



# 牵引变电所及其自动化

孙继星 副教授

牵引供电研究所

Email: [sanyou345@bjtu.edu.cn](mailto:sanyou345@bjtu.edu.cn)

办公室：电气楼808

办公电话：010-51685212-602



## ◆ 教材：

- 《轨道交通牵引供电技术》，贺威俊、高仕斌等，2015
- 《高速铁路牵引变电所技术》，中国铁路总公司，2014
- 《交流电气化铁道牵引供电系统》，谭秀炳，西南交通大学出版社，2007

◆ 考核形式和成绩评定：笔试占成绩 60%。上课出勤占成绩 40%(抽查点名缺课一次扣5分)。

◆ QQ学习交流群：614152328



## 一. 电流制与额定电压

现代电力牵引普遍从公用电网取电，使用经变换的单相电。目前我国，矿山电力牵引、城市电车和地下铁道或轻轨交通都采用直流制，电压从750V-6000V不等；电气化铁路都采用工频(50Hz)，额定电压为27.5kV或55kV( $2 \times 27.5\text{kV}$ )的单相交流制。

**(1) 直流制:** 主要用于城市轨道交通，额定电压有1500V和750V、3000V或6000V。

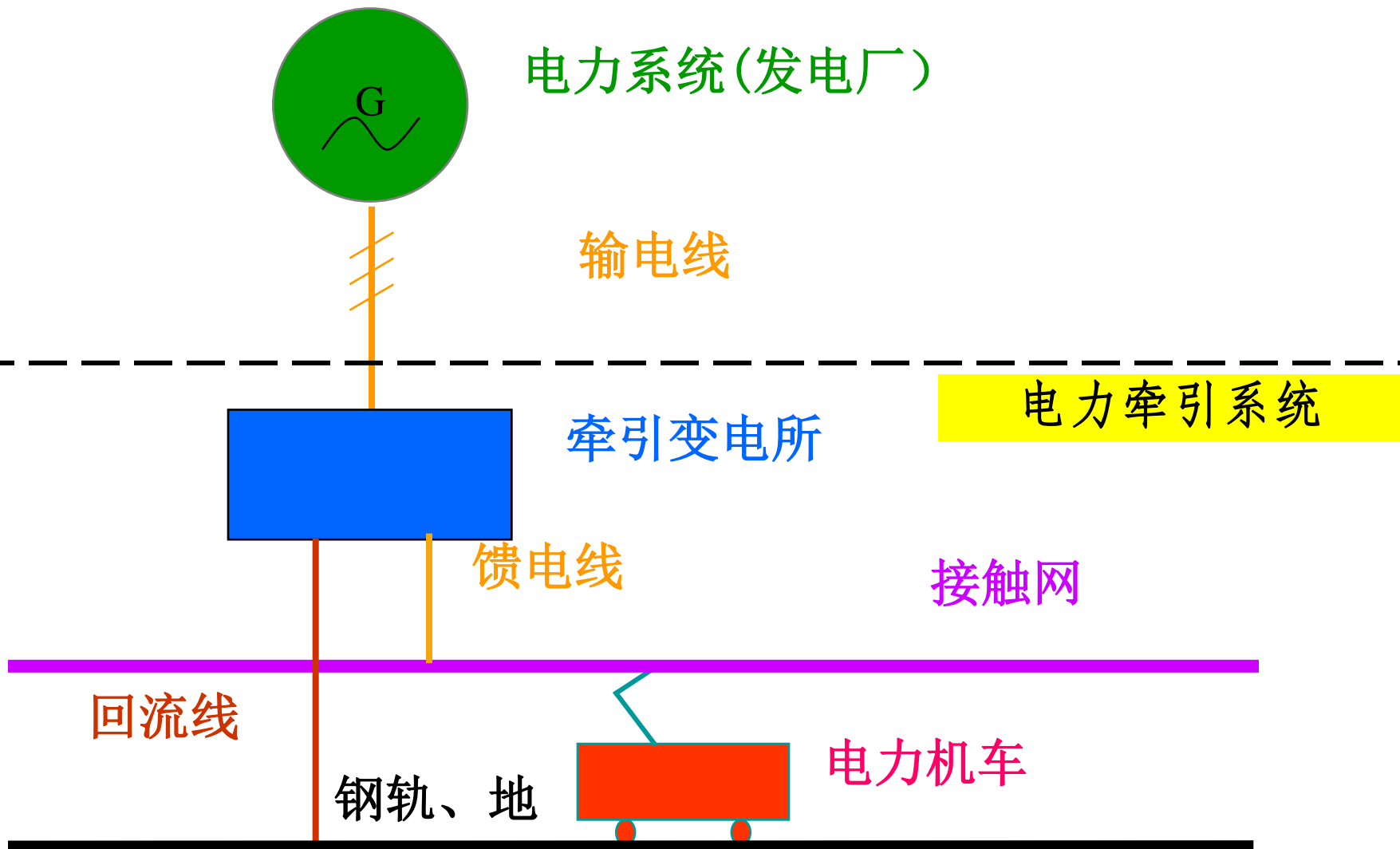
**(2) 交流制** { 低频单相交流制:( $16\frac{2}{3}$ , 25Hz)目前已不采用，额定电压15kV或11kV。  
工频单相交流制:主要用于大运量、重载的铁路运输，额定电压为25kV，广泛采用。



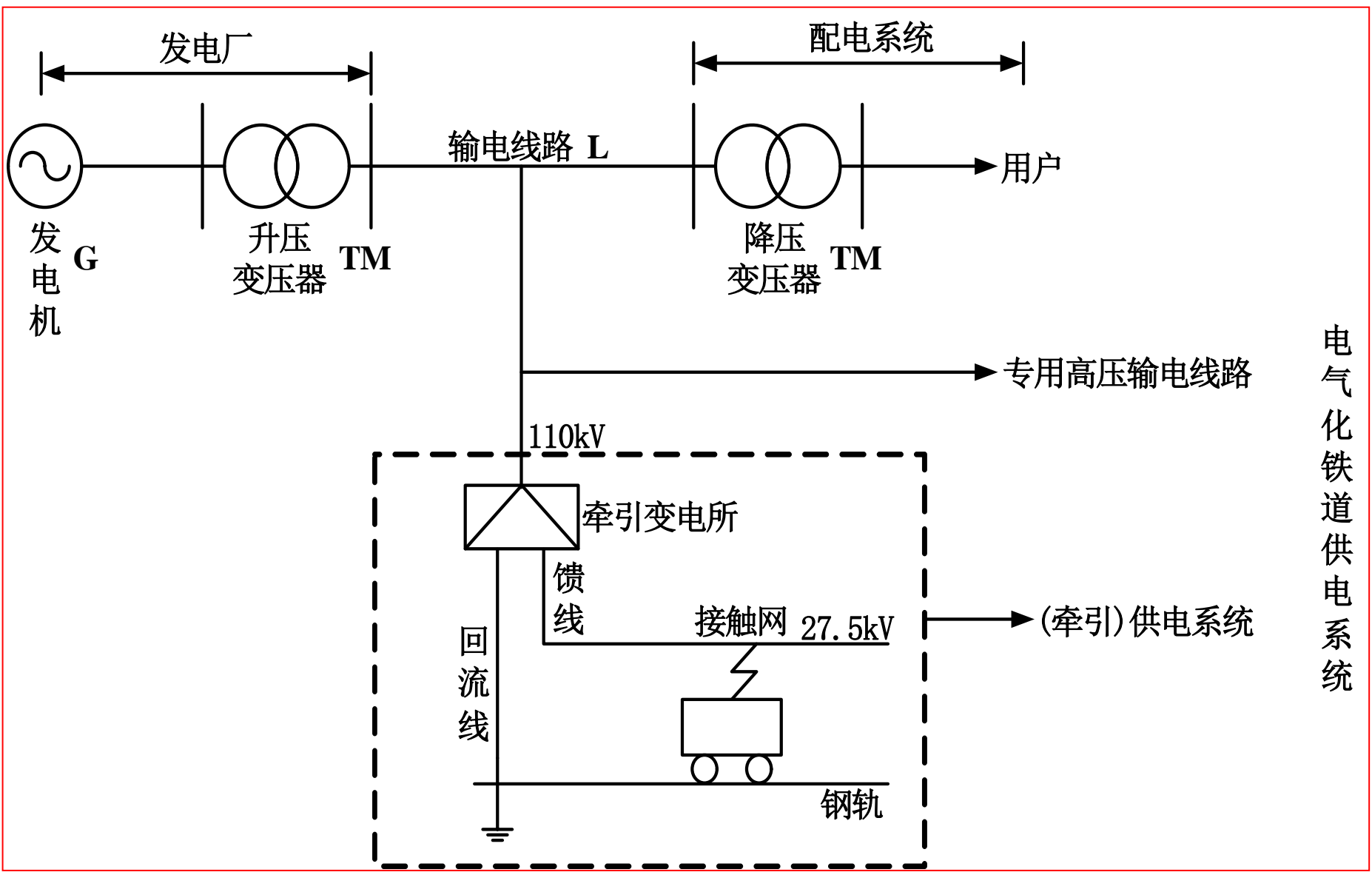
## 二. 牵引供电系统的组成及各部分的作用

电气化铁路供电系统(Traction Power Supply Systems)主要包括：牵引变电所、牵引网、专用高压供电线路(外部电源)。其中，**牵引变电所和牵引网构成牵引供电系统。**

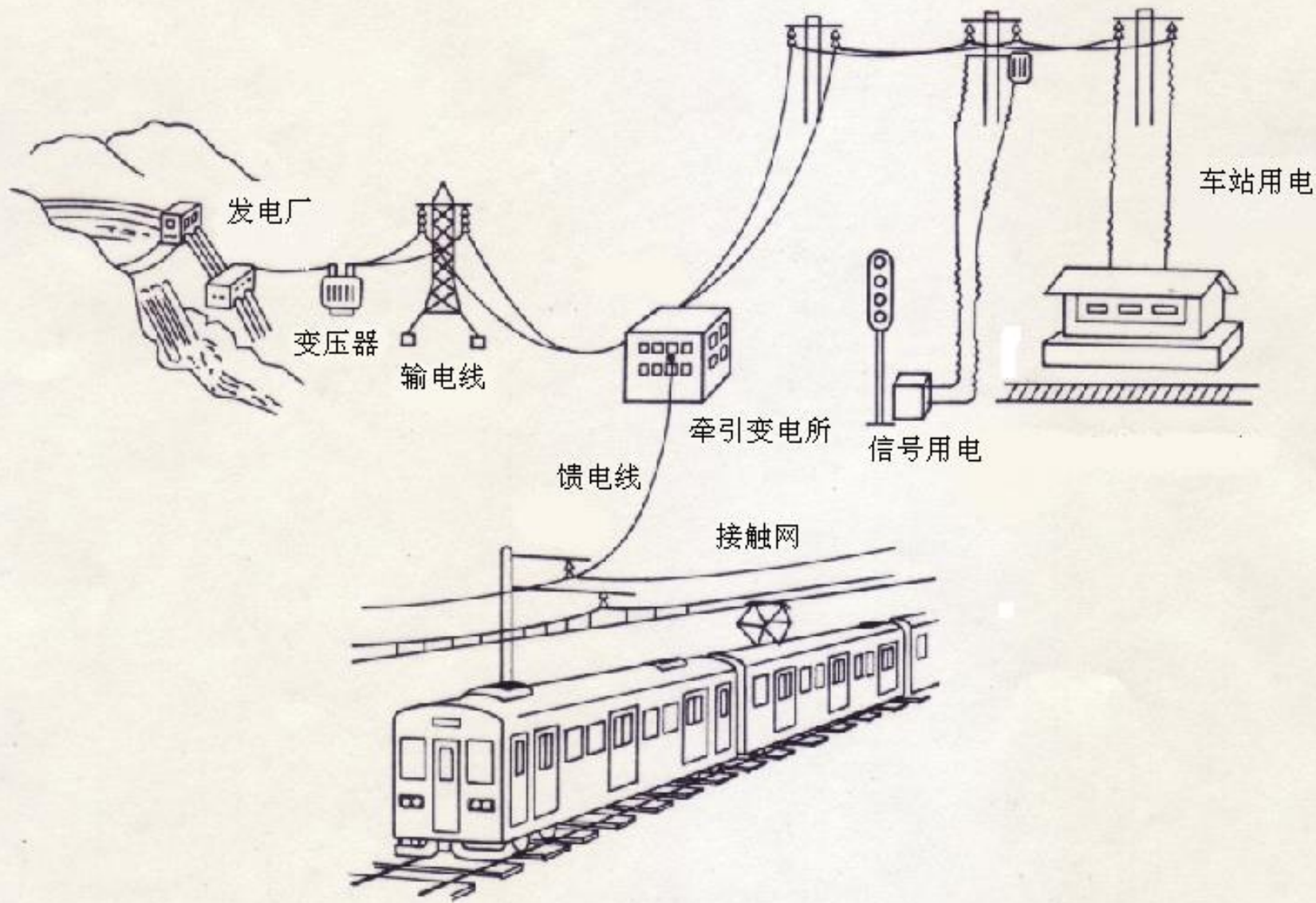
- (1) 牵引变电所:** 把电力系统供应的电能变换成适合电力机车牵引要求的电能；
- (2) 牵引网:** 通常将接触网、馈电线、钢轨回路(包括大地)和回流线称为牵引网。
  - (2) 馈电线:** 连接牵引变电所和接触网的导线。它将牵引变电所变换后的电能送到接触网。
  - (3) 接触网:** 是一种悬挂在轨道上方，沿轨道敷设的、和铁路轨道保持一定距离的输电网。通过电动车组受电弓和接触网的滑动接触，牵引电能就由接触网进入电动车组，从而驱动牵引电动机使列车运行。
  - (4) 轨道:** 在非电牵引情形下只作为列车的导轨。在电力牵引时，轨道除仍具有导轨功能外，还需要完成导通回流的任务。因此，电力牵引的轨道，需要具有良好的导电性能。
  - (5) 回流线:** 是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。

