第一章　供电系统概述

第一节　电力系统的一般概念

电能是当代社会最重要、也是最方便的能源。电能具有许多优点：① 可以十分经济又方便地进行输送和分配；② 可以很方便地与其他形式的能量互相转换；③ 在使用中易于被操作和控制，使得其自动化生产、输送和在各个领域中的普及应用易于实现。因此电能广泛应用于工农业，交通运输，商业贸易，通信以及人民的日常生活中。以电作为动力，可以促进农业生产机械化和自动化，保证产品质量，大幅度提高生产效率。还要指出，提高电气化程度，以电能代替其他形式的能，是节约能源消耗的一个重要途径。

一、电力系统的组成

电力系统是由发电厂、电力网和用电设备组成的统一整体。

电力网是电力系统的一部分。它包括变电所、配电所及各种电压等级的电力线路。与电力系统相关联的还有动力系统。动力系统是电力系统和“动力部分”的总和，所谓“动力部分”，包括火力发电厂的锅炉、汽轮机、热力网、用热设备和水力发电的水库、水轮机以及原子能发电厂的核反应堆、蒸发器等等。所以，电力系统是动力系统的一个组成部分。

图 1-1 是电力系统示意图。

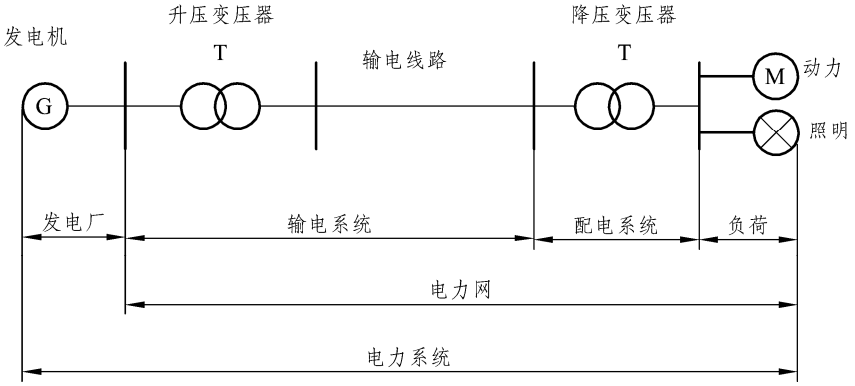


图 1-1　电力系统示意图

（一）发电厂

发电厂（或称发电站）是将各种形式的能量转换为电能的特殊工厂。它的产品是电能。根据所利用的一次能源的不同，发电厂分很多种类型。目前，我国接入电力系统的发电厂主要是火力发电厂、水力发电厂和核发电厂。

1. 火力发电厂

火力发电厂又称火电站或火电厂。火电厂的能源有煤、石油或天然气。我国火电厂的主要能源是煤。有的火力发电厂除了供应电能外，还向电厂附近的工矿企业或居民区供应热能，这种发电厂称为热电厂。

2. 水力发电厂

水力发电厂又称水电站或水电厂。水力发电厂的能源是水。它是将水流的位能通过水轮发电机转换为电能。水电站又分为三类：堤坝式水电站（如长江三峡水电站）、引水式水电站（在具有相当坡度的河段上游筑一低坝，拦住河水，然后用引水道将水直接引到厂房内，通过水轮发电机将水能转换为电能）、混合式水电站（堤坝式和引水式水电站的组合）。

3. 核发电厂

核发电厂又称核电站或核电厂。它的发电原理和火力发电原理相类似，只是热能的产生方式不同而已。核电站能源是核能燃料铀或钍，它利用原子能燃料裂变产生的大量热能进行发电。

火力发电和水力发电在我国电能生产中占有很大的比例，除此之外，还有风力、地热和太阳能发电等。

（二）变电所或变电站

变电所是接受电能、变换电压和分配电能的场所。其主要设备有电力变压器、母线和开关设备等。根据变电所任务的不同，可将变电所分为升压变电所和降压变电所两大类。升压变电所的主要任务是将低电压变换为高电压，一般建在发电厂；降压变电所的主要任务是将高电压变换到一个合理的电压等级，一般建立在靠近负荷中心的地点。根据在电力系统中的地位和作用不同，降压变电所又分枢纽（或区域）变电所、地区变电所和工业企业变电所等。只用来接受和分配电能而不承担变换电压任务的场所，称为配电所，多建于工厂内部。用来将交流电流转换为直流电流，或将直流电流转换为交流电流的电能变换场所，常称为变流站。

（三）输电线路

电力线路是输送电能的通道。因为发电厂距电能用户较远，所以需要各种不同电压等级的电力线路。电力线路作为把发电厂、变电所和电能用户联系起来的纽带，将发电厂生产的电能源源不断地输送到电能用户。

