

基于松弛牛顿法的互联电网并行分布式潮流计算方法

汪芳宗, 杨力森, 高学军, 龚国强

(三峡大学电气信息学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 分布式潮流计算是解决多区域互联电网一体化潮流问题的有效方法。以松弛牛顿法潮流求解公式为出发点, 首先利用矩阵分裂法, 将互联电网分解为相互独立的子系统, 然后利用矩阵求逆运算的 Sherman-Morrison-Woodbery 公式对各子系统进行协调求解, 从而导出了一种新的互联电网并行分布式潮流计算方法。与基于网络分解及协调计算的分布式潮流计算方法相比, 该方法具有更好的收敛性。利用基于 PVM 的分布式计算环境, 以 IEEE 118 节点系统为例, 对所提算法进行了装配、测试以及分析, 初步验证了所提算法的有效性。

关键词: 分布式潮流计算; 松弛牛顿法; 矩阵分裂

Parallel and distributed load flow solution of interconnected power system using relaxed Newton method

WANG Fang-zong, YANG Li-sen, GAO Xue-jun, GONG Guo-qiang

(College of Electrical Engineering & Information Technology, China Three Georges University, Yichang 443002, China)

Abstract: The distributed computing is an efficient solution scheme for multi-area interconnected power system analysis. In this paper, a new distributed load flow algorithm is proposed based on relaxed Newton load flow formulation. In the derived algorithm, the whole system is first decomposed into a set of sub-systems through the splitting of admittance matrix, then the Sherman-Morrison-Woodbery formulation is used for the synchronous and coordination computation of the different sub-systems. The proposed method is a kind of parallel synchronous algorithm, and has a good convergence such as that of Newton-type methods. Tests on IEEE 118 bus system in a distributed computing network is done, and the result prove principally that the proposed algorithm is applicable practical to distributed load flow solution of interconnected power system.

Key words: distributed load flow calculation; relaxed Newton method; matrix splitting

中图分类号: TM744

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)16-0018-05

0 引言

分布式潮流计算是解决多区域互联电网一体化潮流问题的有效方法。互联电网分布式潮流计算的一个主要的前提条件, 就是应保持各区域电网或子系统的数据资源的相互独立性, 只能在各区域电网共同的上级调度部门的协调下, 以尽可能少的区域电网数据交换来实现各区域电网潮流的协调分布式计算, 同时完成全网的一体化潮流计算。

从互联电网一体化潮流计算的角度来看, 分布式潮流计算可以被认为是一类特定的网络分解及协调计算问题。纯粹从算法的角度来看, 分布式潮流计算可以被认为是一类粗粒度的并行计算方法。之所以称其为“粗粒度”, 就是其并行处理的程度只需以每个区域电网为基本计算单元即可。关于保持各

区域电网或子系统的数据资源的相互独立性, 以及尽可能减少区域电网数据交换等前提条件, 不是分布式计算方法与并行计算方法两者间的主要或重要区别, 因为并行计算方法研究中同样需要尽可能减少数据交换即数据通信以便实现较高的加速比。分布式潮流计算与并行潮流计算之间的主要区别, 应该是两者之间在可用的算法装配即具体实现方式上的差别: 由于互联电网的广域分布及电网的分地域管理和调度, 分布式潮流计算只能或主要通过分布式的计算机网络计算方式来实现; 而并行潮流计算则主要(但不仅仅)是通过单一的并行计算机来实现。若采用分布式的计算机网络计算方式来实现并行计算, 则该方法既可以称为分布式计算方法, 也可以称为并行计算方法。

关于分布式潮流计算, 国内学者已提出了不同的算法并发表了一些研究论文。文[1]提出了一种分解协调算法, 其核心思想是构建边界节点的等值功率注入方程, 从而将互联电网分解为相互独立的子

基金项目: 三峡大学省级重点学科建设专项经费资助项目 (002053)

系统, 同时通过外层迭代即协调计算来动态地修正各子系统的外边界节点等值注入功率, 最终实现全网的一体化潮流计算。这种方法在思路上与传统的并行计算方法不同, 巧妙地将 Ward 等值这一思想应用于分布式潮流计算。文献[2]提出了一种新的分布式潮流计算方法, 其核心思想是将边界协调方程表示为一个隐式非线性方程, 并应用 Jacobian-Free Newton-GMRES 方法对其进行求解。在采用预条件子器的情况下, 该算法具有较好的收敛性。

