

摘 要

本文主要研究了基于高级遗传算法 (RGA) 的电力系统故障诊断方法和基于 RGA 的输电线路故障测距方法。

故障诊断是利用保护和断路器信息来判别系统中哪些元件发生了故障、故障种类及原因。故障诊断问题也可以表示成为 0—1 规划问题。按照元件故障、保护动作和开关跳闸之间的逻辑关系, 可以将故障诊断问题表示为无约束的 0—1 规划问题。

遗传算法 (GA) 是通过模拟生物进化过程来达到自学习与优化的目的。GA 是一个迭代过程。在每次迭代中都保留一组候选解。按其解的优劣进行排序, 并按某种指标从中选出一些解, 利用一些遗传算子如交叉 (crossover) 和变异 (mutation) 等对其进行运算。产生新一代的一组候选解, 重复此过程, 直至满足某种收敛指标为止。简单遗传算法 (SGA) 存在的最大的问题是“早熟”。即在解群中的一个或几个数字串的适应值远大于其它串的适应值, 这些数字串在解群中占主导地位, 繁殖机会 (即入选匹配集的机会) 很多, 经过少数几次迭代后解群中的位置有可能全部被该数字串 (或其某个后代) 占据, 这样 GA 的求解过程就结束了, 也即收敛了。但这样很有可能收敛到局部最优解。

本文研究了 RGA 在电力系统故障诊断中的应用, 这种方法可以有效地求得全局最优解, 与 SGA 相比 RGA 的遗传算子中包括了一些新的算子, 基本算子的实现方式也不一样。此外 SGA 中交叉算子发生概率 P_c 和变异算子发生的概率 P_m 是恒定不变的, 而 RGA 中其概率是可变的。RGA 很适用于解决电力系统复杂故障情况下的诊断问题。经算例计算表明, 所发展的故障诊断的数学模型是正确的, 采用的基于 RGA 的故障诊断方法有在线应用的潜力。

随着电力系统的发展, 输电线路电压等级和输送容量逐步提高, 对高效的故障测距的要求也越来越高。近年来的研究表明, 遗传算法在电力系统故障测距领域有一定优势。本文以一简单系统的单相接地故障为例, 阐述了 GA 在这一领域的应用。结果表明, 对于通常的系统和故障类型, 该方法能够较迅速较准确的完成故障定位。

关键词: 遗传算法 电力系统 故障诊断 故障测距

ABSTRACT

This thesis is dealing with fault section estimation and fault location in power systems by using the Refined Genetic Algorithms.

Usually, fault section and fault type are estimated by using the information from protection relay and circuit breaker. Fault section estimation and fault type identification are called fault diagnosis, which can be resolved by 0-1 plan method using logic relationship among the circuit breaker, protection relay and faulted unit.

Genetic algorithm (GA) is an optimal algorithm with the iteration that simulates the process of biologic evolution. All resolutions are arranged in the order of their object values in every iteration. Some of them are selected in the arranged order and they are operated by the genetic operator, such as crossover and mutation, so that a new generation of resolution is produced. Repeat this process until to some target to be needed. There exist the problem of "early mature" in SGA. Object values of some resolutions are very larger than the others' and the resolutions are dominant to obtain much choice of production. These resolution are full of all space of resolution after a few generations and then the process of iteration is finished, or say that it is convergent, but it converge to local optimum.

A new method based upon Refined Genetic Algorithm (RGA), which global optimum is easily converged with, for the fault section estimation problem is presented. There are some new operators in RGA and basic operations of RGA are different from those of SGA. The probability of crossover operator P_c and the probability of mutation operator P_m in SGA are invariant but they in RGA are variable. Method based RGA is a good candidate for fault section estimation. The simulation results have shown that the RGA method can find multiple optimal solutions efficiently in a single run.

Along with the development of power systems, the electric transmission lines have higher and higher voltage grade and transfer capacity. It's very necessary to find an effective method of locating fault location. The recent study indicated that RGA has certain advantages in fault location of power systems. The application of RGA in this field is described by a single-phase ground fault of a simple system. The result indicated that RGA could quickly and accurately locates the fault position and identifies fault types in the power systems.

Keywords: Genetic Algorithms, Power System, Fault Section Estimation, Fault Location

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，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 天津大学 或其他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。

学位论文作者签名：武永峰 签字日期：2003 年 8 月 16 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 天津大学 有关保留、使用学位论文的规定。特授权 天津大学 可以将学位论文的全部或部分内 容编入有关数据库进行检索，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。

(保密的学位论文在解密后适用本授权说明)

学位论文作者签名：武永峰

导师签名：张庆超

签字日期：2003年 8月 16日

签字日期：2003年 8月 16日

第一章 绪 论

1.1 本课题研究的意义和现状

电力系统的故障诊断是利用保护和断路器的动作信息识别故障的元件和误动作的保护与断路器。其中故障元件的识别是关键问题。因为识别出了故障元件之后,只要根据保护动作原理进行简单的逻辑推理就可以识别出误动作的保护与断路器。因此,国内外这方面的研究工作主要集中于故障元件的识别。已提出了多种故障元件的识别方法^[1-11]。总体上可分为四大类,即逻辑处理方法、专家系统方法、人工神经网络方法和基于优化技术的方法。其中专家系统方法和基于优化技术的方法前景较好。专家系统方法在近十年来发展很快,在电力系统故障诊断中也已取得很大的进展,但专家系统的维护比较困难,推理速度也不够快,难以满足大规模电力系统在线应用的需要,目前主要应用于离线故障分析。最近提出的基于优化技术的故障元件的识别方法有很好的应用前景。其理论严密,没有引入启发式知识,用常规算法可以有效地实现。所列参考文献中,发展了当保护和断路器信息都可获取时,电力系统故障诊断的 0—1 规划模型。并提出了求解该问题的模拟分子进化方法、模拟退火算法和简单遗传算法(SGA),其中 SGA 方法在适应能力和求解速度方面有优势。尽管如此,这方面的研究工作仍是初步的,要使其达到在线应用的水平仍有许多工作要做。

电力系统是由发电厂和供电网络组成的,它的任务就是产生电能并向用户输送。由于电能是当今社会普遍使用的一种清洁能源,生产、学习、生活等都离不开电能,所以一旦发生电力系统故障,就会造成巨大的经济损失。在三相交流电力系统中,最常见和最危险的故障是各种短路,包括单相接地短路,两相接地短路,两相非接地短路,三相短路等。电力系统短路可能引起下列严重后果:

- (1) 数值很大的短路电流通过短路点将燃起电弧,使故障设备烧坏甚至烧毁。
- (2) 短路电流通过故障设备和非故障设备时,产生热和电动力的作用,致使

其绝缘遭到破坏或使设备缩短使用寿命。

(3) 电力系统中大部分地区的电压下降,使大量电能用户的正常工作遭到破坏或产生废品。

(4) 破坏电力系统各发电厂之间并列运行的稳定性,而使故障扩大,甚至造成整个电力系统瘫痪。

提高电力系统运行的可靠性和保证安全发电供电是从事电力事业人员的重要任务。为了提高电力系统运行的可靠性,在电力系统的设计与运行中,都必须考虑到系统有发生故障的可能性。但是,由于技术水平的原因,以现阶段系统的可靠性程度来看,故障还是会经常发生的。既然故障是不可避免的,那么我们就需要注意到事故发生之后的善后工作。

在电力传输线发生故障后,我们需要及时的确定故障点位置,以便进行维修,恢复供电,避免进一步的经济损失。故障测距技术能及时的判断出故障类型和故障位置,比工人巡线要节省大量的人力物力和时间,力争使故障造成的损失降到最低。

目前,我国的电力系统还比较薄弱,供电可靠性不高。根据统计资料显示,电力系统的故障绝大多数都发生在输电线上,因此,准确、快速的故障测距对我国电力系统的安全稳定运行有着重要意义。

现有的各种测距算法各有其优缺点^[12-36],为了达到准确测距的目的,都有需要进一步解决的技术问题。随着我国电力事业的发展,电网容量的提高,输电线路故障测距技术越来越为人们所重视。出现了针对不同网络、不同故障类型所采用的多种测距算法,并有许多实用装置投入运行,取得了一定的经济效益。

本论文主要包括四个方面的内容:

(1) 考虑到我国一些电力系统的自动化程度较低,保护信息不可获取或很不完整。本文构造只利用在各类保护(如主保护、第一后备保护和第二后备保护等)动作时段内断路器跳闸的分段时序信息识别故障元件的0—1规划模型,理论严密,适用范围广。

(2) 考虑到电力系统发生故障后,故障元件最终将与发电机隔离(目前尚未考虑发生瞬时故障后重合闸成功的情况)。可根据无源信息来识别故障元件所在

的区域(可能不止一个)。从而可使故障诊断局限于这(些)个小区域之内,大大提高故障诊断的速度。

(3) 比较了简单遗传算法和高级遗传算法的不同性能,探讨了应用高级遗传算法(RGA)求解故障元件识别的0—1规划模型,以期取得比SGA更高的求解效率。

(4) 以单相接地故障为例,运用遗传算法进行故障测距方法的研究,并讨论了一些相关问题。

1.2 遗传算法(GA)的基本原理与方法

生物进化过程就是生物对环境逐步适应的一种优化过程。早在本世纪30年代就有人设想可以通过模拟生物进化过程来达到自学习与优化的目的。从某种意义上说,达尔文的进化论“物竞天演,适者生存,不适者淘汰”实际上就描述了一种强壮的搜索、竞争与优化机理。生物个体为了生存就需要寻找适于其生活的环境,在此过程中需要与同种族的其它个体或不同种族的生物个体进行竞争,其结果是有些个体的生存环境得以改善(优化),而有些则被淘汰。在生物的每一个层次,如细胞、组织、个体和群体,其进化过程都极其复杂,要用数学方式完全描述其过程并发展相应的优化理论与方法是不现实的。人们只能对进化过程进行简化模拟,从中抽象出其本质特征,并用适当的方式进行描述。由达尔文的生物进化论可知,生物进化的历史可以用群体和种族内部或其之间所发生的物理过程来解释。从大的方面讲,这些过程是繁殖(reproduction)、变异(mutation)、竞争(competition)、和选择(selection)。这样,在对生物进化过程进行模拟时,就应在总体上(宏观上)抽象的描述这四个过程。早在60年代初期,就有一些学者开展了这方面的研究工作,提出了多种模拟方法。其中有些方法由于未能适当的或过分简化的对这些基本过程作了模拟,已被逐渐淘汰。但有一些方法比较好的模拟了生物进化过程的本质特征,具有常规优化方法所不具备的一些优点,已逐步得到普遍认可,形成了一类具有鲜明特色的优化方法,即模拟进化方法或进化算法。典型的代表有美国的Holland JH教授提出的遗传算法(Genetic

Algorithm—GA)、美国科学家 Fogel L J 的进化规划 (Evolutionary Programming—EP) 和德国科学家 Rechenberg I 的进化策略 (Evolution Strategies—ES), 他们用不同的方式模拟了生物进化过程, 得到了这三种具有普遍影响的优化方法, 其中 GA 的影响最大, 应用也最广泛。随着这类优化方法研究的不断深入及应用领域的逐步拓宽, 已经形成了一些新的研究分支, 如遗传编程 (Genetic Programming—GP)、分类器系统 (Classifier System—CS) 和进化神经网络 (Evolutionary Neural Network—ENN) 等, 在各个分支中已形成了一整套比较系统的理论与方法。由于篇幅所限, 本文只对 GA 做较为详细的介绍。

遗传算法是一个迭代过程。在每次迭代中都保留一组候选解。按其解的优劣进行排序, 并按某种指标从中选出一些解, 利用一些遗传算子如交叉 (crossover) 和变异 (mutation) 等对其进行运算。产生新一代的一组候选解, 重复此过程; 直至满足某种收敛指标为止。

由这个定义可以看出遗传算法的核心所在。其主要包括两个方面的内容:

(a) 如何从现有解中选出一些解 (后称选择方法, 也可称为选择算子) 来产生“后代”, 希望选出的这些解具有良好的特征, 以便产生出优良的“后代”, 此外选出的这些解在解空间中要相当分散, 以增加求得全局最优解的机会。

(b) 采用何种遗传算子对选出的解进行操作 (运算)。采用的遗传算子要具有好的计算特征, 这包括两个含义。其一是保留原有解中的优良特征, 避免在用遗传算子操作时遭到破坏; 其二是能够把计算过程中丢失的重要信息或优良特征予以恢复。研究适当的选择方法与设计性能优良的遗传算子以满足上述要求一直是遗传算法理论研究的重要问题。迄今已经提出了基于各种不同指标的多种选择方法, 也设计了多种遗传算子, 由不同的选择方法和遗传算子相结合就构成了不同的遗传算法。

尽管已提出了多种不同形式的遗传算法, 但总的来讲一般将这些算法分为两大类, 即简单遗传算法 (SGA) 和高级遗传算法 (RGA)。RGA 和 SGA 的区别主要包括两点:

(1) SGA 的遗传算子只有交叉和变异, 而 RGA 中包括了一些新的算子。基本算子的实现方式也不一致。

(2)SGA 中交叉算子和变异算子发生的概率 P_c 和 P_m 是恒定不变的, 而 RGA 中其概率是可变的。在 RGA 的计算开始时, 通常给定 P_c 一个较大的值, 给定 P_m 一个较小的值, 随着计算过程的进行, 逐步减小 P_c 和增大 P_m , 直至 P_c 和 P_m 分别达到其预先给定的下限和上限为止。由于选择方法和各种遗传算子的实现方法多种多样, 从而可构成多种不同形式的 SGA 和 RGA。

1.2.1 选择方法

采用什么选择方法来形成匹配集对 GA 的性能有很大的影响, 可以把上一代解群中的串的适应值从大到小排序。取其排在前面的串构成匹配集, 但这样做有可能导致匹配集中的串相应的解在解空间中比较集中, 从而不利于找到全局最优解。采用随机的方式形成匹配集是一种较好的方法。但同时要保证匹配集中的串具有较大的适应值, 使优良的串有繁殖的机会, 如果采用全随机的方法形成匹配集, GA 将退化为随机搜索。两两竞争的方法采用了随机的方式, 同时又保证了加入匹配集中的串具有较大的适应值, 是一种比较好的方法。除了上述的两两竞争的选择方法之外, 还有很多其它选择方法, 如: 转轮法, 窗口法等, 本文采取两两竞争法: 先从解群中随机选择两个串, 并比较其适应值, 将适应值较大者加入匹配集。

另外, GA 中采用与适应值大小成比例的选择方法时常遇到下述两个方面的问题:

