绪　论

一、电气化铁路概述

采用电力机车或电力动车作为主要牵引动力的铁路称为电气化铁路。1879 年 5 月 31 日在德国柏林举办的世界贸易博览会上，西门子和哈尔斯克公司展出了世界上第一条电气化铁路，迄今已有近 140 年的历史。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趋势，是铁路现代化的标志。目前，电气化铁路在全球 68 多个国家的营运里程已经突破 26 万千米，占世界铁路总营运里程的近四分之一，承担了一半以上的铁路运量，这显示了电气化铁路的巨大生命力。

中国第一条电气化铁路是宝（鸡）成（都）线宝鸡—凤州段，正式通车于 1961 年 8 月 15 日，共 93 km 长，从此揭开了中国电气化铁路建设的序幕。截至 2015 年年底，中国铁路营业里程达到 12.1 万千米，其中电气化铁路运营里程 7.4 万千米，高速铁路运营里程超过 1.9 万千米，居世界第一位。至 2020 年，全国铁路营业里程将达到 15 万千米，其中高速铁路总里程将达到 3 万千米，未来五年将新增高铁里程达 1.1 万千米，将覆盖 80% 以上的城市。

二、高速电气化铁路发展

根据国际铁道联盟定义，高速铁路是指提速改造后时速达到 200 km 及以上，新建时速达到 250 km 及以上的铁路系统。

高速铁路技术是当今世界铁路的一项重大技术成就，它集中反映了一个国家铁路牵引动力、线路结构、高速运行控制、高速运输组织和经营管理等方面的技术进步，也体现了一个国家的科技和工业水平。高速铁路在经济发达、人口密集地区的经济效益和社会效益尤为突出。

20 世纪 60 年代，世界上第一条高速电气化铁路——东京到大阪的东海道新干线在日本建成，高速列车运行速度 210 km/h，拉开了高速电气化铁路建设的新篇章。到 20 世纪 80 年代，法国和德国先后建成了时速超过 300 km/h 的高速电气化铁路。法国高速铁路 TGV、德国高速铁路系统 ICE 和日本高速客运系统新干线成为世界先进高速铁路的代表。2007 年 4 月 3 日，法国高速列车在巴黎斯特拉斯堡东线铁路行驶试验中达到 574.8 km/h 的时速，打破了 1990 年由法国高速列车创下的时速 515.3 km/h 的有轨铁路行驶世界纪录。2016 年 7 月 15 日，中国标准动车组在郑徐高铁河南省商丘市民权县境内跑出了 420 km/h 的时速交会试验，创造了高铁动车交会速度的世界最高纪录。

20 世纪 90 年代初，中国开始高速铁路研究，把“提高列车速度”上升到铁路发展的战略高度，对高速铁路的设计建造技术、高速列车、管理的基础理论和关键技术组织攻关，开展了大量的科学研究。以此为基础，进行了广深铁路提速改造，修建了秦沈客运专线，实现了既有线铁路六次大提速等，为构建中国高速铁路技术标准体系奠定了必要的基础。2002 年 12 月建成的秦皇岛至沈阳间的客运专线，是中国自己研究、设计、施工，目标速度为 200 km/h，基础设施预留 250 km/h 高速列车条件的第一条铁路客运专线。自助研制的中华之星电力动车组在秦沈客运专线创造了当时“中国铁路第一速”——321.5 km/h。按照国家中长期铁路网规划和铁路“十二五”“十三五规划”，以“八纵八横”快速客运网为主骨架的高速铁路建设全面加快推进，建成了京津、沪宁、京沪、京广、哈大等一批设计时速达 350 km/h、具有世界先进水平的高铁技术体系。通过引进消化吸收再创新，成功搭建了时速 350 km/h 的动车组技术平台，研制了 CRH380 型新一代高速列车。

目前，全世界运营速度达到 250 km/h 及以上的高速铁路里程约 2.07 万千米。日本开通 6 条新干线总长度 2388 千米；法国开通运营 9 条高速新线，总长度 2023.6 千米；德国正在运营的高速线时速 200 km/h 的 IEC 列车的通达里程约为 2331 千米。截至 2015 年年底，我国高速铁路运营里程已超过 1.9 万千米，占世界高速铁路的 60% 以上。