文献[1]和[2]的方法均是基于网络分解及协调计算这一思路。这类方法的主要特点是充分保持了各子系统的独立性, 但算法在整体上不再具有牛顿类方法的收敛性。本文结合网络分解及协调计算以及并行计算两种思路, 提出了一种新的分布式潮流计算方法。该方法首先利用矩阵分裂法, 将互联电网分解为相互独立的子系统, 然后利用矩阵求逆运算的 Sherman-Morrison-Woodbery 公式对各子系统进行协调求解; 在整体计算方法上是基于对线性化网络方程并行求解的思路。

1 网络分解及协调计算的基本原理

以两个子系统互联为例(见图1), 说明互联电网的分解协调计算的基本模式。

图1(a)中, 子系统 S_1 和 S_2 通过联络线 l_{ij} (可以有多个联络线; 为简单起见, 只画1条线作为示意)相连; 图1(b)为子系统 S_1 的本地模型, 它不包括联络线 l_{ij} 本身, 其外网的等值是通过在子系统 S_1 内的节点 i 上挂接等值负荷($\dot{S}_i^{\text{eq}} = P_i^{\text{eq}} + jQ_i^{\text{eq}}$)来实现。图1(c)的情况类似。很明显, 上述等值负荷与联络线两端的传输功率是一致的, 即 $\dot{S}_i^{\text{eq}} = \dot{S}_{ij}^l; \dot{S}_j^{\text{eq}} = \dot{S}_{ji}^l$ 。注意 \dot{S}_{ij}^l 和 \dot{S}_{ji}^l 只与联络线的支路参数及其两端电压状态有关。若 \dot{S}_{ij}^l 和 \dot{S}_{ji}^l 的精确值已知, 则两个子系统 S_1 和 S_2 可以分别独立求解, 这是分解协调计算的基础或出发点。

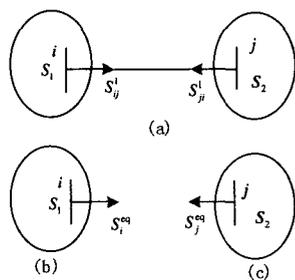


图1 两个系统互联及分解模型示意图

Fig. 1 Interconnected model for two sub-systems

上述分解模式用数学方法进行描述, 即是

$$F_i(\mathbf{V}_i, \mathbf{S}_{ij}) = 0 \quad (1)$$

$$F_j(\mathbf{V}_j, \mathbf{S}_{ji}) = 0 \quad (2)$$

$$\mathbf{S}_{ij} - \phi_{ij}(\mathbf{V}_i^B, \mathbf{V}_j^B) = 0 \quad (3)$$

$$\mathbf{S}_{ji} - \phi_{ji}(\mathbf{V}_j^B, \mathbf{V}_i^B) = 0 \quad (4)$$

方程(3)和(4)可以合写成

$$\phi_B(\mathbf{V}_i^B, \mathbf{V}_j^B, \mathbf{S}) = 0 \quad (5)$$

方程(5)通常称为协调方程。

若对上述方程应用牛顿法, 可以得出

$$\mathbf{J}\Delta\mathbf{V} + \mathbf{C}\Delta\mathbf{S} = -\mathbf{F} \quad (6)$$

