

项目 1

电气化铁路概述

任务 1 电气化铁道的发展

【教学目标】

- (1) 掌握电气化铁路的发展历史。
- (2) 掌握电气化铁路的优越性。
- (3) 掌握电气化铁路的电流制。
- (4) 培养学生学习电气化铁路知识的兴趣。

【任务实例】

根据图 1.1 认知电气化铁路的特点。

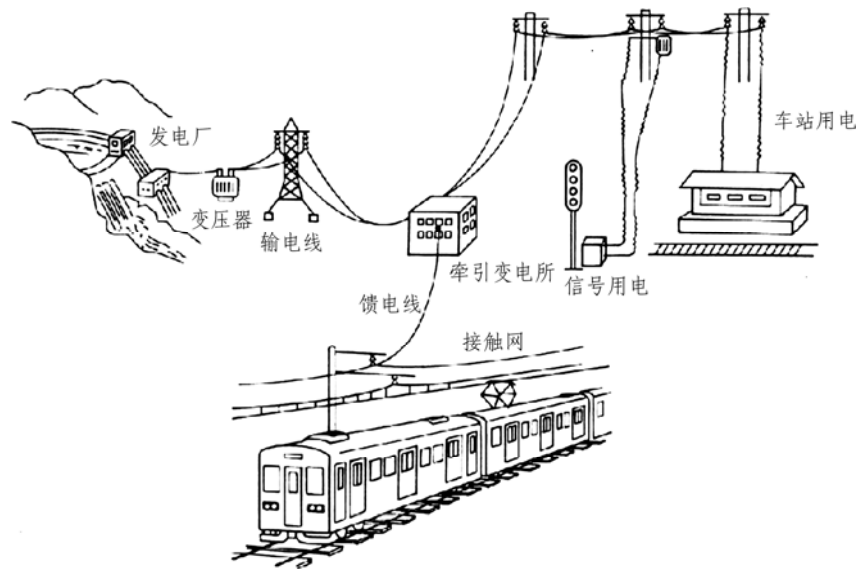


图 1.1 电气化铁路供电系统图

【任务分析】

从铁路牵引形式的发展入手，说明电气化铁路的优越性，进而引入电气化铁路的电流制。

【相关知识】

在铁路运输中，主要有三种牵引形式：蒸汽牵引、内燃牵引和电力牵引。蒸汽牵引是铁路上最早采用的一种牵引形式，至今已有 170 余年的历史。由于它热效率低、燃料消耗大、污染环境重，严重影响铁路技术经济效能和铁路运输能力的提高，从 20 世纪 60 年代开始，已经逐渐被淘汰。而内燃牵引和电力牵引，在技术上比较先进，是 20 世纪 40 年代以后才发展起来的，它们功率大、热效率高、过载能力强，能更好地实现多拉快跑，提高铁路的运输能力，所以发展很快。特别是电力牵引，它除了具有上述优点外，还能综合利用资源和不污染环境，是今后发展的一种主要牵引形式。

世界上第一条电气化铁路和第一台电力机车是 1879 年 5 月 31 日德国西门子和哈尔斯克

公司研制和制造的，这条电气化铁路全长只有 300 m。1881 年西门子和哈尔斯克公司又修建了一条 2.45 km 长的电力线路。1895 年美国在 5.6 km 长的隧道区段内修建了一条 675 V 的直流电气化铁路。同年，日本在京都的下京区修建了一条 6.7 km 长的 550 V 的直流电气化铁路。1902 年意大利在瓦尔切里纳线上修建了一条三相交流电气化铁路。在最初，电气化铁路修建在工矿线路和一些大城市近郊线路上。后来，随着工业的发展，到 20 世纪 50 年代，一些工业发达的国家，为了完成急剧增长的运输任务以及与其他运输业的竞争的需要，开始大规模地进行铁路运输业的现代化建设，主要是牵引动力现代化的建设。因此，电气化铁路的建设速度不断加快，修建的国家逐渐增多。电气化铁路发展最快的时期是 20 世纪 60 年代，平均每年修建达 5 000 多 km。到 20 世纪 70 年代末，在工业发达的欧洲、日本和苏联等国家和地区，运输繁忙的主要铁路干线都已经实现了电气化，而且基本上已经成网。现在，这些国家正在集中力量修建时速 200 km 以上的高速电气化铁路。从 20 世纪 70 年代以后，一些发展中国家，如印度、朝鲜、土耳其、巴西、智利、摩洛哥等电气化铁路发展也很快，特别是我国的电气化铁路更有了飞速的发展。

