

Abstract

SCADA data processing in power system is an important part of the EMS/SCADA system. It is of great significance for improving the quality and reliability of the data system. Real-time surveillance and control for senior applications to fully play its rightful role. This article focuses on methods research in order to identify topology error and detect bad data in SCADA data processing. Data processing software is developed and applied in the reactive power optimal control system of Jinchang city.

According to the part characteristics of remote information, it summarized the part LAN models for topology error identification, and derived formulas of information loss in topology error identification, then advanced 0-1 integer planning models based on the minimum information loss for the LAN error identification. The idea converts the consecutive model into simple binary symmetrical models and simplify mixed integer problem into 0-1 integer planning. In this passage, it regarded node power imbalance degrees as statistical data of bad information identification, and advanced identification idea of bad information based on the average detection of node power imbalance degrees, and corrected suspicious bad data according to the feature of continuous in power system. This passage also provided conception of classifying system node and idea of detecting bad data by grade on the basis of relationship in power system sample data, which improved the accuration rate of node detection. Besides, it introduced basic WLS mathematical models of state estimated algorithms, and methodology flow chart. Finally it also introduced topology error identification, bad data detection and identification and state estimation, which applied in the project.

Key words: state estimation, data processing, topology error identification, detection and identification of bad data

独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得中国农业大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名：

倪小华

时间：

2006年6月15日

关于论文使用授权的说明

本人完全了解中国农业大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。同意中国农业大学可以用不同方式在不同媒体上发表、传播学位论文的全部或部分内容。

(保密的学位论文在解密后应遵守此协议)

研究生签名：

倪小华

时间：

2006年6月15日

导师签名：

杨宝峰

时间：

2006年6月15日

第一章 绪论

1.1 引言

现代电力系统地域不断扩大,容量急剧增加,运行方式亦日趋复杂,为了保证系统的安全和经济运行,系统的控制中心必须能迅速而准确的掌握全面的运行情况,并随时分析计算,从而作出各种正确的决策。为此,电力工作人员从60年代便开始应用计算机对系统进行实时监视与控制。

为了使系统实时监视与控制的高级应用程序充分发挥其应有的作用,就必须建立起可靠而完整的实时数据库^[1]。为达到此目的,既可从硬件着手,通过增加量测设备和运动装置,并提高其精度,速度与可靠性来实现,也可从软件入手,即采用状态估计技术以提高数据的精度,排除偶然的错误信息和坏数据,从而提高整个数据系统的质量与可靠性。

状态估计也称为滤波,是利用实时量测系统的冗余度来提交数据精度,自动排除随机干扰所引起的错误信息,估计或预报系统的运行状态(或轨迹)。它是现代大型电力系统各级调度控制中心能量管理系统(EMS)的重要组成部分,为EMS提供可靠而完整的系统运行状态的信息,并用这些数据来建立各种高级应用软件所需的数据库。可见,状态估计直接关系到电力系统安全可靠、优质经济的重大问题。状态估计程序的主要功能包括^[1]:(1)根据遥测量估计电网的实际开关状态,纠正偶然出现的错误的开关状态信息,以保证数据库中电网接线方式的正确性。状态估计的这种功能称之为网络接线辨识或开关状态辨识。(2)对生数据进行不良数据的检测与辨识,删除或改正不良数据,提高数据系统的可靠性。(3)根据量测量的精度和基尔霍夫定律按最佳估计准则对生数据进行计算,得到最接近系统真实状态的最佳估计值。

电力网络拓扑分析的任务是处理开关信息的变化,形成新的网络结线,对其主要要求是可靠、快速、有效。电力系统运行时,网络拓扑分析是实现EMS/DMS各种高级功能的基础,正确的拓扑分析结果对状态估计、潮流计算、安全分析和无功优化等软件的运行至关重要。可见,在实时情况下,为调度人员提供正确的网络结构是十分必要的,而正确的网络拓扑又建立在正确通信基础上。在实际的电力系统中,通信抖动和误动时有发生^[2],主要原因有:一次或二次设备本身的原因,各种干扰,远动装置本身或调度端采集处理软件的原因。当通信出现错误时,将影响状态估计结果的正确性,甚至使得状态估计计算不收敛,因而,检测、辨识与修正网络结构错误是实时信息处理的重要内容。

不良数据的检测与辨识是电力系统状态估计的重要功能之一^[3],其目的在于排除量测采样数据中偶然出现的少数不良数据,以提高状态估计的可靠性。在现代电力系统中,操作中的不良数据不仅影响软件环境的性能,更严重的是,操作员基于不良数据所作的决策将使系统正常运行受到威胁,甚至可能威胁到整个电力系统的安全。因此,为了确保电力系统的安全,监测这些不良数据并把它们有效地从原始测量数据中提取出来有着重要地意义。

在给定网络接线、支路参数和量测系统的条件下,根据量测值求最优状态估计值的计算方法称为状态估计算法,它是状态估计程序的核心部分,因此状态估计算法的选择对整个状态估计程序的性能有很大的影响。目前,输电系统状态估计算法已经发展得较为成熟,并成为能量

管理系统(EMS)中必不可少的重要环节。

针对上述问题,本文首先检测和辨识网络结构错误修正错误的遥信量测,然后辨识和修正不良遥测数据提高实时数据的精度,最后利用实时量测系统的冗余度进行状态估计,自动排除随机干扰所引起的错误信息,从而提高整个数据系统的准确性和可靠性。

1.2 历史与现状

1.2.1 网络结构错误辨识研究的历史与现状

在实际运行的电网自动化系统中,要想实时得到正确的网络状态是很困难的。一旦开关遥信与开关实际位置不相符,则称为网络结构错误。

网络结构错误检测的目的是为了检测出可信遥信和可疑遥信,为进一步识别结构错误作准备。检测的依据是被检开关处的遥信量与开关所在支路潮流量测值的对应关系。

在结构错误辨识的过程中,必须考虑多个坏数据和多个拓扑错误同时存在的可能性。目前解决这个问题还没有非常成熟的理论。因此,调度自动化系统中的拓扑错误辨识一方面要利用已有的各种拓扑错误辨识方法,另一方面要充分利用SCADA中的数据,也就是要把各种遥信信息和遥测计算结合起来,进行综合分析。

1) 网络结构搜索辨识法^[1]

网络结构搜索辨识法利用检测各开关处的遥信,量测量是否相对应来发现可疑遥信之所在,搜索可能有的几种正确网络结构,据此进行状态估计,以排除结构错误的影响,最后用状态估计结果进行 $J(\hat{x})$ 检测,即用 $J(\hat{x})$ 值是否小于门槛值来判断该网络结构是否正确。此法的优点为算法简单,需估计的状态量未增加,因此对量测配置的要求较低,投入少。其缺点是单一性,要进行多次状态估计计算,计算次数随辨识开关数目的增加而急剧增加,对同时有开关操作,多个结构错误和不良数据复错误的情况,本方法均可能失败。

文献[4]基于正常量测情况下节点潮流基本平衡的原理,提出了一种相关集潮流分析的方法,通过建立支路潮流可靠性隶属函数来定量描述支路投运置信度,并按投运置信度的大小识别开关错误或确定正确网络结构搜索的优化次序,最后以 $J(\hat{x})$ 检验来确定最终的正确网络结构。

2) 网络结构的参数估计辨识法^[1]

网络结构的参数估计辨识法是在参数估计的基础上进行的,其基本原理为:利用检测各开关处的遥信,量测量是否相对应,来发现可疑遥信之所在,找到可疑元件所在支路的编号,并进行增广状态估计,估计该支路的参数,利用估计结果求得投运置信度,由投运置信度是否满足投运不等式和停运不等式来判断其是否投运。该法的优点为:结果直观,适应性强,既可适应有开关操作时的结构辨识,也可同时辨识多个网络结构错误,并且还可以同时进行参数估计和不良数据估计辨识,不必多次进行状态估计计算,但程序较复杂,对量测系统的配置要求较高,它要求线路的两端都有潮流量测。

3) 拓扑结构概率分析法^[5-6]

拓扑结构概率分析法基于辐射网中当拓扑结构发生变化时,功率分配关系是可以事先确定的(在不考虑网络损耗的情况下)和各节点的注入功率是可以确定的。通过被分析开关所在节点向上、下支路的搜索,根据该条支路上相关节点量测的变化情况来确定相应的拓扑结构,然后来判别开关的状态,这样同时剔除了错误量测对确定拓扑结构的影响。这种方法在辐射网中使用,容错能力强,计算速度快,是比较实用的方法。如果用于环网,这种方法的假定条件是拓扑变化前后网络的节点注入量没有改变,即假定经过前一次状态估计后,系统的拓扑结构、网络参数、各支路潮流、节点电压都是准确的,因此这时的PQ节点和PV节点的注入功率及电压幅值是已知的(已经去除了坏数据的影响)。如果依据这些已知量,可以进行支路开断计算,以及发电机开断的计算,将计算结果与拓扑结构变化后的潮流进行比较。而由这个条件计算出来的结果是否能够近似实际情况,与网络的结构和开断的具体支路的位置有关。

4) 新息图法^[7-9]

新息图法在提出预报预估网络与新息网络建模原则的基础上,形成了运行网络与预报预估网络及新息网络的叠加关系,使新息矢量元素间建立了满足克希霍夫电路定律的合理有用的联系。依据新息网络图得到连支推算新息矢量,可以识别出和网络结构变化同时同地发生的相关坏数据及多个有联系的相关拓扑错误同时发生的恶劣情况,可以识别不同种类的网络结构变化,识别支路断开、闭合或二者同时发生的情况下对其进行识别。新息图法需要的遥测数目少,识别功能强甚至可以用小于节点数的有功量测来检测识别拓扑结构动态变化。它无迭代过程,仅需进行加减和比较运算,计算速度很快。该方法的使用条件是假设当线路突然断开时,只是系统中支路潮流发生变化,而发电机节点注入功率没有发生变化,负荷功率也没有发生变化。

5) 规则法^[32-33]

目前应用最多的网络拓扑错误辨识方法是基于专家规则的启发式方法(即规则法)。规则法简单快速,在实际电网中得到了应用。但由于大规模电网十分复杂且变化频繁,难以建立完整的规则库,一些复杂的拓扑错误难以用简单的规则加以描述。而且在专家规则系统的推理过程中,认为各个规则之间是等价的,无法对不确定信息进行科学的量化,因而对信息的使用不够合理、也不够全面,经常错判或漏判,辨识能力尚不如调动人员的人工判断。

综上所述,前面两种方法都是将拓扑分析与状态估计结合起来,在状态估计的过程中排除网络拓扑错误的影响。第3、4种方法是单独进行网络拓扑错误分析,主要是利用不良数据的特点,采用电路分析的方法。它们都要求两次采样间节点注入功率和负荷功率没有发生很大变化。

1.2.2 不良数据的检测与辨识研究的历史与现状

对一个经过良好校对的量测系统来说,其误差具有正态分布的性质。如果电力系统的测量信息误差满足高斯分布,那么常规的状态估计方法可以得到满意的实时数据库。但是,电力系统调度中心接受到的数据由于以下原因^[1]:

- 1) 量测与传送系统受到较大的随机干扰;
- 2) 量测与传送系统出现的偶然故障;

- 3) 电力系统快速变化中各测点间的非同时量测;
- 4) 系统正常操作或大干扰引起的过渡过程;

导致实测数据的误差达到 $\pm(6\sim7)\sigma$ (σ 大约为正常量测范围的 0.5%--2%)以上,理论上把这类数据称为不良数据。在实际的状态估计问题中,某个时刻的不良数据可能是单个的或多个的;在存在多个不良数据时,又可分为多个弱相关或多个强相关的不良数据。显然,不良数据的模式如此多样,如果不进行检测与辨识,将会给显示、记录以及安全经济有关的各种分析计算出的一系列错误,给调度人员带来麻烦,并直接影响安全经济运行。

由上述情况可见,实际量测并不完全严格服从正态分布,不良数据需通过检测与辨识处理,才能满足系统对测量数据的要求。所谓检测是用未判定是否存在不良数据,而辨识则是为了找出哪一个数据是不良数据,以便进行剔除或修正。

目前国内外已经提出了几种不良数据检测和辨识的方法。常用的方法主要是基于状态估计的方法,有残差搜索法、非二次准则法、零残差法、估计辨识法等。这些方法主要是将加权残差或标准残差值作为特征值,假设其服从某一概率分布,并按照一定的置信度水平确定一个门槛值,进行假设检验。找到可疑测量数据后,将其从测量数据中排除或减小其权值,得到新的状态估计值。

这类方法的缺点是很可能出现残差污染和残差淹没现象,从而造成漏检或误检,影响了辨识的效果。由于这种常规的不良数据辨识算法采用非线性残差方程,辨识过程中需要多次状态估计的计算,因此计算量极大。此外采用线性化残差方程,利用残差灵敏度矩阵的子矩阵计算测量的估计值,由于灵敏度矩阵是高维满阵,因此这种方法计算量仍很大。另外,当出现多个不良数据的情况下,使用这种方法经常会发生错误辨识的现象。

不良数据检测方法主要有三类:

- 1) 加权残差 r_w 或标准化残差 r_N 检测^[1]

基于量测残差相对值,即在状态估计的基础上,检测量测量加权残差(r_w)或标准化残差(r_N),将大于某门槛值的量测量纳入可疑数据集。由于不良数据参与估计,在多个不良数据情况下,存在“残差污染”(除了不良数据点的残差呈现出超过检测门槛值的特征外,还有一些正常测点的残差也超过门槛值)及“残差淹没”(多个不良数据相互作用导致在部分的或全部不良数据点上的残差接近于正常残差的现象)现象,不能可靠检测。

- 2) 量测量突变检测和应用伪量测量的检测^[10-12]

这类是基于量测量预测值,即假定前一次估计正确,在此基础上,对本次估计的量测量做一步预测,以本次量测量采样值与预测值之差做为检测特征。其局限是要求电力系统网络结构在两相邻采样间隔之间必须保持不变且负荷变化不大,而且这种假设检验的方法存在误检或漏检的风险。文献[11]在此基础上提出利用模糊数学聚类分析方法,用模糊数学中的隶属度概念,利用标准残差 r_N 与两相邻采样时刻的量测数据差值 ΔZ 作为两个特征,说明该量测以多大程度属于或不属于不良数据;用加权形式的 ISODAT(选自组织数据分析技术)方法,对量测值进行了模糊聚类分析,从而改善检测效果。但是,这类方法无法利用本次大量冗余的量测采样之间可以相互校核的条件。

3) 混合不良数据检测方法^[13]

针对状态估计不良数据检测的实用化要求,结合现有两类基本检测方法的优点,并考虑相关量测量之间可相互校核的特点,提出了可根据网络结构核负荷变化正确选择适合于当时运行状态的检测方法的判别原则核算法。混合辨识方法将标准残差检测方法用于网络结构改变后由于系统负荷快速变化使判据判定突变量检测方法不再适用的情况,即采用此算法为系统负荷变化时的主检测。此方法避免了现有两类基本检测方法的缺点,提出了自动选择检测方法的基本判据,满足了系统实际运行中的要求,尽可能地降低了漏检和误检地概率。标准残差检测虽无法识别相关不良数据,但由于误差在采样中的分布是随机的,在开关操作后相邻两次状态估计中出现完全相关的相关多不良数据的情况微乎其微,因此,采用以上判据确定的系统状态量作为突变检测的基准值是可行的。

在现代电力系统应用中,不良数据的辨识问题通常归到状态估计的研究范畴^[1]。国内外文献中不良数据辨识方法的基本思路是:在检测出存在不良数据后,设法找出这个不良数据并在量测集中排除它,然后再进行状态估计,从而获得可靠的结果。目前国内外用于电力系统状态估计中不良数据具体辨识的方法主要有:

1) 残差搜索法^[14-16]

基本思路是利用 r_w (或 r_N)对不良数据进行排序,并按顺序逐个加以排除,然后重新假设量测模型进行状态估计,从而获得可靠的结果。一般仅适用于单个不良数据的辨识,或者弱相关的多不良数据的辨识;当存在多个强相关的不良数据时,会引起所谓的“残差淹没”现象而无法辨识。状态估计需要进行两次以上。在大电力系统中,大大丧失它的实时性能。

2) 非二次准则法^[17-20]

由于残差搜索法费时的弱点,文献[17]最早开始研究非二次准则法(Non-Quadratic),文献[14]对多种 Non-Quadratic 估计器和坏数据的检测和辨识进行了深入研究,文献[18]研究了 QC(quadratic-constant)和 QL(quadratic-linear)两种估计器在辨识坏数据中的抗差能力。其基本思路是:对残差绝对值大的量测量,并不直接将它从状态估计中排除,而是在迭代过程中减小它的权重,避免了重新估计,降低了计算量。该方法缺点在于存在局部极小值,同时变权重的量测量过多将导致收敛慢或不收敛;无法辨识多个强相关的不良数据。大多数非二次准则的估计,由于不能完全排除不良数据的影响,并非最优估计,但要获得可靠的最优估计仍需假设量测模型重做状态估计。

3) 估计辨识法^[21-23]

估计辨识法是 80 年代初由清华大学相年德等人发展起来的,其思路是首先对不良数据进行估计值计算,再用此估计值去直接修正含有不良数据时获得的状态估计,从而得到排除了不良数据后的最优估计,避免了重新状态估计。该方法具有处理多个弱相关或强相关的不良数据功能;但是前提是必须保证不良数据可辨识,即从 m 维量测矢量中移去 s 维可疑量测后,余下的 t 维正常量测矢量仍能保持对系统的可观性;同时需要存储 $m \times m$ 阶残差灵敏度矩阵,存储量大。文献[22][23]对该方法进行了改进,提出递归量测误差估计辨识法,用线性递归方式计算量

测误差的估计值,当增删可疑量测集中的量测时,不需要计算降阶残差灵敏度矩阵的元素,也不需要再估计,大大加快了计算速度。

4) 图论法^[24]

根据状态估计中误差发生的随机性和误差散布的确定性,在进行不良数据检测与辨识时,不仅考虑了误差的统计特性,还考虑了误差散布的确定性规律,依据沿任一回路量测量的加权代数和等于量测误差的加权代数和,用图论方法进行多个不良数据的检测与辨识。这种方法能够达到可靠检测的目的,没有漏检现象,同时也克服了“残差淹没”的现象。检测法不依赖估计,是估计前检测,避开了量测残差计算,检测过程采用本次量测采样值,充分利用了量测量间的相互校核作出,不依赖系统运行平稳的假设。不良数据检测是在估计前进行的,没有计算残差灵敏度矩阵 W 和各个量测的残差,方法比较简单,计算量小且精度较高,计算速度快,没有对不良数据进行抑制,而是对不良数据修正,实时性能较好。

检测方法与辨识方法是密切相关的。检测成功,辨识则很容易实现;检测失败则会给辨识带来困难,甚至无法辨识。所以检测方法是不良数据检测与辨识的关键。而目前所采用的检测方法均存在问题,需要进一步探讨新方法。上述前第一类检测方法均存在残差污染和残差淹没现象。量测量突变检测基本上能够解决残差污染和残差淹没现象。应用伪量测进行检测,由于伪量测的应用主要增加了残差灵敏度矩阵的对角元素优势,有效地削弱了单不良数据情况下的残差污染现象和多不良数据情况下的残差淹没现象。但量测量突变检测和应用伪量测进行检测都要求在两采样间系统的结构不发生变化,且不能有突变量发生。否则,此两种方法将失效。另外,以上检测方法都是基于概率论的理论提出来的,都存在漏检概率(P_d)和误检概率(P_f)问题。在辨识方法中,残差搜索法和非二次准则法都需要经过多次状态估计的计算,实时性能比较好。

