

1.1 输变电工程的构成

输变电工程是电力系统的重要组成部分，包括输电线路和变电站（或换流站）。发电厂（站）生产的电能，经输变电工程输送到消费电能的地区（又称负荷中心），或进行相邻电网之间的电力互送，使其形成互联电网或统一电网，以保持发电和用电或两个电网之间的供需平衡。

输变电工程输电方式主要有交流输电和直流输电两种。通常所说的交流输电是指三相交流输电；直流输电则包括两端直流输电和多端直流输电，两端又有单极、双极和背靠背三种形式，绝大多数的直流输电是两端直流输电。

对于交流输电而言，输变电工程是由升压变电站的升压变压器、高压交流输电线路、降压变电站的降压变压器组成。在输电系统中杆塔、绝缘子串、架空线路（包括避雷线）等称为输电设备；变电站主要包括变压器、电抗器、断路器、隔离开关、接地开关、避雷器、电压互感器、电流互感器、母线等一次设备和继电保护、监视、控制和电力通信等二次设备等。对于直流输电而言，主要由高压直流输电线路和两端换流站内的换流变压器、换流阀、平波电抗器、交流滤波器、交流开关设备、无功补偿装置、直流开关设备、直流滤波器、监视、控制与保护装置等各种一次设备及二次设备组成。输变电工程主要电气设备及其功能简单介绍如下。

1.1.1 变压器

变压器是利用电磁感应原理对变压器两侧交流电压进行变换的电气设

备。为了大幅度地降低电能远距离传输时在输电线路上的电能损耗，发电机发出的电能需要升高电压后再进行远距离传输，而在输电线路的负荷端，输电线路上的高电压只有降低等级后才能便于电力用户使用。输变电工程中的电压每改变一次都需要使用变压器。根据升压和降压的不同作用，变压器又分为升压变压器和降压变压器。例如，要把发电站发出的电能送入输变电系统，就需要在发电站安装变压器，该变压器输入端（又称一次侧）的电压和发电机电压相同，变压器输出端（又称二次侧）的电压和该输变电系统的电压相同。这种输出电压比输入电压高的变压器即为升压变压器。当电能送到电力用户后，还需要很多变压器把输变电工程的高电压逐级降到电力用户侧的 220V（相电压）或 380V（线电压）。这种输出端电压比输入端电压低的变压器即为降压变压器。除了升压变压器和降压变压器外，还有联络变压器、隔离变压器和调压变压器等。例如，几个邻近的电网尽管平时没多少电能交换，但有时还是希望它们之间能够建立起一定的联系，以便在特定的情况下互送电能，相互支援，这种起联络作用的变压器称为联络变压器。此外，两个电压相同的电网也常通过变压器再连接，以减少一个电网的事故对另一个电网的影响，这种变压器称为隔离变压器。

1.1.2 开关设备

开关设备的主要作用是连接或隔离两个电气系统。高压开关是一种电气机械，其功能就是完成电路的接通和切断，达到电路的转换、控制和保护的目。高压开关比常用低压开关重要得多，复杂得多。常用的低压开关才几两重，而高压开关有的重达几十吨，高达几层楼。这是因为它们之间承受的电压和电流大小很悬殊。按照接通及切断电路的能力，高压开关可分为好几类。最简单的是隔离开关，它只能在线路中基本没有电流时，接通或切断电路。但它有明显的断开间隙，一看就知道线路是否断开，因此凡是要将设备从线路断开进行检修的地方，都要安装隔离开关以保证安全。断路器也是一种开关，它是开关中较为复杂的一种，它既能在正常情况下接通或切断电路，又能在事故下切断和接通电路。除了隔离开关和断路器以外，还有在电

流小于或接近正常时切断或接通电路的负荷开关。电流超过一定值时切断电路的熔断器以及为了确保高压电气设备检修时安全接地的接地开关等都属于高压开关。

1.1.3 高压绝缘子

高压绝缘子是用于支撑或悬挂高电压导体，起对地隔离作用的一种特殊绝缘件。由于电瓷绝缘子的绝缘性能比较稳定，不怕风吹、日晒、雨淋，因此各种高压输变电设备（尤其是户外使用的），广泛采用高压电瓷作为绝缘，如架空导线必须通过绝缘子挂在电线杆上才能保证绝缘，一条长 500km 的 330kV 输电线路大约需要 14 万个绝缘子串。高压绝缘子的另一大类是高压套管，当高压导线穿过墙壁或从变压器油箱中引出时，都需要高压套管作为绝缘。除了高压电瓷作为绝缘子外，基于硅橡胶材料的合成绝缘子也获得了广泛应用。