现在，世界已进入建设高速电气化铁路的新时期，修建的高速电气化铁路的国家越来越多，列车运行的速度越来越高，修建的里程也越来越长，大有你追我赶之势。特别是欧洲，已经突破了国界，向国际化、网络化发展。高速电气化铁路已经成为国家社会发展水平和铁路现代化的主要标志之一。

1964 年 10 月 1 日，日本成功地建成了世界上第一条时速 210 km 的东海道新干线。随后法国、德国、意大利、西班牙、英国、美国、韩国等国家相继修建高速电气化铁路，我国台

湾省在台北至高雄间修建了一条高速电气化铁路。超高速磁浮铁路，实际上也是以电能作为牵引动力的高速电气化铁路。它与现在的铁路不同的地方是，现在铁路上的列车是车轮在钢轨上滚动运行的，而磁浮铁路则是利用电磁原理，使列车悬浮在钢轨之上，由列车上的超导磁体与钢轨上的线圈相互作用运行的，列车运行速度可达到 500 km/h 以上，所以也叫“超高速无轮列车”。它的特点是运行速度高，无噪声和振动，不受气候影响，不污染环境，是解决大城市及其卫星城市之间旅客运输拥挤的最好的交通工具。

我国电气化铁路建设，是新中国成立后才开始的。1958 年我国开始修建电气化铁路，从一开始便直接采用了最先进的电压等级为 25 kV 的单相工频交流电，为我国大规模发展电气化铁路奠定了良好的基础。2001—2005 年是我国电气化铁路建设史上建成开通最多的 5 年，先后建成了哈大、秦沈客运专线、渝怀等 5 000 多 km 电气化铁路。截止到 2014 年，我国铁路营业里程超过 112 000 km，高速铁路营业里程超过 16 000 km，稳居世界第一。

2008 年 8 月 1 日京津高速电气化铁路开通运营。2009 年 4 月 1 日合武高速电气化铁路开通运营。2009 年 12 月 26 日武广高速电气化铁路开通运营。2010 年 2 月 6 日郑西高速电气化铁路开通运营。我国电气化铁路进入了高速电气化时代。2012 年 12 月 1 日，哈大高速铁路正式开通。

国家发展和改革委员会〔2004〕159 号文件——《中长期铁路网规划》提出：为满足快速增长的旅客运输要求，建立省会城市及大中城市间的快速客运通道，规划“四纵四横”铁路快速客运通道以及三个城际快速客运系统。

“四纵”：北京—上海，北京—武汉—广州—深圳，北京—沈阳—哈尔滨（大连），杭州—宁

波—福州—深圳。

“四横”：徐州—郑州—兰州，杭州—南昌—长沙，青岛—石家庄—太原，南京—武汉—重庆—成都。

三个城际客运系统：环渤海地区、长三角地区、珠三角地区，覆盖区域内主要城镇。

至 2020 年，中国铁路将形成以高/快速客运专线为主干网络的客运系统。

一、电气化铁路的优越性

电气化铁路是一种现代化的铁路运输工具，和内燃、蒸汽机车牵引的铁路相比，具有技术和经济上的优越性。

1. 能大幅度提高运输能力

由于电力机车以外部电能作动力，不需要自带动力装置，可降低机车自重，这样，在每根轴荷重相同的条件下，其轴功率较大，目前国内的电力机车最大为 900 kW，而内燃机车为 500 kW，在相同的牵引重量时，其速度较高；而在相同速度下，其牵引力较大。客运用的 SS₈ 型电力机车持续速度为 100 km/h，而 DF₁₁ 型内燃机车只有 65.5 km/h。从货运机车的功率来比较，SS₄ 型电力机车为 6 400 kW，DF₁₀ 型内燃机车为 3 245 kW，而前进型蒸汽机车仅为 2 200 kW。由上述数字可以看出，因为电力机车的功率大，所以它的牵引力大和持续速度较高，从而大大提高了运输能力。