到 2020 年，我国铁路营业里程将达到 15 万千米，如图 0.1 所示。其中，新建高速铁路将达到 1.6 万千米；加上其他新建铁路和既有线提速线路，我国铁路快速客运网将达到 5 万千米，连接所有省会城市和 50 万人口以上城市，覆盖全国 90% 以上人口，“人便其行、货畅其流”的目标将成为现实。

图 0.1　全国铁路规划目标图

三、电气化铁路的组成

由于电力机车本身不携带能源，而是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”。电气化铁路供电网络示意图如图 0.2 所示。

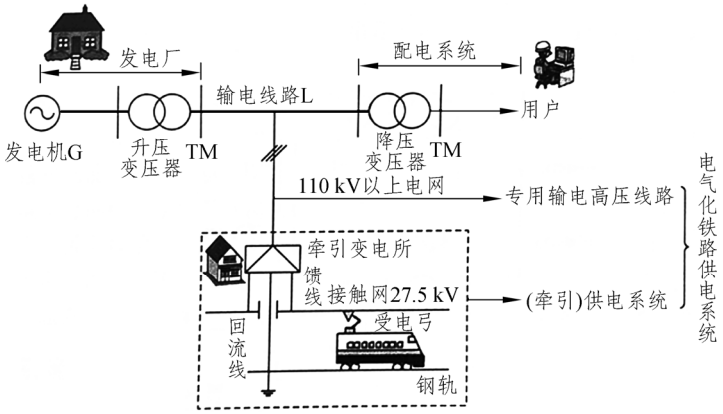


图 0.2 电气化铁路供电网络示意图

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、后各有一受电弓，由司机控制其升降。受电弓升起工作时，以 78.4(68.6+9.8) N 的接触压力紧贴接触网线摩擦滑行，将电能引入机车，经机车主断路器到机车主变压器，再经机车主变压器降压后，经传动装置供给牵引电动机，牵引电动机通过齿轮传动使电力机车运行。电力机车的工作原理如图 0.3 所示。

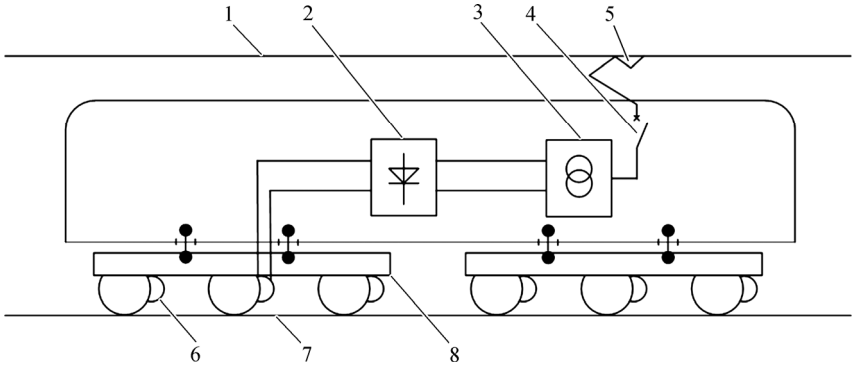
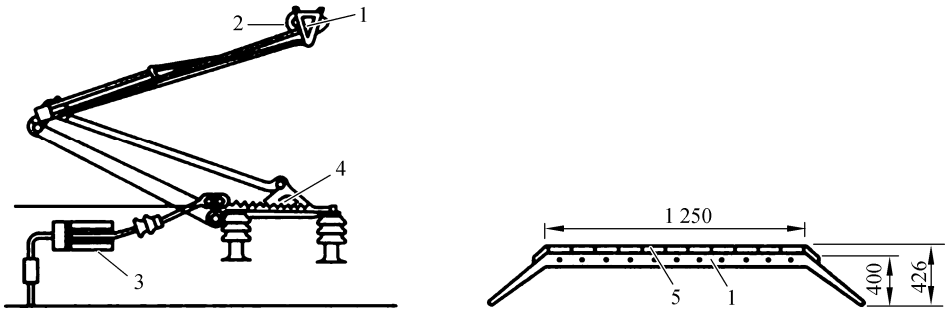


