

Google Bigtable 中文版¹

1 摘要

Bigtable 是一个分布式的结构化数据存储系统，它被设计用来处理海量数据：通常是分布在数千台普通服务器上的 PB 级的数据。

Google 的很多项目使用 Bigtable 存储数据，包括 Web 索引、Google Earth、Google Finance。这些应用对 Bigtable 提出的要求差异非常大，无论是在数据量上（从 URL 到网页到卫星图像）还是在响应速度上（从后端的批量处理到实时数据服务）。尽管应用需求差异很大，但是，针对 Google 的这些产品，Bigtable 还是成功的提供了一个灵活的、高性能的解决方案。

本论文描述了 Bigtable 提供的简单的数据模型。利用这个模型，用户可以动态的控制数据的分布和格式。我们还将描述 Bigtable 的设计和实现。

2 介绍

在过去两年半时间里，我们设计、实现并部署了一个分布式的结构化数据存储系统 — 在 Google，我们称之为 Bigtable。Bigtable 的设计目的是可靠的处理 PB 级别的数据，并且能够部署到上千台机器上。Bigtable 已经实现了下面的几个目标：**适用性广泛、可扩展、高性能和高可用性**。

Bigtable 已经在超过 60 个 Google 的产品和项目上得到了应用，包括 Google Analytics、Google Finance、Orkut、Personalized Search、Writely 和 Google Earth。这些产品对 Bigtable 提出了迥异的需求，有的需要高吞吐量的批处理，有的则需要及时响应，快速返回数据给最终用户。它们使用的 Bigtable 集群的配置也有很大的差异，有的集群只有几台服务器，而有的则需要上千台服务器、存储几百 TB 的数据。

在很多方面，Bigtable 和数据库很类似：它使用了很多数据库的实现策略。并行数据库【14】和内存数据库【13】已经具备可扩展性和高性能，但是 Bigtable 提供了一个和这些系统完全不同的接口。Bigtable 不支持完整的关系数据模型；与之相反，Bigtable 为客户提供了简单的数据模型，利用这个模型，客户可以动态控制数据的分布和格式²，用户也可以自己推测³底层存储数据的位置相关性⁴。数据的下标是行和列的名字，名字可以是任意的字符串。Bigtable 将存储的数据都视为字符串，但是 Bigtable 本身不去解析这些字符串，客户

¹ 译者 alex，原文地址 <http://blademaster.ixiezi.com/>

² 也就是对 BigTable 而言，数据是没有格式的。用数据库领域的术语说，就是数据没有 Schema，用户自己去定义 Schema

³ 英文为 reason about

⁴ 位置相关性可以这样理解，比如树状结构，具有相同前缀的数据的存放位置接近。在读取的时候，可以把这些数据一次读取出来

程序通常会在把各种结构化或者半结构化的数据串行化到这些字符串里。通过仔细选择数据的模式，用户可以控制数据的位置相关性。最后，可以通过 **BigTable** 的模式参数来控制数据是存放在内存中、还是硬盘上。

第 3 节描述关于数据模型更多细节方面的东西；

第 4 节概要介绍了客户端 API；

第 5 节简要介绍了 **BigTable** 底层使用的 Google 的基础框架；

第 6 节描述了 **BigTable** 实现的关键部分；

第 7 节描述了我们为了提高 **BigTable** 的性能采用的一些精细的调优方法；

第 8 节提供了 **BigTable** 的性能数据；

第 9 节讲述了几个 Google 内部使用 **BigTable** 的例子；

第 10 节是我们在设计和后期支持过程中得到一些经验和教训；

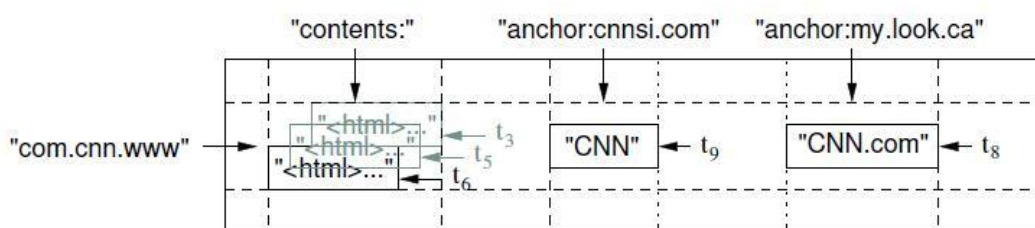
最后，在第 11 节列出我们的相关研究工作，第 12 节是我们的结论。

3 数据模型

Bigtable 是一个稀疏的、分布式的、持久化存储的多维度排序 **Map**⁵。Map 的索引是行关键字、列关键字以及时间戳；Map 中的每个 value 都是一个未经解析的 byte 数组。

```
(row:string, column:string,time:int64)->string
```

我们在仔细分析了一个类似 **Bigtable** 的系统的种种潜在用途之后，决定使用这个数据模型。我们先举个具体的例子，这个例子促使我们做了很多设计决策；假设我们想要存储海量的网页及相关信息，这些数据可以用于很多不同的项目，我们姑且称这个特殊的表为 **Webtable**。在 **Webtable** 里，我们使用 URL 作为行关键字，使用网页的某些属性作为列名，网页的内容存在“contents:”列中，并用获取该网页的时间戳作为标识⁶，如图一所示。



图表 1 一个存储 Web 网页的例子的表的片断

⁵ Map 由 key 和 value 组成，后面我们直接使用 key 和 value，不再另外翻译了

⁶ 即按照获取时间不同，存储了多个版本的网页数据

行名是一个反向 URL。contents 列族存放的是网页的内容，anchor 列族存放引用该网页的锚链接文本⁷。CNN 的主页被 Sports Illustrated 和 MY-look 的主页引用，因此该行包含了名为“anchor:cnnsi.com”和“anchhor:my.look.ca”的列。每个锚链接只有一个版本⁸；而 contents 列则有三个版本，分别由时间戳 t3，t5，和 t6 标识。

3.1 行

表中的行关键字可以是任意的字符串（目前支持最大 64KB 的字符串，但是对大多数用户，10-100 个字节就足够了）。对同一个行关键字的读或者写操作都是原子的（不管读或者写这一行里多少个不同列），这个设计决策能够使用户很容易的理解程序在对同一个行进行并发更新操作时的行为。

Bigtable 通过行关键字的字典顺序来组织数据。表中的每个行都可以动态分区。每个分区叫做一个“Tablet”，Tablet 是数据分布和负载均衡调整的最小单位。这样做的结果是，当操作只读取行中很少几列的数据时效率很高，通常只需要很少几次机器间的通信即可完成。用户可以通过选择合适的行关键字，在数据访问时有效利用数据的位置相关性，从而更好的利用这个特性。举例来说，在 Webtable 里，通过反转 URL 中主机名的方式，可以把同一个域名下的网页聚集起来组织成连续的行。具体来说，我们可以把 maps.google.com/index.html 的数据存放在关键字 com.google.maps/index.html 下。把相同的域中的网页存储在连续的区域可以让基于主机和域名的分析更加有效。

3.2 列族

列关键字组成的集合叫做“列族”，列族是访问控制的基本单位。存放在同一列族下的所有数据通常都属于同一个类型（我们可以把同一个列族下的数据压缩在一起）。列族在使用之前必须先创建，然后才能在列族中任何的列关键字下存放数据；列族创建后，其中的任何一个列关键字下都可以存放数据。根据我们的设计意图，一张表中的列族不能太多（最多几百个），并且列族在运行期间很少改变。与之相对应的，一张表可以有无限多个列。

列关键字的命名语法如下：列族：限定词。列族的名字必须是可打印的字符串，而限定词的名字可以是任意的字符串。比如，Webtable 有个列族 language，language 列族用来存放撰写网页的语言。我们在 language 列族中只使用一个列关键字，用来存放每个网页的语言标识 ID。Webtable 中另一个有用的列族是 anchor；这个列族的每一个列关键字代表一个锚链接，如图一所示。Anchor 列族的限定词是引用该网页的站点名；Anchor 列族每列的数据项存放的是链接文本。

⁷ HTML 的 Anchor

⁸ 注意时间戳标识了列的版本，t9 和 t8 分别标识了两个锚链接的版本

访问控制、磁盘和内存的使用统计都是在列族层面进行的。在我们的 **Webtable** 的例子中，上述的控制权限能帮助我们管理不同类型的应用：我们允许一些应用可以添加新的基本数据、一些应用可以读取基本数据并创建继承的列族、一些应用则只允许浏览数据（甚至可能因为隐私的原因不能浏览所有数据）。

3.3 时间戳

在 **Bigtable** 中，表的每一个数据项都可以包含同一份数据的不同版本；不同版本的数据通过时间戳来索引。**Bigtable** 时间戳的类型是 64 位整型。**Bigtable** 可以给时间戳赋值，用来表示精确到毫秒的“实时”时间；用户程序也可以给时间戳赋值。如果应用程序需要避免数据版本冲突，那么它必须自己生成具有唯一性的时间戳。数据项中，不同版本的数据按照时间戳倒序排序，即最新的数据排在最前面。

为了减轻多个版本数据的管理负担，我们对每一个列族配有两个设置参数，**Bigtable** 通过这两个参数可以对废弃版本的数据自动进行垃圾收集。用户可以指定只保存最后 *n* 个版本的数据，或者只保存“足够新”的版本的数据（比如，只保存最近 7 天的内容写入的数据）。

在 **Webtable** 的举例里，**contents**:列存储的时间戳信息是网络爬虫抓取一个页面的时间。上面提及的垃圾收集机制可以让我们只保留最近三个版本的网页数据。

4 API

Bigtable 提供了建立和删除表以及列族的 API 函数。**Bigtable** 还提供了修改集群、表和列族的元数据的 API，比如修改访问权限。

```
// Open the table
Table *T = OpenOrDie("/bigtable/web/webtable");

// Write a new anchor and delete an old anchor
RowMutation r1(T, "com.cnn.www");
r1.Set("anchor:www.c-span.org", "CNN");
r1.Delete("anchor:www.abc.com");

Operation op;
Apply(&op, &r1);
```

图表 2 Writing to Bigtable.

