



操作系统设计创新的深度分析及未来展望

In-depth Analysis of Innovations in Operating
System Design and Future Prospects

学 校 浙江大学

学 院 软件学院

专 业 人工智能

姓 名 韩金兴

指导教师 赵新奎

2025 年 10 月 20 日

计算与应用范式剧变推动 OS 重思：数据中心规模化与资源解耦、GPU/TPU 等异构常态化、云与 Serverless 强调弹性与可观测，传统单机单内核难兼顾性能、扩展与安全。本文将围绕三条代表性路线——LegoOS（硬件资源解耦型分布式 OS）、DBOS（数据库为中心的操作系统）、FlexOS（隔离机制可定制的模块化 OS），分析其核心设计、优势与局限，并在比较分析与展望中勾勒 AI 时代 OS 的可能形态。

LegoOS 以“Splitkernel”重划 OS 边界：将进程、内存、存储分别交由不同节点上的监视器管理，彼此通过高速网络以消息协作而非共享内存与硬件一致性，应用侧以 vNode 抽象感知到的是“一台虚拟服务器”。为缓解远程内存开销，系统在计算端配置 ExCache 并采用两级分布式虚拟内存，兼顾快路径与全局均衡；在资源层面实现池化与弹性组合，并把故障域收敛到组件级。评测显示在合理缓存下性能接近单机 Linux，同时较“本地 SSD/交换”方案显著占优，但对网络延迟敏感、软件一致性治理与生态兼容仍是落地挑战。

DBOS 则主张“一切系统状态皆表”，将进程、调度、IPC 与文件元数据等统一映射为分布式内存数据库中的表，OS 服务以 SQL 事务实现，由此把一致性、可用性与可追溯能力“内建”为 ACID 性质和可查询状态。其四层堆栈为：最小 OS、分布式内存 DB（如 VoltDB）、以 SQL 实现的 OS 服务、与其上的应用。这一设计强化了全局可观测与策略一机制分离，但在超低延迟路径、数据库可靠性依赖与跨层边界处理上仍需进一步实证。

FlexOS 立足 LibOS，将 OS 细化为可组合组件，并在编译期为组件选择隔离强度与共享策略，覆盖同址空间轻隔离、地址空间/页表隔离、至虚拟化与新硬件（如 MPK）等多级手段。其价值在于让“安全一性能”成为可调参数：可信路径尽量直连以减小调用开销，不可信模块置于强隔离域缩小 TCB；同时支持针对不同应用生成差异化 OS 实例。实验表明在等价隔离下具备与 Linux 同量级或更优的效率，但多样配置也抬升验证与调试复杂度。

三项研究关注的层面不同，LegoOS 主要面向数据中心硬件架构的变革，聚焦于硬件资源如何在多个节点间组合管理的问题；DBOS 关注的是系统软件栈的重构，试图统一集群层次的 OS 服务和数据管理；FlexOS 则立足于单机操作系统内部，探索 OS 模块划分与隔离策略的弹性调整。可以看出，LegoOS 和 DBOS

都是在分布式/集群背景下提出的，而 FlexOS 回答的是“特定应用的操作系统应该如何定制”。因此三者并不相互排斥，反而可能形成互补：可以想象在一个 **LegoOS** 管理的解耦硬件集群上，运行着多个 **DBOS** 风格的服务框架进行全局资源调度，而每个具体应用服务的实例由 **FlexOS** 提供定制隔离——三者结合形成未来云操作系统的全貌。

操作系统本身的复杂策略越来越多，如何优化调度、预取、缓存大小等可能超出人工调参能力。AI 技术可以用于 OS 自适应优化。早期已有使用强化学习优化 IO 调度或内存管理的工作，而有了 DBOS 提供的丰富运行数据，这种学习将更有效。可以想象未来 OS 配有“OS 大脑”模块，持续分析系统数据，自主调整参数甚至重构某些代码路径（类似 JIT 编译优化）。这将使操作系统更智能地适应各种应用，包括不断变化的 AI 工作负载。

同时，随着生成式 AI 的发展，将来甚至可能出现用自然语言操纵操作系统的场景，如管理员通过对话让 OS 调整资源或检查问题。底层实现需要 OS 提供高层抽象接口，这与 DBOS 的可查询 OS 状态正相吻合。在这种人机接口上，AI 或成为 OS 的一个子系统，为用户请求匹配正确的底层操作。

OS 需要在多个物理隔离的机器之间协调计算而不泄露数据，这涉及安全隔离、网络调度的新组合。也许可以借鉴 **LegoOS** 的分布式架构，让不同机构的机器扮演不同资源角色（如一方提供数据内存，一方提供模型计算 CPU），OS 作为中介确保彼此数据不直接暴露但又完成训练，这类跨域协同的操作系统服务将在未来产生需求。

综上，AI 的蓬勃发展既对操作系统提出诸多挑战，又为 OS 领域注入新活力和思路。**LegoOS**、**DBOS**、**FlexOS** 等工作的创新为我们展现了可能的路径：通过解耦与重构提升弹性和扩展，通过数据化与智能化增强管理和优化，通过灵活隔离保障安全和性能。未来操作系统很可能是这些理念的综合体，一个弹性、智能、安全的数据中心操作系统，成为 AI 时代计算基础的坚实支撑。