



# 电力牵引传动与控制

## 第二章 设计基础

苟 斌 副教授

Email: [bingo@swjtu.edu.cn](mailto:bingo@swjtu.edu.cn)

2022 年 3 月

西南交通大学电气工程学院





# 第二章主要内容

- 列车牵引控制基础
- 列车牵引传动系统



# 2.1 列车牵引控制基础

- 列车运行过程的数学描述
- 列车牵引力与制动力
- 列车阻力
- 列车牵引特性
- 粘着控制
- 牵引供电系统



## 2.1 列车牵引控制基础

### □ 列车运行过程的数学描述

- **控制相关因素**：牵引供电、行车信号、线路断面、限速、列车编组、列车牵引/制动性能及司机的驾驶经验等
- **控制目标**：安全、正点、高速高密度运行、舒适性、停车精度、能量消耗
- **控制核心问题**：针对不同的运行环境实时的控制列车的牵引力/制动力，达到控制目标



# 2.1 列车牵引控制基础

## □ 列车运行过程的数学描述

### ● 以时间为独立变量的运动方程

$$\frac{dv}{dt} = \xi \cdot c$$

$$\frac{ds}{dt} = v$$

$$J = \int_0^T p(t)dt$$

$c$	作用于列车上的单位合力 (N/kN)
$\xi = \frac{0.00981}{1+\gamma}$	加速度系数
$\gamma$	回转质量系数 (一般取0.06)
$J$	列车能耗(J)
$p(t)$	列车单位时间的能耗(kW)
$T$	整个行程所用的时间(s)
$v$	列车运行速度(m/s)
$s$	列车行走距离(m)
$t$	列车运行时间(s)



## 2.1 列车牵引控制基础

### □ 列车运行过程的数学描述

- 推出以距离为变量的运行方程

$$\frac{dv}{ds} = \frac{\xi \cdot c}{v} \quad \frac{dt}{ds} = \frac{1}{v} \quad J = \int_0^s \frac{p(s)}{v} d(s)$$

- 列车运动方程的一般描述形式

$$v \frac{dv}{ds} = \xi(f(v) - \omega_0(v) - g(s))$$



## 2.1 列车牵引控制基础

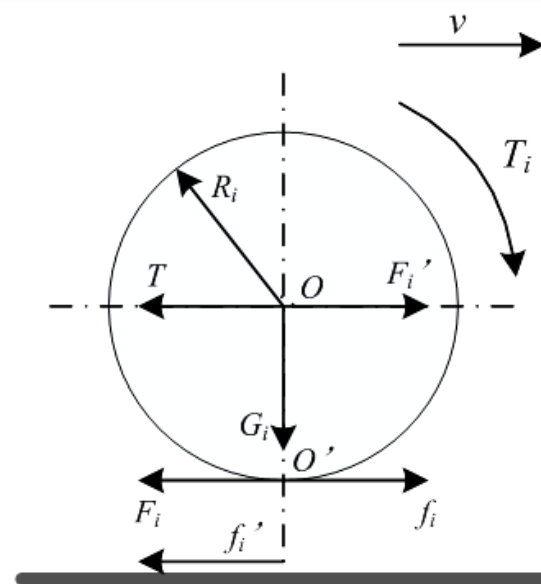
### □ 列车牵引力与制动力

#### ● 粘着的概念

- 动轮与钢轨接触处，由于正压力而出现的保持轮轨接触处相对静止、而不相对滑动的现象

#### ● 列车牵引力

- 动轮轮轴牵引力  $f_i$
- 列车轮轴牵引力  $F$





## 2.1 列车牵引控制基础

### □ 列车运行阻力

- 分为基本阻力和附加阻力
- 基本阻力是零部件之间、列车表面与空气之间、车轮与钢轨之间的摩擦和冲击产生的
- 附加阻力由线路坡道、曲线半径、桥梁隧道等线路条件决定





## 2.1 列车牵引控制基础

### □ 列车运行阻力

$$W_0 = (a + b \cdot v + c \cdot v^2) \cdot M \cdot g$$

式中： $W_0$ —列车运行基本阻力 (N)

$M$ —牵引质量 (t)

$v$ —列车运行速度 (km/h)

$g$ —重力加速度 ( $\text{m/s}^2$ )

$a$ 、 $b$ 、 $c$ —与机械阻力相关的系数

● 列车阻力通常以单位阻力表示

$$\omega_0(v) = \frac{W_0}{M} (\text{N/t})$$

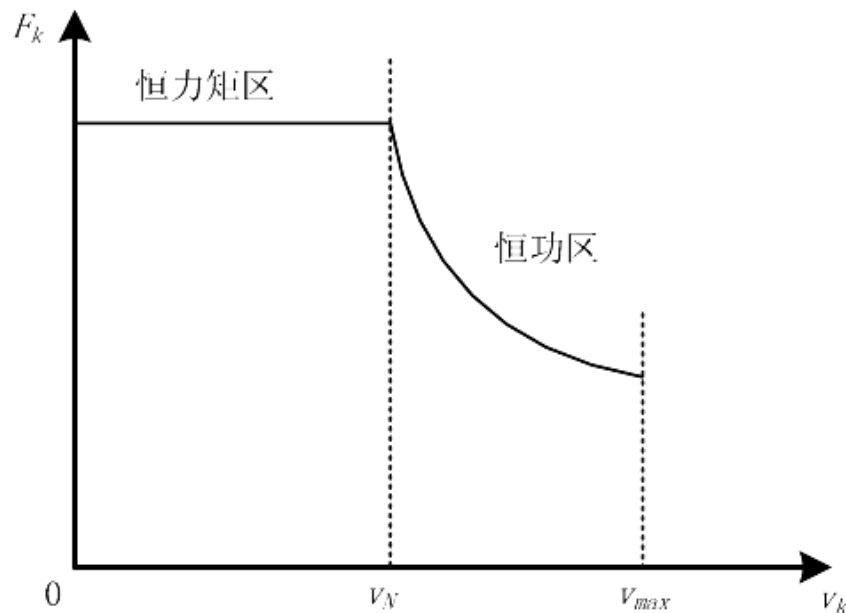


## 2.1 列车牵引控制基础

### □ 列车牵引特性

- 用列车轮缘牵引力/制动力与轮缘线速度的关系曲线表示，是计算列车牵引与制动性能最重要的原始数据
- 恒牵引力起动，恒功率运行
- 牵引力与功率的关系

$$F_k = \frac{P_k \cdot 3.6}{V_k} (\text{kN})$$





## 2.1 列车牵引控制基础

### □ 列车牵引特性

#### ● 牵引特性的计算：

- **确定最高速度时的列车牵引力**：将确定后的机车牵引功率、最大运行速度代入下式，即可求出最高速度时的牵引力

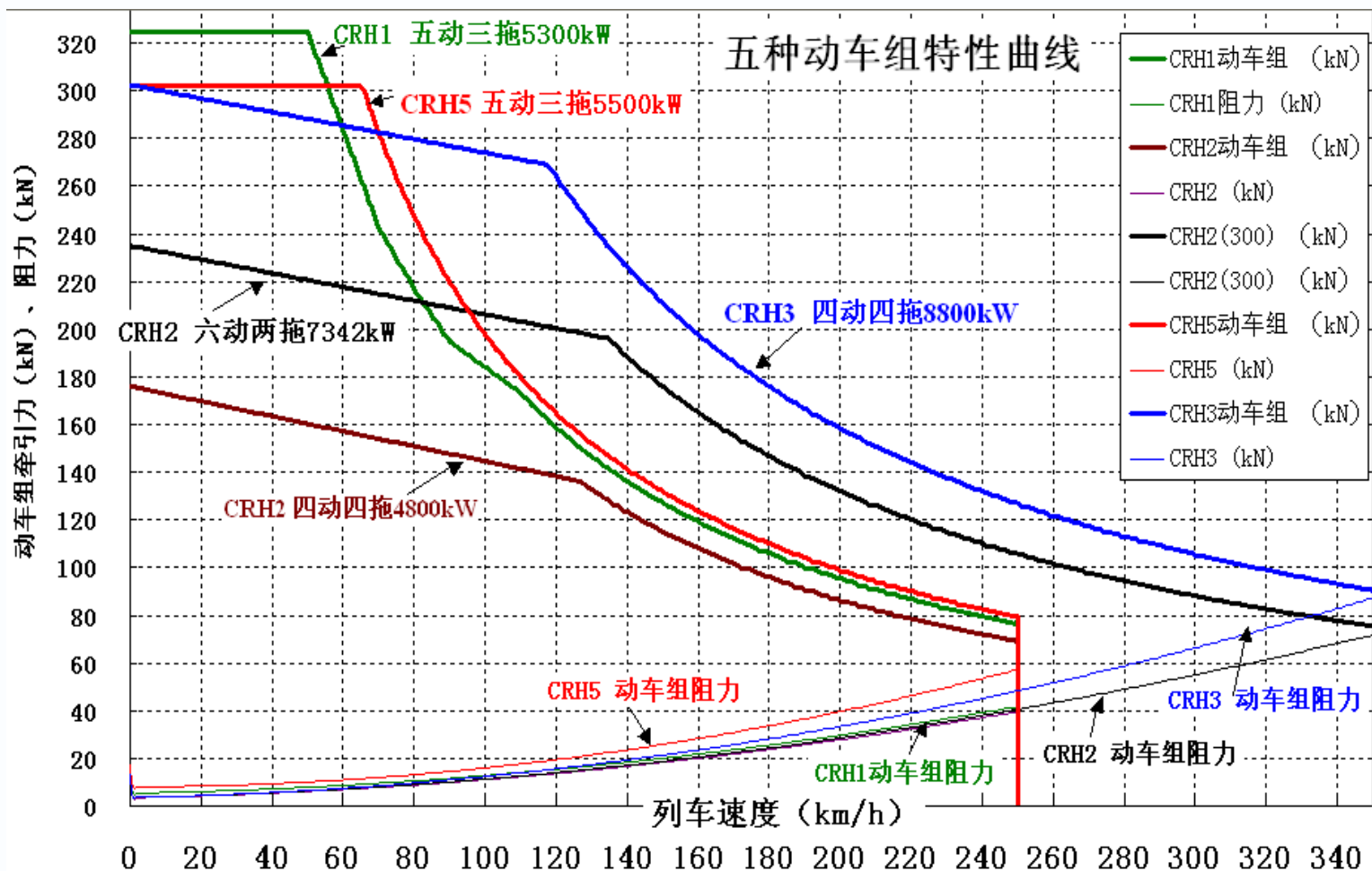
$$F_k(v_{\max}) = \frac{3.6P_k}{v_{k\max}}$$

- **确定列车起动牵引力**：根据列车起动最大加速度和起动平均加速度的要求确定起动牵引力
- **确定恒牵引力、恒功率运行的转折点**：根据起动牵引力与恒功率曲线，求出其相交点即为恒牵引力、恒功率运行的转折点