客户程序可以对 **Bigtable** 进行如下的操作：写入或者删除 **Bigtable** 中的值、从每个行中查找值、或者遍历表中的一个数据子集。图 2 中的 C++ 代码使用 **RowMutation** 抽象对象进行了一系列的更新操作。（为了保持示例代码的简洁，我们忽略了一些细节相关代码）。调用 **Apply** 函数对 **Webtable** 进行了一个原子修改操作：它

为 www.cnn.com 增加了一个锚点，同时删除了另外一个锚点。

```
Scanner scanner(T);
ScanStream *stream;

stream = scanner.FetchColumnFamily("anchor");
stream->SetReturnAllVersions();
scanner.Lookup("com.cnn.www");
for (; !stream->Done(); stream->Next()) {
    printf("%s %s %lld %s\n",
        scanner.RowName(),
        stream->ColumnName(),
        stream->MicroTimestamp(),
        stream->Value());
}
```

图表 3 Reading from Bigtable.

图 3 中的 C++ 代码使用 **Scanner** 抽象对象遍历一个行内的所有锚点。客户程序可以遍历多个列族，有几种方法可以对扫描输出的行、列和时间戳进行限制。例如，我们可以限制上面的扫描，让它只输出那些匹配正则表达式 `*.cnn.com` 的锚点，或者那些时间戳在当前时间前 10 天的锚点。

Bigtable 还支持一些其它的特性，利用这些特性，用户可以对数据进行更复杂的处理。首先，**Bigtable** 支持单行上的事务处理，利用这个功能，用户可以对存储在一个行关键字下的数据进行原子性的读-更新-写操作。虽然 **Bigtable** 提供了一个允许用户跨行批量写入数据的接口，但是，**Bigtable** 目前还不支持通用的跨行事务处理。其次，**Bigtable** 允许把数据项用做整数计数器。最后，**Bigtable** 允许用户在服务器的地址空间内执行脚本程序。脚本程序使用 Google 开发的 Sawzall【28】数据处理语言。虽然目前我们基于的 Sawzall 语言的 API 函数还不允许客户的脚本程序写入数据到 **Bigtable**，但是它允许多种形式的数据转换、基于任意表达式的数据过滤、以及使用多种操作符的进行数据汇总。

Bigtable 可以和 MapReduce【12】一起使用，MapReduce 是 Google 开发的大规模并行计算框架。我们已经开发了一些 Wrapper 类，通过使用这些 Wrapper 类，**Bigtable** 可以作为 MapReduce 框架的输入和输出。

5 BigTable 构件

Bigtable 是建立在其它的几个 Google 基础构件上的。**BigTable** 使用 Google 的分布式文件系统(GFS)【17】存储日志文件和数据文件。**BigTable** 集群通常运行在一个共享的机器池中，池中的机器还会运行其它的各种

各样的分布式应用程序，BigTable 的进程经常要和其它应用的进程共享机器。BigTable 依赖集群管理系统来调度任务、管理共享的机器上的资源、处理机器的故障、以及监视机器的状态。

BigTable 内部存储数据的文件是 Google SSTable 格式的。SSTable 是一个持久化的、排序的、不可更改的 Map 结构，而 Map 是一个 key-value 映射的数据结构，key 和 value 的值都是任意的 Byte 串。可以对 SSTable 进行如下的操作：查询与一个 key 值相关的 value，或者遍历某个 key 值范围内的所有的 key-value 对。从内部看，SSTable 是一系列的数据块（通常每个块的大小是 64KB，这个大小是可以配置的）。SSTable 使用块索引（通常存储在 SSTable 的最后）来定位数据块；在打开 SSTable 的时候，索引被加载到内存。每次查找都可以通过一次磁盘搜索完成：首先使用二分查找法在内存中的索引里找到数据块的位置，然后再从硬盘读取相应的数据块。也可以选择把整个 SSTable 都放在内存中，这样就不必访问硬盘了。

BigTable 还依赖一个高可用的、序列化的分布式锁服务组件，叫做 Chubby【8】。一个 Chubby 服务包括了 5 个活动的副本，其中的一个副本被选为 Master，并且处理请求。只有在大多数副本都是正常运行的，并且彼此之间能够互相通信的情况下，Chubby 服务才是可用的。当有副本失效的时候，Chubby 使用 Paxos 算法【9,23】来保证副本的一致性。Chubby 提供了一个名字空间，里面包括了目录和小文件。每个目录或者文件可以当成一个锁，读写文件的操作都是原子的。Chubby 客户程序库提供对 Chubby 文件的一致性缓存。每个 Chubby 客户程序都维护一个与 Chubby 服务的会话。如果客户程序不能在租约到期的时间内重新签订会话的租约，这个会话就过期失效了⁹。当一个会话失效时，它拥有的锁和打开的文件句柄都失效了。Chubby 客户程序可以在文件和目录上注册回调函数，当文件或目录改变、或者会话过期时，回调函数会通知客户程序。

Bigtable 使用 Chubby 完成以下的几个任务：

1. 确保在任何给定的时间内最多只有一个活动的 Master 副本；
2. 存储 BigTable 数据的自引导指令的位置（参考 5.1 节）；
3. 查找 Tablet 服务器，以及在 Tablet 服务器失效时进行善后（5.2 节）；
4. 存储 BigTable 的模式信息（每张表的列族信息）；
5. 以及存储访问控制列表。

如果 Chubby 长时间无法访问，BigTable 就会失效。最近我们在使用 11 个 Chubby 服务实例的 14 个 BigTable 集群上测量了这个影响。由于 Chubby 不可用而导致 BigTable 中的部分数据不能访问的平均比率是 0.0047%（Chubby 不能访问的原因可能是 Chubby 本身失效或者网络问题）。单个集群里，受 Chubby 失效影响最大的百分比是 0.0326%¹⁰。

⁹ 又用到了 lease。原文是：A client's session expires if it is unable to renew its session lease within the lease expiration time.

¹⁰ 原文是：The percentage for the single cluster that was most affected by Chubby unavailability was 0.0326%.

6 介绍

Bigtable 包括了三个主要的组件：链接到客户程序中的库、一个 Master 服务器和多个 Tablet 服务器。针对系统工作负载的变化情况，BigTable 可以动态的向集群中添加（或者删除）Tablet 服务器。

Master 服务器主要负责以下工作：为 Tablet 服务器分配 Tablets、检测新加入的或者过期失效的 Table 服务器、对 Tablet 服务器进行负载均衡、以及对保存在 GFS 上的文件进行垃圾收集。除此之外，它还处理对模式的相关修改操作，例如建立表和列族。

每个 Tablet 服务器都管理一个 Tablet 的集合（通常每个服务器有大约数十个至上千个 Tablet）。每个 Tablet 服务器负责处理它所加载的 Tablet 的读写操作，以及在 Tablets 过大时，对其进行分割。

和很多 Single-Master 类型的分布式存储系统【17.21】类似，客户端读取的数据都不经过 Master 服务器：客户程序直接和 Tablet 服务器通信进行读写操作。由于 BigTable 的客户程序不必通过 Master 服务器来获取 Tablet 的位置信息，因此，大多数客户程序甚至完全不需要和 Master 服务器通信。在实际应用中，Master 服务器的负载是很轻的。

一个 BigTable 集群存储了很多表，每个表包含了一个 Tablet 的集合，而每个 Tablet 包含了某个范围内的行的所有相关数据。初始状态下，一个表只有一个 Tablet。随着表中数据的增长，它被自动分割成多个 Tablet，缺省情况下，每个 Tablet 的尺寸大约是 100MB 到 200MB。

6.1 Tablet 的位置

我们使用一个三层的、类似 B+树[10]的结构存储 Tablet 的位置信息(如图 4)。

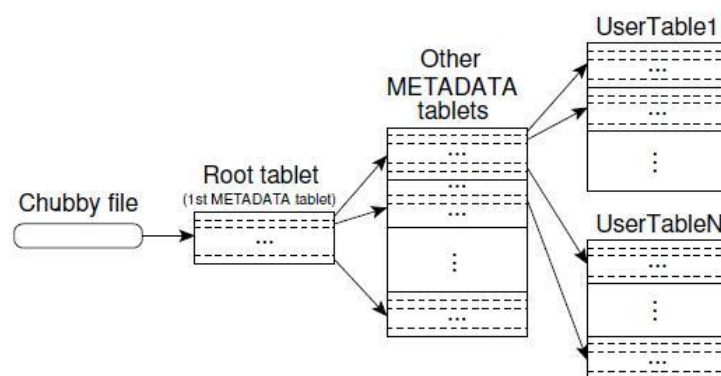


Figure 4: Tablet location hierarchy.

