第一章　电气化铁道与电力牵引

第一节　概　述

一、电气化铁道概述

采用电力机车为主要牵引动力的铁路称为电气化铁路，最早出现于 19 世纪 70 年代末的欧洲。早期的电气化铁路多采用直流供电方式，电压等级较低，需在地面（牵引变电所内）设整流装置，不宜设置在长距离的铁路干线上。在城市轨道交通中，由于在公共场所只允许使用低压电源，而且相对于交流供电方式来说，直流供电方式对毗邻接触网的信号和通信系统干扰较小，因此，城市轨道交通一般采用直流供电方式。

目前国际上普遍采用比较先进的单相工频交流制电气化铁路，它便于升压和减少电能的损耗，可以增加牵引变电所之间的距离，大大降低建设投资和运营费用。

随着高新技术的发展，特别是计算机技术的应用，使电力机车和牵引供电装置的工作性能不断提高。低能耗、高效率、高速度的电力牵引已成为世界各国铁路发展的趋势，是铁路现代化的标志。目前我国正式运营的高速铁路均采用电气化铁道技术，在高速铁路上运行的动车组均采用电力牵引方式，既有铁路上运营的动车组主要采用电力牵引方式。

二、电气化铁路的组成

由于电力机车本身不携带能源，靠外部电力系统经过牵引供电装置供给其电能，故电气化铁路是由电力机车和牵引供电装置组成的。

牵引供电装置一般分成牵引变电所和接触网两部分，所以人们又称电力机车、牵引变电所和接触网为电气化铁道的“三大元件”。电气化铁路的组成如图 1-1 所示。牵引供电回路应为下列顺序：牵引变电所→馈电线→接触网→电力机车→钢轨/回流线→牵引变电所。

1. 电力机车

电力机车靠其顶部升起的受电弓直接接触导线获取电能。每台电力机车前后各有一台受

电弓，由司机控制其升降。受电弓升起工作时，以（68.6 + 9.8）N 的接触压力紧贴接触线摩擦滑行，将电能引入机车主断路器，再经主变压器降压和牵引变流器变流供给牵引电动机，牵引电动机通过齿轮传动使电力机车运行，如图 1-2 所示。

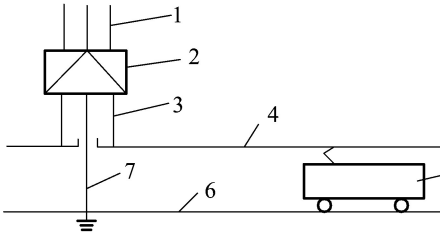

图 1-1　牵引回路构成

1—输电线路；2—牵引变电所；3—馈电线；4—接触网；5—电力机车；6—钢轨；7—回流线

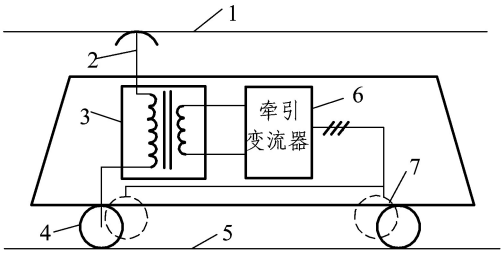

图 1-2　电力机车的工作原理

1—接触网；2—受电弓；3—主变压器；4—轮对；5—钢轨；6—牵引变流器；7—牵引电动机

2. 牵引供电装置

1）牵引变电所

牵引变电所的主要任务是将电力系统输送来的电能降压，然后以单相供电方式经馈电线送至接触网上。电压变换由牵引变压器进行，电力系统的三相电改变为单相电是通过牵引变压器的电气接线来实现的。

城市轨道交通一般采用直流供电方式，牵引变电所的任务除了降压之外，还需要把交流电变换为符合牵引要求的直流电，因此，在城市轨道交通系统的牵引变电所内，还应有整流设备。

2）馈电线

馈电线是连接牵引变电所和接触网的导线，它把经牵引变电所变换成合乎牵引制式用的电能馈送给接触网。

3）接触网

接触网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。其功用是电力机车的受电弓和它直接滑动接触，将电能传送给电力机车，驱动牵引电机使列车运行。

