Red Hat Enterprise Linux 9

RHEL 中逻辑卷的重复数据删除和压缩。

在 LVM 上部署 VDO 以增加存储容量

Last Updated: 2024-08-02

Red Hat Enterprise Linux 9 RHEL 中逻辑卷的重复数据删除和压缩。

在 LVM 上部署 VDO 以增加存储容量

法律通告

摘要

使用逻辑卷管理器(LVM)中的 Virtual Data Optimizer (VDO)功能来管理去重和压缩的逻辑卷。您可以将 VDO 作为 LVM 逻辑卷(LV)的一种类型来进行管理，类似于 LVM 精简配置的卷。 您可以在 LVM (LVM-VDO)上部署 VDO，来为块访问、文件访问、本地存储和远程存储提供去重的存储。您还可以配置精简配置的 VDO 卷，以避免 VDO 卷的物理空间被 100% 使用。

目录

对红帽文档提供反馈

我们感谢您对我们文档的反馈。让我们了解如何改进它。

通过 Jira 提交反馈（需要帐户）

1. 登录到 Jira 网站。
2. 点顶部导航栏中的 **Create**
3. 在 **Summary** 字段中输入描述性标题。
4. 在 **Description** 字段中输入您的改进建议。包括到文档相关部分的链接。
5. 点对话框底部的 **Create**。

第 1 章 LVM 的 VDO 介绍

Virtual Data Optimizer（VDO）为存储提供内联块级的重复数据删除（deduplication）、压缩和精简置备。您可以将 VDO 作为逻辑卷管理器 (LVM) 逻辑卷管理器 (LVM) 逻辑卷 (LV) 类型进行管理，类似于 LVM 精简配置的卷。

LVM (LVM-VDO)上的 VDO 卷包含以下组件：

VDO 池 LV

- 这是用于 VDO LV 存储、重复数据删除和压缩的后端物理设备。VDO 池 LV 设置 VDO 卷的物理大小，即 VDO 可保存到磁盘中的数据量。
- 目前，每个 VDO 池 LV 只能有一个 VDO LV。因此，VDO 会单独压缩每个 VDO LV。存储在独立 LV 上的重复数据不会影响同一 VDO 卷的数据优化。

VDO LV

- 这是 VDO 池 LV 上的虚拟置备设备。VDO LV 设定 VDO 卷的置备和逻辑大小，即应用程序在重复数据删除和压缩发生前可写入卷的数据量。

kvdo

- 载入 Linux 设备映射器层的内核模块提供去除重复数据的、压缩的和精简配置的块存储卷。
- **kvdo** 模块公开 VDO 池 LV 用于创建 VDO LV 的块设备。然后，系统将使用 VDO LV。
- 当 **kvdo** 收到一个读取 VDO 卷中数据的逻辑块的请求时，它会将请求的逻辑块映射到底层的物理块上，然后读取并返回请求的数据。
- 当 **kvdo** 收到一个向 VDO 卷写数据块的请求时，它首先检查请求是 DISCARD 还是 TRIM 请求，或者数据是否统一为零。如果满足其中任何一个条件，则 **kvdo** 会更新其块映射并确认请求。否则，VDO 会处理并优化数据。
- kvdo 模块在内部利用卷上的通用重复数据删除服务 (UDS) 索引，并分析数据，因为它被接收用于重复数据。对于每个新的数据，UDS 可以快速地判断该数据是否与之前存储的数据相同。如果索引发现匹配项，则存储系统可以验证该匹配项的准确性，然后更新内部引用以避免多次存储相同的信息。

如果您已经熟悉 LVM 精简配置的实现结构，您可以参考表 1.1 以了解 VDO 的不同方面如何提供给系统。

表 1.1. LVM 和 LVM 精简置备的 VDO 组件的比较

	物理设备	置备的设备
LVM 上的 VDO	VDO 池 LV	VDO LV
LVM 精简配置	精简池（thin poll）	精简卷（thin volume）

因为 VDO 是精简置备的，所以文件系统和应用程序只会看到使用的逻辑空间，而不是实际可用的物理空间。使用脚本来监控可用的物理空间，并在使用超过阈值时生成警报。有关监控可用的 VDO 空间的详情，请参考 Monitoring VDO 部分。

第 2 章 LVM-VDO 要求

LVM 上的 VDO 对其放置和系统资源有一定要求。

2.1. VDO 内存要求

每个 VDO 卷有不同的内存要求：

VDO 模块

VDO 需要固定的 38 MB RAM 和几个可变的数量：

- 每个 1 MB 的配置的块映射缓存需要 1.15 MB RAM。块映射缓存至少需要 150MB RAM。
- 每个 1 TB 逻辑空间需要 1.6 MB RAM。
- 由卷管理的每 1 TB 物理存储的 268 MB RAM。

UDS 索引

通用重复数据删除服务(UDS)至少需要 250 MB RAM，这也是重复数据删除使用的默认数量。您可以在格式化 VDO 卷时配置值，因为值还影响索引所需的存储量。
UDS 索引所需的内存由索引类型和重复数据删除窗口所需大小决定：

索引类型	重复数据删除窗口	备注
密度	每 1 GB RAM 为 1 TB	1GB 密度索引一般足以满足 4TB 物理存储空间。
稀疏	每 1 GB RAM 为 10 TB	1 GB 稀疏索引一般足以满足40TB 物理存储空间。

注意

使用默认设置的 2 GB slab 和 0.25dense 索引的 VDO 卷的最小磁盘用量需要大约 4.7 GB。这提供了在 0% 重复数据删除或压缩时写入的 2 GB 物理数据要少 2 GB。

这里的磁盘用量是默认 slab 大小和密度索引的总和。

UDS 稀疏索引功能是 VDO 推荐的模式。它依赖于数据的时序性，并尝试只保留内存中最相关的索引条目。使用稀疏索引，UDS 维护一个重复数据删除窗口，它是密度的10 倍，但使用相同数量的内存。

稀疏索引提供了最高的覆盖，但密度索引提供了更多的重复数据删除建议。对于大多数工作负载，如果内存量相同，则密度和稀疏索引间的重复数据删除率的不同会微不足道。

其他资源

- 按物理大小划分的 VDO 要求示例

2.2. VDO 存储空间要求

您可以将 VDO 卷配置为使用最多 256TB 物理存储。只有物理存储的某个部分可用来存储数据。本节提供了计算 VDO 管理的卷的可用空间大小的方法。

VDO 需要为两种类型的 VDO 元数据和 UDS 索引进行存储：

- 第一类 VDO 元数据对于每 4GB *物理贮存*使用 1 MB，再加上每个 slab 的额外的 1 MB。
- 第二类 VDO 元数据对于每 1GB *逻辑存储*使用 1.25 MB，并舍入到最近的 slab。
- UDS 索引所需的存储量取决于索引类型以及分配给索引的 RAM 量。对于每 1 GB RAM，密度 UDS 索引使用 17GB 存储，稀疏 UDS 索引使用 170 GB 存储。

其他资源

- 按物理大小划分的 VDO 要求示例
- VDO 中的 Lab 大小

2.3. 按物理大小划分的 VDO 要求示例

下表根据基础卷的物理大小提供 VDO 的最大系统要求。每个表都列出适合预期部署的要求，如主存储或备份存储。

具体数量取决于您的 VDO 卷的配置。

主存储部署

在主存储中，UDS 索引是物理大小的 0.01% 到 25%。

表 2.1. 主存储的存储和内存要求

物理大小	RAM 使用量：UDS	RAM 使用量：VDO	磁盘用量	索引类型
10GB–1TB	250MB	472MB	2.5GB	密度
2–10TB	1GB	3GB	10GB	密度
	250MB		22GB	稀疏
11–50TB	2GB	14GB	170GB	稀疏
51-100TB	3GB	27GB	255GB	稀疏
101–256TB	12GB	69GB	1020GB	稀疏

备份存储部署

在备份存储中，UDS 索引覆盖了备份组的大小，但小于物理大小。如果您预期备份集或物理大小在以后会增大，则需要把这个值加到索引大小中。

表 2.2. 备份存储的存储和内存要求

物理大小	RAM 使用量：UDS	RAM 使用量：VDO	磁盘用量	索引类型
10GB–1TB	250MB	472MB	2.5 GB	密度
2–10TB	2GB	3GB	170GB	稀疏
11–50TB	10GB	14GB	850GB	稀疏
51–100TB	20GB	27GB	1700GB	稀疏
101–256TB	26GB	69GB	3400GB	稀疏

2.4. 在存储堆栈中放置 LVM-VDO

您必须将特定的存储层放在 VDO 逻辑卷下，并在上面放置其他存储层。

您可以将thick 置备的层放在 VDO 的顶部，但您不能依赖该情况下精简置备的保证。因为 VDO 层是精简置备的，精简置备的效果适用于所有在它上面的层。如果您不监控 VDO 卷，您可能使用完在 VDO 以上的 thick-provisioned 卷的所有物理空间。

以下层支持的放置位于 VDO 下。不要将它们放在 VDO 上：

- DM Multipath
- DM Crypt
- Software RAID（LVM 或 MD RAID）

不支持以下配置：

- VDO 位于回送设备之上
- 加密的卷位于 VDO 之上
- VDO 卷中的分区
- 位于 VDO 卷之上的 RAID，比如 LVM RAID、MD RAID 或者其它类型
- 在 LVM-VDO 上部署 Ceph Storage