1.2.3 输电网状态估计算法研究的历史与现状

状态估计也称为滤波,是利用实时量测系统的冗余度来提高数据精度,自动排除随机干扰所引起的错误信息,估计或预报系统的运行状态(或轨迹)。它是现代大型电力系统各级调度控制中心能量管理系统(EMS)的重要组成部分,为 EMS 提供可靠而完整的系统运行状态的信息,并用这些数据来建立各种高级应用软件所需的数据库。可见,状态估计直接关系到电力系统安全可靠、优质经济的重大问题。

状态估计又可以称为广义潮流,它与常规潮流所求的状态量相同,而区别在于^[1]:

1) 潮流计算中方程式数目等于未知数的数目,而在状态估计中,测量向量的维数一般大于未知状态向量的维数,即方程式数目多于未知数的数目;

2) 潮流计算一般用牛顿—拉夫逊法求解 $2n$ 个非线性方程组,而状态估计则是根据一定的估计准则,按估计理论的处理方法来求解方程组。

在给定网络接线,支路参数和量测系统的条件下,根据量测值求最优状态估计值的计算方法称为状态估计算法,它是状态估计程序的核心部分,因此状态估计算法的选择对整个状态估计程序的性能有很大的影响。

国内外学者对电力系统状态估计算法的研究最早追溯到二十世纪七十年代。

二十世纪七十年代是国外输电系统状态估计算法研究的鼎盛时期,美国、挪威、瑞典、英国等国家相继开展这方面的研究。最具代表性的算法有,美国麻省理工大学的许怀丕(F.C.Schweppe)等人提出的电力系统最基本解法——最小二乘(LS)状态估计算法^[1],美国电力公司道帕兹恩(J.F.Dopazo)等人提出的量测变换状态估计法^[28],美国邦那维尔电力系统拉森(R.E.Larson)和迪波斯(A.S.Debs)等人提出的卡尔曼逐次型状态估计算法等。目前,输电系统状态估计算法已经发展得较为成熟,并成为能量管理系统(EMS)中必不可少的重要环节。

1) 加权最小二乘法^[1]

1970年许怀丕(F.F.Schweppe)等人最早提出的电力系统最小二乘状态估计算法是最基本解法。它假设系统中所有量测量的误差严格服从正态分布,同时基于最小二乘准则,即以测量值和测量估计值之差的平方和最小为目标准则,求出满足目标函数最小的状态变量。算法特点是收敛性能好,估计质量高,对理想正态分布的观测值,估计具有最优一致且无偏等优良统计特性。然而由于这种算法的计算量和使用内存量比较大,计算速度较慢,因此难以用于大型电力系统的实时计算中。

2) 快速分解法^[25-27]

为了满足大型电力系统的需要,吸取岩本伸一潮流计算经验而建立了快速分解状态估计算法。它考虑到各个测量量的量测精度不同,使各个测量量各取一个权值,精度高的测量量权大一些,而精度低的测量量则权小一些,即采用了加权最小二乘准则。同时,充分利用电力系统物理上的性质,通过P-Q解耦将雅可比矩阵视为常数来处理,提高了计算速度。该算法还兼顾了收敛性、使用内存和对各种类型量测量的适应性等方面的优点,可以看成是基本加权最小二乘状态估计算法的实用形式。

3) 量测量变换法^[28-29]

七十年代美国电力公司(AEP)道帕思(J.F.Dopazo)等人提出的量测量变换状态估计算法,也属于最小二乘法的总体算法。用这种算法进行状态估计所需的原始信息仅含支路潮流测量量,将支路潮流测量量变换为对支路两端电压差的“量测”,并假设运行电压变化不大,最后得到与最小二乘法状态估计相类似的迭代修正公式,但其信息矩阵是常数、对称、实虚部统一的稀疏矩阵。这一算法特点是计算速度快,使用内存少和程序简单,仅用支路潮流测量量。然而,它难以处理结点注入型量测量(比如,结点电压,结点注入功率等),如果有功测量精度与无功测量精度不同,也难以处理。

4) 正交变换法^[30-31]

1980年以后,开始探讨数值稳定性较好的算法,如正交变换法。由于加权最小二乘法中增益矩阵的条件数是雅可比矩阵条件数的平方,因此加大了方程的病态性。正交变换法同样采用加权最小二乘准则,但它对增益矩阵进行正交化处理,降低了原问题的病态性质。目前状态估计中广泛采用吉文斯(Givens)正交变换法,可是程序设计过于复杂和计算速度慢,因此出现

豪斯荷德尔 (Householder) 正交变换法, 其优点是数值稳定性高, 收敛性好, 占有内存小, 克服吉文斯变换的上述不足。

以上的各种状态估计方法都适合于输电系统。基本加权最小二乘法收敛性能好, 平均迭代次数少, 估计质量高, 与系统的量测类型无关, 对各种量测类型的适应性最强, 对理想正态分布的观测值, 估计具有最优一致且无偏等优良统计特性, 是状态估计的经典解法和理论基础。快速分解法可以看成是基本加权最小二乘状态估计算法的实用形式。量测量变换法难以处理结点注入型量测量 (比如, 结点电压, 结点注入功率等) 且要求有功测量精度与无功测量精度相同。正交变换法数值稳定性较好但程序设计复杂。

1.3 本文工作

本文的研究工作是围绕对输电网 SCADA 系统的数据进行处理, 为能量管理系统 (EMS) 中各种功能模块提供完整而可靠的实时数据而展开的, 包括网络结构错误辨识、不良数据检测和辨识与状态估计算法三个方面, 具体工作如下:

- 1) 为解决 SCADA 系统中的遥信错误问题, 对网络结构错误辨识方法进行研究, 提出新的实用方法。
- 2) 为解决 SCADA 系统中的遥测不良数据导致状态估计不能收敛的问题, 提出实用的不良数据检测和辨识方法。
- 3) 采用基本加权最小二乘算法编制状态估计实用软件。
- 4) 完成包括网络结构错误辨识、不良数据检测和辨识及状态估计三个功能模块的 SCADA 系统数据处理软件的开发并用于实际工程。

第二章 网络结构错误辨识计算方法的研究

2.1 概述

在调度自动化系统（EMS/SCADA）中，如果开关遥信和开关实际位置不相符，则称为网络结构错误。网络结构错误辨识的完整概念应该包括：检测、估计、辨识和修正四个环节^[1]。

电力系统实时信息的正确性和高精度是 EMS 做出正确决策的基础和保证，但事实上，由于信息采集和传输的各个环节的精度和可靠性存在问题，如：远方终端（RTU）和通讯信道都可能出故障和干扰，在 SCADA 系统遥信数据中不可避免地会出现错误信息，需要进行信息重建。

目前应用最多的网络拓扑错误辨识方法是基于专家规则的启发式方法（即规则法）。规则法简单快速，在实际电网中得到了应用。但由于大规模电网十分复杂且变化频繁，难以建立完整的规则库，一些复杂的拓扑错误难以用简单的规则加以描述。而且在专家规则系统的推理过程中，认为各个规则之间是等价的，无法对不确定信息进行科学的量化，因而对信息的使用不够合理、也不够全面，经常错判或漏判，辨识能力尚不如调动人员的人工判断。

清华大学的孙宏斌教授首先将信息理论用于网络拓扑错误辨识^[32-36]，把辨识过程看成是一个广义的信道重建过程，通过建立广义的信道模型，对电力系统中的离散概率型信息进行了科学的量化，提出了基于信息量损失最小的拓扑错误辨识方法。该方法能够科学地综合利用遥测、遥信、电网结构、运行方式等多方面的信息，但是所提出的模型需要求解大规模混合整数规划问题，在线应用有困难。

本章针对开关遥信所具有的局部特征，归纳了用于拓扑错误辨识的三种局部网络模式，当网络拓扑发生错误时，这三种局部模式就能概括主要的遥信错误情况。将遥信错误辨识所需要考虑的模拟量信息用布尔变量表示，推导了服从 0-1 分布的信源和二元对称信道的信息量损失公式。提出了基于信息量损失最小的局部网络结构错误辨识的 0-1 整数规划模型。该数学模型把遥测量的连续信道模型转化为简单的二元对称信道模型，将混合整数规划问题简化为 0-1 整数规划问题，从而降低求解问题的规模和计算量。

2.2 局部网络模式

电力系统一般规模都比较大，SCADA 系统采集上来的遥信遥测量数目众多，但实际的拓扑错误都是发生在电网局部。所以根据检测出的可疑遥信量类型的不同确定相应的范围，可以在局部范围内进行拓扑错误辨识。

本文对电力系统网络进行了分析，归纳了三种用于局部拓扑错误辨识的局部网络模式。当网络拓扑发生错误时，这三种局部模型就能概括主要的遥信错误情况。

在以下模式中，布尔变量 $z_{d,i}$ 表示从 SCADA 系统采集得到的第 i 遥信量，“1”表示“合”状态，“0”表示“分”状态。模拟量 $z_{m,i}$ 表示从 SCADA 系统采集得到的第 i 个遥测量，其值为有功功率。

下面定义遥测布尔变量 $z_{a,i}$ 为:

$$z_{a,i} = \begin{cases} 1 & \text{当 } z_{m,i} \neq 0 \text{ 时} \\ 0 & \text{当 } z_{m,i} = 0 \text{ 时} \end{cases} \quad (2-1)$$

这样就将网络结构辨识所需要的遥测信息用 0, 1 变量表示出来了。

1) 输电线路断路器模型

线路断路器遥信信息错误辨识主要与如图 2-1 所示的局部网络中所提供的信息量有关, 因此定义该局部网络为输电线路断路器遥信错误辨识局部网络。假设 CB1 和 CB2 对应的遥信量分别为 $z_{d,1}$ 和 $z_{d,2}$, $z_{d,i}$ 取值为 1 或 0, 分别表示开关的断开或合闸状态。线路首末端有功功率量测值分别为 $z_{m,1}$ 和 $z_{m,2}$ 。

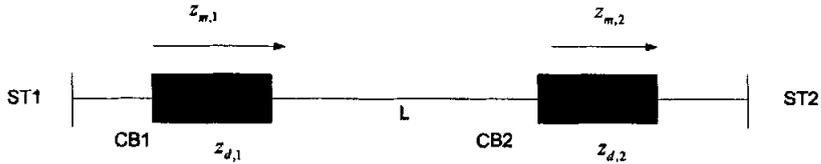


图 2-1 输电线路断路器遥信错误辨识局部网络示意图

2) 线路和母线关联开关刀闸模型

由于双母线接线不仅要判断断路器的合/分, 而且要判断该出线与哪条母线连接, 还必须考虑刀闸的状态。所有采用的模型应该包括断路器、两个刀闸, 其局部网络如图 2-2 所示。假设 CB1、CB2 和 CB3 对应的遥信量分别为 $z_{d,1}$ 、 $z_{d,2}$ 和 $z_{d,3}$, $z_{d,i}$ 取值为 0 或 1 分别表示开关或刀闸的断开或合闸状态。CB1 上的有功功率量测值分别为 $z_{m,1}$ 。

3) 断路器变压器模型

变压器遥信信息错误辨识主要与变压器高中低各侧的断路器状态和流过各断路器的功率量测有关, 所以变压器遥测信息错误辨识局部网络模型如下图 2-3 所示, 假设 CB1、CB2 和 CB3 对应的遥信量分别为 $z_{d,1}$ 、 $z_{d,2}$ 和 $z_{d,3}$, $z_{d,i}$ 取值为 0 或 1 分别表示开关或刀闸的断开或合闸状态。CB1、CB2 和 CB3 开关上的有功功率量测值分别为 $z_{m,1}$ 、 $z_{m,2}$ 和 $z_{m,3}$ 。

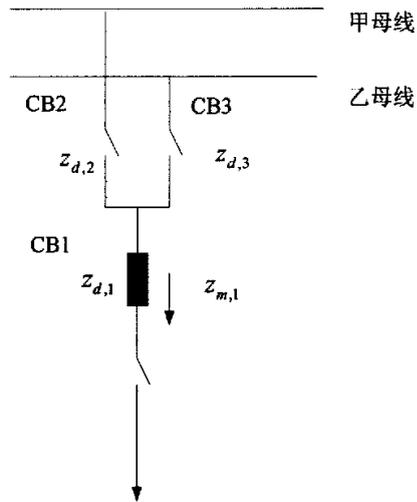


图 2-2 线路和母线关联开关刀闸模型

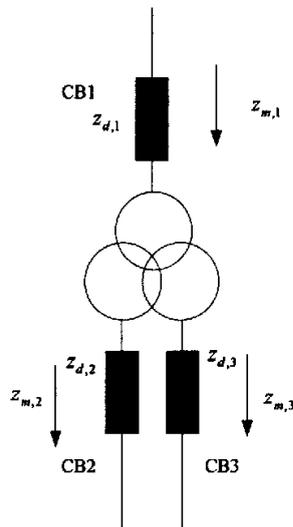


图 2-3 开关变压器模型

2.3 基于信息量损失最小的局部网络结构错误辨识

本节首先介绍了信息理论基础，然后重点介绍了基于信息量损失最小的局部网络结构辨识模型，最后给出了算例验证了方法的有效性。

2.3.1 信息理论基础

- 1) 离散信源的信息量和信息量损失^{[32-36] [38-40]}

设有一个离散随机变量（信源） X ，它有 K 个可能取值，分别为 a_1, a_2, \dots, a_K ，它的分布列或密度矩阵为：

$$\begin{pmatrix} X \\ P(X) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & \cdots & a_K \\ p(a_1) & p(a_2) & \cdots & p(a_K) \end{pmatrix} \quad (2-2)$$

式中， $\sum_{k=1}^K p(a_k) = 1$ ， $p(a_k)$ 为 X 取值为 a_k 的概率。

对概率空间 X ，其事件 a_k 发生所含有的自信息量 $I(a_k)$ 定义为：

$$I(a_k) = -\log p(a_k) \quad (2-3)$$

式中， $p(a_k)$ 是事件 a_k 发生的先验概率。 $I(a_k)$ 代表两种含义：当事件 a_k 发生以前，表示事件 a_k 发生的不确定性；当事件 a_k 发生以后，表示事件 a_k 所含有（或所提供）的信息量。

由式 (2-3) 可知，自信息 $I(a_k)$ 是指某一信源发出某一消息所含有的信息量，它描述了信源中单一消息 a_k 的信息量。于是，所发出的消息不同，它们所含有的信息量也就不同。 $p(a_k)$ 概率值越大，则 $I(a_k)$ 就越小，即信源发出 $X = a_k$ 事件所含有的信息量就越小。

在信息决策中，判断 $X = a_k$ 时的信源的信息量损失值定义为：

$$I_{loss.S.k} = I(a_k) - I(a_L) = \log \frac{p(a_L)}{p(a_k)} \geq 0 \quad (2-4)$$

式中， $p(a_L) = \max\{p(a_1), p(a_2), \dots, p(a_K)\}$ 为输入随机变量 X 取值概率最大的状态 a_L 所对应的概率，则由式 (2-3) 必有： $I(a_L) = \min\{I(a_1), I(a_2), \dots, I(a_K)\}$ ，即为自信息量的下限值。

2) 离散信道的信息量和信息量损失

离散信道的模型如图 2-4 所示，图中输入信号 X 和输出信号 Y 均用随机变量表示， X 分布如式 (2-2)， Y 分布如式 (2-5)：

$$\begin{pmatrix} Y \\ P(Y) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 & b_2 & \cdots & b_J \\ p(b_1) & p(b_2) & \cdots & p(b_J) \end{pmatrix} \quad (2-5)$$

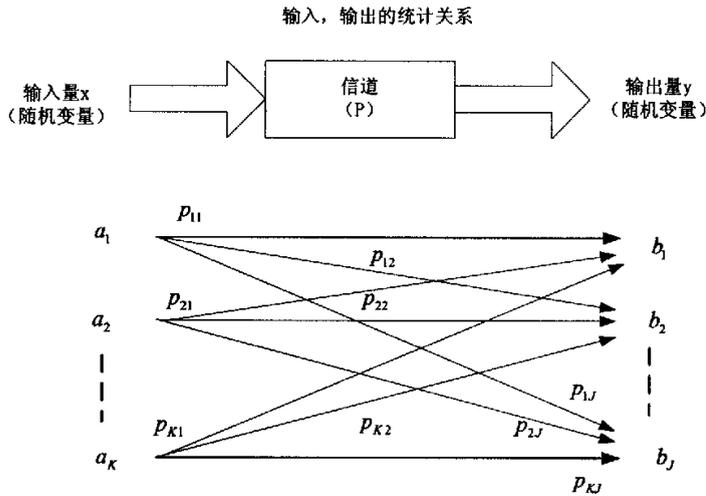


图 2-4 离散信道模型

图中, P 称为信道的概率转移矩阵或传输矩阵, 它描述了输入信号与输出信号直接的统计依赖关系, 表达式如下所示:

$$P = \begin{bmatrix} p(b_1|a_1) & p(b_2|a_1) & \cdots & p(b_j|a_1) \\ p(b_1|a_2) & p(b_2|a_2) & \cdots & p(b_j|a_2) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ p(b_1|a_K) & p(b_2|a_K) & \cdots & p(b_j|a_K) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1J} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2J} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ p_{K1} & p_{K2} & \cdots & p_{KJ} \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

式中, $p(y/x)$ 称为信道的转移概率或传递概率, 且满足:

$$\sum_{j=1}^J p(b_j|a_i) = 1 \quad i = 1, 2, \dots, K$$

表示当信道输入为 $x = a_i$ 时, 信道输出 y 一定是 b_1, b_2, \dots, b_j 中的一个。

根据贝叶斯定律可得:

$$p(a_i|b_j) = \frac{p(a_i b_j)}{p(b_j)} = \frac{p(a_i) p(b_j|a_i)}{\sum_{i=1}^K p(a_i) p(b_j|a_i)} \quad i = 1, 2, \dots, K \quad j = 1, 2, \dots, J$$

且得:

$$\sum_{i=1}^K p(a_i|b_j) = 1 \quad j = 1, 2, \dots, J$$

该式说明, 在信道输出端接收到任意符号 b_j 一定式输入符号 a_1, a_2, \dots, a_K 中的某一

个。

$p(a_i)$ 为输入符号的先验概率，即信源发出 a_i 的概率。

$p(a_i|b_j)$ 称为后验概率，它表示接收端收到消息（符号） b_j 后，发送端发的是 a_i 的概率。

那么，接收端收到 b_j 后，发送端发送的是否是 a_i 尚存在的不确定性应是后验概率的函数，即 $-\log p(a_i|b_j)$ 。于是，收信者在收到消息（符号） b_j 后，已经消除的不确定性为：先验的不确定性减去尚存在的不确定性，这就是收信者获得的信息量。

