

leveldb 实现解析

淘宝-核心系统研发-存储
那岩

neveray@gmail.com

2011-12-13

目录

| | | |
|-----|---|----|
| 一、 | 代码目录结构..... | 1 |
| 1. | doc/ | 1 |
| 2. | include/leveldb/..... | 1 |
| 3. | db/ | 1 |
| 4. | table/..... | 1 |
| 5. | port/ | 1 |
| 6. | util/ | 1 |
| 7. | helper/memenv/..... | 1 |
| 二、 | 基本概念 | 1 |
| 1. | Slice (include/leveldb/slice.h) | 1 |
| 2. | Option (include/leveldb/option.h) | 2 |
| 3. | Env (include/leveldb/env.h util/env_posix.h) | 3 |
| 4. | varint (util/coding.h) | 3 |
| 5. | ValueType (db/dbformat.h) | 3 |
| 6. | SequenceNumber (db/dbformat.h) | 4 |
| 7. | user key..... | 4 |
| 8. | ParsedInternalKey (db/dbformat.h) | 4 |
| 9. | InternalKey (db/dbformat.h) | 4 |
| 10. | LookupKey (db/dbformat.h) | 4 |
| 11. | Comparator (include/leveldb/comparator.h util/comparator.cc) | 4 |
| 12. | InternalKeyComparator (db/dbformat.h) | 5 |
| 13. | WriteBatch (db/write_batch.cc) | 5 |
| 14. | Memtable (db/memtable.cc db/skiplist.h) | 5 |
| 15. | Sstable (table/table.cc) | 5 |
| 16. | FileMetaData (db/version_edit.h) | 5 |
| 17. | block (table/block.cc) | 6 |
| 18. | BlockHandle (table/format.h) | 6 |
| 19. | FileNumber (db/dbformat.h) | 6 |
| 20. | filename (db/filename.cc) | 6 |
| 21. | level-n (db/version_set.h) | 7 |
| 22. | Compact (db/db_impl.cc db/version_set.cc) | 7 |
| 23. | Compaction (db/version_set.cc) | 7 |
| 24. | Version (db/version_set.cc) | 8 |
| 25. | VersionSet (db/version_set.cc) | 9 |
| 26. | VersionEdit (db/version_edit.cc) | 10 |
| 27. | VersionSet::Builder (db/version_set.cc) | 11 |
| 28. | Manifest (descriptor) (db/version_set.cc) | 12 |
| 29. | TableBuilder/BlockBuilder (table/table_builder.cc table/block_builder.cc) | 12 |
| 30. | Iterator (include/leveldb/iterator.h) | 12 |
| 三、 | 存储结构的格式定义与操作 | 12 |
| 1. | memtable (db/skiplist.h db/memtable) | 12 |
| 2. | block of sstable (table/block_builder.cc table/block.cc) | 14 |
| 3. | sstable (table/table_builder.cc/table.cc) | 16 |
| 4. | block of log (db/log_format.h db/log_writer.cc db/log_reader.cc) | 18 |
| 5. | log (db/log_format.h db/log_writer.cc db/log_reader.cc) | 18 |
| 6. | cache (util/cache.cc) | 19 |
| 7. | Snapshot (include/leveldb/snapshot.h) | 19 |
| 8. | Iterator (include/leveldb/iterator.h) | 19 |

| | | |
|----|------------------|----|
| 四、 | 主要流程 | 24 |
| 1. | open | 24 |
| 2. | put | 25 |
| 3. | get | 25 |
| 4. | delete..... | 26 |
| 5. | snapshot..... | 26 |
| 6. | NewIterator..... | 26 |
| 7. | compact..... | 26 |
| 五、 | 总结 | 30 |
| 1. | 设计/实现中的优化..... | 30 |
| 2. | 可以做的优化..... | 31 |

leveldb 是 Google 开源的持久化 KV 单机存储引擎，开源页面 <http://code.google.com/p/leveldb/>。针对存储面对的普遍随机 IO 问题，leveldb 采用了 merge-dump 的方式，将逻辑场景的写请求转换成顺序写 log 和写 memtable 操作，由后台进程将 memtable 持久化成 sstable。对于读请求，随机 IO 还是无法避免，但它设计了一系列策略来保证读的效率。

这里对 leveldb 的实现做具体解析，但并不采用对代码注释的方式，而是意图从上层设计的角度，将内部的实现逻辑串联起来，尽量发现策略设计背后的原因。

一、代码目录结构

1. doc/

相关文档。有 log 和 sstable 的格式介绍 (log_format/table_format)。

2. include/leveldb/

使用者需要的头文件，包含基本的接口，可以自定义的 comparator/env/cache，以及依赖的头文件。

3. db/

主要逻辑的实现。包括接口的实现 (db_impl/db_iter)，内部结构的定义 (dbformat/memtable/skiplist/write_batch)，db 运行状态以及操作的包装 (version_set/version_edit)，log 格式相关 (log/log_reader/log_writer)，filename 处理相关 (filename)，sstable 相关 (builder/table_cache)。

4. table/

sstable 相关的数据格式定义以及操作实现。格式定义 (format)，block 相关的操作 (block/block_builder)，sstable 相关的操作 (table/table_builder)，操作便利封装的复合 Iterator (two_level_iterator/merger)，优化 Iterator 的 wrapper (iterator_wrapper)。

5. port/

根据系统环境，为移植实现的锁/信号/原子操作/压缩相关。提供 posix/android。

6. util/

提供的通用功能实现。memtable 使用的简单内存管理 (arena)，LRU cache 的实现 (cache)，comparator 的默认实现 (comparator)，通用功能的实现 (coding/crc32c/hash/random/MutexLock/logging)，leveldb 将文件/进程相关的操作封装成 Env，提供了默认的实现 (env_posix)。

7. helper/memenv/

实现了一个简单的完全内存的文件系统，提供操作目录文件的接口。

二、基本概念

1. Slice (include/leveldb/slice.h)

为操作数据的方便，将数据和长度包装成 Slice 使用，直接操控指针避免不必要的数据拷贝。

```
class Slice {
...
private:
const char* data_;
size_t size_;
};
```

2. Option (include/leveldb/option.h)

leveldb 中启动时的一些配置，通过 Option 传入，get/put/delete 时，也有相应的 ReadOption/WriteOption。

```
// include/leveldb/option.h
Options {
// 传入的 comparator
const Comparator* comparator;
// open 时，如果 db 目录不存在就创建
bool create_if_missing;
// open 时，如果 db 目录存在就报错
bool error_if_exists;
// 是否保存中间的错误状态(RecoverLog/compact), compact 时是否读到的 block 做检验。
bool paranoid_checks;
// 传入的 Env。
Env* env;
// 传入的打印日志的 Logger
Logger* info_log;
// memtable 的最大 size
size_t write_buffer_size;
// db 中打开的文件最大个数
// db 中需要打开的文件包括基本的 CURRENT/LOG/MANIFEST/LOCK，以及打开的 sstable 文件。
// sstable 一旦打开，就会将 index 信息加入 TableCache，所以把
// (max_open_files - 10)作为 table cache 的最大数量。
int max_open_files;
// 传入的 block 数据的 cache 管理
Cache* block_cache;
// sstable 中 block 的 size
size_t block_size;
// block 中对 key 做前缀压缩的区间长度
int block_restart_interval;
// 压缩数据使用的压缩类型（默认支持 snappy，其他类型需要使用者实现）
CompressionType compression;
}

// include/leveldb/option.h
struct ReadOptions {
// 是否对读到的 block 做校验
bool verify_checksums;
// 读到的 block 是否加入 block cache
bool fill_cache;
// 指定读取的 SnapShot
```

```

    const Snapshot* snapshot;
}

// include/leveldb/option.h
struct WriteOptions {
    // write 时, 记 binlog 之后, 是否对 binlog 做 sync。
    bool sync;
    // 如果传入不为 NULL, write 完成之后同时做 SnapShot.
    const Snapshot** post_write_snapshot;
}

另外还有一些编译时的常量, 与 Option 一起控制。
// db/dbformat.h
namespace config {
    // level 的最大值
    static const int kNumLevels = 7;
    // level-0 中 sstable 的数量超过这个阈值, 触发 compact
    static const int kL0_CompactionTrigger = 4;
    // level-0 中 sstable 的数量超过这个阈值, 慢处理此次写(sleep1ms)
    static const int kL0_SlowdownWritesTrigger = 8;
    // level-0 中 sstable 的数量超过这个阈值, 阻塞至 compact memtable 完成。
    static const int kL0_StopWritesTrigger = 12;
    // memtable dump 成的 sstable, 允许推向的最高 level
    // (参见 Compact 流程的 VersionSet::PickLevelForMemTableOutput())
    static const int kMaxMemCompactLevel = 2;
}

// db/version_set.cc
namespace leveldb {
    // compact 过程中, level-0 中的 sstable 由 memtable 直接 dump 生成, 不做大小限制
    // 非 level-0 中的 sstable 的大小设定为 kTargetFileSize
    static const int kTargetFileSize = 2 * 1048576;
    // compact level-n 时, 与 level-n+2 产生 overlap 的数据 size (参见 Compaction)
    static const int64_t kMaxGrandParentOverlapBytes = 10 * kTargetFileSize;
}

```

3. Env (include/leveldb/env.h util/env_posix.h)

考虑到移植以及灵活性, leveldb 将系统相关的处理(文件/进程/时间之类)抽象成 Env, 用户可以自己实现相应的接口, 作为 Option 传入。默认使用自带的实现。

4. varint (util/coding.h)

leveldb 采用了 protocolbuffer 里使用的变长整形编码方法, 节省空间。

5. ValueType (db/dbformat.h)

leveldb 更新 (put/delete) 某个 key 时不会操控到 db 中的数据, 每次操作都是直接新插入一份 kv 数据, 具体的数据合并和清除由后台的 compact 完成。所以, 每次 put, db 中就会新加入一份 KV 数据, 即使该 key 已经存在; 而 delete 等同于 put 空的 value。为了区分真实 kv 数据和删除操作的 mock 数据, 使用 ValueType 来标识:

```
enum ValueType {
    kTypeDeletion = 0x0,
    kTypeValue = 0x1
};
```

6. SequenceNumber (db/dbformat.h)

leveldb 中的每次更新 (put/delete) 操作都拥有一个版本, 由 SequenceNumber 来标识, 整个 db 有一个全局值保存着当前使用到的 SequenceNumber。SequenceNumber 在 leveldb 有重要的地位, key 的排序, compact 以及 snapshot 都依赖于它。

```
typedef uint64_t SequenceNumber;
```

存储时, SequenceNumber 只占用 56 bits, ValueType 占用 8 bits, 二者共同占用 64bits (uint64_t)。

| | |
|----------------|-----------|
| 0 | 56 |
| SequenceNumber | ValueType |

7. user key

用户层面传入的 key, 使用 Slice 格式。

8. ParsedInternalKey (db/dbformat.h)

db 内部操作的 key。db 内部需要将 user key 加入元信息 (ValueType/SequenceNumber) 一并做处理。

```
struct ParsedInternalKey {
    Slice user_key;
    SequenceNumber sequence;
    ValueType type;
};
```

9. InternalKey (db/dbformat.h)

db 内部, 包装易用的结构, 包含 userkey 与 SequenceNumber/ValueType。

10. LookupKey (db/dbformat.h)

db 内部在为查找 memtable/sstable 方便, 包装使用的 key 结构, 保存有 userkey 与 SequenceNumber/ValueType dump 在内存的数据。

```
class LookupKey {
...
private:
    const char* start_;
    const char* kstart_;
    const char* end_;
};
```

LookupKey:

| start | kstart | end |
|---------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|
| userkey_len (varint32) | userkey_data (userkey_len) | SequenceNumber/ValueType (uint64) |

对 memtable 进行 lookup 时使用 [start,end], 对 sstable lookup 时使用[kstart, end]。

11. Comparator (include/leveldb/comparator.h util/comparator.cc)

对 key 排序时使用的比较方法。leveldb 中 key 为升序。

用户可以自定义 user key 的 comparator (user-comparator)，作为 option 传入，默认采用 byte compare (memcmp)。

comparator 中有 FindShortestSeparator () / FindShortSuccessor () 两个接口，FindShortestSeparator (start, limit) 是获得大于 start 但小于 limit 的最小值。

FindShortSuccessor (start) 是获得比 start 大的最小值。比较都基于 user-comparator，二者会被用来确定 sstable 中 block 的 end-key。