其他资源

- 堆栈 LVM 卷知识库文章

第 3 章 创建重复数据删除和压缩的逻辑卷

您可以创建使用 VDO 功能的 LVM 逻辑卷来重复数据删除和压缩数据。

3.1. LVM-VDO 部署情况

您可以以不同的方式部署 VDO on LVM（LVM-VDO）以提供重复数据删除的存储：

- 块访问
- 文件访问
- 本地存储
- 远程存储

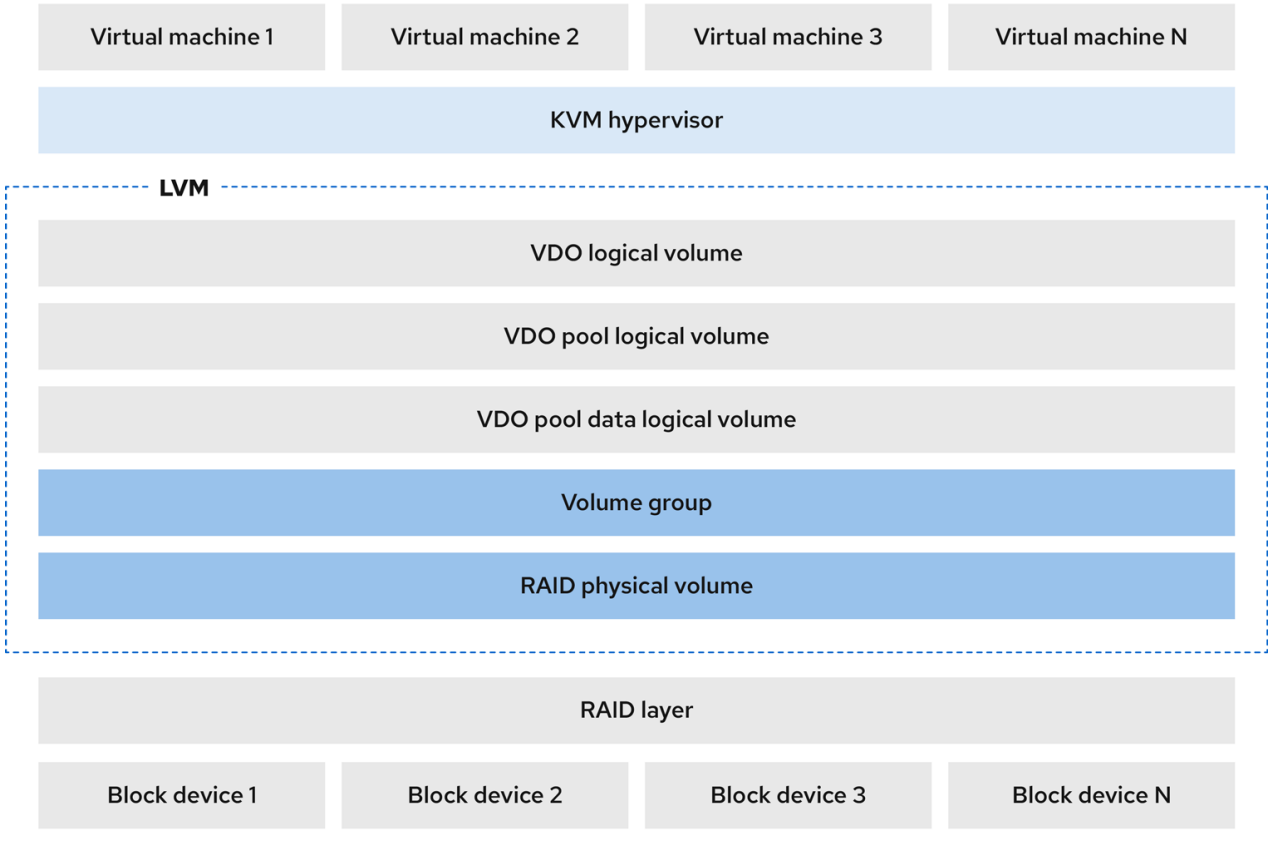
因为 LVM-VDO 会将重复数据删除存储作为常规逻辑卷（LV）形式公开，所以您可以在标准文件系统、iSCSI 和 FC 目标驱动程序或者统一存储中使用它。

