

# 电力系统分析

## —第11章— 电气化铁路牵引供电系统 概述

主讲教师：符玲

西南交通大学 电气工程学院



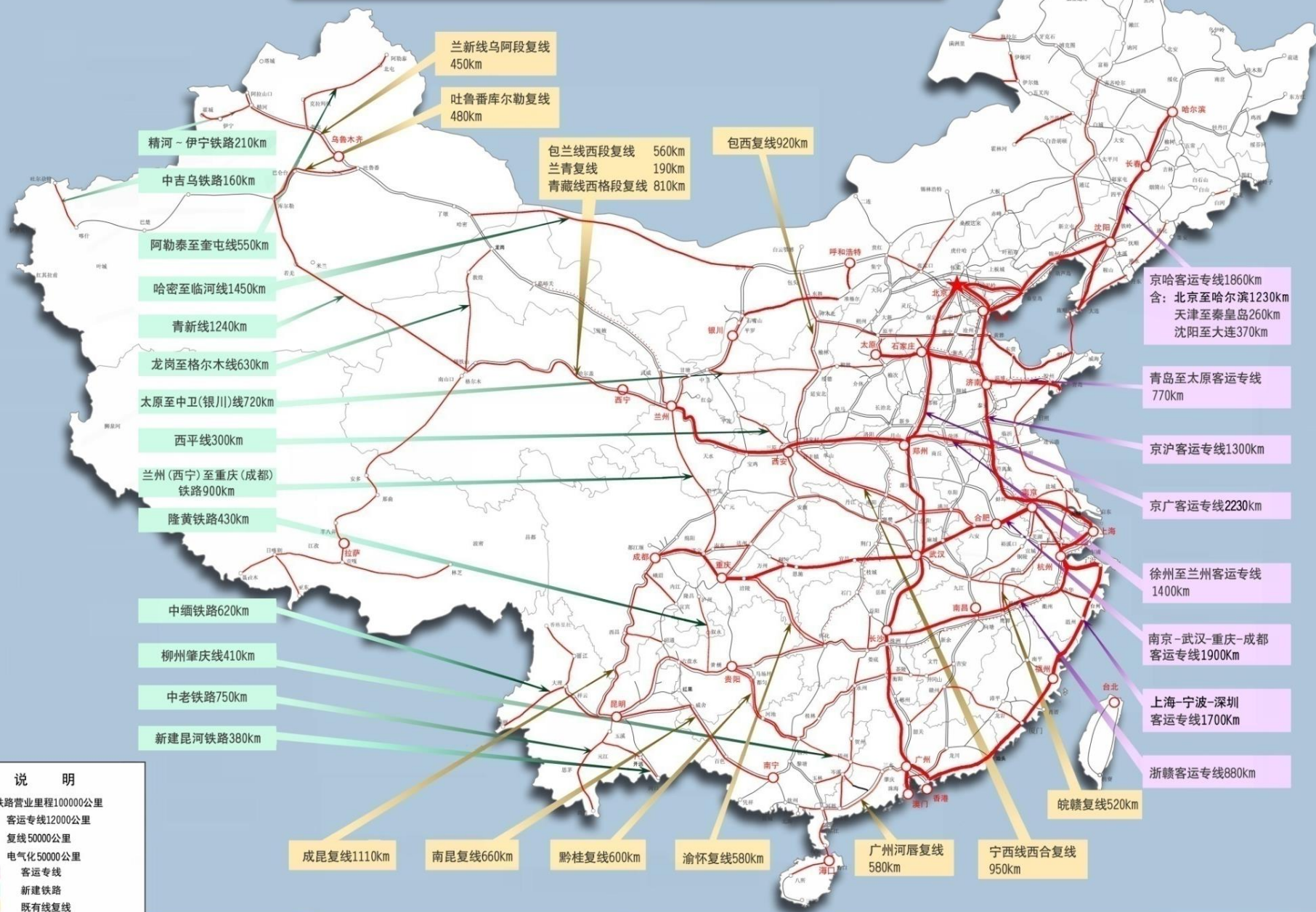


# **-第11章- 牵引供电系统概述**



- 第11.1节- 牵引供电系统的组成**
- 第11.2节- 牵引供电的基本要求**
- 第11.3节- 牵引变电所外部电源供电方式**
- 第11.4节- 牵引供电系统供电方式**

