ICS 29.240
P 62
备案号：XXXX-202X

DL

中华人民共和国电力行业标准

P

DL/T XXXX—202X

±1100kV 直流架空输电线路设计规范

Code for design of ±1100kV DC overhead transmission line

（征求意见稿）

202X-XX-XX 发布　　202X-XX-XX 实施

国家能源局　发布

中华人民共和国电力行业标准

±1100kV 直流架空输电线路设计规范

Code for designing of ±1100kV DC overhead transmission line

DL/T XXXX—202X

主编单位：国家电网有限公司特高压事业部
电力规划设计总院有限公司
国网经济技术研究院有限公司

批准部门：国家能源局

施行日期：202X 年 X 月 XX 日

中国计划出版社

202X 北京

国 家 能 源 局

公 告

202X 年　第 XX 号

依据《国家能源局关于印发〈能源领域行业标准化管理办法（试行）〉及实施细则的通知》（国能局科技〔2009〕52 号）有关规定，经审查，国家能源局批准《　　》等 XXX 项行业标准，其中能源标准（NB）XX 项、电力标准（DL）XXX 项，现予以发布。

附件：行业标准目录

国家能源局

202X 年 XX 月 XX 日

附件：

行业标准目录

序号	标准编号	标准名称	代替标准	采标号	批准日期	实施日期
……						
XXX	DL/T XXXX-202X	±1100kV 直流架空输电线路设计规范			202X-XX-XX	202X-XX-XX

前　言

根据《国家能源局综合司关于下达2018年能源领域行业标准制（修）订计划及英文版翻译出版计划的通知》（国能综通科技〔2018〕100号）的要求，标准编制组经广泛调查研究，认真总结近年来±800kV特高压直流架空输电线路的设计、施工和运行维护经验，充分借鉴±1100kV特高压直流输电关键技术研究及科研成果，并在广泛征求准东—华东（昌吉—古泉）±1100kV特高压直流输电线路工程设计、施工等意见的基础上，编制完成《±1100kV直流架空输电线路设计规范》。

本标准共分16章和1个附录，主要技术内容包括总则，术语和符号，路径，气象条件，导线和地线，绝缘子和金具，绝缘配合、防雷和接地，导线布置，荷载，杆塔，基础，对地距离及交叉跨越，走廊通道，环境保护和水土保持，劳动安全和工业卫生，附属设施等。

本标准由国家能源局负责管理，由电力规划设计总院提出，由能源行业电网设计标准化技术委员会负责日常管理，由国家电网公司特高压事业部、电力规划设计总院、国网济技术研究院有限公司负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见或建议，请寄送电力规划设计总院（地址：北京市西城区安德路65号，邮政编码：100120）。

本标准主编单位、参编单位、主要起草人和主要审查人：

主 编 单 位：国家电网有限公司特高压事业部

电力规划设计总院

国网经济技术研究院有限公司

参 编 单 位：中国电力工程顾问集团东北电力设计院有限公司

中国电力工程顾问集团华东电力设计院有限公司

中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司

中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司

中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司

江苏省电力设计院有限公司

山东电力工程咨询院有限公司

浙江省电力设计院有限公司

河北电力设计院有限公司

中国电力科学研究院有限公司

主要起草人：

主要审查人：

目　次

1　总　　则……1
2　术语和符号……2
　2.1　术语……2
　2.2　符号……2
3　路　　径……3
4　气象条件……4
5　导线和地线……5
6　绝缘子和金具……7
7　绝缘配合、防雷和接地……9
8　导线布置……11
9　荷　　载……12
10　杆　　塔……15
　10.1　基本规定……15
　10.2　杆塔型式……16
　10.3　杆塔材料……16
　10.4　计算表达式……17
11　基　　础……19
12　对地距离及交叉跨越……21
13　走廊通道……24
14　环境保护和水土保持……25
15　劳动安全和工业卫生……26
16　附属设施……27
本标准用词说明……27
引用标准名录……29
附：条文说明……30

Contents

1 General provisions ····· 1
2 Terms and symbols ····· 2
2.1 Terms ····· 2
2.2 Symbols ····· 2
3 Routing ····· 3
4 Meteorological conditions ····· 4
5 Conductor an earthwire ····· 5
6 Insulators and fittings ····· 7
7 Insulation coordination,lightning protecttion and grounding ····· 9
8 Conductor arrangement ····· 11
9 Load ····· 12
10 Tower ····· 15
10.1 basic regulations ····· 15
10.2 Tower type ····· 16
10.3 Tower material ····· 16
10.4 Calculation expression ····· 17
11 Foundation ····· 19
12 Ground clearance and crossing ····· 21
13 Corridor ····· 24
14 Environmental protection and soil and water conservation ····· 25
15 Labor safety and industrial hygiene ····· 26
16 Accessories ····· 27
Explanation of wording in the code ····· 28
List of quoted standards ····· 29
Addition： Explanation of provisions ····· 30

1 总　　则

1.0.1　为了在±1100kV 直流架空输电线路设计中贯彻国家基本建设方针和技术经济政策，做到安全可靠、先进适用、经济合理、资源节约、环境友好，制定本标准。

1.0.2　本标准适用于单回±1100kV 直流架空输电线路的设计。

1.0.3　±1100kV 直流架空输电线路设计，应从实际出发，结合地区特点，积极采用新技术、新工艺、新材料、新结构，推广采用节能、降耗、环保的先进技术和产品。

1.0.4　±1100kV 线路设计除应符合本标准的规定外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2　术语和符号

2.1　术语

2.1.1　±1100kV 直流架空输电线路　　±1100kV DC overhead transmission line

标称电压为±1100kV 的直流架空输电线路。

2.1.2　大跨越　　large crossing

线路跨越通航大江河、湖泊或海峡等，因档距较大（在 1000m 以上）或铁塔较高（在 130m 以上），导线选型或铁塔设计需特殊考虑，且发生故障时严重影响航运或修复特别困难的耐张段。

2.1.4　极间距　　pole spacing

直流架空输电线路正、负极导线中心之间的距离。

2.2　符号

2.2.1　作用与作用效应

C——结构或构件变形的规定限值；

R_d——结构构件抗力的设计值；

R_K——基于安全系数方法计算的地基抗力特征值；

S_d——荷载组合效应的设计值；

T——绝缘子承受的最大使用荷载、稀有荷载、断线荷载、断联荷载或常年荷载；

T_R——绝缘子的额定机械破坏负荷。

2.2.2　计算系数

γ_0——结构重要性系数；

γ_{RE}——承载力抗震调整系数。

3 路　　径

3.0.1　路径选择宜采用卫片、航片、全数字地理信息系统和红外测量等新技术；在地质条件复杂地区，必要时采用地质遥感技术；综合考虑线路长度、地形地貌、地质、冰区、交通、施工、运行及地方规划等因素，进行多方案技术经济比较，做到安全可靠、环境友好、经济合理。

3.0.2　路径选择应避开军事设施、大型工矿企业等重要设施，并应符合城镇规划。当无法避开时应取得相关协议，必要时采取适当措施。

3.0.3　路径选择宜避开不良地质地带和采动影响区，当无法避让时，应采取必要的措施；宜避开重冰区、易舞动区及影响安全运行的其他区域，当无法避让时，应采取必要的措施；宜避开自然保护区、风景名胜区等，当无法避让时应做好评估、报批工作；宜避开机场附近可能影响航路的区域，当无法避让时，应征求航空管理部门意见，采取必要的措施。

3.0.4　路径选择应考虑与邻近设施如电台、机场、弱电线路、地磁台、输油输气管道等的相互影响。

3.0.5　路径选择宜靠近现有国道、省道、县道及乡镇道路，改善交通条件，方便施工和运行。

3.0.6　规划走廊中有多回线路时，宜根据技术经济比较及施工、运行安全因素，统筹规划路径。

3.0.7　在走廊拥挤或房屋密集地段，可采用极导线垂直架设或接地极线路与直流线路同杆塔架设。

3.0.8　轻、中、重冰区的耐张段长度分别不宜大于 10km、5km、3km。当耐张段长度较长时应考虑防串倒措施。在高差或档距相差悬殊的山区或重冰区等运行条件较差的地段，耐张段长度应适当缩短。

3.0.9　输电线路与主干铁路、高速公路交叉时，宜采用独立耐张段。

3.0.10　山区线路在选择路径和定位时，应注意控制使用档距和相应的高差，避免出现杆塔两侧大小悬殊的档距，当无法避免时应采取必要的措施，提高安全度。

3.0.11　有大跨越的输电线路，路径方案应结合跨越点位置，通过综合技术经济比较确定。

3.0.12　大跨越线路跨越位置应符合跨越所在区域的规划、民航、部队、航道、海事、水利、环保等相关部门的要求。

3.0.13　大跨越线路跨越位置的选择应综合考虑水文、地质条件，宜避开河道不稳定、地震断裂、崩塌滑坡、山洪冲刷等影响线路安全运行的地带，对于无法避开的，应采取可靠措施。

3.0.14　大跨越的跨越方案应符合电力行业现行标准《架空输电线路电气设计规程》DL/T 5582 的规定。

4　气象条件

4.0.1　设计气象条件，应根据沿线气象资料的数理统计结果及附近已有线路的运行经验确定，基本风速、设计冰厚重现期应按 100 年考虑。

4.0.2　基本风速确定方法应按电力行业现行标准《架空输电线路荷载规范》DL/T 5551 执行。

4.0.3 山区输电线路，宜采用统计分析和对比观测等方法，由邻近地区气象台、站的气象资料推算山区的基本风速，并结合实际运行经验确定。当无可靠资料时，宜将附近平原地区的统计值提高 10%选用。

4.0.4　基本风速不宜低于 27m/s。必要时还宜按稀有风速条件进行验算。

4.0.5　地线设计冰厚，除无冰区段外，应较导线增加 5mm。

4.0.6　设计时应加强对沿线已建线路设计、运行情况的调查，应充分考虑微地形、微气象条件、导线易舞动地区等影响。对于气象资料缺乏地区，可建立测风、观冰装置进行气象观测，以确定线路的气象条件。

4.0.7　设计用其他气象参数应按 DL/T 5551、DL/T 5582 及《重覆冰架空输电线路设计技术规程》DL/T 5440 的相关规定取值。

5　导线和地线

5.0.1　输电线路导线截面和分裂型式，宜根据系统需要按照经济电流密度选择，根据系统输送容量，结合不同导线的材料结构进行电气和机械特性等比选，并应满足可听噪声和无线电干扰等限值及安全可靠的要求，通过年费用最小法进行综合技术经济比较后确定。导线表面最大电位梯度、电晕无线电干扰场强、电晕可听噪声、地面标称场强、合成场强和离子流密度、年费用最小法计算方法见DL/T 5582。

5.0.2　在海拔1000m及以下地区，距直流架空输电线路正极性导线对地投影外20m处，80%时间，80%置信度，0.5MHz频率的无线电干扰不超过58dB（μV/m）。

5.0.3　在海拔1000m及以下地区，距直流架空输电线路正极性导线对地投影外20m处，由电晕产生的可听噪声（L50）不应超过45dB（A）；海拔高度大于1000m且线路经过人烟稀少地区时，由电晕产生的可听噪声不应超过50dB（A）。

5.0.4　当晴天时，直流输电线路下地面合成电场强度和离子流密度限值应符合表5.0.4的规定。

表5.0.4　合成电场强度和离子流密度限值

途经区域	合成电场强度（kV/m）	离子流密度（nA/m^2）
居民区	25	80
一般非居民区	30	100

5.0.5　直流输电线路大跨越的导线截面宜按允许载流量选择，通过综合技术经济比较后确定。

5.0.6　验算导线载流量时，流过线路导线的直流电流，应取换流站整流阀在冷却设备投运时可允许的最大过负荷电流。在无可靠系统资料情况下，流过线路导线的长期过负荷电流可取1.1倍的额定电流，同时应符合DL/T 5582的规定。

5.0.7　导地线在弧垂最低点的设计安全系数不应小于2.5，悬挂点的设计安全系数不应小于2.25。地线的设计安全系数不应小于导线的设计安全系数。

5.0.8　导地线的张力设计应符合DL/T 5582的规定。

5.0.9　地线选择应符合DL/T 5582的规定。

5.0.10　导地线防振措施应按下列条件设计：

1　钢芯铝绞线的平均张力，不应超过拉断力的25%。分裂导线采用阻尼间隔棒时，档距在700m及以下可不再采用其他防振措施；档距在700m以上的可采用防振锤（阻尼线）或另加护线条防振。阻尼间隔棒宜不等距、不对称布置。

2　镀锌钢绞线或铝包钢绞线平均运行张力的上限和相应的防振措施，应符合表5.0.10的要求。

表5.0.10　地线平均运行张力的上限和防振措施

情　况	平均运行张力的上限（拉断力的百分数）%	防振措施
档距不超过 600m 的开阔地区	12	不需要
档距不超过 600m 的非开阔地区	18	不需要
档距不超过 120m	18	不需要
不论档距大小	25	防振锤（阻尼线）或另加护线条

3　大跨越导地线的防振措施应符合 DL/T 5582 的规定。

5.0.11　导地线架设后的塑性伸长，应按制造厂提供的数据或通过试验确定，塑性伸长对弧垂的影响宜采用降温法补偿。如无资料，镀锌钢绞线或铝包钢绞线塑性伸长可采用 1×10^{-4}，可降低温度 10℃补偿。

5.0.12　导线防舞措施应符合 DL/T 5582 的规定。

5.0.13　大跨越导地线的单丝及绞线均不应有接头。

6 绝缘子和金具

6.0.1 绝缘子机械强度的安全系数应符不小于表 6.0.1 的规定。双联及多联绝缘子串应验算断一联后的机械强度，其荷载及安全系数按断联情况考虑。

表 6.0.1 绝缘子机械强度安全系数

情 况	最大使用荷载		常年荷载	稀 有	断 线	断 联
	盘型绝缘子	棒型绝缘子				
一般线路	2.7	3.0	4.0	1.5	1.8	1.5
大跨越	3.0	3.3	5.0	1.8	2.0	2.0

注：1 常年荷载是指年平均气温条件下绝缘子所承受的荷载，验算荷载是验算条件下绝缘子所承受的荷载；

2 棒型绝缘子包括复合绝缘子和瓷棒绝缘子。

6.0.2 绝缘子机械强度的安全系数 K_I 应按公式（6.0.2）计算：

$$K_I = \frac{T_R}{T} \qquad (6.0.2)$$

式中：T_R——绝缘子的额定机械破坏负荷（kN）；

T——分别取绝缘子承受的最大使用荷载、稀有荷载、断线荷载、断联荷载或常年荷载（kN）。

6.0.3 导线悬垂串在轻、中冰区宜采用复合绝缘子，重冰区宜采用盘型绝缘子；耐张串宜采用盘型绝缘子。

6.0.4 采用黑色金属制造的金具表面应热镀锌或采取其他相应的防腐措施。

6.0.5 金具强度的安全系数应不小于表 6.0.5 的规定。

表 6.0.5 金具强度安全系数

情 况	最大使用荷载	稀 有	断 线	断 联
一般线路	2.5	1.5	1.5	1.5
大跨越	3.0	1.8	2.0	2.0

6.0.6 绝缘子串及金具应考虑均压和防电晕措施。有特殊要求需要另行研制或采用非标准金具时，应经试验合格后方可使用。

6.0.7 当线路与直流输电工程接地极距离小于 5km 时，地线应绝缘，大于或等于 5km 时，应通过计算确定地线是否绝缘。地线绝缘时宜使用双联绝缘子串。

6.0.8 与横担连接的第一个金具应回转灵活且受力合理，其强度应高于串内其他金具强度。

6.0.9 悬垂 V 型绝缘子串两肢之间的夹角的一半可比最大风偏角小 5º～10º，或可通过试验确定。

6.0.10 V 型串采用复合绝缘子时端部应采取防脱落设计，在顺线路方向应转动灵活。

6.0.11 线路经过易舞动区应适当提高金具和绝缘子串的机械强度。

6.0.12 在易发生严重覆冰地区，宜增加绝缘子串长或采用 V 型串、八字串。

6.0.13 持续强风区宜采用耐磨材料制造的金具。

6.0.14 耐张塔跳线宜采用刚性跳线。

7　绝缘配合、防雷和接地

7.0.1　线路的绝缘配合，应使线路能在工作电压、操作过电压和雷电过电压等各种工况条件下安全可靠地运行。

7.0.2　绝缘子片数选择应采用污耐压法，对无可靠污耐压特性参数的绝缘子，也可按照污秽等级按爬电比距法选择合适的绝缘子型式和片数。对中、重覆冰线路还应按绝缘子串覆冰后的覆冰耐压强度进行校核。

7.0.3　线路的防污绝缘设计，应根据绝缘子的污耐压特性，参考污区分布图和交直流积污比，结合现场实际污秽调查及运行经验并考虑污秽发展情况，选择合适的绝缘子型式和片数。

7.0.4　在海拔高度 1000m 以下地区，轻污区 0.05mg/cm^2 盐密时工作电压要求的悬垂 V 型绝缘子串绝缘子片数（钟罩型）不宜小于表 7.0.4 的数值。

表 7.0.4　轻污区 0.05mg/cm^3 盐密时工作电压要求的悬垂 V 型绝缘子串绝缘子片数及参数

盘型绝缘子型式	钟罩型	
单片绝缘子的高度（mm）	170	195
爬距（mm）	545	635
绝缘子片数（片）	83	77

注：绝缘子片数适合南方地区，北方地区的绝缘子片数应根据当地的污秽特征和气候条件，并结合当地已运行线路的经验综合确定。

7.0.5 大跨越雷电过电压下所要求的实际绝缘子片数应根据大跨越雷电过电压计算结果和运行经验确定。雷电过电压最小空气间隙应与雷电过电压片数相匹配。

7.0.6　耐张绝缘子串的绝缘子片数可取悬垂串同样的数值。在中、重污区，爬电比距可根据运行经验较悬垂绝缘子串的适当减少。

7.0.7　复合绝缘子在轻、中、重污区其爬电比距不宜小于盘型绝缘子最小要求值的 3/4。复合绝缘子两端均应加装均压环，其有效绝缘长度应满足雷电过电压和操作过电压的要求。

7.0.8　在海拔高度超过 1000m 的地区，绝缘子的片数应进行修正，修正方法见 DL/T 5582。

7.0.9　线路在相应风偏条件下，带电部分与杆塔构件（包括防坠落装置轨道、脚钉等）的最小间隙不应小于表 7.0.9 所列数值。

表 7.0.9　带电部分与杆塔构件的最小间隙 （m）

海拔高度（m）	1000	2000	3000
工作电压	3.2	3.7	4.2

操作过电压（1.46 p.u.）	7.7	8.4	9.0
操作过电压（1.50 p.u.）	8.1	8.7	9.2
操作过电压（1.55 p.u.）	8.6	9.2	9.7
操作过电压（1.58 p.u.）	8.9	9.5	9.9
雷电过电压	/		

7.0.10　考虑带电作业时，带电部分对杆塔接地部分的校验间隙应符合DL/T 5582的规定。

7.0.11　在海拔高度大于 1000m 地区，空气间隙放电电压需要修正，修正方法见 DL/T 5582。

7.0.12　应结合当地已有的运行经验、地区雷电活动的强弱特点、地形地貌特征及土壤电阻率高低等因素进行线路的防雷设计；在计算耐雷水平后，应通过技术经济比较，采用合理的防雷方式。

7.0.13　线路应沿全线架设双地线。杆塔上地线对导线保护角平丘地区不宜大于-2°，山区不宜大于-15°。

7.0.14　档距中央导线与地线之间的距离应符合 DL/T 5582 的规定。

7.0.15　线路的接地应符合 DL/T 5582 的规定。

8　导线布置

8.0.1　导线极间距的确定应综合考虑电磁环境、绝缘子串参数、空气间隙、走廊宽度、工程造价等因素，做到安全可靠、环境友好、经济合理。

8.0.2　覆冰地区导线和地线间的水平偏移应满足导线和地线在不均匀覆冰、不同期脱冰时静态和动态接近的电气间隙要求。

8.0.3　大跨越线路，上、下导线间及导线与地线间的水平偏移应符合 DL/T 5582 的规定。

8.0.4　±1100kV 直流线路与接地极线路共塔时，直流线路导线与接地极线路导线的净空距离应大于操作过电压间隙。

9 荷　　载

9.0.1　荷载和作用的分类应按《架空输电线路荷载规范》DL/T 5551-2018执行。

9.0.2　杆塔的荷载可分解为横向荷载、纵向荷载和垂直荷载。

9.0.3　杆塔和基础设计时，荷载组合和各类荷载的代表值应按《架空输电线路荷载规范》DL/T 5551-2018执行。

导线、地线、绝缘子串风偏风荷载的取值应按DL/T 5551、DL/T 5582和DL/T 5440执行。

9.0.4　各类杆塔承载能力极限状态下的荷载基本组合应计算设计大风情况、设计覆冰情况、低温情况、不均匀覆冰情况、断线情况和安装情况，必要时尚应计算地震作用和偶然荷载作用等情况。

9.0.5　各类杆塔设计大风情况、设计覆冰情况、低温情况的荷载基本组合应按下列要求计算，并计及高差和档距不等引起的导、地线纵向不平衡荷载。终端杆塔应考虑换流站一侧导线及地线已架设或未架设的情况。

1　设计大风：基本风速、无冰、未断线(包括最小垂直荷载和最大水平荷载组合)。

2　设计覆冰：设计冰厚、相应风速及气温、未断线。

3　低温：最低气温、无冰、无风，未断线（仅适用于终端与耐张杆塔）。

9.0.6　各类杆塔不均匀覆冰情况的荷载基本组合，应按导线和地线不均匀覆冰、相应风速及气温、未断线计算。对不均匀覆冰情况，各类杆塔均应按所有导、地线同时同向有不平衡张力计算，使杆塔承受最大弯矩；中、重冰区杆塔还应按所有导、地线同时不同向有不平衡张力计算，使杆塔承受最大扭矩。

9.0.7　悬垂型杆塔的断线(含导线的纵向不平衡张力)情况，应计算下列荷载基本组合：

1　任意一极导线有纵向不平衡张力，地线未断；

2　断任意一根地线，导线无纵向不平衡张力。

3　防串倒的加强型悬垂杆塔，除计算上述荷载组合外，还应按所有导、地线同时同向有断线张力（导线有纵向不平衡张力）计算。

4　当±1100kV线路与接地极线路同塔架设时，尚应计算同一档内任意一极±1100kV线路导线和一组接地极线路导线同时有纵向不平衡张力的情况。

9.0.8　耐张型杆塔断线情况(含导线的纵向不平衡张力)情况，应按同一档内断任意一根地线、任意一极导线有纵向不平衡张力计算。当±1100kV线路与接地极线路同塔架设时，尚应计算同一档内任意一极±1100kV线路导线和一组接地极线路导线同时有纵向不平衡张力的情况。对大跨越线路的耐张塔，尚应计算下列荷载基本组合：

