

Dianli Xitong

Zhuangtai

Guji

电力系统状态估计

于尔铿 主编



责任编辑 / 郑大坤

封面设计 / 蒋冰清

- ◇ 高血压病中医治疗
- ◇ 慢性胃病中医治疗
- ◇ 慢性肝病中医治疗
- ◇ 肾炎肾病综合征中医治疗
- ◇ 神经衰弱中医治疗
- ◇ 中风后遗症中医治疗
- ◇ 动脉粥样硬化中医治疗
- ◇ 睾丸疾病中医治疗
- ◇ 前列腺疾病中医治疗
- ◇ 慢性阻塞性肺疾病中医治疗
- ◇ 肾功能衰竭中医治疗
- ◆ 甲状腺疾病中医治疗
- ◇ 不孕不育症中医治疗
- ◇ 再生障碍性贫血中医治疗
- ◇ 糖尿病中医治疗
- ◇ 免疫功能减退中医治疗
- ◇ 风湿病中医治疗
- ◇ 肥胖症中医治疗
- ◇ 性病中医治疗
- ◇ 月经病中医治疗

ISBN 7-5345-3685-5



9 787534 536854 >

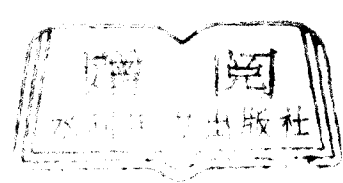
ISBN 7-5345-3685-5

R · 657 定价: 21.00 元

电力系统状态估计

于尔铿 主编

(1987/25)



水利电力出版社



B

256036

图书在版编目(CIP)数据

甲状腺疾病中医治疗 / 许芝银主编. —南京: 江苏科学技术出版社, 2002. 10

(疑难病中医治疗丛书 / 周珉主编)

ISBN 7-5345-3685-5

I. 甲... II. 许... III. 甲状腺疾病-中医疗法
IV. R259.81

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 068303 号

甲状腺疾病中医治疗

主 编 许芝银

责任编辑 郑大坤

出版发行 江苏科学技术出版社
(南京市湖南路 47 号, 邮编: 210009)

经 销 江苏省新华书店

照 排 南京印刷制版厂

印 刷 南京五四印刷厂

开 本 850mm × 1168mm 1/32

印 张 11.375

字 数 280000

版 次 2002 年 10 月第 1 版

印 次 2002 年 10 月第 1 次印刷

印 数 1—5000 册

标准书号 ISBN 7-5345-3685-5/R · 657

定 价 21.00 元

图书如有印装质量问题, 可随时向我社出版科调换

目 录

第一章 绪论 (1)

- 一、实时数据的误差和不良数据 (2)
- 二、电力系统状态估计的用途 (3)
- 三、电力系统状态估计与常规潮流的关系 (5)
- 四、电力系统状态估计问题的数学描述 (9)

第二章 状态估计的数学基础知识 (13)

第一节 矩阵运算的补充 (13)

- 一、矩阵的迹 (Trace) (13)
- 二、分块矩阵的运算及求逆 (14)
- 三、矩阵不等式 (18)
- 四、矩阵的微分运算 (19)

第二节 随机变量的概率分布及其数字特征 (23)

- 一、随机事件及概率计算的基本公式 (23)
- 二、随机变量及其分布 (25)
- 三、多维随机变量及其分布 (29)
- 四、随机变量的数字特征 (33)
- 五、 χ^2 分布及其性质 (42)

第三节 最小二乘法 (43)

第三章 电力系统状态估计的模拟试验 (46)

第一节 电力系统运行状态模拟 (47)

- 一、用常规潮流模拟电力系统的运行变化 (47)
- 二、电力系统病态条件下的运行模拟 (51)
- 三、用广义潮流算法做电力系统运行实况模拟 (52)

第二节 正常遥测系统的数学模拟 (54)

- 一、正常遥测系统的数学描述 (54)
- 二、正常量测值的模拟程序 (56)

第三节 状态估计结果的统计分析 (57)

第四节 状态估计模拟系统的装配和试验例题 (58)

- 一、状态估计模拟试验系统的装配 (58)
- 二、状态估计模拟试验例题 (60)

第四章 电力系统状态估计算法 (61)

第一节 加权最小二乘法状态估计基本算法 (61)

- 一、基本算法的数学基础 (62)
- 二、基本加权最小二乘法状态估计程序框图 (64)
- 三、基本加权最小二乘法状态估计的计算例题 (65)

第二节 快速分解状态估计算法 (72)