所以，对概率空间 X 和 Y ， X 的消息（符号） a_i 和 Y 的消息（符号） b_j 之间的互信息定义为：

$$I(a_i; b_j) = \log \frac{1}{p(a_i)} - \log \frac{1}{p(a_i|b_j)} = \log \frac{p(a_i|b_j)}{p(a_i)} \quad (2-7)$$

式(2-7)表示已知随机变量 Y 取值为 b_j 后所获得的关于 X 取值为 a_i 的信息量，也就是 b_j 发生后关于 a_i 不确定性减少的程度。

$$\text{由 } \log \frac{p(a_i|b_j)}{p(a_i)} = \log \frac{p(b_j|a_i)}{p(b_j)} \quad , \text{ 可得:}$$

$$I(a_i; b_j) = \log \frac{1}{p(a_i)} - \log \frac{1}{p(a_i|b_j)} = \log \frac{p(a_i|b_j)}{p(a_i)} = \log \frac{p(b_j|a_i)}{p(b_j)} \quad (2-8)$$

在信息系统中接收端观测到的事件 $Y=b_j$ 发生，则观测者判断发送端事件 $X = a_k$ 发生时获得的信息量为 $I(a_k; b_j)$ 。于是，观测者判断信源发出的消息不同，所获得的信息量也就不同。

设 $p_{Mj} = \max \{p(b_j|a_1), p(b_j|a_2), \dots, p(b_j|a_K)\} = \max \{p_{1j}, p_{2j}, \dots, p_{Kj}\}$ ，则由式 (2-8) 必有： $I(a_M; b_j) = \max \{I(a_1; b_j), I(a_2; b_j), \dots, I(a_K; b_j)\}$ 。这就说明当接收端收到的消息（符号）为 b_j 时，判断发送端发出的是 a_M 时收信者获得的信息量最大，即上限值为 $I(a_M; b_j)$ 。

当接收端收到消息为 b_j 时判断发送端发出的消息是 a_k 时的信道的信息量损失值定义为：

$$I_{loss.C.kj} = I(a_M; b_j) - I(a_k; b_j) = \log \frac{p_{Mj}}{p_{kj}} \geq 0 \quad (2-9)$$

3) 信息量总损失的计算方法

综合信源和信道，在信息决策中，观测到事件 $Y=b_j$ ，判断 $X = a_k$ 时的信息量总损失值为：

$$I_{loss.kj} = I_{loss.S.k} + I_{loss.C.kj} \quad (2-10)$$

在实际的系统决策应用中，设有 K 个独立的信源和 J 个观测独立的信道输出。这时计算信息量总损失时，信源信息量和信道信息量可以分别累加，最后总加在一起，则信息量总损失为：

$$I_{loss} = \sum_{k=1}^K I_{loss.S.k} + \sum_{j=1}^J I_{loss.C.j} \quad (2-11)$$

4) 服从 0-1 分布的信源和二元对称信道的信息量损失值计算公式

下面推导对服从 0-1 分布的信源信息量损失值计算公式和二元对称信道的信息量损失值计算公式。

(1) 服从 0-1 分布的信源信息量损失计算

若随机变量 X 服从 0-1 分布, 概率分布见式 (2-12), 其中 q 为 $X = 1$ 的概率, 为先验概率。

$$\begin{pmatrix} X \\ p(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1-q & q \end{pmatrix} \quad (2-12)$$

根据信源信息损失计算公式 (2-4), 有以下两种情况:

① 当 $q \geq 0.5$ 时, 判断事件 $X = 0$ 发生时信息量损失值 $I_{loss.S.0}$ 为:

$$I_{loss.S.0} = \log \frac{p(a_L)}{p(a_k)} = \log \frac{q}{1-q}$$

判断事件 $X = 1$ 发生时信息量损失值 $I_{loss.S.1}$ 为:

$$I_{loss.S.1} = \log \frac{p(a_L)}{p(a_k)} = \log \frac{q}{q} = 0$$

② 当 $q < 0.5$ 时, 判断事件 $X = 0$ 发生时信息量损失值 $I_{loss.S.0}$ 为:

$$I_{loss.S.0} = \log \frac{p(a_L)}{p(a_k)} = \log \frac{1-q}{1-q} = 0$$

判断事件 $X = 1$ 发生时信息量损失值 $I_{loss.S.1}$ 为:

$$I_{loss.S.1} = \log \frac{p(a_L)}{p(a_k)} = \log \frac{1-q}{q}$$

综合上述两种情况, 可以得到 0-1 分布信源的信息量损失值 $I_{loss.S}$ 为:

$$I_{loss.s} = \begin{cases} (x-1)^2 \log \frac{q}{1-q} & \text{当 } q \geq 0.5 \text{ 时} \\ x \log \frac{1-q}{q} & \text{当 } q < 0.5 \text{ 时} \end{cases} \quad (2-13)$$

(2) 二元对称信道的信息量损失计算

二元对称信道 (BSC) 是针对输入输出随机变量取值仅为 0 或 1 的特殊信道, 即输入信号 $X = [a_1, a_2] = [0, 1]$, 输出信号 $Y = [b_1, b_2] = [0, 1]$ 。

设 BSC 信道的正确率为 p , 则有转移概率:

$$p(b_1|a_1) = p(0|0) = p \quad p(b_2|a_1) = p(1|0) = 1-p$$

$$p(b_1|a_2) = p(0|1) = 1-p \quad p(b_2|a_2) = p(1|1) = p$$

于是, 可得 BSC 的信道转移概率矩阵 P 为:

$$P = \begin{bmatrix} p & 1-p \\ 1-p & p \end{bmatrix}$$

信道转移图如图 2-5 所示:

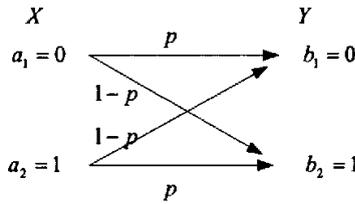


图 2-5 二元对称信道

当信道的正确率 $p > 0.5$ 。由转移概率矩阵 P 和前面所述的信道信息量损失计算公式(2-9), 我们可知:

- ① 当事件 $Y = b_1 = 0$ 发生时判断 $X = a_1 = 0$ 事件发生, 此时信道的信息量损失为:

$$I_{loss.C.11} = \log \frac{p}{p} = 0$$

- ② 当事件 $Y = b_2 = 1$ 发生时判断 $X = a_1 = 0$ 事件发生, 此时信道的信息量损失为:

$$I_{loss.C.12} = \log \frac{p}{1-p}$$

③ 当事件 $Y = b_1 = 0$ 发生时判断 $X = a_2 = 1$ 事件发生, 此时信道的信息量损失为:

$$I_{loss.C.21} = \log \frac{p}{1-p}$$

④ 当事件 $Y = b_2 = 1$ 发生时判断 $X = a_2 = 1$ 事件发生, 此时信道的信息量损失为:

$$I_{loss.C.22} = \log \frac{p}{p} = 0$$

综合上述四种情况, 可以得到, 在信道的正确率 $p > 0.5$ 的条件下, 当事件 $Y = b$ 发生时判断事件信道输入 $X = a$, 信道的信息量损失值 I_{loss} 为:

$$I_{loss} = (b - a)^2 \log \frac{p}{1-p} \quad (2-14)$$

2.3.2 基于信息量损失最小的局部拓扑错误辨识模型

在网络拓扑错误辨识中, 我们的已知条件是 SCADA 系统采集上来的各种信息, 包括遥信信息 (开关或刀闸状态), 遥测信息 (线路功率)。我们的目的是对已知的这些数据进行分析 and 决策, 再生出电力系统真实的运动状态和本质性的规律, 即得到电力系统真实的拓扑状态。这也就是信息理论中所谓的“广义的信息重建”的过程。在广义的信息重建过程中, 一方面通过估计和辨识, 可以提高电力信息的可靠性; 另一方面提取和再生更本质和规律性的信息, 提高信息系统的智能性^[32-36]。

所以对于离散概率型的电力信息, 我们可以建立如图 2-4 所示的信道模型, 其中输入量 X 是“电力系统真实的运动状态或本质规律”, 概率分布见式 (2-2), 输出量 Y 是“电力信息系统直接采集的数据”, 概率分布见式 (2-5)。若 X 和 Y 之间的依存关系可以描述为一种统计关系, 即 $p(y/x)$ 已知, 则可采用信道的概率转移矩阵 P 描述, 如式 (2-6) 所示。在拓扑错误辨识过程中, 信道的输入量 (信源) X 是被测量的真实值, 信道的输出量 Y 是从 SCADA 采集上来的得到的量测值。以上所述的广义信道的信息重建过程就是利用所观测到的数据 Y 来求解 X 的过程, 即根据遥信量、遥测量求解得到系统的真实的拓扑状态。

1) 目标函数

(1) 向量定义

下面先介绍本文将要用到的各个向量名称及其含义。

遥信量向量: $Z_d = [z_{d,1}, z_{d,2}, \dots, z_{d,i}]^T$, $z_{d,i}$: 第 i 个遥信量测值, Z_d 可看作遥信信道的输出矢量。

实际开关状态向量: $X_d = [x_{d,1}, x_{d,2}, \dots, x_{d,i}]^T$, $x_{d,i}$: 需要求解的第 i 个遥信量状态, 取值为 1 或 0, 表示开关的合或分状态。

遥信信道正确率向量： $\mathbf{P} = [p_1, p_2, \dots, p_l]^T$ ， p_i ：第 i 个遥信量的遥信信道分合(1: 合; 0: 分)的正确率，一般情况下 $p_i > 0.5$ 。

开关闭合的先验概率向量 $\mathbf{Q} = [q_1, q_2, \dots, q_j]^T$ ， q_j ：第 j 个遥信量（开关或刀闸）状态为合的先验概率。

有功遥测量向量 $\mathbf{Z}_m = [z_{m,1}, z_{m,2}, \dots, z_{m,K}]^T$ ， $z_{m,k}$ ：第 k 个遥信量测量值。

离散化有功遥测向量 $\mathbf{Z}_a = [z_{a,1}, z_{a,2}, \dots, z_{a,K}]^T$ ， $z_{a,k}$ ：第 k 个遥测离散值，当 $z_{m,k} \neq 0$ 时， $z_{a,k} = 1$ ；当 $z_{m,k} = 0$ 时， $z_{a,k} = 0$ 。

实际离散化有功遥测状态向量： $\mathbf{X}_a = [x_{a,1}, x_{a,2}, \dots, x_{a,K}]^T$ ， $x_{d,i}$ ：需要求解的第 i 个遥信量状态，取值为 1 或 0，表示遥测值的非零或零状态。

有功遥测信道正确率向量： $\mathbf{P}_a = [p_{a,1}, p_{a,2}, \dots, p_{a,K}]^T$ ， $p_{a,k}$ ：第 k 个遥测量的遥测信道(1: 非零; 0: 零)的正确概率，一般情况下 $p_{a,k} > 0.5$ 。

(2) 目标函数

由于已知信息存在不确定性，因此，任何一种决策方案的给出，都可能引起信息量的损失。从信息理论的意义讲，信息量损失最小的决策利用信息最为充分，因此，决策结果最为合理。所以我们选择信息量损失最小作为信息决策的优化目标，即：

$$\min I_{loss} \tag{2-15}$$

式中， I_{loss} 在决策中信息量的总损失。

拓扑错误辨识中，信息量损失包括三个方面：遥信信源信息量的损失、遥信信道信息量的损失和遥测信道信息量的损失。所以根据 (2-11) 式可将式(2-15)扩展，得到下式：

$$\min_x I_{loss} = \sum_{j=1}^J I_{s,j} + \sum_{i=1}^I I_{d,i} + \sum_{k=1}^K I_{a,k} \tag{2-16}$$

式中， $I_{s,j}$ 为第 j 个开关或刀闸的信源信息量损失值， $I_{d,i}$ 为第 i 个遥信量的信道信息量损失值， $I_{a,k}$ 为第 k 个遥测量的信道信息量损失值。 J 、 I 和 K 分别为开关和刀闸个数、SCADA 系统所获得的遥信个数和遥测个数，一般情况下有 $I = J$ 。

因为在电力系统中，开关状态只有闭合或断开两种状态，我们用 1 或 0 来表示，即遥信信源的取值只有 0 或 1 两种可能值，所以可以认为遥信信源都是服从 0-1 分布的随机变量，概率分布如式 (2-12) 所示。SCADA 采集到的遥信量即遥信信道的输出量 Y 也只有 1 或 0 两种可能取值，而且当前时刻的遥信量只与当前时刻的实际开关状态有关，与其他时刻的开关状态无关，所以遥信信道是二元对称信道。遥测量是模拟量，对应的是连续信道模型，信息量损失计算比较复杂。但是在拓扑错误辨识过程中，我们所关心的是开关或刀闸上的潮流是否为零值。所以可以将潮流值（零或非零）转化为二进制值（0 或 1），把遥测量的连续信道模型转化为简单的二元对称信道模型，这样就将目标函数(2-16)由混合整数规划问题简化为 0-1 整数规划的求解问题。

下面介绍具体的计算公式。

由服从 0-1 分布的遥信信源信息损失公式 (2-13) 和二元对称离散信道的信息量损失公式 (2-14), 可得式 (2-16) 的具体计算公式如下所示:

$$\textcircled{1} I_{s,j} = \begin{cases} (x_{d,j} - 1)^2 \log\left(\frac{q_j}{1-q_j}\right) & \text{当 } q_j \geq 0.5 \text{ 时} \\ x_{d,j} \log\left(\frac{1-q_j}{q_j}\right) & \text{当 } 0 < q_j < 0.5 \text{ 时} \end{cases} \quad (2-17)$$

式中, $I_{s,j}$ 是第 j 个遥信量的信源信息量损失值;

$x_{d,j}$ 是待求的第 j 个遥信量状态估计值, 取值为 1 或 0, 表示开关的合或分状态;

q_j 是第 j 个遥信量 (开关或刀闸) 状态为合的先验概率。

由式 (2-17) 可以得到:

- a. 若 $q_j \geq 0.5$, 即“合”状态的先验概率较大。当遥信状态估计值 $x_{d,j}=0$ 时, 则 q_j 值越小遥信信源的信息量损失值 $I_{s,j}$ 就越小; 即在 $x_{d,j}=0$ 条件下, $I_{s,j}$ 是关于 q_j 的递增函数。
- b. 若 $q_j < 0.5$, 即“合”状态的先验概率较小。若遥信状态估计值 $x_{d,j}=1$ 时, 则 q_j 值越小遥信信源的信息量损失值 $I_{s,j}$ 就越大; 即在条件 $x_{d,j}=1$ 下, $I_{s,j}$ 是关于 q_j 的递减函数。

$$\textcircled{2} I_{d,i} = (z_{d,i} - x_{d,i})^2 \log\left(\frac{p_i}{1-p_i}\right) \quad (2-18)$$

式中, $I_{d,i}$ 是第 i 个遥信量的信道信息量损失值;

$z_{d,i}$ 是 SCADA 系统采集上来的第 i 个遥信量, 取值为 1 或 0, 表示开关的合或分状态;

$x_{d,i}$ 是待求的第 i 个遥信量状态估计值, 为待求量, 取值为 1 或 0, 表示开关的合或分状态;

p_i 是第 i 个遥信量的遥信信道正确率, 一般情况下 $p_i > 0.5$ 。

由式 (2-18) 可以得到:

若遥信量测值与估计值不一致, 即 $z_{d,i} \neq x_{d,i}$, 遥信信道正确率 p_i 越大, 则遥信量信道信息量损失值 $I_{d,i}$ 就越大, 即在 $z_{d,i} \neq x_{d,i}$ 的条件下, $I_{d,i}$ 是关于 p_i 的递增函数

$$\textcircled{3} I_{a,k} = (z_{a,k} - H_k(X_d)x_{a,k})^2 \log\left(\frac{p_{a,k}}{1-p_{a,k}}\right) \quad (2-19)$$

式中, $I_{a,k}$ 是第 k 个遥测信道信息量损失值;

$z_{a,k}$ 是 SCADA 系统采集上来的第 k 个遥测量 $z_{m,k}$ 所对应的 1 或 0 值, 为已知值

其中, 当 $z_{m,k} \neq 0$ 时, $z_{a,k}=1$; 当 $z_{m,k}=0$ 时, $z_{a,k}=0$ 。

$x_{a,k}$ 是待求第 k 个遥测量对应的离散状态量估计值, 与 $z_{a,k}$ 对应, 取值为 1 或 0

$p_{a,k}$ 是第 k 个遥测量信道（零与非零）的正确概率

$H_k(X_d)$ 是对应第 k 个待求遥测离散状态量 $x_{a,k}$ 的控制函数，为关于 X_d 的函数，具体表达式见下文。

(3) 控制函数 $H(X_d)$ 与开关关联约束条件

为了减小目标函数式 (2-16) 可行解的搜索范围，本文根据电力系统运行规律，利用实际运行方式中可能出现的开关刀闸组合状态模式作为目标函数的约束条件以便求解；而且由于待求开关状态矢量 X_d 和待求的有功遥测离散状态矢量 X_a 之间存在着约束关系，我们也可以利用两者之间的约束关系来缩小求解范围，因而在计算遥测信道信息量损失值的式(2-18)中设置了以 X_d 为自变量的 $H(X_d)$ ，本文称它为控制函数。

下面讨论不同模型的控制函数和约束条件表达式。

对图 2-1 所示的输电线路断路器模型，由于正常情况下，只有当 $CB1$ 和 $CB2$ 都闭合时， $z_{m,1}$ 和 $z_{m,2}$ 才有量测值，所以遥测离散状态量 $x_{a,1}$ ， $x_{a,2}$ 的控制函数为：

$$H_1(X_d) = H_2(X_d) = x_{d,1}x_{d,2} \quad (2-20)$$

约束条件：

$$s.t. : \begin{cases} x_{d,1} = x_{d,2} \\ x_{a,1} = x_{a,2} \\ x_{d,1} = x_{a,1} \end{cases} \quad (2-21)$$

对于图 2-2 所示的线路和母线关联开关刀闸模型，由于正常情况下，只有当 $CB1$ 闭合，而 $CB2$ 和 $CB3$ 两个刀闸中至少有一个闭合时， $z_{m,1}$ 才有量测值，所以离散遥测状态量 $x_{a,1}$ 的控制函数为：

$$H_1(X_d) = x_{d,1}(x_{d,2} \cup x_{d,3}) \quad (2-22)$$

约束条件：

$$s.t. : x_{d,1} = x_{a,1} \quad (2-23)$$

对于图 2-3 所示的断路器变压器模型，由于正常情况下，只有当 $CB1$ 闭合，而 $CB2$ 和 $CB3$ 两个开关中至少有一个闭合时， $z_{m,1}$ 才有量测值，所以遥测离散状态量 $x_{a,1}$ 的控制函数为：

$$H_1(X_d) = x_{d,1}(x_{d,2} \cup x_{d,3}) \quad (2-24)$$

只有当 $CB1$ 和 $CB2$ 同时闭合时， $z_{m,2}$ 才有量测值，所以遥测离散状态量 $x_{a,2}$ 的控制函数为：

$$H_2(X_d) = x_{d,1}x_{d,2} \quad (2-25)$$

只有当 $CB1$ 和 $CB3$ 同时闭合时, $z_{m,3}$ 才有量测值, 所以遥测离散状态量 $x_{a,3}$ 的控制函数为:

$$H_3(X_d) = x_{d,1}x_{d,3} \quad (2-26)$$

约束条件:

$$s.t. : \begin{cases} x_{d,1} = x_{a,1} \\ x_{d,2} = x_{a,2} \\ x_{d,3} = x_{a,3} \end{cases} \quad (2-27)$$