1.1.4 导线

导线的主要功能就是引导电能实现定向传输。导线按其结构可以分为两大类：一类是结构比较简单不外包绝缘的称为电线；另一类是外包特殊绝缘层和铠甲的称为电缆。电线中最简单的是裸导线，裸导线结构简单、使用量最大，在所有输变电设备中，它消耗的有色金属最多。电缆的用量比裸导线少得多，但是因为它具有占用空间小、受外界干扰少、比较可靠等优点，所以也占有特殊地位。电缆不仅可埋在地里，也可浸在水底，因此在一些跨江过海的地方都离不开电缆。电缆的制造比裸导线要复杂得多，这主要是为了保证它的外皮和导线间的可靠绝缘。输变电系统中采用的电缆称为电力电缆。此外，还有供通信用的通信电缆等。

1.1.5 换流变压器

换流变压器是一种特殊的变压器，是直流换流站交直流转换的关键设备，为换流阀提供相位相差 30° 的交流电源（送端），或将逆变器脉冲电流

变换为交流电流（受端）。换流变压器其网侧与交流场相连，阀侧和换流器相连。因此，其阀侧绕组需承受交流和直流复合应力。

1.1.6 换流阀

换流阀是直流换流站中最核心的部件。由大量的功率晶体管组成，实现电流的变换。为减小谐波，提供输送功率，一般采用 12 脉动换流器，每个 12 脉动换流器有 12 个桥臂，1 个桥臂就是 1 个换流阀。

1.1.7 滤波器

直流输电工程换流器在进行交流和直流的相互转换过程中，需要消耗大量的感性无功，一个换流站大约需要相当于直流输送额定功率 55% 的无功功率。一般情况下，交流系统能够提供的无功功率不能满足换流站正常运行时的无功需要，所以需要换流站进行无功补偿。无功补偿设备包括交流滤波器、并联电容器、调相机、静止无功补偿器、静止同步补偿器等。此外，换流器交、直流两侧的电流和电压状态量中，除工频交流和直流主要分量外，还有众多的频率为工频整数倍的谐波分量。当采用 12 脉动换流器时，交流侧和直流侧分别含有 $(12k \pm 1)$ 次和 $12k$ 次的特征谐波。因此，通常采用在换流器两侧设置滤波器的方法来消除换流器运行中产生的各次谐波。滤波器通常调谐在换流器的特征谐波频率处，就近构成特征谐波回路，避免谐波电流进入交、直流线路对通信及其他设施产生影响。另外，交流滤波器还能根据系统无功平衡的需要，提供全部或部分换流器所需的无功功率。

1.1.8 平波电抗器

平波电抗器用于平滑直流电流中的纹波，并防止直流侧雷电和陡波进入阀厅，使换流阀免遭过电压的应力。此外，在直流短路时，平波电抗器还可以通过限制电流快速变化，降低换向失败概率。

1.1.9 继电保护装置

继电保护装置是输变电工程中重要的安全保护系统。它根据互感器以及其他一些测量设备反映的情况,决定需要将输变电工程的哪些部分切除和哪些部分投入。虽然继电保护装置很小,只能在低电压下工作,但它却在整个输变电工程安全运行中发挥重要作用。

1.2 输变电工程的发展

为提高输电经济性能,不断满足大容量和长距离输电的需求,电网电压等级在不断提高。100多年来,输电网电压由最初的13.8kV,逐步发展到高压20、35、66、110、134、220、230kV;20世纪50年代后,迅速向超高压330、345、380、400、500、735、750、765kV发展;20世纪60年代末,开始进行1000kV和1500kV电压等级特高压输电工程的可行性和特高压输电技术的研发。

交流输电电压一般分高压、超高压和特高压。国际上,高压通常指35~220kV的电压;超高压通常指330kV及以上1000kV以下的电压;特高压定义为1000kV及以上电压。直流输电电压一般分为高压直流和特高压直流,高压直流通常指的是 ± 660 kV及以下的直流输电电压, ± 800 kV及以下的电压称为特高压直流。

