耗优化的研究显得十分重要，学术界和企业界也在多个方向对数据中心进行能耗优化研究，例如针对传统的由化石能源供电的数据中心，由于当前对于可再生能源的技术还不成熟以及传统数据中心在数据中心中的占比十分巨大，所以这也是学术界研究的主要方向。除此之外，对于新型的混合供电型的数据中心，虽然对其的研究和使用仍处于尝试和摸索阶段，但是因为用于产生电能的一次能源分为可再生能源和非可再能源两大类，可再生能源（英语：Renewable Energy）是指风能、

太阳能、水能、[生物质能](https://baike.baidu.com/item/%E7%94%9F%E7%89%A9%E8%B4%A8%E8%83%BD/745167" \t "https://baike.baidu.com/item/%E5%8F%AF%E5%86%8D%E7%94%9F%E8%83%BD%E6%BA%90/_blank)、[地热能](https://baike.baidu.com/item/%E5%9C%B0%E7%83%AD%E8%83%BD/1200223" \t "https://baike.baidu.com/item/%E5%8F%AF%E5%86%8D%E7%94%9F%E8%83%BD%E6%BA%90/_blank)、[海洋能](https://baike.baidu.com/item/%E6%B5%B7%E6%B4%8B%E8%83%BD/1188721" \t "https://baike.baidu.com/item/%E5%8F%AF%E5%86%8D%E7%94%9F%E8%83%BD%E6%BA%90/_blank)等非化石能源 ，是取之不尽，用之不竭的能源，是相对于会穷尽的[不可再生能源](https://baike.baidu.com/item/%E4%B8%8D%E5%8F%AF%E5%86%8D%E7%94%9F%E8%83%BD%E6%BA%90/7024237" \t "https://baike.baidu.com/item/%E5%8F%AF%E5%86%8D%E7%94%9F%E8%83%BD%E6%BA%90/_blank)的一种能源，对环境无害或危害极小，而且资源分布广泛，适宜就地开发利用。非再生能源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，储量越来越少总有枯竭一天的能源称之为非再生能源。非再生能源包括：煤、原油、天然气、油页岩、核能等，它们是不能再生的，用掉一点，便少一点，所以对于可再生能源的在混合供电型数据中心中的利用是未来数据中心发展的重要方向。

值的高兴的是，随着能耗在数据中心中的影响力日益加大，意识到能耗优化重要性的企业和政府开始围绕数据中心能耗优化问题大规模地进行研究、实践并发布相关政策，例如2010年1月，Facebook首个数据中心在俄勒冈州的普林维尔(Prineville)破土动工；Google在2012年与奥克拉荷马州电力公司Grand River Dam Authority签署了一份为期十年的供电合同，为Google在该州梅斯县的数据中心提供48兆瓦的电力；腾讯在2018年开始在贵州打造全国最安全数据中心——贵安七星绿色数据中心；中国在最新发布的《关于加强绿色数据中心建设的指导意见》中提出了对建设数据中心能源消耗的规划，提出到2022年，数据中心平均能耗基本达到国际先进水平，新建大型、超大型数据中心的电能使用效率值达到1.4以下，高能耗老旧设备基本淘汰，水资源利用效率和[清洁能源](https://bg.qianzhan.com/report/detail/1611280933127732.html" \t "https://bg.qianzhan.com/report/detail/300/_blank)应用比例大幅提升，废旧电器电子产品得到有效回收利用。

本文将综述在数据中心能耗优化上近3年的一些研究。本文后续的章节结构如下

# 2 传统数据中心能耗优化

## 2.1 HDFS存储节能优化

在云计算的基础设施——数据中心内，Hadoop分布式文件存储系统（Hadoop Distributed File System, HDFS)以高容错性、高可靠性等优势被广泛使用，但是HDFS中遵循机架感知的存储策略没有考虑数据间的差异性和使用频度，所有数据以相同副本数复制后分散存储在不同的DataNode节点中，这势必会开启过多的DataNode而导致数据中心能耗过高。所以针对这一问题我们开始进行我们的能耗优化研究。

## 2.2优化思路

分布式存储系统具有高存储带宽和易扩展的特点，是大数据和云计算的主要存储模式。然而，随着数据量的快速增长和软件架构带来的高能耗，低能耗问题日益突出。针对这个问题，目前致力于数据中心存储单元的节能主要分为两类：改变存储策略和不改变存储策略的节能研究。

