



中国石油大学(北京)
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM

《工程概论》

第6章 环境与可持续发展



授课教师：孙运雷

目录

CONTENTS

1

可持续发展的系统观构建

2

IT行业的环境影响

3

IT行业的可持续发展路径

4

全球框架下的IT责任

5

可持续发展系统观的工程实践



1

可持续发展的 系统观构建

1 多尺度系统认知

■时间维度：IT系统全生命周期分析

□芯片制造→数据中心运营→电子废弃物处理

■空间维度：局部能效优化与全球碳足迹传递的辩证关系

□矛盾焦点："局部能效优化可能引发全球环境负荷转移"

■价值维度：经济/环境/社会效益的动态平衡模型

□经济效益：IT系统的建设和运营需要大量投资，企业在追求利润的同时，也需要考虑能源成本和环境法规的合规性。

□环境效益：减少能源消耗和碳排放，降低电子废弃物对环境的污染，是实现可持续发展的重要目标。

□社会效益：IT系统的可持续发展不仅关系到企业的社会责任，也直接影响到社会的整体福祉，例如通过数字化技术推动其他行业的绿色转型。

2 系统交互机制

■蝴蝶效应：代码优化引发的能源消耗级联变化

□**代码优化**：例如，将Python代码优化为C语言，能效提升可达75倍。这种优化不仅减少了单个服务器的能源消耗，还能影响整个数据中心的能源使用。

□在《**GTA 5**》联机版加载过程中，开发者未采用高效的哈希表（Hash Map），而是通过暴力循环比对哈希值，导致每次加载需执行 $(63000^2 + 63000)/2 \approx 19.8$ 亿次的if语句。这一低效设计使加载时间长达6分钟以上，显著增加了CPU负载和能源消耗。

□黑客通过改用哈希表优化后，加载时间从6分钟降至1分50秒，能耗减少约70%。优化后单次能耗降至约2.5 Wh（0.0025度电），碳排放约1.25克 CO₂

□全球玩家的累计影响：

➢ 优化前年总能耗**1.52亿度电**，优化后年总能耗456万度电

➢ 年减排量：约7.37万吨 CO₂（相当于1.6万辆汽车的年排放量）

□**级联效应**：代码优化带来的能效提升可以减少服务器数量，降低数据中心的电力需求，从而减少整体碳足迹。

2 系统交互机制

■ 倍增效应：5G基站单站节能与总数激增的能耗悖论

- 单站节能：5G基站相较于4G基站，单站功耗降低了约40%，这是技术进步带来的显著节能效果。
- 总数激增：然而，为了满足5G网络的覆盖需求，基站数量大幅增加，导致整体能耗不降反升。这种现象被称为“倍增效应”，即技术进步带来的节能效果被数量增长所抵消。

■ 延迟效应：硬件淘汰引发的环境成本滞后期

- 硬件淘汰：随着技术的快速发展，旧设备被淘汰的速度加快。例如，Windows系统升级导致大量旧设备无法继续使用，不得不报废。
- 环境成本：淘汰的硬件设备最终成为电子废弃物，其处理和回收过程会产生环境成本。这些成本可能在淘汰后多年才显现，形成“延迟效应”。



2

IT行业的环境影响

1 直接影响

■ 1. 硬件制造的资源黑洞

□ 稀土金属的生态代价

- 稀土开采：每部手机消耗0.3g镝（相当于5个足球场的稀土尾矿）
- 中国白云鄂博矿区钕铁硼生产每吨磁体产生2000吨放射性尾矿
- 全球90%稀土供应链依赖中国矿区，放射性污染扩散半径达50公里

□ 芯片制造的“隐形水战争”

- 台积电工艺演进与水耗曲线（2015-2023）
 - 28nm：每片晶圆耗水80L
 - 7nm：每片耗水210L
 - 3nm：每片耗水300L
- 芯片制造：每片晶圆=300L超纯水+8,000度电（SEMI标准），相当于600瓶矿泉水
- 台积电3nm厂日消耗超纯水20万吨=20万居民日用水
- 台南科学园区地下水超采导致地层下陷速率达6.5cm/年（台湾省水利署监测数据）

