

DOI: 10.7667/PSPC180143

电能质量在线监测系统海量数据的双列族存储设计

屈志坚, 袁慎高, 范明明

(华东交通大学电气与自动化工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 针对高效存储海量电能质量在线监测数据的问题, 提出一种基于 HBase 的双列族电能质量在线监测系统数据库设计新方法。通过将 HBase 的列族存储架构应用到繁杂的电能质量在线监测数据的高效存储中, 然后构造存储优化函数来寻找和设计最优的电能质量在线监测数据存储结构。最后进行几种不同列族数的数据读写时间的对比实验。实验证明: 所提的电能质量监测数据双列族存储设计方法可以高效存储海量电能质量监测数据, 具有较好的可行性。

关键词: 海量数据; 电能质量; 列族; HBase; 存储结构

Double column family storage design for massive data of power quality online monitoring system

QU Zhijian, YUAN Shengao, FAN Mingming

(School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Aiming at the problem of massively storing massive monitoring data of mass power quality, a new database design method based on HBase for dual-column power quality monitoring system is proposed. It finds and designs the optimal power quality online monitoring data storage structure by applying column family storage architecture of the HBase to the efficient storage of complex power quality online monitoring data and then building storage optimization functions. Finally, the reading and writing time of several different column families are compared. Experiments show that the proposed double-column family of power quality monitoring data storage design method can store massive power quality monitoring data efficiently and has good feasibility.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51567008 and No. 51867009), Foundation Plan for Distinguished Young Scholars in Jiangxi Province (No. 20162BCB23045), Natural Science Foundation of Jiangxi Province (No. 20171BAB206044) and Science and Technology Research Project of Jiangxi Provincial Science and Technology Department (No. GJJ160471).

Key words: massive data; power quality; column family; Hbase; storage structure

0 引言

随着大量非线性、波动性和非对称性负载接入电力输配电网, 电能质量严重下滑^[1], 而电能质量在线监测系统是分析和治理电能质量问题^[2-10]的有效途径。电能质量监测覆盖率逐步提高, 电能质量监测终端的采样粒度越来越精细, 导致电能质量监测数据体量不断剧增^[11]。对于呈指数级增长的电能

质量监测数据, 传统关系数据库难以高效存储。因此, 如何存储海量电能质量监测数据已成为智能监测系统迫切需要解决的技术难题。

海量监测数据的存储问题一直是国内外学者研究的热点^[12-16]。根据数据库的存储结构, 可分为关系数据库和非关系数据库两类。

第一类为关系数据库, 是按行进行存储, 但对列数有限制。文献[17]提出利用关系数据库来存储加气站 SCADA 系统数据, 通过建立实时和历史数据表来存储不同设备的工作状况数据, 然后利用数据压缩, 减少数据的存储空间。该方法可实现加气站 SCADA 系统各设备工况数据的存储, 但需建大量数据表, 不利于后期对数据表的维护和管理。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51567008, 51867009); 江西省杰出青年人才计划项目资助(20162BCB23045); 江西省自然科学基金项目资助(20171BAB206044); 江西省科技厅应用培育计划项目资助(GJJ160471)

第二类为非关系数据库, 以 HBase 为代表的非关系数据库, 是按列进行存储。文献[18]提出利用 HBase 来存储海量电能质量数据, 设计一个列族存储电能质量监测系统各监测点的事件信息, 并设置多个字段连成主行键来提高查询速度。但主行键的设计会导致数据存储空间增加和数据冗余, 且此文献没有考虑多维度谐波数据的存储。若存储电能质量各电气量的各次谐波数据, 假设每个变电站有 50 个电气量则一张数据表就有几千多列, 还不包括其余非谐波监控数据。而谐波数据表中的时间、站所和谐波数据构成三维关系, 一般的关系数据表只能存储 128 列, 最多 256 列, 因此一张关系数据表无法存储。若强制用关系数据库来存储, 仅谐波数据就需建大量数据表, 一个变电站需建几十个表, 二十个变电站需建几百张数据表, 这会导致后期维护和管理数据表困难。