第一层是一个存储在 Chubby 中的文件，它包含了 Root Tablet 的位置信息。Root Tablet 包含了一个特殊的 METADATA 表里所有的 Tablet 的位置信息。METADATA 表的每个 Tablet 包含了一个用户 Tablet 的集合。Root Tablet 实际上是 METADATA 表的第一个 Tablet，只不过对它的处理比较特殊 — Root Tablet 永远不会被分割 — 这就保证了 Tablet 的位置信息存储结构不会超过三层。

在 METADATA 表里面，每个 Tablet 的位置信息都存放在一个行关键字下面，而这个行关键字是由 Tablet 所在的表的标识符和 Tablet 的最后一行编码而成的。METADATA 的每一行都存储了大约 1KB 的内存数据。在一个大小适中的、容量限制为 128MB 的 METADATA Tablet 中，采用这种三层结构的存储模式，可以标识 2^{34} 个 Tablet 的地址（如果每个 Tablet 存储 128MB 数据，那么一共可以存储 2^{61} 字节数据）。

客户程序使用的库会缓存 Tablet 的位置信息。如果客户程序没有缓存某个 Tablet 的地址信息，或者发现它缓存的地址信息不正确，客户程序就在树状的存储结构中递归的查询 Tablet 位置信息；如果客户端缓存是空的，那么寻址算法需要通过三次网络来回通信寻址，这其中包括了一次 Chubby 读操作；如果客户端缓存的地址信息过期了，那么寻址算法可能需要最多 6 次网络来回通信才能更新数据，因为只有在缓存中没有查到数据的时候才能发现数据过期¹¹。尽管 Tablet 的地址信息是存放在内存里的，对它的操作不必访问 GFS 文件系统，但是，通常我们会通过预取 Tablet 地址来进一步的减少访问的开销：每次需要从 METADATA 表中读取一个 Tablet 的元数据的时候，它都会多读取几个 Tablet 的元数据。

在 METADATA 表中还存储了次级信息¹²，包括每个 Tablet 的事件日志（例如，什么时候一个服务器开始为该 Tablet 提供服务）。这些信息有助于排查错误和性能分析。

6.2 Tablet 分配

在任何时刻，一个 Tablet 只能分配给一个 Tablet 服务器。Master 服务器记录了当前有哪些活跃的 Tablet 服务器、哪些 Tablet 分配给了哪些 Tablet 服务器、哪些 Tablet 还没有被分配。当一个 Tablet 还没有被分配、并且刚好有一个 Tablet 服务器有足够的空闲空间装载该 Tablet 时，Master 服务器会给这个 Tablet 服务器发送一个装载请求，把 Tablet 分配给这个服务器。

BigTable 使用 Chubby 跟踪记录 Tablet 服务器的状态。当一个 Tablet 服务器启动时，它在 Chubby 的一个指定目录下建立一个有唯一性名字的文件，并且获取该文件的独占锁。Master 服务器实时监控着这个目录（服务器目录），因此 Master 服务器能够知道有新的 Tablet 服务器加入了。如果 Tablet 服务器丢失了 Chubby 上的独占锁 — 比如由于网络断开导致 Tablet 服务器和 Chubby 的会话丢失 — 它就停止对 Tablet 提供服务。

（Chubby 提供了一种高效的机制，利用这种机制，Tablet 服务器能够在不增加网络负担的情况下知道它是否还持有锁）。只要文件还存在，Tablet 服务器就会试图重新获得对该文件的独占锁；如果文件不存在了，那么 Tablet 服务器就不能再提供服务了，它会自行退出¹³。当 Tablet 服务器终止时（比如，集群的管理系统将运行该 Tablet 服务器的主机从集群中移除），它会尝试释放它持有的文件锁，这样一来，Master 服务器就能尽快把 Tablet 分配到其它的 Tablet 服务器。

¹¹ 其中的三次通信发现缓存过期，另外三次更新缓存数据（假设 METADATA 的 Tablet 没有被频繁的移动

¹² secondary information

¹³ so it kills itself

Master 服务器负责检查一个 Tablet 服务器是否已经不再为它的 Tablet 提供服务了，并且要尽快重新分配它加载的 Tablet。Master 服务器通过轮询 Tablet 服务器文件锁的状态来检测何时 Tablet 服务器不再为 Tablet 提供服务。如果一个 Tablet 服务器报告它丢失了文件锁，或者 Master 服务器最近几次尝试和它通信都没有得到响应，Master 服务器就会尝试获取该 Tablet 服务器文件的独占锁；如果 Master 服务器成功获取了独占锁，那么就说明 Chubby 是正常运行的，而 Tablet 服务器要么是宕机了、要么是不能和 Chubby 通信了，因此，Master 服务器就删除该 Tablet 服务器在 Chubby 上的服务器文件以确保它不再给 Tablet 提供服务。一旦 Tablet 服务器在 Chubby 上的服务器文件被删除了，Master 服务器就把之前分配给它的所有的 Tablet 放入未分配的 Tablet 集合中。为了确保 Bigtable 集群在 Master 服务器和 Chubby 之间网络出现故障的时候仍然可以使用，Master 服务器在它的 Chubby 会话过期后主动退出。但是不管怎样，如同我们前面所描述的，Master 服务器的故障不会改变现有 Tablet 在 Tablet 服务器上的分配状态。

当集群管理系统启动了一个 Master 服务器之后，Master 服务器首先要了解当前 Tablet 的分配状态，之后才能够修改分配状态。Master 服务器在启动的时候执行以下步骤：

1. Master 服务器从 Chubby 获取一个唯一的 Master 锁，用来阻止创建其它的 Master 服务器实例；
2. Master 服务器扫描 Chubby 的服务器文件锁存储目录，获取当前正在运行的服务器列表；
3. Master 服务器和所有的正在运行的 Tablet 表服务器通信，获取每个 Tablet 服务器上 Tablet 的分配信息；
4. Master 服务器扫描 METADATA 表获取所有的 Tablet 的集合。

在扫描的过程中，当 Master 服务器发现了一个还没有分配的 Tablet，Master 服务器就将这个 Tablet 加入未分配的 Tablet 集合等待合适的时机分配。

可能会遇到一种复杂的情况：在 METADATA 表的 Tablet 还没有被分配之前是不能够扫描它的。因此，在开始扫描之前（步骤 4），如果在第三步的扫描过程中发现 Root Tablet 还没有分配，Master 服务器就把 Root Tablet 加入到未分配的 Tablet 集合。这个附加操作确保了 Root Tablet 会被分配。由于 Root Tablet 包括了所有 METADATA 的 Tablet 的名字，因此 Master 服务器扫描完 Root Tablet 以后，就得到了所有的 METADATA 表的 Tablet 的名字了。

保存现有 Tablet 的集合只有在以下事件发生时才会改变：建立了一个新表或者删除了一个旧表、两个 Tablet 被合并了、或者一个 Tablet 被分割成两个小的 Tablet。Master 服务器可以跟踪记录所有这些事件，因为除了最后一个事件外的两个事件都是由它启动的。Tablet 分割事件需要特殊处理，因为它是由 Tablet 服务器启动。在分割操作完成之后，Tablet 服务器通过在 METADATA 表中记录新的 Tablet 的信息来提交这个操作；当分割操作提交之后，Tablet 服务器会通知 Master 服务器。如果分割操作已提交的信息没有通知到 Master 服务器（可能两个服务器中有一个宕机了），Master 服务器在要求 Tablet 服务器装载已经被分割的子表的时候会发

现一个新的 Tablet。通过对比 METADATA 表中 Tablet 的信息，Tablet 服务器会发现 Master 服务器要求其装载的 Tablet 并不完整，因此，Tablet 服务器会重新向 Master 服务器发送通知信息。

6.3 Tablet 服务

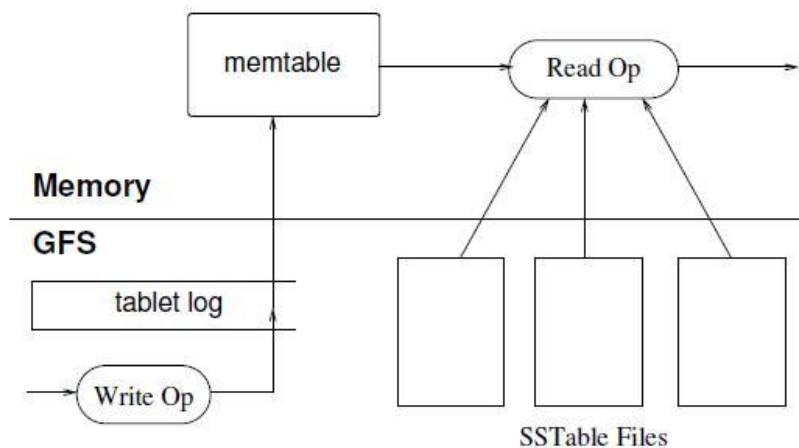


Figure 5: Tablet Representation

如图 5 所示，Tablet 的持久化状态信息保存在 GFS 上。更新操作提交到 REDO 日志中¹⁴。在这些更新操作中，最近提交的那些存放在一个排序的缓存中，我们称这个缓存为 memtable；较早的更新存放在一系列 SSTable 中。为了恢复一个 Tablet，Tablet 服务器首先从 METADATA 表中读取它的元数据。Tablet 的元数据包含了组成这个 Tablet 的 SSTable 的列表，以及一系列的 Redo Point¹⁵，这些 Redo Point 指向可能含有该 Tablet 数据的已提交的日志记录。Tablet 服务器把 SSTable 的索引读进内存，之后通过重复 Redo Point 之后提交的更新来重建 memtable。