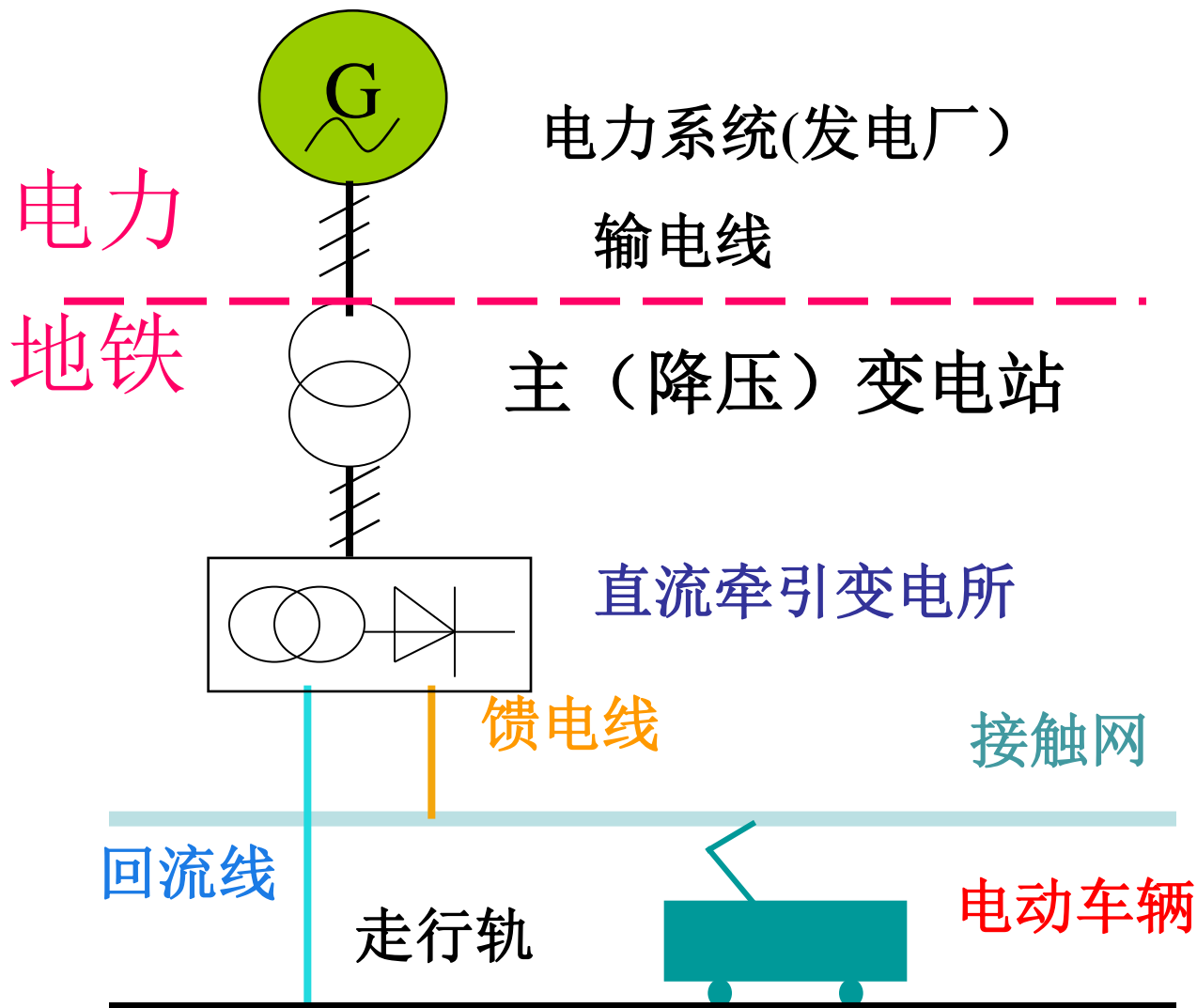


交流电力牵引系统组成原理图

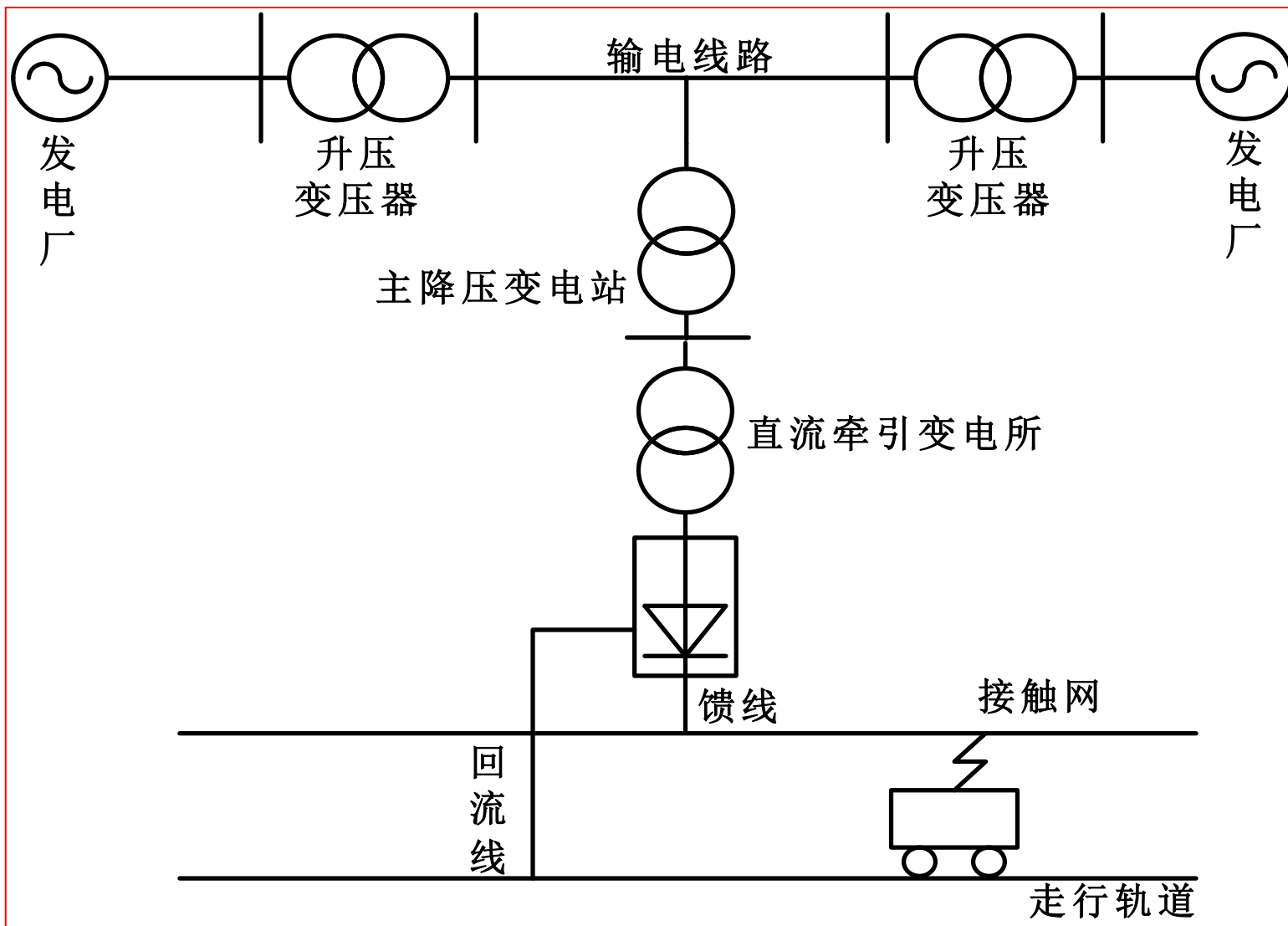


电气化铁道供电系统





直流电力牵引系统(地铁)组成原理图



**直流电力牵引系统(地铁)组成原理图**



## 牵引供电系统的其他设施

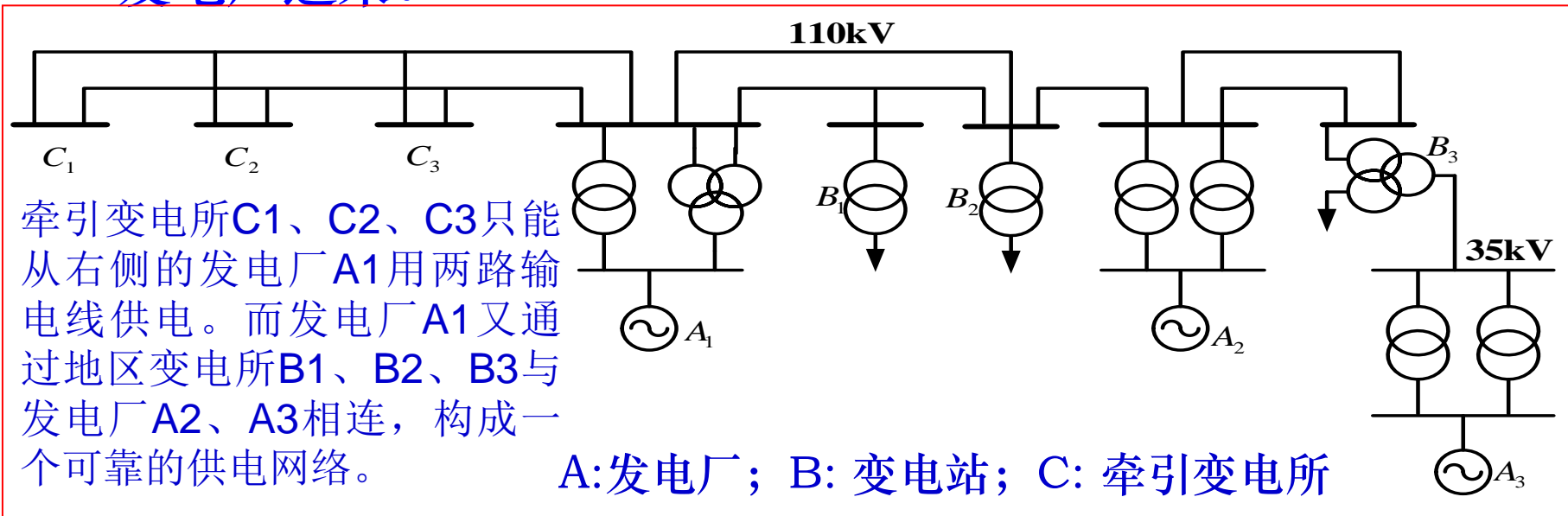
- (1) 分区所(Sectioning Post, SP):** 设于两变电所之间，把电气化铁道牵引网分成不同供电区段，装有开关设备，根据运行需要可以连接同一供电臂的上、下行接触网，或连接相邻供电臂以实现越区供电。
- (2) 开闭所(Sub-feeder Switching Post, SFSP):** 实际上是开关站，多设于铁路枢纽，一般两路进线、多路馈线，用以实现对站场各股道群的分别供电控制。进线和馈线都经过断路器，可灵活地对各分区接触网停、供电；在断路器上可实现短路故障保护，从而缩小事故停电范围；对AT牵引网，往往同ATP合建，增强对供电臂供电的灵活性。
- (3) 自耦变压器(AT)所(AT Post, ATP):** AT供电系统，除变电所、分区所和开闭所外，在牵引网上放置自耦变压器的场所。