# 2.1 列车牵引控制基础

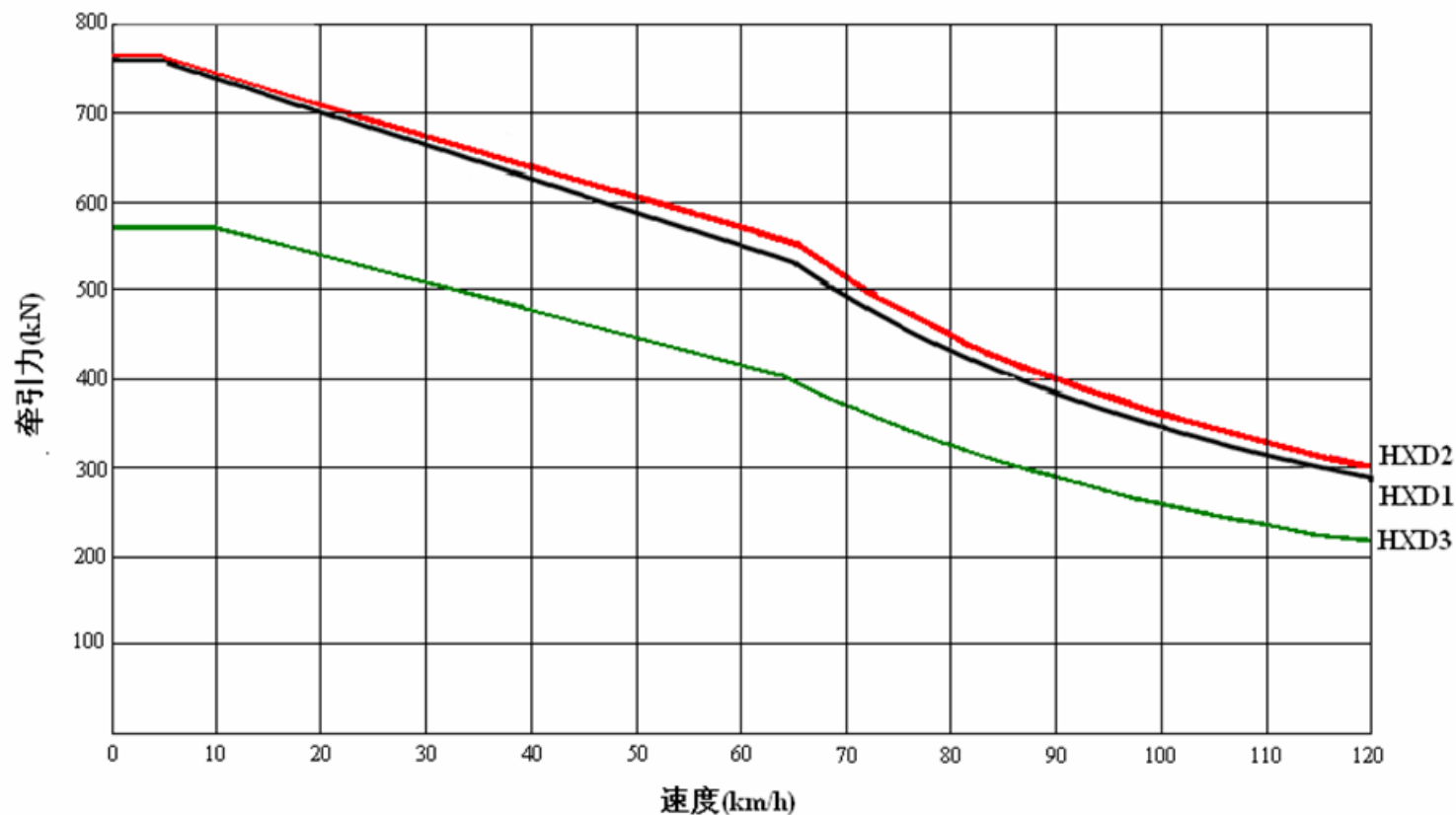
## □ 列车牵引特性





# 2.1 列车牵引控制基础

## □ 列车牵引特性





# 2.1 列车牵引控制基础

## □ 黏着控制

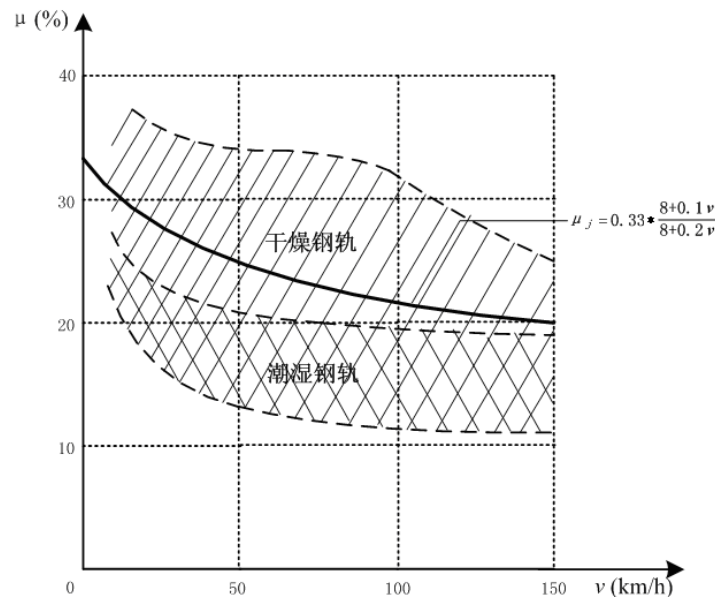
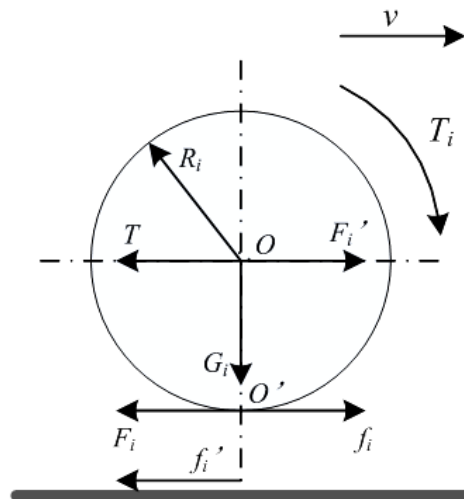
### ● 粘着系数

- 与动轮踏面和钢轨表面状态
- 线路质量
- 运行速度的高低
- 列车有关部件的状态

### ● 计算公式

$$\text{干燥: } \mu_s = 0.0624 + \frac{45.6}{260 + v} \quad \mu_0 = 0.24$$

$$\text{潮湿: } \mu_s = 0.0405 + \frac{13.55}{120 + v} \quad \mu_0 = 0.15$$





# 2.1 列车牵引控制基础

## □ 黏着控制

### ● 空转

- 牵引时，牵引力大于轮轨间的粘着力，轮轨间发生相对滑动的现象。

### ● 滑行

- 制动时，制动力大于轮轨间的粘着力，轮轨间发生相对滑动的现象



# 2.1 列车牵引控制基础

## □ 黏着控制

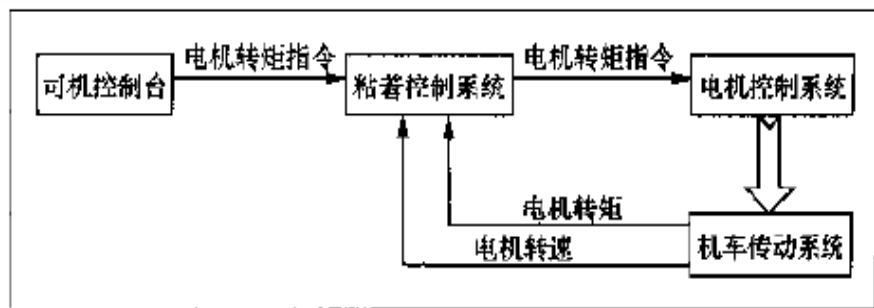


图1 粘着控制系统在机车传动控制中的位置

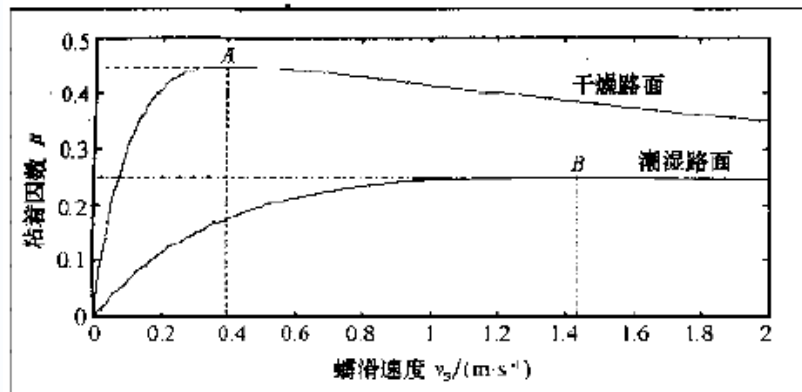


图2 不同路况时的粘着特性曲线

## ● 粘着控制的方法

- 传统方法：在空转和滑行发生后，通过消减电机转矩来实现粘着的利用
- 现代方法：自动搜索粘着峰值点，并使粘着工作点保持在粘着峰值点，从而能够获得较高的粘着利用率





## 2.1 列车牵引控制基础

### □ 牵引供电系统

#### 高速铁路牵引供电的特点

- 满足高速运行的弓网关系;
- 满足可靠稳定的供电要求;
- 满足免维护、少检修、抵御自然环境侵害的要求;
- 动车组自动过分相;
- 供电能力适应高速度、高密度;
- 具有综合一体化远程监控能力。

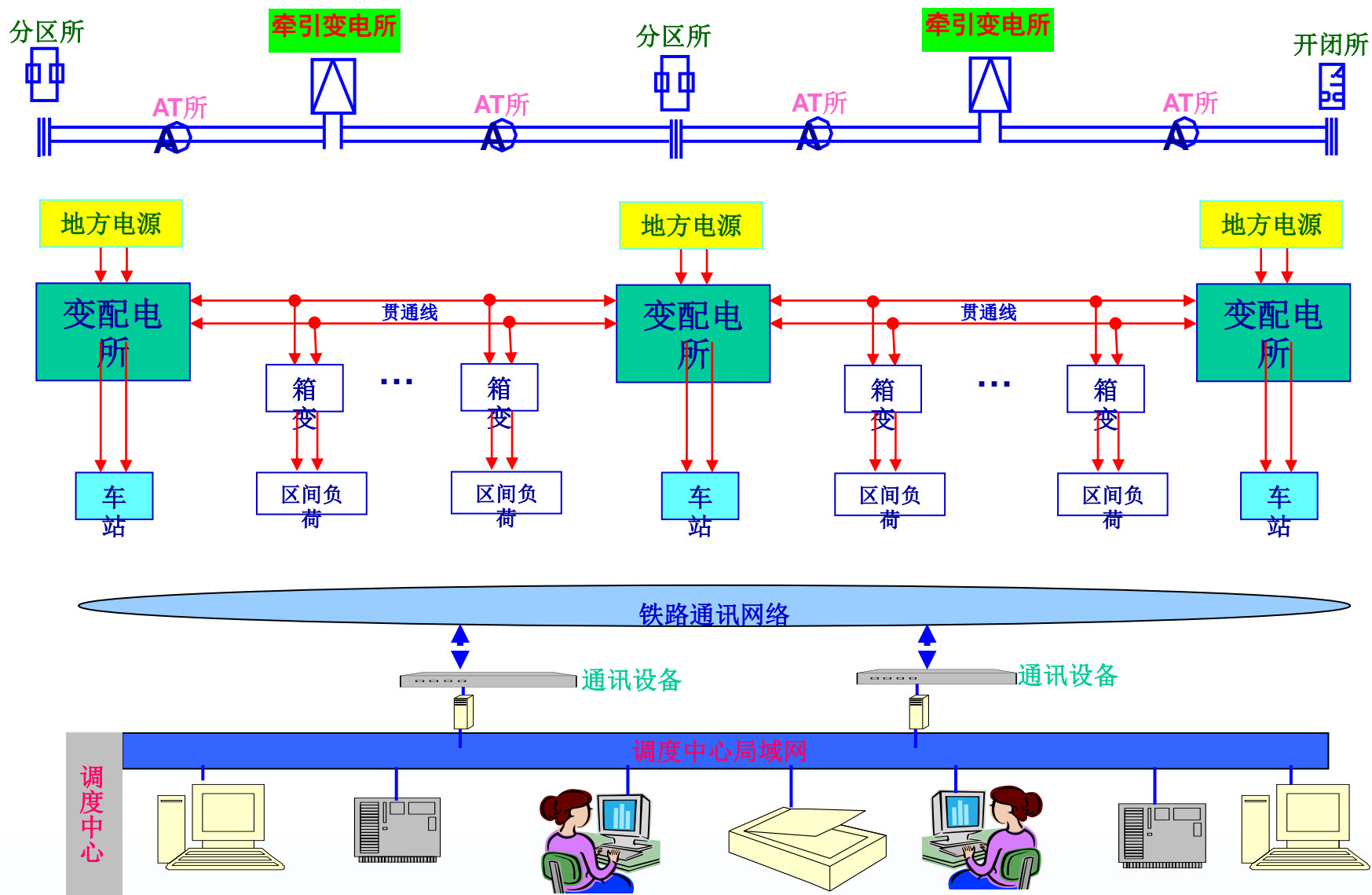
# 牵引供电

## 牵引供电、电力、SCADA系统结构示意图

牵引供电

电力供电

SCADA





## 2.1 列车牵引控制基础

### □ 牵引供电系统——供电系统

- 牵引变电所优先采用电力系统两回独立可靠的220kV电源，互为热备用。
- 高速正线采用 2X25kV (AT) 供电方式。
- 牵引变压器和自耦变压器均采用固定备用方式，牵引变电所按远期布点，按近期选择容量。





## 2.1 列车牵引控制基础

### □ 牵引供电系统——变电系统

- 牵引变压器优先采用单相接线形式。
- 高压侧开关采用SF6断路器或GIS。
- 2X25kV侧采用户内GIS、AIS或户外分散布置断路器。
- 变电所实行无人值班。