1 直接影响

■2. 运行能耗的指数爆炸

□数据中心能耗结构

- 全球数据中心占 2% 电力消耗（超过阿根廷全国用电量）
 - 40%：制冷系统（PUE=1.5的典型值）
 - 35%：计算单元（GPU集群占55%）
 - 25%：网络与存储（SSD比HDD节能30%）
- 比特币挖矿：单笔交易耗电1173度=60万笔Visa交易，年耗电143亿度电（剑桥CCAF数据），超过荷兰全国用电量

□5G能效悖论

- 单站功耗下降40%（华为AAU技术），但全球基站总数激增300%（GSMA 2025预测），净能耗增长140%
- 中国5G基站年耗电量2025年将达三峡电站年发电量的1.8倍（工信部白皮书）

□虚拟化陷阱：云计算服务器虚拟化技术增加30%冗余负载，形成"隐性耗能链"

2 间接影响

■3.电子废弃物的毒性迁移

□全球电子垃圾流分析

- 5360万吨/年（UN数据），相当于4500座埃菲尔铁塔重量，仅 17.4% 被正规回收
- 合法回收：欧盟WEEE指令（回收率35%）
- 灰色路径：加纳阿博布罗西拆解场（铅污染超标100倍）
- 回收困境：金回收率<0.02%，但1吨手机含金量=35吨金矿石

□毒害物质迁移模型

- 拆解流程图：电子废弃物→贵金属提取→有害物质扩散路径
- 尼日利亚拉各斯铅浸出浓度达1.5%，污染半径达5公里，导致地下水铅超标230倍
- 焊接式主板：高温拆解耗时45分钟，贵金属损失率92%，产生二噁英浓度达0.6ng TEQ/m³（欧盟限值0.1ng）
- 卡扣式设计（Framework）：拆解耗时7分钟，元件复用率83%

2 间接影响

■1. 技术升级的淘汰链

□Windows 11的TPM 2.0强制要求导致：

- 全球6亿台设备提前报废（Gartner数据），产生电子垃圾增量480万吨
- 设备更换潮引发芯片需求激增，触发晶圆厂扩产的水资源压力

■2. 算法通胀的碳代价

□GPT-3训练碳排放：

- 碳排放量 = 算力 × 能效比 × 训练时长
- 单次训练排放552吨CO₂（相当于纽约⇌旧金山往返550次）
- 人类作家创作等量文本的碳排放仅为0.0003吨（基于笔记本电脑能效计算）
- 1篇AI生成文章=人类写作5000倍碳足迹