### 三. 电网向牵引变电所一次侧的供电方式

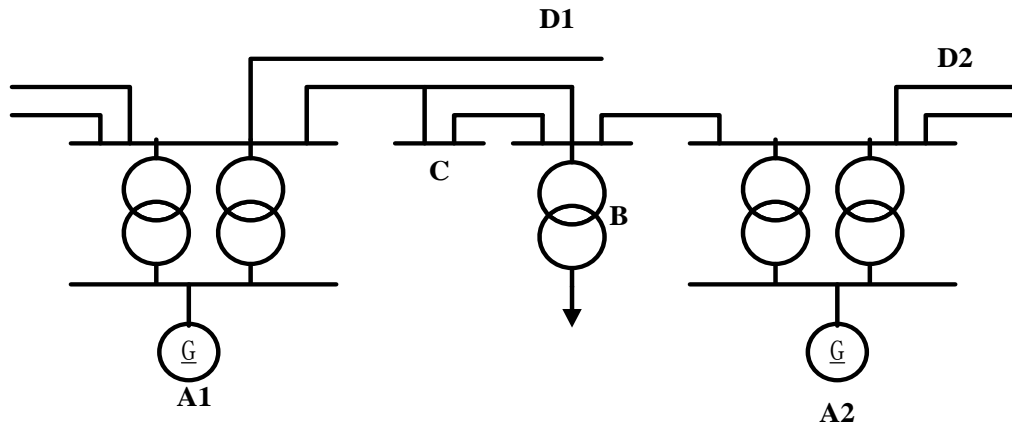
电气化铁道属一级负荷，根据《TB-10009-2005 铁路电力牵引供电设计规范》规定：“牵引变电所应有两路电源供电，当任一路故障时，另一路仍应正常工作”。其中两路电源可引自不同的地区变电站或同一地区变电站的不同母线。

**1. 单侧供电：**牵引变电所的电能不能由电力系统的一个方向的发电厂送来。



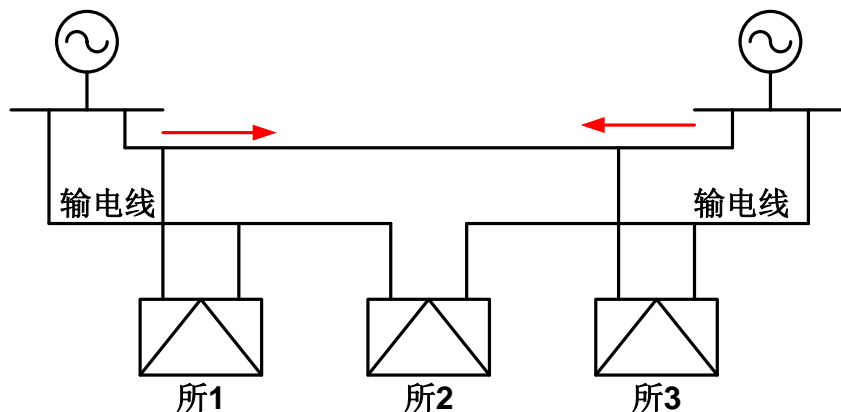


## 2. 两侧供电：牵引变电所的电能由电力系统中两个方向的发电厂送来。



## 3. 环形供电：若干个发电厂、地方变电所通过高压输电线连接成环形的电力系统，牵引变电所处于环形电力系统的一段环路之中。

电源来自电力系统的两个地区变电所，给铁路供电的输电线是联络这两个地区变电所的通路。采用双路输电线。





## 四. 牵引变电所向牵引网的供电方式

牵引网的供电方式是由牵引网所完成的特殊输电功能的技术要求和经济性能所决定的，基本上可以按分区所运行状态和牵引网设备类型进行分类。按分区所的运行状态，通常分单边供电、双边供电两种方式。按牵引网设备类型可分为直接供电方式、BT(Booster-Transformer, 吸流变压器)供电方式、AT(Auto-Transformer, 自藕变压器)供电方式和CC(coaxial cable, 同轴电缆)供电方式等。

牵引变电所是沿着电气化铁道区段分布的，每一个牵引变电所有一定的供电范围。在相邻两个牵引变电所之间的接触网，为了使其安全、可靠的供电，通常在其中央处断开，即分成互相绝缘的两个部分。每一部分称为供电分区，一个供电分区的长度对应于线路的区间数，一般在1~5个区间范围内。

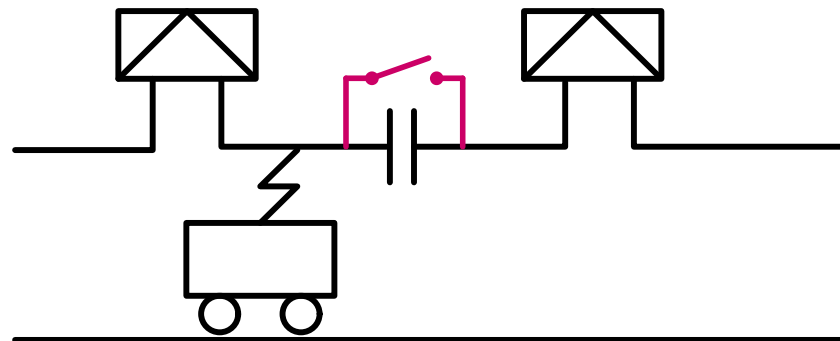
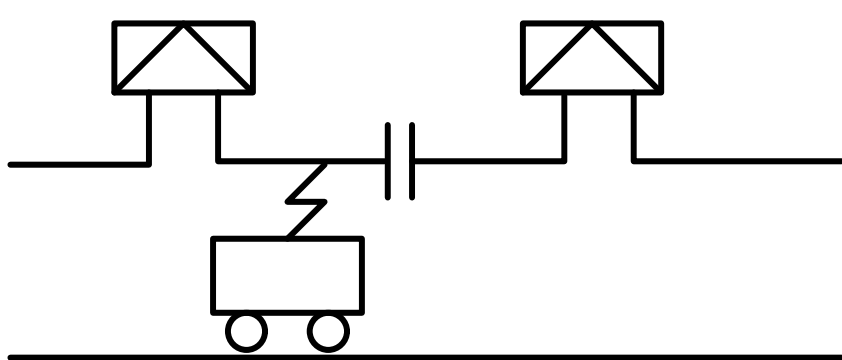


## 2. 按分区所运行状态分类

### (1) 单边供电

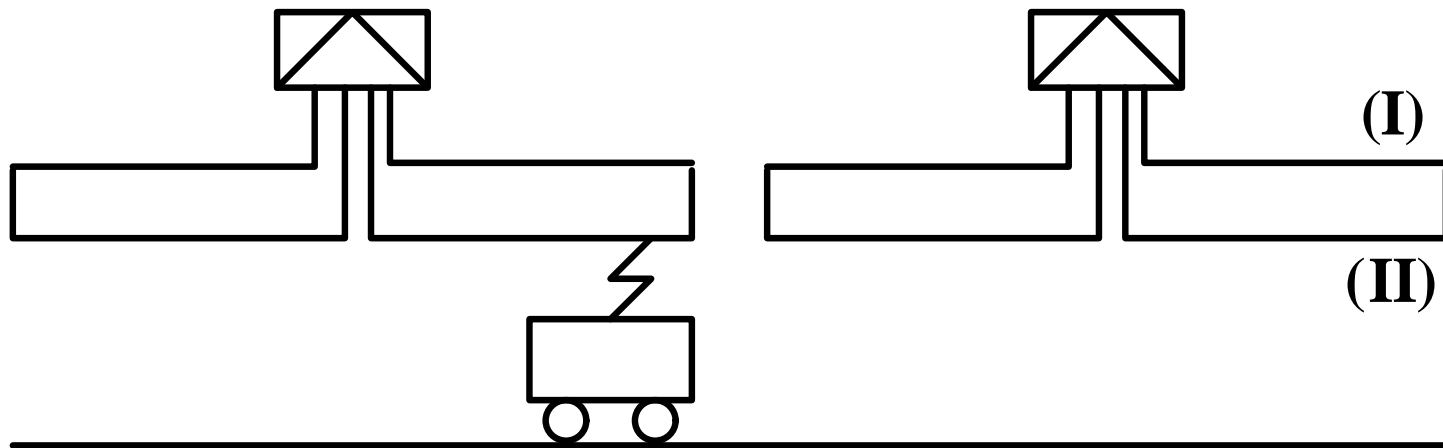
接触网供电分区由牵引变电所从一边供应电能，此时的供电分区通常称为供电臂(**feeding section**)。相邻两牵引变电所之间的供电臂相互绝缘，电力机车只从一个牵引变电所取用电力。为了在必要时实行越区供电(**Over-zone feeding**)，在接触网分界点设有隔离开关。