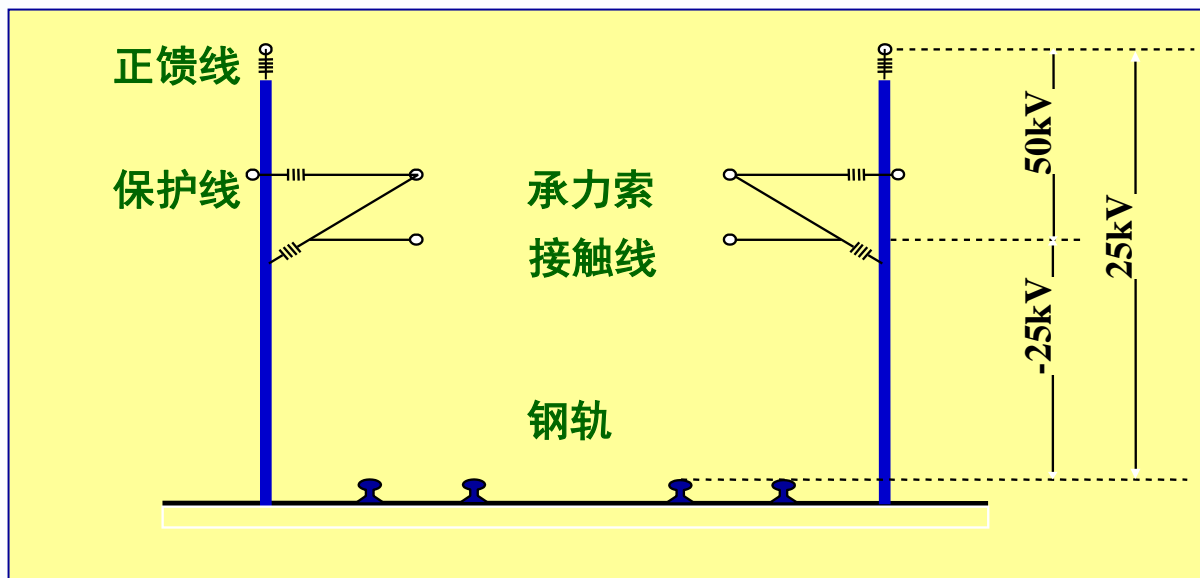




## 2.1 列车牵引控制基础

### □ 牵引供电系统——接触网系统

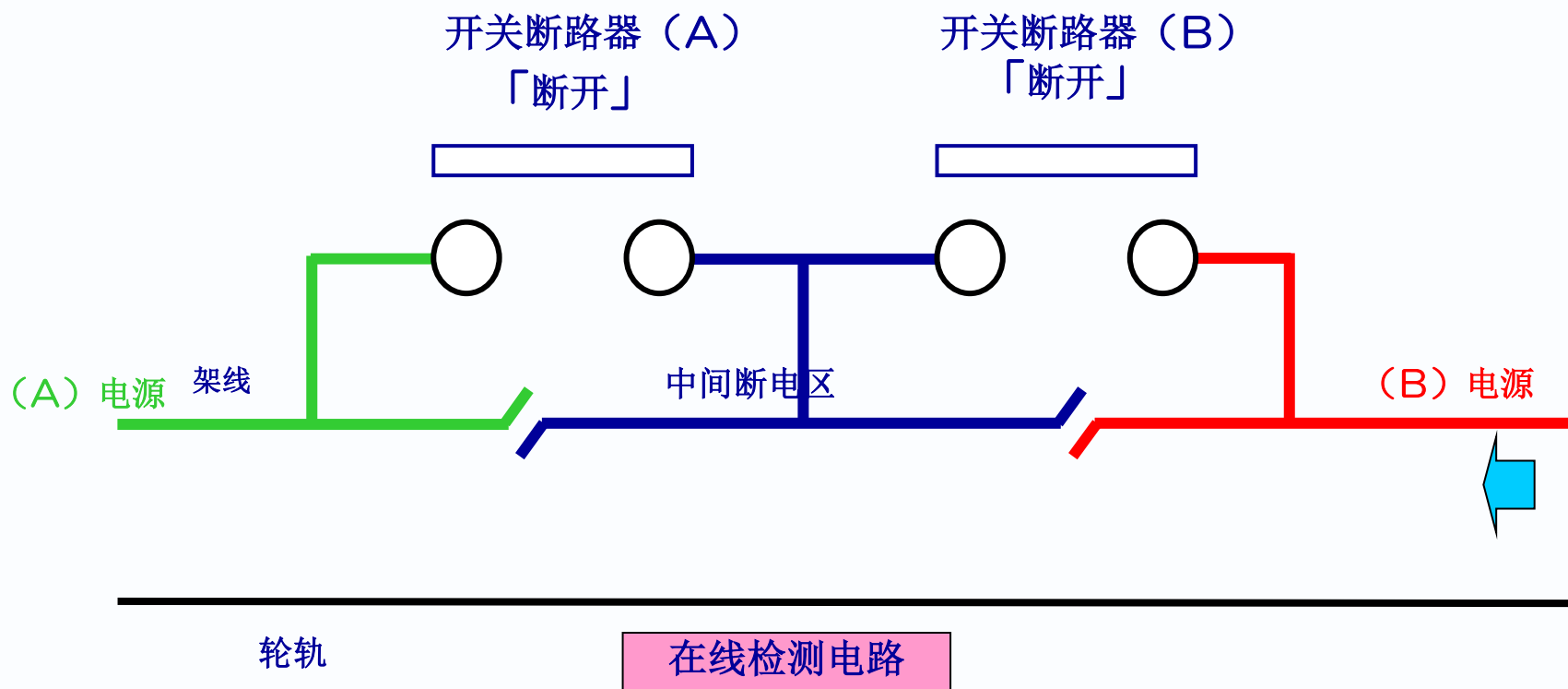
- 接触网采用简单链形悬挂，H形钢柱，绝缘爬距1400mm。
- 接触导线：150mm<sup>2</sup>铜合金，张力不小于25kN。
- 承力索：120mm<sup>2</sup>铜合金，张力不小于20kN。
- 最高运行速度：低于70%的接触悬挂波动传播速度。