2.3.3 计算方法

通过上述讨论, 我们根据可疑遥信量的类型, 在局部范围内建立目标函数, 这样就降低了求解问题的规模和计算量, 所以可以运用求解小规模 0-1 规划问题的隐枚举法进行求解^[65]。

隐枚举法与穷举法有着根本的区别, 它不需要将所有可行的变量组合一一枚举。实际上, 在得到最优解时, 很多可行的变量组合并没有被枚举, 只是通过分析、判断, 排除了它们是最优解的可行性。

求解步骤:

- 1) 先用试探的方法找出一个初始可行解。假设有 $X_d^{(0)}$ 、 $X_a^{(0)}$ 满足目标函数式 (2-16) 的所有约束条件, 可选它们作为初始可行解, 设其目标函数值为 I_0 。
- 2) 对原有约束增加一个过滤条件。初始可行解的目标函数值为 $I = I_0$, 我们要寻找的是比初始可行解更好的可行解, 所以以目标函数 $I < I_0$ 作为过滤条件加到原有约束集中。
- 3) 求解问题。按照枚举法的思路, 依次检查各种变量的组合, 每找到一个可行解, 求出它的目标函数值 I_1 。若 $I_1 < I_0$, 则将过滤条件换成 $I < I_1$ 。

一般讲, 过滤条件是所有约束条件中关键的一个, 因而先检查它是否满足, 如不满足, 其它约束条件也就不再检查了 (不论这个变量的组合是否是可行解, 对我们都没有用了), 这样也就减小了计算工作量。

2.4 计算方法和步骤

算法流程图如图 2-6 所示, 具体步骤如下:

- 1) 对遥信量作预检测, 发现可疑遥信量。
- 2) 根据可疑遥信量类型的不同, 确定可疑遥信所属局部网络模型。
- 3) 在局部范围内运用 2.3 节所述基于信息量损失最小的局部网络结构错误辨识方法建立如式 (2-16) 目标函数。
- 4) 运用 2.3.3 节的隐枚举法对目标函数求解, 得到可疑遥信量的修正值。

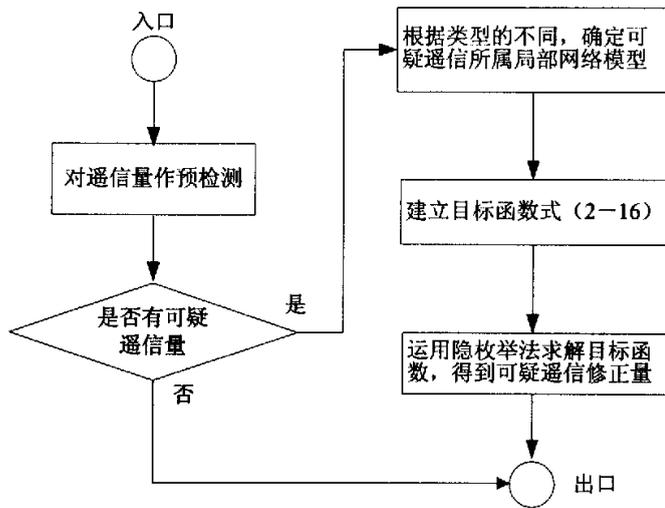


图 2-6 拓扑错误辨识流程图

2.5 算例

本文对输电线路断路器发生遥信错误设计了以下的条件来验证本章式 (2-16) 数学模型和计算方法的正确性。

模型图见图 2-1。设 SCADA 系统输出的信息：

- 1) CB1 遥信输出为“合”， $z_{d,1} = 1$ ；
CB2 遥信输出为“分”， $z_{d,2} = 0$ ；
- 2) CB1 对应的有功遥测 $z_{m,1} = 50MW$ ，对应的布尔变量 $z_{a,1} = 1$ ；
CB2 对应的有功遥测 $z_{m,2} = 0MW$ ，对应的布尔变量 $z_{a,2} = 0$ ；

在这种情况下，运用规则法遥信错误是不可辨识的，因为 SCADA 都正常， $50MW$ 认为 CB2 遥信错误， $0MW$ 认为 CB2 遥信正确，支持和反对的数量相同。

本文在对信源置不同先验概率，对信道置不同正确率的情况下，采用式 (2-16) 数学模型并用 lingo 仿真工具求解模型结果如下表 2-1 所示。

由表 2-1 可以看出，运用基于最小信息损失的局部拓扑错误辨识方法，根据遥信信源的先验概率、信道的正确率就可以辨识出错误的遥信量。讨论如下：

- 1) 当 CB1 和 CB2 开关为“合”的先验概率相同，遥信信道正确率相同，遥测信道正确率也相同，则修正遥信量时就可以相信开关为“合”的先验概率。例如：情况 1 开关先验概率都为 0.7，遥信信道正确率相同都为 0.9，遥测信道正确率相同都为 0.9，计算结果为 $x_{d,1} = 1$ ， $x_{d,2} = 1$ ，即 CB1 和 CB2 开关状态都为“合”。但是情况 2 与情况 1 相比，只有开关先验概率不同，其它都相同，计算结果为 $x_{d,1} = 0$ ， $x_{d,2} = 0$ ，即 CB1 和 CB2 开关状态都为“分”。
- 2) 当 CB1 和 CB2 开关为“合”的先验概率相同，遥信信道正确率相同，只有遥测信道正确率不同，则修正遥信量时就可以相信遥测信道正确率。例如：情况 3、4 中，

开关先验概率都为 0.7，遥信信道正确率相同都为 0.9；情况 3 中 $z_{a,1} = 1$ 遥测信道正确率大于 $z_{a,2} = 0$ 遥测信道正确率，计算结果为 $x_{d,1} = 1$ ， $x_{d,2} = 1$ ，即 CB1 和 CB2 开关状态都为“合”。情况 4 中 $z_{a,2} = 0$ 遥测信道正确率大于 $z_{a,1} = 1$ 遥测信道正确率，计算结果为 $x_{d,1} = 0$ ， $x_{d,2} = 0$ ，即 CB1 和 CB2 开关状态都为“分”。

表 2-1 输电线路开关状态辨识修正结果状态表

序 号	开关状态为“合” 的先验概率		遥信信道 正确率		遥测信道 正确率		SCADA 输出 遥信量		计算结果	
	CB1 为 为“合” 的先验 概率 q_1	CB2 为 “合”的 先验概 率 q_2	$z_{d,1}=1$ 的正确 率 p_1	$z_{d,2}=0$ 的正确 率 p_2	$z_{a,1}=1$ 的正确 率 $p_{a,1}$	$z_{a,2}=0$ 的正确 率 $p_{a,2}$	$z_{d,1}$ 与 $z_{a,1}$ 值	$z_{d,2}$ 与 $z_{a,2}$ 值	$x_{d,1}$	$x_{d,2}$
1	0.7	0.7	0.9	0.9	0.9	0.9	1	0	1	1
2	0.4	0.4	0.9	0.9	0.9	0.9	1	0	0	0
3	0.7	0.7	0.9	0.9	0.9	0.6	1	0	1	1
4	0.7	0.7	0.9	0.9	0.6	0.9	1	0	0	0
5	0.4	0.4	0.9	0.9	0.9	0.6	1	0	1	1
6	0.4	0.4	0.9	0.9	0.6	0.9	1	0	0	0
7	0.7	0.4	0.9	0.9	0.9	0.9	1	0	1	1
8	0.7	0.4	0.9	0.9	0.9	0.6	1	0	1	1
9	0.7	0.4	0.9	0.9	0.6	0.9	1	0	0	0
10	0.4	0.7	0.9	0.9	0.9	0.9	1	0	1	1
11	0.4	0.7	0.9	0.9	0.9	0.6	1	0	1	1
12	0.4	0.7	0.9	0.9	0.6	0.9	1	0	0	0

2.6 本章小结

本文基于开关遥信所具有的局部特征，归纳了三种局部网络模式用来表达各类遥信量错误所需要的信源（发）和信漏（收）。在局部网络模式中将遥信错误辨识所需要的模拟量信息用布尔变量表示使所有信源转化成 0-1 分布。文中推导了服从 0-1 分布的信源和二元对称信道的信息量损失公式，在此基础上提出了基于信息量损失最小的局部网络结构错误辨识 0-1 整数规划模型。运用 Lingo 软件对该模型进行了遥信错误辨识的模拟计算，模拟算例表明本文提出的数学模型能够对可疑遥信量进行辨识和修正，并且大幅度地降低了求解问题的规模和计算量。

第三章 不良数据的检测与辨识计算方法的研究

本章提出了节点功率不平衡度均值检验法。该方法包括两个方面，一是对 SCADA 系统中的所有网络节点进行分级，二是对各级节点所关联的遥测功率进行节点功率不平衡度均值检验和不良数据修正。

下面首先介绍假设检验的统计量“节点功率不平衡度”、节点功率不平衡度均值检验方法和不良数据的修正方法，然后介绍节点分级的概念和方法。

3.1 基于节点功率不平衡度均值检验的不良数据检测方法

本节首先定义节点功率不平衡度随机变量，根据节点不平衡度的随机特性，用均值检验算法对各节点进行不良数据检验；然后利用电力系统正常运行时不同时刻同一点的采样值具有时间上的延续性的特点进行可疑数据的修正。为了使得节点功率不平衡度均值检验方法能够发挥更好的作用，避免出现漏检、重复检测现象，提高不良可疑数据检测与辨识的成功率和效率，本文还提出系统节点分级方法，利用电力系统正常运行时同一时刻的采样数据之间具有相关性的特点，用广度搜索方法把网络节点分为若干级别，并对所有节点根据级别由低到高，逐级逐点检测并初步修正可疑不良数据。

3.1.1 节点功率平衡检测、辨识与修正

1) 节点功率平衡检测

定义：节点 N_{ij} 的注入有功功率与流出有功功率之和为该节点有功不平衡量 $\Delta P_{N_{ij}}$ ，表达式为：

$$\Delta P_{N_{ij}} = \sum_{k \in B} p_k \tag{3-1}$$

式中，集合 B 为与节点 N_{ij} 关联的支路有功量测集， p_k 为 B 中的第 k 个元素。对于节点 N_{ij} ，集合 B 对应的所有功率量测值遵循流入为正，流出为负的原则。设 B 集中没有不良数据，根据 KCL 定律， $\Delta P_{N_{ij}}$ 应接近于零。

对于整个网络，按照广义 KCL 定理^[43]将其作为一个广义节点，计算它的有功不平衡量时必须考虑系统总的网损率 α ，则有功不平衡量 ΔP_0 为：

$$\Delta P_0 = (1 - \alpha) \sum_{k \in B} p_k \tag{3-2}$$

定义：节点 N_{ij} 有功不平衡量与节点注入有功功率之比为该节点有功不平衡度 $\varepsilon_{N_{ij}}$ ，表达式如下：

$$\varepsilon_{Nij} = \frac{\Delta P_{Nij}}{\sum_{k \in T} p_k} \quad (3-3)$$

式中, T 为节点 N_{ij} 注入功率对应的量测集合。设 B 集中没有不良数据, 根据 KCL 定律, ε_{Nij} 应接近于零。

ε_{Nij} 为随机变量, ε_{Nij} 的概率分布具有以下规律:

- (1) 不同大小的 ε_{Nij} 出现的概率不同, ε_{Nij} 较小值出现比 ε_{Nij} 较大值出现的概率大, 极大 ε_{Nij} 出现的概率很小。
- (2) ε_{Nij} 的分布曲线对称于 μ_{Nij} 值。

本文认为 ε_{Nij} 服从参数为 μ_{Nij} 、 σ_{Nij} 的正态分布, 即 $\varepsilon_{Nij} \sim N(\mu_{Nij}, \sigma_{Nij}^2)$ 。一般情况下, $\mu_{Nij} = 0$, 下面讨论都是在 $\varepsilon_{Nij} \sim N(0, \sigma_{Nij}^2)$ 情况下进行的。

对于任意的正态分布的随机变量 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$, 由拉普拉斯表可查出:

$$P\{|X - \mu| < \sigma\} = 0.6827$$

$$P\{|X - \mu| < 2\sigma\} = 0.9545$$

$$P\{|X - \mu| < 3\sigma\} = 0.9973$$

所以有下列各式成立:

$$P\{|\varepsilon_{Nij}| < \sigma_{Nij}\} = 0.6827$$

$$P\{|\varepsilon_{Nij}| < 2\sigma_{Nij}\} = 0.9545$$

$$P\{|\varepsilon_{Nij}| < 3\sigma_{Nij}\} = 0.9973$$

由 ε_{Nij} 的性质, 我们可以按照假设检验的方法, 利用 ε_{Nij} 值判断集合 B 中是否存在可疑不良数据。

给出两个假设:

H_0 : 集合 B 中没有可疑不良数据

H_1 : 集合 B 中存在可疑不良数据

可疑不良数据的检验就变成检验 H_0 是否成立。

设定置信度 η , η 一般取 0.9 或 0.95, 则由 $P\{|\varepsilon_{Nij}| < z\} = \eta$, 就可得到检测阈值 z 。

当确定了检测阈值 z 之后, 如果某次采样计算得到的 $|\varepsilon_{Nij}| < z$, 就认为 H_0 属真, 并接受 H_0 假设; 反之, 若 $|\varepsilon_{Nij}| \geq z$, 就认为 H_0 不真 (即认为集合 B 中存在可疑不良数据) 而拒绝 H_0 假设, 转而接受 H_1 假设。

2) 辨识与修正方法

假如集合 B 中存在可疑不良数据, 即 $|\varepsilon_{Nij}| < z$ 不成立, 则有:

(1) 当 $\varepsilon_{Nij} \geq z$ 时, 即注入量大于流出量, 可以通过减小注入量, 增大流出量的方式达到功率平衡。由于集合 B 中量测值遵循注入为正, 流出为负的原则, 所以具体的措施是把相应的注入量和流出量都向下限值方向调整。

(2) 当 $\varepsilon_{Nij} \leq -z$ 时, 即注入量小于流出量, 可以通过增大注入量, 减小流出量的方式达到功率平衡。由于集合 B 中量测值遵循注入为正, 流出为负的原则, 所以具体的措施是把相应的注入量和流出量都向上限值方向调整。

假设集合 B 有 K 个元素, p_k 为其中的第 k 个元素, p_{km} 为 p_k 的均值, p_{km} 由多次采样计算得到。定义绝对偏差量 $\Delta\varepsilon_k$, $\Delta\varepsilon_k$ 为 p_k 与其均值 p_{km} 偏差的绝对值, 计算公式如下:

$$\Delta\varepsilon_k = |p_k - p_{km}|, \quad k = 1, 2, \dots, K \tag{3-4}$$

$\Delta\varepsilon$ 值大的元素, 它偏离正常值较远, 为可疑不良数据的概率比较大, 修正可疑数据时优先级别最高, 最先进行修正。所以按照绝对偏差量 $\Delta\varepsilon$ 值从大到小的顺序对 B 中元素重新进行排列, 得到 K 维向量 N_B 。修正时先对 N_B 中的第一个元素进行修正, 然后判断 $|\varepsilon_{Nij}| < z$ 是否成立。若 $|\varepsilon_{Nij}| < z$ 不成立, 则对 N_B 中的第一、二个元素进行修正, 再做判断, 依次进行, 直到满足 $|\varepsilon_{Nij}| < z$ 式。

具体修正过程如下:

定义 K 维向量 N_L , 向量 N_L 中的元素值对应 N_B 中每个元素允许的可调整量的最大值。 N_L 向量如式:

$$N_L = [L_1 \quad L_2 \quad \dots \quad L_k \quad \dots \quad L_K]$$

式中, L_k 表示向量 N_B 中的第 k 个元素 p_k 的可调量的极大值, 满足下式:

$$L_k = \begin{cases} 0 & |\varepsilon_{Nij} - \mu_{Nij}| < z \\ p_k - p_{k \min} & \varepsilon_{Nij} \geq \mu_{Nij} + z \\ p_{k \max} - p_k & \varepsilon_{Nij} < \mu_{Nij} - z \end{cases} \tag{3-5}$$

上式中, $p_{k \max}$ 、 $p_{k \min}$ 为 p_k 采样值的上下限值。

定义功率调整系数向量 P_L , P_L 的维数 S 不确定, 可以是 1 至 K 中的任意一个数。

$$P_L = [l_1 \quad l_2 \quad \dots \quad l_s \quad \dots \quad l_S]$$

其中:

$$l_s = \frac{L_s}{\sum_{s=1}^S L_s} \tag{3-6}$$

由 P_L 的定义我们可知 l_s 描述了每个量测量所允许的可调节量 L_s 与可调整量总和之间的比值。所以可将节点 N_{ij} 的不平衡功率 $\Delta P_{N_{ij}}$ 按功率调整系数 l_s 分配到 N_B 前 S 个元素上, 如式 (3-7) 所示, 得到修正量 $p'_s = p_s + \Delta p_s$ 。式中, Δp_s 为 p_s 的修正量, $p_{s \max}$ 、 $p_{s \min}$ 分别为 p_s 采样值的上下限值, $s = 1, 2, \dots, S$ 。

$$\begin{cases} \Delta p_s = \Delta P_{N_{ij}} \cdot l_s \\ p_{s \min} \leq p_s + \Delta p_s \leq p_{s \max} \end{cases} \quad (3-7)$$

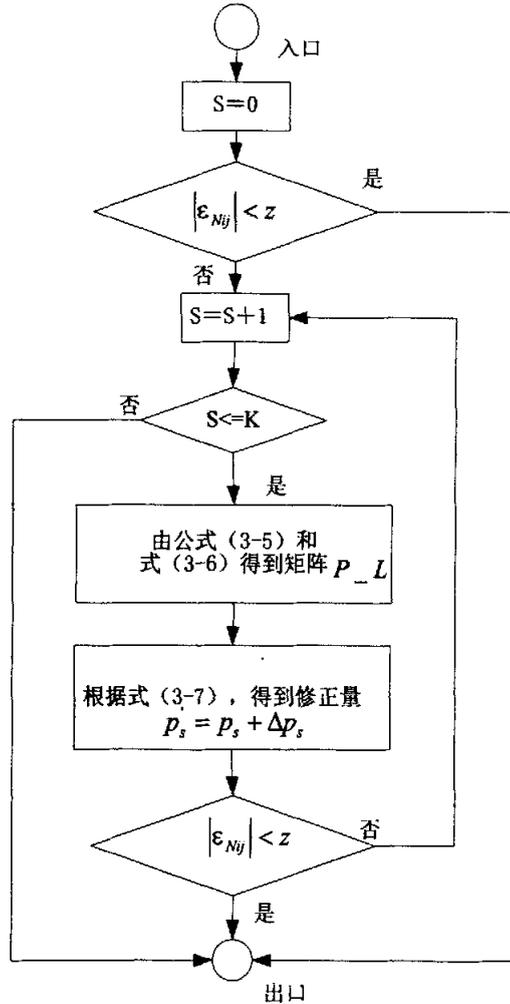


图 3-1 节点 N_{ij} 功率平衡检测和修正的流程图

修正步骤和流程图如图 (3-1) 所示:

