

基于终端裸金属虚拟化的高性能云桌面

张晓东^{1,2} 刘学兵^{1,2} 王 晔^{1,2} 王则陆^{1,2}
ZHANG Xiaodong LIU Xuebing WANG Ye WANG Zelu

摘 要

当前，基于国产 ARM 架构的私有云桌面多采用 KVM+QEMU 虚拟化技术，虚拟机通常配备 virtio 或 qxl 等软件模拟显卡，缺乏 3D 加速能力，画面卡顿、显示效果不佳。为此，文章提出一种终端裸金属虚拟化方案，将虚拟机直接运行于终端本地，利用终端 GPU 实现 3D 加速与图形渲染，无需在服务器端配置专用硬件。通过改造操作系统启动流程、集成裸金属客户端，实现从远程 iSCSI 存储挂载虚拟机硬盘并引导启动虚拟机系统，显著提升虚拟机的图形显示性能与终端资源利用效率。实验表明，所提方案在 3D 加速和显示效果方面优于传统虚拟化方式，适用于全栈国产化环境下的高性能云桌面部署需求。

关键词

国产化；虚拟化；裸金属；云桌面

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.05.042

0 引言

随着云计算的深度普及与国产化进程的加速推进，市场对基于全栈国产化软硬件的私有云桌面需求持续攀升。当前，支持国产 ARM 架构服务器的主流云管理软件，大多以 KVM+QEMU^[1] 作为虚拟化技术底座；其管理的虚拟机所搭载的国产操作系统，也多以 Linux 为基础开发；终端设备则通过 SPICE^[2] 或 RDP 等远程协议，实现对虚拟机的访问与操作。

常规虚拟机多采用 virtio 或 qxl 显卡，这类纯软件模拟的显卡使用虚拟机 CPU 渲染画面，不具备 3D 加速能力，最终在终端侧呈现的虚拟机画面刷新卡顿、显示效果欠佳。虽然在服务器上配备的虚拟化专用 GPU 并透传^[3] 给虚拟机，再以视频流^[4] 形式向终端传输虚拟机画面，能在一定程度上缓解这一问题，但视频流传输需对虚拟机画面进行编码压缩，难免造成画质损耗；同时该方案还需额外投入虚拟化专用 GPU 的硬件成本，且没有充分利用终端侧的 GPU，形成资源浪费。就此，本文提出终端裸金属技术，在终端上直接运行虚拟机，依托终端的 GPU 实现 3D 加速与画面显示，无需在服务器端配置专用硬件，即可实现高性能云桌面。

1 简介

1.1 Linux 系统启动流程

国产 Linux 操作系统的启动流程如图 1 所示。计算机开

机后，BIOS 进行硬件自检和初始化，将控制权移交给硬盘上的 Boot Loader；Boot Loader 启动操作系统的内核，将 initrd 加载到内存中；initrd^[5] 提供了一个临时文件系统，initrd 里的 init 脚本会加载必要的驱动，帮助内核找到并切换至操作系统的 rootfs^[6]（根文件系统）；rootfs 中的 systemd（进程与服务管理工具）继续进行初始化，最终启动操作系统^[7]。

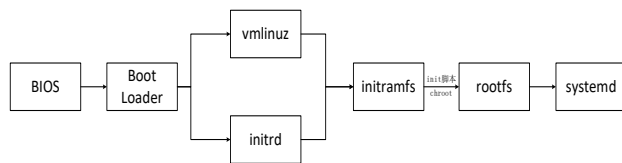


图 1 Linux 系统启动流程

1.2 虚拟机实现原理

虚拟机的本质是在一个物理计算机系统上，通过虚拟化管理软件模拟出一个或多个完整的、具有完整硬件系统功能的、运行在隔离环境中的计算机系统^[8]。

服务器上的云管理软件依托真实硬件资源，通过 QEMU 模拟虚拟硬件，并借助 KVM 实现硬件加速，最终构建出完整的虚拟机。当虚拟机运行在物理服务器上时，能够灵活调配 CPU、内存、硬盘、网络等资源。为提升虚拟机的硬盘性能、支持动态迁移等集群特性，通常会引入存储服务器（如 iSCSI^[9]），将其上的块设备映射至物理服务器，作为创建虚拟机硬盘的底层存储。如图 2 所示。