## 2.1 列车牵引控制基础

### □ 牵引供电系统——自动过分相

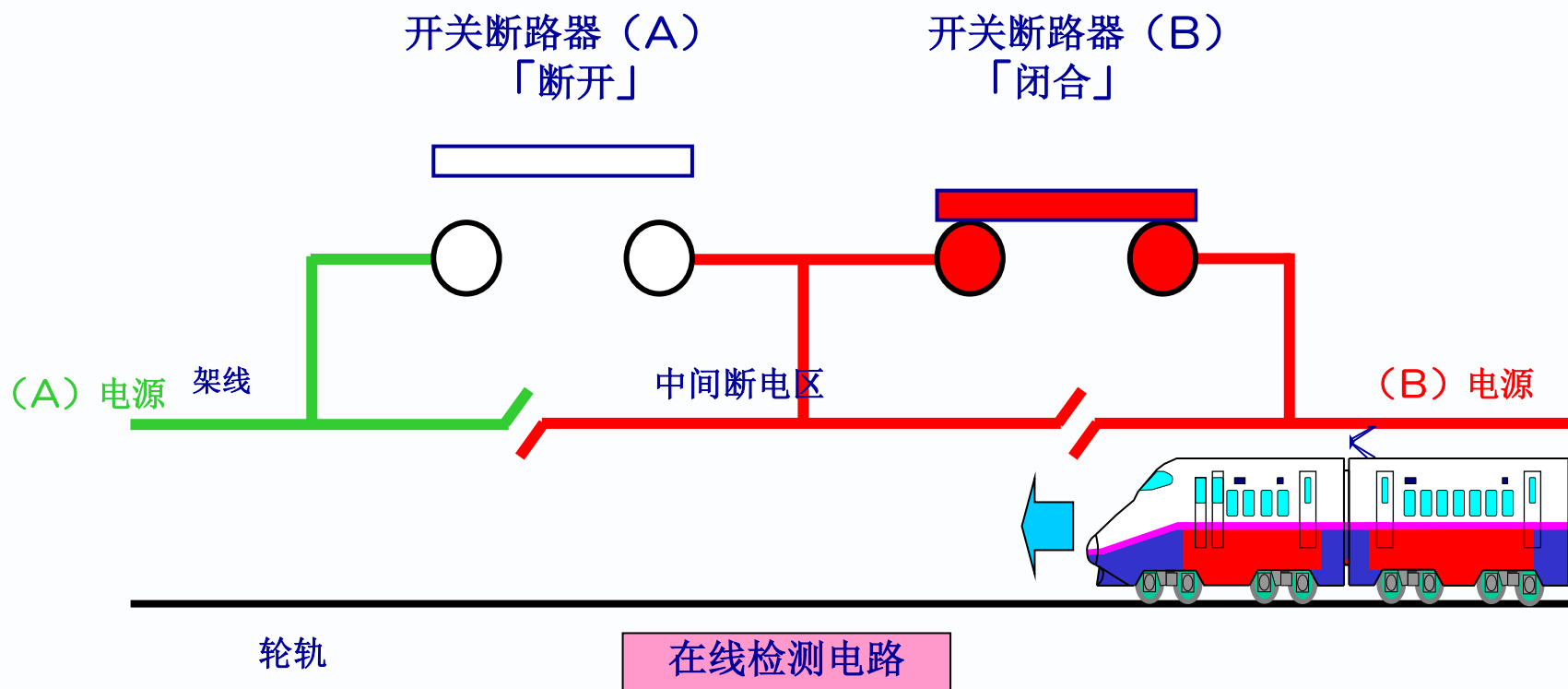


※无列车状态



## 2.1 列车牵引控制基础

### □ 牵引供电系统——自动过分相

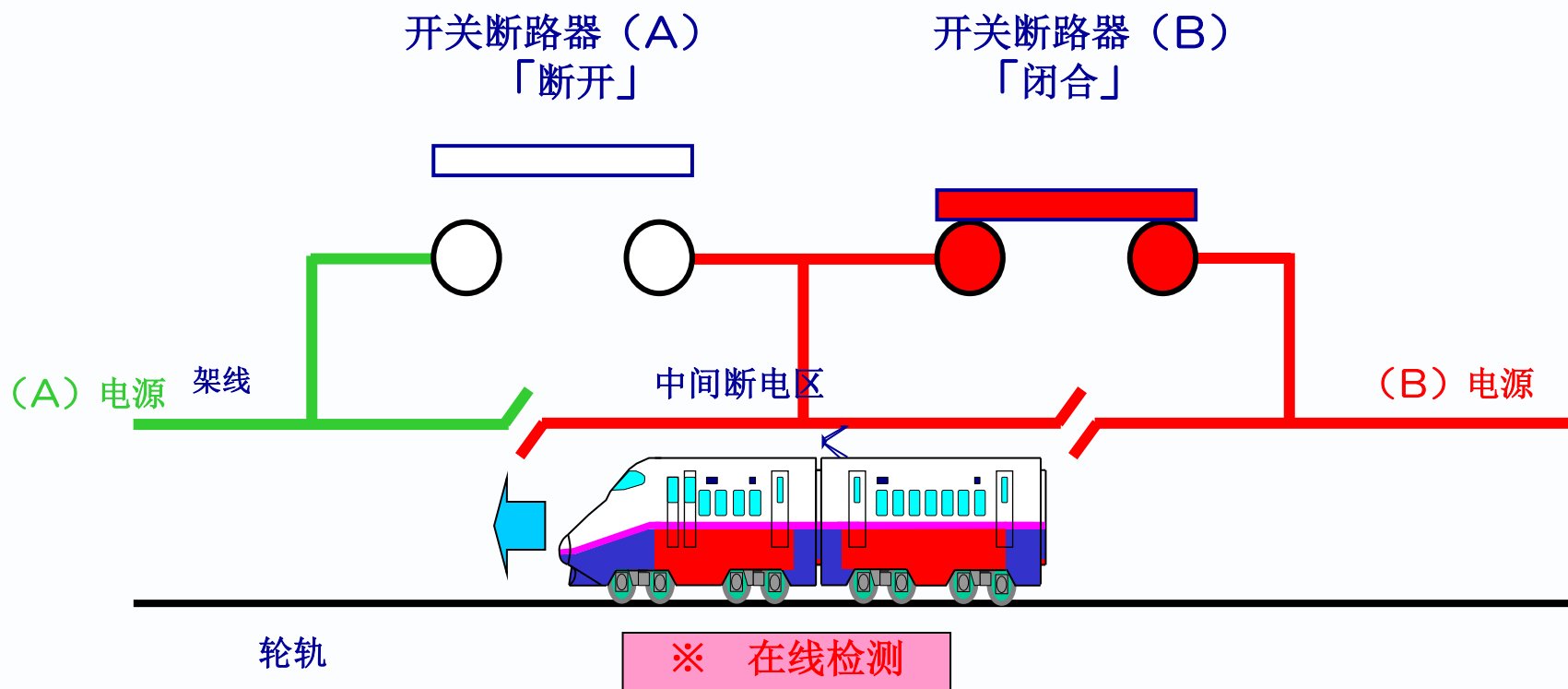


※列车靠近



## 2.1 列车牵引控制基础

### □ 牵引供电系统——自动过分相



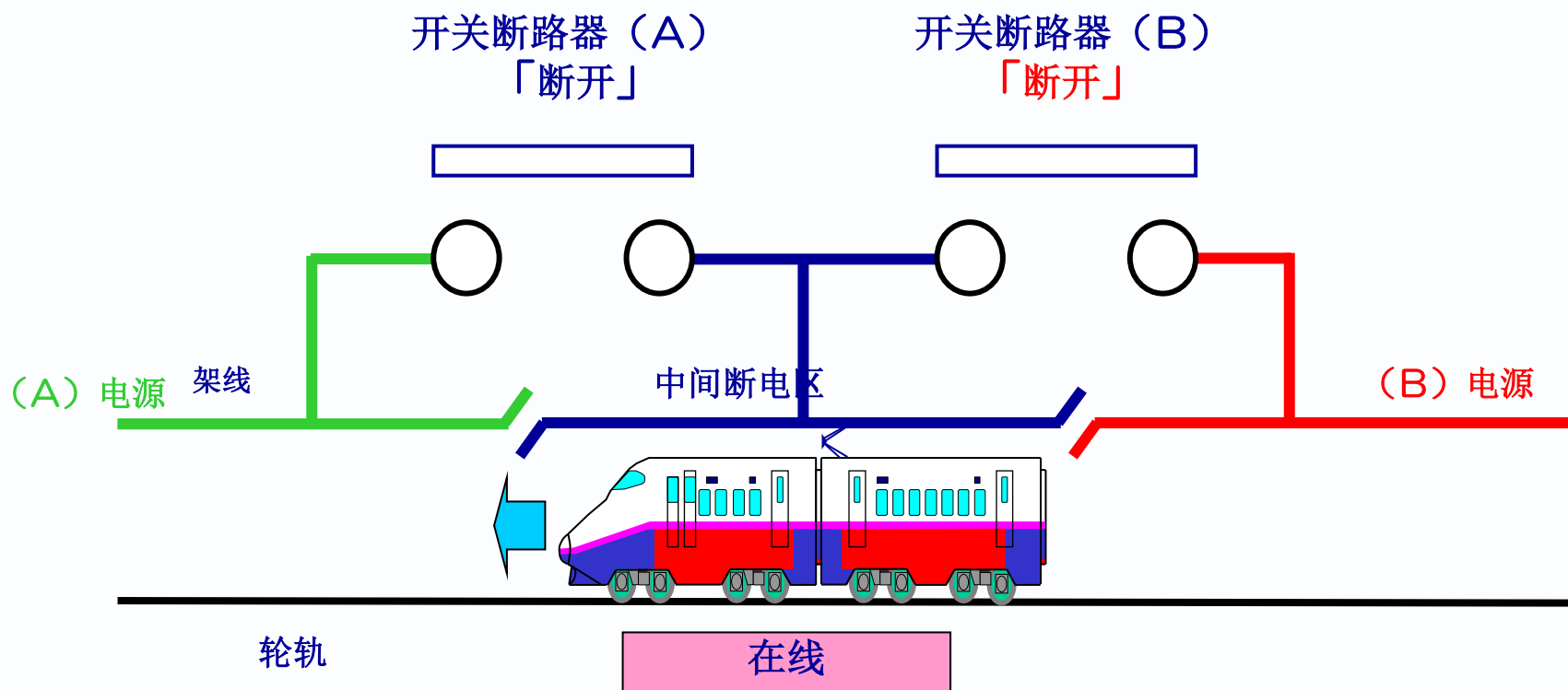
※进入中间断电区、在线检测





## 2.1 列车牵引控制基础

### □ 牵引供电系统——自动过分相



※ 开关断路器 (B) 「断开」

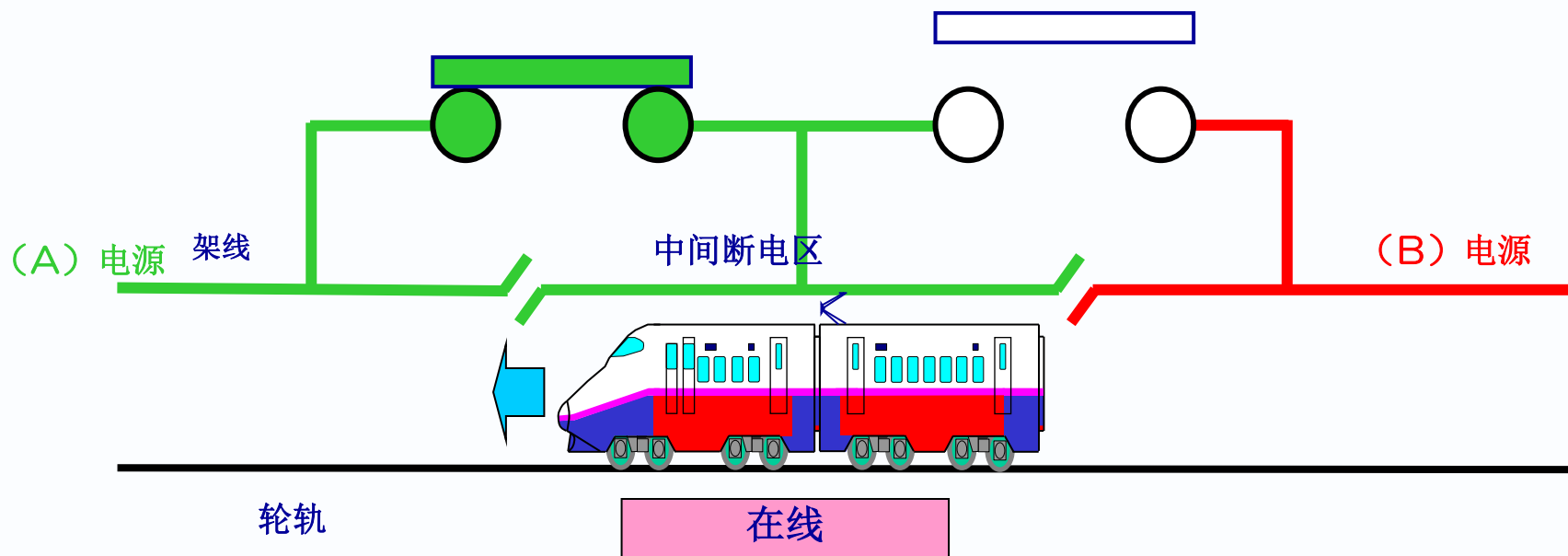


## 2.1 列车牵引控制基础

### □ 牵引供电系统——自动过分相

开关断路器 (A)  
「闭合」

开关断路器 (B)  
「断开」

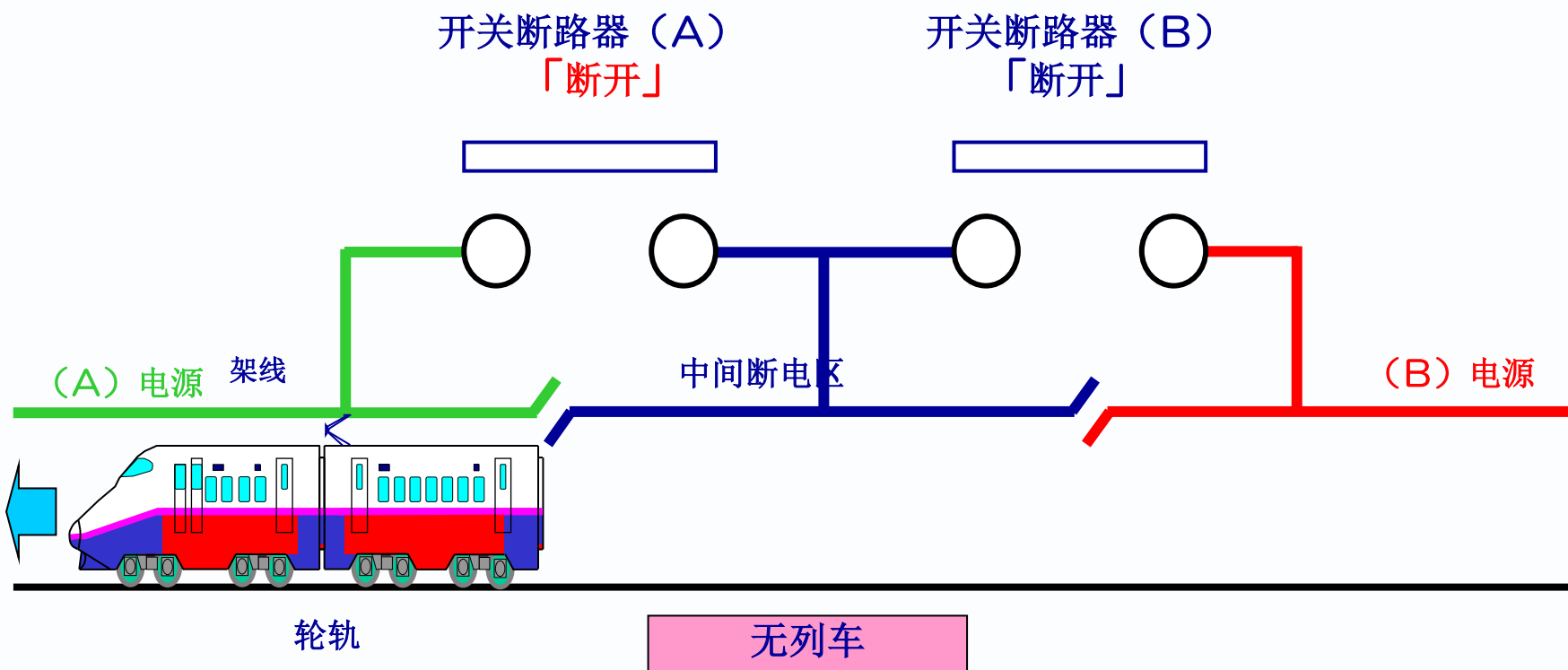


※ 开关断路器 (A) 「闭合」



## 2.1 列车牵引控制基础

### □ 牵引供电系统——自动过分相



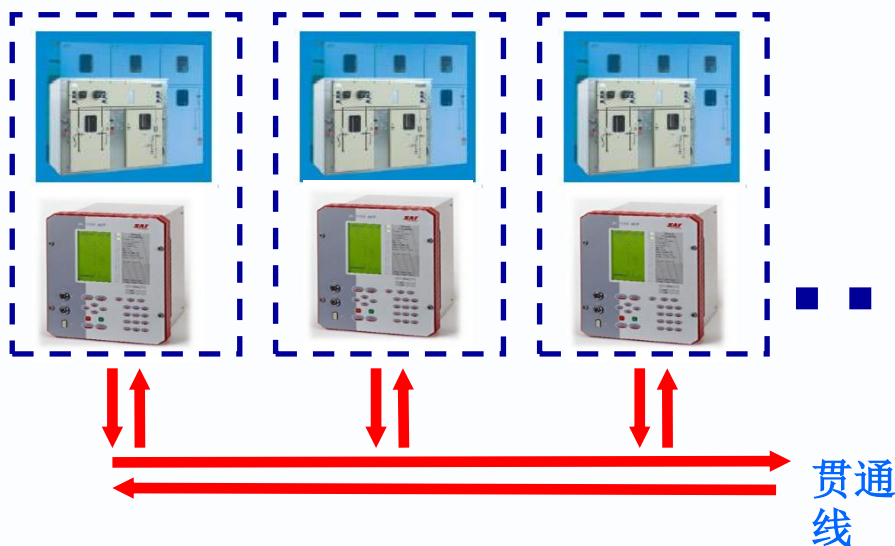
※ 开关断路器 (A) 「断开」



## 2.1 列车牵引控制基础

### □ 牵引供电系统——电力系统

- 电力供电网络：由沿线设置的变配电所及全线铺设的两回10kV电力贯通线（单芯电缆）构成。
- 变配电所：按照免维护、无人值班设计，依靠SCADA系统远动操作、监视。
- 电力贯通线：单芯电缆沿电缆槽敷设或直埋敷设。