在高压输电方面,1908年美国建成了世界上第一个110kV交流输变电工程,1923年又建成第一个230kV交流输变电工程。瑞典于1952年建成第一个380kV交流输变电工程,此后美国、加拿大等欧美国家相继使用330~345kV输电系统。1956年,苏联建成400kV交流输变电工程,并于1959年升压至500kV,在世界上首次使用500kV输电。1965年,苏联建成 ± 400 kV直流输电工程,同年,加拿大建成735kV交流输变电工程,1967年,苏联建成750kV交流输变电工程。1985年,苏联建成世界上最高电压1150kV的交流输变电工程,间断运行5年多,1991年苏联解体后降压为



500kV 运行。

我国电网发展始于 20 世纪 50 年代初，随着社会经济发展对电能需求的不断增加，交直流输变电工程建设取得了巨大成就。1952 年，我国自主建设了 110kV 交流输变电工程，逐步形成京津唐 110kV 输电网。1954 年，建成 220kV 丰满—李家寨交流输变电工程，1972 年，建成 330kV 刘家峡—关中交流输变电工程，逐步形成西北电网 330kV 骨干网络。1981 年，500kV 姚孟—武昌超高压交流输变电工程建成投运，全长 595km，逐步形成华中 500kV 骨干网络。2005 年，750kV 官亭—兰州东超高压交流输变电工程建成投运。1989 年，建成±500kV 葛洲坝—上海高压直流输电工程，实现了华中—华东两大区域的直流联网。截至 2009 年，我国已经建成 7 个±500kV 高压直流输电工程，分别为：葛洲坝—南桥高压直流输电工程、天生桥—广东高压直流输电工程、三峡—常州高压直流输电工程、三峡—广东高压直流输电工程、三峡—上海、贵州—广东 I 回（安顺—肇庆）和贵州—广东 II 回（兴仁—深圳）高压直流输电工程，总换流容量达到 2400 万 kW，高压直流输电线路总长达到 6700 余 km。建成灵宝、高岭背靠背换流站，分别将西北电网与华中电网、东北电网和华北电网连接起来。

目前，随着我国社会经济的不断发展，用电需求持续攀升，环境压力日益凸显。我国发电资源和电力消费呈地域逆向分布的基本国情，决定了超高压电网已不能满足电源大规模集约开发、能源大范围优化配置的现实需求，建设电压等级更高、资源优化配置能力更强的特高压输变电工程成为我国电网发展的必然趋势。

关于特高压输电，从 20 世纪 60 年代开始，美国、苏联、日本、意大利等国家先后开展了该方面的技术研究、试验和工程实践，为推动相关技术的发展进行了积极探索，但在商业应用上并未取得突破。我国从 1986 年初正式启动特高压输电技术研究工作，特别是从 2004 年开始，国家电网公司主导全面开展了特高压交、直流输电关键技术研究、成套设备研制及工程示范应用，并在关键技术领域取得了一系列重大突破，建立了特高压交、直流试验基地，建成投运了 1000kV 晋东南—南阳—荆门、皖电东送淮南—上海和

浙北—福州特高压交流输变电工程；建成投运了±800kV 向家坝—上海、锦屏—苏南、哈密—郑州、宜宾—金华特高压直流输电工程。同时，中国南方电网有限责任公司（简称南方电网公司）建立了昆明特高压直流试验基地，建成了±800kV 云广特高压直流输电工程。2014 年，国家能源局分别与国家电网公司、南方电网公司签署《大气污染防治外输电通道建设任务书》，规划建设 12 条大气污染防治输电通道，从西部向京津冀鲁、长三角及珠三角等地区送电，其中有 9 条输电通道为特高压输变电工程，包括国家电网公司的“四交四直”工程（锡盟—山东、榆横—山东、淮南—南京—上海、蒙西—天津 4 条 1000kV 交流特高压输变电工程，以及内蒙古上海庙—山东、锡盟—江苏、宁东—浙江、山西—江苏 4 条±800kV 特高压直流工程）和南方电网公司±800kV 滇西北外送特高压直流输电工程。此外，±800kV 酒泉—湖南特高压直流输电工程及最高电压等级的±1100kV 准东—皖南特高压直流输电工程也在开工建设中。