1　同一档内，两极导线有纵向不平衡张力，地线未断；

2　同一档内，断两根地线，导线无纵向不平衡张力。

9.0.9　悬垂型杆塔安装情况的荷载基本组合应符合下列规定：

1　提升导线、地线及其附件时的作用荷载，应包括提升导、地线、绝缘子和金具等重力荷载

（导线按1.5倍计算，地线按2.0倍计算）、安装工人和工具的附加荷载，动力系数宜取1.1。一般线路附加荷载标准值可按表9.0.9取值，大跨越线路附加荷载标准值可按一般线路的1.5倍取值。

表 9.0.9　附加荷载标准值（kN）

导线		地线		跳　线
悬垂型杆塔	耐张型杆塔	悬垂型杆塔	耐张型杆塔	
8.0	12.0	4.0	4.0	6.0

2　导线及地线锚线作业时的作用荷载，锚线对地夹角不宜大于20°，正在锚线相的张力宜取动力系数1.1。挂线点垂直荷载取锚线张力的垂直分量和导、地线重力和附加荷载之和，纵向不平衡张力分别取导、地线张力与锚线张力纵向分量之差。

9.0.10　耐张型杆塔安装情况的荷载基本组合应符合下列规定：

1　锚塔在锚地线时，相邻档内的导线及地线应均未架设；锚导线时，在同档内的地线应已架设。紧线塔在紧地线时，相邻档内的地线可已架设或未架设，同档内的导线应均未架设；紧导线时，同档内的地线应已架设，相邻档内的导线和地线可已架设或未架设。

2　锚塔和紧线塔均可计及临时拉线的作用。临时拉线对地夹角不应大于45°，其方向应与导、地线方向一致。临时拉线平衡导线张力标准值宜按160kN计算，地线临时拉线平衡地线张力标准值宜按10kN计算。

3　紧线牵引绳对地夹角宜按不大于20°考虑，计算紧线张力时应考虑导、地线的初伸长、施工误差和过牵引的影响。

4　一般线路附加荷载标准值可按表9.0.9取值，大跨越线路附加荷载标准值可按一般线路的1.5倍取值。

9.0.11　与水平面夹角不大于 30°且可以上人的铁塔构件，应能承受施工或检修集中荷载的作用。施工或检修集中荷载的标准值可取 0.8kN，且不应与其他荷载组合。

9.0.12　扶梯和走道上的垂直荷载应包括自重和可变荷载，其中可变荷载的标准值不宜小于 2.5kN/m^2，且不应与其它荷载组合。

9.0.13　稀有大风情况和稀有覆冰情况的荷载组合效应设计值应按荷载偶然组合进行计算。

9.0.14　稀有覆冰情况的相应气温宜采用-5℃，相应风速可采用 10m/s，所有导、地线同时同向有不平衡张力，使杆塔承受最大弯矩。大跨越线路稀有覆冰情况的不平衡张力，还应按脱冰档内的脱冰重量不小于稀有覆冰重量的 50%计算。

9.0.15　各类杆塔断线情况下的断线张力（或导线纵向不平衡张力），以及不均匀覆冰情况下的不平衡张力均应按静态荷载计算。

9.0.16　位于地震烈度为 9 度及以上地区的各类杆塔均应进行抗震验算。

9.0.17　外壁坡度小于2%的圆筒形结构或圆管构件，应根据雷诺数Re的不同情况进行横风向风振

（旋涡脱落）校核。

10　杆塔

10.1　基本规定

10.1.1　杆塔结构设计应采用极限状态设计法，结构构件的可靠度采用可靠指标度量，极限状态设计表达式采用荷载标准值、材料性能标准值、几何参数标准值以及各种分项系数等表达。

10.1.2　杆塔结构应按承载能力极限状态和正常使用极限状态进行设计。结构或构件的强度、稳定和连接强度，应按承载力极限状态的要求，采用荷载的设计值进行计算；结构或构件的变形应按正常使用极限状态的要求，采用荷载的标准值和正常使用规定限值进行计算。

10.1.3　长期荷载效应组合（无冰、风速 5m/s 及年平均气温）作用下，杆塔的计算挠度（不包括基础倾斜），宜符合表 10.1.3 的规定。

表 10.1.3　杆塔的计算挠度（不包括基础倾斜）

项　　目	计算挠度限值
自立式悬垂直线塔	3*h*/1000
自立式悬垂转角塔	5*h*/1000
自立式耐张转角及终端塔	7*h*/1000

注：1 h 为杆塔最长腿基础顶面起至计算点的高度。

2 根据杆塔的特点，设计应提出施工预偏的要求。

10.1.4　钢结构构件允许最大长细比应符合表 10.1.4 的规定。

表 10.1.4　钢结构构件允许最大长细比

项　　目	允许最大长细比
受压主材	150
其它受压材	200
辅助材	250
受拉材（预拉力的拉杆可不受长细比限制）	400

10.1.5　横担预拱值应结合变形验算结果确定，一般可取横担悬臂长度的 1/70～1/80。

10.1.6　杆塔在设计时应基于施工的安全性和便利性，设置相应的施工用孔或辅助结构并进行承载力校验。

10.1.7　杆塔全部铁构件、螺栓、脚钉及插入基础的主材外露部分，均应采取可靠的防腐措施。对于一般腐蚀环境，宜采用热（浸）镀锌防腐，镀锌层厚度应符合《输电线路铁塔制造技术条件》GB/T 2694 的规定；重腐蚀环境宜采取增加镀锌层厚度或其它增强防腐措施。

10.1.8　受剪螺栓的螺纹不宜进入剪切面。当无法避免螺纹进入剪切面时，应按丝扣部分的有效面积进行剪切强度验算。

10.1.9　全塔所有螺栓应采取有效防松措施，并按运行要求考虑有效的防卸措施。

10.1.10　位于导线舞动区的杆塔应计及舞动对杆塔的不利影响。

10.2　杆塔型式

10.2.1　杆塔可按其受力性质分为悬垂型、耐张型杆塔。悬垂型杆塔可分为悬垂直线和悬垂转角杆塔；耐张型杆塔分为耐张直线、耐张转角和终端杆塔。

10.2.2　杆塔的外型应满足导、地线的排列方式等相关电气性能要求，同时结合占地范围、运行维护条件、施工方法、制造工艺及美观等因素，按照技术先进、经济合理的原则进行综合规划。

10.2.3　杆塔构件布置应简单明确、传力清晰、受力均衡，同时应考虑构件受力状态、截面型式、材料类型的影响。

10.2.4 杆塔使用宜遵守以下原则：

1　不同类型杆塔的选用应依据线路路径特点，按安全可靠、经济合理、维护方便和有利于环境保护的原则进行。

2　山区线路杆塔应依据地形特点，采用全方位长短腿结构型式。

3　在走廊拥挤地带，可采用导线垂直排列的杆塔。

4　终端塔塔型宜根据换流站的门型布置及终端塔位置灵活选择，必要时可采用单极终端塔。

5　悬垂直线杆塔兼小角度转角时，其转角度数不宜大于 3°。

6　悬垂转角杆塔的转角度数不宜大于 20°。

10.3　杆塔材料

10.3.1　钢材的材质应按照技术可靠、经济合理的原则，根据结构的重要性、荷载特征、结构形式、连接方式、工作环境、钢材厚度等条件进行合理选用。

10.3.2　钢材宜采用 Q235、Q355 和 Q420，有条件时也可采用 Q460，其质量应分别符合现行国家标准《碳素结构钢》GB/T 700、《低合金高强度结构钢》GB/T 1591、《合金结构钢》GB/T 3077 和《钢结构设计标准》GB 50017 的规定。特殊环境条件下，当采用其它牌号的钢材时，尚应符合相关标准的规定和要求。

10.3.3　所有杆塔结构的钢材均应满足不低于 B 级钢的质量要求，当环境极端最低气温不高于-40℃时，尚应符合下列规定：

1　Q235、Q355 焊接构件和 Q420 钢材质量等级应满足不低于 C 级钢的质量要求，Q460 钢材质量等级应满足不低于 D 级钢的质量要求。

2　导地线挂点处的构件不宜采用 Q420、Q460 高强钢。

3　锻造法兰当钢材厚度小于 40mm 时，质量等级不低于 C 级；当钢材厚度不小于 40mm 时，质量等级不宜低于 D 级。

4 Q420、Q460 钢材制孔应采用钻孔工艺，Q235、Q355 钢材制孔宜采用钻孔工艺。

10.3.4 受力构件的厚度不宜小于 4mm。

10.3.5 大规格角钢肢宽可选用 220mm、250mm、280mm 和 300mm。

10.3.6 当采用 40mm 及以上厚度的钢板焊接时，应采取防止钢材层状撕裂的措施。

10.3.7 结构连接宜采用 6.8、8.8 级热浸镀锌螺栓，有条件时也可使用 10.9 级螺栓，其材质、机械特性和尺寸应分别符合现行国家标准《紧固件机械性能 螺栓、螺钉和螺柱》GB/T 3098.1 和《紧固件机械性能 螺母》GB/T 3098.2 及电力行业标准《输电线路杆塔及电力金具用热浸镀锌螺栓与螺母》DL/T 284 的有关规定。

10.3.8 钢材的设计用强度指标、钢材的抗力分项系数、螺栓和地脚螺栓的强度设计值均应按现行电力行业标准《架空输电线路杆塔结构设计技术规程》DL/T 5486 的规定采用。

10.4 计算表达式

10.4.1 结构或构件的承载力极限状态，应按荷载的基本组合或偶然组合计算荷载组合的效应设计值，并应采用下列设计表达式进行设计：

$$\gamma_0 \cdot S_d \le R_d \tag{10.4.1}$$

式中：

γ_0 ——结构重要性系数，各类杆塔除安装工况取1.0外，其他工况不应小于1.1；

S_d ——荷载组合效应的设计值，应按DL/T 5551确定；

R_d ——结构构件抗力的设计值，应按各有关架空输电线路结构设计规范确定。

10.4.2 结构或构件的正常使用极限状态，应根据不同的设计要求，采用下列设计表达式进行设计：

$$S_d \le C \tag{10.4.2}$$

式中：C——结构或构件变形的规定限值（mm）。

10.4.3 位于基本地震烈度为 9 度及以上地区的钢结构杆塔应进行抗震验算。结构或构件的抗震验算应采用下列设计表达式进行设计：

$$S_d \le \frac{R_d}{\gamma_{RE}} \tag{10.4.3}$$

式中：γ_{RE}——承载力抗震调整系数，应符合表 10.4.3 的规定。

表 10.4.3　承载力抗震调整系数

材　料	结构构件	承载力抗震调整系数
钢	跨越塔	0.85
	除跨越塔以外的其他铁塔	0.80
	焊缝和螺栓	1.00

11 基　　础

11.0.1　基础型式的选择，应结合塔位地形地质、施工条件和杆塔型式的特点综合考虑，并应符合下列要求：

1　应优先采用原状土基础，并宜适应机械化施工的要求。

2　一般地区宜选用现浇钢筋混凝土基础。

3　岩石地区宜采用锚杆基础或岩石嵌固基础；软土地基宜采用大板基础、桩基础或沉井基础；

4　山区线路基础选型应遵循不破坏或少破坏原状地貌的原则，保护自然环境，防止水土流失。

11.0.2　地基基础设计应保证地基的稳定和结构的强度，并应进行地基变形计算，使地基变形控制在容许范围内。

11.0.3　地基基础设计时，所采用的作用效应与相应的抗力限值应符合下列规定：

1　计算基础稳定、地基承载力时，传至基础或承台底面上的作用效应应按正常使用极限状态下作用的标准组合；相应的抗力应采用地基承载力特征值或单桩承载力特征值。

2　计算地基的不均匀沉降、基础位移和基础裂缝时，传至基础底面上的作用效应应按正常使用极限状态下作用的准永久组合。

3　在确定基础或桩基承台高度、支挡结构截面、计算基础或支挡结构内力、确定配筋和验算材料强度时，应按承载能力极限状态下作用的基本组合。

11.0.4　地基承载力计算应按下式计算：

$$\gamma_0 \cdot S_K \le R_K \qquad (11.0.3)$$

式中：γ_0——结构重要性系数；

S_K——照正常使用极限状态下标准组合的荷载效应；

R_K——基于安全系数方法计算的地基抗力特征值，即抗力标准值除以安全系数 K，安全系数 K 不小于表 11.0.4 规定的数值。

表 11.0.4　地基基础的安全系数

设计条件	上拔 K1				上拔 K2	倾覆 K3	下压 K4
基础型式 杆塔类型	重力式基础	锚杆	桩基础	其他类型基础	/	各类型基础	桩基础
悬垂直线杆塔	1.2	2.0	1.6	1.5	1.2	1.5	1.6
耐张直线（0°转角）及悬垂转角杆塔	1.3	2.2	2.0	1.8	1.3	1.8	2.0
耐张转角、终端及大跨越杆塔	1.5	2.5	2.5	2.2	1.5	2.2	2.5

11.0.5　基础设计（包括地脚螺栓、插入角钢设计）时，其作用力按现行行业标准《架空输电线路

基础设计技术规程》DL/T 5219 计算。

11.0.6　现浇钢筋混凝土基础本体的强度等级不应低于 C25，灌注桩的混凝土强度等级不应低于 C25，预制桩的混凝土强度等级不应低于 C30。运输条件允许时积极采用商品混凝土。

11.0.7　基础设计应根据塔位地下水、环境水及土壤腐蚀的情况采取适宜有效的防腐措施。

11.0.8　湿陷性黄土地区的杆塔基础应根据湿陷性黄土的等级采取不同的处理方式。地基处理原则应符合现行国家标准《湿陷性黄土地区建筑规范》GB 50025 中的有关规定。对于二级及以上自重湿陷性黄土地区的基础，土体表层应夯实并设散水坡或排水沟。

11.0.9　冻土地区的基础埋深应遵照现行行业标准《冻土地区建筑地基基础设计规范》JGJ 118 的有关要求确定。

11.0.10　当位于地震烈度为 7 度及以上的地区且场地为饱和砂土或饱和粉土时，应考虑地基液化的可能性，并应采取必要的稳定和抗震措施。

11.0.11　跨越河流或位于洪泛区的塔位，应根据水文地质资料进行基础设计，必要时应计算冲刷和漂浮物的撞击作用，并采取适当的防护措施；位于河滩或内涝积水区的塔位，除有特殊要求外，基础主柱顶面高程不应低于 5 年一遇洪水位高程。

11.0.12　转角塔、终端塔的基础应采取预偏措施，预偏值应根据杆塔结构的变形和基础设计时地基出现的变形综合确定。

12　对地距离及交叉跨越

12.0.1　导线与地面、建筑物、树木、铁路、公路、河流、管道、索道及各种架空线路的距离应符合下列要求：

1　垂直距离应根据导线运行温度40℃或覆冰无风情况求得的最大弧垂计算。

2　风偏净空距离应根据最大风情况或覆冰情况求得的最大风偏进行校验。

3　大跨越的导线弧垂应按导线实际能够达到的最高温度计算。

4　输电线路与铁路、高速公路及一级公路交叉时，如交叉档距超过200m，最大弧垂应按导线允许温度计算，导线的允许温度可取70℃。

12.0.2　导线对地面的最小距离，以及与山坡、峭壁、岩石之间的最小净空距离应符合下列规定：

1　当导线绝缘子串按水平V串布置时，在最大计算弧垂情况下，导线与地面的最小距离不应小于表12.0.2-1规定的数值。

表12.0.2-1　导线与地面的最小距离

地　区	最小距离（m）	备　注
居民区	28.5	-
非居民区	25	农业耕作区
	22	人烟稀少的非农业耕作区
交通困难地区	21	-

注：1 海拔高度按1000m考虑。当海拔高度超过1000m，每增加1000m海拔高度，导线与地面的最小距离增加4%的距离。

2 在灰尘严重和气候干燥地区，宜适当增加极导线对地距离。

2　在最大计算风偏情况下，导线与山坡、峭壁、岩石之间的最小净空距离，应符合表12.0.2-2规定的数值。

表12.0.2-2　导线与山坡、峭壁、岩石之间的最小净空距离

线路经过地区	最小净空距离（m）
步行可以到达的山坡	15.5
步行不能到达的山坡、峭壁和岩石	13.5

12.0.3　当线路邻近民房时，在湿导线情况下房屋所在地面的未畸变合成电场不应超过15kV/m。

12.0.4　线路不应跨越经常有人居住的建筑物以及屋顶为燃烧材料危及线路安全的建筑物。导线与建筑物之间的距离应符合下列规定：

1　当跨越时，在最大计算弧垂情况下，导线与建筑物之间的最小垂直距离，应不小于21.5m。

2　当不跨越时，在无风时，导线与建筑物之间的最小水平距离应不小于 7m。

3　在最大计算风偏情况下，导线与建筑物之间的最小净空距离应不小于 21m。

12.0.5　线路经过经济作物和集中林区时，在轻、中冰区宜采用加高杆塔跨越林木不砍通道的方案，在重冰区应综合经济技术比较，采取砍跨结合，在充分利用塔型塔高的条件下，尽量跨越。并应符合下列规定：

1　当跨越时，导线与树木（考虑自然生长高度）之间的最小垂直距离，应不小于 17m。

2　在最大计算风偏情况下，导线与树木之间的最小净空距离应不小于 14m。

3　需要砍伐树木时，砍伐范围应按导线与树木（考虑自然生长高度）之间的最小垂直距离和最小净空距离的要求确定，并考虑导线静止时，砍伐范围外的树木应按表 7.0.9 规定的最小工作电压间隙校核其倾倒过程对导线的距离。

4　线路通过果树、经济作物林或城市灌木林不应砍伐通道。导线与果树、经济作物、城市绿化灌木以及街道行道树木之间的最小垂直距离应不小于 19.5m。

12.0.6　线路跨越弱电线路（不包括光缆和埋地电缆）的交叉角应符合表 12.0.6 的规定。

表 12.0.6　线路与弱电线路的交叉角

弱电线路等级	一级	二级	三级
交叉角	≥45°	≥30°	不限制

12.0.7　线路与铁路、公路、河流、管道、索道及各种架空线路交叉或接近的要求，应符合下列规定：

1　线路与铁路、公路、河流、管道、索道及各种架空线路交叉最小垂直距离应符合表 12.0.7-1 的规定。

表 12.0.7-1　线路与铁路、公路、河流、管道、 索道及各种架空线路交叉最小垂直距离

项目		垂直距离（m）
铁路	至轨顶	28.5
	至承力索或接触线	19.5
公路	至路面	28.5
通航河流	至最高航行水位船舶驾驶甲板或人员活动平台	19.5
	至最高航行水位桅顶	13
不通航河流	百年一遇洪水位	15
	冬季至冰面	25
弱电线	至被跨越物	22
电力线	至被跨越物（杆顶）	13（19.5）

项目		垂直距离（m）
特殊管道、索道	至管道任何部分	管道 22、索道 13

注：1 垂直距离中，括号内的数值用于跨杆（塔）顶。

2 当线路跨越拟建铁路桥梁地段，考虑铁路架桥机施工，导线至轨顶的垂直距离不应小于 30 米。

表 12.0.7-2 线路与铁路、公路、河流、管道、索道及各种架空线路水平接近距离的要求

项目					最小水平距离（m）
铁路	杆塔外缘至轨道中心				交叉：塔高加 3.1m，无法满足要求时可适当减小，但不得小于 40m，困难时双方协商确定。 平行：最高塔高加 3.1m，困难时双方协商确定。
公路	交叉	杆塔外缘至路基边缘			15.0 或按协议取值
	平行	边导线至路基边缘	开阔地区		最高塔高
			路径受限制地区		15.0 或按协议取值
通航河流 不通航河流	塔位至河堤				河堤保护范围之外或按协议取值
弱电线	与边导线间（平行）		开阔地区		最高塔高
			路径受限制地区（最大风偏情况下）		15.5
电力线	与边导线间（平行）		开阔地区		最高塔高
			路径受限制地区		杆塔同步时，边导线间 22 杆塔交错时，导线风偏至邻塔 15.5
特殊管道、索道	平行		边导线至管、索道	开阔地区	最高塔高
				路径受限制地区（最大风偏情况下）	17.5
	交叉		杆塔外缘至管、索道	开阔地区	最高塔高
				路径受限制地区	17.5

注：走廊内受静电感应可能带电的金属物应予以接地。

12.0.8 当线路跨越铁路、高速公路、一级公路、电车道、一二级通航河流、110kV 及以上电力线、特殊管道、索道时，导、地线不得接头。

12.0.9 当跨越 110kV 及以上电力线路、铁路、高速公路、一级公路、一二级通航河流及特殊管道等时，导线悬垂绝缘子串宜采用双挂点双联串型。

12.0.10 输电线路平行接近电信线路和低压线时，应根据电信线路和低压线的危险影响感应电压的允许值，确定平行间距及平行长度。

13　走廊通道

13.0.1　通道内建筑物拆迁原则应按照本规范第 12.0.3、12.0.4 条规定执行，对不满足地面场强及安全距离的房屋应拆迁。

13.0.2　通道内树木跨越或砍伐原则应满足本规范第 12.0.5 条规定。树木自然生长高度应在林业部门意见的基础上，结合沿线建设运行经验综合确定。

13.0.3　路径选择时宜避让厂矿、企业等设施；在路径受限制地区，对于拟封闭、拆迁的厂矿、企业等设施，应进行经济技术比较并计及社会影响等因素综合确定。

13.0.4　输电线路与甲类火灾危险性的生产厂房、甲类物品库房、易燃、易爆材料堆场以及可燃或易燃、易爆液（气）体储罐的防火间距，不应小于杆塔全高加 3m，还应满足其他的相关规定。在通道非常拥挤的特殊情况下，可与相关部门协商，在适当提高防护措施、满足防护安全要求后，可相应压缩防护间距。

13.0.5　与采用爆破作业的采石（矿）场的安全距离，应符合现行国家标准《爆破安全规范》GB 6722 的规定。在通道较紧张地区，应根据爆破情况及与线路的相对位置关系合理确定安全距离。对于不满足安全距离要求的采石场按封闭考虑。

13.0.6　线路应尽量远离炸药库、烟花爆竹仓库，受走廊限制时应满足相关规范要求。对于不满足安全距离要求的炸药库、烟花爆竹仓库等障碍设施按封闭或拆迁考虑。

13.0.7　输电线路与管道平行接近时宜按线路的参数和管道的特性具体分析计算确定是否需要采用特殊的防护措施。

13.0.8　直流线路对地磁观测点的最小距离应符合现行国家标准《地震台站观测环境技术要求——第 2 部分：电磁观测》GB/T 19531.2 的要求，若无法满足应对地磁观测点采取一定的防护措施或予以搬迁。

14　环境保护和水土保持

14.0.1　输电线路设计应符合国家环境保护、水土保持和生态环境保护的有关法律法规的要求。

14.0.2　输电线路的设计中应充分考虑场强、无线电干扰、可听噪声等对环境的影响，满足各限值要求，应对电磁干扰、噪声等方面采取必要的改善措施，减少其对周围环境的影响。