注意

目前不支持在 LVM-VDO 上部署 Ceph Storage。

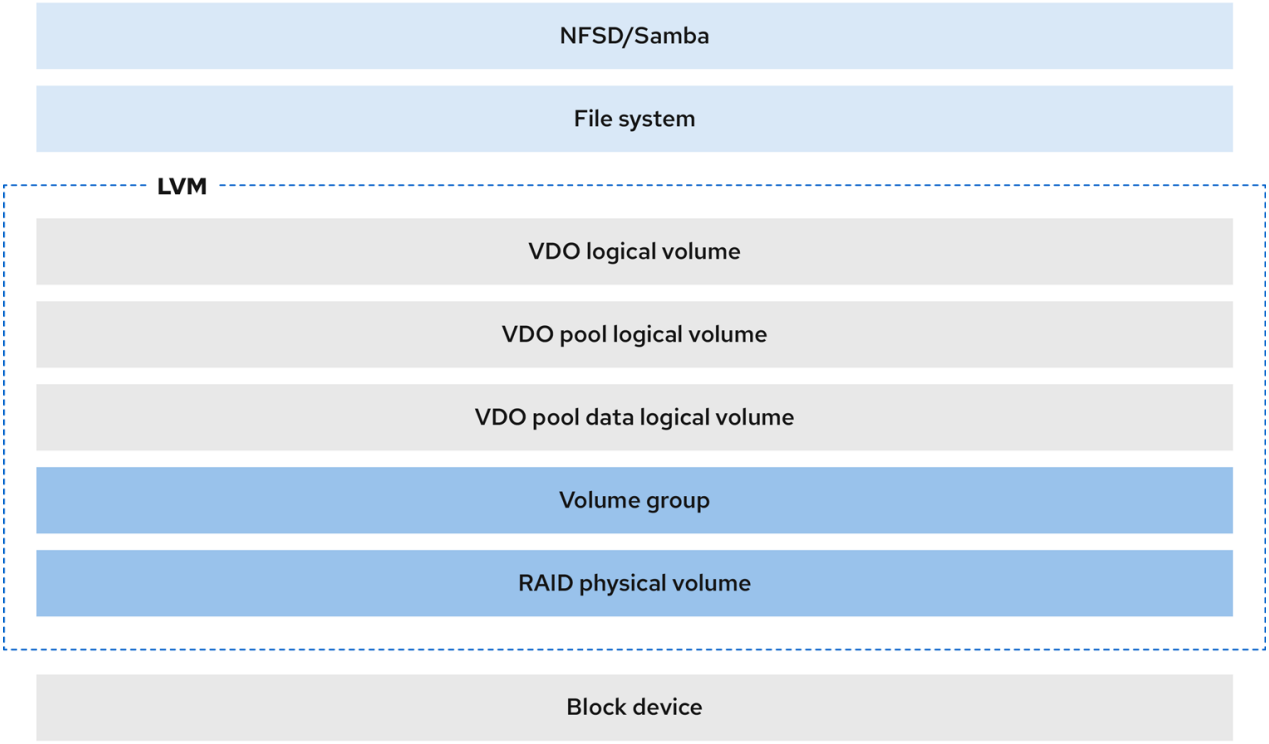
KVM

您可以在配置了直接附加存储的 KVM 服务器中部署 LVM-VDO。



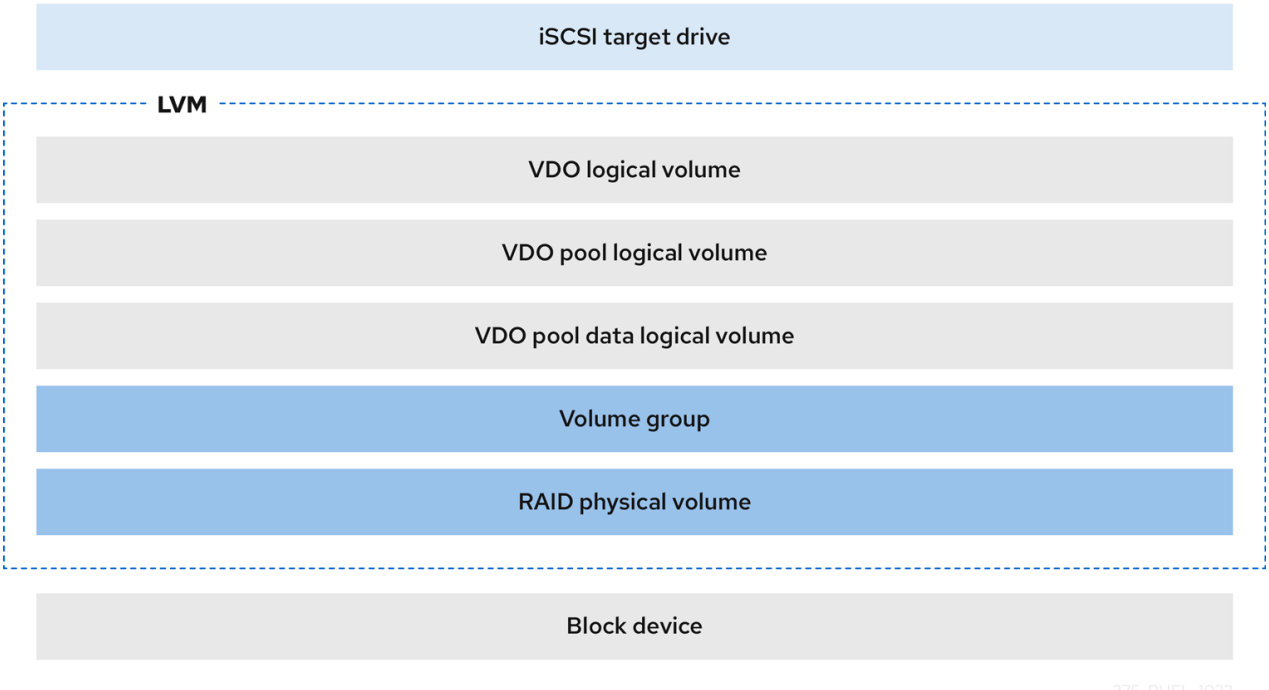
文件系统

您可以在 VDO LV 上创建文件系统，并将其公开给使用 NFS 服务器或 Samba 的 NFS 或 CIFS 用户。



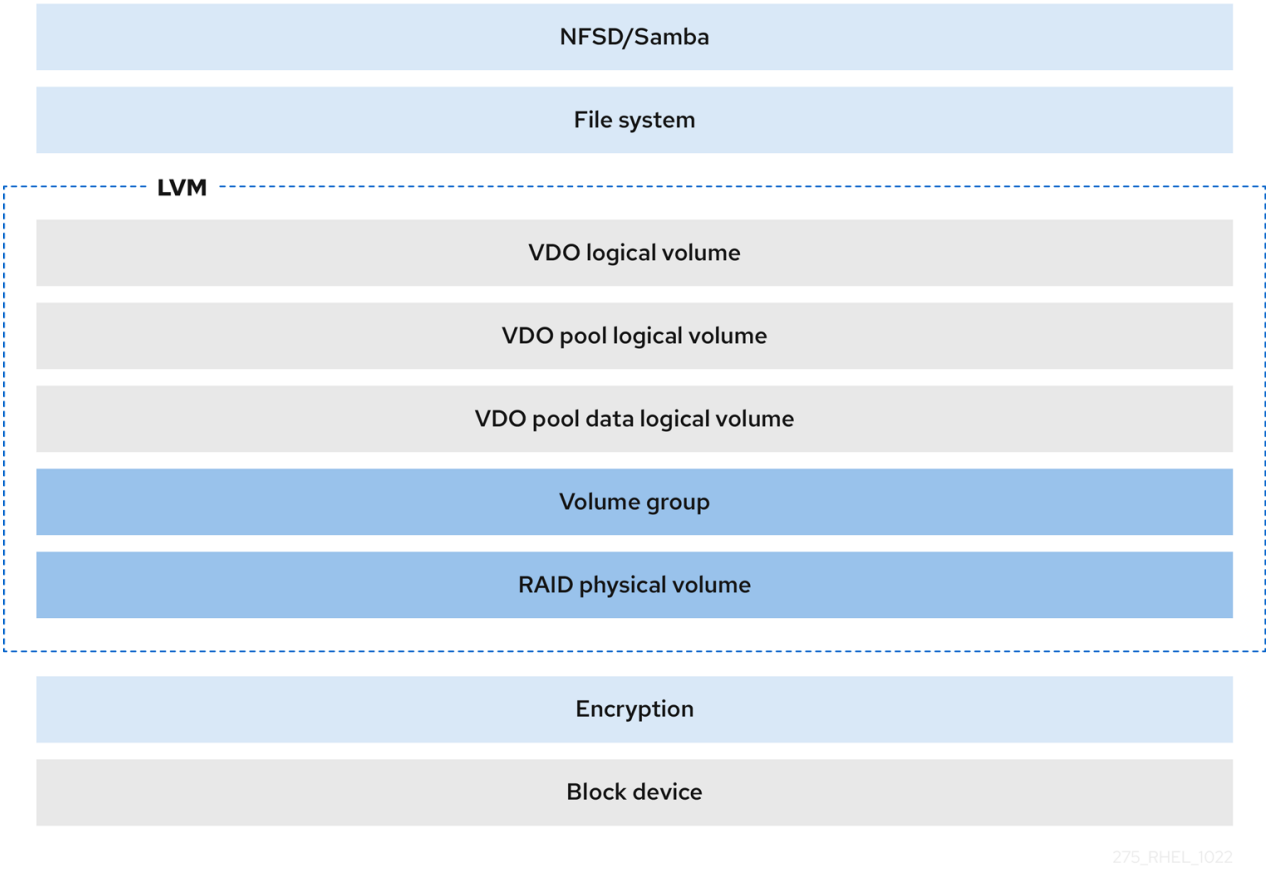
iSCSI 目标

您可以将 VDO LV 的整个导出为 iSCSI 目标到远程 iSCSI 启动器。



加密

DM Crypt 等设备映射器（DM）机制与 VDO 兼容。加密 VDO LV 卷有助于确保数据安全性，且所有 VDO LV 以上的文件系统仍会重复使用。



重要

如果对数据进行了重复数据删除，则在应用 VDO LV 上面应用加密层不会产生太大效果。在 VDO 可以对它们进行重复数据删除前，加密会使重复数据块不同。

始终将加密层放在 VDO LV 下。

3.2. LVM-VDO 卷的物理和逻辑大小

这部分论述了 VDO 可以使用的物理大小、可用物理大小和逻辑大小。

物理大小

这与分配给 VDO 池 LV 的物理区块大小相同。VDO 使用这个存储用于：

- 用户数据，这些数据可能会进行重复数据删除和压缩
- VDO 元数据，如 UDS 索引

可用物理大小

这是 VDO 可用于用户数据的物理大小的一部分。
它等同于物理大小减去元数据的大小，向下舍入到 slab 大小的倍数。

逻辑大小

这是 VDO LV 出现在应用程序中置备的大小。它通常大于可用的物理大小。VDO 目前支持任意逻辑卷大小最多为物理卷的 254 倍，但不能超过 4 PB。

当您设置 VDO 逻辑卷（LV）时，可以指定 VDO LV 出现的逻辑存储量。在托管活跃虚拟机或容器时，红帽建议使用 10:1 逻辑和物理比例置备存储：也就是说，如果您使用 1TB 物理存储，您将会把它显示为 10TB 逻辑存储。

如果没有指定 **--virtualsize** 选项，VDO 会将卷置备为 **1:1** 比例。例如，如果您将 VDO LV 放在 20GB VDO 池 LV 的上面，如果使用默认索引大小，VDO 为 UDS 索引保留 2.5 GB。剩余的 17.5 GB 为 VDO 元数据和用户数据提供。因此，要消耗的可用存储不超过 17.5 GB，且可能会因为组成实际 VDO 卷的元数据而减少。

其他资源

- 按物理大小划分的 VDO 要求示例

3.3. VDO 中的 LAB 大小

VDO 卷的物理存储被分成几个 slab。每个 slab 都是物理空间的连续区域。给定卷的所有 slab 的大小相同，可以是基于 128 MB 的 2 的指数的任何值，最大值为 32 GB。

默认的 slab 大小为 2 GB，用于在较小的测试系统中评估 VDO。单个 VDO 卷最多可有 8192 个 slabs。因此，在使用 2GB slab 的默认配置中，允许的最大物理存储为 16 TB。当使用 32GB 的 slab 时，允许的最大物理存储为 256 TB。VDO 总是保留至少一个整个 slab 来保存元数据，因此预留 slab 无法用于存储用户数据。

slab 大小不影响 VDO 卷的性能。

表 3.1. 根据物理卷大小推荐的 VDO slab 大小

物理卷大小	推荐的 slab 大小
10–99 GB	1 GB
100 GB – 1 TB	2 GB
2–256 TB	32 GB

注意

使用默认设置的 2 GB slab 和 0.25dense 索引的 VDO 卷的最小磁盘用量需要大约 4.7 GB。这提供了在 0% 重复数据删除或压缩时写入的 2 GB 物理数据要少 2 GB。

这里的磁盘用量是默认 slab 大小和密度索引的总和。

您可以通过向 **lvcreate** 命令提供 **--config 'allocation/vdo_slab_size_mb=*size-in-megabytes*'** 选项来控制 slab 大小。

3.4. 安装 VDO

此流程安装创建、挂载和管理 VDO 卷所需的软件。

步骤

- 安装 VDO 软件：

```
# dnf install lvm2 kmod-kvdo vdo
```

3.5. 创建 LVM-VDO 卷

这个过程在 VDO 池 LV 中创建 VDO 逻辑卷（LV）。

先决条件

- 安装 VDO 软件。如需更多信息，请参阅安装 VDO。
- 在您的系统中有一个有可用存储容量的 LVM 卷组。

步骤

1. 为您的 VDO LV 选择一个名称，如 **vdo1**。您必须为系统中的每个 VDO LV 使用不同的名称和设备。
   在以下步骤中，将 *vdo-name* 替换为名称。
2. 创建 VDO LV：

```
# lvcreate --type vdo \
        --name vdo-name
        --size physical-size
        --virtualsize logical-size \
        vg-name
```

   - 使用您要放置 VDO LV 的现有 LVM 卷组的名称替换 *vg-name*。
   - 使用 VDO LV 存在的逻辑存储数量替换 *logical-size*。
   - 如果物理大小大于 16TiB，请添加以下选项以将卷的 slab 大小增加到 32GiB：

```
--config 'allocation/vdo_slab_size_mb=32768'
```