图 0.3 电力机车的工作原理

1—接触线；2—传动系统；3—主变压器；4—主断路器；5—受电弓；
6—牵引电动机；7—钢轨；8—转向架

电力机车受电弓直接从接触线上滑行取流，其形式一般有单臂式和双臂式两种，目前一般采用单臂式受电弓。受电弓顶部的滑板紧贴接触线。滑板固定在托架上，托架一般采用 2 mm 的铝板冷压制成。根据接触线材质的不同选用不同材质的滑板。受电弓的最大工作范围为 1250 mm，允许工作范围为 1000 mm。受电弓及滑板安装如图 0.4 所示。



（a）受电弓结构　　（b）滑板结构

图 0.4　受电弓及其滑板结构

1—滑板；2—弓头支架；3—活塞；4—升弓弹簧；5—滑条

2．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。电力系统的三相交流电改变为单相是通过牵引变压器的电气接线来实现的。牵引变电所一般设有备用电源，采用双回路电源供电，以提高供电的可靠性。中国目前所用的牵引变压器有三相式、三相—二相式及单相式三种类型。

三相式变压器绕组为星形—三角形联结，联结组标号为 Y/dll，二次侧为三角形联结。三角形的一角（w 相）与钢轨和接地网连接，另两角（u 相、v 相）分别接至牵引变电所两边供电分区的接触网上（又称两个供电臂），因此使接触网对地为单相。

三相变电所高压侧电压等级为 220 kV/110 kV，低压侧（又称牵引侧）电压为 27.5 kV。这是中国牵引变电所的主要接线形式。在 AT 供电区段，牵引变电所低压侧电压为 55 kV，配合 AT 变压器实现对牵引网的供电。例如，哈（尔滨）大（连）线牵引变电所即采用了这种接线形式，其高压侧电压等级为 220 kV，牵引侧电压等级为 27.5 kV。目前，高速电气化铁路牵引变电所进线电压等级为 220 kV 及以上。

为了减少单相牵引负载对三相电力系统产生的不对称影响，其牵引变电所的变压器采用较特殊的接线方式，主要有斯科特（Scott）接线方式和伍德桥（Wood Bridge）接线方式，采用这样接线的变电所称为三相—二相变电所。这种接线方式的特点是变压器二次电压是相角差为 90° 的二相交流电，在两相负载平衡时，其变压器的一次侧为三相对称负载，可以大大消除牵引系统对电力系统产生的不对称影响。我国高速电气化铁路牵引变电所的变压器采用单相变压器、单相 V/V 接线、V/X 接线变压器。

3．牵引供电回路

牵引供电回路是由牵引变电所—馈电线—接触网—电力机车—钢轨、地或回流线（正馈线）—牵引变电所构成，如图 0.5 所示。其中接触网在供电回路中起着十分重要的作用，直接影响着电气化铁路的运行可靠性，因此必须使接触网始终处于良好的工作状态，安全可靠地向电力机车供电，这对于保证铁路运输畅通无阻有着极为重大的意义。

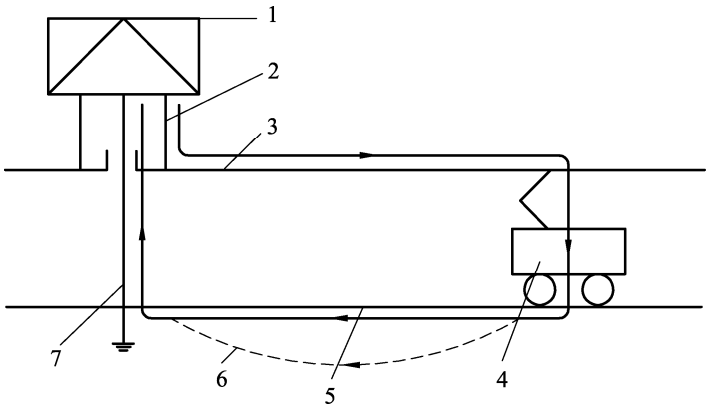


图 0.5 牵引回路构成

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

四、接触网的定义与分类

接触网系统是电气化铁路牵引供电系统的重要组成部分，是沿着走行轨道架设的为电力机车（电力动车组）提供牵引电能的特殊形式的供电线路。高速接触网技术是高速电气化铁路的核心技术之一。