针对高效存储海量电能质量在线监测数据的问题, 提出一种基于 HBase 的双列族电能质量数据库设计新方法。利用 HBase 数据库的逻辑存储模型和构造存储优化函数来设计电能质量在线监测系统数据表的存储结构, 分析了电能质量在线监测数据的存取流程。最后通过几种不同列族数的对比实验来测试数据读写时间, 验证本文所提方法的可行性。

1 海量电能质量监测数据存储结构

1.1 HBase 架构电能质量监控数据物理存储

不同于传统关系数据库, HBase 是一个分布式、面向列存储且对列没有太多限制的开源数据库。数据都以字节数组格式进行存储, 且可以存储结构化和非结构化数据。HBase 架构的电能质量在线监测数据表由行和列族组成, 列族是类型相同或关联的多列, 每一个列族下的列都可以动态添加, 从而提高了 HBase 存储的灵活性。电能质量在线监测数据物理存储如图 1 所示。

客户端向存储区域服务器发送添加电能质量监测数据的请求, 区域服务器把请求分配给数据表里的某个区域, 然后将添加的电能质量数据存储于内存缓冲区。电能质量监测数据表在行方向上分割为多个区域, 开始时每个表只有一个区域, 随着电能质量在线监控数据增多, 区域不断增大。当增大到一定阈值时, 一个区域会等分成两个新区域, 之后数据表的区域越来越多, 而区域由一个或者多个内存缓冲区组成, 每个内存缓冲区存储着一个列族和其对应的数据文件。比如电能质量在线监测数据表可分割为区域 1、区域 2 和区域 3, 而区域 1 的内存缓冲区内存放一个电压列族、区域 2 的内存缓冲区

内存存储一个电流列族和区域 3 存储其他列族。

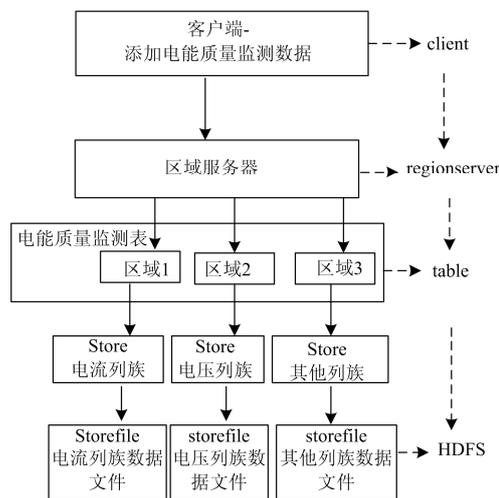


图 1 电能质量在线监测数据库物理存储

Fig. 1 HBase power quality online monitoring database physical storage

1.2 基于 HBase 的电能质量监测数据逻辑存储模型

设计传统二维表结构时必须预先定义列, 行可以动态增加, 而 HBase 的数据表是三维的, 设计表结构时只需先定义列族, 其行、列均可以动态增加。通常关系数据库只能存储二维数据, 若存储三维的电能质量谐波数据, 只能设计大量数据表将三维关系分解为二维来进行存储。HBase 的数据表每行数据都有唯一的主行键和任意数量的列^[19]。一个数据表的列族数是固定的且不宜过多, 但可有上百万列, 因此可以高效存储列数很多的电能质量在线监测数据。电能质量在线监测数据表一般结构如表 1 所示。

表 1 电能质量在线监测数据表

Table 1 Power quality online monitoring data table

主行键	时间戳	列族 1	列族 2	其他列族
r ₁	T ₃	U ₁	P ₃	Q ₁
r ₂	T ₄	U ₂	P ₁	Q ₂
r ₃	T ₃	I ₁	P ₂	Q ₃
r ₄	T ₂	I ₂	f ₁	...
r ₅	T ₁	I ₃	f ₂	...