1.3 输变电工程环境保护要求

1.3.1 环境保护要求

环境保护是指为防治人类生产建设活动可能产生的各种污染和其他公害，保障人体健康而开展的各种保护和改善生活环境与生态环境的工作。《中华人民共和国环境保护法》（简称《环境保护法》，1989 年 12 月 26 日第七届全国人民代表大会常务委员会第十一次会议通过 2014 年 4 月 24 日第十二届全国人民代表大会常务委员会第八次会议修订）为我国解决现实的或潜在的环境问题、协调人类与环境的关系提供了法律保障。

《环境保护法》明确了产生环境污染和其他公害单位的环境保护责任，要求建立环境保护责任制度，采取有效措施防治生产建设或其他活动中产生的污染和危害。该法对建设项目的污染防治也提出了明确要求，包括建设项目工艺设备选择与污染防治措施的设计要求、污染防治措施与主体工程建设

的“三同时”制度（同时设计、同时施工、同时投产使用）、达标排放以及竣工环境保护验收等要求，涵盖了建设项目设计、建设、运行的全过程。

1.3.2 建设项目环境保护管理要求

1.3.2.1 建设项目环境影响评价

《中华人民共和国环境影响评价法》（简称《环境影响评价法》）第十六条规定，国家根据建设项目对环境的影响程度，对建设项目的环境影响评价实行分类管理。

建设单位应当按照下列规定组织编制环境影响报告书、环境影响报告表或者填报环境影响登记表：

（1）可能造成重大环境影响的，应当编制环境影响报告书，对产生的环境影响进行全面分析；

（2）可能造成轻度环境影响的，应当编制环境影响报告表，对产生的环境影响进行分析或者专项评价；

（3）对环境影响较小，不需要进行环境影响评价的，应当填报环境影响等级表。

建设项目的环境影响评价分类管理名录，由国务院环境保护行政主管部门制定并公布。

同时，《建设项目环境保护管理条例》第九条规定了环境影响评价文件的报批时限。建设单位应当在建设项目可行性研究阶段报批建设项目环境影响报告书、环境影响报告表或者环境影响登记表。

1.3.2.2 建设过程环境保护管理

《环境影响评价法》第二十六条规定，建设项目过程中，建设单位应当同时实施环境影响报告书、环境影响报告表以及环境影响评价文件审批部门审批意见中提出的环境保护对策措施。同时，《建设项目环境保护管理条例》第十六条规定，建设项目需要配套建设的环境保护设施，必须与主体工程同时设计、同时施工、同时投产使用；第十七条规定，建设项目的初步设计，应当按照环境保护设计规范的要求，编制环境保护篇章，并依据经批准的建

设项目环境影响报告或者环境影响报告表，在环境保护篇章中落实防治环境污染和生态破坏的措施以及环境保护设施投资概算。

2015年12月10日，中华人民共和国环境保护部印发了《建设项目环境保护事中事后监督管理办法（试行）》（环发〔2015〕163号）。该办法第二条规定，建设项目环境保护事中监督管理是指环境保护部门对本行政区域内的建设项目自办理环境影响评价手续后到正式投入生产或使用期间，落实经批准的环境影响评价文件及批复要求的监督管理；建设项目环境保护事后监督管理是指环境保护部门对本行政区域内的建设项目正式投入生产或使用后，遵守环境保护法律法规情况，以及按照相关要求开展环境影响后评价情况的监督管理。同时，该办法第五条规定了建设单位是落实建设项目环境保护责任的主体，建设单位在建设项目开工前和发生重大变动前，必须依法取得环境影响评价审批文件。建设项目实施过程中应严格落实经批准的环境影响评价文件及其批复文件提出的各项环境保护要求，确保环境保护设施正常运行。

1.3.2.3 建设项目竣工环保验收管理

环境保护设施的建设和投产前的环境保护验收，是环境影响评价制度的延伸。《建设项目环境保护管理条例》规定，建设项目竣工后，建设单位应当向审批该建设项目环境影响报告书、环境影响报告表或者环境影响登记表的环境保护行政主管部门，申请该建设项目需要配套建设的环境保护设施竣工验收。