4）钢轨

钢轨在非电牵引情形下只作为列车的导轨。在电力牵引时，钢轨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，还需要具有连续导电的功能。

5）回流线

回流线是连接钢轨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。

3. 电力牵引方式的动车组

传统的牵引编组模式通常采用带动力的机车牵引连挂好的不带动力的车辆的方式。一趟列车由机车和车辆组成，根据需要，车辆可以灵活地编组。现代铁路客运要求高速、便捷、准点、专用于客运。针对这些特点，客运列车采用固定编组形式，机车和车辆不再分解。分布在列车两端起控制作用的头车可带动力也可不带动力，动力装置也可分布在中间车辆。动车组按牵引动力分布的不同来分，有动力集中式动车组和动力分散式动车组两种形式。其工作原理与电力机车工作原理类似，如图 1-3 所示。

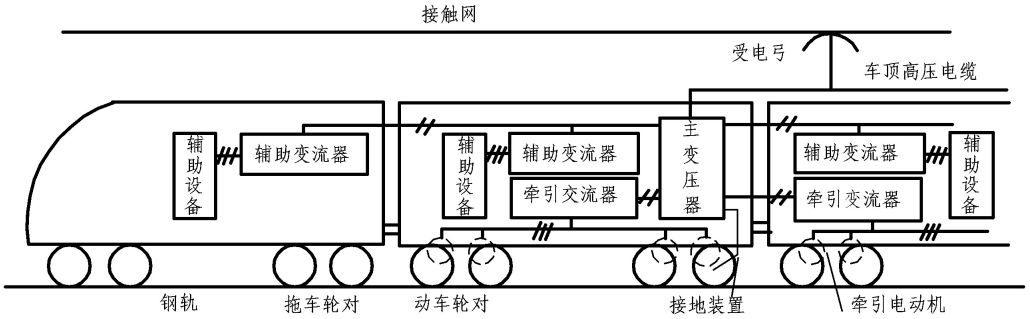

图 1-3　动力分散式动车组工作原理

动车组牵引供电及牵引传动系统主要由：供电系统、牵引传动系统、辅助系统组成。通常供电系统包括：牵引变电所、接触网、受电弓等；牵引传动系统包括：主断路器、主变压器、牵引变流器、牵引电动机及其控制装置等；辅助系统包括：辅助变流器、辅助设备、蓄电池系统等。

三、电力牵引的特点及优越性

在各种牵引动力中，电力机车与蒸汽机车、内燃机车的根本不同点在于它牵引列车时所需的能量不是由机车本身产生的，而是通过接触网（或其他供电装置）供给的，这种机车称为非自给式机车。而蒸汽机车、内燃机车在牵引列车时所需要的能量，则是由机车本身装载的燃料（如煤、柴油等）燃烧而产生的，这种机车称为自给式机车。由于电力机车与其他机车这种根本的区别，客观上决定了它取用能量的万能性。对于自给式机车来说，只有机车上

储存的燃料，才能作为它能量的来源，这就表现出它取用能量的单一性。但对电力机车来说，它所需要的电能却可以由一切形式的能量转换而来，如可以由热力、水力、风力、天然气甚至地热、原子能、太阳能等转换而来。只要有相应的发电站，便可以利用相应的能量。由于这种取用能量的非自给性，使得电力机车具有一系列的特点。

1. 电力牵引的特点

1）功率大

现代铁路运输的发展，要求机车具有强大的功率。由于电力机车是非自给式机车，没有燃料储备，因而在同样的机车质量下，其功率要比自给式机车大。机车按单位质量所具有的功率称为比功率，这是衡量机车技术水平的标志之一。目前，电力机车的比功率一般达到 40～60 kW/。而较好的内燃机车，其功率也只有 25～30 kW/t。按每轴功率来说，电力机车已超过 750 kW，最高已达到 1 800 kW（采用三相交流异步牵引电机），较好的内燃机车的每轴功率为 440～580 kW。从整台机车来说，电力机车的轮周功率已达 7 500 kW 以上，内燃机车最高功率为 4 800 kW（柴油机功率，若折算到机车轮周，则还要降低 20%～30%）。