电能质量在线监测数据表由主行键、时间戳、列族 CF1、CF2 及其他列族组成, 而列族下的列存储电压 U_1 、电流谐波 I_1 、功率 P_1 和频率 f_1 等电能质量在线监测数据。

2 电能质量监测数据库设计方案

2.1 数据库设计构架

电能质量在线监测系统存储的数据主要包括三

相电压、电流、频率、有功功率、无功功率、谐波电压和谐波电流等。面对海量的电能质量监测数据，数据的存储设计是电能质量在线监测系统的重要组成部分。电能质量在线监测数据结构如图 2 所示。

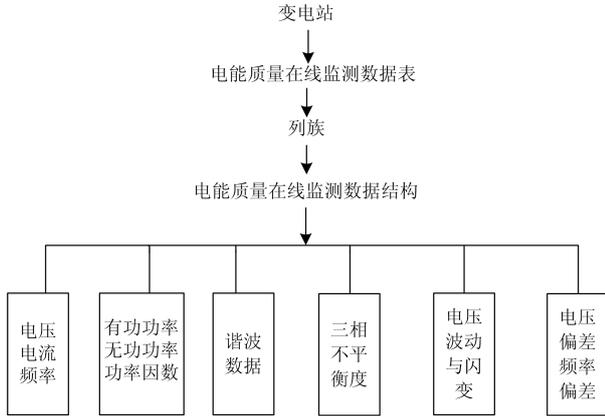


图 2 电能质量在线监测数据结构

Fig. 2 Power quality monitoring system database structure

通过为每个变电站设计一个电能质量在线监测数据表，然后利用 HBase 的列族存储架构来存储各监测数据信息。

在分析电能质量问题时，通常重点分析和处理谐波数据，因此谐波数据是电能质量在线监测数据中的高频率使用数据。谐波是电流和电压在经过非线性负载而产生的畸变波形，通过傅里叶变换将谐波分解成基波和一系列谐波的叠加，即

$$u(t) = A_0 + \sum_{n=1}^N (A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t) \quad (1)$$

$$i(t) = C_0 + \sum_{n=1}^N (C_n \cos n\omega t + D_n \sin n\omega t) \quad (2)$$

式中： A_0 为电压直流分量的值； A_n 为 n 次谐波电压余弦分量的幅值； B_n 为 n 次谐波电压正弦分量的幅值； ω 为角频率； n 为谐波次数； C_0 为电流直流分量的值； C_n 为 n 次谐波电流余弦分量的幅值； D_n 为 n 次谐波电流正弦分量的幅值； $u(t)$ 为电压随时间的变化函数； $i(t)$ 为电流随时间的变化函数。离散的谐波数据经过傅里叶变换^[20]得到各次谐波的电压和电流值，并以复数虚部和实部分开存放。

第 k 次谐波电压的有效值为

$$U_k = \sqrt{\frac{\text{Re}[U(k)]^2 + \text{Im}[U(k)]^2}{2}} \quad (3)$$

式中： $U(k)$ 为第 k 次谐波电压； $\text{Re}[U(k)]$ 表示 FFT 变换后第 k 次谐波电压的实部； $\text{Im}[U(k)]$ 表示 FFT 变换后第 k 次谐波电压的虚部。

第 k 次谐波电流的有效值为

$$I_k = \sqrt{\frac{\text{Re}[I(k)]^2 + \text{Im}[I(k)]^2}{2}} \quad (4)$$

通过利用傅里叶变换将谐波分解为各次谐波的有效值^[21]，然后将分解的各次谐波数据存储到 HBase 数据库中。

2.2 电能质量在线监测数据的存储优化设计

由于电能质量在线监测数据表的不同列族会共享区域，可能出现一个列族有 1 000 万行，而另一个列族才 100 行。当一个区域需分割时，会导致 100 行的列族下的列分布到多个区域中，容易出现基数问题。由于电能质量在线监测系统的 HBase 的存储和性能优化都在列族上进行，为了提高数据访问效率，避免基数问题的出现，列族下的列成员结构和数量尽量保持平衡。

利用 HBase 的存储架构来设计电能质量在线监测数据表的关键技术在于列族的设计和数据的分配问题。为了使电能质量在线监测数据存储设计优化率达到最大，需要寻找最合适的列族数和数据分配方法。因此需要构造存储优化设计函数 $W(x) = W(x, g(x))$ ，其中 x 为列族数量， $g(x)$ 为电能质量在线监测数据分配函数，服从均匀分配原则。电能质量监测数据存储的途径如图 3 所示。