- (1) 令 $S=0$;
- (2) 按照假设检验的方法判断 $|\epsilon_{N_{ij}}| < z$ 是否成立, 成立则退出, 否则继续下面步骤。

- (3) $S=S+1$, 并判断 $S \leq K$ 是否成立。
- (4) 取出 N_B 中前 S 个元素, 即令向量 P_L 维数为 S ; 由公式 (3-5) 和式 (3-6) 得到功率调整系数向量 P_L 。
- (5) 将节点 N_{ij} 的不平衡功率 $\Delta P_{N_{ij}}$ 按功率调整系数 l_s 分配到的 N_B 前 S 个元素上, 如式 (3-7) 所示, 则可得修正值 $p'_s = p_s + \Delta p_s$ 。
- (6) 根据修正值再按照假设检验的方法判断 $|\epsilon_{N_{ij}}| < z$ 是否成立, 成立则退出, 否则转到 (3)。

3.1.2. 节点分级方法

目前, 由于电力系统网络比较庞大, 节点数量较多, 为了使得节点功率不平衡度均值检验方法能够发挥更好的作用, 避免出现漏检、重复检测现象, 提高不良可疑数据检测与辨识的成功率和效率, 本文结合电力系统正常运行时同一时刻的采样数据之间具有相关性的特点, 提出了系统节点分级的概念和方法。从负荷节点开始逆潮流方向或从平衡节点开始顺潮流方向根据节点相互的关联关系, 采用广度搜索方法把网络节点分为若干级别。下面首先介绍信息矩阵(节点关联矩阵), 然后介绍具体的节点分级概念及方法。

1) 信息矩阵

(1) 支路节点关联矩阵 B_N

支路节点关联矩阵描述了支路与节点的关联关系, 假设某一系统的支路数为 $BranchN$, 则该系统的支路节点关联矩阵为:

$$B_N = \begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} \\ \vdots & \vdots \\ N_{i1} & N_{i2} \\ \vdots & \vdots \\ N_{BranchN1} & N_{BranchN2} \end{bmatrix}_{BranchN \times 2}$$

矩阵中 i 表示网络支路编号, 元素 N_{i1} 和 N_{i2} 分别表示第 i 条支路关联的两个节点的网络节点编号。

例如, 图 3-2 中所示系统的支路首末节点矩阵为:

$$B_N = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 7 & 8 & 8 & 10 & 11 & 10 & 11 & 9 & 9 & 12 & 13 & 13 & 12 \\ 4 & 5 & 4 & 5 & 6 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 15 & 15 & 14 & 14 & 12 & 13 & 16 & 16 & 17 & 17 \end{bmatrix}^T$$

(2) 节点级别矩阵 N_G

本文将狭义节点进行了级别的划分。节点级别矩阵描述了每个级别所包含的节点号和节点个数。

假设系统节点级别个数为 M ，即将系统的节点划分了 M 级级别。令属于第 i 级级别的节点个数 $n_i (i = 1, 2, \dots, M)$ ，取 $n = \max\{n_1, n_2, \dots, n_M\}$ ，则节点级别矩阵 N_G 为：

$$N_G = \begin{bmatrix} N_{11} & \dots & N_{1j} & \dots & N_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ N_{i1} & \dots & N_{ij} & \dots & N_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ N_{M1} & \dots & N_{Mj} & \dots & N_{Mn} \end{bmatrix}_{M \times n}$$

矩阵中的元素 N_{ij} 为某节点的网络节点编号， i 为该节点所在的节点级别号， j 为该节点所在级别的序列号。

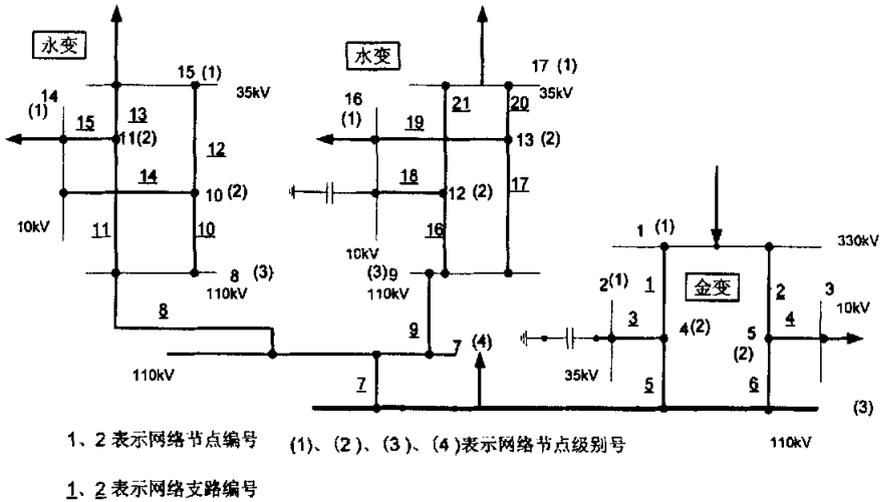


图 3-2 网络模型示意图

2) 节点级别定义和分级方法

定义节点级别：用 0 至 M 整数表示网络节点的级别，相同类型的节点其级别数相同。本文称处于 0 级级别的节点级别最高，检测与辨识时最优先考虑此类节点的功率平衡性。

定义 0 级节点：把整个系统看作一个广义节点，这个广义节点就称为 0 级节点。

定义 1 级节点：在电网中，有一类节点仅与系统内的另一个节点相关联，定义这类节点为 1 级节点。一般这类节点为负荷节点或功率注入节点。例如在图 3-2 中，水变的中低压侧负荷节点 16、17 节点，金变的高压侧功率注入节点 1 节点都为 1 级节点。

定义 2 级节点：与 1 级节点相关联的节点，其类型为变压器中性点。例如在图 3-2 中，水变的 12、13 节点，金变的 4、5 节点都为 2 级节点。

定义 3 级节点：与 2 级节点相关联的除去 1 级节点以外的节点。例如在图 3-2 中，水变的 9 节点，金变的 6 节点都为 3 级节点。

定义 M 级节点：与 M-1 级节点相关联的除去 M-2 级节点以外的节点。

采用广度优先搜索法从 1 级节点开始搜索，求与各节点有电气联系的节点，依次搜索，从而得到节点级别矩阵 N_G 。

搜索方法如下：从 1 级节点开始，根据网络拓扑分析生成的节点_支路关联表，得到与 1 级节点相关联的 2 级节点，记录这些节点号并作标记。再从 2 级节点开始各自搜索节点_支路关联矩阵，得到与 2 级节点相关联的未被标记的节点，这些未被标记的节点为 3 级节点，记录这些节点并作标记。按照上述方法依次搜索，直到所有的支路和节点搜索完毕。

以图 3-2 所示网络拓扑图为例说明说明搜索过程，其搜索过程如图 3-3 所示：

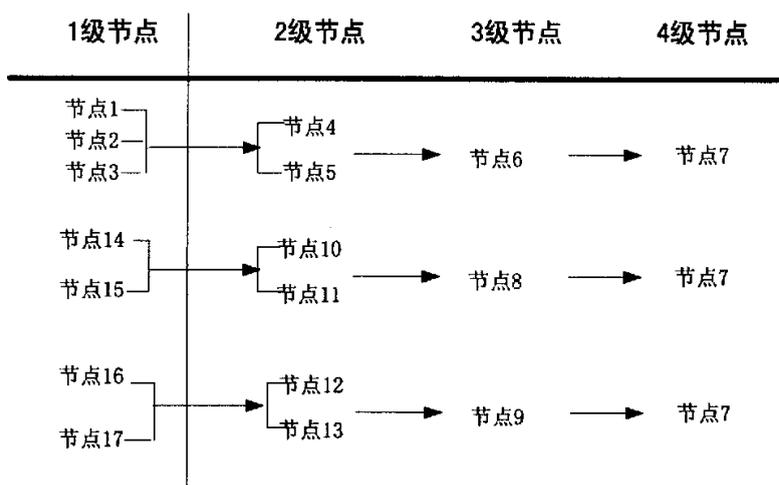


图 3-3 节点分级搜索过程示意图

由图 3-3 我们可得节点级别矩阵 N_G 为：

$$N_G = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 14 & 15 & 16 & 17 \\ 4 & 5 & 10 & 11 & 12 & 13 & 0 \\ 6 & 8 & 9 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

本方法不仅将网络节点进行了归类，便于统一管理，而且还根据节点的重要性排定了节点修正的优先次序，利于提高修正效果；此外，该方法易于编程实现：首先确定最高级节点，即 1 级节点，然后将这级节点分别作为起始节点，采用广度优先搜索法依次确定各级节点。

3.1.3 逐级逐点平衡检测、辨识与修正步骤

为了保证系统总的有功功率能够达到平衡，节点功率平衡检测、辨识和修正时首先检测系统 0 级节点的功率平衡，若 0 级功率不平衡则修正部分可疑量测，再根据系统节点分级结果从一级节点开始逐级逐点进行，即从矩阵 N_G 第一个元素 N_{11} 开始，逐级逐点依次遍历检测和

修正。

节点功率平衡检测和修正的流程图见图 3-4，具体步骤如下：

- 1) 运用广度优先搜索法将系统节点分级，得到节点级别矩阵 N_G ；
- 2) 令 $i = 1, j = 1$ ；
- 3) 取出 N_G 中的第 i 行，第 j 列元素值 N_{ij} 。
- 4) 判断 $N_{ij} > 0$ 是否成立，不成立则转步骤 (8)，成立则继续；
- 5) 由 N_{ij} 节点号，得到与 N_{ij} 相关联的有功量测集合 B ；
- 6) 根据式 (3-1) 和式 (3-3) 计算节点 N_{ij} 的有功不平衡量 $\Delta P_{N_{ij}}$ 和不平衡率 $\epsilon_{N_{ij}}$ ；
- 7) $j = j + 1$ ，转步骤 (3)；
- 8) $i = i + 1$ ，判断 $i \leq M$ ，成立则转步骤 (3)，否则退出

按照以上步骤从一级节点开始，依次对各级节点进行逐点检测和修正量测，得到满足约束关系的数据。

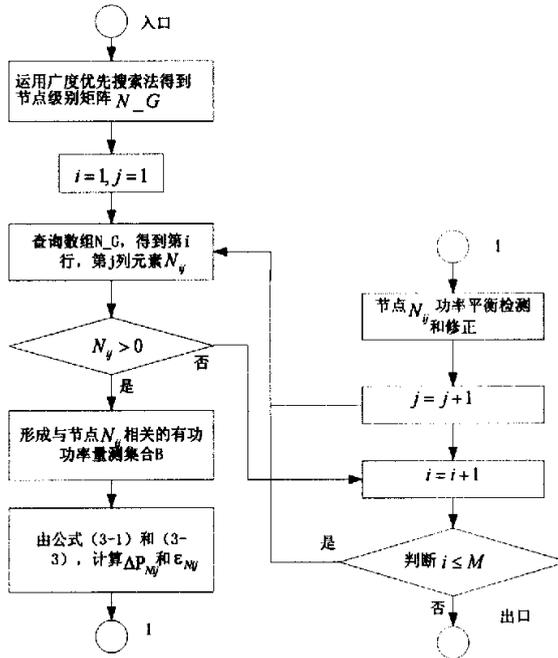


图 3-4 逐级逐点功率平衡检测和修正的流程图

3.2 数据计算步骤与流程图

在实际工程运用中，可以先对数据进行预处理，然后对系统 0 级广义节点进行功率平衡检测、辨识和修正，保证系统中的功率平衡，最后采用基于节点功率不平衡度均值检验的不良数据辨识方法逐级逐点对数据进行检测、辨识和修正。

3.2.1 不良数据的粗检测、辨识与修正原则

首先介绍了粗检测和辨识原则，根据量测数据类型的不同，对明显的坏数据初步修正。

电力系统正常运行时同一时刻的采样数据具有相关性，不同时刻同一点的采样值具有时间上的延续性，所以可以根据以下三个原则来判断遥测数据是否可疑^[37,41]：

1) 量测量的限值检测：在系统正常运行条件下，利用量测量的上下限值确定该量测值是否可疑。例如：对于电压幅值量测 V_m ，判断 $V_{\min} \leq V_m \leq V_{\max}$ 。

2) 量测量的突变检测：利用负荷的平滑性，检测冲击负荷的准确性。例如：对于有功功率量测 P_m ：（1）根据历史数据计算得到平均值 \bar{P} 和标准差 σ ；（2）如果

$$|P_m - \bar{P}| > 3\sigma, \text{ 则认为 } P_m \text{ 是明显坏数据, 用均值 } \bar{P} \text{ 将其修正并作标志。}$$

3) 量测量的相关性检测（节点 KCL 检测）：根据网络拓扑结构，对数据进行相关性检测。每个节点都有注入的有功功率量测和流出有功功率量测，我们称这些有功量测与节点相关联。根据基尔霍夫电流定律，与同一个节点相关联的有功功率量测应该满足下式（3-8），式中， t 是与同一节点相关联的有功量测个数， P_i 是与同一节点相关联的有功功率量测值。 ε_m 为预定义的阈值，该值根据运行经验得到（以下 ε 均为运行经验值）。

$$\sum_{i=1}^t P_i < \varepsilon_m \tag{3-8}$$

根据量测数据类型的不同，常见的数据修正方法有以下几种：

量测数据为母线电压：单母线运行时，参考历史数据修正；双母线并列运行时，参考并列运行母线的量测数据修正^[44]。

量测数据为联络线支路功率：参考对端负荷量测数据修正。

量测数据为馈线负荷：应用基尔霍夫电流定律约束修正。

以上几种工程上常用的不良数据的辨识和修正方法简单、快速、实用性强，能够在一定程度上修正量测数据，但并不能建立起完整的，精确的数据库，作为本文量测数据修正的粗检模块。

3.2.2 算法步骤和流程图

算法流程图如图 3-5 所示，该具体步骤如下：

- 1) 运用 3.2.1 介绍的粗检测、辨识和修正原则，对遥测数据进行初步的简单检测和辨识；
- 2) 根据量测数据类型的不同，对明显的坏数据初步修正；
- 3) 对系统 0 级广义节点进行功率平衡检测、辨识和修正，保证系统中的功率平衡；
- 4) 由 3.1.3 节介绍的广度优先搜索法对系统节点进行分级；

5) 从1级节点开始, 逐级逐点对节点进行功率平衡检测、辨识和修正;

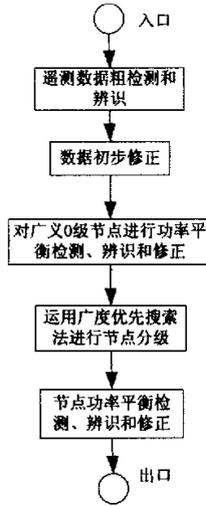


图 3-5 数据处理流程图

3.3 算例和实例

采用本文提出的算法编写了不良数据辨识和修正的计算程序, 并对金昌地区电网的采样数据作了计算。该系统软件已在 win2000 操作系统上用 Borland 公司的 Delphi3.0 开发平台实现。

针对甘肃某地区电网 2004 年 7 月 15 日 19 点这一时刻断面的量测数据为例进行修正计算。此地区电网规模如图 3-6 所示, 基本情况是: 厂站数为 11 个, 其中 330kV 电压等级的变电站 1 座, 220kV 电压等级的 1 座, 110kV 地区发电厂 2 座, 110kV 电压等级的变电站 7 座。

首先做系统平衡性检测。计算得到注入有功为 551MW, 负荷有功为 542MW, 修正可疑有功注入量测, 将 6# 机组发出的有功修正为 91.7MW。接着进行逐级逐点检测、辨识和修正。运用本文提出的节点分级方法, 将系统 47 个节点分为四级。采用广度优先搜索法确定各级节点, 得到 1 级节点 18 个, 2 级节点 17 个, 3 级节点 9 个, 4 级节点 3 个。最终修正结果如表 3-1 所示。

表 3-1 计算结果比较表

单位 (MW)	注入有功功率	负荷有功功率	状态估计迭代次数
采集数据	551	542	不收敛
修正后数据	586	542	4

由表 3-1 可以看出, 本方法可以有效地辨识和修正不良数据, 调整系统的平衡性, 使得状态估计能够可靠收敛。

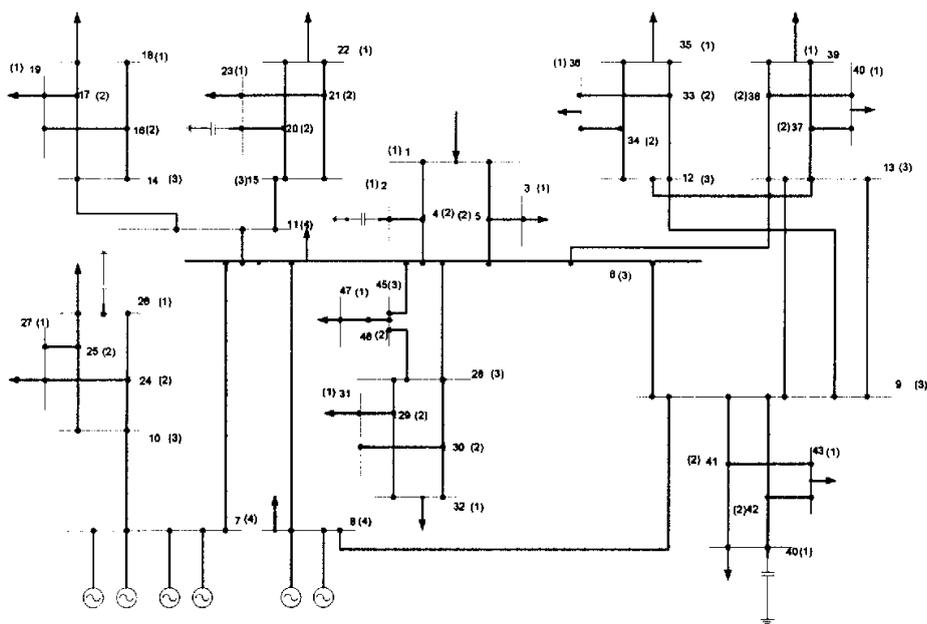


图 3-6 某地区电网网络节点图

3.4 本章小结

为解决 SCADA 系统中的遥测不良数据导致状态估计不收敛的问题，本文定义了节点功率不平衡度作为假设检验的统计量，提出了基于节点功率不平衡度均值检验的不良数据检测方法。根据电力系统正常运行时同一测点不同时刻的采样值具有时间上的延续性给出了可疑不良数据的修正方法。利用电力系统正常运行时同一时刻采样数据之间具有相关性，提出了系统节点分级的概念和逐级对节点进行不良数据检测的方法从而保证对系统节点进行逐点检测辨识的成功率。工程实例计算表明本章提出的不良数据检测、辨识和修正方法能有效地保证状态估计可靠收敛，具有一定的实用价值。

第四章 加权最小二乘法状态估计基本算法

电力系统加权最小二乘状态估计是最基本状态估计算法，其特点是收敛性能好，平均迭代次数少，估计质量高，与系统的量测类型无关，对各种量测类型的适应性最强，对理想正态分布的观测值，估计具有最优一致且无偏等优良统计特性，是状态估计的经典解法和理论基础，并在大型电力系统的实时计算中广泛应用。

