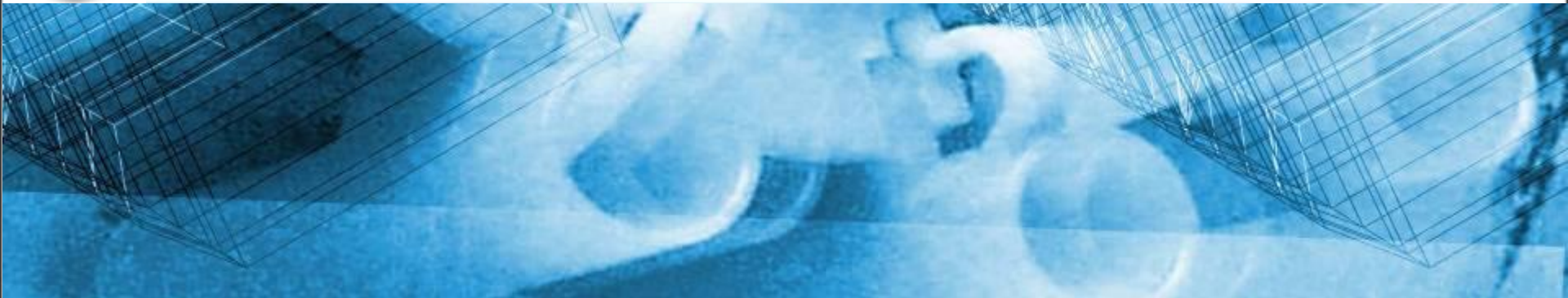




西南交通大学



轨道交通牵引供电系统

西南交通大学电气工程学院

2021年3月





1

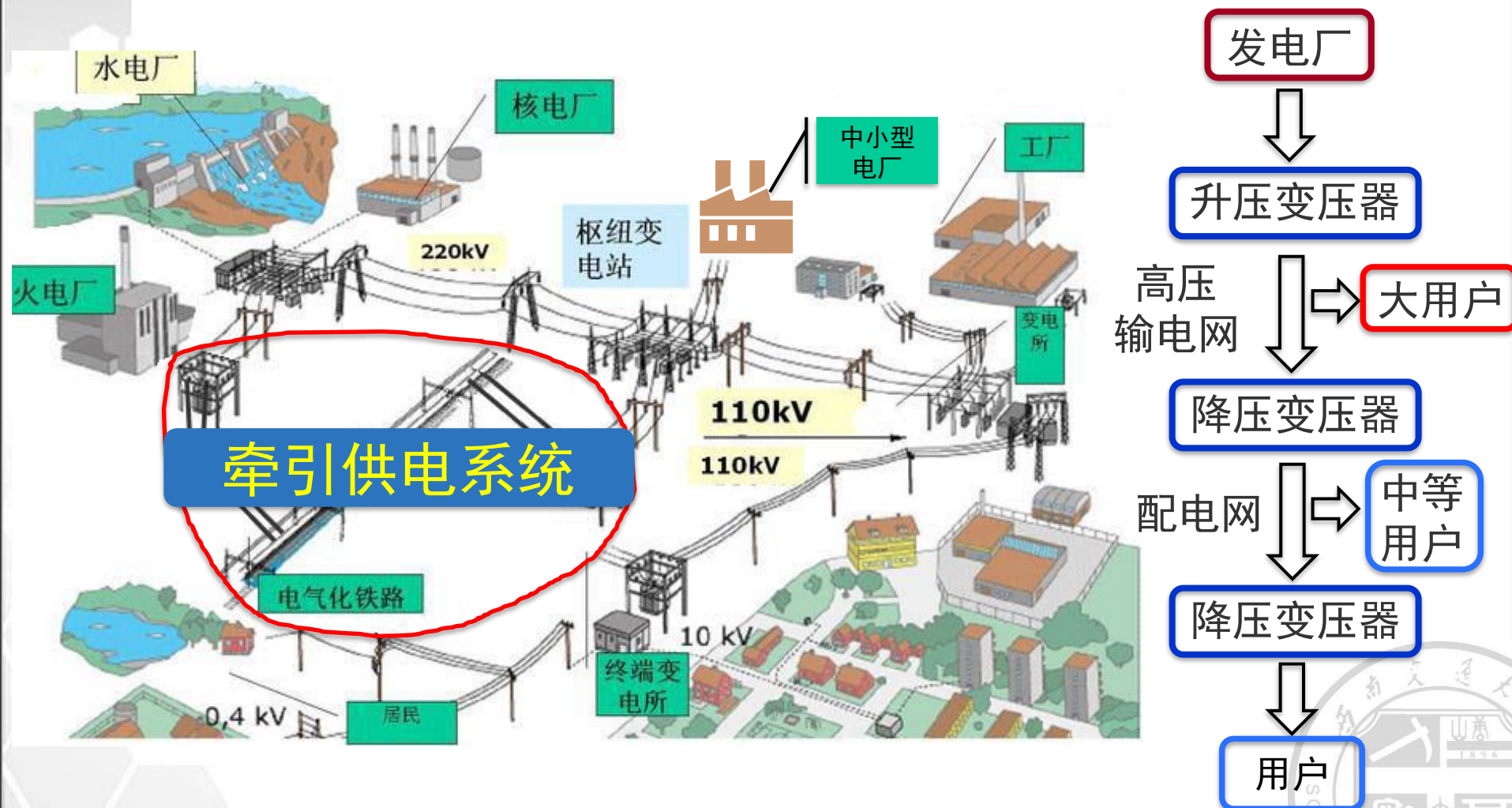
交、直流牵引供电系统结构





1.1 交、直流牵引供电系统结构

➤ 牵引供电系统与电力系统





1.1 交、直流牵引供电系统结构

➤ 牵引供电系统与电力系统

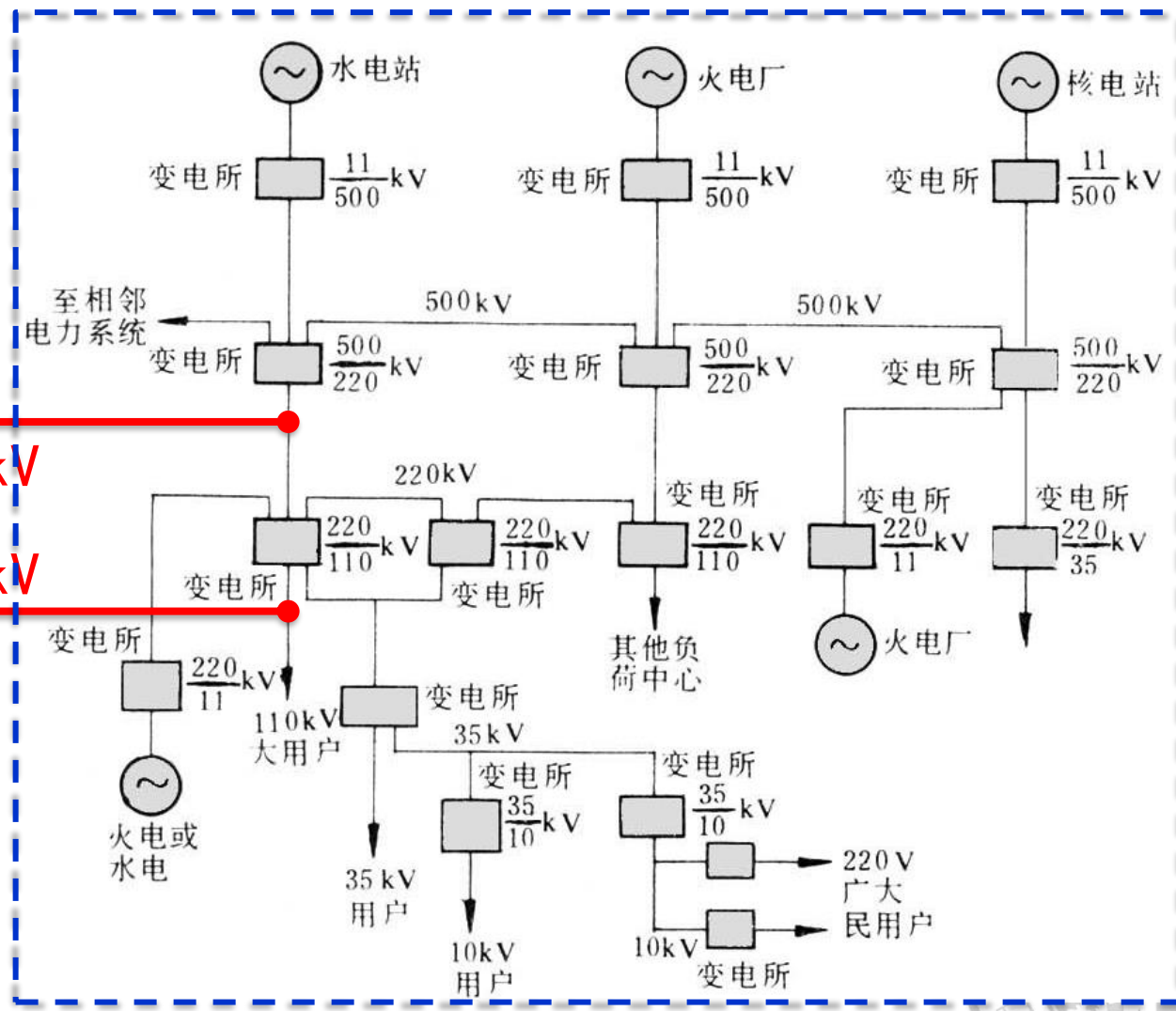
公用电网

牵引供电系统

220kV

110kV

牵引供电系统是直接接入高压系统的特殊用户



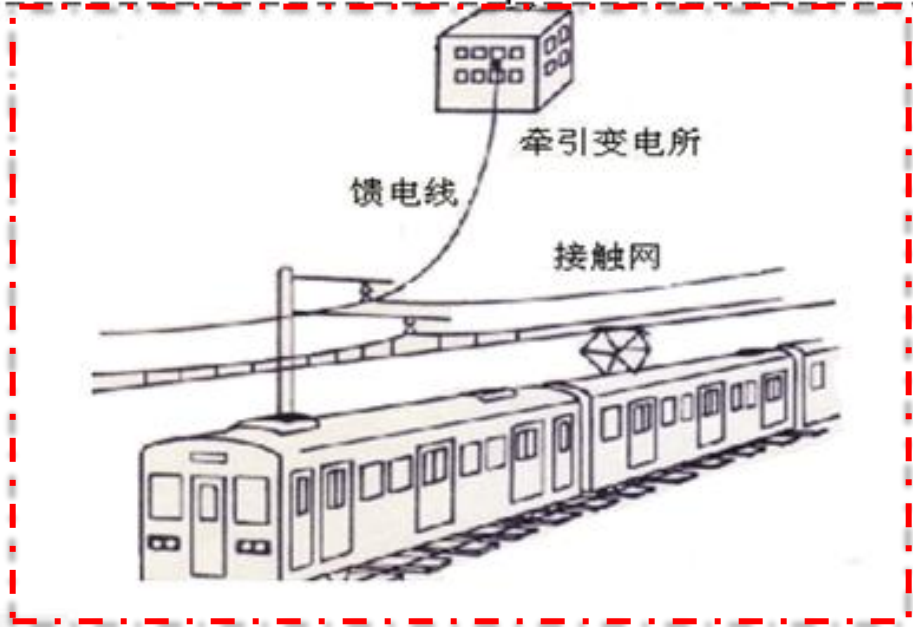


1.1 交、直流牵引供电系统结构

➤ 牵引供电系统与电力系统



牵引供电系统



公用电网
(三相工频)



牵引
变电所



接触网 (单相工频)



单相负载 (电力
机车/动车组)