12. InternalKeyComparator (db/dbformat.h)

db 内部做 key 排序时使用的比较方法。排序时，会先使用 user-comparator 比较 user-key，如果 user-key 相同，则比较 SequenceNumber，SequenceNumber 大的为小。因为 SequenceNumber 在 db 中全局递增，所以，对于相同的 user-key，最新的更新 (SequenceNumber 更大) 排在前面，在查找的时候，会被先找到。

InternalKeyComparator 中 FindShortestSeparator () / FindShortSuccessor () 的实现，仅从传入的内部 key 参数，解析出 user-key，然后再调用 user-comparator 的对应接口。

13. WriteBatch (db/write_batch.cc)

对若干数目 key 的 write 操作 (put/delete) 封装成 WriteBatch。它会将 userkey 连同 SequenceNumber 和 ValueType 先做 encode，然后做 decode，将数据 insert 到指定的 Handler (memtable) 上面。上层的处理逻辑简洁，但 encode/decode 略有冗余。

WriteBatch encode 之后，内部保存的数据格式：

| | | | | |
|----------------------------|-------------------|---------|-------|---------|
| SequenceNumber (uint64) | count (uint32) | record0 | | recordN |
|----------------------------|-------------------|---------|-------|---------|

record 组成：

| | | | | |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------------|
| ValueType (char) | key_len (varint32) | key_data (key_len) | value_len (varint32) | value_data (value_len) |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------------|

1) SequenceNumber: WriteBatch 中开始使用的 SequenceNumber。

2) count: 批量处理的 record 数量

3) record: 封装在 WriteBatch 内的数据。

如果 ValueType 是 kTypeValue, 则后面有 key 和 value

如果 ValueType 是 kTypeDeletion, 则后面只有 key。

14. Memtable (db/memtable.cc db/skiplist.h)

db 数据在内存中的存储格式。写操作的数据都会先写到 memtable 中。memtable 的 size 有限制最大值 (write_buffer_size)。

memtable 的实现是 skiplist。

当一个 memtable size 到达阈值时，会变成只读的 memtable (immutable memtable)，同时生成一个新的 memtable 供新的写入。后台的 compact 进程会负责将 immutable memtable dump 成 sstable。所以，同时最多会存在两个 memtable (正在写的 memtable 和 immutable memtable)。

15. Sstable (table/table.cc)

db 数据持久化的文件。文件的 size 有限制最大值 (target_file_size)。文件前面为数据，后面是索引元信息。

16. FileMetaData (db/version_edit.h)

sstable 文件的元信息封装成 FileMetaData，

```
struct FileMetaData {  
    int refs;                // 引用计数
```



```

    int allowed_seeks;           // compact 之前允许的 seek 次数（参见 Version）
    uint64_t number;            // FileNumber
    uint64_t file_size;         // 文件的 size
    InternalKey smallest;       // sstable 文件的最小 key
    InternalKey largest;        // sstable 文件的最大 key
};

```

17. block (table/block.cc)

sstable 的数据由一个个的 block 组成。当持久化数据时，多份 KV 聚合成 block 一次写入；当读取时，也是以 block 单位做 IO。sstable 的索引信息中会保存符合 key-range 的 block 在文件中的 offset/size (BlockHandle)。

18. BlockHandle(table/format.h)

block 的元信息（位于 sstable 的 offset/size）封装成 BlockHandle。

19. FileNumber (db/dbformat.h)

db 创建文件时会按照规则将 FileNumber 加上特定后缀作为文件名。所以，运行时只需要记录 FileNumber (uint64_t) 即可定位到具体的文件路径，省掉了字符串的麻烦。FileNumber 在 db 中全局递增。

20. filename (db/filename.cc)

db 中的文件用文件名区分类型。有以下几种类型

- ```

enum FileType {
 kLogFile,
 kDBLockFile,
 kTableFile,
 kDescriptorFile,
 kCurrentFile,
 kTempFile,
 kInfoLogFile // Either the current one, or an old one
};

```
- 1) kLogFile 日志文件: [0-9]+.log  
leveldb 的写流程是先记 binlog，然后写 sstable，该日志文件即是 binlog。前缀数字为 FileNumber。
  - 2) kDBLockFile, lock 文件: LOCK  
一个 db 同时只能有一个 db 实例操作，通过对 LOCK 文件加文件锁 (flock) 实现主动保护。
  - 3) kTableFile, sstable 文件: [0-9]+.sst  
保存数据的 sstable 文件。前缀为 FileNumber。
  - 4) kDescriptorFile, db 元信息文件: MANIFEST-[0-9]+  
每当 db 中的状态改变 (VersionSet)，会将这次改变 (VersionEdit) 追加到 descriptor 文件中。后缀数字为 FileNumber。
  - 5) kCurrentFile, : CURRENT  
CURRENT 文件中保存当前使用的 descriptor 文件的文件名。
  - 6) kTempFile, 临时文件: [0-9]+.dbtmp  
对 db 做修复 (Repairer) 时，会产生临时文件。前缀为 FileNumber。
  - 7) kInfoLogFile, db 运行时打印日志的文件: LOG  
db 运行时，打印的 info 日志保存在 LOG 中。每次重新运行，如果已经存在 LOG 文件，会先将 LOG 文件重命名成 LOG.old

---

## 21. level-n (db/version\_set.h)

为了均衡读写的效率，sstable 文件分层次 (level) 管理，db 预定义了最大的 level 值。compact 进程负责 level 之间的均衡。

## 22. Compact (db/db\_impl.cc db/version\_set.cc)

db 中有一个 compact 后台进程，负责将 memtable 持久化成 sstable，以及均衡整个 db 中各 level 的 sstable。Compact 进程会优先将已经写满的 memtable dump 成 level-0 的 sstable (不会合并相同 key 或者清理已经删除的 key)。然后，根据设计的策略选取 level-n 以及 level-n+1 中有 key-range overlap 的几个 sstable 进行 merge (期间会合并相同的 key 以及清理删除的 key)，最后生成若干个 level-(n+1) 的 sstable。随着数据不断的写入和 compact 的进行，低 level 的 sstable 不断向高 level 迁移。level-0 中的 sstable 因为是由 memtable 直接 dump 得到，所以 key-range 可能 overlap，而 level-1 以及更高 level 中的 sstable 都是做 merge 产生，保证了位于同 level 的 sstable 之间，key-range 不会 overlap，这个特性有利于读的处理。

## 23. Compaction(db/version\_set.cc)

compact 信息的封装。

```
class Compaction {
.....
 int level_; // 要 compact 的 level
 uint64_t max_output_file_size_; // 生成 sstable 的最大 size (target_file_size)
 Version* input_version_; // compact 时当前的 Version
 VersionEdit edit_; // 记录 compact 过程中的操作

 // inputs_[0] 为 level-n 的 sstable 文件信息，
 // inputs_[1] 为 level-n+1 的 sstable 文件信息
 std::vector<FileMetaData*> inputs_[2];

 // 位于 level-n+2，并且与 compact 的 key-range 有 overlap 的 sstable。
 // 保存 grandparents_ 是因为 compact 最终会生成一系列 level-n+1 的 sstable，
 // 而如果生成的 sstable 与 level-n+2 中有过多的 overlap 的话，当 compact
 // level-n+1 时，会产生过多的 merge，为了尽量避免这种情况，compact 过程中
 // 需要检查与 level-n+2 中产生 overlap 的 size 并与
 // 阈值 kMaxGrandParentOverlapBytes 做比较，
 // 以便提前中止 compact。
 std::vector<FileMetaData*> grandparents_;
 // 记录 compact 时 grandparents_ 中已经 overlap 的 index
 size_t grandparent_index_;
 // 记录是否已经有 key 检查 overlap
 // 如果是第一次检查，发现有 overlap，也不会增加 overlapped_bytes_。
 // (没有看到这样做的意义)
 bool seen_key_;
 // 记录已经 overlap 的累计 size
 int64_t overlapped_bytes_;
 // compact 时，当 key 的 ValueType 是 kTypeDeletion 时，
 // 要检查其在 level-n+1 以上是否存在 (IsBaseLevelForKey())
 // 来决定是否丢弃掉该 key。因为 compact 时，key 的遍历是顺序的，
 // 所以每次检查从上一次检查结束的地方开始即可，
 // level_ptrs_[i] 中就记录了 input_version_>levels_[i] 中，上一次比较结束的
```

---

```

 // sstable 的容器下标。
 size_t level_ptrs_[config::kNumLevels];
 };

```

## 24. Version (db/version\_set.cc)

将每次 compact 后的最新数据状态定义为 Version，也就是当前 db 元信息以及每个 level 上具有最新数据状态的 sstable 集合。compact 会在某个 level 上新加入或者删除一些 sstable，但可能这个时候，那些要删除的 sstable 正在被读，为了处理这样的读写竞争情况，基于 sstable 文件一旦生成就不会改动的特点，每个 Version 加入引用计数，读以及解除读操作会将引用计数相应加减一。这样，db 中可能有多个 Version 同时存在（提供服务），它们通过链表链接起来。当 Version 的引用计数为 0 并且不是当前最新的 Version 时，它会从链表中移除，对应的，该 Version 内的 sstable 就可以删除了（这些废弃的 sstable 会在下一次 compact 完成时被清理掉）。

```

class Version {

 // 属于的 VersionSet
 VersionSet* vset_;
 // 链表指针
 Version* next_;
 Version* prev_;
 // 引用计数
 int refs_;

 // 每个 level 的所有 sstable 元信息。
 // files_[i] 中的 FileMetaData 按照 FileMetaData::smallest 排序，
 // 这是在每次更新都保证的。（参见 VersionSet::Builder::Save()）
 std::vector<FileMetaData*> files_[config::kNumLevels];

 // 需要 compact 的文件（allowed_seeks 用光）
 FileMetaData* file_to_compact_;
 // file_to_compact_ 的 level
 int file_to_compact_level_;

 // 当前最大的 compact 权重以及对应的 level
 double compaction_score_;
 int compaction_level_;
};

```

Version 中与 compact 相关的有 file\_to\_compact\_/ file\_to\_compact\_level\_, compaction\_score\_/ compaction\_level\_，这里详细说明他们的意义。

### 1) compaction\_score\_

leveldb 中分 level 管理 sstable，对于写，可以认为与 sstable 无关。而基于 get 的流程（参见 get 流程），各 level 中的 sstable 的 count, size 以及 range 分布，会直接影响读的效率。可以预想的最佳情形可能是 level-0 中最多有一个 sstable，level-1 以及之上的各 level 中 key-range 分布均匀，期望更多的查找可以遍历最少的 level 即可定位到。

将这种预想的最佳状态定义成：level 处于均衡的状态。当采用具体的参数量化，也就量化了各个 level 的不均衡比重，即 compact 权重：score。score 越大，表示该 level 越不均衡，需要更优先进行 compact。

每个 level 的具体均衡参数及比重计算策略如下：

- a. 因为 level-0 的 sstable range 可能 overlap，所以如果 level-0 上有过多的 sstable，在做查找时，会严重影响效率。同时，因为 level-0 中的 sstable 由 memtable 直接 dump 得到，并不受

kTargetFileSize (生成 sstable 的 size) 的控制, 所以 sstable 的 count 更有意义。基于此, 对于 level-0,

均衡的状态需要满足:  $\text{sstable 的 count} < \text{kL0\_CompactionTrigger}$ 。

$\text{score} = \text{sstable 的 count} / \text{kL0\_CompactionTrigger}$ 。

为了控制这个数量, 另外还有 kL0\_SlowdownWritesTrigger/kL0\_StopWritesTrigger 两个阈值来主动控制写的速率 (参见 put 流程)。

- b. 对于 level-1 及以上的 level, sstable 均由 compact 过程产生, 生成的 sstable 大小被 kTargetFileSize 控制, 所以可以限定 sstable 总的 size。当前的策略是设置初始值 kBaseLevelSize, 然后以 10 的指数级按 level 增长。每个 level 可以容纳的  $\text{quota\_size} = \text{kBaseLevelSize} * 10^{(\text{level\_number}-1)}$ 。所以 level-1 可以容纳总共 kBaseLevelSize 的 sstable, level-2 允许  $\text{kBaseLevelSize} * 10 \dots$

基于此, 对于 level-1 及以上的 level

均衡的状态需要满足:  $\text{sstable 的 size} < \text{quota\_size}$ 。

$\text{score} = \text{sstable 的 size} / \text{quota\_size}$ 。

每次 compact 完成, 生效新的 Version 时 (VersionSet::Finalize()), 都会根据上述的策略, 计算出每个 level 的 score, 取最大值作为当前 Version 的 compaction\_score\_, 同时记录对应的 level(compaction\_level\_)。