$$\mathbf{D}\Delta\mathbf{S} + \mathbf{E}\Delta\mathbf{V}^B = -\phi \quad (7)$$

式中

$$\mathbf{J}' = \text{Diag}(\mathbf{J}'_i, \mathbf{J}'_j) \quad (8)$$

\mathbf{J}'_i 和 \mathbf{J}'_j 为分解后的子系统的雅可比矩阵。

很显然, 若采用严格的牛顿法, 则必须对方程(6)和(7)进行联立求解。但是, 在基于分解协调计算的分布式潮流计算过程中, 为保持各子系统计算的独立性, 通常是采用对方程(6)和(7)进行交互求解的方式, 即在各子系统进行独立潮流计算时, 先假定 \mathbf{S} 为常量, 以此为基础求出 $\Delta\mathbf{V}$, 然后利用协调方程对各子系统求得的结果进行“协调修正”。关于“协调修正”方法, 文[1]是采用修正外网等值注入功率或戴维南等值电压的思路。这种处理思路比较新颖, 但系统在整体收敛机理上不易理解; 文[2]是利用 Newton-GMRES 方法对方程(5)进行迭代求解。当协调方程维数较高时, 该方法不失为一种新的合理选择。从宏观上看, 此类方法在本质上相当于先令 $\Delta\mathbf{S} = 0$ 来求解方程(6)(此为分解计算), 再利用方程(7)对 $\Delta\mathbf{V}^B$ 进行修正(此为协调计算), 然后重新开始新一轮的分解协调计算, 直到系统整体收敛为止。很显然, 由于采用了交互迭代方式, 此类方法在整体上不具备牛顿类方法的收敛特性。

2 基于松弛牛顿法的分布式潮流算法

2.1 松弛牛顿计算方法

在采用直角坐标系的前提条件下, 基于牛顿法的潮流计算可由下列方程描述:

$$-\mathbf{J}\Delta\mathbf{V} = \Delta\mathbf{W} \quad (9)$$

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_d + \mathbf{YV} = \mathbf{J}_d + \mathbf{VY} \quad (10)$$

式中: \mathbf{J} 为雅可比矩阵, \mathbf{Y} 为节点导纳矩阵, $\Delta\mathbf{W}$ 为节点注入功率残差向量。有关表达式可参见文[3]。

利用矩阵求逆运算的松弛方法^[3,4]可以近似计算

$$\mathbf{J}^{-1} = (\mathbf{YV} + \mathbf{J}_d)^{-1} \approx (\mathbf{I} - \mathbf{Y}^{-1}\mathbf{V}^{-1}\mathbf{J}_d)\mathbf{Y}^{-1}\mathbf{V}^{-1} \quad (11)$$

这样, 我们可以得出

$$\Delta \tilde{V} = -Y^{-1}V^{-1}\Delta W \quad (12)$$

$$\delta = -Y^{-1}V^{-1}J_d \quad (13)$$

$$\lambda = I + \delta \quad (14)$$

$$\Delta V \approx \lambda \Delta \tilde{V} \quad (15)$$

上述方程即是松弛牛顿计算方法^[1]。

理论上, 若谱半径 $\rho(Y^{-1}V^{-1}J_d) < 1$, 则上述算法是超线性收敛的。若忽略 J_d , 即 $\delta = -Y^{-1}V^{-1}J_d = 0$, 则上述算法即是“完全松弛牛顿法”, 亦即是通常所说的“定雅可比法”, 此时算法是线性收敛的; 若进一步忽略节点导纳矩阵中的 G_{ij} , 即 $|G_{ij}| \ll |B_{ij}|$, $G_{ij} \approx 0$, 则上述算法即成为“P-Q 分解法”。对高压输变电网而言, 无论是“定雅可比法”还是“P-Q 分解法”, 均具有较好的收敛性, 而且已得到了广泛应用。因此, 松弛牛顿计算方法是一种通用性较强的实用算法。该算法是本文导出的分布式潮流计算方法的出发点。

2.2 并行分布式潮流计算方法

设子系统的节点导纳矩阵为 $Y_s^i (i = 1, m)$, 整个互联电网的节点导纳矩阵为 Y 。定义

$$Y_s = \text{Diag}(Y_s^1, \dots, Y_s^m) \quad (16)$$

则有

$$Y = Y_s + \Delta Y \quad (17)$$

很易理解, 上述公式中的 Y_s 即是将互联电网中所有联络线(支路)全部开断后系统的节点导纳矩阵; ΔY 是一个补偿矩阵。依据电力系统中常用的网络补偿法^[5], 方程(17)可以进一步写成

$$Y = Y_s + \Delta Y = Y_s + MDN^T \quad (18)$$

利用矩阵求逆运算的 Sherman-Morrison-Woodbery 公式(或称为矩阵求逆辅助定理)对方程(18)求逆, 可以得到

$$Y^{-1} = Y_s^{-1} - Y_s^{-1}M(D^{-1} + N^T Y_s^{-1}M)^{-1}N^T Y_s^{-1} \quad (19)$$