2）速度高

由于电力机车功率大，因而可以获得较高的速度。目前，客运电力机车运行速度可达到 250 km/h，货运电力机车也可达到 120 km/h，随着新型电力机车的不断出现，机车运行速度将进一步提高。法国的电力机车在试验线路上已达到 331 km/h 的速度，TGV 电动车组试验速度为 570 km/h，我国 CRH3 型动车组试验速度已达 460 km/h。

3）效率高

对于自给式机车来说，每台机车的平均热效率实际上是基本固定的，例如蒸汽机车的平均热效率为 8%～10%，内燃机车的平均热效率为 25%左右。电力机车本身的效率是很高的，但考虑到整个电力牵引系统，其平均效率则不是固定的，它与供电系统的电能来源有关：在由水力发电站供电的情况下，电力牵引的效率可达到 60%～70%，在由高参数火力发电站供电时，其效率为 25%左右；由低参数火力发电站供电时，其效率为 16%～18%。由此可见，在电力牵引的电能平均来自各种电站的情况下，其效率要高于内燃机车和蒸汽机车。

4）过载能力强

机车在起动、牵引重载列车和通过困难区段时，具有一定的过载能力是十分重要的。自给式机车的过载能力要受两方面的限制，一方面受机车发动机（如蒸汽机、内燃机车的牵引发电机或液力变扭器）过载能力的限制，另一方面又受机车所带的能量装置（如锅炉、柴油机）过载能力的限制。对于非自给式电力机车，其能量来自较强大的供电系统，因而机车的过载能力是较高的。

2. 电力牵引的优越性

由于电力机车具有上述一系列的特点，故在铁路运输中显示出很大的优越性和良好的运营效果。根据电力机车的运行经验，其优越性表现在下述几个方面：

1）运输能力强

电力机车功率大、速度高，最符合铁路运输多拉快跑的要求，这样就可以提高牵引定数，缩短区间运行时间，因而线路通过能力大大提高，其完成铁路运量的效果更为显著。法国、德国、日本等国电气化铁路里程占全国总运量的 30%～40%，但完成铁路运量却达到全国总运量的 52%～83%。有资料表明，1 条电气化铁路的运输能力，相当于 1.5 条内燃机车或 3 条蒸汽机车牵引铁路的运输能力。此外，电力牵引还不受外界条件的限制，在山区和高寒地区较之蒸汽机车和内燃机车更为优越。

2）经济效果显著

使用电力牵引容易实现多机重联牵引，因而使得运输中各项经济技术指标大为提高。同时，由于电力机车的检修周期长，检修工作量少，从而减少了维修费用和人力，机务成本大大降低。此外，由于电力机车整备作业少，宜于长交路行驶，这样就可以减少机务段的数目，而且乘务人员和使用的机车台数也相应减少，使劳动生产率大大提高。

3）能源利用合理

电力牵引的能源可以来自多方面，因而实行电力牵引可以合理地利用能源，特别是可以利用丰富而廉价的水力资源和天然气资源，即使由火力发电站供电，发电站也可以使用质量较差的煤作燃料，蒸汽机车则要消耗优质煤。使用电力牵引时，燃料的消耗也较蒸汽机车和内燃机车低得多。

4）利于环保、劳动条件好

蒸汽机车和内燃机车工作时，均要排出大量的煤烟和有害气体造成空气污染。使用电力牵引工作则可避免了这种情况，利于环境保护。特别是在机车运行中，当机车进入市区和人口稠密地区时，电力机车的噪声干扰也大大低于蒸汽牵引和内燃牵引，因而改善了乘务人员的劳动条件和铁路沿线居民的生活环境。

5）加强了行车安全

宝成铁路电气化后，列车正点率大幅度提高，1962—1964 年正点率为 98.2%，以后一直保持着较高的水平。电力牵引装有电气制动，提高了长大坡道上的运行速度，保证了行车安全，解决了由蒸汽牵引而带来的大量车辆轮、轴等事故，并且大大减少了因使用空气制动而产生的闸瓦熔化引起的火灾事故，因此电力牵引使行车更安全。