- 一、快速分解状态估计算法原理 (73)
- 二、快速分解法状态估计程序框图 (76)
- 三、快速分解法状态估计的计算例题 (78)

第三节 对量测量变换的状态估计算法 (84)

- 一、量测量变换状态估计原理 (84)
- 二、量测变换状态估计程序框图 (88)
- 三、量测变换状态估计例题 (89)

第四节 逐次型状态估计算法 (94)

- 一、逐次型状态估计算法 (94)
- 二、逐次型状态估计例题 (96)

第五节 几种状态估计算法的试验比较 (99)

- 一、四种状态估计算法的估计质量 (100)
- 二、四种状态估计算法的计算速度 (101)
- 三、四种状态估计算法使用内存的情况 (101)
- 四、四种状态估计算法对量测系统的适应性 (102)
- 五、四种状态估计算法的综合比较 (103)

第五章 不良数据的检测与辨识 (105)

第一节 概述 (105)

- 一、几个术语 (105)
- 二、不同水平的检测与辨识功能 (105)
- 三、检测与辨识不良数据的几种主要方法 (106)

第二节 残差方程 (107)

第三节 不良数据的一般检测方法 (110)

- 一、三种检测方法 (110)
- 二、三种检测方法的一般评价 (114)
- 三、试验结果及分析 (115)
- 四、以前一采样时刻量测信息为依据的检测方法 (117)

第四节 不良数据的残差搜索辨识法 (126)

- 一、残差搜索辨识法的基本概念 (126)
- 二、残差搜索辨识法 (126)
- 三、残差搜索辨识法的框图 (131)
- 四、残差搜索辨识法的试验实例 (133)
- 五、残差搜索辨识法的一般评价 (133)

第五节 不良数据的非二次准则辨识法 (134)

- 一、非二次准则辨识法的数学描述 (134)

二、非二次准则状态估计的框图(137)

三、非二次准则辨识程序的应用方式(137)

四、非二次准则辨识法的试验结果及其一般特点(139)

五、零残差辨识法(142)

第六节 不良数据的估计辨识法(146)

一、不良数据估计辨识法的数学描述(146)

二、估计辨识法的模型试验(149)

三、不良数据的可辨识性与实用可疑数据检测系统(151)

四、实用可疑数据检测系统的模型试验(156)

五、组合搜索估计辨识法(158)

六、估计辨识法中的状态估计修正及一般特点(160)

第七节 不良数据检测与辨识的模拟试验系统及各种方法比较(162)

一、模拟试验系统(162)

二、各种方法的比较(164)

第六章 电力系统实时结线分析(166)

第一节 离线数据准备(167)

第二节 变电站结线分析(170)

一、建立元件-开关关联表TEK(171)

二、建立元件-结点关联表TEB(172)

三、变电站结线分析的例题(174)

第三节 网络结线分析(178)

第四节 量测系统分析(180)

一、按子系统划分量测系统(180)

二、结点注入型量测量的可用性分析(182)

三、可计算性检查(183)

第五节 结线分析与状态估计程序的联接(186)

第七章 电力系统的参数估计和网络结构错误辨识(189)

第一节 概述(189)

第二节 参数估计的基本原理(190)

一、增广状态估计算法的原理(190)

二、参数的可估计性(193)

三、增广状态估计精度分析(194)

第三节 参数估计程序设计与计算实例(196)

一、增广状态估计程序框图(196)

二、增广状态估计计算实例(200)

第四节 参数估计模拟计算试验与统计结果(205)

第五节 网络结构错误辨识的基本原理(208)

一、网络结构搜索辨识法(209)

二、网络结构的参数估计辨识法(210)

第六节 网络结构辨识模拟试验与统计结果 (212)

一、(A)类网络结构错误的辨识 (212)

二、(B)类网络结构错误的辨识 (213)

第八章 电力系统状态估计程序的实用设计 (215)

第一节 状态估计程序的实用设计技巧 (215)

一、排号方法 (215)

二、稀疏矩阵非零元素的存取方法 (218)

三、平方根分解法 (Cholesky分解) (223)

第二节 电力系统状态估计程序设计实例及实时试验 (225)

一、状态估计的预备计算程序 (226)

二、跟踪估计程序 (239)

三、状态估计的计算结果 (245)

四、常规潮流程序 (245)

五、状态估计程序的实时试验 (247)

附录 电力系统网络方程 (250)

一、极坐标系的网络方程 (250)

二、极坐标系的雅可比矩阵 (252)

三、直角坐标系的网络方程 (257)