接触网有多种实现形式，广义的接触网包括了接触轨和架空接触网。

接触轨是设置在走行轨道旁的连续刚性导电“轨道”，其作用是给电力机车（电动车组）供电。电力机车通过安装在车辆转向架两侧的集电靴和接触轨的滑动接触取得电能。接触轨主要的结构形式有第三轨（第三轨供电、走行轨回流）、第四轨（第三轨供电、第四轨回流）两种。第三轨形式较常见，比如北京地铁大量采用 DC 750 V 接触轨系统，近几年来修建的武汉地铁（轻轨）（DC 750 V），广州地铁四、五号线和深圳地铁三号线（DC 1500 V）也采用了第三轨形式。第四轨系统在伦敦地铁和意大利米兰地铁 A 线使用，这种系统比较少见。接触轨系统的安装高度低，导体截面积大、载流能力强，对安装净空要求低，结构简单、施工方便，在露天区段和城市高架区段对景观影响小。但是，接触轨处于人员较容易接触到的位置，带来了安全问题，限制了系统电压等级一般不能高于 1500 V。目前，接触轨多用于城市地铁的直流供电系统，在干线电气化铁路中没有采用。

架空接触网分为刚性架空接触网和柔性架空接触网两类。刚性架空接触网将接触线夹装在汇流排中，依靠汇流排自身的刚性保持接触线的固定位置，使接触线不因重力而产生弛度。刚性架空接触网具有结构简单、可靠性高（采用无张力架设，无断线、钻弓等事故隐患）、维护工作量小、维修周期长等优点。刚性架空接触网一般适用于隧道段，而不应用于地面及高架桥，在城市地铁中应用较多。2002 年 12 月开通的广州地铁二号线在国内第一次采用了刚性架空接触网系统，近几年来，南京、上海、西安、深圳、郑州、成都、杭州等城市地铁建设中都有采用刚性架空接触网形式。干线铁路中，刚性架空接触网主要应用在长大隧道。2006 年 4 月，20.50 km 长的兰（州）武（威）二线乌鞘岭隧道在国内干线铁路中第一次采用了刚性接触悬挂。2008 年完成的焦（作）柳（州）铁路石门北到怀化段六座隧道内采用了刚性悬

挂接触网。刚性悬挂接触网一般应用于行车速度小于 160 km/h 的线路中。

柔性架空接触网采用柔性线索作为导体，具有较好的弹性，跨距大，适应高速电气化铁路的受流，在干线铁路工程中得到了广泛的应用。狭义的接触网就指的是柔性架空接触网。在干线铁路中，柔性架空接触网是牵引供电系统主要的馈电形式，习惯上将其简称为“接触网”，本教材中“接触网”均是柔性架空接触网。

五、高速电气化铁路接触网的基本特性和运营要求

高速电气化铁路接触网是接触网的一种特殊应用形式，“高速”本身是一个相对的概念，“高速铁路接触网”也是一个相对的称谓，与之对应的是“普速铁路接触网”。

高速铁路接触网和普速铁路接触网比较，就基本构成和宏观结构而言，并无明显差异，均包括支柱与基础、支持装置、定位装置、接触悬挂以及供电辅助设施五大部分；就其各自的机电特性、设计考量、技术要求、施工工艺、维修理念、运营管理而言，二者存在较大差异，主要原因在于：普速铁路接触网的侧重点在于弓网几何参数的匹配和电气参数的耦合，而高速铁路接触网除了弓网几何参数的匹配和电气参数的耦合外，重点关注点已转至弓网间的电接触状态和机械动态（振动、波动）特性上。

（一）高速电气化铁路接触网的基本特性

接触网的本质是高压电力输电线，但因其服务对象的特殊性，使得表面看起来仅由几根导线组成的、结构并不复杂的接触网变得非常复杂了。其复杂性不在于结构，而在于弓网之间的匹配以及为满足这种匹配所提出的对弓和网的性能要求和实现方法。因此，接触网实际上包含了输电和与高速受电弓动态配合的问题，由此造成接触网在机电性能上受到极其严格的限制和要求，这些限制和要求造成接触网在环境、备用、负荷、机电、研究内容等方面都大大不同于一般高压电力输电线。

1．接触网的环境特性

接触网具有典型的环境特性，这里的环境包括空间、气候、电磁和运营四个方面。

1）接触网的空间环境

接触网沿轨道线路架设，空间位置受到车辆限界、运输货物限界、建筑限界、电气安全距离以及弓网几何关系的严格制约，接触网的所有几何参数都是以线路中心线和轨道平面组成的直角坐标系为参照的。因此，线路空间位置一旦确定，接触网的空间位置也就确定了，可调节的范围非常有限。

