

第 3 章

元宇宙的引擎： 云计算





元宇宙作为一个虚拟的、多维度的数字世界，其复杂的虚拟环境需要庞大且强大的计算和储存资源的支持，而云计算能够为元宇宙提供充足的计算能力、存储资源、网络带宽等基础设施支持。与此同时，云计算的弹性扩展特性满足元宇宙的动态变化需求，能够灵活调整计算和存储资源，以确保元宇宙高效稳定运行。随着元宇宙的发展，将进一步推动云计算的创新和发展，共同构建数字化时代的未来。



3.1 云计算概述

云计算的基本内容将帮助读者建立对云计算全貌的系统性认识：云计算的概念，阐述其核心原理和基本理念；云计算的发展历程展现了技术演变趋势；云计算的基本特征是云计算模式的重要标志；云计算的部署模式能够反映其优势和适用场景；云计算的服务模式能够满足多样化的实际应用。

3.1.1 云计算的概念

当代信息技术的快速发展对计算、存储和网络传输等方面提出了更为迫切的要求，云计算作为一种基于互联网的服务模式，为用户提供了高效、灵活、安全和可靠的 IT 资源。用户可以按需访问和使用 IT 资源，而不必考虑资源购置、维护和管理等问题，为应用程序的快速开发、部署和管理创造了有利的条件。

2021 年，《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》将云计算纳入数字经济重点产业；2022 年国务院印发了《“十四五”数字经济发展规划》，肯定了以云计算为代表的数字技术与实体经济在更大范围、更广领域、更深层次的融合；2022 年中共中央办公厅、国务院办公厅联合印发的《关于加强新时代高技能人才队伍建设的意见》中指出要充分利用云计算等新一代信息技术加强技能人才工作信息化建设，建立健全技能人才库。由此可见，中国政府在促进云计算产业的发展和推动云计算技术在各个领域的应用方面采取了一系列具体政策措施。这些政策的实施有助于推动云计算产业的创新和发展，为企业和用户提供更加高效、便捷、安全的云服务。

云计算作为元宇宙技术架构中的底层核心科技之一，通过提供软件定义的基础设施使元宇宙生态运作起来，向元宇宙用户交付服务器、存储空间、数据库、网络和分析等资源平台。云计算以应用为目的，通过互联网将软、硬件连接起来，同时随着需求不



断变化而灵活调整，从而形成一种低消耗、高效率的虚拟资源服务的集合形式。在元宇宙中，云计算是实现虚拟世界的基础设施之一，可以为用户提供更加丰富、高效、安全、可靠的虚拟体验。目前，云计算已广泛应用于各个领域，如企业信息化、物联网、人工智能、游戏和电影等，为社会和经济的发展提供了强有力的支撑。

3.1.2 云计算的发展历程

云计算作为一种计算模式，是指通过网络连接的方式，按需获取计算资源的过程。随着云计算技术的不断发展，其应用场景越来越广泛，逐渐成为了数字经济发展的主要支撑。

(1) 云计算的概念启蒙。云计算的发展历程可以追溯到 20 世纪 60 年代。1961 年，在麻省理工学院百周年纪念典礼上，约翰·麦卡锡（1971 年图灵奖获得者）第一次提出了效用计算（utility computing）的概念。意味着计算机有望转变为一种公共资源，类似于生活中的水、电、煤气等公共设施，被每一个人寻常地使用，这在当时看来是天马行空的事情。