当对 Tablet 服务器进行写操作时，Tablet 服务器首先要检查这个操作格式是否正确、操作发起者是否有执行这个操作的权限。权限验证的方法是通过从一个 Chubby 文件里读取出来的具有写权限的操作者列表来进行验证（这个文件几乎一定会存放在 Chubby 客户缓存里）。成功的修改操作会记录在提交日志里。可以采用批量提交方式¹⁶来提高包含大量小的修改操作的应用程序的吞吐量【13，16】。当一个写操作提交后，写的内容插入到 memtable 里面。

当对 Tablet 服务器进行读操作时，Tablet 服务器会作类似的完整性和权限检查。一个有效的读操作在一个由一系列 SSTable 和 memtable 合并的视图里执行。由于 SSTable 和 memtable 是按字典排序的数据结构，因此可以高效生成合并视图。

¹⁴ 原文：Updates are committed to a commit log that stores redo records

¹⁵ 原文：a set of redo points

¹⁶ 原文：group commit

当进行 Tablet 的合并和分割时，正在进行的读写操作能够继续进行。

6.4 空间收缩¹⁷

随着写操作的执行，memtable 的大小不断增加。当 memtable 的尺寸到达一个门限值的时候，这个 memtable 就会被冻结，然后创建一个新的 memtable；被冻结住 memtable 会被转换成 SSTable，然后写入 GFS¹⁸。Minor Compaction 过程有两个目的：shrink¹⁹ Tablet 服务器使用的内存，以及在服务器灾难恢复过程中，减少必须从提交日志里读取的数据量。在 Compaction 过程中，正在进行的读写操作仍能继续。

每一次 Minor Compaction 都会创建一个新的 SSTable。如果 Minor Compaction 过程不停滞的持续进行下去，读操作可能需要合并来自多个 SSTable 的更新；否则，我们通过定期在后台执行 Merging Compaction 过程合并文件，限制这类文件的数量。Merging Compaction 过程读取一些 SSTable 和 memtable 的内容，合并成一个新的 SSTable。只要 Merging Compaction 过程完成了，输入的这些 SSTable 和 memtable 就可以删除了。

合并所有的 SSTable 并生成一个新的 SSTable 的 Merging Compaction 过程叫作 Major Compaction。由非 Major Compaction 产生的 SSTable 可能含有特殊的删除条目，这些删除条目能够隐藏在旧的、但是依然有效的 SSTable 中已经删除的数据²⁰。而 Major Compaction 过程生成的 SSTable 不包含已经删除的信息或数据。Bigtable 循环扫描它所有的 Tablet，并且定期对它们执行 Major Compaction。Major Compaction 机制允许 Bigtable 回收已经删除的数据占有的资源，并且确保 BigTable 能及时清除已经删除的数据²¹，这对存放敏感数据的服务是非常重要的。

7 优化

上一章我们描述了 Bigtable 的实现，我们还需要很多优化工作才能使 Bigtable 到达用户要求的高性能、高可用性和高可靠性。本章描述了 Bigtable 实现的其它部分，为了更好的强调这些优化工作，我们将深入细节。

7.1 局部性群组

客户程序可以将多个列族组合成一个局部性群组。对 Tablet 中的每个局部性群组都会生成一个单独的

¹⁷ Compactions 这个词挺简单，但是在这节里面挺难翻译的。应该是空间缩减的意思，但是似乎又不能完全概括它在上下文中的意思，在下文中不进行翻译。

¹⁸ 我们称这种 Compaction 行为为 Minor Compaction

¹⁹ shrink 是数据库用语，表示空间收缩

²⁰ 令人费解啊，原文是 SSTables produced by non-major compactions can contain special deletion entries that suppress deleted data in older SSTables that are still live.

²¹ 实际是回收资源。数据删除后，它占有的空间并不能马上重复利用；只有空间回收后才能重复使用。

SSTable。将通常不会一起访问的列族分割成不同的局部性群组可以提高读取操作的效率。例如，在 Webtable 表中，网页的元数据（比如语言和 Checksum）可以在一个局部性群组中，网页的内容可以在另外一个群组：当一个应用程序要读取网页的元数据的时候，它没有必要去读取所有的页面内容。

此外，可以以局部性群组为单位设定一些有用的调试参数。比如，可以把一个局部性群组设定为全部存储在内存中。Tablet 服务器依照惰性加载的策略将设定为放入内存的局部性群组的 SSTable 装载进内存。加载完成之后，访问属于该局部性群组的列族的时候就不必读取硬盘了。这个特性对于需要频繁访问的小块数据特别有用：在 Bigtable 内部，我们利用这个特性提高 METADATA 表中具有位置相关性的列族的访问速度。

7.2 压缩

客户程序可以控制一个局部性群组的 SSTable 是否需要压缩；如果需要压缩，那么以什么格式来压缩。每个 SSTable 的块（块的大小由局部性群组的优化参数指定）都使用用户指定的压缩格式来压缩。虽然分块压缩浪费了少量空间²²，但是，我们在只读取 SSTable 的一小部分数据的时候就不必解压整个文件了。很多客户程序使用了“两遍”的、可定制的压缩方式。第一遍采用 Bentley and McIlroy's 方式[6]，这种方式在一个很大的扫描窗口里对常见的长字符串进行压缩；第二遍是采用快速压缩算法，即在一个 16KB 的小扫描窗口中寻找重复数据。两个压缩的算法都很快，在现在的机器上，压缩的速率达到 100-200MB/s，解压的速率达到 400-1000MB/s。

虽然我们在选择压缩算法的时候重点考虑的是速度而不是压缩的空间，但是这种两遍的压缩方式在空间压缩率上的表现也是令人惊叹。比如，在 Webtable 的例子中，我们使用这种压缩方式来存储网页内容。在一次测试中，我们在一个压缩的局部性群组中存储了大量的网页。针对实验的目的，我们没有存储每个文档所有版本的数据，我们仅仅存储了一个版本的数据。该模式的空间压缩比达到了 10:1。这比传统的 Gzip 在压缩 HTML 页面时 3:1 或者 4:1 的空间压缩比好的多；“两遍”的压缩模式如此高效的原因是由于 Webtable 的行的存放方式：从同一个主机获取的页面都存在临近的地方。利用这个特性，Bentley-McIlroy 算法可以从来自同一个主机的页面里找到大量的重复内容。不仅仅是 Webtable，其它的很多应用程序也通过选择合适的行名来将相似的数据聚簇在一起，以获取较高的压缩率。当我们在 Bigtable 中存储同一份数据的多个版本的时候，压缩效率会更高。

7.3 通过缓存提高读操作的性能

为了提高读操作的性能，Tablet 服务器使用二级缓存的策略。扫描缓存是第一级缓存，主要缓存 Tablet 服务器通过 SSTable 接口获取的 Key-Value 对；Block 缓存是二级缓存，缓存的是从 GFS 读取的 SSTable 的

²² 相比于对整个 SSTable 进行压缩，分块压缩压缩率较低

Block。对于经常要重复读取相同数据的应用程序来说，扫描缓存非常有效；对于经常要读取刚刚读过的数据附近的数据的应用程序来说，Block 缓存更有用（例如，顺序读，或者在一个热点的行的局部性群组中随机读取不同的列）。

7.3.1 Bloom 过滤器²³

如 6.3 节所述，一个读操作必须读取构成 Tablet 状态的所有 SSTable 的数据。如果这些 SSTable 不在内存中，那么就需要多次访问硬盘。我们通过允许客户程序对特定局部性群组的 SSTable 指定 Bloom 过滤器【7】，来减少硬盘访问的次数。我们可以使用 Bloom 过滤器查询一个 SSTable 是否包含了特定行和列的数据。对于某些特定应用程序，我们只付出了少量的、用于存储 Bloom 过滤器的内存的代价，就换来了读操作显著减少的磁盘访问的次数。使用 Bloom 过滤器也隐式的达到了当应用程序访问不存在的行或列时，大多数时候我们都不需要访问硬盘的目的。

7.3.2 Commit 日志的实现

如果我们把对每个 Tablet 的操作的 Commit 日志都存在一个单独的文件的话，那么就会产生大量的文件，并且这些文件会并行的写入 GFS。根据 GFS 服务器底层文件系统实现的方案，要把这些文件写入不同的磁盘日志文件时²⁴，会有大量的磁盘 Seek 操作。另外，由于批量提交²⁵中操作的数目一般比较少，因此，对每个 Tablet 设置单独的日志文件也会给批量提交本应具有优化效果带来很大的负面影响。为了避免这些问题，我们设置每个 Tablet 服务器一个 Commit 日志文件，把修改操作的日志以追加方式写入同一个日志文件，因此一个实际的日志文件中混合了对多个 Tablet 修改的日志记录。