14.0.3　山区线路应通过全方位长短腿、不等高基础、原状土基础等技术措施，减少塔基开方。妥善处理余土，并合理采用护坡、堡坎、排水沟等措施防止和减少水土流失。

14.0.4　塔基施工场、牵张场、交叉跨越场等区域应采取合理的措施，减少水土流失及对周围环境的影响，施工完成后应尽快恢复原始地貌及植被。

14.0.5　建、构筑物拆迁后应采取合理的迹地恢复措施。

15　劳动安全和工业卫生

15.0.1　输电线路设计应满足国家规定的有关防火、防爆、防尘、防毒及劳动安全与卫生等的要求。

15.0.2　杆塔应设有高空作业工作人员的安全保护措施。

15.0.3　在人工开挖基础设计时应根据基坑及地质情况采取护壁、支护等安全防护措施。

15.0.4　施工时应针对由邻近输电线路可能产生的感应电压采取安全保护措施。

15.0.5　当对平行和交叉的其他输电线路、通信线等邻近线路存在感应电压影响时，邻近线路在施工、运行和维修时应做好安全措施。

16　附属设施

16.0.1　应根据线路沿线交通及该地区已有的生产运行机构情况合理设置巡检站。巡检站应配备必要的备品备件、检修材料、维护检修工器具以及交通工具。

16.0.2　杆塔上的固定标志，应符合下列规定：

1　所有杆塔均应标明线路的名称、代号、极性和杆塔号；

2　新建输电线路若对航路有影响，应与航空管理部门协商装设航空障碍标志；

3　杆塔上固定标志的尺寸、颜色和内容还应符合运行部门的要求；

4　跨越铁路时杆塔处应设置标志牌。

16.0.3　新建输电线路宜根据现有运行条件配备适当的通信设施。

16.0.4　一般线路杆塔登高设施可选用脚钉或直爬梯。高于 70m 的杆塔宜设置简易的休息平台。平台宽度不小于 0.6m，围栏高度应不小于 1.2m。大跨越杆塔应设置动力升降装置和爬梯。

16.0.5　新建输电线路可根据需要，适当配置在线监测装置。

16.0.6　杆塔可安装高空作业人员的防坠落装置。

本标准用词说明

1 为便于在执行本标准条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1）表示很严格，非这样做不可的：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

2）表示严格，在正常情况均应这样做的：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；

3）表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

4）表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准目录

《架空输电线路电气设计规程》DL/T 5582

《架空输电线路荷载规范》DL/T 5551

《重覆冰架空输电线路设计技术规程》DL/T 5440

《碳素结构钢》GB/T 700

《低合金高强度结构钢》GB/T 1591

《合金结构钢》GB/T 3077

《钢结构设计标准》GB 50017

《紧固件机械性能 螺栓、螺钉和螺柱》GB/T 3098.1

《紧固件机械性能 螺母》GB/T 3098.2

《输电线路杆塔及电力金具用热浸镀锌螺栓与螺母》DL/T 284

《架空输电线路杆塔结构设计技术规程》DL/T 5486

《架空输电线路基础设计技术规程》DL/T 5219

《湿陷性黄土地区建筑规范》GB 50025

《冻土地区建筑地基基础设计规范》JGJ 118

《爆破安全规范》GB 6722

《地震台站观测环境技术要求——第 2 部分：电磁观测》GB/T 19531.2

中华人民共和国电力行业标准

±1100kV 直流架空输电线路设计规范

DL/T XXXX——202X

条 文 说 明

制定说明

《±1100kV 直流架空输电线路设计规范》（DL/T xxxx－202x），经国家能源局 202x 年 xx 月 xx 日以第 xx 号公告批准发布。

本规范制定过程中，编制组贯彻国家法律、法规和相关政策，进行了深入调查研究，认真总结近年来±800kV 特高压直流架空输电线路的设计、施工和运行维护经验，充分借鉴±1100kV 直流输电关键技术研究及科研成果，并广泛征求准东—华东（昌吉—古泉）±1100kV 特高压直流输电线路工程设计、施工、建设等意见。

为便于广大设计、施工、科研、学校等单位有关人员在使用本规范时能正确理解和执行条文规定，编制组按章、节、条顺序编制了本规范的条文说明，对条文规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项进行了说明。但是，本条文说明不具备与标准正文同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握标准规定的参考。

目　次

1　总　　则……33
2　术语和符号……34
　2.1　术语……34
　2.2　符号……34
3　路　　径……35
4　气象条件……37
5　导线和地线……39
6　绝缘子和金具……47
7　绝缘配合、防雷和接地……47
8　导线布置……64
9　荷　　载……67
10　杆　　塔……72
　10.1　基本规定……72
　10.2　杆塔型式……72
　10.3　杆塔材料……73
　10.4　计算表达式……74
11　基　　础……76
12　对地距离及交叉跨越……78
13　走廊通道……98
14　环境保护和水土保持……102
15　劳动安全……104
16　附属设施……105

1 总　　则

1.0.1　本条明确强调了±1100kV 直流架空输电线路的设计要求，提出了输电线路设计工作的基本原则，要求协调好各方面的关系，如安全与经济、基本建设与生产运行、近期需要和远景规划、线路建设和周围环境及法律法规等，目的是以合理的投资使设计的输电线路能获得最佳的综合效益。

1.0.2　本条为本标准适用范围。本标准适用于单回±1100kV 直流架空输电线路的设计，单极线路，与接地极线共塔线路可参照执行。

1.0.4　根据电网建设发展，本标准还明确了依靠技术进步，合理利用资源，达到降低消耗、提高资源的利用率的目的。

1.0.5　强调架空输电线路设计除应执行本标准外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2　术语和符号

2.1　术语

本节按照标准编纂范例列出架空直流输电输电线路设计中常用到的术语。

2.2　符号

本节根据条文中符号的使用情况将标准中引用的符号列入。

3 路　　径

3.0.1　目前特高压交直流输电线路路径选择现已大量使用卫片、航片、全数字摄影测 量系统等新技术，在滑坡、泥石流、崩塌等不良地质发育地区，必要时宜采用了地质遥感技术。

3.0.2　为了使新建特高压工程与地方发展和规划相协调，明确路径选择原则，要求尽 量减少对军事设施和地方经济发展的影响。说明房屋接近及跨越的标准。《民用建筑设计术语标准》中建筑物的定义：用建筑材料构筑的空间和实体，供人们居住和进行各种活动的场所。构筑物就是不具备、不包含或不提供人类居住功能的人工建造物，比如水塔、水池、过滤池、澄清池、沼气池等。

3.0.3　根据多年的线路运行经验的总结，路径选择应尽量避开不良地质地带、采动影 响区（地下矿产开采区、采空区）等可能引起杆塔倾斜、沉陷的地段；当无法避让时，应开展详细的地质、矿产分布、开采情况、塌陷情况的专项调查，应开展塔位稳定性评估。增加了路径选择应尽量避 开导线易舞动区等内容并加以明确。东北的鞍山、丹东、锦州一带，湖北的荆门、荆州、武汉一带是全国范围内输电线路发生舞动较多地区，导线舞动对线路安全运行所造成的危害十分重大，诸如线路 频繁跳闸与停电、导线的磨损、烧伤与断线，金具及有关部件的损坏等等，都会造成重大的经济损失与社会影响，因此舞动多发区应尽量避让，当无法避让时，应对铁塔、金具等采取适当加强，并安装 防舞装置等措施。随着社会经济的发展，民用机场建设大幅度增多，对机场的避让问题已经成为路径选择时较普遍的问题。一般需初步判断线路是否对机场航路有影响，可能影响航路的情况一般有：线路在机场障碍物限制面内；线路在机场障碍物限制面外、净空区范围内；航空主管部门认为对航空器飞行构成影响的其它情况，如横跨河流、山谷、公路、铁路等。

3.0.4　为使新建线路与沿线相关设施的相互协调，以求和谐共 存，明确在路径选择时应考虑与邻近设施如电台、机场、弱电线路、地磁台、输油输气管道等的相互影响。

3.0.6　规定换流站的进出线应统一规划。当两回或多回路相邻线路线路路径受到城 市规划、工矿区、军事设施、复杂地形等的限制，为减轻线路建设对地方的影响，在线路走廊狭窄地 段，宜统筹规划。两回或多回线路并行间距的确定，应考虑电磁环境、电气安全距离（静电感应、工频 及操作条件下的空气间隙、舞动等）、组塔架线施工、运行维护等方面的要求。

3.0.8　耐张段长度由线路的设计、运行、施工条件和施工方法确定。汲取 2008 年抗冰保电经验，需控制耐张串长度，限制冰灾事故范围，且如果耐张段长度过长，受限于目前施工条件及方法，耐张段需分段放线，直线塔锚线周期过长会损伤导线，因此对不同冰区的耐张段进行了限制。但对于气候干燥，不易发生冰灾，且地形开阔、障碍物较少的地区，建议在收集相关气象资料和临近线路运行资料后，若无冰灾等相关极端天气造成的电网事故发生，在以上地区的轻、中冰区可适当放开对耐张段长度的限制。对较长的耐张段，设计中应采取措施防止串倒，例如轻冰区每隔 7～8 基（中冰区每隔 4～5 基）设置一基纵向强度较大的加强型直线塔，防串倒的加强型直线塔其设计条件除按常规直线塔工况计算外，还应按所有导地线同侧有断线张力（含纵向不平衡张力）计算。档距差

较大或高差较大时，纵向不平衡张力会逐渐增加，影响线路安全性。山区和重覆冰段线路缩小耐张段，可提高线路安全性，且发生冰害时可减小冰害范围，便于事故抢修。《重覆冰架空输电线路设计技术规程》DL/T 5440—2009 中也要求避免大档距大高差，且在条文解释里 5.0.2-6 提到重覆冰线路耐张段长度不宜太长。

3.0.9　根据 2008 年初我国南方地区发生冰灾事故的经验，对特殊区段线路，如输电线路跨越主干铁路、高速公路等重要设施的跨越应采用独立耐张段，并按稀有覆冰校验交叉跨越物的间距。但对于不易发生冰灾或较少有极端天气出现的地区，建议根据地区特点，收集相关气象资料和临近线路运行资料，根据综合判断选择合适的跨越方案。

3.0.10　为了预防灾害性事故的发生，山区输电线路 选择路径和定位时，应注意限制使用档距和相应的高差，避免出现杆塔两侧大小悬殊的档距，当无法避免时应采取必要的措施，提高安全度。

3.0.11　大跨越是输电线路路径方案的控制点和决定因素，应先进行大跨越选点，在大跨越可行的基础上，结合大跨越的情况，通过综合技术经济比较确定路径方案。大跨越位置应符合跨 越所在区域的规划、航空、军事、航道、海事、水利、环保等相关部门的要求。宜避开河道不稳定、 地震断裂、崩塌滑坡、山洪冲刷等影响线路安全运行的地带，对于无法避开的，应采取可靠措施。必要时由专业部门针对跨越方案作综合评估。大跨越杆塔宜设置在洪水淹没区以外，并考虑堤岸冲刷变迁的影响。对于重要通航河流，跨越塔基础外缘应根据水利主管部门相关规定，与堤防坡脚保持安全距离。大跨越应自成耐张段。

4　气象条件

4.0.1　±1100kV 特高压直流输电线路的重要性与±800kV 特高压直流输电线路类似，风荷载基本值重现期参考国家标准《±800kV 直流架空输电线路设计规范》GB50790-2013 中 4.0.1 条之规定。

4.0.2 ±1100kV 一般线路及大跨越线路基本风速的统计方法在《架空输电线路荷载规范》DL/T 5551、《架空输电线路电气设计规程》DL/T 5582 中已有详细规定及说明，可直接参照执行。

4.0.3　架空输电线路经过地区广，地形条件复杂，线路通过山区时，除一些狭谷、高峰等处受微地形影响，风速值有所增大外，对于整个山区，从宏观上看摩擦阻力大，风速值也不一定就较平地大，所以，如无可靠资料，对于通过山区的线路，从安全的角度出发，参考国家标准《建筑结构荷载规范》 GB50009-2001 的规定，设计风速按附近平地风速资料增大 10％；至于山区的微地形影响，除个别大跨越为提高其安全度可考虑增大风速以外，在一般地区就不予增加。至于一般山区虽有狭管等效应，考虑到架空输电线路有档距不均匀系数的影响，因此，从总的方面山区风速较平地增大了 10％以后，已经能够反映狭管效应等情况。

4.0.4　在国家标准《110kV～750kV 架空输电线路设计规范》GB50545-2010 中，500kV～750kV 输电线路设计时，将对地 20m 高的最大设计风速的最小值不能低于 30m/s 归算到 10m 基准高时为 26.85m/s；500kV～750kV 架空输电线路计算导地线的张力、荷载以及杆塔荷载时，基本风速不应低于 27m/s。《1000kV 架空输电线路设计规范》GB50665-2011 和《±800kV 直流架空输电线路设计规范》GB 50790-2013 分别规定 1000kV 和±800kV 直流架空输电线路基本风速不宜低于 27m/s。本标准仍沿用此最低风速限制。

4.0.5　地线的悬挂高度高于导线，地线直径通常小于导线，正常运行时，地线温度远低于导线，这些特征决定了在同一覆冰天气条件下，地线覆冰的厚度要大于导线。根据 2008 年初我国南方地区覆冰灾害情况调查分析，在同样条件下，地线上的覆冰厚度较导线大，故在新建线路设计时，轻冰区地线设计冰厚应较导线增加 5mm，中、重冰区地线设计冰厚应较导线增加不小于 5mm。

对于一般线路，地线设计冰厚较导线增加 5mm，仅针对杆塔的机械强度设计，即地线水平、垂直荷载、纵向张力（地线张力计算时，按导线设计冰厚作为覆冰控制工况，计算冰厚增加 5mm 情况下的张力，计入杆塔荷载中），不涉及地线机械特性、间隙验算、断线情况和不均匀覆冰情况（地线不平衡张力取值时应与导线采用的冰区相对应）。地线覆冰取值较导线增加 5mm 后，地线的荷载取值对应的冰区（如不均匀覆冰的不平衡张力、断线张力取值等）应与导线的冰区相同。

国内部分特高压线路对地线悬垂线夹握力按增加 5mm 冰厚进行校验。

稀有工况时，地线稀有冰厚亦可较导线稀有冰厚增加不小于 5mm。

4.0.6　根据我国输电线路的运行经验，本条强调加强沿线已建线路设计、运行情况的调查，并对调查结果予以论述（风灾、冰灾、雷害、污闪、地质灾害、鸟害等）。

我国输电线路运行经验要求：线路应避开重冰区及易发生导线舞动的地区。路径必须通过重冰区或导线易舞动地区时，应进行相应的防冰害或防舞动设计，适当提高线路的机械强度，局部易舞区段在线路建设时安装防舞装置等措施。输电线路位于河岸、湖岸、山峰以及山谷口等容易产生强风的地带时，其基本风速应较附近一般地区适当增大。对易覆冰、风口、高差大的地段，宜缩短耐张段长度，杆塔使用条件应适当留有裕度。对于相对高耸、山区风道、垭口、抬升气流的迎风坡、较易覆冰等微地形区段，以及相对高差较大、连续上下山等局部地段的线路应加强抗风、冰灾害能力。

昌吉-古泉±1100kV 输电线路工程在新疆哈密北部山区跨越天山，工程跨越段为天山“百里风区”的入风口区域，地形起伏大，气候的垂直变化显著，受狭管效应和下坡风等影响，风灾频繁，设计风速难以确定。通过沿线设立了 4 个临时气象站，经过 3 年的实际观测；与附近参证气象站进行相关分析，将参证气象站重现期风速移植到临时气象站位置；采用中尺度气象数值模拟方法获得大风区域风速的水平和垂直风速的分布，最终得到线路跨天山段不同重现期风速及风切变的分布情况。

4.0.7　设计用年平均气温、安装、雷电、操作、带电作业、覆冰、断线、断联、舞动及稀有气象工况的的气象参数在现行电力行业标准《架空输电线路荷载规范》DL/T 5551、《架空输电线路电气设计规程》DL/T 5582 及《重覆冰架空输电线路设计技术规程》DL/T 5440 中已有详细规定及说明，可按以上标准执行。

5　导线和地线

5.0.1　目前，为选定导线截面，一般分为两步：首先根据系统输送容量选择几种规格导线截面进行经济分析比较，以确定最佳截面；然后从电气性能上考虑导线表面电位梯度、无线电干扰、可听噪音等因素，以求对环境影响控制在允许范围内。

在正常输送功率条件下，±1100kV 输电线路导线选择主要决定于电晕条件以及电晕派生效应无线电干扰和可听噪声，其中可听噪声是导线最小截面和分裂型式选择的主要控制条件。

5.0.2　电晕放电产生的无线电干扰具有白色频谱特性，其频率基本上在30MHz 以内，控制直流输电线路无线电干扰主要应考虑其对线路附近收听无线电广播的影响。交流电晕产生的无线电干扰与直流电晕产生的无线电干扰具有相似的特性，过去我国±500kV直流线路的无线电干扰允许值一直参照500kV交流线路的标准执行，即20m处0.5MHz 无线电干扰场强80％/80％值不超过55dB。由于同等被干扰程度时直流输电线路的无线电干扰比交流输电线路的大3dB，故国外的直流线路允许RI电平较交流高3dB即58dB。《±800kV直流架空输电线路设计规范》GB50790-2013中规定无线电干扰值不大于58dB，线路运行中尚未发生任何投诉，说明取值是可行的。

采用国际无线电干扰特别委员会 CISPR 推荐的的无线电干扰场强计算公式，对多种导线组合的无线电干扰水平值进行的估算结果列于表 1。

表 1　无线电干扰计算结果

序号	导线结构(n×㎜)	导线表面最大场强（kV/cm）	无线电干扰（dB）或（μV/m）				
			海拔 0m	海拔 1000m	海拔 2000m	海拔 3000m	海拔 3500m
1	8×44.5	20.30	43.59	46.59	49.59	52.59	54.26
2	8×42.1	20.70	43.64	46.64	49.64	52.64	54.31
3	8×39.9	22.01	44.14	47.14	50.14	53.14	54.81
4	9×42.1	19.12	41.36	44.36	47.36	50.36	52.03
5	9×39.9	20.33	41.71	44.71	47.71	50.71	52.38
6	10×38.4	19.42	39.72	42.72	45.72	48.72	50.39
7	10×36.2	20.30	39.97	42.97	45.97	48.97	50.64
8	8×47.4	19.43	43.44	46.44	49.44	52.44	54.11

注：上表为好天气，50％概率，0.5MHz，距正极性导线 20m 处无线电干扰电平。导线平均高度 32m，极间距 26m。

±1100kV 淮东-华东特高压直流输电工程导线组合为 8×1250mm²，由上表可以看出其无线电干扰计算值能满足 58dB（μV/m）限值要求。

对于海拔超过 1000m 的线路，其无线电干扰限值应进行高海拔修正。修正因数为：以 1000m

为基准，海拔高度每增加 300m，无线电干扰限值增加 1dB。

导线选择还应符合环境保护部门提出的限值及计量标准要求。

5.0.3　我国特高压输电线路的建设，其路径主要经过荒山、林地或农业耕作地区等非居住环境地区，参考我国环境噪声的限制标准为 2 类地区。特高压交流输电线路的可听噪声（L_5）不宜超过 55dB（A），已被国家环保总局认可。

按国家环保总局批文〔2006〕199 号，云南至广东±800kV 特高压直流输电工程的可听噪声控制指标为：按当地功能区划的声环境标准执行，无功能区划的地区按《声环境质量标准》（GB 3096-2008）的相关规定评价。

按国家环保部批文环审〔2015〕203 号，准东至华东±1100kV 特高压直流输电工程的可听噪声控制指标为：该工程周围居民区噪声应符合《声环境质量标准》（GB 3096-2008）相应功能区要求。

采用美国 EPRI 公司推荐的的电晕可听噪声计算公式，并按“海拔每增加 300m，可听噪声增加 1dB（A）”进行海拔修正，计算得出±1100kV 直流输电线路采用 8×1250mm² 导线，在不同海拔（0~3500m）不同极导线间距下（22~36m）正极性导线对地投影外 20m 处的可听噪声 50%值，表 2 中结果对应极导线平均对地高度 32m。

表 2　正极性导线对地投影外 20m 处的可听噪声（50%值）

（按美国 EPRI 推荐的方法修正）

海拔高度（m）	电晕可听噪声（50%值）（dB（A））							
	极间距 22m	极间距 24m	极间距 26m	极间距 28m	极间距 30m	极间距 32m	极间距 34m	极间距 36m
0	**42.17**	**41.08**	**40.13**	**39.28**	**38.52**	**37.84**	**37.22**	**36.66**
500	**43.84**	**42.75**	**41.80**	**40.95**	**40.19**	**39.51**	**38.89**	**38.33**
1000	45.50	**44.41**	**43.46**	**42.61**	**41.85**	**41.17**	**40.55**	**39.99**
1500	47.17	46.08	45.13	**44.28**	**43.52**	**42.84**	**42.22**	**41.66**
2000	48.84	47.75	46.80	45.95	45.19	**44.51**	**43.89**	**43.33**
2500	50.50	49.41	48.46	47.61	46.85	46.17	45.55	**44.99**
3000	52.17	51.08	50.13	49.28	48.52	47.84	47.22	46.66

根据中国电力科学研究院（CEPRI）在北京特高压直流试验基地和西藏高海拔试验基地分别进行了 2 年直流线路电磁环境真型试验，结果表明，从海拔 0m 到 4300m，直流线路可听噪声增加量只有按美国 EPRI 推荐的海拔修正量的 30％左右。但从海拔及离子对导线电晕放电及其产生的噪声影响看，直流线路可听噪声随海拔增加呈现非线性，随海拔增加，在海拔较低时的可听噪声增加量比海拔较高时的增加量大。在不同海拔试验结果的情况下看，可暂按海拔每增加 1000m，可听噪声增加 2.2dB（A）修正。表 3 给出了采用电科院修正方法计算得出的±1100kV 直流输电线路在不同海

拔不同极导线间距下正极性导线对地投影外 20m 处的可听噪声 50%值。

表 3　正极性导线对地投影外 20m 处的可听噪声（50%值）

（按海拔每增加 1000m 可听噪声增加 2.2dB 修正）

导线结构(n×mm)	海拔（m）	电晕可听噪声（50%值）（dB（A））							
		极间距 22m	极间距 24m	极间距 26m	极间距 28m	极间距 30m	极间距 32m	极间距 34m	极间距 36m
8×47.4	0	**42.17**	**41.08**	**40.13**	**39.28**	**38.52**	**37.84**	**37.22**	**36.66**
	500	**43.27**	**42.18**	**41.23**	**40.38**	**39.62**	**38.94**	**38.32**	**37.76**
	1000	**44.37**	**43.28**	**42.33**	**41.48**	**40.72**	**40.04**	**39.42**	**38.86**
	1500	45.47	**44.38**	**43.43**	**42.58**	**41.82**	**41.14**	**40.52**	**39.96**
	2000	46.57	45.48	**44.53**	**43.68**	**42.92**	**42.24**	**41.62**	**41.06**
	2500	47.67	46.58	45.63	**44.78**	**44.02**	**43.34**	**42.72**	**42.16**
	3000	48.77	47.68	46.73	45.88	45.12	**44.44**	**43.82**	**43.26**