1.2 牵引负载的特殊性

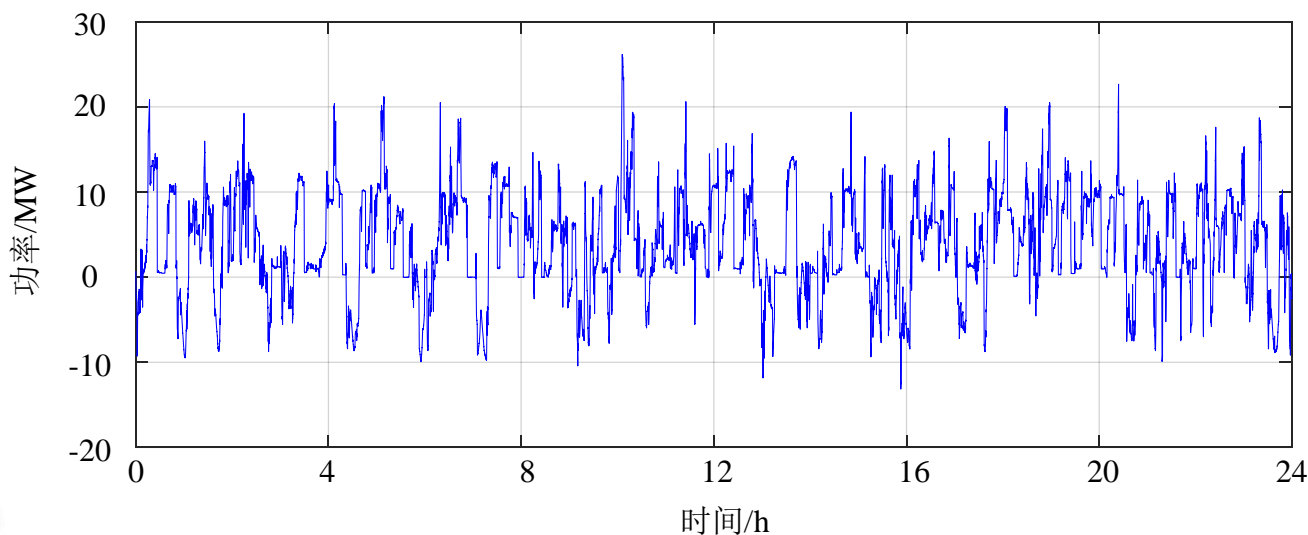
➤ 牵引供电系统直接接入高压系统

电气化铁道牵引供电系统接入110kV电网，随着铁路客运高速和货运重载的不断发展，高速铁路均拟直接接入220kV电网。

城市轨道交通牵引供电系统集中式方式接入城市电网110kV电网。

➤ 负载波动频繁，负荷大小不均衡

铁路线路条件千差万别，线路坡度随时变化，列车速度随时变化；列车按信号运行，铁路运输状态随时发生变化，供电臂内列车数量疏密不等，有时轻载，甚至空载，有时负载较重。





1.2 牵引负载的特殊性

➤ 单相负载

牵引负载是接入三相电力系统的单相负载，相对三相电力系统而言，牵引负荷具有**不对称性**，将在电力系统中造成三相不平衡。

➤ 功率因数取决于机车类型

交-直（AC/DC 整流）电力机车**功率因数低**、**谐波含量大**；交-直-交动车组，功率因数在0.95以上，谐波含量低。

➤ 高速铁路负载更大

高速列车单车电流可达**600~1000A**，而普速列车电流一般**不大于300A**

➤ 高速铁路列车负载率高，受电时间长

空气阻力随速度呈几何级数增长。高速时，**空气阻力**成为列车运行的主要阻力，持续从接触网取得电能。

➤ 高速铁路列车运行密度大

高速列车追踪间隔一般为3~4分钟





1.3 电能质量

➤ 电力系统基本任务

1. 保证供电可靠性

按电力用户的种类及要求供电的连续性，将用户分成三级：一级负荷、二级负荷和三级负荷。

电力牵引负荷属于一级负荷。

2. 保证良好电能质量

为用户提供充足、可靠和具有良好电能质量的电能，保证电力系统安全（secure）、稳定（stable）、可靠（reliable）和经济（economical）运行。