     如果您在大于 16TiB 的物理大小中使用 2GiB 的默认 slab 大小，则 **lvcreate** 命令会失败并显示以下错误：

```
ERROR - vdoformat: formatVDO failed on '/dev/device': VDO Status: Exceeds maximum number of slabs supported
```

     例 3.1. 为容器存储创建 VDO LV

     例如，要为 1TB VDO 池中的容器存储创建 VDO LV，您可以使用：

```
# lvcreate --type vdo \
        --name vdo1
        --size 1T
        --virtualsize 10T \
        vg-name
```

重要

如果在创建 VDO 卷时发生故障，请删除要清理的卷。

3. 在 VDO LV 上创建文件系统：

   - 对于 XFS 文件系统：

     ```
     # mkfs.xfs -K /dev/vg-name/vdo-name
     ```

   - 对于 ext4 文件系统：

     ```
     # mkfs.ext4 -E nodiscard /dev/vg-name/vdo-name
     ```

其他资源

- **lvmvdo(7)** 手册页

3.6. 在 WEB 控制台中创建 VDO 卷

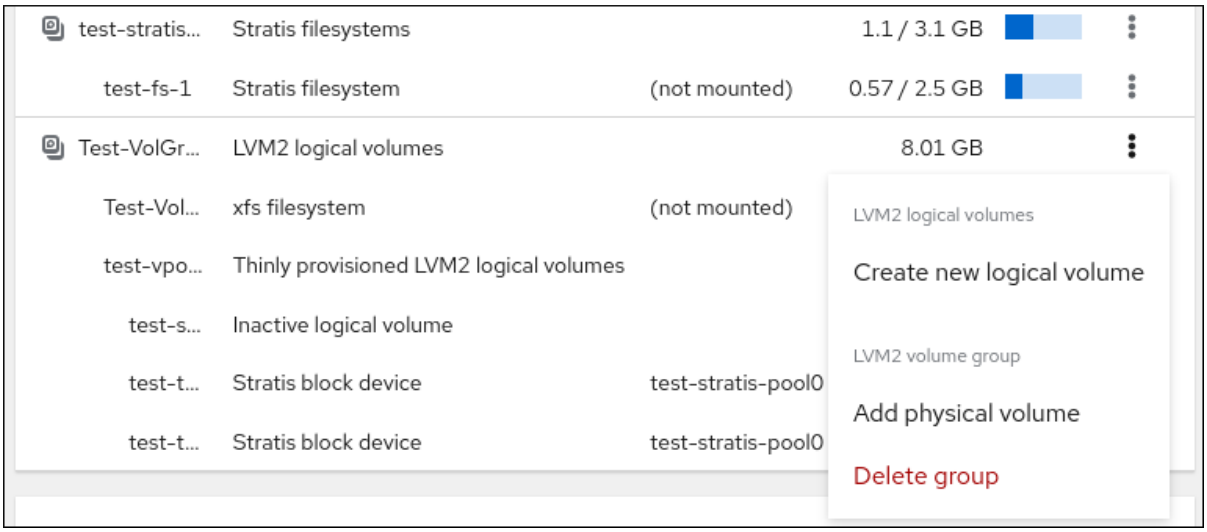
在 RHEL web 控制台中创建 VDO 卷。

先决条件

- RHEL 9 web 控制台已安装并可以访问。
  详情请参阅安装 Web 控制台。
- **cockpit-storaged** 软件包已安装在您的系统上。
- 要从其创建 VDO 的 LVM2 组。

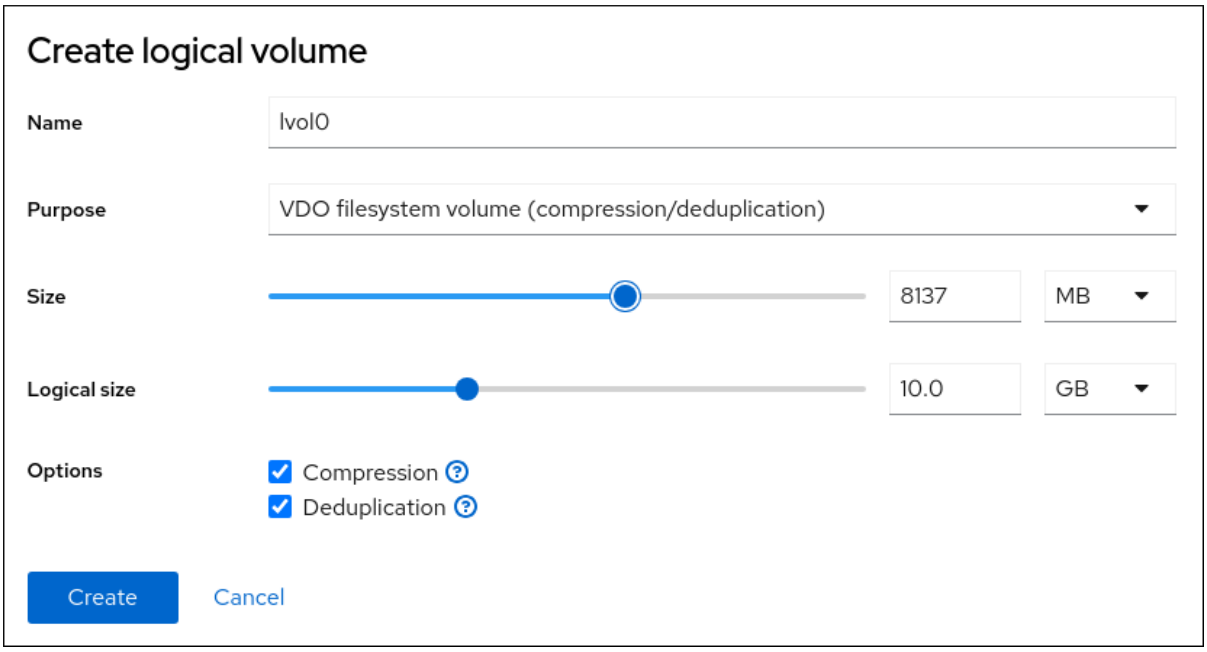
步骤

1. 登录到 RHEL 9 web 控制台。
   详情请参阅 登录到 web 控制台。
2. 点 **Storage**。
3. 点击您要在其中创建 VDO 卷的 LVM2 组旁边的菜单按钮 ⋮。



4. 在 **Purpose** 字段旁边的下拉菜单中选择 **VDO filesystem volume**。
5. 在 **Name** 字段中输入 VDO 卷的名称，没有空格。
6. 在 **Logical Size** 条中，设置 VDO 卷的大小。您可以扩展超过十倍，但请考虑创建 VDO 卷的目的是：
   - 对于活跃的虚拟机或容器存储，逻辑大小为物理大小的十倍。
   - 对于对象存储，逻辑大小为物理大小的三倍。

   详情请参阅 部署 VDO。
7. 选择 **Compression** 选项。这个选项可以有效地减少各种文件格式。
   详情请查看 更改 LVM-VDO 卷上的压缩设置。
8. 选择 **Deduplication** 选项。
   这个选项通过删除重复块的多个副本来减少存储资源的消耗。详情请参阅 更改 LVM-VDO 卷上的重复数据删除设置。