使用单个日志显著提高了普通操作的性能，但是将恢复的工作复杂化了。当一个 Tablet 服务器宕机时，它加载的 Tablet 将会被移到很多其它的 Tablet 服务器上：每个 Tablet 服务器都装载很少的几个原来的服务器的 Tablet。当恢复一个 Tablet 的状态的时候，新的 Tablet 服务器要从原来的 Tablet 服务器写的日志中提取修改操作的信息，并重新执行。然而，这些 Tablet 修改操作的日志记录都混合在同一个日志文件中的。一种方法新的 Tablet 服务器读取完整的 Commit 日志文件，然后只重复执行它需要恢复的 Tablet 的相关修改操作。使用这种方法，假如有 100 台 Tablet 服务器，每台都加载了失效的 Tablet 服务器上的一个 Tablet，那么，这个日志文件就要被读取 100 次（每个服务器读取一次）。

为了避免多次读取日志文件，我们首先把日志按照关键字（table, row name, log sequence number）排序。排序之后，对同一个 Tablet 的修改操作的日志记录就连续存放在了一起，因此，我们只要一次磁盘 Seek 操作、

²³ Bloom，又叫布隆过滤器，什么意思？请参考 Google 黑板报 <http://googlechinablog.com/2007/07/bloom-filter.html>

²⁴ 原文：different physical log files

²⁵ 原文：group commit

之后顺序读取就可以了。为了并行排序，我们先将日志分割成 64MB 的段，之后在不同的 Tablet 服务器对段进行并行排序。这个排序工作由 Master 服务器来协同处理，并且在一个 Tablet 服务器表明自己需要从 Commit 日志文件恢复 Tablet 时开始执行。

在向 GFS 中写 Commit 日志的时候可能会引起系统颠簸，原因是多种多样的（比如，写操作正在进行的时候，一个 GFS 服务器宕机了；或者连接三个 GFS 副本所在的服务器的网络拥塞或者过载了）。为了确保在 GFS 负载高峰时修改操作还能顺利进行，每个 Tablet 服务器实际上有两个日志写入线程，每个线程都写自己的日志文件，并且在任何时刻，只有一个线程是工作的。如果一个线程的在写入的时候效率很低，Tablet 服务器就切换到另外一个线程，修改操作的日志记录就写入到这个线程对应的日志文件中。每个日志记录都有一个序列号，因此，在恢复的时候，Tablet 服务器能够检测出并忽略掉那些由于线程切换而导致的重复的记录。

7.3.3 Tablet 恢复提速

当 Master 服务器将一个 Tablet 从一个 Tablet 服务器移到另外一个 Tablet 服务器时，源 Tablet 服务器会对这个 Tablet 做一次 Minor Compaction。这个 Compaction 操作减少了 Tablet 服务器的日志文件中没有归并的记录，从而减少了恢复的时间。Compaction 完成之后，该服务器就停止为该 Tablet 提供服务。在卸载 Tablet 之前，源 Tablet 服务器还会再做一次（通常会很快）Minor Compaction，以消除前面在一次压缩过程中又产生的未归并的记录。第二次 Minor Compaction 完成以后，Tablet 就可以被装载到新的 Tablet 服务器上了，并且不需要从日志中进行恢复。

7.3.4 利用不变性

我们在使用 Bigtable 时，除了 SSTable 缓存之外的其它部分产生的 SSTable 都是不变的，我们可以利用这一点对系统进行简化。例如，当从 SSTable 读取数据的时候，我们不必对文件系统访问操作进行同步。这样一来，就可以非常高效的实现对行的并行操作。memtable 是唯一一个能被读和写操作同时访问的可变数据结构。为了减少在读操作时的竞争，我们对内存表采用 COW(Copy-on-write)机制，这样就允许读写操作并行执行。

因为 SSTable 是不变的，因此，我们可以把永久删除被标记为“删除”的数据的问题，转换成对废弃的 SSTable 进行垃圾收集的问题了。每个 Tablet 的 SSTable 都在 METADATA 表中注册了。Master 服务器采用“标记-删除”的垃圾回收方式删除 SSTable 集合中废弃的 SSTable【25】，METADATA 表则保存了 Root SSTable 的集合。

最后，SSTable 的不变性使得分割 Tablet 的操作非常快捷。我们不必为每个分割出来的 Tablet 建立新的 SSTable 集合，而是共享原来的 Tablet 的 SSTable 集合。

8 性能评估

为了测试 Bigtable 的性能和可扩展性，我们建立了一个包括 N 台 Tablet 服务器的 Bigtable 集群，这里 N 是可变的。每台 Tablet 服务器配置了 1GB 的内存，数据写入到一个包括 1786 台机器、每台机器有 2 个 IDE 硬盘的 GFS 集群上。我们使用 N 台客户机生成工作负载测试 Bigtable。（我们使用和 Tablet 服务器相同数目的客户机以确保客户机不会成为瓶颈。）每台客户机配置 2GZ 双核 Opteron 处理器，配置了足以容纳所有进程工作数据集的物理内存，以及一张 Gigabit 的以太网卡。这些机器都连入一个两层的、树状的交换网络里，在根节点上的带宽加起来有大约 100-200Gbps。所有的机器采用相同的设备，因此，任何两台机器间网络来回一次的时间都小于 1ms。

Tablet 服务器、Master 服务器、测试机、以及 GFS 服务器都运行在同一组机器上。每台机器都运行一个 GFS 的服务器。其它的机器要么运行 Tablet 服务器、要么运行客户程序、要么运行在测试过程中，使用这组机器的其它的任务启动的进程。

R 是测试过程中，Bigtable 包含的不同的列关键字的数量。我们精心选择 R 的值，保证每次基准测试对每台 Tablet 服务器读/写的数据量都在 1GB 左右。

在序列写的基准测试中，我们使用的列关键字的范围是 0 到 R-1。这个范围又被划分为 10N 个大小相同的区间。核心调度程序把这些区间分配给 N 个客户端，分配方式是：只要客户程序处理完上一个区间的数据，调度程序就把后续的、尚未处理的区间分配给它。这种动态分配的方式有助于减少客户机上同时运行的其它进程对性能的影响。我们在每个列关键字下写入一个单独的字符串。每个字符串都是随机生成的、因此也没有被压缩²⁶。另外，不同列关键字下的字符串也是不同的，因此也就不存在跨行的压缩。随机写入基准测试采用类似的方法，除了行关键字在写入前先做 Hash，Hash 采用按 R 取模的方式，这样就保证了在整个基准测试持续的时间内，写入的工作负载均匀的分布在列存储空间内。

序列读的基准测试生成列关键字的方式与序列写相同，不同于序列写在列关键字下写入字符串的是，序列读是读取列关键字下的字符串（这些字符串由之前序列写基准测试程序写入）。同样的，随机读的基准测试和随机写是类似的。

扫描基准测试和序列读类似，但是使用的是 BigTable 提供的、从一个列范围内扫描所有的 value 值的 API。由于一次 RPC 调用就从一个 Tablet 服务器取回了大量的 Value 值，因此，使用扫描方式的基准测试程序可以减少 RPC 调用的次数。

随机读（内存）基准测试和随机读类似，除了包含基准测试数据的局部性群组被设置为“in-memory”，因此，读操作直接从 Tablet 服务器的内存中读取数据，不需要从 GFS 读取数据。针对这个测试，我们把每台

²⁶ 参考第 7 节的压缩小节

Tablet 服务器存储的数据从 1GB 减少到 100MB，这样就可以把数据全部加载到 Tablet 服务器的内存中了。

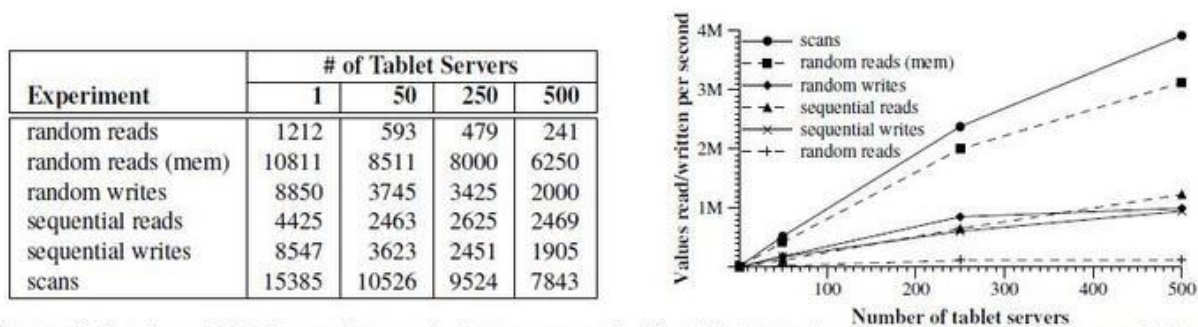


Figure 6: Number of 1000-byte values read/written per second. The table shows the rate per tablet server; the graph shows the aggregate rate.