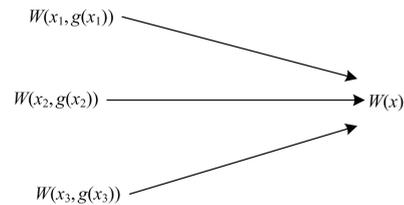


图 3 电能质量监测数据存储的途径

Fig. 3 Power quality monitoring data storage approach

电能质量在线监测数据存储的途径有好多种，需要寻找和设计最优的存储结构。

求 $W(x) = W(x, g(x))$ 的最大优化率可将问题转化为求最优化问题。

$$\begin{cases} \max W(x) & x \in Z \\ g(x) \text{服从均匀分配} & 1 \leq x \leq 3 \text{或} x > 3 \end{cases} \quad (5)$$

式中： $\max W(x)$ 为最大优化率函数， x 为列族数； $g(x)$ 为数据分配函数。

x 的取值分为两大类： $1 \leq x \leq 3$ 和 $x > 3$ ，由于 HBase 的存储结构特点，列族数一般不宜超过 3 个，列族数过多会严重影响数据的存取时间。

在 $1 \leq x \leq 3$ 和 $g(x)$ 服从均匀分配的约束条件下，求 $W(x)$ 的最优化方案。

1) 当 $x=1$ 时即列族数为 1，则 $g(x)=(1)$ 。所有电能质量在线监测数据都放在一个列族里，难以区

分使用频率高的数据和频率低的数据, 对于高频率的谐波数据存取效率不高。

2) 当 $x=2$ 时即列族数为 2, 则 $g(x)=(1,1)$ 。将电能质量在线监测数据分为两部分存储, 高频率使用的谐波数据和其他监测数据分开存储。两个列族下的行数和数据量基本平衡, 不会出现在区域分割时出现基数问题, 若查询谐波数据可以直接访问存放谐波数据的文件, 数据访问效率较高。

3) 当 $x=3$ 时即列族数为 3, 将电能质量在线监测数据分为三部分存储, $g(x)=(1,1,1)$ 。将监测数据分为谐波数据, 电压、电流、功率和功率因数, 三相不平衡度三类进行储存。由于谐波数据的数据体量大, 其他两个列族的数据量较小, 可能分割时会出现基数问题。

因此一个列族无法进行高效存取和区分电能质量在线监测数据中的使用频率高的谐波数据和其他数据, 而三个列族相对两个列族而言, 其数据的存取效率相对较低, 故电能质量在线监测数据双列族的存储设计为最优的设计结构, 如表 2 所示。

表 2 电能质量在线监测数据表

Table 2 Power quality monitoring data sheet

主行 键	时间 戳	谐波数据列族		其他监测数据列族			
		电压谱 波/kV	电流谱 波/A	功率/W	频率/ Hz	...	功率 因数
r_1	6:00	0.5	0.23	1 096	50	...	0.45
r_2	6:01	0.7	0.28	2 057	48	...	0.65
r_3	6:02	0.81	0.42	2 696	49	...	0.63
r_4	6:03	0.89	0.72	3 095	51	...	0.75

电能质量在线监测数据表由 2 个列族组成, CF1 列族存储着谐波数据, CF2 列族存储着其他监测数据。而电能质量在线监测数据表的谐波列族设计表如表 3 所示。

表 3 谐波列族 CF1 设计表

Table 3 Harmonic column family CF1 design table

谐波列族	CF1
时间	CF1: time
站所号	CF1: Station
电流 I_1 的 2 次谐波	CF1: I_1-2t
⋮	⋮
电流 I_1 的 n 次谐波	CF1: I_1-nt
⋮	⋮
电流 I_n 的 n 次谐波	CF1: I_n-nt
电压 U_1 的 2 次谐波	CF1: U_1-2t
⋮	⋮
电压 U_n 的 n 次谐波	CF1: U_n-nt

双列族设计方案的谐波列族 CF1 由时间、站所号和各个电流量、电压量对应的 n 次谐波数据组成 (n 的取值可以根据实际需求进行扩展), 其中时间、站所号和谐波数据三者构成三维关系。比如电流 I_1 的时间、站所地址、1~ n 次谐波一共 $n+2$ 列。假设某个站所有 50 个电流和电压量, 一个电气量对应 50 次谐波, 则列族 CF1 有 $2+50 \times 50=2\ 502$ 列。假设另一个列族也有 2 000 列, 则一个数据表有 4 000 多列。其他监测数据列族, 如表 4 所示。