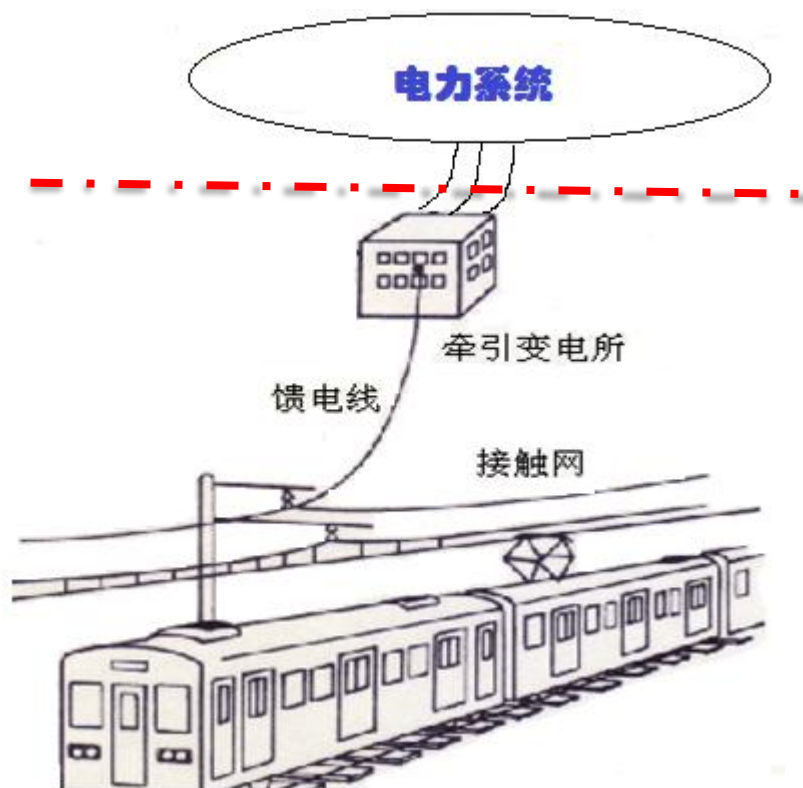




1.3 电能质量

牵引供电系统与其电源，即三相电力系统（公用电网）之间通过电能质量相互约束。

公共连接点（PCC）
或
供用电协议规定的
电能计量点



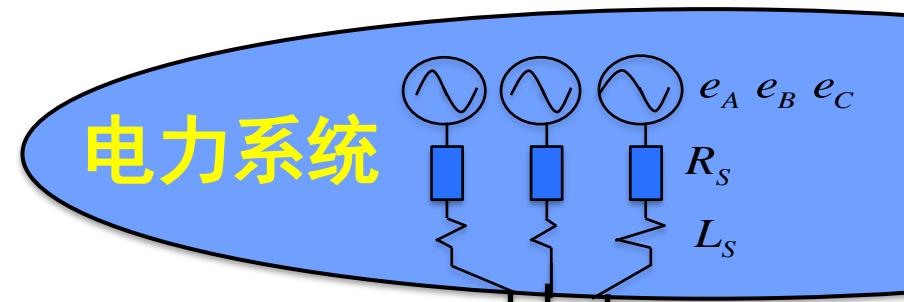
电能质量





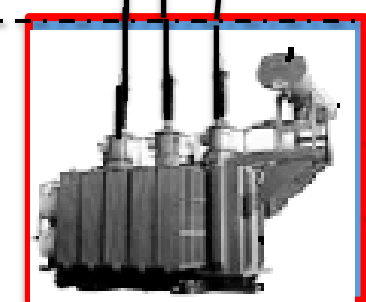
1.4 交流牵引供电系统结构和原理

交流牵引供电系统：从电力系统接受电能，通过牵引变压器变换电压后，由接触网向电力机车负载提供电能的系统。



220kV或110kV

牵引
变电所



27.5kV

馈线

回流线

25kV

接触网

牵引
网

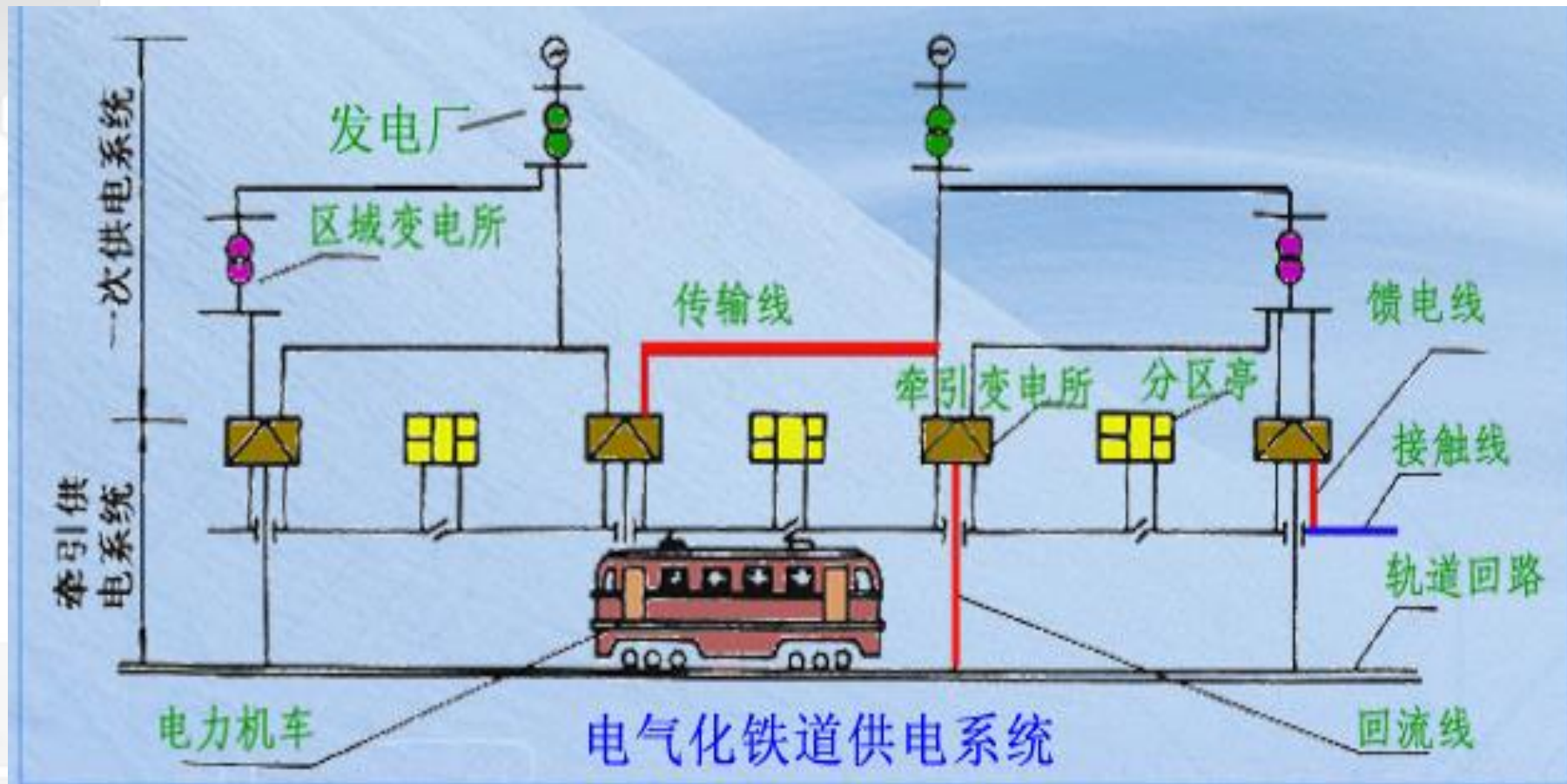
钢轨



牵引供电系统



1.4 交流牵引供电系统结构和原理



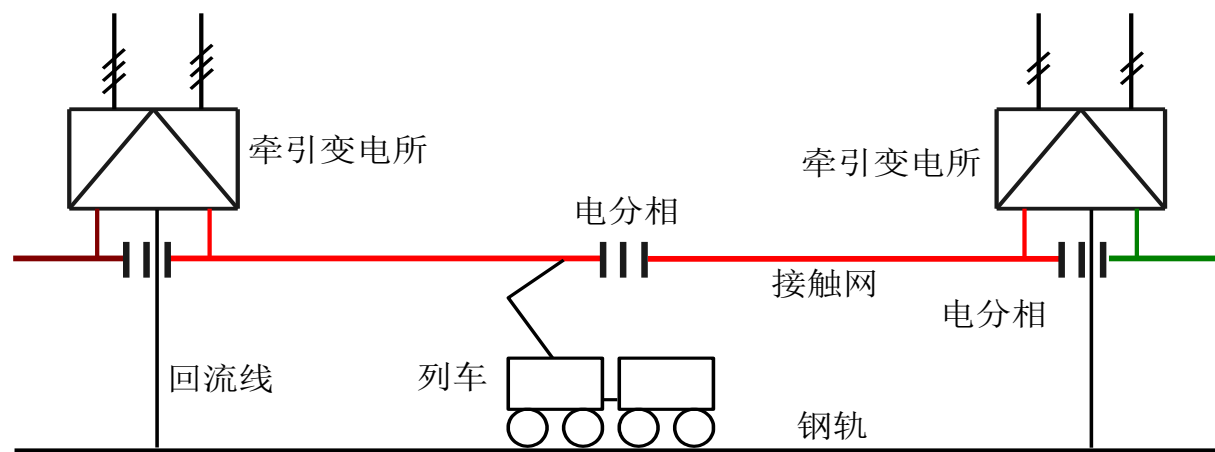


1.4 交流牵引供电系统结构和原理

我国牵引变电所均采用2路外部电源进线，2台牵引变压器，线路和变压器均为一主一备方式运行。

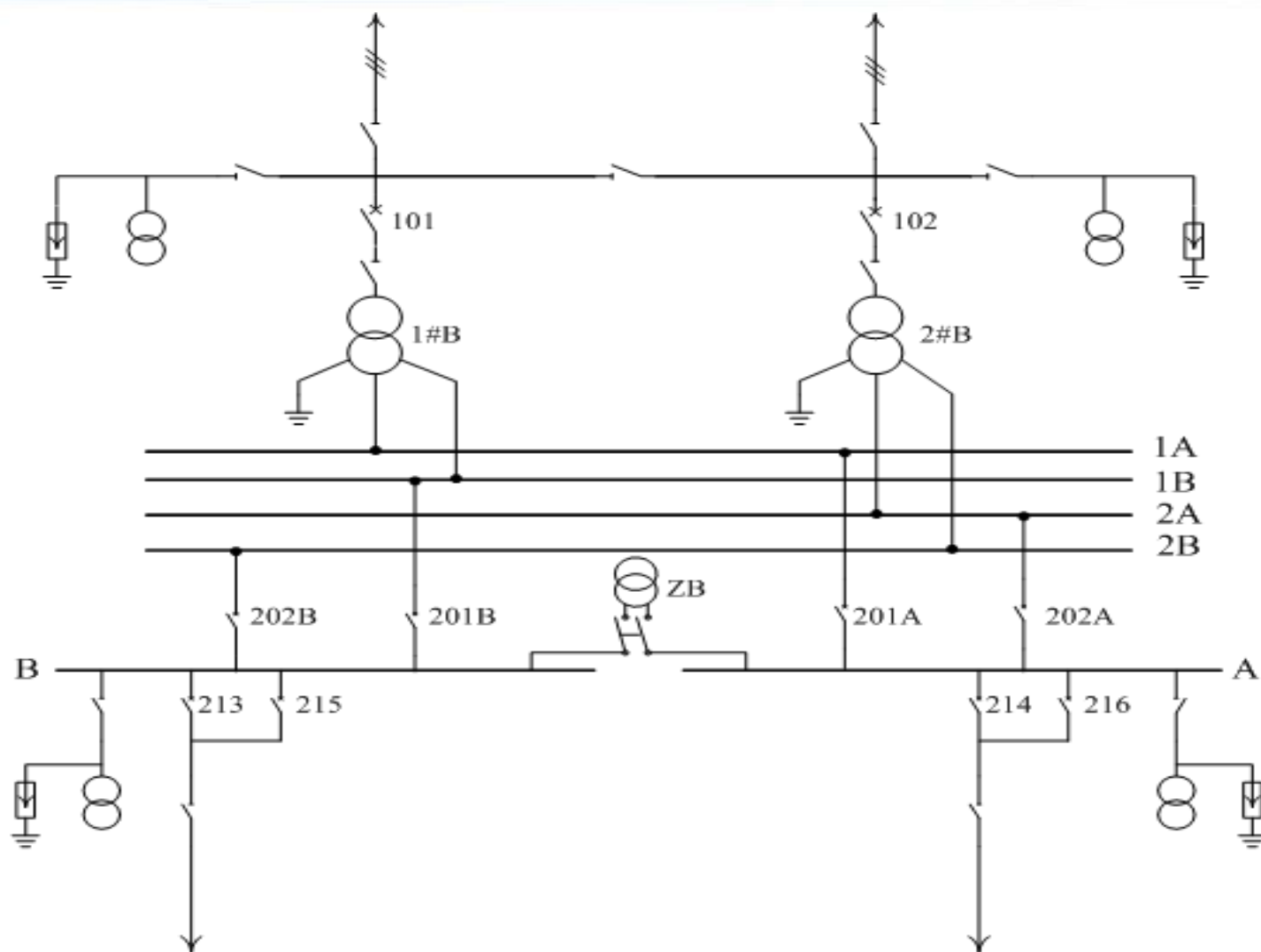
110kV或220kV电源经牵引变压器后，降为25kV（直接供电方式）或 $2 \times 25\text{kV}$ 电压（AT供电方式）后供给牵引网。

牵引网由馈线、接触网、轨道及轨地回流线组成。





1.4 交流牵引供电系统结构和原理

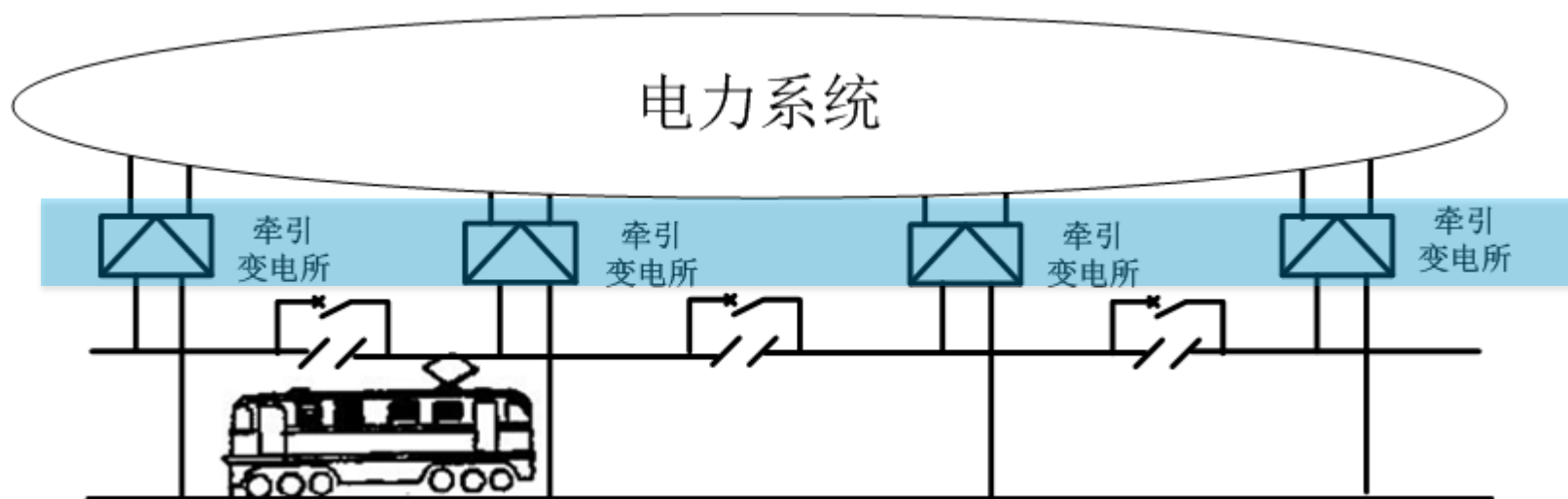


牵引变电所主接线图





1.4 交流牵引供电系统结构和原理



牵引变电所

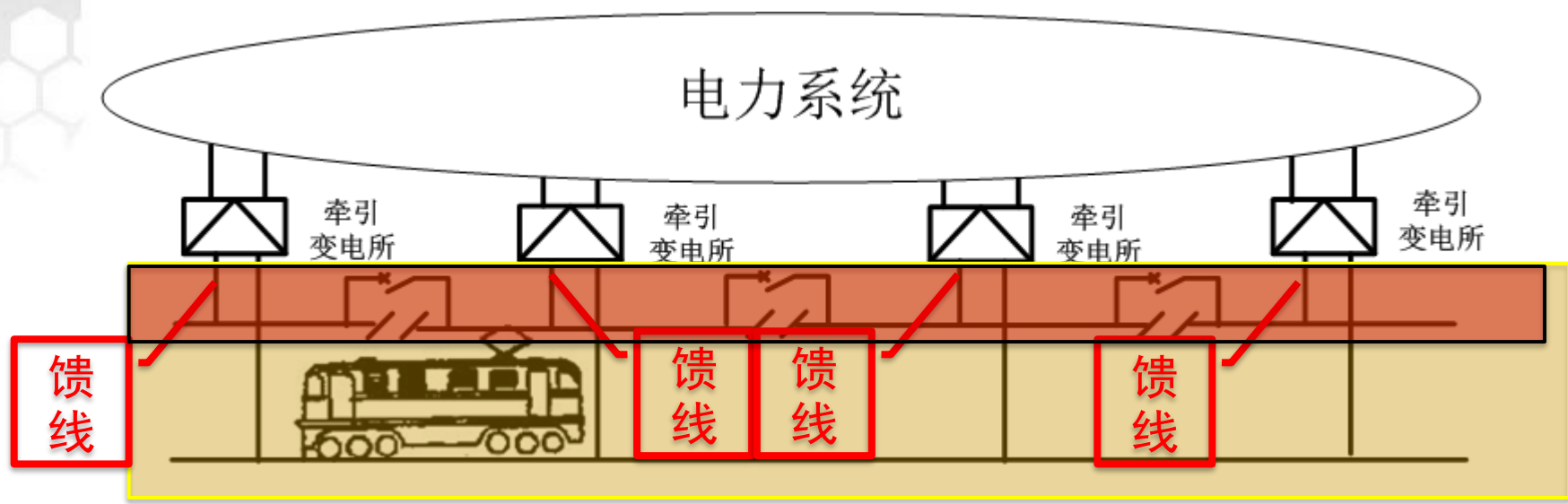
将电力系统供应的电能转变为适于电力牵引及其供电方式的电能，其核心元件是**牵引变压器**，并设有备用。