①超级数字串或超级个体问题。超级数字串指的是目前解群中的一个或几个数字串的适应值远大于其它串的适应值, 这些数字串在解群中占主导地位, 繁殖机会(即入选匹配集的机会)很多, 经过少数几次迭代后解群中的位置有可能全部被该数字串(或其某个后代)占据, 这样 GA 的求解过程就结束了, 也即收敛了。但这样很有可能收敛到局部最优解, 因为搜索范围很有限, 因而一般不希望有个别数字串在 GA 运算的最初几次迭代时就在解群中占据主导地位。要避免这个问题, 应使各个数字串入选匹配集的概率与其适应值的大小不直接成比例。可以按照数字串的适应值从大到小排序, 按其顺序赋予其入选匹配集的概率, 这个概率只与各个串在解群中排位有关, 与其适应值的数值大小不直接成比例。从这个意

义上讲，两两竞争方法是比较好的方法，每个数字串入选的概率与其适应值的大小也不直接成比例。

②多个相似数字串问题，也称封闭竞争。“相似”这里指的是数字串的结构和适应值的大小都相似或接近，也就是说这些数字串在解空间中比较接近。在GA运行的后期，解群中常出现这个问题。由于这些数字串相似，其入选匹配集的概率相当，而且其交叉后得到的子串也不会有多大变化，这样搜索过程就不能有效地进行，从而难以找到全局最优解。

1.2.2 交叉与变异

交叉可以把两个串中优良的格式传递到下一代的某一个串中，使该串具有优于其父辈的性能，如果交叉后得到的后代性能不佳，则可以在此后的选择过程中将其摒弃，匹配集中只保留性能比较好的串。交叉是GA中最主要的算子，寻优的搜索过程主要是通过它来实现的，因而其发生的概率应给定得比较大。变异可以使在运算过程中丢弃的某位重要数字予以恢复。因为如果某一代的串的某位数字均为0，则无论选择和交叉如何进行，其后代的所有串中该位数字永远为0，不会再出现1，也就是说，1这个信息丢失了，只有通过变异才可将其恢复。但变异的概率应比较小，如果其发生的概率达到0.5以上，则GA就退化为随机搜索了，GA的一些重要的数学特性和计算能力也就不复存在了。

近期的研究表明，采用下述的两断点交叉方式比上述的单断点交叉方式效果好。对于数字中C和D：

C=1 1 | 0 0 1 0 1 | 1 1 1 0 1

D=1 0 | 0 1 1 1 0 | 0 1 1 1 1

其中，第3和第8位是断点，也即交叉点。两断点交叉后得到：

C*=1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1

D*=1 0 0 0 1 0 1 0 1 1 1 1

本文采用两断点交叉。

变异是串的某位数字发生变化。如A变成A'

A=0 1 0 1 1 0 1

$$A' = 0\ 1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 1$$

A' 即为 A 的第三位数字发生变异后的结果。变异可在串的一位或多位上发生，但一般采用一位变异的方式。变异的概率 P_m 通常给定得很小，一般在 0.001 和 0.1 之间，变异的数字的位置随机确定。

1.2.3 收敛判据

常规的数学规划方法有数学上比较严格的收敛判据，但 GA 的收敛判据基本上是启发式的。GA 没有利用梯度等信息，因而其适用范围很广。但同时要构造数学上比较严格的收敛判据也就相当困难。

目前采用的 GA 的收敛判据有多种，如根据计算时间和所采用的计算机容量限制所确定的判据，即给定迭代次数和每一代解群中的数字串的数目；或从解的质量方面确定的判据，如连续几次得到的解群中的最好的解没有变化则认为 GA 收敛了；或解群中最好的解的适应值与其平均适应值之差占平均适应值的百分数小于某一给定允许值等等。

1.3 遗传算法 (GA) 在电力系统中的应用

近年来，GA 正在迅速发展，已被广泛应用于解决各种问题，例如工程优化、机器学习、工程控制、对策论、模式识别、人工智能、分子生物学、故障诊断、计算机等领域，取得了良好的效果。现在每两年召开一次专门的 GA 国际会议，几种会议已设有 GA 的专题，GA 的研究已成为国际学术界跨学科的热门话题之一。随着 GA 基本原理、方法及其应用技巧的深入研究，其应用范围也越来越广泛。尤其在电力系统中，GA 的作用已越来越突出，是目前为止应用最多的一种模拟进化方法。本文作者在参阅了大量有关的科技文献的基础上，总结了 GA 在电力系统各个领域中的应用。

1.3.1 规划与调度

GA 适于解决象规划与调度这样的组合优化问题。电力系统中这类问题的规模常常很大，现有的方法中有的难以保证求得全局最优解，有的方法因计算量太

大而无法应用于大系统。GA 为求解这类问题提供了一种可能的途径。总的说来，GA 在这一领域被广泛应用于发电规划、网络规划、检修计划、机组最优组合等方面。

1.3.2 运行优化

运行优化中既有组合优化问题又有参数优化问题，是 GA 在电力系统中应用的一个主要领域。由于 GA 可以处理非线性因素、无可微性要求且有较大的概率求得全局最优解而吸引了很多学者的研究兴趣。在这个领域，GA 可以令人满意的解决发电调度、无功调度、网络重构、潮流计算等问题。

1.3.3 警报处理与故障诊断

警报处理的目标是当系统处于非正常条件下帮助控制中心的运行人员了解发生了什么事，其提供的信息应是综合的、简洁的而非大量数据。另一方面，故障诊断是利用保护和断路器信息来判别系统中哪些元件发生了故障、故障种类及原因。警报处理和故障诊断的区别在于两者分析的深度不同。

故障诊断问题也可以表示成为 0—1 规划问题。按照元件故障、保护动作和开关跳闸之间的逻辑关系，可以将故障诊断问题表示为无约束的 0—1 规划问题。近年来有关文献提出了应用 GA、模拟分子进化优化方法和模拟退火算法来求解该问题。对几个算例系统的测试结果表明，GA 在计算效率上优于其它两种方法。

1.3.4 其它领域

由于遗传算法有着其它算法所不具备的优势，它在电力系统中的应用也越来越广泛。目前，在其它领域，GA 已被广泛应用于短期负荷预报、网络分解、谐波分析与滤波、状态估计、分散电源 (dispersed power sources) 的最优配置、水轮机参数解调、灵活交流输电系统、配电系统中分段开关 (sectionalizer) 的最优分布等各个方面。

第二章 基于高级遗传算法的电力系统故障诊断

2.1 故障元件识别的数学模型

诊断电力系统发生故障的元件，就是要找出最能解释警报信号的故障假说。我们将其表示为使下述目标函数(误差函数)最小化的问题

$$E(S) = \sum_{t=1}^{n_r} \sum_{i=1}^{n_r} \sum_{j=1}^{n_c} |C_j^{(t)} - G_{i,j}^{(t)}(s)| \quad (1)$$

式中 S ——元件状态向量 (n 维, n 为元件数)

S_i ——第 i 个元件的状态 (正常时为 0, 故障时为 1)

t ——保护动作时段序号, $t=1, 2, 3$ 分别表示主保护时段和第一、第二后备保护动作时段。

n_r ——保护动作时段数

n_r ——保护总数目

$C_j^{(t)}$ ——第 j 个断路器 (CB) 在第 t 个保护动作时段的状态 (未跳闸时为 0, 跳闸时为 1)

$G_{i,j}^{(t)}(S)$ ——根据第 i 个保护的动原理确定的第 j 个断路器函数 (应该跳闸时为 1, 不应该跳闸时为 0), 如果在第 t 个保护动作时段内, 第 j 个断路器的状态不受第 i 个保护所控制, 则取 $C_j^{(t)}$

n_c ——断路器的数目

我们用图 1 所示的简单例子来详细说明如何根据保护动作原理确定 $G_{i,j}^{(t)}(S)$ 。

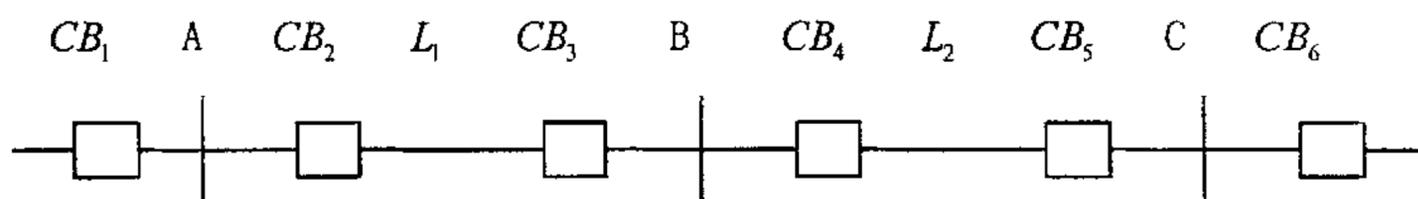


图 1 简单例子

图 1 所示系统中共有 5 个元件, 即 A 、 L_1 、 B 、 L_2 和 C (依次用 $S_1 \sim S_5$ 表示), 6 个断路器 $CB_1 \sim CB_6$ (依次用 $C_1 \sim C_6$ 表示), 15 个保护 (即 A_m 、 B_m 、 C_m 、 L_{1Am} 、 L_{1Bm} 、 L_{2Bm} 、 L_{2Cm} 、 L_{1Ap} 、 L_{1Bp} 、 L_{2Bp} 、 L_{2Cp} 、 L_{1As} 、 L_{1Bs} 和 L_{2Cs} 依次编号为第 1 个至第 15 个保护)。这里 A 、 B 、 C 表示母线, L 表示线路, m 表示主保护, p 表示第一后备保护, s 表示第二后备保护。保护动作原理列于表 1 与表 2, 各种保护相应的断路器函数列于表 3。

表 1 主保护动作原理

保护名	动作原理
A_m	A 发生故障时, A_m 动作跳开 CB_1 和 CB_2
B_m	B 发生故障时, B_m 动作跳开 CB_3 和 CB_4
C_m	C 发生故障时, C_m 动作跳开 CB_5 和 CB_6
L_{1Am}	L_1 发生故障时, L_{1Am} 动作跳开 CB_2
L_{1Bm}	L_1 发生故障时, L_{1Bm} 动作跳开 CB_3
L_{2Bm}	L_2 发生故障时, L_{2Bm} 动作跳开 CB_4
L_{2Cm}	L_2 发生故障时, L_{2Cm} 动作跳开 CB_5

表 2 后备保护动作原理

保护名	动作原理
L_{1Ap}	L_1 故障时, CB_2 在主保护动作时段未跳开时, L_{1Ap} 动作跳开 CB_2
L_{1Bp}	L_1 故障时, CB_3 在主保护动作时段未跳开时, L_{1Bp} 动作跳开 CB_3
L_{2Bp}	L_2 故障时, CB_4 在主保护动作时段未跳开时, L_{2Bp} 动作跳开 CB_4
L_{2Cp}	L_2 故障时, CB_5 在主保护动作时段未跳开时, L_{2Cp} 动作跳开 CB_5
L_{1As}	B 故障时, CB_3 在主保护和第一后备保护动作时段内未跳开时或

	<p>L_2 故障, CB_3 和 CB_4 在主保护和第一后备保护动作时段内未跳开时, L_{1As} 动作跳开 CB_2</p> <p>A 故障时, CB_2 在主保护和第一后备保护动作时段未跳开时, L_{1Bs} 动作跳开 CB_3</p> <p>C 故障时, CB_5 在主保护和第一后备保护动作时段未跳开时, L_{2Bs} 动作跳开 CB_4</p> <p>B 故障时, CB_4 在主保护和第一后备保护动作时段未跳开时或 L_1 故障, CB_3 和 CB_4 在主保护和第一后备保护动作时段内未跳开时, L_{2Cs} 动作跳开 CB_5</p>
L_{1Bs}	
L_{2Bs}	
L_{2Cs}	

表 3 各种保护相应的断路器函数

保护序号	保护名	断路器函数
1	A_m	$G_{1,1}^{(1)} = S_1 \quad G_{1,2}^{(1)} = S_1$
2	B_m	$G_{2,3}^{(1)} = S_3 \quad G_{2,4}^{(1)} = S_3$
3	C_m	$G_{3,5}^{(1)} = S_5 \quad G_{3,6}^{(1)} = S_5$
4	L_{1Am}	$G_{4,2}^{(1)} = S_2$
5	L_{1Bm}	$G_{5,3}^{(1)} = S_2$
6	L_{2Bm}	$G_{6,4}^{(1)} = S_4$
7	L_{2Cm}	$G_{7,5}^{(1)} = S_4$
8	L_{1Ap}	$G_{8,2}^{(2)} = S_2 [1 - C_2^{(1)}]$

9	L_{1Bp}	$G_{9,3}^{(2)} = S_2 [1 - C_3^{(1)}]$
1 0	L_{2Bp}	$G_{10,4}^{(2)} = S_4 [1 - C_4^{(1)}]$
1 1	L_{2Cp}	$G_{11,5}^{(2)} = S_4 [1 - C_5^{(1)}]$
1 2	L_{1As}	$G_{12,2}^{(3)} = 1 - \{1 - S_3 [1 - C_3^{(2)}]\} \{1 - S_4 \cdot [1 - C_3^{(2)}] [1 - C_4^{(2)}]\}$
1 3	L_{1Bs}	$G_{13,3}^{(3)} = S_1 [1 - C_2^{(2)}]$
1 4	L_{2Bs}	$G_{14,4}^{(3)} = S_5 [1 - C_5^{(2)}]$
1 5	L_{2Cs}	$G_{15,5}^{(3)} = 1 - \{1 - S_3 [1 - C_4^{(2)}]\} \{1 - S_2 \cdot [1 - C_3^{(2)}] [1 - C_4^{(2)}]\}$

$$\begin{aligned}
E(S) &= \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_r} \sum_{j=1}^{n_c} |C_j^{(i)} - G_{i,j}^{(i)}(s)| \\
&= \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_r} \sum_{j=1}^{n_c} [C_j^{(i)} - G_{i,j}^{(i)}(s)]^2 \\
&= \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_r} \sum_{j=1}^{n_c} [C_j^{(i)} - 2C_j^{(i)}G_{i,j}^{(i)}(s) + G_{i,j}^{(i)}(s)] \\
&= \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_r} \sum_{j=1}^{n_c} C_j^{(i)} + \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_r} \sum_{j=1}^{n_c} [1 - 2C_j^{(i)}] G_{i,j}^{(i)}(s) \quad (2)
\end{aligned}$$

由于式(2)中等号右边的第一项与优化变量 S 无关,可将其从目标函数中去掉,而不影响优化问题的解。

$$f(S) = \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_r} \sum_{j=1}^{n_c} [1 - 2C_j^{(i)}] G_{i,j}^{(i)}(s) \quad (3)$$