由上表可见可听噪声随极间距离的增大逐渐减小，为降低可听噪音，可采取加大极间距离、提高导线平均高度等措施。

交流的 55dB（A）是指在小雨、潮湿导线情况下，年出现概率值为 5％的可听噪声值，若换算到好天气 50％概率的可听噪声值要减去 7～10dB（A）。因此建议±1100kV 特高压直流线路可听噪声限值（好天气 50％概率的可听噪声值）参照交流线路可听噪声限值选取，即为 45～50dB（A）。换算到年出现概率值为 5％的可听噪声值为 51～56dB（A）（$L_5=L_{50}+6$），低于交流线路。因此，推荐±1100kV 特高压直流输电线路的电晕可听噪声限值为 45～50 dB（A）。

对人口稠密地区，要满足 45dB（A）的可听噪声限值要求。对于海拔高度大于 1000m 且人烟稀少的高海拔地区，其噪声限值要满足 50dB（A）的要求，同时民房所在处要满足 45dB（A）的要求。

导线选择还应符合环境保护部门提出的限值及计量标准要求。

5.0.4　与《架空输电线路电气设计规程》DL/T 5582 一致，同时做如下说明。

直流输电线路电晕、地面合成场强和离子流密度会随天气条件的变化而变化，本条文规定地面合成场强和离子流密度限值对应的天气条件为晴天。条文中的“晴天”指无雨、无雪、无风、无雾、空气质量良好的好天气。直流输电线路电磁环境试验结果表明，湿度对地面合成电场和离子流密度影响很大，空中颗粒物对地面合成电场影响也非常明显。

在空气清洁条件下，直流线路湿导线时的合成电场比干导线时的大，在确定导线对地最小高度时，需对湿导线下的地面最大合成场强和离子流密度进行校核。将雨天合成场强控制在居民区不超过 30kV/m，一般非居民区不超过 36kV/m；将雨天离子流密度控制在居民区不超过 100 nA/m^2，一般非居民区不超过 150 nA/m^2。同时民房所在地面未畸变合成场强应不超过 15kV/m（对应于湿导线），

以满足测量时民房所在地面的合成电场 80%值不超过 15kV/m 的要求。

以海拔 1000 米，导线最低点对地距离 25m、极间距 24m 为例，计算得到下列导线方案的和合成场强及离子流密度值。

表 4 合成场强及离子流密度计算结果

导线结构(n×mm)	晴天合成场强 (kV/m)	雨天合成场强 (kV/m)	晴天离子流密度 (nA/m^2)	雨天离子流密度 (nA/m^2)
6×42.1	30.9	**37.3**	73	93.30
6×45.3	29.9	**36.7**	69.6	91.30
6×47.4	29.3	**36.4**	67.6	90.30
7×47.4	26.4	34.7	56.8	85.10
8×33.8	30.1	**36.99**	69.5	91.60
8×36.2	28.9	**36.3**	64.8	89.20
8×38.4	27.7	35.6	60.9	87.20
8×40.6	26.6	34.9	57.4	85.40
8×42.1	25.4	34.5	53.3	84.20
8×47.4	23.5	33.4	45.5	80.00
10×30.0	28.4	**36.2**	62.4	88.30
10×33.8	25.9	34.9	54.1	84.60
10×36.2	24.2	34.2	47.9	81.90
10×38.4	22.8	33.5	41.9	79.60

注：带下横杠粗字体为超标数据。

从上表可以看出，上述导线方案中，合成场强一般为雨天控制。6 分裂导线方案不满足要求；8 分裂导线方案中，8×33.8mm、8×36.2mm 不满足要求；10 分裂导线方案中，10×30.0mm 不满足要求。其它导线方案均满足要求。

5.0.5　大跨越段在输电线路中只占较小的一部分，导线引起的发热损耗（电阻损耗），对整个输电线路损耗所占比例很小，导线选择主要考虑要有较高的机械强度以及对杆塔、基础的各种荷载（水平荷载、垂直荷载、断线张力）较小，因此，导线截面选择不是按经济电流密度，而是按允许载流量选择。

但此时应注意电网的总体配合，对导线制造的各处接点均需要特殊考虑，交叉跨越距离亦应按

导线实际能够达到的温度计算最大弧垂。

5.0.6　控制导线允许载流量的主要依据是导线的最高允许温度，后者主要由导线经长期运行后的强度损失和联接金具的发热而定，目前国家电网有限公司在±800kV 直流工程标准化设计中采用长期过负荷电流取 1.1 倍的额定电流，2 小时过负荷电流取 1.2 倍的额定电流，30 分钟过负荷电流取 1.3 倍的额定电流。同时由于温度提高，导线弧垂增加，对地及交叉跨越空气间隙距离减少，将影响线路对地及交叉跨越的安全裕度。

1）以往设计按经济电流密度选择导线截面，并以最高气温弧垂来校验对地和交叉跨越的安全间距。鉴于导线达到允许温度的时间在全年运行中所占比重很小，一般不要求对允许温度弧垂校验安全距离。对于特定的交叉跨越如 200m 以上档距跨越铁路、高速或一级公路，和按允许温度选择导线截面的大跨越或跨越电线等，规程规定按允许温度弧垂校验交叉跨越间距。

2）对于按发热条件选择导线截面的线路，由于常常处于其允许传输容量的运行状态，要按提高后的允许温度的弧垂来校验规定要求的安全距离。

5.0.7　本条规定了导、地线设计的最小安全系数。

5.0.10　导、地线的防振在特高压线路设计中是一项重要的内容，特高压线路由于档距较大，导、地线悬挂点较高，在地形平坦，面粗糙度小的地区，高空层流风较稳定，输入给导、地线的能量增大，扩大了引起导线振动的风速的范围，增大了导、地线振动的相对时间，且微风振动幅度比较大，容易引起导、地线材料的疲劳，导致导、地线断股断线事故的发生。因此，防止或减小特高压线路导、地线的微风振动、次振距振荡及舞动造成的危害就成为线路设计的一个重要问题。

中国电力科学研究院《准东－华东±1100kV 特高压直流工程导线微风振动、舞动及次档距振荡防治技术研究》研究结论，八分裂 1250mm² 导线和 240mm² 地线的防振锤安装数量见表 5 和表 6。

表 5　八分裂 1250㎜² 导线防振锤安装数量

防振锤个数	0	1	2	3
档距（m）	＜700	700－900	900－1200	≥1200

表 6　240㎜² 地线防振锤安装数量

防振锤个数	1 个	2 个	3 个	4 个	5 个
档距（m）	＜300	300～600	600～900	900～1200	≥1200

对于次档距振荡，分裂导线装设阻尼式间隔棒，并合理调整次档距距离，优化布置阻尼间隔棒，以加强对次档距振荡的防护。间隔棒的型式要结合防舞动措施一并考虑，以防止子导线鞭击、吸合，次档距分裂导线翻转、金具磨损，间隔棒疲劳等故障发生。《准东－华东±1100kV 特高压直流工程导线微风振动、舞动及次档距振荡防治技术研究》研究结论如下：

1）8 分裂 1250mm² 导线分裂间距取 550mm；

2）10mm 和 15mm 冰区，一般地区档距小于 1000m 时，最大次档距取 70m，平均次档距取 64m,；档距大于 1000m 时最大次档距取 66m，平均次档距取 60m。20mm 冰区，最大次档距取 62m，平均次档距取 55m。

3）在次档距振荡易发地区采用缩小导线平均次档距方案进行防护，JL1/G3A-1250/70 导线的最大次档距取 60m，平均次档距取 50m。JL1/G2A-1250/100 导线的最大次档距取 65m，平均次档距取 55m。

5.0.11　对未张拉过的导、地线受力后除产生弹性伸长和塑性伸长外，还随着受力的累积效应产生蠕变伸长。塑性伸长及蠕变伸长均为永久变形（以下简称塑性伸长）。为考虑塑性伸长对弧垂的影响，线路理想的施工工艺是按塑性伸长曲线（蠕变曲线）架设导、地线。如导线制造厂家不能提供塑性伸长曲线，又无相关塑性伸长资料，可参考目前我国特高压直流线路常用的大截面导线降温值，如表7所示。

表 7　大截面绞线降温值

绞线型号	降温值（℃）
JL1/G3A-1250/70-76/7	30
JL1/G2A-1250/100-84/19	30
JLHA1/G2A-1250/100	30
JLHA4/G2A-1250/100	30
JL1/G3A-1000/45	30
JL1/G2A-1000/80	30
JL1/G3A-900/40	25
JL1/G2A-900/75	25

上海中天铝线有限公司导线试验数据，JL/G3A-900/40钢芯铝绞线25%RTS的降温值为27.25 ℃，JL/G3A-900/75钢芯铝绞线25%RTS的降温值为27.55℃，JL/G2A-1000/80钢芯铝绞线降温值为27.22℃，JL/G3A-1000/45钢芯铝绞线降温值为27.68℃，JL/G3A-1250/70钢芯铝绞线降温值为26.93℃，JL/G2A-1250/100钢芯铝绞线降温值为26.86℃。

6 绝缘子和金具

6.1 我国自 20 世纪 80 年代末开始批量使用复合绝缘子，荷载设计安全系数大都为 3.0，至今运行情况良好，虽出现极个别串脆断，多属产品质量问题。故复合绝缘子最大使用荷载设计安全系数取 3.0 较为合适。20 世纪 90 年代开始使用瓷棒绝缘子，根据德国运行经验最大使用荷载设计安全系数取 3.0，运行情况良好。

以前的线路设计规程对瓷质盘型绝缘子有校验常年荷载安全系数的要求，是针对当时瓷绝缘子质量不稳定，发生事故较多而提出的，目前国产瓷绝缘子产品质量不断提高，在有条件择优选购的情况下，在限制常年荷载的问题上瓷质绝缘子和玻璃绝缘子可以等同看待；电力规划设计总院以电规总送（2002）73 号文，对华东电力设计院《关于盘型绝缘子常年荷载安全系数的复函》，已明确在择优采购的情况下，瓷和玻璃绝缘子在限制常年荷载问题上可以等同看待，其常年安全系数一般输电线路工程按不低于 4.0 考虑。常年荷载状态下安全系数不仅对绝缘子有影响，对金属件也有影响，电力行业标准要求所有绝缘子均通过微风振动的试验，因此常年荷载安全系数取 4.0 适用所有绝缘子。

6.3 根据我国特高压直流输电线路工程设计和运行经验，导线悬垂串在轻中冰区建议采用复合绝缘子，重冰区建议采用盘型绝缘子；耐张串建议采用盘型绝缘子。

6.5 本条为强制性条文，规定了金具强度的安全系数。

6.6 绝缘子串及金具防止发生电晕的措施可采用均压环、屏蔽环及金具自身防晕等办法。防电晕的目的主要是控制无线电干扰，对于减少电能损耗及防止金具腐蚀也有作用。

一般认为绝缘子的无线电干扰是一恒定电流源产生，因此可取与试品串联的检测电阻的两端电压来进行度量，所测得的电压称为无线电干扰电压（RIV），单位通常用 dB 表示，且取 1μV 为 0dB，一般每相绝缘子串干扰电压上限为 55dB。测量方法可按现行国家标准《电力金具试验方法第 2 部分：电晕和无线电干扰试验》GB2317.2 或参考美国全国电气制造商协会（NEMA）法、国际无线电干扰特别委员会（CISPR）法。

当金具用于海拔高于 1000m 地区时，位于低海拔地区的试验室要将试验电压乘以海拔修正系数k_H：

$$U_H = k_H \times U_0 \quad (1)$$

$$k_H = \frac{1}{1.1-0.1\times H} \quad (2)$$

式中：H——海拔高度（km）。

例如线路最高海拔为 2500m，因此对应的±1100kV 线路悬垂线夹起晕电压不小于 $1122 \times \frac{1}{1.1-0.1\times 2.5} = 1320kV$。

6.7 直流线路地线一般是直接接地的。如果直流线路在接地极附近通过，当直流系统以大地返回方式运行（特别是大电流运行）时，由于大地电位升高，直流地电流可能通过杆塔和地线从一个杆塔

流进，从另一个杆塔流出，从而导致杆塔和基础被腐蚀。

此外，如果直流（交流）线路与接地极很近，当直流系统以大地返回方式运行（特别是大电流运行）时，地电流可能通过杆塔和地线返回到换流站（变电站）接地网，再通过接地网、中性点接地的变压器流入到交流系统中，从而导致变压器磁饱和。缓解或消除接地极地电流对杆塔的腐蚀影响和对换流站（变电站）变压器磁饱和影响的方法比较简单，只要将靠近接地极的线路地线进行绝缘即可解决问题，离 5km 以外的地线是否绝缘要经过模拟计算确定。

6.8 绝缘子串与横担连接的第一个金具受力较复杂，国内早期运行经验已经证明这一金具不宜采用可锻铸铁制造的产品。1988 年发生在 500kV 大房线上的球头断裂事故证明：第一个金具不够灵活，不但本身易受磨损，还将引起相邻的其他金具受到损坏。因此在选择第一个金具时，要从强度、材料、型式三方面考虑。国外对此金具也有特殊考虑的事例，加拿大 BC 省水电局是采取提高一个强度等级的措施；日本则通过疲劳，磨损等试验对各种金具型式进行选择；意大利设计了一种两个方向的回转轴心基本上在同一个平面上的金具，使得两个方向转动都较灵活。因此，对联塔第一个金具的选择，除了要求结构上灵活外，同时要求强度上提高一个等级。

6.9 在线路设计中，为了缩小走廊宽度，减少悬垂串的风偏摇摆，V 型串的使用日趋广泛，根据试验和设计研究成果，330kV 以上输电线路悬垂 V 串两肢间夹角的一半，可比最大风偏角小 5°~10°，或通过试验确定。目前，发生了多起 V 型串大风情况下球、碗头脱落事故，因此，要采取控制球、碗头加工尺寸或新型金具方案。

6.10 为防止 V 型复合绝缘子端部连接金具（例如球头挂环、碗头挂环）脱落，宜采用延长环型式的复合绝缘子串连接方式等防脱落设计，以保证顺线路方向转动灵活。

6.11 在路径选择时要尽量避开易发生舞动地区，无法避让时，要采取提高线路的机械强度，并预留安装抑舞装置的措施。在 2 级和 3 级舞动区、重覆冰区，导线悬垂线夹应采用预绞式或加装预绞丝护线条，减小线夹对导线的磨损。

6.12 根据 2008 年初我国南方地区覆冰灾害情况的教训，为防止或减少重要线路冰闪事故的发生，需采取增加绝缘子串长和采用 V 型串、八字串等措施。

6.13 线路经过大风盛行区域，由于环境、气候的因素，连接金具容易出现不同程度的磨损，尤其是承重转动轴、环环连接的部位，磨损更为严重，因此大风区金具应采用耐磨材料，同时应从材料硬度、增大接触面等方面采取措施，以提高金具的寿命，保证金具的安全可靠性。

根据昌吉—古泉±1100kV 特高压直流输电线路设计和运行经验，在低温区、持续强风区，金具材料可采用耐低温性能和耐磨性能较好的 35CrMo。同时该工程在新疆持续强风区段发生调距线夹磨损引流线情况，经分析，常规调距线夹存在调节自由度不够、导线易松脱等缺点，后优化采用螺杆连接销钉紧固铰链式调距线夹。

6.14 采用刚性跳线可减小跳线弧垂及其风偏偏移值，有利于缩小耐张塔塔头尺寸，降低综合费用。

7　绝缘配合、防雷和接地

7.0.1　作为绝缘配合的基本原则，±1100kV 直流线路瓷或玻璃绝缘子串以及直流棒形悬式复合绝缘子，都应能耐受额定工作电压、操作过电压和雷电过电压。

7.0.2 覆冰绝缘子的耐压值一般应根据试验确定。中国电科院的试验结果表明，直流线路 V 串覆冰耐压值比 I 串高 40%，重冰区特高压直流线路 V 串和耐张串绝缘子长度由污秽闪络电压控制。

7.0.3 污耐压法是根据试验得到绝缘子在不同污秽程度下的污秽耐受电压，使选定的绝缘子串的污秽耐受电压大于该线路的最大工作电压。该方法和实际绝缘子的污耐受能力直接联系在一起，是一种较好的绝缘子串长的确定方法，但人工污秽试验结果同自然污秽条件下的污耐受电压值存在等价性问题。

前苏联、美国、美国、日本、武汉高压研究所和中国电力科学研究院主要是以 $U_{50\%}$进行污秽外绝缘设计。$U_{50\%}$以长串绝缘子试验来确定。

对于±1100kV 直流输电路，原则上要用此法。选择适合的试验室和试验方法，求出预选型号绝缘子的污闪电压数据。日本 NGK 公司在直流线路的设计中对 CA-735EZ(Φ320×H170)的污耐压值进行多次试验。从下表可看出，其数据也存在较大分散性。

表 8　单片 CA-735EZ 绝缘子的污耐压值（kV）

等值盐密（mg/m²）	Esdd（mg/cm²）				备　注
	0.03	0.05	0.08	0.15	
污耐压值	17.8	15.2	13.2	10.7	1988 年 NGK 提供葛南线设计用
	15.01	12.72	10.86	9.08	2000 年 NGK 提供龙政线设计用
	13.5	11.9	9.8	7.9	1986 年日本在 CIGRE 会上介绍

注：1　所有数据灰密为 0.1mg/cm²；

2　葛南数据为 Tonoko 土，按 4 次耐压法得出；

3　龙政数据为 Kaolin 土，按上下法求出 V50％。

表 7 反映了 NGK 自身数据的变化，我国的±500kV 线路工程除葛南线外都采用 NGK 提供的数据。表 9 为美国电科院的试验数据。

表9　单片CA-735EZ绝缘子的50%污闪电压（kV）

等值盐密（mg/m²）	Esdd（mg/cm²）				备　注
	0.03	0.05	0.08	0.15	
污耐压值	14.3	11.7	10.1	8.7	1983 年系列试验报告
	15.4	12.0	10.0	8.6	1986 年 CIGRE 会上报告

	17.7	15.0	12.8	10.7	1988 年美日联合试验

考虑到污秽导致放电的关键是污秽物溶于水造成的导电性，而不溶于水的成分起的作用是在潮湿气候条件下吸收水分，以保持污层潮湿促进导电性能的增长。因此，在等值盐密相同的情况下，绝缘子的污闪特性还受灰密的影响。目前国外普遍采用美国EPRI提出的修正方法，即绝缘子的人工污耐受电压与灰密的-0.15次方成比例的降低。日本NGK根据新的试验数据，提出绝缘子50%闪络电压U50%与灰密（NSDD）的-0.12次方成比例的降低。中国电科院直流污秽试验结果表明，灰密对绝缘子直流污闪特性的影响不仅与灰密有关，也与等值盐密（ESDD）有关，即可按下式表示：

$$K1=0.98(NSDD)^{-n} \quad (3)$$

式中n与等值盐密的关系可表示为：

$$n=0.25(ESDD)^{0.15} \quad (4)$$

自然污秽绝缘子每片上下表面、同一表面的不同部位及同一串绝缘子各片之间污秽量分布不一样，有时上、下表面积污量相差2～10倍，其污闪电压较均匀积污提高10～20％左右。在建设宁东～山东±660kV线路时，中国电科院对北方气候条件下绝缘子积污均匀性及对绝缘子上下表面积污比的修正进行了大量研究工作，对于北方气候条件下，由于雨量较少，绝缘子上表面污秽物得不到充分洗涤，其上下表面积污均匀性相差不大，在绝缘子选择时的修正与南方气候条件存在差异，即绝缘子污闪电压的提高值较南方气候条件下小，绝缘子片数应增加。绝缘子选择时，按南、北方气候条件进行考虑，参照电科院总结数据，通用直流绝缘子伞裙上下表面的积污比可采用表10结果。

表10　直流通用绝缘子上下表面积污比

等值盐密（mg/m²）	0.03	0.05	0.08	0.10	0.15
积污比（北方）	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1
积污比（南方）	1:5	1:6	1:8	1:10	1:10

根据工程实践，南方、北方可按年降雨量 800mm 进行分界。

根据美国电科院（EPRI）有关试验得出初步增大系数 Y＝1－0.38Lg（T/B），其中（T/B）为上下表面积污比。

中国电科院试验研究表明，通用型绝缘子上下表面积污不均匀修正系数K2不仅决定于上下表面盐密比，而且还受等值盐密的影响，可表示为：

$$K2=1-m\lg(T/B) \quad (5)$$

式中m＝0.2（等值盐密ESDD≤0.1mg/cm²）；m＝0.3（等值盐密ESDD≥0.1mg/cm²）。

根据哈郑线路对北方气候下绝缘子上下表面积污不均匀性对污闪电压的影响研究，由于北方气候条件下雨天天气少、雨量小，对绝缘子表面的清洗不够完全，因此对于北方气候条件不进行此项

修正。

在±500kV 三沪线设计中，各设计院统一了污耐压计算方法，采用此方法对±1100kV 线路计算，过程如表 11 所示。

表 11　按绝缘子下表面盐密选择片数

污秽等级	轻污区	中污区	重污区
盐密（mg/m²）	0.05	0.08	0.15
绝缘子上下表面积污比	1:5	1:8	1:10
灰密 H1（mg/cm²）	0.30	0.48	0.90
线路最高运行电压（kV）	1122		
要求耐受电压 V_{50}（kV）	1122/（1－3×0.07）＝1420		
NGK 提供 V'_{50}（kV） （灰密 H2＝0.1 mg/cm²）	15.0	12.8	10.7
灰密修正系数 K1＝（H1/H2）$^{-0.12}$	0.876	0.828	0.768
灰密校正后 $V''_{50}=V'_{50}\times K1$（kV）	13.14	10.6	8.22
上下表面积污比校核系数 $K_2=1-0.38Lg(T/B)$	1.266	1.343	1.38
积污比校正后 $V'''_{50}=K_2\times V''_{50}$（kV）	16.64	14.24	11.34
要求绝缘片数	86	100	126

按中国电科院推荐的计算参数，污耐压法计算±1100kV 线路北方、南方地区绝缘配置如表 12 所示。

表12 ±1100kV按污耐压法绝缘配置推荐片数

污秽等级		北方			南方		
		轻污区	中污区	重污区	轻污区	中污区	重污区
密(mg/m²)		0.05	0.08	0.15	0.05	0.08	0.15
有效盐密(mg/m²)		0.05	0.08	0.10	0.05	0.08	0.12
绝缘子上下表面积污比		1	1	1	0.20	0.13	0.10
灰密 H1(mg/cm²)		0.30	0.48	0.63	0.30	0.48	0.63
线路最高运行电压 Um(kV)		1122					
要求耐受电压 U50% (kV)		1122/（1－3×0.07）＝1420					
$U_{50\%}$(kV) (灰密 H2＝0.1mg/cm²)	CA-756EZ (195mm/300kN)	11.27	9.34	8.38	11.27	9.34	8.38