6）有利于实现城乡电气化

发展电力牵引是整个国家电气化建设的一个组成部分，对城乡及其他部门的电气化，也有一定的推动作用。特别是在一些发展中国家，农村电气化程度较低，使用电力牵引后，沿线农村可以方便地修建电网，促进了城乡的电气化。

四、动车组电力牵引传动系统的发展概况

日本从 1964 年首条高速线开通以来，动车组从 0 系发展到 700 系，从直流传动发展到交

流传动，运营速度从 210 km/h 到 300 km/h，一直坚持动力分散模式。法、德两国原先一直推崇动力集中牵引的动车组模式。法国以直流传动速度 260 km/h 起步，经过同步电机传动，第三代实现三相交流异步电机传动高速动车组，而下一代的 AGV 动车组改用动力分散式，速度为 320～360 km/h。德国 ICE1、ICE2 高速动车组率先采用交流异步电机传动，实现 280 km/h 的运营速度，采用动力集中传动方式。然而 ICE3 新一代高速动车组也转而采用动力分散方式（2M2T）。可见，开发 300 km/h 以上高速动车组采用动力分散方式是目前的发展趋势。

早期的电力牵引传动系统均采用交—直传动，用直流电动机驱动，采用抽头切换，间断控制或可控硅连续相位控制技术进行调速。无论是日本 0 系、100 系、200 系还是法国 TGV-P 和意大利的 ETR450 均采用直流牵引电机，继承了传统的交—直牵引传动系统技术：由于直流电动机的单位功率质量较大，这就要求高速列车既要大功率驱动又要求减轻轴重，特别是减轻簧下部分质量。这形成了难以克服的矛盾。

到 20 世纪 80 年代末 90 年代初，高速列车开始采用交流电动机驱动，并存在两种不同的技术路线，即交流同步电机和交流异步电机。法国选择了自换相三相同步牵引电动机，把单台电机功率提高到 1 100 kW，从而在 TGV-A 上用 8 台交流牵引电机，代替 TGV-P 上的 12 台直流牵引电机，将列车功率由 6 800 kW 提高到 8 800 kW，运行速度由 270 km/h 提高到 300 km/h，列车质量由 418 t 增加到 479 t，列车定员由 368 人增加到 485 人。

TGV-A 采用 GTO 晶闸管逆变器，同步电动机加上辅助设备的质量比 TGV-P 的直流电动机增加 30 kg，而功率却增加了一倍。

日本和德国与法国不同，它们采用异步牵引电动机驱动。同步牵引电动机结构上虽然比直流牵引电动机简单，但它仍有滑环及电枢绕组。而异步电动机中的鼠笼型感应电机（简称异步电机），转子用硅钢片叠压，用裸铜条作为导体，无滑环等磨耗装置。其结构简单，可靠，体积小，质量轻，可实现电机免维修。

交流传动系统采用三相交流鼠笼式感应电机。三相异步电机与直流电机相比具有很多优点：(1) 结构简单，可靠性高，维护少，价格低，易于制造；(2) 功率大（目前，世界上最大的直流牵引电机功率为 1 000 kW，而交流牵引电机功率，已达到 1 800 kW），效率高，质量轻；(3) 无换向引起的电气损耗和机械损耗，无环火引起的故障；(4) 耐振动、冲击的性能较好；(5) 耐风雪，多尘，潮湿等恶劣环境；(6) 具有可持续的大启动牵引力；(7) 过载能力强（仅受定子绕组热时间常数的影响）；(8) 转速高，功率/质量比高，有利于电机悬挂，(9) 转矩—速度特性较陡，可抑制空转，提高黏着利用率；(10) 在几台电机并联时，不会发生单台电机空转现象；(11) 由于取消了整流子和电刷，大大减少了维修工作量（据统计，不到直流电机的 1/3）。

逆变器技术和交流电机控制技术的进步为采用异步牵引电动机驱动提供了条件。因此交—直—交传动并采用异步电动机驱动是高速列车牵引传动系统发展的主流。

早期，日本的科学技术和国力比不上欧洲，但比欧洲早 17 年实现世界第一条高速铁路，促进了它的经济高速发展。欧洲原来的技术实力和水平较高，坚持发展动力集中，但滞后日