$f(S)$ 最小时, $E(S)$ 也最小。

此外,为便于用遗传算法求解,我们将(3)式最小化的问题改变成为使下式最大化的问题

$$f'(S) = W - \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_r} \sum_{j=1}^{n_c} [1 - 2C_j^{(i)}] G_{i,j}^{(i)}(s) \quad (4)$$

式中 W ——任意给定的很大的正数(取 $W = 10^6$)用于确保 $f'(S)$ 恒为正。

2.2 故障区域的快速识别

电力系统中通常只有少数元件（如 10 个以下）同时发生故障，而且在事故发生后的比较短的时间内保护将动作，跳开有关的断路器，将故障元件与电源隔离，防止事故进一步扩大。这样，在自动装置动作结束（后称“故障平息状态”）后，故障元件不再与系统相连而处于孤立的无源网络之中。可以通过识别与比较故障前与故障平息后的系统拓扑结构，找到故障后形成的无源网络（可有一个，也可有多个）。故障元件则肯定在这（些）个无源网络中，我们称这些无源网络为故障区域。在找到这些故障区域后，故障元件的识别就可局限于这些区域中所包含的元件，这样式（4）中的优化变量就大大减少了，计算速度可大大提高。

我们可以利用断路器的实时信息，采用实时结线分析方法来识别故障前与故障平息后系统拓扑结构，之后找出这两个拓扑结构的差异，就可识别出故障区域。这个过程耗时很少。例如，当某线路发生故障后，主保护正确动作，成功地跳开其两端的断路器的情况，用上述故障区域识别方法就可识别出线路为一孤立子系统，它就是故障元件。

第三章 故障诊断程序的建立与仿真

3.1 程序框图与程序说明

(1) 用 $p[ps][x]$ 表示初始解群， $mp[ps][x]$ 表示经过选择运算产生匹配集。
主要变量说明： ps ——解群规模； mg ——最大允许迭代次数； nt ——时序数； nr ——保护个数； nc ——断路器个数； x ——元件个数； $pc[t]$ ——第 t 次迭代时交叉概率； $pm[t]$ ——第 t 次迭代时变异概率。

(2) 本文采用高级遗传算法交叉概率和变异概率是变化的。置其初始值为 $pc[0]=0.9$ ； $pm[0]=0.001$ ；计算公式为 $pc[t]=pc[t-1]-(pc[0]-0.6)/mg$ ； $pm[t]=pm[t-1]+(0.1-pm[0])/mg$ ；

(3) 两两选择方法原理如前所述，实现时先从解群中随机选择两个串，并

比较其适应值，将适应值较大者加入匹配集。如此进行 ps 次就产生了与初试解群规模一致的匹配集。

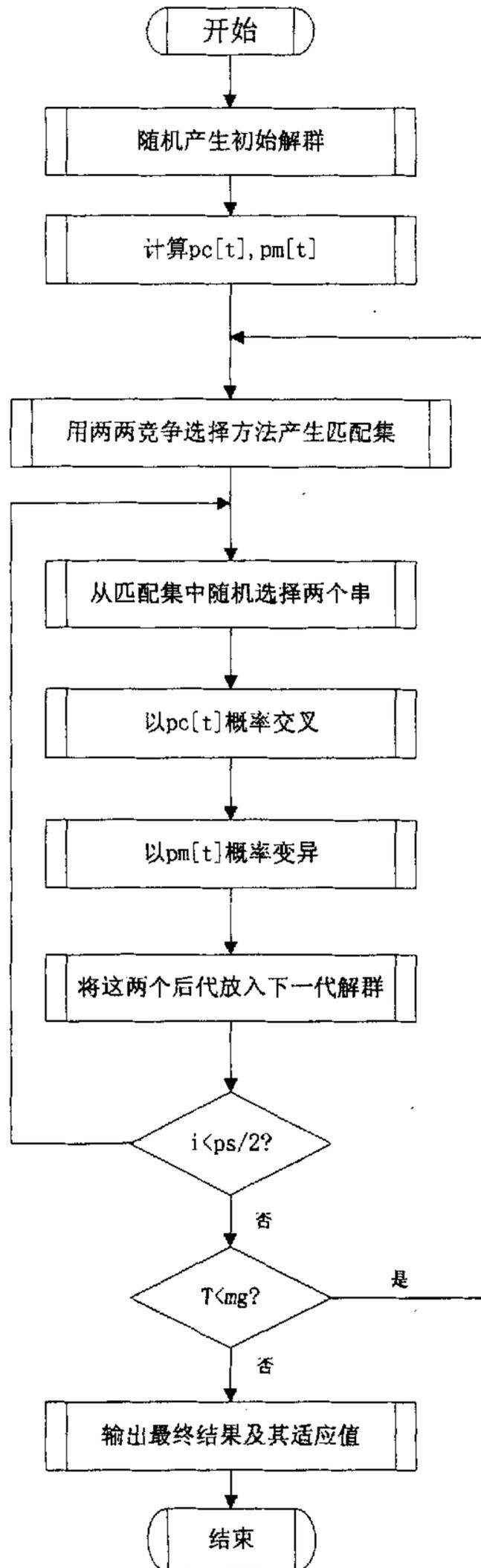


图 2 程序框图

(4) 本文采用两断点交叉, 实现方法如下: 首先随机产生两个交叉位置 $cp1$, $cp2$, 保证 $cp1 < cp2$; 将所选的两个串按位置 $cp1$, $cp2$ 进行两断点交叉。

(5) 变异运算: 随机产生变异位置, 如果该位置的数字为 1 则变为 0, 否则变为 1。

(6) 为保证 (3) 步所选择的两个串不重复, 设计数组 $a[100]$ 保存已经选择过的串号。

(7) 收敛判据采用控制迭代次数的方法 ($t < mg$)。

(8) 达到收敛判据要求后, 从最终解群中选取适应值最大者输出作为最终结果。

(9) 本程序输入为断路器时序信息, 使用时先输入 $c[nt][nc]$ 行号代表时序数 (减 1), 列号代表断路器编号 (减 1)。如编号为 3 的断路器在主保护动作时段跳闸, 表示为 $c[0][2]=1$; 同样, 编号为 5 的断路器在第一后备保护动作时段跳闸表示为 $c[1][4]$ 。

(10) 输出为故障元件信息, 0 代表正常, 1 代表故障。

3.2 系统仿真算例

我们以图 3 为例, 对其故障情况进行测试。

图 3 所示系统共有 28 个元件、40 个断路器和 84 个保护。

28 个元件 ($S_1 \sim S_{28}$) 依次为 $A_1 \sim A_4$, $T_1 \sim T_8$, $B_1 \sim B_8$, $L_1 \sim L_8$ 。

40 个断路器 ($C_1 \sim C_{40}$) 依次为 CB_1 , CB_2 , ..., CB_{40} 。

84 个保护中, 36 个为主保护, 48 个为后备保护。

36 个主保护 ($r_1 \sim r_{36}$) 依次为 $A_{1m} \sim A_{4m}$, $T_{1m} \sim T_{8m}$, $B_{1m} \sim B_{8m}$, $L_1S_m \sim L_8S_m$, $L_1R_m \sim L_8R_m$ 。

48 个后备保护 ($r_{37} \sim r_{84}$) 依次为 $T_{1p} \sim T_{8p}$, $T_{1s} \sim T_{8s}$, $L_1S_p \sim L_8S_p$, $L_1R_p \sim L_8R_p$, $L_1S_s \sim L_8S_s$, $L_1R_s \sim L_8R_s$ 。

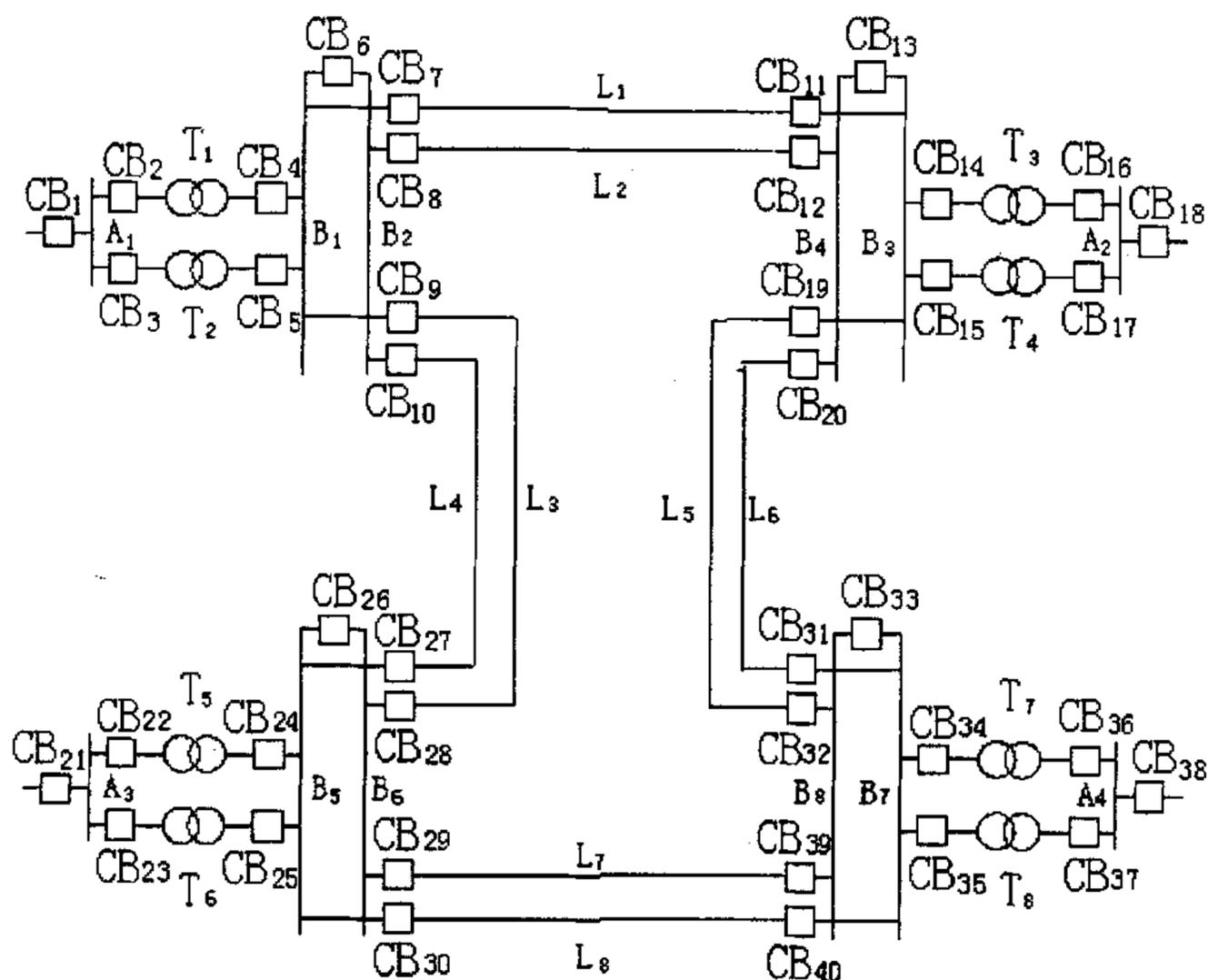


图3 算例系统图

在上述保护名称中，A 和 B 表示母线，T 表示变压器，L 表示线路。S 和 R 分别表示线路的送端和受端，下标 m、p 和 s 分别表示主保护、第一后备保护和第二后备保护。

下面简要介绍一下各类保护的動作原理：

(1) 母线的主保护動作时跳开与该母线直接相连的所有断路器，如 A_1 故障时。

A_{1m} 動作跳开 CB_1 ， CB_2 和 CB_3 ； B_8 故障时， B_{8m} 動作跳开 CB_{32} ， CB_{33} 和 CB_{39} 。

(2) 变压器主保护動作时跳开其两端的断路器。如 T_3 故障时， T_{3m} 動作跳开 CB_{14} 和 CB_{16} 。变压器的第一后备保护用于当主保护拒动时，動作跳开其两端的断路器。如 T_3 故障， T_{3m} 未動作时， T_{3p} 動作跳开 CB_{14} 和 CB_{16} 。变压器的第二后备保护用于相邻区域故障，而该区域保护未動作时，保护变压器。如 T_{3s} 的動作原

理为：当 A_2 故障， A_{2m} 未动作时， T_{3x} 动作跳开 CB_{16} ；当 B_3 故障， B_{3m} 未动作时， T_{3x} 动作跳开 CB_{14} ；当 B_4 故障， B_{4m} 未动作时， T_{3x} 动作跳开 CB_{14} 。

(3) 线路两端都各有主保护和两个后备保护。如线路 L_7 两端的主保护分别为 L_7S_m 和 L_7R_m ，其动作原理为： L_7 故障时， L_7S_m 和 L_7R_m 均动作，分别跳开 CB_{29} 和 CB_{39} 。两个第一后备保护 L_7S_p 和 L_7R_p 的动作原理为：如果 L_7 故障，而 L_7S_m 未动作，那么 L_7S_p 动作跳开 CB_{29} ；如果 L_7 故障，而 L_7R_m 未动作，那么 L_7R_p 动作跳开 CB_{39} 。线路的第二后备保护用于相邻区域故障的起保护作用。如 L_7S_x 的动作原理为：当 B_8 故障， CB_{39} 未跳开时， L_7S_x 动作跳开 CB_{29} ；当 B_7 故障， CB_{39} 或 CB_{33} 未跳开时， L_7S_x 动作跳开 CB_{29} 。 L_7R_x 的动作原理为：当 B_6 故障， CB_{29} 未跳开时， L_7R_x 动作跳开 CB_{39} ；当 B_5 故障， CB_{26} 或 CB_{29} 未跳开时， L_7R_x 动作跳开 CB_{39} 。

符号对应表：

28 个元件：

A1~A4:s[1] ~s[4];

T1~T8:s[5] ~s[12];

B1~B8:s[13] ~s[20];

L1~L8:s[21]~s[28];

40 个断路器：

c[t][1] ~c[t][40];

(t 代表时序数取 1, 2, 3)

根据保护动作原理所编写的断路器时序动作函数见附录

我们共测试了 35 种故障情况。其中 28 种情况属于主保护正确动作，成功地跳开其两端的断路器的简单情况，另外 7 种情况属于有保护或断路器误动作的复杂情况。所有 35 种情况的计算结果都全部正确。且都找到了全部的最优解。这里列出了 7 种复杂情况的诊断结果见表 3.1。表 3.1 中有些情况的诊断结果不止

一个。这些结果对应的目标函数值相等。其可信程度是相同的。

当解群规模为 100, 迭代 20 次时, RGA 可求得其中 5 种情况下的最优解或全部多个最优解。当解群规模为 100, 迭代 50 次时, RGA 的结果得到明显改善, 但它仍不能求得全部 7 种情况下的最优解或全部多个最优解。当解群规模为 100, 迭代 200 次时, 求得了全部 7 种情况下的最优解或全部多个最优解。