通常，电压为 220 kV 以上的电力线路称输电线。电压为 220 kV、110 kV 及以下电力线路，称为（高、中、低压）配电线路。

（四）电能用户

在电力系统中，一切消费电能的用电设备均称为电能用户或用电负荷。按用途，用电设备可分为动力用电设备、工艺用电设备、电热用电设备、照明用电设备和试验用电设备等。

按用户的重要程度和对供电可靠性的要求，用电负荷可分为三类，负荷等级不同的用户对供电可靠性的要求有所差别。

1. 一级负荷

一级负荷是用户负荷中对供电可靠性要求最高的负荷，这类负荷中断供电将造成人身伤亡、重要设备严重损坏、重要产品大量报废、生产秩序被打乱并长期不能恢复或使城市生活发生严重混乱。对这类负荷，必须有两路以上的独立电源供电。电气化铁路的牵引供电系统即属于一级负荷。

2. 二级负荷

对二级负荷中断供电将造成产品产量及质量严重下降。对这类负荷，应有两路电源供电且当任何一路电源失去后，能保证全部或大部分二级负荷的供电。当负荷较小或地区供电条件困难时，才允许由一路 6 kV 及以上的专用架空线供电。

3. 三级负荷

三级负荷是指不属于一级负荷和二级负荷的其他负荷，这类负荷对供电可靠性要求不高，可以允许非连续性供电，如工厂的附属车间，小镇和农村的公共负荷等。对这一级荷的短时供电不会造成重大的损失。这类负荷通常用一路电源供电。

二、电力系统运行的特点和要求

（一）电力系统运行特点

（1）电能不能大量储存。

电能的生产输送、分配和消费是同时进行的，发电厂任何时刻生产的电能，必须等于同时刻用电设备消耗的电能与电力系统本身所消耗的电能之和。

（2）电力系统暂态过程非常短暂。

发电机、变压器电力线路和电动机等设备的投入和切除都是瞬时完成的。电能从一地点输送到另一地点所需的时间，仅千分之几秒甚至百万分之几秒。电力系统由一种运行状态到另一种运行状态的过渡过程也是非常短暂。

（3）与国民经济各部门及人民日常生活有极为密切的关系。

（二）对电力系统的基本要求

电力系统是由电能的生产、输送，分配和消费的各个环节组成的一个整体，与别的工业系统相比，电力系统的运行具有如下明显特点。

（1）可靠性。

供电安全可靠是对电力系统最基本的要求。一旦供电中断将导致生产停顿、生活混乱，甚至危及人身和设备安全，造成严重的经济和政治损失。

（2）良好的电能质量。

电压和频率是标志电能质量的两个重要指标。我国规定：额定频率为 50 Hz，允许偏差（±0.2 Hz～±0.5 Hz）：各级额定电压允许偏差一般为±5%U_n。电压或频率超过允许偏差范围，不仅对设备的寿命和安全运行不利，还可造成产品减产或报废。

（3）波形是电能质量的另一个重要指标，理想状态的电力系统电压是 50 Hz 严格的正弦波，但系统中大量非线性电力元件的存在，导致高次谐波的出现，使得电压电流波形产生畸变，严重影响电气设备的运行。高次谐波已经成为公共电网的一大“公害”，国家对公共电网中的谐波也有明确的规定。

（4）灵活性。

电力系统接线力求简单，并应能适应负荷变化的需要，灵活、简便迅速地由一种运行状态转换到另一种运行状态，在转换过程中不易发生误操作；能保证正常维护和检修工作安全方便地进行。

（5）经济性。

所谓经济性是指投资少、年运行费用低。在满足必要的技术要求的前提下，应力求经济。

（6）发展性。

为适应建设事业的发展，对电压等级、设备容量、安装场地等应留有定的发展余地。

（7）尽可能减小对生态环境的有害影响。

保证安全可靠地发、供电是对电力系统运行的首要要求。在运行过程中，供电的突然中断大多数由事故引起。必须从各方面采取措施以防止和减少事故的发生，例如要严密监视设备的运行状态和认真维修设备以减少事故，要不断提高运行人员的技术水平以防止人为事故。为了提高系统的运行安全可靠性，还必须配备足够的有功功率电源和无功功率电源；完善电力系统的结构，提高电力系统抗干扰的能力，增强系统的运行的稳定性；利用计算机系统的运行进行安全监视和控制等。

三、电力系统的额定电压和额定频率

额定电压，通常指电器设备铭牌上标出的线电压。电器设备都是按照指定的电压和频率设计制造的。这个指定的电压和频率称为电器设备的额定电压和额定频率。当电器设备在该电压和频率下运行时，能获得最佳的技术性能和经济效果。

为了成批生产和实现设备互换，各国都制定有标准系列的额定电压和额定频率。我国规定工业用标准额定频率为 50 Hz（工频）；国家标准规定，交流电力网和电力设备的额定电压等级较多，但考虑设备制造的标准化、系列化，电力系统额定电压等级不宜过多，具体规定如表 1-1 所示。频率能否维持不变主要取决于系统中有功功率的平衡，频率偏低，表示系统发出的有功功率不足，应设法增加发电机出力。系统电压主要取决于系统中无功功率的平衡，无功不足，则电压偏低，应增加发电机励磁。

从表 1-1 中可以看到，同一个电压级别下，各种设备的额定电压并不完全相等。为了使各种互相联系的电器设备都能运行在较有利的电压下，各电气设备的额定电压之间有一个相互配合的问题。