表 4 其他监测数据列族 CF2 设计表

Table 4 Other monitoring data column family CF2 design table

其他监测列族	CF2
时间	CF2: time
站所号	CF2: Station
电压	CF2:U
电流	CF2:I
频率	CF2:f
有功功率	CF2:P
无功功率	CF2:Q
功率因数	CF2: μ
⋮	⋮
三相不平衡度	CF2: ε

电能质量在线监测数据表的另一个列族为其他监测数据列族, 主要由时间、站所号、各个电气量监测数据如电压、电流、功率和功率因数等组成。

3 电能质量监测数据存取程序流程

HBase 的数据访问方式为 HBase shell、Thrift gateway、pig 和 Native Java API 等, 而 Native Java API 是最常规和最有效的访问方式, 因此利用 HBase2.0 的 Java API 对电能质量在线监测数据表进行数据读写操作。

HBase 配置文件 hbase-site.xml 是连接 HBase 的前提条件, 通过创建 Configuration 实例读取电能质量在线监测系统的 HBase 配置环境, 然后使用 Configuration 实例创建 HBaseAdmin 来管理表, 创建 Table 实例用于访问和操作指定表。利用 HBaseAdmin 实例创建各变电站数据表, 然后用 Table 实例对数据表进行操作, 主要通过 Put 和 Get 对象对电能质量数据进行读写操作。若有电能质量数据添加的请求, Put 实例逐个被送到区域服务器。若禁止自动刷写功能, Put 操作会在写缓存区填满后被送到区域服务器, 该方法适用于批量电能质量数据的添加。电能质量在线监测数据存取流程如图 4 所示。

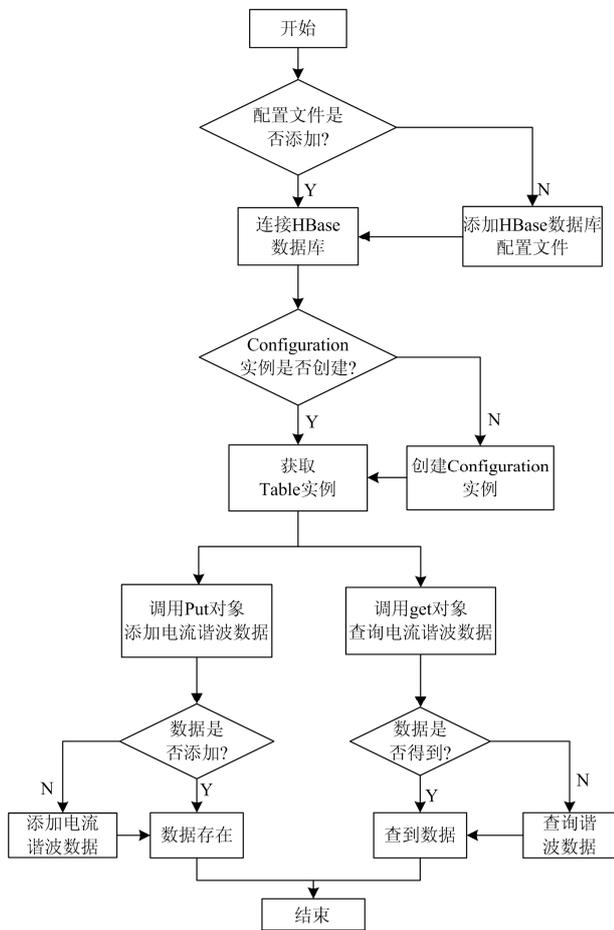


图 4 电能质量在线监测数据存取流程

Fig. 4 Power quality monitoring data access flow

电能质量在线监测数据存取流程主要为连接HBase数据库、创建 Configuration实例，然后通过Table实例调用Put和Get对象来实现数据的读写操作。

4 实验测试分析

4.1 实验环境搭建

本次实验的HBase数据库为2.0版本，JDK采用1.8版本；eclipse为kepler版本，计算机操作系统为ubuntu16.04的Linux系统，计算机内存为4G，硬盘容量为500G。在HBase中根据某牵引变电所电能质量的基础数据而模拟生成数据量为1000万行和120列的数据集条件下，利用Java编程进行对比实验，测试几种不同列族数的数据读写时间。列族数与 $g(x)$ 的对应关系如表5所示。