值得注意的是第 32 种故障情况 (见表 3.1), 实际测试时情况 2 出现次数最多, 第结果 4 和结果 1 出现次数较少, 而结果 3 几乎不出现 (测试 50 次出现 1 次) 这说明算法具有某种偏向性。而第 35 种情况, 结果 1 和结果 2 出现概率几乎相同。

表 3.1 遗传算法部分测试结果

测试 序号	在各个保护时段内跳闸的断路器			诊断结果
	主保护动作 时段	第一后备保护动作 时段	第二后备保护动作 时段	
29	CB_4 、 CB_5 、 CB_7 和 CB_9	无	CB_{12} 和 CB_{27}	B_1 故障
30	CB_4 、 CB_5 、 CB_6 、 CB_7 、 和 CB_9	CB_{11}	无	B_1 和 L_1 故障
31	CB_4 、 CB_5 、 CB_6 、 CB_7 、 CB_9 、 CB_{10} 和 CB_{12}	CB_8 和 CB_{11}	无	B_1 、 L_1 、 B_2 和 L_2 故障

32	无	CB_{14} 、 CB_{16} 、 CB_{29} 、 CB_{39}	无	1. T_3 和 L_7 故障 2. T_3 故障 3. L_7 故障 4. 无故障
33	CB_{21}	无	CB_{22} 、 CB_{23}	A_3 故障
34	CB_{19} 、 CB_{33} 、 CB_{34} 、 CB_{35} 、 CB_{36} 、 CB_{39}	CB_{29} 、 CB_{32} 、 CB_{37}	CB_{20} 和 CB_{30}	L_5 、 L_7 、 B_8 、 B_7 、 T_7 和 T_8 故障
35	CB_7 、 CB_{30} 、 CB_{39} 、 CB_{40}	CB_8 、 CB_{11} 、 CB_{12} 和 CB_{29}	无	1. L_1 、 L_2 、 L_7 和 L_8 故障 2. L_1 、 L_7 、 和 L_8 故障

第四章 电力系统故障测距

4.1 概述

当电力系统输电线发生故障时，通过准确的故障定位可以减轻巡线负担，节省大量的人力物力，从而提高运行可靠性，加快线路恢复供电，减少因停电而造成的经济损失，效益是明显的。随着电力系统的发展，输电线路电压等级和输送容量逐步提高，由输电线路故障造成的损失也越来越大。经过几十年的探讨和研

究，架空输电线路的故障测距方法在原理上和方法上都取得了一定的成果。特别是近年来，随着计算机在电力系统中的广泛应用，计算机故障测距方法的研究已成为最热门的课题之一。总的来说，目前的电力系统故障测距方法主要可划分为两大类：阻抗计算方法和行波故障测距方法。此外，智能化的故障测距方法正在起步阶段。不失一般性，以一个简单的单回双电源线路为例。假设在线路的某一点 K 发生经过渡电阻 R_f 的 A 相接地短路， K 点距线路本端的距离与线路全长的比为 D ，其集中参数等效电路如图 4-1。

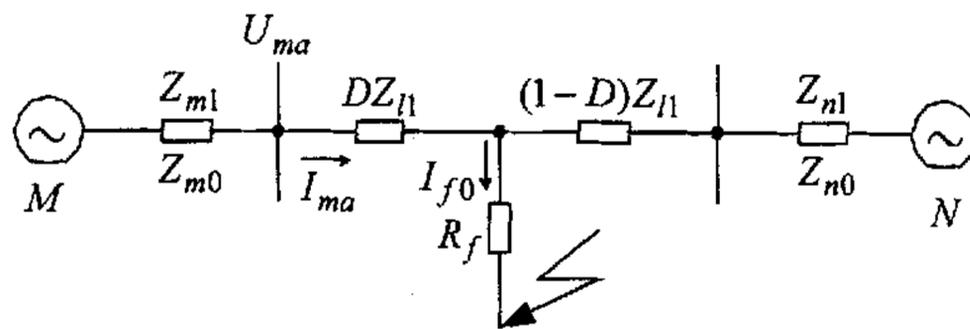


图 4-1 单回双电源线路的集中参数等效电路

在该网络中，已知量只有 M 侧的实测电流电压及线路阻抗参数 Z_{l1} 、 Z_{l0} ，而如何通过已知量，比较精确的估算出故障距离 D 就是故障测距的任务。此时，根据故障条件得方程：

$$U_{ma} = (I_{ma} + k \times I_{m0}) \times D \times Z_{l1} + 3R_f \times I_{f0} \quad (4-1)$$

又根据零序网络得：

$$I_{f0} = \frac{Z_{l0} + Z_{m0} + Z_{n0}}{(1-D) \times Z_{l0} + Z_{n0}} \times I_{m0} \quad (4-2)$$

其中： U_{ma} 、 I_{ma} 、 I_{m0} 为线路 M 端实测的 A 相电压电流及零序电流；

Z_{l1} 、 Z_{l0} 为线路正序、零序阻抗参数；

Z_{m0} 、 Z_{n0} 为线路 M 侧及 N 侧系统的零序阻抗参数；

$k = \frac{Z_{l0} - Z_{l1}}{Z_{l1}}$ 为零序补偿系数；

I_{f0} 为故障支路中流过的零序电流；不可测。

结合方程 (4-1)、(4-2) 并消去 I_{f0} 得：

$$U_{ma} = (I_{ma} + k \times I_{m0}) \times D \times Z_{l1} + 3R_f \times \frac{Z_{l0} + Z_{m0} + Z_{n0}}{(1-D) \times Z_{l0} + Z_{n0}} \times I_{m0} \quad (4-3)$$

从方程 (4-3) 可以看出：该方程中含有三个未知数 D 、 R_f 和 Z_{n0} ，无定解。

要求故障距离 D ，首先必须通过其它途径得到对侧系统参数 Z_{n0} ，由于系统运行条件的时变性，不采用通道这是难以实现的，所以一般只能得到 D 的一个近似解。不同的测距算法采用了不同的近似手段，但都未能从根本上解决精确测距所面临的问题：

- * 对侧系统信息的模糊性，即无法在线的知道对侧系统的信息；
- * 故障电阻不能精确测量。

4.2 阻抗算法

4.2.1 引言

目前，电力系统高压输电线路故障测距主要基于阻抗算法。阻抗算法是求解以差分或微分形式表示的电压平衡方程式。故障阻抗的计算可以使用线路两端的信息进行，也可以仅利用本侧测量信息进行近似处理。后者在工程应用中，费用较低，也不受系统通信技术的限制，长期以来一直是人们关注的焦点。但是阻抗算法大部分是建立在一种或几种简化假设的基础之上。经验表明，这些假设经常带来很大的误差。通过对这些误差进行补偿或者采用多于一端的线路参数，可以在一定程度上提高算法的精度，但对于某些系统结构或故障类型，阻抗算法存在明显不足，如高阻接地，多电源线路，断线故障，分支线路，线路结构不固定，有时同杆、有时分杆架设的双回线，直流输电线路等。即使在阻抗算法可以使用的场合，由于受互感器误差等多种因素的影响，阻抗算法也只能保证误差为 2~3 km 的测距精度。

4.2.2 利用本侧测量信息的测距算法

这类方法最初是建立在阻抗法或电抗法的原理的基础上，计算方法比较复杂，如利用牛顿—拉夫逊法、傅立叶级数方法、最小二乘估计方法等来计算故障阻抗，从而求得故障距离。采用此类方法的故障探测器由于不能消除过渡电阻的影响，探测精度都不高。后来人们对这种方法进行改进：检测工频电气量的过零点来消除过渡电阻的影响，此法原理简单但不易实现，测距精度也无明显改善。这是因为除单端供电线路以外，仅使用单端信息不能有效的消除对侧系统的影响，自然影响到测距精度。从现有文献看，这类算法至今尚不能或不能完全消除下述因素的影响：

- * 故障点过渡电阻；
- * 对侧系统运行阻抗；
- * 负荷电流。

针对以上问题，很多文献分别进行了研究，并有针对性的提出了一些有影响的测距算法如下。

1. 解微分方程算法

这类方法假定被保护电路的分布电容可以忽略，于是故障后测距装置安装处的电流电压应满足微分方程：

$$V = L \frac{dI}{dT} + R \times I \quad (4-4)$$

其中： V 、 I ：测距装置安装处实测的电压电流。

L 、 R ：测距装置安装处至线路故障点的正序电感和电阻。

这样，利用两个不同时刻的瞬时采样值可以获得两个独立的方程，从而解出和并进一步求出故障距离。其优点是响应时间短，可兼作保护和测距，但它也存在以下问题：

- * 算法视线路电流与故障支路电流为同相而求故障距离，因而其结果要受故障电阻及系统运行方式的影响；
- * 对长线路该算法算得的阻抗离散性大；
- * 对高阻接地故障，其测距精度不能保证。

2. 基于工频基波量的测距方法

对于一个简单的单回双电源线路，采用图 4-1 所示的电路模型。假设在距 M

端距离为 D 处发生了一经过渡电阻 R_f 的 A 相接地短路，其测距方程见 4-1 式。该矢量方程含有三个未知数 D 、 R_f 和 I_{f0} （实虚部），不能求得定解。解决这一问题的最初处理方法是用可测量的 I_{m0} 代替 I_{f0} ，然而由于对侧系统助增的影响导致 I_{f0} 与 I_{m0} 不同相位，给这种处理方法带来测距误差。针对这一问题，有多种不同的处理方法，从而形成了形形色色的测距算法。

(1) 采用 Fourier 变换和 Laplace 变换的测距算法

该类方法的最大特点是假定测量端电流 I_{m0} 与故障支路的总电流同相位，并利用傅氏或拉氏变换将时域量转化到频域进行分析。需要说明的是，这种假设事实上并不合乎实际，有些情况下， I_{f0} 与 I_{m0} 的相差 α 可能会达到十几度。

(2) 实时对称分量法

实时对称分量法的研究比较早，它一般假设故障电阻是一实数，再根据故障边界条件及状态方程 (4-1) 即可获得各种故障情况下的测距公式。而对于 I_{f0} 与 I_{m0} 不同相位问题的解决方法则各有差异。

(3) 零序电流相位修正法

这种方法的主要思想是令的相差为 α ，线路模型如图 4-1，则根据系统零序网络可得：

$$\alpha = \arg I_{ma} - \arg I_{f0} = \arg \frac{(1-D) \times Z_{l0} + Z_{n0}}{Z_{m0} + Z_{n0} + Z_{l0}} \quad (4-5)$$

由方程 4-1 做矢量图如图 4-2。

根据正弦定理并联立方程 4-1 和 4-5 可得迭代公式如下：

$$D(k) = \left| \frac{U_{ma}}{I_a \times Z_{l1}} \right| \times \frac{\sin[\theta_3 + \alpha \times (k-1)]}{\sin[\theta_4 - \alpha \times (k-1)]} \quad (4-6)$$

$$\alpha(k) = \arg \frac{[1 - D(k)] \times Z_{l0} + Z_{n0}}{Z_{m0} + Z_{n0} + Z_{l0}}$$

$$\alpha(0) = 0, \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots, n \quad (4-7)$$

随着迭代过程的进行， α 将渐渐收敛到真值，计算故障距离 $0Q$ 也将收敛到

实际故障距离 OP 。这种处理方法理论上可以消除过渡电阻的影响，如采用纯故障分量还可以消除负荷电流的影响。

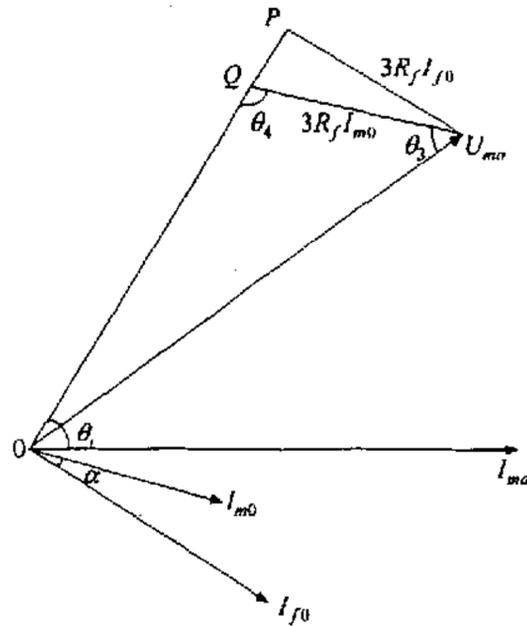


图 4-2 图 4-1 所示网络经过渡电阻 R_f 的 A 相接地矢量图

(4) 零序电流修正法

对图 4-1 所示的系统结构有：

$$I_{f0} = I_{m0} \times \frac{Z_{m0} + Z_{l0} + Z_{n0}}{(1-D) \times Z_{l0} + Z_{n0}} \quad (4-8)$$

联立方程 4-1 和 4-8 并令 I_{f0} 的初值 $I_{f0}(0) = I_{m0}$ ，则进行实虚部分解可得如下迭代公式：

$$D(k) = \frac{U_{mar} \times \left| \frac{I_{f0x}(k-1)}{I_{f0r}(k-1)} \right| - U_{max}}{\Delta U_{ar} \times \left| \frac{I_{f0x}(k-1)}{I_{f0r}(k-1)} \right| - \Delta U_{ax}}$$

$$I_{f0}(k) = I_{m0} \times \frac{Z_{m0} + Z_{n0} + Z_{l0}}{[1 - D(k)] \times Z_{l0} + Z_{n0}}$$

$$I_{f0}(0) = I_{m0} \quad (4-9)$$

该法虽然形式上和零序电流相位修正法不一样，但实质上仍是用 I_{m0} 替代 I_{f0} 的一种迭代过程。它们存在的共同问题是迭代的结果可能收敛至伪解（包括负距或正向误距），同时迭代也可能不收敛，尽管这种不收敛情况可望通过移动

数据窗得到改善。

(5) 解方程算法

该算法是对图 4-1 导出的方程 4-3 直接求解。

4-3 式是故障距离 D 的二次方程，它很好的处理了 I_{m0} 与 I_{f0} 不同相的问题，此时只要给出对侧系统的阻抗值即可获得 D 的精确解。但该方法存在以下问题：

- * 只有给出精确的对侧系统正序或零序阻抗值时，才能准确测出故障距离；
- * D 有两个解，有可能均在线路范围内，此时将无法确定何解反映真实的故障点。

综上所述，方法 (1) ~ (4) 均有可能使测距结果落到方程 4-3 的一个假根上。更进一步的分析还表明：凡是使用迭代算法或对相位差 α 进行近似处理的方法都有可能导致这种结果。