(2) 云计算的初期发展。1996 年，Compaq 首次在其内部文件中提及“云计算”一词，为这个前瞻性的理念命名。在 20 世纪 90 年代，许多有远见的企业纷纷驶入了信息技术的快车道，数据、产品、人员、财务的管理转向数字化，计算机成为了主要的利器。随着规模扩大，应用场景增多，数据运算的负荷增加，公司初期建设成本、电费、运营和网络维护成本成为了发展路上的“绊脚石”。赛富时（Salesforce）通过租赁式网页客户关系管理（customer relationship management, CRM）软件服务开创了软件即服务模式的时代。初创企业只需按月支付租赁费用，无需再投入资金购买软、硬件，也不用耗费人力成本在软件运营上。Salesforce 提出“将所有软件带入云中”的愿景成为了一项革命性举措，也成了云计算发展的一个重要里程碑。2002 年，出版商 O'Reilly 向亚马逊的杰夫·贝佐斯展示了一个叫作 Amaranck 的工具，能够定时访问亚马逊的网站并复制 O'Reilly 的销售数据及其竞争对手数据排名。随之，亚马逊开发了一个应用程序接口（application programming interface, API），第三方公司可以通过这个接口获取其产品、价格和销售排名。同年，亚马逊启用了云计算服务平台（amazon web services, AWS），当时该平台的免费服务可以让企业将亚马逊网站的功能集成到自己的网站上。

(3) 云计算的飞速发展。2006 年，当亚马逊第一次售卖其弹性计算能力作为云服务时，标志着云计算的商业模式诞生。随着亚马逊不断扩张和业务范围的扩展，另一科技巨头谷歌也加入了这项研究。2003—2006 年谷歌发表了 3 篇文章包含了分布式文件



系统的应用 Google File System、并行计算的模型 MapReduce 和分布式数据库的分布式存储系统 Bigtable，至此奠定了云计算的发展方向。谷歌拥有全球最大的搜索引擎以及面向个人的云服务产品，如 Gmail 等。凭借丰厚的广告收入，它对企业云服务领域并未赋予最高优先级。直到 2008 年 4 月，谷歌的云业务 (google app engine, GAE) 对外发布，通过专有 Web 框架，允许开发者开发 Web 应用并部署在 Google 的基础设施之上。此时，另一竞争对手微软在 2008 年发布云计算战略和平台 Windows Azure Platform，尝试将技术和服务托管化、线上化。2008 年之后，不管是在技术领域还是资本领域，云计算受到越来越多的关注。其中，2010 年 Netflix 宣布全量上 AWS，给市场注入了强心剂。后来者纷纷加码，2016 年微软耗费 260 亿美元收购 LinkedIn，拓展企业用户，2018 年 6 月微软又以 75 亿美元收购 GitHub，进一步提升企业服务能力。2015 年，AWS 46 亿美元的营收数据，不仅让外界知道了亚马逊的实力，也让大众清楚地认识到了云计算广阔的发展前景。与此同时，中国各大厂商纷纷加入这场浪潮，应运而生的阿里云、腾讯云、百度云、金山云和华为云等使得云计算在中国彻底爆发，根据中国信通院发布的 2022 年《云计算白皮书》显示，我国云计算市场呈现持续高速增长态势。

近年来，云计算产业经历了两个不平凡的阶段。首先，在新冠疫情出现后，基于云服务的远程办公、在线教育等应用得到了迅速发展，深刻地改变了社会的生产和生活方式，并在社会治理、疫情分析、资源调度等方面发挥了重要作用，为元宇宙的发展提供了推动力。接着，随着全球数字经济的发展，云计算成为企业和家庭数字化转型的必然选择，以云计算为核心，融合人工智能、大数据、区块链、物联网等技术，将实现企业信息技术软硬件的全面升级，提升社会运行效率。同时，云计算承担了类似操作系统的角色，是元宇宙的重要基础设施之一。

3.1.3 云计算的基本特征

云计算的核心思想是按需提供弹性的 IT 资源与服务，实现以虚拟化技术为核心、低成本为目标、动态可扩展的网络应用基础设施。云计算的 5 个基本特征是：基于互联网、按需服务、资源池化、安全可靠、资源可控。

(1) **基于互联网**。基于互联网，是指云计算将多台服务器通过互联网连接起来，服务器之间可以通过网络进行数据传输，用户可以远程访问云计算资源，无需在本地部署硬件和软件设备。

