第一章　　引言

1.1 课题的研究背景

城市轨道交通系统是以城市电网的电能为动力，使用轮轨运转方式的大运量公共交通系统。随着社会的不断发展，以及城市人口的不断增长，城市轨道交通系统已成为城市公共交通系统中不可或缺的组成部分，并日显重要。目前，世界轨道交通按照轨道以及运行特点的不同，分为地铁、轻轨、市郊铁路以及磁悬浮列车等类型[1]。随着我国经济的腾飞，城市化进程的不断加快，一些特大城市普遍存在着交通拥堵，交通污染严重等突出的问题。由于城市轨道交通具有快捷舒适、运量巨大、安全节能、污染轻、占地少等明显优点，发展城市轨道交通已经成为城市发展公共交通的首选方针以及缓解城市交通问题的最佳选择。

我国城市轨道交通开始于20世纪50年代的福州地铁的建设。进入20世纪90年代以来，我国城市轨道交通进入了一个快速的发展时期。我国规划建设的轨道交通网络总里程超过5000公里，总投资预算超过8000亿元。 城市轨道交通系统一般的运行通道为市区（城市轻轨）或者地下隧道（地铁），采用600-3000V直流形式供电；同时，由于地铁车辆的运行间隙小、运量大、站与站问的距离短，地铁车辆需要进行频繁的启动、制动，使得城市轨道交通系统的用电情况更为复杂。以上因素使得城市轨道交通供电系统需要更为准确、可靠的保护系统。

目前中国已有上海、福州、深圳、广州、武汉、南京等十多个城市拥有已投入运行的近50多条线路，全国规划建设轨道交通网络的城市则已超过30个。由此可见，中国的轨道交通建设具有宏大的发展前景，广阔的市场价值，该行业的发展壮大，将推动轨道交通的各种配套技术尤其是高新技术产业的跟踪发展，进而形成城市轨道交通行业的产业化生产体系。

城市轨道交通牵引供电系统作为城市铁路运输的重要组成部分，其安全可靠运行是整个城市轨道交通安全畅通运行的基础。直流牵引供电保护系统应在确保向地铁列车提供安全可靠的供电的同时，尽量减少甚至消除不必要的停电时间，从而提高经济效益；而在直流牵引供电系统发生故障的情况下，应有选择性地迅速切除故

城市轨道交通牵引福州地铁供电系统直流母线保护设计毕业论文设计--第1页

障，以保证列车、设备和旅客的人身安全。

直流大电流测量技术在科学研究和生产实践中有着十分广泛的应用[2]，如在城市轨道交通的直流牵引系统和高压直流输电系统中用于对系统电流的测量；在大功率电子学以及核物理等科学研究中经常涉及直流大电流的测量；在金属冶炼工业中也是一项不可或缺的技术。而对于测量到的直流大电流也有不同的用途，如计量、保护与控制、监视等。随着城市轨道交通客流量的不断增加，传统的分流器以及霍尔传感器测量直流电流的手段已逐渐暴露出与之不相适应的弱点，如不断提高的负荷电流超出了分流器的测量范围，导致霍尔传感器频繁出现磁饱和从而无法准确记录被测电流的实际大小及变化过程，体积大、重量大、价格昂贵，不易于数字设备连接等。光电式互感器（Optical Current Transformer ）与传统的分流器以及霍尔传感器具有截然不同的测量原理和结构，它具有传统 CT 和分流器所不具有的优点，如不含铁芯，没有铁磁共振、磁饱和，绝缘性好，动态范围大，可在相当宽的电流范围内保持良好的线性特性，测量频带宽，受电磁干扰小，体积小、重量轻、易于与数字设备连接等特点[3]，符合地铁技术的发展方向。因此，对地铁使用的分流器，霍尔互感器以及光学互感器的研究亦具有重要的意义。

城市轨道交通直流保护系统直流侧的配置分为直流母线保护、直流馈线柜保护、负极柜保护等几个部分。目前直流母线保护不够完善，仅装设了大电流脱扣保护（断路器本体保护）。随着社会的发展，城市轨道交通的客流量越来越大，使得地铁正常运行的负荷也随之增长，这也导致母线负荷电流量的上升，现有保护配置已不能满足城市轨道交通安全运行的需要，因此，研究新型牵引供电系统直流母线保护方法具有重要的意义。

1.2 本文主要研究内容

本文从城市轨道交通直流牵引供电系统的结构出发，对直流牵引供电系统进行建模，包括牵引变电站、第三轨及走行轨，地铁机车传动系统模型，并对直流牵引供电系统进行仿真分析。通过分析系统不同的运行状态下直流母线的电流分布情况，提出适用于地铁直流母线的保护算法，针对 CT 断线这一情况提出适合于地铁直流牵引系统的 CT 断线闭锁判据。对地铁直流大电流的测量装置进行误差分析，研究直流牵引供电系统谐波对地铁直流保护的影响，并设计相应的模拟低通滤波器和数字滤波器。同时，基于对本文设计的母差动保护算法以及 CT 断线闭锁判据进行验证。针对直流牵引供电系统的电流测量装置以及直流保护系统应满足的要求，

本文对牵引供电系统微机保护装置的基本结构进行设计，并对直流侧保护装置进行配置，最后对该保护系统的数据通信方式进行探索。

第二章牵引供电系统直流母线保护的研究

2.1 电流差动保护基本原理

差动保护的理论依据是基尔霍夫电流定理[8]，若把被保护的电气设备看成是一个节点，那么在正常情况下 或者保护区外发生故障时，流进被保护区段的电流和流出的电流相等，差动电流等于零。当被保护区段出现故障时，流进被保护区段的电流和流出的电流不相等，差动电流大于差动保护装置的整定值，保护动作，将相应的断路器跳开，使故障设备断开电源。

规定电流的正方向为流入被保护设备，则有

$$\mathbf{I_d=\sum_{j=1}^{n} I_j} \qquad (3\text{-}1)$$

式（3—1）中，Ij 为引出线 j 上流入被保护区段的电流；n 为引出线的个数；I_d即为各引出线流入被保护区段的总电流称为差动电流。

差动保护的基本判据为：

$$\mathbf{|I_d| > I_{set}} \qquad (3\text{-}2)$$

其中，$\mathbf{I_{set}}$为差动保护的启动电流。

在不考虑 CT 误差的情况下，当区内无故障时 I_d，差动保护不动作；当区内发生故障时，差动电流的绝对值大于设定的启动值，差动保护动作。差动保护有很高的选择性，保护动作基本不需要延时，而一般内部故障最小短路电流也远大于差动电流的启动值，所以差动保护同时亦具有较高的灵敏度。