4.2.3 利用双端信息的故障测距算法

如前所述，这一类方法必须使用通道来传输线路两端信息。在原理上可以做到很精确的测距。应用被保护线路两端阻抗数据的故障定位算法，是根据两侧的实测电流量和阻抗值并计入故障电阻的影响来计算故障距离，原理上可以完全消除过渡电阻的影响，但该方法在线路两端的距离继电器中流过的电流大致相等时会产生很大的误差。

4.3 行波故障测距方法简介

行波故障测距的研究可追溯到 50 年代，人们根据电压和电流行波在线路上有固定的传播速度这一特点，提出了数种行波故障测距方法，并分为 A、B、C 三种类型，其中 A 型是根据故障点出现的行波到达母线后反射到故障点，再由故障点反射到达母线的的时间差来测距；B 型是根据故障点出现的行波分别向两侧母线运动的时间并借助专用的通道来实现；C 型是故障后人为施加高频或直流信号，根据雷达原理制成。A 型测距由于要求记录行波波形的，技术上比较困难，同时也难以区分是故障点的反射波还是对侧母线的反射波，而且对于行波的第次折、反射由于反射信号可能很微弱而难以实现；对 B 型测距，因为对通道的要求过高，

使得测距投资过大，也不便于广泛应用；C型测距由于瞬时性故障是瞬时出现的，人为施加雷达信号往往测不到故障，也难以真正使用。

随着微电子技术和计算机技术的发展，准确记录故障后行波电流分量或电压分量已是一件很容易的事。特别是GPS（全球卫星定位系统）的出现，给利用线路两端母线行波波头到达时间实现的故障测距带来了新的生机。

Ko Y M于1980年提出了应用于单端电气量的距离保护方案，用求导数判断信号是否突变的方法来确定时间间隔 $2T$ ；其后Desikachar K V也对此进行了研究，方法上并无突破。1983年，Croselly P A提出了利用行波相关系数来确定时间 $2T$ 的距离保护方案，其后发表的关于行波故障测距算法的文献基本上都是采用相关技术来求入射波与反射波的时延，并以此时延来计算故障距离。但这些方法分别存在着测距算法无方向性、出口短路有死区等问题，而且不能排除下列因素的影响：

- * 所用模型都是基于理想无损线路或理想无畸变线路的假设，实际上由于行波的衰减或畸变而造成的误差较大；

- * 线路末端短路时，由于波的折射，使测距结果出现错误；

- * 当线路近区短路时，由于很小，造成硬件性能不能满足测距要求。

在Croselly P A之前，Jons A T还提出了通过判别正向波与反射波出现顺序的比较式方向行波原理，Vrintins M提出了判别故障行波轨迹的轨迹式方向行波原理，这些方案解决了故障方向的判别问题，但其灵敏度又随故障初始相角的不同而变化，在某些情况下，甚至造成死区。针对这个问题，有些文献对轨迹式方向行波原理进行了分析，找到了一个可以用测量量表示的幅值恒定的虚构电压源，从而解决了该问题。

与根据时延 $2T$ 确定故障距离的锡箔测距思想相比，1973年Kohlas J根据输电线路的偏微分方程和故障点电压极值条件，提出了另一种新颖的行波测距方法，并利用行波特征曲线对其进行数字化处理。1986年，Ibe A O和Cory B J也对该方法进行了进一步的探讨和研究。这种方法理论上不需对侧系统信息，而且测距精度只受迭代区间长度的影响，解决了测量 $2T$ 的困难；但它对采样的要求很高（平均需 $5\mu\text{s}$ 测一点），当用插值方法解决该问题时又带来很大误差，因

此并不实用。直至 1992 年, Rangbar A M 等人对这种方法进行了较大的改进, 极大的降低了对采样频率的要求。

在国内, 通过近年来的研究, 对故障行波进行分析, 找到了一些不变的行波特征, 提出了特征行波方案, 并应用模变理论, 将其推广到有耦合的多回线路。

总的说来, 行波方法有许多独特的优点, 今后将在测距和距离保护中得到更为广泛的应用。

4.4 智能化测距方法简介

近年来, 随着计算机技术的发展, 通过建立知识库、数据库和规则库, 可以使计算机模拟专家的行为, 这种方法也正在逐步应用于电力系统故障测距。

这类方法一般利用数据库进行谐波分析, 并利用辅助信号输入来准确确定故障位置。如日本通过在架空地线上隔点设置光纤传感器来实现, 台北市则在城市供电中利用开关的辅助节点输入来实现。该类方法可以很准确的确定故障点, 但辅助设备成本很高, 相信将来会有所发展。

另外还有使用在线识别方法的智能化测距。最早的两篇报道由 Richards G G 于 1982 和 1983 年分别在 IEEE 和 IEE 上发表。其基本思想是利用在线动态参数估计来进行故障测距: 首先建立系统各序模型, 然后将系统瞬时采样值和物理模型的数字响应进行比较, 通过不断的调整线路模型参数而测距, 其主要特点如下:

- * 电路采用集中参数模型;
- * 不需任何滤波环节;
- * 需要知道两侧系统参数;
- * 动态参数辨识过程中要多次解非线性方程。

第五章 基于遗传算法的电力系统故障测距方法

由前面的介绍我们可以知道电力系统故障测距是一项非常重要的工作。由于技术上的原因, 目前这方面的工作还有待于进一步完善。而遗传算法是一种生命力很强的寻优搜索方法。于是人们想到利用遗传算法来进行电力系统的故障测

距。本文在这方面做了初步尝试，得到了较好的结果。

我们知道，遗传算法是一种 0—1 规划方法，它工作于适应值（目标函数值）的基础之上。而我们使用的是基于阻抗算法的故障测距方法，这是一个连续变量问题。于是首先要解决的问题就是怎样将该故障测距问题转化为 0—1 规划问题，以及怎样建立目标函数。有了这两个前提条件之后，就可以建立起算法的结构，进行迭代计算，最终求得所要的结果。

这里需要指出的是，在一个完善的故障测距软件中，进行测距的迭代计算之前，需要做的工作还很多。我们能够得到的信息只有母线上的三相电流电压瞬时采样值以及线路的各种参数。当某一线路发生故障后，首先要判断是哪一条线路发生了故障，然后再判断故障类型，因为不同的故障类型其电路模型也是不同的。仅就单相接地故障而言，还需判断出故障相。由于这些工作不是本章的研究内容，这里不做讨论，而是将这些信息均视为已知。

下面以一个简单系统的单相接地故障为例，对运用遗传算法进行电力系统故障测距工作的各个环节做一介绍。

5.1 单相接地故障测距模型

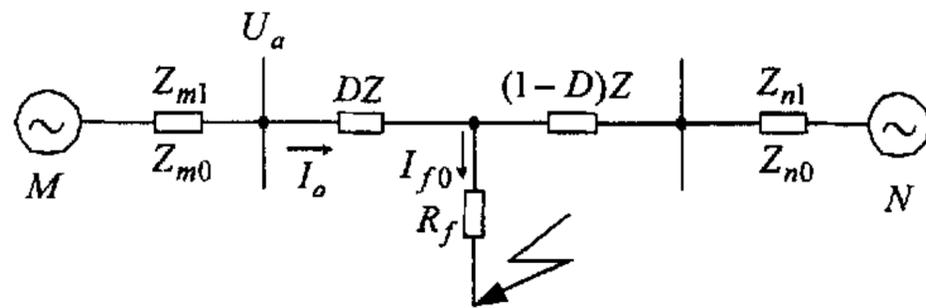


图 5-1 单回双电源集中参数等效电路

我们仍然采用图 4-1 的简单系统，现重画如图 5-1，并设 A 相发生了接地故障。

图中： D 为故障点到本侧的距离与线路全长的比，有 $0 \leq D \leq 1$ ；

Z 、 Z_0 分别为线路的正序、零序阻抗，包括电阻 R 、 R_0 和电感 L 、 L_0 ；

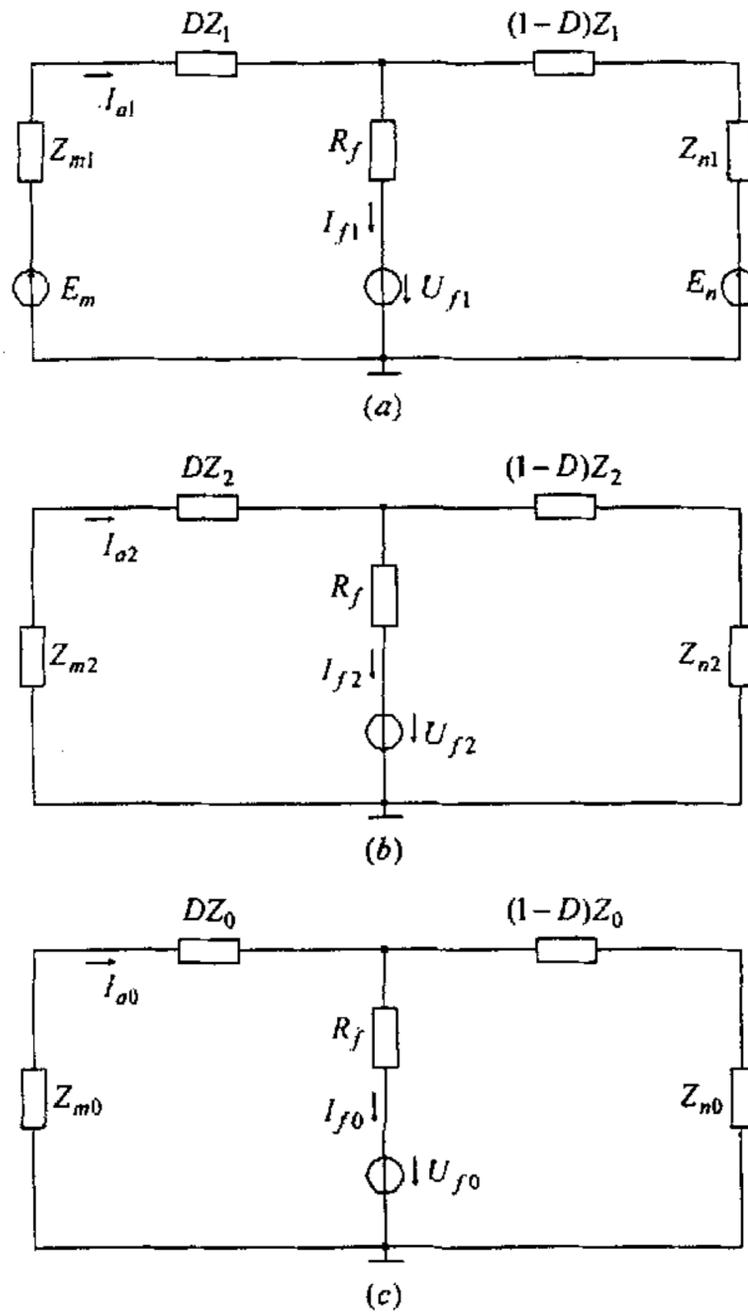
Z_n 、 Z_{n0} 分别为对侧系统的正序、零序等效阻抗，与系统运行方式、接线方

式等多种因素有关，不可测；

R_f 为接地过渡电阻，不可测。

请注意，这里忽略了接地电感。

进一步的分析可以得到 A 相接地故障后的正、负、零三序等效网络如图 5-2。



(a) 正序网络, (b) 负序网络, (c) 零序网络

图 5-2 三序等效网络

根据三序网络图可知：

$$U_{a1} = DZ_1 I_{a1} + R_f I_{f1} + U_{f1}$$

$$U_{a2} = DZ_2 I_{a2} + R_f I_{f2} + U_{f2}$$

$$U_{a0} = DZ_0 I_{a0} + R_f I_{f0} + U_{f0}$$

(5-1)

将上三式相加，得到：

$$U_a = U_{a1} + U_{a2} + U_{a0} = D(I_{a1}Z_1 + I_{a2}Z_2 + I_{a0}Z_0) + R_f I_f \quad (5-2)$$

其中有 $U_{f1} + U_{f2} + U_{f0} = 0$

$$I_f = I_{f1} + I_{f2} + I_{f0}$$

因为是单相接地故障，有 $I_{f1} = I_{f2} = I_{f0} = \frac{I_f}{3}$ ，将其代入式 5-2，并设

$Z_1 = Z_2 = Z$ ，同时考虑到 $I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} = I_a$ ，得：

$$U_a = DI_a Z + DI_{a0}(Z_0 - Z) + 3R_f I_{f0} \quad (5-3)$$

观察式 5-3，其中 R_f 和 I_{f0} 不可测，而且 I_{f0} 在故障后的暂态过程中随时间不断变化，这给利用式 5-3 解故障距离 D 带来了困难。要解决这个问题，可以用不随时间变化的参量 Z_{n0} 来代替 I_{f0} ，实现方法如下：

根据零序网络，有：

$$I_{f0} = I_{a0} - \frac{U_{a0} - DI_{a0}Z_0}{(1-D)Z_0 + Z_{n0}} \quad (5-4)$$

将式 5-4 代入式 5-3 并整理得：

$$\begin{aligned} & ZZ_0 [D(1-D)(I_a - I_{a0})] + ZZ_{n0} [D(I_a - I_{a0})] + Z_0 Z_{n0} DI_{a0} + Z_0^2 [D(1-D)I_{a0}] \\ & + Z_0 [3R_f I_{a0} - (1-D)U_a] + Z_{n0} (3R_f I_{a0} - U_a) - 3R_f U_{a0} = 0 \end{aligned} \quad (5-5)$$

将上式移植到复频域，引入算子 $S = j\omega$ ，

$$\text{有 } Z = R + SL, \quad Z_0 = R_0 + SL_0, \quad Z_{n0} = R_{n0} + SL_{n0},$$

代入式 5-5 并整理得：

$$S^2(I_a DLL_p + I_{a0} L_p L_q) + S(I_a A + I_{a0} B - U_a L_p) + I_a DRR_p + I_{a0} C - U_a R_p - 3R_f U_{a0} = 0 \quad (5-6)$$

其中： $L_p = (1-D)L_0 + L_{n0}$ ， $L_q = D(L_0 - L)$ ， $R_p = (1-D)R_0 + R_{n0}$ ，

$$A = D[RL_{n0} + LR_{n0} + (1-D)(R_0 L + RL_0)],$$

$$B = D(R_0 L_{n0} + L_0 R_{n0}) + 2R_0 L_0 D(1-D) + 3R_f (L_0 + L_{n0})$$

$$-D(1-D)(R_0L + RL_0) - D(RL_{n0} + LR_{n0}),$$

$$C = D(R_0 - R)R_p + 3R_f(R_0 + R_{n0}) \quad (5-7)$$

可以将式 5-6 表示为矩阵形式:

$$\mathbf{S} \times \boldsymbol{\alpha} = 0 \quad (5-8)$$

$$\text{式中 } \mathbf{S} = \begin{pmatrix} S^2 & S & 1 \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{\alpha} = \begin{pmatrix} I_a DLL_p + I_{a0} L_p L_q \\ I_a A + I_{a0} B - U_a L_p \\ I_a DRR_p + I_{a0} C - U_a R_p - 3R_f U_{a0} \end{pmatrix}.$$