(2) **按需服务**。云计算可以根据用户的个性化需求增加或减少计算资源，用户只需要按照实际使用的资源量进行付费，按需购买，可以随时增加或减少资源容量，大大



降低了用户使用计算资源的成本，同时提高了资源的利用率。

(3) 资源池化。资源池化是指可以对多种资源进行统一配置，用户无需关心设备型号、内部的复杂结构、实现的方法或地理位置，只需专注于所需的服务，资源管理者可以十分便捷地进行资源的增减、管理和调度。

(4) 安全可靠。供应商必须采用各种冗余机制、备份机制、安全管理机制和海量数据灵活存取机制来保证云计算服务的持续性、安全性、高效性和灵活性，使用户得到便捷、专业的安全防护，节省时间与精力。

(5) 资源可控。资源可控是指方便获取云计算服务资源，并大幅提高计算资源使用率的同时还可以有效节约成本，将资源在一定程度上纳入控制范畴，以达到云计算服务资源可控的目的。

3.1.4 云计算的部署模式

根据云计算提供 IT 资源服务的用户对象，可以将云计算分成 3 种部署模式，即公有云、私有云和混合云。

(1) 公有云。公有云由云计算提供方部署提供，主要面向大众用户，所有入驻用户统称为租户。公有云服务方提供了基础架构、硬件和软件等 IT 资源，用户按需购买，能够有效降低资源维护成本和风险。公有云支持多租户同时使用，当一个租户空闲时，可以立即释放其占有的资源给其他租户，从而实现资源配置优化。对于中小型用户而言，公有云是一种安全、可靠、便捷、低成本的选择，但对于敏感行业和大型用户而言，公有云的安全风险和服务质量可能会受到其他租户的影响。

(2) 私有云。考虑到公有云的安全隐私风险，私有云只为特定用户提供云计算服务。私有云可以部署在企业数据中心的防火墙内，也可以部署在一个安全的主机托管所，能够最有效地控制数据、安全性和服务质量。私有云用于实现小范围内的资源优化，特别是对于具有严格安全和合规要求的企业而言，私有云是一种更加安全可靠的选择。当然，私有云的部署方式也带来了更高的运维成本。

(3) 混合云。公有云具备面向大众、成本低的优势，私有云在安全性上更有保障。混合云结合了公有云和私有云，作为一种较为理想的平衡方式。混合云使用私有云作为基础，保障了用户关键资源的安全性，同时结合公有云的服务策略，实现资源的优化管理，降低云计算部署成本。对于企业而言，混合云能够实现在保证安全性和合规性的前提下，灵活地使用公有云和私有云的资源和服务，从而满足不同业务需求。虽然混合云结合了公有云和私有云的特点，但两者之间资源的转化和兼容性问题，也会增加混合



云架构的复杂性和成本。

云计算 3 种部署模式的特点如表 3-1 所示。

表 3-1 各种云服务的特点

分类	特点	适合的行业
公有云	规模化、运维可靠、弹性强	游戏、视频、教育
私有云	自主可控、数据私密性好	金融、医疗、政务
混合云	弹性强，但架构复杂	金融、医疗

3.1.5 云计算的服务模式

根据云计算的服务模式，主要可以分为基础设施即服务（infrastructure as a service, IaaS）、平台即服务（platform as a service, PaaS）和软件即服务（software as a service, SaaS）。

（1）基础设施即服务。基础设施即服务是一种商业模式，通过 Internet 连接，用户可以从完善的计算机基础设施中获取服务，例如服务器、虚拟机、存储、网络和操作系统等硬件资源，这种服务模式的核心思想是将数据中心和基础设施等硬件资源通过 Web 分配给用户。IaaS 模式提供了一种灵活、可扩展、按需定价的基础设施服务，用户可以根据自己的需求使用和管理硬件资源，将计算资源变为可伸缩和弹性的资源池，以适应不同的业务需求。