2.2 城市轨道交通供电系统的结构

按照功能的不同，城轨供电系统可以划分成外部电源、主变电所、牵引供电系统、动力照明供电系统、杂散电流腐蚀防护系统、电力监控系统这六个系统[1]。它是整个城市轨道交通系统运行的能量来源，负责电能的供应、转化与传输。

（1）外部电源

城市轨道交通的外部电源即为城市电网电源，负责为城市轨道交通直流供电系

统提供电能。外部电源方案有集中式、分散式和混合式这 3 种形式。

所谓集中供电方案,指由专门设置的主变电所集中为牵引变所及降压变电所供电的外部供电方式每个主变电所有两路独立的进线电源。主变电所进线电压经降压后变成 10kV或 35kV。集中供电方案的主要特点有：①在城市轨道交通沿线,建设专用主变电所，集中为牵引变电所及降压变电所供电；②城轨供电系统从城网引入高压电源，与城网接口少，每座主变电所只从城网引入两路独立的进线电源：③城轨供电系统相对独立，自成系统，便于运营管理。上海、广州、南京地铁为集中式供电方案[1]。

所谓分散式供电方案，是指沿线分散引入城市中压电源直接为牵引变电所及降压变电所供电的外部供电方式。分散式供电方案的主要特点如下：①在城市轨道交通沿线，直接从城网分散地引入多路中压电源作为城市轨道交通电源；②城轨供电系统从城网引入中压电源，与城网接口比较多；③城轨供电系统与城网关系紧密，独立性差，运营管理相对复杂。福州地铁 1、2、4、5、9 号线及 10 号线一期为分散式供电方案[1]。

所谓混合式供电方案，多指以集中式供电为主以分散式供电为辅的供电方式，当构建集中式供电方案时，在主变电所设置一定的情况下，如果线路末端中压网络压降不能满足要求，则可以从城网引入中压电源作为补充 ，这就构成了以集中式为主的混合式供电方案。

（2）主变电所或电源开闭所

主变电所的功能是接受城网高压电源 ，经降压为牵引变电所、降压变电所提供中压电源，它与集中式供电方案配套；电源开闭所的功能是接受城市中压电源，为牵引变电所、降压变电所转供中压电源，它一般与车站牵引或降压变电所合建，与分散式供电方案配套。福州地铁 2 号线设有西湖公园和游泳中心 2 座变电所，每座主变电所从城市电网引入两路独立可靠的 110kV电源，经主变电所降压为 35kV后，对牵引变电所和降压变电所供电；经牵引变电所降压整流为直流 1500V供沿线架设的接触网为运行中的列车供电，经降压变电所降压为交流 220V为运营需要的各种机电设备提供电源。

