

第二章 牵引系统

在城市轨道交通车辆中，用电动机驱动实现车辆牵引的传动控制方式，称为电力牵引控制（电传动系统）。它以牵引电机作为控制对象，通过控制系统对电机的旋转方向、输出转矩及转速的控制，来选择列车运行方向并调节列车运行速度，使其满足列车牵引性能要求。牵引系统根据使用的牵引电机类型分为直流传动牵引系统和交流传动牵引系统。目前，在城市轨道交通车辆上普遍使用交流传动牵引系统。

本章重点讲解交流传动牵引系统，直流传动牵引系统不作讲解。本章主要介绍牵引系统的主要部件、牵引系统的组成以及牵引系统的基本工作原理等内容。

第一节 牵引系统概述

牵引系统是城市轨道交通车辆的核心部件，是列车动力的来源。它根据需要为列车提供牵引力和制动力，完成列车牵引和制动。牵引系统在“牵引”模式下，把接触网提供的电能转换成牵引电机使用的电能供给牵引电机，牵引电机作为电动机工作，将电能转换成机械能，来实现列车的牵引功能；在“制动”模式下，牵引电机充当发电机，机械制动能量转换成电能，重新反馈给接触网，供给其他列车使用或者通过制动电阻消耗掉，实现列车的制动功能。

一、牵引系统的分类

根据牵引系统不同的特点，牵引系统可以从以下几个方面进行分类。

（1）根据城市轨道交通车辆使用的牵引电机的类型，城市轨道交通车辆牵引系统有直流传动牵引系统和交流传动牵引系统之分。这两种传动方式各有优缺点。随着大功率逆变技术和自动控制技术的不断发展，交流电机能够通过变压变频技术来获得直流电机的优点。目前城市轨道交通车辆以交流传动方式为主。

（2）根据供电控制方式，牵引系统有1C4M和1C2M两种形式。1C4M牵引系统的一台牵引逆变器向同一动车上的四台牵引电机供电；1C2M牵引系统的一台逆变器向同一转向架上的

两台牵引电机供电。有些地铁列车牵引逆变器分成两个相同的模块，每个模块给一个转向架上的两台牵引电机供电，牵引逆变器采用此种供电模式的牵引系统也称为 1C4M 牵引系统。

(3) 根据控制单元控制原理的不同，牵引系统可以分为直接转矩控制型和矢量控制型两种。

二、牵引系统的功能

牵引系统主要有两种工况：牵引工况和电制动工况，分别完成牵引、再生制动及电阻制动的功能。牵引系统完成的主要功能如图 2-1 所示。

(1) 牵引工况：牵引系统为列车提供牵引动力，它将接触网提供的直流电转换成三相交流电供给牵引电机，再由牵引电机将电能转换成机械能驱动列车运行。

(2) 电制动工况：电制动工况可分为再生制动工况和电阻制动工况。

① 再生制动工况：牵引系统进行再生制动时将列车动能转换为电能反馈到电网供其他列车使用。

② 电阻制动工况：制动能量不能向电网回馈时，电制动产生的电能将会消耗在制动电阻上，列车动能转换为热能散逸在大气中。

电制动和空气制动共同配合完成列车的制动功能。

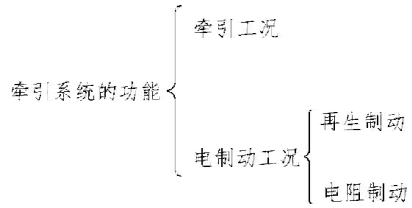


图 2-1 牵引系统的主要功能

三、牵引系统的主要设备

牵引系统主要由受流装置、避雷器、高速断路器、牵引逆变器、牵引控制单元、PWM 编码器、牵引电机、制动电阻、接地回流装置等组成。

① 受流装置。

受流装置主要有受电弓和集电靴，它是列车将电网电源平稳地引入车辆电源，为列车的牵引设备和辅助设备提供电能的重要电器。

② 避雷器。

避雷器也称浪涌吸收器，主要用来防止来自城市轨道交通车辆外部和内部过电压对车辆电气设备的破坏。

③ 高速断路器。

高速断路器简称 HSCB，是牵引系统最重要的保护性器件，主要作用：在正常情况下，根据需要接通或断开接触网与牵引主回路之间的高压回路；在发生故障时，如主回路短路、过载等，快速切断主回路，防止事故扩大，保护车辆和人身安全。

④ 牵引逆变器。

牵引逆变器是牵引系统的核心部件。它的主体结构是电压型三相桥式逆变电路，主要功率元件为 IGBT（或 IPM 模块），一端与电网相连，另一端与牵引电机相连。牵引逆变器的作用为：牵引工况时，牵引逆变器将电网提供的直流电转换为三相可调压调频的交流电供牵引电机使用；电制动时，牵引电机工作在发电机状态，牵引逆变器将牵引电机产生的交流电整流成直流电回馈给电网，实现再生制动；若电网不能吸收，则消耗在制动电阻上，实现电阻制动。

⑤ 牵引控制单元（DCU）。

牵引控制单元是牵引系统的微机控制单元，与牵引逆变器共同安装于牵引逆变器箱内，主要功能有：

- a. 对牵引电机进行矢量控制；
- b. 将车辆控制单元通过总线传输的给定值和控制指令转换成 VVVF 逆变器用的控制信号；
- c. 对 VVVF 逆变器和牵引电机进行保护；
- d. 对电制动进行调整和保护，以及逆变器脉冲模式的产生；
- e. 空转/滑行保护控制；
- f. 列车加减速冲击率的限制；
- g. 通过列车总线实现 DCU 与其他控制单元的通信功能；
- h. 当列车总线出现故障时，可用硬连线实现紧急牵引；
- i. 故障诊断功能。

⑥ PWM 编码器。

PWM 编码器的主要作用是将主控制手柄或 ATO 设备给出的模拟牵引/制动指令信号转化为 500 Hz/24 V 的 PWM 信号。此 PWM 信号通过 PWM 硬线传输给牵引控制单元和微机制动控制单元。

⑦ 牵引电机。

目前城市轨道交通车辆应用最广泛的牵引电机是三相鼠笼式异步电动机。牵引电机安装于动车转向架上，用来驱动列车运行。

⑧ 制动电阻。

制动电阻用于电阻制动。在列车进行电制动时，如果供电线路不能吸收电制动产生的能量，制动能量将在制动电阻上转化成热能并消散于大气。制动电阻一般安装于动车车底，需要进行强迫通风冷却。