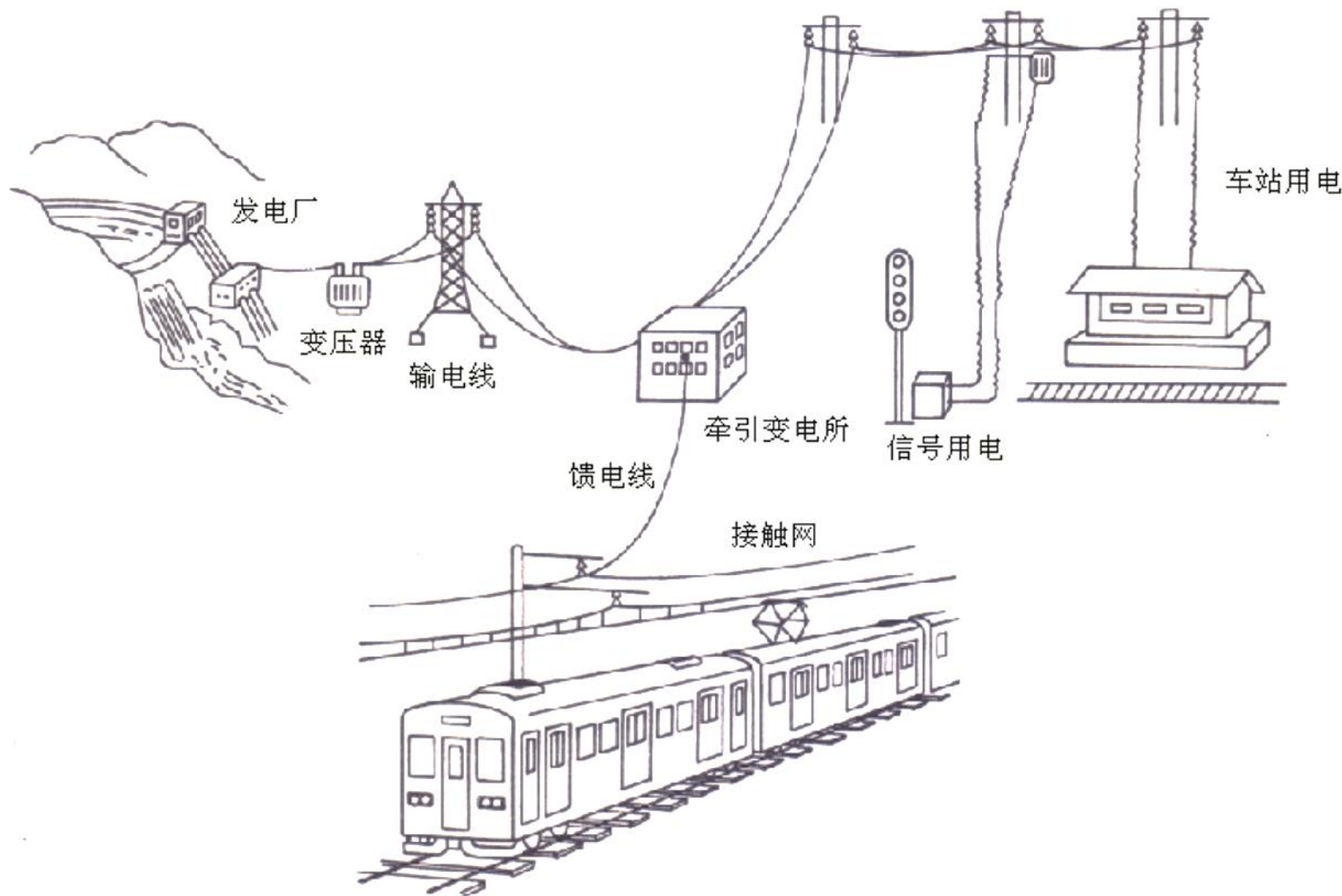
# 2020年铁路网规划图





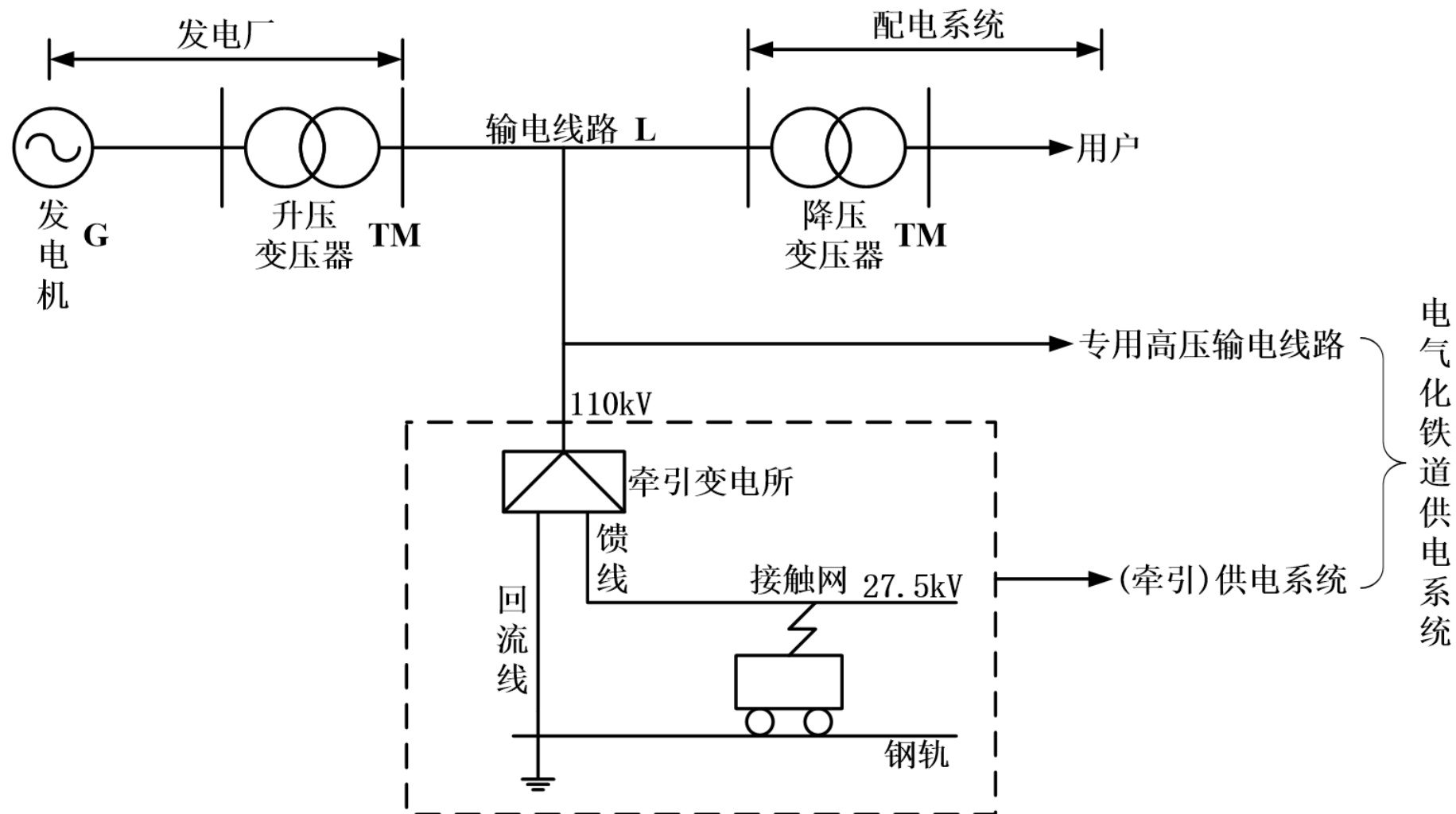
# -第11.1节- 牵引供电系统的组成

## ➤ 电力系统向牵引供电系统供电示意图



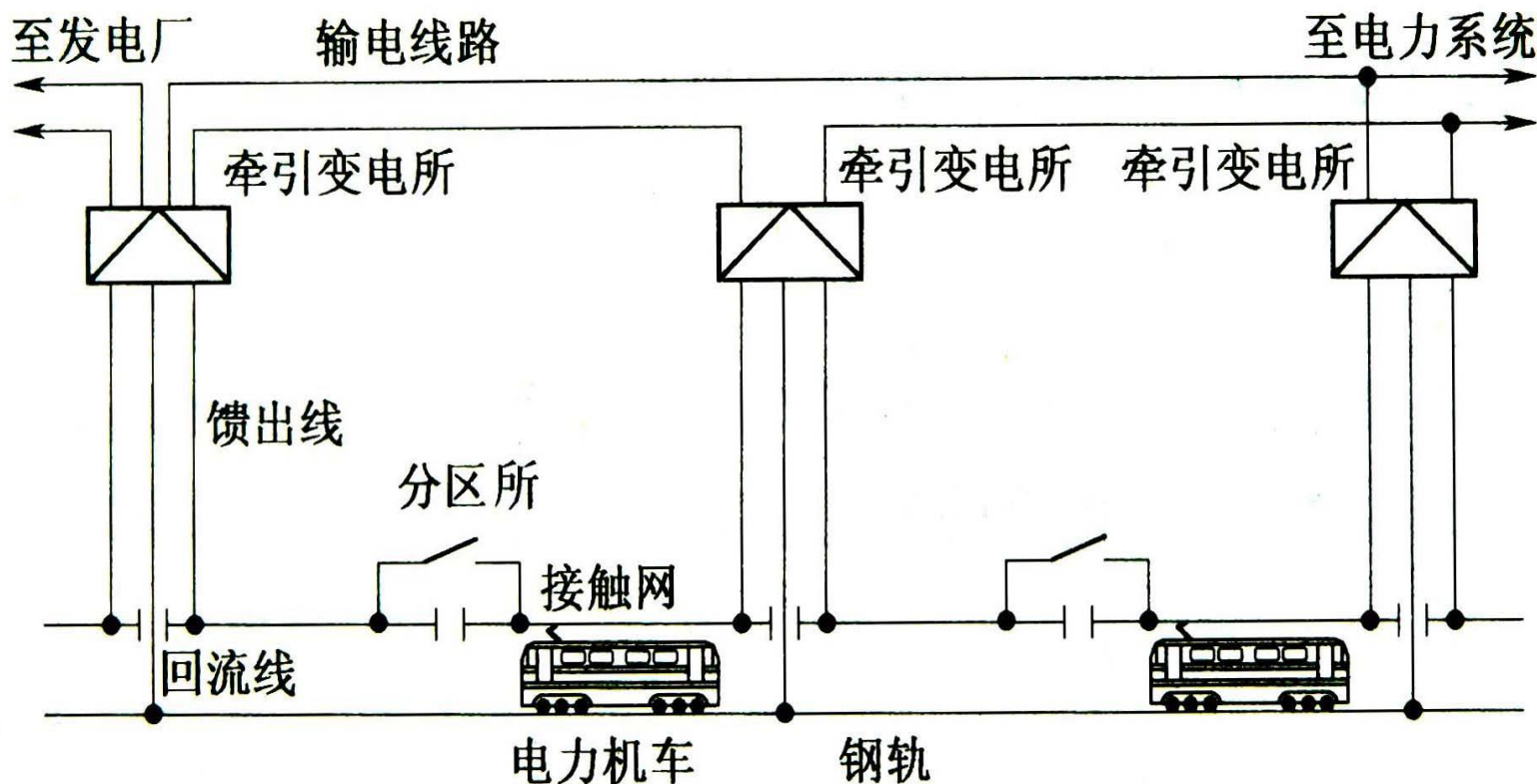
# -第11.1节- 牵引供电系统的组成

## ➤ 电力系统向牵引供电系统供电结构图



# -第11.1节- 牵引供电系统的组成

## ➤ 牵引供电系统示意图



## -第11.1节- 牵引供电系统的组成

### ➤ 牵引供电系统的主要设备

- **牵引变电所**

把电力系统供应的电能变换成适合电力机车牵引要求的电能。

- **接触网**

一种悬挂在轨道上方，沿轨道敷设的、和铁路轨顶保持一定距离的输电网。通过电动车组的受电弓和接触网的滑动接触，牵引电能就由接触网进入电动车组，从而驱动牵引电动机使列车运行。