2. 节约能源，降低运输成本

铁路运输是国家能源消耗的大户。因此，牵引动力类型的选择对于合理使用能源具有重要意义。

电力牵引的动力是电能，从我国能源生产的发展来看，原油储量远少于煤炭、水力，而一些无法直接使用电能的水上、陆地和空中运输工具及移动机械却需要大量的液体燃料，因此，电力牵引是最合理的牵引动力。电力牵引每万吨公里的能耗比其他牵引约低 1/3，根据全路运输业务决算报告，以每万吨公里机务成本计算，电力机车为 100%，则内燃机车为 136.9%，蒸汽机车为 135.1%。

3. 有利于保护环境，并能增加安全可靠程度

电力机车无废气、烟尘，对空气无污染，另外噪声较小，特别在通过长大隧道时，其优点更为显著，这不仅改善了司机的工作条件和旅客的舒适度，而且对铁路沿线城市、郊区的污染也减到最小程度。电力机车装有大功率的电气制动装置，可用于长大下坡的速度调整，从而可以大大提高列车运行的安全度。

二、电气化铁路的电流制

(一) 直流制

电力系统将三相交流电送到牵引变电所，经降压，整流变成直流电，再通过牵引网供给电力机车使用。

(1) 优点：直流牵引电动机调速性能好，机车构造简单，接触网对铁路沿线通信线路造成的电磁干扰较小。

(2) 缺点：直流制的供电电压因受到牵引电机端电压的限制而不能过高（最高 6.6 kV）。接触网导线的截面面积大，金属消耗大，线路损耗大。变电所间距小，增加了变电所的数目。另外，变电所的设备、结构较复杂（降压、整流）。直流制的泄漏电流对沿线地下金属的腐蚀

作用较为严重。

(3) 应用：地铁、城市轨道交通、工厂矿山运输等。

(二) 三相交流制

用两根接触网导线和一根钢轨形成三相电路。电力机车采用三相异步电动机。

(1) 优点：牵引变电所和机车设备简单，维修方便。

(2) 缺点：异步电动机调速困难，接触网结构复杂且不安全。

(三) 低频单相交流制

采用低于工业频率 (50 Hz) 的单相交流电源供电。

频率和电压：西欧国家为 $16\frac{2}{3}$ Hz、15 kV；美国为 25 Hz、11 kV。

(1) 优点：接触网上的电压比直流制高，接触网导线的截面减小，牵引变电所的距离有所增大。

(2) 缺点：频率与工业频率不同。牵引变电所需设变频器，或设置专用变频所，从经济效果方面比较，这种制式反而不如直流制。

(3) 应用：西欧一些国家 (如德国) 采用较多。

(四) 工频单相交流制

采用工业频率 (50 Hz) 的单相交流电供电的制式。供电电压一般为 25 kV。

1932 年，匈牙利首先使用这种电流制建成了世界上第一条工频单相交流制的电气化铁道。

1958 年，新中国第一条电气化铁路宝成线宝鸡—凤州段，也采用该电流制，后来修建的每条电气化铁路都无一例外地采用了这种制式。

1. 工频单相交流制的优越性

牵引供电系统的结构比其他电流制简单；供电电压提高，牵引变电所的间距增大，数目减少，接触网导线截面面积减小；交流电力机车的黏着性能和牵引性能良好；交流制的地中电流对地下金属的腐蚀性小。

2. 工频单相交流制的主要问题

单相牵引负荷在电力系统中形成负序电流；牵引负荷为感性，功率因数低；牵引电流为非正弦波，含有丰富谐波电流；工频单相电流对沿线通信线路造成较大电磁干扰。

【任务实施】

- (1) 学生接受任务，根据给出的相关知识并查阅相关的资料，自行完成任务的内容。
- (2) 各小组成员之间、各小组之间互相检查，发现问题，提出意见。
- (3) 老师检查各小组及个人完成的任务，提出问题，给出成绩。