列族数与 $g(x)$ 一一对应，尽量保证每个列族的数据量均匀分配，避免区域分割时出现基数问题影响数据的存取效率。

表 5 几种不同列族数对比表

Table 5 Comparison of three design plans

$x/g(x)$	$g(1)$	$g(1,1)$	$g(1,1,1)$	$g(1,\dots,1)$
1个	1			
2个		2		
3个			3	
n 个				n

4.2 实验过程

为验证双列族存储设计的可行性，进行几种不同列族数的数据读写时间对比实验。实验分别选取1个、2个、3个、21个和60个列族作为例子进行对比试验，如图5所示。

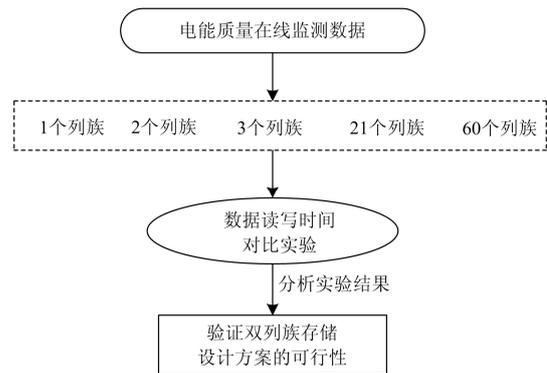


图 5 对比实验流程

Fig. 5 Contrast experimental process

通过进行几种不同列族数的数据读写时间对比实验和实验结果分析，从而验证双列族存储设计方案的可行性和合理性。

1) 在相同数据量条件下，进行不同列族数的对比实验，测试加载数据的时间性能。加载20行数据时间运行结果如图6所示。

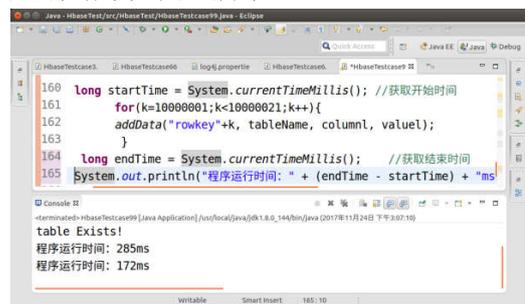


图 6 双列族加载 20 行数据运行结果

Fig. 6 Double-column family loaded 20 rows of data results

双列族方案下利用java编程加载20行数据时间为 $285+172=457$ ms，然后重复10次计算出平均值为471ms。查询20行数据的时间如图7所示。

双列族方案下利用java编程查询20行数据的时

间为 153 ms, 然后重复 10 次计算出平均值为 160 ms。不同列族数加载 20 行数据时间如图 8 所示。

```

167 int m=0;
168 long startTime = System.currentTimeMillis(); //获取开始时间
169 for(m=0;m<20;m++){
170     getResult(tableName, "rowkey100"+m);
171 }
172 long endTime = System.currentTimeMillis(); //获取结束时间
173 System.out.println("程序运行时间: " + (endTime - startTime) + "s");
174 }catch (Exception e) {

```

```

column: station8
value : 1
timestamp: 1510283092629
-----
rowkey: rowkey10019
family: cf2
column: station9
value : 1
timestamp: 1510283092629
程序运行时间: 153ms