## 2) file\_to\_compact\_

leveldb 对单个 sstable 文件的 IO 也做了细化的优化, 设计了一个巧妙的策略。

首先, 一个 sstable 如果被 seek 到多次 (一次 seek 意味找到这个 sstable 进行 IO), 可以认为它处在不最优的情况 (尤其处于高 level), 而我们认为 compact 后会倾向于均衡的状态, 所以在

一个 sstable 的 seek 次数达到一定阈值后, 主动对其进行 compact 是合理的。

这个具体 seek 次数阈值(allowed\_seeks)的确定, 依赖于 sas 盘的 IO 性能:

- a. 一次磁盘寻道 seek 耗费 10ms。
- b. 读或者写 1M 数据耗费 10ms (按 100M/s IO 吞吐能力)。
- c. compact 1M 的数据需要 25M 的 IO: 从 level-n 中读 1M 数据, 从 level-n+1 中读 10~12M 数据, 写入 level-n+1 中 10~12M 数据。

所以, compact 1M 的数据的时间相当于做 25 次磁盘 seek, 反过来说就是, 1 次 seek 相当于 compact 40k 数据。那么, 可以得到 seek 阈值  $\text{allowed\_seeks} = \text{sstable\_size} / 40k$ 。保守设置, 当前实际的  $\text{allowed\_seeks} = \text{sstable\_size} / 10k$ 。每次 compact 完成, 构造新的 Version 时 (Builder::Apply()), 每个 sstable 的 allowed\_seeks 会计算出来保存在 FileMetaData。

在每次 get 操作的时候, 如果有超过一个 sstable 文件进行了 IO, 会将最后一个 IO 的 sstable 的 allowed\_seeks 减一, 并检查其是否已经用光了 allowed\_seeks, 若是, 则将该 sstable 记录成当前 Version 的 file\_to\_compact\_, 并记录其所在的 level(file\_to\_compact\_level\_)。

## 25. VersionSet (db/version\_set.cc)

整个 db 的当前状态被 VersionSet 管理着, 其中有当前最新的 Version 以及其他正在服务的 Version 链表; 全局的 SequenceNumber, FileNumber; 当前的 manifest\_file\_number; 封装 sstable 的 TableCache。每个 level 中下一次 compact 要选取的 start\_key 等等。

.....

```
VersionSet {
 // 实际的 Env
 Env* const env_;
 // db 的数据路径
 const std::string dbname_;
 // 传入的 option
 const Options* const options_;
 // 操作 sstable 的 TableCache
```

---

```

 TableCache* const table_cache_;
 // comparator
 const InternalKeyComparator icmp_;
 // 下一个可用的 FileNumber
 uint64_t next_file_number_;
 // manifest 文件的 FileNumber
 uint64_t manifest_file_number_;
 // 最后用过的 SequenceNumber
 uint64_t last_sequence_;
 // log 文件的 FileNumber
 uint64_t log_number_;
 // 辅助 log 文件的 FileNumber, 在 compact memtable 时, 置为 0.
 uint64_t prev_log_number_;

 // manifest 文件的封装
 WritableFile* descriptor_file_;
 // manifest 文件的 writer
 log::Writer* descriptor_log_;
 // 正在服务的 Version 链表
 Version dummy_versions_;
 // 当前最新的 Version
 Version* current_;

 // 为了尽量均匀 compact 每个 level, 所以会将这一次 compact 的 end-key 作为
 // 下一次 compact 的 start-key. compactor_pointer_ 就保存着每个 level
 // 下一次 compact 的 start-key.
 // 除了 current_ 外的 Version, 并不会做 compact, 所以这个值并不保存在 Version 中.
 std::string compact_pointer_[config::kNumLevels];
}

```

## 26. VersionEdit(db/version\_edit.cc)

compact 过程中会有一系列改变当前 Version 的操作 (FileNumber 增加, 删除 input 的 sstable, 增加输出的 sstable……), 为了缩小 Version 切换的时间点, 将这些操作封装成 VersionEdit, compact 完成时, 将 VersionEdit 中的操作一次应用到当前 Version 即可得到最新状态的 Version。

```

VersionEdit {
.....
 typedef std::set< std::pair<int, uint64_t> > DeletedFileSet;

 // db 一旦创建, 排序的逻辑就必须保持兼容, 用 comparator 的名字做凭证
 std::string comparator_;
 // log 的 FileNumber
 uint64_t log_number_;
 // 辅助 log 的 FileNumber
 uint64_t prev_log_number_;
 // 下一个可用的 FileNumber
 uint64_t next_file_number_;
 // 用过的最后一个 SequenceNumber
 SequenceNumber last_sequence_;
 // 标识是否存在, 验证使用

```

---

```

 bool has_comparator_;
 bool has_log_number_;
 bool has_prev_log_number_;
 bool has_next_file_number_;
 bool has_last_sequence_;

 // 要更新的 level ==> compact_pointer。
 std::vector< std::pair<int, InternalKey> > compact_pointers_;
 // 要删除的 sstable 文件 (compact 的 input)
 DeletedFileSet deleted_files_;
 // 新的文件 (compact 的 output)
 std::vector< std::pair<int, FileMetaData> > new_files_;
}

```

每次 compact 之后都会将对应的 VersionEdit encode 入 manifest 文件。

## 27. VersionSet::Builder (db/version\_set.cc)

将 VersionEdit 应用到 VersionSet 上的过程封装成 VersionSet::Builder. 主要是更新 Version::files\_[].

```

class VersionSet::Builder {
.....
 // 处理 Version::files_[i] 中 FileMetaData 的排序
 struct BySmallestKey {
 const InternalKeyComparator* internal_comparator;

 bool operator()(FileMetaData* f1, FileMetaData* f2) const {
 int r = internal_comparator->Compare(f1->smallest, f2->smallest);
 if (r != 0) {
 return (r < 0);
 } else {
 // Break ties by file number
 return (f1->number < f2->number);
 }
 }
 };

 // 排序的 sstable (FileMetaData) 集合
 typedef std::set<FileMetaData*, BySmallestKey> FileSet;
 // 要添加和删除的 sstable 文件集合
 struct LevelState {
 std::set<uint64_t> deleted_files;
 FileSet* added_files;
 };

 // 要更新的 VersionSet
 VersionSet* vset_;
 // 基准的 Version, compact 后, 将 current_ 传入作为 base。
 Version* base_;
 // 各个 level 上要更新的文件集合 (LevelStat)

```

```
// compact 时，并不是每个 level 都有更新（level-n/level-n+1）。
LevelState levels_[config::kNumLevels];
};
```

以 `base_>files_[level]` 为基准，根据 `levels_` 中 `LevelStat` 的 `deleted_files/added_files` 做 merge，输出到新 Version 的 `files_[level]` (`VersionSet::Builder::SaveTo()`)。

- 1) 对于每个 level `n`，`base_>files_[n]` 与 `added_files` 做 merge，输出到新 Version 的 `files_[n]` 中。过程中根据 `deleted_files` 将要删除的丢弃掉 (`VersionSet::Builder::MaybeAddFile()`)，。
- 2) 处理完成，新 Version 中的 `files_[level]` 有了最新的 `sstable` 集合 (`FileMetaData`)。

## 28. Manifest (descriptor) (db/version\_set.cc)

为了重启 db 后可以恢复退出前的状态，需要将 db 中的状态保存下来，这些状态信息就保存在 `manifest` 文件中。

当 db 出现异常时，为了能够尽可能多的恢复，`manifest` 中不会只保存当前的状态，而是将历史的状态都保存下来。又考虑到每次状态的完全保存需要的空间和耗费的时间会较多，当前采用的方式是，只在 `manifest` 开始保存完整的状态信息 (`VersionSet::WriteSnapshot()`)，接下来只保存每次 compact 产生的操作 (`VesrionEdit`)，重启 db 时，根据开头的起始状态，依次将后续的 `VersionEdit` replay，即可恢复到退出前的状态 (`Vesrion`)。

## 29. TableBuilder/BlockBuilder(table/table\_builder.cc table/block\_builder.cc)

生成 block 的过程封装成 `BlockBuilder` 处理。生出 `sstable` 的过程封装成 `TableBuilder` 处理。

## 30. Iterator (include/leveldb/iterator.h)

`leveldb` 中对 key 的查找和遍历，上层统一使用 `Iterator` 的方式处理，屏蔽底层的处理，统一逻辑。提供 `RegisterCleanup()` 可以在 `Iterator` 销毁时，做一些清理工作（比如释放 `Iterator` 持有句柄的引用）。

# 三、存储结构的格式定义与操作

以下存储结构层面提到的 key，如非特别说明，均指已经包含 `SequenceNumber/valueType` 的 `Internalkey`：

|          |                                    |
|----------|------------------------------------|
| user-key | SequenceNumber<br>(with ValueType) |
|----------|------------------------------------|

## 1. memtable (db/skiplist.h db/memtable)

类似 `BigTable` 的模式，数据在内存中以 `memtable` 形式存储。`leveldb` 的 `memtable` 实现没有使用复杂的 B-树系列，采用的是更轻量级的 `skip list`。

全局看来，`skip list` 所有的 node 就是一个排序的链表，考虑到操作效率，为这一个链表再添加若干不同跨度的辅助链表，查找时通过辅助链表可以跳跃比较来加大查找的步进。每个链表上都是排序的 node，而每个 node 也可能同时处在多个链表上。将一个 node 所属链表的数量看作它的高度，那么，不同高度的 node 在查找时会获得不同跳跃跨度的查找优化，图 1 是一个最大高度为 5 的 `skiplist`。

换个角度，如果 node 的高度具有随机性，数据集合从高度层次上看就有了散列性，也就等同于树的平衡。相对于其他树型数据结构采用不同策略来保证平衡状态，`Skip list` 仅保证新加入 node 的高度随机即可（当然也可以采用规划计算的方式确定高度，以获得平摊复杂度。`leveldb` 采用的是更简单的随机方式）

如前所述，作为随机性的数据机构，skip list 的算法复杂度依赖于我们的随机假设，复杂度为  $O(\log n)$ 。

基于下面两个特点，skiplist 中的操作不需要任何锁或者 node 的引用计数：

- 1) skip list 中 node 内保存的是 InternalKey 与相应 value 组成的数据，SequenceNumber 的全局唯一保证了不会有相同的 node 出现，也就保证了不会有 node 更新的情况。
- 2) delete 等同于 put 操作，所以不会需要引用计数记录 node 的存活周期。

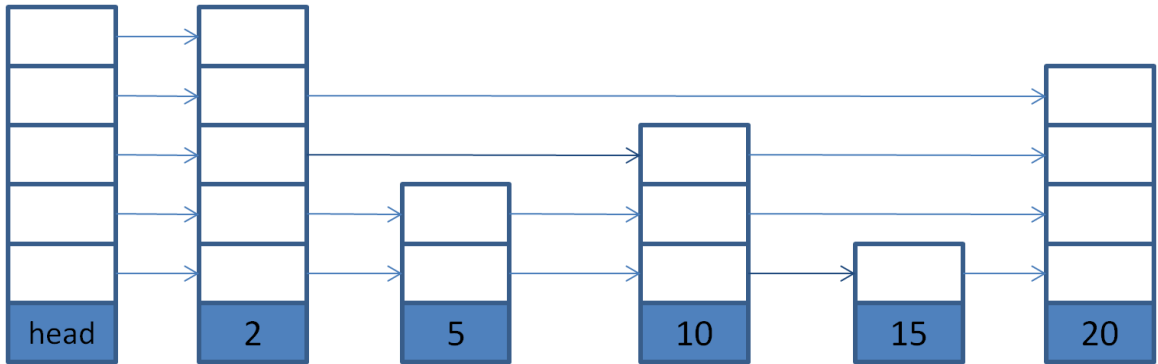


图 1

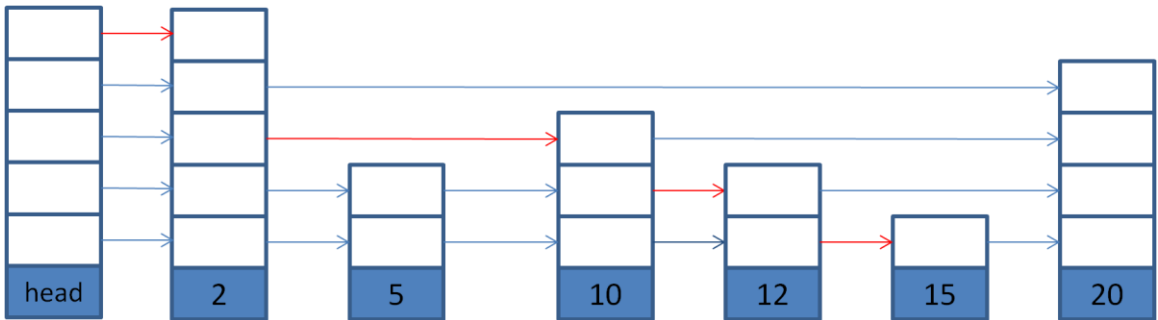


图 2

skiplist 的操作

1) 写入 (Skiplist::Insert()/Delete())