⑨ 接地回流装置。

接地回流装置的主要作用是为牵引主回路提供回流通路，使电流经轮对到达钢轨，再通过供电馈线到牵引变电所，构成完整回路。

第二节 牵引系统主回路

城市轨道交通车辆主回路是牵引系统的重要组成部分，它接收控制回路发出的牵引和制动指令，完成城市轨道交通列车的牵引和制动功能，与控制电路共同作用实现车辆启动、调速和制动。为了充分发挥车辆的功率，要求车辆能在不同的线路和载荷条件下改变牵引力，车辆主回路必须保证牵引电机的转矩和转速都可进行调节，且有宽广的调节范围。

一、牵引系统主回路原理图

牵引系统主回路原理图 1 如图 2-2 所示。

图 2-2 中，每台牵引逆变器采用两个完全相同的逆变模块及制动斩波电路，每个逆变模块给两台牵引电机供电。每个逆变模块主体结构为两电平电压型三相桥式逆变电路，功率元件采用 1700 V/1200 A 的 IGBT。逆变模块直流端与电网相连，交流输出端与转向架上的牵引电机相连。

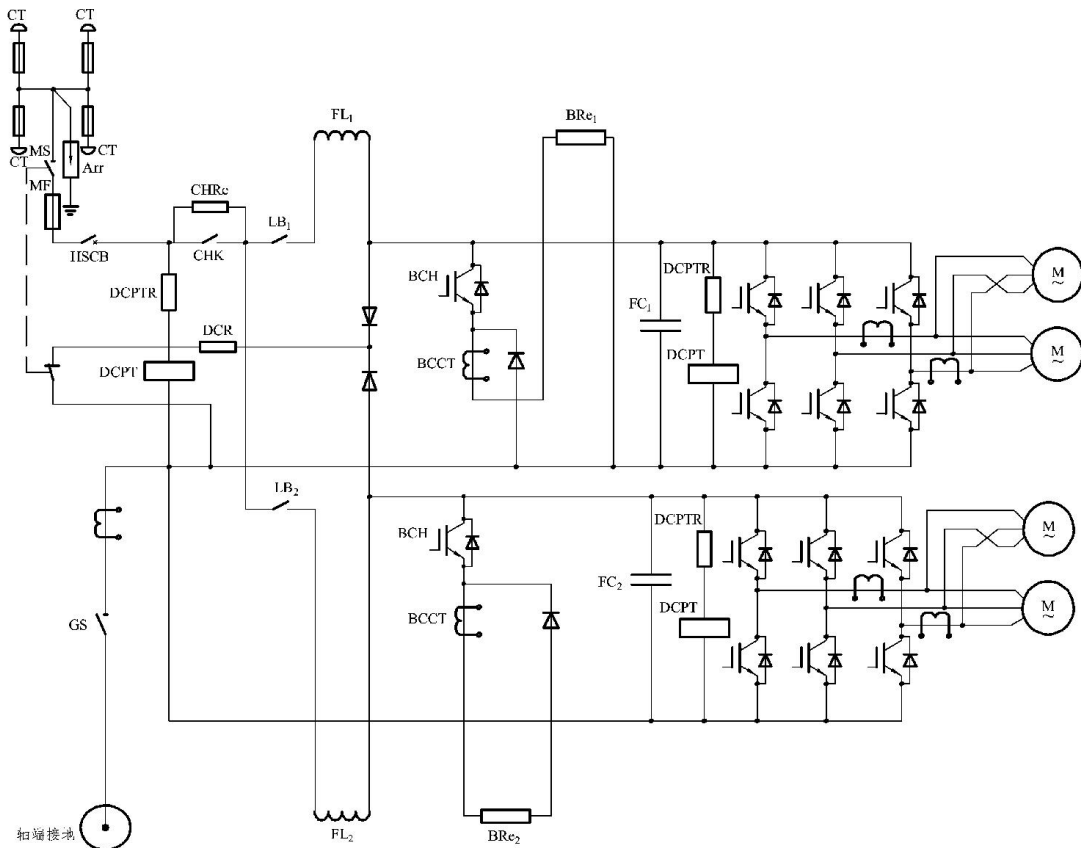


图 2-2 牵引主回路原理图 1

CT—集电靴；Arr—浪涌吸收器；MS—主隔离开关；MF—主熔断器；HSCB—高速断路器；FL—滤波电抗器；
BRe—制动电阻；DCR—放电电阻；BCH—制动斩波器；BCCT—制动电流传感器；FC—滤波电容；
CHK—预充电接触器；CHRe—预充电电阻；LB—线路接触器；
DCPTR—直流电流传感器；GS—接地开关

主回路主要设备有：集电靴、避雷器、主隔离开关、高速断路器、牵引逆变器（VVVF 逆变器）、滤波电抗器、制动电阻、牵引电机等。

牵引逆变器中主要设备有：直流电压传感器（DCPT）、制动斩波器（BCH）、滤波电容（FC）、制动电流传感器（BCCT）等。

① 主隔离开关 MS。

主隔离开关为手动开关，不能切断负荷电流，只有在确定电路不带电的情况下才能操作。主隔离开关用于实现 VVVF 逆变器与高压母线间电气上的隔离。为确保人身安全，在维修过程中，维修人员应将主隔离开关从与三轨连接状态转换为接地状态。