作用：变压、变流、变阻抗、三相-单相





1.4 交流牵引供电系统结构和原理



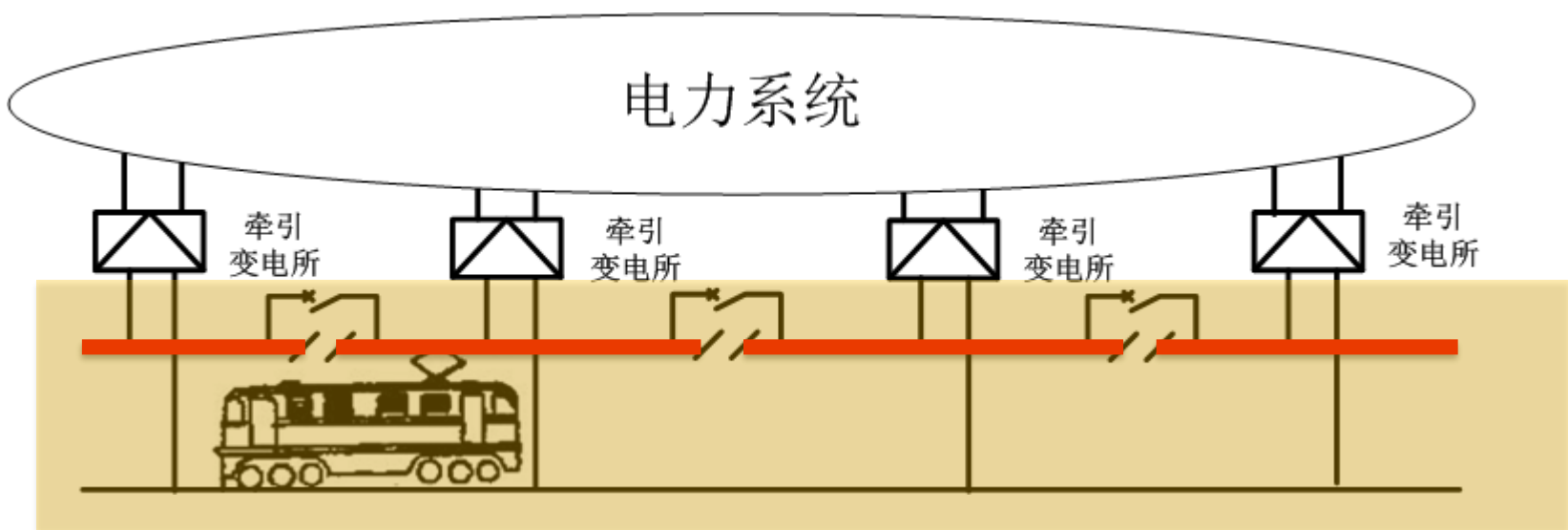
牵引网

馈线：牵引变电所牵引母线和接触网之间的导线（一般采用大截面的钢芯铝绞线），即将电能由牵引变电所引向电气化铁路；





1.4 交流牵引供电系统结构和原理



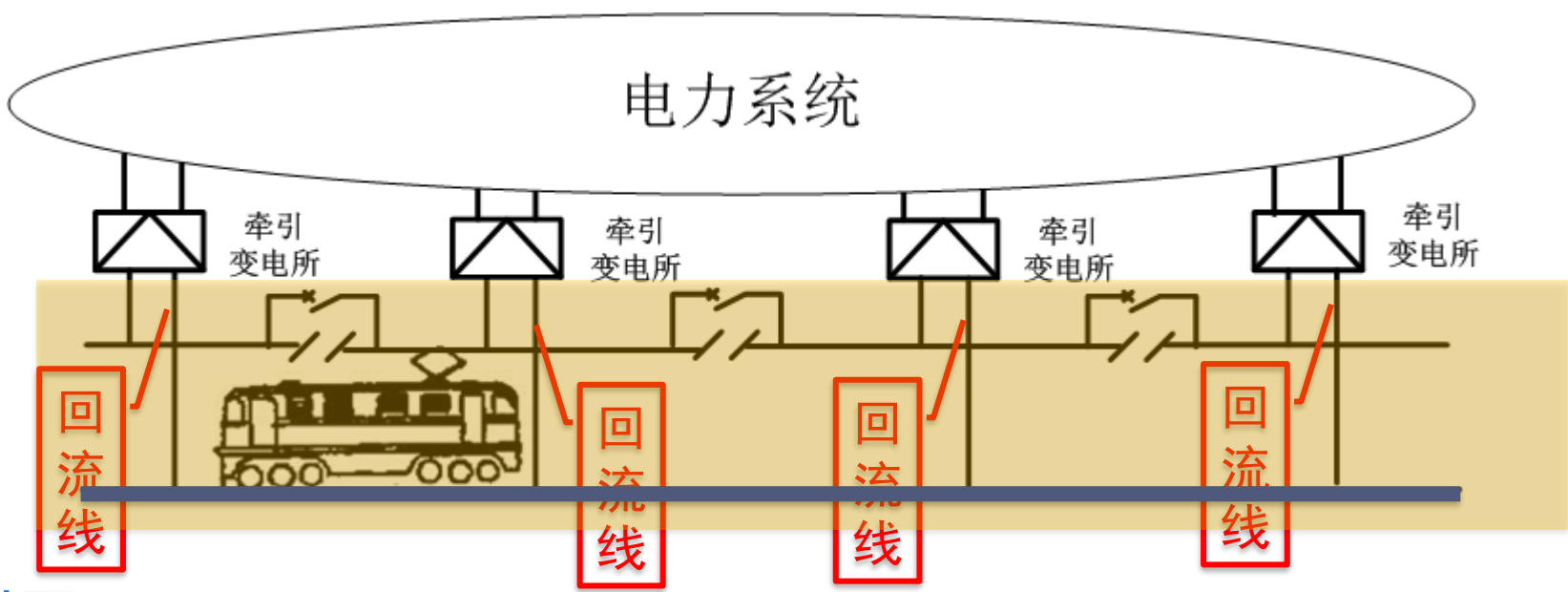
牵引网

接触网：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。





1.4 交流牵引供电系统结构和原理



牵引网

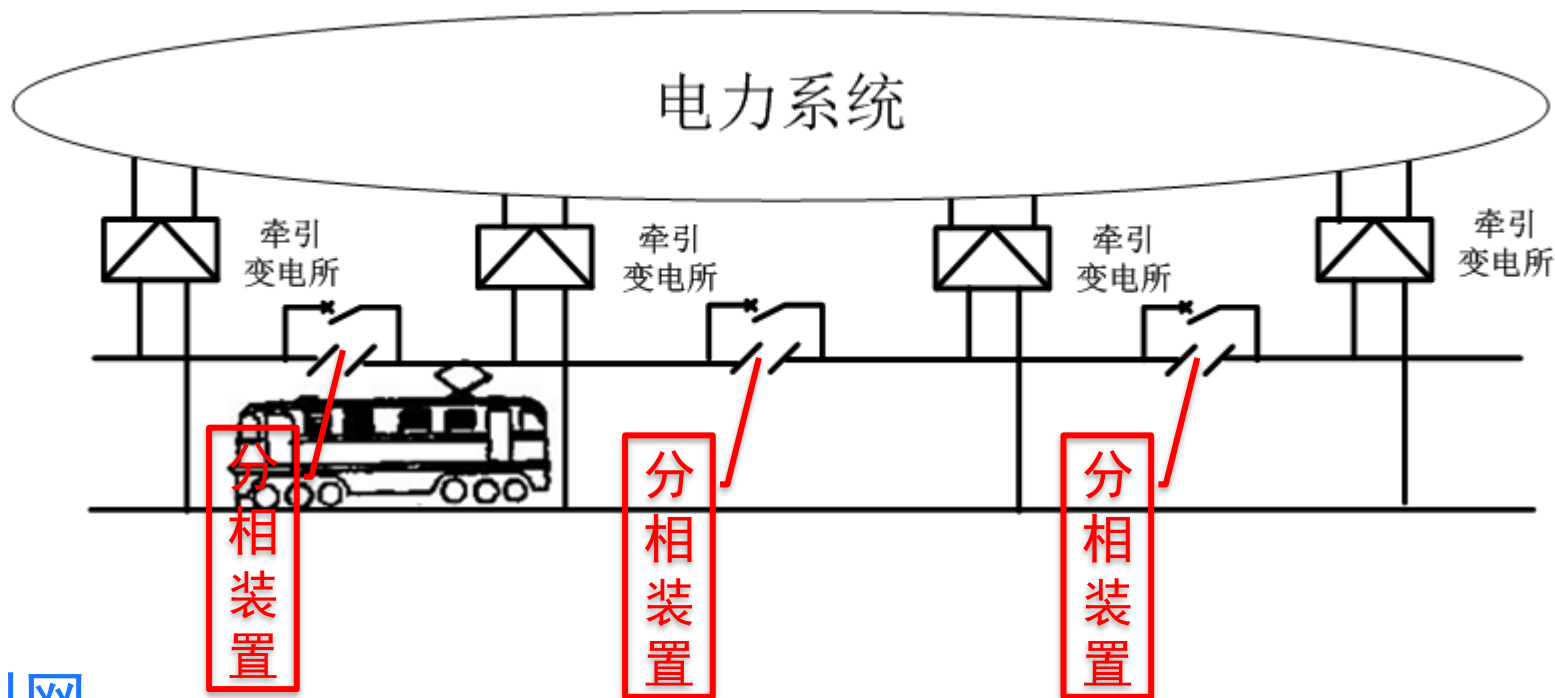
轨道：完成导能回流的任务。

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。





1.4 交流牵引供电系统结构和原理

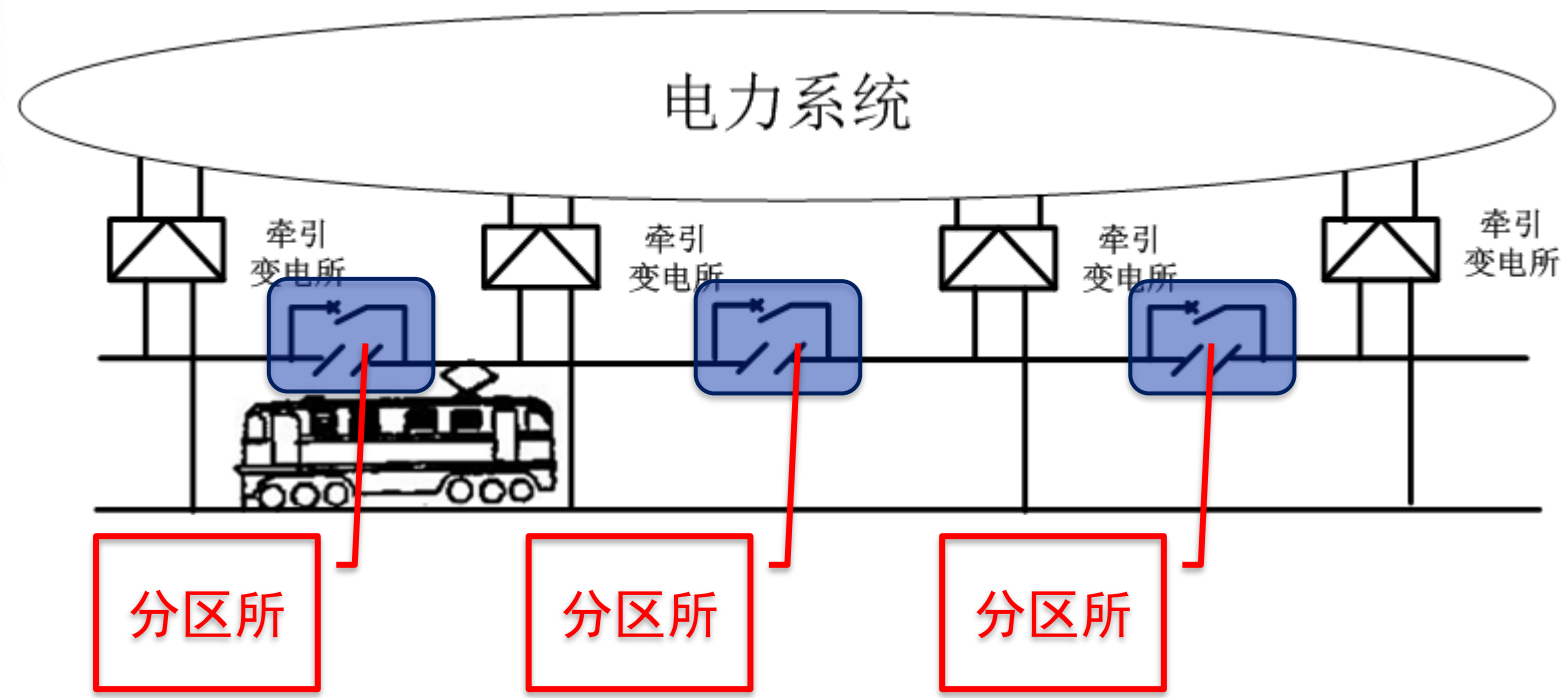


牵引网

分相装置(中性段)：两端有电分段的装置。串接在接触网中，将两相不同的供电区分开，防止受流装置通过而使不同电压或不同相位的两相邻电气化区段相互连通。



1.4 交流牵引供电系统结构和原理

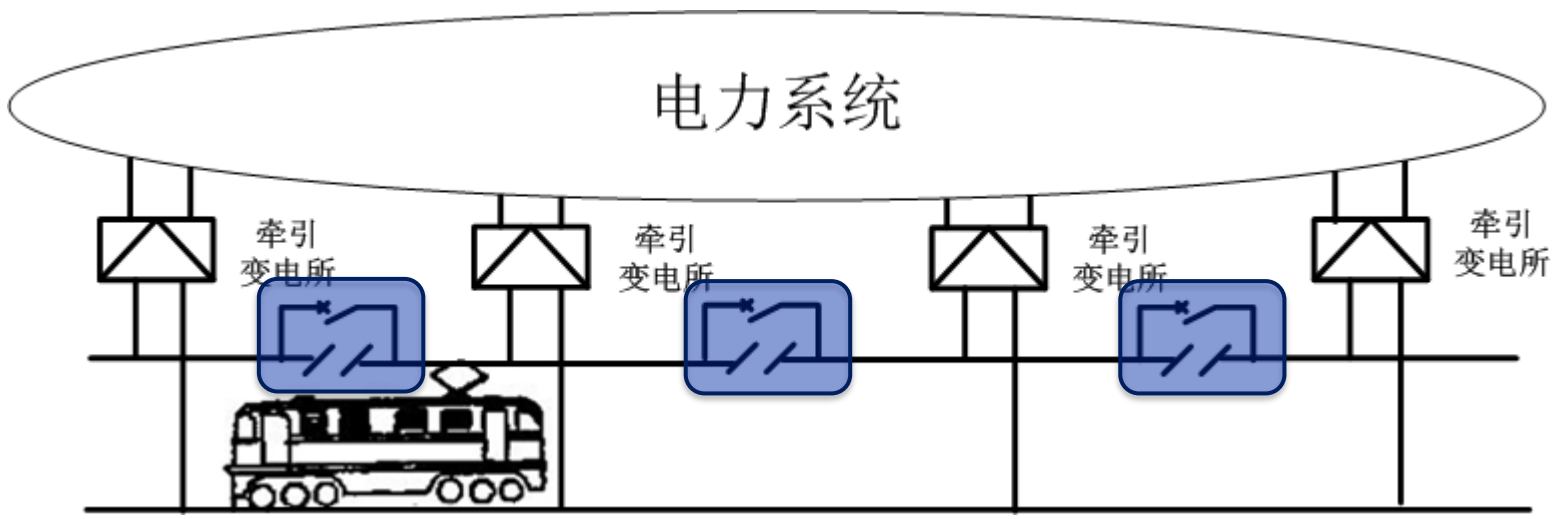


分区所：增加供电的灵活性，提高运行的可靠性，在两个牵引变电所的供电区中间设分区所。





1.4 交流牵引供电系统结构和原理



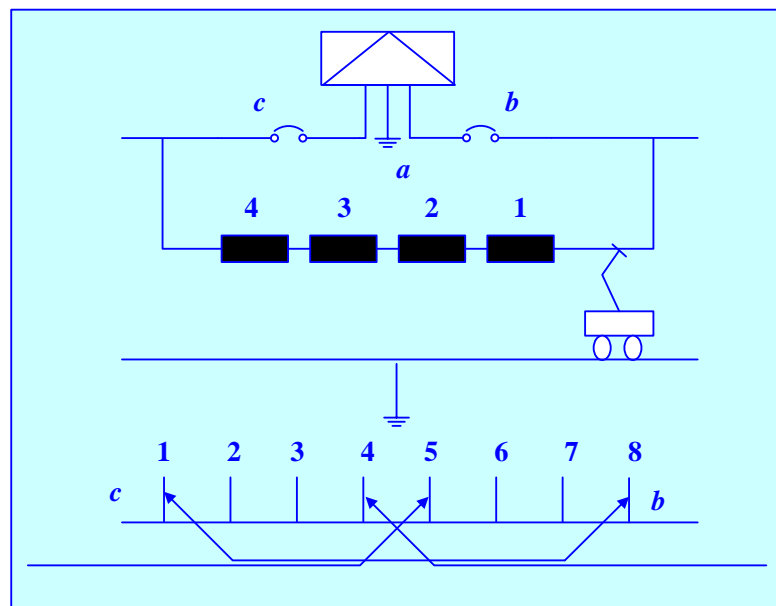
分区所：（1）用以明确各牵引变电所的供电范围，供电分界处接触网设**分相绝缘装置**，以缩小牵引网事故范围。（2）分相绝缘装置并联断路器或隔离开关，**实现牵引网不同运行方式的切换、倒闸。**





1.4 交流牵引供电系统结构和原理

- 自动过电分相与同相供电技术
- 牵引供电系统电分相环节是制约列车运行速度的瓶颈之一。





1.4 交流牵引供电系统结构和原理

1. 手动过电分相

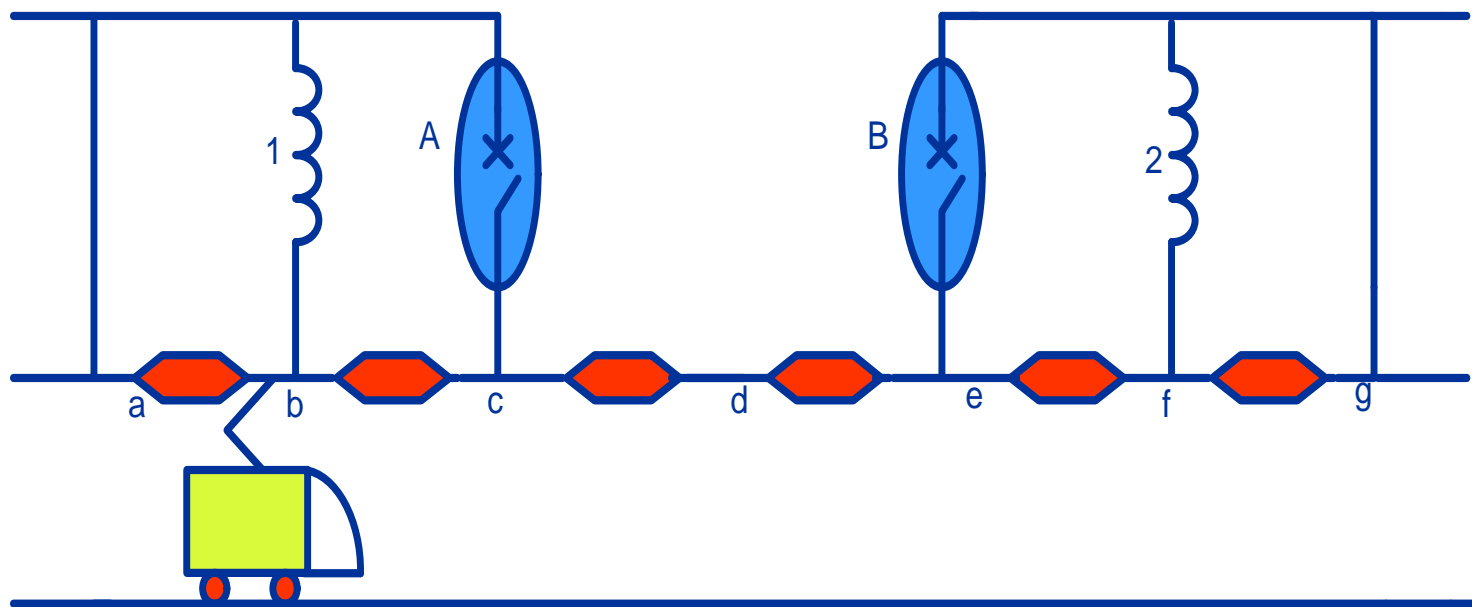
- 退级（减小牵引负荷电流）→关辅助机组→断主断路器→靠机车惯性不降受电弓通过电分相，过分相后按照线路的标志，合主断路器→合辅助机组→进级并限制电流增加率，以避免“闯动”。
- 这种操作的成功与否，依赖于司机的技能水平和道路信号的指示，一旦疏忽，就会造成带电闯分相，严重影响牵引供电系统的安全运行。