本 17 年才实现高速铁路；而在 1989 年实现 300 km/h 高速列车运行时，欧洲又比日本早 9 年。

日本采用电动车组的主要理由是它属于岛国，山丘、坡道、弯道多，地质松软，对动轴轴重限制十分严格，而欧洲铁路土质坚硬，路基结实，轨道基础好，可承受的作用力较大。

在法国、德国和日本的货运中，铁路所占的比重不一样，法国、德国近年仍占 20%，而日本水运比重大，铁路货运只占 5%～6%。日本铁路货运量太少，可以针对客运专线专门设计轻量客运列车。由于轴重轻，在路基、桥梁建筑中，日本铁路可采用轻型标准规格，以降低修路成本。而对于欧洲来说，采用客货通用的线路和机车牵引客货通用方式，可以提高机车的利用率，或者通过技术延伸，把货运机车技术延伸到客运机车中去。欧洲坚持发展动力集中实现高速：一是凭借先进技术；二是客货混跑的缘故。欧洲实现高速比日本要付出高得多的代价和克服更多的困难，因此实现高速比日本滞后了 17 年，尔后通过采用先进技术（特别是交流传动技术和双空心轴悬挂传动技术），坚持采用动力集中模式，在日本之前突破了 300 km/h 的高速，但代价是相当大的。300 km/h 以上的动车组在欧洲国家也逐渐转向动力分散式。

大功率交—直—交传动系统性能的提高与电力半导体器件的发展密切相关，电力半导体器件的特性决定了变流装置的性能、体积、质量和价格。从铁道牵引的角度看，理想的电力半导体器件应是：断态时能够承受高电压，通态时可流过大电流且通态压降小，可在通态和断态之间进行快速切换，即开关频率高，损耗小，易于控制。应用于铁道牵引的电力半导体器件大致经历了晶闸管、GTO、IGBT 3 个发展阶段。新干线高速列车电传动技术的发展与电力半导体技术的发展紧密相关，20 世纪 60 年代初研制的 O 系高速列车，限于当时的电力半导体器件水平，只能采用牵引变压器次边抽头，二极管整流调压方式。到 80 年代，大功率晶闸管应用技术成熟，新研制的 100、200、400 系高速列车，均采用相控调压方式。进入 90 年代，在电力牵引领域，交流传动开始取代直流传动，加之大功率 GTO 元件的应用，使得电压型交流传动技术在该领域中占据了主导地位。因此，新研制的 300 系、500 系、700 系，E1、E2、E3、E4 等高速列车均采用了交流传动技术。

随着新型大功率半导体器件（诸如 IGBT、IPM）的出现，E2 和 700 系高速列车牵引变流器开始采用 IGBT 或 IPM 器件，进一步改善了传动系统性能。

采用交流电机时，网上的单相交流电经变压、整流之后，还必须通过逆变器变成三相交流电，才能作为交流电机的驱动电流。整个变流过程是从单相交流变直流，再由直流变三相交流，这套交—直—交变流技术，特别是交流牵引电机的控制技术，是高速列车牵引技术的核心，而逆变器又是其中的关键，其中包括下列 3 项主要技术：一是电力半导体器件，它是逆变器中的关键元件，目前比较先进的是 GTO 元件和 IGBT 元件，后者将逐步取代前者。IPM 元件是 GTO 元件、驱动及保护电路的集成块，它具有短路、过流、过热及电流实时控制等保护功能，将更有利于实用。二是变流电路的结构性能，它是随半导体器件的发展而发展的，目前其设计重点已转向于牵引性能、谐波含量、电磁干扰、控制特性及运用成本等。软开关电路是进一步降低开关损耗，减少开关过程中的电磁干扰和对环境的电磁污染的重要途径，

有待研究开发。三是交—直—交传动的控制技术。这一技术由网侧变流器控制和电机侧逆变器控制两部分组成。

列车牵引传动长期以来采用交—直传动系统，牵引电机为直流电机。近 30 年来，由于电子技术尤其是大功率变流技术的发展、控制理论和控制技术的完善以及变频器技术的成熟，使三相交流电动机在高速列车牵引中的应用得到了关键性突破，获得了极为迅速的发展。高速动车组采用的就是交流传动系统，其牵引电机采用的是三相交流异步电机。