② 滤波电抗器（FL）。

滤波电抗器采用空心线圈结构、自然冷却方式。滤波电抗器与滤波电容组成滤波电路，对电网提供的直流电进行滤波。

③ 直流电压传感器（DCPT）。

直流电压传感器用于监测滤波电容电压。

④ 制动斩波器（BCH）。

制动斩波器主体结构为 IGBT 元件。进行电阻制动时，制动斩波器接通制动电阻供电线路，制动能量消耗在制动电阻上。

⑤ 滤波电容（FC）。

滤波电容与滤波电抗器组成滤波电路，对电网提供给牵引逆变器的电能进行滤波。同时，稳定逆变电路直流输入电压，吸收无功能量。

⑥ 制动电流传感器（BCCT）。

制动电流传感器用于检测制动电流的大小。

牵引系统主回路原理图 2 如图 2-3 所示。

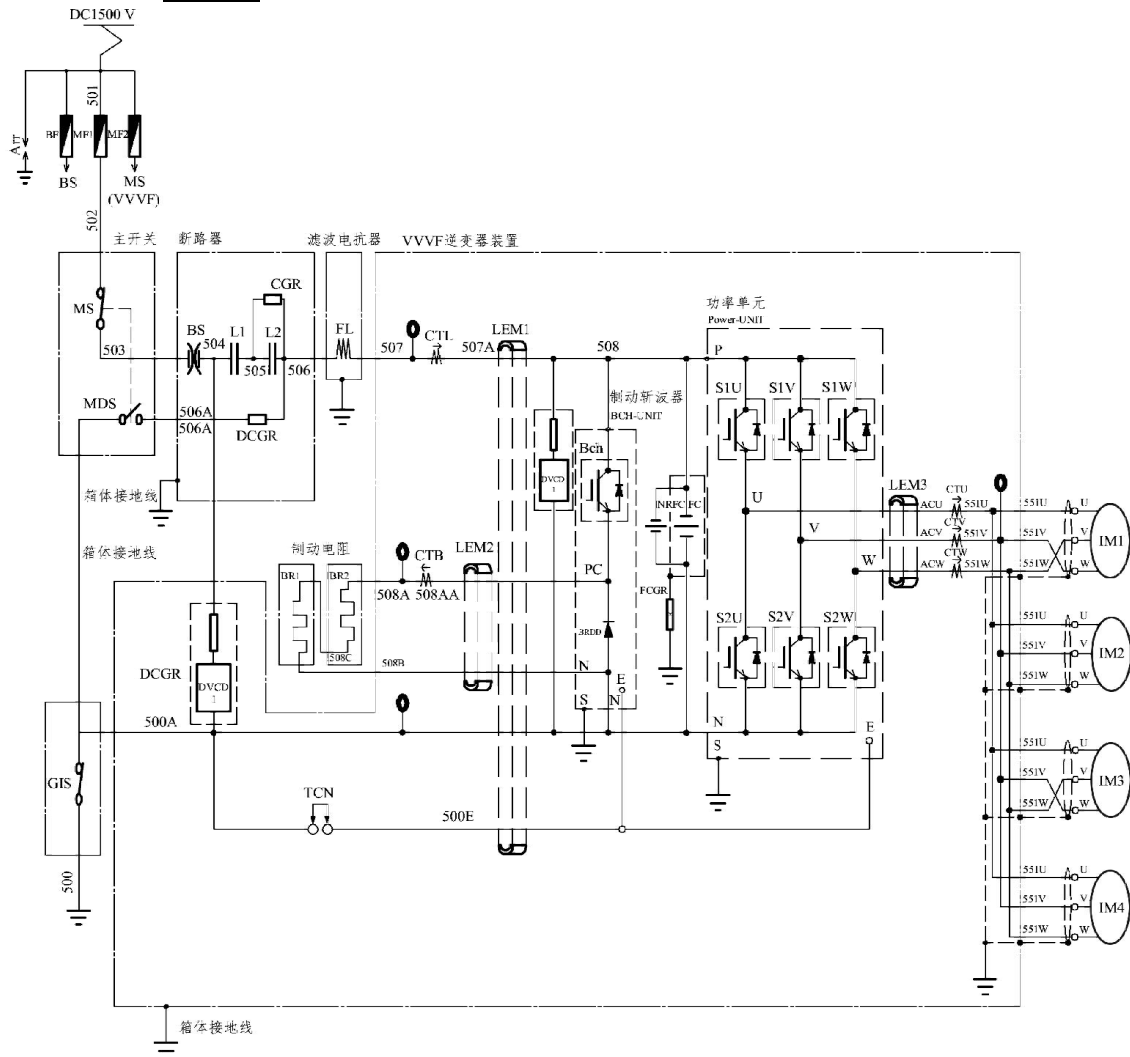


图 2-3 牵引主回路原理图 2

MF—主熔断器；BF—母线熔断器；Arr—避雷器；MS—主隔离开关；HB—高速断路器；L1—线路接触器；
L2—预充电接触器；CGR—预充电电阻；FL—滤波电抗器；DCVCD—直流电压检测装置；
BR—制动电阻；BCH—制动斩波器；FC—滤波电容

上图中，VVVF 逆变器的逆变模块使用三相桥式逆变电路，功率元件使用 3300 V/1200 A 的 IGBT。DCPT1 检测接触网电压，并将检测信号送至车辆监控系统，由 DDU 显示。DCPT2 检测滤波电容电压。

主回路中主要设备有：受电弓、主隔离开关、主熔断器、高速断路器、滤波电抗器、VVVF 逆变器、制动电阻、牵引电机等。受电弓安装于动车车顶，其他设备分别安装于动车车底主开关箱、断路器箱、滤波电抗器箱、VVVF 逆变器箱和制动电阻箱等。

2. 牵引主回路的电路结构

牵引主回路的电路由网侧电路、预充电电路、直流滤波电路、电阻制动电路、三相桥式逆变器电路、放电电路和检测电路组成。

(一) 网侧电路

网侧电路靠近电网侧，主要由受流装置、避雷器、高速断路器、熔断器和主隔离开关等组成。网侧电路的作用主要是供电、隔离及主回路故障保护。网侧电路结构如图 2-4 所示。

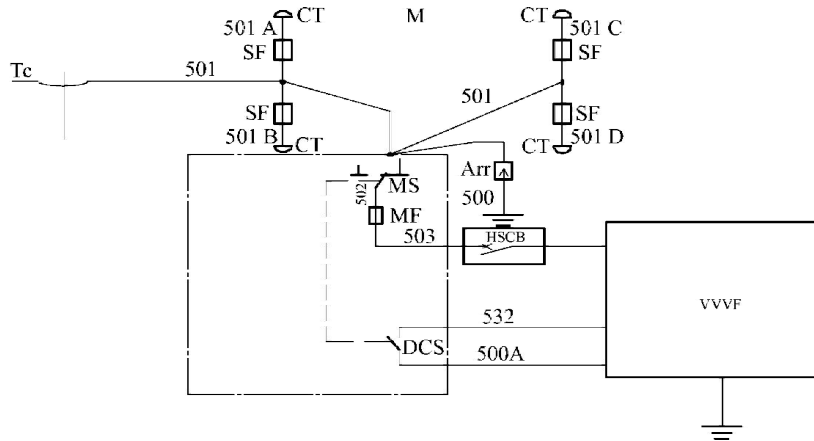


图 2-4 网侧电路

(二) 预充电电路

预充电电路用来限制主回路接通瞬间滤波电容受到的较大的电流冲击，即限制主回路接通时滤波电容的充电电流。预充电电路主要由线路接触器、预充电接触器、预充电电阻和滤波电容组成。预充电电路的结构形式主要有两种，如图 2-5 所示。