### 单线区段的单边供电





## 双线区段的单边供电



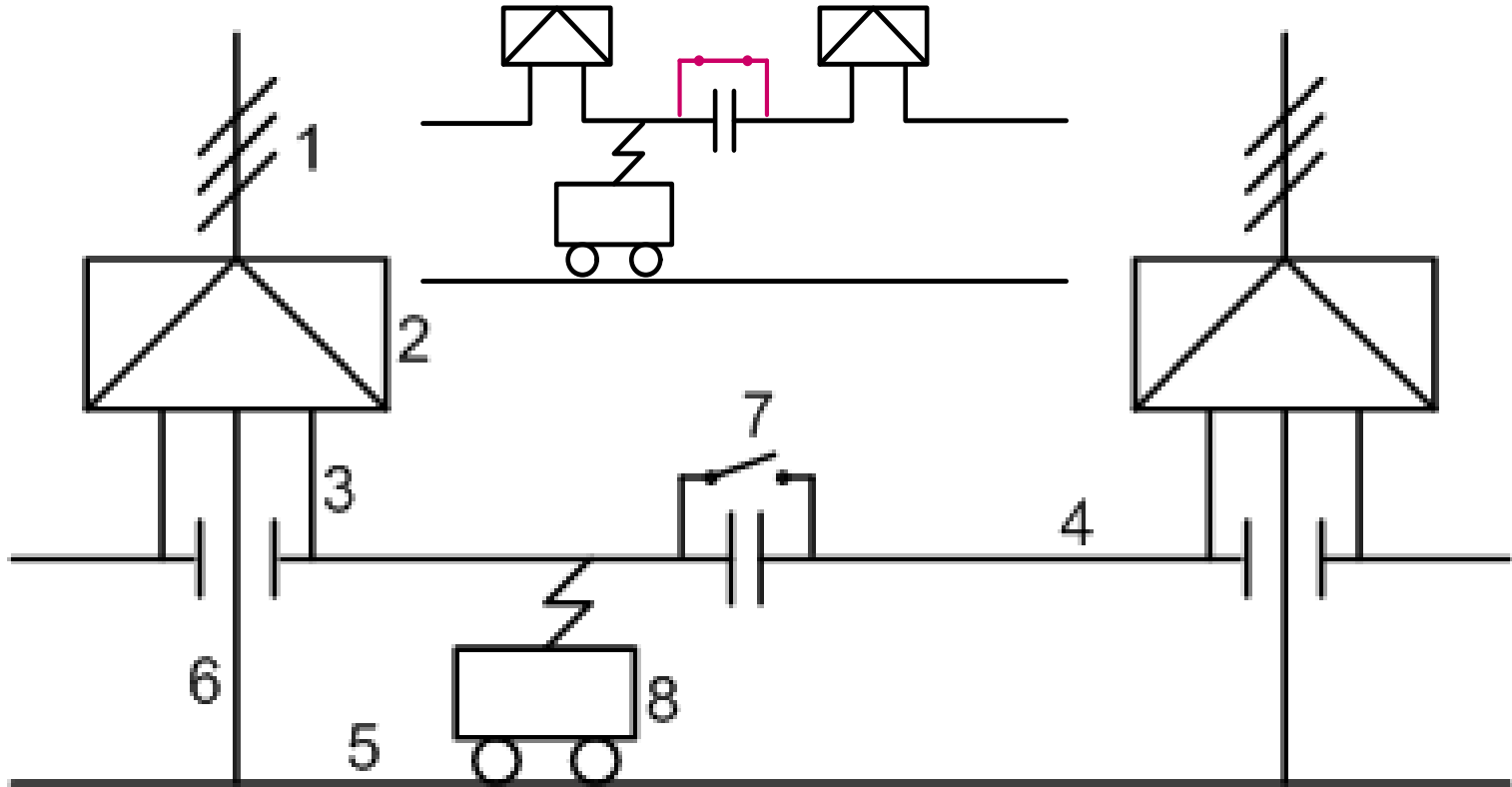
双线区段的供电方式 目前都采用同相的单边供电。分为单边分开供电和单边并联供电。

(I)、(II)分别表示为上行接触网和下行接触网。在同一供电分区内，上行和下行的接触网在分区末端联接起来，由同一相供电。



## (2) 双边供电

在相邻两牵引变电所之间的供电臂分界点，必须设置分区所，实现两边供电。此时电力机车从相邻两牵引变电所取用电力。





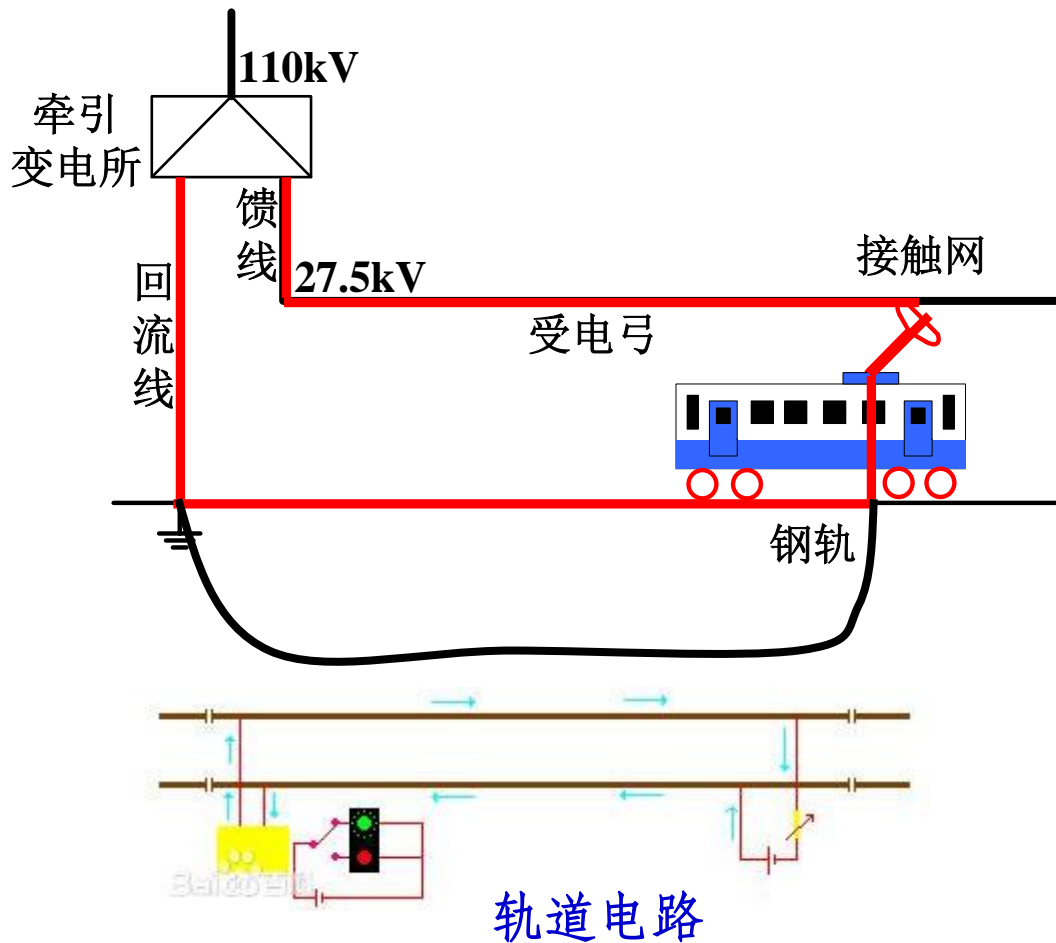
## 2. 按牵引网设备类型分类

### (1) 直接供电方式 (DF) Direct feeding

对通信干扰不加特殊防护措施，最早大都采用这种供电方式。最简单、投资最省，牵引网阻抗较小，能损也较低。

电流经钢轨流回牵引变电所，而钢轨与地并不是完全绝缘的，一部分回流由钢轨流入大地，这部分电流会对通信线路产生感应影响。

因此这种供电方式一般用在铁路沿线无架空通信线路或通信线路已改用地下屏蔽电缆的区段。





## 直接供电方式对通信线路的影响

### 静电感应影响

牵引网是一个单相高压交流电网，接触网带电时，在其周围空间将产生一个工频高压电场，从而使通信线上的各点产生相应的静电感应电压。同接触网电压性质一样，静电感应电压也是一个工频交流电压。

### 电磁感应影响

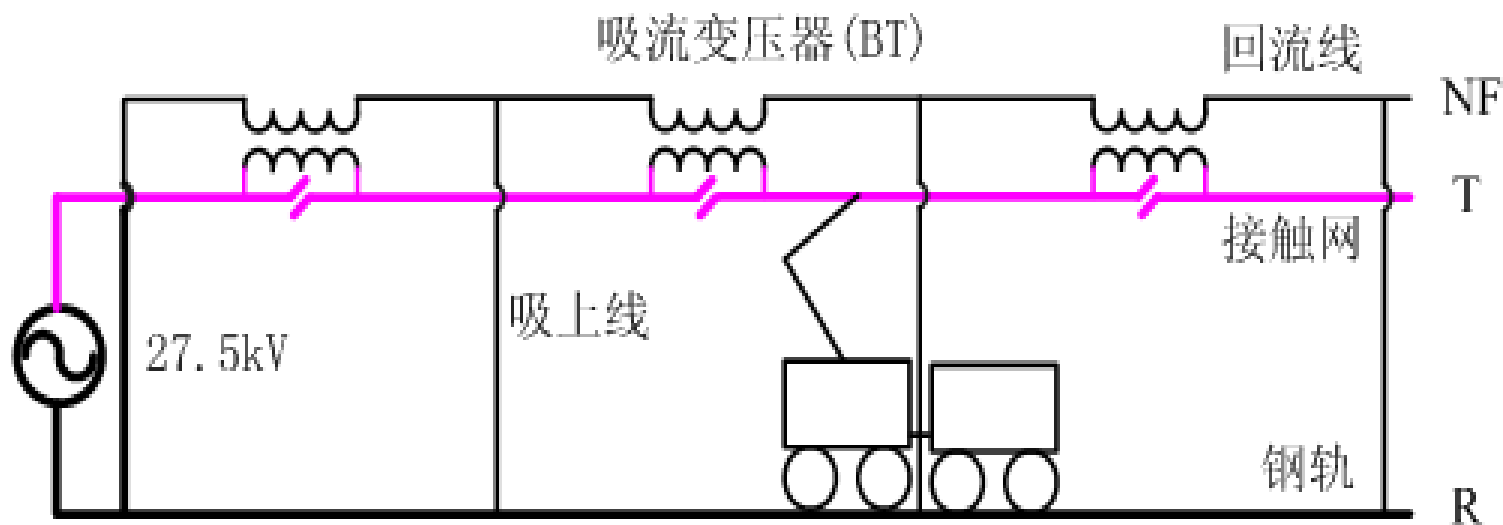
牵引网由接触网、钢轨网构成，由于钢轨-地之间存在过渡电阻，一部分负荷电流经大地返回变电所，因此，牵引网是一个不平衡的单相回路，接触网和钢轨网电流所产生的感应电势在通信上不能抵消，所以在通信线上将产生电磁感应电势。

### 传导电流影响

由于一部分牵引电流经大地返回牵引变电所，使大地在不同地点出现不同的电位。如果在铁路附近有以地为回路的单导线通信电路，则将由于通信线路两个接地点之间的电位差而出现干扰电流。



## (2) 吸流变压器供电方式 (BT方式)



- ◆ 防干扰效果好;
- ◆ 牵引网阻抗偏大;
- ◆ 电力机车过BT时, 易产生电弧;
- ◆ 由于是串联系统, 可靠性较低。



在牵引供电系统中加装吸流变压器-回流线装置的供电方式，称为吸流变压器供电方式，简称BT（Booster Transformer）供电方式。

它是在牵引网中，每相距1.5-4km，设一台变比为1: 1的吸流变压器，吸流变压器采用变比为1: 1的特殊变压器，原边串接在接触网上，次边串接在回流线中。间隔约1.5-4km 设置一台吸流变压器，在两个吸流变压器中间，把轨道和回流线连接起来，这个连接成为吸上线。它是机车电流返回回流线的通路。回流线中流回的电流与接触网内流过的牵引电流大小基本相等，方向相反，它们形成的电磁场相互抵消，这样就显著的消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的减小。但BT方式牵引网结构复杂，造价较高，由于吸流变压器串入接触网，使得牵引网阻抗变大，供电臂长度将减小；因存在BT分段（火花间隙），不利于高速、重载等大电流运行。

牵引网阻抗大，变电所间距小，电分相数量多，不适合高速电力牵引。

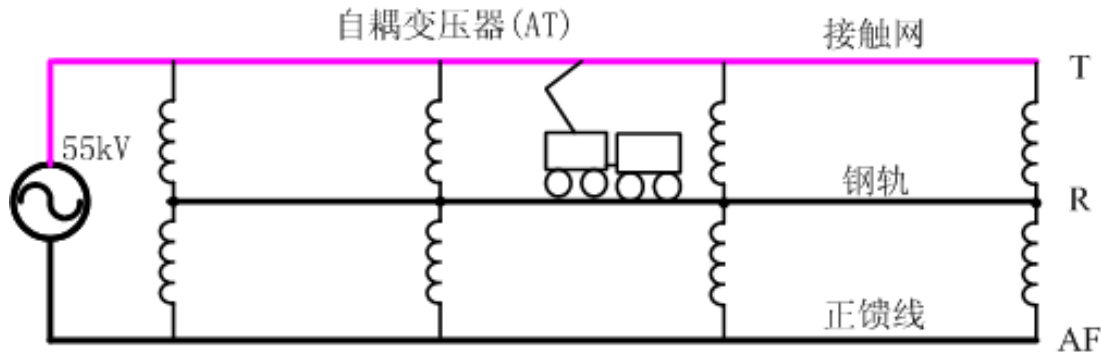
1.使牵引网阻抗显著增大，增加约50%-60%。接触网—回流线回路比通常牵引网阻抗要高。应用这种装置的牵引网，其阻抗等于接触网—回流线回路阻抗与吸流变压器短路阻抗之和。由于牵引网阻抗增高，使供电臂的电压损失相应增加，在重载和高速运行的情况下尤为严重，有时可能需要缩短牵引变电所间的距离，或增设串联电容补偿，来保证牵引网电压水平。