```

图 7 双列族查询 20 行数据运行结果

Fig. 7 Double-row family queries 20 rows of data results

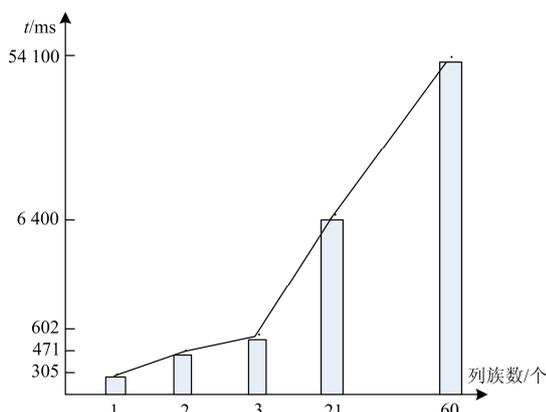


图 8 不同列族数加载 20 行数据时间

Fig. 8 Different numbers of columns load 20 rows of data time

图 8 所示为几种不同列族数加载 20 行数据时间的对比柱状图, 随着列族个数的增加, 加载数据的时间也呈明显上升的趋势。

2) 在相同的数据量条件下, 进行几种不同列族数的对比实验, 测试随机查询数据的时间。不同列族查询 20 行数据时间如图 9 所示。

图 9 所示为几种不同列族数下随机查询数据的时间对比柱状图, 随机查询 20 行数据下, 1 个、2 个、3 个、21 个和 60 个列族查询时间相差在几十 ms 内, 因此列族数对查询数据的影响不是很大。

实验结果表明, 加载数据时间和列族数呈线性增长关系, 但查询数据时间和列族数不呈线性关系。因此, 考虑到数据的加载和查询时间最好列族数尽量少一些。考虑到电能质量在线监测数据的结构特点, 设计两个列族进行存储。由图 8 和图 9 可知, 两个列族相对于三个列族数据读写时间相对较好。

在 1 000 万行和 120 列的数据集条件下, 双列族存储设计 20 行数据的读写时间在 500 ms 内, 因此验证了双列族存储设计的合理性和可行性。

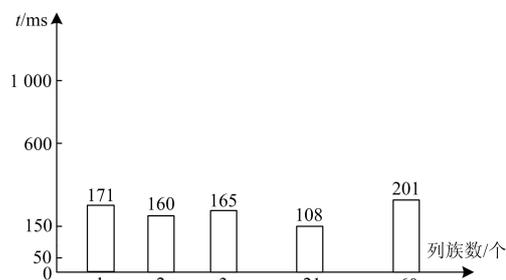


图 9 不同列族数随机查询 20 行数据时间

Fig. 9 Different races random query 20 data time

5 结语

1) 利用 HBase 的逻辑模型设计了基于 HBase 双列族的设计方案, 解决了传统关系数据库难以高效存储列数很多的海量电能质量在线监测数据的技术难题。

2) 通过构造存储优化函数来设计双列族的存储设计方案, 且对几种不同列族数进行对比实验来测试数据读写时间。实验结果验证了基于 HBase 的双列族电能质量在线监测系统数据库设计方法的合理性和可行性。

参考文献

- [1] 管春. 电能质量综合检测与分析系统研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
GUAN Chun. Power quality comprehensive detection and analysis system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [2] 曲广龙, 杨洪耕, 李兰芳. 主动配电网电能质量实时监测系统设计与实现[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(10): 117-123.
QU Guanglong, YANG Honggeng, LI Lanfang. Design and realization of power quality real-time monitoring system for active distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(10): 117-123.
- [3] ZHANG Delong, LI Jianlin, HUI Dong. Coordinated control for voltage regulation of distribution network voltage regulation by distributed energy storage systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 35-42. DOI: 10.1186/s41601-018-0077-1.
- [4] 唐宏伟, 唐杰, 林立. 新型电气化铁路电能质量管理系统的[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 84-91.
TANG Hongwei, TANG Jie, LIN Li. New power quality management system in electrical railway[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 84-91.
- [5] 田庆生, 刘二勇, 梁仕斌, 等. 配电网电能质量测试系统的设计与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2017,