文献【1】通过对以上两种优化类型的研究，总结出了两类方法的一些不足之处，例如数据存储单元的节能策略与其它，如计算部分,云计算数据中心HEDFS差异性存储节能优化算法《计算机学报》的节能策略有很大区别．虚拟机整合和迁移技术能够在很小迁移代价下有效提升计算服务器CPU利用率，进而获得显著的节能效果．但对于数据存储单元，数据的迁移将耗费大量系统资源，占用网络资源，并可能由于传输故障造成数据的不完整而失效．因此对于数据存储单元，迁移并非有效的节能策略．百度HDFS集群存储压缩机制中就提出了本地性，尽量不进行跨数据节点的压缩操作；不改变存储策略的现有算法和HDFS机架感知策略都未考虑文件和数据被访问的频度差异，以固定的３副本数或１覆盖率进行计算．这样的配置，对于高访问频度的文件，单一活跃数据块的多需求端的频繁读取会造成传输通道的拥塞，降低数据读取准确性．而如果整体提升覆盖率则又会急剧增加开启DataNode服务器个数，能耗同步剧增。然后在这些不足之处上进行了可变κ重覆盖的数据中心HDFS节能存储方法研究,并给出一种可变κ～横贯超边计算方法完成可变覆盖集选择．则依据文件的访问需求，可动态设定不同数据块的副本个数，依据极小可变κ覆盖集确定最优的DataNode开启集合，实现系统存储单元节能，同时在机架间优化的数据配置，也有效降低了数据读取／存储通道的负载率，提升了数据正确率。

## 2.3 建立模型

### 2.3.1 HDFS存储模型

经典的HDFS是由多个机架Rack组成，一个机架内部包含多个存储服务器DataNode，并通过数据中心内部网络实现高速数据交换。通过对这种存储过程中的映射进行定义来建立实验模型。

**定义１**（机架感知存储策略）．　第一个数据块的第一个副本被随机地存放于某一个数据节点中，第二个副本存放在与第一个数据块不同的机架上的任意一个数据节点中，第三个副本存放在与第二个副本相同的机架但是不同的数据节点中；如果文件的副本系数＞３，剩下的数据块就被随机地存放在除上述三个数据节点以外的任意数据节点中。

**定义2** 令X={x1,x2,x3,...,xm}是一个有限集，若Ei≠Φ(i=1,2,...,m)和Ei(i=1,2,...,m)的和等于X,则称二元关系H=(X,E)为超图，其中X的元素x1,x2,...,xm称为超图的顶点，E={E1,E2,...,Em}为超图的边集合。

**定义3** （超图关联矩阵）矩阵A表示超图H(X,E)的关联矩阵，由A(aij)来数学表述：m列对应H的m条超边{E1,E2,...,Em},n行对应H中包含的n个顶点X={x1,x2,...,xm}。当xi属于Ej时，aij=1；反之aij=0。

### 2.3.2 HDFS可变κ～覆盖问题建模

对Yahoo公司HDFS集群的数据块访问日志进行分析发现研究问题：在保证数据块可用性前提下的灵活可变数据块副本存储策略，可有效节省存储资源．并通过对空闲出的DataNode休眠，节省系统能耗。

利用HDFS存储模型将该问题建模为数据块存储的可变κ覆盖问题：寻找一个最小DataNode子集，集合中覆盖所有种类数据块的κ个副本．其中每种数据块的副本数κ可变，其可基于对数据块访问频率的统计计算活动因子的方法获得。最终得到的数学模型为