- **馈电线**

连接牵引变电所和接触网的导线。它将牵引变电所变换后的电能送到接触网。

- **轨道**

在非电牵引情形下只作为列车的导轨。在电力牵引时，轨道除仍具有导轨功能外，还需要完成导通回流的任务。因此，电力牵引的轨道，需要具有良好的导电性能。

- **回流线**

连接轨道和牵引变电所的导线。通过回流线把轨道中的回路电流导入牵引变电所的主变压器。

# -第11.1节- 牵引供电系统的组成



• 牵引变电所



## -第11.1节- 牵引供电系统的组成

### ◆ 牵引变电所：核心元件为变压器

- (1) 三相YNd11接线;
- (2) 单相Ii接线;
- (3) 单相Vv接线;
- (4) Scott接线。

### ◆ 牵引网：由馈线、接触网、轨（地）、回流线组成。

- (1) 直接供电方式
- (2) 带回流线的直接供电方式
- (3) 吸流变压器(BT)供电方式
- (4) 自耦变压器(AT)供电方式

## -第11.2节- 牵引供电的基本要求



### ➤ 1. 牵引供电的电流制式

**直流制：**主要用于城市轨道交通  
额定电压有1500V和750V

**交流制：**

- 低频单相交流制：**少量国家  
 $16\frac{2}{3}$  Hz, 25Hz

- 工频单相交流制：**50Hz, 60Hz  
主要用于大运量、重载的铁路运输  
额定电压为25kV, 广泛采用

- 三相交流制：**淘汰

# -第11.2节- 牵引供电的基本要求



## ➤ 2. 牵引供电的三大技术课题

### ◆ 负序电流

动态单相取流，产生负序电流输入电力系统；

**措施：**三相-两相变压器；变电所换向连接；

### ◆ 高次谐波

机车整流器产生高次谐波，对通信产生干扰。

**措施：**BT，AT供电方式

### ◆ 功率因数低

**措施：**并联电容补偿

## -第11.2节- 牵引供电的基本要求



### ➤ 3. 对牵引供电系统的基本要求

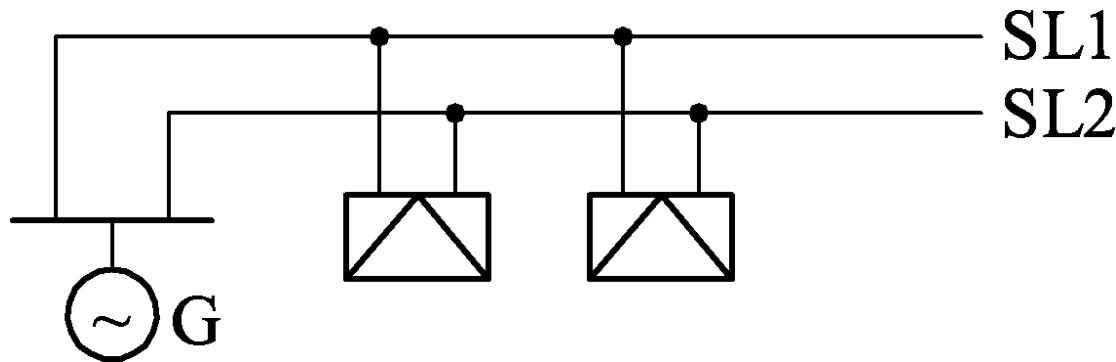
- ◆ 安全、可靠、不间断供电;
- ◆ 保证必须的电压水平: 19 ~ 29KV, 额定27.5kv;
- ◆ 提高功率因素:  $\cos\Phi=0.8\sim1$ ;
- ◆ 减少负序电流和高次谐波;
- ◆ 减少对邻近通信线路的干扰。



## -第11.3节- 牵引变电所外部电源供电方式



### ➤ 1. 单电源双回输电线路供电方式



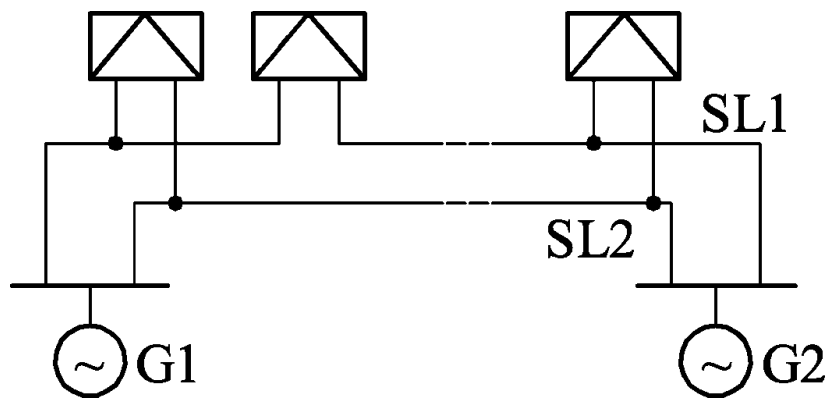
- 电力系统的单个地区变电所或发电厂以专用双回输电线路向牵引变电所供电；
- 输电线路距离较短，牵引变电所数目不应超过两个，以保证供电的可靠性。
- 单侧供电方式的可靠性一般比双侧供电方式和环形供电方式要差，而投资不会比环形供电方式和双侧供电方式少。
- 要求：必须有两回路输电线路供电，且有各自的杆塔和走线

# -第11.3节- 牵引变电所外部电源供电方式



## ➤ 2. 双电源环形供电方式

- 牵引变电所电源进线来自两个不同电源点（地区变电所），且若干变电所的一次侧进（出）线与电力系统连成环形网，并在环网中同时有功率传输；



- 单回路环网，如 SL1 线路，但可靠性和灵活性低于双回路环网供电。

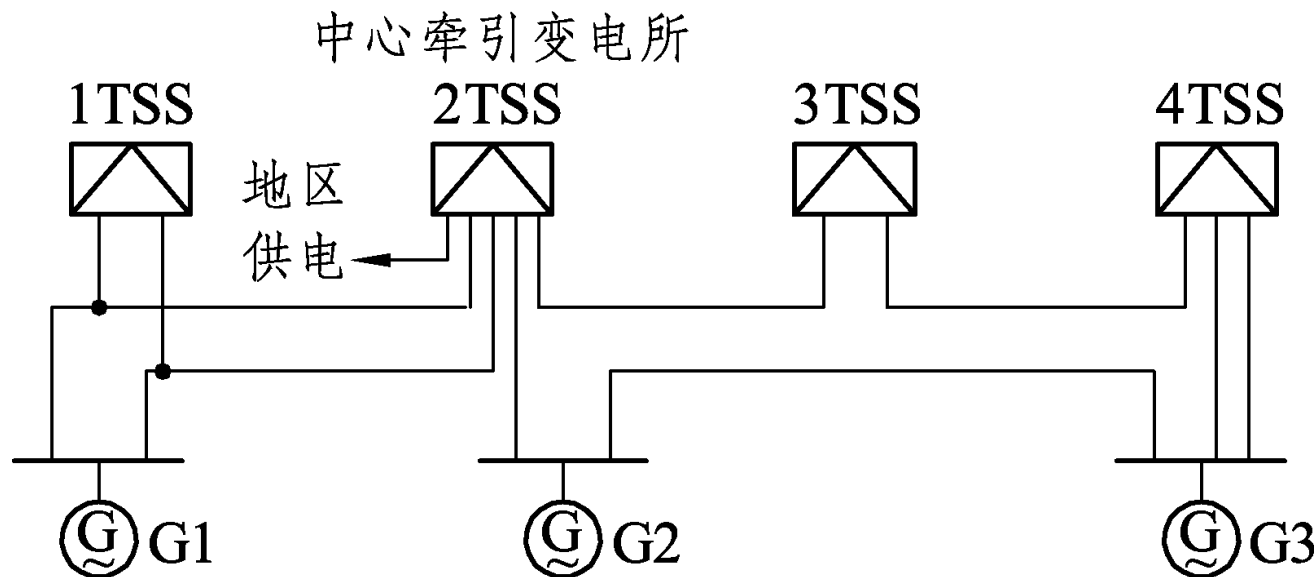
- 双电源双回路环网供电，在任一电源点和线路同时发生故障或检修时，能保证牵引变电所不间断供电，具有很高的可靠性和转换操作的灵活性。

- SL2 线路为电力系统主要功率传输线，它除用 T 型接线外，不允许破口（设断路器开断线路）连接至牵引变电所，因而 SL2 线路可作为牵引变电所的后备电源线，SL1 输电线则为牵引变电所的专用传输线。

## -第11.3节- 牵引变电所外部电源供电方式



### ➤ 3. 多电源混合供电方式



- 由多电源环网供电、双回输电线路和辐射供电（电源G3直接对4TSS供电）等方式综合构成。
- 2TSS牵引变电所，一方面通过它与系统各电源点交换功率，另一方面它又为其他牵引变电所充当环网供电的枢纽，并在高压侧为地区工农业负荷供电，担负着重要的电能传输和供电任务，故称为**中心牵引变电所**。
- 1TSS、3TSS和4TSS分别称为**终端牵引变电所**和**中间牵引变电所**。