图 6 中有两个视图，显示了我们的基准测试的性能；图中的数据和曲线是读/写 1000-byte value 值时取得的。图中的表格显示了每个 Tablet 服务器每秒钟进行的操作的次数；图中的曲线显示了每秒钟所有的 Tablet 服务器上操作次数的总和。

8.1 单个 Tablet 服务器的性能

我们首先分析下单个 Tablet 服务器的性能。随机读的性能比其它操作慢一个数量级或以上²⁷。每个随机读操作都要通过网络从 GFS 传输 64KB 的 SSTable 到 Tablet 服务器，而我们只使用其中大小是 1000 byte 的一个 value 值。Tablet 服务器每秒大约执行 1200 次读操作，也就是每秒大约从 GFS 读取 75MB 的数据。这个传输带宽足以占满 Tablet 服务器的 CPU 时间，因为其中包括了网络协议栈的消耗、SSTable 解析、以及 BigTable 代码执行；这个带宽也足以占满我们系统中网络的链接带宽。大多数采用这种访问模式 BigTable 应用程序会减小 Block 的大小，通常会减到 8KB。

内存中的随机读操作速度快很多，原因是，所有 1000-byte 的读操作都是从 Tablet 服务器的本地内存中读取数据，不需要从 GFS 读取 64KB 的 Block。

随机和序列写操作的性能比随机读要好些，原因是每个 Tablet 服务器直接把写入操作的内容追加到一个 Commit 日志文件的尾部，并且采用批量提交的方式，通过把数据以流的方式写入到 GFS 来提高性能。随机写和序列写在性能上没有太大的差异，这两种方式的写操作实际上都是把操作内容记录到同一个 Tablet 服务器的 Commit 日志文件中。

序列读的性能好于随机读，因为每取出 64KB 的 SSTable 的 Block 后，这些数据会缓存到 Block 缓存中，后续的 64 次读操作直接从缓存读取数据。

扫描的性能更高，这是由于客户程序每一次 RPC 调用都会返回大量的 value 的数据，所以，RPC 调用的消耗基本抵消了。

²⁷ 原文：by the order of magnitude or more

8.2 性能提升

随着我们将系统中的 Tablet 服务器从 1 台增加到 500 台，系统的整体吞吐量有了梦幻般的增长，增长的倍率超过了 100。比如，随着 Tablet 服务器的数量增加了 500 倍，内存中的随机读操作的性能增加了 300 倍。之所以会有这样的性能提升，主要是因为这个基准测试的瓶颈是单台 Tablet 服务器的 CPU。

尽管如此，性能的提升还不是线性的。在大多数的基准测试中我们看到，当 Tablet 服务器的数量从 1 台增加到 50 台时，每台服务器的吞吐量会有一个明显的下降。这是由于多台服务器间的负载不均衡造成的，大多数情况下是由于其它的程序抢占了 CPU。我们负载均衡的算法会尽量避免这种不均衡，但是基于两个主要原因，这个算法并不能完美的工作：一个是尽量减少 Tablet 的移动导致重新负载均衡能力受限（如果 Tablet 被移动了，那么在短时间内 — 一般是 1 秒内 — 这个 Tablet 是不可用的），另一个是我们的基准测试程序产生的负载会有波动²⁸。

随机读基准测试的测试结果显示，随机读的性能随 Tablet 服务器数量增加的提升幅度最小（整体吞吐量只提升了 100 倍，而服务器的数量却增加了 500 倍）。这是因为每个 1000-byte 的读操作都会导致一个 64KB 大的 Block 在网络上传输。这样的网络传输量消耗了我们网络中各种共享的 1GB 的链路，结果导致随着我们增加服务器的数量，每台服务器上的吞吐量急剧下降。

9 实际应用

# of tablet servers			# of clusters
0	..	19	259
20	..	49	47
50	..	99	20
100	..	499	50
> 500			12

Table 1: Distribution of number of tablet servers in Bigtable clusters.

截止到 2006 年 8 月，Google 内部一共有 388 个非测试用的 Bigtable 集群运行在各种各样的服务器集群上，合计大约有 24500 个 Tablet 服务器。表 1 显示了每个集群上 Tablet 服务器的大致分布情况。这些集群中，许多用于开发目的，因此会有一段时期比较空闲。通过观察一个由 14 个集群、8069 个 Tablet 服务器组成的集群组，我们看到整体的吞吐量超过了每秒 1200000 次请求，发送到系统的 RPC 请求导致的网络负载达到了 741MB/s，系统发出的 RPC 请求网络负载大约是 16GB/s。

²⁸ 原文：the load generated by our benchmarks shifts around as the benchmark progresses

Project name	Table size (TB)	Compression ratio	# Cells (billions)	# Column Families	# Locality Groups	% in memory	Latency-sensitive?
<i>Crawl</i>	800	11%	1000	16	8	0%	No
<i>Crawl</i>	50	33%	200	2	2	0%	No
<i>Google Analytics</i>	20	29%	10	1	1	0%	Yes
<i>Google Analytics</i>	200	14%	80	1	1	0%	Yes
<i>Google Base</i>	2	31%	10	29	3	15%	Yes
<i>Google Earth</i>	0.5	64%	8	7	2	33%	Yes
<i>Google Earth</i>	70	–	9	8	3	0%	No
<i>Orkut</i>	9	–	0.9	8	5	1%	Yes
<i>Personalized Search</i>	4	47%	6	93	11	5%	Yes

Table 2: Characteristics of a few tables in production use. *Table size* (measured before compression) and *# Cells* indicate approximate sizes. *Compression ratio* is not given for tables that have compression disabled.

表 2 提供了一些目前正在使用的表的相关数据。一些表存储的是用户相关的数据，另外一些存储的则是用于批处理的数据；这些表在总的大小、每个数据项的平均大小、从内存中读取的数据的比例、表的 Schema 的复杂程度上都有很大的差别。本节的其余部分，我们将主要描述三个产品研发团队如何使用 Bigtable 的。

9.1 Google Analytics

Google Analytics 是用来帮助 Web 站点的管理员分析他们网站的流量模式的服务。它提供了整体状况的统计数据，比如每天的独立访问的用户数量、每天每个 URL 的浏览次数；它还提供了用户使用网站的行为报告，比如根据用户之前访问的某些页面，统计出几成的用户购买了商品。

为了使用这个服务，Web 站点的管理员只需要在他们的 Web 页面中嵌入一小段 JavaScript 脚本就可以了。这个 Javascript 程序在页面被访问的时候调用。它记录了各种 Google Analytics 需要使用的信息，比如用户的标识、获取的网页的相关信息。Google Analytics 汇总这些数据，之后提供给 Web 站点的管理员。

我们粗略的描述一下 Google Analytics 使用的两个表。Row Click 表（大约有 200TB 数据）的每一行存放了一个最终用户的会话。行的名字是一个包含 Web 站点名字以及用户会话创建时间的元组。这种模式保证了对同一个 Web 站点的访问会话是顺序的，会话按时间顺序存储。这个表可以压缩到原来尺寸的 14%。

Summary 表（大约有 20TB 的数据）包含了关于每个 Web 站点的、各种类型的预定义汇总信息。一个周期性运行的 MapReduce 任务根据 Raw Click 表的数据生成 Summary 表的数据。每个 MapReduce 工作进程都从 Raw Click 表中提取最新的会话数据。系统的整体吞吐量受限于 GFS 的吞吐量。这个表的能够压缩到原有尺寸的 29%。

9.2 Google Earth

Google 通过一组服务为用户提供了高分辨率的地球表面卫星图像，访问的方式可以使通过基于 Web 的 Google Maps 访问接口 (maps.google.com)，也可以通过 Google Earth 定制的客户端软件访问。这些软件产品允许用户浏览地球表面的图像：用户可以在不同的分辨率下平移、查看和注释这些卫星图像。这个系统使用

一个表存储预处理数据，使用另外一组表存储用户数据。

数据预处理流水线使用一个表存储原始图像。在预处理过程中，图像被清除，图像数据合并到最终的服务数据中。这个表包含了大约 70TB 的数据，所以需要从磁盘读取数据。图像已经被高效压缩过了，因此存储在 Bigtable 后不需要再压缩了。

Imagery 表的每一行都代表了一个单独的地理区域。行都有名称，以确保毗邻的区域存储在了一起。Imagery 表中有一个列族用来记录每个区域的数据源。这个列族包含了大量的列：基本上市每个列对应一个原始图片的数据。由于每个地理区域都是由很少的几张图片构成的，因此这个列族是非常稀疏的。

数据预处理流水线高度依赖运行在 Bigtable 上的 MapReduce 任务传输数据。在运行某些 MapReduce 任务的时候，整个系统中每台 Tablet 服务器的数据处理速度是 1MB/s。

这个服务系统使用一个表来索引 GFS 中的数据。这个表相对较小（大约是 500GB），但是这个表必须在保证较低的响应延时的前提下，针对每个数据中心，每秒处理几万个查询请求。因此，这个表必须在上百个 Tablet 服务器上存储数据，并且使用 in-memory 的列族。

9.3 个性化查询

个性化查询（www.google.com/psearch）是一个双向服务；这个服务记录用户的查询和点击，涉及到各种 Google 的服务，比如 Web 查询、图像和新闻。用户可以浏览他们查询的历史，重复他们之前的查询和点击；用户也可以定制基于 Google 历史使用习惯模式的个性化查询结果。

个性化查询使用 Bigtable 存储每个用户的数据。每个用户都有一个唯一的用户 id，每个用户 id 和一个列名绑定。一个单独的列族被用来存储各种类型的行为（比如，有个列族可能是用来存储所有的 Web 查询的）。每个数据项都被用作 Bigtable 的时间戳，记录了相应的用户行为发生的时间。个性化查询使用以 Bigtable 为存储的 MapReduce 任务生成用户的数据图表。这些用户数据图表用来个性化当前的查询结果。

个性化查询的数据会复制到几个 Bigtable 的集群上，这样就增强了数据可用性，同时减少了由客户端和 Bigtable 集群间的“距离”造成的延时。个性化查询的开发团队最初建立了一个基于 Bigtable 的、“客户侧”的复制机制为所有的复制节点提供一致性保障。现在的系统则使用了内建的复制子系统。