四、直角坐标系的雅可比矩阵 (258)

参考文献 (264)

第一章

绪论

随着电力系统的迅速发展,电力系统的结构和运行方式日趋复杂,电力系统调度中心的自动化水平也需要逐步由低级向高级发展。现代化的调度系统要求能迅速、准确而全面地掌握电力系统的实际运行状态,预测和分析系统的运行趋势,对运行中发生的各种问题提出对策,并要提供下一步运行的决策。从而保证电力系统运行的安全性和经济性。

在现代的调度系统中,计算机已成为重要的一环。计算机的高级自动化功能主要体现在它所具备的程序的功能。高级在线应用程序的特点是要对大量实时数据进行处理与分析,以确定电力系统的安全与经济状况,因此保证电力系统实时数据的质量是进一步提高计算机在线应用水平的关键。

为了建立可靠而完整的实时数据库,通常有两条途径:从硬件的途径可以增加量测设备和远动设备,并提高其精度、速度与可靠性;从软件的途径,可以采用现代的状态估计技术,对数据进行实时处理。但是对量测与远动设备提出过高的要求会导致技术和经济上付出过大的代价。如果在具备一定水平的硬件基础上,采用状态估计技术则能充分发挥已有硬件设备的潜力,提高数据的精度,补充测点和量测项目的不足,排除偶然的错误信息和数据,提高整个数据系统的质量与可靠性。

状态估计也被称为滤波,它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(或轨道)。状态估计作为近代计算机实时数据处理的手段,首先应用于宇宙飞船、卫星、导弹、潜艇和飞机的追踪、导航和控制中。它主要使用了六十年代初期由卡尔曼、布西等人提出的一种递推式数字滤波方法,既节约内存,又大大降低了每次估计的计算量^[1]。电力系统状态估计的研究也是由卡尔曼滤波开始,但根据电力系统的特点,即状态估计主要处理对象是某一时间断面上的高维空间(网络)问题,而且对量测误差的统计知识又不够清楚,因此目前很多电力系统实际采用的状态估计算法是最小二乘法。

1968年丰田淳一提出用卡尔曼滤波方法做负荷预报和水库来水预报的文章^[2],已经属于状态估计在电力系统中应用的研究。然而状态估计在电力系统被广泛研究和实际应用,却是针对实时潮流问题进行的。按照目前习惯的说法,“电力系统状态估计”一词的含义就是指实时潮流的状态估计。1969年美国麻省理工学院的许怀丕(F·C·Schweppe)等人提出了基本加权最小二乘法状态估计^[12],在同时期,美国邦那维尔电力系统(BPA)的拉森(R·E·Larson)等人提出了卡尔曼型的逐次估计算法^[18,19],其后在美国的其它电力公司以及挪威、瑞典、日本、法国、英国、澳大利亚、意大利和苏联等国相继开展这方面的研究工作。最早应用状态估计程序的是挪威水利电力局(Tokke)所属的较小的电网

和美国电力公司（AEP）所属的较大的电网^[3]。至七十年代末，世界上约有十几个电网在正常运行中使用了状态估计程序。状态估计应用在电力系统所得到的效果已被肯定，现已进入实用的阶段。新设计的电力系统调度中心普遍包含这一新的功能。

自1977年开始，我国北京、广东和华东等电力系统先后与有关的科研机构 and 高等院校合作开展了状态估计课题的研究工作。1980年北京电力系统就成功地进行过状态估计的实时试验。

一、实时数据的误差和不良数据

把数据量测和传送系统，状态估计程序和实时数据库在调度系统中的作用示意性地画在图1-1中。由该图可以看出一个远方的遥测量要经过许多环节才能达到电力系统调度中心。例如图上所示的一个功率量测值，首先要由量测器（电压互感器和电流互感器）测得电压和电流，通过功率变换器将两者相乘并变换到统一规格的信号电压，再由模/数转换器化为数字编码，由远动通道送到调度中心，再通过接口进入计算机。这些环节均有误差，并可能出现故障或受到干扰，因此量测值与其真实值总是有差异的。