2 设计实现

2.1 总体设计

裸金属^[10] 虚拟化（Bare Metal Virtualization）是一种不

1. 超越科技股份有限公司 山东济南 250101
2. 山东省自主可靠计算技术与装备重点实验室
山东济南 250101

依赖于底层操作系统，直接在物理硬件上运行虚拟机的虚拟化技术，旨在减少虚拟化损耗。利用裸金属虚拟化技术，可将虚拟机运行在配备 GPU 的终端上，虚拟机里安装 GPU 驱动后，可使用终端 GPU 进行 3D 加速，实现近似终端物理机的显示效果。

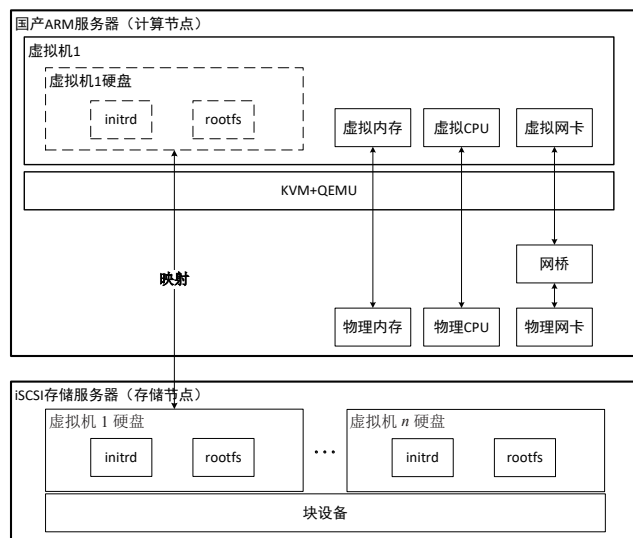


图2 虚拟机典型构成

在终端安装操作系统后，在 `initrd` 中集成裸金属客户端，并改造 `initrd` 里 `init` 脚本的启动流程，使其不再引导终端本地硬盘中的操作系统，而是通过裸金属客户端将 iSCSI 存储中保存的虚拟机硬盘映射到本地，进而解析出虚拟机磁盘文件中的 `rootfs` 并完成引导启动，如图3所示。

终端的 `initrd` 集成裸金属客户端后，即成为裸金属 `initrd`。为确保虚拟机硬盘中的操作系统能被终端的内核及裸金属 `initrd` 正常引导，终端与虚拟机所使用的操作系统版本需保持一致。裸金属虚拟机操作系统在终端上的启动流程如图4所示。

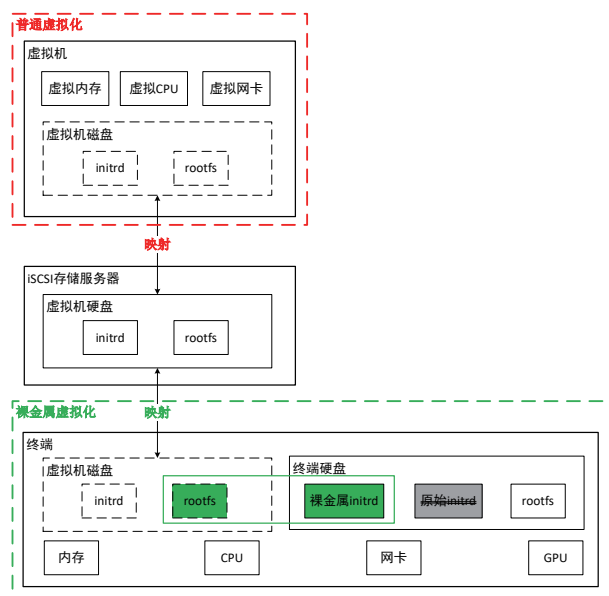


图3 裸金属虚拟化原理

2.2 裸金属 `initrd` 设计

为了实现裸金属虚拟化，需要向终端操作系统的 `initrd` 里集成裸金属客户端。

`initrd` 的 `init` 脚本用来初始化临时文件系统、加载硬件驱动模块、调用 `local_mount_root` 函数挂载本地硬盘中的 `rootfs`、切换并启动系统。对 `init` 脚本进行改造，使其不再调用 `local_mount_root`，转而调用裸金属客户端，即可改变 `initrd` 的工作流程。