## 2.4 算法描述

由于问题的可行解中会存在多个最优解的情况，因此该问题是一个多态函数优化问题，文章采用贪心萤火虫算法加以求解。

### 2.4.1 FA算法贪心策略

在迭代的每一个时刻检查萤火虫代表的DataNode状态是否满足条件，不满足则启动贪心策略修正，直至解满足约束集，即成为可行解。

FA贪心策略有效解决了具有多约束的极小κ横贯优化问题，使得计算中每个解都保持可行解

### 2.4.2 FA算法变异策略

由于贪心策略能够较好的求解多态函数优化问题，可快速稳定在多个极值点处，但也因此导致算法容易陷入局部最优解而无法获取全局最优解。因此，引入变异策略，

按照变异概论P1＝0.01%在每代解群中选择待变异个体狑犿狌，随后对萤火虫的每一位二进制编码以变异概论P２＝0.02%进行变异，即将0和1相互翻转。

### 2.4.3 算法执行流程

基于上述算法表述，给出贪心ＦＡ算法求解可变κ覆盖集的伪代码如表１所示

表１　贪心萤火虫算法求解伪代码

## 2.5 实验与性能分析

### 2.5.1实验环境

对所提出HDFS可变κ～覆盖节能算法进行性能评测．实验选用WordCount、TeraSort和Grep三种典型任务进行运行，测评算法对数据的可用性，以及对集群节能和运算性能提升效果．WordCount是典型的Mapreduce类计算，TeraSort是Hadoop中对原始数据的排序工作的典型任务，Grep是对指定文档中指定单词的词频进行计算的另一类典型任务．实验中我们不仅观测Map计算和Reduce计算过程的系统耗时和能耗，还通过NS-2网络仿真平台测试新的存储方法对数据读取／传递过程的性能提升效果。

为验证算法的普遍适用性，搭建数据中心最常用的3种集群结构，所含有DataNode数量也逐级递增：

1. Fat-Tree拓扑结构．集群由3个机架组成，每个机架包含9个DataNode节点，共计５４节点．

（２）BCube２拓扑结构．集群由4个机架组成，每个机架包含16个DataNode节点，共计64节点．

（３）DCell2拓扑结构．集群由５个机架组成，每个机架包含20个DataNode节点，共计100节点．单个DataNode节点的配置参数如表２所示。

表二 DataNode 节点配置参数

|  |  |
| --- | --- |
| 参数 | 设定值 |
| CPU | Intel 2.7GHz/2 cores |
| OS版本 | Ubantu12.04 |
| Hard Disk | SATA3.0(6Gbps) |
| Java 版本 | 1.6 for Linux |
| Hadoop 版本 | 2.6.5 |
| DataNode 最小运行功耗 | 168.2W |
| DataNode 最大运行功耗 | 344.8W |

### 2.5.2数据可用性实验

保证存储数据可用性是数据中心存储的首要任务，本节从数据块和任务两方面讨论HDFS集群采用可变κ覆盖集算法后，休眠DataNode节点数目对于存储数据可用性的影响，并与机架感知存储策略和采用计算恒定覆盖率集合优化策略比较。

最终获得的实验结果表明，随着存储节点的关闭，数据块的可用性也随之减少，而对Task任务能否完成的影响更重．不采用优化策略时，随机关闭集群中任意一个DataNode节点都有可能无法满足数据块的可用性需求，同时也必然破坏任务的完成率；当采用iPACS固定覆盖算法时，为了保证所有种类数据块都满足可用性要求且任务均能顺利完成，则需要选择最大覆盖率k＝３，此时可以关闭3个DataNode节点；而依循数据可用性需求的可变κ覆盖算法则可实现多达12个DataNode节点的关闭，同时仍然保证所有数据块可用和计算任务正常完成．

### 2.5.3 HDFS集群能耗分析

由数据可用性实验可知，在保证数据可用性需求条件下本文的可变κ覆盖最小集算法能够让集群中更多DATa Node节点休眠，休眠节点以低功耗运行能够大幅降低集群能耗。

除此之外，通过实际运行Hadoop基准测试程序—WordCount来测试不同存储方法对数据中心计算节能效果。由实验获得的数据统计图可知，可变κ～覆盖算法进行配置后，数据中心存储能量损耗在３种网架结构中不同的负载的实验场景下始终是最小的．为测试数据中心面对更多样化的任务，论文选用TeraSort、Grep和WordCount三种任务运行，轻载情况下，可变k覆盖最小集覆盖优于CS-3重复覆盖算法的高效节能30.15%，比不优化的存储节能高达87.01%；重负载下，比CS-3重复覆盖算法具有更高的节能效率7.21%，比不优化储能节能高达18.05%，实际获得的效果总结如表三所示。

表三 集群节能效率

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 多任务轻载荷 | | 多任务重载荷 | |
| Fat\_Tree | 30.15% | 79.01% | 5.36% | 12.83% |
| BCube2 | 17.79% | 83.01% | 4.47% | 14.22% |
| DCell2 | 14.53% | 87.01% | 7.21% | 18.05% |

## 2.6小结

文献【1】在保证数据库可用性的前提下，提出了灵活多变的数据块副本存储策略，并最终通过数学建模将解决问题的过程表示为求解可变k覆盖最小集问题。利用贪心萤火虫算法寻找问题的最优解，并发现了贪心算法所具有的局部稳定性的缺点，然后进行改正，提出了变异策略，提高获得最优解的概率。最后通过实验来检测该策略的可用性以及实际效果，并对此分析，发现该策略能够在保证数据可用性的前提下，休眠更多的DataNode节点，从而实现数据中心的能耗优化。