目前，中华人民共和国环境保护部正对《建设项目环境保护管理条例》开展修订、公开征求意见工作，该修订征求意见稿对建设项目验收提出了新的要求，分排污许可和非排污许可两种不同的管理要求。该修订征求意见稿规定，不实行排污许可管理的建设项目投入生产或者使用前，建设单位应当依据建设项目环境影响报告书（表）及其审批意见，委托第三方机构对建设项目环境保护设施和措施落实情况进行调查，编制建设项目环境保护设施和措施竣工验收报告。建设项目配套的环境保护设施及措施经验收合格，该建设项目方可正式投入生产或者使用。具体方式应参照修订后的实施版执行。

1.3.2.4 建设项目环境影响后评价管理

中华人民共和国环境保护部依据《环境影响评价法》，于2015年12月10日发布了《建设项目环境影响后评价管理办法（试行）》（环境保护部令第37号）。该办法所称的环境影响后评价，是指编制环境影响报告书的建设项目在通过环境保护设施竣工验收且稳定运行一定时期后，对其实际产生的环境影响以及污染防治、生态保护和风险防范措施的有效性进行跟踪监测和验证评价，并提出补救方案或者改进措施，提高环境影响评价有效性的方法和制度。

该办法第三条规定，下列建设项目运行过程中产生不符合经审批的环境影响报告书情形的，应当开展环境影响后评价：

（1）水利、水电、采掘、港口、铁路行业中实际环境影响程度和范围较大，且主要环境影响在项目建成运行一定时期后逐步显现的建设项目，以及其他行业中穿越重要生态环境敏感区的建设项目；

（2）冶金、石化和化工行业中有重大环境风险，建设地点敏感，且持续排放重金属或者持久性有机污染物的建设项目；

（3）审批环境影响报告书的环境保护主管部门认为应当开展环境影响后评价的其他建设项目。

该办法第六条规定了建设项目环境影响后评价的责任主体为建设单位或生产经营单位；第八条规定了后评价时限为建设项目正式投入生产或者运营后3~5年内开展，原审批环境影响报告书的环境保护主管部门也可以根据建设项目的环境影响和环境要素变化特征，确定开展环境影响后评价的时限。

1.3.3 输变电工程环境保护要求

输变电工程在建设和运行阶段均会产生一定的环境影响，根据《环境保护法》等相关法律法规，及建设项目环境保护管理相关要求，需在工程建设、运行的全过程开展环境保护工作，将环境保护理念融入到设计思路、设备制造和施工工艺之中，实现环境保护与工程建设的有机统一，促进电网健

康可持续发展。

输变电工程环境保护贯穿于工程全过程，包括可研、设计、施工和运行等阶段。在可研阶段，工程需开展可行性研究以及环境影响评价方案编制工作。工程可行性研究应初步确定工程选址选线、技术方案以及污染控制和生态保护方案、并纳入环境友好的理念，从源头上减小工程环境影响。环境影响评价方案应对可行性研究方案从环境保护和生态恢复的角度进行评价和分析，预测工程建成后可能产生的不良环境影响，并针对工程具体情况补充必要的环境保护措施，使工程建成后的环境影响能够满足相应的环境保护标准。

从电磁环境保护管理角度，依《电磁辐射环境保护管理办法》（国家环保局令第 18 号）及《电磁环境控制限值》（GB 8702—2014）中规定，100kV 以下电压等级的交流输变电设施可免于管理。100kV 以上电压等级的输变电工程在开展环境影响评价中，依《建设项目环境影响评价分类管理名录》（环境保护部令第 33 号）中相关要求执行，具体见表 1-1。

表 1-1 建设项目分类管理名录（摘录）

项目类别	报告书	报告表	登记表	本栏目环境敏感区含义
36、送（输） 变电工程	500kV 及以上； 涉及环境敏感区的 330kV 及以上	其他（不含 100kV 以下）	—	（一）中的全部；（三）中的全部

表 1-1 中所称的环境敏感区，指依法设立的各级各类自然、文化保护地，以及对建设项目的某类污染因子或生态影响因子特别敏感的区域，主要包括：

（1）自然保护区、风景名胜区、世界文化和自然遗产地、饮用水水源保护区；

（2）基本农田保护区、基本草原、森林公园、地质公园、重要湿地、天然林、珍稀濒危野生动植物天然集中分布区、重要水生生物的自然产卵场、索饵场、越冬场和洄游通道、天然渔场、资源性缺水地区、水土流失重点防治区、沙化土地封禁保护区、封闭及半封闭海域、富营养化水域；