接触网的确切空间位置取决于线路空间位置、受电弓几何形状与尺寸、受电弓安装位置、受电弓动态包络线、列车车辆限界、列车及其装运货物限界、建筑限界等因素，接触网与其四周一定空间内的各种建筑物（如电力输电线、通信电缆、桥涵隧道、车站建筑、地下设施等）在空间位置上可能发生矛盾和冲突，必须协调相互之间的空间关系，以满足建筑限界、电气安全和弓网几何关系三方面的要求。协调接触网与其四周建筑物的空间关系时，必须处理好以下五个方面的问题：

① 接触网与建筑物间的绝缘安全和电磁安全是否能够得到充分保障；

② 接触网的导电截面是否能够得到足够保障；

③ 接触网的结构高度是否受到影响，影响所造成的悬挂弹性变化是否在许可范围内；

④ 因建筑物引起的跨距变化或悬挂点变化是否符合相应规定；

⑤ 导线高度变化以及由此引起的接触线坡度变化是否在允许范围内。

另外，在高速铁路中，桥隧占线路的比重较大（70%左右），列车运行引起的桥振动、地震引起的桥的二次振动，这些振动与接触网的固有振动频率之间存在某种关系，应避免接触网与桥之间发生共振现象；根据高速铁路试验和运营数据，列车通过隧道的速度大于 140 km/h 时，因活塞效应所产生的气动力影响不可忽略，高速铁路隧道内接触网应按基本结构风速进行气动力影响校验。

除此以外，环境问题还包括接触网与动物、植物、自然景观、人文景观和噪声等方面，应采取一定技术措施防止飞鸟及其他动物造成接触网短路事故，但这些技术措施不得使保护动物受到伤害；弓网集流过程中的摩擦和离线所产生噪声的影响不容忽视，这些噪声对设备、人和动物均构成不利影响，应研究和使用新型电接触材料，增大电流的有效传输，减少受电弓数量，降低弓网集流噪声。

2）接触网的气候环境

接触网是露天电气设备，接触网的机电参数和技术状态与大气环境中的温度、湿度、冰、雪、风、霜、雾霾、污染、雷电等密切相关。接触网线索的张力、弛度、抗拉强度、载流容量，接触悬挂的弹性、空间姿态、电气强度和安全，接触线与受电弓滑板间的磨耗和接触电阻都要受到大气环境的影响，接触网的设计工作和运营工作与气象条件息息相关，气象条件的选择不仅影响电气化铁路的运营安全，而且会影响电气化铁路的工程成本和运营的社会成本。

在表征大气环境的所有气象参数中，温度、风速、覆冰称为气象三要素。气象三要素决定着接触网众多机电参数的取值。

温度对承力索弛度、接触线正负弛度、附加导线的弛度和张力，接触网载流量、锚段长度、吊弦偏移、磨耗、定位和支持装置的空间位置，补偿装置的效率和形式等有明显影响。研究表明：在 120～140 °C，张力 10 kN 情况下，接触线的抗拉强度不会突变，此时损坏接触线的主要机理是过度磨耗处或有缺陷处的塑性变形和低温材料蠕变；在 100～140 °C，张力 13～15 kN 情况下，电解铜中的微结构开始变化；在电流出入导线处，接触线可发生极度的微结构变化，接触线的再结晶区降低了它的抗拉强度，并可发生塑性变形的累积。对接触线造成累积伤害的是塑性变形，它是由于装有缺陷的连接组件处及温度超过 180 °C 处的应力超出弹性极限；长期发热可使冷拔铜的晶状结构重新回归到冷拔前的原始状态，丧失冷拔铜的典型物理特性。

高速铁路行车密度高、电能传输大，接触网设计温度除考虑环境的最高温度、最大日照外，还应考虑最大负荷电流（含瞬时短路电流）所引起的导线发热，以此确定腕臂、定位器、吊弦最佳安装位置时的温度以及接触网系统正常工作温度和最大载流量。

风（气流）会增加接触网的附加负载，严重时会破坏接触网系统的正常工作，风（气流）还会影响受电弓的取流姿态，引起弓网接触力突变，严重时还会引起严重的弓网事故。因此，在高速铁路接触网设计规范中明确提出了基本结构风速和基本运营风速的概念。

气流无论在垂直方向还是水平方向受到约束，其流速都将增大。路堤（桥梁）对风存在