（2）平台即服务。平台即服务指将软件研发的平台作为一种服务，PaaS 提供方在云上构建了一个开发平台，其中包含了开发所需的软件工具、开发语言、数据库、中间件、操作系统等资源。开发人员可以通过 PaaS 平台访问这些资源，编写和运行应用程序，而无需自己购买和设置硬件、操作系统等基础设施。PaaS 平台通常还提供自动化的扩展和负载均衡功能，应用程序能够根据需要快速扩展，并保持高可用性。

（3）软件即服务。软件即服务是一种基于互联网提供软件的模式，用户可以通过租用互联网上的软件来管理企业的经营活动，而无需购买软件。SaaS 模式相比于传统的软件购买模式具有更低的使用成本，尤其对于大型软件，使用成本的降低尤为明显。此外，由于软件托管在服务商的服务器上，用户可以省去管理维护软件的成本，而且 SaaS 服务商通常会提供更高的可靠性和安全性保障。因此，SaaS 模式已经被广泛应用于各个行业，成为了企业管理软件的重要选择。



3.2

云计算的关键技术

云计算作为当今元宇宙领域的重要范式，其核心在于有效管理和利用大规模的分布式资源，这依赖于多项关键技术的支持。本节系统介绍云计算的各项关键技术，包括虚拟化技术、云存储技术和分布式系统，并阐述这些关键技术的协同应用。

3.2.1 虚拟化技术

虚拟化技术是一种将计算资源进行抽象和逻辑分离的关键技术，实现了计算资源的高效利用、安全隔离和灵活便携。它包括裸金属虚拟化、寄居虚拟化和操作系统虚拟化等不同架构，采用虚拟机监视器作为关键组件，使得操作系统和应用程序能够独立于底层硬件运行，极大地提高了整个系统的效率和灵活性。不同类型的虚拟化产品，为构建多样化、高效的虚拟化环境提供了多种选择，推动现代云计算领域的不断发展和创新。

1. 虚拟化技术概念

虚拟化技术是一种基于资源管理的技术，它通过将计算机的各种实体资源如服务器、网络 and 存储器等抽象转换，打破实体结构不可分割的障碍，使用户以更好的方式来应用这些资源。虚拟化技术将底层物理硬件隐藏，让多个操作系统可以透明地使用和共享。虚拟化资源包括计算资源、存储资源和网络资源等，不受现有资源的架构方式、地域等限制。

在虚拟化技术中，操作系统和底层物理服务器之间存在一个提供平台虚拟化的中间软件层，称为 Hypervisor，它允许多个操作系统和应用共享一套基础物理硬件，可视为虚拟环境中“元”操作系统，能够协调访问服务器上所有物理设备和虚拟机，也叫作虚拟机监视器（virtual machine monitor, VMM）。在虚拟机上运行的操作系统称为客户操作系统（guest OS）。当物理服务器启动并执行 Hypervisor 时，它会给每台虚拟机分配适量的内存、CPU、网络和磁盘，并加载所有虚拟机的客户操作系统，实现资源的动态调度，提高资源利用率。Hypervisor 将软件、硬件等资源虚化处理，使客户操作系统可以透明地使用这些资源，而无需考虑它们的底层实现细节。Hypervisor 将软件、硬件等资源虚化处理后，可以根据需求实现动态调度，提高资源利用率。典型的虚拟化技术架构如图 3-1 所示。

虚拟化技术已经广泛应用于云计算、虚拟桌面和服务器等领域，成为数字经济时代



的一项重要技术，它具有以下优点。

(1) **利用率高**。通过在一台主机上运行多个虚拟机，可以高效充分地利用主机的硬件资源，提高利用率。

(2) **独立性好**。每台虚拟机是相互独立的，即使一台虚拟机崩溃，也不会对其他共享同一硬件资源的虚拟机产生影响，显著提升了整个系统的安全性。

(3) **移动性强**。传统软件捆绑在硬件上，转移一个软件至另一台服务器上需要耗费大量时间和精力。而现在虚拟机与硬件是相互独立的，因此可以在本地或远程虚拟服务器上低成本地迁移，具有极高的灵活性和便捷性。