2.由于BT的串入，使供电臂上每隔一个BT间距就出现一个电分段，这些电分段不论在电气上还是在机械上都是薄弱环节。所以BT制式不适合和重载和高速铁路。





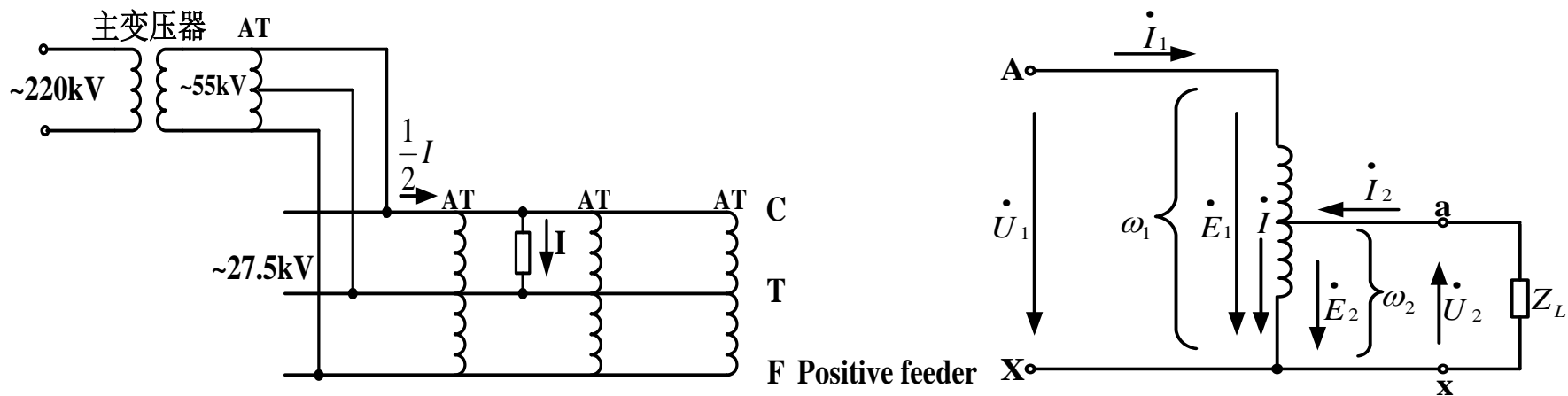
## (4) 自耦变压器供电方式 (AT方式)



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，AT间隔为10km左右。

- ◆ 防干扰效果与BT方式相当
- ◆ 牵引网阻抗小，输送容量大，供电臂长（可达50km）
- ◆ 结构复杂，投资大，维护费用高
- ◆ 适于高速重载场合

AT供电方式又称为自耦变压器供电方式，是每隔10km左右在接触网与正馈线之间并联接入一台自耦变压器，其中性点与钢轨相连。电力机车由接触网受电后，牵引电流一般由钢轨流回，由于自耦变压器的作用，经钢轨流回的电流经自耦变压器绕组和正馈线流回变电所，因电流在接触网和正馈线中的方向相反，因而对邻近的通信线路干扰很小。



原边和副边共用一部分绕组的变压器称为自耦变压器。可设想为从一台普通双绕组变压器演变而来。

- 1.电压、电流关系：其原次边的电压、电流关系与双绕组变压器一样。
- 2.容量关系：对于双绕组变压器，原绕组容量就是变压器的输入容量，副绕组容量就是变压器输出容量，都等于变压器的容量。对于自耦变压器，变压器容量与绕组容量不相等。



自耦变压器容量为:

$$S = U_1 I_1 = U_2 I_2$$

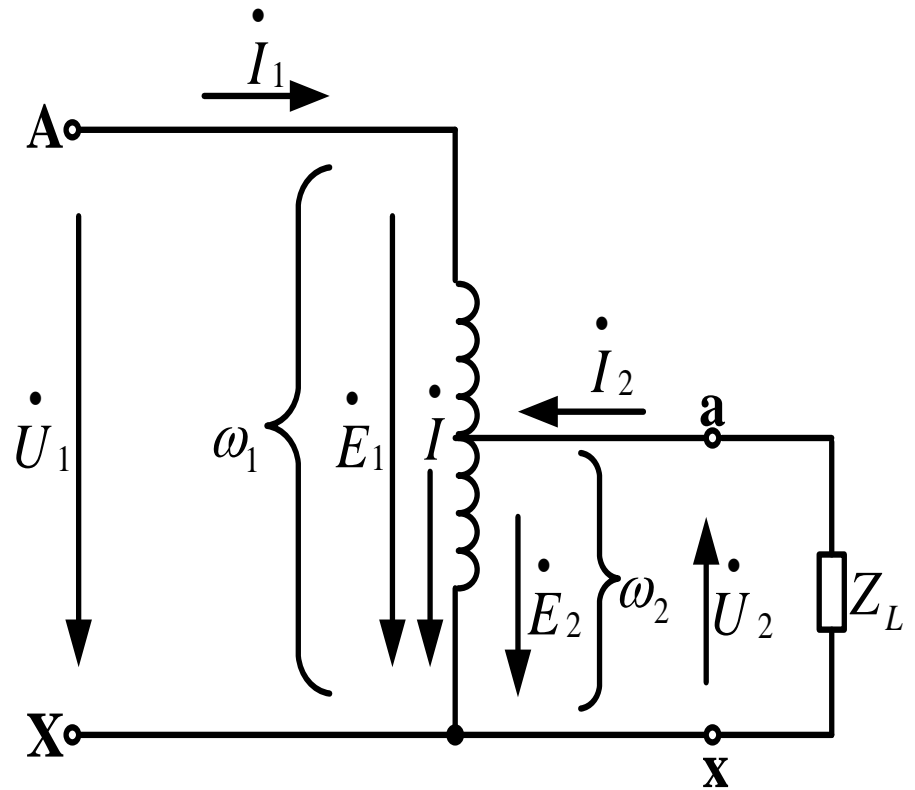
串联绕组 **Aa** 的绕组容量为:

$$S_{Aa} = U_{Aa} I_1 = (U_1 - U_2) I_1$$

$$= U_1 I_1 - \frac{U_1}{k_a} I_1 = S \left( 1 - \frac{1}{k_a} \right)$$

公共绕组 **ax** 的绕组容量为:

$$S_{ax} = U_{ax} I = U_2 I_2 \left( 1 - \frac{1}{k_a} \right) = S \left( 1 - \frac{1}{k_a} \right)$$





取 $k_a=2$ ，则

$$\frac{U_1}{U_2} = 2, \frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{2}$$

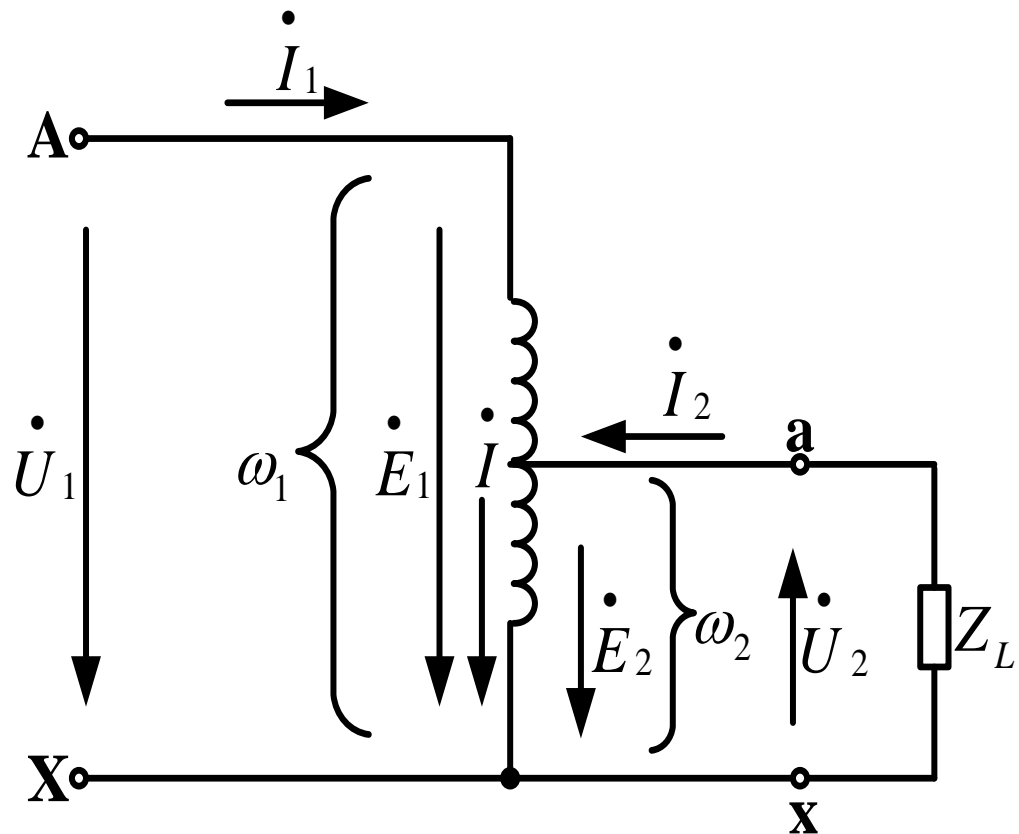
对于牵引供电系统，  
电压为**27.5kV**，即

$$U_2 = 27.5kV$$

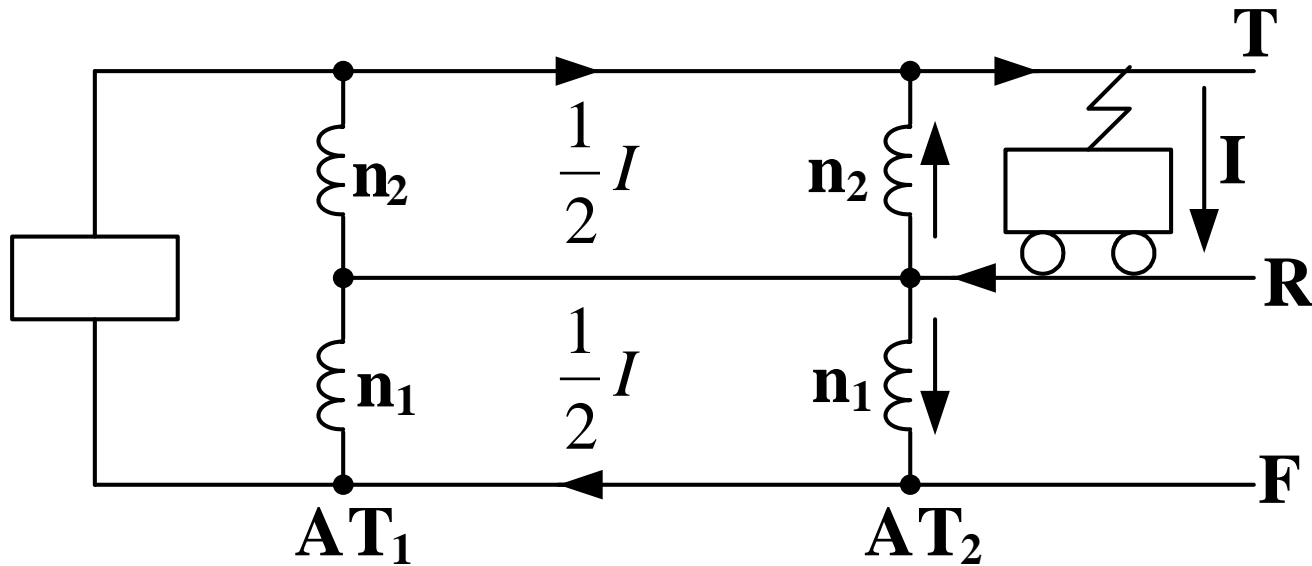
$$\therefore U_1 = k_a U_2 = 55kV$$

设机车电流为 **$I$** ，即

$$I_2 = I, \therefore I_1 = \frac{1}{k_a} I_2 = \frac{1}{2} I$$





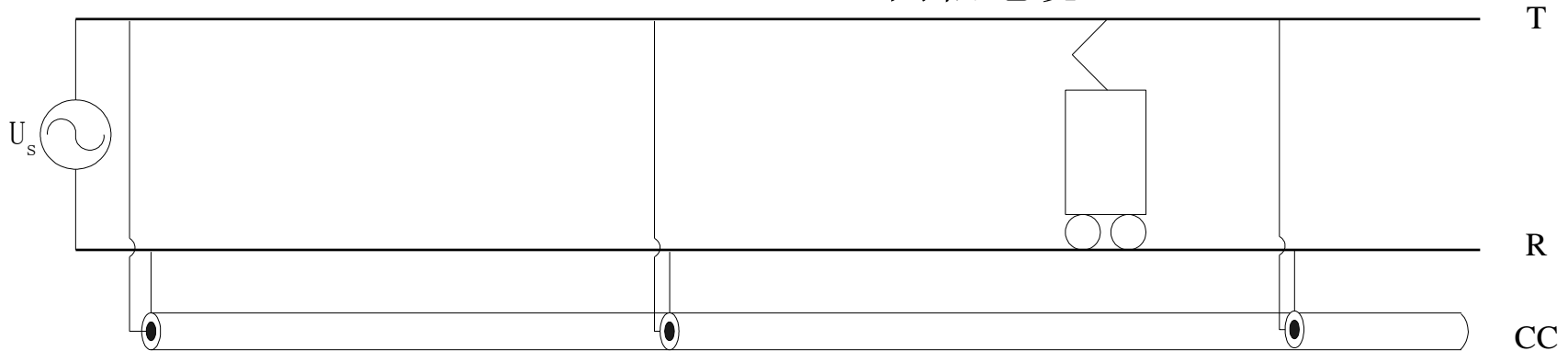


**AT**供电方式有效地减弱对通信线的感应影响。大部分回流沿正馈线流回牵引变电所，减小了地中电流。同时，接触网中的电流与正馈线的电流大小相同，方向相反，两者的交变磁场可以相互抵消。因此，**AT**供电的防干扰性能十分理想。



## (5) 同轴电缆供电方式 (CC方式)

同轴电缆 Coaxial Cable



CC供电是一种新型的供电方式。它的同轴电力电缆(CC)沿铁路线路埋设，内部芯线作为供电线与接触网1连接，外部导体作为回流线与钢轨2相接，每隔5-10km做一个分段。