高速动车组牵引传动系统采用的新技术主要表现在以下几个方面：

1）新型全控电力电子器件的应用

电力电子器件是牵引变流技术的基础和核心。诞生于 20 世纪 80 年代的新型全控制电力电子器件 IGBT 是一种 MOSFET 与晶体管复合的器件，由于它既有易于驱动、控制简单、开关频率高的优点，又有功率晶体管的导通电压低、通态电流大、损耗小的优点，IGBT 的发展及应用领域的拓展十分迅速。高速动车组牵引变流器的功率电子器件大多采用大功率 IGBT/IPM。

2）牵引变流器 PWM 控制技术

交流调速传动系统中的变流器，无论是电源侧的整流器还是电机侧的逆变器都属于开关电路，电路中开关器件的周期性通断，从根本上破坏了交流电压、电流的连续性和正弦性。电压、电流中的高次谐波，一方面给交流电网带来严重危害，另一方面又使电机运行性能恶化。谐波电流产生的脉动力矩，会引起运动轴系振动，增大运行噪声，严重时还会使电机不稳定运行。减小谐波含量的有效办法是牵引变流器采用 PWM 技术。高速列车牵引变流器均采用 PWM 控制技术。

3）列车驱动控制技术

高速列车牵引传动系统是一个多变量、非线性和强耦合的系统。通常电压（或电流）和频率是可控的输入量，输出量则是转速、位置和力矩，它们彼此之间以及和气隙磁链、转子磁链、转子电流等内部量之间都是非线性耦合关系。

近年来，现代控制理论的应用又促进多种控制系统的诞生，并解决了传统反馈控制理论所不能解决的控制问题。例如取得重要突破的矢量控制系统、直接力矩控制系统等。

矢量控制系统采用参数重构和状态重构的现代控制概念，实现电机定子电流的励磁分量与力矩分量之间的解耦，从而使交流电机能像直流电机一样分别对其励磁分量和力矩分量进行独立控制，是交流驱动控制最有效的方法之一。

继矢量控制技术之后的另一个新的突破是直接力矩控制方法，与矢量解耦控制的方法不同，它无需进行两次坐标变换及求矢量的模与相角的复杂计算，而是直接在定子坐标系上计算电机磁链和力矩的实际值，并与磁链和力矩的给定值相比较，通过二点式调节器进行力矩的直接调节，加快了力矩的快速响应，使响应时间控制在一拍之内，能使系统的静、动态性能得到很大的提高。

第二节　牵引供电概述

牵引供电系统是电气化铁路的重要组成部分，牵引供电系统与动车组和电力机车之间有着紧密的联系，熟悉和了解牵引供电系统的组成、作用、类型、相关概念等，能使读者更好地学习和理解动车组牵引与控制系统的相关知识。

一、牵引供电系统的特点

1）负荷大

由于牵引质量大（最大可超过 10 000 t）、速度快（高速动车组最高速度超过 380 km/h），所以列车负荷比城市轨道交通、矿山轨道运输大得多。

2）采用 25 kV 工频交流供电

可以采用大功率的高速动车组、电力机车，减少系统的电压损失和电能损失，降低导线等有色金属的消耗量。而城市轨道交通、矿山轨道运输的供电一般采用 750 ~ 1 500 V 的直流供电。

3）对电力系统影响大

由于牵引供电系统是单相负荷，所以会有负序电流流入电力系统。为了减少负序电流的影响，牵引变电所往往采用轮换接线方式或采用三相—两相平衡变压器。

4）对通信线路干扰大

由于系统中交流电产生电磁影响以及负荷中的高次谐波电流，会严重影响通信线路和通信设备，使通信质量下降。为了减少影响，一般在系统中采用对通信线路影响小的供电方式，如 AT 方式、BT 方式。

二、牵引变电所

牵引变电所的主要任务是将电力系统输送来的电能降压。然后以单相供电方式经馈电线送至接触网上，电压变换由牵引变压器进行。电力牵引为一级负荷，牵引变电所应由二路独立电源供电。为了保证供电的可靠性，由电力系统送到牵引变电所的高压输电线路无一例外地为双回路，两条进线互为备用，平时均处于带电状态。一旦一条回路发生供电故障，另一条回路自动投入，从而保证不间断供电。