□软件膨胀指数 = 代码行数年增率 / 硬件能效提升率（当前值**1.78**）

2 间接影响

■3. 云服务的地理悖论

□爱尔兰数据中心集群：

- 爱尔兰数据中心集群（清洁能源占比 80%），但服务器芯片产自东亚（化石能源依赖度 65%）
- 消耗全国14%电力（2023年），迫使电网重启退役燃煤机组

■4. 数字化的减排杠杆

□中国国家电网AI调度系统：

- 降低输配损耗0.9个百分点（年节电540亿度，相当于三峡电站半年发电量）
- 动态电价算法使新能源消纳率提升至97.3%（2023年数据）

□视频会议的环境临界点：

- Zoom会议减排90%（vs航空差旅），但4K视频流能耗达标清视频的800%
- 替代航空差旅的临界值：单次会议参与人数>7人（MIT能源实验室模型）



3

IT行业的 可持续发展路径

1 绿色计算技术框架

■低功耗芯片设计

□ARM v9架构的能效比x86提升3.8倍（SPECint基准测试）

■算法与代码优化

□DeepSeek训练成本是OpenAI的2%，极致的代码优化

■数据中心能效提升

□浸没式液冷：将电力使用效率PUE压到1.0的终极方案

□技术对比：

- 传统风冷：PUE=1.6（腾讯天津数据中心）
- 自然冷却：PUE=1.2（阿里云张北数据中心）
- 液冷突破：PUE=1.03（华为廊坊实验中心）

■边缘计算降耗

□传输能耗对比：边缘处理 vs 云端传输=1:8

□边缘计算价值：减少 90% 的数据传输能耗（案例：自动驾驶本地决策）



2 循环经济实践

■模块化设计与可升级架构

- 问界 M9、M8、M7、M5：硬件可升级：激光雷达、华为星河通信系统、智能座舱
- 华为Mate 10手机：2017年发布，至今8年，可升级鸿蒙

■芯片级回收技术

- 生物浸取法流程：
 - 利用微生物分解电子废弃物中的贵金属
 - 回收率提升至 98%，污染减少 70%
- 数据：1 吨电子废弃物可提取 300g 黄金（传统方法仅 200g）

■开源硬件的长生命周期

- 树莓派案例：
 - 社区驱动维护：2012 年发布的初代型号仍在更新
 - 二次开发率达 65%，平均使用周期 5 年以上



4

全球框架下的IT责任

联合国2030年可持续发展目标

- 联合国2030年可持续发展目标（Sustainable Development Goals, **SDGs**）是2015年9月在联合国可持续发展峰会上通过的一项全球性计划，旨在从2015年到2030年间以综合方式解决社会、经济和环境三个维度的发展问题，设置了**17**个主要目标，引导全球转向可持续发展道路。



ICT赋能可持续发展目标

■ ICT赋能目标7（经济适用的清洁能源）

□ **智能电网**：通过AI调度优化可再生能源接入（如中国国家电网降低输配损耗0.9%，年节电540亿度）

□ **能源数字化**：华为数字能源解决方案支持光伏电站效率提升至98.6%，助力全球碳中和进程

■ ICT赋能目标9（产业、创新和基础设施）

□ **黑灯工厂**：无人化生产的终极形态。

□ **数字基础设施**：芯片、5G、算力中心、互联网、AI大模型成为新质生产力的基础。

■ ICT赋能目标12（负责任消费与生产）

□ **循环经济**：华为模块化手机设计（如Fairphone案例）延长设备生命周期，电子垃圾拆解效率提升80%

□ **供应链数字化**：区块链技术追踪稀土材料来源，减少非法开采与生态破坏

ICT促进可持续发展的四大路径

■1. 技术创新驱动

- 绿色计算：量子计算能耗效率提升 10^4 倍（D-Wave案例），边缘计算减少数据传输能耗92%
- 数字孪生：新加坡虚拟电厂优化城市能耗15%，空客A350制造废料减少28%