## -第11.4节- 牵引供电系统供电方式

### ➤ 牵引供电方式的分类

#### ◆ 按分区所运行状态分类：

- (1) 单边供电；
- (2) 双边供电；
- (3) 上、下行并联供电。

#### ◆ 按牵引网设备类型分类：

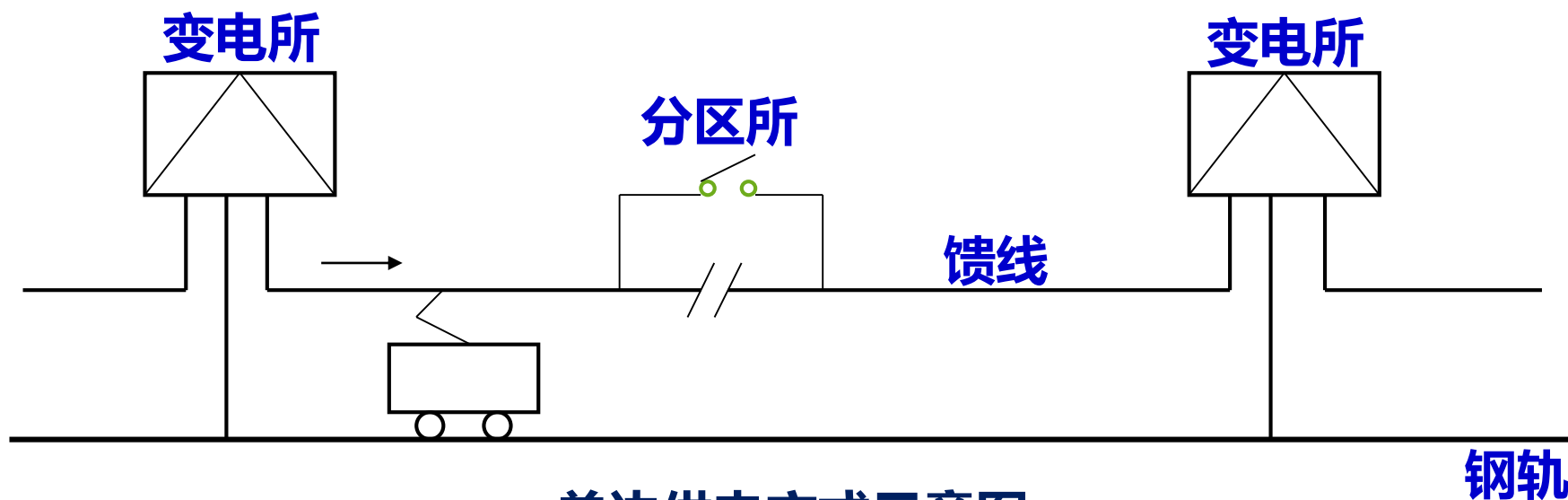
- (1) 直接供电方式(TR供电方式)；
- (2) BT供电方式(Booster-Transformer,吸流变压器)；
- (3) AT供电方式(Auto-Transformer,自耦变压器)；
- (4) 带回流线的直接供电方式(DN供电方式)；
- (5) CC供电方式(Coaxial Cable, 同轴电力电缆)。