(4) **易恢复**。虚拟化技术还可以通过快照技术 (snapshot) 记录下某一时间点的虚拟机状态，一旦错误发生，可以快速恢复虚拟机状态，保证系统的高可用性。

2. 虚拟化架构

随着虚拟化架构技术的发展，如今已涌现出多种类型的虚拟化解决方案。根据应用场景的不同，采用不同的实现方式，从而衍生了不同的虚拟化架构，其核心是基于计算机分层设计架构实现的。通过在不同层次上引入虚拟化平台软件，根据层次结构从底向上划分，可以把虚拟化架构分为以下 3 类。

(1) **裸金属虚拟化**。裸金属虚拟化是一种云计算虚拟化架构，如图 3-2 所示，它允许用户直接访问物理硬件，而不是在虚拟机上运行。在裸金属虚拟化中，硬件层上运行一个 Hypervisor，它将物理服务器资源抽象化并提供给用户。与传统虚拟化不同的是，裸金属虚拟化不需要在虚拟机上运行操作系统和虚拟机监视器，因此可以实现更高的性能和更低的延迟。这种虚拟化架构通常用于需要更高性能和更接近物理硬件的应用程序，例如大型数据库和高性能计算等。

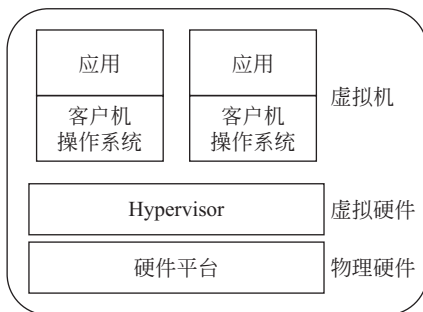


图 3-1 虚拟化技术架构

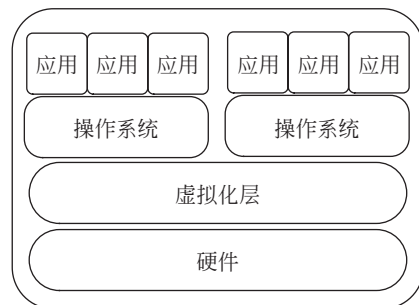


图 3-2 裸金属虚拟化架构



(2) 寄居虚拟化。如图 3-3 所示，寄居虚拟化就是在宿主机操作系统上安装虚拟化应用程序，通过虚拟化应用程序为用户构建一个虚拟化环境。在这个虚拟化的环境中，可以安装各类操作系统，满足用户对操作系统的要求。

(3) 操作系统虚拟化。如图 3-4 所示，操作系统虚拟化，也称为容器化，利用操作系统自身的特性，允许多个相互隔离的用户空间实例的存在。这些用户空间实例也称容器。普通的进程可以看到计算机的所有资源，而容器中的进程只能看到分配给该容器的资源。操作系统虚拟化是将操作系统所管理的计算机资源（包括进程、文件、设备、网络等）分组，然后交给不同的容器使用，容器中运行的进程只能看到配给该容器的资源，从而达到隔离与虚拟化的目的。