- 45(11): 115-120.
TIAN Qingsheng, LIU Eryong, LIANG Shibin, et al. Design and simulation of power quality testing system for distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 115-120.
- [6] 张宇帆, 艾芊, 肖斐, 等. 数据驱动电能质量分析现状及其支撑技术与展望[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(11): 187-196.
ZHANG Yufan, AI Qian, XIAO Fei, et al. Present situation, supporting technologies and prospect of data driven power quality analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 187-196.
- [7] 曾江, 凌毓畅. 光伏电站接入电网的电能质量分析及其应用[J]. 广东电力, 2017, 30(8): 38-46.
ZENG Jiang, LING Yuchang. Analysis and application of power quality of grid-connected photovoltaic power station[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(8): 38-46.
- [8] 徐文远, 雍静. 电力扰动数据分析学——电能质量监测数据的新应用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 93-101, 15.
XU Wilsun, YONG Jing. Data analysis of power disturbance-new application of power quality monitoring data[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 93-101, 15.
- [9] 王金丽, 盛万兴, 宋祺鹏, 等. 配电网电能质量智能监控与治理仿真[J]. 电网技术, 2014, 38(2): 515-519.
WANG Jinli, SHENG Wanxing, SONG Qipeng, et al. An intelligent monitoring and control simulation of power quality in distribution network[J]. Power System Technology, 2014, 38(2): 515-519.
- [10] 王德文, 肖磊, 肖凯. 智能变电站海量在线监测数据处理方法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(8): 142-146, 156.
WANG Dewen, XIAO Lei, XIAO Kai. Mathematical substation mass online monitoring data processing method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(8): 142-146, 156.
- [11] 王淑祥. 基于Hadoop的海量电能质量数据云计算平台研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
WANG Shuxiang. Hadoop-based massive power quality data cloud computing platform[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [12] SU Yu, GAO Wanlin, YU Lina, et al. Wireless body area network data storage method based on HBase[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 2748(427).
- [13] XU Junwu, LIANG Junling. Research on a distributed storage application with HBase[J]. Advanced Materials Research, 2013, 2200(631).
- [14] 陆婷, 房俊, 乔彦克. 基于HBase的交通流数据实时存储系统[J]. 计算机应用, 2015, 35(1): 103-107, 135.
LU Ting, FANG Jun, QIAO Yanke. HBase-based real-time traffic flow data storage system[J]. Journal of Computer Applications, 2015, 35(1): 103-107, 135.
- [15] 陈庆奎, 周利珍. 基于HBase的大规模无线传感网络数据存储系统[J]. 计算机应用, 2012, 32(7): 1920-1923, 1977.
CHEN Qingkui, ZHOU Lizhen. HBase-based large-scale wireless sensor network data storage system[J]. Journal of Computer Applications, 2012, 32(7): 1920-1923, 1977.
- [16] 马竹娟, 汪宏喜. 一种基于关系数据库XML存储方案的数据库模型[J]. 计算机系统应用, 2011, 20(4): 203-206.
MA Zhujuan, WANG Hongxi. A database model based on XML schema of relational database[J]. Computer Systems & Applications, 2011, 20(4): 203-206.
- [17] 钟杰, 谢涛. 基于关系数据库的加气站SCADA系统数据存储方案[J]. 自动化与仪器仪表, 2017(11): 171-173.
ZHONG Jie, XIE Tao. Data storage scheme of SCADA system for filling station based on relational database[J]. Automation & Instrumentation, 2017(11): 171-173.
- [18] 曾杰. 基于Hadoop的海量电能质量数据处理研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
ZENG Jie. Massive power quality data processing based on Hadoop[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [19] 陈东辉, 曾乐, 梁中军, 等. 基于HBase的气象地面分钟数据分布式存储系统[J]. 计算机应用, 2014, 34(9): 2617-2621.
CHEN Donghui, ZENG Le, LIANG Zhongjun, et al. HBase-based distributed storage system for meteorological ground minute data[J]. Journal of Computer Applications, 2014, 34(9): 2617-2621.
- [20] 黄建明, 李晓明. 结合短时傅里叶变换和谱峭度的电力系统谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 43-50.
HUANG Jianming, LI Xiaoming. Detection of harmonic in power system based on short-time Fourier transform and spectral kurtosis[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 43-50.
- [21] 穆瑜. 有源电力滤波器的电能质量监控系统研究[D]. 合肥: 安徽工业大学, 2016.
MU Yu. Research on power quality monitoring system of active power filter[D]. Hefei: Anhui University of Technology, 2016.

收稿日期: 2018-01-31; 修回日期: 2018-03-25

作者简介:

屈志坚(1978—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为智能监控理论与信息处理技术; E-mail: 08117324@bjtu.edu.cn

袁慎高(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量在线监控系统和机器学习等; E-mail: 1129204236@qq.com

范明明(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为大数据查询技术. E-mail: 573599681@qq.com

(编辑 魏小丽)