## -第11.4节- 牵引供电系统供电方式

### ◆ 按分区所运行状态分类——单边供电

分区所开关打开，只由一端供电

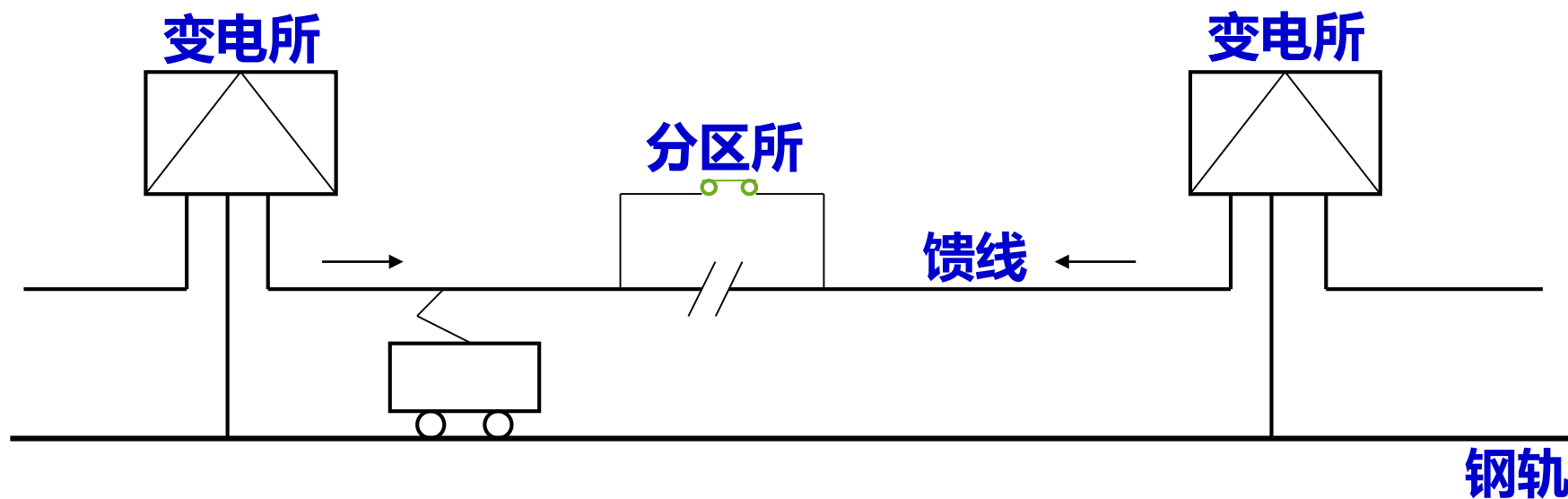


• 单边供电方式示意图

## -第11.4节- 牵引供电系统供电方式

### ◆ 按分区所运行状态分类——双边供电

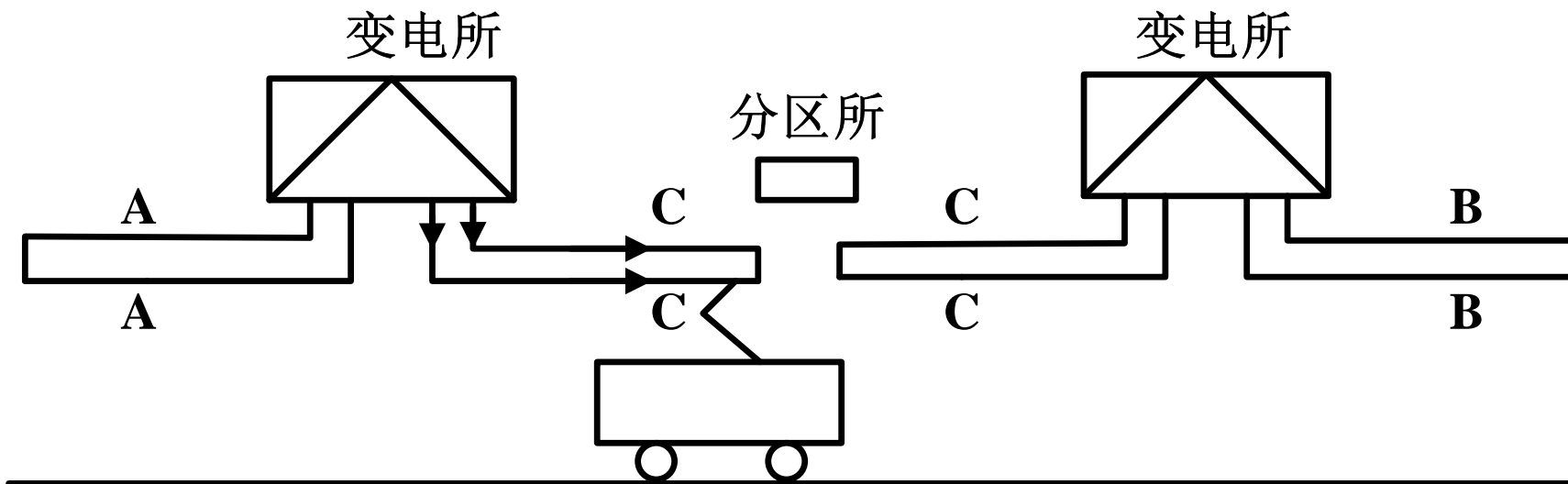
分区所开关闭合，由两端供电。



• 双边供电方式示意图

## -第11.4节- 牵引供电系统供电方式

### ◆ 按分区所运行状态分类——上、下行并联供电

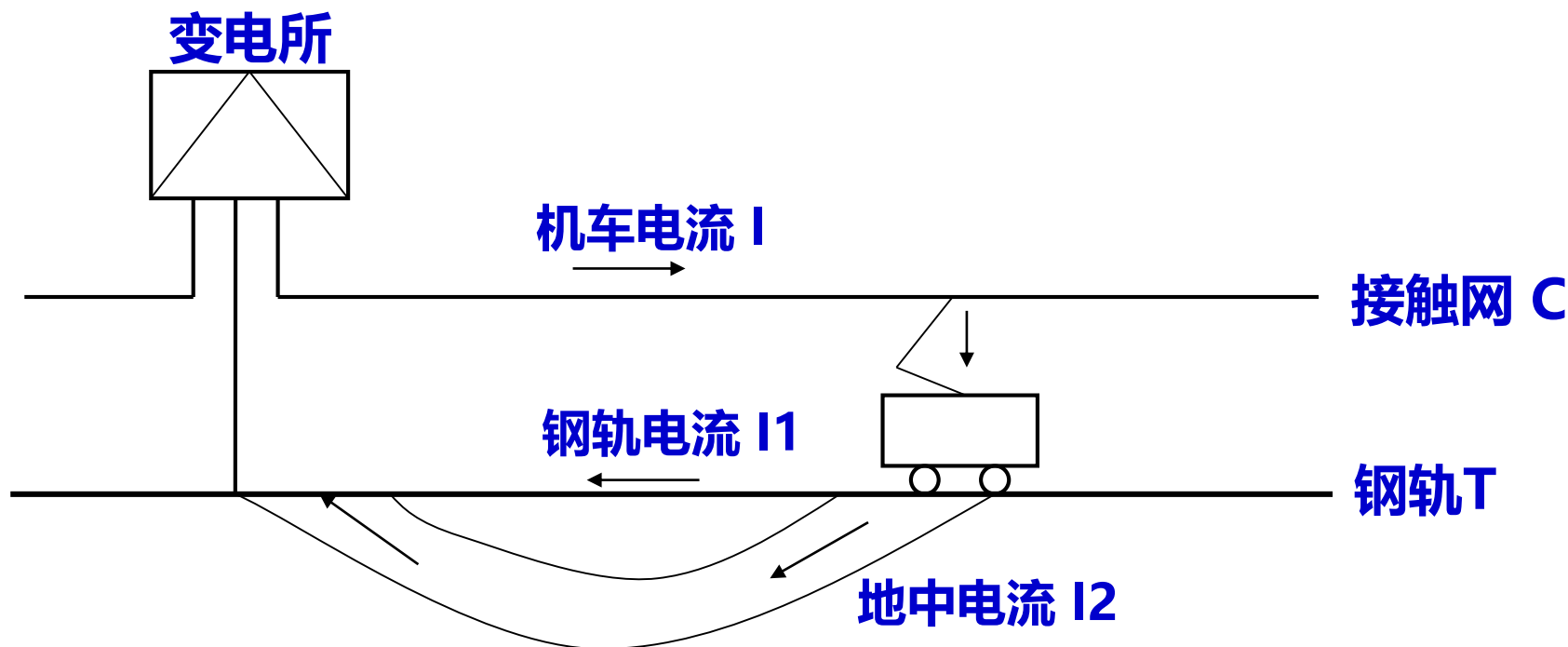


• 上、下行并联供电方式示意图

## -第11.4节- 牵引供电系统供电方式

### ◆ 按牵引网设备类型分类——直接供电方式

特点：投资小，钢轨电位高，对通信线感应干扰大。法国、英国、前苏联广泛使用。



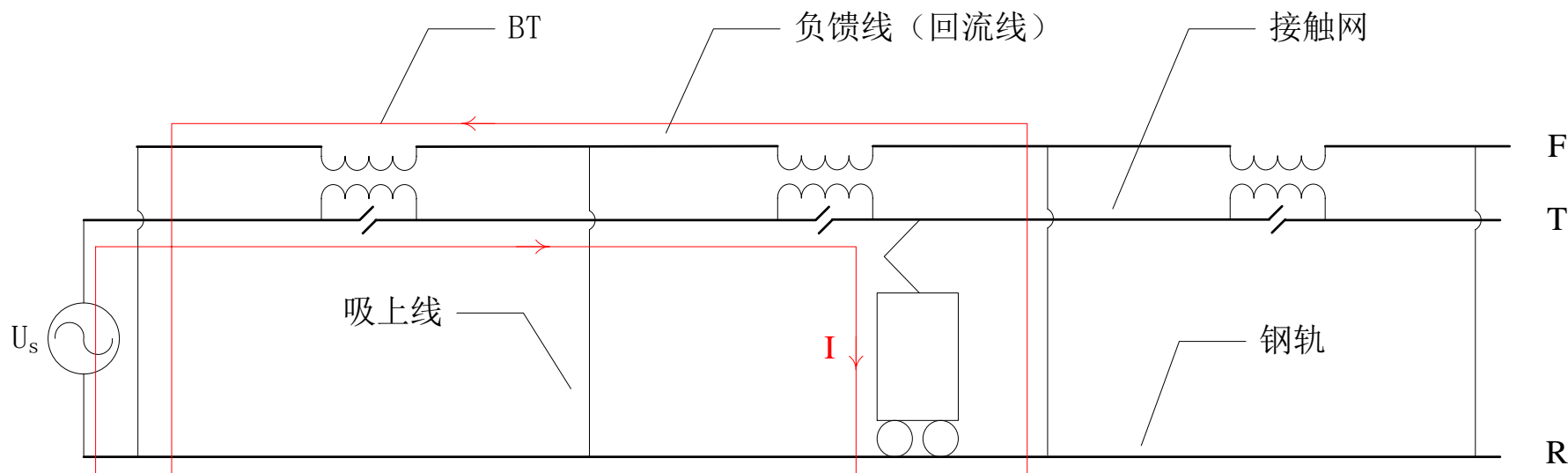
• 直接供电方式示意图



## -第11.4节- 牵引供电系统供电方式

### ◆ 按牵引网设备类型分类——BT供电方式

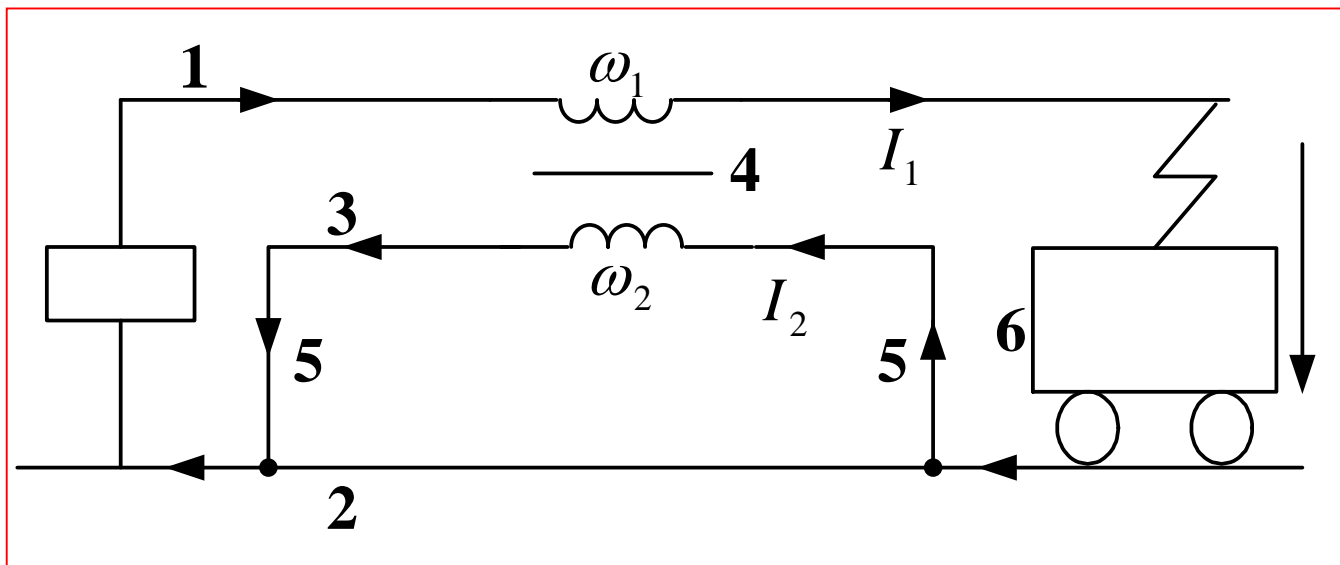
在牵引网中，每相距1.5km~4km间隔，设置一台变比为1:1的吸流变压器。吸流变压器设在分段中央，其原边串入接触网，副边串入沿铁路架设的回流线。回流线通常就悬挂在铁路沿线的接触网支柱外侧的横担上。