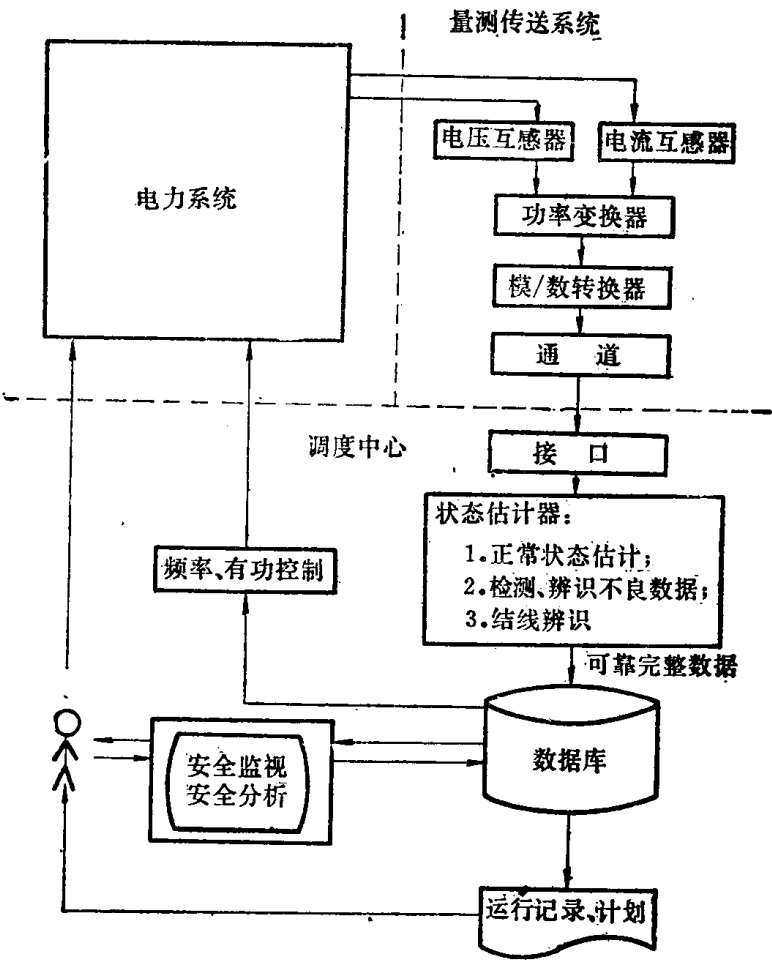


图 1-1 电力系统中数据量测-传送-处理系统工作示意图

量测值与真实值的差值称为量测误差。

电力系统量测误差来源大体可归纳为：

- (1) 量测器（电压互感器和电流互感器）的误差；
- (2) 变换器的误差；
- (3) 模/数转换器的误差；
- (4) 数据传送过程的误差（用模拟量传送时）；
- (5) 量测和传送过程中的时间延迟（量测器有一定的时间常数，传送设备有一定的传送速度，采样又按一定的周期扫描）；
- (6) 运行中三相不平衡及功率因数的变化，会给单相量测和计算带来误差。

对于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，即对应每一量测量，有量测误差标准差 σ ，在正常量测采样条件下几乎有99.73%量测值的误差在 $\pm 3\sigma$ 的范围内；有68%在 $\pm \sigma$ 的范围内。

一般来说，电力系统遥测量的标准误差 σ 大约为正常量测范围的0.5~2%。

因为在正常量测条件下，误差大于 $\pm 3\sigma$ 的量测值出现的概率仅为0.27%，即几乎是不可能出现的事。因此，误差大于 $\pm 3\sigma$ 的量测值就可以认为是不良数据，但实用中所采用的不良数据的界限要远远大于 $\pm 3\sigma$ 的标准，一般为大于 $\pm (6 \sim 7)\sigma$ 以上。

电力系统调度中心接受到的不良数据的来源可能是：

- (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。

目前我国电力系统中主要用微波和电力线载波通道传送数据，实测通道的误码率在 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 之间，由此可推算得出现不良数据的概率约在 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 之间。假设有一个200个测点、以30秒为周期的采样系统，平均2.5~25分钟可能出现一个不良数据，那么一天可能接受到58~576个不良数据。

这种由远动装置直接传送来的数据具有较大的误差，偶而还包含不良数据，习惯上称为生数据。

具有丰富经验的调度人员并不轻信仪表的指示，对仪表上出现的每一突然变化都要与相关的仪表进行校核，并观察这一变化是否持久，从而判断出不良数据，正确地把握系统的实际运行状态。然而随着电力系统的扩大和复杂化，靠人来从事计算机所收到的实时数据的纠错工作是不可想像的。如果没有一个可靠的数据库，则对于显示、记录、以及与安全和经济有关的各种分析计算程序都可能出现一系列的错误。这将会给调度人员带来麻烦，并直接影响安全和经济运行水平。