# 混合供电数据中心能耗优化

## 3.1优化思路

高能耗是数据的一大挑战中心。制造一个系统以更少的功耗完成更多的工作，也就是说，提高“性能瓦特”，是当前能量优化的主要目标研究。不同传统数据中心的能耗优化和性能优化，可再生能源混合供电数据中心能耗优化研究需要区分电源，考虑产生可再生电能以及对环境的影响等，从另一个新的数据中心角度进行能耗优化研究，即“优化可再生能源利用数据中心，降低褐色用电量”。

可再生能源发电往往是间歇性的、不稳定的和动态的。比如风力发电受风速影响，太阳能受温度和光照影响，很难预测。绿色电能不能独立供电，有时需要褐色电能补充，有时候又会浪费一部分绿色电能。以太阳能为例，如果太阳能在某个时候产生的电能超过数据中心的能源需求，部分绿色电力将浪费了。在某时刻，太阳能发电将产生比数据中心所需更少的能量，因此需要褐色电能补充动力。理想情况下当然是绿色能源将得到充分利用，而不是补充褐色电能电源。

研究表明，在数据中心混合供电时，计算设备的“用电-时间”曲线不一定与可再生能源“发电-时间”曲线拟合，因此存在两部分能源浪费，无法充分利用绿色能源，需要额外添加褐色电能。由于可再生能源的发电特性往往难以控制，但可以通过调整数据中心的功耗特性来降低能耗浪费。直观上, 现有的研究采用硬件和软件相结合的方法，通过调整“用电-时间”曲线，减少重叠面积，节约能源，充分利用可再生能源。

为了实现产电曲线和耗电曲线的相匹配，一般采用两种方法，第一种是功率控制法，即通过调整数据中心中的计算机工作功率来最大化能源利用率，该方法位于数据中心的资源层，属于硬件优化方法；第二种是负载均衡，也即通过软件方法改变计算机的工作负载，进而改变能耗以适应能源特征，本文将在后面介绍第二种方法中的两种具体实现途径。

## 3.2产电和耗电模型

文献【2】对可再生能源中的太阳能和风能进行了建模，通过研究太阳能和风能的间歇性和周期性规律，对太阳能和风能的产能进行了数学建模，获得了大致估算产能的模型公式：

而关于数据中心的耗电模型，一般是从以下几个角度进行研究：

1. 计算机、网络设备和制冷设备的数据中心整体能耗
2. 计算机、网络设备和制冷设备的数据中心整体能耗
3. 考虑虚拟机的能耗
4. 每个用户请求的能耗
5. 每个用户请求的能耗

具体的数学建模根据研究人员研究的类型而定。

## 3.3 负载均衡

在计算机科学中，负载（Workload）是对计算机处理的工作的抽象描述系统负载是计算机能量的根本原因消耗.负荷可以采取多种具体形式，执行应用程序、数据库查询任务，虚拟机可以看作是装上。那个数据中心负载由用户请求生成。在云数据中心的情况下，服务器执行多个数据库查询任务以响应SaaS请求，MapReduce任务响应PaaS请求，并创建虚拟机以响应IaaS服务请求。数据中心通常可以支持多个IT请求，按响应时间划分为即时交互任务，比如网络搜索，延迟容忍任务，比如数据处理和科学计算。

而负载均衡方法就是利用请求在时间和空间上的灵活性，通过调度、延迟和迁移等技术，例如请求的重定向和虚拟机迁移，改变数据中心负载在时间和空间上的分布，进而影响数据中心能耗，以匹配变化的可再生能源。具体的均衡方法根据均衡对象的不同，还可以分为面向应用的任务负载均衡和面向资源的虚拟机负载均衡，两者之间也有一些不同点，如表四所示。

表四 任务负载均衡和虚拟机负载均衡的不同点

|  |  |
| --- | --- |
| 任务负载均衡 | 虚拟机负载均衡 |
| 面向应用 | 面向计算机资源 |
| 细粒度 | 粗粒度 |
| 位于中间件层 | 位于资源层 |
| 轻量级，均衡代价小 | 重量级，均衡代价大 |
| 任务数量多 | 虚拟机数量少 |
| 实时性高 | 实时性差 |
| 任务能耗特征差异大 | 任务能耗特征差异小 |