• BT供电方式示意图

## -第11.4节- 牵引供电系统供电方式

### ◆ 按牵引网设备类型分类——BT供电方式



1——接触网；2——轨道；3——回流线；4——变比1:1的吸流变压器；5——吸上线；6——电力机车。

## -第11.4节- 牵引供电系统供电方式

### ◆ 按牵引网设备类型分类——BT供电方式

这种装置的**防护作用**在于：把本来是尺寸很大的接触网——轨道大地回路改变成尺寸相对很小的接触网——回流线回路。

当牵引电流流经吸流变压器原边时，副边在回流线中产生很大的互感电势。吸流变压器的作用也就是在接触网和回流线之间集中地**加大互感**。即：设吸流变压器原边电流为 $I_1$ ，匝数为 $\omega_1$ ；副边电流 $I_2$ ，匝数为 $\omega_2$ 。根据磁势平衡关系：

$$I_2 \omega_2 \approx I_1 \omega_1$$

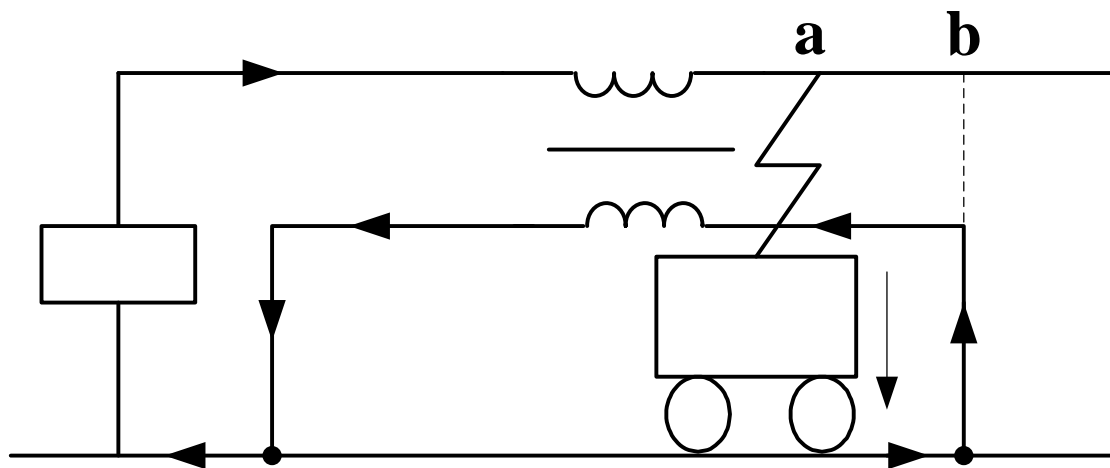
又因为变比为1:1，则 $\omega_1 = \omega_2$ ，所以  **$I_2 \approx I_1$** 。

**说明：**采用吸流变后，只有变压器原边的激磁电流仍流经轨道和大地，且电流数量很小。

如果不设吸流变，单凭接触网和回流线之间的分布互感，仅约**10~20%牵引电流经回流线流回**。

## -第11.4节- 牵引供电系统供电方式

### ◆ 按牵引网设备类型分类——BT供电方式

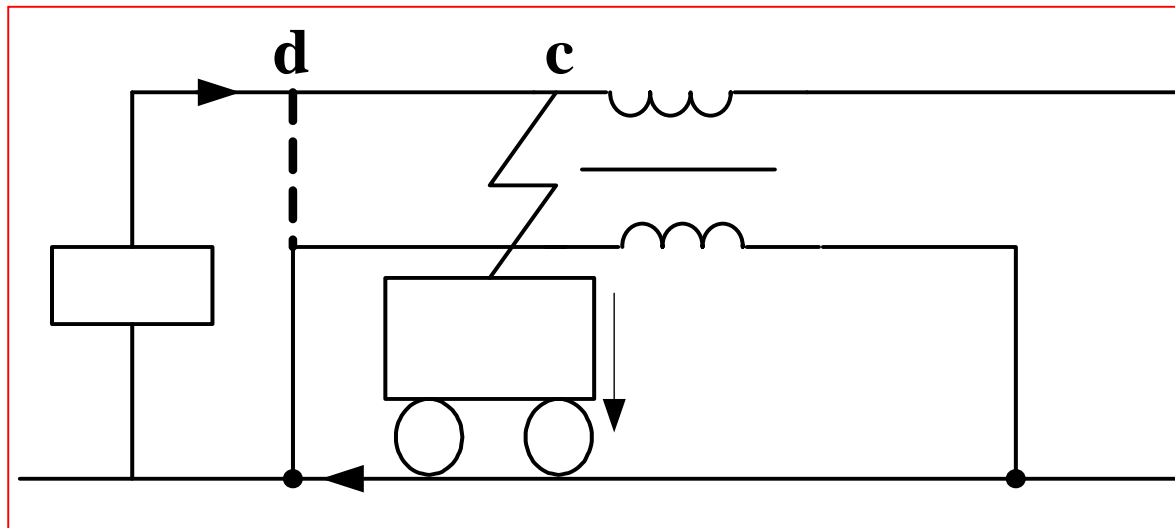


回流线和接触网中的电流基本上**大小相等、方向相反**。两者的交变磁场基本上可互相平衡(抵消)。显著地减弱了接触网和回流线周围空间的交变磁场，使牵引电流在邻近的通信线路中的电磁感应影响大大地减小。

**缺点：**1. 电力机车处于吸流变压器附近时防护效果差。机车电流经轨道与大地，然后经回流线流回，接触网在a、b段中没有电流，而回流线中有电流，则在ab段的长度内等于没有防护。

## -第11.4节- 牵引供电系统供电方式

### ◆ 按牵引网设备类型分类——BT供电方式



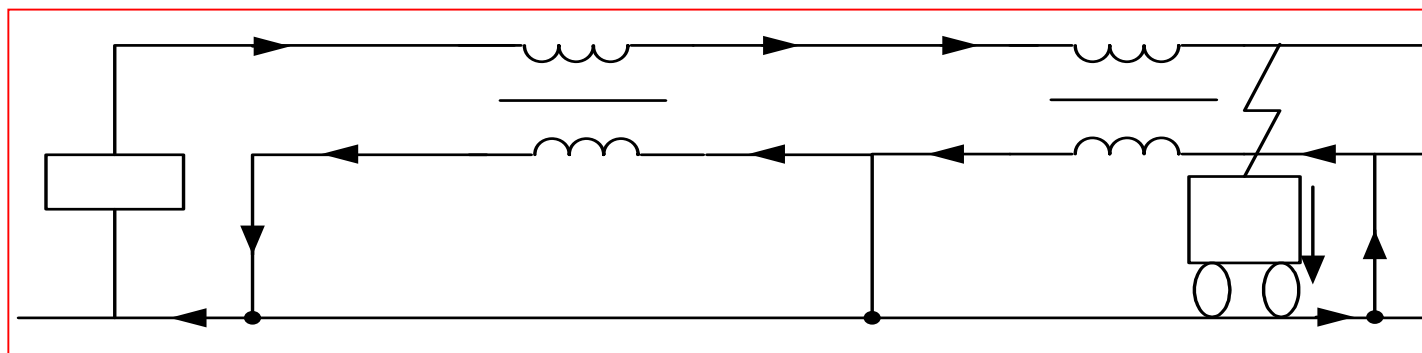
回流线cd 中无电流，在接触网cd 段的长度内等于没有防护。

两种情形都使吸流变压器—回流线在半段长度里失去效用，这种现象叫做**半段效应**，**失效区相当于分段长度之半**。

所以实际装置是在供电臂内设置长度不大的许多**吸上分段**，每个分段仅长2~4km，每个分段中央设置一台吸流变压器。分段以吸上线为界，吸上线一端接回流线，另一端焊入钢轨。

## -第11.4节- 牵引供电系统供电方式

### ◆ 按牵引网设备类型分类——BT供电方式



- 按照这种安排，**半段效应长度大大缩小**，且只有处在一个分段中的机车的电流而不是牵引网总电流在该分段产生半段效应影响。
- 使**牵引网阻抗显著增大**。接触网—回流线回路比通常牵引网阻抗要高。应用这种装置的牵引网，其阻抗等于接触网—回流线回路阻抗与吸流变压器短路阻抗之和。
- 由于牵引网阻抗增高，有时可能必要**缩短牵引变电所间的距离**，或**增设串联电容补偿**，来保证牵引网电压水平。