个性化查询存储系统的设计允许其它的团队在它们自己的列中加入新的用户数据，因此，很多 Google 服务使用个性化查询存储系统保存用户级的配置参数和设置。在多个团队之间分享数据的结果是产生了大量的列族。为了更好的支持数据共享，我们加入了一个简单的配额机制²⁹限制用户在共享表中使用的空间；配额也为使用个性化查询系统存储用户级信息的产品团体提供了隔离机制。

²⁹ quota，参考 AIX 的配额机制

10 经验教训

在设计、实现、维护和支持 Bigtable 的过程中，我们得到了很多有用的经验和一些有趣的教训。

一个教训是，我们发现，很多类型的错误都会导致大型分布式系统受损，这些错误不仅仅是通常的网络中断、或者很多分布式协议中设想的 fail-stop 类型的错误³⁰。比如，我们遇到过下面这些类型的错误导致的问题：内存数据损坏、网络中断、时钟偏差、机器挂起、扩展的和非对称的网络分区³¹、我们使用的其它系统的 Bug（比如 Chubby）、GFS 配额溢出、计划内和计划外的硬件维护。我们在解决这些问题的过程中学到了很多经验，我们通过修改协议来解决这些问题。比如，我们在我们的 RPC 机制中加入了 Checksum。我们在设计系统的部分功能时，不对其它部分功能做任何假设，这样的做法解决了其它的一些问题。比如，我们不再假设一个特定的 Chubby 操作只返回错误码集合中的一个值。

另外一个教训是，我们明白了在彻底了解一个新特性会被如何使用之后，再决定是否添加这个新特性是非常重要的。比如，我们开始计划在我们的 API 中支持通常方式的事务处理。但是由于我们不会马上用到这个功能，因此，我们并没有去实现它。现在，Bigtable 上已经有了很多的实际应用，我们可以检查它们真实的需求；我们发现，大多是应用程序都只是需要单个行上的事务功能。有些应用需要分布式的事务功能，分布式事务大多数情况下用于维护二级索引，因此我们增加了一个特殊的机制去满足这个需求。新的机制在通用性上比分布式事务差很多，但是它更有效（特别是在更新操作的涉及上百行数据的时候），而且非常符合我们的“跨数据中心”复制方案的优化策略。

还有一个具有实践意义的经验：我们发现系统级的监控对 Bigtable 非常重要（比如，监控 Bigtable 自身以及使用 Bigtable 的客户程序）。比如，我们扩展了我们的 RPC 系统，因此对于一个 RPC 调用的例子，它可以详细记录代表了 RPC 调用的很多重要操作。这个特性允许我们检测和修正很多的问题，比如 Tablet 数据结构上的锁的内容、在修改操作提交时对 GFS 的写入非常慢的问题、以及在 METADATA 表的 Tablet 不可用时，对 METADATA 表的访问挂起的问题。关于监控的用途的另外一个例子是，每个 Bigtable 集群都在 Chubby 中注册了。这可以帮助我们跟踪所有的集群状态、监控它们的大小、检查集群运行的我们软件的版本、监控集群流入数据的流量，以及检查是否有引发集群高延时的潜在因素。

对我们来说，最宝贵的经验是简单设计的价值。考虑到我们系统的代码量（大约 100000 行生产代码³²），以及随着时间的推移，新的代码以各种难以预料的方式加入系统，我们发现简洁的设计和编码给维护和调试带来的巨大好处。这方面的一个例子是我们的 Tablet 服务器成员协议。我们第一版的协议很简单：Master 服

³⁰ fail-stop failure, 指一旦系统 fail 就 stop, 不输出任何数据; fail-fast failure, 指 fail 不马上 stop, 在短时间内 return 错误信息, 然后再 stop

³¹ extended and asymmetric network partitions, 不明白什么意思。partition 也有中断的意思, 但是我不知道如何用在

³² non-test code

务器周期性的和 Tablet 服务器签订租约，Tablet 服务器在租约过期的时候 Kill 掉自己的进程。不幸的是，这个协议在遇到网络问题时会大大降低系统的可用性，也会大大增加 Master 服务器恢复的时间。我们多次重新设计这个协议，直到它能够很好的处理上述问题。但是，更不幸的是，最终的协议过于复杂了，并且依赖一些 Chubby 很少被用到的特性。我们发现我们浪费了大量的时间在调试一些古怪的问题³³，有些是 Bigtable 代码的问题，有些是 Chubby 代码的问题。最后，我们只好废弃了这个协议，重新制订了一个新的、更简单、只使用 Chubby 最广泛使用的特性的协议。

11 相关工作

Boxwood【24】项目的有些组件在某些方面和 Chubby、GFS 以及 Bigtable 类似，因为它也提供了诸如分布式协议、锁、分布式 Chunk 存储以及分布式 B-tree 存储。Boxwood 与 Google 的某些组件尽管功能类似，但是 Boxwood 的组件提供更底层的服务。Boxwood 项目的目的是提供创建类似文件系统、数据库等高级服务的基础构件，而 Bigtable 的目的是直接为客户程序的数据存储需求提供支持。

现在有不少项目已经攻克了很多难题，实现了在广域网上的分布式数据存储或者高级服务，通常是“Internet 规模”的。这其中包括了分布式的 Hash 表，这项工作由一些类似 CAN【29】、Chord【32】、Tapestry【37】和 Pastry【30】的项目率先发起。这些系统的主要关注点和 Bigtable 不同，比如应对各种不同的传输带宽、不可信的协作者、频繁的更改配置等；另外，去中心化和 Byzantine 灾难冗余³⁴也不是 Bigtable 的目的。

就提供给应用程序开发者的分布式数据存储模型而言，我们相信，分布式 B-Tree 或者分布式 Hash 表提供的 Key-value pair 方式的模型有很大的局限性。Key-value pair 模型是很有用的组件，但是它们不应该是提供给开发者唯一的组件。我们选择的模型提供的组件比简单的 Key-value pair 丰富的多，它支持稀疏的、半结构化的数据。另外，它也足够简单，能够高效的处理平面文件；它也是透明的（通过局部性群组），允许我们的使用者对系统的重要行为进行调整。

有些数据库厂商已经开发出了并行的数据库系统，能够存储海量的数据。Oracle 的 RAC【27】使用共享磁盘存储数据（Bigtable 使用 GFS），并且有一个分布式的锁管理系统（Bigtable 使用 Chubby）。IBM 并行版本的 DB2【4】基于一种类似于 Bigtable 的、不共享任何东西的架构³⁵【33】。每个 DB2 的服务器都负责处理存储在一个关系型数据库中的表中的行的一个子集。这些产品都提供了一个带有事务功能的完整的关系模型。

³³ obscure corner cases

³⁴ Byzantine，即拜占庭式的风格，也就是一种复杂诡秘的风格。Byzantine Fault 表示：对于处理来说，当发错误时处理器并不停止接收输出，也不停止输出，错就错了，只管算，对于这种错误来说，这样可真是够麻烦了，因为用户根本不知道错误发生了，也就根本谈不上处理错误了。在多台处理器的情况下，这种错误可能导致运算正确结果的处理器也产生错误的结果，这样事情就更麻烦了，所以一定要避免处理器产生这种错误。

³⁵ a shared-nothing architecture

Bigtable 的局部性群组提供了类似于基于列的存储方案在压缩和磁盘读取方面具有的性能；这些以列而不是行的方式组织数据的方案包括 C-Store【1, 34】、商业产品 Sybase IQ【15, 36】、SenSage【31】、KDB+【22】，以及 MonetDB/X100【38】的 ColumnDM 存储层。另外一种在平面文件中提供垂直和水平数据分区、并且提供很好的数据压缩率的系统是 AT&T 的 Daytona 数据库【19】。局部性群组不支持 Ailamaki 系统中描述的 CPU 缓存级别的优化【2】。

Bigtable 采用 memtable 和 SSTable 存储对表的更新的方法与 Log-Structured Merge Tree【26】存储索引数据更新的方法类似。这两个系统中，排序的数据在写入到磁盘前都先存放在内存中，读取操作必须从内存和磁盘中合并数据产生最终的结果集。

C-Store 和 Bigtable 有很多相似点：两个系统都采用 Shared-nothing 架构，都有两种不同的数据结构，一种用于当前的写操作，另外一种存放“长时间使用”的数据，并且提供一种机制在两个存储结构间搬运数据。两个系统在 API 接口函数上有很大的不同：C-Store 操作更像关系型数据库，而 Bigtable 提供了低层次的读写操作接口，并且设计的目标是能够支持每台服务器每秒数千次操作。C-Store 同时也是个“读性能优化的关系型数据库”，而 Bigtable 对读和写密集型应用都提供了很好的性能。

Bigtable 也必须解决所有的 Shared-nothing 数据库需要面对的、类型相似的一些负载和内存均衡方面的难题（比如，【11, 35】）。我们的问题在某种程度上简单一些：

1. 我们不需要考虑同一份数据可能有多个拷贝的问题，同一份数据可能由于视图或索引的原因以不同的形式表现出来；
2. 我们让用户决定哪些数据应该放在内存里、哪些放在磁盘上，而不是由系统动态的判断；
3. 我们的系统中没有复杂的查询执行或优化工作。