二、电力系统状态估计的用途

电力系统状态估计程序（或按硬件的说法称为状态估计器或滤波器）的主要功能是：

(1) 根据量测量的精度(加权)和基尔霍夫定律(网络方程)按最佳估计准则(一般为最小二乘准则)对生数据进行计算,得到最接近于系统真实状态的最佳估计值。所以通过状态估计可以提高数据精度。

(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) 推算出完整而精确的电力系统的各种电气量。例如根据周围相邻的变电站的量测量推算出某一没有装远动装置的变电站的各种电气量。或者根据现有类型的量测量推算另一些难以量测的电气量,例如根据有功功率量测值推算各结点电压的相角。

(4) 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结线方式的正确性。状态估计的这种功能称之为网络结线辨识或开关状态辨识。

(5) 可以应用状态估计算法以现有的数据预测未来的趋势和可能出现的状态(电力系统负荷预测和水库来水预测)。这些预测的数据丰富了数据库的内容,为安全分析与运行计划等程序提供必要的计算条件。

(6) 如果把某些可疑或未知的参数作为状态量处理时,也可以用状态估计的方法估计出这些参数的值。例如带负荷自动改变分接头位置的变压器,如果分接头位置信号没有传送到中调时,可以作为参数把它估计出来。当然根据运行资料估计某些网络参数,以纠正离线和在线计算中这些参数的较大误差也不是非常困难的事情。状态估计的这种用法称为参数估计。

(7) 通过状态估计程序的离线模拟试验,可以确定电力系统合理的数据收集与传送系统。即确定合适的测点数量及其合理分布,用以改进现有的远动系统或规划未来的远动系统,使软件与硬件联合以发挥更大的效益,既能保证数据的质量而又降低整个数据量测——传送——处理系统的投资。

从目前电力系统状态估计的实际应用情况来看,主要内容包括估计计算和结线分析,简单的不良数据的检测与辨识以及结线辨识。我们将以此为重点介绍其原理、算法、试验结果和程序实现的步骤。

在线应用程序的功能,其主要目的是为了提高电力系统安全与经济运行水平。随着电力系统的发展,对应用程序也不断提出更多更高的要求,而计算技术的发展又为更好地满足这些要求创造了可能实现的条件。为了对电力系统运行的安全性和经济性进行正确的分析与判断,首先要求正确而全面地掌握电力系统过去的、当时的、甚至未来的状态。正如图1-1所示,为了满足各种应用程序对数据不断增长的要求,建立一个实时数据库是必要而方便的。它里面的数据可供安全监视、频率和有功控制、电压和无功控制等项目使用。目前对电力系统运行的安全分析是根据调度人员的指示进行的;将来可由计算机进行,进而还可以提出安全对策供调度人员参考。可以预期在线应用程序还会向更高级的阶段发展,它将会帮助或代替调度人员做更多的工作。而越高级的程序就越依赖于对大量数据的运算,也就越依赖于完整而可靠的数据库。

综上所述,电力系统状态估计程序是远动装置与数据库之间的重要一环。它从远动装

置接受的是低精度、不完整、偶而还有不良数据的生数据。而由它输出到数据库的是提高了精度、完整而可靠的数据。在这里，状态估计程序提高了数据精度，滤掉了不良数据，还相当于补足了一些测点，并能得到某些难以直接量测的物理量（如结点电压的相角），似乎起到了“设备”的作用^[4]。

三、电力系统状态估计与常规潮流的关系

电力系统的状态量一般取为各结点的复电压。它可以用极坐标表示为电压的幅值与相角，也可以用直角坐标表示为电压的实部和虚部。电力系统的量测量一般是结点注入或支路的有功功率、无功功率和结点电压幅值。在常规潮流中，如果把各PQ结点给定的注入复功率和各PV结点给定的注入有功功率和电压幅值看作量测量，则其量测数恰好等于状态量数。而在状态估计中量测量的种类不仅包括各结点的注入复功率，还可以包括支路复功率及结点电压幅值。因此在状态估计中量测数一般多于状态量数。

常规潮流与状态估计都是由已知量测值（给定条件）求其状态量的计算过程。

状态估计的实质是在量测类型和数量上扩大了广义潮流，而常规潮流可理解为特定条件下的状态估计，可以说是狭义的潮流。

1. 常规潮流的数学模型与算法

在图1-2中画出了四结点的潮流例题，其量测量 z 是给定的潮流计算条件，包括各结点的注入有功功率、无功功率或电压幅值组成的 m 维矢量（ $m=7$ ）；

$$z = \begin{bmatrix} V_1 \\ P_2 \\ Q_2 \\ P_3 \\ Q_3 \\ P_4 \\ Q_4 \end{bmatrix}$$