## -第11.4节- 牵引供电系统供电方式

### ◆ 按牵引网设备类型分类——BT供电方式

特点：变比为1：1的BT串入接触网，间隔为1.5~4 km，用以吸回地中电流，减少通信干扰。

优点：钢轨电位低，抑制通信干扰效果好。

缺点：增加牵引网结构的复杂性，提高造价。阻抗增大，使供电臂长度减小；存在BT分段(火花间隙)，不利于高速、重载等大电流运行。

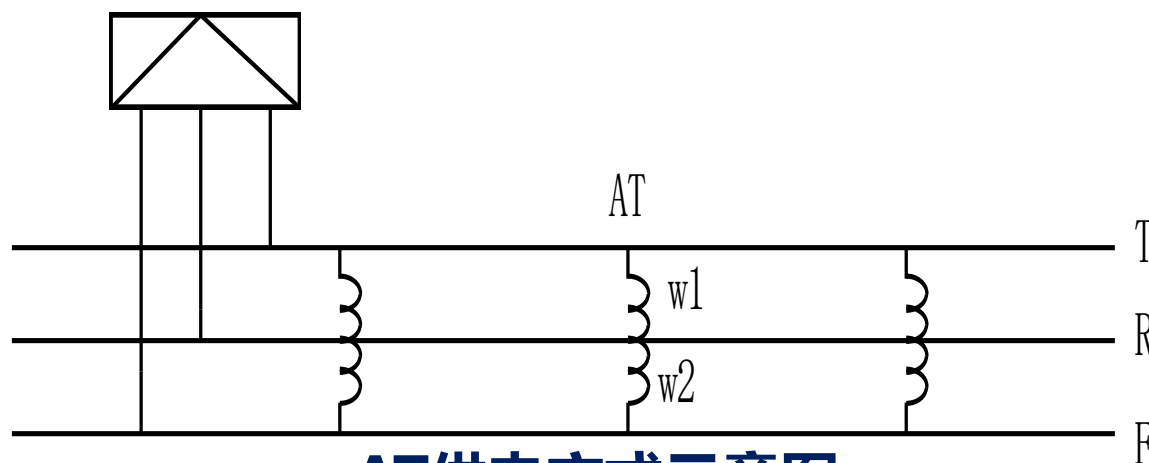


## -第11.4节- 牵引供电系统供电方式

### ◆ 按牵引网设备类型分类——AT供电方式

AT供电方式：由接触网T、正馈线F、轨道大地系统R以及每隔一定距离的自耦变压器(AT)构成。

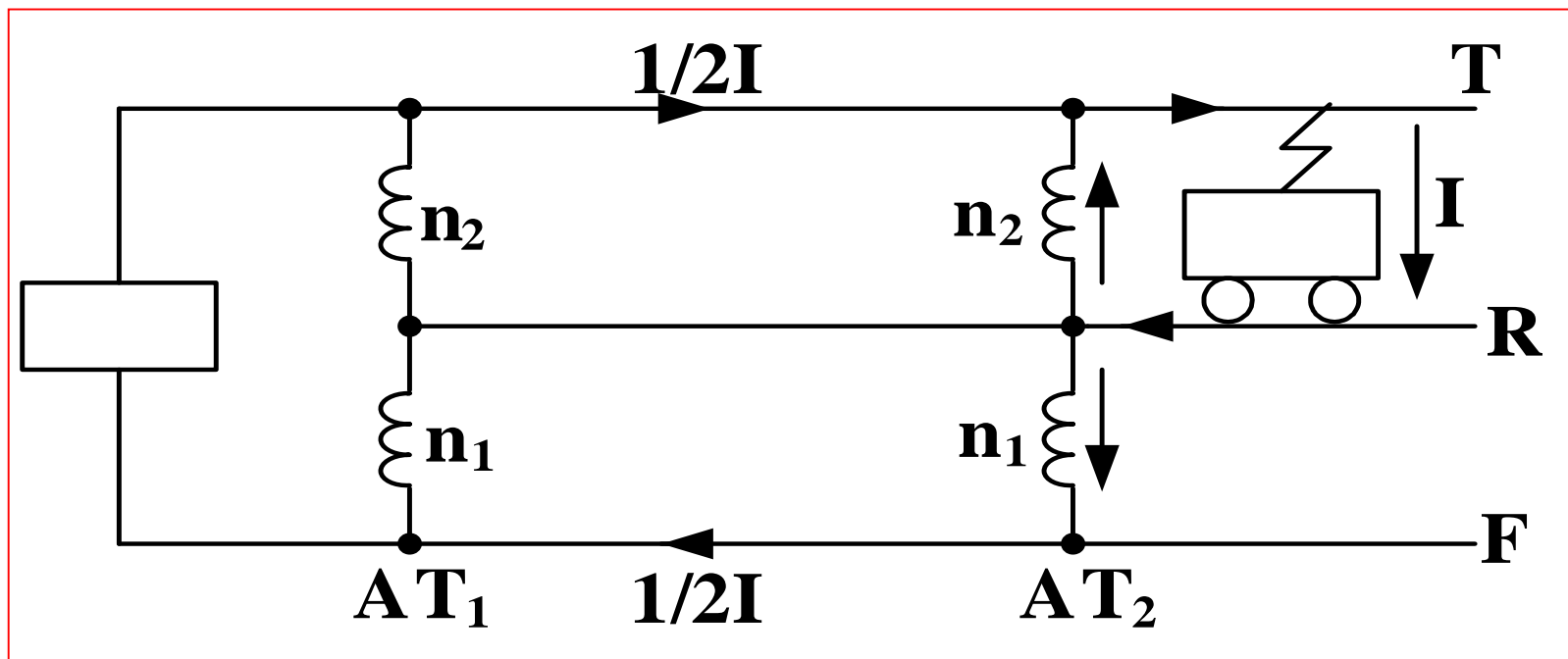
AT并联于接触导线与正馈线之间，AT中点与钢轨相连。



• AT供电方式示意图

## -第11.4节- 牵引供电系统供电方式

### ◆ 按牵引网设备类型分类——AT供电方式



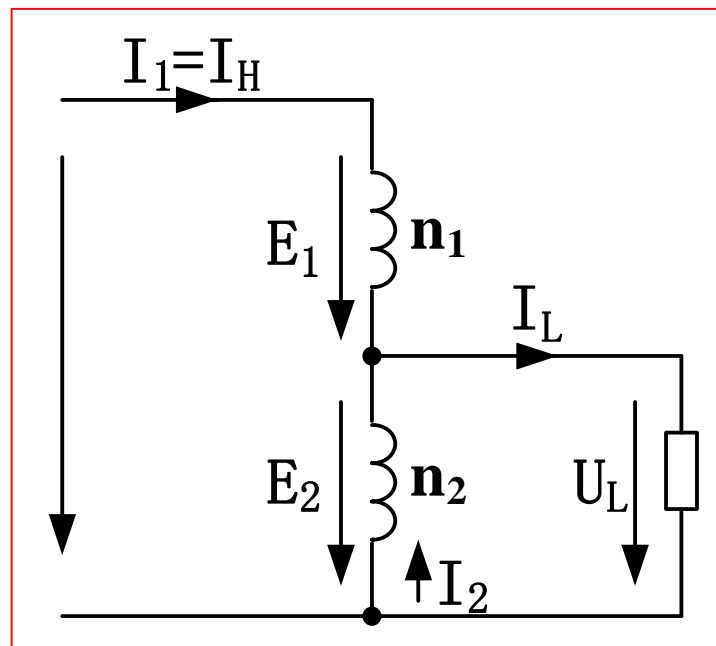
T—接触网；R—轨道；F—正馈线；AT—自耦变压器。

## -第11.4节- 牵引供电系统供电方式

### ◆ 按牵引网设备类型分类——AT供电方式

结构上：AT方式是用自耦变压器代替了吸流变压器，正馈线代替了回流线。自耦变压器是并入电路，这一改变，首先是消除了接触网中的吸流变压器分段。大部分回流流经正馈线，从而降低对邻近通信线的干扰。

自耦变压器的工作原理：一次和二次回路共用部分绕组( $n_2$ 部分)，而 $n_1$ 只有一次电流通过。



## -第11.4节- 牵引供电系统供电方式

### ◆ 按牵引网设备类型分类——AT供电方式

输入电压为输出电压的**2倍**，也就是说，通过自耦变压器可以输入较高的电压而得到机车所需的低电压。电流则相反，输入电流为输出电流的一半。从牵引变电所看，以两倍接触网电压沿线输送 $1/2I$ 。