`initrd` 是一个结构不完整的临时文件系统，缺少裸金属客户端需要的内核模块与工具软件。`rootfs` 是最终呈现给使用者、供日常操作的操作系统载体，包含了操作系统内核所需的所有内核模块，而且从系统源下载并安装工具软件后，能在 `rootfs` 中获得相应的可执行文件和库文件。解压 `initrd` 后，

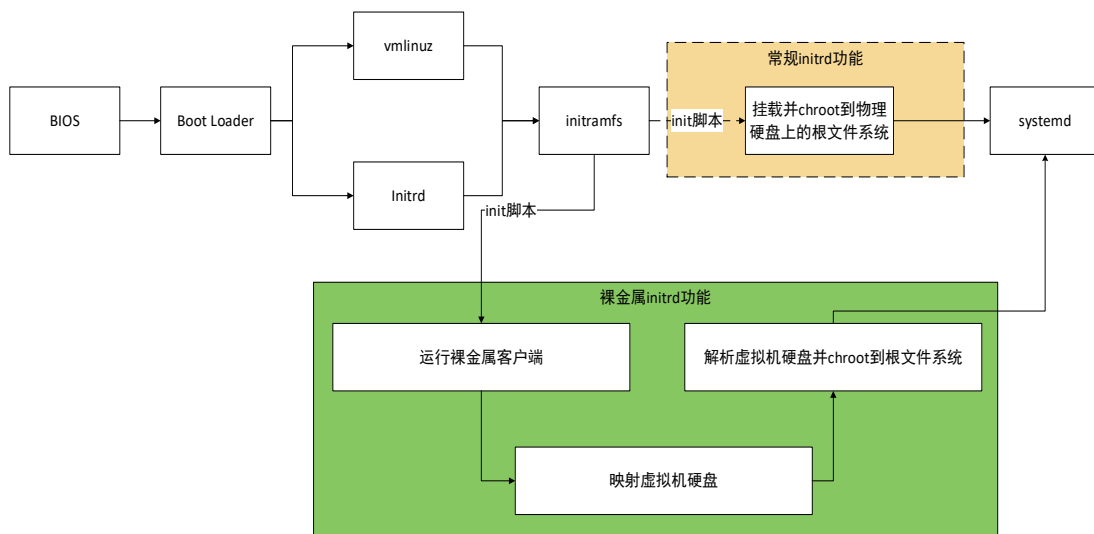


图4 裸金属虚拟机系统启动流程

从 rootfs 中移植内核模块与工具软件至其中，同时集成裸金属客户端，随后重新压缩 initrd，即可得到裸金属 initrd，如图 5 所示。

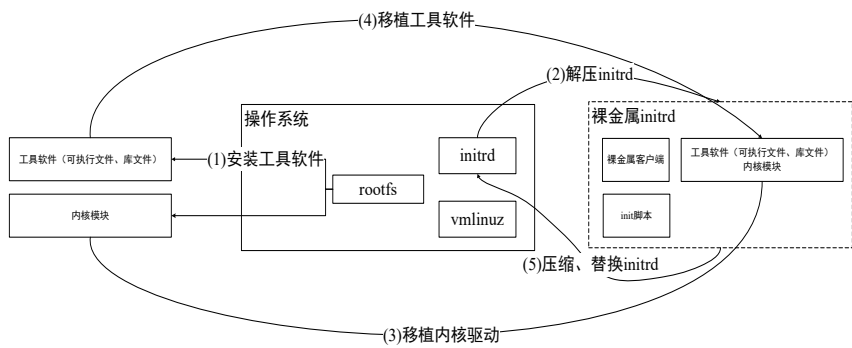


图 5 initrd 定制方法

2.3 裸金属客户端设计

基于 shell^[11] 编写裸金属客户端，通过 initrd 的 init 脚本自动调用后，用户可通过字符界面进行裸金属虚拟化的相关配置，实现虚拟机硬盘的远程挂载、解析、引导。

在 init 脚本启用 tty1、tty3 两个控制台：tty1 运行裸金属客户端，支持标准启动与快捷启动两种模式；tty3 为纯命令行，供调试与查看日志使用，如图 6 所示。