验证步骤

- 检查您是否可在 **Storage** 部分看到新的 VDO 卷。然后，您可以使用文件系统对其进行格式化。

3.7. 在 WEB 控制台中格式化 VDO 卷

VDO 卷作为物理驱动器使用。要使用它们，您必须使用文件系统格式化它们。

警告

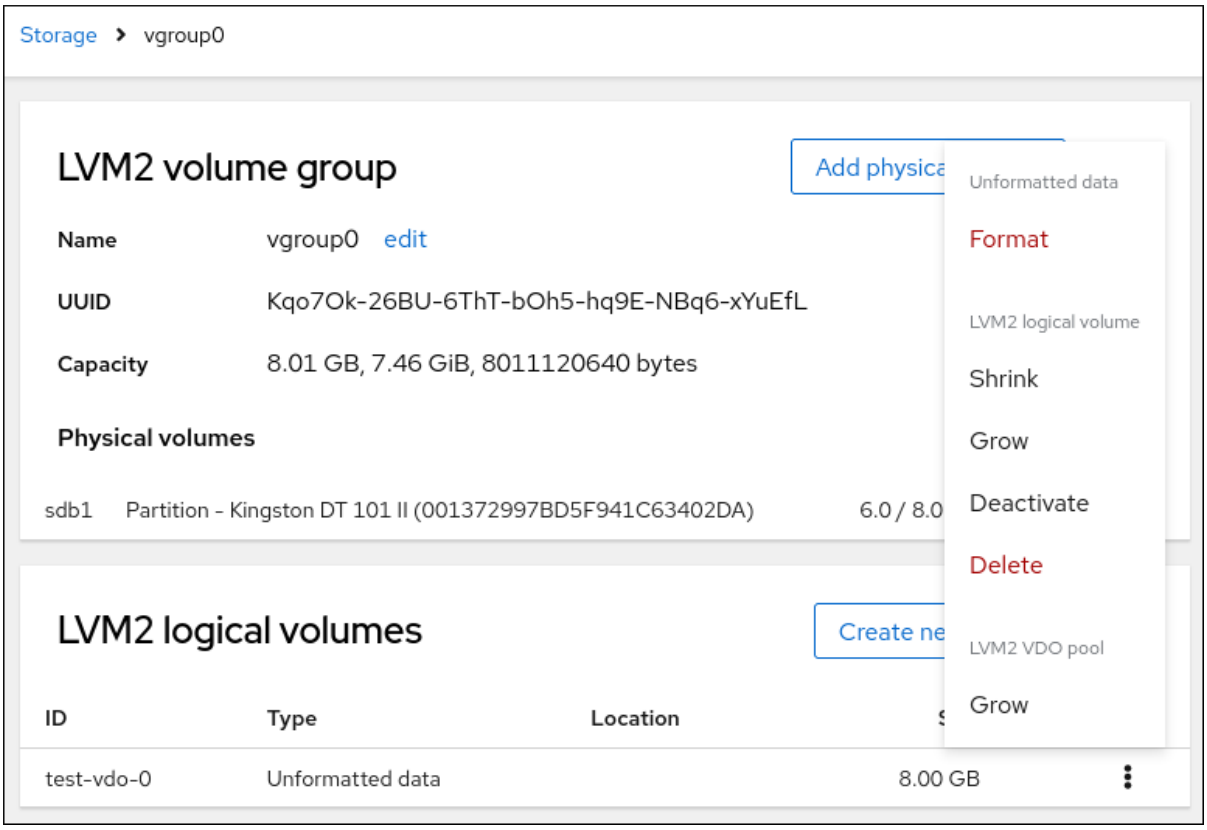
格式化会清除卷上的所有数据。

先决条件

- RHEL 9 web 控制台已安装并可以访问。
  详情请参阅安装 Web 控制台。
- **cockpit-storaged** 软件包已安装在您的系统上。
- 已创建一个 VDO 卷。

步骤

1. 登录到 RHEL 9 web 控制台。详情请参阅 登录到 web 控制台。
2. 点 **Storage**。
3. 点击包含您要格式化的 VDO 卷的 LVM2 卷组。
4. 点击您要格式化的 VDO 卷所在行末尾的菜单按钮 ⋮。
5. 点 **Format**。



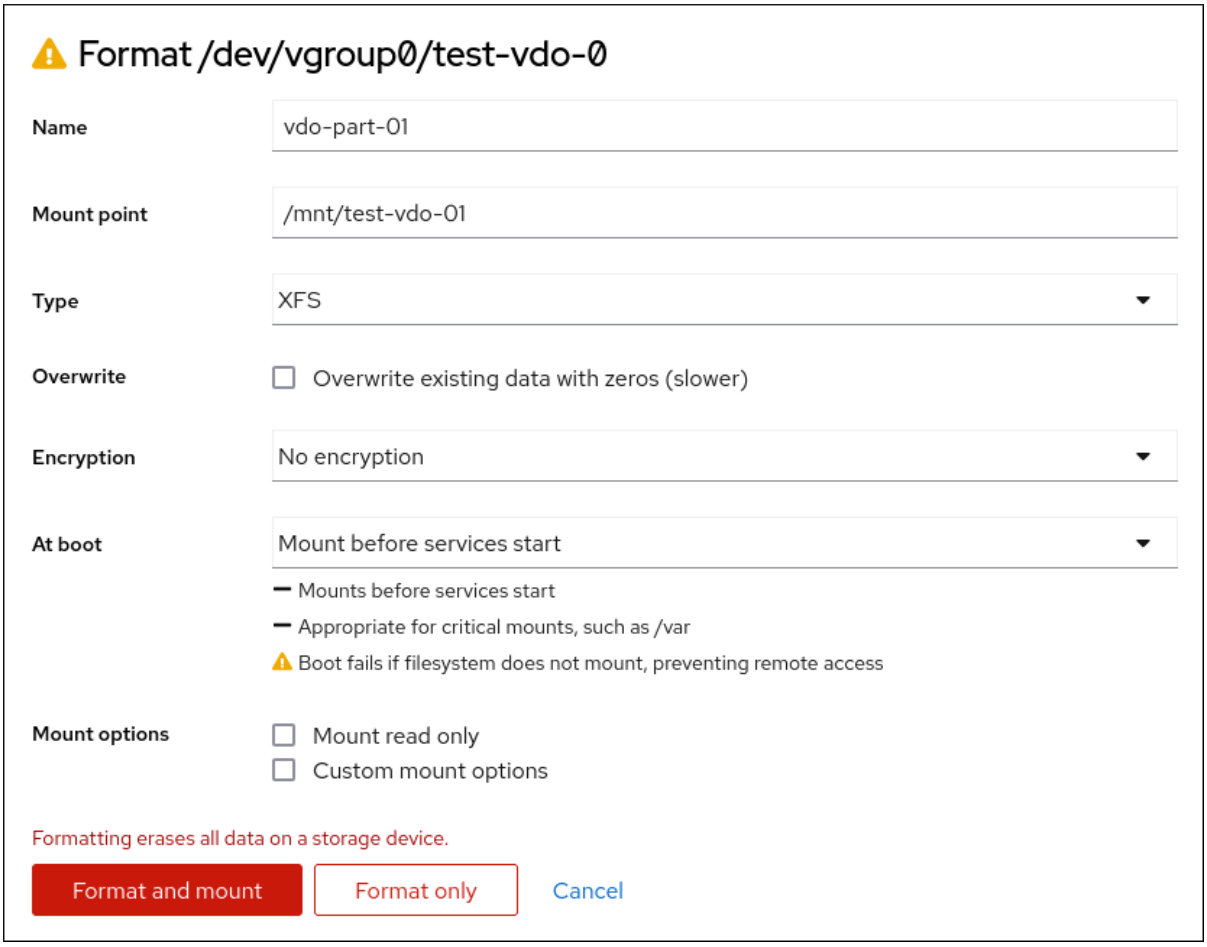
6. 在 **Name** 字段输入逻辑卷名称。
7. 在 **Mount Point** 字段中添加挂载路径。
8. 默认情况下，在完成此对话框后，web 控制台只重写磁盘头。这个选项的优点是格式化速度快。如果您选中了 **Overwrite existing data with zeros**选项，Web 控制台会使用零重写整个磁盘。这个选项较慢，因为程序必须经过整个磁盘。如果磁盘包含任何敏感数据，且您想要重写它们，则使用这个选项。
9. 在 **Type** 下拉菜单中选择一个文件系统：
   - 默认选项 **XFS** 文件系统支持大型逻辑卷，在不中断的情况下在线切换物理驱动器，并增大。XFS 不支持缩小卷。因此，您无法缩小使用 XFS 格式的卷的大小。

- **ext4** 文件系统支持逻辑卷，在不停止工作的情况下在线切换物理驱动器，并缩减。

您还可以选择带有 LUKS(Linux 统一密钥设置)加密的版本，它允许您使用密码短语加密卷。

10. 在 **At boot** 下拉菜单中选择您要何时挂载卷。

11. 点 **Format and mount** 或 **Format only**。
根据使用的格式化选项和卷大小，格式化的过程可能需要几分钟。



验证

- 成功完成后，您可以在 **Storage** 选项卡和 LVM2 volume group 选项卡中看到格式化的 VDO 卷的详情。

3.8. 在 WEB 控制台中扩展 VDO 卷

在 RHEL 9 web 控制台中扩展 VDO 卷。

先决条件

- RHEL 9 web 控制台已安装并可以访问。
详情请参阅安装 Web 控制台。

- **cockpit-storaged** 软件包已安装在您的系统上。

- 创建 VDO 卷。

步骤

1. 登录到 RHEL 9 web 控制台。
   详情请参阅 登录到 web 控制台。
2. 点 **Storage**。
3. 在 **VDO Devices** 框中点您的 VDO 卷。
4. 在 VDO 卷详情中点 **Grow** 按钮。
5. 在 **Grow logical size of VDO** 对话框中，扩展 VDO 卷的逻辑大小。
6. 点 **Grow**。

验证步骤

- 检查 VDO 卷详情中的新大小，以验证您的更改是否成功。

3.9. 挂载 LVM-VDO 卷

这个过程会在 LVM-VDO 卷中手动挂载文件系统，也可以永久挂载文件系统。

先决条件

- 您的系统中有 LVM-VDO 卷。如需更多信息，请参阅创建 LVM-VDO 卷。

步骤

- 要手动将文件系统挂载到 LVM-VDO 卷中，请使用：

```
# mount /dev/vg-name/vdo-name mount-point
```

- 要将文件系统配置为在引导时自动挂载，请在 **/etc/fstab** 文件中添加行：
  - 对于 XFS 文件系统：

```
/dev/vg-name/vdo-name mount-point xfs defaults 0 0
```

  - 对于 ext4 文件系统：

```
/dev/vg-name/vdo-name mount-point ext4 defaults 0 0
```

  如果 LVM-VDO 卷位于需要网络的块设备中，如 iSCSI，请添加 **_netdev** 挂载选项。对于 iSCSI 和其它需要网络的块设备，请查看 **systemd.mount (5)** 手册页，已了解有关 **_netdev** 挂载选项的信息。

其他资源

- **systemd.mount(5)** 手册页

3.10. 更改 LVM-VDO 卷上的压缩设置

默认情况下，启用了 VDO 池逻辑卷(LV)的压缩。要保存 CPU 使用情况，您可以禁用它。使用 **lvchange** 命令启用或禁用压缩。

先决条件

- 您的系统中有 LVM-VDO 卷。

步骤

1. 检查逻辑卷的压缩状态：

```
# lvs -o+vdo_compression,vdo_compression_state
  LV        VG        Attr       LSize   Pool   Origin Data%  Meta%  Move Log Cpy%Sync
Convert VDOCompression VDOCompressionState
  vdo_name vg_name vwi-a-v---   1.00t vpool0        0.00                                    enabled
online
  vpool0   vg_name dwi------- <15.00g                20.03                                enabled
online
```