- a. insert: 先找到不小于该 key 的 node (FindGreaterOrEqual ())，随机产生新 node 的高度，对各个高度的链表做 insert 即可。  
图 2 即是对图 1 insert 12，并且随机确定其高度为 2 之后情形。
- b. delete: 先找到 node，并对其所在各个高度的链表做相应的更新。leveldb 中 delete 操作相当于 insert，skiplist 代码中并未实现。

2) 读取

skiplist 提供了 Iterator 的接口方式，供查找和遍历时使用。

- a. Seek ()  
找到不小 key 的节点 (FindGreaterOrEqual ())。从根节点开始，高度从高向低与 node 的 key 比较，直到找到或者到达链表尾。图 2 中的红色路径即是对 15 的查找路径。
- b. SeekToFirst()  
定位到头节点最低高度的 node 即可。
- c. SeekToLast()  
从头节点的最高开始，依次前进，知道达到链表尾。
- d. Next()/Prev()  
在最低高度的链表上做 next 或者 prev 即可。

memtable 中数据的存储格式：



|                        |                        |                          |                            |
|------------------------|------------------------|--------------------------|----------------------------|
| key_size<br>(varint32) | key_data<br>(key_size) | value_size<br>(varint32) | value_data<br>(value_data) |
|------------------------|------------------------|--------------------------|----------------------------|

memtable 的操作:

- 1) 写入 (MemTable::Add())
  - a. 将传入的 key 和 value dump 成 memtable 中存储的数据格式。
  - b. SkipList::Insert()。
- 2) 读取 (MemTable::Get())
 

memtable 对 key 的查找和遍历封装成 MemTableIterator。底层直接使用 SkipList 的类 Iterator 接口。

  - a. 从传入的 LookupKey 中取得 memtable 中存储的 key 格式。
  - b. 做 MemTableIterator::Seek()。
  - c. seek 失败, 返回 data not exist。seek 成功, 则判断数据的 ValueType
    - a) kTypeValue, 返回对应的 value 数据。
    - b) kTypeDeletion, 返回 data not exist。
- 3) 使用内存 (Arena util/arena.cc)
 

memtable 有阈值的限制 (write\_buffer\_size), 为了便于统计内存的使用, 也为了内存使用效率, 对 memtable 的内存使用实现了比较简单的 arena 管理 (Arena)。

```
class Arena {
.....
 // 当前空闲内存 block 内的可用地址
 char* alloc_ptr_;
 // 当前空闲内存 block 内的可用大小
 size_t alloc_bytes_remaining_;

 // 已经申请的内存 block
 std::vector<char*> blocks_;

 // 累计分配的内存大小
 // 一个 memtable 对应一个 Arena,
 // memtable 内的数据量就用这个值表示
 size_t blocks_memory_;
}
```

Arena 每次按 kBlockSize(4096)单位向系统申请内存, 提供地址对齐的内存, 记录内存使用。当 memtable 申请内存时, 如果 size 不大于 kBlockSize 的四分之一, 就在当前空闲的内存 block 中分配, 否则, 直接向系统申请 (malloc)。这个策略是为了能更好的服务小内存的申请, 避免个别大内存使用影响。

## 2. block of sstable (table/block\_builder.cc table/block.cc)

sstable 中的数据以 block 单位存储, 有利于 IO 和解析的粒度。整体如下图:

|        |        |       |                                      |                             |         |
|--------|--------|-------|--------------------------------------|-----------------------------|---------|
| entry0 | entry1 | ..... | restarts<br>(uint32*num_of_restarts) | num_of_restarts<br>(uint32) | trailer |
|--------|--------|-------|--------------------------------------|-----------------------------|---------|

entry 的组成:

|                          |                            |                         |                                       |                             |
|--------------------------|----------------------------|-------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|
| shared_bytes<br>(varint) | unshared_bytes<br>(varint) | value_bytes<br>(varint) | unshared_key_data<br>(unshared_bytes) | value_data<br>(value_bytes) |
|--------------------------|----------------------------|-------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|

trailer 的组成:

|             |              |
|-------------|--------------|
| type (char) | crc (uint32) |
|-------------|--------------|

- 1) entry: 一份 key-value 数据作为 block 内的一个 entry。考虑节约空间, leveldb 对 key 的存储

进行前缀压缩，每个 entry 中会记录 key 与前一个 key 前缀相同的字节（shared bytes）以及自己独特的字节（unshared bytes）。读取时，对 block 进行遍历，每个 key 根据前一个 key 以及 shared bytes/unshared bytes 可以构造出来。

- 2) restarts: 如果完全按照 1) 中所述处理，对每个 key 的查找，就都要从 block 的头开始遍历，所以进一步细化粒度，对 block 内的前缀压缩分区段进行。若干个（Option::block\_restart\_interval）key 做前缀压缩之后，就重新开始新一轮。每一轮前缀压缩的 block offset 保存在 restarts 中，num\_of\_restarts 记录着总共压缩的轮数。
- 3) trailer: 每个 block 后面都会有 5 个字节的 trailer。1 个字节的 type 表示 block 内的数据是否进行了压缩（比如使用了 snappy 压缩），4 个字节的 crc 记录 block 数据的校验码。block 在 sstable 中索引信息 offset/size, 封装成 BlockHandle (table/format.h) 使用, size 不包含 trailer。持久化时，offset/size 均采用 varint64 encode。

block 的操作

- 1) 写入 (BlockBuilder::Add()/BlockBuilder::Finish())  
block 写入时，不会对 key 做排序的逻辑，因为 sstable 的产生是由 memtable dump 或者 compact 时 merge 排序产生，key 的顺序上层已经保证。
  - a. 检查上一轮前缀压缩是否已经完成（达到 restart\_interval）  
完成，则记录 restarts 点，重新开始新一轮。该 key 不做任何处理（shared\_bytes = 0）  
未完成，计算该 key 与保存的上一个 key 的相同前缀，确定 unshared\_bytes/shared\_bytes
  - b. 将 key/value 以 block 内 entry 的数据格式，追加到该 block 上(内存中)。
  - c. BlockBuilder::Finish() 在一个 block 完成（达到设定的 block\_size）时，将 restarts 点的集合和数量追加到 block 上。
- 2) 读取 (ReadBlock() table/format.cc)  
有了一个 block 的 BlockHandle，即可定位到该 block 在 sstable 中的 offset 及 size, 从而读取出具体的 block (ReadBlock())。
  - a. 根据 BlockHandle，将 block 从 sstable 中读取出来（包含 trailer）。
  - b. 可选校验 trailer 中的 crc (get 时由 ReadOption:: verify\_checksums 控制，compact 时由 Option:: paranoid\_checks 控制)。
  - c. 根据 trailer 中的 type，决定是否要解压数据。
  - d. 将数据封装成 Block (block.cc)，解析出 restarts 集合以及数量。

上层对 Block 进行 key 的查找和遍历，封装成 Block::Iter 处理。

- a. Seek()
  - a) restarts 集合记录着每轮前缀压缩开始的 entry 在 block 中的 offset (restart\_point)，可以认为是所有位于 restart\_point 的 key 的集合，并且是排序的。所以，用 seek 的 key 在 restarts 集合中做二分查找，找到它属于的前缀压缩区间的开始 offset (restart\_point)，位于 restarts 内的下标记为 restart\_index。
  - b) 根据 restart\_point 定位到 block 中的 entry (SeekToRestartPoint())。
  - c) 根据 entry 的格式，依次遍历 (ParseNextKey())，直到找到不小于 key 的 entry。中间需要同步更新当前处于的 restart\_index。
- b. SeekToFirst()  
定位到 restart\_index 为 0 的 entry (SeekToRestartPoint())。
- c. SeekToLast()  
定位到最后一个 restart\_index 的 entry，然后遍历完该前缀压缩区间的 entry，即定位到该 block 的最后一个 key。
- d. Next()  
根据 entry 的格式，遍历下一个 entry (ParseNextKey())。
  - a) 根据前一个 value，获得下一个 entry 的 offset (NextEntryOffset())。
  - b) 解析 entry (DecodeEntry())。

- c) 根据 shared\_bytes/unshared\_bytes 以及前一个 key, 构造出当前 entry 中的 key/value。
- d) 如果到了这一轮前缀压缩的结束, 更新 restart\_index;
- e. Prev ()
  - a) 找到上一个 entry 属于的 restart\_index, 或者前一个 (前一个 entry 是一轮前缀压缩的开始时)。
  - b) 定位到 restart\_index 对应的 entry (SeekToRestartPoint())。
  - c) 从当前位置开始依次遍历, 直到上一个 entry 的前一个。
- 4) cache 的处理 (BlockCache)
 

block 的 cache 如果用户未指定自己的实现, 使用内部的 ShardLRUCache。

cache 中的 key 为 block 所在 sstable 加入 TableCache 时获得的 cacheID 加上 block 在 sstable 中的 offset, value 为 未压缩的 block 数据。
- 5) 统一处理 cache 与 IO (Table::BlockReader() table/table.cc)
 

处理 BlockCache 以及实际的 block IO 的逻辑由 Table::BlockReader() 处理:

  - a. 如果不存在 block cache, 直接调用 ReadBlock(), 否则, 根据传入的 BlockHandle, 构造出 BlockCache 的 key 进行 lookup:
    - a) 存在, 则返回 cache 中的 block 数据 (Block)。
    - b) 不存在, 调用 ReadBlock() 从磁盘上获得, 同时插入 BlockCache。
  - b. 根据得到的 Block, 构造出 Block::Iter 返回。

### 3. sstable (table/table\_bulder.cc/table.cc)

sstable 是 leveldb 中持久化数据的文件格式。整体来看, sstable 由数据 (data) 和元信息 (meta/index) 组成。数据和元信息统一以 block 单位存储 (除了文件最末尾的 footer 元信息), 读取时也采用统一的读取逻辑。整体的数据格式如下:

|                 |
|-----------------|
| data_block0     |
| data_block1     |
| .....           |
| data_blockN     |
| meta_block0     |
| ....            |
| meta_blockN     |
| metaindex_block |
| index_block     |
| footer          |

footer 的组成:

|                        |                    |               |               |
|------------------------|--------------------|---------------|---------------|
| metaindex_block_handle | index_block_handle | padding_bytes | magic(uint64) |
|------------------------|--------------------|---------------|---------------|