灰密修正系数 K1=0.98(NSDD)$^{-n}$，n＝0.25(ESDD)$^{0.15}$		1.23	1.23	1.16	1.13	1.23	1.16
灰密校正后 $U'_{50\%}=U_{50\%}\times K1$(kV)	CA-756EZ (195mm/300kN)	13.87	10.82	9.72	13.87	10.82	8.66
上下表面积污比校核系数 K2＝1-mLg(T/B)		1.00	1.00	1.00	1.00	1.14	1.18
积污比校正后 U''50%＝K2×U'50% (kV)	CA-756EZ (195mm/300kN)	13.87	10.82	9.72	15.81	12.77	11.26
要求绝缘片数 N=Um/ U''50%	CA-756EZ (195mm/300kN)	102	131	146	90	111	126
	CA-765EZ (205mm/400kN)	97	125	139	85	106	120
	CA-785EZ (240mm/530kN)	83	107	119	73	90	102

中国电科院在±1100kV吉泉线中提出的绝缘子片数及按±800kV水平外推、NGK污耐压法绝缘子片数比较见表13。

表 13　电科院、按±800kV 水平外推、NGK 污耐压法绝缘子片数比较

区　域	型　号	直　流 盐　密（mg/m^2）	电科院	按±800kV 水平外推	NGK污耐压法
北　方	CA-785EZ	轻0.05	86	83	83
		中0.08	103	102	107
		重0.15	122	122	119
南　方	CA-785EZ	轻0.05	/	78	73
		中0.08	92	93	90
		重0.15	102	102	102

注：计算结果为海拔 500m 时绝缘子片数。

从上表可以看出，三种计算方法得到的结果差别不大，基本处于同一绝缘水平。

Ⅴ型串污耐压较单Ⅰ串高，主要原因在以下几个方面：

1　Ⅴ型串的电弧较单Ⅰ串易飘移，绝缘子串表面不易形成线状放电，与单Ⅰ串紧贴绝缘子串的电弧短接形式不同；

2　是Ⅴ型串特殊的布置方式改善了绝缘子串的对地电容，使容性电流对绝缘子串的影响减小，提高了其污闪电压；

3　在合理的污秽设计下，V 型串的积污特性要优于悬垂串，仅为悬垂串的 85%甚至更低。基于年度盐密下±1100kV 绝缘子片数推荐见表 14。

表 14 基于年度盐密下±1100kV 绝缘子片数

区　域	型　号	直　流 盐　密（mg/m²）	500m	1000m	1500m	2000m	2500m	3000m
北　方	CA-785EZ	轻0.05	83	86	89	92	95	98
		中0.08	102	105	109	113	117	121
		重0.15	119	123	127	131	135	139
南　方	CA-785EZ	轻0.05	73	76	79	82	85	88
		中0.08	90	93	96	99	102	105
		重0.15	102	105	109	113	117	121

7.0.4　根据±500kV 直流线路上过电压研究，其操作过电压水平在 1.5p.u.～1.8 p.u.，最大操作过电压发生在线路中间。目前国内±800kV 直流线路操作过电压水平计算结果在 1.6p.u.～1.8 p.u.。根据电科院过电压水平研究成果，±1100kV 直流线路操作过电压水平计算结果在 1.5p.u.～1.58 p.u.。表 15 为±1100kV 吉泉线沿线路操作过电压水平。

表 15 吉泉线在健全极产生的过电压分布（接地电阻 5. 7Ω）

线路全长 (%)	过电压 (p.u)	线路全长 (%)	过电压 (p.u)	线路全长 (%)	过电压 (p.u)	线路全长 (%)	过电压 (p.u)
0.0	1.23	31.90	1.46	58.58	1.51	93.72	1.32
3.43	1.29	34.22	1.44	62.51	1.47	95.21	1.31
6.81	1.32	36.54	1.47	65.12	1.44	100.0	1.22
8.52	1.33	40.49	1.52	68.83	1.39	-	-

11.81	1.36	42.10	1.53	70.75	1.39	-	-
15.04	1.38	45.28	1.54	74.73	1.38	-	-
20.49	1.44	47.64	1.54	77.31	1.38	-	-
23.12	1.44	50.00	1.58	78.65	1.38	-	-
25.28	1.46	51.88	1.52	82.60	1.33	-	-
27.44	1.45	53.53	1.53	86.65	1.30	-	-
29.67	1.45	55.97	1.52	90.82	1.32	-	-

需指出的是，操作过电压水平往往会控制塔头尺寸，应结合换流站内滤波设备参数抑制线路工程操作过电压水平，同时也可在线路上安装无间隙式线路避雷器进行抑制。±1100kV 吉泉线在线路全长（自昌吉换流站起算）40.5%、45.3%、50%和 56%处分别安装无间隙式线路避雷器，将线路缓波前过压由 1.57p.u.限制至 1.5p.u.，沿线缓波前过电压水平降低 7%~14%，塔头操作间隙由 10m 减小为 8.1m。

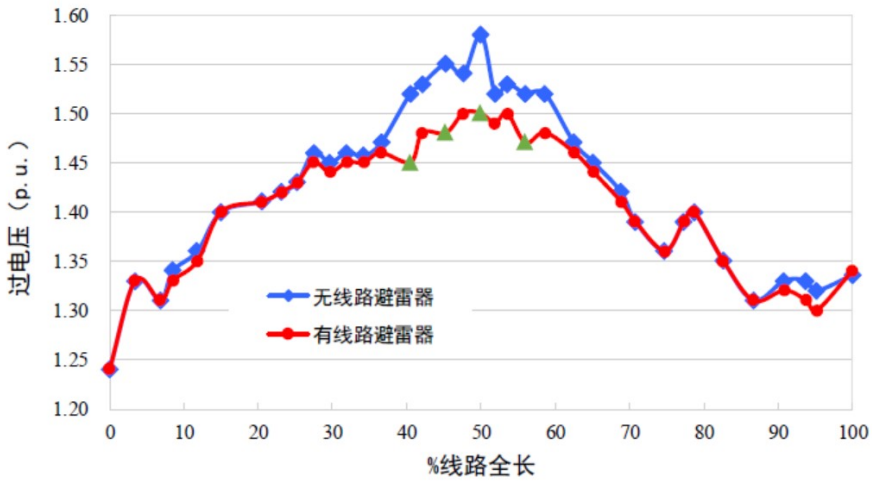

图 1 吉泉线线路缓波前过电压抑制效果

由于绝缘子表面脏污时沿面放电过程是其表面干燥带的形成及局部电弧的发展过程。对污秽条件下绝缘子纯操作冲击强度存在不同看法，一种看法为污秽物使绝缘子操作冲击耐受强度降低，另一种看法认为，在中等程度污秽条件下，绝缘子的操作冲击耐受强度，将高于清洁湿耐受值，即使在重污秽下也仅很少下降或不下降，但均认为污秽绝缘子的操作冲击闪络电压都随污秽程度的增加而降低。根据美国 EPRI 试验验证，在同一污秽条件下，同型号的绝缘子的直流操作耐压为直流耐压

的 2.2～2.3 倍。又根据大量试验研究证明，当预加直流电压时，其 50％操作冲击电压是 50％污闪运行电压的 1.7～2.3 倍。因此，操作过电压对绝缘子片数的选择不起控制作用。由于污秽原因，直流线路的绝缘子片数（串长）较交流 1000kV 线路还多（长），其在雷电冲击电压下的绝缘裕度较大，反击雷电流超过 200kA，雷电过电压对绝缘子片数的选择不起控制作用。

条文中的数据是根据中国电科院在溪洛渡-浙西±800kV 特高压直流线路工程中给出的钟罩瓷绝缘子 XZP-210 和 CA-756EZ 在直流盐密 0.05mg/cm^2 下的 V 型串片数基础上外推到±1100kV 线路绝缘水平。

耐张绝缘子串受力比悬垂绝缘子串大，容易产生零值绝缘子，一般要求在悬垂串片数基础上增加绝缘子片数。但±1100kV 线路直线杆塔悬垂绝缘子串的绝缘子片数选择主要取决于工作电压，且按工作电压选择的绝缘子串的操作冲击 50%放电电压远大于系统操作过电压，所以耐张串绝缘子片数可不再增加。

北方地区直流特高压线路工程的绝缘子片数应根据当地的污秽特征和气候条件，并结合当地已运行的经验综合确定。

现行国家标准《110kV～750kV 架空输电线路设计规范》GB50545-2010 规定，为保持高杆塔的耐雷性能，全高超过 40m 有地线的杆塔，高度每增高 10m，绝缘子应增加 1 片。由于±1100kV 线路按工作电压确定的绝缘子串长具有较高的耐雷电冲击绝缘水平，不再增加片数已能保证较高的耐雷水平和较低的雷击跳闸率水平。

7.0.5　由于线路按工频电压（工作电压）确定的绝缘子串长具有较高的耐雷电冲击绝缘水平，计算表明，一般不再增加片数已能保证较高的耐雷水平和较低的雷击跳闸率水平。但是，大跨越杆塔很高，需要根据具体工程情况通过计算确定在雷电过电压下所要求的实际绝缘子片数。随着杆塔高度的增加，大跨越杆塔反击耐雷水平呈下降趋势，宜适当增加杆塔的绝缘水平。由于高杆塔而增加绝缘子片数时，雷电过电压间隙也相应增大。

7.0.6　在雨量充沛地区，耐张绝缘子串由于水平放置容易受雨水冲洗，因此其自洁性较悬垂绝缘子串要好，110 kV ~500kV、±500 kV、±800 kV 运行经验表明，耐张绝缘子串很少污闪。因此在同一污区内，其爬电距离可较悬垂串减少。

7.0.7　国内外污闪试验结果（包括 STRI 试验）证实：同等污秽，即便在亲水性状态下，复合绝缘子污闪电压比瓷和玻璃绝缘子高 50％以上，因此，同样运行电压下，复合绝缘子爬距仅需要瓷和玻璃绝缘子爬距的 2/3 即可；按照目前±500kV 超高压直流输电线路绝缘配置，复合绝缘子爬距定为瓷绝缘子爬距的 3/4 以上已经有相当裕度。

准东—华东±1100kV 特高压直流线路进行了复合绝缘子长度的优化研究。考虑到实际线路运行中复合绝缘子完全亲水性出现的可能性不大，因此按照弱憎水性的污染特性推荐复合绝缘子长度，并考虑到绝缘配置裕度，准东-华东±1100kV 特高压直流线路采用的复合绝缘子长度见下表。

表 16　不同海拔高度复合绝缘子推荐长度取值

钟罩绝缘子直流盐密（mg/cm²）	0m	500m	1000m	1500m	2000m	2500m	3000m
0.05	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	13.9	13.9
0.08	12.3	12.3	12.3	13.9	13.9	15.4	15.4
0.15	13.9	13.9	13.9	15.4	15.4	16.6	16.6

注：1 标准数字已包含两端金具长度（按照 0.54m 计算）；

2 复合绝缘子 CF 系数=爬距/干弧距离。本报告试验用复合绝缘子 CF 系数为 3.8。具体可在制造生产时根据相关标准在合理范围内选取。直流绝缘子暂无标准可参考，根据 IEC60815-3 和 GB/T26218.3，CF 系数在不同交流污区可从 3.5-4.4 之间选取。

7.0.8 也可采用目前正在报批的国家标准《高压输变电工程外绝缘放电电压海拔校正方法》中对污秽外绝缘的海拔校正方法。

随海拔升高，气压降低，染污绝缘子的闪络电压会降低，通过海拔校正系数，可以将低海拔条件下（0m，标准参考大气压力 P0）的绝缘子污闪放电电压换算到高海拔条件下（大气压力 P）的电压值；然后按照污秽外绝缘选择方法，选取高海拔地区输变电工程的绝缘配置（绝缘子串长或绝缘距离）。

高海拔地区污秽绝缘子的闪络电压，宜按式（6）或其简化式（7）进行修正。

$$U = U_0(\frac{P}{P_0})^n \quad (6)$$

$$U = (1 - k_1 H)U_0 \quad (7)$$

式中：

U —— 低气压 P 下的污闪电压，单位为千伏（kV）；

U0 —— 常压 P0 下污闪电压，单位为千伏（kV）；

n —— 下降指数，它反映气压对于污闪电压的影响程度；

H —— 海拔高度，单位为千米（km）；

k_1 —— 下降斜率，表示海拔每升高 1 千米，污闪电压下降的幅度。

特高压直流工程设计中，标准型绝缘子 k1 取 0.059，外伞型绝缘子取 0.039。

7.0.9 风偏后导线对杆塔构件的空气间隙，应分别满足工作电压、操作过电压及雷电过电压的要求。

1 工作电压空气间隙

根据中国电力科学研究院试验结果，分裂导线对塔身间隙在直流正极性电压作用下的放电特性见图 2。将试验结果与棒-板间隙和棒-棒间隙的试验结果进行比较的结果表明，在正极性直流电压下，放电电压与间隙距离呈线性关系，并且与棒-棒、棒-板的试验结果很接近。在负极性直流电压下，电极形状对放电电压有一定的影响，分裂导线对塔身间隙的放电特性更接近棒-板的情况。可见直流电压要求的空气间隙距离远小于冲击电压要求的间隙距离，在杆塔间隙距离的设计中可不予考虑。

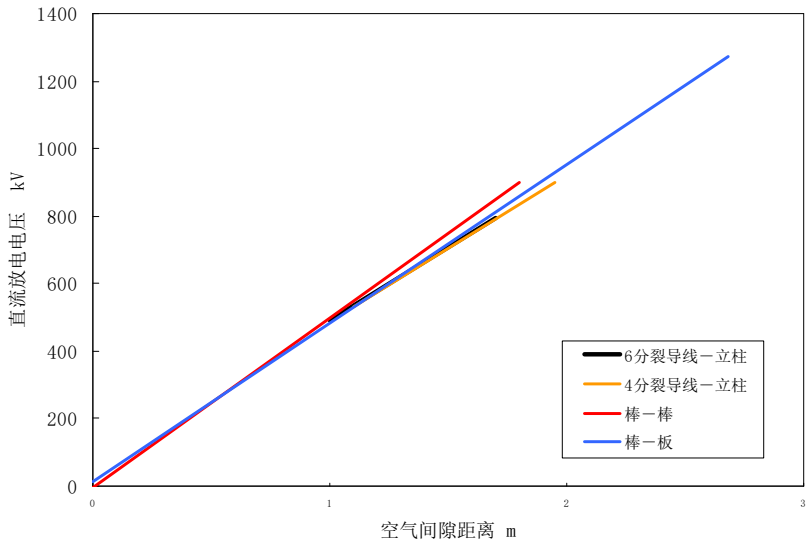

图 2　分裂导线对塔身间隙的正极性直流放电特性

参照电力行业标准 DL/T 5497《高压直流架空输电线路设计技术规程》中的公式，导线对杆塔空气间隙的直流 50% 放电电压应符合式 8 的要求。

$$U_{50\%N}=\frac{K_2K_3}{(1-3\sigma_N)K_1}U_e \qquad (8)$$

式中：U_e——额定运行电压（kV）；

K_1，K_2——直流电压下间隙放电电压的空气密度、湿度校正系数；

K_3——安全系数，1.15，如绝缘子串为 V 型串取 1.25；

σ_N——空气间隙直流放电电压的变异系数，0.9 %。

2　操作过电压空气间隙

直流线路的操作过电压，其产生机理及出现的频度，与交流系统有一定的不同，主要波形为直流分量之上叠加一冲击波。当然交流操作波形更复杂，虽千差万别，IEC 的统一试验标准操作波为 250/2500us。目前尚无直流操作波形的规定，试验也不多。国际上多引用瑞典试验数据，尽管很不完善。它的试验波形为 120/4000us，叠加在直流分量之上。对于棒板间隙，直流分量的叠加影响甚大，其闪络电压可提高 10%，少量的试验数据表明，对于导线～塔身间隙，直流分量的叠加影响甚微，参见图 3。

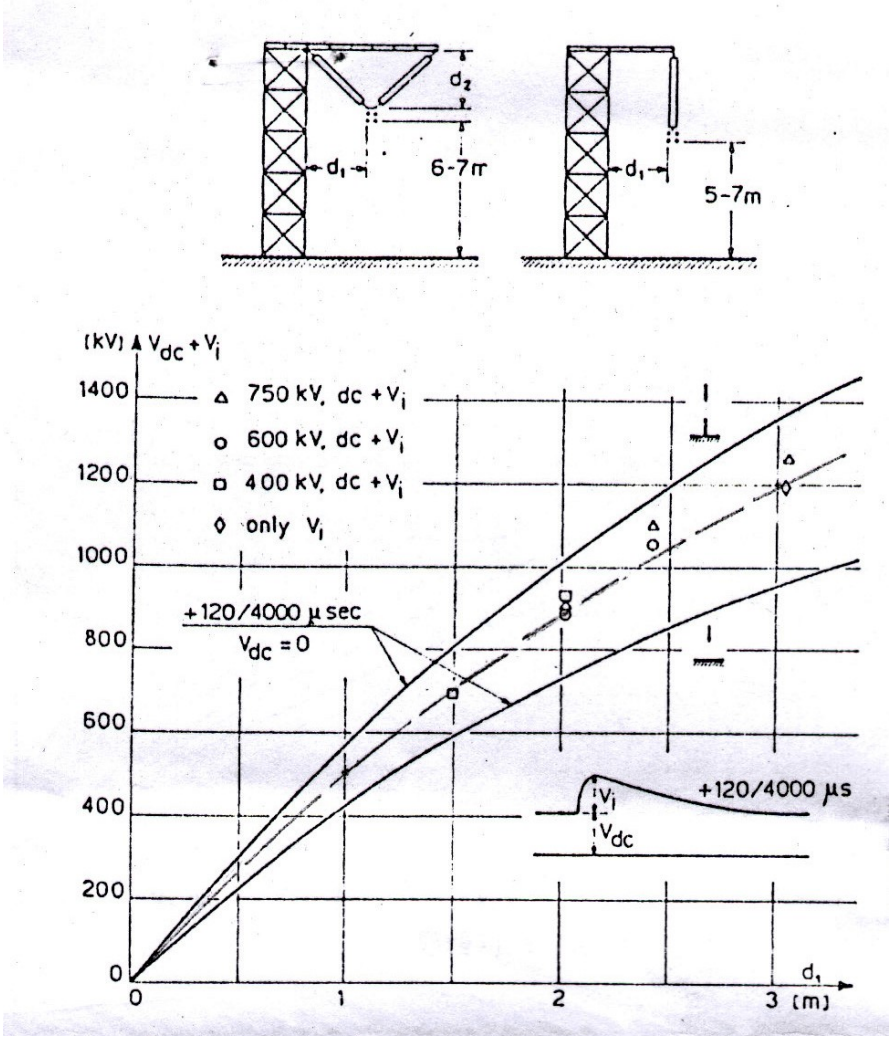

图 3　瑞典导线－塔身间隔放电特性

图 2 上部曲线为棒～棒间隙，下部曲线为棒～板间隙，中间部分为直流电压叠加操作冲击电压试验数据，拟和曲线为美国 BPA 后期采用，与交流操作波间隙因数 K＝1.28 非常接近。

美国高压部门一直未作直流操作波空气间隙放电试验，早期的太平洋联络线是按照等效交流放电特性决定的，±400kV 直流线路指 1.7 倍过电压，30°风偏，间隙取 2.35m。

中国电科院在±800kV 直流 V 型绝缘子串杆塔塔头空气间隙操作冲击放电特性试验中，通过对 V 形串塔头空气间隙进行的正极性 50%操作冲击放电特性试验，获得了直流线路杆塔 V 形串空气间隙距离与正极性 50%操作冲击放电电压的特性曲线，如图 4 所示。

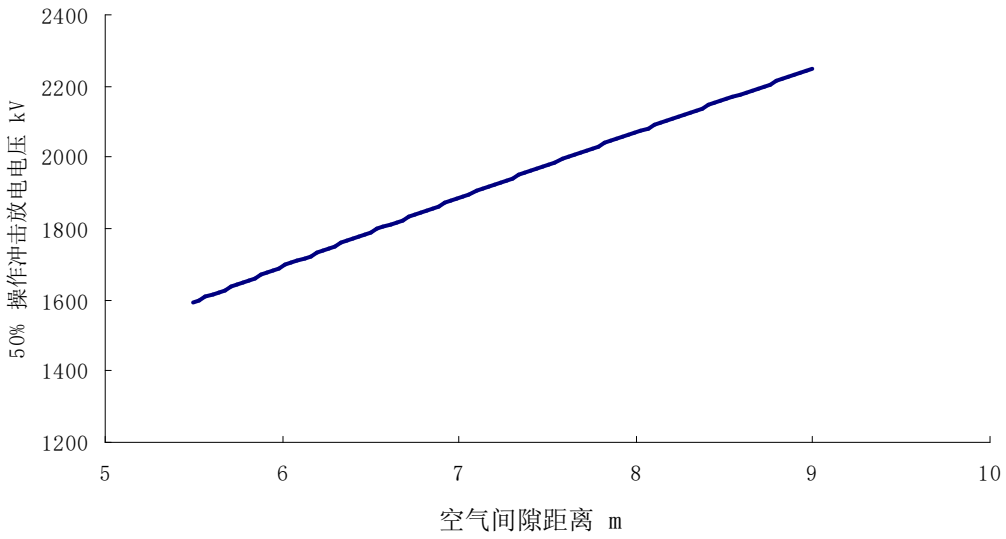

图 4　±800kV 直流线路杆塔空气间隙操作冲击放电特性

作为对比，图 5 给出了电科院 80 年代开展的±500kV 直流线路塔头空气间隙的 50%正操作冲击放电电压试验的特性曲线。

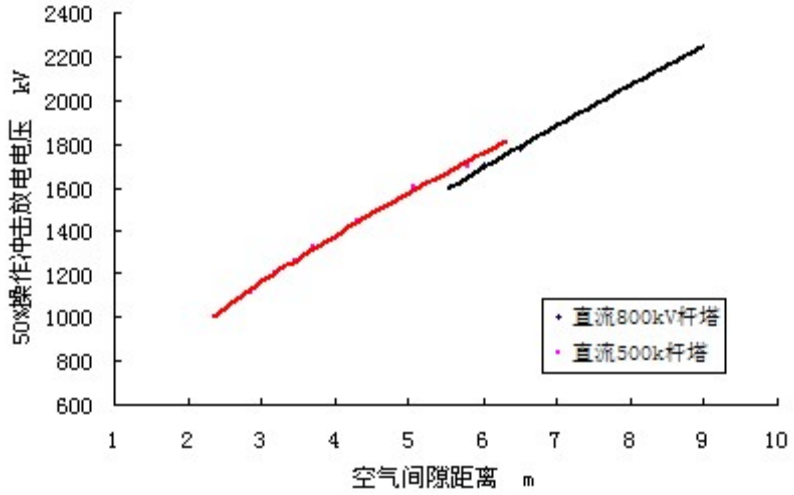

图 5　空气间隙操作冲击放电特性比较

近年来，针对±800kV 特高压直流输电线路，中国电科院在北京（海拔 55m）、宝鸡（海拔 900m）和青海硝湾（海拔 2200m）的进行了大量 V 串塔头空气间隙的 50%操作冲击放电特性试验，结果见图 6。