（3）牵引供电系统

牵引供电系统的功能是将交流中压电压经降压整流变成 DC1500V或者 DC750V

电压，为地铁车辆提供所需的直流电能。它包括牵引变电所与牵引网。典型的牵引供电系统如图 2-1 所示。

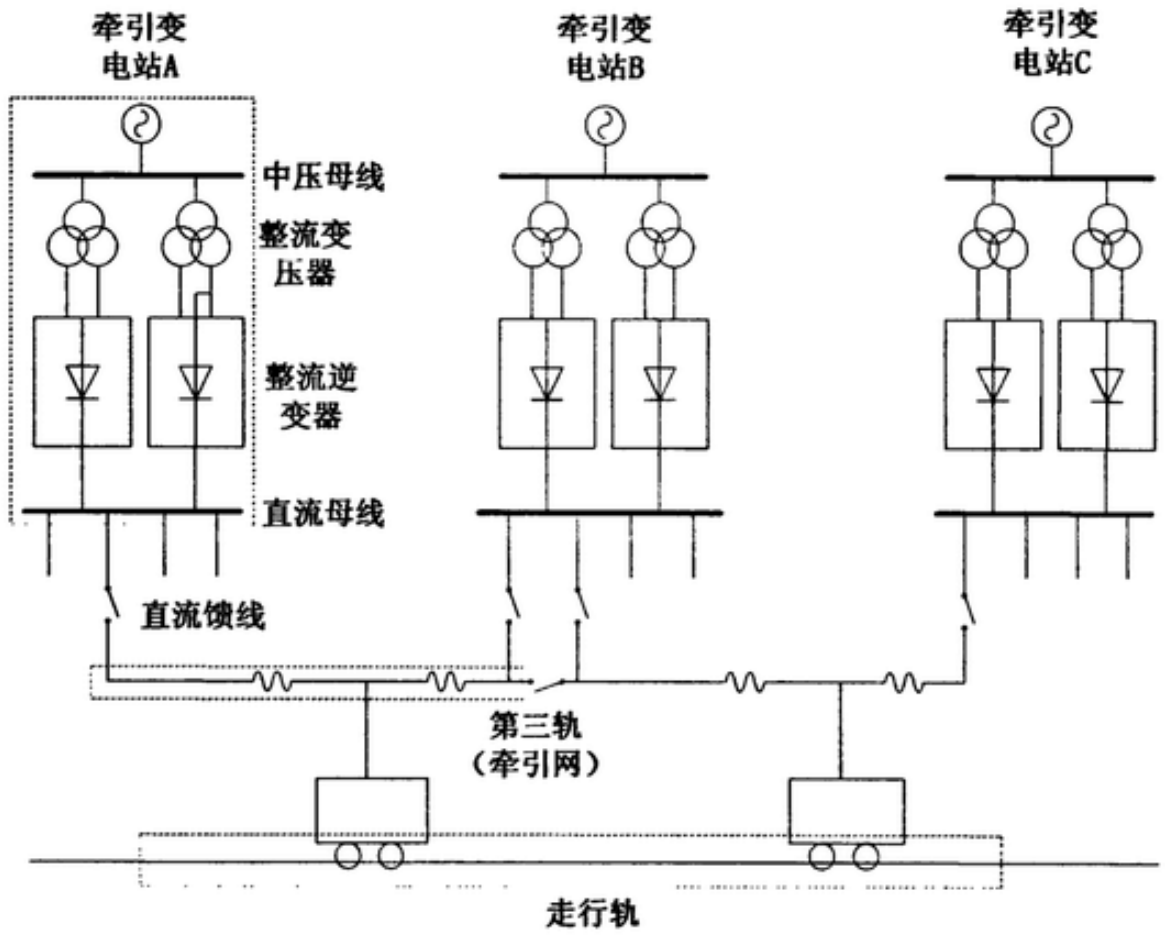


图 2-1 直流牵引供电系统示意图

A.牵引变电所

牵引变电所引入两个独立的中压交流电源，并将交流电能转换为直流电能，向电动列车提供电能。牵引变电所主接线由交流中压开关设备、牵引整流机组、 直流开关设备等几个部分组成。牵引变电所中压主接线的基本环 节是电源和引出线。母线是中间环节，起着汇总和分配电流的作用。出于减少系统侧谐波电流影响以及双机组出力平衡的角度考虑，我国城市轨道交通的牵引整流变电站广泛采用双机组等效 24 脉波牵引整流机组同接一段母线这种形式。

对于中压网络，若采用两套牵引整流机组分别接至两段母线方式，当牵引变电所两段中压母线电压不平衡时，容易引起两套牵引整流机组的输出负荷不平衡。为了平衡两套牵引整流机组的输出负荷，现在已普遍采用将两套牵引整流机组接在同一段中压母线上这种方式。

直流母线接线形式有单母线、双母线系统两种主要形式，如图2-2 所示。单母线系统设置两路进线，四路直流馈出线。这种形式接线简单实用，可靠性高，我国大多城市轨道交通供电系统均采用这种形式[1]。

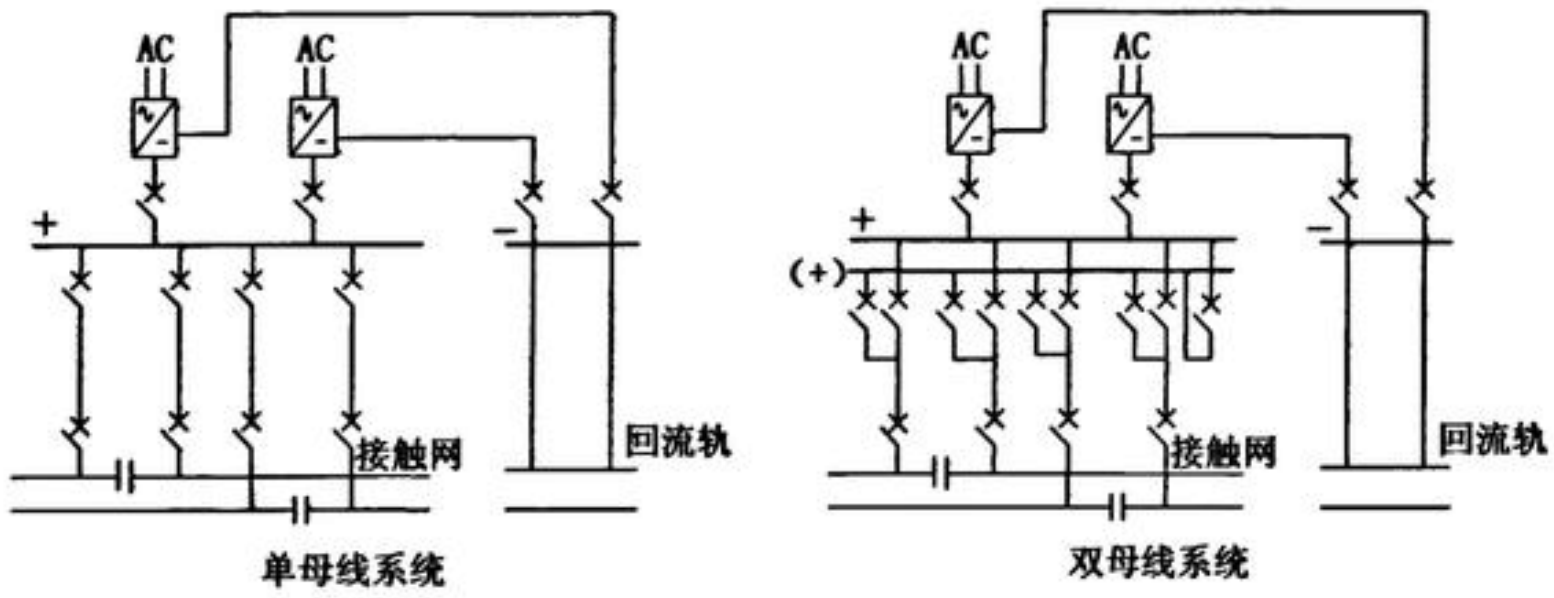


图 2-2 直流主接线形式

B.接触网城市轨道交通系统的牵引网是沿线路敷设的专为城轨车辆提供电源的装置。牵引网包括接触网与回流轨。接触网有架空接触网和第三轨（接触轨道)两种悬挂方式。根据与城轨车辆受流器的安装方式不同，第三轨可分为上部接触式（第三轨面朝上固定安装）和下部接触式（第三轨面朝下固定安装），它由正极接触网供电，负极走行轨回流两部分组成；架空接触网可分为刚性和柔性悬挂两种基本形式。 第三轨的主要优点是：使用寿命长、维修量小，在地面对城市景观没有影响，适应于电压较低的制式。架空接触网的主要优点是：安全性较好，车辆可随时落弓脱离电源；电压较高，适用于大运量牵引系统供电。福州地铁采用的是第三轨供电的方式，而上海、广州、福州地铁则采用了1500V接触网供电的方式。不同地区应根据自己的特点，车辆编组和客流的大小，经过技术、经济比较，确定所采用的牵引网供电方式。