本文在开发 SCADA 系统数据处理软件过程中采用了基本加权最小二乘状态估计算法，本章将介绍此算法的数学模型、计算方法和流程图，最后通过软件测试实验验证所开发程序的性能。

4.1 数学模型

4.1.1 量测方程^[1]

最小二乘估计不需要随机变量的任何统计特性，以量测量 z 和测量估计值 \hat{z} 之差的平方和最小为目标的估计方法。电力系统中，在给定网络接线、支路参数和量测系统的条件下，电力系统的非线性量测方程为：

$$z = h(x) + v \quad (4-1)$$

式中， x 为状态向量； z 为量测向量； $h(x)$ 为量测向量函数； v 为量测误差向量。

1) 状态向量 x

在电力系统的状态估计中，待求的状态向量 x 与常规潮流相同，均是节点的复数电压。复数电压分为极坐标和直角坐标两种，待求状态向量 x 用极坐标表示是电压幅值和相角，用直角坐标表示是电压的实部和虚部。假设网络中节点个数为 N ，状态向量 x 用极坐标表示时组成 n 维向量， $n=2N-1$ ，如下式：

$$x = [v_1 \quad \theta_1 \quad v_2 \quad \theta_2 \quad \cdots \quad v_N]^T$$

2) 量测向量 z

网络中的实际量测量主要包括节点的注入有功功率、无功功率、支路两端的有功潮流和无功潮流、电压幅值等，构成 m 维量测矢量 z ，如下式：

$$z = [\cdots P_i \quad Q_i \quad \cdots P_j \quad Q_j \quad \cdots \cdots P_{ij} \quad Q_{ij} \quad \cdots \cdots P_{ji} \quad Q_{ji} \quad \cdots V_i]^T$$

3) 量测函数 $h(x)$

将所有的量测值用状态向量 x 来表示，得到量测向量 $h(x)$ 。 $h(x)$ 可以根据量测量的类型选取对应的网络方程得到，分下列几种情况：

- (1) 当量测量为节点电压幅值量测，量测矢量函数 $h(x)$ 为：

$$\dot{V}_i = v_i e^{j\theta_i}$$

式中, \dot{V}_i —节点 i 复数电压;

v_i —节点 i 的电压幅值;

θ_i —节点 i 的电压相角;

(2) 量测矢量函数为当量测量为节点注入功率时, 量测矢量函数 $h(x)$ 为:

$$P_i = \sum_{j=1}^N v_i v_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij})$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^N v_i v_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij})$$

式中, P_i , Q_i —节点 i 有功注入功率和无功注入功率, 其方向规定: 流入节点 i 为正, 流出节点 i 为负;

G_{ij} , B_{ij} —节点导纳矩阵中对应节点 i 和 j 之间的电导和电纳, 当 $i = j$ 时为自导纳, 当 $i \neq j$ 时为互导纳;

$\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$, 为节点 i 和 j 之间的相角差;

N —网络节点总数;

(3) 当量测量为线路潮流时, 量测矢量函数 $h(x)$ 为:

$$P_{ij} = v_i^2 g - v_i v_j g \cos \theta_{ij} - v_i v_j b \sin \theta_{ij}$$

$$Q_{ij} = -v_i^2 (b + y_c) - v_i v_j g \sin \theta_{ij} + v_i v_j b \cos \theta_{ij}$$

$$P_{ji} = v_j^2 g + v_i v_j (-g \cos \theta_{ij} + b \sin \theta_{ij})$$

$$Q_{ji} = -v_j^2 (b + y_c) + v_i v_j (g \sin \theta_{ij} + b \cos \theta_{ij})$$

式中, P_{ij} , Q_{ij} —线路 ij 上始端的有功和无功功率, 其方向规定: 有 i 流向 j 为正, 由 j 流向 i 为负;

P_{ji} , Q_{ji} —线路 ij 上终端的有功和无功功率, 其方向规定: 有 j 流向 i 为正, 由 i 流向 j 为负;

g —线路 ij 的电导;

b —线路 ij 的电纳;

y_c 一线路 ij 的对地电纳;

4.1.2 目标函数^[1]

给定量测向量 z 以后, 状态估计向量 \hat{x} 是使目标函数:

$$J(x) = [z - h(x)]^T R^{-1} [z - h(x)] \quad (4-2)$$

达到最小的 x 的值。由于 $h(x)$ 是 x 的非线性向量函数, 故无法直接计算 \hat{x} , 然而可以采用牛顿法一样的标准迭代算法解决此问题。

4.1.3 求解方法^[1]

1) 雅克比矩阵 $H(x)$

为了求取 \hat{x} , 首先要对 $h(x)$ 进行线性化假设。令 x_0 是 x 的某一近似值, 可以在 x_0 附近将 $h(x)$ 进行泰勒展开, 忽略二次以上的非线性项之后, 得到:

$$h(x) \approx h(x_0) + H(x_0)\Delta x \quad (4-3)$$

式中, $\Delta x = x - x_0$;

$$H(x_0) = \left. \frac{\partial h(x)}{\partial x} \right|_{x=x_0} \quad (4-4)$$

这里 $H(x)$ 是 $m \times n$ 阶量测向量的雅克比矩阵。

在电力系统状态估计中, 由量测量类型的不同可以把雅克比矩阵中的元素的计算公式

$H_{ij} = \frac{\partial h_i}{\partial x_j}$ 主要分为以下几种类型:

(1) 当量测量为节点电压幅值量测, 雅克比矩阵中元素的计算公式为:

$$\frac{\partial V_i}{\partial v_i} = 1$$

$$\frac{\partial V_i}{\partial \theta_i} = 0$$

$$\frac{\partial V_i}{\partial v_j} = 0$$

$$\frac{\partial V_i}{\partial \theta_j} = 0$$

(2) 量测矢量函数为当量测量为节点注入功率时，雅克比矩阵中元素的计算公式为：

$$\frac{\partial P_i}{\partial v_i} = \frac{1}{v_i} (v_i^2 G_{ii} + P_i)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} = -B_{ii} v_i^2 - Q_i$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial v_j} = v_i (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij})$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} = v_i v_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij})$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial v_i} = \frac{1}{v_i} (-v_i^2 B_{ii} + Q_i)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} = -v_i^2 G_{ii} + P_i$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial v_j} = v_i (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij})$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} = -v_i v_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij})$$

(3) 当量测量为线路潮流时，雅克比矩阵中元素的计算公式为：

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial v_i} = 2v_i g - v_j g \cos \theta_{ij} - v_j b \sin \theta_{ij}$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_i} = v_i v_j (g \sin \theta_{ij} - b \cos \theta_{ij})$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial v_j} = -v_i (g \cos \theta_{ij} + b \sin \theta_{ij})$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_j} = -v_i v_j (g \sin \theta_{ij} - b \cos \theta_{ij})$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial v_i} = -2v_i(b + y_c) - v_j(g \sin \theta_{ij} - b \cos \theta_{ij})$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_i} = -v_i v_j (g \cos \theta_{ij} + b \sin \theta_{ij})$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial v_j} = -v_i (g \sin \theta_{ij} - b \cos \theta_{ij})$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_j} = v_i v_j (g \cos \theta_{ij} + b \sin \theta_{ij})$$

$$\frac{\partial P_{ji}}{\partial v_i} = v_j (-g \cos \theta_{ij} + b \sin \theta_{ij})$$

$$\frac{\partial P_{ji}}{\partial \theta_i} = v_i v_j (g \sin \theta_{ij} + b \cos \theta_{ij})$$

$$\frac{\partial P_{ji}}{\partial v_j} = 2v_j g + v_i (-g \cos \theta_{ij} + b \sin \theta_{ij})$$

$$\frac{\partial P_{ji}}{\partial \theta_j} = -v_i v_j (g \sin \theta_{ij} + b \cos \theta_{ij})$$

$$\frac{\partial Q_{ji}}{\partial v_i} = v_j (g \sin \theta_{ij} + b \cos \theta_{ij})$$

$$\frac{\partial Q_{ji}}{\partial \theta_i} = v_i v_j (g \cos \theta_{ij} - b \sin \theta_{ij})$$

$$\frac{\partial Q_{ji}}{\partial v_j} = -2v_j (b + y_c) + v_i (g \sin \theta_{ij} + b \cos \theta_{ij})$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_j} = -v_i v_j (g \cos \theta_{ij} - b \sin \theta_{ij})$$

把上述各类计算公式整理得到雅克比矩阵元素计算公式分类表，如表 4-1 所示。

2) 迭代计算

将(4-3)式代入到(4-2)式中，得到：

$$J(x) = [Az - H(x_o) \Delta \Delta]^T R^{-1} [Az - H(x_o) \Delta \Delta] \quad (4-5)$$

式中, $\Delta z = z - h(x_0)$

将(4-5)式展开, 并经配平方后可以得到:

$$J(x) = \Delta z^T [R^{-1} - R^{-1}H(x_0)\sum(x_0)H^T(x_0)R^{-1}]^T \Delta z + [\Delta x - \sum(x_0)H^T(x_0)R^{-1}\Delta z]^T \sum^{-1}(x_0)[\Delta x - \sum(x_0)H^T(x_0)R^{-1}\Delta z] \quad (4-6)$$

式中, $\sum(x_0) = [H^T(x_0)R^{-1}H(x_0)]^{-1}$

(4-6)式中右边第一项与 Δx 无关。因此, 欲使 $J(x)$ 极小, 第二项应为 0, 从而有:

$$\Delta x = \sum(x_0)H^T(x_0)R^{-1}\Delta z \quad (4-7)$$

由此得到:

$$\hat{x} = x_0 + \Delta x = x_0 + \sum(x_0)H^T(x_0)R^{-1}[z - h(x_0)] \quad (4-8)$$

表 4-1 雅克比矩阵元素计算公式分类表

x h		电		压	
		v_i	θ_i	v_j	θ_j
节点 注入	P_i	$\frac{\partial P_i}{\partial v_i}$	$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i}$	$\frac{\partial P_i}{\partial v_j}$	$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_j}$
	Q_i	$\frac{\partial Q_i}{\partial v_i}$	$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i}$	$\frac{\partial Q_i}{\partial v_j}$	$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j}$
线 路	P_{ij}	$\frac{\partial P_{ij}}{\partial v_i}$	$\frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_i}$	$\frac{\partial P_{ij}}{\partial v_j}$	$\frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_j}$
	Q_{ij}	$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial v_i}$	$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_i}$	$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial v_j}$	$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_j}$
潮 流	P_{ji}	$\frac{\partial P_{ji}}{\partial v_i}$	$\frac{\partial P_{ji}}{\partial \theta_i}$	$\frac{\partial P_{ji}}{\partial v_j}$	$\frac{\partial P_{ji}}{\partial \theta_j}$
	Q_{ji}	$\frac{\partial Q_{ji}}{\partial v_i}$	$\frac{\partial Q_{ji}}{\partial \theta_i}$	$\frac{\partial Q_{ji}}{\partial v_j}$	$\frac{\partial Q_{ji}}{\partial \theta_j}$
电 压	V_i	$\frac{\partial V_i}{\partial v_i}$	$\frac{\partial V_i}{\partial \theta_i}$	$\frac{\partial V_i}{\partial v_j}$	$\frac{\partial V_i}{\partial \theta_j}$

应当指出, 只有当 \mathbf{x}_0 充分接近 $\hat{\mathbf{x}}$ 时, 忽略掉泰勒展开式中非线性项的(4-3)式才能保持足够的近似程度, 由(4-7)式计算出的状态修正量 $\Delta \hat{\mathbf{x}}$ 才能达到足够的准确程度, 用(4-8)式计算出的状态估计值 $\hat{\mathbf{x}}$ 才能使目标函数 $J(\mathbf{x})$ 达到最小。事实上要求直接给出这样精确的 \mathbf{x}_0 是不可能的, 但只要能给出 $\hat{\mathbf{x}}$ 不太远的 \mathbf{x} 做为初值, 把(4-8)式作为一步迭代式来处理, \mathbf{x} 是可以逐步达到 $\hat{\mathbf{x}}$ 的。这时 \mathbf{x} 是一个序列:

$$\mathbf{x} = \hat{\mathbf{x}}^{(0)}, \hat{\mathbf{x}}^{(1)}, \dots, \hat{\mathbf{x}}^{(l)}, \dots, \mathbf{x}_0, \hat{\mathbf{x}}$$

式中, l 表示迭代序号。于是(4-7)和(4-8)式可以写成为:

$$\Delta \hat{\mathbf{x}}^{(l)} = \left[\mathbf{H}^T(\hat{\mathbf{x}}^{(l)}) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}^T(\hat{\mathbf{x}}^{(l)}) \right]^{-1} \mathbf{H}^T(\hat{\mathbf{x}}^{(l)}) \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}^{(l)})] \quad (4-9)$$

$$\hat{\mathbf{x}}^{(l+1)} = \hat{\mathbf{x}}^{(l)} + \left[\mathbf{H}^T(\hat{\mathbf{x}}^{(l)}) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}^T(\hat{\mathbf{x}}^{(l)}) \right]^{-1} \mathbf{H}^T(\hat{\mathbf{x}}^{(l)}) \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}^{(l)})] \quad (4-10)$$

以上各式中 $[\mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}]$ 为状态估计的信息矩阵, \mathbf{R} 为测量误差方差阵, 方差阵中的各元素为:

$$R_i^{-1} = \frac{1}{\sigma_i^2}, \text{ 式中 } \sigma \text{ 为标准差。}$$

按照(4-10)式进行迭代修正, 直到目标函数 $J(\mathbf{x}^{(l)})$ 接近于最小值为止, 采用的收敛判据可以是以下三项中的任一项:

$$(1) \quad \left| \Delta \hat{\mathbf{x}}_i^{(l)} \right| \max_i < \varepsilon_x; \quad (4-11a)$$

$$(2) \quad \left| J(\hat{\mathbf{x}}^{(l)}) - J(\hat{\mathbf{x}}^{(l-1)}) \right| < \varepsilon_J; \quad (4-11b)$$

$$(3) \quad \left\| \Delta \hat{\mathbf{x}}^{(l)} \right\| < \varepsilon_a; \quad (4-11c)$$

其中 i 表示矢量 \mathbf{x} 中分量的序号, 而 ε_x 、 ε_J 和 ε_a 是按精度要求而选取的收敛标准。(4-11a)式表示第 l 次迭代计算中状态修正量绝对值最大者小于给定的门槛值, 这是实用中最常用的标准, ε_x 可取基准电压幅值的 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ 。

经过 l 次迭代满足收敛标准时:

$$\Delta \hat{\mathbf{x}}^{(l)} = \hat{\mathbf{x}}^{(l+1)} - \hat{\mathbf{x}}^{(l)} = \left[\mathbf{H}^T(\hat{\mathbf{x}}^{(l)}) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}^T(\hat{\mathbf{x}}^{(l)}) \right]^{-1} \mathbf{H}^T(\hat{\mathbf{x}}^{(l)}) \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}^{(l)})] \approx \mathbf{0}$$

此时 $\hat{\mathbf{x}}^{(l)}$ 即是最优状态估计值 $\hat{\mathbf{x}}$: $\hat{\mathbf{x}} = \hat{\mathbf{x}}^{(l)}$, 而量测量的估计值是: $\hat{\mathbf{z}} = \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}})$ 。

4.2 计算步骤和流程图

算法流程图如图 4-1 所示, 该具体步骤如下:

- (1) 查询数据库,可以得到系统的节点数据,支路数据和变压器变比等参数;
- (2) 根据支路参数和变压器参数等得到节点导纳矩阵。
- (3) 查询数据库,得到一个断面时刻的量测采样数据和量测误差。
- (4) 程序初始化,对状态量置初值;
- (5) 恢复迭代计数器: $l = 1$;
- (6) 由现有的状态量 $\mathbf{x}^{(l)}$ 计算各量测量的计算值 $\mathbf{h}(\mathbf{x}^{(l)})$ 和雅可比矩阵 $\mathbf{H}(\mathbf{x}^{(l)})$ 。由 \mathbf{z} 和 $\mathbf{h}(\mathbf{x}^{(l)})$ 计算出残差 $\mathbf{r}^{(l)} = \mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x}^{(l)})$ 和目标函数值 $J(\mathbf{x}^{(l)})$, 并由雅可比矩阵 $\mathbf{H}(\mathbf{x}^{(l)})$ 计算信息矩阵 $[\mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}]$ 和自由矢量 $\mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x}^{(l)})]$ 。
- (7) 解线性方程组(4-9)式求状态修正量 $\Delta \mathbf{x}^{(l)}$, 并选取其中绝对值最大者: $|\Delta x_i^{(l)}|_{\max}$ 。线性方程组的系数矩阵 $[\mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}]$ 是对称矩阵, 可以选用平方根分解法或 LDL 分解法求解 $\Delta \mathbf{x}^{(l)}$ 。
- (8) 收敛检查: $|\Delta x_i^{(l)}|_{\max}$ 达到收敛标准 ε_x 以内结束计算, 转出口; 否则继续迭代。
- (9) 修正状态量: $\mathbf{x}^{(l+1)} = \mathbf{x}^{(l)} + \Delta \mathbf{x}^{(l)}$, 并将迭代计数器加 1: $l = l + 1$, 继续迭代。
为了避免无休止地迭代, 对迭代次数应加以限制。

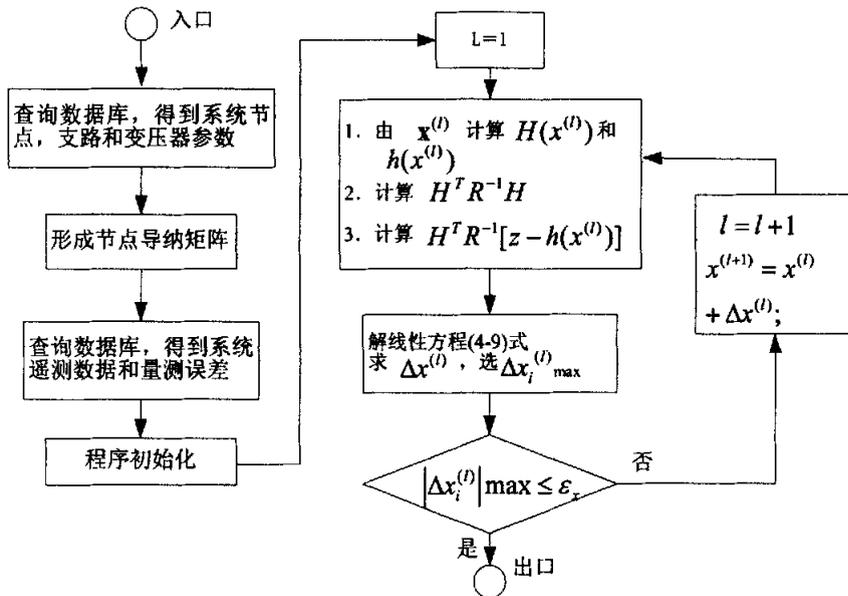


图 4-1 基本加权最小二乘法状态估计程序框图

4.3 状态估计程序模拟实验

4.3.1 评价指标

一个状态估计程序算法性能的优劣通常是用系统模拟计算的统计分析来评价。主要指标有

目标函数均值、量测误差统计值以及估计误差统计值^[1]。

1) 目标函数的均值

$$\bar{J}(\hat{x}) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{i=1}^m \left[\frac{Z_{i,t} - h_{i,t}(\hat{x})}{\sigma_i} \right]^2 \right\}$$