表 1-1　各级电网中的额定电压

类　别	电力网和用电设备额定电压	发电机额定电压	电力变压器额定电压	
			一次绕组	二次绕组
低压配电网/V	220/127 380/220	230 400	220/127 380/220	230/133 400/230
中压配电网/kV	3 6 10 -	3.15 6.3 10.5 13.8 15.75 18 20	3 及 3.15 6 及 6.3 10 及 10.5 13.8 15.75 18 20	3.15 及 3.3 6.3 及 6.6 10.5 及 11 —
高压配电网/kV	35 65 110 220	— — — —	35 65 110 220	38.5 69 121 242
输电网/kV	330 500 750	— — —	330 500 750	363 550 —

电力线路的额定电压和系统的额定电压相等，有时候把他们称为网络的额定电压。

发电机的额定电压与系统的额定电压为同一等级时，发电机的额定电压规定比系统的额定电压高 5%。

变压器的额定电压的规定略为复杂。一次侧绕组的作用相当于受电设备，其额定电压与系统的额定电压相等，但直接与发电机连接时，其额定电压与发电机的额定电压相等。二次绕组的作用相当于供电设备，考虑其内部电压损耗，额定电压规定比系统的额定电压高 10%，如果变压器的短路电压小于 7%或直接（包括通过短路离线路）与用户联系时，则规定比系统的额定电压高 5%。为了适应电力系统运行调节的需要，通常在变压器的高压绕组上设计有分接抽头。分接抽头用百分数表示，即表示分抽头与主轴抽头电压的差值为主轴抽头电压的百分之几。对同一电压及的变压器，升压变压器和降压变压器，即使分接头百分值相同，分接头的额定电压也不同。

第二节　牵引供电系统简介

电力牵引供变电系统是指从电力系统或一次供电系统接受电能，通过变压、变相或换流（将工频交流变换为低频交流或直流电压）后，向电力机车负荷提供所需电流制式（交流或直流）的电能，并完成牵引电能传输、配电等全部功能的完整系统。牵引供电系统的性能直接影响列车牵引功率的发挥和牵引传动控制系统的性能。

一、电流制的发展

电力牵引供电系统按照向电力机车提供的电流性质分为直流制和交流制，交流制又分工频单相交流制和低频单相交流制。工频指工业标准频率，即 50 Hz 或 60 Hz，低频指低于工业标准频率的频率，应用最多的为 50 Hz 的三分之一。各种电流制的电力牵引供电系统的设备有很大的差别。

直流制应用最早，19 世纪末电力牵引开始用于铁路干线时，应用的就是直流制。目前在英、法、日、苏等国，直流制仍然大量存在。直流制是将电力系统的三相交流电降压并变换为直流电供应接触网。接触网电压有 1 200 V、1 500 V、3 000 V 等多种。由于电力机车电压受直流牵引电动机换向条件的限制，接触网电压很难大幅度提高，所以直流制要沿接触网输送大量电流，在接触网上一般须用两根铜接触导线，并应用铜承力索，另加一些平行的铝加强导线来分流，耗费有色金属量较大。另外，为了保持接触网的电压水平，沿线路每隔 10～30 km 须设置一个牵引变电所。直流制的这些弱点，推动了交流制的研究。

20 世纪初，工频三相交流制和低频单相交流制相继出现。工频三相交流制曾在意大利应用，由接触网输送三相中的两相，另一相接地。后因两相接触网结构复杂、维护困难被淘汰。低频单相交流制则在德国、瑞典、瑞士等国得到发展。这种电流制接触网电压一般为 15 kV，在电力机车上降压，使用单相整流子牵引电动机。交流制的接触网比直流制的简单得多，牵引变电所的设置间距也加长。采用低频的主要原因是整流子牵引电动机换向困难，不适宜于在工频运转。低频制需要低频电源，所以低频制电气化铁路必须建设专用低频发电厂，或者在牵引变电所将电力系统送来的工频电流降压并变换成低频电流。早年采用电动发电机组来变换频率，后来改用静止式变频器，设备比直流制复杂。单相整流子牵引电动机也不如直流牵引电动机构造简单和容易维护。

1933 年匈牙利建成一条工频单相交流制电气化铁路，接触网电压为 16 kV，电力机车上采用旋转式变相频机和三相异步电动机。这种电力机车由于构造复杂，没有得到推广。1955 年，法国在电力机车上采用静止式整流器和直流牵引电动机获得成功，工频单相交流制才在各国推行开来。原来采用直流制的日本、苏联、英国、印度等国也相继采用工频单相交流制。这种交流制接触网电压一般为 25 kV，接触网构造进一步简化，牵引变电所的设置间距扩大为 30～70 km。电力机车上静止式整流器最初应用引燃管，后来普遍采用硅半导体整流器。整流技术的进步，是工频单相交流制获得广泛应用的一个重要原因。中国铁路采用额定电压 25 kV 为工频单相交流制。TB10621—2009《高速铁路设计规范》明确规定接触网的标称电压为 25 kV，长期最高电压为 27.5 kV，短时（5 min）最高电压为 29 kV，设计最低电压为 20 kV。这样规定是因为供电电压高于最低电压（20 kV）即可保证动车组运行，但该电压并不能保证动车组功率完全发挥。目前 IEC62313（等效 EN50388）《轨道交通供电系统和机车车辆运行匹配技