以上所有电压电流均为向量, 而故障后采集到的所有电压电流均为瞬时值。

为把式 5-8 转化为瞬时值形式, 对其做 Z 变换, 令 $S = \frac{2}{T} \frac{1-Z^{-1}}{1+Z^{-1}}$ (其中 Z 为 Z 变

换因子, T 为采样间隔时间), 代入式 5-8, 整理后得:

$$\mathbf{Z} \times \boldsymbol{\beta} = 0 \quad (5-9)$$

$$\text{式中 } \mathbf{Z} = \begin{pmatrix} Z^{-2} & Z^{-1} & 1 \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{\beta} = \begin{pmatrix} I_a A' + I_{a0} B' + U_a C' - 3R_f U_{a0} \\ I_a D' + I_{a0} E' - 2R_p U_a - 6R_f U_{a0} \\ I_a F' + I_{a0} G' - U_a H' - 3R_f U_{a0} \end{pmatrix}.$$

对式中的各系数说明如下:

$$A' = \frac{4}{T^2} DLL_p - \frac{2A}{T} + DRR_p,$$

$$B' = \frac{4}{T^2} L_p L_q - \frac{2B}{T} + C,$$

$$C' = \frac{2L_p}{T} - R_p,$$

$$D' = 2DRR_p - \frac{8}{T^2} DLL_p,$$

$$E' = 2C - \frac{8}{T^2} L_p L_q,$$

$$F' = \frac{4}{T^2} DLL_p + \frac{2A}{T} + DRR_p,$$

$$G' = \frac{4}{T^2} L_p L_q + \frac{2B}{T} + C,$$

$$H' = \frac{2L_p}{T} + R_p$$

对于一系列的采样数据 $X[t_0 - nT]$ 、 $X[t_0 - (n-1)T]$... $X[t_0 - T]$ 、 $X[t_0]$ ， Z 变换域和时域有下列的对应关系：

$$Z^{-n}f(Z) \Rightarrow f[X(t_0 - nT)] \quad (5-10)$$

则式 5-9 转化为时域表达式：

$$\begin{aligned} & i_a(t_0 - 2T)A' + i_{a0}(t_0 - 2T)B' + u_a(t_0 - 2T)C' - 3R_f u_{a0}(t_0 - 2T) + \\ & i_a(t_0 - T)D' + i_{a0}(t_0 - T)E' - 2R_p u_a(t_0 - T) - 6R_f u_{a0}(t_0 - T) + \\ & i_a(t_0)F' + i_{a0}(t_0)G' - u_a(t_0)H' - 3R_f u_{a0}(t_0) = 0 \end{aligned} \quad (5-11)$$

观察式 5-11，其中含有三个采样点的数据，这些数据包括正序和零序的电压电流参量。若要求解某一时刻的某一参量的瞬时值，可将其它参量以及其它时刻该参量的值视为已知。本文的思想就是根据式 5-11，利用多个采样点的数据求解 u'_a 。不难看出，利用 n 个采样点的数据可以求出 $n-2$ 个 u'_a 的瞬时值。

5.2 基于遗传算法的故障测距算法

从式 5-11 可以看出，该方程中含有四个未知量 D 、 R_f 以及 R_{n0} 、 L_{n0} ，无法求出 D 的定解。而遗传算法正是解决此类问题的能手，它可以同时求得多个变量的最优解，这也正是遗传算法在此问题中的优势所在。上一节我们建立了故障测距的电路模型，有了算法的数学基础。

5.2.1 编码方法

我们知道，在建立遗传算法程序之前，首先要将问题转化为 0—1 规划问题。以上的四个未知量都是连续变量，可以根据精度的要求，将它们编码为一定长度的二进制代码串。在本文中，各变量都要求精确到千分之一，即保留三位小数。下面分别说明四个变量的编码方法：

* 故障距离 D ：因为 $0 \leq D \leq 1$ ，它是一个非负的纯小数，可以将其视为区间 $[0, 1000]$ 内的一个整数，因此它的编码长度可设为 10 位（0~1024），解码后缩小千倍即可得到 D 的值；

* 过渡电阻 R_f ：它的经验值在 $0 \sim 1000 \Omega$ 之间，且含有整数小数两个部分。

为了计算方便，程序中将这两部分分别处理。为此，每个 R_f 值可以编码成两个均为 10 位的二进制代码串，它们分别表示 R_f 的整数部分和小数部分，解码后将小数部分除以 1000 再和整数部分相加即得到 R_f 的值：

* 对侧系统参数 R_{n0} 和 L_{n0} ：由于它们的特点与 R_f 类似，因此它们的编码方法与 R_f 相同，分别用两个均为 10 位的二进制代码串表示它们的整数部分和小数部分。

5.2.2 适应值函数的建立

接下来，我们要建立一个非负的适应值函数（目标函数）。为此，可以给以上四个未知量设一个初始值，利用式 5-11 求出 u'_a ，检测 u'_a 与 u_a 的差值是否接近于零。为保证目标函数的非负，用 $(u'_a - u_a)^2$ 作为目标函数。运用遗传算法的规则不断的改变变量的值，使目标函数值为零的各个变量的值即为我们所要的结果。

这里存在两个问题，首先是该问题为多变量问题，结果可能得到伪根。解决方法是利用多个采样点求出多个时刻的 u'_a 值，用 $\sum (u'_a - u_a)^2$ 作为目标函数，这样可以减小求得伪根的几率。本文中使用了 6 个采样点，求出 4 个时刻的 u'_a 值；其次，遗传算法解决的是最大化问题，即其结果是使适应值最大，而此问题为最小化问题。为此，可以用一个正数 W 减去目标函数值作为适应值，即适应值函数

为 $W - \sum_{j=1}^4 (U'_a[j] - U_a[j])^2$ 。为保证适应值的非负，要求 W 足够大。

第六章 Z 变换和数字滤波

6.1 连续和离散系统间的关系

序列 $X(nT)$ 通常得自对连续时间波形 $X(t)$ 每 T 秒进行一次抽样。在这种情况下, 能够建立序列的频率响应 $X(e^{j\omega T})$ 与连续时间波形的傅立叶变换 $X_A(j\Omega)$ 间的关系是很重要的。下面将简述导出此结果的必要步骤并讨论它的含意。

连续时间波形 $X(t)$ 的傅立叶变换关系是

$$X_A(j\Omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\Omega t} dt$$
$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X_A(j\Omega)e^{j\Omega t} d\Omega$$

对离散时间波形必需的变换关系是

$$X(e^{j\omega T}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT)e^{-j\omega nT}$$
$$x(nT) = \frac{T}{2\pi} \int_{-\pi/T}^{\pi/T} X(e^{j\omega T})e^{j\omega nT} d\omega$$

由于 $x(nT) = x(t)|_{t=nT}$, 在 $t=nT$ 求 (3.2) 式的值并以无限多个每段宽度为 $2\pi/T$ 的积分段的和来求无限积分就可以把 $X_A(j\Omega)$ 和 $X(e^{j\omega T})$ 联系起来, 即

$$x(nT) = \frac{1}{2\pi} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \int_{(2m-1)\pi/T}^{(2m+1)\pi/T} X_A(j\Omega)e^{j\Omega nT} d\Omega$$

对 (3.5) 式的积分进行简单的运算, 并以 ω 代 Ω 便得到结果

$$x(nT) = \frac{T}{2\pi} \int_{-\pi/T}^{\pi/T} \left[\frac{1}{T} \sum_{m=-\infty}^{\infty} X_A\left(\omega + \frac{2\pi}{T}m\right) \right] e^{j\omega nT} d\omega$$

令 (3.6) 式方括号内的项与 (3.4) 式中的 $X(e^{j\omega T})$ 相等, 即得出所需要的关系

$$X(e^{j\omega T}) = \frac{1}{T} \sum_{m=-\infty}^{\infty} X_A\left(\omega + \frac{2\pi}{T}m\right)$$

上式表示序列的周期性频率响应由无限多个连续波形的频率响应分量之和组成。为了防止出现信息从一个频带向另一个频带移动的混淆现象, 应用足够小的采样

时间对连续时间波形进行采样。

6.2 z 变换与拉氏变换和傅氏变换的关系

一个离散序列 $x(n)$ 的 z 变换定义为 $X(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)z^{-n}$ ，这是一个以 z 为变量的函数， z 是一个复变量，它具有实部和虚部，所以 z 是一个以实部为横坐标，虚部为纵坐标的平面上的变量，这个平面也称为 z 平面。

我们常用 $Z[x(n)]$ 表示对序列 $x(n)$ 进行 z 变换，也即

$$Z[x(n)] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)z^{-n}$$

这种变换也称为双边 z 变换，与此相应存在着另一种单边 z 变换，单边 z 变换是只对单边序列（即 $n \leq -1$ 时序列值永远为零的序列）进行变换的 z 变换，它的定义为

$$X_1(z) = \sum_{n=0}^{\infty} x(n)z^{-n}$$

单边 z 变换只有在少数情况下与双边 z 变换有所区别，即需要考虑序列的起始条件，其它特性则都和双边 z 变换相同。因此在多数情况下，可以把单边 z 变换只看作是双边 z 变换的一种特例，即因果序列情况下的双边 z 变换。

z 变换的序列移位特性： $Z[x(n - n_0)] = z^{-n_0} X(z)$ ，位移 n_0 可以为正（右移），也可以为负（左移）。此特性的证明如下：

$$Z[x(n - n_0)] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n - n_0)z^{-n} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(m)z^{-(m+n_0)} = z^{-n_0} \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(m)z^{-m} = z^{-n_0} X(z)$$

对连续信号 $x_a(t)$ 进行理想采样后，其拉氏变换为

$$\hat{X}_a(s) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_a(nT)e^{-nsT}$$

同时，对采样序列 $x(n) = X_a(nT)$ 的 z 变换为： $X(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)z^{-n}$

z 变换与拉氏变换的关系：从上看出，当 $z=e^{sT}$ 时，采样序列的 z 变换就等于其理想采样信号的拉氏变换： $X(e^{sT})=\hat{X}_a$ ，这说明，从理想采样信号的拉氏变换到采样序列的 z 变换，就是由复变量 s 平面到复变量 z 平面的映射变换，这个映射关系就是 $z=e^{sT}$ 说明 s 平面的虚轴映射到 z 平面上是半径为 1 的圆，而 s 的左半平面映射到 z 平面上是单位圆以内， s 的右半平面映射到 z 平面上是单位圆以外。再看 s 的虚轴与 z 的幅角 ω 的关系式， $\omega=\Omega T$ 是线性关系， $\Omega=0$ 时 $\omega=0$ ，即 s 平面的实轴映射到 z 平面上是正实轴，原点 $s=0$ 映射到 $z=1$ 点。但是由于 $z=re^{j\omega}$ 是 ω 的周期函数，因此当 Ω 由 $-\pi/T$ 增长到 π/T 时， ω 由 $-\pi$ 增长到 $+\pi$ ，幅角旋转了一周，映射了整个 z 平面，因此 Ω 每增加一个采样频率 $\Omega_s=2\pi/T$ ， ω 就相应增加一个 2π ，也即重复旋转一周， z 平面重叠一次。这种多值函数的映射关系可以想象为将 s 平面裁成一条条宽为 Ω_s 的横带，这些横带相互重叠映射到整个 z 平面。也可以把 z 平面想象为以原点为中心的无穷层重叠在一起的螺旋面，即无穷阶黎曼平面，当 s 平面上沿 $j\Omega$ 轴变化时，映射到 z 域的黎曼面上则是随着幅角 ω 的增加由一个螺旋面旋转到另一个螺旋面。

z 变换与傅氏变换的关系：傅氏变换是拉氏变换在徐忧伤的特例，即 $s=j\Omega$ ，映射到 z 平面上正是单位圆 $z=e^{j\Omega T}$ ，将此关系代入 $z=e^{sT}$ ，就知采样序列在单位圆上的 z 变换就等于其理想采样信号的幅氏变换，序列的幅氏变换是单位圆上的 z 变换，反映的是序列的频谱

6.3 z 变换在故障测距算法中的应用

利用前面所介绍的 z 变换的知识，我们把 z 变换用到故障测距的算法中，用 z 变换法对传输线发生三相短路后测到的采样数据进行处理。

把 (5-11) 方程式进行拉氏变换，得到

$$a_1(s)R_f + a_2(s)D + a_3(s)D^2 + a_4(s) = 0 \quad (6-1)$$

利用 z 变换与拉氏变换的关系，可知 $z = \frac{2-Ts}{2+Ts}$ ，推出

$s = \frac{2}{T} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}$, 把此式代入(6-1)式中, 得到

$$a_1 \left(\frac{2}{T} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \right) R_f + a_2 \left(\frac{2}{T} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \right) D + a_3 \left(\frac{2}{T} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \right) D^2 + a_4 \left(\frac{2}{T} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \right) = 0 \quad (6-2)$$

对方程式(6-2)左右两边同乘以一因子, 使各系数都消去分母, 得到

$$b_1(z)R_f + b_2(z)D + b_3(z)D^2 + b_4(z) = 0 \quad (6-3)$$

利用逆 z 变换的性质: $Z^{-1}[z^{-n}x(z)] = x(t_0 - nT)$

分别在 t_0 和 $t_0 - T$ 点对方程进行逆 z 变换, 得到

$$b_1(t_0)R_f + b_2(t_0)D + b_3(t_0)D^2 + b_4(t_0) = 0 \quad (6-4)$$

$$b_1(t_0 - T)R_f + b_2(t_0 - T)D + b_3(t_0 - T)D^2 + b_4(t_0 - T) = 0 \quad (6-5)$$

合并(6-4)式和(6-5)式, 消去未知量 R_f , 得到

$$B_1 D + B_2 D^2 + B_3 = 0 \quad (6-6)$$

其中 $B_1 = b_2(t_0 - T) - \frac{b_1(t_0 - T)b_2(t_0)}{b_1(t_0)}$

$$B_2 = b_3(t_0 - T) - \frac{b_1(t_0 - T)b_3(t_0)}{b_1(t_0)}$$

$$B_3 = b_4(t_0 - T) - \frac{b_1(t_0 - T)b_4(t_0)}{b_1(t_0)}$$

这样只要求出一元二次方程式(6-6)中的各系数, 我们就可以解得方程的解 D , 从而得到短路距离。

6.4 数字信号处理概貌

近些年来, 数字信号处理领域已迅速扩展到包含许多单独部门的程度, 并为这些部门提供了牢固的理论基础。由于数字信号处理多半是依据离散时间线性非时变系统理论, 所以这一理论是该领域的主导。