1.4 交流牵引供电系统结构和原理

2. 柱上自动切换式（瑞士AF公司）



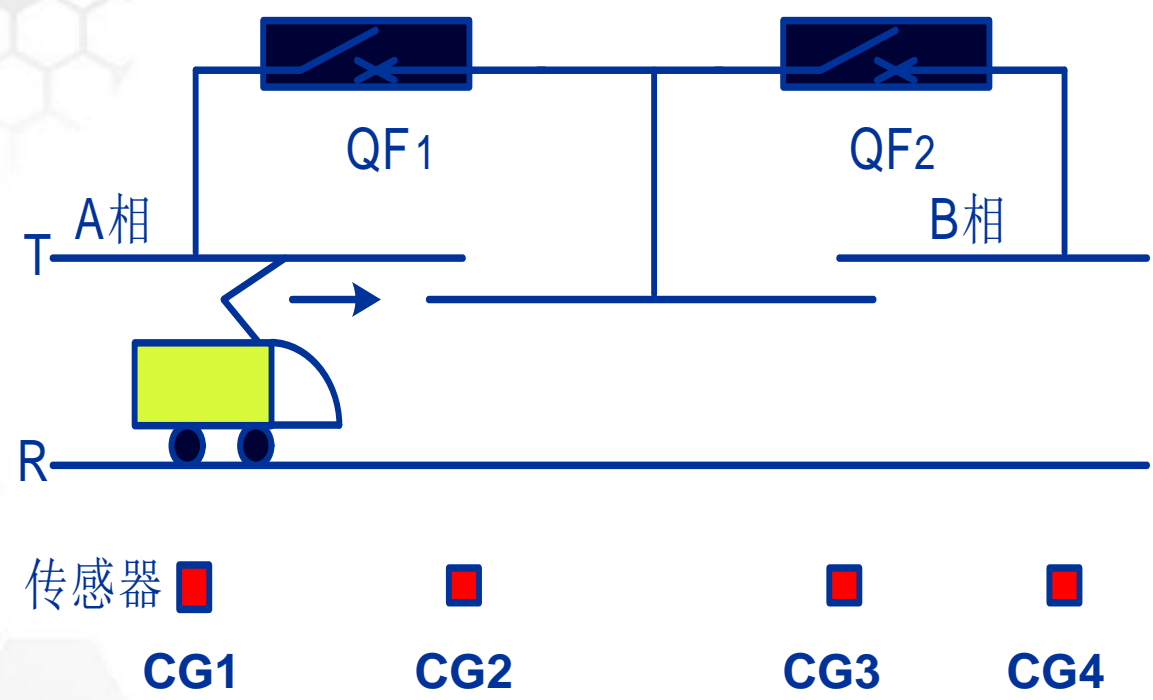
- 当机车到a—b间→A的线圈1带电→A闭合→ c区段带电；
- 当机车到c—d段时→ A的线圈失电→ A断开。机车到f区段→ B的线圈带电→ B闭合；
- 当机车驶过g时→ B的线圈失电→ B断开。





1.4 交流牵引供电系统结构和原理

3. 地面开关自动转换（日本新干线）



- 机车（动车组）达CG1→传感器发信号→将QF1闭合→中性段接到A相→机车带电通过第一个空气间隙；
- 机车（动车组）达CG3→断开QF1后闭合QF2→中性段与B相连接→机车可以顺利通过第二个空气间隙

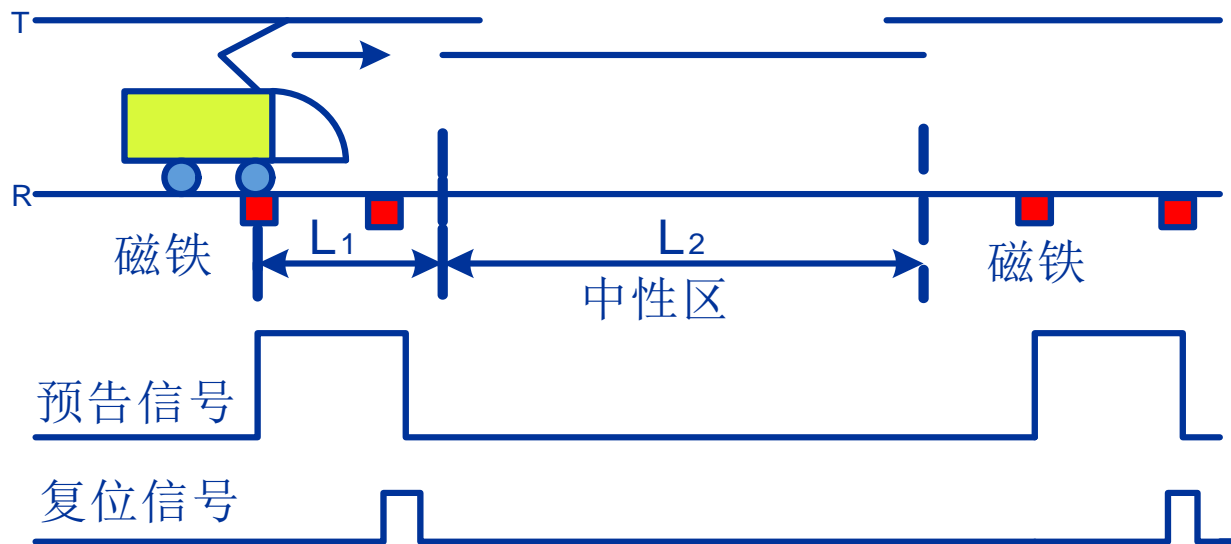
断电时间为QF1和QF2切换时间间隔，约为0.1~0.15s





1.4 交流牵引供电系统结构和原理

4. 车载自动控制断电过分相（英国）



- 机车驶近电分相→地面传感器（磁铁感应或检测轮对数计数）给机车发送预告信号→收到预告信号并延时确认→自动完成退级、关辅助机组、断主断路器的操作；
- 通过电分相后，由主断路器前安装的PT检测有压进行判断，进行自动化的合闸操作。





1.4 交流牵引供电系统结构和原理

三种自动过电分相比较

- **地面开关自动切换方案**：性能指标最高，没有供电死区，速度损失最小，与线路条件无关，日本，法国有成功经验，是未来**最有发展前途的技术方案**。
- **柱上断电方案**：通过分相时，容易因为电感存在产生谐振过电压。国外铁路以交直交机车为主，过电压现象并不严重，我国目前以直流机车为主的现实，借鉴意义不大。并且，这种方案仍然是对器件式电分相的改良，结构复杂，能够基本解决受电弓的拉弧问题，但是不能完全解决硬点的问题，这明显与高速铁路发展的总体趋势相悖。
- **车载自动断电过分相方案**：相对以上两种具有投资较少，设备可靠性高，检修维护简单，适用速度范围广的突出优点，是目前**最适合**我国国情和铁路现实的过分相方案。



1.4 交流牵引供电系统结构和原理

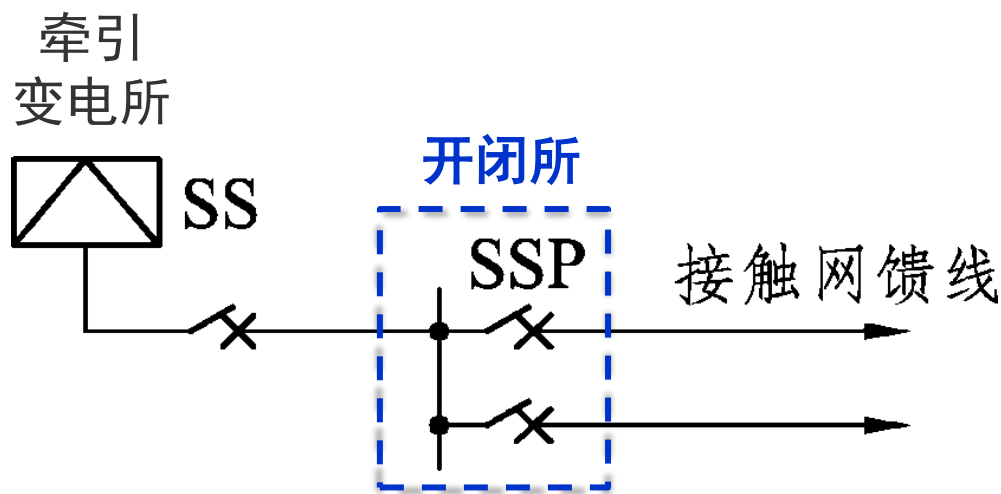
电分相的隐患

- 不论在电气上还是机械上都是薄弱环节，当重载、高速列车通过时，由于绝缘器形成的硬点对受电弓构成严重威胁，同时绝缘器也常因拉弧而烧损。
- 一般电气化铁道每50km设一牵引变，25km左右设“电分相”。若列车以200km/h行驶，每7.5分钟要过一次“电分相”。当过分相，机车要提前退级、断电，并靠惯性滑过“电分相”。过去之后再重新给电、进级行驶。对于高速行驶列车，人工操作几乎不可能。
- 高速铁路“电分相”处一般有100m左右的无电区，电力机车只能靠惯性通过。当“电分相”处于上坡的长大坡道线路时，机车牵引满载的列车通过“电分相”就十分困难，

解决方法：设自动过分相转换装置，但装置复杂，且因电压高，转换动作频繁，使其准确性和可靠度在应用中受到严峻挑战，至今在使用中的技术缺陷依然存在，更重要的是不能解决系统不平衡问题。