- 1) data\_block: 实际存储的 kv 数据。
- 2) meta\_block: 每个 data\_block 对应一个 meta\_block, 保存 data\_block 中的 key size/value size/kv counts 之类的统计信息, 当前版本未实现。
- 3) metaindex\_block: 保存 meta\_block 的索引信息。当前版本未实现。
- 4) index\_block : 保存每个 data\_block 的 last key 及其在 sstable 文件中的索引。block 中 entry 的 key 即是 last key (依赖于 FindShortestSeparator()/FindShortSuccessor() 的实现), value 即是该 data\_block 的 BlockHandler (offset/size)。
- 5) footer: 文件末尾的固定长度的数据。保存着 metaindex\_block 和 index\_block 的索引信息 (BlockHandler), 为达到固定的长度, 添加 padding\_bytes。最后有 8 个字节的 magic 校验。

sstable 的操作

- 1) 写入 (TableBuilder::Add() TableBuilder::Finish())  
同 sstable 中 block 的写入一样，不需要关心排序。
  - a. 如果是一个新 block 的开始，计算出上一个 block 的 end-key  
(Comparator::FindShortestSeparator())，连同 BlockHandle 添加到 index\_block 中。  
考虑到 index\_block 会 load 进内存，为了节约 index\_block 中保存的 index 信息（每个 block 对应的 end-key/offset/size），leveldb 中并没有直接使用 block 最后一个 key 做为它的 end-key，而是使用 Comparator::FindShortestSeparator() 得到。默认实现是将大于上一个 block 最后一个 key，但小于下一个 block 第一个 key 的最小 key 作为上一个 block 的 end-key。用户可以实现自己的 Comparator 来控制这个策略。
  - b. 将 key/value 加入当前 data\_block (BlockBuilder::Add())。
  - c. 如果当前 data\_block 达到设定的 Option::block\_size，将 data\_block 写入磁盘 (BlockBuilder::WriteBlock())。
  - d. BlockBuilder::Finish()。
  - e. 对 block 的数据做可选的压缩 (snappy)，append 到 sstable 文件。
  - f. 添加该 block 的 trailer (type/crc)，append 到 sstable 文件。
  - g. 记录该 block 的 BlockHandle。
  - h. TableBuilder::Finish() 是在 sstable 完成时 (dump memtable 完成或者达到 kTargetFileSize) 做的处理。
    - a) 将 meta\_index\_block 写入磁盘 (当前未实现 meta\_index\_block 逻辑，meta\_index\_block 没有任何数据)。
    - b) 计算最后一个 block 的 end-key (Comparator::FindShortSuccessor())，连同其 BlockHandle 添加到 index\_block 中。
    - c) 将 index\_block 写入磁盘。
    - d) 构造 footer，作为最后部分写入 sstable。
- 2) 读取 (Table::Open() table/table.cc TwoLevelIterator table/two\_level\_iterator.cc)  
一个 sstable 需要 IO 时首先 open (Table::Open())。
  - a. 根据传入的 sstable size (Version::files\_ 保存的 FileMetaData)，首先读取文件末尾的 footer。
  - b. 解析 footer 数据 (Footer::DecodeFrom() table/format.cc)，校验 magic，获得 index\_block 和 meta\_index\_block 的 BlockHandle。
  - c. 根据 index\_block 的 BlockHandle，读取 index\_block (ReadBlock() table/format.cc)。
  - d. 分配 cacheID (ShardedLRUCache::NewId(), util/cache.cc)。
  - e. 封装成 Table (调用者会将其加入 table cache，TableCache::NewIterator())。对 sstable 进行 key 的查找遍历封装成 TwoLevelIterator (参见 Iterator) 处理。
- 3) cache 的处理 (TableCache db/table\_cache.cc)  
加快 block 的定位，对 sstable 的元信息做了 cache (TableCache)，使用 ShardedLRUCache。  
cache 的 key 为 sstable 的 FileNumber，value 是封装了元信息的 Table 句柄。每当新加入 TableCache 时，会获得一个全局唯一 cacheId。  
当 compact 完成，删除 sstable 文件的同时，会从 TableCache 中将其对应的 entry 清除。而属于该 sstable 的 BlockCache 可能有多个，需要遍历 BlockCache 才能得到 (或者构造 sstable 中所有 block 的 BlockCache 的 key 做查询)，所以基于效率考虑，BlockCache 中属于该 sstable 的 block 缓存 entry 并不做处理，由 BlockCache 的 LRU 逻辑自行清除。
- 4) 统一处理 cache 与 IO (TableCache::NewIterator() db/table\_cache.cc)  
处理 table cache 和实际 sstable IO 的逻辑由 TableCache::NewIterator() 控制。
  - a. 构造 table cache 中的 key (FileNumber)，对 TableCache 做 Lookup，若存在，则直接获得对应的 Table。若不存在，则根据 FileNumber 构造出 sstable 的具体路径，Table::Open()，得到具体的 Table，并插入 TableCache。

- 
- b. 返回 sstable 的 Iterator (Table::NewIterator(), TwoLevelIterator)。
- 上层对 sstable 进行 key 的查找遍历都是用 TableCache::NewIterator() 获得 sstable 的 Iterator, 然后做后续操作, 无需关心 cache 相关逻辑。

#### 4. block of log (db/log\_format.h db/log\_writer.cc db/log\_reader.cc)

log 文件中的数据也是以 block 为单位组织。写日志时, 一致性考虑, 并没有按 block 单位写, 每次更新均对 log 文件进行 IO, 根据 WriteOption::sync 决定是否做强制 sync, 读取时以 block 为单位做 IO 以及校验。

block 的整体结构如下:

|         |
|---------|
| record0 |
| record1 |
| .....   |
| recordN |
| trailer |

record 的组成:

|                   |                 |              |               |
|-------------------|-----------------|--------------|---------------|
| checksum (uint32) | length (uint16) | type (uint8) | data (length) |
|-------------------|-----------------|--------------|---------------|

- 1) record: 每次更新写入作为一个 record。  
checksum 记录的是 type 和 data 的 crc 校验。  
length 是 record 内保存的 data 长度 (little-endian)。  
为了避免 block 内部碎片的产生, 一份 record 可能会跨 block, 所以根据 record 内保存数据占更新写入数据的完整与否, 当前分为 4 种 type: FULL, FIRST, MIDDLE, LAST, LAST, 依次表示 record 内保存的是完整数据的全部, 开始, 中间或者最后部分。  
data 即是保存的数据。
  - 2) trailer: 如果 block 最后剩余的部分小于 record 的头长度 (checksum/length/type 共 7bytes), 则剩余的部分作为 block 的 trailer, 填 0 不使用, record 写入下一个 block。
- log 的写入是顺序写, 读取只会在启动时发生, 不会是性能的瓶颈 (每次写都 sync 会有影响), log 中的数据也就没有进行压缩处理。

#### 5. log (db/log\_format.h db/log\_writer.cc db/log\_reader.cc)

log 文件格式:

|           |
|-----------|
| init_data |
| block1    |
| block2    |
| .....     |
| blockN    |

- 1) init\_data: log 文件开头可以添加一些信息, 读取写入的时候, 跳过这些数据。当前版本只在 log\_reader 中支持, log\_writer 中并没有相关逻辑, 所以当前 init\_data 为空。
  - 2) block: 实际的数据。
- binlog 以及 MANIFEST 文件都使用了这种 log 的格式。

log 的操作

- 1) 写入 (Writer::AddRecord() log\_writer.cc)  
对 log 的每次写入作为 record 添加。
  - a. 如果当前 block 剩余的 size 小于 record 头长度, 填充 trailer, 开始下一个 block。
  - b. 根据当前 block 剩余的 size 和写入 size, 划分出满足写入的最大 record, 确定 record

- 
- type。
  - c. 写入 record (`Writer::EmitPhysicalRecord()`)
    - a) 构造 record 头 (checksum/size/type)
    - b) 追加写入 log 文件
  - d. 循环 a-c, 直至写入处理完成。
  - e. 根据 option 指定的 sync 决定是否做 log 文件的强制 sync。
- 2) 读取 (`Reader::ReadRecord()` `db/log_reader.cc`)
- log 的读取仅发生在 db 启动的时候, 每次读取出当时写入的一次完整更新。
- a. 第一次读取, 根据指定的 `initial_offset` 跳过 log 文件开始的 `init_data(Reader::SkipToInitialBlock())`, 如果从跳过的 offset 开始, 当前 block 剩余的 size 小于 record 的头长度 (是个 trailer), 则直接跳过这个 block。当前实现中指定的 `initial_offset` 为 0。
  - b. 从 log 文件中读一个 record (`Reader::ReadPhysicalRecord()`)。
    - a) 如果第一次读取或者当前 block 已经解析完成, 从 log 文件中读取一个 block 的数据。
    - b) 从当前 block 解析到的 offset 开始, 解析 record 头, 根据选项决定是否校验 crc (当前一定校验), 进而解析出完整的 record。
  - c. 根据读到 record 的 type 做进一步处理
    - a) `kFullType`, 则直接返回。
    - b) `kFirstType`/ `kMiddleType`, 保存读到的数据。
    - c) `kLastType`, 与前面已经读到的数据合并, 直接返回。
    - d) 非法的 type, 返回错误。非法的 type 是指在读取 log 文件或者解析 block 数据时发生错误, 诸如 block 中剩余的 size 不满足 record 头中的 `data_size`, 数据从 `initial_offset` 开始, 未完成完整的解析, log 文件就已经结束 (eof) 了之类。
  - d. 循环 a-c 直至读取出当时写入的一个完整更新。

## 6. cache (`util/cache.cc`)

leveldb 中支持用户自己实现 block cache 逻辑, 作为 option 传入。默认使用的是内部实现的 LRU。简单以及效率考虑, leveldb 中实现了一个简单的 hash table (`HashHandle`), 采用定长数组存放 node, 链表解决 hash 冲突, 每次 insert 后, 如果 node 数量大于数组的容量 (期望短的冲突链表长度), 就将容量扩大 2 倍, 做一次 rehash。

LRU 的逻辑由 `LRUCache` 控制, insert 和 lookup 时更新链表即可。

为了加速查找和减少冲突, 又将 `LRUCache` 再做 shard (`ShardedLRUCache`)。

整体来看, 上层使用 cache 时, 首先根据 key 做 shard, 然后在 `LRUCache` 层对 `HashHandle` 做数据的操作, 最后处理 lru 逻辑。

## 7. Snapshot (`include/leveldb/snapshot.h`)

依赖于 `SequenceNumber` 来标识时间点, leveldb 中 Snapshot 的实现很简单, 只需要记录产生 Snapshot 时的 `SequenceNumber` 即可, 所有 Snapshot 用 double-linked list 组织, 新加入的添加在列表头。

## 8. Iterator (`include/leveldb/iterator.h`)

leveldb 中 key 的查找遍历, 存储层面之上统一通过 Iterator 的方式处理。存储结构 (`memtable/sstable/block`) 都提供对应的 Iterator, 另外还有为操作方便封装的特殊 Iterator。

- 1) memtable 的 Iterator (`MemTableIterator` `db/memtable.cc`)

参看 memtable。

- 2) sstable 的 Iterator (`TwoLevelIterator`)。

sstable 的 Iterator 使用 `TwoLevelIterator`, 参看 `TwoLevelIterator`。



- 
- 3) block of sstable 的 Iterator (Block::Iter table/block.cc)  
参看 block of sstable
- 4) 非 level-0 的 sstable 元信息集合的 Iterator (LevelFileNumIterator db/version\_set.cc)  
level-0 中的 sstable 可能存在 overlap, 处理时每个 sstable 单独处理即可。非 level-0 的 sstable 集合不会有 overlap, 且 key-range 是排序的 (Version::files\_[level]), 在非 level-0 上进行 key 的查找遍历, 可以根据排序的 FileMetaData 集合加速定位到 key 所在的 sstable (FileMetaData), 将其封装成 LevelFileNumIterator。
- ```
class Version::LevelFileNumIterator : public Iterator {
.....
    // 对 key 做比较的 comparator
    const InternalKeyComparator icmp_;
    // 当前 level 中 FileMetaData 集合, 构造时取 Version::files_[] 中的一项即可,
    // 其中的 FileMetaData 已经按照 sstable (FileMetaData) 的 smallest 排序
    const std::vector<FileMetaData*>* const flist_;
    // 当前定位到的 sstable (FileMetaData) 在 flist_ 中的 index
    uint32_t index_;
    // 保存上次取 Value () 时的实际数据, 供 Slice 包装返回。
    // 这是为了避免每次 Value () 都要分配内存。
    mutable char value_buf_[16];
};
```
- a. Seek()
用要 Seek 的 key 在 flist_ 中做二分查找 (与 FileMetaData::largest key 比较), 可以定位到 key 所在 sstable 的元信息 (FileMetaData) (FindFile())。
- b. SeekToFirst () / SeekToLast ()
定位到 flist_ 的开始/结束。
- c. Next () / Prev()
flist_ 前进/后退一个。
- d. Key()
当前 FileMetaData 的 largest key。
- e. Value()
将当前 FileMeta 的 filenumber 与 filesize encode 到 value_buf_, 返回 value_buf_
- 5) TwoLevelIterator (table/two_level_iterator.cc)
对于类似 index ==> data 这种需要定位 index, 然后根据 index 定位到具体 data 的使用方式, leveldb 封装成 TwoLevelIterator 使用。
TwoLevelIterator 封装了 index Iterator (index_iter), 和根据 index 中的信息可以返回 data Iterator (data_iter) 的 hook 函数。index_iter 以及 data_iter 需要支持同一个 key 的 seek。
- ```
class TwoLevelIterator: public Iterator {
 // 根据 index_value(index_iter->Value()), data 对应的 index 信息)
 // 可以返回对应 data Iterator 的 hook
 BlockFunction block_function_;
 // block_function_ 的参数
 void* arg_;
 // 传入的 option
 const ReadOptions options_;
 // 记录过程中的 status
 Status status_;
 // index 的 Iterator, 根据 key 可以 Seek () 到 key 所在 data 的元信息。
 IteratorWrapper index_iter_;
 // data 的 Iterator, 根据 key 可以 Seek () 到 key 在 data 中的位置,
```

```

// 进而获得对应的 value.
IteratorWrapper data_iter_;
// If data_iter_ is non-NULL, then "data_block_handle_" holds the
// "index_value" passed to block_function_ to create the data_iter_.
// 保存 index_value(data 的 index 信息)
std::string data_block_handle_;
};

a. Seek ()
a) index_iter->Seek (), 得到 index_iter->Value(), 即 key 所在 data 的 index 信息
 data_block_handle_。
b) InitDataBlock(), 根据 index_block_handle, 调用 hook 函数, 获得对应 data 的
 data_iter。
c) data_iter->Seek()。定位到要找的 key。
d) SkipEmptyDataBlocksForward ()。如果获得的 data_iter 是无效, 那么需要不断尝试下
 一个 data 并定位到其最开始(已经满足 Seek 条件), 直到找到合法的 data。
 (index_iter->Next()/InitDataBlock()/data_iter->SeekToFirst())。

b. SeekToFirst()/SeekToLast ()
 类似 Seek (), index_iter/data_iter 均做 SeekToFirst()/SeekToLast () 即可。
 最后同样 SkipEmptyDataBlocksForward ()。

c. Next()/Prev ()
 直接调用 data_iter->Next()/Prev () 即可。SkipEmptyDataBlocksForward ()。

d. Key()/Value ()
 即 data_iter->Key()/iter->Value()。