## 2.1 列车牵引控制基础

### □ 牵引供电系统——远程监控 (SCADA)

远程监控系统集通信、信号、牵引供电、电力远程监控一体化设计。

**系统结构：**采用分层分布式系统结构。控制中心采用独立的监控网络及设备，通过网络安全隔离措施与其他系统进行接口。

**系统监控范围：**220V ~ 220kV的通信、信号、牵引供电、电力供电设备在线实时监控。



## 2.1 列车牵引控制基础

### □ 牵引供电系统——技术创新

采用国内外先进的牵引供电技术，进行系统集成，全面实现设计速度350km/h牵引供电系统的国产化。

形成统一的客专技术标准体系，构建具有自主知识产权的客专牵引供电系统技术平台。





## 2.2 列车牵引传动系统

- 电力传动类型及牵引交流传动类型
- 牵引传动系统组成
- 牵引传动系统的能量变换



## 2.2 列车牵引传动系统

### □ 电力传动系统的分类

- 直-直传动系统
- 交-直传动系统
- 直-交传动系统
- 交-交传动系统
- 交直交传动系统





## 2.2 列车牵引传动系统

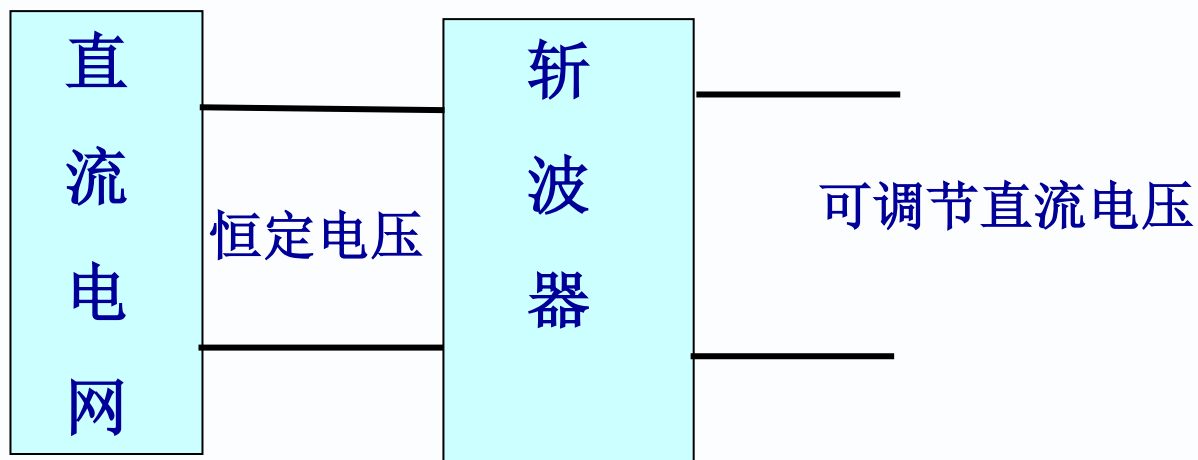
### □ 电力传动系统的分类

#### ● 直-直传动系统

工作原理：直流斩波实现直流电压调节

斩波电路：降压和升压两种

在地铁机车、工矿机车等传动系统中采用





## 2.2 列车牵引传动系统

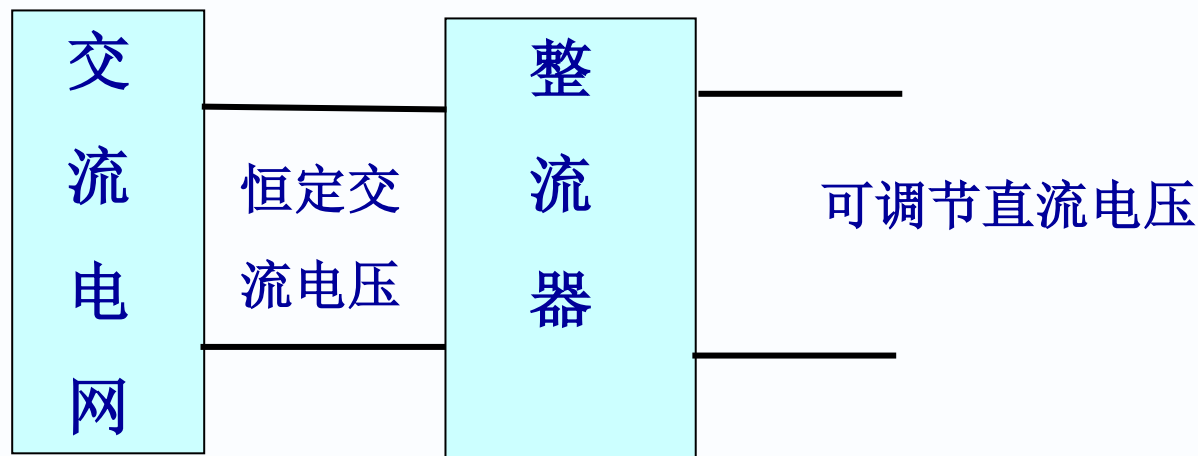
### □ 电力传动系统的分类

#### ● 交-直传动系统

工作原理：整流器实现AC-DC变换并调节电压

整流电路：相控整流

在干线电力机车及内燃机车中采用





## 2.2 列车牵引传动系统

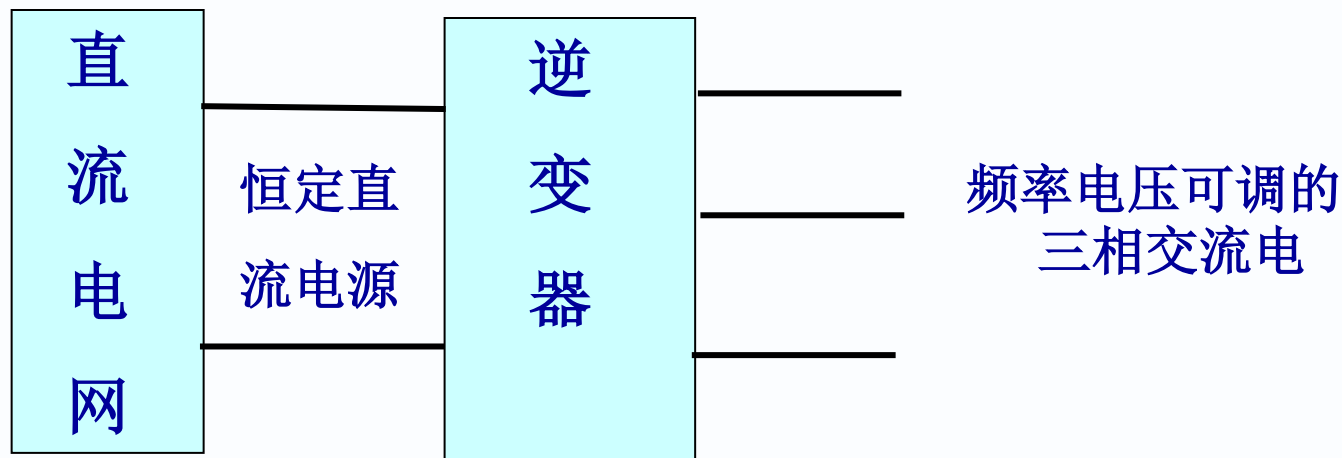
### □ 电力传动系统的分类

#### ● 直-交传动系统

工作原理：逆变器实现DC-AC变换并调节电压

逆变电路：PWM电路

在城市轨道交通中采用





## 2.2 列车牵引传动系统

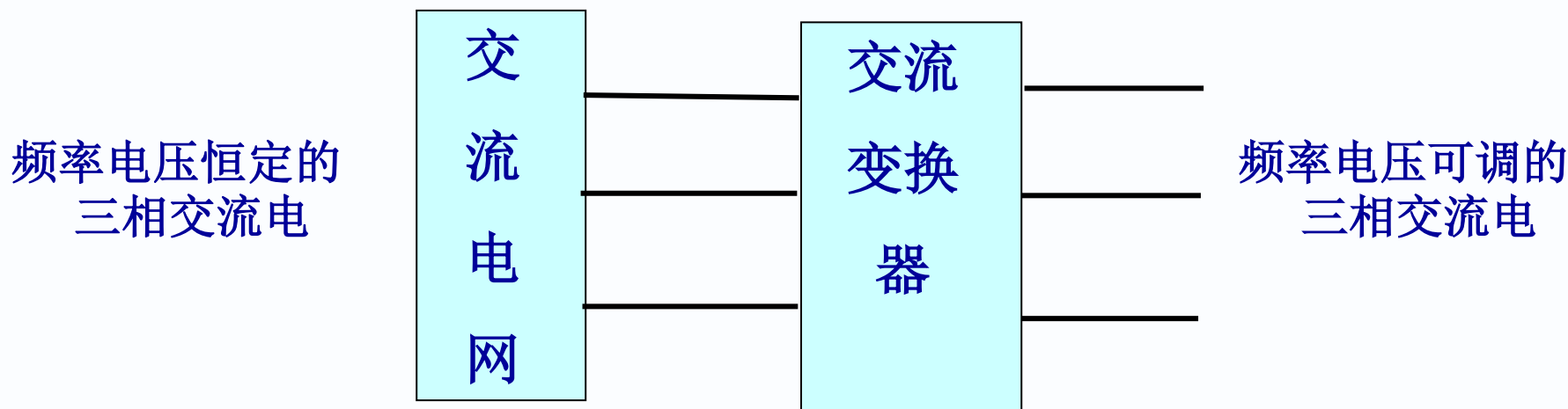
### □ 电力传动系统的分类

#### ● 交-交传动系统

**工作原理：**变流器将频率电压恒定的三相交流电变换成频率电压可调的三相交流电

**交流变换器：**调频调压电路

**应用：**要求低频率交流传动系统中如轧钢等





## 2.2 列车牵引传动系统

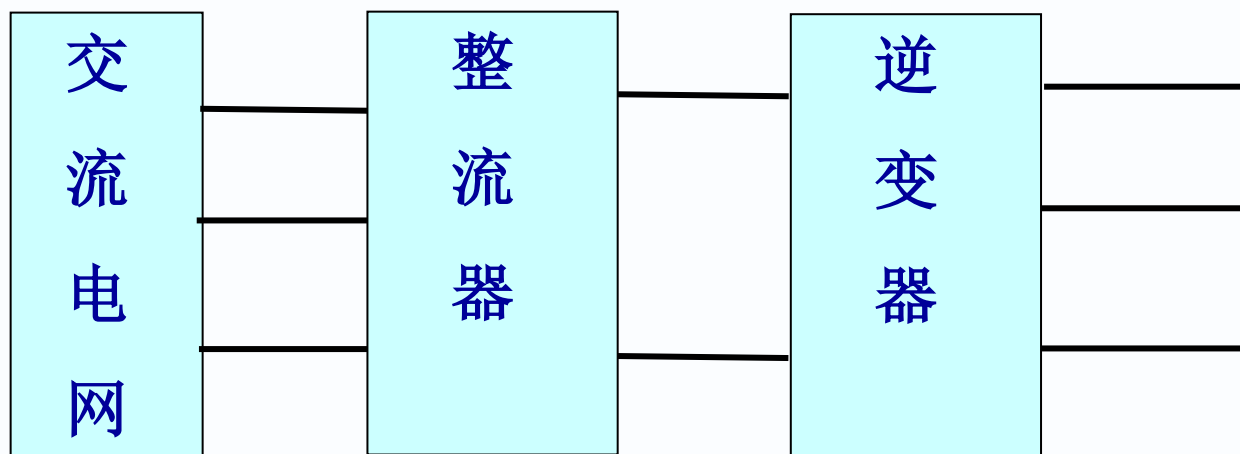
### □ 电力传动系统的分类

#### ● 交-直-交传动系统

**工作原理：** 将频率电压恒定的三相交流电变换成直流电，再将直流电变换成频率电压可调的三相交流电

**变 流 器：** 整流器、中间直流环节、逆变器

**应 用：** 广泛（交通、工业、能源）



频率电压恒定的  
三相交流电

直流电压或电流

频率电压可调的  
三相交流电



## 2.2 列车牵引传动系统

### □ 牵引传动系统的组成

- 交-直牵引传动系统

- 韶山系列机车

- 交-直-交牵引传动系统

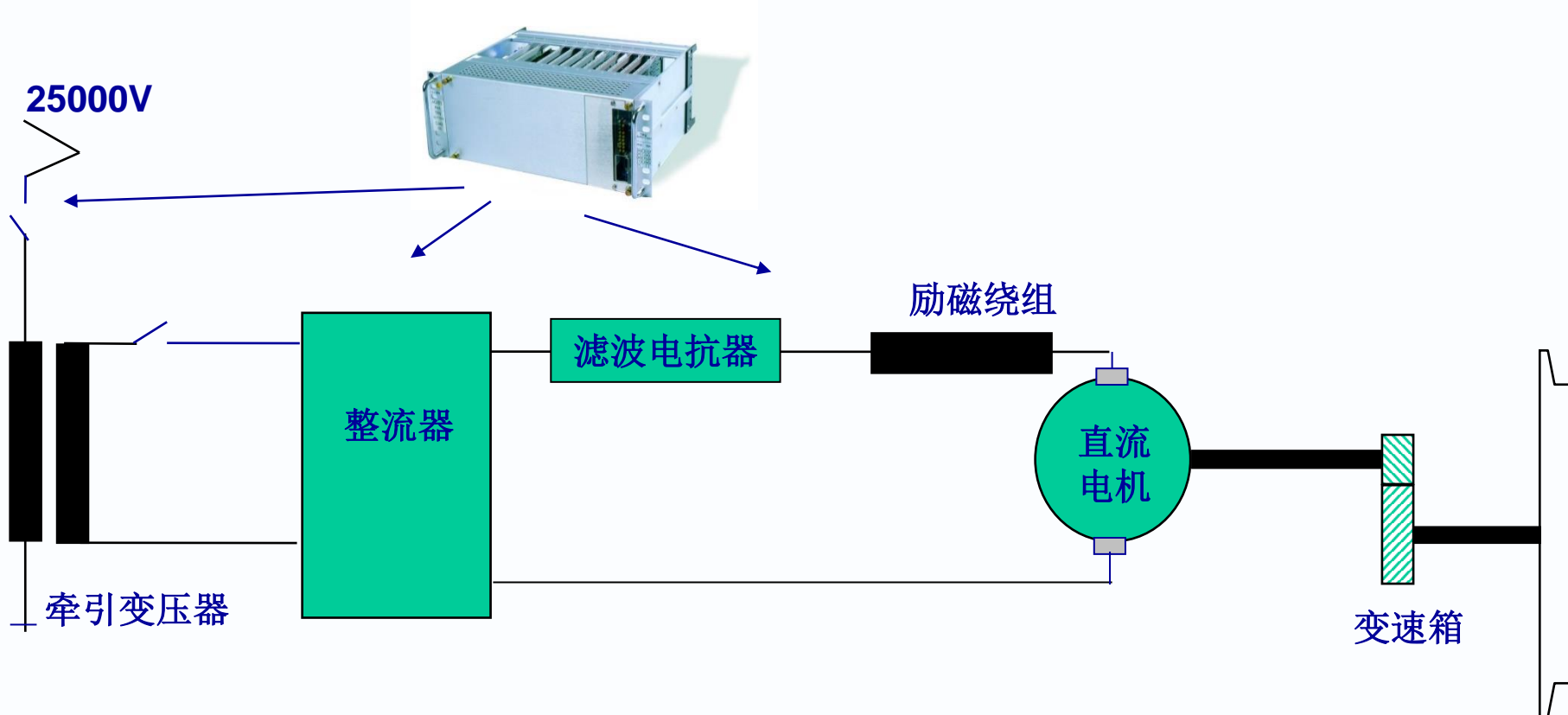
- CRH系列高速动车组、大功率交流传动电力机车



## 2.2 列车牵引传动系统

### □ 牵引传动系统的组成

#### ● 交直传动系统组成及工作原理



由AC25000V供电、直流电机驱动的机车称为交直传动电力机车



## 2.2 列车牵引传动系统

### □ 牵引传动系统的组成

#### ■ 交直传动系统组成及工作原理

- 受电弓将接触网的AC 25 kV单相工频交流电输送给牵引变压器；
- 经变压器降压后的单相交流电供给整流器；
- 整流器输出电压可控的直流电供给牵引电动机；
- 牵引电机轴端输出的转矩与转速通过齿轮传动传递给轮对，转换成轮缘牵引力和线速度。