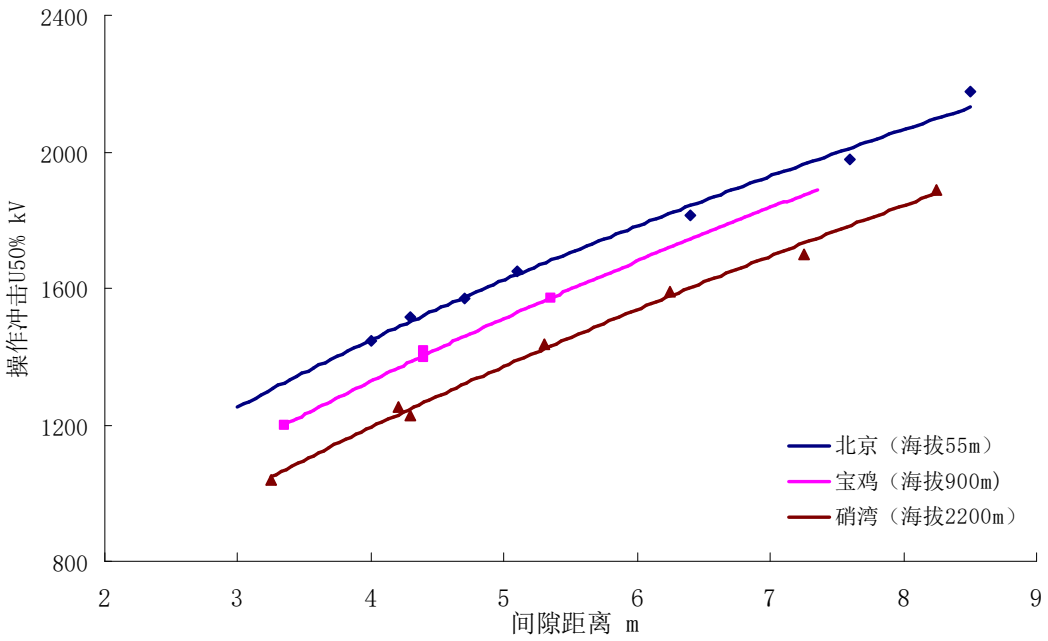

图 6　±800kV 塔头空气间隙试验结果

中国电力科学研究院根据北京、宝鸡和青海硝湾的最新试验结果，采用插值法，得到 0m、500m、1000m、1500m 和 2000m 的 50%操作冲击放电特性曲线见图 7。

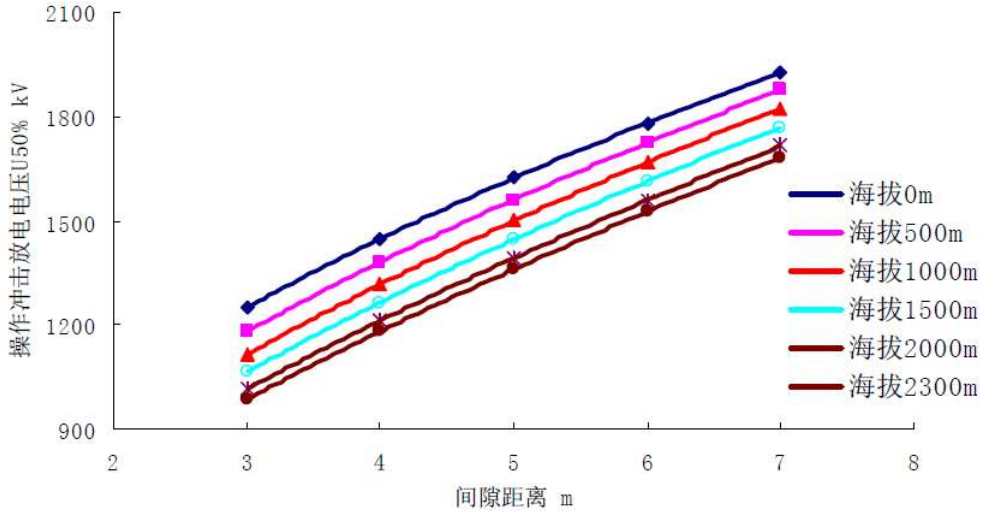

图 7　±800kV 不同海拔高度空气间隙放电特性试验曲线

中国电科院根据±1100kV真型尺寸模拟杆塔分别在55m和4300m海拔下进行了杆塔间隙的冲击放电试验，获得了相应的操作冲击和雷电冲击放电特性曲线。

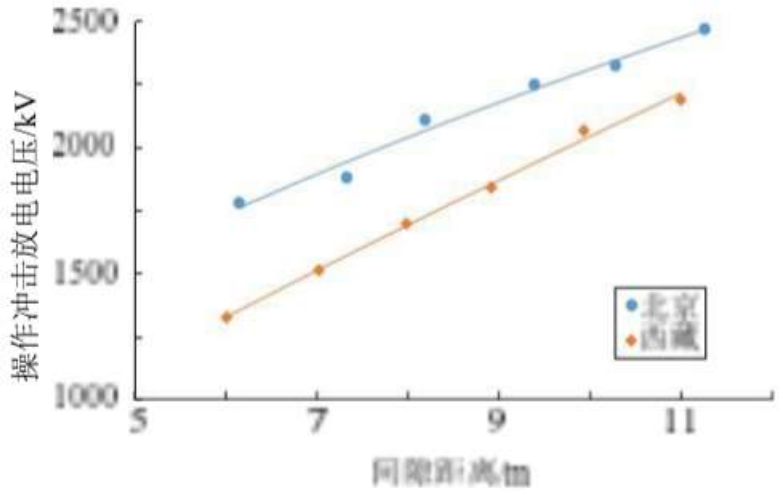

图 8　±1100kV 直流塔空气间隙操作冲击放电曲线

±1100kV八分裂导线杆塔标准操作冲击下的空气间隙放电电压曲线见图9。

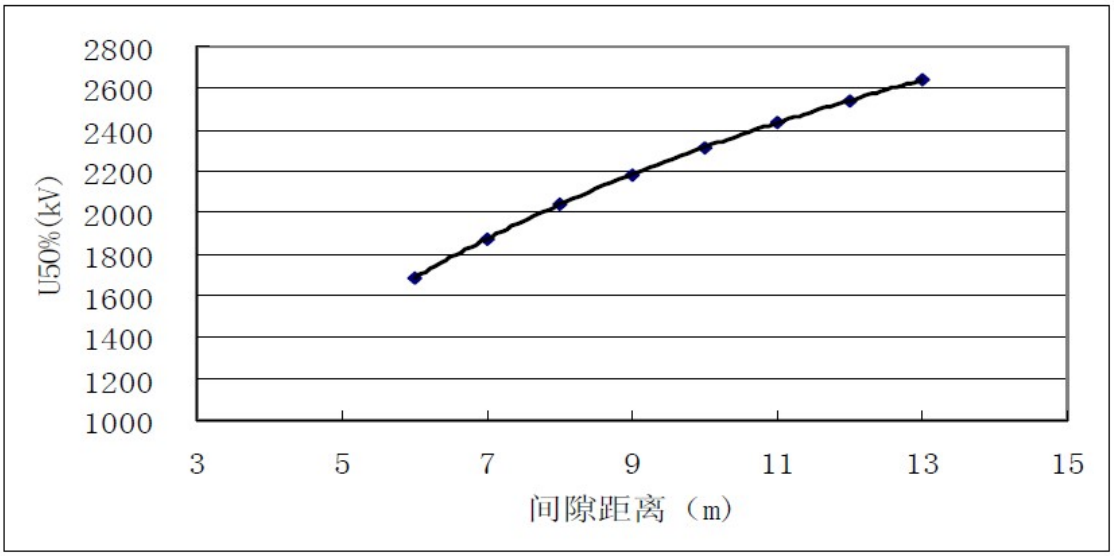

图 9 ±1100kV 8 分裂导线杆塔标准操作冲击下的空气间隙放电电压曲线

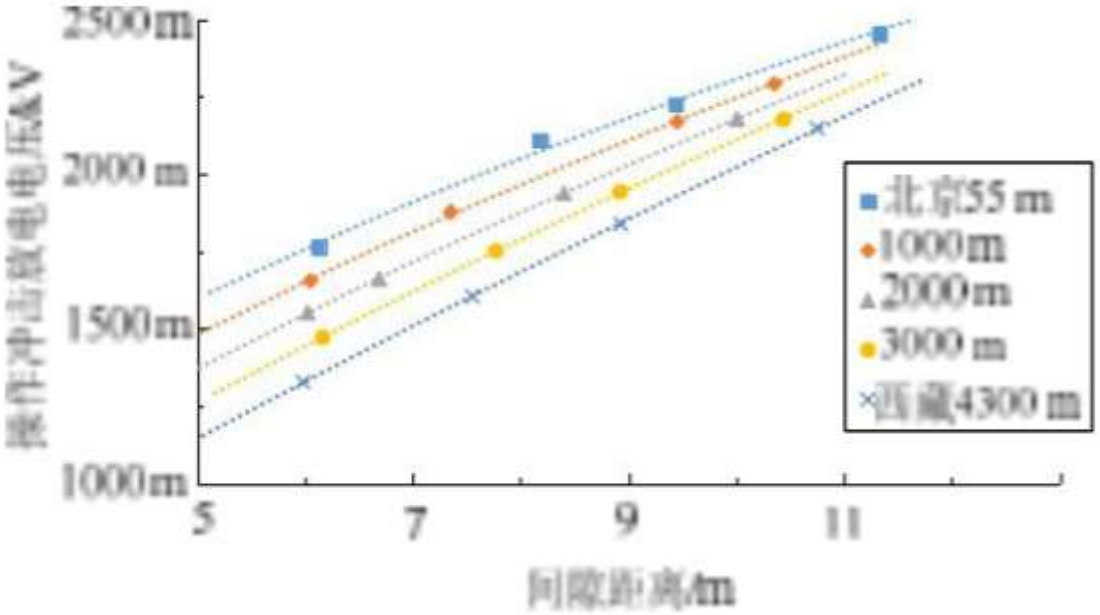

图 10　±1100kV 不同海拔高度空气间隙放电特性试验曲线

参照电力行业标准 DL/T436－2005《高压直流架空送电线路技术导则》的公式，直流杆塔空气间隙的正极性 50% 操作冲击放电电压应符合式 9 的要求。

$$U_{50\%s}=\frac{K'_2K'_3}{(1-2\sigma s)K'_1}U_m \qquad (9)$$

式中：U_m——系统最高电压（kV）；

K'_1，K'_2——操作冲击电压下间隙放电电压的空气密度、湿度校正系数；

K'_3——操作过电压倍数；

σ_s——空气间隙在操作电压下放电电压的变异系数。根据 DL/T 436-2005，操作冲击对σs 取 5％，另外大电网会议于 2002 年出版的“HVDC CONVERTER STATIONS FOR VOLTAGES ABOVE＋/－600kV”报告中对于操作的σ_s取 6%。本规范推荐取 6%。

根据图 8 曲线，得到 1.50p.u 下在 0m 海拔下所需要的操作间隙为 7.5m。

3　雷电过电压要求的空气间隙

在雷电过电压情况下，其空气间隙的正极性雷电冲击放电电压应与绝缘子串的 50%雷电冲击放电电压相匹配。不必按绝缘子串的 50%雷电冲击放电电压的 100%确定间隙，只需按绝缘子串的 50%雷电冲击放电电压的 80%确定间隙（间隙按 0 级污秽要求的绝缘长度配合）或雷电过电压间隙不予规定。即按下式进行配合。

$$U'_{50\%}=80\%U_{50\%} \qquad (10)$$

式中：$U_{50\%}$——绝缘子串的 50%雷电冲击放电电压（kV）。其数值可根据绝缘子串的雷电冲击试验获得或由绝缘长度求得。

对于直流线路，我国电力科学研究院曾在 500kV 塔头上进行了直流叠加雷电冲击波的绝缘子串

闪络试验，其复合闪络电压（Vi＋Vdc）见表 17。

表 17　绝缘子串的雷电波闪络电压（kV）

闪络电压 / 绝缘子片数 / 直流电压（kV）	（Vi＋Vdi）		
	10	20	30
Vdc＝0	961.4	1910.2	2881.1
Vdc＝170	969.7	1900.4	——
Vdc＝330	932.6	1921.7	2852.9
Vdc＝500	——	1902.0	2823.7

从表 15 可知，复合闪络电压与单独雷电冲击基本一致。因此，可以用单独施加雷电波时（如交流线路）的试验数据来进行防雷计算。目前导则中没有提出直流线路的雷电过电压的间隙要求。

由于直流线路串长大于交流线路，如按交流配合比选择大气过电压下的间隙值则明显偏大，而按操作过电压间隙值进行防雷计算，比较合理。

对于高压直流线路而言，绕击是主要的雷击情况。直流换流阀在直流线路遭受电击时，换流阀很快动作，由换流状态转换为逆变状态，对线路进行抽能和去空气游离电子作用，然后重新启动，时间极短，全过程不超过 100ms，基本不影响线路连续运行。塔头间隙设计时目前一般暂不考虑雷电过电压影响。

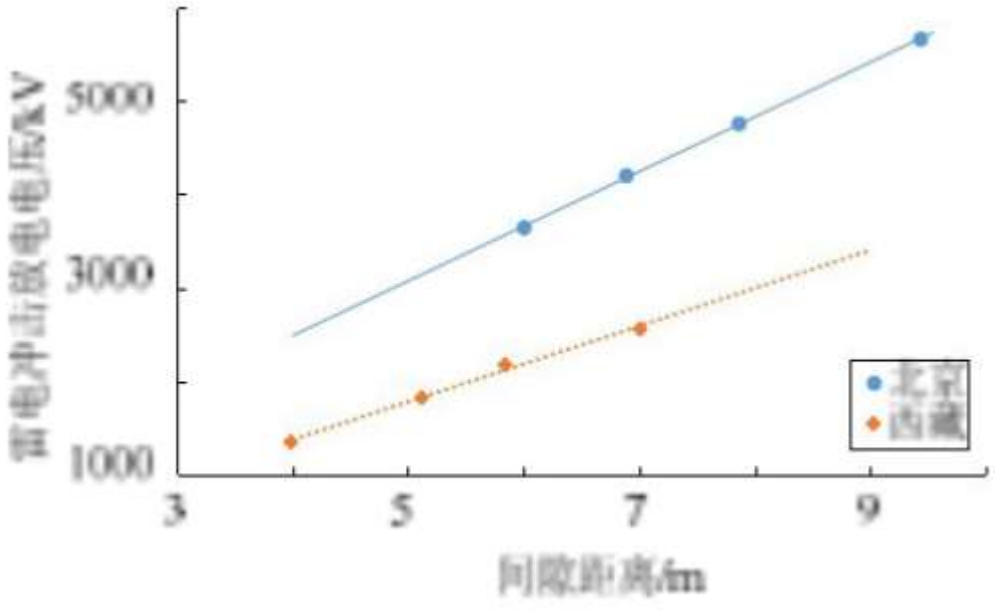

图 11　±1100kV 直流塔空气间隙雷电冲击放电曲线

4　前苏联的研究表明，导线距横担、导线距塔身的距离不同空气间隙的电气特性也不同，放电电压与对应导线位置的塔身宽（B）之间，可由下式确定：

$$U'_{50\%}(B) = U_{50\%}(1).(1.03 - 0.03B) \qquad (11)$$

式中：$U_{50\%}$(1)——塔身宽 B=1m 时的放电电压，B=0.02～5m。

根据电科院所做复合绝缘子试验情况，在两支复合绝缘子串联使用时，两复合绝缘子间的联结金具上发生跳弧现象，因此复合绝缘子是否可以串联使用要进一步试验，在工程设计中宜采用单支复合绝缘子。电科院采用不同绝缘子串型式的±800kV 直线塔空气间隙冲击 50％击穿电压试验结果见表 18。

表18　±800kV直线塔空气间隙冲击50％击穿电压试验结果

绝缘子串型式	复合绝缘子		瓷绝缘子		
每联绝缘子（支（片）数）	两支串联	一支	50 片	60 片	64
操作冲击电压（kV）	1638	1776	1740	1950	2091

由表 33 可以看出，由两支串联复合绝缘子组成的“V” 型绝缘子串，由于受中间均压环的影响，导线对铁塔 50％操作冲击耐受电压最低，其次为玻璃绝缘子及整支复合绝缘子组成的“V” 型绝缘子串。经折算，在操作冲击电压下，由两支串联复合绝缘子及玻璃绝缘子组成的“V” 型绝缘子串所需的空气间隙，分别比由整支复合绝缘子组成的“V”型绝缘子串多 0.2 m～0.8m。对于工作电压，由于其放电间隙距离相对于绝缘子串长要小很多，因此，在工作电压下，由两支串联复合绝缘子组成的“V” 型绝缘子串，电气间隙距离仅做适当调整。

根据电科院试验研究，准东－华东±1100kV 特高压直流线路的带电部分与杆塔构件的最小间隙值具体见表 19。

表 19　带电部分与杆塔构件的最小间隙（m）

标称电压（kV）		±1100				
海拔（m）		1000	1500	2000	2500	3000
工作电压		3.2	3.5	3.7	4.0	4.2
操作过电压	1.5p.u.	8.1	8.4	8.7	9.0	9.2
	1.58p.u.	8.9	9.2	9.5	9.7	9.9
雷电过电压		/				

对于带电作业要求的空气间隙，在《带电作业工具基本技术要求及设计导则》标准中，规定可以接受的危险率水平为 1.0×10^{-5}。

检修人员停留在线路上进行带电作业时，系统不可能发生合闸空载线路操作，并应退出重合闸。而单极接地分闸过电压是确定带电作业安全距离时必须考虑的过电压。

以往超高压输电线路设计时，对需要带电作业的杆塔，应考虑带电作业所需的安全空气间隙距离。由于带电作业的方式是灵活多样的，根据多年的设计及运行经验，在一般情况下不会也不宜因

考虑带电作业而增大塔头尺寸。不过，在设计中应尽可能从塔头结构及构件布置上为带电作业创造方便条件。

7.0.13　随着线路额定电压的提高，线路绝缘水平不断提高，雷电反击跳闸的概率愈来愈小，我国雷电定向定位仪记录的数据表明，我国 500kV 以上电压等级的交流线路和±500kV 以上电压等级的直流线路雷击跳闸的主要原因均为绕击跳闸。

前苏联特高压线路的运行经验也表明，雷击跳闸是 1000kV 线路跳闸的主要原因。在 1985 年至 1994 年十年期间，特高压线路雷击跳闸高达 16 次，占其总跳闸次数的 84%，而雷击跳闸的原因是雷绕击导线。经分析，前苏联特高压线路的地线保护角过大是(大于 20°)造成了雷电绕击率过高的主要原因。日本特高压线路和其 500kV 线路一样，均采用负的地线保护角，雷电绕击率较低。

我国±800kV 直流线路均采用负的地线保护角，实际运行经验表明雷电绕击率极低。

国网电科院对锡盟－泰州±800kV 特高压直流输电工程雷电闪络率计算，约为 0.1 次/100km·a。

国网电科院对准东－华东±1100kV 特高压直流输电工程雷电闪络率计算，当地线保护角平丘-2°，山区-15°时与我国±800kV 直流线雷击闪络率水平相当，约为 0.088 次/100km·a。

国网电科院根据准东－华东±1100kV 特高压直流输电工程塔型尺寸和间隙，计算±1100kV 反击耐雷水平如表 20。

表 20　±1100kV 直流线路反击雷电性能的计算

工频接地电阻（Ω）	反击耐雷水平（kA）	反击闪络率（次/100km·a）
30	181	0.167
25	192	0.125
20	213	0.072
15	241	0.035
10	279	0.013

注：年平均雷暴日数（T_d）取 40。

从表中可以看出，±1100kV 直流线路反击耐雷水平明显高于交流 500kV 线路杆塔接地电阻在 10～15Ω范围时的反击耐雷水平 177～125kA，也高于±800kV 直流线路杆塔接地电阻在 10～15Ω范围时的反击耐雷水平 136～249kA。

7.0.15　线路经过腐蚀地区，为提供接地的使用寿命，减少运行维护工作量，建议接地体选用耐腐蚀材料。

8　导线布置

8.0.1 直流线路的极间距离对塔头尺寸、杆塔重量、对地距离、无线电干扰、可听噪声、地面合成电场强度、离子流密度有巨大的影响，进而影响着工程造价、走廊宽度、环保水平等，因此，选择合适的极间距离具有重大的经济效益和社会效益。极间距离确定需研究电磁环境、对地高度、塔重、走廊宽度、空气间隙、绝缘子串长和 V 串夹角对其的影响，找出多因素控制下的最小极间距离。

±1100kV 吉泉线在极间距的优化工作中，得出如下结论：

（1）直线塔极间距离。

在不同海拔高度下，各控制因素要求的极间距离见表 21。

表 21　　各控制因素要求的最小极间距离（m）

海拔	空气间隙控制		中污区绝缘子串长控制			重污区绝缘子串长控制		
	过电压 1.5p.u.	过电压 1.58p.u.	V 串夹角 75°	V 串夹角 85°	V 串夹角 105°	V 串夹角 75°	V 串夹角 85°	V 串夹角 105°
1000	24.0	25.6	21.4	23.2	26.4	23.4	25.4	29.0
2000	25.2	26.8	23.4	25.4	29.0	25.2	27.4	31.3
3000	26.2	27.6	25.2	27.4	31.3	26.7	29.1	33.2