式中, t —采样序号, $t=1,2,\dots,T$;

T —采样总数;

i —测点序号, $i=1,2,\dots,m$ 。

2) 量测误差统计值:

$$\bar{S}_M = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left[\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(\frac{Z_{i,t} - S_{\hat{x},t}}{\sigma_i} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

3) 估计误差统计值

$$\bar{S}_E = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left\{ \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(\frac{h_{i,t}(\hat{x}) - S_{\hat{x},t}}{\sigma_i} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

式中, $S_{\hat{x},t}$ —表示量测量 i 在时刻 t 的真值。

对于符合要求的量测模拟系统, 量测误差的统计值应接近于 1:

$$\bar{S}_M \approx 1$$

对于正常的状态估计程序, 量测量估计误差的统计值应小于 1:

$$\bar{S}_E < 1$$

目标函数的均值应该接近于量测冗余度:

$$\bar{J}(\hat{x}) \approx K = m - n$$

其中 n 为状态量的维数。

4.3.2 实验

本文以 IEEE 提供的 14 节点的实验系统为例进行了模拟实验。

1) 实验系统的原始资料

14 节点系统的原始数据请见参考文献^[45]中的附录 III。

2) 实验步骤

步骤 1: 根据平衡节点的电压和负荷功率值, 通过潮流计算求出支路上的功率分布作为支路功率的量测真值, 量测真值如表 4-1 所示, 表中功率值是以 100MW 为功率基准值的标么值。

表 4-1 量测真值

支路号	首末端母线号	首端有功	首端无功	末端有功	末端无功
1	1-2	1.5682	-0.2035	-1.5254	0.2754
2	2-3	0.7316	0.0355	-0.7085	0.0154
3	2-4	0.5606	-0.0211	-0.5439	0.0317
4	1-5	0.7551	0.0358	-0.7276	0.0243
5	2-5	0.4159	0.0085	-0.4068	-0.0174
6	3-4	-0.2335	0.0298	0.2372	-0.0560
7	4-5	-0.6106	0.1535	0.6157	-0.1507
8	5-6	0.4425	0.1291	-0.4425	-0.0846
9	4-7	0.2792	-0.0892	-0.2792	0.1057
10	7-8	-0.0000	-0.1703	0.0000	0.1748
11	4-9	0.1599	0.0003	-0.1599	0.0126
12	7-9	0.2793	0.0658	-0.2793	-0.0578
13	9-10	0.0524	0.0370	-0.0522	-0.0367
14	6-11	0.0733	0.0382	-0.0727	-0.0370
15	6-12	0.0901	0.0188	-0.0892	-0.0177
16	6-13	0.1672	0.0763	-0.1652	-0.0725
17	9-14	0.0920	0.0335	-0.0909	-0.0312
18	10-11	-0.0377	-0.0200	0.0378	0.0203
19	12-13	0.0283	0.0030	-0.0282	-0.0028
20	13-14	0.0585	0.0187	-0.0580	-0.0175

步骤 2: 权重的求取, 对实验系统, 权重可以按下式产生:

$$\sigma = \frac{1}{3}(a_m S_i + b_m S_f)$$

式中, S_i 指量测量的真值;

S_f 指满刻度值;

a_m 指与量测值有关的误差系数, 这里表示量测器的误差, 一般对于功率量测取 0.02, 对于电压量测取 0.003, 对于电流量测取 0.005;

b_m 指与满刻度值有关的误差系数, 表示变换器和转化器的误差, 一般对于功率量测取 0.0035, 对于电压量测取 0.003, 对于电流量测取 0.01;

$\frac{1}{3}$ 是由最大量测误差 $(a_m S_i + b_m S_f)$ 转换为标准误差的常数。

步骤 3: 量测值的产生, 量测值可以按下式求取:

$$S_m = S_i + \frac{1}{3}(a_m S_i + b_m S_f) a_i$$

式中, S_m 为量测值, a_i 是随机数, 服从正态分布, 即 $a_i \sim N(0,1)$ 。

步骤 4: 估计计算

本次实验分为两组, 每组的统计次数为 60 次, 分布计算出了每组实验的目标函数均值、量测误差统计值和估计误差统计值。

3) 实验结果

实验统计结果如表 4-2 所示, \bar{S}_M 、 \bar{S}_E 分别表示量测误差统计值和估计误差统计值, 文中收敛判据采用 $\max_i |\Delta \hat{x}_i^{(l)}| < \epsilon_x$, 其中 $\epsilon_x = 0.001$ 。

表 4-2 加权最小二乘状态估计算法统计结果

状态变量 个数	量测配置			量测冗余	目标函数值	\bar{S}_M	\bar{S}_E
	有功	无功	电压				
14×2-1	24	24	8	29	29.7645	0.9817	0.8672
	20	20	6	19	18.5414	0.9636	0.9218

对于正常的状态估计, 目标函数值应该近似等于冗余度, 量测误差统计值 $\bar{S}_M \approx 1$, 估计误差统计值 $\bar{S}_E < 1$, 计算结果表明了该量测系统模拟是正确的, 状态估计程序的性能良好。

4.4 本章小结

本章介绍了采用的基本加权最小二乘状态估计算法的数学模型、计算方法和流程图, 并且编写了状态估计软件。着重介绍状态估计软件的测试实验, 以 IEEE 提供的 14 节点的实验系统为例进行了软件测试实验。实验结果表明所编写的程序估计性能良好, 能够提高遥测数据的精度。

第五章 工程应用

5.1 概论

本文作者参与了甘肃金昌市“地区电网实时电压无功优化控制系统”项目的研究和开发工作，并将本文提出的网络拓扑错误辨识方法、不良数据检测和辨识方法和加权最小二乘状态估计算法应用到工程中，完成了该项目中 SCADA 系统数据处理模块的研究和开发工作。

金昌地区电网如图 5-1 所示，基本情况是：厂站数为 11，其中 330kV 电压等级的变电站 1 座，220kV 电压等级的 1 座，110kV 地区发电厂 2 座，110kV 电压等级的变电站 7 座。

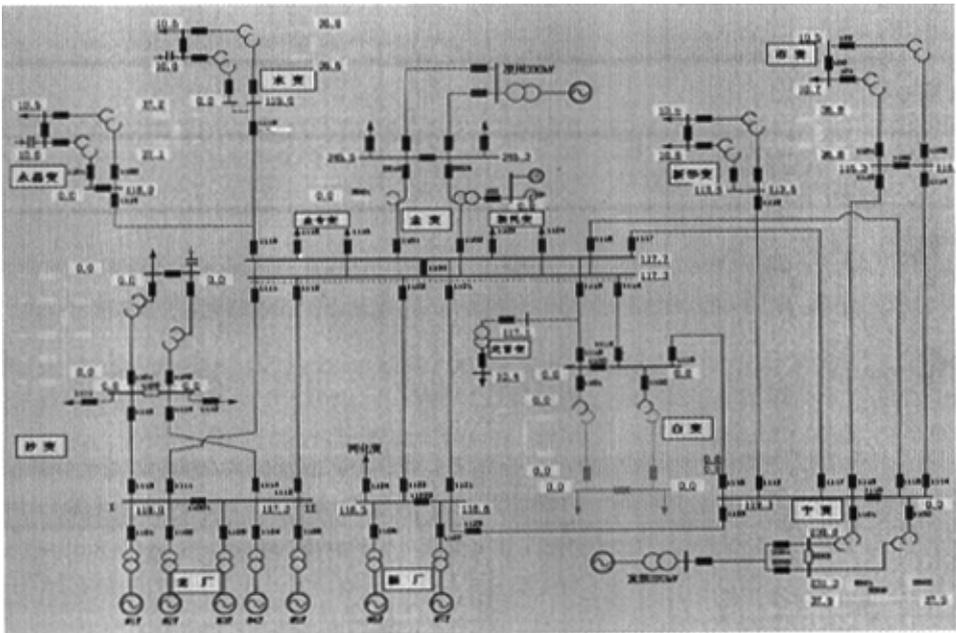


图 5-1 金昌电网系统图

甘肃金昌全局电压无功优化控制系统立足全网角度合理设置 VQC 限值，以弥补 VQC 就地控制的不足。该系统软件已在 win2000 操作系统上用 Borland 公司的 Delphi3.0 开发平台实现，软件结构如图 5-2 所示。系统主要由五个功能模块组成，这五部分包括：通讯与数据采集模块、SCADA 系统数据处理模块、无功优化数据库模块、负荷预测模块和电压无功优化软件模块。

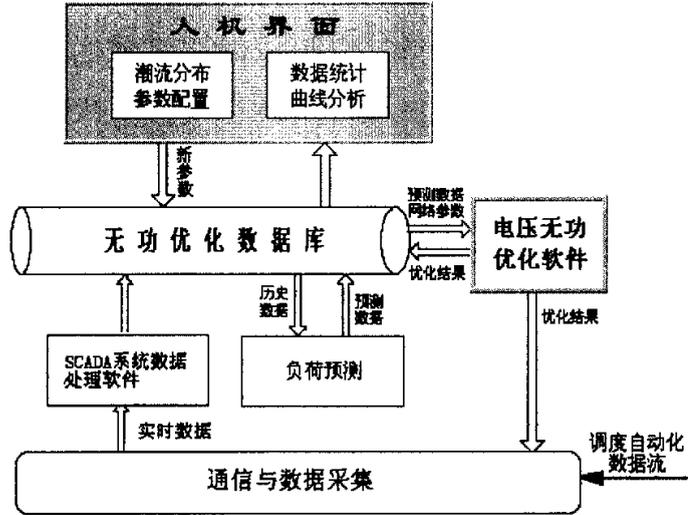


图 5-2 地区电网无功优化软件结构体系图

5.2 输电网 SCADA 系统数据处理软件的设计

SCADA 系统数据处理软件能够对实时数据进行处理，提高实时采集数据的精度，排除错误信息和数据，确保整个采集的数据系统的可靠性，使得状态估计程序能够顺利进行并在工程应用中取得较好的估计结果，为潮流计算、无功优化等软件提供较准确数据。

该系统软件已在 win2000 操作系统上用 Borland 公司的 Delphi3.0 开发平台实现，软件结构如图 5-3 所示。系统主要由四个功能模块组成，这四部分包括：网络结构错误辨识模块、网络接线分析模块、不良数据检测和辨识模块和状态估计模块。

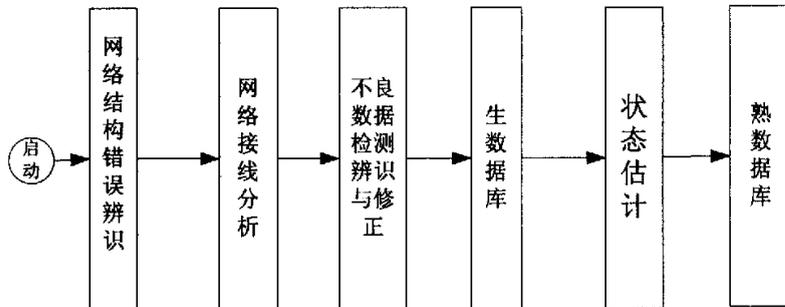


图 5-3 SCADA 系统数据处理软件结构图

下面具体介绍这四个功能模块的软件设计。

5.2.1 网络结构错误辨识模块的软件设计

该模块负责对通讯与数据采集模块接收到的生数据进行初步检测，纠正不合理的遥信量，

纠正后的遥信量即时刷新到数组中供网络接线分析模块使用。模块的主要算法采用的是前面第 2 章提出的基于信息量损失最小的局部网络拓扑错误辨识方法，可对大型电力系统进行实时拓扑错误分析。

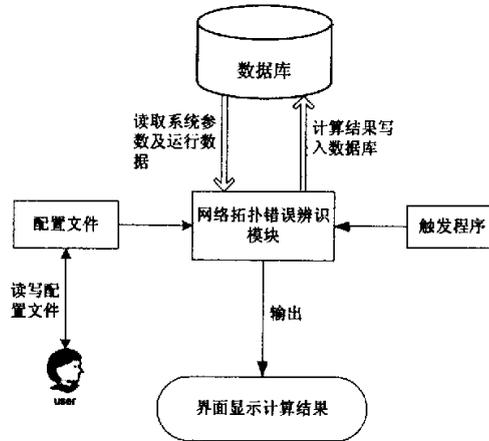


图 5-4 网络拓扑错误模块软件图

由于该软件是实时软件，因此计算所需的数据有两种：静态数据和动态数据。静态数据主要包括：系统线路及变压器信息、线路和原始节点连接关系、开关和原始节点连接关系、变压器与原始节点连接关系、开关刀闸闭合的先验概率以及遥信、遥测信道的正确率，这些数据通过访问数据库或配置文件获得；动态数据是 SCADA 系统实时采集上来的遥信量、遥测量，如开关刀闸的分合状态、实测负荷节点的有功、无功，源点的有功、无功及电压、线路潮流值等，这些数据是在计算过程中通过通信软件直接由数组获得的；出口数据是修正后的遥信和遥测量。

5.2.2 不良数据检测和辨识模块的软件设计

该模块负责对通讯与数据采集模块接收到的生数据进行初步检测，纠正不合理的遥测量，纠正后的遥测量即时存入数据库中供状态估计模块使用。模块的主要算法采用的是第 3 章提出的基于节点功率不平衡度均值检验的不良数据检验方法，可对大型电力系统进行实时的不良数据检测。

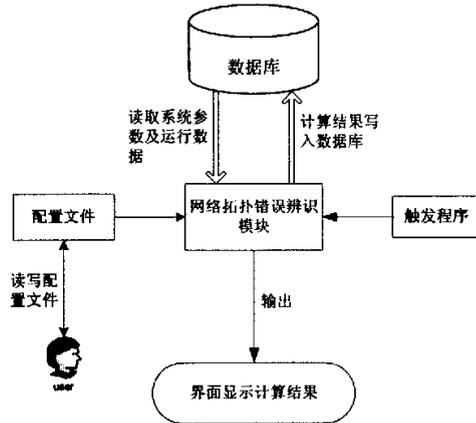


图 5-5 不良数据检测和辨识模块软件图

由于该软件是实时软件，因此计算所需的数据有两种：静态数据和动态数据。静态数据主要包括：系统线路及变压器信息、线路和原始节点连接关系、开关和原始节点连接关系、变压器与原始节点连接关系，这些数据通过访问数据库或配置文件获得；动态数据包括 SCADA 系统实时采集上来的遥信量、遥测量，如开关刀闸的分合状态、实测负荷节点的有功、无功，源点的有功、无功及电压、线路潮流值等；还包括系统实时的拓扑分析结果，如网络节点和线路的连接关系，原始节点和网络节点的关系等；这些数据是在计算过程中通过通信软件直接由数组获得的。出口数据是修正后的遥信量和遥测量。

5.2.3 加权最小二乘状态估计算法模块的软件设计

该模块负责对经过初检程序的数据进一步检测和辨识，依靠量测量之间的冗余度，通过加权最小二乘算法处理不明显的不良数据，使得数据符合电力系统运行规律，建立起完整、精确的成熟数据库。模块的主要算法采用的是状态估计的经典算法，即基本加权最小二乘算法，可对大型的电力系统进行实时的状态估计计算。

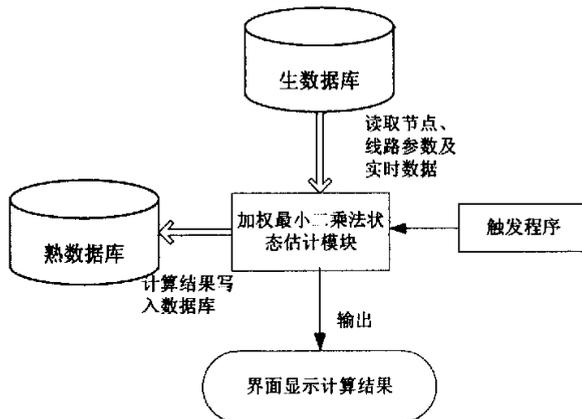


图 5-6 状态估计模块软件图

由于该软件是实时软件，因此计算所需的数据有两种：静态数据和动态数据。静态数据主要包括：系统线路参数、变压器变比、线路和原始节点连接关系等信息用来计算导纳矩阵，这些数据通过访问数据库获得；动态数据包括实时数据库中经过初检测的遥测数据，如实测负荷节点的有功、无功，源点的有功、无功及电压、线路潮流值等；还包括系统实时的拓扑分析结果，如网络节点和线路的连接关系，原始节点和网络节点的关系等；这些数据已经由通信软件写入数据库中，可以通过访问数据库获得。出口数据是当前时刻电力系统潮流数据，包括网络节点电压幅值和相角、线路潮流等。

5.3 系统运行总结

在完成对该系统的开发和调试工作后，我们利用从金昌地区现场收集到的电网 2004 年、2005 年的历史数据在实验室进行了闭环仿真运行，即模拟“电压无功优化控制系统”自动对金昌电网的电压和无功进行调节，取得了满意的结果，该系统于 2006 年 1 月投入试运行。

5.4 本章小结

本文结合甘肃金昌市全局电压无功优化控制系统的实际课题，设计了包括网络拓扑错误辨识模块、网络接线分析模块、不良数据检测和辨识模块和加权最小二乘状态估计模块的输电网 SCADA 系统数据处理软件。已在 win2000 操作系统上用 Borland 公司的 Delphi3.0 平台上开发了所有程序，该系统于 2006 年 1 月投入试运行。

第六章 结 论

总结上述内容, 本文完成了以下工作:

1) 基于开关通信所具有的局部特征, 归纳了三种局部网络模式并在局部网络模式中将遥信错误辨识所需要的模拟量信息用布尔变量表示使所有信源转化成 0-1 分布。推导了服从 0-1 分布的信源和二元对称信道的信息量损失公式, 在此基础上提出了基于信息量损失最小的局部网络结构错误辨识 0-1 整数规划模型。运用 Lingo 软件对该模型进行了遥信错误辨识的模拟计算。

2) 定义了节点功率不平衡度作为假设检验的统计量, 提出了基于节点功率不平衡度均值检验的不良数据检测方法。根据电力系统正常运行时同一测点不同时刻的采样值具有时间上的延续性给出了可疑不良数据的修正方法。利用电力系统正常运行时同一时刻采样数据之间具有相关性, 提出了系统节点分级的概念和逐级对节点进行不良数据检测的方法从而保证对系统节点进行逐点检测辨识的成功率。

3) 介绍了采用的基本加权最小二乘状态估计算法的数学模型、计算方法和流程图, 并且编写了状态估计软件。着重介绍状态估计软件的测试实验, 以 IEEE 提供的 14 节点的实验系统为例进行了软件测试实验。实验结果表明所编写的程序估计性能良好, 能够提高遥测数据的精度。

4) 结合甘肃金昌市“地区电网实时电压无功优化控制系统”的实际课题, 设计了包括网络拓扑错误辨识模块、网络接线分析模块、不良数据检测和辨识模块和加权最小二乘状态估计模块的输电网 SCADA 系统数据处理软件。已在 win2000 操作系统上用 Borland 公司的 Delphi3.0 平台上开发了所有程序, 该系统于 2006 年 1 月投入试运行。