工作过程（以结构形式 1 介绍）：

预充电电路的工作过程主要分成两个阶段：

① 主回路接通时，线路接触器断开，预充电接触器闭合，预充电电阻接入回路，电网通过预充电电阻给滤波电容充电。由于预充电电阻的分流作用，滤波电容的充电电流较小，滤波电容两端电压缓慢上升。

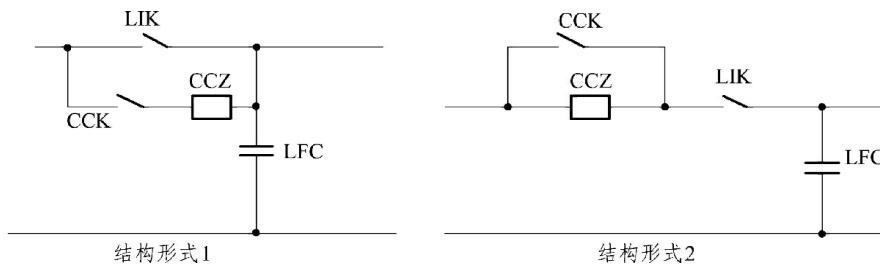


图 2-5 预充电电路的两种结构形式

② 当滤波电容两端电压上升到接近电网电压时（一般为电网电压的 80%），线路接触器闭合，预充电接触器断开，电网直接给滤波电容充电，滤波电容电压快速达到工作电压，并保持恒定。

（三）直流滤波电路

直流滤波电路主要由滤波电抗器和滤波电容器组成，位于牵引主回路逆变电路的直流输入端。滤波电抗器串入牵引主回路，滤波电容并联于逆变电路输入端。直流滤波电路的结构形式如图 2-6 所示。

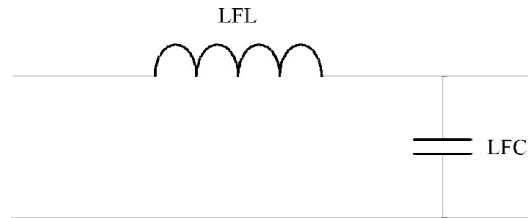


图 2-6 直流滤波电路的结构形式

直流滤波电路在牵引主回路中主要有以下几点作用：

- ① 与滤波电容构成滤波器，对逆变器的直流侧双向滤波；
- ② 抑制电网侧发生的过电压，减少其对逆变器的影响；
- ③ 抑制逆变器因换流引起的尖峰过电压；
- ④ 抑制逆变器产生的谐波电流对电网的影响；
- ⑤ 限制逆变器的故障电流。

（四）电阻制动电路

电阻制动电路（制动斩波电路）是一种过电压抑制电路。当牵引主回路直流环节电压过高时，通过控制导通制动斩波器，将电能消耗在制动电阻上，从而达到限制直流环节电压的目的；电制动时，电机能量储存在滤波电容上，若电网不能吸收制动能量，则将制动斩波器导通，让滤波电容对制动电阻放电，从而限制了滤波电容电压。制动电流的大小由制动斩波器的占空比决定，调节制动斩波器的占空比可调节制动电流的大小。

电阻制动电路的作用主要有以下两点：

- ① 进行电阻制动。电阻制动时，吸收不能再生的制动电能量。

② 过电压保护。当直流输入端出现过电压时，斩波器导通，滤波电容经过制动斩波器对制动电阻放电，将直流输入端电压限制在一定的范围内。

电阻制动电路主要由制动斩波器和制动电阻组成，结构形式如图 2-7 所示。

当滤波电容出现高压时，图中 IGBT 将导通。续流二极管与制动电阻反向并联，主要用来保证在斩波器开通或关断瞬间不至于造成电流突然中断而引起直流回路过压。

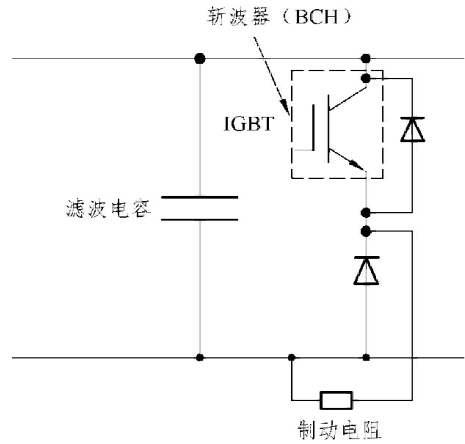


图 2-7 电阻制动电路结构图

(五) 三相桥式逆变电路

三相桥式逆变电路的应用是车辆控制技术的革新，在牵引逆变器和辅助逆变器中得到了广泛的应用。牵引主回路中，充分利用三相逆变电路的可逆性，既可将直流电逆变成三相交流电输出，又能工作在整流状态，将牵引电机产生的三相交流电整流成直流电。一般采用电压型三相桥式逆变电路，它由 6 个 IGBT 元件反向并联 6 个二极管组成。直流输入端并联 1 个大电容，交流电由逆变电路每个半桥的中点输出。电路原理图如图 2-8 所示。目前，三相桥式逆变电路主要采用两种调制方式：180°导电型和 PWM 型。PWM 型逆变电路输出为等效于正弦波的一组脉冲序列，谐波分量较少，应用更为广泛，但对控制的要求更高。

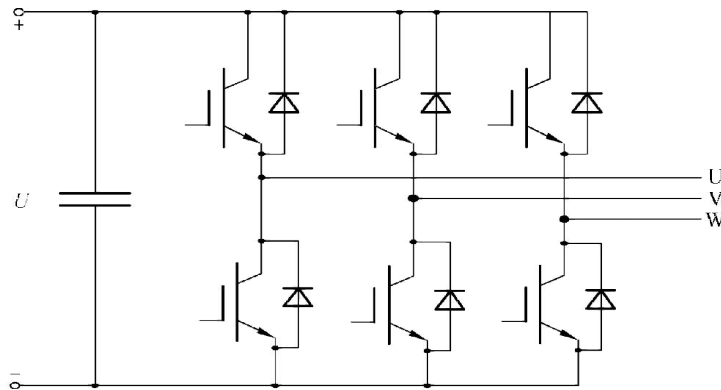


图 2-8 三相桥式逆变电路原理图

工作状态：

- ① 牵引时，三相桥式逆变电路工作在逆变状态，将直流电逆变成三相交流电输出。
- ② 电制动时，三相桥式逆变电路工作在整流状态，将交流电整流成直流电输出。

(六) 放电电路

放电电路是为非工作状态时操作主回路设备，避免残留的电荷造成触电危险而设置的快速释放滤波电容中残留电荷的电路。不同的车辆的放电电路结构形式有所不同，下面介绍三种放电电路。