数字信号处理领域的两个主要分支是数字滤波和频谱分析^[37]。数字滤波领域

进一步分成有限脉冲响应 (FIR) 滤波器和无限脉冲响应 (IIR) 滤波器。数字频谱分析领域进一步分为用离散傅立叶变换 (DFT) 的频谱计算和用统计方法对随机信号频谱的计算—例如数字系统中量化噪声频谱的计算。在实际频谱分析技术中几乎无一例外地采用快速傅立叶变换 (FFT) 和有关的快速卷积法。数字信号处理的其余方面有如雷达理论, 声纳理论, 通信, 语音, 地震学等。如果不同时对用有限精度的硬件或软件去实际实现这些系统所涉及的各种问题有充分的理解, 几乎所有关于数字滤波器和频谱分析仪设计的理论上的考虑就不会有什么价值。所以, 实现方面的问题首先与离散系统中量化的数学基础有关; 其次是与要求用硬件还是用软件来实现有关, 懂得这两种实现方法内在的限制和优点是重要的。

许多应用范围正是在传统上是采用模拟元件来进行信号处理的领域。模拟方法已经取得了如此多的进展并且还在继续发展, 因此出现了采用数字信号处理技术是否适宜等许多疑问。答案要到科学和工程方法的及其核心的方面去找。鉴于工程问题的系统阐述经常如同那些所谓“软”的科学 (如人类学, 心理学等) 那样不很明确, 这些问题的解决显得越来越取决于精度和再现能力。例如人们曾不懈地试图更加精确的测量光速、普朗克常数和其它通用常数。所以, 虽然许多信号处理系统用模拟方法来实现最经济, 但数字系统具有达到工程师们所要求的有保证的精度和实际上完全再现的能力。从而这又将有助于刺激元件制造者重视提高数字工艺的方法, 最终会使数字实现更为经济。总之, 基于数字计算机已经胜过模拟计算机的同样理由, 数字信号处理的重要性终将超过模拟信号处理。

数字信号处理的第一个环节是采样, 采样是把连续信号变为离散信号的手段。采样器一般由电子开关组成, 开关每隔 T 秒短暂的闭合一次, 将连续信号接通, 实现一次采样。理想采样就是假设采样开关闭合时间无限短, 即 τ 趋于零的极限情况。这时采样序列将表示为一个冲激函数的序列, 这些冲激函数准确的出现在采样瞬间, 而它的面积则准确的等于输入信号在采样瞬间的幅度, 也可以把理想采样看作是对冲激脉冲载波的调幅过程

在实际采样器中, 任何开关都不能达到宽度为零的极限情况。但是当 τ 远远小于 T 时, 采样器就很接近于一个理想采样器了。理想采样可以看作是实际采样的一种科学的本质的抽象, 它可以更集中的反映采样过程的一切本质的特性。

6.5 快速傅立叶变换(FFT 算法)

由于短路发生瞬间检测设备采集的信号是暂态信号,它包括一定量的谐波,容易出现峰值,如果用这样的数据进行计算,所得的结果就会产生偏差,影响测量的精度。所以必须采取一种有效的数字算法对采样信号进行处理,以滤去信号中的谐波,保留基频分量,这样才能保证故障测距的精确度。在本文中,是利用快速傅立叶算法来对采样信号进行滤波的。

通常称为快速傅立叶变换(FFT)的一组算法包含多种用以减少离散傅立叶变换(DFT)所需时间的技巧。由于在大多数频谱分析问题中DFT是主要的计算,而在某些实际场合,DFT的FFT实现能比直接计算DFT改善性能一百倍或更多,因而它是极端重要的,并且必须把它看成是利用频谱分析的数字信号处理技术所作认真努力的一部分。

有限长度的序列 $\{x(n)\}$ 的DFT定义成

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j(2\pi/N)nk} \quad k=0, 1, 2, \dots, N-1$$

可方便地把它写成如下形式

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W^{nk}, \quad \text{其中 } W = e^{-j(2\pi/N)}$$

可见 W^{nk} 是周期性的,且周期为 N ,即 $W^{(n+mN)(k+lN)} = W^{nk}$, $l=0, \pm 1, \dots$

在 $x(n)$ 为复数序列的情况下,完全直接计算 N 点DFT需要 $(N-1)^2$ 次复数乘法和 $N(N-1)$ 次复数加法。因此,对于一些相当大的 N 值(约1000)来说,直接计算它的DFT所需用的计算量过多。FFT的基本思想在于,将原有的 N 点序列分成两个较短的序列,这些序列的DFT可组合起来给出原序列的DFT。这样一来,例如,若 N 为偶数且原有的 N 点序列被分成两个 $(N/2)$ 点序列,那么为计算所期望的 N 点DFT将需要约 $N^2/2$ 次复数乘法,即比直接计算节省乘法约 $1/2$ 。因子 $(N/2)^2$ 表示直接计算 $(N/2)$ 点DFT所需要的乘法数,而乘数 2 表示必须完成两个DFT。可迭代运用上述处理方法以便计算 $(N/2)$ 点DFT化成计算两个 $(N/4)$ 点DFT从而得到又 $1/2$ 节省。节省 $1/2$ 仅仅是近似的,因为未将较小的DFT合并成所期望的 N 点DFT这一点计算在内。

我们就将 N 取为 2 的乘方的 N 点序列 $\{x(n)\}$ 举例说明上述处理方法。定义两个分别为 $x(n)$ 的偶数项和奇数项的 $(N/2)$ 点序列 $x_1(n)$ 和 $x_2(n)$,即

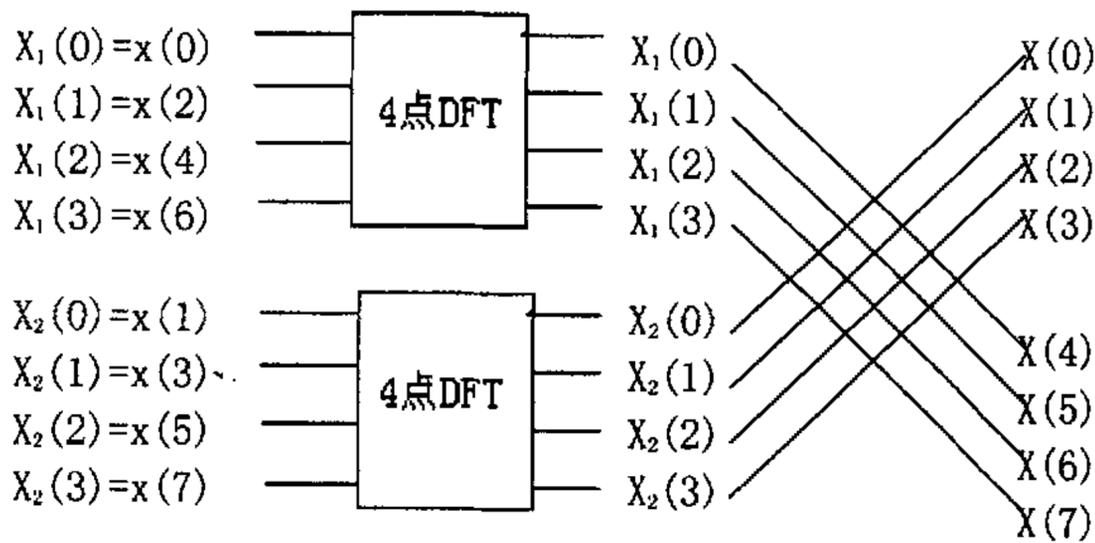
$$\begin{aligned} x_1(n) &= x(2n) \\ x_2(n) &= x(2n+1) \end{aligned} \quad n = 0, 1, \dots, \frac{N}{2} - 1$$

$\{x(n)\}$ 的 N 点DFT可写成

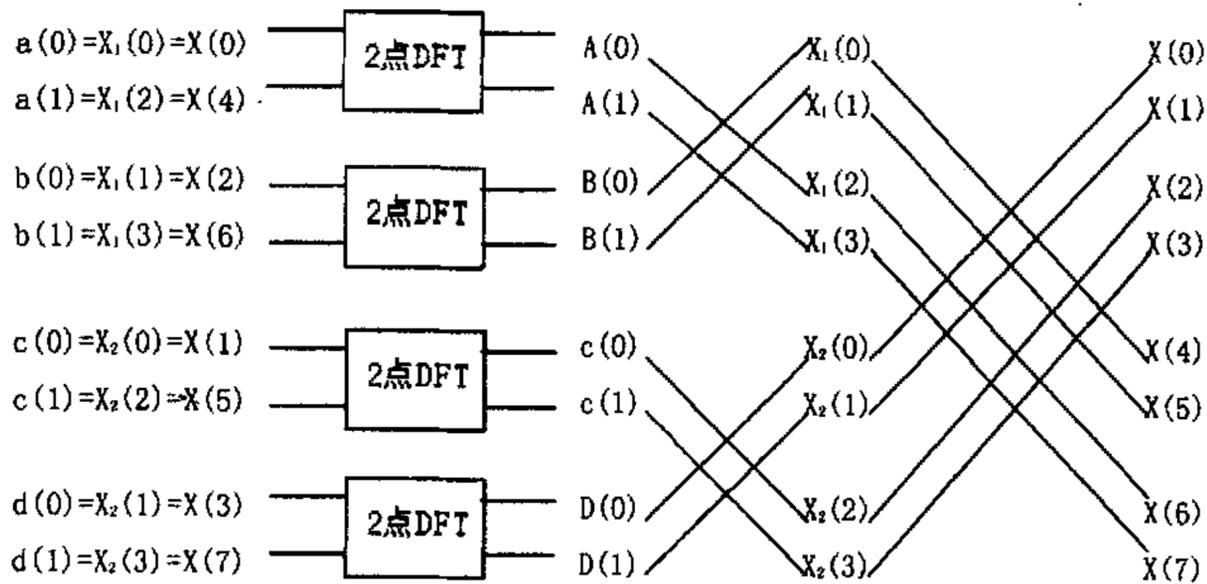
$$\begin{aligned}
 X(k) &= \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{nk} + \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{nk} \\
 &= \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2n) W_N^{2nk} + \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2n+1) W_N^{(2n+1)k}
 \end{aligned}$$

因考虑到 W_N^2 可写成 $W_N^2 = [e^{j(2\pi/N)}]^2 = e^{j(2\pi/(N/2))} = W_{N/2}$

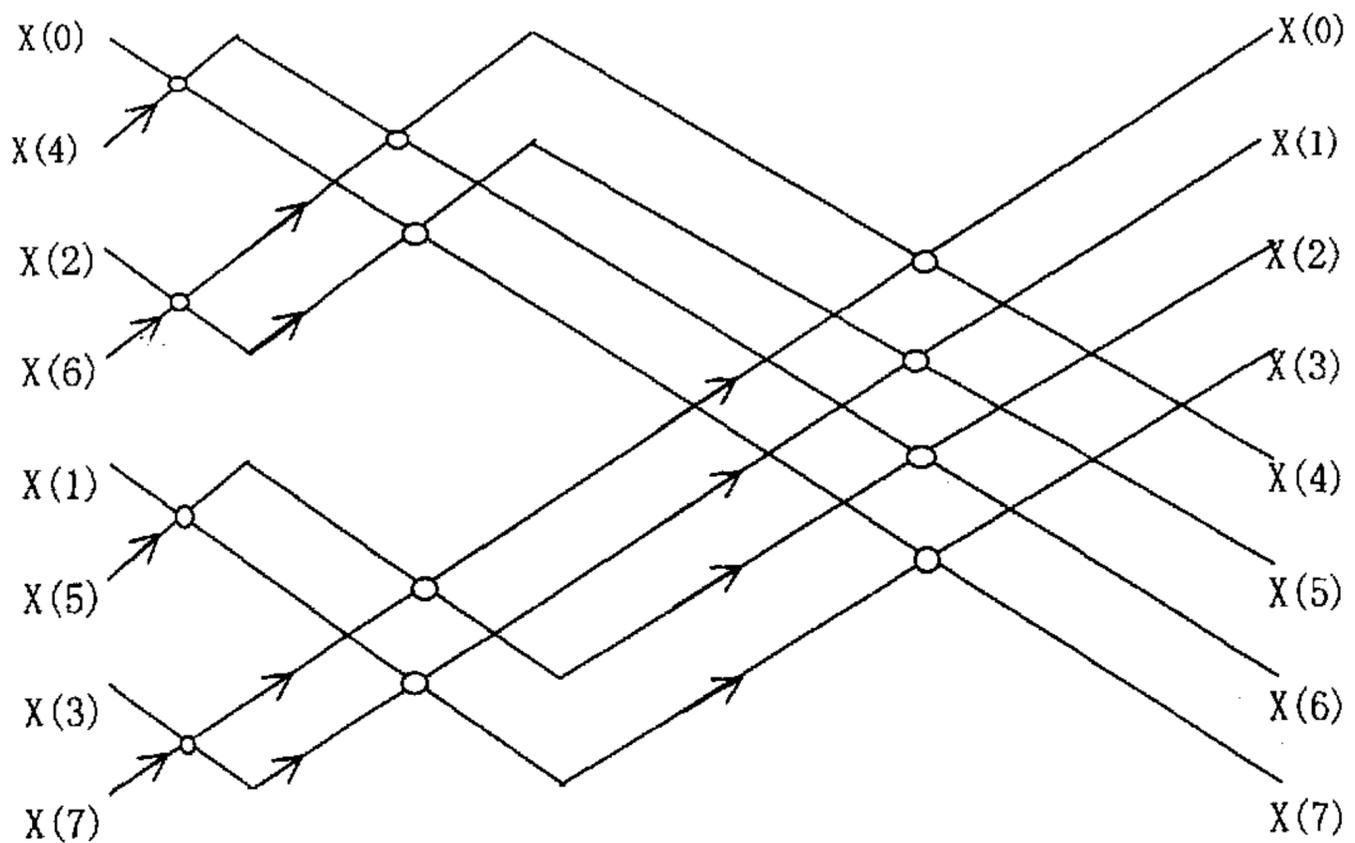
式中 $X_1(k)$ 和 $X_2(k)$ 被看成是 $x_1(n)$ 和 $x_2(n)$ 的 $N/2$ 点 DFT。此种处理方法可一直持续到在左侧是用两点 DFT 作计算为止。于是，8 点 DFT 可逐次化成以下流程图。