【课堂训练与测评】

- (1) 电气化铁路的优越性有哪些？
- (2) 电气化铁路的电流制有哪几种？各有什么特点？

【知识拓展】

查阅有关资料，了解各国电气化铁路的发展，尤其是高铁的发展情况。

任务2 电气化铁路牵引供电系统

【教学目标】

- (1) 熟练掌握电气化铁路供电系统的构成。
- (2) 掌握对电气化铁道供电系统的基本要求。
- (3) 理解并掌握电气化铁路(高速铁路)的供电方式。
- (4) 理解电气化铁路对通信线路的影响与防护。

【任务实例】

根据图 1.2 认知电气化铁道供电系统的构成。

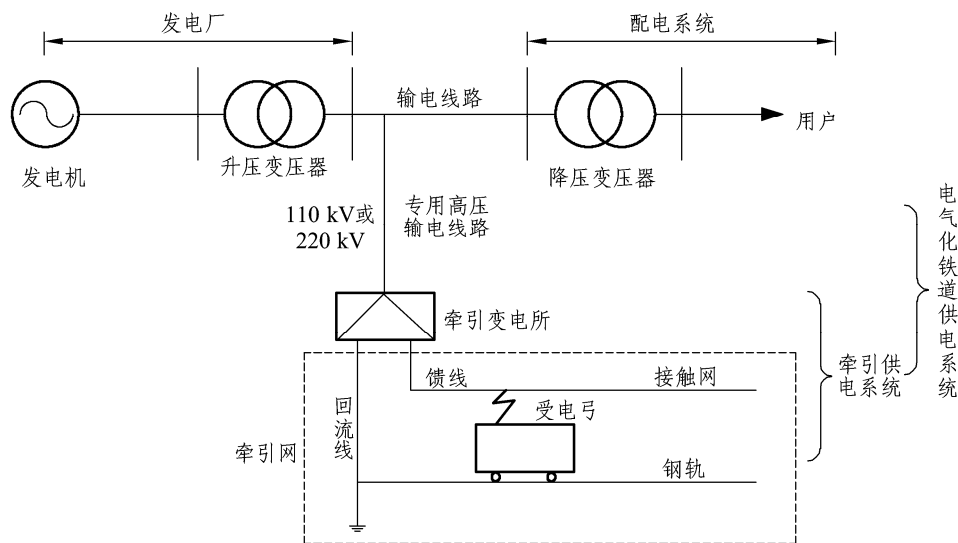


图 1.2 电气化铁道供电系统的构成

【任务分析】

从电气化铁路供电系统的构成开始，深入讲解对电气化铁道供电系统的基本要求及电气化铁路(高速铁路)的供电方式，进而引出电气化铁路对通信线路的影响与防护。

【相关知识】

牵引供电系统是电气化铁路从电力系统接引电源，降压转换后给电力机车供电的电力网络。电力机车是以电能作为牵引动力的一种现代化交通运输工具。由于它的牵引动力是电能，

所以又称电力牵引。它与蒸汽牵引和内燃牵引不同的地方，是电力机车本身不带能源，必须由外部供给电能。专门给电力机车供给电能的装置叫做牵引供电系统。因此，电气化铁路由电力机车和牵引供电系统两大部分组成。电气化铁路的牵引供电系统本身并不产生电能，而是将电力系统的电能传送给电力机车。一般把国家的电力系统称为电气化铁路的一次供电系统，也称为铁路的外部供电系统。一次供电系统主要包括发电厂、区域变电所和电力传输线。牵引供电系统主要包括牵引变电所和接触网。

我国电气化铁路（接触网）采用单相工频交流制，额定电压为 25 kV。

一、电气化铁道供电系统的构成

电气化铁道供电系统由一次供电系统和牵引供电系统组成。

（一）一次供电系统

一次供电系统是指电力系统向电气化铁道的供电部分。在我国，电力系统通常以 110 kV（或 220 kV）的电压等级向电气化铁道供电。图 1.3 中，1 为区域变电站或发电厂，2 为三相交流高压输电线，这两部分即为电气化铁道的一次供电系统。