定义

$$\gamma = -Y_s^{-1}M \quad (20)$$

$$\eta = (D^{-1} - N^T \gamma)^{-1}N^T \quad (21)$$

$$\mu = I + \gamma \eta \quad (22)$$

则方程(20)可以写成

$$Y^{-1} = \mu Y_s^{-1} \quad (23)$$

定义

$$\Delta \tilde{V}_s = -Y_s^{-1}V^{-1}\Delta W \quad (24)$$

$$\delta_s = -Y_s^{-1}V^{-1}J_d \quad (25)$$

$$\Delta \tilde{V}_s = \mu \Delta \tilde{V}_s \quad (26)$$

$$\Delta V_s = \Delta \tilde{V}_s + \delta_s \Delta \tilde{V}_s \quad (27)$$

则可以推出

$$\Delta V \approx \lambda \Delta \tilde{V} = \mu \Delta V_s \quad (28)$$

至此, 本文导出了分布式潮流计算公式。

方程(20)、(24)、(25)、(27)可以由各子系统分别进行计算; 方程(26)可以被看成是对各子系统独立求解结果的“初步协调计算”; ΔV_s 可以被看成是各子系统独立求解所得的“近似解”; 方程(28)可以被看成是对各子系统独立求解所得“近似解”的“二次协调计算”; μ 可以被称为协调因子矩阵, 它是一个强稀疏、对称(块形式)常量矩阵。通过协调因子矩阵, 在进行 2 次“协调计算”后可以求出各子系统的“真解”。若采用定雅可比方法或 P-Q 分解法, 则只需 1 次“协调计算”。

很易理解, 上述算法在收敛性上与利用松弛牛顿法对单一系统进行求解的收敛性是完全一致的, 而且这种收敛性与子系统数量、联络线数量不存在任何关系。换言之, 上述算法的收敛性不受分区数目、联络线的多少等的影响。

2.3 并行分布式潮流计算流程图

以上所述的分布式潮流算法的计算流程框图如图 2 所示。需要说明的是: 各子系统在计算其相应的 ΔW 和 J_d 时, 对涉及联络线的节点应计及联络线支路。因此, 在迭代过程中, 尽管联络线两端的电压状态量分属于两个不同的子系统, 但应通过“协调层”“发送”到相应的两个子系统。

3 算法模拟装配结果及分析比较

3.1 分布式计算环境

迄今为止, 对分布式潮流计算的研究工作绝大多数均是通过串行仿真算例来检验算法的收敛性。如上所述, 分布式潮流计算可以被认为是一类“粗粒度”的网络并行计算方法。如何对分布式潮流算法进行网络化并行装配, 是一项具有重要意义的研究课题。在串行仿真计算中, 一般是通过“协调层”来“启动”分布式潮流计算进程的。从工程实际应用的角度讲, 任何一个子系统(子系统层)或其共同的上级调度部门(协调层)均应可以“启动”分布式潮流计算进程。

对分布式潮流算法进行网络化并行装配, 需构建一个分布式计算环境。新版的 Matlab 平台软件(R2006b)提供了一个很好的分布式计算管理工具(Distributed Computing Toolbox), 但其售价较贵。PVM^[4]及 MPI 是自由软件, 可以用于分布式计算。本文利用 PVM 的数据通信机制, 构建了一个基于

局域网的分布式计算网络。该计算环境由 7 台 PC 计算机组成, 其中的 1 台计算机用于“协调层”的计算 (Master Computer); 另外的 6 台计算机用于子系统的计算 (Slave Computer)。每个 Slave

Computer 只与 Master Computer 进行数据通信; Master Computer 可以单独 (TCP/IP) 或同时 (UDP) 与每个 Slave Computer 进行数据通信。