总结以上研究开发工作, 本文认为在以下方面存在不足之处有待进一步研究:

1) 在基于信息量损失最小的局部网络拓扑错误辨识方法的运用过程中, 如何利用统计信息, 采用数据挖掘等技术得到开关分合的先验概率, 以及开关遥信和遥测信道的正确概率有待进一步研究。

2) 提出了基于节点功率不平衡度均值检验的不良数据检测方法, 但如何根据检测结果将不良数据准确定位, 即辨识不良数据有待进一步研究。

参考文献

- [1] 于尔铿. 电力系统状态估计. 北京: 水利电力出版社, 1985.6
- [2] 王凤萍, 电网调度自动化系统遥信误动和抖动问题的解决, 电网技术, 1999, 23(3): 74~75.
- [3] 葛成. 基于 GSA 的电力系统不良数据辨识方法研究: [硕士学位论文], 南京: 南京理工大学, 2005
- [4] 夏长征, 陈红坤, 邹勇. 基于相关集潮流分析的电网拓扑模糊识别, 武汉水利电力大学学报, 1996, 29(5): 110~113
- [5] 阮作伟, 李响. 电力网络拓扑错误辨识的一种新方法, 东北电力技术. 2004, 12(1): 12~14
- [6] 李响. 电力系统状态估计中的拓扑错误辨识: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学(北京), 2000.
- [7] 周苏荃, 柳焯. 新息图法识别多重网络结构动态变化, 中国电机工程学报. 2001,21(10): 67~72
- [8] 周苏荃, 柳焯. 新息图法拓扑错误辨识, 电力系统自动化. 2000,20(2): 67~72
- [9] 周苏荃, 李昌, 柳焯. 加权新息图法识别小潮流支路拓扑错误, 电力系统自动化. 2001,21(3): 27~30
- [10] 卫志农, 张云岗, 郑玉平. 基于量测量突变检测的新方法, 中国电机工程学报. 2002,22(6): 34~37
- [11] 卫志农, 张云岗, 郑玉平. ISODATA 方法在配网状态估计不良数据辨识中的应用, 河海大学学报, 30(2): 97~100
- [12] 刘浩, 刘玉田. 模糊数学在状态估计不良数据检测辨识中的应用, 电力系统及其自动化学报, 1996, 8(3): 52~59
- [13] 张海波, 李林川. 电力系统状态估计的混合不良数据检测方法, 电网技术, 2001, 25(10): 17~20
- [14] E.Handschin, F.C.Schwepe and J.Kohlas et al. Bad Data Analysis for Power System State Estimation. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1975, PAS-94: 329-336
- [15] L.Mili,Th.Van Cutsem and M.Ribbens-Pavella. Bad Data Identification Methods in Power System State Estimation-A Comparative Study. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1985, PAS-104: 3037~3049
- [16] 刘浩, 崔巍. R_N 检测与状态预估相结合的不良数据检测辨识法. 电力系统及其自动化学报. 2001,13(2): 39~43
- [17] H.M.Merrill and F.C.Schwepe. Bad Data Suppression in Power System Static-state Estimation. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1971, PAS-90: 2718-2725
- [18] R.Baldick, K.A.Clements, Z.Pinjo-Dzagal, et al. Implementing Nonquadratic Objective Functions for State Estimation and Bad Data Rejection.IEEE Transactions on Power Systems. 1997, 12(1): 376~382
- [19] 魏强, 王凯, 韩学山. 不良数据识别发生误判和漏判时的处理. 东北电力学院学报. 2003,23(1): 34~38
- [20] 郭伟, 单渊达. M 估计方法及其在电力系统状态估计中的应用. 中国电机工程学报. 2000,20(9): 26~31
- [21] Xiang Nian-de,Wang Shi-ying and Yu Er-keng. A New Approach for Detection and Identification of Multiple Bad Data in Power System State Estimation. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1982, PAS-101: 454~461

- [22] B.M.Zhang and K.L.Lo. A Recursive Measurement Error Estimation Identification Method for Bad Data Analysis in Power System State Estimation. IEEE Transactions on Power Systems. 1991, 6(1): 191~198
- [23] B.M.Zhang, S.Y.Wang and N.D.Xiang. A Linear Recursive Bad Data Identification Method with Real-time Application to Power System State Estimation. IEEE Transactions on Power Systems. 1992, 7(3): 1378~1385
- [24] 张兴民, 毛玉华等. 利用图论方法进行多不良数据检测与辨识, 中国电机工程学报, 1997, 17(1): 69~72,47
- [25] 刘浩, 侯博渊. 保留非线性的快速 P-Q 分解状态估计. 电力系统自动化, 1995, 19(1):26~30,34
- [26] 刘爱国. P-Q 分解最小二乘法的电力系统状态估计. 南昌大学学报(工科版), 1997, 19(1):48~62
- [27] 刘浩. 保留非线性的快速 P-Q 分解状态估计程序设计. 电力系统及其自动化学报, 1997, 9(4):14~18
- [28] 程浩忠, 袁青山, 汪一华, 等. 基于等效电流量测变换的电力系统状态估计方法. 电力系统自动化, 2000, 7(25): 25~29
- [29] 李可文, 张步涵, 曲伟君. 一种基于量测变换的快速解耦状态估计方法. 华中理工大学学报, 2000, 28(2):61~63
- [30] 刘一广, 胡锡龙, 余尔铿, 等. 快速正交变换阻尼最小二乘法在电力系统状态估计中的应用. 中国电机工程学报, 1991, 11(6):34~40
- [31] 彭学勤, 王雨虹. 正交算法在状态估计中的应用. 郑州工业大学学报, 1999, 20(3):108~109
- [32] 孙宏斌, 张伯明. 能量管理系统中的电力信息学. 电力系统自动化, 2002, 26(2): 1~4
- [33] 孙宏斌, 张伯明, 汤磊, 等. 电力系统中基于信息量损失最小的决策原理. 电力系统自动化, 2002, 26(12): 9~13
- [34] 孙宏斌, 高峰, 张伯明, 等. 电力系统最小信息损失状态估计的信息学原理. 中国电机工程学报, 2005, 25(6): 11~16
- [35] 孙宏斌, 高峰, 张伯明, 等. 最小信息损失状态估计中潮流和拓扑统一估计的通用理论. 中国电机工程学报, 2005, 25(17): 1~4
- [36] 孙宏斌, 高峰, 张伯明, 等. 最小信息损失状态估计在拓扑错误辨识中的应用. 中国电机工程学报, 2005, 25(18): 1~5
- [37] 黄滔, 卢建刚, 张辉. 广东省调提高状态估计计算精度的措施, 电网技术, 2004, 28(16): 81~84
- [38] 曲炜, 朱诗兵. 信息论基础及应用. 北京: 清华大学出版社, 2005, 15~56
- [39] 朱雪龙. 应用信息论基础. 北京: 清华大学出版社, 2004, 17~31, 14~42
- [40] 宋铁成, 徐平平, 徐智勇, 等. 通信系统. 北京: 电子工业出版社, 2003, 497~513
- [41] 董朝霞, 杨峰. 基于模糊聚类分析的分层估计算法在 DTS 中的应用. 电力系统自动化, 2004, 28(12): 78~81
- [42] 何坚勇. 运筹学基础. 北京: 清华大学出版社, 2002, 216~217
- [43] 邱关源. 电路(第四版). 北京: 高等教育出版社, 1999, 50~52
- [44] 范锡普. 发电厂电气部分[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995,12~15
- [45] 张伯明, 陈寿孙. 高等电力网络分析. 北京: 清华大学出版社, 1996, 309~310

致谢

本文是在导师杨明皓教授的精心指导和帮助下完成的，导师严谨的治学态度、诲人不倦的精神和渊博的知识使我受益匪浅，无论是在学术、品行还是生活上，都让我学到了很多宝贵的东西，这些都将对我的这一生产生深远的影响。在此，特向辛勤指导、教育我的导师致以衷心的感谢和深深的敬意！

在软件的编制和系统的开发过程中，双电研究所的牛焕娜老师等提供了热情的帮助。

在整个课题的进行过程中，师兄、师姐、师弟、师妹，还有实验室的同学，宿舍的姐妹们，都给了我很大的帮助，为我创造了一个团结、和谐、温馨的集体，使我的课题能够轻松地开展，在此一并表示感谢！

最后，感谢我的家人给予我无限的关爱。我的父母、姐姐和爱人的理解、支持与鼓励是我顺利完成论文的精神动力。

倪小华

2006年6月8日

附录

附录 I：状态估计计算结果

本文用所开发的状态估计计算程序，对甘肃金昌电网 2004 年 6 月 2 日 16 时的实时数据进行状态估计计算。该系统的支路参数值如表 I-1 所示，支路的功率量测值如表 I-2 所示。

表 I-1 支路参数表

支路号	首末端节点号	电阻	电抗	1/2 充电电容电纳	支路号	首末端节点号	电阻	电抗	1/2 充电电容电纳
1	20 33	0.0265	0.0689	0.0044	32	40 9	0.0026	-0.0130	0.0000
2	17 33	0.0802	0.1244	0.0066	33	40 10	0.0037	0.1176	0.0000
3	2 33	0.0149	0.0232	0.0015	34	41 12	0.0108	0.3411	0.0000
4	2 47	0.0023	0.0073	0.0019	35	41 14	0.0067	-0.0237	0.0000
5	2 46	0.0015	0.0072	0.0020	36	41 13	0.0077	0.2186	0.0000
6	12 47	0.0005	0.0016	0.0004	37	42 12	0.0108	0.3411	0.0000
7	15 6	0.0083	0.0178	0.0046	38	42 14	0.0067	-0.0237	0.0000
8	2 6	0.0034	0.0173	0.0044	39	42 13	0.0077	0.2186	0.0000
9	6 26	0.0198	0.0615	0.0040	40	43 15	0.0145	0.5563	0.0000
10	46 6	0.0093	0.0486	0.0030	41	43 31	0.0121	-0.0463	0.0000
11	2 8	0.0143	0.0448	0.0029	42	43 16	0.0137	0.3493	0.0000
12	8 11	0.0006	0.0018	0.0001	43	44 15	0.0194	0.5382	0.0000
13	2 11	0.0137	0.0419	0.0028	44	44 31	0.0119	-0.0397	0.0000
14	23 11	0.0034	0.0066	0.0004	45	44 16	0.0140	0.3442	0.0000
15	1 48	0.0000	0.0635	0.0000	46	45 17	0.0108	0.3360	0.0000
16	35 1	0.0004	0.0447	0.0000	47	45 19	0.0067	-0.0163	0.0000
17	35 2	0.0005	-0.0023	0.0000	48	45 18	0.0077	0.2068	0.0000
18	35 32	0.0022	0.0566	0.0000	49	30 20	0.0161	0.5525	0.0000
19	36 1	0.0003	0.0447	0.0000	50	30 22	0.0091	-0.0255	0.0000
20	36 2	0.0007	-0.0021	0.0000	51	30 21	0.0102	0.3555	0.0000
21	36 3	0.0022	0.0561	0.0000	52	29 20	0.0128	0.5500	0.0000
22	37 5	0.0015	0.1229	0.0000	53	29 22	0.0050	-0.0250	0.0000
23	37 6	0.0015	-0.0063	0.0000	54	29 21	0.0047	0.3525	0.0000
24	37 7	0.0015	0.0771	0.0000	55	25 23	0.0188	0.5069	0.0000
25	38 4	0.0015	0.1229	0.0000	56	34 27	0.0050	-0.0198	0.0000
26	38 6	0.0015	-0.0063	0.0000	57	24 26	0.0068	0.2635	0.0000
27	38 7	0.0015	0.0771	0.0000	58	24 28	0.0042	0.1715	0.0000
28	39 8	0.0045	0.1713	0.0000	59	24 27	0.0049	-0.0182	0.0000
29	39 9	0.0026	-0.0111	0.0000	60	34 26	0.0070	0.2662	0.0000
30	39 10	0.0037	0.1171	0.0000	61	34 28	0.0042	0.1693	0.0000
31	40 8	0.0045	0.1713	0.0000					

表 I-2 支路功率量测表

支路号	首端有功	首端无功	末端有功	末端无功	支路号	首端有功	首端无功	末端有功	末端无功
1	-0.1201	-0.0595			32			-0.1807	-0.0766
2	-0.1470	0.0000			33			-0.1381	-0.0423
3	0.3009	0.0625			34			0.2033	0.0599
4	0.2021	0.0262	-0.2032	-0.0357	35			-0.1754	-0.0833
5	-1.1420	-0.9176	1.1235	0.1408	36			-0.0291	-0.0346
6	-0.9105	-0.2283	0.8968	0.2295	37			0.2047	0.0557
7	-0.0890	-0.0590	0.0000	0.0463	38			-0.1798	-0.0859
8	0.3997	0.0424	-0.3505	-0.0346	39			-0.0278	0.0342
9	0.2623	0.1261			40			0.0400	0.0290
10	0.4948	0.0536	-0.4298	-0.0502	41				
11	0.3165	0.1295	-0.3100	-0.1318	42			-0.0418	-0.0189
12	-0.3230	-0.1401			43			0.0444	0.0339
13	0.3143	0.1278			44				
14	0.0000	0.8038			45			-0.0432	0.0000
15	2.6682	-0.0523			46			0.1470	0.0000
16			0.9953	0.0000	47			-0.1470	-0.0450
17			-0.9953	0.0000	48				
18					49			0.0605	0.0000
19			0.9796	-0.3500	50			-0.0249	-0.0201
20			-0.9657	-0.4912	51			-0.0330	0.0053
21			0.0000	-0.2033	52			0.0596	0.0298
22					53			-0.0251	-0.0333
23			0.2356	-0.0458	54			-0.0326	-0.0029
24			-0.2327	0.0485	55			0.0000	0.8038
25					56			-0.0074	0.0000
26			0.2344	-0.0469	57			0.1303	0.0751
27			-0.2321	-0.0509	58			-0.1248	-0.0630
28			0.3091	0.1504	59			0.0000	0.0057
29			-0.1670	-0.0492	60			0.1320	0.0754
30			-0.1069	-0.0646	61			-0.1260	-0.0630
31			0.2989	0.1281					

经过状态估计程序计算以后，支路功率计算结果如表 I-3 所示。

表 I-3 支路功率估计值表

支路号	支路				支路号	支路			
	首端有功	首端无功	末端有功	末端无功		首端有功	首端无功	末端有功	末端无功
1	-0.1009	0.0495	0.1012	0.0459	32	0.1755	0.0618	-0.1754	-0.0624
2	-0.1291	-0.04621	0.1306	0.0418	33	0.1180	0.0547	-0.1179	-0.0524
3	0.2076	0.0864	-0.2068	-0.0868	34	-0.1925	-0.2719	0.1938	0.3134
4	0.1406	0.0010	-0.1405	-0.0009	35	0.1725	0.0831	-0.1722	-0.0841
5	-1.3482	-0.4644	1.3512	0.4762	36	0.0246	-0.0001	-0.0246	0.0003
6	-0.9174	-0.3130	0.9179	0.3140	37	-0.1928	-0.2718	0.1941	0.3133
7	-0.0473	-0.0086	0.0473	0.0039	38	0.1753	0.0831	-0.1750	-0.0842
8	0.4077	0.0254	-0.4072	-0.0273	39	0.0243	-0.0001	-0.0243	0.0002
9	0.2546	0.1263	-0.2530	-0.1256	40	-0.0333	-0.1286	0.0335	0.1387
10	0.3448	0.0856	-0.3437	-0.0830	41	-0.0037	-0.0011	0.0037	0.0011
11	0.2495	0.1283	-0.2484	-0.1279	42	0.0401	0.0089	-0.0401	-0.0083
12	-0.3059	-0.1327	0.3060	0.1328	43	-0.0358	-0.1325	0.0362	0.1430
13	0.2530	0.1291	-0.2519	-0.1287	44	-0.0029	-0.0012	0.0029	0.0012
14	0.0207	0.0025	-0.0207	-0.0029	45	0.0405	0.0090	-0.0405	-0.0084
15	1.1111	0.4666	-1.1111	-0.3820	46	-0.1427	-0.2324	0.1436	0.2599
16	0.1145	-0.4925	-0.1144	0.5033	47	0.1450	0.0434	-0.1448	-0.0438
17	0.7009	0.1587	-0.7006	-0.1598	48	-0.0044	-0.0012	0.0044	0.0012
18	-0.4095	0.0087	0.4098	0.0004	49	-0.0569	-0.1428	0.0573	0.1568
19	0.1274	-0.4797	-0.1273	0.4901	50	0.0242	0.0259	-0.0242	-0.0259
20	0.5987	-0.0522	-0.5985	0.0514	51	0.0315	-0.0014	-0.0315	0.0018
21	-0.2429	0.2068	0.2431	-0.2013	52	-0.0561	-0.1440	0.0564	0.1581
22	-0.0079	-0.5117	0.0083	0.5410	53	0.0240	0.0264	-0.0240	-0.0264
23	-0.2290	0.0085	0.2290	-0.0088	54	0.0322	-0.0012	-0.0322	0.0016
24	0.2318	0.0040	-0.2317	-0.0001	55	0.0045	-0.0994	-0.0044	0.1045
25	-0.0083	-0.5117	0.0087	0.5410	56	0.0047	-0.0048	-0.0047	0.0048
26	-0.2282	0.0085	0.2282	-0.0089	57	-0.1320	-0.2437	0.1326	0.2654
27	0.2317	0.0041	-0.2317	-0.0001	58	0.1242	0.0650	-0.1241	-0.0612
28	-0.2930	-0.4955	0.2946	0.5574	59	0.0016	-0.0032	-0.0016	0.0032
29	0.1673	0.0618	-0.1672	-0.0622	60	-0.1309	-0.2409	0.1315	0.2624
30	0.1221	0.0557	-0.1221	-0.0533	61	0.1256	0.0662	-0.1255	-0.0623
31	-0.2959	-0.4959	0.2975	0.5582					

从表 I-2 中可以知道支路 6 的上节点 47 流向节点 12 的有功功率值为 0.8968，而节点 12 流向节点 47 的有功功率值却为-0.9105，流入有功功率值小于末端功率值，不符合电力系统运行规律。通过状态估计以后，从表 I-3 的计算结果可以看出状态估计修正了数据，比较符合实际情况。说明该算法收敛可靠，能够满足输电系统状态估计的要求。

个人简介

作者：倪小华（1978~），性别：女；籍贯：江苏；民族：汉；研究方向：电力系统自动化技术。

发表论文：

- 1) 倪小华, 王永清, 杨明皓. 基于节点分级的不良数据处理方法, 中国高等学校电力系统及其自动化专业第 21 届学术年会。
- 2) 倪小华, 王永清, 杨明皓, 李慧. 一种实用的不良数据处理方法, 现代电力, 已录用。
- 3) 倪小华, 杨明皓. 基于节点分级的不良数据处理方法, 2005 年世界农业论坛农业电气化与信息化发展论坛, 81-85。
- 4) 李慧, 倪小华, 杨明皓. 配电系统测点布置方法研究, 继电器, 2005, 33(16), 36-40。
- 5) 倪小华, 王永清, 杨明皓. 配电设备缺陷管理数据结构的探讨, 电力系统及其自动化学报, 已录用。