- ◆ 防干扰效果好，占用空间小；
- ◆ 牵引网阻抗小；
- ◆ 投资大



## CC供电方式优缺点

### 优点:

- ◆ 馈电线与回流线在同一电缆中，间隔很小，而且同轴布置，使得互感系统数增大；
- ◆ 同轴电缆的阻抗比接触网和钢轨的阻抗小得多，因此牵引电流和回流几乎全部从同轴电缆中流过；
- ◆ 电缆芯线与外层导体电流相等，方向相反，二者形成的磁场相互抵消，对邻近的通信线路几乎无干扰；
- ◆ 阻抗小，供电距离长。

### 缺点:

- ◆ 投资很大，是几种供电方式中最高的，因此无法在实际系统中大量正式采用，仅在一些特别困难的区段采用。



# 牵引网供电方式的比较

牵引网供电方式有：

- 1) 直接供电方式（含带回流线、加强线）
- 2) BT供电方式
- 3) AT供电方式
- 4) CC（同轴电力电缆）供电方式

对于高速电气化工程，BT和CC供电方式均存在致命的弱点，是不能予以考虑的供电方式。

## 两种主要的供电方式

(1)AT供电方式

- ◆ 300km/h及以上客运专线：京津城际，京沪，武广，郑西等。
- ◆ 重载铁路：大秦，神朔
- ◆ 供电臂长度约30km，两个AT段

(2)带回流线的直接供电方式

- ◆ 其它一般铁路
- ◆ 供电臂长度一般20~25km



在BT供电方式的基础上，取消吸流变压器，但是仍然保留回流线，便形成了带回流线的直接供电方式。利用接触网与回流线之间的互感作用，使钢轨中的回流尽量由回流线流回牵引变电所，可部分抵消接触网对邻近通信线路的干扰。此种供电方式是高速电气化铁路可选择的供电方式。

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，采用直接供电加回流线(负馈线)。

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。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。

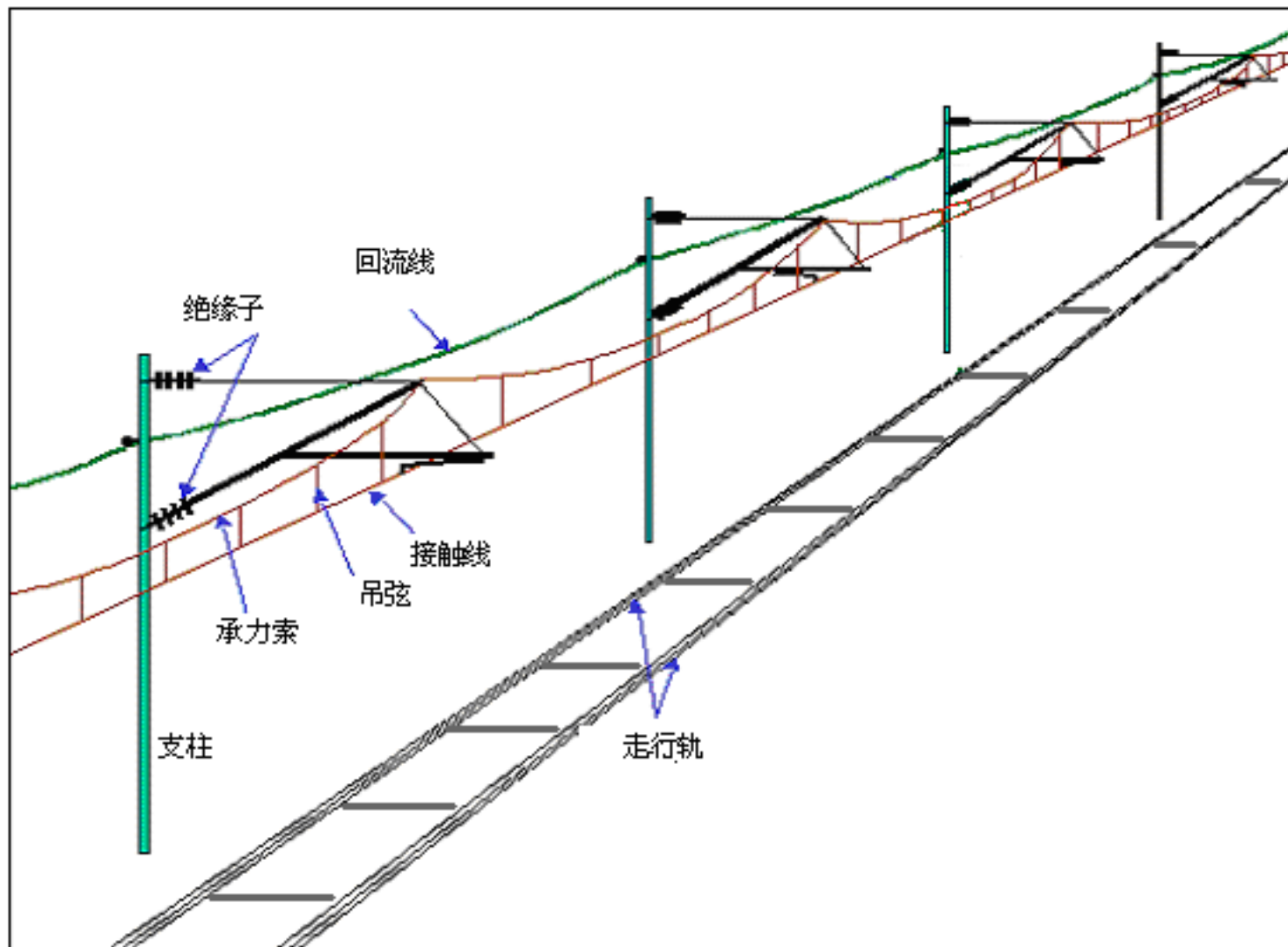


在AT和直接两种供电方式中，高速铁路供电系统电源取自公共电网的国家，牵引网均采用AT供电方式，电压较直供方式提高一倍，供电臂长度增加一倍，同时满足大功率负荷的需求。牵引网采用直接供电方式只有德国采用，因为德国采用独立自用电源系统，全线接触网可实现纵向并联方式运行，没有电分相，不存在通过电分相对列车速度的影响问题。

**根据我国国情，应首先选用AT供电方式。**

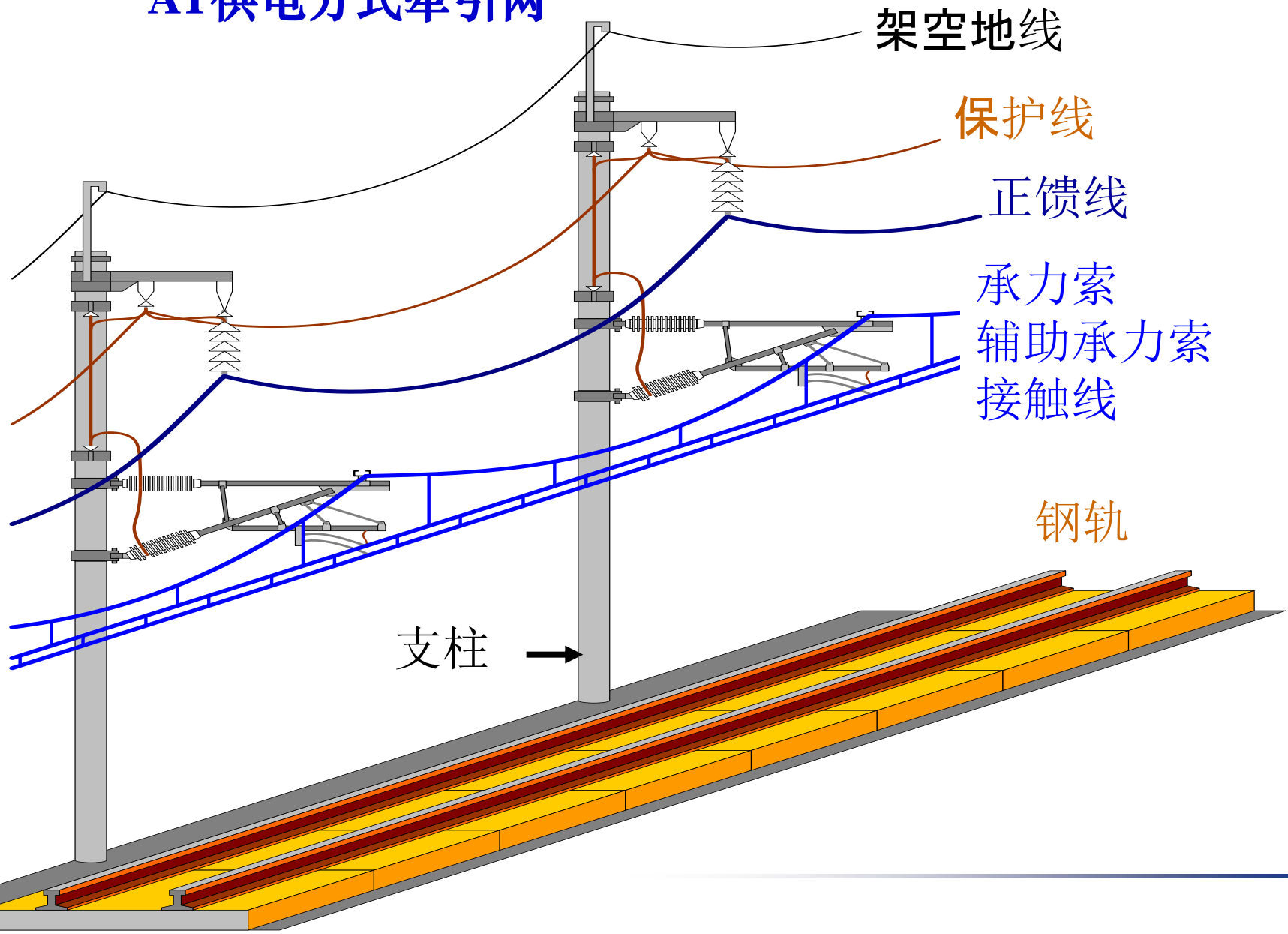


## 带回流线的直接供电方式牵引网





## AT供电方式牵引网





## 世界主要高速铁路国家电铁供电方式

1996年	日本	山阳新干线	300km/h	AT
1983年	法国	TGV东南线	300km/h	AT+直供
1990年	法国	TGV大西洋线	300km/h	AT
1994年	法国	TGV北方线	300km/h	AT
2001年	法国	TGV地中海线	350km/h	AT
2003年	韩国	汉城——釜山	300km/h	AT
2004年	西班牙	马德里——巴塞罗那	350km/h	AT
2004年	意大利	都灵——佛罗伦萨	300km/h	AT
2008年	意大利	罗马——那不勒斯	300km/h	AT