（4）动力照明供电系统

动力照明供电系统的功能是将交流中压电压降压变成交流220/280V电压，为运营需要的各种机电设备提供低压电源。它包括降压变电所、动力照明配电系统。

（5）杂散电流腐蚀防护系统

杂散电流腐蚀防护系统的功能是减少因直流牵引供电引起的杂散电流并防止其对外扩散。尽量避免杂散电流对城市轨道交通本身及其附近结构钢筋、金属管线的电腐蚀，并对杂散电流及其腐蚀防护情况进行监测。

（6）电力监控系统

电力监控系统的功能是实时地对城市轨道交通各变电所以及接触网设备进行远程数据采集和监控。在城市轨道交通控制中心，通过调度端、通信通道和执行端，

对主要电气设备进行遥控、遥信、遥测，实现对整个供电系统的运营调度和管理。

2.3 直流母线保护算法的原理研究

2.3.1 电流差动保护基本原理

差动保护的理论依据是基尔霍夫电流定理[8]，若把被保护的电气设备看成是一个节点，那么在正常情况下 或者保护区外发生故障时，流进被保护区段的电流和流出的电流相等，差动电流等于零。当被保护区段出现故障时，流进被保护区段的电流和流出的电流不相等，差动电流大于差动保护装置的整定值，保护动作，将相应的断路器跳开，使故障设备断开电源。

规定电流的正方向为流入被保护设备，则有

（3-1）

式（3—1）中，Ij 为引出线 j 上流入被保护区段的电流；n 为引出线的个数；I_d即为各引出线流入被保护区段的总电流称为差动电流。

差动保护的基本判据为：

(3-2)

其中，为差动保护的启动电流。

在不考虑 CT 误差的情况下，当区内无故障时 I_d，差动保护不动作；当区内发生故障时，差动电流的绝对值大于设定的启动值，差动保护动作。差动保护有很高的选择性，保护动作基本不需要延时，而一般内部故障最小短路电流也远大于差动电流的启动值，所以差动保护同时亦具有较高的灵敏度。

2.3.2 直流母线保护的基本要求

（1）选择性

选择性是指保护装置动作时仅将故障元件从系统中切除，尽量减小停电范围，保证系统中非故障部分继续安全运行。直流母线保护的选择性应包括两点，即能正确区分外部故障和内部故障，以及在不同的运行方式下发生故障时，能正确区分故障母线。

（2）速动性

速动性是指保护装置应尽可能快的切除故障元件。母线发生故障后，保护应能够尽快的动作，切除故障区段。因此必须快速切除直流母线短路故障，保证城市轨

道交通牵引供电系统能够安全运行。

（3）灵敏性

保护装置对其保护的范围内的故障或者不正常运行状态的反映能力，称为灵敏性。当直流母线发生内部故障时，差动保护应该具有足够的反映故障的能力。

（4）可靠性

可靠性是指在保护装置规定的保护范围内发生故障时，保护装置应能够可靠动作。而在不属于该保护动作的其他任何情况下，不应动作。直流母线保护如果动作，直流母线上所有开关将被跳开。因此，其可靠性将影响到城市轨道交通供电系统的安全运行。

提高母线保护的可靠性，要同时提高其安全性和可靠性。安全性是指在正常运行、外部短路以及保护自身出现问题时，保证保护不误动。可靠性则是指在直流母线发生故障时能够保证保护不拒动。

2.3.3 地铁直流母线差动保护原理

直流母线作为多端元件，其差动保护原理也是基于上述的电流差动保护原理而成，即正常状态下流入直流母线和流出直流母线的电流相等，而内部故障时流入母线的电流大于流出母线的电流。由于未装设专用的直流母线保护装置或直流母线保护装置在停用中，发生直流母线故障而不能快速切除故障时，以至事故扩大，甚至造成城市轨道交通大范围停运。因此，装设直流母线保护是非常必要的。

每个牵引变电站直流母线的接线方式及编号如图 3-1 所示。由于采用的是直流电，因此不存在“相线”问题。图中母线 M上有 2 条进线，4 条直流馈线，2 条进线以及 4 条直流馈线上流过的电流分别为 i_1，i_2，i_3，i_4，i_5，i_6。各条线路上装有完全相同的电流互感器，这些电流互感器测量得到的电流值传到微机中，由微机进行计算。本文假设流入直流母线的方向为电流正方向，则在不考虑电流互感器的测量偏差情况下，正常运行和外部短路的情况下，根据基尔霍夫电流定理可知

$$i_{d==} i_1 + i_{2+} i_{3+} i_{4+} i_5 + i_6 \qquad (3\text{-}3)$$

式（3-3）中 i_d 为差 动电 流 。由于 i_d 为 0，保护装置不会动作；在发生母线内部短路中，由于故障电流的存在，i_d 便不再为 0，及母线各进线以及馈线上的电流之和不再为0，而是等于总的短路电流。

为了防止 CT 传变误差以及系统不平衡电流的影响，地铁直流母线差动保护的基本判据为：

(3-4)