1. 结构形式 1

电路结构图如图 2-9 所示。

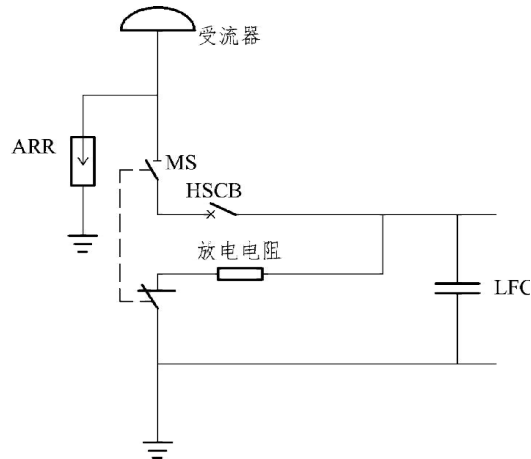


图 2-9 放电电路结构形式 1

图中，MS 为主隔离开关，LFC 为滤波电容。在主隔离开关断开的同时，放电电路接通。滤波电容中的残留电荷通过放电电阻快速释放掉。

2. 结构形式 2

电路结构图如图 2-10 所示。

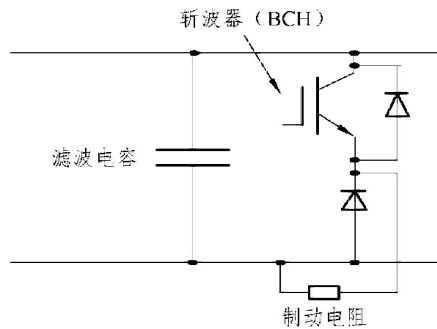


图 2-10 放电电路结构形式 2

电阻制动电路充当放电电路。当牵引逆变器停止工作后，为了保证人身安全，在牵引控制单元的控制下，制动斩波器导通，滤波电容对制动电阻快速放电。

3. 结构形式 3

电路结构图如图 2-11 所示。

在滤波电容两端并联固定保护电阻，也具有放电功能，滤波电容中储存的电荷会对固定放电电阻慢慢释放掉，一般要求对电阻放电 5 min 内电压降到 50 V 以下。

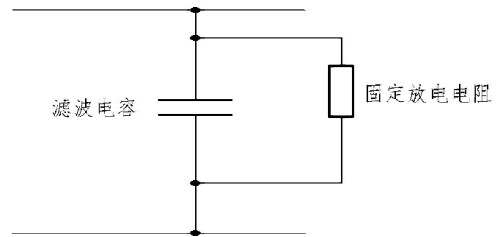


图 2-11 放电电路结构形式 3

(七) 检测电路

检测电路用来检测牵引主回路工作时各状态量，为主机和牵引控制单元提供控制信号，起监控和保护牵引主回路的作用。检测电路由各种电压传感器、电流传感器、差动电流传感器、速度传感器等检测装置组成。牵引主回路中，利用电压传感器检测电网电压、逆变电路直流输入电压、逆变器输出线电压等，控制逆变器牵引和制动工作，同时实现电路过压和欠压保护；利用电流传感器检测直流输入电流、制动电流、逆变器输出相电流等，实现电机控制及过流、过载的保护；差动电流传感器（电流平衡继电器）主要用来检测牵引主回路输入输出电流差值，依此来判断牵引主回路是否存在接地故障等。

三、牵引主回路工况

牵引主回路的主要功能是完成牵引系统的牵引/制动，有牵引、电制动两种不同的工况。

(一) 牵引工况

牵引工况时，电网向牵引逆变器供电，牵引逆变器工作在逆变状态，它将接触网提供的直流电转换成三相变频变幅的交流电输出给牵引电机。此时，牵引电机工作在电动机状态，将电能转换成机械能驱动列车运行。

牵引工况时，主回路的工作框图如图 2-12 所示。

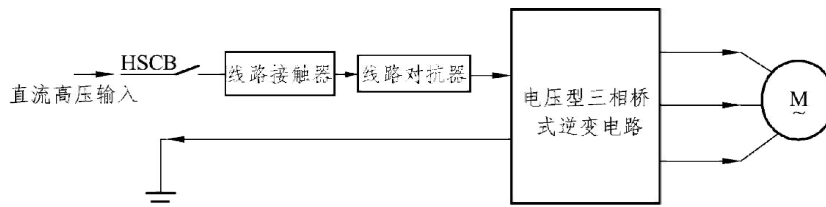


图 2-12 牵引工况时主回路的工作框图

牵引工况时，电能传递路径如图 2-13 所示。

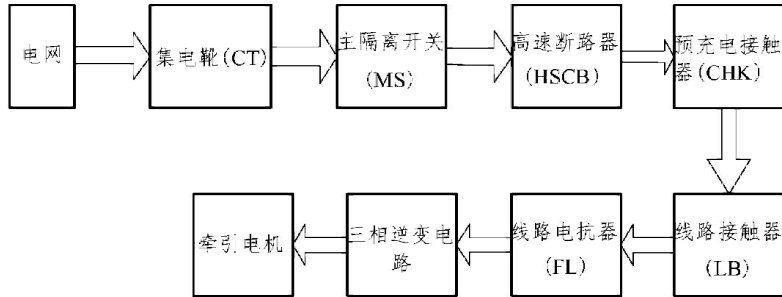


图 2-13 牵引工况时电能传递路径

(二) 电制动工况

电制动分为再生制动和电阻制动，再生制动优先。

电制动工况时，牵引电机作为发电机，牵引逆变器工作在整流状态，此时，接触网停止给牵引系统供电。牵引电机的机械能转换成电能向电网回馈，即再生制动。若电网不能吸收回馈的制动能量，则将制动能量消耗在制动电阻上，以热能形式消耗掉，即电阻制动。电阻制动时，制动电流的大小与制动斩波器的占空比有关，制动斩波器的占空比越大，制动电流越大。