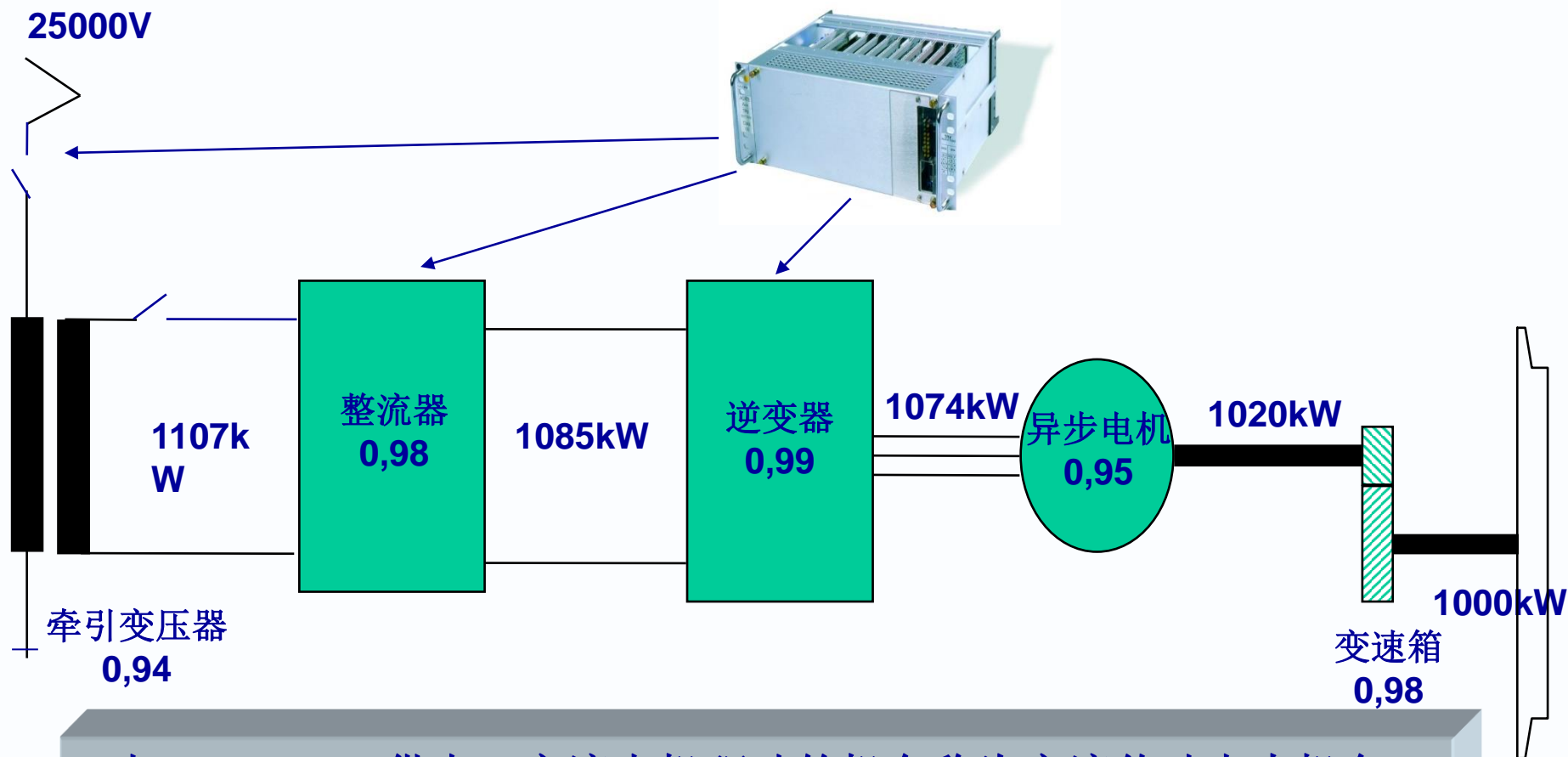




## 2.2 列车牵引传动系统

### □ 牵引传动系统的组成

#### ■ 交流机车牵引传动系统组成及工作原理



由AC25000V供电、交流电机驱动的机车称为交流传动电力机车



## 2.2 列车牵引传动系统

### □ 牵引传动系统的组成

#### ■ 交流机车牵引传动系统组成及工作原理

- 受电弓将接触网的AC 25 kV单相工频交流电输送给牵引变压器；
- 经变压器降压后的单相交流电供给脉冲整流器，脉冲整流器将单相交流变换成直流电；
- 经中间直流电路将直流电输出给牵引逆变器；
- 牵引逆变器输出电压、电流，频率可控的三相交流电供给三相异步牵引电动机；
- 牵引电机轴端输出的转矩与转速通过齿轮传动传递给轮对，转换成轮缘牵引力和线速度。



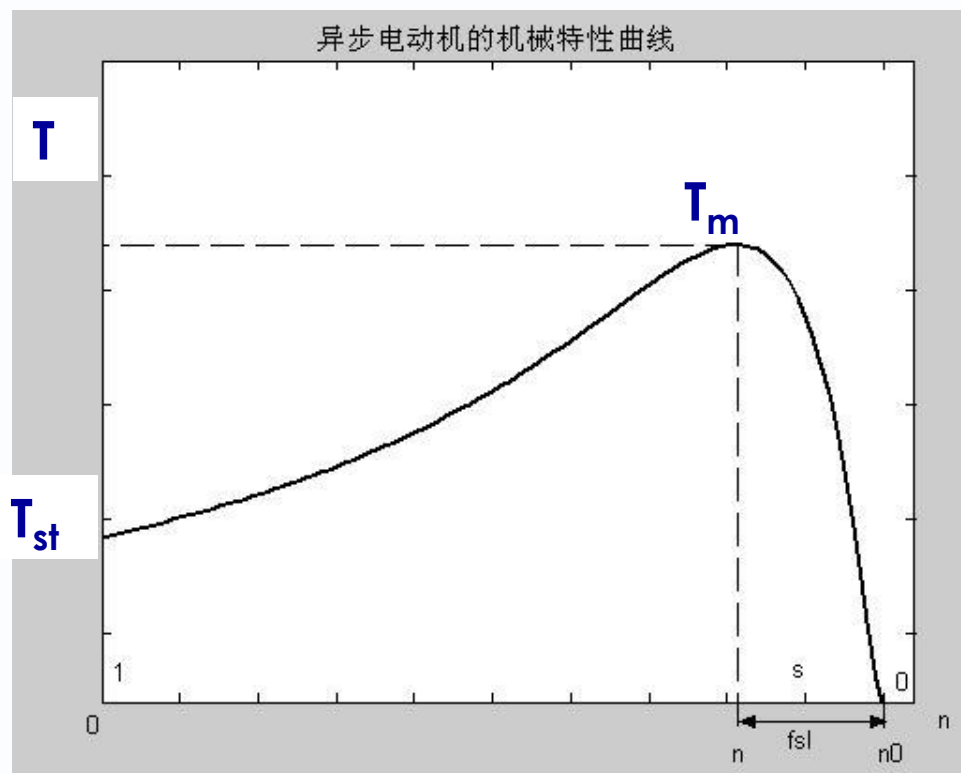
## 2.2 列车牵引传动系统

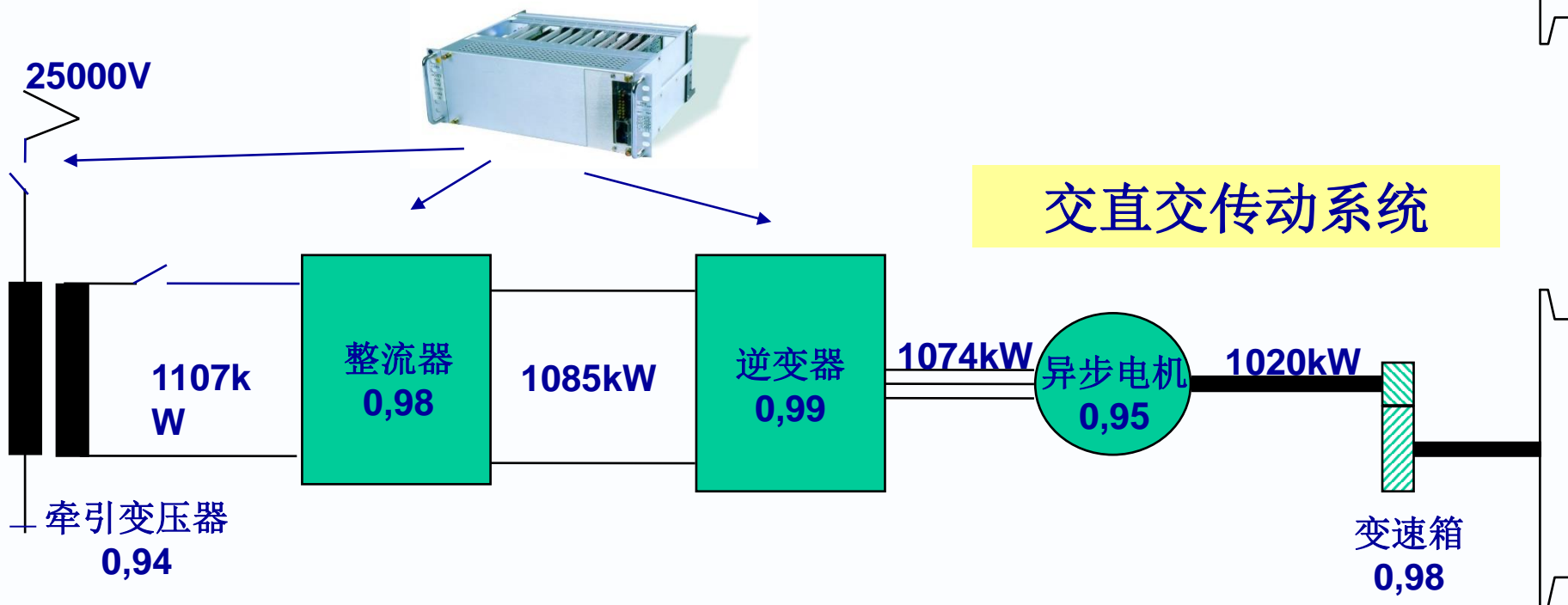
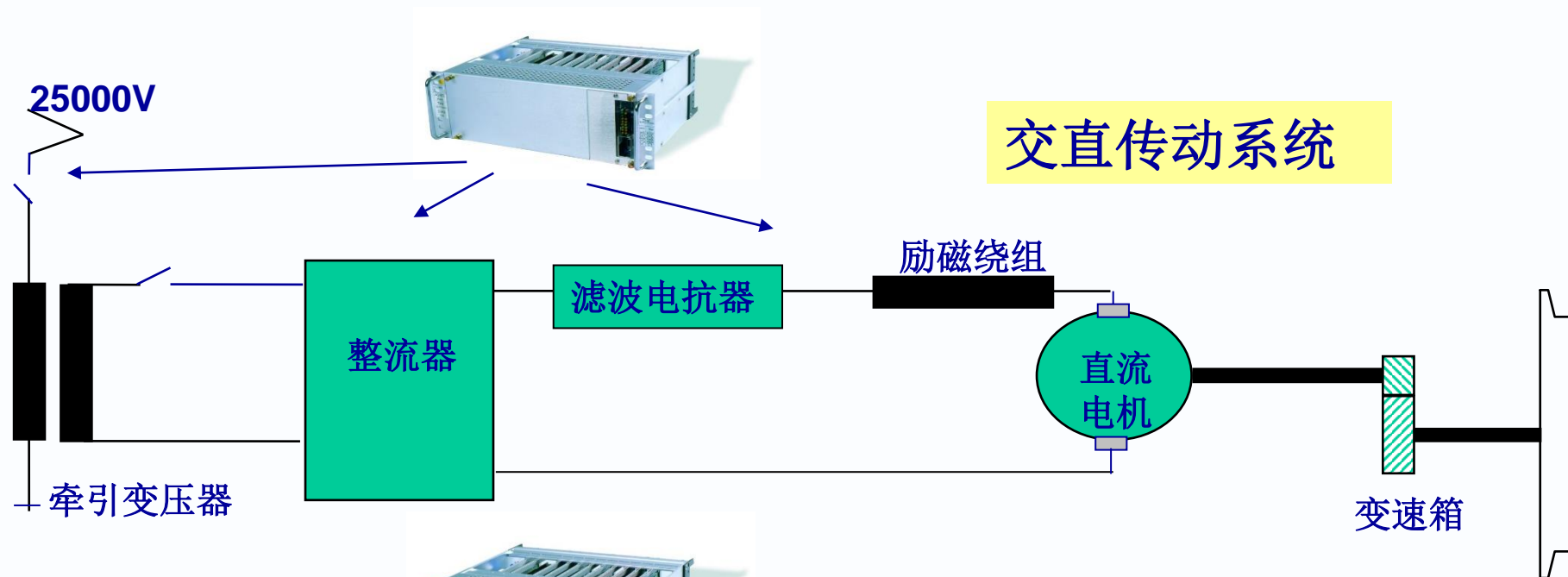
### □ 牵引传动系统的组成

#### ■ 交流传动电机（异步）的矩速特性

$$\begin{cases} n = \frac{60f_s}{n_p} (1-s) \\ T = C_M \Phi_m I_r \cos \varphi_r \end{cases}$$

强耦合系统







## 2.2 列车牵引传动系统

### □ 动力分散型与动力集中型

国外先进的高速动车组已普遍采用了轻量化铝合金车体、高可靠性无摇枕转向架、大功率交直交牵引传动、微机控制的电空联合制动、基于计算机和网络技术的列车控制和旅客信息系统等。

