

### 实验三：课程报告

姓名：潘梓月 学号：22551192 指导老师：赵新奎 实验日期：2025/10/27

通过研读 LegoOS、DBOS 和 FlexOS 三篇具代表性的研究成果，可以清晰地观察到，传统的、一体化的单机操作系统模型，正在被新一代的分布式、模块化和高可靠的设计思想所挑战。这三种设计思路分别从硬件资源组织、软件架构设计和系统状态管理三个维度，为未来操作系统的发展方向提供了富有启发性的探索。

LegoOS 提出了一种颠覆性的硬件解耦架构，其核心思想是将传统服务器的计算、内存和存储资源彻底分离为独立的组件。这种“分裂内核”设计直面了内存与处理器分离带来的性能挑战，在处理器端保留本地 DRAM 作为扩展缓存，同时依赖 RDMA 进行远程内存访问。在当时的技术下，LegoOS 不得不放弃跨组件的硬件缓存一致性，这一权衡反映了早期解耦架构面临的现实约束。

FlexOS 则从软件架构层面重新思考了操作系统的构建方式。该研究认为传统操作系统固定的隔离策略已难以满足现代应用对安全性和性能的多样化需求。基于库操作系统的设计理念，FlexOS 将内核功能分解为细粒度组件，允许开发者在编译或部署阶段根据具体应用场景，灵活选择隔离粒度和隔离机制。这种设计将安全与性能的权衡从固定的设计决策转变为可定制的配置形式，极大地增强了操作系统的适应性。

DBOS 从更根本的系统状态管理角度重新定义了操作系统架构。面对现代分布式系统状态管理的复杂性，DBOS 创新性地将分布式数据库管理系统置于操作系统的核心位置。通过将所有系统状态统一存储为数据库表，并将核心操作转化为数据库事务执行，天然获得了传统操作系统难以企及的可靠性、高可用性和事务一致性保障。

将这些前沿思想与我研究的 CXL 内存系统领域相结合，可以勾勒出清晰的技术演进路径。LegoOS 对内存解耦的设想具有显著的前瞻性，但受限于当时的互连技术，在延迟和一致性方面不得不做出妥协。而 CXL 技术的出现，特别是 CXL.mem 和 CXL.cache 协议，从硬件层面完善了解耦架构的关键支撑。CXL 提供的低延迟内存互连和原生硬件缓存一致性，使得 LegoOS 设想的计算节点与内存池分离架构具备了工程可行性。

然而 CXL 带来的灵活性也引入了前所未有的系统复杂性。管理复杂的 CXL 拓扑结构、内存访问偏好以及多样化的安全域，对传统操作系统的资源管理能力提出了严峻挑战。在此背景下，FlexOS 的灵活架构思想显得尤为重要。一个面向 CXL 内存系统的未来操作系统，必须实现策略与机制的彻底分离，允许应用程序

或管理员根据具体需求动态调整资源管理策略。这种架构能够充分利用 CXL 的安全特性，实现比传统虚拟化更轻量、更高效的隔离机制。

更重要的是，当数据中心部署了由 CXL 互连的大规模解耦内存池时，系统状态管理的复杂度将呈指数级增长。调试跨节点、跨插槽的缓存一致性问题，管理复杂的内存映射和权限设置，都可能成为系统可靠性的瓶颈。此时，DBOS 的状态管理范式提供了极具价值的解决方案。如果将整个 CXL 架构的元数据，包括内存归属、地址映射、一致性状态和安全域权限等，作为可信状态存入高性能分布式数据库，使每次状态变更都成为可追溯的数据库事务，那么调试复杂的数据一致性问题就可以从分析海量硬件日志转变为对系统溯源信息的结构化查询。

综上所述，这三项研究共同指明了操作系统架构演进的重要方向。从我的研究视角来看，面向 CXL 内存系统的理想操作系统应当是三者的有机融合：具备 LegoOS 所设想的解耦物理架构，运行 FlexOS 提供的灵活策略框架，并建立在 DBOS 保障的可信状态管理基础之上。这种融合架构不仅能够充分发挥 CXL 内存系统的技术优势，还能为未来数据中心的资源管理提供全新的解决方案。