```

TwoLevelIterator 的设计封装非常巧妙, 使用在了两个地方:

- a. 作为 sstable 的 iterator 对 sstable 进行 key 的查找遍历。index\_iter 为该 sstable 中的 index\_block\_iter(Block::Iter), hook 函数为 Table::BlockReader() (table/table.cc)。Seek 时, index\_iter 做 Seek 得到 key 所在 block 的 index 信息 (BlockHandle), BlockReader 根据 BlockHandle 获得具体的 block 数据, 封装成 Block::Iter 作为 data\_iter 返回, data\_iter 做 Seek 即可在 block 中定位到 key, 进而得到对应的数据。
  - b. 作为非 level-0 中 sstable 集合的 iterator 进行 key 的查找遍历。当遍历 db 或者 compact 时, 非 level-0 中已经排序的 sstable 集合封装成 TwoLevelIterator。index\_iter 为 LevelFileNumIterator, hook 函数为 GetFileIterator () (db/version\_set.cc)。Seek 时, LevelFileNumIterator 作为 index\_iter 做 Seek, 可以得到 key 所在 sstable 的 index 信息 (FileMetaData), GetFileIterator 根据 FileMeta, 获得具体的 sstable 句柄 (Table), 封装成 sstable 的 iterator (也就是上面 a 使用的 TwoLevelIterator) 作为 data\_iter 返回, data\_iter 做 Seek 即可定位到 key, 进而得到对应的数据。
- 6) IteratorWrapper (table/iterator\_wrapper.h)
- IteratorWrapper 提供了稍作优化的 Iterator 包装, 它会保存每次 Key () /Valid() 的值, 从而避免每次调用 Iterator 接口产生的 virtual function 调用。另外, 若频繁调用时, 直接使用保存的值, 比每次计算能有更好的 cpu cache locality。
- 7) MergingIterator (table/merge.cc)
- MergingIterator 内部包含多个 Iterator 的集合 (children\_), 每个操作, 对 children\_ 中每个 Iterator 做同样操作之后按逻辑取边界的值即可, 负责边界值的 iterator 置为 current\_。
- ```

class MergingIterator : public Iterator {
// 对 key 做比较的 comparator
const Comparator* comparator_;
// 包含的所有 Iterator, 这里采用简单的数组保存,
// 每次比较其中的当前值, 会有 O(n) 的遍历开销,

```

```

// n_较小时可以容忍。
IteratorWrapper* children_;
// children_中 Iterator 的数量
int n_;
// 当前定位到的 Iterator
IteratorWrapper* current_;

// 因为有多多个 Iterator 存在，需要记录前一次做的是何种方向的操作，
// 判断这一次操作的方向是否和前一次一致，来做不同的处理。
// 比如，如果做了 Next()，current_定位到的一定是 children_中满足条件最小的，
// 其他的 Iterator 已经定位到大于当前 key
// 的位置(除非 Iterator 已经 end)，这是，继续做 Next()，只需要
// current_->Next()，然后在 children_中选出大于当前 key 且最小的即可。
// 但如果做 Prev()，其他的 Iterator
// 可能位于大于当前 key 的位置，所以必须先让所有的 Iterator 都定位到小于
// 当前 key 的位置(Iterator 中不存在 key，就 SeekToLast())，然后选出小于
// 当前 key 且最大的。
enum Direction {
    kForward,
    kReverse
};
Direction direction_;
};

```

- a. Seek ()

children_中的所有 iterator 均做一次 seek，然后找到 Valid () 中最小的 (FindSmallest())。
- b. SeekToFirst()

children_中的所有 iterator 均做一次 SeekToFirst()，FindSmallest()。
- c. SeekToLast()

children_中的所有 iterator 均做一次 SeekToLast()，然后找到 Valid() 中最大的 (FindLargest())。
- d. Next ()
 - a) 如果前一次的操作也是 Next() (direction_ == kForward)，只需要 current_->Next ()，然后返回 FindSmallest()。
 - b) 否则，对 children_中非 current_的 iterator 均做当前 key 的 Seek ()，Seek 到则做相应的 Prev ()，否则做 SeekToFirst ()，这样保证除了不存在 key 的 Iterator，其他都处于大于当前 key 的下一个位置。
 - c) current_->Next ()
 - d) FindSmallest ()
- e. Prev ()
 - e) 如果前一次的操作也是 Prev() (direction_ == kReverse)，只需要 current_->Prev ()，然后返回 FindLargest()。
 - f) 否则，对 children_中非 current_的 iterator 均做当前 key 的 Seek ()，Seek 到则做相应的 Prev ()，否则做 SeekToLast ()，这样保证除了不存在 key 的 Iterator，其他都处于小于当前 key 的前一个位置。
 - g) current_->Prev ()
 - h) FindLargest ()

8) 遍历 db 的 Iterator (DBIter db/db_iter.cc)

对 db 遍历时，封装成 DBIter(NewDBIterator() db/db_iter.cc)。

- a. 整个 db 内部的 Iterator (DBImpl::NewInternalIterator())
 - a) 获得 memtable 的 iterator (Memtable::NewIterator(), MemTableIterator)
 - b) 获得 immutable memtable 的 iterator (Memtable::NewIterator(), MemTableIterator)
 - c) 获得所有 sstable 的 Iterator (Version::AddIterators())
 - i. level-0 中所有 sstable 的 iterator (TableCache::NewIterator(), 作为单个 sstable iterator 的 TwoLevelIterator)
 - ii. 每个非 level-0 的 level 上 sstable 集合 iterator (VersionSet::NewConcatenatingIterator(), 作为 sstable 集合 iterator 的 TwoLevelIterator)
 - d) 把获得的所有 Iterator 作为 children iterator 构造出 MergingIterator.
- b. 如果指定 Snapshot, 将 Snapshot 的 SequenceNumber 作为最大值, 否则将 VersionSet::last_sequence_ 作为最大值
- c. 构造 DBIter.

```

class DBIter: public Iterator {
    // db 数据路径
    const std::string* const dbname_;
    // Env
    Env* const env_;
    // 因为这是提供给使用者的 Iterator, 需要对 user-key 进行比较验证,
    // 需要 user_comparator
    const Comparator* const user_comparator_;
    // DBImpl::NewInternalIterator() 获得的封装整个
    // db Iterator 的 MergingIterator:
    Iterator* const iter_;
    // 通过 SequenceNumber 的比较来控制遍历数据的时间点。
    // 如果指定了 Snapshot, 则赋值为 Snapshot::sequence_number,
    // 只遍历出 Snapshot 确定之前的数据;
    // 否则赋值为 VersionSet::last_sequence_number_, 遍历出当前 db 中所有的数据
    SequenceNumber const sequence_;

    // 遍历过程中的 status
    Status status_;
    // 遍历时需要跳过相同和删除的 key, 反向遍历为了处理这个逻辑, 操作完成时,
    // iter_ 定位到的会是当前 key 的前一个位置, 所以需要保存过程中
    // 获得的当前 key/value。
    // 参见 FindPrevUserEntry()。
    std::string saved_key_;
    std::string saved_value_;
    // 前一次遍历的方向, 参见 MergingIterator。
    Direction direction_;
    // 标识是否遍历完成。
    bool valid_;
}

```

存储层的 Iterator (iter_) 不关心实际的数据, 只需要做遍历, DBIter 是提供给用户的最外层 Iterator, 返回对应的 kv 数据, 需要做逻辑上的解析, 比如, 遍历到相同或者删除的 key 要跳过, 如果指定了 Snapshot, 要跳过不属于 Snapshot 的数据等。

DBIter::FindNextUserEntry()/DBIter::FindPrevUserEntry() 处理这些解析逻辑。

- a. FindNextUserEntry()

-
- 正向遍历，首次遇到的 key 就是 key 的最终状态（SequenseNumber 更大），处理简单。
- a) `iter_>Next()` 直到 `Key()` 不同于遍历最开始的 key
 - b) 解析 `iter->Key()`，判断是否可用（`sequence <= DBIter::sequence_`）
 - i. 是 `kTypeValue`，直接返回
 - ii. 是 `kTypeDeletion`，说明该 key 已经删除，继续下去。
 - c) 循环 a) b)。
- 此时，`iter_>Key()/iter->Value()` 返回的就是遍历到的下一个合法的数据。
- b. `FindPrevUserEntry()`

反向遍历时，对于一个 key，最后遍历到的才是其最终状态，所以必须遍历到该 key 的前一个，才能确定该 key 已经全部处理过，并获得其最终状态。这时 `iter_` 并不位于当前 key 的位置，所以需要 `saved_key_/save_value_` 来保存当前的 key/value。

 - a) `iter_>Prev()` 直到遍历到不同的 `Key()`，中间用 `saved_key_/saved_value_` 保存已经遍历到的 key/value。
 - b) 解析 `saved_key_`，判断是否可用（`sequence <= DBIter::sequence_`）
 - i. 是 `kTypeValue`，则直接返回，`saved_key_/saved_value_` 即是遍历到的 key/value。
 - ii. 是 `kDeletion`，说明该 key 已经删除，clear `saved_key_/saved_value_`，继续下去。
 - c) 循环 a) b)。
- 其他的操作只需要底层 iterator 做相应操作，用 `FindNextUserEntry()/FindPrevUserEntry()` 处理数据的判断逻辑即可。
- c. `Seek()`
 - a) `iter_>Seek()`。
 - b) `FindNextUserEntry()`。
 - d. `SeekToFirst()`
 - a) `iter_>SeekToFirst()`
 - b) `FindNextUserEntry()`
 - e. `SeekToLast()`
 - a) `iter_>SeekToLast()`
 - b) `FindPrevUserEntry()`
 - f. `Next()`
 - a) 如果与上一次操作 `dirction_` 一致，直接 `FindNextUserEntry()`
 - b) 否则，前一次的 `Prev()` 使 `iter_` 定位在当前 key 的前一个，先 `iter_>Next()`（如果已经 `Prev()` 遍历完了，则 `iter_>SeekToFirst()`），回到当前位置，然后再 `FindNextUserEntry()`。
 - g. `Prev()`
 - a) 如果与上一次操作 `dirction_` 一致，直接 `FindPrevUserEntry()`
 - b) 否则，前一次的 `Next()` 使 `iter_` 定位在当前 key 上，先 `iter->Prev()` 回退一个，然后再 `FindPrevUserEntry()`。
 - h. `Key()/Value()`

如前所述，如果是正向遍历，就是 `iter_>Key()` 中的 user-key 部分/`iter_>Value()` 中的如果是反向遍历，则返回 `saved_key/saved_value`。