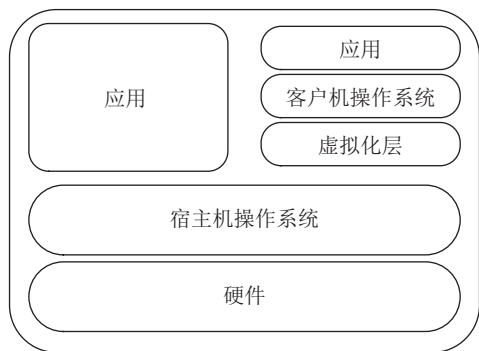


图 3-3 寄居虚拟化架构

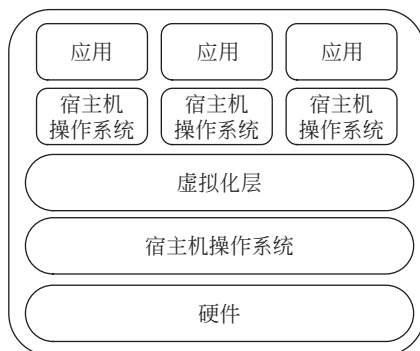


图 3-4 操作系统虚拟化架构

3. 常见的虚拟化产品

虚拟化技术在计算领域得到了广泛应用，许多公司和组织开发了各种虚拟化产品。以下将对常见的虚拟化产品进行介绍。

(1) KVM。基于内核的虚拟机（kernel-based virtual machine, KVM）是一种用于 Linux 内核中的虚拟化模块，是硬件支持虚拟化技术的 Linux 的全虚拟化解决方案。KVM 采用寄居虚拟化架构，可以将 Linux 内核转换成一个裸金属虚拟化架构的 Hypervisor。

(2) Xen。Xen 是最早的开源虚拟化引擎，源自剑桥大学的一个开源项目。Xen 可直接运行在硬件上的软件层，它能够在计算机硬件上同时运行多个客户操作系统。

(3) VMware ESXi。VMware ESXi 是 VMware 的企业级虚拟化产品，它是一个用来管理硬件资源的特殊操作系统，可以直接运行在裸机上。虚拟化内核（称为 VMkernel）负责对硬件及虚拟机的管理。

(4) Microsoft Hyper-V。微软推出的一款虚拟化产品，首次内置于 Windows Server



2008 中，与 VMware ESXi、Xen 一样采用裸金属虚拟化架构，直接运行在硬件之上。

4. 虚拟化类型

根据不同的应用场景和性能需求，可以选择合适的虚拟化类型来部署和管理应用以及服务，最常见的有服务器虚拟化、存储器虚拟化、容器虚拟化和网络虚拟化。

(1) **服务器虚拟化**。服务器虚拟化是虚拟化技术最早细分的子领域之一，其起源可以追溯到 20 世纪 60 年代，并逐渐显现出其重要的价值。服务器虚拟化是一种方法，能够通过区分资源的优先次序并随时随地将服务器资源分配给最需要它们的工作负载来简化管理和提高效率，从而缩减为单个工作负载峰值而储备的资源。与所有颠覆性技术一样，服务器虚拟化技术先是悄然出现，最终因为节省能源的合并计划而得到了认可。如今，许多公司使用虚拟化技术来提高硬件资源的利用率，进行灾难恢复，提高办公自动化水平。

服务器虚拟化技术具备许多优势：通过在物理服务器上创建多个虚拟机，并将其分配给不同的应用程序或用户，可以更好地利用服务器的处理能力和存储资源，提高资源利用效率；通过统一的管理界面，可以集中管理所有虚拟机，包括配置、监控、备份和恢复等操作，简化了管理流程，减少了维护工作的复杂性和成本；可以通过复制和克隆虚拟机的方式快速创建新的虚拟机，并将其配置为特定的工作负载，加快工作负载的部署过程，提高业务的灵活性和响应速度；可以根据应用程序的需求，灵活地分配和调整虚拟机的资源，如 CPU、内存和存储等，以优化应用程序的性能表现，并确保不同虚拟机之间的资源隔离和互不干扰；当其中一个虚拟机出现故障时，其他虚拟机仍可继续运行，实现故障隔离和容错能力，提高了服务器的可用性和稳定性；通过将多台服务器上的虚拟机集中到单个物理服务器上运行，可以节省大量硬件资源，减少了服务器数量的剧增，简化了服务器架构和管理的复杂性。