电制动工况时，主回路工作框图如图 2-14 所示。

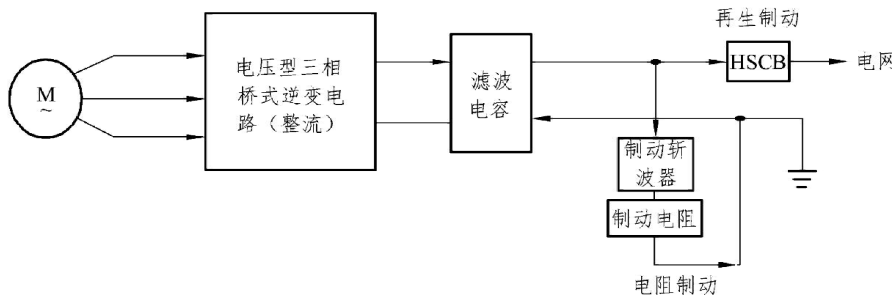


图 2-14 电制动工况时主回路工作框图

电制动工况时，电能传递路径如图 2-15 所示。

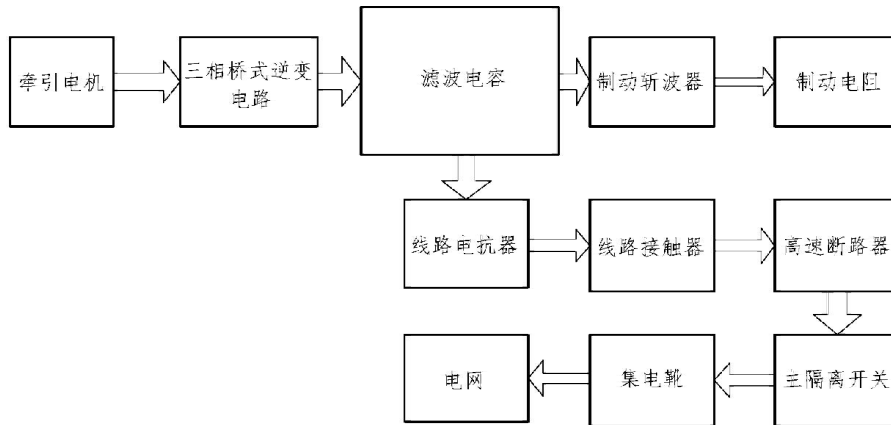


图 2-15 电制动工况时电能传递路径

四、牵引主回路工作状态

牵引主回路的工作分为四个部分：滤波电容充电、逆变器逆变或整流、滤波电容对电网放电（再生制动）、滤波电容对制动电阻放电（电阻制动）。

（一）滤波电容充电

滤波电容是牵引主回路中直流连接电路的重要设备，它能稳定电压，吸收交流分量，并和线路电抗器组成线路滤波器。牵引主回路开始工作前，滤波电容中基本没有电荷。牵引主回路开始工作后，电网首先要对滤波电容进行充电。

滤波电容的充电路径如图 2-16 所示。

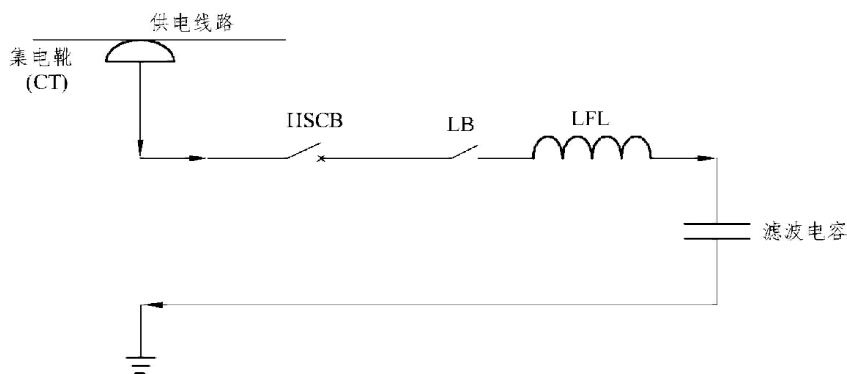


图 2-16 滤波电容的充电路径

（二）直流电向三相交流电逆变

滤波电容充电完成之后，由三相桥式逆变电路将直流电转换成三相交流电。

(三) 牵引电机发电对滤波电容充电

牵引控制单元接收到电制动指令后，就会控制牵引主回路工作在电制动状态。电制动时，牵引电机作为发电机，将机械能转换成电能，输出三相交流电。牵引电机输出的三相交流电经整流后，对滤波电容进行充电。

牵引电机发电对滤波电容充电示意图如图 2-17 所示。

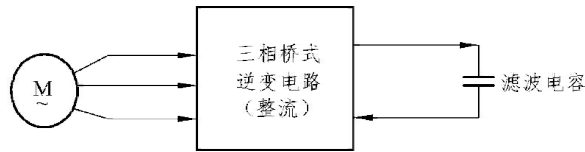


图 2-17 牵引电机发电对滤波电容充电示意图

(四) 滤波电容对电网放电

电制动时，牵引电机输出的电能储存在滤波电容中，滤波电容的电压会上升，而滤波电容电压必须维持稳定，不允许太高，多余的电荷必须释放掉。若实现再生制动的条件能得到满足，滤波电容首先会对电网释放电荷。实现再生制动的条件是：

- ① 逆变电路直流输入端电压高于电网电压；
- ② 同一供电区段内有其他用电设备吸收回馈的电能。

滤波电容对电网放电示意图如图 2-18 所示。

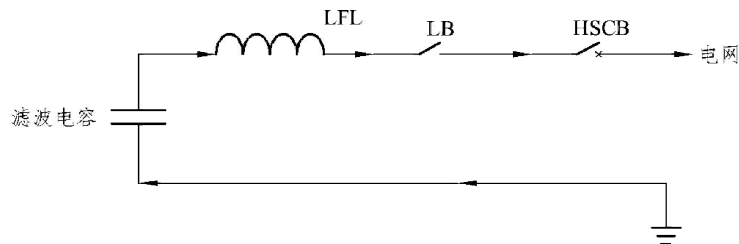


图 2-18 滤波电容对电网放电示意图

(五) 滤波电容对制动电阻放电

电制动时，若实现再生制动的条件不能得到满足，滤波电容上储存的电荷将会对制动电阻释放。此时，牵引控制单元控制制动斩波器导通，滤波电容通过制动斩波器对制动电阻放电，将制动能量在制动电阻上消耗掉。