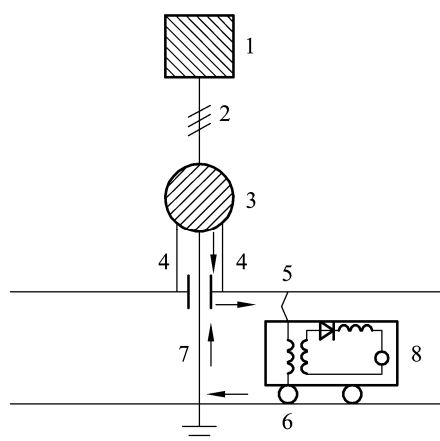


图 1.3 电气化铁道供电系统构成示意图

1—区域变电站或发电厂；2—110 kV (或 220 kV) 交流高压输电线；3—牵引变电所；
4—馈电线；5—接触网；6—轨道；7—钢轨回流线；8—电力机车

(二) 牵引供电系统

完成对电力机车供电的属于铁路部门管辖的装置称为电气化铁道的牵引供电系统。如图 1.3 所示，它由牵引变电所 3、馈电线 4、接触网 5、钢轨 6 和钢轨回流线 7 等组成。

电力部门管辖的电力系统与铁路部门管辖的牵引供电系统是在牵引变电所高压进线的门形架处分界。现将牵引供电系统各部分的功用简述如下：

1. 牵引变电所

牵引变电所沿电气化铁道沿线分布，每一个牵引变电所负责两侧接触网的供电。牵引变电所的左、右两侧接触网称为供电臂或供电分区。牵引变电所的作用是降压和分相，它将电力系统的三相高压电转换成两个单相电，通过馈电线分别供给两侧的接触网。牵引变电所主要设备是牵引变压器，它将 110 kV (或 220 kV) 交流电变换为 27.5 (或 55) kV 的交流电，然后以 27.5 (或 55) kV 的电压等级向牵引网供电。

2. 接触网

接触网是一种悬挂在电气化铁道线路上方，并和铁路轨顶保持一定距离的链形或单导线的输电网。电力机车的受电弓和接触网滑动接触获得电能。接触网的额定电压为 25 kV，如图 1.3 中 5 所示。

3. 馈电线

馈电线是连接牵引变电所和接触网的导线，把牵引变电所变换后的电能输送到接触网。

馈电线一般为大截面的钢芯铝绞线，如图 1.3 中 4 所示。

4. 轨道

在非电牵引情形下，轨道只作为列车的导轨。在电气化铁道，轨道除仍具上述功用外，还需要完成导通回流的任务，是电路的组成部分。因此，电气化铁道的轨道应具有畅通导电的性能。

5. 回流线

连接轨道和牵引变电所中主变压器接地相之间的导线称为回流线，它也是电路的组成部分，其作用是将轨道、地中的回路电流导入牵引变电所，如图 1.3 中 7 所示。

从图 1.3 可以看出，牵引供电回路是：牵引变电所→馈电线→接触网→电力机车→钢轨和大地→回流线→牵引变电所。习惯上，把馈电线、接触网、钢轨、回流线叫做牵引网。

(三) 牵引供电系统的其他供电设备

1. 分区所

在电气化铁道上，为了提高运行的可靠性，增加供电工作的灵活性，在相邻两变电所供电的相邻两供电分区的分界处常用分相绝缘器断开。若在断开处设置开关设备和相应的配电装置，则组成分区所，如图 1.4 所示。分区所（亭）的结构型式有多种，它与铁路运量、单线和复线、向牵引网供电方式、采用设备的类型等因素有关。

在单线单边供电的电气化区段，相邻两供电臂之间仅设分相绝缘器即可，并设旁路隔离开关以便实现临时越区供电，设置分区所（亭）的意义不大。

在复线电气化区段和单线电气化区段双边供电时，一般设置分区亭，在分区亭内用断路器将同一供电分区的上、下行接触网或相邻两供电分区的接触网在末端连接起来，相邻两供电臂间设分相绝缘器和与之并联的隔离开关（或断路器）。