(3) 以居住、医疗卫生、文化教育、科研、行政办公等为主要功能的区域，文物保护单位，具有特殊历史、文化、科学和民族意义的保护地。

在设计阶段，工程可行性研究方案将进一步细化，并形成设计图纸。环境影响评价文件经行政主管部门审批后具有法律效力，其中指出的各项环境保护措施必须落实到工程设计方案中，对设备制造和施工工艺明确环境保护要求。环境影响评价文件经批准后，建设项目的性质、规模、地点、采用的生产工艺或防治污染、防止生态破坏的措施发生重大变动的，建设单位应当重新报批建设项目的环境影响评价文件。加强设计阶段的环境保护工作，有利于确保输变电工程环境保护措施与主体工程“同时设计”。

在施工阶段，工程施工单位应按照施工图纸，将各项环境保护措施落实到工程建设中。为保证各项环境保护措施得到落实，建设单位应组织开展环境监理和环境监测工作，确保环境保护措施与主体工程“同时施工”。

运行阶段分为试运行和正式运行两个阶段。在试运行阶段，建设单位应依法开展竣工环境保护验收工作，确保环境保护设施与主体工程“同时投产”。正式运行后，运行维护单位应组织开展日常环境保护管理工作。符合环境影响后评价的工程，在运行 3~5 年后，应开展工程的环境影响后评价。



2.1 输变电工程电磁环境

2.1.1 交流输变电工程电磁环境

静止电荷在其周围空间产生电场，运动电荷在（电流）在其周围空间同时产生磁场。当频率很低时，电场和磁场是相互独立的，彼此没有联系。当频率很高时，变化的电场和磁场可以相互转换且存在定量的波阻抗关系，而且可以脱离电荷或电流以波的形式向空间传播电磁能量。

我国电力系统的电源工作频率为 50Hz，属于极低频范围，其波长长达 6000km，构不成有效的电磁能量发射，其周围的电场和磁场没有相互依存、相互转化的关系，彼此独立没有联系。因此在实际工程与环境健康研究中，二者通常分别予以讨论。

当电力设施带电或加上电压后，在其周围就产生了工频电场。最直观的表现有：高压输电线路下方手持验电笔或荧光灯管时会发光，其实这是电场作用于感应式验电笔造成氖管放电或电场作用于荧光灯电极间荧光物质所产生的场导致的发光现象。电场的强度是用沿一定方向单位距离内的电位差（即电压）来度量，电场强度的计量单位为 V/m 或 kV/m。邻近高压线路导线处电场高度集中，线路导线与大地间的空间电场分布是不均匀的，沿导线到地面高度的空间范围内，电位分布呈指数衰减分布。

电力设备工作或运转时，其电流便在空间产生磁场。表征电流产生磁场能力的物理量称为磁场强度 H ，以 A/m 为计量单位，磁场强度在周围介质中产生相应的磁感应强度 B ，取决于周围空间介质的磁导率 μ ，磁场强度与

磁感应强度关系： $B=\mu H$ ，磁感应强度随着与载流导体的距离增加而迅速衰减。三相输电线路产生的磁场大致按距离平方的倒数衰减。

2.1.1.1 交流输电线路电磁环境

交流输电线路周围的工频电场强度与线路的运行电压、线路参数（包括导线直径、分裂导线数、分裂间距）、塔形结构有关。多回路输电线路同塔架设或平行架设时，输电线路周围的工频电场强度还与其相序排列有关。

以 1000、500kV 和 220kV 交流输电线路为例给出了线下工频电场垂直线路方向上的分布特性，如图 2-1 所示，1000kV 线路为同塔双回垂直逆相序布置，导线对地最小高度为 26m，500kV 线路为单回三角布置，导线对地最小高度为 14m，220kV 线路为单回水平布置，导线对地最小高度为 7.5m。由图 2-1 工频电场强度分布特征可以看出，虽然电压等级和导线布置方式不同，但选择合适的对地高度，可将线下地面处的工频电场强度最大值控制在相当的水平。