根据以上的两种类型的方法，在3.4和3.5中将依次介绍两篇论文中的调度方法。

## 3.4 任务负载

在数据中心内，负载均衡可通过任务调度来实现．任务调度机制研究如何依据可再生能源可用量来分级调度交互型和延迟容忍型任务．任务调度将可再生能源供应与数据中心负载相匹配，其主要方法为：①根据天气数据预测可再生能源总量；②基于Trace数据预测数据中心任务负载特征；③在可再生能源充足期，交互型任务将优先于延迟容忍型任务执行；④当可再生能源不足时，可在不违反SLA的前提下延迟任务执行，否则必须从公共电网中补足电力；⑤对于交互型任务，通过降低服务质量（如延长响应时间、选择性地拒绝部分请求）来降低能耗，充分利用有限可再生能源：⑥对于延迟容忍型任务，通过可再生能源感知的松弛调度来最大化可再生能源利用率．其中，混合任务和延迟型任务是研究的重点，鲜有单独研究交互型任务的文献

文献【3】中提出并开发了一种灵活的电源感知资源供应方法EPower，以提高整体系统性能，并控制动态绿色电源的系统功耗，接下来对EPower方法以及结果进行介绍。

### 3.4.1 动机

EPower的动机是为了提高数据中心的资源利用率，为了实现这一目的，文献【3】先对数据中心的工作负载进行分析，将其分为事务性工作负载和批处理工作负载两种。其中，事务性工作负载由短客户机请求组成，其性能是根据在响应时间目标内完成的请求吞吐量来衡量的，MapReduce批处理作业通常是一个长时间运行的程序，具有预期的完成时间。然后利用Wikipedia和 Facebook关于事务性工作和批处理作业的资源使用情况数据绘制了相关图，得到了以下一些结论，例如在提交作业后的执行过程中，批处理工作量相对稳定。但是对于事务性工作负载，工作负载量(例如吞吐量)是非常动态的。最终确定了三种资源调配方案

1. 优先处理事务性工作负载。在此时间间隔内，可以将更多资源分配给事务性工作负载，从而暂时延迟批处理作业。
2. 补偿批处理作业。延迟的批处理作业处理可以通过为批处理作业分配更多的资源来补偿其加速。
3. 竞争。最佳资源分配取决于工作负载之间的复杂交互。虽然事务性工作负载的响应性很重要，但也应该考虑即将到来的批处理作业截止日期。目标是以最大化整体数据中心性能的方式分配资源。

这些挑战促使我们开发了一种配置方案，该方案可以自动优化异构工作负载的弹性资源分配，同时考虑应用服务质量要求、时变工作负载流量和动态绿色电源。为此，我们提出了ePower，这是一种弹性的电源感知数据中心资源管理器。

### 3.4.2 EPower设计

EPower是一款面向异构工作负载的电源感知资源调配管理器，可在动态绿色电源的情况下最大限度地提高整体系统性能。关键的见解是，为了对事务性工作负载进行优先排序，可以暂时延迟(或减慢)长时间运行的批处理作业的处理。而EPower设计的关键是结合模糊性能建模和模拟退火资源优化的自动资源调配方案。每一个控制间隔，EPower都会搜索一个与整体系统性能最大化相关的资源分配。模拟退火组件随机选取资源分配，并查询模糊性能模型以预测工作负载性能。如果预测的系统性能明显优于当前的系统性能，EPower将接受新的分配。在每个控制间隔结束时，两个工作负载的性能都会反馈到EPower，以更新性能模型。为了更好地量化异构工作负载的系统性能，文献【3】中定义了一个指标goodput，指的是在一个时间间隔k内系统所完成的有效工作的总吞吐量，包括事务性工作和批处理工作。

### 3.4.3 模拟退火优化

为了在存在动态电源的情况下优化系统输出，文献【3】开发了一种高效的模拟退火算法来搜索最优资源分配，可以处理高度非线性的模型、混沌、噪声数据和多种约束。最初的退火过程是寻找能量最低的点。为了避免陷入局部最优，退火过程根据称为温度的时变参数探索相邻点。温度越高，访问邻近点的机会就越高。当T=0时，该过程简化为贪婪算法。模拟退火算法的核心是设计一个动态改变温度的冷却方案，以平衡勘探和开发。最优资源分配问题适合于退火过程。