其中，为该母线差动保护的启动电流，其值应按照小于各 CT 最大误差值之和，而大于母线发生各种类型短路的最小总短路电流进行整定。

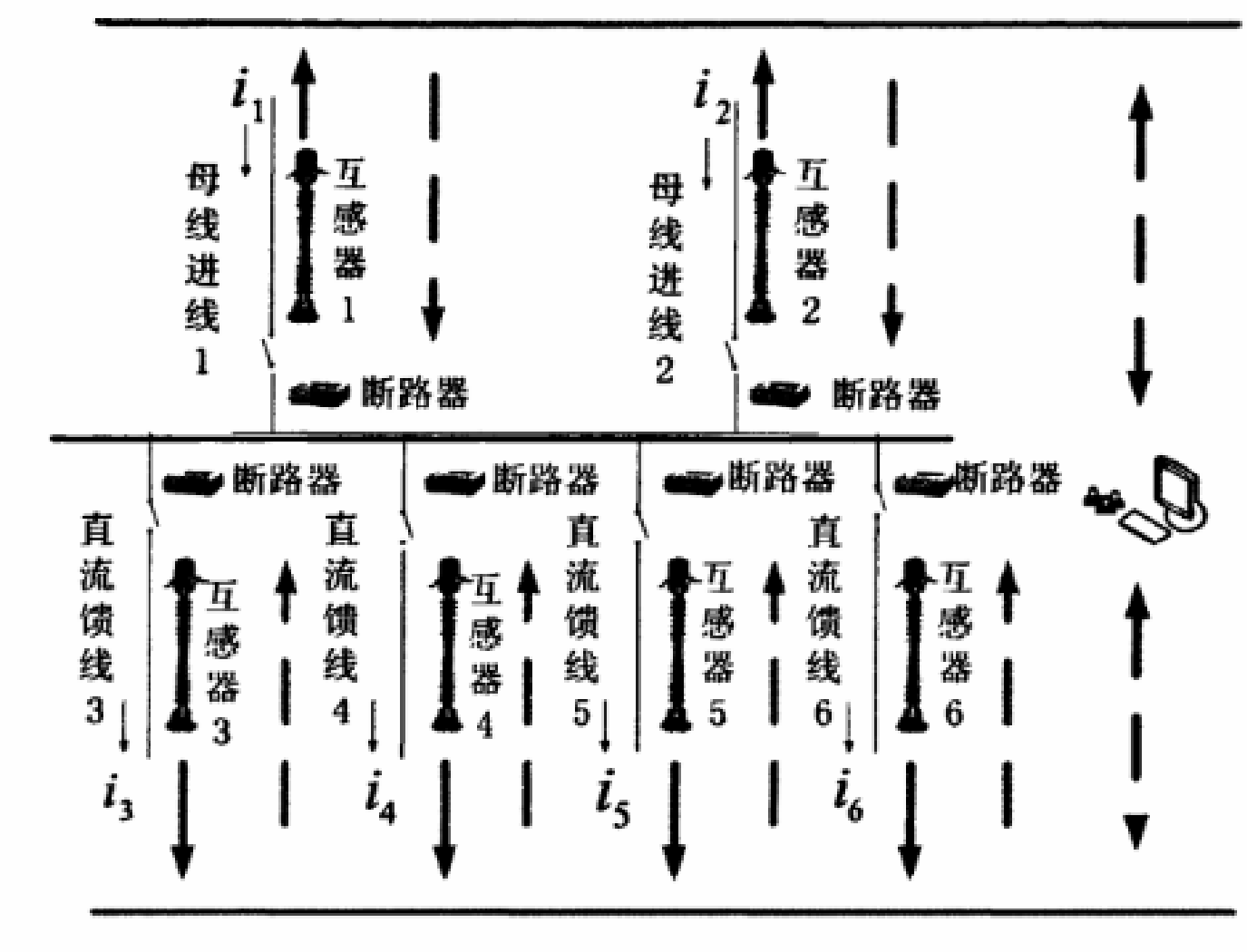


图 3-1　　地铁直流母线结构及各进出线编号

2.4 CT 断线对直流母线差动保护的影响及对策

2.4.1 CT 断线对差动保护的影响

差动保护的基本原理就是利用各 CT 测量值进行“和”运算得到差点流，根据差电流是否大于整定值来判断线路是否故障。通常在正常情况下，差电流近似为零，所以一般差动保护的启动整定值比较小。当母线带有一定的负载时，若电流传感器发生断线现象，极有可能使差动保护元件启动，造成保护误动作，特别是对于装设有无延时特性保护装置的重要系统，若 CT 发生断线现象，将造成保护设备误动作。因此，必须装设CT断线闭锁，防止由于CT断线而引起的误动作。

渐增加，在信道繁忙的时候，有可能出现数据丢失、错误等各种现象。因此，尽量减少数据量不仅是从经济的角度考虑，而且能减少保护装置对数据的需求量，提高保护装置的运算速度。对于无延时的差动保护装置，由于其动作速度较快，因此要求 CT 断线判据在发生断线后尽可能快的给出判断。基于地铁直流系统特性，以及上述提及的要求，本文提出了用于闭锁差动保护的快速CT断线闭锁判据。

根据地铁直流系统的结构以及运行特性，本文提出了一种快速识别 CT 断线的判据，其判断因子如下所示：

$$\begin{cases} |i_d| \geq i_{set} \\ i_d \geq 0 \\ i_k(j-1) \neq 0 \\ |i_d - \Delta i| \geq i_{CT} \\ di_d/dt \geq di_{set} \end{cases} \tag{3-15}$$