图 6 裸金属客户端架构

2.3.1 标准启动

在已安装裸金属 initrd 的终端上点开机，显示裸金属客户端的基本信息输入页，提示输入终端 IP、云管服务端 IP 和用户名。若输入信息符合正则校验，裸金属客户端会在后台配置终端 IP，然后进入密码输入界面。密码验证通过后，裸金属客户端将连接云管服务端，调用 API 获取虚拟机列表并显示。

虚拟机列表展示的是当前用户有权限访问且经云管理软件预先配置终端 IP 的虚拟机信息。每个虚拟机的信息包括虚拟机 ID、名称、所在计算节点、虚拟机硬盘名、虚拟机硬盘所在 iSCSI 存储名、iSCSI 存储服务器 IP、iSCSI 存储标识等。

通过键盘方向键，选择要启动的虚拟机，点击回车，裸

金属客户端会为选中的虚拟机加锁，避免该虚拟机在其他终端以及服务器上运行。裸金属客户端在确认连通 iSCSI 存储服务器后，会自动从 iSCSI 存储服务器映射块设备、解析虚拟机硬盘所在的逻辑卷，挂载虚拟机硬盘

的 rootfs。将本次裸金属启动用到的用户名、终端 IP 等信息保存到终端物理硬盘后，把控制权移交给 init 脚本，init 脚本 chroot 到虚拟机 rootfs，最终启动虚拟机硬盘里的系统。

由于 iSCSI 存储服务器上存在大量虚拟机硬盘，若不加筛选地全部映射到终端，操作系统启动后会持续扫描，产生大量网络 IO，造成带宽浪费。因此，裸金属客户端会屏蔽选中虚拟机硬盘之外的其他逻辑卷。

此外，操作系统安装时支持普通分区和 LVM 卷组两种分区模式，两种模式下系统 rootfs 的路径不同。裸金属客户端通过检测虚拟机磁盘上是否存在 LVM 卷组来区分其分区模式，并采用对应路径挂载 rootfs。标准启动的主要环节如图 7 所示。

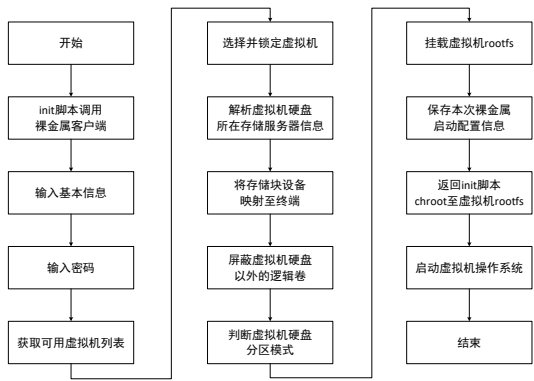


图 7 裸金属客户端标准启动流程

终端以裸金属方式运行虚拟机时，除硬盘采用 iSCSI 存储中的虚拟机硬盘外，GPU、CPU 等硬件均直接调用终端物理机的资源，能够利用终端 GPU 进行 3D 加速和显示，如图 8~9 所示。

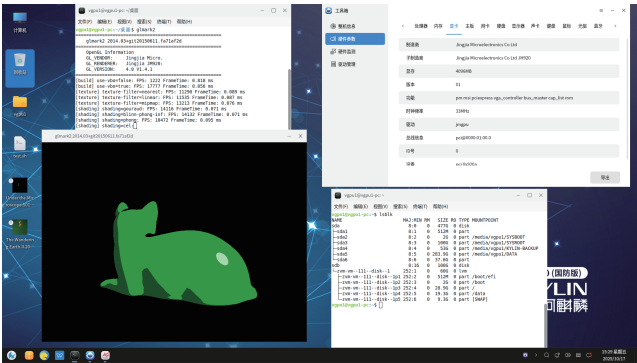


图 8 裸金属虚拟机 GPU、硬盘信息

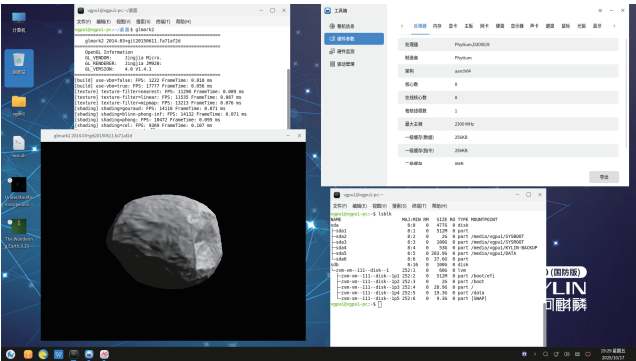


图 9 裸金属虚拟机 CPU 信息

2.3.2 快捷启动

终端以裸金属形式运行虚拟机时，会将本次裸金属虚拟化使用的终端 IP、云管服务端 IP、用户名、虚拟机等信息保存在终端的物理硬盘里的配置文件。下一次终端启动时，裸金属客户端会检查并加载该文件，将上一次裸金属虚拟化的各项配置呈现给用户，由用户选择启动方式，如图 10 所示。