术标准》已提出“平均有效电压”的概念，该参数是评估电压与机车性能关系的重要指标。受电弓的平均有效电压达到 22.5 kV 及以上时，动车组才能发挥最佳性能。

二、牵引供电系统的组成

工频交流单相电力牵引供电系统主要由牵引变电所、牵引网、分区所、开闭所等部分组成；牵引网实行单相供电，由馈电线（简称馈线）、接触网、轨道电路及回流线等组成。我国规定牵引网额定电压为 25 kV，额定频率为 50 Hz。交流电气化牵引供电系统组成结构如图 1-2 所示，牵引供电构成的回路是：牵引变电所—接触网—电力机车—钢轨和大地—回流线—牵引变电所。城市轨道交通的直流电力牵引供电系统则由主变电所、直流牵引变电所、牵引网等组成。

（一）交流牵引供电系统

1. 牵引变电所

牵引变电所是交流工频单相电力牵引供变电系统的重要环节，它完成变压、变相和向牵引网供电，并实现三相交流一次供电系统与单相电力牵引系统的接口与系统变换。牵引变电所停电后，可由相邻变电所实现越区供电，但牵引网电压水平将下降。

根据交流牵引网的不同供电方式和牵引变电所为抑制单相牵引负荷造成电力系统的不对称影响，可采用不同接线方式与结构的主变压器，区分为单相牵引变电所（含 V/V 形接线方式主变压器）、三相牵引变电所（如 YNd11 接线主变压器）、三相一二相牵引变电所。相对于牵引网不同供电方式而言，则区分为直接供电方式、直供+回流线的供电方式、带吸流变压器的供电方式、自耦变压器供电方式、同轴电力电缆供电方式。

2. 接触网

按电力机车集电方式的不同，接触网可分为：架空单线式、架空复线式和接触轨（第三轨）三种方式。交流电气化铁道多采用架空单线式；城市无轨电车则采用架空复线式，第三轨方式则普遍应用于地下铁道。

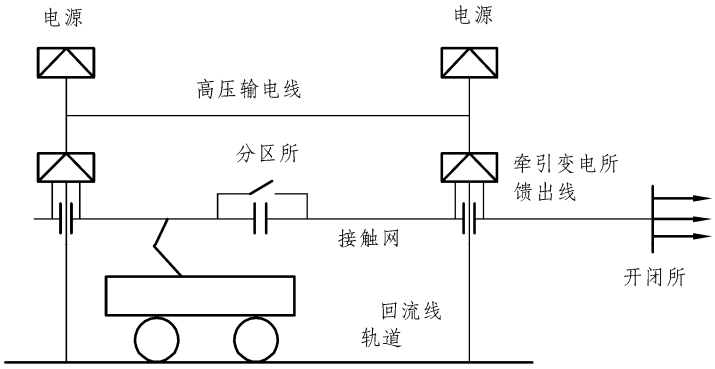


图 1-2　交流牵引供电系统示意图

正常供电时，由牵引变电所馈线到接触网末端的一段供电线路，称为供电分区，也称供

电臂。由于牵引负荷常处于运动之中，对于接触网的要求除了提供数量足够并符合质量标准的电能外，还应保证牵引负荷受流的稳定性。

3. 馈电线

馈电线是连接牵引变电所和接触网的导线，也称馈出线。馈电线一般采用钢芯铝绞线，将变电所的电能输送给接触网。

4. 回流线

回流线是牵引供电回路中的一部分，是将轨道和牵引变电所主变压器接地相之间连接的导线，通过其将流经电力机车的负荷电流引入变电所。

5. 轨道

轨道除了作为电力机车的导轨外，同时是牵引供电系统中回流电路的一部分，在供给机车的电流中有一部分是流入大地的，轨道的作用就是将大地中的回流导人变电所。

6. 分区所

交流电气化铁道上为了增加供电的灵活性，提高运行的可靠性，在两个牵引变电所的供电区中间常加设分区所。分区所的作用如下：

（1）可以使两相邻的供电区段实现并联工作或单独工作。当实现并联工作时，分区所的断路器闭合，否则打开。

（2）当相邻牵引变电所发生故障而不能继续供电时，可以闭合分区所的断路器，由非故障牵引变电所实行越区供电。

（3）双边供电的供电区内发生牵引网短路事故时，可由分区所的断路器切除事故点所在处的一半供电区，非事故段仍可照常工作。

7. 开闭所

交流电力牵引系统开闭所，实际上是起配电作用的开关站，在牵引网有分支引出时，为不影响电力牵引安全，保证可靠供电而设置带保护断路器等设施的控制场所。一般是在下面两种情况或系统中设置。

