

电力系统计算中的二维稀疏结构技术

毛安家, 郭志忠

(哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 提出了一种既能方便解决单相电力系统中的稀疏矩阵的存取, 又能方便解决三相电力系统计算中的稀疏矩阵存取问题的二维稀疏结构技术。该技术还方便地解决了单、三相计算中迭代方程组系数方程的存取及非零元素注入问题。使得处理稀疏矩阵象处理二维数组一样地简单。把二维稀疏结构作为一种基本数据结构来描述, 这对形成电力系统计算类库具有实际意义。

关键词: 电力系统计算; 稀疏矩阵; 二维稀疏结构

中图分类号: TM744 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2001)01-0019-03

1 引言

在电力系统计算中, 导纳矩阵和迭代方程的系数矩阵都是庞大的稀疏矩阵, 因此, 如何处理这些稀疏矩阵, 成为电力系统计算中的一个较为突出的问题。稀疏矩阵技术也因此应运而生^[1]。由于稀疏矩阵只存储非零元素, 因而不但节省了大量内存, 而且避免了对零元素的乘除运算, 使程序中的运算量大大减少。这使得在当初计算机内存极为珍贵时, 用较少的内存, 解算较大的电力系统成为可能。在计算机技术飞速发展的今天, 虽然内存和计算速度似乎已不再是问题的主要矛盾, 但作为提高计算效率的一项技术, 稀疏矩阵技术仍然是广大程序设计者乐意研究的问题。

仔细研究一下这些稀疏矩阵技术, 不难看出, 它实际上是用一维数组(或链表)来压缩存储二维矩阵的。因此, 在实际操作中, 不可避免地要对一个(或几个)大型数组的查询问题, 随着电力系统的节点数

增多, 查询效率也会越来越低, 查询速度也会越来越慢。特别是, 在解方程时碰到“下雨”(该行以上各行非零元素在本行零元素位置引起注入元素)问题就更复杂。而且, 随着电力系统的日益发展, 电力系统输电电压越来越高, 引起电力系统不对称的因素也越来越多, 因此, 研究在相分量系统下的三相电力系统计算已成为必然趋势^[2]。在三相问题中, 我们同样面临着稀疏矩阵问题, 只是此时的矩阵的元素不再是数, 而是矩阵了。而且, 随着所采用的模型的不同, 稀疏矩阵的复杂程度也不一样, 甚至各元素矩阵的维数不一样^[3]。因此, 有必要寻求一种更为高效的稀疏矩阵算法, 使得它既能方便、高效地解决单相问题中的简单的稀疏矩阵, 又能方便地处理三相问题中的复杂稀疏矩阵。本文提出的二维稀疏结构技术正是这样的一种技术。之所以称之为结构, 因为它已不是传统意义上的矩阵, 它可以实现多对象的混合存储, 从数据结构上看, 它更象一种结构。

保护的原理、构成等进一步完善, 为变压器保护的安全可靠运行做出新贡献。

收稿日期: 2000-05-09

作者简介: 常凤然(1967-), 男, 工程师, 1989年起从事继

电保护的计算、运行、管理工作; 张洪(1964-), 女, 高级工程师, 1988年起从事继电保护的计算、运行、管理工作; 周纪录(1964), 男, 高级工程师, 1986年起从事继电保护的计算、运行、管理工作; 赵春雷(1968), 男, 工程师, 1991年起从事继电保护的计算、运行、管理工作。

Analysis on the characteristics of sum current protection for transformer

CHANG Feng-ran, ZHANG Hong, ZHOU Ji-lu, ZHAO Chun-lei

(Hebei Electric Power Dispatch & Communication Center, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: To solve the problems on sensitivity of phase to phase backup protection on transformer's power supply side, especially the problems on the backup protection on the conditions of a current limit reactor applied on the LV side, a sum current protection formed by CT on HV and MV sides on transformer is proposed. Its principle, construction and setting way are different from the traditional overcurrent protections. In the author's view, the sum current protection would improve the sensitivity considerably and should make it be a standard arrangement. Its CT should be delta wired realized by microprocessor based device. Its setting should be done based on single transformer operation.