四、主要流程

1. open

-
- 1) 基本检查
 - a. 根据传入的 db 路径, 对 LOCK 文件做 flock 来判断是否已经有 db 实例启动, 一份数据同时只能有一个 db 实例操作。
 - b. 根据 option 内的 create_if_missing/error_if_exists, 来确定当数据目录已经存在时要做处理。
 - 2) db 元信息检查 (VersionSet::recover())
 - a. 从 CURRENT 文件中读取当前的 MANIFEST 文件。
 - b. 从 MANIFEST 文件中依次读取每个 record (VersionEdit::DecodeFrom), 检查 Comparator 是否一致, 然后依次 replay。
 - c. 检查解析 MANIFEST 的最终状态中的基本的信息是否完整 (log number, FileNumber, SequenceNumber), 将其生效成 db 当前的状态。此时, 整个 db 的各种元信息 (FileNumber, SequenceNumber, 各 level 的文件数目, size, range, 下一次 compact 的 start_key 等等) 均 load 完成, db 恢复成上一次退出前的状态。
 - 3) 从 log 中恢复上一次可能丢失的数据 (RecoverLogFile)
 - a. 遍历 db 中的文件, 根据已经获得的 db 元信息 LogNumber 和 PrevLogNumber, 找到上一次未处理的 log 文件。
 - b. 遍历 log 文件中的 record (record 中的 data 即是 memtable 中的 data), 重建 memtable。达到 memtable 阈值, 就 dump 成 sstable。期间, 用 record 中的 SequenceNumber 修正从 MANIFEST 中读取的当前 SequenceNumber。
 - c. 将最后的 memtable dump 成 sstable。
 - d. 根据 log 文件的 FileNumber 和遍历 record 的 SequenceNumber 修正当前的 FileNumber 和 SequenceNumber。
 - 4) 生成新的 log 文件。更新 db 的元信息 (VersionSet::LogAndApply(), 生成最新的 MANIFEST 文件), 删除无用文件 (DeleteObsoleteFiles()), 尝试 compact (MaybeScheduleCompaction())。
 - 5) 启动完毕。

2. put

leveldb 中的写操作不是瓶颈, 但可能出现过量写影响读的效率 (比如 level-0 中文件过多, 查找某个 key 可能会造成过量的 io), 所以有一系列策略主动去限制写。

- 1) 将 key value 封装成 WriteBatch。
- 2) 循环检查当前 db 状态, 确定策略 (DBImpl::MakeRoomForWrite()):
 - a. 如果当前 level-0 中的文件数目达到 kL0_SlowdownWritesTrigger 阈值, 则 sleep 进行 delay。该 delay 只会发生一次。
 - b. 如果当前 memtable 的 size 为达到阈值 write_buffer_size, 则允许这次写。
 - c. 如果 memtable 已经达到阈值, 但 immutable memtable 仍存在, 则等待 compact 将其 dump 完成。
 - d. 如果 level-0 中的文件数目达到 kL0_StopWritesTrigger 阈值, 则等待 compact memtable 完成。
 - e. 上述条件都不满足, 则是 memtable 已经写满, 并且 immutable memtable 不存在, 则将当前 memtable 置为 immutable memtable, 生成新的 memtable 和 log file, 主动触发 compact, 允许该次写。
- 3) 设置 WriteBatch 的 SequenceNumber。
- 4) 先将 WriteBatch 中的数据记 log (Log::AddRecord())。
- 5) 将 WriteBatch 应用在 memtable 上。 (WriteBatchInternal::InsertInto()), 即遍历 decode 出 WriteBatch 中的 key/value/ValueType, 根据 ValueType 对 memtable 进行 put/delete 操作。
- 6) 更新 SequenceNumber (last_sequence + WriteBatch::count())。

3. get

总体来说, get 即是找到 userkey 相同, 并且 SequenceNumber 最大 (最新) 的数据。leveldb 支持对特定 Snapshot 的 get, 只是简单的将 Snapshot 的 SequenceNumber 作为最大的 SequenceNumber 即可。

- 1) 如果 ReadOption 指定了 snapshot, 则将指定 snapshot 的 SequenceNumber 作为最大 SequenceNumber, 否则, 将当前最大 SequenceNumber (VersionSet::last_sequence_number) 作为最大值。
- 2) 在 memtable 中查找 (MemTable::Get())
- 3) 如果 memtable 中未找到, 并且存在 immutable memtable, 就在 immutable memtable 中查找 (Memtable::Get())。
- 4) 仍未找到, 在 sstable 中查找 (VersionSet::Get())。
从 level-0 开始, 每个 level 上依次进行查找, 一旦找到, 即返回。
 - a. 首先找出 level 上可能包含 key 的 sstable. (key 包含在 FileMetaData 的 [starttest, largest].
 - a) level-0 的查找只能顺序遍历 files_[0]。考虑到 level-0 中的 sstable 是 memtable dump 生成的, 所以新生成的 sstable 一定比旧生成有更新的数据, 同时 sstable 文件的 FileNumber 是递增, 所以, 将从 level-0 中获得的 sstable (FileMetaData) 按照 FileNumber 排序 (NewestFirst() db/version_set.cc), 能够优化 level-0 中的查找。level-0 中可能会找到多个 sstable
 - b) 非 level-0 中的查找, 对 files_[] 基于 FileMetaData::largest 做二分查找 (FindFile() db/version_set.cc) 即可定位到 level 中可能包含 key 的 sstable。非 level-0 上最多找到一个 sstable。
 - b. 如果该 level 上没有找到可能的 sstable, 跳过。否则, 对要进行查找的 sstable 获得其 Iterator (TableCache::NewIterator()), 做 seek ()。
 - c. seek 成功则检查有效性 (GetValue() db/version_set.cc) 也就是根据 ValueType 判断是否是有效的数据:
 - a) kTypeValue, 返回对应的 value 数据。
 - b) kTypeDeletion, 返回 data not exist。

4. delete

delete 相比于 put 操作, 只在构造 WriteBatch 时, 设置 ValueType 为 kTypeDeletion, 其他流程和 put 相同。

5. snapshot

- 1) 取得当前的 SequenceNumber
- 2) 构造出 Snapshot, 插入到已有链表中。

6. NewIterator

构造 DBIter, 做 Seek() 即可。参见 Iterator。

7. compact

leveldb 中有且仅有一个后台进程 (第一次 compact 触发时 create 出来) 单独做 compact。当主线程主动触发 compact 时 (MaybeScheduleCompaction()), 做以下流程:

- 1) 如果 compact 已经运行或者 db 正在退出, 直接返回。
- 2) 检查当前的运行状态, 确定是否需要进行 compact, 如果需要, 则触发后台调度 compact (Env::Schedule()), 否则直接返回。
- 3) 做实际的 compact 逻辑 (BackgroundCompaction()), 完成后, 再次主动触发 compact (主线程将任务入队列即返回, 不会有递归栈溢出的问题)。

详细描述各个步骤

-
- 1) 会主动触发 compact 的情况
 - a. db 启动时, 恢复完毕, 会主动触发 compact。
 - b. 直接调用 compact 相关的函数, 会把 compact 的 key-range 指定在 manual_compaction 中。
 - c. 每次进行写操作 (put/delete) 检查时 (MakeRoomForWrite()), 如果发现 memtable 已经写满并且没有 immutable memtable, 会将 memtable 置为 immutable memtable, 生成新的 memtable, 同时触发 compact。
 - d. get 操作时, 如果有超过一个 sstable 文件进行了 IO, 会检查做 IO 的最后一个文件是否达到了 compact 的条件 (allowed_seeks 用光), 达到条件, 则主动触发 compact。
 - 2) 需要 compact 的运行状态
 - a. 存在 immutable memtable。
 - b. 函数直接调用了 compact 相关的接口, manual_compaction 中指定了要 compact 的 key-range。
 - c. level 存在不均衡状态或者有明确需要 compact 的 sstable 文件 (`VersionSet::NeedsCompaction()`
`VersionSet::compaction_score >= 1 || VersionSet::file_to_compact != NULL`)。
 - 3) 实际 compact 的流程
 - a. 如果存在 immutable memtable, 将其 dump 成 sstable (`DBImpl::CompactMemTable()`), 完成返回。
 - b. 如果存在外部触发的 compact, 根据 manual_compaction 指定的 level/start_key/end_key, 选出 `Compaction(VersionSet::CompactRange())`。为了避免外部指定的 key-range 过大, 一次 compact 过多的 sstable 文件, manual_compaction 可能不会一次做完, 所以有 done 来标识是否已经全部完成, tmp_storage 保存上一次 compact 到的 end-key, 即下一次的 start-key。

```
struct ManualCompaction {
    int level;
    bool done;
    const InternalKey* begin;    // NULL means beginning of key range
    const InternalKey* end;      // NULL means end of key range
    InternalKey tmp_storage;     // Used to keep track of compaction progress
};
```
 - c. 根据 db 当前状态, 选出 `Compaction(VersionSet::PickCompaction())`。
 - d. 如果不是 manual compact 并且选出的 sstable 都处于 level-n 且不会造成过多的 GrandparentOverlap (`Compaction::IsTrivialMove()`), 简单处理, 将这些 sstable 推到 level-n+1, 更新 db 元信息即可 (`VersionSet::LogAndApply()`)。
 - e. 否则, 根据确定出的 Compaction, 做具体的 compact 处理 (`DoCompactionWork()`), 最后做异常情况的清理 (`CleanupCompaction()`)。

再详细描述 3) 实际 compact 的流程:

- 1) `DBImpl::CompactMemTable()` (db/db_impl.cc)
 - a. `DBImpl::WriteLevel0Table()`
 - a) 取得 memtable 的 Iterator (`MemtableIterator`)。
 - b) 生成新的 sstable 文件, 遍历 memtable, 将每份数据写入 sstable (`BuildTable()`)。
 - c) 为生成 sstable 选择合适的 level (`VersionSet::PickLevelForMemTableOutput()`), 记录 `VersionEdit`。
 - a. 更新当前的 lognumber, 应用 `VersionEdit`, 生效新的 `Version(VersionSet::LogAndApply())`。
 - b. 删除废弃文件 (`DBImpl::DeleteObsoleteFiles()`)。
- 2) `BuildTable()` (db/builder.cc)
 - a. 生成新的 sstable。
 - b. 遍历 memtable, 写入 sstable (`TableBuilder::add()`), 完成 sync。

-
- c. 记录 sstable 的 FileMetaData 信息。将新生成 sstable 加入 TableCache, 作为文件正常的验证(TableCache::NewIterator()).
- 3) VersionSet::PickLevelForMemTableOutput () (db/version_set.cc)
- 对于 memtable dump 成的 sstable, 考虑到 level-0 做 compact 的消耗最大(可能处理的文件最多), 所以期望尽量让 dump 出的 sstable 能够直接位于高的 level。同时, 若处于过高的 level, 如果对某些 rang 的 key 一直做更新, 后续的 compact 又会好消耗很多, 权衡考虑, 设置了最大 level 阈值 kMaxMemCompactLevel (当前为 2)。
- a. 如果新生成的 sstable 与 level-0 中的文件有 overlap, 选 level-0.
 - b. 向上尝试不大于 kMaxMemCompactLevel 的 level, 如果与 level 产生 overlap 即返回。
 - c. 对于不产生 overlap 的 level, 同时考虑 kMaxGrandParentOverlapBytes 的阈值判断。
- 4) VersionSet::CompactRange () (db/version_set.cc)
- a. 获得指定 level-n 中 key-range 符合[start-key, end-key]的 sstable (Version::GetOverlappingInputs())。
 - b. 避免一次 compact 过多的 sstable, 控制一个 level 中参与 compact 的 sstable size 不大于 MaxFileSizeForLevel(), 当前是 kTargetFileSize(也就是只选取一个, 略有偏小),
 - c. 取得需要的其他 sstable (VersionSet::SetupOtherInputs ())
 - a) 确定从 level-n 中获得的 sstable 的 key-range, 然后获得与其有 overlap 的 level-n+1 中的 sstable (Version::GetOverlappingInputs ())。
 - b) 在不扩大已经获得的所有 sstable 的 key-range 的前提下, 尝试添加 level-n 中 sstable。
 - c) 获得 grandparents_ (参见 Compaction)。
 - d) 更新 level-n 中下下次要 compact 的 start-key (compact_pointer_)。
- 5) VersionSet::PickCompaction () (db/version_set.cc)
- a. 确定需要 compact 的 level-n 以及对应的 sstable。
相比由 seek 产生的不均衡 (seek_compaction: file_to_compact != NULL), 更优先 compact 由 sstable size/count 造成的不均衡 (size_compaction: compaction_score > 1)
 - a) 如果 compaction_score_ > 1, 说明 compaction_level_ 上最不平衡, 取位于 compaction_level_, 并且 start-key 大于该 level 的 compact_pointer_ 的第一个 sstable。如果没有找到, 就取该 level 上的第一个文件 (compaction_level_ > 0, 应该可以使用二分查找)。
 - b) 如果 compaction_score_ < 1 但 file_to_compact_ 存在, 则取该 sstable。
 - c) 如果以上二者都不满足, 说明 db 处于均衡状态, 不需要 compact。
 - b. 如果 level-n 为 level-0, 由于其中的 sstable 会有 overlap, 取出在 level-0 中与确定 compact 的 sstable 有 overlap 的文件。
 - c. 取得需要的其他 sstable (SetupOtherInputs ())
- 6) DBImpl::DoCompactionWork () (db/db_impl.cc)
- 实际的 compact 过程就是对多个已经排序的 sstable 做一次 merge 排序, 丢弃掉相同 key 以及删除的数据。
- a. 将选出的 Compaction 中的 sstable, 构造出 MergingIterator (VersionSet::MakeInputIterator ())
 - a) 对 level-0 的每个 sstable, 构造出对应的 iterator: TwoLevelIterator (TableCache::NewIterator())。
 - b) 对非 level-0 的 sstable 构造出 sstable 集合的 iterator: TwoLevelIterator (NewTwoLevelIterator())
 - c) 将这些 iterator 作为 children iterator 构造出 MergingIterator (NewMergingIterator())。
 - b. iterator->SeekToFirst ()
 - c. 遍历 Next ()
 - d. 检查并优先 compact 存在的 immutable memtable。
 - e. 如果当前与 grandparent 层产生 overlap 的 size 超过阈值