一种情况是在离牵引变电所较远的铁路枢纽地区，由于站线多，接触网相应复杂，客货列车运行、编组和机车进出库作业繁忙，致使该地区故障几率增多。为保证枢纽供电可靠性，缩小事故范围，一般将接触网横向分组及分区供电，由开闭所的多路馈线向接触网各分组和分区供电。

另一种情况是在 AT 供电方式的复线牵引网供电臂中间设置开闭所，由于 AT 供电方式供电电压增高（2×25 kV），供电臂距离增长，可达 40-50 km，为提高供电灵活性，缩小事故停电范围和降低牵引网电压损失和电能损失，需要在牵引变电所与分区所之间增设开闭所。

8. AT 所

当牵引供电系统采用自耦变压器供电方式时，需在沿线 10-15 km 设置一台自耦变压器，

自耦变压器站简称 AT 所，是 AT 牵引网的重要组成部分。

9. 分相绝缘器和分段绝缘器

分相绝缘器又称电分相，串接在接触网上，目的是把两相不同的供电区分开，并使机车光滑过渡，主要用在牵引变电所出口处和分区所处。分段绝缘器又称电分段，分为纵向电分段和横向电分段，前者用于线路接触网上，后者用于站场各条接触网之间。通过其上的隔离开关将有关接触网进行电气连通或断开，以保证供电的可靠性、灵活性和缩小停电范围等。

（二）直流牵引供电系统

1. 主变电所

主变电所从电力系统的区域变电所或城市降压变电所接受电能，向地铁、城市轨道交通沿线直流牵引变电所、降压变电所集中供电，并以环网或双电源进线方式保证牵引、电力负荷的不间断供电。主变电所一般设在电气化线路两端或中间，供电电压为 10～35 kV。条件允许时也可从城市降压变电所直接向直流牵引变电所供电。

2. 直流牵引变电所

直流牵引变电所从环网供电线路的双电源受电，经整流机组变压器降压、分相后，按一定整流接线方式由大功率硅整流器（或可控整流器）把三相交流电变换为与直流牵引网相应电压等级的直流电，并向电动机组或电动车辆供电，如图 1-3 直流牵引供电系统示意图。

地铁、城市轻轨交通直流牵引变电所有时常与向车站、区间供电的降压电力变电所合并，形成牵引、降压混合变电所。此时，主电路和电气设备与一般直流牵引变电所相比有所不同。

在有再生电能需向交流电网返送的情况下，直流牵引变电所必须增设可控硅逆变机组，其功能和设备也相应增加，运行、技术都较复杂。直流牵引变电所距离仅几公里，一般不设分区所和开闭所。

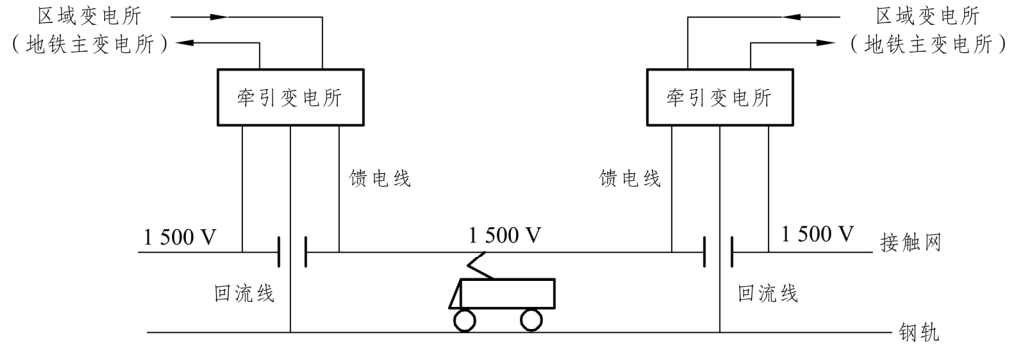


图 1-3　直流牵引供电系统示意图

三、牵引供电方式

（一）牵引变电所对牵引网的供电方式

牵引变电所向牵引网供电有单边供电和双边供电两种方式。接触网通常在相邻两个牵引变电所中间断开，分成两个供电臂。如每一个供电臂只能从一端的牵引变电所取得电流的供电方式称为单边供电；如相邻牵引变电所的两个同相供电臂可从两个牵引变电所获取电能，这种供电方式称为双边供电。

1. 单边供电

我国单线电气化铁路全部采用单边供电，如图 1-4 所示。单边供电与其他区段无联系，当某一供电臂内的接触网发生故障时，只影响本供电臂，而不影响其他供电臂的正常供电，从

而缩小了事故范围，并且继电保护设置简单。

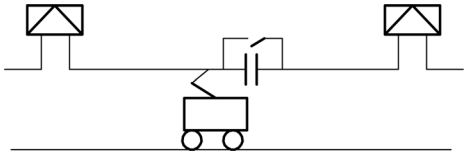


图 1-4　单边供电方式原理图

对于复线电气化区段的供电臂末端设有分区所，将上下行接触网通过断路器实现单边上下行同相并联供电，如图 1-5 所示。该供电方式能均衡上下行供电臂的电流，降低接触网损耗，提高电压水平。