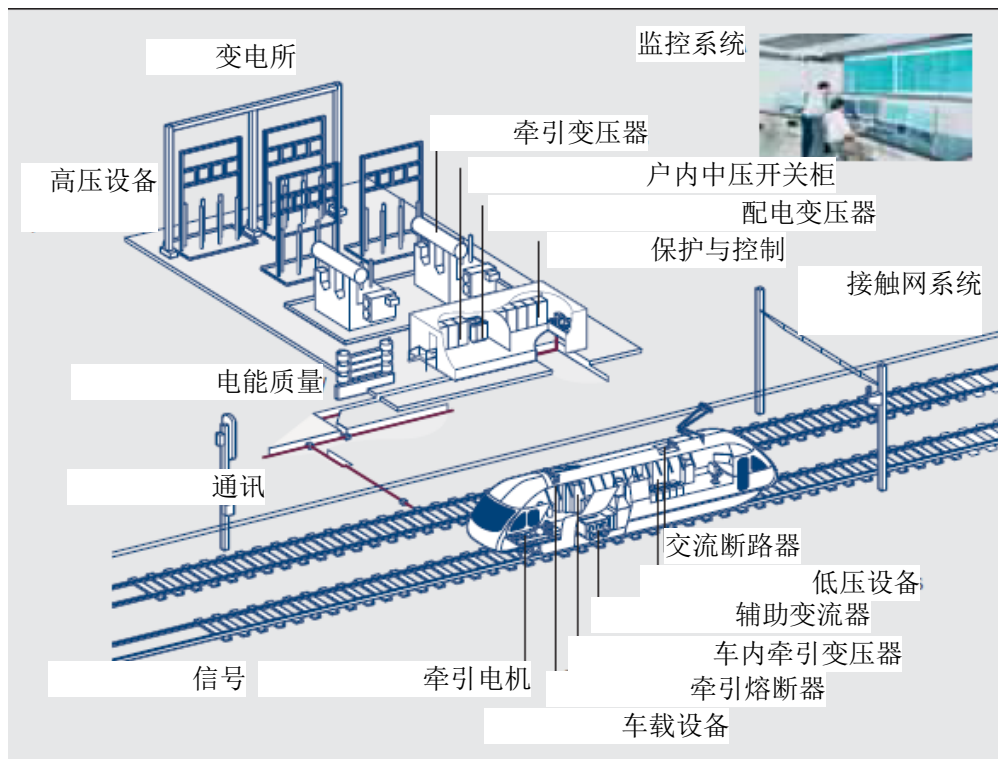
## 工频单相电气化铁道的牵引供电方式

供电方式	DF	DN	BT	AT
供电臂(km)	25~30	30	20	45~50
牵引网阻抗( $\Omega$ /km)	0.6~0.65	0.5~0.55	0.85~0.9	0.16~0.2
牵引网结构	由接触悬挂、钢轨组成。 最简单	由接触悬挂、钢轨和回流线组成	由接触悬挂、钢轨、NF和吸流变压器组成	由接触悬挂、钢轨、正馈线、自耦变压器和保护线。 最复杂
牵引网电压水平	较好	良好	较差	最好
牵引网电能损失(%)	5%	4~5%	7~8%	2~3%
防干扰特性	最差	较差	良好	良好
维护管理	最少	较少	较多	最多
牵引网造价	最少	较少	较大	最大



## 五. 牵引变电所设备概述

为保证电气化铁路安全供电和稳定经济运行，牵引变电所中设有各种类型一次电气设备和监控设备。通常把转换和分配电能的设备和载流导体等称为一次设备；二次设备对一次设备进行控制、监测和保护，以保证其正常、安全运行，也称二次系统。





## 1. 牵引变电所一次设备

牵引变电所一次设备由以下几部分组成:牵引变压器、断路器、隔离开关、电压互感器、电流互感器、母线、避雷器、电抗器、电容器、接地装置等。一次设备按其作用可以分为以下几类:

- (1) 变换和传递电能的设备: 如主用变压器、自用变压器、载流导体(如母线和电缆);
- (2) 补偿设备: 如并联无功补偿的电容器组、静止无功补偿器(SVC)、静止无功发生器(SVG)、滤波器等, 用于改善牵引变电所的电能质量;
- (3) 接通或断开电路的开关电器: 包括断路器、隔离开关、负荷开关等, 用于正常或故障时将电路闭合、断开或隔断;
- (4) 过电压抑制装置与接地装置: 前者如避雷器、防雷线圈、放电器(间隙或阻容回路), 后者为工作接地或保护人身安全的保护接地网系统;
- (5) 互感器: 包括电压互感器、电流互感器, 它们将一次电路的高电压、大电流变换为测量仪表、继电保护适用的量值。



## 2. 牵引变电所二次设备

牵引变电所二次设备主要包括综合自动化系统、安全监控系统和交-直流系统。

- (1) 综合自动化系统：综合自动化系统将变电所的二次设备(包括测量仪表、信号系统、继电保护、自动装置和远动装置等)经过功能的组合和优化设计，利用先进的计算机技术、现代电子技术、通信技术和信号处理技术，实现对全站设备的自动监视、自动测量、自动控制和保护，以及与调度通信等综合性的自动化功能；
- (2) 安全监控系统：它既可作为变电所综合自动化系统的一个组成单元，也可作为一套完整的独立安全监控系统。安全监控单元由一个监控中心、所辖的多个被控站(前端设备)以及通信信道组成。各被控站将采集的信号通过铁路信道发送到监控中心。
- (3) 交-直流系统：包括交流电源、蓄电池组、充电系统、不间断电源装置等，用来供给控制、保护和事故照明的操作电源与直流用电。

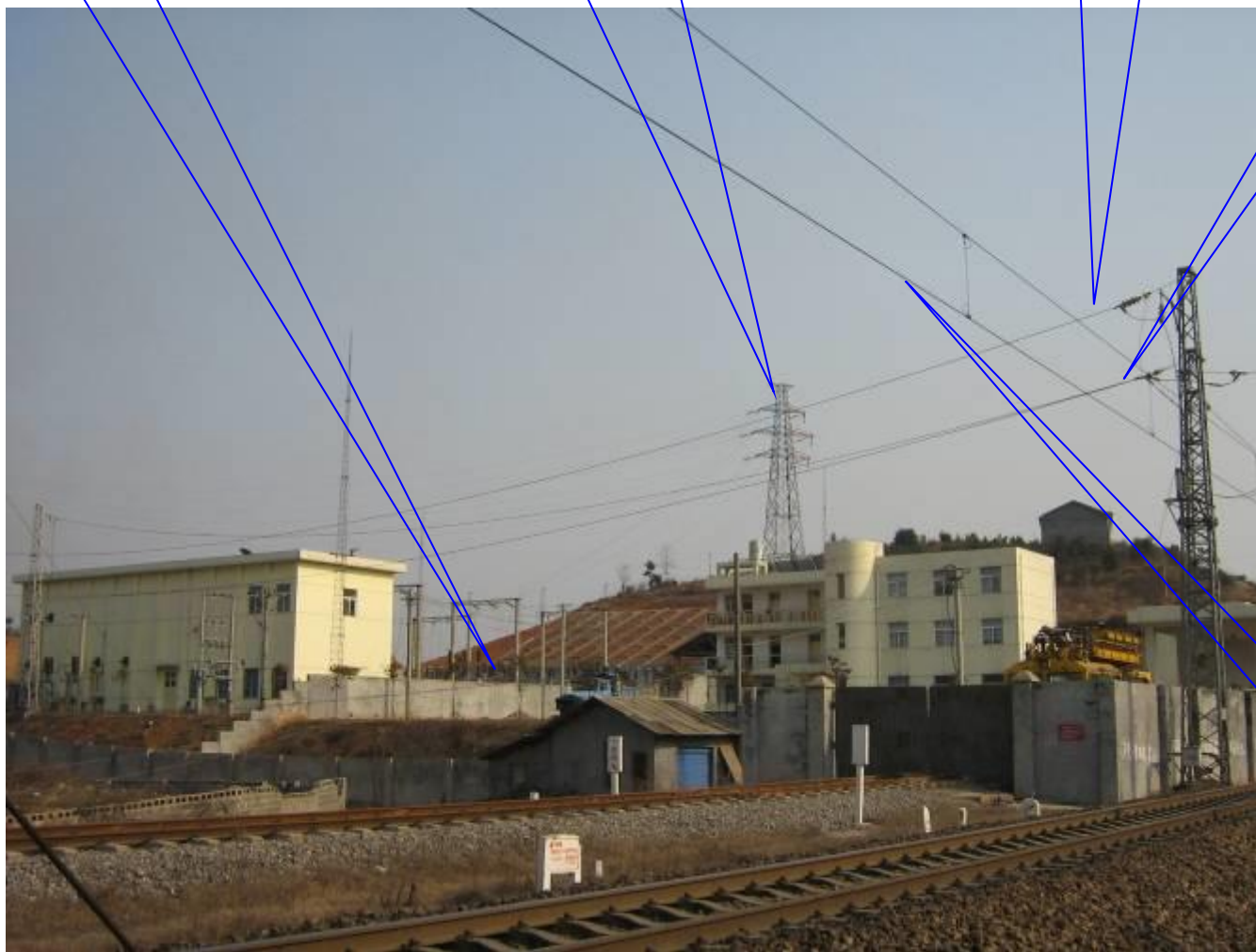


牵引变电所

110KV电力电源

供电线

回流线



牵引供电系统实景图

接触网

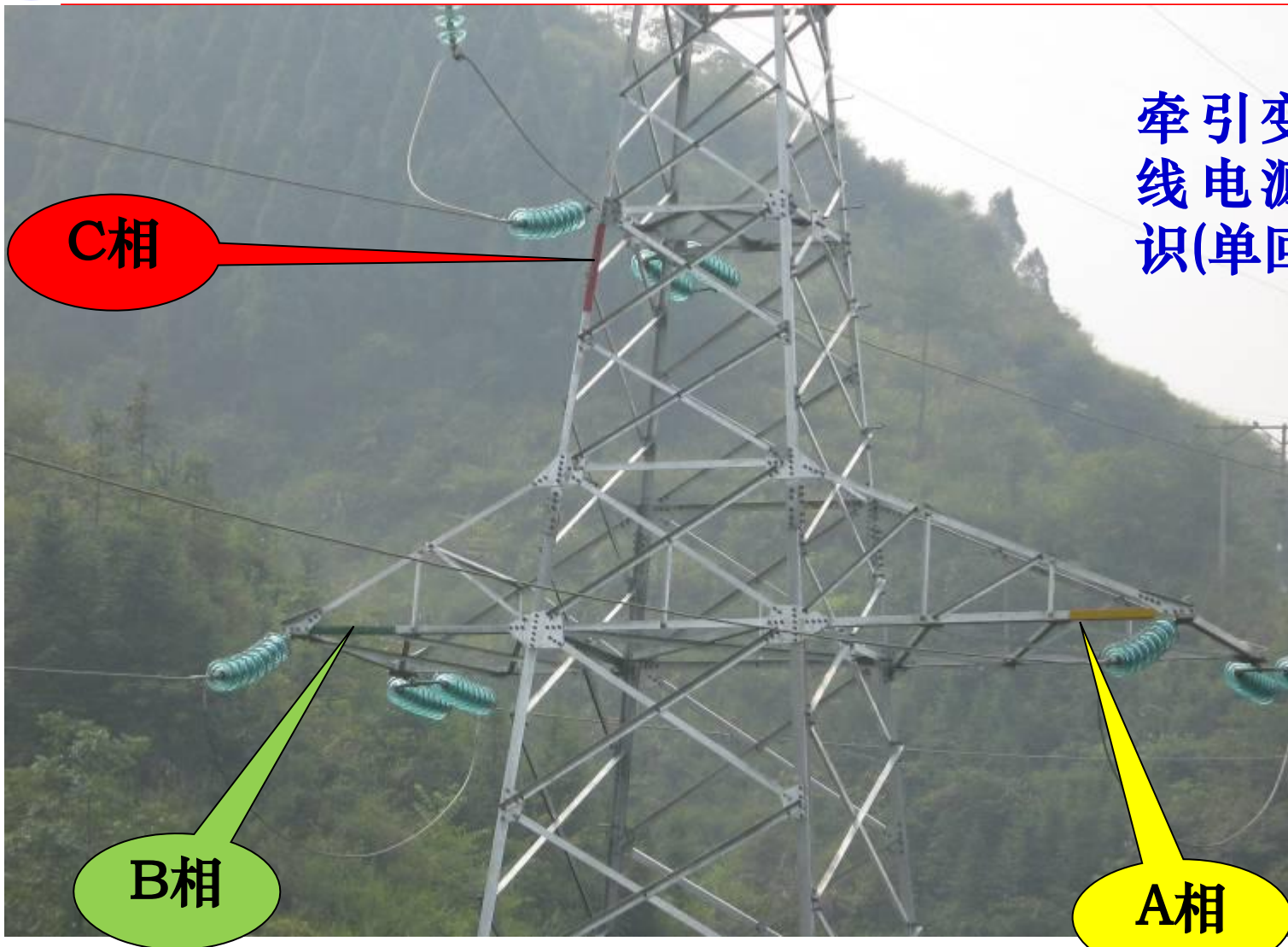




◆ 牵引变电所  
进线铁塔  
(单塔双回)