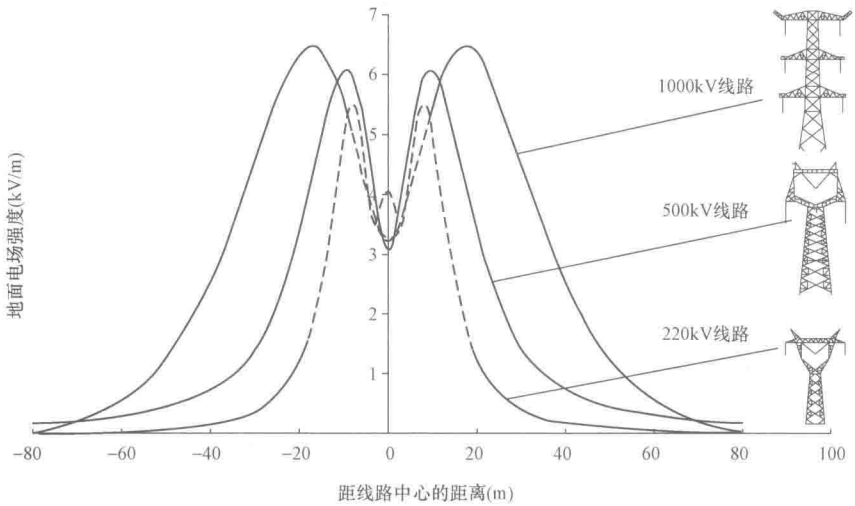


图 2-1 工频电场强度的垂直线路方向上的分布特性

交流输电线路周围的工频磁感应强度与线路运行电流、塔型结构有关。多回路输电线路同塔架设或者平行架设时，周围的工频磁感应强度与其相序排列有关。

以 1000、500kV 和 220kV 交流输电线路为例，图 2-2 给出了输电线路下方工频磁感应强度横向分布曲线。如图 2-2 可以看出，工频磁感应强度的大小主要由电流和导线对地高度决定，因此虽然电压等级提高，但线下工频磁感应强度却并不一定增加。

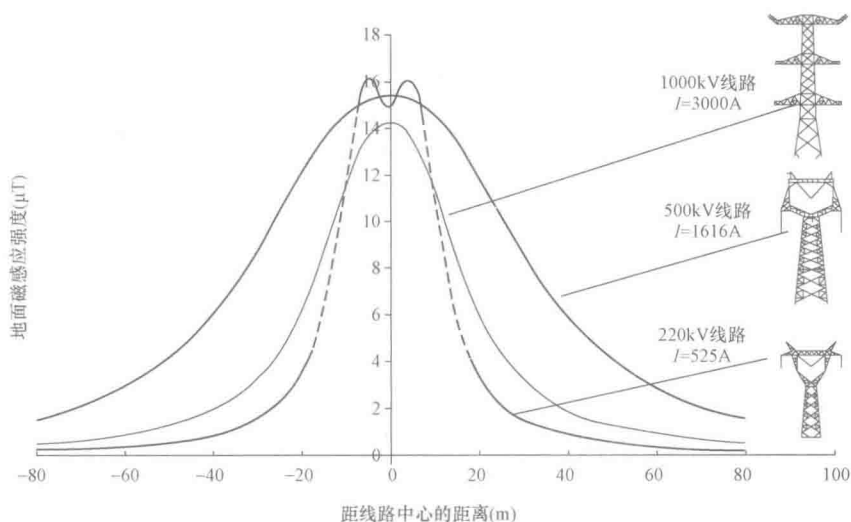


图 2-2 工频磁感应强度横向分布特性

交流输电线路工频电磁场有以下分布规律。

(1) 工频电磁场与输电线路对地高度的关系：在输电线路下方，工频电磁场强度均随线路对地高度增加而减小。

(2) 工频电磁场与输电线路导线布置方式的关系：导线水平排列时工频电磁场强度最大，由水平排列改为三角形排列时，场强最大值以及高场强区的范围均减小，倒三角排列时最小。

(3) 工频电场强度与相间距离的关系：相间距离减小可使工频电场强度降低，但其效果不如加大导线对地高度明显。

(4) 工频电磁场与同塔多回线路之间相序排列的关系：同样的尺寸和高度下，逆相序排列的工频电磁场强度最小，同相序最大。

(5) 工频电磁场与输电线路分裂导线数的关系：采用二分裂的导线比单

导线的线下工频电场强度明显增加，同相序排列时，单导线结构比二分裂导线结构最大的电场强度值低约 35.8%；逆相序排列时，单导线结构比二分裂导线结构最大的电场强度值低约 29.3%。