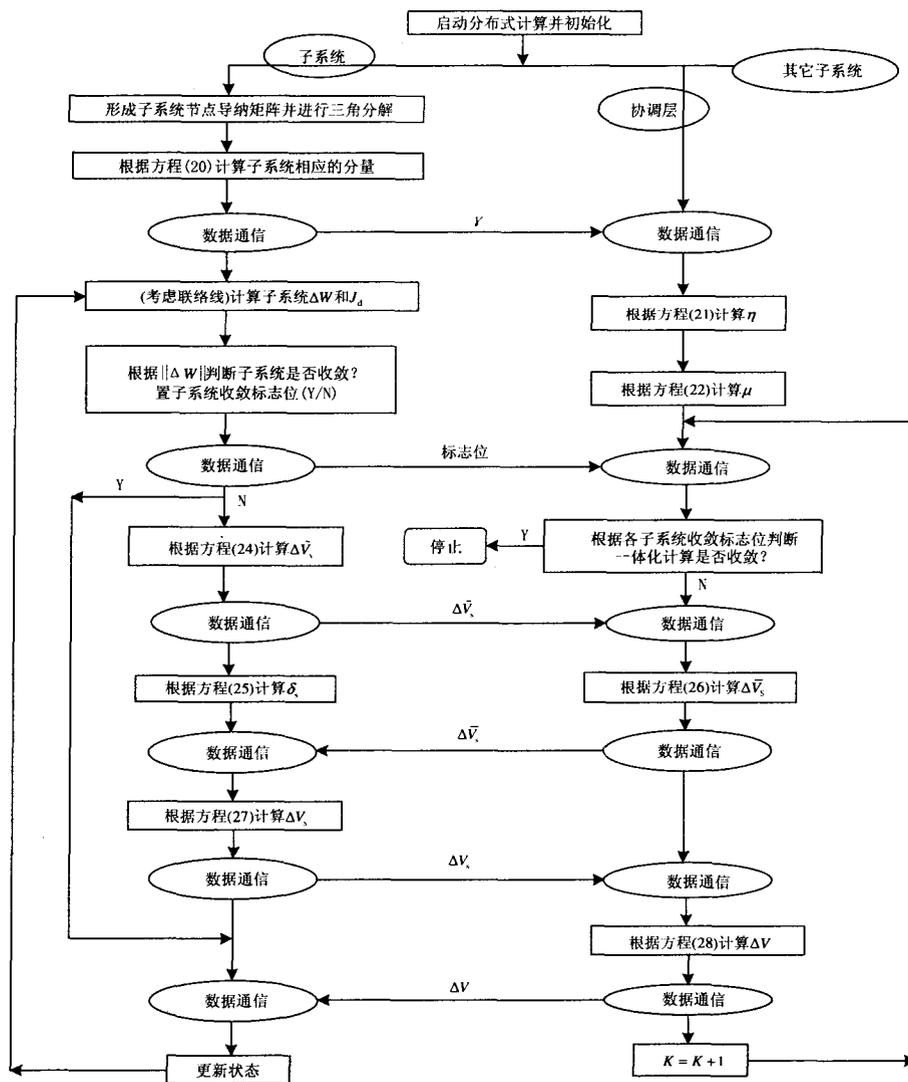


图 2 分布式潮流计算框图

Fig.2 Solution frame for distributed load flow

3.2 测试结果及分析

表 1 是利用本文所提方法在上述分布式计算环境下, 对 IEEE 118 节点系统进行测试的结果。该系统经人工处理划分为 3 个子系统, 共计 9 条联络线。收敛精度均统一为 $\|\Delta W\| \leq 10^{-5}$ p.u.。表中 T_1 为采用传统的串行计算方法对整个系统进行潮流计算所耗时; T_2 为分布式潮流计算所耗时。 T_3 的计算公式如方程(29)所示, 它大致反映在分布式潮流计算中数据通信以及协调计算等所耗用的时间; 分布式计算效率 (σ) 的计算公式如方程(30)

所示。

$$T_3 = T_2 - T_1/3 \quad (29)$$

$$\sigma = [T_1 / (3T_2)] \times 100\% = [(T_2 - T_3) / T_2] \times 100\% \quad (30)$$

从表 1 可以看出: 当对各子系统采用 P-Q 分解法时, 分布式计算所用时间最少, 整体分布式计算速度最快; 当对各子系统采用松弛牛顿法时, 分布式计算效率最低, 这是因为松弛牛顿法在每一步迭代中需要 2 次“协调计算”, 数据通信以及协调计算等所耗用的时间较多。从理论上讲, 当每个子系统的规模更大而且大致均衡时, 采用上述分布式计