# 牵引变电所进 线电源相序标 识(单回单塔)



C相

B相

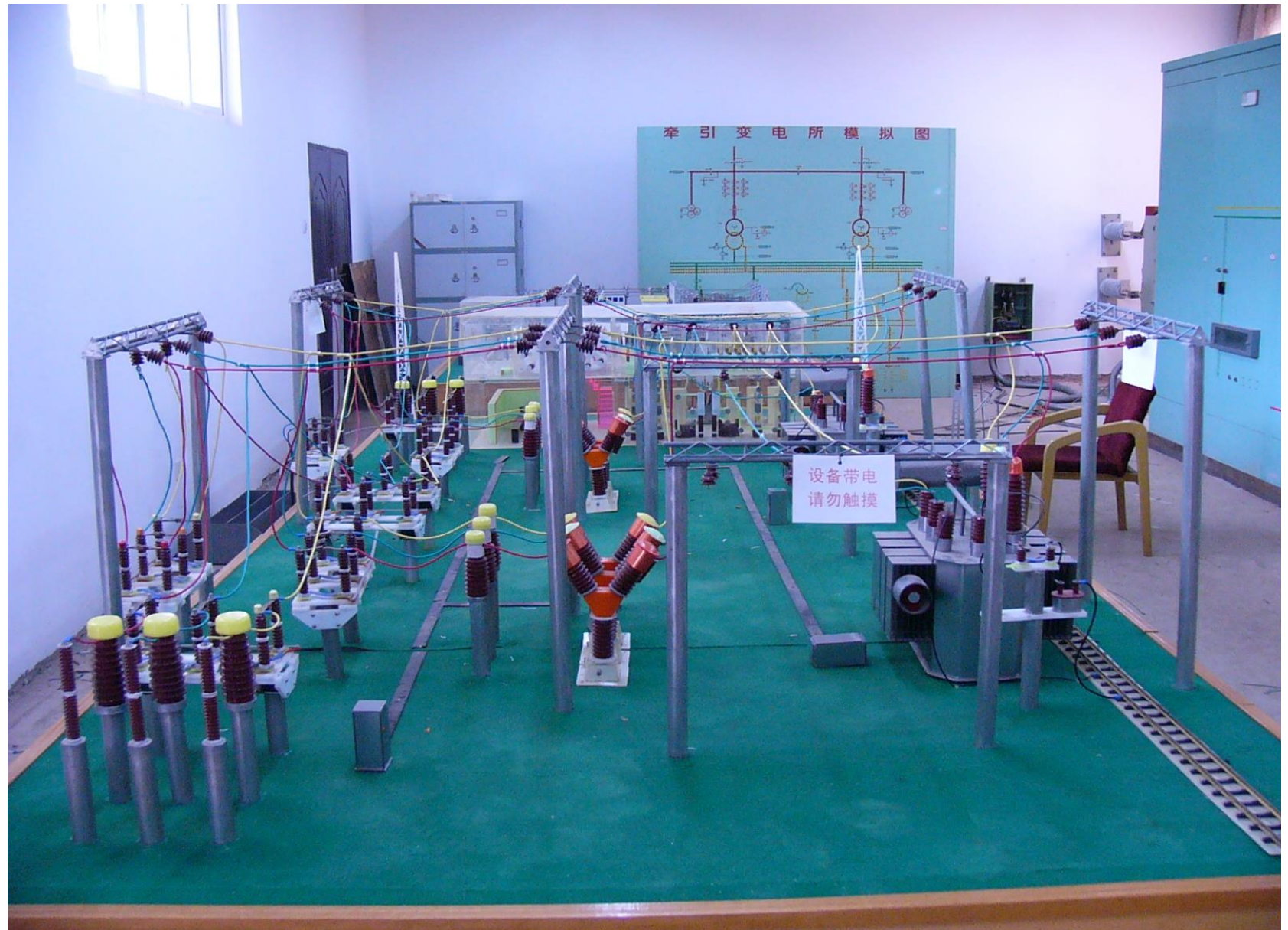
A相

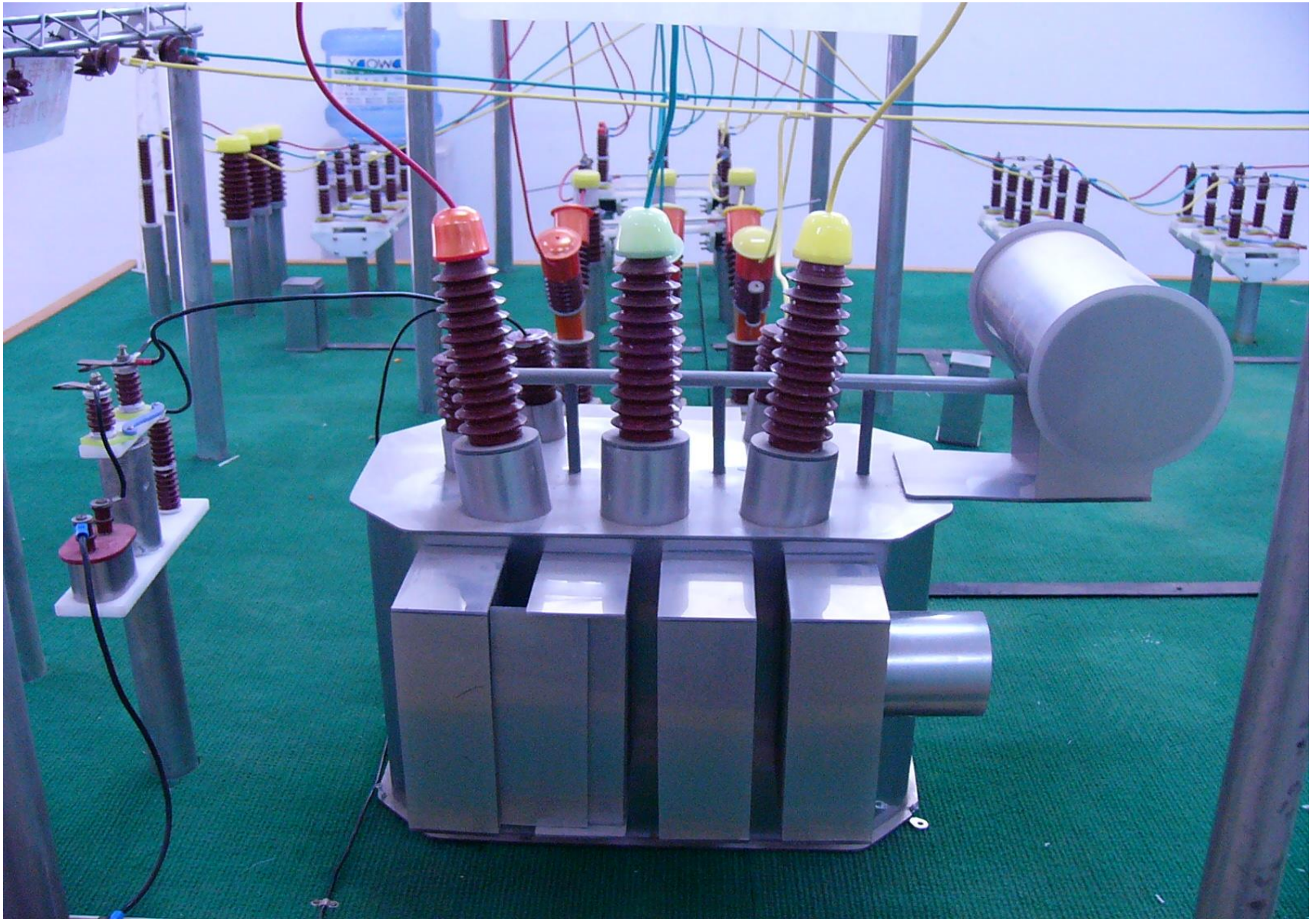


# 牵引变电所









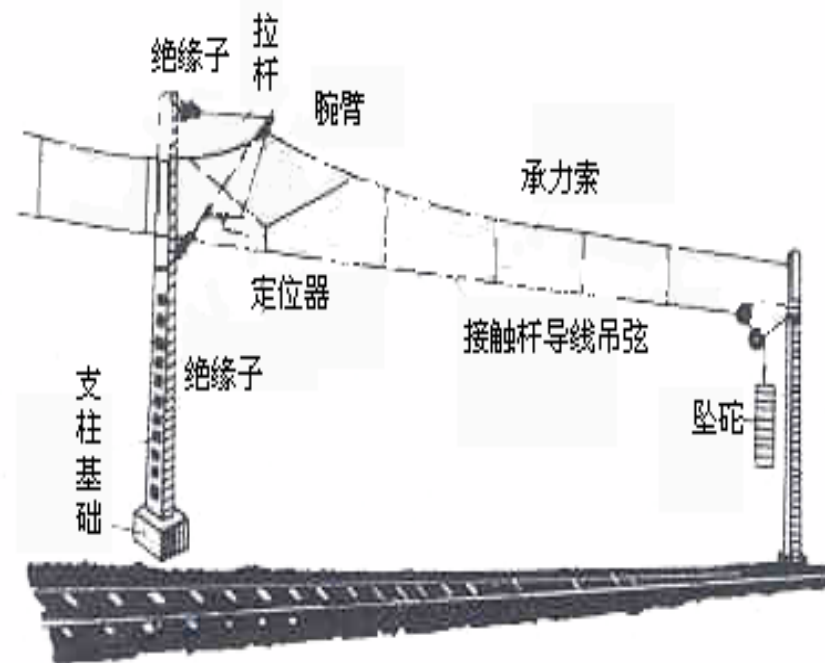






## 馈电线 (feeder)

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。



## 接触网 (*Overhead contact system*)

是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。



# 区间接触网



承力索

保护线/  
地线

接触线

回



# 站场接触网





铁道设备



# 牵引变压器

出厂序号 **789-113**

高压侧			
开关位置	分接头位置	电压 V	电流 A
I	2-3	115500	105
II	3-4	112750	
III	4-5	110000	
IV	5-6	107250	
V	6-7	104500	

低压侧	
电压 V	电流 A
27500	420

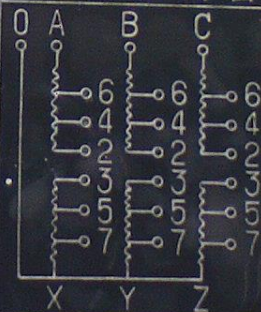
标准代号: GB1094.1-5-83  
 技术条件: OEK.517.044  
 产品代号: MOB 3010  
 型号: SF7-20000/110-GY  
 额定容量: 20000 kVA  
 停电容量: 12400 kVA  
 相数: 3 相  
 额定频率: 50 Hz  
 联结组标号: YN, d11

绝缘水平: L1480Ac200-L1250Ac95/  
 L1200Ac85

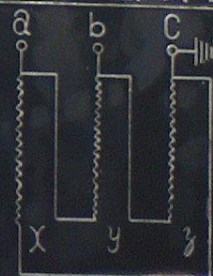
冷却方式: ONAF  
 使用条件: 海拔2500m以下  
 户外装置

额定性能数据(试验值)	重量表 kg (约重)
空载电流 0.484 %	器身重 20670
空载损耗 28000 W	上节油重 1800
负载损耗 81911 W	绝缘油重 8350
阻抗电压 10.17 %	运输重 20000
	总重 36420

高压接线图



低压接线图



中华人民共和国云南变压器厂

1989年2月





## 保护、计量盘(室内)









本章结束，  
谢谢大家！