2. 禁用 VDOPoolLV 的压缩：

```
# lvchange --compression n vg-name/vdopoolname
```

如果要启用压缩，请使用 **y** 选项，而不是 **n** 选项。

验证

- 查看压缩的当前状态：

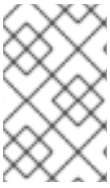
```
# lvs -o+vdo_compression,vdo_compression_state
  LV        VG        Attr       LSize   Pool   Origin Data%  Meta%  Move Log Cpy%Sync
Convert VDOCompression VDOCompressionState
  vdo_name vg_name vwi-a-v---   1.00t vpool0        0.00
offline
  vpool0   vg_name dwi------- <15.00g                20.03                                offline
```

其他资源

- **lvmvdo(7)** 手册页
- **lvcreate(8)** 手册页

3.11. 更改 LVM-VDO 卷上的去重设置

默认情况下，启用了 VDO 池逻辑卷(LV)的去重。要保存内存，您可以禁用去重。使用 **lvchange** 命令启用或禁用去重。



注意

由于 VDO 处理正在并行的 I/O 操作的方式，VDO 卷继续识别这些操作中的重复数据。例如，如果虚拟机克隆操作正在进行中，且 VDO 卷有许多紧密相邻的重复块，则卷仍可使用去重来节省一些空间。卷的索引状态不会影响进程。

先决条件

- 您的系统中有 LVM-VDO 卷。

步骤

1. 检查逻辑卷的去重状态：

```
# lvs -o+vdo_deduplication,vdo_index_state
  LV         VG         Attr       LSize   Pool   Origin Data%  Meta%  Move Log Cpy%Sync
Convert VDODeduplication VDOIndexState
  vdo_name vg_name vwi-a-v---   1.00t vpool0        0.00                                    enabled
online
  vpool0   vg_name dwi------- <15.00g                20.03                                  enabled
online
```

2. 禁用 VDOPoolLV 的去重：

```
# lvchange --deduplication n vg-name/vdopoolname
```

如果要启用去重，请使用 **y** 选项而不是 **n**。

验证

- 查看去重的当前状态：

```
# lvs -o+vdo_deduplication,vdo_index_state
  LV         VG         Attr       LSize   Pool   Origin Data%  Meta%  Move Log Cpy%Sync
Convert VDODeduplication VDOIndexState
  vdo_name vg_name vwi-a-v---   1.00t vpool0        0.00
closed
  vpool0   vg_name dwi------- <15.00g                20.03
closed
```

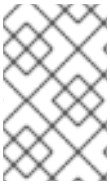
其他资源

- **lvmvdo(7)** 手册页
- **lvcreate(8)** 手册页

3.12. 使用虚拟数据优化器管理精简配置

可以通过配置精简配置的 VDO 卷准备以后扩展物理空间，以便解决 VDO 卷使用 100% 的条件。例如，在 **lvcreate** 操作中不使用 **-l 100%FREE** 而是使用例如 '95%FREE'，以确保稍后会根据需要进行恢复。这个步骤描述了如何解决这个问题：

- 卷耗尽空间
- 文件系统进入只读模式
- 卷报告的 ENOSPC



注意

解决 VDO 卷中高物理空间使用的最佳方法是删除未使用的文件，并使用在线丢弃这些未使用文件的块或 **fstrim** 程序。VDO 卷的物理空间只能增加到 8192 slab，对于一个默认 slab 大小为 2 GB 的 VDO 卷为 16 TB，或对于一个具有 32 GB 的 VDO 卷为 256 TB 。

在以下步骤中，将 *myvg* 和 *myvdo* 分别替换为卷组和逻辑卷名称。

先决条件

1. 安装 VDO 软件。如需更多信息，请参阅安装 VDO。
2. 在您的系统中有一个有可用存储容量的 LVM 卷组。
3. 使用 **lvcreate --type vdo --name myvdo myvg -L logical-size-of-pool --virtualsize virtual-size-of-vdo** 命令的精简配置 VDO 卷。如需更多信息，请参阅 创建 LVM-VDO 卷。

步骤

1. 确定精简置备 VDO 卷的最佳逻辑大小

```
# vdostats myvg-vpool0-vpool

Device                  1K-blocks Used     Available  Use% Space saving%
myvg-vpool0-vpool   104856576  29664088 75192488   28%   69%
```

要计算空间节省率，请使用以下公式：

```
Savings ratio = 1 / (1 - Space saving%)
```

在本例中，

- 大约有 **3.22:1** 个空间节省率（大约 80 GB）。
- 如果对使用相同空间节省的数据写入 VDO 卷，则按比例增加数据集大小乘以 256 GB。
- 将这个数字调整到 200 GB 时，如果出现相同的空间节省率，则会产生一个具有安全可用磁盘空间的逻辑大小。

2. 监控 VDO 卷中的空闲物理空间：

```
# vdostats myvg-vpool0-vpool
```

可定期执行这个命令，以提供对 VDO 卷使用的和空闲物理空间的监控。

3. 可选：使用可用的 **/usr/share/doc/vdo/examples/monitor/monitor_check_vdostats_physicalSpace.pl** 脚本，查看 VDO 卷上的物理空间使用量警告：

```
# /usr/share/doc/vdo/examples/monitor/monitor_check_vdostats_physicalSpace.pl myvg-vpool0-vpool
```

4. 在创建 VDO 卷时，**dmeventd** 监控服务监控 VDO 卷中物理空间的使用情况。当 VDO 卷被创建或启动时，这会被默认启用。
在监控 VDO 卷时，使用 **journalctl** 命令查看日志中的 **dmeventd** 的输出：

```
lvm[8331]: Monitoring VDO pool myvg-vpool0-vpool.
...
```

```
lvm[8331]: WARNING: VDO pool myvg-vpool0-vpool is now 84.63% full.
lvm[8331]: WARNING: VDO pool myvg-vpool0-vpool is now 91.01% full.
lvm[8331]: WARNING: VDO pool myvg-vpool0-vpool is now 97.34% full.
```

5. 修复快要没有可用物理空间的 VDO 卷。当可以在 VDO 卷中添加物理空间时，但卷空间在可以增大前已满时，可能需要临时将 I/O 返回到卷。
   要临时停止 I/O 到卷，请执行以下步骤，其中 VDO 卷 *myvdo* 包含挂载在 */users/homeDir* 路径中的文件系统：

   a. 冻结文件系统：

   ```
   # xfs_freeze -f /users/homeDir

   # vgextend myvg /dev/vdc2

   # lvextend -l new_size myvg/vpool0-name

   # xfs_freeze -u /users/homeDir
   ```

   b. 卸载文件系统：

   ```
   # umount /users/homeDir

   # vgextend myvg /dev/vdc2

   # lvextend -l new_size myvg/vpool0-name

   # mount -o discard /dev/myvg/myvdo /users/homeDir
   ```

   注意

   卸载或释放缓存数据的文件系统将产生缓存数据的写入，这可能会填满 VDO 卷的物理空间。当为 VDO 卷上的空闲物理空间设置监控阈值时，请考虑缓存的最大缓存文件系统数据量。

6. 可以使用 **fstrim** 程序清理文件系统不再使用的块。对 VDO 卷上的挂载的文件系统执行 **fstrim** 可能会导致该卷的可用空间增加。**fstrim** 工具将丢弃到 VDO 卷，然后用于删除对之前使用的块的引用。如果这些块中有单一引用，则使用物理空间。

   a. 检查 VDO stats 以查看当前可用空间量：

   ```
   # vdostats --human-readable myvg-vpool0-vpool

    Device              Size  Used  Available Use%  Space saving%
   myvg-vpool0-vpool  100.0G 95.0G 5.0G      95%   73%
   ```

   b. 丢弃未使用块：

   ```
   # fstrim /users/homeDir
   ```

   c. 查看 VDO 卷的空闲物理空间：

   ```
   # vdostats --human-readable myvg-vpool0-vpool
   ```

```
Device              Size    Used   Available Use%  Space saving%
myvg-vpool0-vpool   100.0G  30.0G  70.0G     30%   43%
```

在这个示例中，在文件系统上执行 **fstrim** 后，丢弃可以返回 65G 物理空间以便在 VDO 卷中使用。

注意

丢弃较低级别的重复数据删除和压缩卷时，可能会回收物理空间，而不是丢弃更高水平的重复数据删除和压缩卷。具有高水平的重复数据删除和压缩卷可能需要进行更广泛的清理来回收物理空间，而不是只是丢弃尚未使用的块。

第 4 章 在 LVM-VDO 卷中修剪选项

您可以使用 **discard** 选项挂载文件系统，它会告知 VDO 卷未使用的空间。另一种选择是使用 **fstrim** 应用，它是一个按需丢弃的，或 **mount -o discard** 命令用于立即丢弃。

在使用 **fstrim** 应用时，管理员需要调度和监控额外的进程，而使用 **mount -o discard** 命令则可尽可能立即恢复空间。

请注意，目前建议使用 **fstrim** 应用程序丢弃未使用的块，而不是 **discard** 挂载选项，因为此选项的性能影响可能非常严重。因此，**nodiscard** 是默认值。