1.4 交流牵引供电系统结构和原理



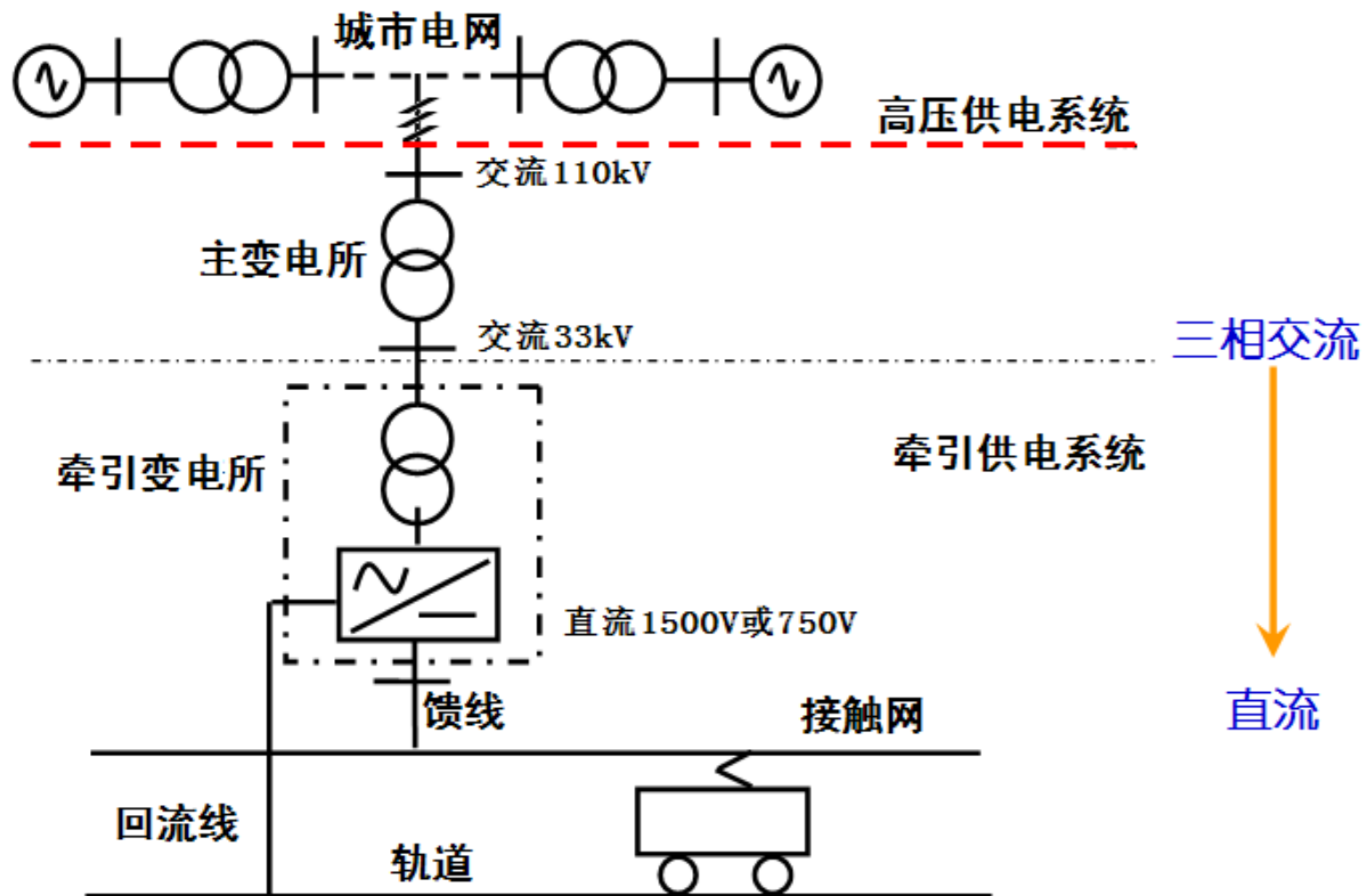
开闭所：只有配电设备而无牵引变压器，仅用于接受和分配电能。

作用：(1) 扩大馈线回路数，不进行电压变换；(2) 保证枢纽站、场装卸作业和接触网分组检修的灵活性，可靠性。





1.5 直流牵引供电系统结构和原理





1.5 直流牵引供电系统结构和原理

城市轨道交通供电系统的各单元

- **发电厂（站）**：城市电网发出的电能的中心；
- **升压变压器**：发电厂的发电机发出的电能，要先经过升压变压器升高电压；
- **电力网**：将高压电流通过三相传输线输送到主变电所或区域变电所；
- **主变电所**：将来自城市电网的高压交流电经过降压转变为轨道交通系统中压交流电；
- **直流牵引变电所**：将中压交流电整流为轨道交通系统规定的直流电能；
- **馈电线**：将牵引变电所的直流电送到接触网上；
- **接触网**：沿车辆走行轨假设的特殊供电线路，轨道车辆通过受流器与接触网直接接触获得电能；
- **走行轨道**：是电动列车的走行轨，走行轨道构成牵引供电回路的一部分，又是行车信号电路的一部分；
- **回流线**：将轨道回流回送到牵引变电所。





2

交流牵引供电方式





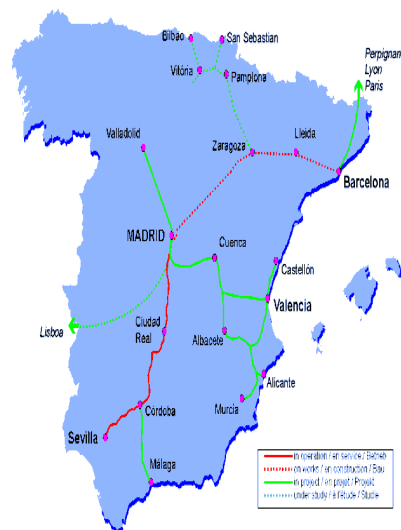
2.1 世界主要高速铁路国家电铁供电方式

韩国



汉城～釜山全长412 km，采用AT供电方式，运营速度为300km/h

西班牙



马德里～塞维利亚（471km，250km/h）采用直接供电方式，马德里～巴塞罗那（730km，350km/h）采用AT供电方式

意大利



都灵～佛罗伦萨，罗马～那不勒斯（620km，300km/h）采用AT供电方式

另外，中国台湾的台北～高雄高速铁路也采用AT供电方式



2.1 世界主要高速铁路国家电铁供电方式

50Hz/60Hz、25kV牵引供电方式（300~350km/h）

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



2.1 世界主要高速铁路国家电铁供电方式

目前单相工频25kV牵引网供电方式主要有：

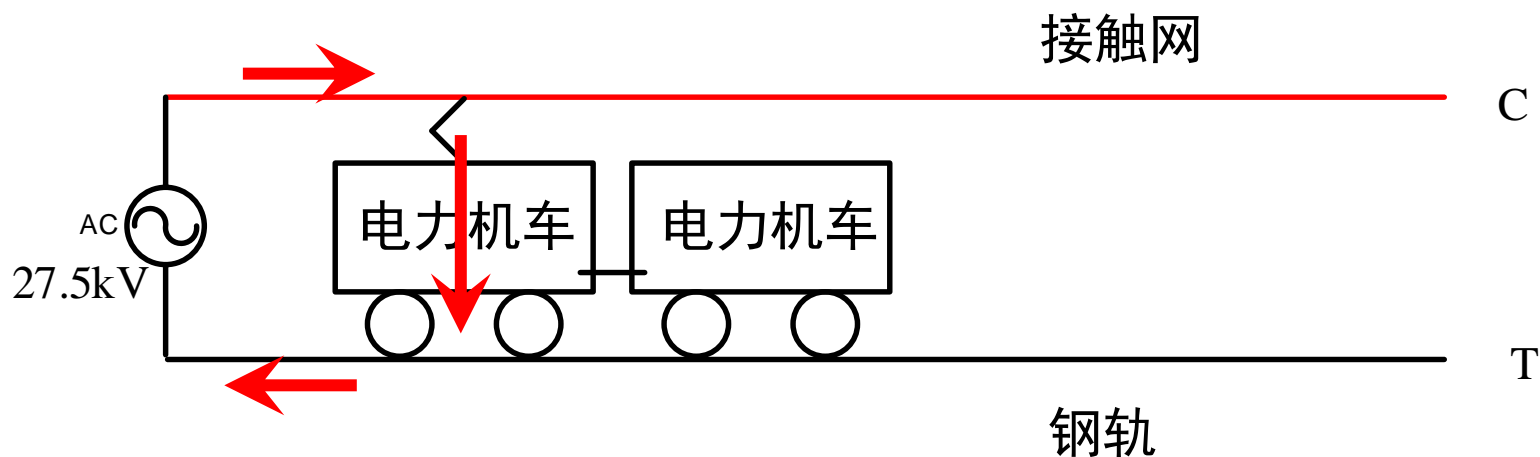
- (一) 直接供电方式(TR)
- (二) BT(吸流变压器)供电方式
- (三) 带回流线的直接供电方式(TRNF)
- (四) AT(自耦变压器)供电方式
- (五) CC供电接触网不分段供电方式





2.2 牵引网供电方式

➤ 直接供电方式 (TR)



牵引电流通过电力机车后直接从钢轨或大地返回牵引变电所。

结构简单，投资最少，维护费用低。

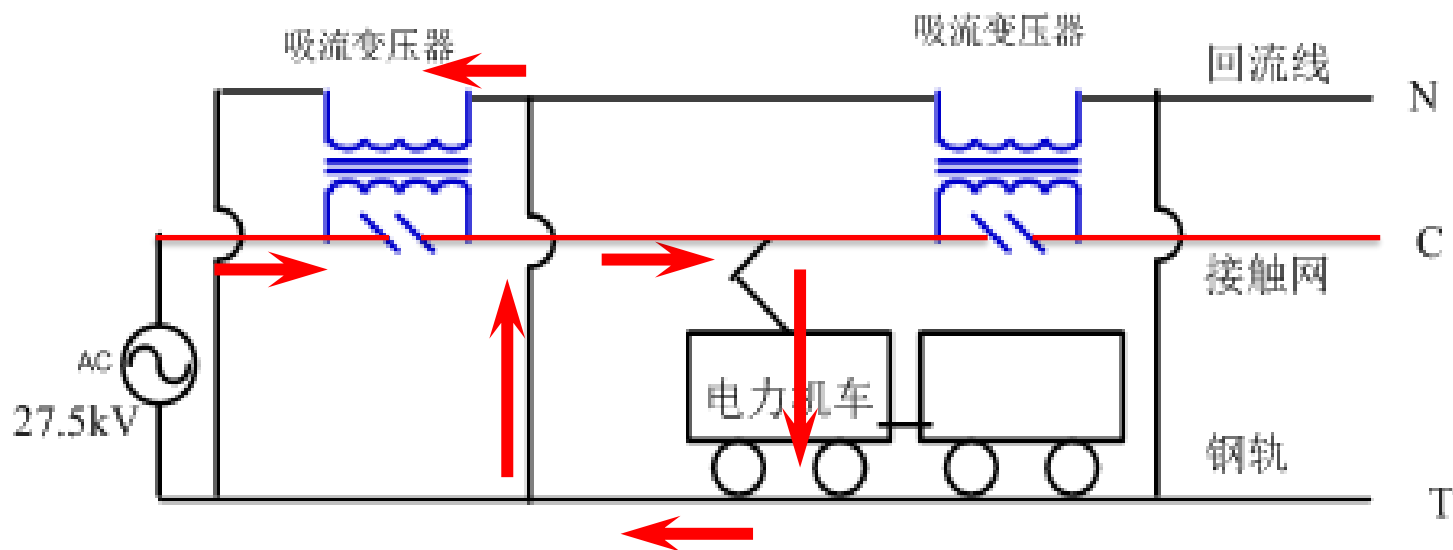
在负荷电流较大的情况下，钢轨电位高；对弱电系统的电磁干扰较大





2.2 牵引网供电方式

➤ BT(吸流变压器)供电方式



吸流变压器变比：1：1

长回路中回流线电流=接触网电流，方向相反；长回路中钢轨电流为0。

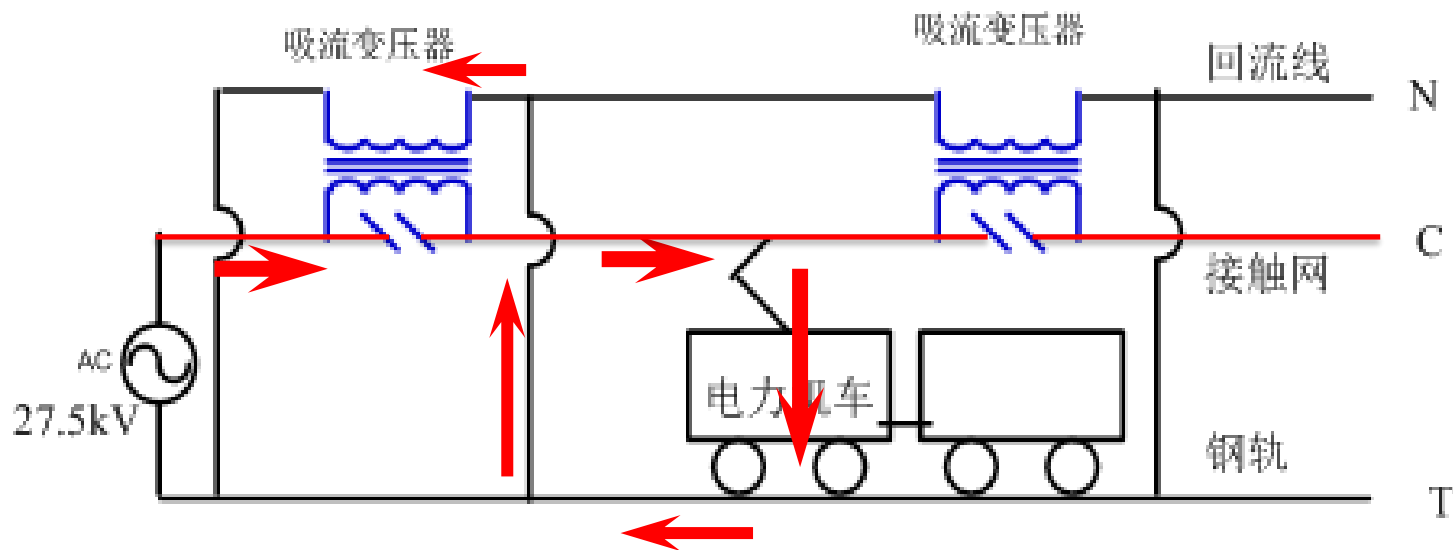
优点：电磁兼容性能好，对周围环境影响小，钢轨电位低





2.2 牵引网供电方式

➤ BT(吸流变压器)供电方式



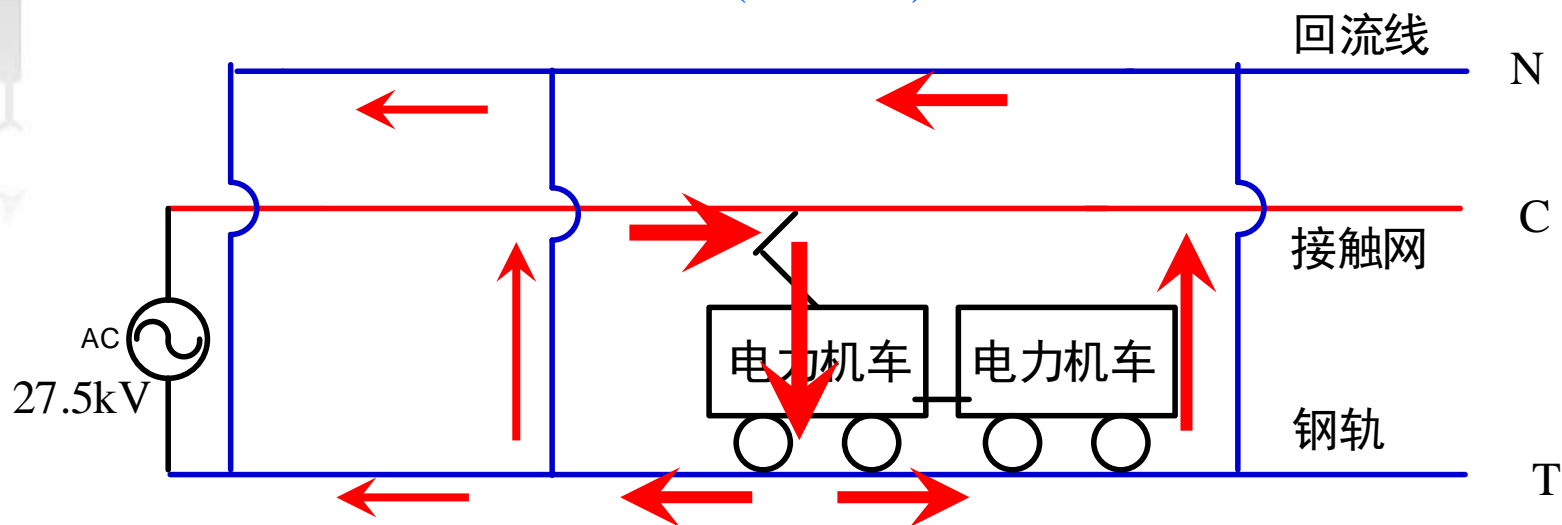
接触网中串接吸流变压器，间隔约1.5km-4km。牵引网阻抗增大，供电臂压降增大，牵引变电所的供电距离缩短。