由两个 4 点组成的 8 点结构图



由 4 个两点组成的 8 点结构图

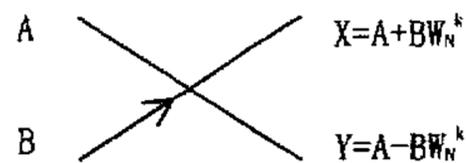


经逐次一分为二得到的 8 点 FFT

在计算过程的每一级都要将输入序列分成较小序列来处理,即在每一级都要对输入序列进行抽取,这称为按时间抽取算法。这种算法就是所谓的蝶式运算,在这一运算中两个输入量 A 和 B 是经由下列算式加以组合从而给出两个输出量 X 和 Y 的

$$X = A + W_N^k B$$

$$Y = A - W_N^k B$$



FFT 的蝶式运算

蝶式结构对于 FFT 的重要意义在于: 为了对存储器中所存 N 点序列作变换。只需要增加一个存储单元。于是,我们能计算 FFT 的中间各级,而把结果存入那些正在作变换的原始数据曾经存过的相同地址。所以,用于存储输入序列的存储阵列也是存储输出序列的同一阵列。

需要注意的一点是为使输出序列按自然顺序排列 (例 $X(k), k=0, 1, 2, \dots, 8$), 所需的输入序列的顺序必须是 $x(0), x(4), x(2), x(6), x(1), x(5), x(3), x(7)$

在整个变换的每一级均需要系数 $\{W_N^k\}, k=0, 1, \dots, N-1$ 。获得这些系数的方法可能有好几种。最简单的一种方法是建立可供计算过程中各点查用的系数表。该法的唯一缺点是需要用另外的存储器来保存这些系数。获得系数的第二种方法是运用标准的正余弦程序在每次用到时直接计算 $W_N^k = \cos[(2\pi/N)k] - j\sin[2\pi/N]k$, 鉴于计算正弦通常需要相当多的计算时间, 因此这种方法较慢。第三种可供选择的方法是利用从某一初始条件 (例如: $W_N^0=1$)

$$W_N^k = (W_N^{k-1})W_N^1$$

开始运算的简单递归关系, 之所以能用这样的递归关系, 是因为在 FFT 的每一级中所需要的 W 的乘幂是等间隔。

下面是 FFT 的 C++ 程序, 第一个循环执行输入数据的位倒序混存, 其余的代码执行 FFT 的实际计算。整个算法需要三个嵌套的循环, 一个循环与 M 级中正在执行的那级相联系, 另一个循环与该级中正在进行计算的那个蝶式运算相关联, 第三个循环编定给定级以内各蝶式运算所需要的 W 的乘方次数。

通过作正向 FFT 计算逆 FFT

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k)W^{-nk}$$

因为 N 点序列 $\{X(k)\}, k=0, 1, \dots, N-1$, 的逆 FFT 定义为

若取上式的复数共轭并乘以 N , 则得到

$$Nx^*(n) = \sum_{k=0}^{N-1} X^*(k)W^{nk}$$

上式的右边可以看成是序列 $\{X^*(k)\}$ 的 FFT, 因此所期望的输出序列 $\{X(n)\}$ 可通过对上式的 FFT 取复数共轭再除以 N 从而给出。单独一个 FFT 算法即可以用于正向计算又可用于逆向计算。

第七章 计算机数字仿真和结果分析

模型系统是如图 5-1 所示的一个 500 kV, 120 km 的输电线路, 它的参数如表 7.1 所示。计算机仿真计算结果如表 7.2~7.6 所示。

表 7.1 模型系统参数

长度/km	Z_1/Ω	Z_0/Ω	$Y_1/10^{-3}$ 西	$Y_0/10^{-3}$ 西	Z_m/Ω
120	49.88+j98.1	121.1+j303	j1.2227	j0.7578	j92.5

通过改变 EMTP 的输入文件, 可以测量并比较在不同情况、不同短路位置、不同采样间隔下测量结果的变化。表 7.2 是在不同短路位置点上, 由稳态过程数据计算出的结果与理论结果的比较。由数据可以看出此种算法的计算结果精确度较高, 它证明了该算法的准确性。同时也可看出此算法随着短路距离的增加, 计算误差也有所增加。说明此算法对短路位置较近的故障测量较准确, 而对于短路距离较远的故障测量略有误差。

表 7.2 稳态过程数据仿真结果 km

故障距离	10	30	50	70	90	110
估计距离	9.96	29.13	50.82	70.82	88.87	111.9
误差	0.04	0.13	0.32	0.82	1.13	1.9

表 7.3 是在不同故障电阻时, 由稳态过程数据计算出的结果由上表可以看出当故障电阻较小时 ($R_f \leq 100 \Omega$), 它对计算结果的影响比较小。当故障电阻较大时 ($R_f \geq 100$), 它将对计算结果产生较大的影响。

表 7.3 不同故障电阻仿真结果

R_f / Ω	故障距离/km		
	20	60	80
1	19.68	60.6	79.92
10	19.8	60.96	80.28
100	20.24	60.12	79.2
300	21.05	62.11	81.98
500	21.64	61.2	81.26

表 7.4 是在不同的远端电源内阻抗下, 由稳态过程数据计算出来的结果, 由表可以看出, 远端电源的内阻抗对计算结果几乎没有什么影响, 这正是此算法的优点。

表 7.4 不同的远端电源内阻抗仿真结果

Z_m/mH	故障距离/km		
	20	60	80
80	19.88	60.7	79.94
100	19.87	60.36	80.21
120	20.08	60.22	79.52
140	20.06	60.32	80.38
160	20.24	59.2	80.26

表 7.5 和表 7.6 是在不同短路位置点上, 暂态过程数据由不经过滤波计算出的结果和经过滤波计算出来的结果进行的比较。从数据可以看出, 不滤波的计算结果和滤波的计算结果精确度相比误差很大, 这说明对暂态过程进行处理时, 滤波是必不可少的环节。同时也可看出, 滤波计算的结果与实际值相比也存在着一一定的误差, 此误差在靠近两端短路时较大, 在中间附近短路时较小。

表 7.5 无滤波暂态过程数据仿真结果

	km					
故障距离	10	30	50	70	90	110
估计距离	无解	21.78	55.28	78.78	104.5	无解
误差	/	8.22	5.28	8.78	14	/

表 7.6 经滤波暂态过程数据仿真结果

	km					
故障距离	10	30	50	70	90	110
估计距离	13.08	33.36	51.83	68.41	87.02	106.25
误差	3.08	3.36	1.83	1.59	2.98	3.75

第八章 结 论

RGA 算法在解的最优性和求解速度方面较 SGA 有明显优势。这说明了采用均匀交叉和两断点交叉比单断点交叉的效果好很多。当解群规模受限（即计算机容量受限）而对计算时间要求不太高的场合，采用交叉和变异概率变化的遗传算法（如 RGA）效果好。

本文还构造了只利用断路器跳闸的时序信息的电力系统故障诊断的数学模型，并用算例证实了其正确性，这种模型对于保护动作信息不可获取或不完整的电力系统的在线故障诊断具有实用价值。

提出了利用无源信息采用实时结线分析方法识别故障区域的方法，从而可把故障诊断问题局限于小型故障区域之中，大大提高了诊断速度。

应当指出，由于可采用前述方法来快速识别故障区域，并把故障诊断问题局限于这些小的故障区域之中，这样测试故障诊断方法的有效性时就没有必要采用大规模系统。因为故障区域不会很大，用例 2 这样的系统就可以说明问题，用 RGA 诊断例 2 的每种故障情况时所用时间都不多（不到 1min），且与故障复杂程度无关，可以在线应用。

本文介绍了电力传输线故障测距发展状况，重点对单回输电线电力系统非接地短路故障测距的阻抗算法做了阐述。该算法精确度较高且设备投资小、经济合理。该算法只用到了电网一端的数据，不需要远端的数据，节省了所需数据量。它在理论上不受到远端电源阻抗和故障电阻的影响，因此这种算法较为精确。本文对单回输电线电网的单相短路故障作了论述，建立了数学模型，推导出了测距方程，并对方程各项系数的求解做了详细的说明。

由于实际发生短路故障时，测量设备测到的瞬时数据往往是暂态过程中的数据，这些数据包含有大量的谐波，如果用来计算将会使计算结果产生偏差，所以在使用这些数据进行计算前必须经过数字滤波。通过数字滤波滤去影响结果精度的谐波，保留了基频分量。此处采用的是十分有效的快速傅立叶算法（FFT）进行滤波。为了便于验证此算法的精确性，使用了 EMTP 仿真软件模拟故障数据，作为算法程序的输入数据。

通过对各种情况下的计算结果进行分析,我们发现此算法适于短路距离较近的电网,随着短路距离的逐渐增加,结果的精确度将略有减少。另外,此算法受线路分布参数和采样参数准确度的影响较大。该算法有其独特的优点,所以它有很广的应用范围,且它自身也在不断的完善和发展,今后它必将有更大的发展。

参考文献:

- [1] Wen, F S. A new approach to fault section estimation in power systems based upon the set covering theory and a refined genetic algorithm. Proceeding of 12th Power systems Computation Conference.
- [2] Fukui C. et al. An expert system for fault section estimation using information from protective relays and circuit breakers. IEEE PWRD, 1986, 1(4):412-416.
- [3] Wen, F S. A refined genetic algorithm for fault section estimation in power systems using the time sequence information of circuit breakers. Journal of Electric Machine & Power Systems. 1996, 24(8):801-815.
- [4] Wen, F S. Probabilistic approach for fault section estimation in power systems based on a refined genetic algorithm. IEE Proceedings of Generation Transmission and Distribution. 1997, 144 (2):160-168.
- [5] 文福拴, 韩祯祥. 基于模拟进化理论的电力系统故障诊断. 第九届全国高校电力系统及其自动化专业学术年会. 1993.
- [6] 文劲宇, 刘沛, 程时杰. 遗传算法极其在电力系统中的应用(上)(下) 电力系统自动化, 1996, (10):912-917.
- [7] 文福拴, 韩祯祥. 模拟进化优化方法极其应用——遗传算法. 计算机科学, 1995, 11(3):345-348.
- [8] 文福拴, 韩祯祥. 基于遗传算法和模拟退火算法的电力系统故障诊断. 中国电机工程学报, 1994, 12(5):423-427.
- [9] 文福拴, 韩祯祥, 邱家驹. 只利用断路器信息诊断的电力系统故障的高级遗传算法. 电工技术学报, 1996, 11(4):321-326.
- [10] 文福拴, 韩祯祥, 田磊. 基于遗传算法的电力系统故障诊断的解析模型与方法(上)(中)(下). 电力系统及其自动化学报, 1998, 6(9):867-871.
- [11] 文劲宇, 刘沛, 程时杰. 遗传算法及其在电力系统中的应用综述(上)(中)(下). 电力系统自动化, 1996, 4(2):185-198.

- [12] 于尔铿。电力系统状态估计。北京：水利电力出版社，1985。
- [13] 苏沛浦，刘娟芝。一种改进的解微分方程阻抗算法。全国高等学校电力系统及其自动化专业第二届学术年会论文集，1986。
- [14] 王绪昭等。利用测量阻抗电阻分量实现高阻接地短路的准确测距法。继电器，1988，3（3）：311-315。
- [15] 徐启峰，魏孝铭。高压输电线路故障测距的负距问题及修正方法。中国电机工程学会论文集，1989。
- [16] 周玉江，黄焕琨。探测故障距离的新方法。电力系统自动化，1998，12（5）：335-339。
- [17] Cook V, et al. Fundamental Aspects of Fault Location Algorithms Used in Distance Protection. IEE Proc. of Generation Transmission and Distribution, 1986, 133(6):254-259.
- [18] 王春。双回线故障精确测距法。武汉水利电力学院学报，1992，25（2）：121-125。
- [19] 陈腊生，孙淑信。探测平行双回线路故障距离的一种计算方法。电力系统自动化，1990，14（1）：26-34。
- [20] 许敬贤。同杆并架双回线路跨线电气量的计算。电力系统自动化，1980，4（1）：62-67。
- [21] 卢继平，叶一麟。同杆架设平行双回线的跨线故障精确测距法。中国电机工程学报，1992，12（6）：723-728。
- [23] 李志民，陈学允。基于单侧信息的输电线路故障测距新方法。中国电机工程学报，1997，17（6）：634-338。
- [24] 肖东晖，刘沛，程时杰。架空输电线路故障测距方法综述。电力系统自动化，1993，17（8）：823-827。
- [25] 韩祯祥，文福拴。模拟进化优化方法简介。电力系统自动化，1995，19（12）
- [26] 周双喜，杨彬。影响遗传算法性能的因素及改进措施。电力系统自动化，1996，20（7）：766-770。
- [27] Takagi T, et al. Development of a new type fault locator using the one terminal voltage and current data [J]. IEEE Trans PAS, 1982, 101（8）：2892-2898。

- [28] Aggarwal R K ,et al . A practical approach to accurate location on extra high voltage Teed feeders[J]. IEEE Trans PWRD. 1993, 8(3):874-883.
- [29] Srinivasan K , et al. A new fault location algorithm for radial transmission lines with loads[J]. IEEE Trans. PWRD, 1989, 4(3):1676-1682.
- [30] Zhang Qingchao; Zhang Yao; Song Wennan. Fault location of two-parallel transmission line for non-earth Fault using one-terminal data. IEEE Transaction on Power Delivery ,1999,112(3): 863-867.
- [31] Lian Bao, Salama M A, Chikhani A Y. A time domain differential equation approach using distributed parameter line model for transmission line faulty location algorithm[J]. Electric Power System Research, 1998, 46(1):1-10
- [32] 马文骐, 郎燕生, 绍彦. 分布参数输电线路故障模拟及测距[J]. 电力系统及其自动化学报, 1996, 8(3):7~16.
- [33] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术. 西安交通大学出版社, 1996
- [34] 束洪春, 高峰, 李卫东. 利用单端工频量的高压输电线路故障测距使用方法研究[J]. 电工技术学报, 1998, 13(5): 9~15
- [35] 束洪春. 基于分布参数线路模型的架空电力线故障测距方法研究[D]. 哈尔滨工业大学学报, 1997, 14(2):102-106
- [36] 栗晓华. 利用单端实测数据进行输电线准确故障测距的研究[D]. 西安交通大学, 1993, 11(1):24-28.
- [37] 黄顺吉, 黄振兴, 刘醒凡. 数字信号处理及其应用. 国防工业出版社, 1982.

致 谢

本论文是在导师张庆超副教授和马剑平高工的悉心指导下完成的。张老师严谨的治学精神和渊博的学识给我留下了终身难忘的深刻印象，他的谆谆教诲将使我终生受益。在此我谨向张老师表示崇高的敬意！

另外，李林川老师和马剑平高工在此期间给予了我许多关心和帮助，谨向他们表示深深的谢意！