4.1. 在 VDO 中启用丢弃挂载选项

此流程在 VDO 卷中启用 **discard** 选项。

先决条件

- 您的系统中有 LVM-VDO 卷。

步骤

- 在卷中启用 **discard** ：

```
# mount -o discard /dev/vg-name/vdo-name mount-point
```

其他资源

- **XFS(5)**、**mount(8)** 和 **lvmvdo(7)** man page

4.2. 设置定期 TRIM 操作

这个过程在您的系统中启用调度的 TRIM 操作。

先决条件

- 您的系统中有 LVM-VDO 卷。

步骤

- 启用并启动计时器：

```
# systemctl enable --now fstrim.timer
```

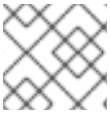
验证

- 验证计时器是否已启用：

```
# systemctl list-timers fstrim.timer
```

例 4.1. 验证过程的可能输出

```
# systemctl list-timers fstrim.timer
NEXT                        LEFT        LAST  PASSED  UNIT         ACTIVATES
Mon 2021-05-10 00:00:00 EDT  5 days left  n/a   n/a     fstrim.timer fstrim.service
```



注意

您没有对 VDO 卷的引用，因为 **fstrim.timer** 在所有挂载的文件系统中运行。

其他资源

- **fstrim(8)** man page

第 5 章 优化 VDO 性能

VDO 内核驱动程序通过使用多个线程来加快任务。它不是一个线程为一个 I/O 请求做任何事情，而是将工作分成较小的部分，来分配给不同的线程。这些线程在处理请求时相互通信。这样，一个线程可以处理共享数据，而无需不断地锁定和解锁。

当一个线程完成一个任务时，VDO 已为它准备了另一个任务。这会保持线程忙碌，并减少切换任务所花费的时间。VDO 还对较慢的任务使用单独的线程，如将 I/O 操作添加到队列中，或将消息处理到去重索引中。

5.1. VDO 线程类型

VDO 使用各种线程类型来处理特定的操作：

逻辑区域线程(kvdo:logQ)

维护提供给 VDO 设备的用户的的逻辑块号(LBN)和底层存储系统中物理块号(PBN)之间的映射。它们还阻止并发写入同一块。逻辑线程在读和写操作过程中处于活动状态。处理通常是平均分布的，但特定的访问模式偶尔可能将工作集中在一个线程中。例如，频繁访问特定块映射页中的 LBN 可能会导致一个逻辑线程处理所有这些操作。

物理区域线程(kvdo:physQ)

在写操作过程中处理数据块分配和引用计数。

I/O 提交线程(kvdo:bioQ)

处理从 VDO 到存储系统的块 I/O (**bio**)操作的转换。它们处理来自其他 VDO 线程的 I/O 请求，并将它们传给底层设备驱动程序。这些线程与设备相关的数据结构进行交互，为设备驱动程序内核线程创建请求，并在 I/O 请求因为设备请求队列满了而被阻止时防止延迟。

CPU 处理线程 (kvdo:cpuQ)

处理不阻止或需要独占访问其他线程类型的数据结构的 CPU 密集型任务。这些任务包括计算哈希值和压缩数据块。

I/O 确认线程(kvdo:ackQ)

向更高级别的组件发出 I/O 请求完成的信号，如内核页缓存或应用程序线程执行直接 I/O。其 CPU 使用率和对内存争用的影响受到内核级别的代码的影响。

哈希区域线程(kvdo:hashQ)

将 I/O 请求与匹配的哈希进行协调，以处理潜在的去重任务。虽然它们创建并管理去重请求，但它们不会执行大量的计算。一个哈希区域线程通常就足够了。

去重线程(kvdo:dedupeQ)

处理 I/O 请求并与去重索引进行通信。这个工作是对单独的线程执行，以防止阻塞。如果索引没有快速响应，它也有一个跳过去重的超时机制。每个 VDO 设备只有一个去重线程。

日志线程(kvdo:journalQ)

更新恢复日志，并调度日志块以进行写入。此任务不能在多个线程中分配。每个 VDO 设备只有一个日志线程。

Packer 线程(kvdo:packerQ)

启用压缩时，在写操作过程中工作。它从 CPU 线程收集压缩数据块，以减少浪费的空间。每个 VDO 设备只有一个 packer 线程。

5.2. 识别性能瓶颈

识别 VDO 性能中的瓶颈对于优化系统效率至关重要。您可以采取的一个主要步骤是确定瓶颈是否位于 CPU、内存或后备存储的速度上。在确定最慢的组件后，您可以制定策略来增强性能。

要确保低性能的根本原因不是硬件问题，请在存储堆栈中使用和不使用 VDO 运行测试。

VDO 中的 **journalQ** 线程是一个自然瓶颈，特别是在 VDO 卷处理写操作时。如果您注意到另一个线程类型比 **journalQ** 线程有更高的使用率，您可以通过添加更多那种类型的线程来修复此问题。

5.2.1. 使用 top 分析 VDO 性能

您可以使用 **top** 工具检查 VDO 线程的性能。

步骤

1. 显示单个线程：

```
$ top -H
```

注意

top 等工具无法区分生产 CPU 周期和因缓存或内存延迟而卡住的周期。这些工具将缓存争用和低内存访问速度解释为实际工作。在节点间移动线程可能看起来减少了 CPU 使用率，同时增加了每秒的操作。

2. 按 **f** 键显示字段管理器。
3. 使用 **(↓)** 键导航到 **P = Last Used Cpu (SMP)** 字段。
4. 按空格栏选择 **P = Last Used Cpu (SMP)** 字段。
5. 按 **q** 键关闭字段管理器。**top** 工具现在显示单个核的 CPU 负载，并指示每个进程或线程最近使用的 CPU。您可以通过按 **1** 切换到每个 CPU 统计信息。

其他资源

- **top (1)** 手册页
- 解释 top 结果

5.2.2. 解释 top 结果

在分析 VDO 线程的性能时，请使用下表来解释 **top** 工具的结果。

表 5.1. 解释 top 结果

值	描述	建议
线程或 CPU 使用率超过 70%	线程或 CPU 过载。高使用率可以导致 VDO 线程调度到没有实际工作的 CPU 上。这可能因为过多的硬件中断、内存冲突或资源竞争而发生。	增加运行此核的线程类型的数量。
低 **%id** 和 **%wa** 值	核正在积极处理任务。	不需要任何操作。

值	描述	建议
低 **%hi** 值	核正在执行标准的处理工作。	添加更多核来提高性能。避免 NUMA 冲突。
• 高 **%hi** 值[a] • 只有一个线程被分配给核 • **%id** 为零 • **%wa** 值为零	核被过度使用。	将内核线程和设备中断处理重新分配给不同的核。
• **kvdo:bioQ** 线程通常处于 **D** 状态。	VDO 始终使存储系统忙于 I/O 请求。[b]	如果 CPU 使用率非常低，则减少 I/O 提交线程的数量。
kvdo:bioQ 线程通常处于 **S** 状态。	VDO 有比它需要的多的 **kvdo:bioQ** 线程。	减少 **kvdo:bioQ** 线程的数量。
每个 I/O 请求的高 CPU 使用率。	每个 I/O 请求的 CPU 使用率随着线程的增加而增加。	检查 CPU、内存或锁争用。

[a] 超过几个百分点

[b] 如果存储系统可以处理多个请求，或者请求处理效率高，则这是很好的。

5.2.3. 使用 perf 分析 VDO 性能

您可以使用 **perf** 工具检查 VDO 的 CPU 性能。

先决条件

- **perf** 软件包已安装。

步骤

1. 显示性能配置文件：

```
# perf top
```

2. 通过解释 **perf** 结果来分析 CPU 性能：

表 5.2. 解释 perf 结果

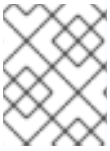
值	描述	建议
kvdo:bioQ 线程花费大量需要 spin 锁的周期	VDO 下的设备驱动程序中可能会出现太多争用	减少 **kvdo:bioQ** 线程的数量
高 CPU 使用率	NUMA 节点之间的争用。 如果处理器支持，请检查 **stalled-cycles-backend**、**cache-misses** 和 **node-load-misses** 等计数器。高未命中率可能导致卡住，类似于其他工具中的高 CPU 使用量，表示可能的争用。	为 VDO 内核线程的 CPU 关联性或中断处理程序的 IRQ 关联性，将处理工作限制到单个节点。

其他资源

- **perf-top (1)** man page

5.2.4. 使用 sar 分析 VDO 性能

您可以使用 **sar** 工具创建有关 VDO 性能的定期报告。



注意

并非所有块设备驱动程序都可以提供 **sar** 工具所需的数据。例如：MD RAID 等设备不报告 **%util** 值。

先决条件

- 安装 **sysstat** 工具：

```
# dnf install sysstat
```

步骤

1. 以 1 秒的间隔显示磁盘 I/O 统计信息：

```
$ sar -d 1
```

2. 通过解释 **sar** 结果分析 VDO 性能：

表 5.3. 解释 sar 结果

值	描述	建议
• 底层存储设备的 **%util** 值在 100% 下为良好。 • VDO 100% 忙碌。 • **bioQ** 线程使用大量 CPU 时间。	对于快速设备，VDO 有太少的 **bioQ** 线程。	添加更多 **bioQ** 线程。 请注意，当您由于 spin 锁争用而添加 **bioQ** 线程时，某些存储驱动程序可能会减慢。