滤波电容对制动电阻放电示意图如图 2-19 所示。

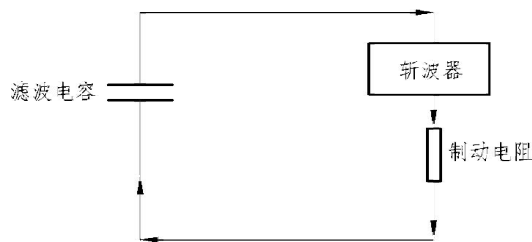


图 2-19 滤波电容对制动电阻放电示意图

第三节 牵引系统的工作原理

牵引系统作为地铁列车的动力系统，是既重要又复杂的一个系统。本节将从牵引系统工作条件、牵引系统工作框图和牵引系统工作模式三个方面对牵引系统进行介绍。

一、牵引系统工作的条件

牵引系统的控制由牵引控制单元完成。牵引控制单元综合车辆各设备的状态，比较设定条件，来判定牵引与否；根据牵引参考值来判定进行牵引或制动，计算所需牵引力/制动力的大小，从而控制牵引逆变器按要求工作。

牵引系统至少要满足以下三个条件才会开始工作：

- ① 牵引方向；
- ② 牵引控制单元接收到牵引授权指令；
- ③ 牵引控制单元收到牵引参考值。

（一）牵引方向

牵引方向由主控制器的方向手柄给出。在列车处于静止状态下，必须操作方向手柄确定列车的运行方向。如果在列车运行过程中改变方向手柄的位置，牵引控制单元将会封锁牵引授权指令。

（二）牵引授权指令

牵引授权指令由列车启动联锁控制电路给出，只要列车启动所需的条件都得到满足，则

向牵引控制单元发出牵引授权指令。列车启动所需的条件主要有以下几点：

- ① 所有客室车门关好；
- ② 疏散门关好；
- ③ 主风缸压力不低于列车启动所需的最小值；
- ④ 紧急制动已缓解；
- ⑤ 所有空气制动和停放制动已缓解。

(三) 牵引参考值

牵引参考值由主控制手柄或 ATO 设备给出。

手动驾驶时，由主控制手柄给出牵引参考值。主控制手柄在不同的位置给出不同的模拟电流信号。此模拟信号代表所需牵引/制动力的大小，再经过 PWM 编码器转换成 PWM 信号后发给牵引控制单元，牵引控制单元依据此 PWM 信号控制逆变器。

自动驾驶时，牵引参考值由 ATO 设备给出。

二、牵引系统工作框图

牵引系统主要由受流装置、HSCB、牵引逆变器、牵引控制单元、牵引电机、制动电阻等组成，它们彼此之间按照一定的方式协调工作。牵引系统工作框图如图 2-20 所示。

下面对牵引系统工作框图作简单说明。

- ① TCMS：列车控制与监测系统，即列车的大脑，用来监测、控制列车上重要设备的工作状况。
- ② DCU：牵引控制单元，主要用来控制牵引逆变器根据需要输出一定形式的交流电。同时，控制线路接触器、预充电接触器、制动斩波器等。控制列车的制动状态、再生制动向电阻制动的转换以及控制制动电流的大小等。
- ③ TCMS 主机与 ATO 主机、DCU 之间通过总线进行通信，一般使用 MVB 总线。
- ④ PWM 编码器与 DCU 之间通过 PWM 硬线连接。PWM 硬线用于紧急牵引时向牵引控制单元和微机制动控制单元传输 PWM 脉冲信号。
- ⑤ DCU 监测牵引电机的转速，用于闭环控制牵引电机。
- ⑥ 主控制手柄在不同位置将给出不同的模拟电流信号。

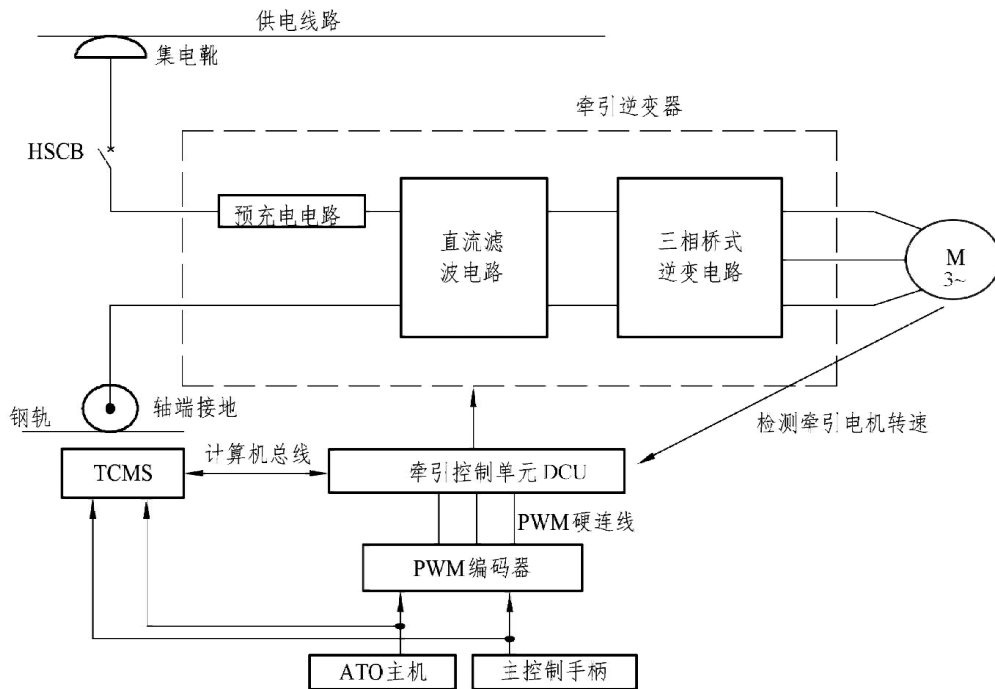


图 2-20 牵引系统工作框图

三、牵引系统的工作模式

城市轨道交通车辆运行环境复杂，牵引状态受线路情况、信号状态、车辆自身设备状态等各种因素的影响，从而决定了牵引系统的工作模式必须多样化。

牵引系统的工作模式主要有以下几种：

- ① 正常牵引：分为自动驾驶（ATO、AR）和手动驾驶（SM、RM、WM、URM等）；
- ② 紧急牵引；
- ③ 坡起牵引；
- ④ 高加速牵引。

（一）正常牵引

牵引参考值有两种传输方式，即总线传输和 PWM 硬线传输。正常牵引时，牵引参考值信号通过总线网络传输。列车通信网络正常时，列车可以进行正常牵引。正常牵引时，根据驾驶方式不同，有自动驾驶和手动驾驶两种方式。