### 3.4.4 模糊性能建模

ePower在模拟退火搜索过程中使用自学习模糊模型来预测系统的良好输出。模糊模型描述了异构工作负载的复杂行为。它能够在异构工作负载环境中通过一组语言规则描述不同工作负载及其资源分配之间的复杂非线性关系。它能够在广泛的操作条件下提供良好的性能预测，这对于优化和控制至关重要。

文献【3】中对有效吞吐量、资源分配和工作负载级别三者关系的建立的关系模型为：



其中E(k),r(k),w(k)分别代表有效吞吐量、资源分配和工作负载级别，其他变量分别为实验过程中一些参数分量的加权和。

### 3.4.5 系统环境

在一个大学原型数据中心搭建了一个测试平台，由五台戴尔PowerEdge R610服务器和两台戴尔PowerEdge R810服务器组成。总共有10个英特尔6核至强5650处理器、8个英特尔6核E7540处理器和704 GB内存。服务器通过10 Gbps以太网连接。VMware vSphere 5.0用于服务器虚拟化。VMware虚拟层模块控制分配给虚拟机的CPU使用限制(以兆赫为单位)。它还提供了一个支持远程管理的应用编程接口，例如，在实验为1.0.03的情况下，远程管理就是一个例子。Hadoop集群配置有11台虚拟机。每个虚拟机分配有1个VCPU和1 GB内存。一个虚拟机运行作业跟踪器并托管名称节点。其余10台虚拟机分别托管一个数据节点和一个任务跟踪器。每个Hadoop的DataNode 节点由单个映射和缩减槽组成。事务性工作负载托管在一个虚拟机中，该虚拟机具有4GB内存和4VCPU。所有虚拟机都使用装有Linux2.6.32版本的Ubantu10.04系统。

对于可再生能源，实验人员使用工作中提出的预测方法，根据我们当地城市的自然天气条件来估算绿色电力供应量。在实验中，我们利用这些数据来模拟真正的绿色发电和供电。和许多其他能源一样，我们考虑两种主要的可再生能源，太阳能和风能。我们假设可持续数据中心有七个太阳能电池板和一个微型涡轮机，每个都能够产生1.8千瓦的功率。

### 3.4.6 实验结果

实验测试并记录了在两天时间内在Epower算法控制下，数据中心资源分配以及能耗与实际供电的情况，具体的数据如下图1，2，3：

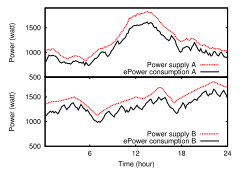


图1 供电与耗电曲线图

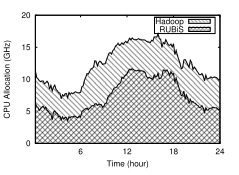


图2 第一天资源分配给Hadoop和RUBIS的数目

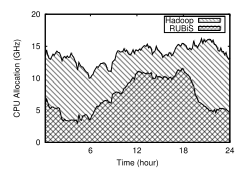


图3 第二天资源分配给Hadoop和RUBIS的数目

图1显示出了在第一天和第二天存在动态电源时的系统功耗。我们可以观察到，ePower能够通过自适应地控制异构工作负载的整体可用资源来控制功耗。这是由于其基于ARMIA模型的多间隔电源预测及其基于阈值的功率封顶机制，该机制确保实际功耗低于实际电源。

图2和3分别显示了在第一天和第二天，RUBiS和Hadoop之间的动态资源分配。Y轴CPU分配是分配给两个工作负载的所有频率的总和。请注意，Hadoop和RUBiS工作负载的两种不同资源分配在图2和3中没有重叠。斜线区域代表分配给Hadoop工作负载的资源，网格区域代表分配给RUBiS工作负载的资源。在这两天的第6到第18个小时之间，当RUBiS的工作负载和电源增加时，epower为RUBiS分配了更多的资源来满足其需求，并提升了整个系统的吞吐量。当RUBiS工作负载减少但电源仍然相对较高时，例如第二天的前六个小时和后六个小时，epower通过分配更多资源来补偿Hadoop。当电源稀缺且RUBiS工作负载相对较高时，例如在第一天的最后六个小时，ePower允许RUBiS和Hadoop之间的竞争，从而导致最佳的系统良好输出。

### 3.4.7小结

异构工作负载的资源调配是数据中心中一个重要但具有挑战性的问题。此文献中，研究人员重点关注自持续数据中心的问题，提出并开发了一种灵活的电源感知资源供应方法EPower，以提高整体系统性能，并控制动态绿色电源的系统功耗。最后通过实验证表明了算法具有的接近最优的性能、对动态电源可用性的弹性和改进的系统可靠性，对于未来数据中心能耗优化的研究发展具有一定的引导作用。