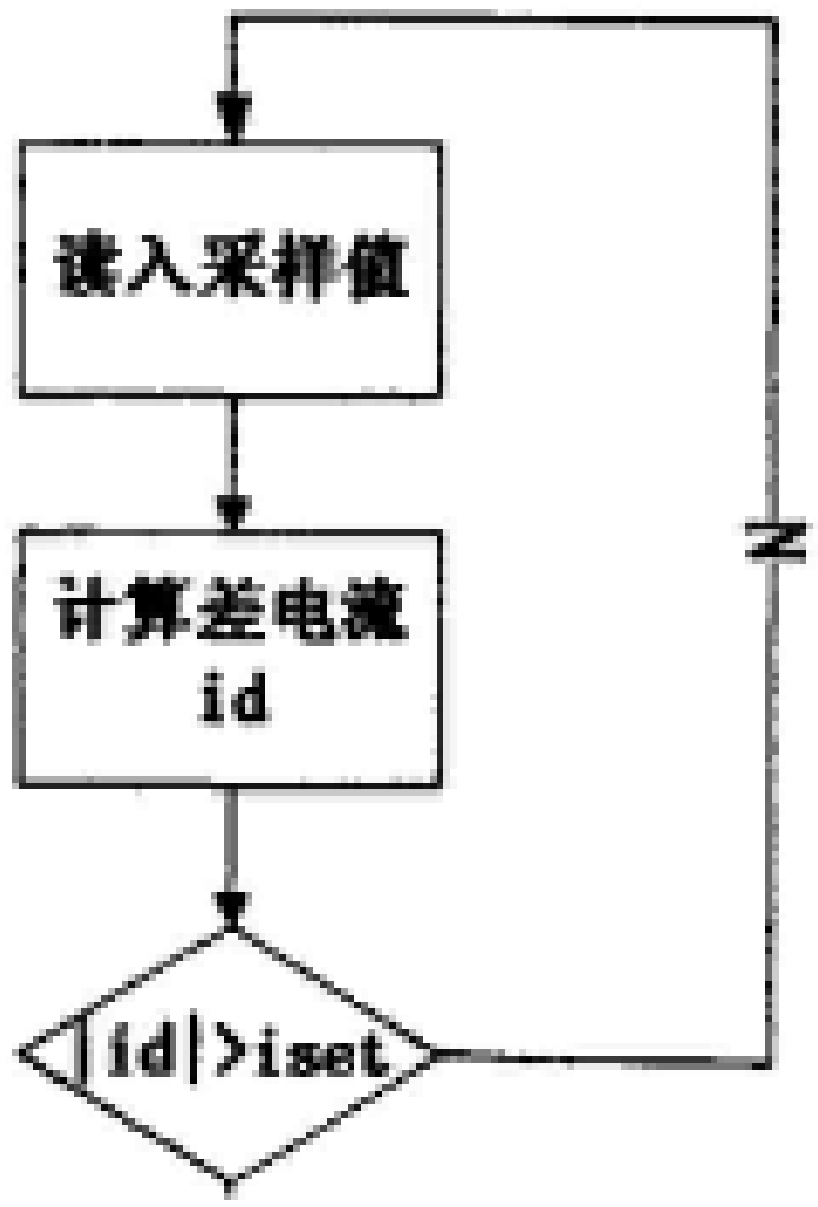
其中，i_d 为差电流，$i_d = i_1 + i_2 + i_3 + i_4 + i_5 + i_6$；$i_k$（j-1）为当 i_d 大于保护启动值 i_{set} 时采样值为 0 的 CT的前一个采样步长的采样值；di_d/dt 为电流的上升率，di_{set} 为差电流上升率启动值，其值按照大于牵引系统正常运行负荷电流上升率，小于母线发生各种类型短路的最小总短路电流的上升率来整定；i 为当 i_d 大于保护启动值 i_{set} 时采样值为的 CT时的采样值 i_k（j）与前一个采样步长的采样值 i_k（j-1）之差，即 $i = i_k$（j-1）- i_k（j）；i_{CT} 为单个 CT变误差制动量，其值按照 CT传变误差来整定。

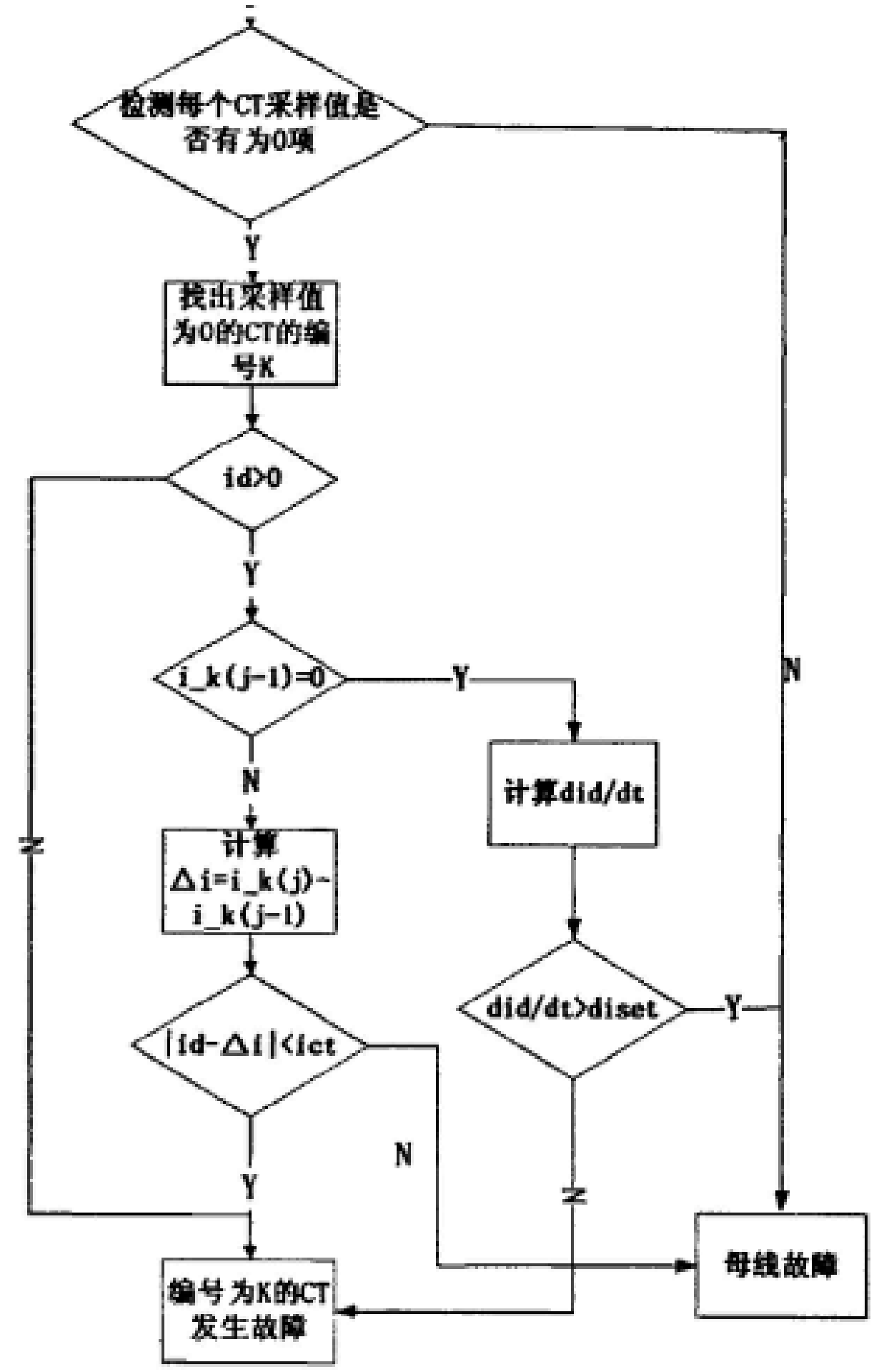
2.4.3 线闭锁判据的直流母差保护流程图

带 CT断线判据的直流母线差动保护流程图如 3-12 所示。该算法循环不断地计算并判断差电流 i_d 是否大于 保护启动整定值 i_{set}，当｜i_d｜i_{set}，通过检测各 CT 采集的数据中有没有为 0 的测量值，若没有为 0 项，则可认为母线发生故障；若存在为 0 的项，找出该项 CT，并判断 i_d 是否大于 0，若 i_d＜0，则可认为该 CT发生断线故障，若 i_d＞0，则检测该 CT 的前一测量值是否为 0，若为 0，则通过判断 di_d/dt 是否大于整定的上升率整定值 di_{set}，若大于 di_{set}，则认为母线发生故障，若小于