1. 自动驾驶

自动驾驶时，牵引参考值由 ATO 主机给出，由 TCMS 主机车辆控制单元接收 ATO 主机

信号，再通过总线传输给牵引控制单元。

自动驾驶时工作原理框图如图 2-21 所示。

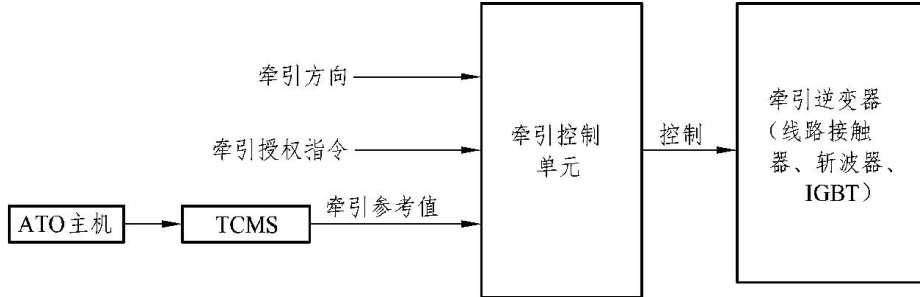


图 2-21 自动驾驶时工作原理框图

2. 手动驾驶

手动驾驶时，牵引参考值由主控制手柄给出，同样由 TCMS 主机车辆控制单元接收主控制手柄发出的信号，再通过总线传输给牵引控制单元。

手动驾驶时工作原理框图如图 2-22 所示。

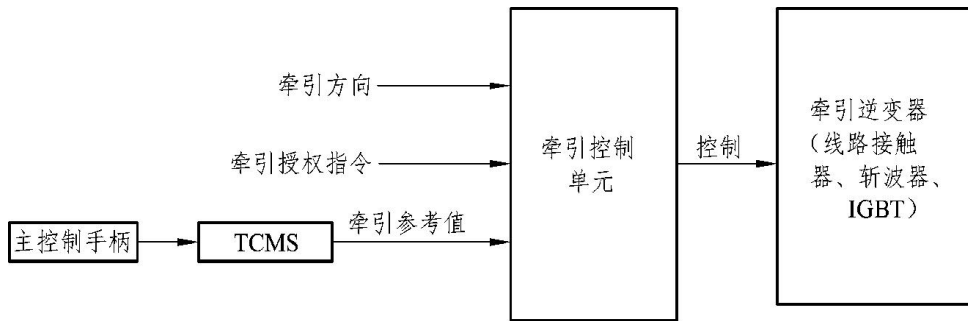


图 2-22 手动驾驶时工作原理框图

(二) 紧急牵引

正常牵引时，PWM 信号通过列车总线网络传递到牵引系统。若列车通信网络故障，列车必须进行紧急牵引，此时主控制手柄给出的牵引参考值模拟信号经编码器编译成 PWM 信号，再通过 PWM 硬线传递给牵引控制单元。紧急牵引时，只能进行手动驾驶。

紧急牵引时工作框图如图 2-23 所示。

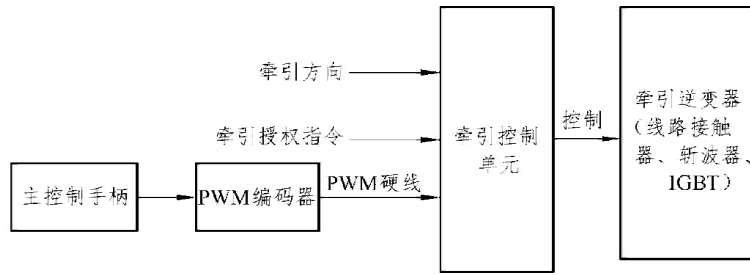


图 2-23 紧急牵引时工作原理框图

（三）坡起牵引

当列车停在坡道上时，为了保证列车能正常启动而不至于后溜，需采用坡起牵引模式，在牵引系统工作的同时给列车施加一定的制动力。此时，列车牵引力已施加，但常用制动未完全缓解，列车会带闸前进，常用制动一般在 2 s 内自行缓解。根据驾驶方式的不同，坡起牵引分为自动驾驶和手动驾驶两种情况。

① 自动驾驶模式：坡起牵引命令自动执行，牵引系统在列车带有制动力的情况下施加牵引，当牵引转矩逐渐增加后，坡起牵引命令被取消。

② 手动驾驶模式 坡起牵引命令通过按下坡起按钮来执行。当列车具有足够的速度之后，司机应当释放坡起按钮，并且车速超过 2 km/h 后自动切除该指令。

（四）高加速牵引

当接通高加速模式开关时，牵引控制单元接收高加速指令，系统进入高加速模式，转矩指令被增加至标准值的 1.335 倍，产生更大的加速度以便爬坡。

高加速牵引时工作框图如图 2-24 所示。

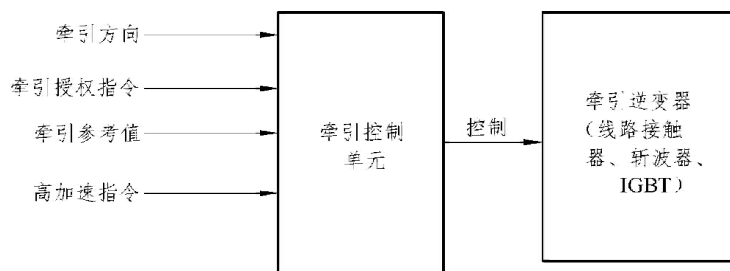


图 2-24 高加速牵引时工作框图

课后练习题

1. 牵引系统如何分类？
2. 电压型逆变电路与电流型逆变电路的差别是什么？
3. 简述气动受电弓升降弓过程。
4. 交流传动牵引系统主回路的主要部件有哪些？
5. 高速断路器属于哪个系统的设备？主要有怎样的作用？
6. 简述牵引电机在地铁列车上的布置方案，采用何种供电方式。
7. 牵引逆变器的作用是什么？
8. 牵引主回路中有哪些保护性器件？各起到怎样的作用？
9. 我国地铁供电电压制式主要有哪两种？各采用哪种供电方式供电？
10. 简述牵引主回路主要由哪几种电路组成。
11. 预充电电路的作用是什么？结构形式是怎样的？
12. 牵引主回路中直流环节滤波电路的作用是什么？
13. 在什么情况下会进行电阻制动？电阻制动时制动电流与什么有关？
14. 简述三相桥式逆变器的结构，并画出电压型三相桥式逆变电路的电路图。
15. 写出下列英文缩写的中文名称：
SPWM、DCU、TMS、TCMS、VVVF、HSCB、IGBT
16. 牵引系统主要有哪几种工作状态？工作在何种状态主要由什么决定？
17. 列车进行再生制动需要具备的基本条件是什么？