待求的状态量 x 是各结点的电压幅值和相角组成的 n 维矢量（ $n=7$ ）；

$$x = \begin{bmatrix} v_1 \\ \theta_2 \\ v_2 \\ \theta_3 \\ v_3 \\ \theta_4 \\ v_4 \end{bmatrix}$$

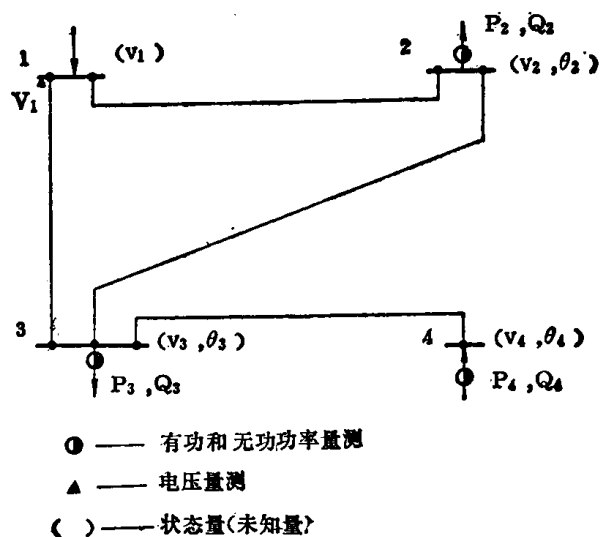


图 1-2 四结点潮流例题

根据基尔霍夫定律，可以建立用未知状态量 x 和导纳矩阵表示的各量测量的计算式 $h(x)$ ，共有 m 个方程式：

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} h_1(\mathbf{x}) \\ h_2(\mathbf{x}) \\ h_3(\mathbf{x}) \\ h_4(\mathbf{x}) \\ h_5(\mathbf{x}) \\ h_6(\mathbf{x}) \\ h_7(\mathbf{x}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1(\mathbf{x}) \\ P_2(\mathbf{x}) \\ Q_2(\mathbf{x}) \\ P_3(\mathbf{x}) \\ Q_3(\mathbf{x}) \\ P_4(\mathbf{x}) \\ Q_4(\mathbf{x}) \end{bmatrix}$$

只要有一组状态量 $\mathbf{x}$ 就可以得到一组量测量的计算值 $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ 。给定的量测值与此计算值的差值称为残差。由各量测量的残差组成 m 维残差矢量：

$$\mathbf{r}(\mathbf{x}) = \mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})$$

$$\begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \\ r_5 \\ r_6 \\ r_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 - h_1(\mathbf{x}) \\ P_2 - h_2(\mathbf{x}) \\ Q_2 - h_3(\mathbf{x}) \\ P_3 - h_4(\mathbf{x}) \\ Q_3 - h_5(\mathbf{x}) \\ P_4 - h_6(\mathbf{x}) \\ Q_4 - h_7(\mathbf{x}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta P_2 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta Q_3 \\ \Delta P_4 \\ \Delta Q_4 \end{bmatrix}$$

常规潮流的计算问题实质上是希望求出一组状态量 $\hat{\mathbf{x}}$ ，使此残差矢量 $\mathbf{r}$ 的各分量均为0，这样的 $\hat{\mathbf{x}}$ 就是满足给定运行条件 $\mathbf{z}$ 的状态量，即：

$$\mathbf{r}(\hat{\mathbf{x}}) = 0 \quad (1-1)$$

在常规潮流计算中给定的条件数，即方程式数 m 恰好等于未知量数 n ，即：

$$m = n \quad (1-2)$$

由于 $\mathbf{r}(\mathbf{x})$ 是状态估计量 $\mathbf{x}$ 的非线性函数，可以采用牛顿法迭代求解：

$$\Delta \mathbf{x}^{(1)} = \mathbf{H}^{-1}(\mathbf{x}^{(1)}) \mathbf{r}(\mathbf{x}^{(1)}) \quad (1-3)$$

$$\mathbf{x}^{(1+1)} = \mathbf{x}^{(1)} + \Delta \mathbf{x}^{(1)} \quad (1-4)$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{x}) = \frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{x})}{\partial (\mathbf{x})} \quad (1-5)$$