■2. 政策与全球协作

- 国际协议：中美半导体协议纳入水足迹条款，欧盟《数字产品护照》强制全生命周期追溯
- 国家战略：中国“新基建”投资超3.5万亿元，5G网络覆盖99%行政村

■3. 数字包容与公平

- 农村数字化：云南“5G+数字庄甸平台”实现农业生产数字化，带动农民增收30%
- 教育普惠：华为TECH4ALL项目覆盖46国，22万师生接入数字教育资源

■4. 企业责任框架

- ESG整合：将SDGs目标嵌入企业战略（如英特尔将社会责任报告与SDGs对标）
- 开源生态：RISC-V架构延长硬件适用期3-5倍，推动技术普惠

案例：华为的全球责任实践

■绿色技术矩阵-华为数字能源的三重革命

□清洁发电：

- 智能光伏解决方案装机量全球第一（累计减少CO₂排放1.5亿吨）

□高效用电：

- 液冷服务器PUE=1.09（对比行业平均1.58）
- 5G Power解决方案降低基站能耗30%

□智慧储能：

- 沙特红海新城1300MWh储能项目（全球最大离网储能系统）

□华为数字能源解决方案的碳减排量（等效植树**40亿棵**）

■数字包容行动-技术普惠的非洲实践

□RuralStar Pro：

- 单站覆盖半径从5km扩展至50km（刚果金偏远矿区网络覆盖）

案例：华为的全球责任实践

■数字包容行动-技术普惠的非洲实践

□数字人才计划：

- “未来种子2.0” 培养10万+非洲ICT人才

□灾害应急：

- 南太岛国应急通信系统（台风灾害期间保障10万人通信）

□社会效益：数字鸿沟指数下降15%（接入互联网的偏远社区比例）

■透明治理体系-从供应链到董事会的责任链条

□管理创新：

- 绿色供应链：要求TOP 100供应商碳减排18%（2023年达成率92%）

□董事会ESG委员会：直接向联合国提交可持续发展进展报告

□数字信任：鸿蒙系统隐私保护通过欧洲GDPR认证

□行业影响：带动500+中国供应商通过ISO 14064认证



5

可持续发展系统观的 工程实践

1、多目标优化框架：性能 vs 能效 vs 成本

■1. 冲突分析与帕累托前沿

□三元悖论：芯片性能提升通常伴随能耗增加（如5nm芯片功耗较7nm增加15%），而低功耗设计可能牺牲性能或提高成本（如台积电3nm工艺研发投入超200亿美元）

□Pareto最优解集：

- 高性能模式：5
- 能效优先模式：
- 成本敏感模式：

年度	性能权重	能效权重	成本权重
2023	0.5	0.3	0.2
2024	0.4	0.4	0.2
2025	0.3	0.5	0.2

■2. 多目标决策工具

□加权系数法：2023-2025年华为芯片设计权重系数调增机制

□约束优化模型：限定碳排放阈值(如单颗芯片全生命周期 $\text{CO}_2 \leq 1.5\text{kg}$)，反向优化性能与成本

技术路线的环境评估工具



■LCA软件（生命周期评估软件）

□LCA是一种用于评估产品、过程或服务在其整个生命周期内对环境影响的工具。它通过量化分析从原材料提取、生产、使用到废弃处理的各个环节，帮助用户识别环境热点、优化资源利用，并促进可持续发展。

■LCA软件在芯片制造中的应用（Simapro vs Gabi对比）

维度	Simapro	Gabi
数据库	Ecoinvent 3.8（侧重欧洲供应链）	GaBi DB（覆盖亚洲供应链，含中国特化数据）
芯片建模	支持半导体材料毒性分析（如砷化镓）	集成TSMC/Samsung工艺能耗模型
建模粒度	单工艺步骤碳排放追踪	材料-设备-厂务系统级耦合分析
毒性物质评估	仅CO ₂ 当量	包含铅、汞等17种重金属迁移模型
碳核算	IPCC 2021标准	支持中国碳市场MRV规则

案例：华为Mate 60 Pro+ LCA报告解读



■全生命周期碳排放

□数据：单台手机全生命周期排放 85kg CO₂ (较上代降低15%)

- 原材料 (45%)：稀土开采与芯片制造
- 使用阶段 (35%)：日常充电与 5G 连接
- 报废处理 (20%)：贵金属回收与污染控制

□制造阶段突破：

- 国产化率90%缩短供应链半径 (运输碳排放↓32%)
- 海思芯片堆叠技术减少封装层数 (能耗↓18%)

□回收设计：

- 主板模块化拆解时间缩短至45秒 (行业平均300秒)
- 贵金属再生：生物浸取法提纯黄金 (纯度99.99%)
- 塑料闭环：30%再生塑料用于新品包装

案例：华为Mate 60 Pro+ LCA报告解读

■ 可持续设计亮点

□ 材料创新：

- 稀土用量减少 30%（自研芯片替代进口）
- 超韧、超轻纤维材料

□ 能效优化：

- 芯片 AI 调度降低 15% 日常功耗
- 无线充电效率提升至 95%

■ 循环经济实践

□ 回收体系：

- 全国 500 + 回收网点，旧机回收率提升至 40%
- 芯片级回收提取金、银等贵金属

□ 用户激励：以旧换新抵扣 1000 元，延长设备使用周期 2 年

本章案例分析作业

在第一章的复杂工程问题基础上，从可持续性视角重新审视该工程实践，运用本章所学理论与工具展开多维度评估：

- 1、绘制该工程的全生命周期流程图；
- 2、运用 LCA 工具计算该工程的碳足迹与水足迹；
- 3、构建多目标决策矩阵；
- 4、设计可持续性改进方案。



中国石油大学 (华东)
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM

谢谢大家!