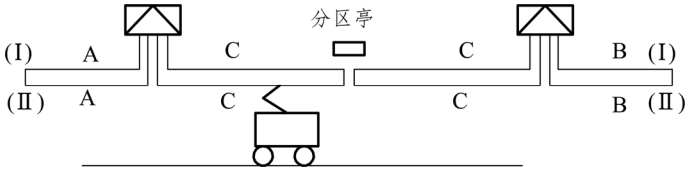


图 1-5　复线区段单边上下行同相并联供电方式原理图

2. 双边供电

双边供电是由相邻两个牵引变电所同时向其间的接触网供电，在供电臂末端分区所连接起来。两边供电时，电力机车从两个牵引变电所取流，每条馈电线的电流相对减小，降低了牵引网中的电压损失和电能损失，而且牵引变电压器和接触网悬挂的负载较均匀，同时由于电力机车两边的供电电流方向相反，故可以减小对通信线路的电磁感应干扰。但这种供电方式还存在着一些问题，如牵引变电所低压侧双边供电，对电力系统来说，相当于在低压侧联网，若不是同一个电力系统供电的牵引变电所，低压侧禁止联网，即使同一个电力系统供电，接触网双边供电后形成环网，当牵引变电所电源侧线路发生故障时，由低压向高压反馈，会造成继电保护设置困难，严重时，原边电压升高，造成设备损坏。

（二）牵引网对电力机车的供电方式

针对牵引网的结构，采用不同的技术措施和装备，以减少牵引网对邻近通信线路的干扰，降低牵引网的电压损失和电能损失，提高电气化铁路效益，从而形成了牵引供电系统不同的供电方式。目前单相工频 25kV 牵引网供电方式主要有直接供电方式（TR）、带回流线的直接供电方式（TRNF）、带吸流变压器（BT）供电方式、自耦变压器（AT）供电方式和同轴电力电缆（CC）供电方式。

1. 直接供电方式

直接供电方式是在牵引网中不加特殊防护措施的一种供电方式。电气化铁路最早大都采用这种供电方式，它的一根馈线接在接触网上，另一根接在钢轨上，如图 1-6 所示。

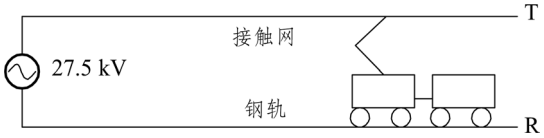


图 1-6　直接供电方式

这种供电方式最简单，投资最省，牵引网阻抗较小，能耗也较低。供电距离单线一般为 30 km 左右。电气化铁路是单相负荷，机车由接触网取得的电流经钢轨流回牵引变电所。由于钢轨和大地不是绝缘的，一部分电流经钢轨流入大地，因此对通信线路产生电磁感应影响，这是这种供电方式的缺点。直接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。

2. 带回流线的直接供电方式

直接供电方式牵引网结构简单经济，主要缺点是它会对沿线通信线产生电磁干扰影响。这限制了它的应用。为了减轻牵引网的电磁干扰影响，可在接触导线平行位置增加金属回流线，隔一距离设置连接导线将回流导线与钢轨并联，从而构成回流导线和钢轨—地回路的回流设施，这种供电方式就是带回流线的直接供电方式，如图 1-7 所示。

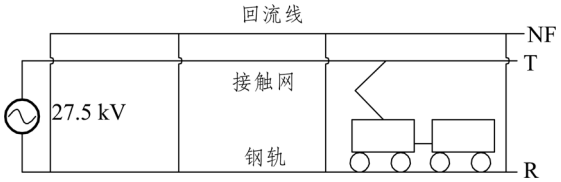


图 1-7　带回流线的直接供电方式

带回流线的直接供电方式，机车电流一部分通过钢轨和大地流回牵引变电所（约 70%），其余通过回流线流回牵引变电所（约 30%）。由于流经接触网的电流和流经回流线的电流虽然大小不等，但方向相反，且安装高度比较接近，两者对铁路沿线通讯设施的电磁干扰影响趋于抵消，因此牵引网本身具备防干扰功能。在接地方面，接触网支柱通过回流线实现集中接地，回流线每隔一个闭塞分区通过吸上线（铝芯或铜芯电缆，常用 VLV-70 和 2xVLV-150）与信号扼流圈中性点连接（吸上线间距 3～4 km）。

3. 带吸流变压器（BT）供电方式

1）BT 供电方式的工作原理

BT（Boost Transformer）供电方式又称吸流变压器供电方式，在我国早期电气化铁路中有采用，其主要目的是提高牵引网防干扰能力，但随着通信线路电缆化和光缆化，防干扰矛盾越来越不突出，其生命力也已大大降低，该种供电方式目前已经基本不采用。工作原理如图 1-8 所示。