图 10 裸金属客户端启动方式选择页

若选择执行标准启动，会进入此前标准启动流程；若选择进行快捷启动并输入密码，如果配置信息没有失效，即用户信息、云管服务端信息、虚拟机信息、存储信息仍然正确，裸金属客户端会自动从 iSCSI 存储服务器挂载、解析虚拟机硬盘，引导启动虚拟机硬盘里的操作系统。如果启动过程中遇到异常，会返回首页并要求用户重新选择启动方式。快捷启动的主要环节如图 11 所示。

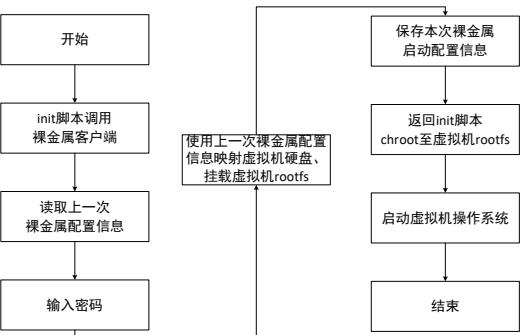


图 11 裸金属客户端快捷启动流程

3 实验数据测试结果与讨论

3.1 实验条件

实验设备主要为一台飞腾双路 S5000C/64 服务器和 2 台飞腾终端（D3000/D2000），终端配备景嘉微 JH920/JM9100 显卡，如表 1 所示。

表 1 测试环境

类别	项目	配置及性能
服务器	CPU	双路 飞腾 S5000C/64
	内存	512 GB DDR5
	硬盘	1 块 512 GB SSD
	网卡	千兆电口
	操作系统	国产自主云操作系统
虚拟机	硬盘	100GB
	操作系统	银河麒麟操作系统
iSCSI 存储服务器	网卡	千兆电口
交换机	网卡	千兆电口
终端 1	CPU	飞腾 D3000
	内存	16 GB
	硬盘	1 块 512 GB SSD
	GPU	景嘉微 JH920/JM9100
	网卡	千兆电口
终端 2	操作系统	银河麒麟操作系统
	CPU	飞腾 D2000
	内存	16 GB
	硬盘	1 块 512 GB SSD
	GPU	景嘉微 JH920/JM9100
终端 2	网卡	千兆电口
	操作系统	银河麒麟操作系统

3.2 实验组网图

裸金属虚拟化实验组网图如图 12 所示。

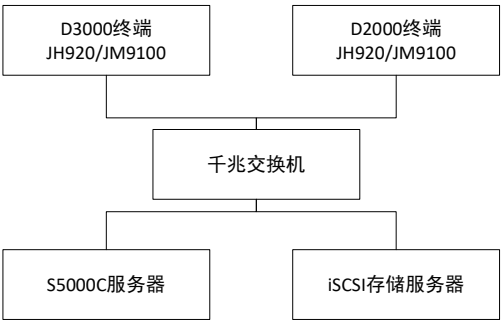


图 12 裸金属虚拟化实验组网图

3.3 实验结果与讨论

基于终端裸金属虚拟化的高性能云桌面测试结果如下表所示。其中表 2 列出裸金属虚拟机、终端物理机以及 virtio/qxl 虚拟机的 glmark2 测试结果，对比 3D 加速能力；表 3 列出裸金属虚拟机和 virtio/qxl 虚拟机播放高清视频时的综合效

果，对比显示能力；表 4 为裸金属虚拟机长期运行 glmark2 和播放高清视频时的稳定性测试。

表 2 glmark2 对比测试

终端	显卡	显存	物理机 lmark2	裸金属 lmark2
D3000	JH920	4 GB	9 658	9 577
D3000	JM9100	2 GB	5 344	5 359
D2000	JH920	4 GB	8 500	8 542
D2000	JM9100	2 GB	5 104	5 138
虚拟机	virtio/qxl		glmark2: 175	