每一个BT串入处，使接触导线分段，大大影响高速列车运行的安全性及列车速度



2.2 牵引网供电方式

➤ 带回流线的直接供电方式(TRNF)



回流线与钢轨并联，牵引网阻抗降低，供电距离增长，使供电臂延长30%及以上；

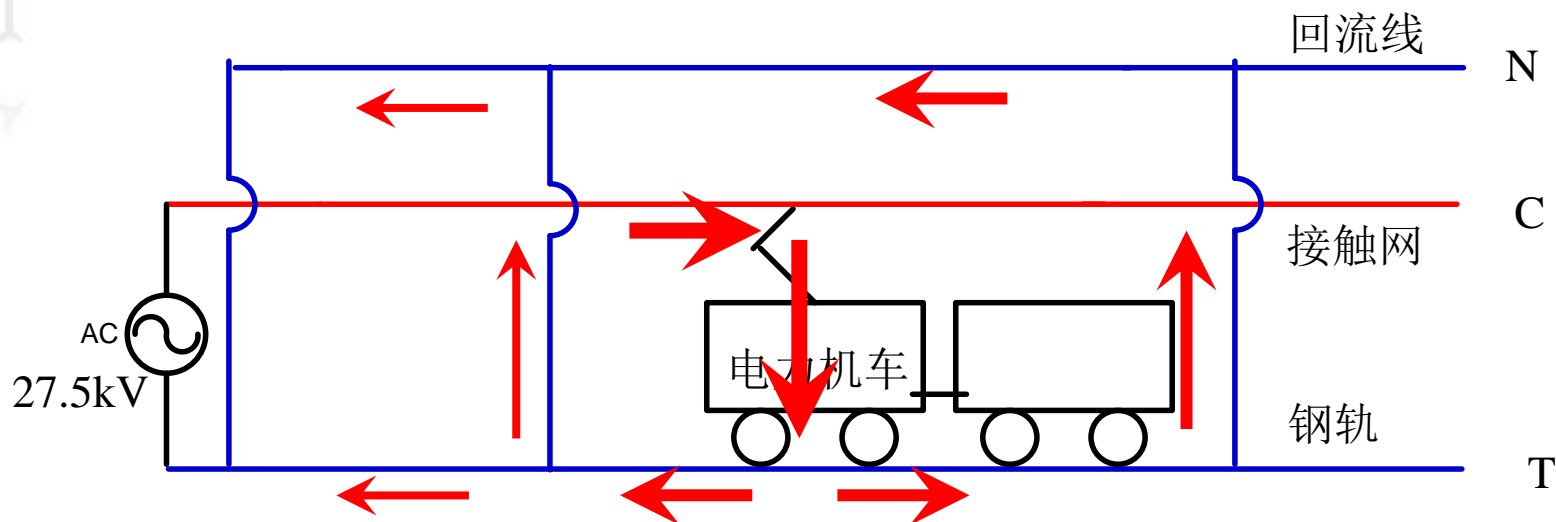
钢轨电流部分由回流线回流，对弱电系统的电磁干扰减小，钢轨电位降低。

相对BT方式，结构简单，投资少，维护费用低；牵引网阻抗减小，供电距离增长。



2.2 牵引网供电方式

➤ 带回流线的直接供电方式(TRNF)



相对BT方式，结构简单，投资少，维护费用低；牵引网阻抗减小，**供电距离增长**。





2.2 牵引网供电方式

➤ 带回流线的直接供电方式(TRNF)



接触线

回流线

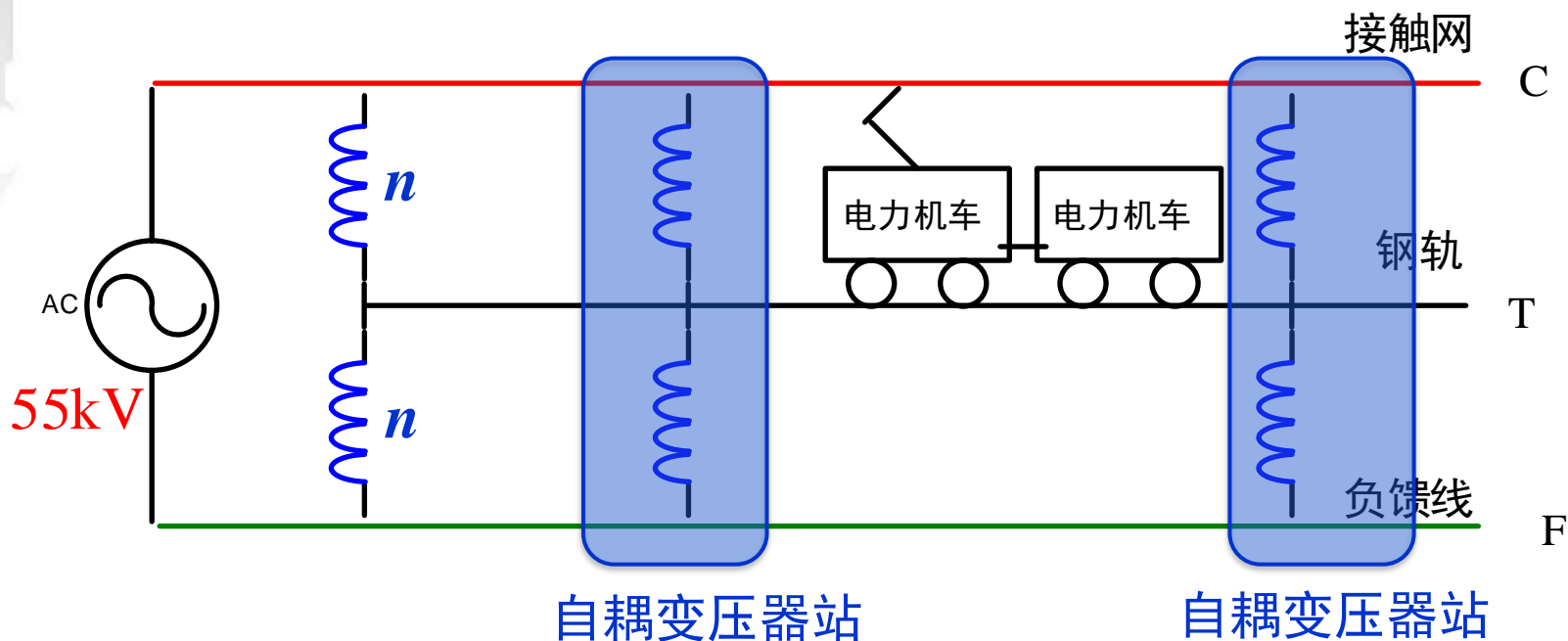
钢轨





2.2 牵引网供电方式

➤ AT(自耦变压器)供电方式



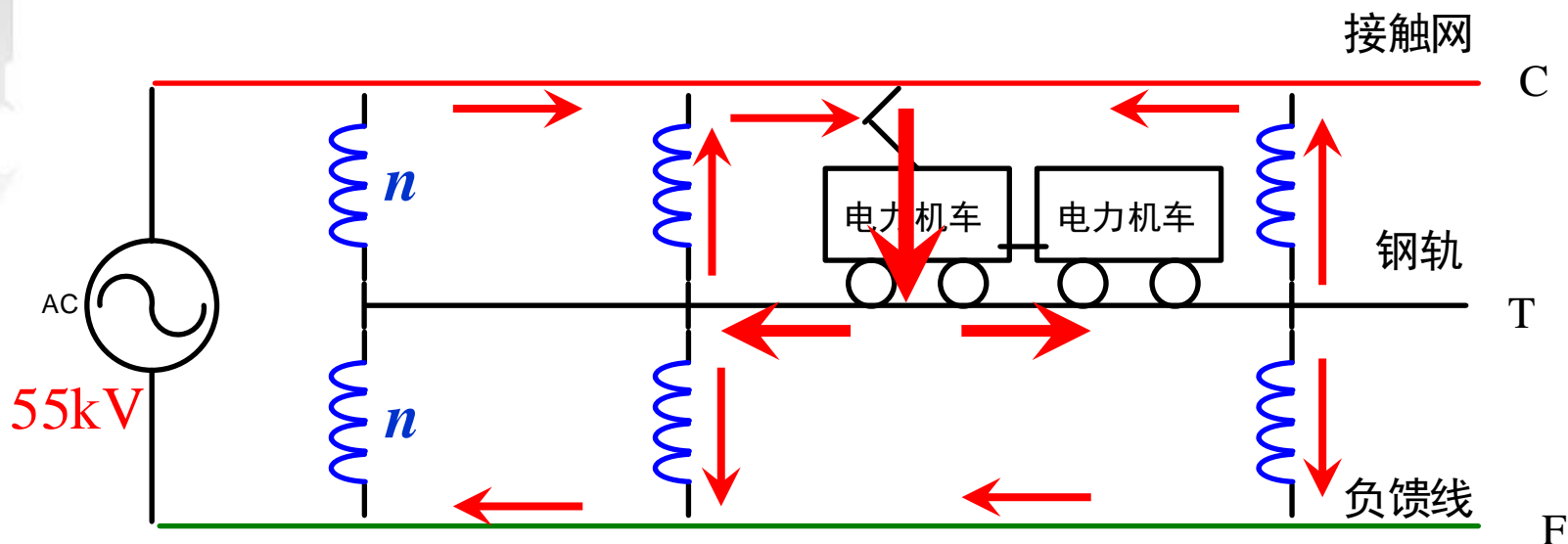
自耦变压器站：自耦变压器（AT）供电方式时，沿线每隔10～15 km设置一台自耦变压器，**一般与分区所、开闭所合并**，以利运行管理。





2.2 牵引网供电方式

➤ AT(自耦变压器)供电方式



电源电压提高一倍，输电电压提高一倍

传输相同的功率

电流降为 $1/2$

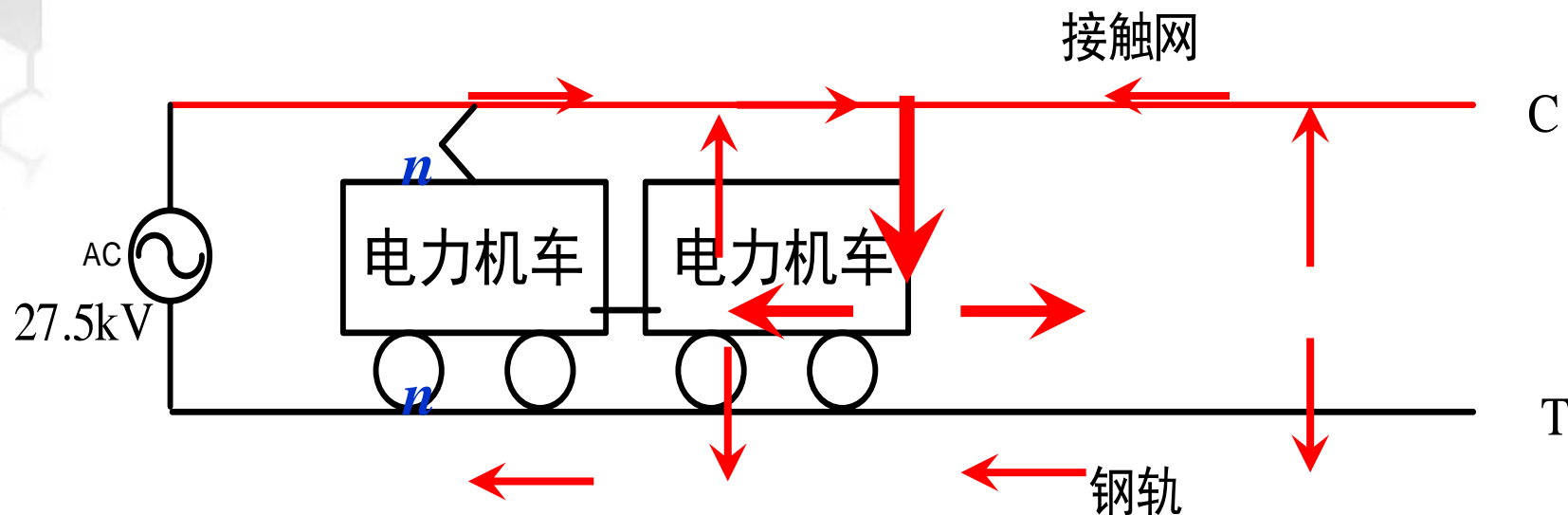
电压损失降为 $1/4$ （实际略大）





2.2 牵引网供电方式

➤ AT(自耦变压器)供电方式



更能适应大功率负荷的供电，功率输送能力强，供电距离远，可减少牵引变电所数量，减少电分相数目，机车通过分相中性段短时失电产生的速度和功率损失得到降低。





2.2 牵引网供电方式

AT(自耦变压器)供电方式

- 更能适应大功率负荷的供电，功率输送能力强，**供电距离远**，具有更大的供电潜力，特别是越区供电能力；
- 变电所间距大，**可减少牵引变电所数量**，可节省电力系统供电线路的投资。
- 牵引变电所数量减少，**可减少电分相数目**，机车通过分相中性段短时失电产生的速度和功率损失得到降低，改善列车运行环境和延长车上设备使用寿命。
- 长回路中，**接触网电流=负馈线电流=1/2机车电流**，**减少对通信线的干扰**，降低通信线路迁改费用；长回路中，**钢轨电流=0**，钢轨电位降低。