-
- (`Compaction::ShouldStopBefore()`)，立即结束当前写入的 sstable (`DBImpl::FinishCompactionOutputFile()`)，停止遍历。
 - f. 确定当前 key 的数据是否丢弃。
 - a) key 是与前面的 key 重复，丢弃。
 - b) key 是删除 (检查 `ValueType`) 并且该 key 不位于指定的 Snapshot 内 (检查 `SequenceNumber`) 并且 key 在 level-n+1 以上的的 level 中不存在 (`Compaction::IsBaseLevelForKey()`)，则丢弃。
 - g. 如果当前要写入的 sstable 未生成，生成新的 sstable (`DBImpl::OpenCompactionOutputFile()`)。将不丢弃的 key 数据写入 (`TableBuilder::add()`)。
 - h. 如果当前输出的 sstable size 达到阈值 (`Compaction::MaxOutputFileSize()` 即 `MaxFileSizeForLevel()`，当前统一为 `kTargetFileSize`)，结束输出的 sstable (`DBImpl::FinishCompactionOutputFile()`)。
 - i. 循环 c-h，直至遍历完成或主动停止。
 - j. 结束最后一个输出的 sstable (`DBImpl::FinishCompactionOutputFile()`)。
 - k. 更新 compact 的统计信息。
 - l. 生效 compact 之后的状态。(`DBImpl::InstallCompactionResults()`)。
- 7) `DBImpl::CleanupCompaction()` (`db/db_impl.cc`)
- a. 如果上一次最后一个 sstable 未完成就异常结束，修复状态 (`TableBuilder::Abandon()`)。
 - b. 将已经成功完成的 sstable `FileNumber` 从 `pending_outputs_` 中去除。
- 8) `DBImpl::DeleteObsoleteFiles()`
- db 中当前 Version 的 sstable 均在 `VersionSet::current_` 中，并发的读写造成会有多个 Version 共存，`VersionSet::dummy_versions_` 中有包含 `current_` 所有正在服务的 Version。凡是正在服务的 Version 中的 sstable 文件都认为是 live 的。`DeleteObsoleteFiles()` 删除非 live 的 sstable 以及其他类型的废弃文件。
- 1) 取得 `pending_output_` 中仍存在的以及 live 的 sstable 文件 (`VersionSet::AddLiveFiles()`，遍历 `VersionSet::dummy_versions_` 即可)，作为所有 live 的文件。
 - 2) 遍历 db 目录下所有的文件名，删除非 live 的 sstable 以及废弃的其他类型文件。
 - a) log 文件保留大于 `VersionSet::log_number_` 以及辅助 log 文件 (`VersionSet::prev_log_number_`)。
 - b) Manifest 文件只保留当前的。
 - c) sstable 文件以及临时文件 (repair 时会产生) 只保留 live 的。
 - d) `CURRENT/LOG/LOCK` 文件均保留。
- 9) `DBImpl::FinishCompactionOutputFile()` (`db/db_impl.cc`)
- a. `BlockBuilder::Finish()`。
 - b. 记录统计信息
 - c. sync 文件，将新生的 sstable 加入 `TableCache((TableCache::NewIterator()))` 作为文件正常的验证。
- 10) `DBImpl::InstallCompactionResults()` (`db/db_impl.cc`)
- 将 compact 过程中记录的操作 (`VersionEdit`) 生效。
- a. 将 compact 的 input sstable 置为删除 (`Compaction::AddInputDeletions()`)，生成的 output sstable 置为 level-n+1 中要加入的文件。
 - b. 应用 `VersionEdit` (`VersionSet::LogAndApply()`)。
 - c. 生效成功则释放对前一个 Version 的引用，`DeleteObsoleteFiles()`；否则，删除 compact 过程生成的 sstable。
- 11) `VersionSet::LogAndApply()`
- 以当前 Version 为基准构造新的 Version，`VersionSet::Builder` 将 `VersionEdit` 应用在新 Version 上，最后将新 Version 生效成 `VersionSet::current_`。
- a. 更新 `VersionSet` 中的元信息 (`VersionSet::Builder::Apply()`)
 - a) 根据 `VersionEdit::compact_pointers_` 更新 `VersionSet::compact_pointers_`

-
- b) 将对应 level 新生成的 sstable 构造出元信息数据 (FileMetadata)，计算 allowed_seeks
 - b. 更新 Version::files_[level] (VersionSet::Builder::SaveTo())。
Version::files_[level] 中保存的是每个 level 上所有的 FileMetadata，并且按照 key-range 排序。VersionSet::Builder::level_[level] 中保存的是每个 level 中需要添加或者删除的 file
VersionSet::Builder::level_[level].added_files/level_[level].deleted_files 对 Version::files_[level] 做 merge，清除已经删除的，加入新生成的。
 - c. 计算 Version 内的均衡状态参数：compaction_score_，compaction_level_ (VersionSet::Finalize)。
 - d. 写 MANIFEST 文件。如果是第一次写，则将当前的 Version 状态作为 Snapshot 先写入 (WriteSnapshot())，否则，将这次的操作 VersionEdit encode 写入 MANIFEST。
 - e. 如果是新生成 MANIFEST，更新 CURRENT 文件中记录的 MANIFEST 文件名。
 - f. 上述步骤均成功，则生效最新的 version (VersionSet::AppendVersion())
 - a) unref current_
 - b) current_ 置为新的 version
 - c) 插入 dummy_versions_否则，将新生成 MANIFEST 删除 (原来如果是已经存在了 MANIFEST 文件，这里不会删除。但可能会出现 corrupted MANIFEST，依靠 RepairDB 来处理)。

五、总结

1. 设计/实现中的优化

针对持久化存储避不开的磁盘随机 IO 问题，leveldb 将写操作转化成内存操作 memtable 和顺序的 binlog IO。分 level 管理 sstable，并用 compact 操作来均衡整个 db，以达到最优的读效率。具体实现时，做了很多细节的优化，来达到更少的 IO，更快的查找以及更优的读写效率。

- 1) 可以减少数据量以及 IO 的细节：
 - a. 支持数据压缩存储 (snappy)
 - b. 对数字类型采用变长编码
 - c. 对 key 进行前缀压缩
 - d. 确定每个 sstable block 的 end-key 时，并不直接使用保存的最后一个 key，而是采用 FindShortestSeparator() / FindShortSuccessor()。
 - e. 内部存储的 key 仅添加 SequenceNumber(uint64)。
 - f. sstable 元信息以及 block 数据都有 cache。
 - g. log 文件/manifest 文件采用相同的存储格式，都以 log::block 为单位。
- 2) 可以加速 key 定位的细节。
 - a. memtable 使用 skiplist，提供 $O(\log n)$ 的查找复杂度。
 - b. 分 level 管理 sstable，对于非 level-0，sstable 不存在 overlap，所以查找时最多处理一个 sstable。
 - c. 内存中有每个 level 的 sstable 元信息 (VersionSet::files_[])，非 level-0 的元信息集合根据 sstable 的 smallest-key 排序，定位 key 时，可以做二分查找加速定位。
 - d. sstable 中所有 block 的元信息 (index_block) 根据每个 block 的 end-key 排序，定位 key 所在的 block 时，可以做二分查找。
 - e. block 中标识每个前缀压缩区间开始 offset (restart_point) 的 restarts 集合，可以看作是 block 中所有 restart_point 处的 key 的集合，显然它们是排序的，所以定位 key 所在的前缀压缩区间时，可以对 restarts 做二分查找。
- 3) 均衡读写效率的细节。
 - a. level-0 上 sstable 数量的阈值检查来主动限制写的速率，以避免过多 level-0 sstable 文

-
- 件影响读效率。
 - b. 为均衡读写效率，设计 compact 的策略，使 db 处于均衡的状态。
 - a) 尽量减少 level-0 的 sstable，dump memtable 时尽可能的直接将生成的 sstable 推向高 level。
 - b) 避免生成过多与 level-n+2 overlap 的 level-n+1 上的 sstable (kMaxGrandParentOverlapBytes)。
 - c) 控制每个 level 上的 sstable 数量/size，设计 compact 权值 (compaction_score) 作为 compact 的选取标准。
 - d) 细化 sstable 文件的 IO 控制 (allowed_seeks)，主动 compact (file_to_compact) 避免坏情况的发生。
 - e) 均匀的 compact 每个 level，将这一次 compact 的 end-key 作为下一次 compact 的 start-key (compact_pointer)。
 - 4) 其他的一些优雅封装
 - a. SequenceNumber 解决了数据的时间点
 - b. ValueType 将数据更新 (put/delete) 统一处理逻辑。
 - c. 对 key 的查找遍历统一使用 Iterator 方式处理。复合 Iterator 简化了逻辑上的处理。
 - d. Ref/Unref/RegisterCleanup，Ref/Unref 消除使用者的内存释放逻辑，而 Iterator 的 RegisterCleanup 在 Iterator 销毁时做注册的 hook，二者结合，简化了对结构的遍历使用。
 - e. db 中的文件按找规则生成，FileNumber 不仅简化了如何定位文件路径，还可以表示出文件的创建时间先后 (compact 时，找到需要 compact 的 level-0 中的文件会根据时间顺序排序)。
 - f. sstable 格式定义中，data 与 index 使用同样的 block 格式，统一了处理逻辑。
 - g. 将对当前 db 状态的修改封装成 VersionEdit，一次 apply。
 - h. log 格式，以 block 为单位，IO 友好。block 内分 record，利于解析。
 - i. manifest 文件中只保存一次全量状态，后续仅保存每次的修改，减少 IO。

2. 可以做的优化

- 1) memtable/sstable 的阈值 size，level-0 中的数量阈值，每个非 level-0 上的总数据量阈值等参数，均会影响到 compact 的运行，从而影响到最终的读写效率，根据不同场景需要做不同的配置，以达到最优效果。
- 2) 内部策略是基于 sas 盘的 IO 性能设计，使用其他硬件存储 (ssd) 时，需要做相应调整。
- 3) 查找不存在的 key 一个最坏情况，考虑不同的场景采用写入 mock value 或者加入 bloom filter 进行优化。
- 4) db 启动后，会将当前的状态写入 manifest 文件，后面每次 compact 后，会将产生的操作 (VersionEdit) 作为追加到 manifest。如果 db 实例运行时间很长，manifest 中会有大量的更新记录，当 db 重启时，replay manifest 时可能会耗费较长的时间。考虑限制单个 manifest 中的 record 数量，达到阈值，则做一次 rotate。重启时，仅 replay 最新的 manifest 即可，做异常情况的 repair 时，则可以连同历史 manifest 一起 replay。
- 5) leveldb 中除了 memtable 使用内存有 Arena 管理外，没有其他的内存管理，内部处理中有很多小对象的申请释放，考虑是否可以优化内存使用，当前可以使用 tcmalloc。
- 6) compact 时，选取非 level-0 中符合对应 compact_pointer 的 sstable 时，可以使用二分查找定位。