表 3 裸金属虚拟机和 virtio/qxl 虚拟机的视频播放测试

方案类型	virtio/qxl 虚拟机	裸金属虚拟机
传输形式	spice- 像素流	终端本地显示
画面质量	高	高
画面流畅度	卡顿	流畅
画面延迟	20~160 ms	无
虚拟机内部硬件加速	否	—
终端硬件加速	否	是

表 4 稳定性测试

稳定性测试	测试时间/h	测试结果
glmark2	1	glmark2 正常运行
	6	glmark2 正常运行
	12	glmark2 正常运行
	24	glmark2 正常运行
播放 4k 视频	1	视频流畅播放
	6	视频流畅播放
	12	视频流畅播放
	24	视频流畅播放

从上述测试结果可知，本文提出的基于终端裸金属虚拟化的高性能云桌面方案，依托终端 GPU 实现的 3D 加速性能与画面显示效果达到终端物理机水准，显著优于采用 virtio/qxl 显卡的常规虚拟机。

4 结语

普通云桌面采用纯软件模拟的虚拟显卡，既无 3D 加速能力，显示效果也较差，要实现高性能云桌面，物理 GPU 的支撑必不可少。然而，支持分片技术的国产虚拟化专用 GPU 成本高昂，且其通过视频流向终端传输虚拟机画面时，会因画质压缩导致显示效果不及终端物理机水准。当前私有云在企事业单位逐步推广，市场对基于全栈国产化软硬件的高性能、低成本私有云桌面需求日益增长。本论文首先介绍了 Linux 系统启动流程和虚拟机实现原理，随后提出基于终端

裸金属虚拟化的高性能云桌面方案，并对其实现方式展开详细阐述，实现在现有终端物理机上直接运行虚拟机，使虚拟机借助终端 GPU 进行 3D 加速和高清显示，最终达成与终端物理机相当的使用体验。

参考文献：

[1] 罗利,周锡玲. Linux 环境下 KVM 虚拟化平台的构建 [J]. 信息技术与信息化 ,2021(4):91-93.

[2] 曾德生,骆金维,刘信雄,等. 基于 KVM 的桌面云管理系统设计与实现 [J]. 电脑编程技巧与维护 ,2017(23):62-63.

[3] 张政. 基于 KVM 虚拟化的显卡直传技术研究 [J]. 软件导刊, 2016, 15(10):142-144.

[4] 陈丹伟,张增. 一种提高 SPICE 虚拟视频性能的反馈丢帧策略 [J]. 计算机技术与发展 ,2014(1):136-139.

[5] 董晓明,李怀阳,赵振,等. 一种创建小型化 Linux 系统的方法 [J]. 计算机工程 ,2005,31(9):61-63.

[6] 谢宏文. 基于定制软件源的嵌入式操作系统设计文件系统构建方法 [J]. 数字通信世界 ,2024(11):74-76.

[7] 王士刚. Linux 系统的启动过程研究 [J]. 科技传播, 2011(24): 184.

[8] 赵丙科. 虚拟机技术原理与应用 [J]. 数字化用户, 2014(22): 127-127.

[9] 白勇,朱清新. 基于 iSCSI 的 IP SAN 网络存储技术及其安全性研究 [J]. 计算机研究与发展 ,2009,46(z2):12-17.

[10] 吴瑶裔. 裸金属纳管工具在私有云平台中的应用 [J]. 数字化用户, 2019,25(40):49.

[11] 许志聪. 基于 Shell 脚本的 KVM 虚拟化技术应用 [J]. 大众科技 ,2024,26(3):9-11.

【作者简介】

张晓东（1995—），男，山东济南人，硕士，工程师，研究方向：虚拟化、云计算，email: zhangxd@chaoyue.com.cn。

刘学兵（1983—），男，山东济南人，硕士，工程师，研究方向：虚拟化、云计算。

王晔（1993—），女，山东济南人，硕士，工程师，研究方向：虚拟化、云计算。

王则陆（1988—），男，山东济南人，硕士，高级工程师，研究方向：虚拟化、云计算。

（收稿日期：2025-10-23 修回日期：2026-05-13）