算方法将获得更高的分布式计算效率,因为当子系统的规模更大时,纯粹用于潮流计算的时间将占更大的比例。

将上述测试结果与文[2]的测试结果(参见文[2]中的“表2”)可以看出,本文所提出的算法在整体收敛性上具有明显的优势。

表1 算法测试结果

Tab. 1 Test results of the proposed algorithm

所用算法	迭代 次数	计算时间/ms			分布式计算 效率/%
		T_1	T_2	T_3	
松弛牛顿 法	3	3237	2068	989	52.2
定雅可比 法	4	2849	1292	342	73.5
P-Q分 解法	4	2240	1078	331	69.3

4 结论

结合网络分解及协调计算以及并行计算两种思路,本文以松弛牛顿法潮流计算公式为基础,利用矩阵分裂法以及矩阵求逆运算的 Sherman-Morrison-Woodbery 公式,导出了一种新的互联电网并行分布式潮流计算方法。与基于网络分解及协调计算的分布式潮流计算方法相比,该方法具有更好的收敛性,而且其收敛性不受分区数目、联络线的多少等的影响。

利用基于 PVM 的分布式计算环境,以 IEEE 118 节点系统为例,对所提算法进行了测试和分析,初步验证了所提算法的有效性。

参考文献

- [1] 张海波,张伯明,孙宏斌.基于异步迭代的多区域互联系统动态潮流分解协调计算[J].电力系统自动化,2003,27(24):1-5.
ZHANG Hai-bo, ZHANG Bo-ming, SUN Hong-bin. A

Decomposition and Coordination Dynamic Power Flow Calculation for Multi-area Interconnected System Based on Asynchronous Iteration[J].Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(24): 1-5.

- [2] 陈颖,沈沉,梅生伟,等.基于改进 Jacobian-Free Newton-GMRES(m)的电力系统分布式潮流计算[J].电力系统自动化,2006,30(9):5-8.
CHEN Ying, SHEN Chen, MEI Sheng-wei, et al. Distributed Power Flow Calculation Based on an Improved Jacobian-Free Newton-GMRES(m) Method[J].Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(9): 5-8.
- [3] 汪芳宗,向小民,袁兆强.基于松弛牛顿法的配电网潮流计算方法[J].继电器,2007,35(6):21-24.
WANG Fang-zong, XIANG Xiao-min, YUAN Zhao-qiang. Relaxed Newton Method for Power Flow Analysis of Distribution Systems[J]. Relay, 2007, 35(6):21-24.
- [4] 汪芳宗.电力系统潮流的并行松弛牛顿计算方法[J].电力系统自动化,1998,22(12):16-19.
WANG Fang-zong. Relaxed Newton Method for Parallel Power Flow Calculation[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(12): 16-19.
- [5] Alsac O, Stotte B, Tinney W F. Sparsity-Oriented Compensation Methods for Modified Network Solution[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1983, 102(50): 1050-1060.

收稿日期:2007-01-22; 修回日期:2007-03-23

作者简介:

汪芳宗(1966-),男,博士、教授,研究方向为电网一体化计算及并行分布式处理;E-mail: fzwang@ctgu.edu.cn

杨力森(1970-),男,讲师,研究方向为电力系统自动化;

高学军(1966-),男,博士、副教授,研究方向为计算机网络及计算机控制。

许继电气新产品获河南省科技一等奖

许继电气公司自主研发开发的 WGL-800 故障录波分析装置荣获河南省信息产业科技成果奖的一等奖。据了解,许继电气于 2004 年 6 月立项开发 WGL-800 故障录波分析装置,2005 年 8 月投入试运行,2005 年 11 月产品通过国家继电器质量检测中心定型试验,同期通过鉴定。基于对产品负责和更好地满足客户要求,2006 年 1 月开始小批量试生产,通过小批量供货发现问题,从细微处提升产品的性能质量,不断总结不断升级改进。经过近一年的努力,许继故障录波装置在性能试验和调试投运中得到了客户的高度评价和认可,产品的自主研发水平实现了质的飞跃。2006 年 12 月在中国电科院电力工业电力设备及仪表质量检测中心一次顺利通过系统录波和机组录波型试验及动模试验。

2007 年上半年,该产品在郑州通过由省科技厅组织的省级鉴定,专家鉴定认为该产品性能指标达到国际先进水平。升级后的 WGL-800 故障录波分析装置,连续中标继南阳天益 2×600 MW 机组故障录波、华能沁北电厂二期升压站的 500 kV 系统故障录波等高端项目。今年上半年,该公司故障录波产品的订货量实现了大幅度增长。