## 3.5虚拟机负载

将虚拟机视为数据中心负载，感知并遵循跨地域数据中心可再生能源的可用性，在数据中心之间放置或迁移虚拟机，称为面向虚拟机的空间负载均衡，本节归纳为“虚拟机放置与迁移”．虚拟机放置和前节请求分发类似，关键在于求解最佳的虚拟机放置策略；而虚拟机迁移和前节任务迁移类似，均采用数据建模和算法求解的方法．但由于虚拟机比任务大，在广域网中迁移虚拟机的代价难以忽略，因此大部分研究都考虑了迁移过程的网络通讯代价。

文献【4】仅提出了静态的虚拟机放置策略，没有考虑通讯代价。接下来就对其策略的详细内容进行介绍

### 3.5.1 介绍

文献【4】提出的策略主要针对的是离网绿色数据中心，文章关于该类型的数据中心的定义是部分或全部采用可再生能源的离网电力系统的数据中心。为了探究在绿色数据中心的投资成本是固定的，所有设备的设备折旧率是固定的情况下，如何处理虚拟机分配问题能获得较好的结果。

### 3.5.2 问题建模

首先为离网绿色数据中心定义了以下电力需求和供应：

D(t) =时间t时数据中心的总电力需求。

R(t) =时间t时可再生能源(太阳能和风能)发电机的总电力供应。

F(t) =时间t时化石燃料发电机的总电力供应

假设忽略不间断电源系统的影响，该系统仅提供短期备份以确保不间断供电，则电力需求和电力供应之间的简化关系可表示为





上式中E表示数据中心中用来补充绿色能源发电不足的化石能源成本，P(T)表示T时刻的能源价格，F(T)为T时刻使用的能源数量

然后建立任务x、虚拟机v，服务器s三者之间的关系公式：



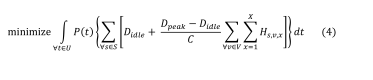
然后用上面的公式来计算服务器的使用率：



上式中C表示为每台服务器的最大计算处理能力。再定义Didle为物理服务器空闲时的功耗，Dpeak表示物理服务器100%忙碌时的功耗，根据观察后发现服务器的使用率与能耗呈线性关系，建立如下公式计算t时刻数据中心的总能耗：

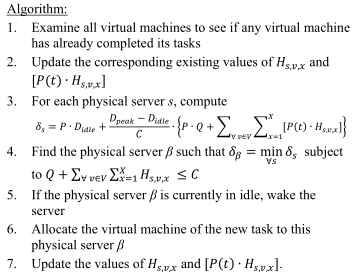


当R(t)=0时，最小化E的计算公式为：



### 3.5.3 算法描述

即使化石燃料价格P(t)保持不变，所有任务都提前知道，与上一节中获得的关于E(t)模型关联的优化问题是一个已知为NP难的整数规划问题。由于没有快速的算法来解决这个优化问题，文献【3】提出了一个贪婪的实时虚拟机分配算法。一旦任务到达数据中心，贪婪算法将立即将相应的虚拟机分配给最小化Eq的特定物理服务器。实际的执行流程如下图：



### 3.5.4 实验结果

通过对能源价格P(t)控制变量法，设置一些不同的其他参数，进行两组实验来探究效果

实验一：

设定Didle= 0.5, Dpeak= 3 .0，C = 10，M，对于所有X,Qx = 2到6之间的随机整数,特定类的任务完成时间与对应的Qx相同，两类的任务以随机顺序到达，所有任务的到达遵循泊松过程。图4显示了未处于空闲状态的物理服务器的平均数量，图5显示了相对于不同数量的任务(即M)而言，未处于空闲状态的物理服务器的平均利用率。在图4和图5中，我们比较了以下三种不同的设置:

(1)化石燃料的价格保持为常数10.0，

(2)化石燃料的价格在模拟中每单位时间连续增加1%，

(3)化石燃料的价格在模拟中每单位时间连续减少1%

我们发现化石燃料的价格变化影响了活动物理服务器的平均数量和活动物理服务器的平均利用率。价格变化与活动物理服务器的平均数量呈正相关，但与活动物理服务器的平均利用率呈负相关