由于**动力分散动车组与动力集中动车组**比较，在高速运用条件下有明显的优点，原采用动力集中技术的国家在开发时速300公里及以上高速动车组时，也选择了动力分散的技术。动力分散是高速动车组的发展趋势。

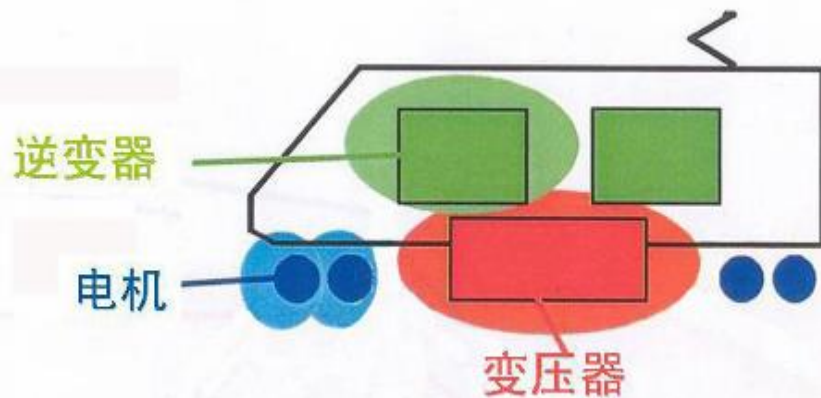


## 2.2 列车牵引传动系统

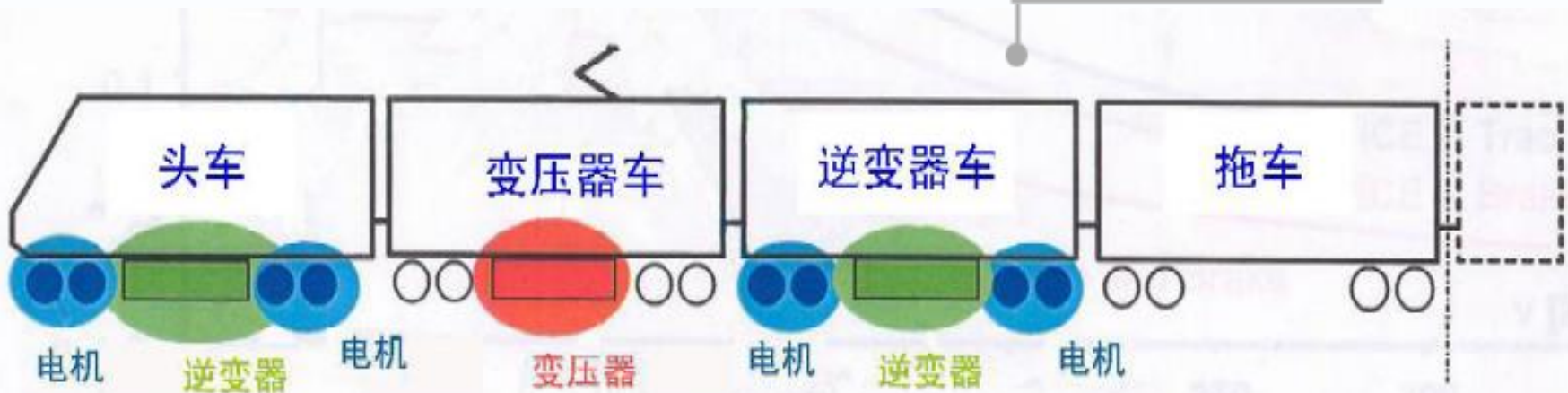
动力分散动车组优点：

- 牵引功率大，载客人数多
- 轴重小，黏着力用合理
- 启动快，加速性能好
- 运用可靠，不需换向
- 利用率高，适合公交化客运
- 编组灵活，经济效益高

动力集中

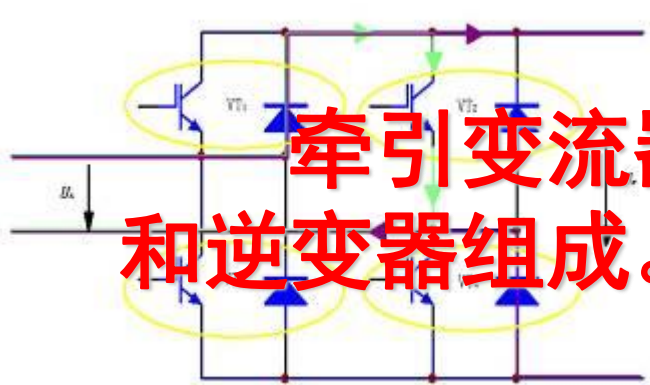


动力分散

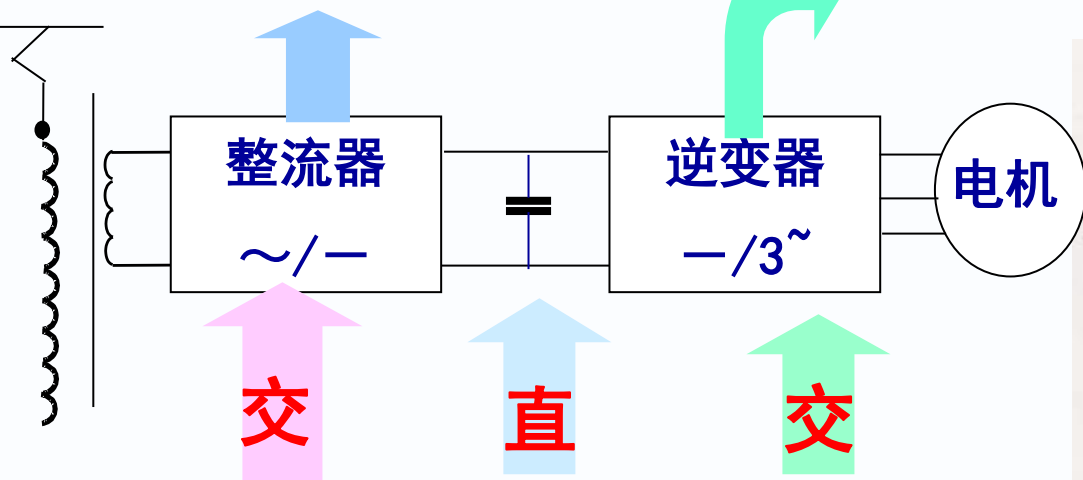
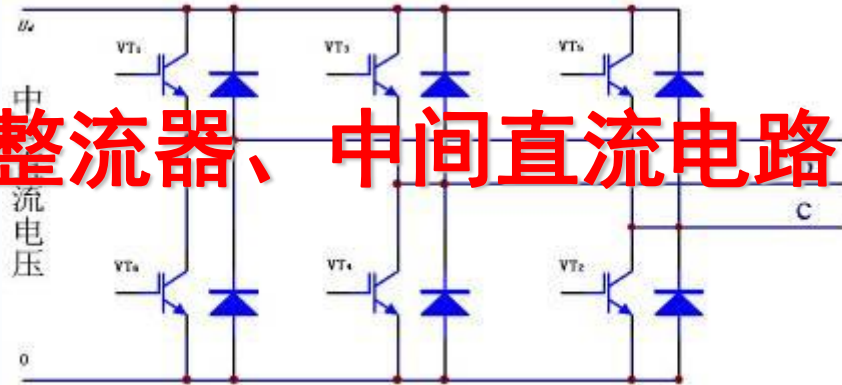