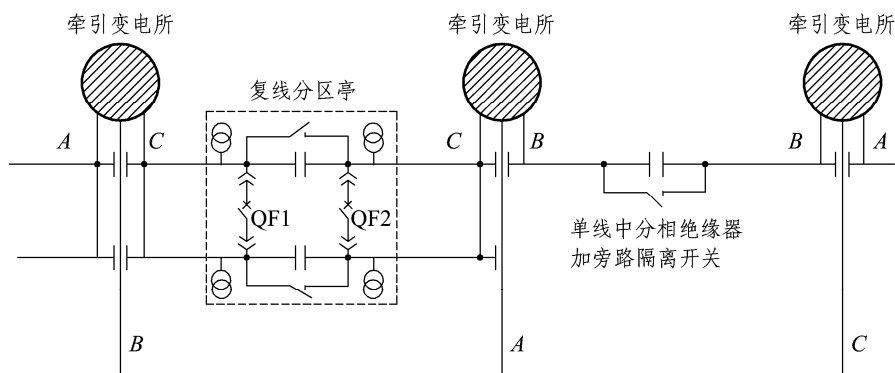


图 1.4 单、复线分区亭

复线分区亭的作用可简述如下：

(1) 使同一供电分区的上、下行接触网并联工作或单独工作。当并联工作时，分区亭内的断路器闭合以提高接触网的末端电压；单独工作时，断路器打开。

(2) 单边供电的同一供电分区上、下行接触网（并联工作）内发生短路事故时，由牵引变电所中的馈线断路器和分区亭中的断路器配合动作，切除事故区段，缩小事故范围。非事故区段仍可照常工作。

(3) 当某牵引变电所主变压器事故中断供电时，可闭合分区亭中与分相绝缘器并联的隔离开关（或断路器），由相邻牵引变电所向事故牵引变电所的供电分区临时越区供电。

2. 开闭所

某些远离牵引变电所的大宗负荷，如枢纽站、电力机务段等，接触网按作业及运行的要求需要分成若干组，需要多条供电线路向这些接触网分组供电。若直接从牵引变电所向这些接触网分组供电，不但会增加变电所的复杂程度，而且将大量增加馈电线的长度，造成一次投资过大。为此，一般采取在大宗负荷附近建立开闭所的办法来解决，如图 1.5 所示。

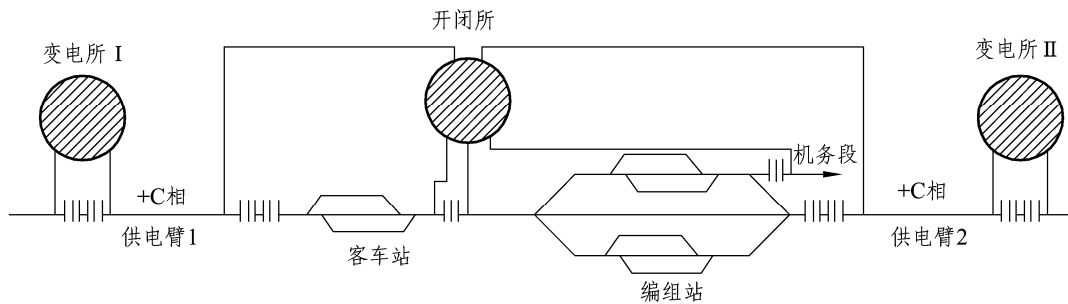


图 1.5 开闭所

开闭所即单相开关站，其中只有配电设备而无牵引变压器，仅用于接受和分配电能。为保证开闭所供电的可靠性，一般从相邻两供电分区上引入两路电源，互为备用。

开闭所的作用可简述如下：

- (1) 开闭所不进行电压变换，只起扩大馈线回路数的作用，相当于配电所。
- (2) 在 AT 供电方式中，将长供电臂分段，事故时可缩小事故范围，提高供电的可靠性。
- (3) 保证枢纽站、场装卸作业和接触网分组检修的灵活性、安全性。
- (4) 降低牵引变电所的复杂程度。