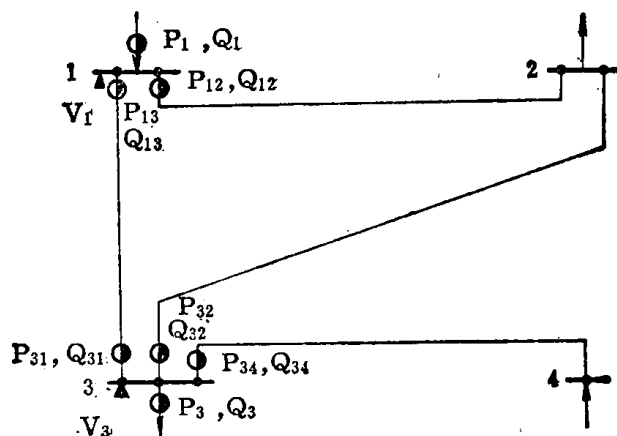


图 1-3 四结点状态估计例题（符号含义同图1-2）

式中 l ——迭代序号；

$H(x)$ —— $n \times n$ 阶雅可比矩阵。

(1-3)式和(1-4)式称为潮流计算的修正方程式，迭代至 $|\Delta x| \rightarrow 0$ 就得到了潮流解。

2. 状态估计的算法

状态估计的已知条件是电力系统的实时量测值，如图1-3所示：

$$z = \begin{bmatrix} V_1 \\ P_1 \\ Q_1 \\ P_{12} \\ Q_{12} \\ P_{13} \\ Q_{13} \\ P_{31} \\ Q_{31} \\ P_{32} \\ Q_{32} \\ P_3 \\ Q_3 \\ P_{34} \\ Q_{34} \\ V_3 \end{bmatrix}$$

待求的状态量 x 与常规潮流完全相同，仍然是各结点电压幅值和相角组成的 n 维矢量：

$$x = \begin{bmatrix} v_1 \\ \theta_2 \\ v_2 \\ \theta_3 \\ v_3 \\ \theta_4 \\ v_4 \end{bmatrix}$$

由于 $m > n$ 和量测误差的存在，不可能找到一个 $\hat{x}$ ，使残差矢量：

$$r(\hat{x}) = z - h(\hat{x}) \quad (1-6)$$

各分量均为 0，然而可以期望得到使加权残差平方和最小的状态矢量 $\hat{x}$ ，为此可以建立如下的目标函数：

$$J(x) = [z - h(x)]^T R^{-1} [z - h(x)] \quad (1-7)$$

$$= \sum_{i=1}^m \left(\frac{r_i}{\sigma_i} \right)^2 \rightarrow \min$$

其中 $\mathbf{R}$ 是以 σ_i^2 为对角元素的 $m \times m$ 阶量测误差方差阵。式中 $\mathbf{R}^{-1}$ 起权重的作用。

为了求得状态估计值 $\hat{\mathbf{x}}$ ，可以采用与(1-3)式相似的迭代算法：

$$\Delta \mathbf{x}^{(1)} = [\mathbf{H}^T(\mathbf{x}^{(1)})\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H}(\mathbf{x}^{(1)})]^{-1}\mathbf{H}^T(\mathbf{x}^{(1)})\mathbf{R}^{-1}\mathbf{r}(\mathbf{x}^{(1)}) \quad (1-8)$$

$$\mathbf{x}^{(1+1)} = \mathbf{x}^{(1)} + \Delta \mathbf{x}^{(1)} \quad (1-9)$$

由此得到状态估计值 $\hat{\mathbf{x}}$ ，使目标函数值 $J(\hat{\mathbf{x}})$ 达到最小。可以证明， $J(\hat{\mathbf{x}})$ 是一个服从自由度为 K 的 χ^2 分布的随机变量。

$$K = m - n \quad (1-10)$$

因为量测方程式的个数 m 大于未知量的个数 n ，即：

$$m > n \quad (1-11)$$

K 称为量测冗余度，它是一个大于零的正整数。所以 $J(\hat{\mathbf{x}})$ 的值不会如常规潮流那样达到0。

3. 常规潮流与状态估计算法的关系

如果在(1-8)式中令 $\mathbf{R} = \mathbf{I}$ ，则 $(\mathbf{H}^T\mathbf{H})^{-1}\mathbf{H}^T$ 就是 $m \times n$ 阶雅可比矩阵 $\mathbf{H}$ 的广义逆矩阵，写成：

$$\mathbf{H}^+ = (\mathbf{H}^T\mathbf{H})^{-1}\mathbf{H}^T \quad (1-12)$$

则(1-8)式就可以改写成：

$$\Delta \mathbf{x}^{(1)} = \mathbf{H}^+(\mathbf{x}^{(1)})\mathbf{r}(\mathbf{x}^{(1)}) \quad (1-13)$$