Key words: transformer protection; sum current; setting value; microprocessor based protection

2 传统一维稀疏矩阵技术

由于稀疏矩阵技术研究较早,成熟的算法较多,下面就笔者所用到的和常见的几种作一下简单的描述及其存取的平均查找长度的对比。文中对稀疏矩阵用数组和链表存取不再进行区分。

2.1 行标数组和元素带列足码存取方式

这种存储方式是最早应用的一种方式,具体存储方法是将对角线元素和非对角线元素分开存放,以一个元素数组存储 $\{X_{ij}, j\}$,另一个行号数组存放 $\{i\}$ (实际上存储的是各行非对角元素的首地址)。这样,对这两个数组进行操作就可以存取稀疏矩阵中的各个元素,对于结构固定的导纳矩阵,这种存取方式的平均查找长度是 n (其中, ρ 代表稀疏度);但对于结构不固定的迭代方程系数矩阵来说,要不断地修改行号数组和移动元素数组。平均查找长度为 n^2 ^[4]。

2.2 元素带行、列号存取方式

这种存取方式类似于 2.1 中的存取方法,但是它用一个数组存取结构 $\{i, j, X_{ij}\}$,存取时,分别查询各元素的 i, j ,从而就可以得到 X_{ij} ,它的平均查找长度是 n^2 ,对于处理结构不固定的方程系数矩阵比较方便。对于解方程过程“下雨”问题,也很方便。

2.3 利用行、列标为关键字的映射存取方式

这种存取方式是利用数据结构技术,以矩阵元素的行、列标为关键字建立一个映射表,对行、列标的查询,就可以得到矩阵元素。由于各种软件开发工具(如 Microsoft Visual C++, Borland C++) 都带有现成的数据结构对象供软件开发者使用,因此,应用也很方便。此方法的存取平均查找长度为 $\frac{1}{2}(1 + \frac{1}{1-\rho})$ (为哈希表的装填因子^[4]),效率较以上两种方法高。

3 二维稀疏结构技术

所谓二维稀疏结构技术,就是用二维即分别按行和列的方式存取矩阵元素的一种数据结构实现技术。显然,这种做法带来的好处有:1)从形式上讲,二维稀疏结构更能体现矩阵是二维的特点。2)从存取效率来讲,二维存取方法的平均查找长度是 n 。这是显然的,例如,我们若要存取矩阵元素 X_{ij} ,只需要到第 i 行去查找列标为 j 的元素。搜索范围为 n 。

3.1 二维稀疏结构的实现

二维稀疏结构非常类似于二维数组,按行存取

各元素的,只不过在二维稀疏结构中,各行并不是等长的。为实现的方便,首先建立一个行对象,用来存取稀疏结构的各行。再以这些行对象来建立列对象,就可以形成一个二维的稀疏结构。一般来讲,为保证二维稀疏结构的灵活性,行对象应该用动态存储结构,如常用的有动态数组、链表和映射等。而列对象可以用对象指针实现。这样,可以用如图 1 形象地说明二维稀疏结构的存储方式。

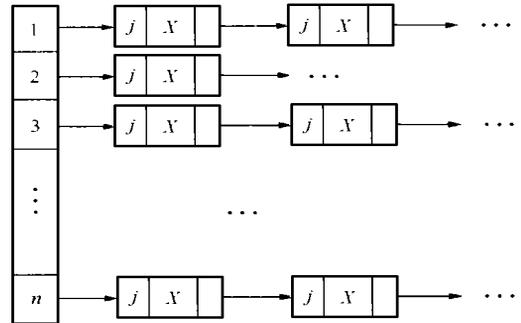


图 1 二维稀疏结构的存储

从图中可以看出,二维稀疏结构在纵向是致密排列的,在横向,由于保证其适应性和结构灵活的特点,一般不是致密排列的,这主要是看采用什么数据结构来实现行对象的。一般来说,传统一维稀疏矩阵中的几种方法,在实现行对象时可以应用,视程序设计者的习惯和开发工具而定。

经过这样的处理,在存储行对象中的各元素时,应相应带上其列标,当存取元素 X_{ij} 时,只需要到第 i 个行对象中去查询列下标为 j 的元素即可。这样,对比一维系数矩阵技术,把原来对整个矩阵的查询,变成对矩阵的一行的查询,显然效率要高很多。而且,随着 n (即电力系统网络的节点数) 的增大,这种优势也就越明显。

由于二维稀疏结构已不再局限于存储元素为实数的稀疏矩阵,它可以存取任何性质相似的二维结构,因此,在程序实现时,可以借助类模板技术^[5]。将二维稀疏结构封装成类,在使用它时,根据需要,用不同的数据类型为模板构造二维稀疏就可。从而真正使二维稀疏结构成为一种通用的数据结构,进而可以将它作为通用数据类型,为编写电力系统计算类库打下基础。