3. 自耦变压器站 (AT 所)

工频单相交流电气化铁路采用自耦变压器 (AT) 供电方式时，在铁路沿线每隔 12 km 左右设置自耦变压器和相应的配电装置，即设置 AT 所。AT 所的作用之一便是将牵引变电所供来的 55 kV 电压经自耦变压器 AT 降为接触网的 25 kV 电压等级，然后向接触网供电。自耦变压器容量较小，接线方式简单，变压器可只设立简单的瓦斯和碰壳保护，由远方电源侧进行保护切除。供电分区中间设有分区亭或开闭所时，自耦变压器站 (即 AT 所) 可与分区亭或开闭所合并。这时，由于分区亭或开闭所设有直流操作电源，自耦变压器可以通过断路器联入牵引网。一旦自耦变压器发生事故，可以由断路器就地切除。

二、对电气化铁道供电系统的基本要求

对电气化铁道供电系统的基本要求：

- (1) 保证向电气化铁路安全、可靠、不间断地供电。
- (2) 提高供电质量，保证必需的电压水平。
- (3) 提高功率因数，减少电能损失，降低工程投资和运营费用。
- (4) 尽量减少单相牵引负荷在电力系统中引起的负序电流、负序电压和高次谐波的影响。
- (5) 尽量减小对邻近的通信线路的干扰影响。

我国电气化铁道已运营了几十年，在实践中积累了大量的经验，但与铁路电气化发达国家相比，在技术及装备上仍有较大的差距。特别是在面临高速、重载和扩能的要求下，电气化铁道供电系统中更有许多技术难题需要解决。

三、电气化铁路（高速铁路）的供电方式

交流牵引供电系统可采用的供电方式主要有 4 种：直接供电方式，BT（吸流变压器）供电方式，AT（自耦变压器）供电方式和 CC（同轴电缆）供电方式。交流电气化铁道对邻近通信线路的干扰主要是由接触网与地回路对通信线的不对称引起的。如果能实现由对称回路向电力机车供电，就可以大大减轻对通信回路的干扰。采用 BT、AT、CC 等供电方式就是为了提高供电回路的对称性，其中 CC 供电方式效率最高，但投资过大。目前，电气化铁路对采用 BT、AT 供电方式。下面逐一介绍。

（一）直接供电方式

这是一种最简单的供电方式。在线路上，机车供电由接触网 1 和钢轨 2（大地）直接构成

回路,对通信干扰不加特殊防护措施,如图 1.6 所示。电气化铁路最早大都采用这种供电方式。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,供电距离一般为 30~40 km。电气化铁路的单项负荷电流由接触网经钢轨流回牵引变电所。由于钢轨和大地不是绝缘的,一部分回流由钢轨流入大地,因此对通信线路产生感应影响,这是直接供电方式的缺点。它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区段,必要时也将通信线迁到更远处。

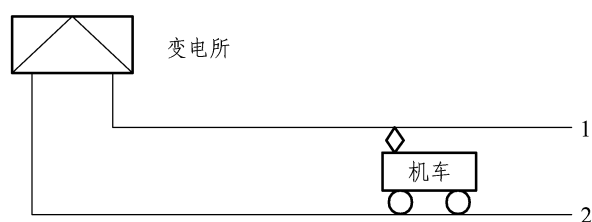


图 1.6 直接供电方式

带回流线的直接供电方式是在接触网支柱上架设一条与钢轨并联的回流线,称为负馈线(NF),如图 1.7 所示。利用接触网与回流线之间的互感作用,使钢轨中的回流尽可能地由回流线流回牵引变电所,减少了电气空间,因而能部分抵消接触网对邻近通信线路的干扰,但其防干扰效果不及 BT 供电方式。这种供电方式可在对通信线路防干扰要求不高的区段采用,能进一步降低牵引网阻抗,供电性能要好一些,但造价稍高。目前我国京广线、石太线均采用此种供电方式。