由于 $m > n$ ，所以(1-12)式表示的 $\mathbf{H}^+$ 为左广义逆矩阵。只有当 $m = n$ ，而且 $\mathbf{H}$ 有逆时，则 $\mathbf{H}^+ = \mathbf{H}^{-1}$ 。修正方程式(1-13)统一了(1-3)和(1-8)两式。状态估计扩展了常规潮流算法，表现在：

(1) 量测类型的扩展：状态估计的量测量除常规潮流中已有的结点电压和注入功率之外，增加了支路功率量测量。

(2) 增加了量测数目：状态估计中量测量个数 m 大于状态量数 n ，即方程式的个数比未知量的个数多 K 。由于量测误差的存在，使 m 个方程是矛盾的，形成了初等代数中矛盾方程的无解局面，只有去掉 K 个“多余”的方程式才能求解。如果真是这样处理，就又回到了常规潮流算法，这将对量测资源的极大浪费。而状态估计正是利用了这些多余的量测量资源所形成的对各状态量的重复量测，从而获得了提高数据精度和辨识不良数据的良好性能。

(3) 加权以提高状态量的估计精度：在潮流计算中对各量测量给以相同的权重，即 $\mathbf{R}^{-1} = \mathbf{I}$ 。而在状态估计中对各量测量按其精度加权，即精度高的量测量有较大的权重，使估计值靠近精度高的量测值，也就是让精度高的量测值在估计状态中起较大的作用，提高了估计的精度。因此平均使用不同精度的量测值，不能不说是浪费了对精度高的量测资源的一种浪费。

常规潮流和状态估计算法上的异同点见表1-1。

状态估计中“估计”一词并不同于日常口语中的“估计”。事实上用状态估计算法做

表 1-1

常规潮流与状态估计算法比较

项 目	常 规 潮 流	状 态 估 计
状态量 x	θ, v	θ, v
状态量数 n	$2N-1$	$2N-1$
量测量 z 的类型	V_i, P_i, Q_i	$V_i, P_i, Q_i, P_{ij}, Q_{ij}$
量测量 z 的数目 m	$= n$	$> n$
量测误差 v	$= 0$	$\neq 0$
量测量权重 R_i^{-1}	$= 1$	$= \frac{1}{\sigma_i^2}$
迭代矩阵	H^{-1}	$(H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1}$
计算残差	$r = 0$	$r \neq 0$
目标函数 $J(x)$	$\sum r^2 = 0$	$E \{ \sum (r/\sigma)^2 \} = m - n$

* N 为系统结点数。

常规潮流计算时，在正常条件下： $J(\hat{x}) = 0$ ，即完全满足给定的潮流条件。所以“估计”决不意味着不准确。相反，对于实际运行状态来说，不能认为潮流是绝对准确的，而状态估计的值显然更准确。这不仅由于状态估计算法能利用多余量测提高数据精度，也由于离线潮流的原始数据本身已具有粗略的性质，往往距实际运行条件有较大的偏差。

综上所述，状态估计算法的本质是在量测类型和数量上扩展了的一种广义潮流，而常规潮流算法则是限量测类型为结点注入功率或电压幅值条件下的狭义潮流，即是状态估计算法中 $m=n$ 的特例。

四、电力系统状态估计问题的数学描述

前面几节对量测误差、不良数据、状态估计的功能和算法作了概念性的介绍，本节将引入一些必要的定义和对状态估计问题进行数学描述。

电力系统实时潮流问题的状态估计程序的输入和输出数据内容见图1-4。

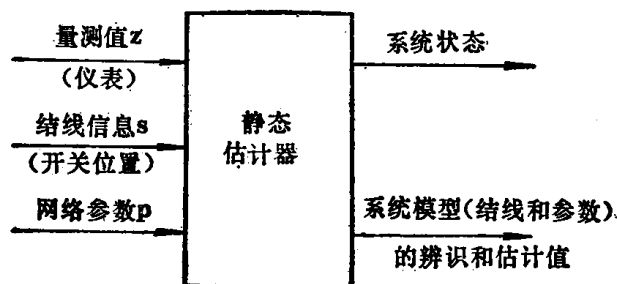


图 1-4 静态估计器的输入和输出模型

从图1-4可以看出，电力系统状态估计需要量测系统和电力网络两方面的数据和信息。

1. 量测系统的数学描述

量测系统的数学描述包括量测值和量测设备两个方面：

(1) 量测值 z ，包括对支路有功功率和无功功率、结点注入有功功率和无功功率及