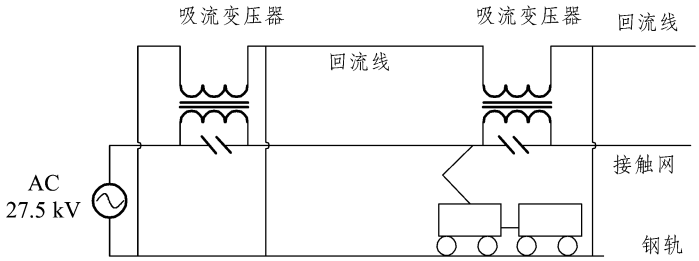


图 1-8　BT 供电方式原理图

图中，牵引网每隔一段距离在牵引网的接触导线和回流线接入变比为 1∶1 的吸流变压器

BT，其原边串入接触网中（在绝缘锚段关节处），次边串入回流线中，吸流变压器的间隔为 3～4 km，在两个吸流变压器的中间设有吸上线，用于将钢轨中的牵引电流吸入回流线。当牵引负荷电流经 BT 原边时，其副边产生很大的互感电流，迫使负荷电流沿回流线流回牵引变电所而不经钢轨和大地，从而极大地减弱了牵引网周围的磁场，有效降低了牵引电流对邻近通信线路的干扰影响。

2）BT 供电方式存在的主要问题

吸流变压器—回流线供电方式存在着在机车所处的 BT 间隔内在一定范围内失去吸流防护效果的现象，即："半段效应"，在该 BT 段内接触网与回流线中的电流并不相等，防干扰效果并不明显，而在其余 BT 段内两者的电流大小相等，方向相反，防干扰效果非常明显。

但是，由于 BT 变压器自身存在较大的阻抗，且安装密度较大，其在牵引网中引起的电压损耗也较大。因此，在同等条件下，BT 供电方式变电所间距小于其他供电方式，且每 3～4 km 在接触网内存在断口，断口两端因 BT 自阻抗而存在一定的电压差，机车通过该断口时可能会产生电火花，导致接触网的使用寿命缩短。

4. AT 供电方式

在牵引网中并联自耦变压器而形成 AT 供电方式，AT 供电方式除具有显著的降低电气化铁路对外界的电磁干扰外，还具有现行其他供电方式所不具备的技术优势而被许多国家采用。

1）AT 供电方式工作原理

AT 供方式原理图 1-9 所示，牵引变电所牵引侧电压为单相 55 kV 或两相 2×27.5 kV，AT 表示变比为 2∶1 的自耦变压器，牵引网接触线 T 和正馈线 F 接在自耦变压器原边，构成 55 kV 供电回路，而钢轨与自耦变压器的中点连接，使接触网和钢轨间的电压仍然保持为 27.5 kV。因此，在列车与变电所之间形成长回路，由列车所在的 AT 段形成短回路，由于长回路电压提高了一倍，在相同的牵引功率下牵引网上电流减小，使得电压损失、功率损失都大大下降，因而 AT 供电系统运行的技术指标得到大大的改善。自耦变压器的容量，视铁路运量及 AT 间隔大小而定，通常 AT 间距为 8～12 km，自耦变压器的容量为 2 000～3 000 kVA。

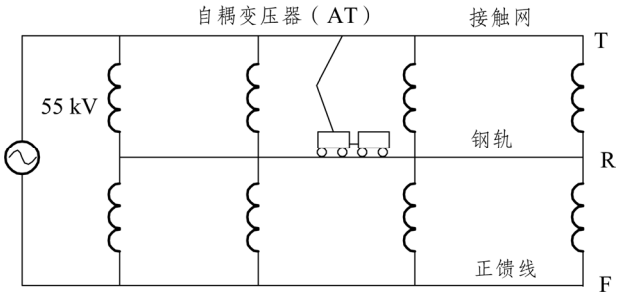


图 1-9　AT 供电方式原理图

由于自耦变压器存在阻抗且容量有限，因而远离机车的 AT 也提供部分牵引电流，致使全部供电区的轨道—地回路中都有电流流通，并相应地存在地中电流，导致对邻近通信线路产生电磁感应影响。但由于 AT 阻抗很小（一般为 0.45 Ω），因而机车所处 AT 段以外的每台 AT 所向机车供给的牵引电流较小，可有效降低全线的感应影响，其防护效果与 BT 供电方式相当。

2）AT 供电方式的主要技术特性

（1）牵引网传输功率和电压水平提高，由于 AT 原边为二倍接触网电压，只有 1/2 牵引电流通过接触网和正馈线，有利于牵引网传输较大功率。同时，牵引网的电压损失和功率损失大幅度降低，可提高电压水平，增强运营的经济效益。

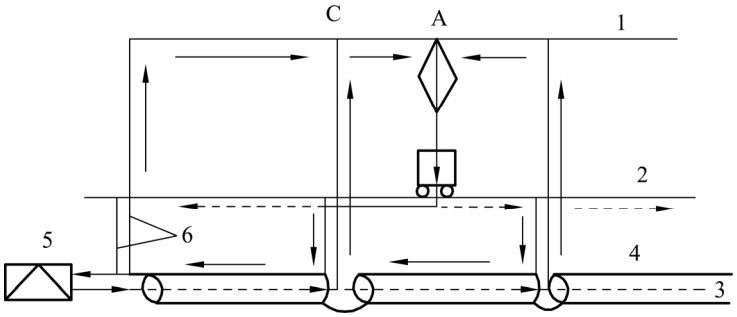
（2）牵引网电压提高为 2×25 kV 后，牵引变电所的间隔可增大为 90～100 km（比 BT 供电方式增大 3 倍），变电所主变压器副边绕组和相应的开关设备绝缘水平提高，牵引网单位阻抗比 BT 方式有较大降低，但牵引网结构复杂，并在沿线设置若干台自耦变压器及相应的开关设备和避雷器等（称为 AT 站），使牵引网系统（含 AT 站）的造价增大，维护运行工作增多。