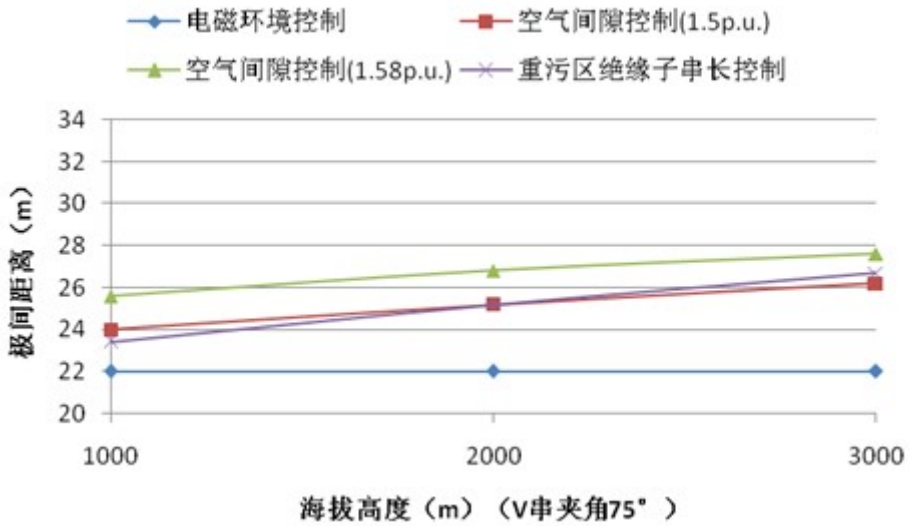

图 12 不同海拔下的最小极间距离(V 串夹角 75°）

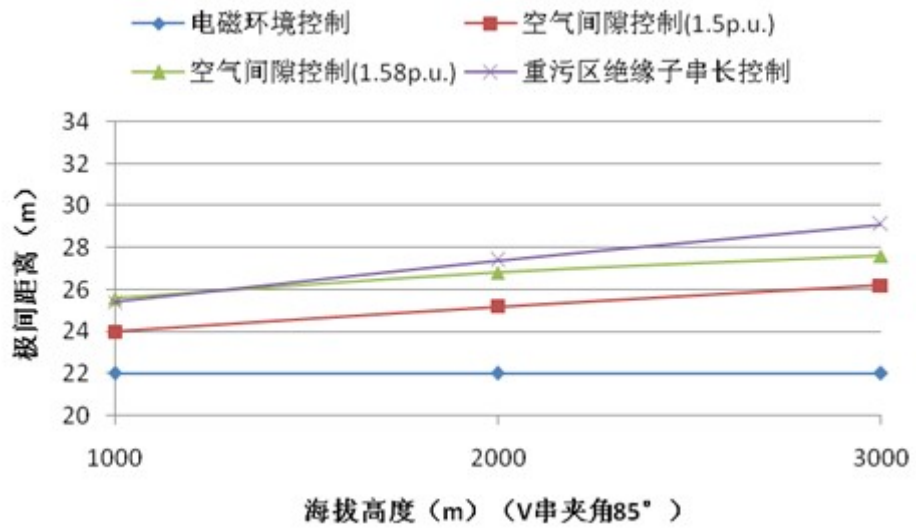

图 13 不同海拔下的最小极间距离(V 串夹角 85°）

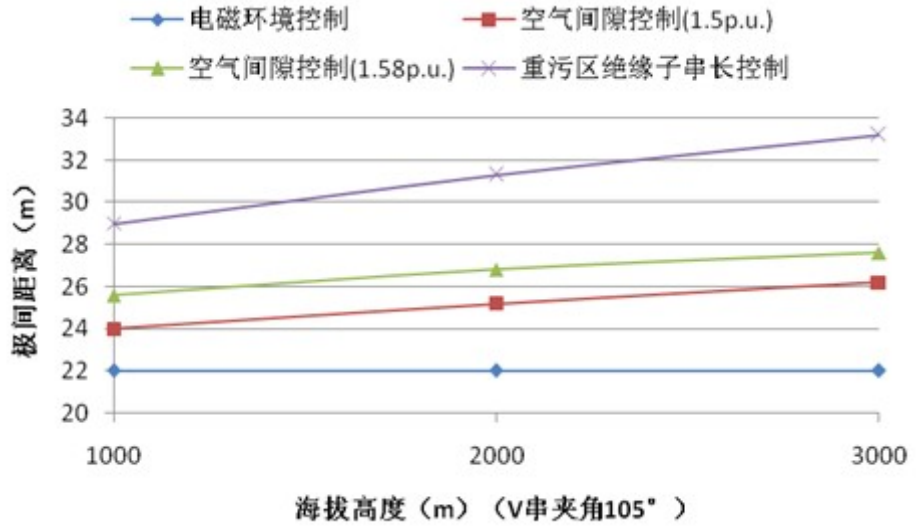

图 14 不同海拔下的最小极间距离(V 串夹角 105°）

从以上图表可以看出，对于±1100kV 电压等级，绝缘子串长、V 串夹角和空气间隙均起控制作用，而在以往±800kV 特高压线路工程中，极间距基本由绝缘子串长控制，空气间隙不控制。

表 22 给出轻、中冰区直线塔最小极间距离。

表 22　　轻、中冰区直线塔最小极间距离

海拔高度（m）		1000	2000	3000
极间距（m）	1.50p.u.	24	26	27
	1.58p.u.	26	27	28

注：此表针对 27m/s 风速，直线塔绝缘子串 V 串夹角 75°条件。当风速大于 27m/s、V 串夹角增大时，极间距离要根据表 20 适当增大。此表计算过程中塔身宽度取 4.2m。

（2）耐张塔极间距离。按照海拔 1000m 及以下可听噪声限值 45dB（A）、海拔 1000m 以上可

听噪声限值 50dB（A）控制的耐张塔最小极间距离均为 22m。

（3）当极间距离增大时，电晕损耗减小，极间距离每增大 1m，单位长度年平均电晕损失约减小 3%，相应的损失费用也减小约 3%。

（4）极间距离越大，对地距离越高，走廊宽度越宽。

（5）极间距每增加 1m，塔重平均增加 2%；呼高每增加 1m，塔重平均增加 1%。相比而言，极间距离对塔重影响更大，在减轻塔重方面，压缩极间距离比降低呼高的效果更明显。

（6）极间距增大时，塔重增加，相应初投资增加，而电晕损耗减小，相应的年费用也减小。通过经济性分析可知，塔重初投资的年费用大于电晕损耗的年费用，减小极间距离以减轻塔重的方式更经济。

（7）F 型塔的极间距离由空气间隙和 V 串等效串长控制，最小极间距离在 28.3m-28.7m 之间（横担高度取 4m）。

8.0.2　导地线的水平偏移主要取决于导线和地线覆冰不均匀以及覆冰脱落时的跳跃或舞动情况下导地线间的工作间隙，特高压线路应该按以上三种情况求得塔头上最小垂直距离和水平偏移的最佳组合。按导地线覆冰不均匀以及覆冰脱落时的跳跃或舞动情况下分别进行校验，得出结论。

校验导线间和导线与地线间在不均匀脱冰情况下危险接近时，一般取验算档的上层导线或地线的冰重为 100%设计冰重，下层导线脱冰重量可取 50～100%设计冰重。（覆冰厚度 5～10mm 时脱冰重量宜取 100%）。

跳跃接近应满足工作电压要求的最小空气间隙；静态接近应满足操作过电压要求的最小空气间隙。地线弧垂最低点不应低于导线弧垂最低点，上层导线弧垂最低点不应低于下层导线弧垂最低点。

8.0.3　《架空输电线路电气设计规程》DL/T XXXX 中对±800kV 及以上电压等级大跨越线路上、下导线间及导线与地线间的水平偏移有详细规定，可参照取值。

8.0.4　从经济性角度考虑，接地极线路与±1100kV 直流线路共塔时，应使接地极线路不控制塔高为宜，±1100kV 吉泉线在规划共塔段的塔头尺寸时，考虑在满足两回导线安全距离的同时，尽量提高接地极线路的导线挂点高度；最终，两回导线的垂直距离按±1100kV 线路跨越电力线的垂直距离（13m）来控制，耐张塔跳线对接地极线路的净空距离按操作过电压间隙控制。

9 荷　　载

9.0.1　本条依据现行国家标准《工程结构可靠度设计统一标准》GB 50153和《建筑结构荷载规范》GB 50009的规定，并结合输电线路特点，按随时间的变异性提出了荷载和作用的分类原则。值得注意的是，本条中的导、地线张力应包括由于档距或气象荷载不均匀等因素引起的纵向不平衡张力。稀有气象条件（如稀有大风和稀有覆冰等）一般在架空输电线路的运行期间出现概率较小，一旦出现则导致的荷载很大，且持续时间一般较短，因此本标准将稀有气象条件所导致的荷载归入偶然荷载。

固定设备主要包括：电梯、爬塔机、警航灯等附属设施及其电源，走道、爬梯和休息平台，以及电缆终端塔（杆）上的电缆、安装平台等附属设备。

9.0.3　各类荷载具有不同性质的变异性，但在设计中不可能直接引用反映荷载变异性的各种统计参数进行概率运算。因此，在设计时除了采用便于设计者使用的设计表达式外，还须对荷载赋予一个规定的量值，称为荷载代表值。荷载可根据不同的设计要求规定不同的代表值，以使之能够更确切地反映其在设计中的特点。

本标准给出了荷载的两种代表值：标准值和组合值。通常，架空输电线路所承受的可变荷载以风荷载、冰荷载和导、地线张力为主。风荷载的标准值可按本章的规定计算；结合架空输电线路特点，不同情况下风荷载的组合值可根据本标准第4章所规定的气象条件进行计算。对于导线、地线张力，由于其随温度、风速、覆冰厚度、档距和弧垂等的变化而变化，因此本标准不引入张力标准值的概念，而是规定应按不同情况对应的气象条件和工作状态采用不同的代表值。

《电力设施抗震设计规范》GB 50260-2013 根据《建筑工程抗震设防分类标准》GB 50223-2008规定的原则，确定了各类电力设施的抗震设防分类和抗震设防标准，本标准与之保持一致。

9.0.4　设计大风情况、设计覆冰情况、低温情况、不均匀覆冰情况、断线（含分裂导线时的纵向不平衡张力）情况和安装情况下的荷载基本组合是各类架空输电线路荷载设计的基础组合，不论线路工程处于何种气象区都必须计算。

9.0.5　当杆塔前后档的高差和档距差异较大时，会导致杆塔承受由此引起的导线、地线纵向不平衡荷载，一般在大跨越线路的荷载设计中须予以考虑。对于一般线路，可根据工程具体情况确定。设计大风情况时，如果相应的垂直档距是最小值，此时最大水平荷载和最小垂直荷载的组合对一些格构式铁塔的某些杆件可能起控制作用。

最小垂直荷载只要求在悬垂塔基本风速时考虑，悬垂塔其他情况(如事故、安装)水平荷载很小，与最小垂直荷载组合不起控制作用。

耐张塔不存在最小垂直档距问题，均不需要考虑这种工况。但是，位于山区的耐张塔可能存在前后两档垂直荷载不等或倒拔问题，对横担、顶架的局部构件选材可能起控制作用，需要进行计算。

9.0.6　当±1100kV直流架空输电线路所处气象区有覆冰条件时，还应计算不均匀覆冰的情况。对轻冰区，不均匀覆冰情况下的荷载组合应考虑纵向弯距组合情况，以提高杆塔的纵向抗弯能力；对重覆冰区，不均匀覆冰情况下的荷载组合尚应考虑水平扭距组合情况，以保证杆塔的抗扭能力。

9.0.7、9.0.8　断线情况及其荷载组合是为了确保杆塔具有一定的抵抗纵向荷载的能力而提出的。值得注意的是，对于±1100kV直流架空输电线路与接地极同塔架设的情况，其不同电压等级导线的断线张力（或分裂导线纵向不平衡张力）差异较大，若所有断线（或分裂导线存在不平衡张力）相均为高电压等级导线，则可能导致远超设防目标的、不必要的荷载增大，故设计时可不计算此类组合，此时可不考虑两极直流导线同时存在纵向不平衡张力的情况。

历年运行经验表明，自然灾害或事故导致的倒塔和断线可以引起相邻档内的杆塔发生连续串倒。为了有效控制倒塔断线影响的进一步扩大，在较长耐张段中适当布置防串倒的加强型悬垂型杆塔是一种非常有效的方法，一些国外标准中也有类似的规定。加强型悬垂型杆塔除按常规悬垂型杆塔进行荷载组合外，还应按所有导地线同时同侧有断线张力（分裂导线纵向不平衡张力）计算，以提高该塔的纵向承载能力。

9.0.9　导线、地线及其附件的提升作业在施工和维护时均可能发生，锚线作业在±1100kV 直流架空输电线路中采用。本条根据我国工程实践，列入了悬垂型杆塔设计时必须考虑的上述两种施工荷载组合，设计时一般均应进行计算，如有特殊情况应在设计文件中指明。大跨越工程的跨越段通常导、地线不允许有接头，此时跨越塔可不计算锚线工况。

当起吊导、地线时采用转向滑轮（图 15）等措施,将起吊荷载控制在导、地线重量的 1.5 倍以内是可行的。但是，按 1.5 倍起吊设计时应在设计文件中加以说明。

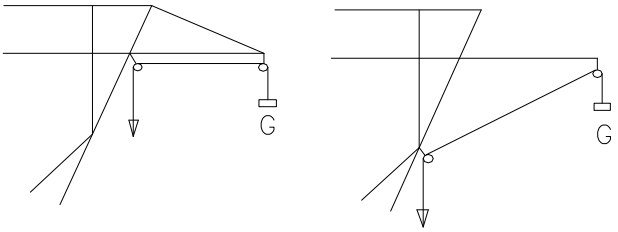

图 15　转向滑轮起吊

悬垂直线塔锚线作业的荷载计算公式如下：

正在锚：

$$G = 1.2 \times 0.8G_{k} + 1.4\psi\left(1.1L_{R} \cdot \mathrm{Sin}\,20° + G_{0}\right) \tag{12}$$

$$L = 1.1 \times 1.4\psi \cdot L_{R}\left(1 - \mathrm{Cos}\,20°\right) \tag{13}$$

$$T = 1.0 \times 1.4\psi \cdot 0.8T_{C} \tag{14}$$

已锚好：

$$G = 1.2 \times 0.8G_{k} + 1.4\psi \cdot L_{R} \cdot \mathrm{Sin}\,20° \tag{15}$$

$$L = 1.4\psi \cdot L_{R}\left(1 - \mathrm{Cos}20°\right) \tag{16}$$

$$T = 1.4\psi \cdot 0.8T_{C} \tag{17}$$

式中：G_{k} ——导、地线垂直荷载标准值（N）；

L_{R} ——导、地线张力代表值（包括施工误差、过牵引和初伸长）（N）；

T_{C} ——导、地线张力水平荷载组合值（N）；

G_{0} ——导、地线安装时的附加荷载标准值（N）；

ψ ——可变荷载调整系数，取 0.9。

附加荷载标准值是根据我国±1100kV 直流架空输电线路的设计、施工和运行经验提出的。设计时，可在确保工程安全的前提下根据工程实际情况灵活采用。

9.0.10　线路架线施工时，耐张型杆塔可能作为锚线塔(尽头塔)，也可能作为紧线塔(操作塔)(图16)。因此，铁塔强度和变形必须同时满足锚线塔和紧线塔的各种荷载组合。本条根据我国工程实践列入了耐张型杆塔设计时必须考虑的各种施工荷载组合，设计时一般均应进行计算，如有特殊情况应在设计文件中指明。

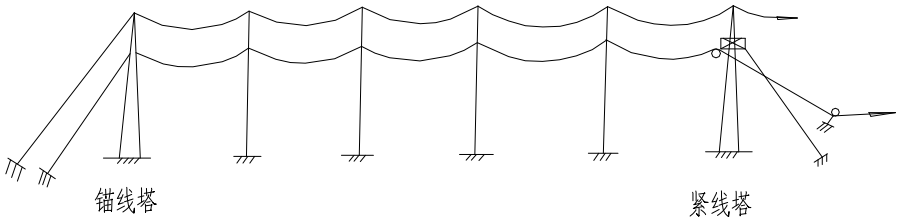

图 16　架线施工中的耐张塔

终端塔在变电所侧的导、地线可能后架设。因此，应考虑变电侧导、地线已架设和未架设两种情况的荷载组合。

耐张型杆塔的强度和变形通常须同时满足锚线塔和紧线塔的各种荷载组合，导线、地线的架设次序一般考虑自上而下、从左至右依次逐相(根)对称进行。

（1）锚线塔的荷载示意图（图 17）和计算方法如下。

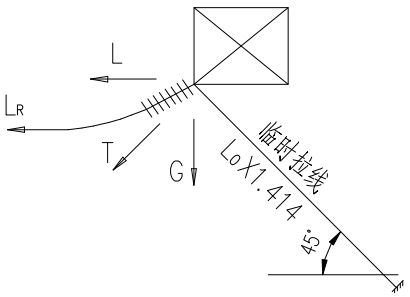

图 17　锚线塔的荷载示意图

正在操作：

$$G = 1.2 \times 0.8G_{k} + 1.4\psi \cdot L_{0} \tag{18}$$

$$L = 1.4\psi \left(1.1L_{R} - L_{0}\right)\mathrm{Cos}\,\theta \tag{19}$$

$$L = 1.4\psi \cdot \left[\left(1.1L_{R} - L_{0}\right)\mathrm{Sin}\,\theta + 0.8T_{C}\right] \tag{20}$$

操作完成：

$$G = 1.2 \times 0.8G_{k} + 1.4\psi \cdot L_{0} \tag{21}$$

$$L = 1.4\psi \left(L_{R} - L_{0}\right)\mathrm{Cos}\,\theta \tag{22}$$

$$L = 1.4\psi \cdot \left(L_{R} - L_{0}\right)\mathrm{Sin}\,\theta + 0.8T_{C} \tag{23}$$

式中：θ ——线路转角度数的一半（°）；

L_{0} ——临时拉线平衡导、地线纵向力标准值（临时拉线与导、地线方向一致）（N）；

（2）紧线塔的荷载示意图（图 18）和计算方法如下。

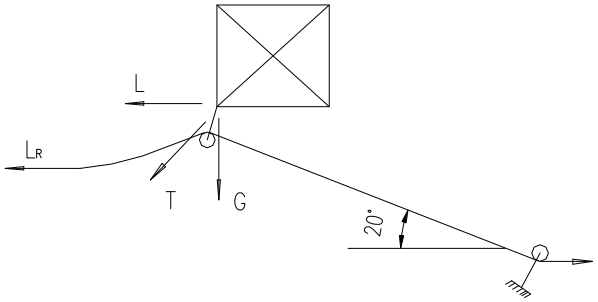

图 18　紧线塔的荷载示意图

正在操作：

$$G = 1.2 \times 0.8G_{k} + 1.4\psi \cdot (1.1L_{R} \cdot \mathrm{Sin}\,20° + G_{0}) \tag{24}$$

$$L = 1.1 \times 1.4 \cdot \psi \cdot L_{R}\left(1 - \cos 20°\right)\cos\theta \tag{25}$$

$$L = 1.4 \cdot \psi \cdot \left[1.1L_{R} \cdot \left(1 - \cos 20°\right)\sin\theta + 0.8T_{C}\right] \tag{26}$$

操作完成：同锚线塔。

（3）临时拉线平衡导、地线张力标准值是根据±1100kV 直流架空输电线路的设计、施工和运行经验提出的。大跨越线路的耐张塔可不计及临时拉线对导、地线张力的平衡作用，但应计入临时拉线产生的垂直荷载。

9.0.12　各类铁塔的水平或接近水平的杆件在任意点考虑人和工具荷重是施工和运行维时的需要，此时不与其他荷载组合。设计实践表明，这种工况一般只对细长的辅助材起控制作用。水平或接近水平的杆件是指安装工人可能站立的杆件，本标准将与水平夹角不大于 30° 的杆件视为接近水平的杆件，美国标准和一些国外工程招标书取不大于 45° 。此种工况的计算图示可按集中荷载作用的简

支梁进行，由于人重垂直于地面，计算时可用杆件的投影长度作为简支梁的计算长度。

9.0.13~9.0.15　本规范规定的断线张力（或纵向不平衡张力）和不均匀覆冰情况下的不平衡张力值已考虑了动力影响，因此，应按静态荷载计算。不均匀覆冰荷载组合，要考虑纵向弯矩组合情况，以提高杆塔的纵向抗弯能力；对中、重冰区还应考虑因不均匀覆冰或不均匀脱冰产生的扭矩对杆塔的影响。

10mm 及以下冰区导线、地线断线张力（含纵向不平衡张力）的取值应按现行行业标准《架空输电线路荷载规范》DL/T 5551-2018 执行。中、重冰区导线、地线断线张力（含纵向不平衡张力）的取值应按现行行业标准《重覆冰架空输电线路设计技术规程》DL/T 5440-2020 执行。

10mm 冰区不均匀覆冰情况下导线、地线不平衡张力的取值按现行行业标准《架空输电线路荷载规范》DL/T 5551-2018 执行。中、重冰区，不均匀覆冰情况下导线、地线不平衡张力的取值应按现行行业标准《重覆冰架空输电线路设计技术规程》DL/T 5440-2020 执行。

10 杆　　塔

10.1 基本规定

10.1.1、10.1.2　此条根据《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153-2008 确定。

10.1.3　杆塔挠度由荷载、施工和长期运行等原因产生，而从设计上只能控制由荷载引起的挠度值。计算挠度限值的确定原则是使常用的杆塔结构尺寸在荷载的长期效应组合作用下一般能满足要求。

10.1.4　本条是按我国杆塔设计经验并参照美国土木工程师学会标准 ASCE 10-97 确定的。实际工程中塔身斜材的长细比较大时，由于刚度较弱会引起自重下垂变形，故参照 ASCE 10-97 将一般受压材的最大允许长细比定为 200。

10.1.5　±1100kV 线路铁塔的横担悬臂长度较±800kV 线路大幅增加，尤其是高风速地区，悬臂长度可达 30 米以上，螺栓滑移对横担挠曲度的影响较以往工程更大，为保证铁塔长期正常使用，需要更大预拱。已建的±1100kV 昌吉-古泉线路工程一般杆塔采用了横担悬臂长度 1/70～1/80 的预拱值。本条参考以往±800kV 工程建设经验以及±1100kV 昌吉-古泉线路工程横担预拱取值，规定±1100kV 线路的铁塔横担预拱取值在常规特高压线路取横担悬臂长度 1/75～1/100 的基础上适当增加，按 1/70～1/80 取用。

10.1.6　±1100kV 架空线路采用大截面、多分裂导线，铁塔尺寸和重量均较大，施工难度大，设计时需要结合现有的施工工艺设置相应的施工用孔，并通过相应的工况组合进行承载力计算。对于需要采取特殊施工措施的杆塔，例如需封网施工的重要跨越杆塔，宜根据施工需要设置合适的辅助结构。

10.1.7　目前工程中常规采用热浸镀锌防腐工艺。大量工程实践证明，热浸镀锌工艺是铁塔钢构件防腐的有效措施。当选用其他防腐措施时，要有足够资料证明其防腐性能不低于热浸镀锌工艺方可采用。

10.1.8　铁塔的连接螺栓螺纹进入剪切面，不仅降低螺栓的承载力，而且大量螺栓进入剪切面还影响铁塔的变形。因此，设计时应使螺纹不进入剪切面。

10.1.9　运行部门如无特殊要求，一般可在地面以上 10m 高度范围内的塔腿的连接螺栓采取防卸措施。

对于受拉螺栓、法兰螺栓及位于横担、顶架等易振动部位的螺栓，宜采取双帽防松措施；其余螺栓均可采取增加一个薄螺母方式的防松措施，薄螺母应符合电力行业标准《输电线路杆塔及电力金具用热浸镀锌螺栓与螺母》DL/T 284 的有关规定。

10.1.10　输电线路舞动易造成杆塔机械损伤。舞动区杆塔应适当提高耐张塔导线挂点、横担和塔身连接处等重要部位的连接强度和平面外刚度，焊接连接设计宜考虑疲劳影响。耐张塔、紧邻耐张塔的直线塔以及重要交叉跨越段杆塔，应适当加强杆塔防松措施。

10.2 杆塔型式

10.2.1 本条给出了杆塔类型的基本概念，使得杆塔类型的定义规范化和具体化。同时，便于区分悬垂型和耐张型两类杆塔的荷载组合。对于跨越杆塔以及其他特殊杆塔，可以按绝缘子与杆塔的连接方式分别归入悬垂型或耐张型。

10.2.2 能够满足使用要求（如电气参数等）的杆塔外型或型式可能有多种，要根据线路的具体特点来选择适合的杆塔外型。同一条线路，往往由于沿线所经地区环境、条件等不同，对塔型的要求也不同。设计时应在充分优化的基础上选择最佳塔型方案。