12 结论

我们已经讲述完了 Bigtable，Google 的一个分布式的结构化数据存储系统。Bigtable 的集群从 2005 年 4 月开始已经投入使用了，在此之前，我们花了大约 7 人年设计和实现这个系统。截止到 2006 年 4 月，已经有超过 60 个项目使用 Bigtable 了。我们的用户对 Bigtable 提供的高性能和高可用性很满意，随着时间的推移，他们可以根据自己的系统对资源的需求增加情况，通过简单的增加机器，扩展系统的承载能力。

由于 Bigtable 提供的编程接口并不常见，一个有趣的问题是：我们的用户适应新的接口有多难？新的使用者有时不太确定使用 Bigtable 接口的最佳方法，特别是在他们已经习惯于使用支持通用事务的关系型数据库的接口的情况下。但是，Google 内部很多产品都成功的使用了 Bigtable 的事实证明了，我们的设计在实践中行之有效。

我们现在正在对 Bigtable 加入一些新的特性，比如支持二级索引，以及支持多 Master 节点的、跨数据中

心复制的 Bigtable 的基础构件。我们现在已经开始将 Bigtable 部署为服务供其它的产品团队使用，这样不同的产品团队就不需要维护他们自己的 Bigtable 集群了。随着服务集群的扩展，我们需要在 Bigtable 系统内部处理更多的关于资源共享的问题了【3， 5】。

最后，我们发现，建设 Google 自己的存储解决方案带来了很多优势。通过为 Bigtable 设计我们自己的数据模型，是我们的系统极具灵活性。另外，由于我们全面控制着 Bigtable 的实现过程，以及 Bigtable 使用到的其它的 Google 的基础构件，这就意味着我们在系统出现瓶颈或效率低下的情况时，能够快速解决这些问题。

13 Acknowledgements

We thank the anonymous reviewers, David Nagle, and our shepherd Brad Calder, for their feedback on this paper. The Bigtable system has benefited greatly from the feedback of our many users within Google. In addition, we thank the following people for their contributions to Bigtable: Dan Aguayo, Sameer Ajmani, Zhifeng Chen, Bill Coughran, Mike Epstein, Healfdene Goguen, Robert Griesemer, Jeremy Hylton, Josh Hyman, Alex Khesin,

Joanna Kulik, Alberto Lerner, Sherry Listgarten, Mike Maloney, Eduardo Pinheiro, Kathy Polizzi, Frank Yellin, and Arthur Zwiegincew.

14 References

[1] ABADI, D. J., MADDEN, S. R., AND FERREIRA, M. C. Integrating compression and execution in column-oriented database systems. Proc. of SIGMOD (2006).

[2] AILAMAKI, A., DEWITT, D. J., HILL, M. D., AND SKOUNAKIS, M. Weaving relations for cache performance. In The VLDB Journal (2001), pp. 169-180.

[3] BANGA, G., DRUSCHEL, P., AND MOGUL, J. C. Resource containers: A new facility for resource management in server systems. In Proc. of the 3rd OSDI (Feb. 1999), pp. 45-58.

[4] BARU, C. K., FECTEAU, G., GOYAL, A., HSIAO, H., JHINGRAN, A., PADMANABHAN, S., COPELAND, G. P., AND WILSON, W. G. DB2 parallel edition. IBM Systems Journal 34, 2 (1995), 292-322.

[5] BAVIER, A., BOWMAN, M., CHUN, B., CULLER, D., KARLIN, S., PETERSON, L., ROSCOE, T., SPALINK, T., AND WAWRZONIAK, M. Operating system support for planetary-scale network services. In Proc. of the 1st NSDI (Mar. 2004), pp. 253-266.

[6] BENTLEY, J. L., AND MCILROY, M. D. Data compression using long common strings. In Data Compression Conference (1999), pp. 287-295.

- [7] BLOOM, B. H. Space/time trade-offs in hash coding with allowable errors. CACM 13, 7 (1970), 422-426.
- [8] BURROWS, M. The Chubby lock service for looselycoupled distributed systems. In Proc. of the 7th OSDI (Nov. 2006).
- [9] CHANDRA, T., GRIESEMER, R., AND REDSTONE, J. Paxos made live ? An engineering perspective. In Proc. of PODC (2007).
- [10] COMER, D. Ubiquitous B-tree. Computing Surveys 11, 2 (June 1979), 121-137.
- [11] COPELAND, G. P., ALEXANDER, W., BOUGHTER, E. E., AND KELLER, T. W. Data placement in Bubba. In Proc. of SIGMOD (1988), pp. 99-108.
- [12] DEAN, J., AND GHEMAWAT, S. MapReduce: Simplified data processing on large clusters. In Proc. of the 6th OSDI (Dec. 2004), pp. 137-150.
- [13] DEWITT, D., KATZ, R., OLKEN, F., SHAPIRO, L., STONEBRAKER, M., AND WOOD, D. Implementation techniques for main memory database systems. In Proc. of SIGMOD (June 1984), pp. 1-8.
- [14] DEWITT, D. J., AND GRAY, J. Parallel database systems: The future of high performance database systems. CACM 35, 6 (June 1992), 85-98.
- [15] FRENCH, C. D. One size ts all database architectures do not work for DSS. In Proc. of SIGMOD (May 1995), pp. 449-450.
- [16] GAWLICK, D., AND KINKADE, D. Varieties of concurrency control in IMS/VS fast path. Database Engineering Bulletin 8, 2 (1985), 3-10.
- [17] GHEMAWAT, S., GOBIOFF, H., AND LEUNG, S.-T. The Google file system. In Proc. of the 19th ACM SOSP (Dec.2003), pp. 29-43.
- [18] GRAY, J. Notes on database operating systems. In Operating Systems ? An Advanced Course, vol. 60 of Lecture Notes in Computer Science. Springer-Verlag, 1978.
- [19] GREER, R. Daytona and the fourth-generation language Cymbal. In Proc. of SIGMOD (1999), pp. 525-526.
- [20] HAGMANN, R. Reimplementing the Cedar file system using logging and group commit. In Proc. of the 11th SOSP (Dec. 1987), pp. 155-162.
- [21] HARTMAN, J. H., AND OUSTERHOUT, J. K. The Zebra striped network file system. In Proc. of the 14th SOSP(Asheville, NC, 1993), pp. 29-43.
- [22] KX.COM. kx.com/products/database.php. Product page.
- [23] LAMPORT, L. The part-time parliament. ACM TOCS 16,2 (1998), 133-169.

- [24] MACCORMICK, J., MURPHY, N., NAJORK, M., THEKKATH, C. A., AND ZHOU, L. Boxwood: Abstractions as the foundation for storage infrastructure. In Proc. of the 6th OSDI (Dec. 2004), pp. 105-120.
- [25] MCCARTHY, J. Recursive functions of symbolic expressions and their computation by machine. CACM 3, 4 (Apr. 1960), 184-195.
- [26] O'NEIL, P., CHENG, E., GAWLICK, D., AND O'NEIL, E. The log-structured merge-tree (LSM-tree). Acta Inf. 33, 4 (1996), 351-385.
- [27] ORACLE.COM. www.oracle.com/technology/products/database/clustering/index.html. Product page.
- [28] PIKE, R., DORWARD, S., GRIESEMER, R., AND QUINLAN, S. Interpreting the data: Parallel analysis with Sawzall. Scientific Programming Journal 13, 4 (2005), 227-298.
- [29] RATNASAMY, S., FRANCIS, P., HANDLEY, M., KARP, R., AND SHENKER, S. A scalable content-addressable network. In Proc. of SIGCOMM (Aug. 2001), pp. 161-172.
- [30] ROWSTRON, A., AND DRUSCHEL, P. Pastry: Scalable, distributed object location and routing for largescale peer-to-peer systems. In Proc. of Middleware 2001(Nov. 2001), pp. 329-350.
- [31] SENSAGE.COM. sensation.com/products-sensation.htm. Product page.
- [32] STOICA, I., MORRIS, R., KARGER, D., KAASHOEK, M. F., AND BALAKRISHNAN, H. Chord: A scalable peer-to-peer lookup service for Internet applications. In Proc. of SIGCOMM (Aug. 2001), pp. 149-160.
- [33] STONEBRAKER, M. The case for shared nothing. Database Engineering Bulletin 9, 1 (Mar. 1986), 4-9.
- [34] STONEBRAKER, M., ABADI, D. J., BATKIN, A., CHEN, X., CHERNIACK, M., FERREIRA, M., LAU, E., LIN, A., MADDEN, S., O'NEIL, E., O'NEIL, P., RASIN, A., TRAN, N., AND ZDONIK, S. C-Store: A columnoriented DBMS. In Proc. of VLDB (Aug. 2005), pp. 553-564.
- [35] STONEBRAKER, M., AOKI, P. M., DEVINE, R., LITWIN, W., AND OLSON, M. A. Mariposa: A new architecture for distributed data. In Proc. of the Tenth ICDE(1994), IEEE Computer Society, pp. 54-65.
- [36] SYBASE.COM. www.sybase.com/products/databaseservers/sybaseiq. Product page.
- [37] ZHAO, B. Y., KUBIATOWICZ, J., AND JOSEPH, A. D. Tapestry: An infrastructure for fault-tolerant wide-area location and routing. Tech. Rep. UCB/CSD-01-1141, CS Division, UC Berkeley, Apr. 2001.
- [38] ZUKOWSKI, M., BONCZ, P. A., NES, N., AND HEMAN, S. MonetDB/X100 ?A DBMS in the CPU cache. IEEE Data Eng. Bull. 28, 2 (2005), 17-22.