城市轨道交通牵引福州地铁供电系统直流母线保护设计毕业论文设计--第10页

di_{set} CT发生断线故障。当该CT的前一测量值不为0时，计算 $_{i}$，然后判断｜$i_{d\ i}$－｜是否大于 i_{CT},若｜$i_{d\ i}$－｜＜i_{CT}，则认为该 CT 发生断线故障，若｜$i_{d\ i}$－｜＞i_{CT}，则认为母线发生断路故障。





3-12　带 CT断线判据的母差保护流程图

地铁直流系统谐波对保护的影响

3.1 牵引供电系统直流侧谐波对直流保护的影响

24 脉波牵引整流机组把三相交流电转换为直流电。地铁机车从牵引整流机组取得的电压中除了直流量外，还含有频率为电压脉动数整数倍的交流谐波[13]。交流谐波分量会在地铁机车运行中产生相应频率的谐波电流。由于整流变压器三相阻抗的不平衡以及机车逆变等环节的影响，直流侧电流还将有低次谐波存在。当牵引系统区段内有地铁车辆运行时，对直流侧电流波形进行傅里叶分解得频谱图，如图3-13 所示。

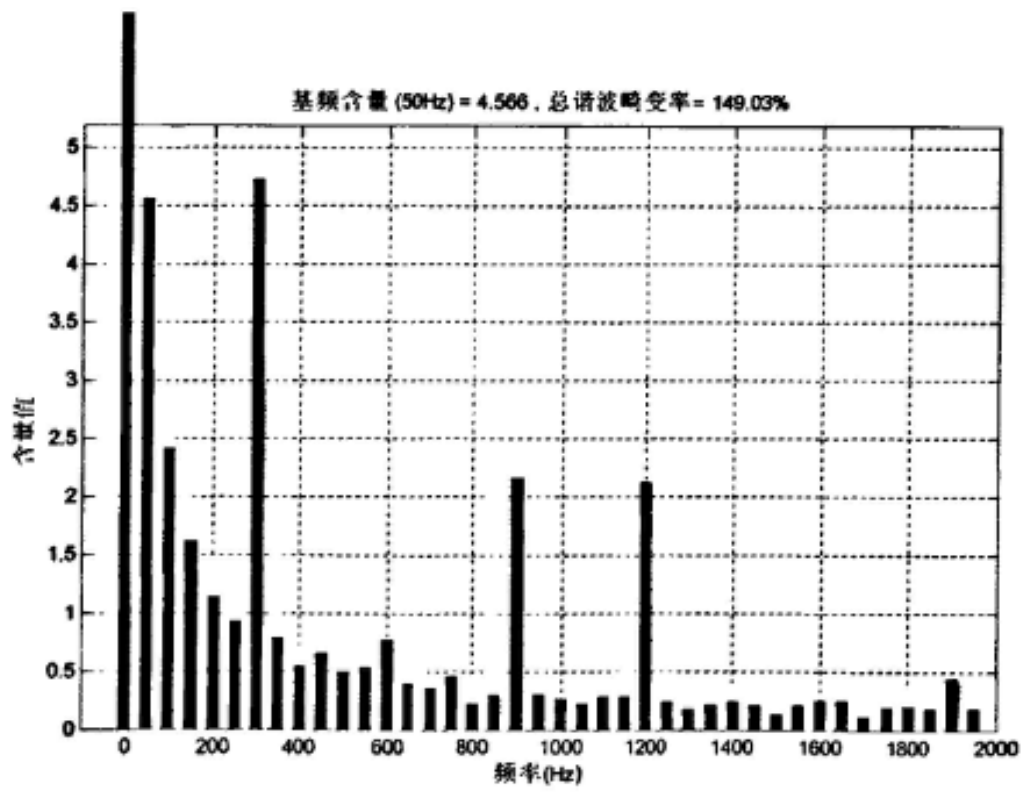


图 3-13　直流侧电流频谱图

地铁直流保护系统包含了直流母线保护、直流馈线保护以及负极柜等部分，谐波的存在会给直流保护的可靠性造成影响，尤其是直流馈线保护部分，直流馈线保护的主保护是电流上升率及电流增量保护。同时，谐波 因素对本文提出的 CT 断线闭锁判据也有较大的影响。

3.2 牵引供电系统谐波的产生及危害

谐波是一个周期电气辆的正弦波分量，其频率为基波频率的整数倍数。由于系统中某些设备和负荷的非线性特性造成了波形畸变。牵引供电系统是城市轨道交通供电系统的主要谐波源，其中采用的牵引整流机组，属于非线性受电设备，电压畸变的程度取决于整流装置容量和电网容量的相对比值及供电系统对谐波频率的阻抗，地铁机车的逆变装置，直流电源成套装置亦会造成电流畸变。对于城市轨道交通系统而言，整流机组直流侧谐波的危害主要表现为：

城市轨道交通牵引福州地铁供电系统直流母线保护设计毕业论文设计--第13页

1）干扰地铁系统的信号、通信系统；

（2）对机车驱动电机产生干扰，影响机车安全可靠运行，并使轨道电位升高；

（3）严重影响城市轨道交通保护系统和自动装置的正常运行；

（4）使测量和计量仪器的指示和计量不准确。

对于传统微机保护装置而言，通过一个模拟抗混叠低通滤波器滤除2 采样率以上的谐波以满足奈奎斯特采样定律要求，再将数据传入装置内，然后将传入装置的数据进行数字滤波处理后进行保护运算，是本文对直流侧电流进行处理的基本思想。其过程如下图所示