牵引变压器（主变）是牵引变电所内的核心设备，是一种特殊电压等级的电力变压器。牵引变压器担负着将电力系统供给的 110 kV 或 220 kV 的三相电源变换成适合电力机车使用的 25 kV 单相电的作用。由于牵引负荷具有极度不稳定、短路故障多、谐波含量大等特点，

所以牵引变压器运行环境比一般电力负荷恶劣的多，因此要求牵引变压器过负荷和抗短路冲击的能力要强，这也是牵引变压器区别于一般电力变压器的特点。

牵引变压器根据接线方式不同，可分为单相牵引变压器、三相牵引变压器、三相—两相牵引变压器等。我国牵引变压器接线形式主要有五种：单相接线、V/v 接线、YN/d11 接线、Scott 接线和阻抗平衡接线变压器等。目前 110 kV 单相接线和 V/v 接线牵引变压器应用较多。

单相接线变压器（图 1-4）高压侧由两相供电。单相变压器的结构简单，可靠性高，容量利用率可达 100%，造价及年运行费用、容量电费较低，因此其在电气化铁路中得到广泛应用。但单相变压器的负序容量较高，对电网污染较大，带来了较严重的电能质量问题。

V/v 接线有单相变压器 V/v 接线和三相变压器 V/v 接线，单相 V/v 接线即用 2 台单相变压器连接成开口三角形。三相 V/v 接线如图 1-5 所示。V/v 接线变压器高压侧由三相供电，容量利用率可达 100%，负序容量较单相变压器大大降低，因此降低了对电网的不利影响。对 2×27.5 kV 的 AT 系统，可省略变电所内的自耦变压器，相应二次侧采用中点抽出的接线方式。图 1-6 是 V/x 接线方式。

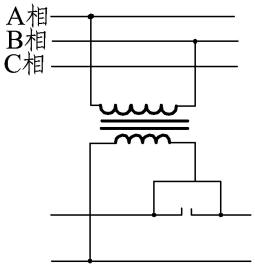

图 1-4　单相接线牵引变压器

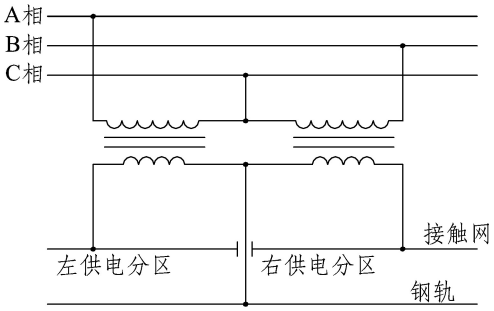

图 1-5　三相 V/v 接线牵引变压器

Scott 接线牵引变压器原理如图 1-7，它是将原边对称的三相电压变换为副边两相对称电压，用其一相供应一边供电臂，另一相供应另一边供电臂。

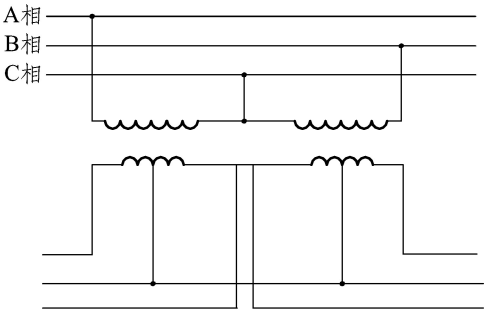

图 1-6　三相 V/X 接线牵引变压器

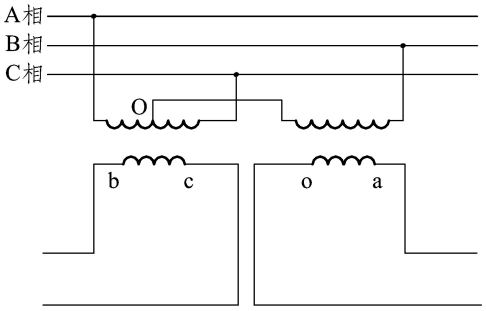

图 1-7　Scott 接线牵引变压器