(6) 工频电场强度与分裂间距的关系：减少分裂间距可以降低电场强度，但效果没有相序优化明显。

(7) 塔型结构与工频电磁场：塔型结构的选择是影响工频电场和磁场水平的一种综合因素，不同的塔型结构所产生的工频电场强度和磁感应强度大小和分布也不同。当相间距离不同时，相序排列不同，其工频电场强度和磁感应强度的影响程度也不同，而且会产生相反的影响结果。当同相序排列时，相间距离越大，线路下的工频电场强度和磁感应强度越小；当逆向序排列时，相间距离越大，线路下的工频电场强度和磁感应强度越大。

2.1.1.2 交流变电站电磁环境

按建筑形式不同，变电站主要分为户内和户外两种。对于户内式变电站，由于房屋的屏蔽作用，变电站外工频电场强度基本为背景值。对于户外式变电站，由于变电站围墙的屏蔽作用，围墙外的工频电场强度整体较小，在进出线或带电构架附近，工频电场强度较大；但随着距围墙距离的增加，站外工频电场衰减很快。变电站外工频电场强度一般在每米几伏到几百伏之间（靠近变电站进出线附近除外）。变电站在设计时，均按照相关技术规范要求，保证变电站外的工频电场强度低于国家规定 4kV/m 的限值。

户外变电站站外工频磁感应强度主要来源于进出线及电抗器的影响。变电站站界 1m 外的工频磁感应强度小于 $10\mu\text{T}$ ，远低于我国规定的推荐限值 $100\mu\text{T}$ 。户内变电站站外的工频磁感应强度则趋于背景值。

一般情况下，城市内建设的变电站为全户内或地下等型式，大多采用了气体绝缘金属封闭开关设备（GIS）、地下电缆等（环保）措施，变电站产生的工频电场和工频磁场在变电站围墙处已经衰减得很小。

可见，变电站周围的工频电场、工频磁场数值均满足国家有关标准或推荐限值的要求，不会对居民的健康产生不良影响。

2.1.2 直流输电工程电磁环境

2.1.2.1 直流输电线路电磁环境

(1) 直流磁场。直流磁场的产生与交流输电线路产生的工频磁场的机理相同，即电流产生磁场，由于我国直流输电线路一般是双极运行，则直流磁场是由正负两个相反方向的电流产生的，如图 2-3 所示。同时，由于地球磁场的存在，使分析直流线路磁场不可避免地涉及地球磁场。

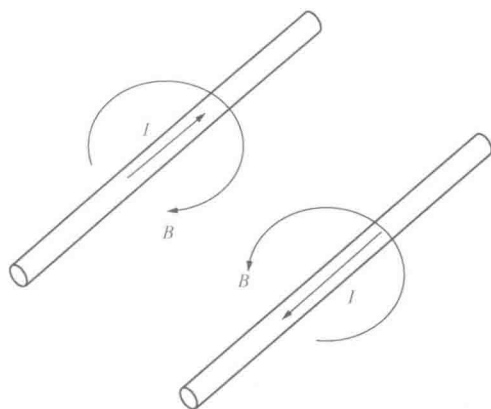


图 2-3 直流输电线路产生直流磁场示意图

我国目前在运高压、特高压直流输电线路计算和实测结果表明，直流输电线路产生的磁场在 μT 数量级，与地球的地磁场接近，远远小于国际非电离辐射防护委员会（ICNIRP）《限制时变电场-磁场和电磁场（300GHz 以下）暴露导则》给出的一般公众磁场暴露限值（40mT），从此意义来说，直流输电线路可以不考虑磁场问题。

(2) 合成场强和离子流密度。合成场和离子流是高压直流输电的特有现象，也是与交流输电环境影响的重要差别之一。就交流输电线路而言，线路导线电晕时，由于电压的交替变化，电晕所产生的离子绝大部分被限制在导线附近或被中和而消失，基本上不存在这些离子离开导线的运动。而直流输电线路的电场则比较复杂，在导线无电晕（或不计及电晕及其产生的离子