3.2 二维稀疏结构在单相电力系统中应用

在单相电力系统计算中,包括潮流计算、状态估计、短路电流计算、稳定计算等等,都包含网络解算部分,这部分包括形成导纳矩阵和线性方程组的求解。导纳矩阵是一个对称的复数稀疏矩阵,在用二

维稀疏结构存取它时。用复数模板构造二维稀疏结构,若需要存储元素 Y_{ij} 可以将结构 $\{Y_{ij}, j\}$ 作为元素,存进二维稀疏结构列对象的第 i 个行对象中。实际上,可以把这些存取功能编成函数,封装进二维稀疏结构对象中,使用者可以象使用二维数组一样地使用它,非常方便。

在最后形成线性方程组时,线性方程组的系数矩阵是一个庞大的实数稀疏矩阵,因此,应该用实数(一般用双精度数,如果机器内存实在很少,也可以用单精度数)构造二维稀疏结构对象。可以看出,如果在解线性方程组过程中出现了“下雨”问题,只需在“下雨”的那个行对象中插入注入元素即可,其他行对象不需要改变。其优越性显而易见。

3.3 二维稀疏结构在三相电力系统计算中的应用

三相电力系统计算目前仍局限于潮流计算、状态估计和短路电流计算上,和单相电力系统计算一样,也有导纳矩阵和线性方程组求解问题。在三相问题中,导纳矩阵的各元素已不再是单相中的复数了,而是 3×3 的复数矩阵,因此,在应用二维稀疏结构时,应该用复数矩阵为模板来构造。其存取过程和单相问题一样。

三相问题归结到最后的线性方程组的系数矩阵也是一个庞大的稀疏矩阵,和单相问题相比,此时的矩阵元素为 3×3 实数矩阵,因此,在使用二维稀疏结构时,应该以实数矩阵为模板来构造,以后的存取和使用过程同单相问题一样简单。

4 算例

笔者通过几年的编程实践,对比几种常用的一维结构的稀疏矩阵技术和本文提出的二维稀疏结构技术,发现二维稀疏结构在解决大型电力系统问题上,有着一维结构的稀疏矩阵无可比拟的优越性。笔者使用本文所提出的二维稀疏结构技术开发的可视化潮流计算软件包,成功地解算了东北电网 500 节点的潮流(1999 年夏天数据)。而且,在最近的课

题“电力系统单、三相状态估计统一算法的研究”中,使用本文所提出的二维稀疏结构技术,不但实现了单、三相算法的统一,而且,使得三相问题变得和单相问题一样简单。实践证明,本文所提出的二维稀疏结构技术,在解决网络稀疏问题时,不失为一种比较好的方法。

5 结论

可以看出,使用二维稀疏结构,不但使原本比较复杂的稀疏矩阵变得和普通的二维数组一样简单,而且,通过模板技术,使得任何具有稀疏性的数据都能用二维稀疏结构来存取,从而使得二维稀疏结构真正成为一种简单的数据类型。这在编写电力系统计算软件库时,实现代码的重用,减少编程工作量和缩短软件开发周期,无疑是很有好处的。而且,通过重载,可以将电力系统单、三相问题统一起来,这正是作者将要阐述的问题。

参考文献:

- [1] 西安交大,等. 电力系统计算. 水利电力出版社,1979: 405 ~ 407.
- [2] Wasley R G, Shlash M A. Newton-Raphson algorithm for 3-phase load flow. Proc IEE, 121(7).
- [3] Hanson C W, Debs A S. Power system State Estimation using three-phase Modals. IEEE Transaction on Power system, 1995, 10(2).
- [4] 严蔚敏,吴伟民. 数据结构. 清华大学出版社,1997. 254 ~ 265.
- [5] Nabajyoti Barkati,任明(译). Borland C++4 开发指南. 电子工业出版社,1996. 271 ~ 284.

收稿日期: 2000-04-24

作者简介: 毛安家(1975-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统分析与控制; 郭志忠(1961-),男,教授,博导,研究方向为电力系统分析与控制、电力系统自动化技术及计算机在电力系统中的应用。

The 2 - order sparse structure in power system calculations

MAO An - jia , GUO Zhi - zhong

(Harbin Institute of Technology , Harbin 150001 , China)

Abstract: A universal sparse structure was presented in this paper. Sparse structure can easily solve the problem of sparse matrix in single phase calculations, it can also solve the problem of sparse matrix in three-phase calculations. With this method, the injection of non-zero element in coefficient matrix of linear equations can be solved easily. It also benefits of building a library of power system calculations.

Keywords: power system calculations; sparse matrix; 2-order sparse structure.