（3）对通信线防干扰特性和效果较好，且接触导线不需断口，有利于列车高速运行。

总之，采用 AT 供电方式时，应作牵引供电系统的全面综合技术经济比较，尽量发挥它的技术优势。在高速重载电气化区段 AT 供电方式有较大的适用性，也可按不同地区采用 AT 方式和带回流线的直接供电方式相结合的综合供电方式。

5. CC 供电方式

CC 供电方式是一种新型的供电方式。同轴电力电缆沿铁路线路埋设，其内芯线作为馈电线与接触网并联连接，外部导体作为回流线与钢轨并联连接。每隔 5～10 km 作一个分段，如图 1-10 示。由于馈电线与回流线在同一电缆中，间隔很小，而且同轴布置，使互感系数增大，因同轴电力电缆的阻抗比接触网和钢轨的阻抗小得多，牵引电流和回流几乎全部经由同轴电力电缆中流过。因此电缆芯线与外部导体电流相等，方向相反，二者形成磁场相互抵消，对邻近通信线路几乎无干扰。由于阻抗小，供电距离长。



1—接触网；2—钢轨；3—同轴电缆内芯；4—同轴电缆外芯；
5—牵引变电所；6—连接导线。

图 1-10　CC 供电方式原理图

6. 牵引网对电力机车的供电方式的特点

1）AT 供电方式特点

（1）2×25 kV 系统，供电电压比直供方式高一倍，电压损失降为 1/4，牵引网单位阻抗约为直供方式的 1/4（实际略高），电能损失小，显示了良好的供电特性。（55 kV 阻抗归算至 27.5 kV，阻抗 1/4，压损 1/4）

（2）牵引变电所的间距大，易选址，减少了外部电源的工程数量和投资。

（3）减少了电分相数量，有利于列车的高速运行。

（4）牵引网回路是平衡回路，防干扰效果，可改善电磁环境，并减少防干扰费用。

（5）牵引网系统需设正馈线，较一般直供方式复杂，但在重负荷区段不必设加强导线，

可与直供方式相当；变电系统较直供方式减少了牵引变电所的数量，但需设 AT 所，一般ＡＴ间距为 10～20 km，开关设备需用双极。

（6）牵引网结构复杂，导线数量多，对跨线建筑物和隧道净空要求高，投资较大，保护和维护难度较大。

2）带回流线的直接供电方式

（1）1×25 kV 系统，变电设施较为简单，接触网在一般情况下（重负荷除外）也比较简单，但在接触网使用加强导线的情况下，牵引网结构与 AT 供电方式相当。

（2）在牵引网的电压损失和电能损失方面较 AT 供电方式大。

（3）牵引变电所的间距较小，增加了电分相数量，外部电源的工程数量和投资较大。

（4）牵引网回路不完全是平衡回路，防干扰性能较差，需增加防干扰费用。

（5）供电回路结构简单，运行可靠，投资和维修量低。

（6）适用于防干扰问题不突出和外部电源投资相对较小的区段及运输繁忙干线、重载和高速线。

3）高速铁路常采用的供电方式

总之，技术上 AT 和带回流线直供方式均能满足 300 km/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，同时电分相数目减少。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。

高速铁路牵引供电方式应采用 AT 供电方式或带回流线的直接供电方式。

第三节　牵引供电系统的外部电源

牵引供电系统的外部电源来自公用电力系统的电力网，限制电力网送电能力的因素有导线发热、电压损、功率和能量损耗、稳定破坏四个方面。这四个方面都是由电流引起的。解决方法就是提高供电电压，减小电流。但是电压提高会导致电器设备的投资增大。因此，选择一个合适的电压电压等级牵引变电所设计中的一项重要工作。电力网的电压等级一般根据输送功率和输电距离来选择，其应用的大致范围可参照表 1-2。

表 1-2　电力网电压与输送功率、输电距离的关系

额定电压/kV	输送功率/MVA	输送距离/kM
110	10～50	50～150
220	100～150	100～300
500	1000～1500	150～850

我国第一条电气化铁路宝凤段 1961 年建成开通时，牵引变电所外部电源即采用 110 kV 电源供电，随后建成的其他电气化铁路一直习惯采用 110 kV，应该说均保证了安全、可靠供电。对于高速铁路牵引负荷增大较为明显。一般来说，时速 350 kM/h 铁路按间隔 3 min，16 辆编组运行时，牵引变电所的负荷瞬间可达 170 MVA，高峰小时可达 130 MVA。由于牵引负荷电流大，波动比较剧烈，谐波含量丰富，并且属于单项负荷，为了增大电网对谐波、负序