## 2.2 列车牵引传动系统



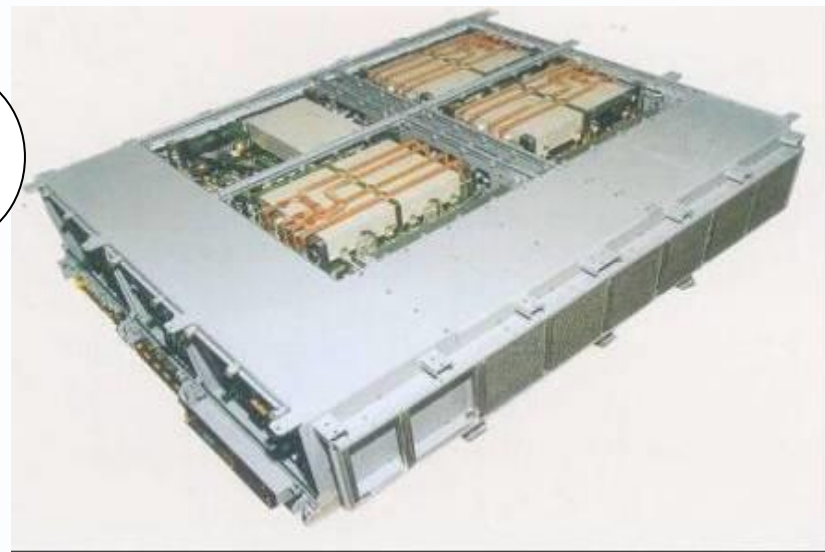
牵引变流器由整流器、中间直流电路和逆变器组成。



整流器将牵引变压器次边输入的单相交流电变为直流电。

中间直流电路为逆变器提供一个稳定的直流电源。

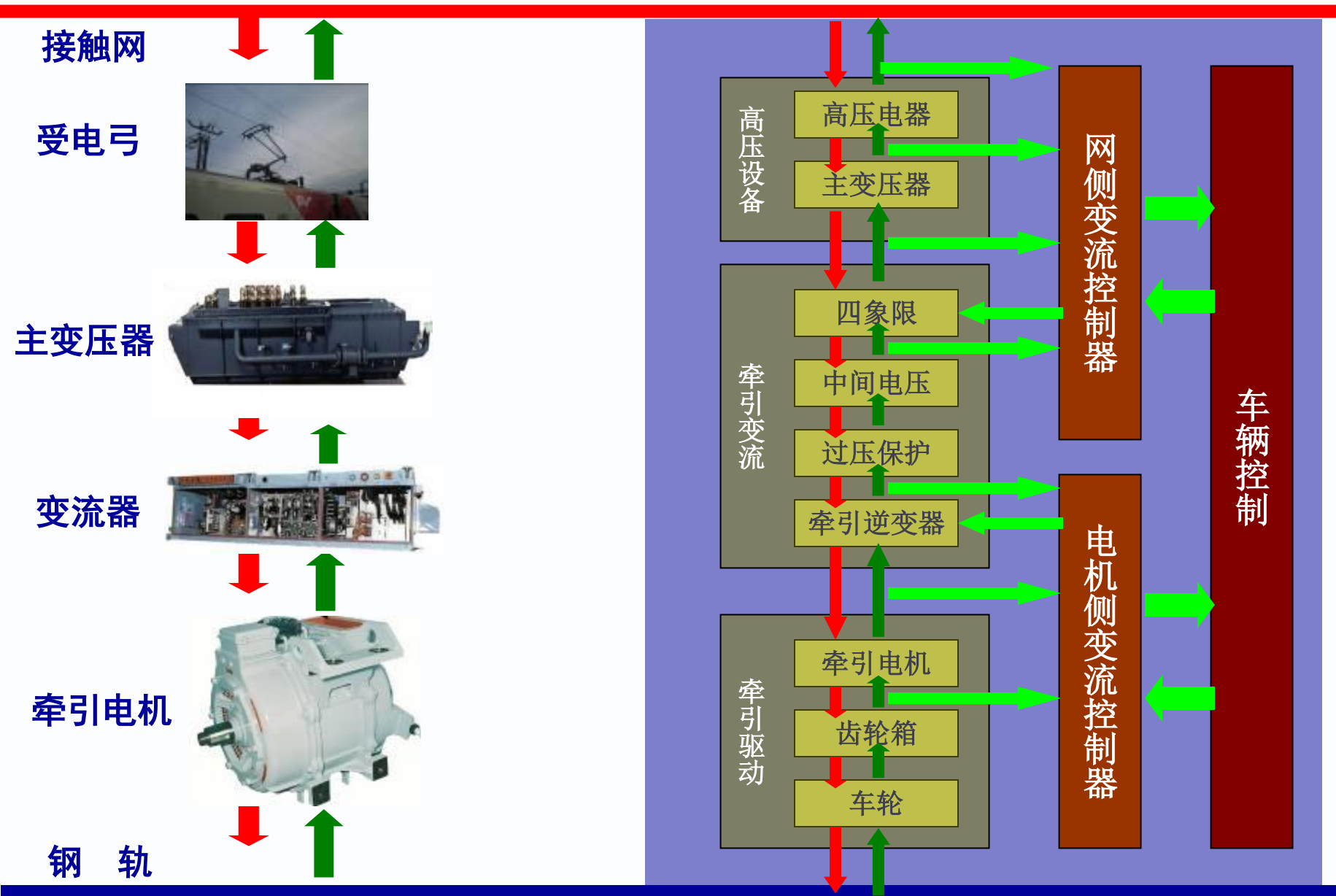
逆变器将中间直流电逆变为牵引电机所需要的可调频调压的三相交流电。



4. 牵引变流器



# 牵引传动系统能量流



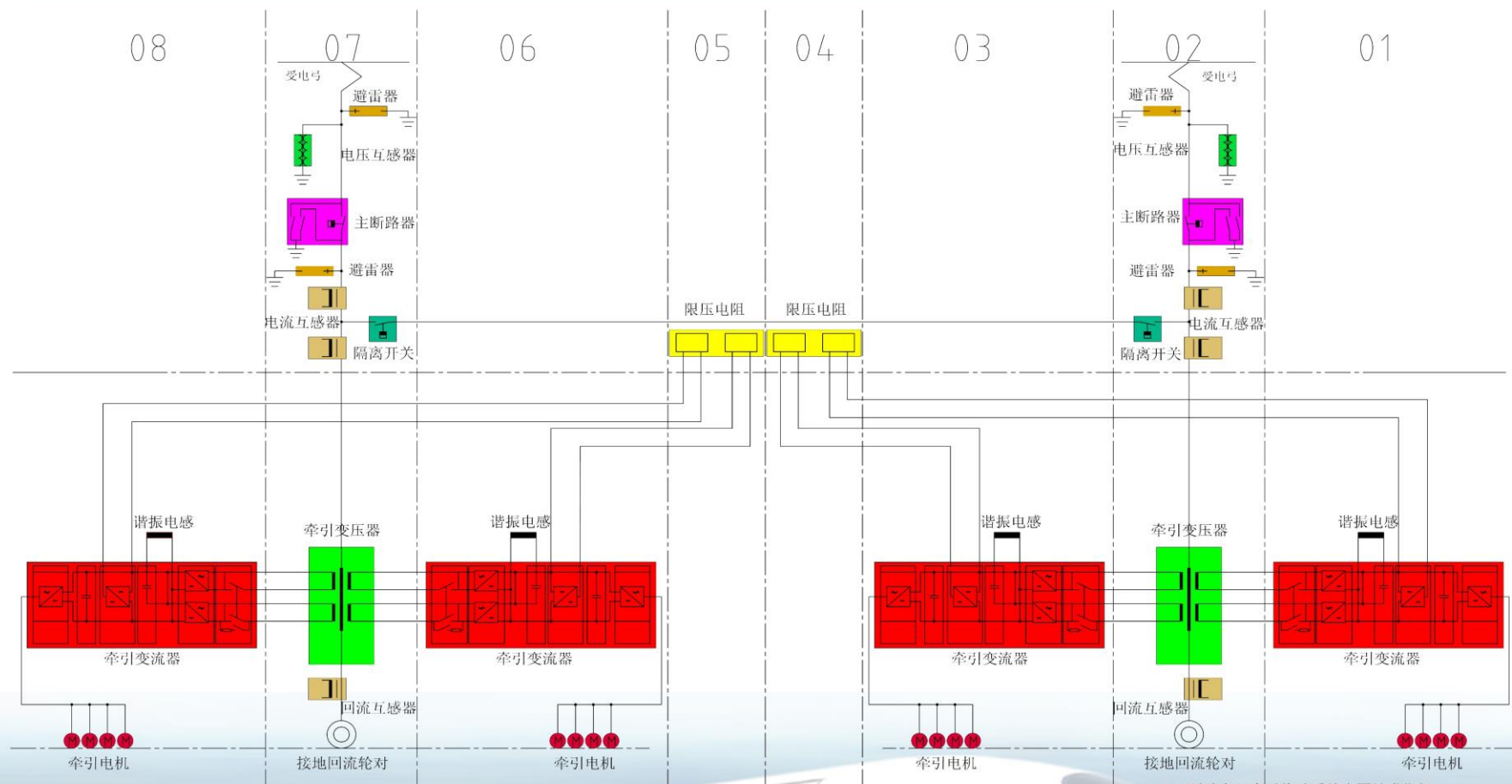




# CRH3型动车组牵引系统原理图

## CRH<sub>3</sub> 型动车组技术系列挂图

### 牵引系统原理图



CRH3型动车组牵引传动系统主要技术指标

序号	技术指标	指标值
1	额定工作网压	交流25kV
2	轮周最大牵引功率	8800kW
3	轮轴最大再生制动功率	8000kW
4	启动牵引力	300kN
5	传动比	2.793
6	中间直流环节电压(牵引时)	2700~3600V

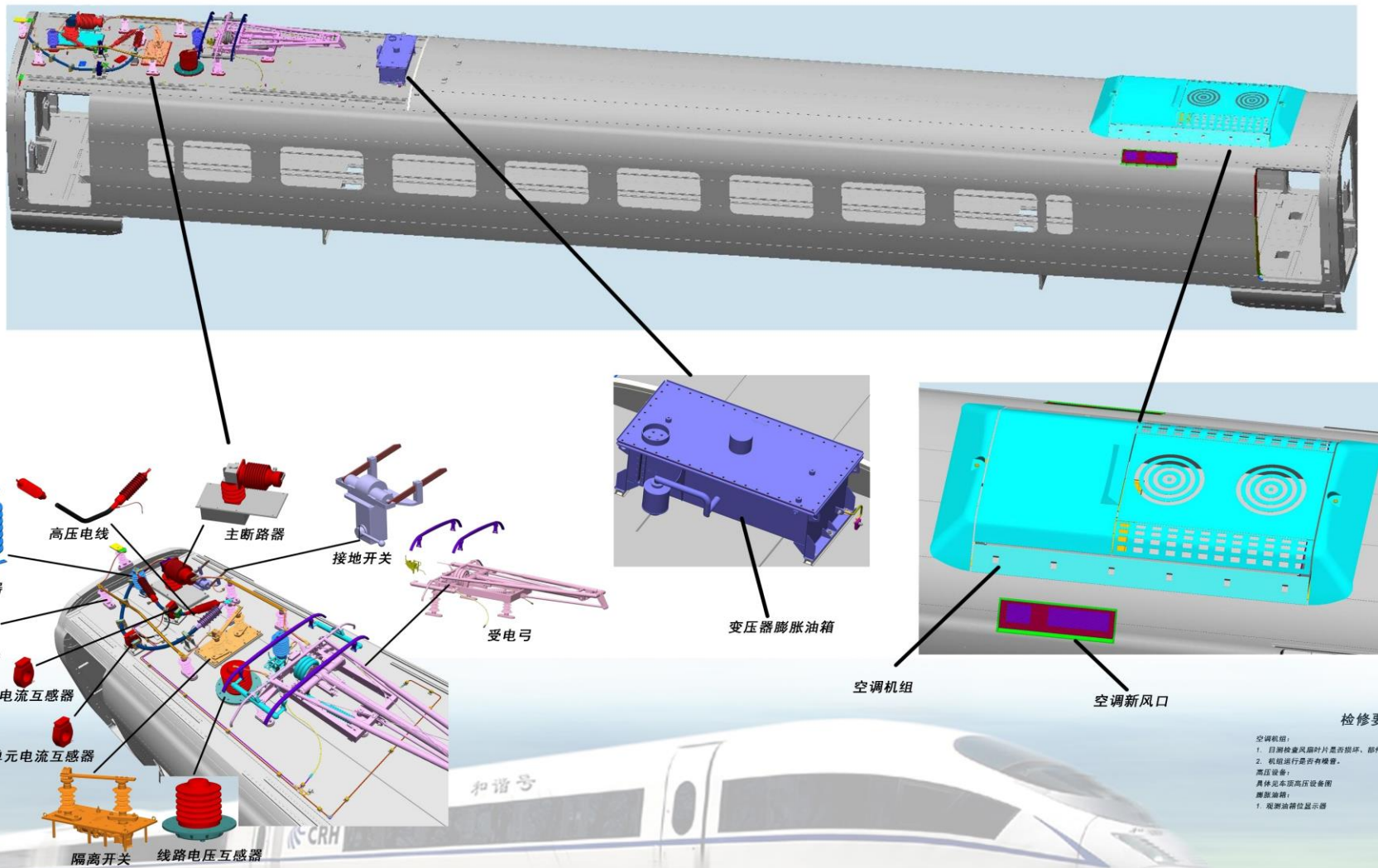
铁道部运输局装备部



# CRH3型动车组车顶设备布置图

## CRH<sub>3</sub> 型动车组技术系列挂图

### TC02 车车顶设备布置图

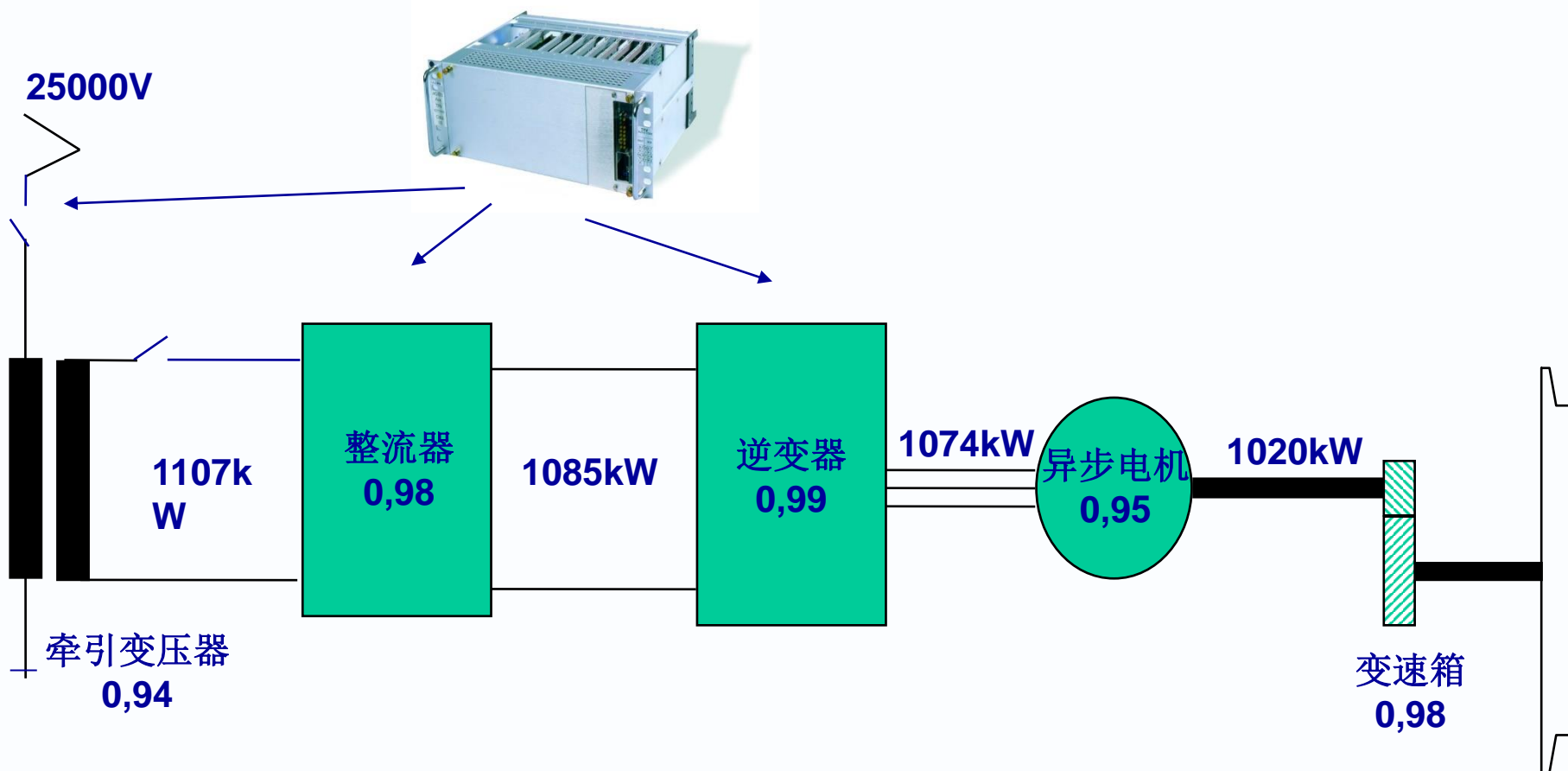


铁道部运输局装备部



## 2.2 列车牵引传动系统

### □ 交流传动系统的能量变换



电力牵引传动系统的构成



## 2.2 列车牵引传动系统

### □ 牵引传动系统容量计算

参数	符号 (取值或计算公式)
动车轮对输出功率	由牵引特性计算
APU辅助装置容量	490kVA
牵引变压器功率因数	$Pf_{Tr} = 1.0$
牵引变压器空载时牵引绕组电压有效值	$E_s = 1500$
脉冲整流器效率	$\eta_{CONV} = 0.975$
逆变器效率	$\eta_{INV} = 0.985$
齿轮箱效率	$\eta_{Gear} = 0.95$
牵引电动机功率因数	$Pf_{MM} = 0.87$
牵引电动机效率	$\eta_{MM} = 0.94$



## 2.2 列车牵引传动系统

### □ 牵引传动系统容量计算

牵引电机输出功率	$P_{MO} = P_{MI} \times \eta_{MM}$
牵引电机输入功率	$P_{MI} = S_{I1} \times Pf_{MM}$
牵引电机输入视在功率	$S_{I1} = P_{MI} / Pf_{MM} = \sqrt{3} U_M \times I_M$
牵引电机电压	$U_M \leq (\sqrt{6}/\pi) \times U_d$
牵引电机电流	$I_M = S_{I1} / (\sqrt{3} U_M)$
逆变器输出容量	$S_I = S_{I1} \times \text{电机数量}$
脉冲整流器输出容量	$P_c = S_I \times Pf_{MM} / \eta_{INV} = U_d I_d$
牵引变压器牵引输出容量	$S_{Tr} = P_c / (Pf_{Tr} \times \eta_{CONV})$
牵引绕组输出电流	$I_N = S_{Tr} / U_{AB}$



## 2.2 列车牵引传动系统

### □ 牵引传动系统容量计算