2.2 牵引网供电方式

➤ AT (自耦变压器) 供电方式



承力索

接触线

正馈线

架空地
线/保
护线

钢 轨





2.2 牵引网供电方式

对比及应用：

- ✓ **BT方式**牵引网单位阻抗高，功率输送能力较弱
- ✓ **直接供电方式**在负荷电流较大的情况下，对通讯线路干扰大，钢轨电位高的缺点更为突出
- ✓ **AT和带回流线直供方式**均能满足300km/h及以上高速牵引。两者相比，AT供电方式更能适应大功率负荷的供电，同时由于电分相数目的减少。但AT供电方式接触网结构复杂，供变电设施较多，运营维护难度较大。

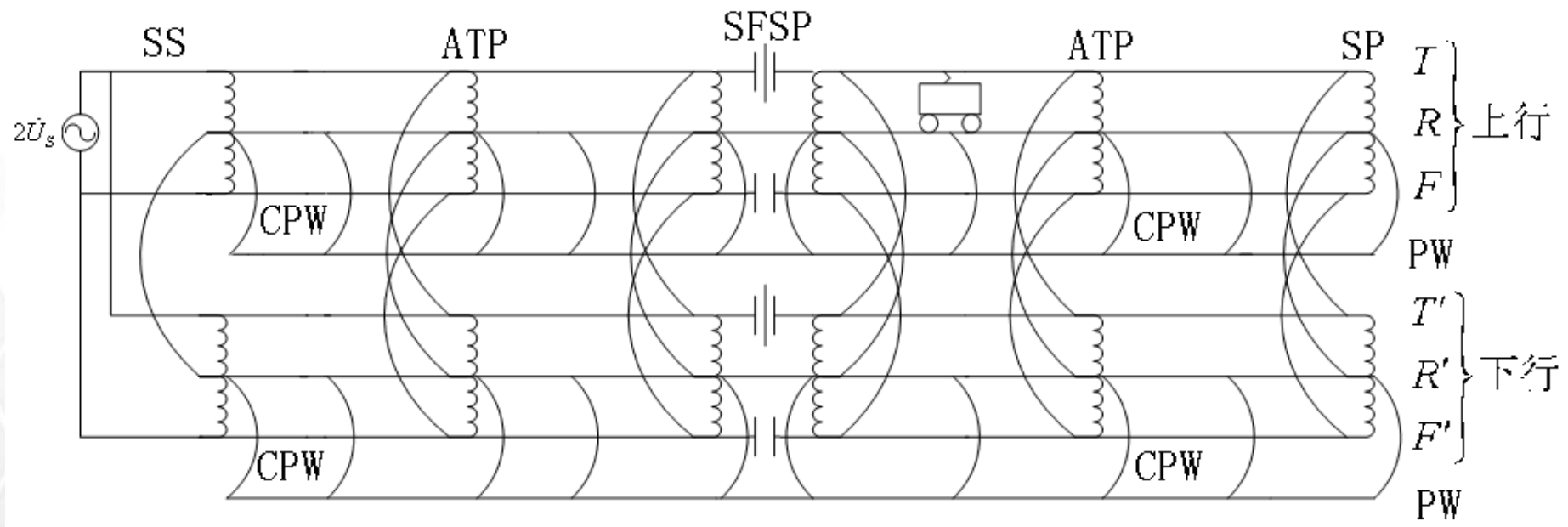




2.2 牵引网供电方式

➤ 全并联AT供电方式

AT开闭所 (SFSP): AT牵引网供电臂一般较长, 可达40km—50km。为了减小牵引网故障时的停电范围, 常在供电臂中间设置开闭所, 实行保护分段。在重要的区段站、编组站或电力机务段所在站, 也可设置开闭所进行分段。

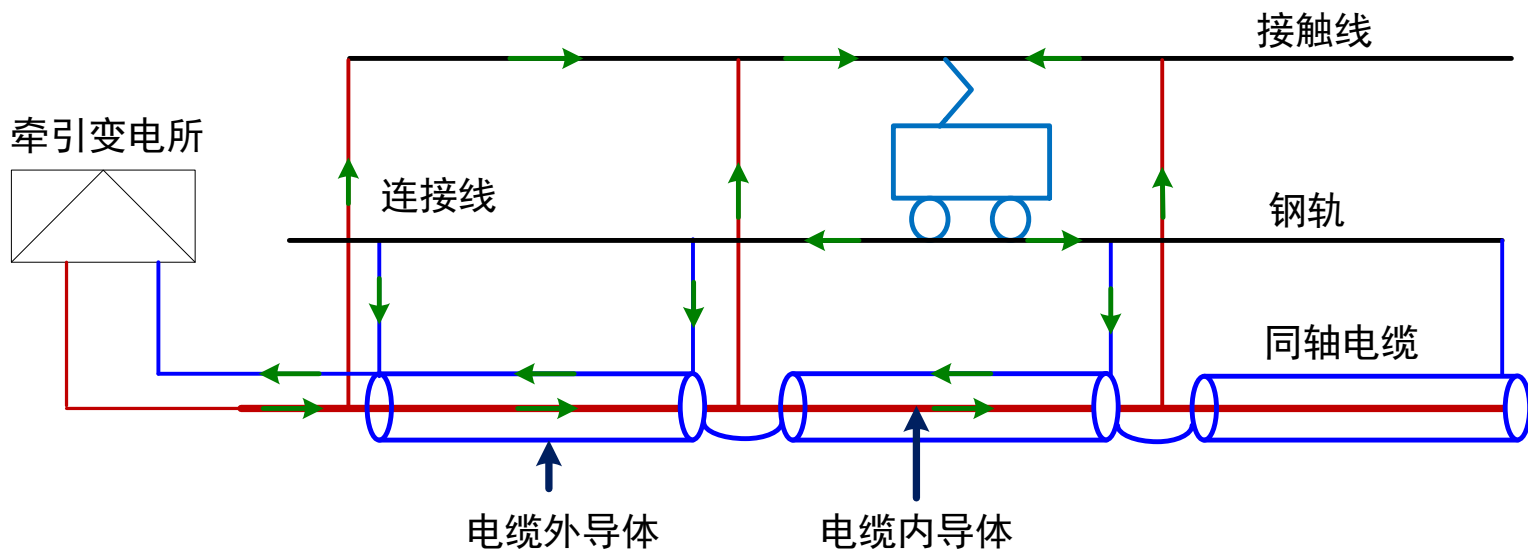


接触网保护线 (PW)



2.2 牵引网供电方式

➤ CC供电方式

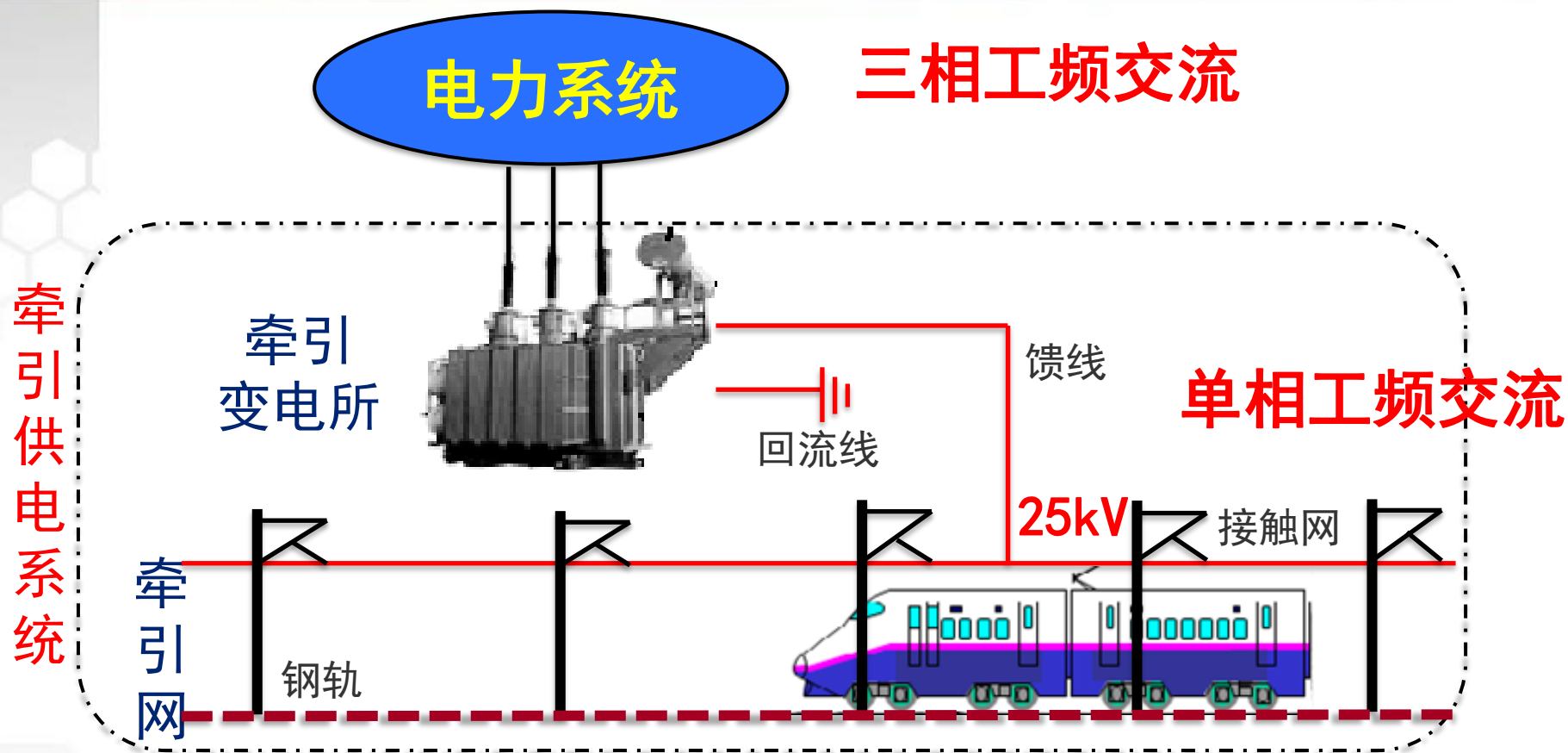


将同轴电力电缆沿电气化铁路装设，电缆内导体与接触悬挂相连，用作**正馈线**，外导体与轨道相连，用作**负馈线**，每隔一定距离分成一个供电区段。

特点：同轴电力电缆供电方式的供电分区长度，对其防护效果影响较大。若供电分区长，“**半段效应**”影响就大，对邻近通信线路的防护效果就差。但由于电缆的接续工艺要求高，若供电分区过短，也会带来不利影响，尤其当采用接触网(电)分段方式时，会恶化行车条件。



2.3 牵引供电系统与电力系统的关系



电力系统

如何确保对**负荷**的安全、可靠供电？



如何减小负荷对**系统**的影响？

牵引
负荷

单相，非线性，移动，冲击性



2.4 我国牵引供电系统制式

课程的内容就是一个爱国主义和文化自信的典型案例



讨论

单相工频（50Hz）25kV
交流电

“由曹建猷院士和潘启敬教授在我国铁路领域首创”，曹院士系麻省理工毕业，该制式在人民日报发文确定





2.5 常规牵引供电系统存在的问题

常规牵引供电系统存在的问题

- 两相供电时，为求得对电力系统的平衡，变电所采取换相连接，导致 27.5 kV 侧接触网**电分相**出现。高速和重载要求机车受电弓平滑连续受流，**电分相**由于机械、电气的弱点，成为速度和牵引力损失的主要原因，最薄弱环节之一。
- **自动过分相装置**是解决问题的方法之一。
- 高速、重载运输都需要大容量供电，为满足国家标准中电力系统对电气化铁道以**负序**为突出的电能质量限制指标，原有两相供电方式所使用的补偿技术已无法适应。
- 我国高铁可能是高、中速混跑模式，除负序外，无功和谐波仍然存在，**电能质量**不能改善，面临高价电费。速度和牵引力损失使列车的速差进一步拉大，**影响整体运能**。





复习思考题

- 1、牵引负荷的特性有哪些？
- 2、简述交流牵引供电系统的组成及其原理？
- 3、简述直流牵引供电系统的组成及其原理？
- 4、牵引供电系统与其他供电系统的区别有哪些？
- 5、交流牵引网的供电方式有哪几种，分别有什么样的特点？
- 6、交流牵引供电系统的特殊问题有哪些？可采取什么样的措施解决？
- 7、什么是电分相，为什么要采取电分相？
- 8、自动过分相有哪几种形式，各有何优缺点？