其他资源

- **sar (1)** 手册页

5.3. 重新分发 VDO 线程

在处理请求时，VDO 为不同的任务使用不同的线程池。最佳性能取决于在每个池中设置正确的线程数量，这因可用的存储、CPU 资源以及工作负载的类型而异。您可以将 VDO 分散到多个线程，以提高 VDO 性能。

VDO 旨在通过并行最大化性能。您可以根据可用 CPU 资源等因素和瓶颈的根本原因，来向瓶颈任务分配更多线程来改善它。高线程使用率(70-80% 以上)可能会导致延迟。因此，在这种情况下增加线程数可能会有所帮助。但是，过量线程可能会妨碍性能，并产生额外的成本。

要获得最佳性能，请执行以下操作：

- 使用各种期望的工作负载测试 VDO，来评估并优化其性能。
- 为使用率超过 50% 的池增加线程数。
- 如果总使用率超过 50%，即使单个线程使用率较低，请增加 VDO 可用的核数。

5.3.1. 在 NUMA 节点间对 VDO 线程进行分组

跨 NUMA 节点访问内存比本地内存访问要慢。在核共享节点中最后一级缓存的 Intel 处理器上，缓存问题在数据在节点间共享时，比在单个节点内共享时更多。虽然很多 VDO 内核线程管理专用的数据结构，但它们通常会交换有关 I/O 请求的消息。VDO 线程分散到多个节点上，或者调度程序在节点间重新分配线程可能会导致争用，这是多个节点竞争同一资源。

您可以通过在同一 NUMA 节点上对某些线程进行分组来提高 VDO 性能。

将一个 NUMA 节点上的相关线程分组到一起

- I/O 确认(**ackQ**)线程
- 高级别 I/O 提交线程：
  - 用户模式线程处理直接 I/O
  - 内核页缓存刷新线程

优化设备访问

- 如果设备访问时间因 NUMA 节点而异，请在最接近存储设备控制器的节点上运行 **bioQ** 线程

最小化争用

- 在与 **logQ** 或 **physQ** 线程相同的节点上运行 I/O 提交和存储设备中断处理。
- 在同一节点上运行其他与 VDO 相关的工作。
- 如果一个节点无法处理所有 VDO 工作，在将线程移到其他节点时请考虑内存争用。例如，将中断处理的设备和 **bioQ** 线程移到另一个节点上。

5.3.2. 配置 CPU 关联性

如果调整 VDO 线程的 CPU 关联性，您可以提高某些存储设备驱动程序的 VDO 性能。

当存储设备驱动程序的中断(IRQ)处理程序做了大量工作，并且驱动程序不使用线程 IRQ 处理程序时，它可能会限制系统调度程序优化 VDO 性能的能力。

要获得最佳性能，请执行以下操作：

- 如果核超载，将特定的核用于 IRQ 处理并调整 VDO 线程关联性。如果 **%hi** 值超过其他核几个百分点，则核超载。
- 避免在忙碌的 IRQ 核上运行单例 VDO 线程，如 **kvdo:journalQ** 线程。
- 只有当单个 CPU 使用较高时，才使其他线程类型远离忙于 IRQ 的核。

注意

配置在系统重启后不会持久。

步骤

- 设置 CPU 关联性：

```
# taskset -c <cpu-numbers> -p <process-id>
```

将 **<cpu-numbers>** 替换为您要将进程分配给的用逗号隔开的 CPU 号的列表。将 **<process-id>** 替换为您要为其设置 CPU 关联性的正在运行的进程的 ID。

例 5.1. 为 CPU 核 1 和 2 上的kvdo 进程设置 CPU 关联性

```
# for pid in `ps -eo pid,comm | grep kvdo | awk '{ print $1 }'`
do
    taskset -c "1,2" -p $pid
done
```

验证

- 显示关联性集合：

```
# taskset -p <cpu-numbers> -p <process-id>
```

将 **<cpu-numbers>** 替换为您要将进程分配给的用逗号隔开的 CPU 号的列表。将 **<process-id>** 替换为您要为其设置 CPU 关联性的正在运行的进程的 ID。

其他资源

- **taskset (1)** 手册页

5.4. 增加块映射缓存大小，以增强性能

您可以通过增加 VDO 卷的缓存大小来提高读和写性能。

如果您扩展了读和写延迟，或者从存储中读取不符合应用程序要求的大量数据，您可能需要调整缓存大小。

警告

当您增加块映射缓存时，缓存会使用您指定的内存量，再加上额外的 15% 的内存。较大的缓存大小使用更多 RAM，并影响整体系统稳定性。

以下示例演示了如何将系统中的缓存大小从 128Mb 更改为 640Mb。

步骤

1. 检查 VDO 卷的当前缓存大小：

```
# lvs -o vdo_block_map_cache_size
  VDOBlockMapCacheSize
              128.00m
              128.00m
```

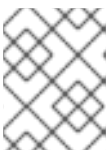
2. 停用 VDO 卷：

```
# lvchange -an vg_name/vdo_volume
```

3. 更改 VDO 设置：

```
# lvchange --vdosettings "block_map_cache_size_mb=640" vg_name/vdo_volume
```

将 **640** 替换为以 MB 为单位的新缓存大小。



注意

缓存大小必须是 4096 的倍数，范围为 128MB 到 16TB，每个逻辑线程至少 16MB。更改在下次 VDO 设备启动时生效。已在运行的设备不受影响。

4. 激活 VDO 卷：

```
# lvchange -ay vg_name/vdo_volume
```

验证

- 检查当前的 VDO 卷配置：

```
# lvs -o vdo_block_map_cache_size vg_name/vdo_volume
  VDOBlockMapCacheSize
              640.00m
```

其他资源

- **lvchange(8)** 手册页

5.5. 加快丢弃操作

VDO 为系统上的所有 VDO 设备设置允许的最大 DISCARD (TRIM)扇区的大小。默认大小为 8 个扇区，其对应于一个 4KiB 块。增加 DISCARD 大小可以显著提高丢弃操作的速度。但是，在提高丢弃性能和维护其他写操作速度之间有一个权衡。

最佳 DISCARD 大小因存储堆栈而异。非常大且非常小的 DISCARD 扇区可能会降低性能。使用不同的值进行试验，以发现一个令人满意的结果。

对于存储本地文件系统的 VDO 卷，最好使用 8 个扇区的 DISCARD 大小，这是默认设置。对于充当 SCSI 目标的 VDO 卷，中等大的 DISCARD 大小，如 2048 扇区（对应于 1MB 丢弃）效果最佳。建议最大 DISCARD 大小不超过 10240 个扇区，它转换为 5MB 丢弃。在选择大小时，请确保它是 8 的倍数，因为如果它们比 8 个扇区小，VDO 可能无法有效地处理丢弃。

步骤

1. 为 DISCARD 扇区设置新的最大大小：

```
# echo <number-of-sectors> > /sys/kvdo/max_discard_sectors
```

   将 **<number-of-sectors>** 替换为扇区数。此设置保持不变，直到重启为止。

2. 可选：要在重启后对 DISCARD 扇区进行持久性更改，请创建一个自定义 **systemd** 服务：

   a. 使用以下内容创建一个新的 **/etc/systemd/system/max_discard_sectors.service** 文件：

```
[Unit]
Description=Set maximum DISCARD sector
[Service]
ExecStart=/usr/bin/echo <number-of-sectors> > /sys/kvdo/max_discard_sectors

[Install]
WantedBy=multi-user.target
```

   将 **<number-of-sectors>** 替换为扇区数。

   b. 保存文件并退出。

   c. 重新载入服务文件：

```
# systemctl daemon-reload
```

d. 启用新服务：

```
# systemctl enable max_discard_sectors.service
```

验证

- 可选：如果您使缩放调控器更改持久，请检查是否启用了 **max_discard_sectors.service** ：

```
# systemctl is-enabled max_discard_sectors.service
```

5.6. 优化 CPU 频率扩展

默认情况下，RHEL 使用 CPU 频率缩放来省电，并在 CPU 不在重负载下时减少热量。为了在使性能优先于节能，您可以将 CPU 配置为以其最大时钟速度运行。这样确保 CPU 可以以最高效率处理数据去重和压缩过程。通过以最高频率运行 CPU，可以更快地执行资源密集型操作，从而有可能提高 VDO 在数据减少和存储优化方面的整体性能。

警告

为更高的性能调整 CPU 频率缩放可以提高功耗和发热量。在冷却不足的系统中，这可能导致过热，并可能导致热流，这限制了性能提升。

步骤

1. 显示可用的 CPU 调控器：

```
$ cpupower frequency-info -g
```

2. 更改缩放调控器以优先选择性能：

```
# cpupower frequency-set -g performance
```

此设置保持不变，直到重启为止。

3. 可选：要在重启后使缩放调控器中的更改持久，请创建一个自定义 **systemd** 服务：

a. 使用以下内容创建一个新的 **/etc/systemd/system/cpufreq.service** 文件：

```
[Unit]
Description=Set CPU scaling governor to performance

[Service]
ExecStart=/usr/bin/cpupower frequency-set -g performance

[Install]
WantedBy=multi-user.target
```

b. 保存文件并退出。

c. 重新载入服务文件：

```
# systemctl daemon-reload
```

d. 启用新服务：

```
# systemctl enable cpufreq.service
```

验证

- 显示当前使用的 CPU 频率策略：

```
$ cpupower frequency-info -p
```

- 可选：如果您使缩放调控器更改持久，请检查是否启用了 **cpufreq.service** ：

```
# systemctl is-enabled cpufreq.service
```