送电电压加倍，送电电流减半，送电电路中的**电压损失将降低为 $1/4$** 。

利用AT这个特点，可增大变电所间的距离和增大传输功率，**减少牵引网损耗**。

**缺点：**必须在沿线安设电压较高、容量较大的自耦变压器，牵引网设备的投资相应增加。

## -第11.4节- 牵引供电系统供电方式

### ◆ 按牵引网设备类型分类——AT供电方式

日本铁路为防止通讯干扰，在实行交流电气化的前期，在牵引网中普遍应用了BT供电方式。

但当高速、大功率机车在这种电路中通过吸流变压器分段时，在受电弓上会产生强烈电弧，为了克服此缺点，后来发展了一种新的牵引网供电方式——自耦变压器供电方式。

特点：回流线为正馈线T，供电电压为 $2 \times 27.5\text{kV}$ ，间隔约10km加AT变压器。

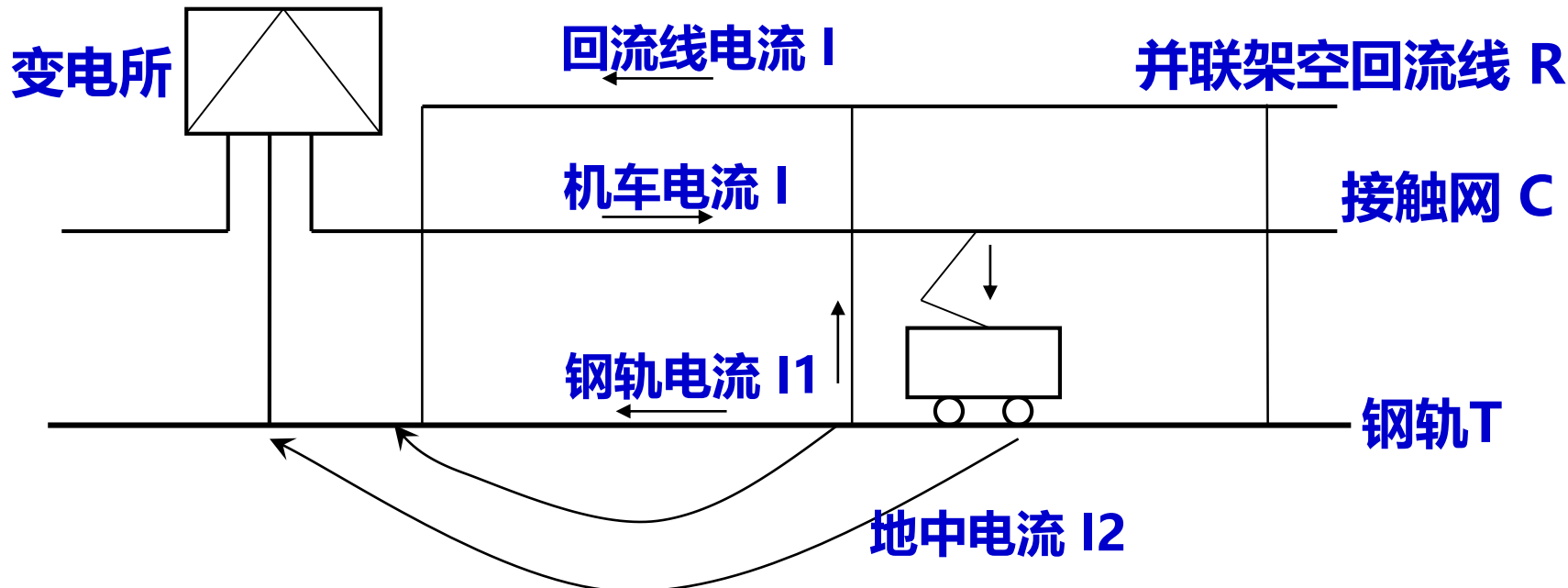
优点：供电电压成倍提高，牵引网阻抗小，供电远距离长，为直接供电的170~200%，网上电压损失和电能损失小。钢轨电位低，抑制通信干扰效果好。

缺点：投资大，电流分布复杂，保护算法难度大。

## -第11.4节- 牵引供电系统供电方式

### ◆ 按牵引网设备类型分类——带回流线的直接供电方式(DN供电方式)

**DN供电方式：**由接触网、钢轨、沿全线架设的负馈线NF(每隔几公里用P金属线和钢轨相连)组成。由于NF和钢轨并联连接，使得正常运行时钢轨中负荷电流的一部分分流到NF中去，因此，可以减少流入大地的电流，减轻对通讯的干扰危害，降低钢轨电位，减小馈电回路的阻抗。



• 带回流线的直接供电方式示意图

## -第11.4节- 牵引供电系统供电方式

### ◆ 按牵引网设备类型分类——带回流线的直接供电方式(DN供电方式)

由于AT方式设备复杂，一次投资高、运营费用高、维护困难，特别在多隧道区段应用更为困难。BT方式由于其半段效应、接触网分段及牵引网阻抗大等弱点，对高速和重载行车的适应能力差。因此，常采用直接供电加回流线(负馈线)。

DN方式与AT、BT相比，其馈电回路和设备简单、投资省、运营维护方便。为了能取得最好的防干扰效果，需研究回流线的空间。

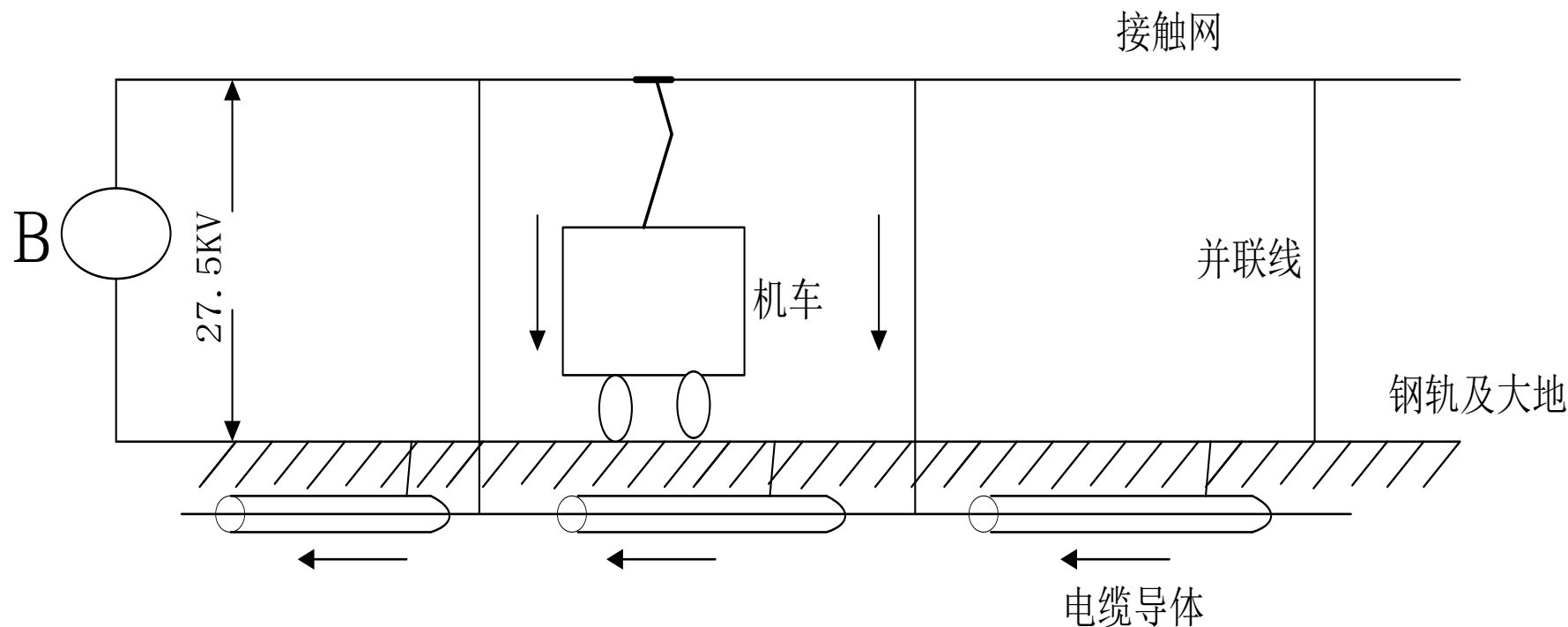
布置(与接触网的磁耦合关系)和设法降低回流线—地、钢轨—地回路的阻抗，以提高回流率。

回流率与各导线——地回路自阻抗以及各导线——地回路间的互阻抗有关，当回流率=1时，则接触网电流完全由回流网吸上，地中电流为零。



## -第11.4节- 牵引供电系统供电方式

### ◆ 按牵引网设备类型分类——同轴电力电缆供电方式



• 同轴电力电缆供电方式示意图



End  
谢谢