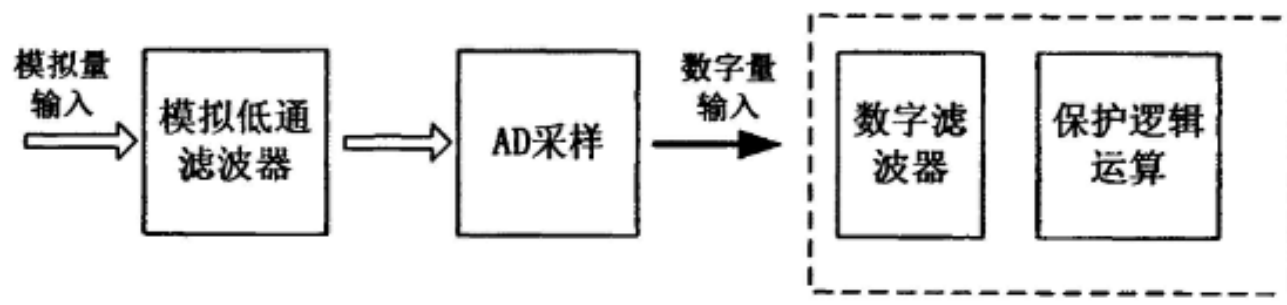


图 3-14　直流侧电流处理流程

（1）模拟低通滤波器的设计

由奈奎斯特抽样定理可知，在采集信号时，当一个周期内的采样次数不少于 2 次时，才能使连续时间信号转换成离散信号。若采样点数不够，将无法从采集的数据中将原来的信号恢复，对于一个频带有限的信号，当 采样频率不小于两倍于该信号包含的最高频率的话，则理论上可以根据采集到的数据恢复出原始信号[1]。

在实际应用中，为保证信号的质量，更好的恢复原始信号，选用的采样频率一般会大于奈奎斯特采样定理所给出的最小采样频率，而选用高于原始信号所包含的最高频率 4 倍以上的采样频率。在测控系统的数据采集过程中，不可避免的有干扰信号混在有用的信号中，若该干扰信号的频率高于采样频率的二分之一， 在使用的采样频率不够高的情况下，将会产生混叠信号。为了避免混叠现象的产生，需要在采样之前使信号通过一个抗混叠滤波器滤除上述干扰。因此，在采样之前，需要采用抗混叠滤波器来消除或抑制混叠信号对测量精度的影响。

理想的低通滤波器在理论上应该能使所有低于截止频率的信号完全地通过，而对于所有高于该截止频率的 信号，都应当被无限的衰减，而在实际的设计应用中，无法实现上述理想滤波效果。选择不同的逼近函数，根据所选的逼近函数，可以得到与该函数相对应的响应。逼近函数函数的种类很多，考虑到实际电路的使用

这三种逼近函数中，巴特沃斯响应具有最大滤波器的通带平坦度 。该逼近函数在拐点频率之前的响应非常平坦，接近直流信号，然后由拐点频率慢慢衰减至截止频率点-3dB，最终逼近-20ndB/decade 的衰减率。巴特沃斯滤波器适用于低频应用，符合地 铁直流牵引系统电流的响应特点，而且巴特沃斯滤波器对于维护增益的平坦性来说具有非常好的效果。因此，本文选用巴特沃斯响应的滤波器作为抗混叠滤波器。

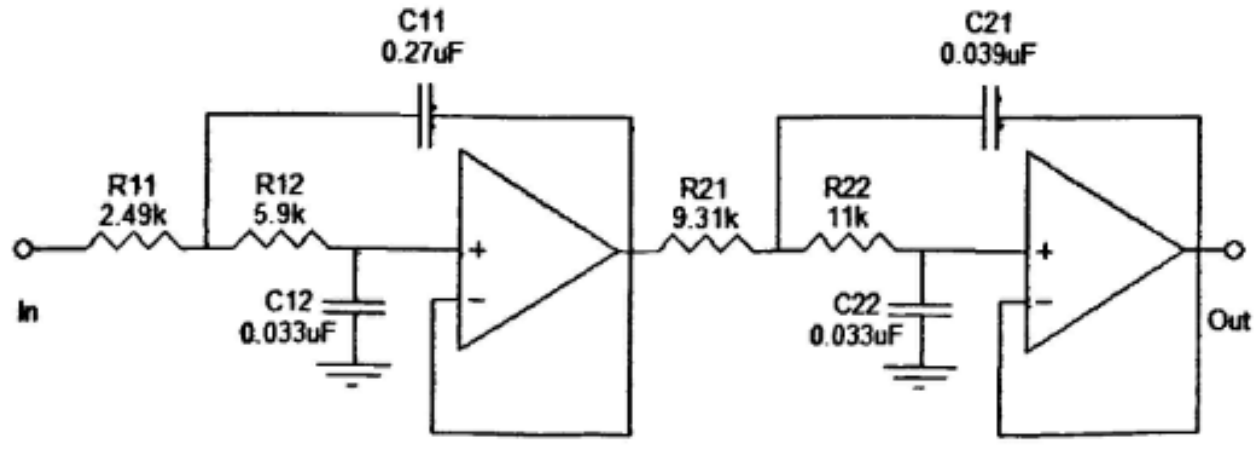
文献[15]分析了地铁直流牵引供电系统保护装置采用不同的采样频率下，保护装置的误动拒动率，并提出了地铁直流系统保护装置的采样率在 200s—300s 范围内具有最高的可靠性与经济型。因此本文选取装置的采样间隔取为每 250s 采一个点，即采样频率为 4kHz，所以截止频率最大为 2kHz。为了避免混叠现象的产生，需要在采样之前使用一个低通抗混叠滤波器让2kHz以上的谐波衰减 50dB 或以上。而拐点频率则根据直流牵引系统的电流特点，选取为300Hz。

本文采用美国微芯科技公司开发的滤波器专业设计软件 FilterLab [TM]设计抗混叠巴特沃斯滤波器，基本设计参数如下表所示。

表 3-1 低通滤波器设计参数

逼近函数类型	Butterworth
滤波器类型	低通滤波器
电压/电流增益	1
拐点频率	300Hz
截止频率	2000Hz
拐点频率信号衰减度	0.2dB
截止频率信号衰减度	50dB

相应的电路原理图如图 3-14



以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：https://d.book118.com/335022322213011324