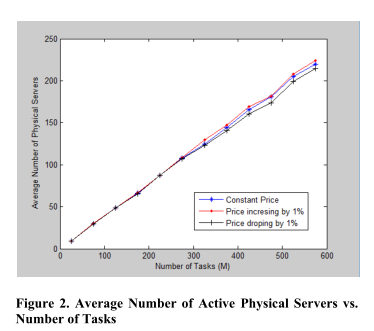


图4

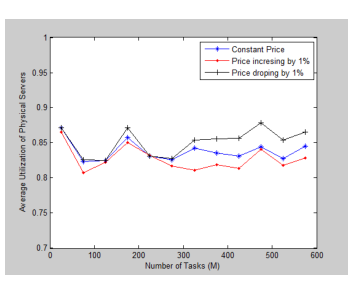


图5

实验二：

设定Didle= 0。0 5, Dpeak= 3 .0，C = 10，X = 2，对于所有X,Qx = 2到6之间的随机整数,特定类的任务完成时间与对应的Qx相同，其他与实验一相同。实验结果如图6和图7。

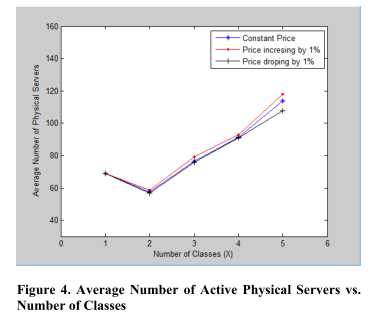


图6

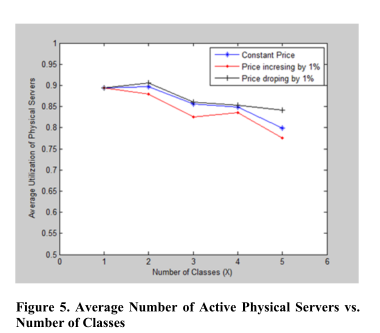


图7

最后发现相同的结果，分析发现所提出的算法对化石燃料价格的变化很敏感，

### 3.5.5 小结

本文证明了离网绿色数据中心的成本感知虚拟机分配问题是一个NP难的整数规划问题。并且已经证明，其提出的贪婪算法能够实现可扩展的性能，同时最小化化石燃料的能量成本并保持任务的服务质量要求。该算法有助于离网绿色数据中心的设计和实现。

# 未来发展和研究

数据中心耗能的原因是有许多，包括IT设备、照明设备、制冷设备等，本文中我们着重从IT设备上去总结近年来在数据中心能耗优化上的各种研究，当然在制冷设备等其他设备上的研究也是必不可少的，总结来说，将来在数据中心能耗优化上的研究对于数据中心发展是十分重要的，大致的方向可以我总结了以下几点：

1. 针对分布式系统存储数据策略上的优化，寻求在如何在满足需求下最佳的存储数据方式。
2. 对数据中心的功率进行合理的控制，缩小耗电和产电曲线的差距，实现能耗优化
3. 数据中心的负载均衡，实现在各个时间间隔内，在尽量满足QoS的前提下，实现系统吞吐量最大化，从实现能源的充分利用，减少能耗
4. 数据中心制冷环节，研究如何使用最少的能源消耗，实现数据中心设备制冷达到要求的情况，这个很多政府和企业都有尝试，比如水冷法、二次利用等

# 结束语

本文以综述的角度对数据中心的能耗优化研究进行了分类和分析，具体分类对象分为传统依靠化石能源供电的数据中心和混合供电的数据中心。对于传统数据中心，深入剖析了如何从HDFS存储策略上对数据中心能耗进行优化，对于混合供电的数据中心，主要从负载均衡的角度介绍了分别针对任务负载和虚拟机负载进行能耗优化的两种方法，发现了他们的一些优点和缺点。最后对未来数据中心能耗优化研究和发展进行了展望。

**参考文献**

1. 杨挺,王萌,张亚健,赵英杰,盆海波.云计算数据中心HDFS差异性存储节能优化算法[J].计算机学报,2019,42(04):721-735.
2. D. Cheng, J. Rao, C. Jiang and X. Zhou, "Elastic Power-Aware Resource Provisioning of Heterogeneous Workloads in Self-Sustainable Datacenters," in IEEE Transactions on Computers, vol. 65, no. 2, pp. 508-521, 1 Feb. 2016, doi: 10.1109/TC.2015.2428695.
3. Tingting Zhu, Hai Wang and Haikun Wei, "Cost-aware virtual machine allocation for off-grid green data centers," 2017 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops), Kona, HI, 2017, pp. 291-295, doi: 10.1109/PERCOMW.2017.7917574.