(2) **存储器虚拟化**。随着信息业务的快速发展，存储系统网络平台已经成为一个关键的核心平台，积累了大量高价值的数据。因此，对存储平台的要求逐渐提高，包括存储容量、数据访问性能、数据传输性能、数据管理能力和存储容错能力等多个方面。因此，应运而生的存储器虚拟化技术成为虚拟化技术的一个子领域。存储器虚拟化技术在计算机技术和相关信息处理技术的推动下发展起来，最早始于 20 世纪 70 年代。当时，由于存储容量和内存容量成本高，而且容量小，大型应用程序或多程序应用受到了很大的限制。为了克服这种限制，人们采用了虚拟存储技术，其中最典型的应用是虚拟内存技术。

存储器虚拟化技术具有多方面的优势：通过将物理存储器资源划分为多个虚拟存储



器，多个虚拟机或应用程序可以共享同一块物理存储器，从而更高效地利用存储资源，减少存储空间的浪费；管理员可以根据实际需求动态分配和调整虚拟存储器的大小，以满足不同应用程序或虚拟机对存储空间的需求，使系统能够适应不断变化的工作负载和存储需求，提供了灵活性和可扩展性；通过提供统一的管理接口，管理员可以集中管理虚拟存储器，包括创建、配置、监控和备份等操作，降低了管理和维护的复杂性；可以根据应用程序的需求，灵活地分配和调整虚拟存储器的资源，以提高系统的整体性能；不同的虚拟机或应用程序可以在独立的虚拟存储器中运行，一个虚拟存储器的故障不会影响其他虚拟存储器，具备故障隔离和容错能力。

(3) 容器虚拟化。容器虚拟化是一种重要的虚拟化技术，它在现代计算环境中具有广泛应用。容器虚拟化通过在操作系统层面创建隔离的容器，使应用程序能够在相互独立的运行环境中运行，实现了资源的高效利用和应用程序的快速部署。

容器虚拟化具有多方面优势：实现了轻量级的虚拟化，使容器能够与宿主机操作系统共享内核和系统资源，因此，容器的启动和运行速度相比于传统的虚拟机更快；每个容器都拥有独立的运行环境，彼此实现了有效的隔离，应用程序在容器内运行时不会相互干扰，高效地保护应用程序的安全性和稳定性，防止恶意软件或误操作对其他容器或宿主机操作系统造成影响；具备极强的可移植性和可扩展性，无需关注底层操作系统和硬件的差异；能够根据需求快速创建和部署多个相同或相似的容器实例，实现应用程序的弹性和可伸缩性；通过容器编排工具，可以对容器进行集中管理、监控和自动化操作，方便管理大规模的容器集群，实现应用程序的自动化部署、弹性伸缩和故障恢复等功能。

(4) 网络虚拟化。网络虚拟化是一种关键技术，在现代计算环境中扮演着重要角色。它通过将物理网络资源划分为多个虚拟网络，实现了高效利用和灵活管理网络资源。网络虚拟化技术包括了对网络设备、链路、子网、IP 地址和安全策略等网络资源的虚拟化。

网络虚拟化具有多方面的优势：能够实现资源共享，多个虚拟网络可以共享同一套物理网络设备和带宽资源，更高效地利用网络资源；提供了网络隔离和安全性增强的能力，不同的虚拟网络在逻辑上相互隔离，有效防止潜在的安全风险和网络攻击；具备灵活性和可扩展性，可以根据实际需求动态分配和调整虚拟网络的资源，以适应不同应用程序或用户对网络带宽和拓扑结构的需求变化；简化了网络管理和维护的过程，通过统一的管理接口集中管理虚拟网络，降低了管理和维护的复杂性；实现了故障隔离和容错能力，提高了网络的可靠性，确保在故障情况下网络能够快速恢复正常运行。

元宇宙的构建需要大量的计算资源和存储资源，而虚拟化技术有助于优化资源的利用效率，提高整体的性能和可靠性。首先，虚拟化技术可以用于构建元宇宙的基础设施，包括服务器、存储设备、网络设备等。通过将物理设备虚拟化为多个虚拟设备，可以更