10.2.3 杆塔型式规划除了应满足使用要求以外，还应注意使结构布置及构造方案尽量简单，安全可靠、经济合理。

10.2.4 本条规定了杆塔的使用原则：

1 在杆塔选型时不仅要对塔体本身进行技术经济比较，而且要考虑到导线排列型式和塔体尺寸（如铁塔根开）对不同地质条件的基础造价的影响，进行综合技术经济比较。通常导线水平排列比垂直排列铁塔的基础作用力要小些；塔体尺寸大（铁塔根开大），基础作用力也要小些，基础材料耗量也相应比较小一些。但是对地质条件较好的山区，减小基础作用力，效果就不显著，塔体尺寸大（根开大），可能还会引起土方开挖量增加。

2 对山区铁塔需采用长短腿配合高低基础的结构型式，尽量适应塔位地形的要求，以减小基面开挖量和水土流失，将线路对沿线环境的影响降至最低程度。

3 走廊清理费是指线路走廊的房屋拆迁和青苗赔偿等费用。工程实践证明，当走廊清理费较大时，通过对铁塔、基础和走廊清理费用进行综合经济比较，结果为当采用 V 型、Y 型和 L 型绝缘子串时，线路走廊会更窄，走廊清理费用也会更小。

4 由于换流站直流场的两极门型构架一般分开布置、间距较大，采用单极终端塔可灵活适应门型构架的布置方式和接线方式。

5 悬垂型杆塔可带 3°转角设计，是根据国内的设计和运行经验提出的。由于悬垂型杆塔带转角只是少数情况，实际定位时，有些塔位的设计档距往往不会用足。因此，设计时采用将角度荷载折算成档距，在设计使用档距中扣除，杆塔仍以设计档距荷载计算，这样做比较经济合理。如果带转角较大，用缩小档距的办法，使悬垂型杆塔带转角就比较困难，同时悬垂串的偏角较大，塔头相应要放大，而且运行方面更换绝缘子也不方便。当带转角后要导致放大塔头尺寸时，宜做技术经济比较后确定。

6 悬垂转角杆塔的允许角度是根据国内的运行经验提出的。悬垂转角杆塔的角度较大时，通常需要在导线横担向下设置小支架来调整导线挂点位置以满足电气间隙要求。

10.3 杆塔材料

10.3.2 新修订的 GB/T 1591-2018 以 Q355 牌号代替了 GB/T 1591-2008 的 Q345，电力行业标准 DL/T

5486-2020 也纳入了 Q355，但目前《钢结构设计标准》GB 50017-2017 对材料的规定并未纳入 Q355。本标准采用 DL/T 5486-2020 规定的 Q355。

对位于化工厂、腐蚀性介质储存区域、海港等特殊环境的杆塔，如有特殊防腐要求时，可采用耐候钢或其它钢材。

10.3.3　对于低温环境，《钢结构设计标准》GB 50017-2017 按结构工作温度选择钢材材质。杆塔结构位于露天环境，其工作温度难以确定，而极端最低气温则相对容易确定。为便于工程应用，本标准低温环境钢材选用原则与 DL/T 5486-2020 保持一致，将“结构工作温度”修改为“极端最低气温”，按极端最低温度选取钢材质量等级，同时基于工程实践经验，采取了相对简单、偏于安全的用钢原则。

10.3.4　对于低温环境，《钢结构设计标准》GB 50017-2017 按结构工作温度选择钢材材质。杆塔结构位于露天环境，其工作温度难以确定，而极端最低气温则相对容易确定。为便于工程应用，本标准低温环境钢材选用原则与 DL/T 5486-2020 保持一致，将“结构工作温度”修改为“极端最低气温”，按极端最低温度选取钢材质量等级，同时基于工程实践经验，采取了相对简单、偏于安全的用钢原则。

10.3.5　由于厚钢板在热轧过程中产生的缺陷，当钢板与其它构件焊接并在厚度方向承受拉力时，沿厚度方向可能会发生层状撕裂的问题，所以本规范规定厚钢板要考虑采取防止层状撕裂的措施，例如可采用 Z 向性能钢板、控制焊接应力、控制钢材的断面收缩率、控制材料杂质含量、控制焊接工艺等措施。

10.3.6　8.8 级螺栓近年来在杆塔上已应用较多，但是 10.9 级螺栓在输电塔上应用还不多，螺栓的强度越高，硬度越高、脆性越大，尤其是氢脆的可能性就越大，在满足强度要求的前提下，要特别注意螺栓的塑性性能符合现行国家标准 GB/T3098 系列的要求。

10. 4　计算表达式

10.4.1　承载力极限状态设计表达式是根据现行国家标准 GB 50068 规定的有关原则确定的。

现行国家标准 GB 50068 规定建筑结构设计时，要根据结构破坏可能产生的后果（危及人的生命、造成经济损失、产生社会影响等）的严重性，采用不同的安全等级。建筑结构安全等级的划分符合表 23 的要求，结构构件承载能力极限状态的可靠指标不小于表 24 的规定。

表 23　建筑结构的安全等级

安全等级	破坏后果	建筑物类型
一级	很严重	重要的
二级	严　重	一般的
三级	不严重	次要的

表 24　结构构件承载能力极限状态的可靠指标

破坏类型	安全等级		
	一级	二级	三级
延性破坏	3.7	3.2	2.7
脆性破坏	4.2	3.7	3.2

基于最小设计风速 30m/s（离地高 20m）设计的 500kV 线路杆塔结构构件按当量正态化法（JC 法）计算的可靠度指标β≥3.2，已满足现行国家标准 GB 50068 二级建筑物延性破坏可靠度指标的要求，500kV 线路多年来的运行实践表明其可靠度是可接受的，没有频繁地出现产生很大社会影响的杆塔失效事故。

±1100kV 线路规划用作跨区输电重要线路，其输送容量为 500kV 线路的 5 倍～6 倍，若杆塔失效，造成的经济损失、社会影响等都将很严重，由此，±1100kV 线路杆塔的安全等级应较 500kV 线路提高一个安全等级，即要按一级安全等级考虑。

现行国家标准 GB 50068 规定结构重要性系数γ_0要按结构构件的安全等级、设计使用年限并考虑工程经验确定，对安全等级为一级或设计使用年限为 100 年及以上的结构构件，不小于 1.1。

对日咨询可知，日本特高压线路杆塔结构设计时构件强度留 10%的裕度，相当于重要性系数取 1.1。

结合国内已建线路倒塔事故发生的原因，主要发生在运行情况下的风及覆冰超过设计值，而对于安装情况发生倒塔事故的概率极小，结构重要性系数取 1.1，相当于将所有荷载提高 10％，对于安装工况，从国内的实际情况以及国内 6 万多公里线路的设计和施工经验来看，没有必要进行再提高。因此，±1100kV 线路各类杆塔除安装工况取γ_0=1.0 外，其它工况取γ_0=1.1。

10.4.2　与正常使用极限状态有关的荷载效应是根据荷载标准值确定的。

10.4.3　本条是根据现行国家标准 GB 50191 和 GB 50260 的有关规定和线路杆塔结构的特点制订的。

11 基　　础

11.0.1　近年来，各单位的基础选用经验日益丰富，选用的基础型式也逐渐增多，但是，原状土掏挖基础、现浇钢筋混凝土基础仍然是主要的基础型式。 原状土基础能充分发挥原状土的承载性能，承载力大、变形小，用料省。目前，环保要求越来越高，原状土基础对环境的破坏较小，比较符合绿色工程的理念。 机械化施工基础设计必须与施工装备结合，不能脱离现有设备的施工能力进行基础型式的设计，应统筹考虑杆塔等物资运输对道路的要求，合理选择基础施工机械。 工程中已经普遍采用了全方位长短腿铁塔，为了保护环境，基础设计时需要在基础型式和基面设计方面多做优化工作，尽量采用合理的基础型式，尽可能少开挖或不开挖基面。

11.0.3　根据现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 地基基础设计的基本规定，对基础稳定、地基承载力采用正常使用极限状态下作用的标准组合进行计算，对地基的不均匀沉降、基础位移等采用准永久组合进行计算。

11.0.4　根据现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 基础作用力采用标准组合值，地基抗力采用安全系数法计算的特征值，保持了原电力规程的安全度标准。

11.0.7　腐蚀地区杆塔基础可参照《工业建筑防腐蚀设计标准》GB 50046 及以往特高压工程措施，并应充分考虑工程特点。如下为哈密南－郑州±800kV 特高压直流输电线路工程的盐渍土地区防护措施工程实例。

（1）弱腐蚀地区基础混凝土强度等级 C30，最大水胶比 0.5，最小水泥用量 300kg/m³，不再采取其它外防护措施。混凝土垫层最低强度等级 C20，最小厚度 100mm。灌注桩基础混凝土强度等级 C35，最大水胶比 0.45。

（2）中等腐蚀地区基础混凝土强度等级 C35，最大水胶比 0.4，最小水泥用量 320kg/m³ 。开挖基础表面及其垫层顶面全部采用防腐蚀涂层进行防护，垫层混凝土最低强度等级 C25，最小厚度 100mm；掏挖基础、人工挖孔桩基础和灌注桩基础在地面以下 500mm 及地面露出部分涂刷表面防腐涂层。

（3）强腐蚀地区基础混凝土强度等级 C40，最大水胶比 0.36，最小水泥用量 340kg/m³ 。开挖基础表面及其垫层顶面全部采用防腐蚀涂层进行防护，垫层混凝土最低强度等级 C25，最小厚度 100mm。在采取有效隔离、防水措施的条件下，强腐蚀地区可采用灌注桩基础，混凝土强度等级 C50，最大水胶比 0.36。在地面以下 500mm 及地面露出部分涂刷防腐涂层。隔离措施可采用裹体灌注桩、预制井壁的钻井技术等工艺，并需开展现场应用试点工作。

（4）灌注桩基础钢筋混凝土保护层最小厚度，在中腐蚀地区为 55mm，强腐蚀地区为 65mm，其它基础为 50mm。

（5）各等级混凝土宜采用 42.5 普通硅酸盐水泥配制。

（6）基础表面防腐蚀涂层采用改性高氯化聚乙烯（HCPE），中等腐蚀地区涂层干膜厚度不小于200mm，强腐蚀腐蚀地区涂层干膜厚度不小于300mm。

（7）中、强腐蚀地区基础混凝土中需加入粉煤灰、磨细矿渣、硅灰等矿物掺合料，具体种类、品质和掺量通过试验确定。

（8） Cl-强腐蚀地区的基础混凝土中应添加钢筋阻锈剂，其品种和用量可根据Cl-不同含量，通过电化学试验确定。

（9）地下水位较高的中、强腐蚀地区大开挖基础可采用玻璃钢模板防护措施，混凝土强度等级可降低一级。

11.0.8　湿陷性黄土地区的杆塔基础宜远离水浇地、有汇水的地区，避开冲沟、落水洞等位置，宜使塔位立于排水顺畅的位置。当塔位位于无汇水的山坡、山梁、山顶等位置时，可不采取处理措施；当塔位位于有汇水的平台、平地、洼地时，应根据线黄土湿陷等级采取不同的处理方式。杆塔地基处理原则可按现行国家标准《湿陷性黄土地区建筑标准》GB 50025的有关规定执行。

11.0.9　冻土地区输电线路塔位应选择在地势较高、地下水位较低、排水条件好的地点，避开易引起冻胀的不良地段。

11.0.10　根据以往工程实践经验提出。防治措施可参照国家标准《构筑物抗震设计规范》GB 50191和国家标准《电力设施抗震设计规范》GB 50260。

11.0.11　参考《架空输电线路基础设计技术规程》DL/T 5219给出的“在河滩上或内涝积水地区设置塔位时”基础主柱露出地面高度的最小值。当有特殊要求时，应遵循相关标准确定。

11.0.12　转角塔、终端塔的预偏要根据杆塔结构的变形和基础设计时地基出现的变形综合考虑确定或根据工程设计、施工、运行经验确定。

12　对地距离及交叉跨越

12.0.1　导线与地面、建筑物、树木、铁路、道路、河流、管道、索道及各种架空线路 的垂直距离是按最高气温或覆冰情况求得的最大弧垂计算的。

1 重覆冰区的线路，由于严重的冰过载或不均匀覆冰和验算覆冰使导线弧垂增大，对跨越物或地 面的间距减小，造成人身触电伤亡，导线烧伤、线路跳闸等事故。为此，本条补充规定了对重覆冰区的 线路，还应计算导线不均匀覆冰和验算覆冰情况下的弧垂增大。

2 为解决架线过程中，由于设计和施工的误差而引起导线对地距离的减少，一般采用在定位过程 预留“裕度”的方法来补偿。

在输电线路的设计和施工过程中，由于技术上和设备工具上的原因，往往使计算所得的导线弧垂数值与竣工后的数值之间存在着一定的差距。其产生的原因有测量误差，定位误差和施工误差三种情况。 因此，杆塔定位时必须考虑“导线弧垂误差裕度”。

3 大跨越的导线，其截面往往是按发热条件确定的。导线允许温度远大于本条规定的一般线路的 数值，而且大跨越在线路中的地位又比较重要，因此为考虑电流过热引起弧垂增大的影响，故补充规定了在大跨越段，确定导线至地面、建筑物、树木、铁路、道路、河流、管道、索道及各种架空线路的距 离，应按导线实际能够达到的最高温度计算最大弧垂。

4 验算覆冰条件、导线最高温度及导线覆冰不均匀情况下对被交叉跨越物的间隙距离按操作过电压间隙校验。

5 导线短时过负荷电流为额定电流的 1.2 倍时，应考虑导线温度升高引起弧垂增大。以环境温度 35℃、风速 0.5m/s，太阳辐射功率密度 1000W/m^2 为例，输送额定电流 5455A 时，导线温度为 56.1℃，输送额定电流 6546A 时，导线温度为 57.9℃。500m 档距条件下，与定位温度 40℃相比，1.2 倍过负荷时弧垂增加 0.84m。

12.0.2　本条说明如下：

1 电场和离子流密度的限值选择

根据国内外直流超高压、特高压输电线路下电场限制值的研究成果，确定直流特高压架空输电线下地面处电场强度、离子流密度控制值取值如下：

1）对于一般非居民地区，合成场强限定在雨天 36kV/m，晴天 30kV/m，离子流密度限定在雨天 150nA/m^2，晴天 100nA/m^2。

2）对于居民区，合成场强限定在雨天 30kV/m，晴天 25kV/m，离子流密度限定在雨天 100nA/m^2，晴天 80nA/m^2。

3）对于人烟稀少的非农业耕作地区，合成场强限定在雨天 42kV/m，晴天 35kV/m，离子流密度限定在雨天 180nA/m^2，晴天 150nA/m^2。

2 对地最小间隙距离

±1100kV 直流输电线路导线对地面的距离除要考虑正常的绝缘水平外，还要考虑静电场强、合成场强的影响。线路设计中采用的各种对地及交叉跨越间隙值，按其取值原则，可分为三大类：①由电场强度决定的距离；②由电气绝缘强度决定的距离：③由其他因素决定的距离 。

第三类距离主要是为避免输电线路与其他部门设施之间的影响，如车辆行驶时电力线杆塔对司机视线的阻挡、电力线倒塔时对其他设施造成危害等，在现行线路设计规程中，其取值大多与电压等级无关，相关部门亦已认可，故基本上沿用规程的值。个别与电压等级相关的距离，按各电压等级取值的级差递增取值。

1） 居民区、非居民区最小对地距离取值

±1100kV 直流输电线路导线对地面的距离主要由电场效应决定，按公众及交通工具可能到达的频繁程度分类的。在不同的分类场所，有不同的场强要求和标准，还应注意到人们在线路走廊内从事农业劳动时，在各个地方停留的机会是均等的，不可能全部集中在高场强的地方。在考虑输电线下最大场强限值时应综合考虑最大地面场强出现的概率、设计时对地距离的裕度等因素。

综合考虑以上各种因素，导线最小对地距离如表 41。

本规范由场强控制的对地及交叉跨越距离时按 8×1250mm^2 导线计算确定的，当导线型号变化时，相关数值可根据计算结果调整。

海拔高度超过 1000m，每增加 1000m 海拔高度，±1100kV 线路非居民区（人烟稀少的非农业耕作区）对地距离增加约 5%，居民区及一般非居民区对地距离增加约 4%。

一般来讲，中国南北方是以 800mm 年等降水量线为界限划分的，如线路经过北方的灰尘严重地区时，线路对地距离还需适当增加。

表 25 准东-华东±1100kV 线路工程导线最小对地距离（m）

地区		海拔高度（m）						备 注
		500	1000	1500	2000	2500	3000	
南方	居民区	27.5	28.5	29	29.5	30.5	31	-
	非居民区	24.5	25	25.5	26	26.5	27	农业耕作区

		21.5	22	22.5	23	24	24.5	人烟稀少的非农耕区
	交通困难地区	20.5	21	21.5	21.5	22.5	23	-
北方	居民区	30.5	31.5	32	32.5	33.5	34	-
	非居民区	27.5	28	28.5	29	29.5	30	农业耕作区
		21.5	22	22.5	23	24	24.5	人烟稀少的非农耕区
	交通困难地区	20.5	21	21.5	21.5	22.5	23	-

2） 交通困难地区最小对地距离

超高压输电线路在交通困难地区、步行可达和不可达到山坡的最小对地距离均按操作过电压的放电间隙，再根据人体的高度、物体的高度一并考虑一定的裕度而决定。

交通困难地区是指车辆不能达到的地区，该类地区的超高压线路最小对地距离的确定是取人、畜及携带物总高加上操作过电压间隙和裕度。我国现行的线路设计技术规程中，500kV 和 750kV 线路，人、畜及携带物总高按 3.5m 考虑、裕度按 2.0m 考虑。500kV 线路操作过电压间隙取 3.0m，交通困难地区导线最小对地距离取 8.5m；750kV 线路操作过电压间隙取 4.7m，该项最小对地距离为 10.2m 取 11m（对地距离 11m 时，地面最大电场强度为 16.5kV/m）。

前苏联规定交通困难地区的电场强度限制值为 20kV/m，我国超高压输电线路在此类地区没有规定场强限值。有资料显示，电场强度在 18kV/m～20kV/m 电场下时，湿润牧场放牧的奶牛并无反常行为；线路下和附近的乔木超过一定高度，树木端部会出现烧伤，引起植物端部烧伤的电场强度要在 20kV/m 以上，且这种现象与电压等级并没有直接关系。

1000kV 特高压输电线路在交通困难地区，地面最大电场强度按 18kV/m 左右控制，对地距离约需 14.5m，推荐取 15m。±800kV 直流输电线路在交通困难地区，按操作过电压间隙控制的距离为 13m；对其电场效应即静电场强限定在 20kV/m，合成场强限定在雨天 46kV/m，晴天 38kV/m，则 V 串情况下，对地距离约需 15m。

±1100kV 直流输电线路在交通困难地区，按操作过电压间隙控制的距离为 15.5m。按电场效应控制的距离，即按标称场强 20kV/m，合成电场强度雨天 46kV/m，晴天 38kV/m 控制的距离为 21m。

我国超高压线路在经过步行可达到的山坡时，导线的净空距离是考虑人在放牧时挥鞭对导线的接近，再留有 2m 的裕度，取和交通困难地区相同的数值（500kV 线路取 8.5m，750kV 线路取 11m）；对于步行不可达到的山坡、峭壁、岩石的净空距离，仅考虑操作过电压间隙加裕度，500kV 线路取 6.5m，750kV 线路取 8.5m。1000kV 特高压输电线路仍按此原则考虑，对于步行可达到的山坡，导线风偏后的净空距离推荐 12m；对于步行不可达到的山坡、峭壁、岩石，导线风偏后的净空距离推荐 10m。±800kV 特高压直流输电线路仍按此原则考虑，对于步行可达到的山坡，导线风偏后的净空距离取 13m；即操作过电压间隙 7.5m，加人、畜及携带物总高按 3.5m 考虑、加裕度 2.0m；对于步行不可达到的山坡、峭壁、岩石，导线风偏后的净空距离取 11m。

±800kV 特高压直流输电线路仍按此原则考虑，对于步行可达到的山坡，导线风偏后的净空距离推荐 13m；即操作过电压间隙 7.5m，加人、畜及携带物总高按 3.5m 考虑、加裕度 2.0m；对于步行不可达到的山坡、峭壁、岩石，导线风偏后的净空距离推荐 11m。

±1100kV 特高压直流输电线路推荐按上述原则考虑，对于步行可达到的山坡，导线风偏后的净空距离推荐 15.5m，即操作过电压间隙 10m，加人、畜及携带物总高按 3.5m 考虑，加裕度 2.0m；对于步行不可达到的山坡、峭壁、岩石，导线风偏后的净空距离推荐 13.5m。

经初步估算，对于 8×1250mm^2 钢芯铝绞线，在基本气象条件（风速为 31m/s）下，导线的风偏角约为 40 度，当地面坡度为 30 度，导线风偏后的净空距离满足 15.5m 时，导线静止时对山坡的距离将大于 21m，垂直距离大于 25m。此时的地面静电场小于 19kV/m，地面最大合成电场强度雨天小于 44kV/m，晴天小于 34kV/m。因此，取该距离值是安全的。

12.0.3 对邻近民房的地面场强说明如下：

对人的影响实质上是合成场强，标称场强只是其中的一部分，因此，直流线路电场对人的影响应该以合成场强衡量。从前苏联和我国直流线路的运行经验看，地面合成场强没有必要小于 10kV/m，从美国和前苏联的规定看，不应大于 15kV/m。我国在原《高压直流架空送电线路技术导则》DL/T436-1991 中规定，邻近民房的地面标称场强限值为 3kV/m，而在《高压直流架空送电线路技术导则》DL/T436-2005 中已改为“民房所在地面未畸变合成场强应不超过 15kV/m（对应于湿导线）”。

原导则是在建设葛上直流工程时确定的，当时中国电力科学研究院对直流合成电场对人的影响进行过大量的试验研究，在晴天，当地面合成电场到达 11kV/m 时，人在该电场下打伞，手触摸金属柄，会感受到明显但比较轻微的暂态电击；在雨天，同一地点的地面合成电场达到约 15kV/m，暂态电击更强烈，具有刺痛感。随着电场增加，暂态电击程度也增加。为了防止人在民房所在地打伞时出现较强的暂态电击，民房所在地面的合成电场应不超过 15kV/m（对应于湿导线）。由于合成电场不好计算，而以合成电场对应的标称电场作为限值，便于设计，所以对应葛上直流线路采用的导线为 4×300mm^2，

取导线对地最小距离为 12.5m，晴天 11kV/m（或雨天 15kV/m）地面合成电场对应的标称电场约为 3kV/m。所以原导则对应当时的设计条件，取邻近民房的地面标称场强限值为 3kV/m 是合适的。

直流输电线路的合成电场与标称电场之间的量值关系与说采用的导线有关。如果导线电压、导线分裂数、分裂间距和导线对地距离一样，子导线直径越大，导线表面电场越小，空间电荷产生的电场在合成场强中占有的比例就较小，地面的合成电场也越小。当在以后的直流工程中，导线为 4×720mm^2，导线对地距离为 12.5m 时，地面标称电场为 3kV/m 时，对应的合成电场只有 4.5 kV/m～7kV/m，比葛上直流的合成场 11kV/m（或雨天 15kV/m）小很多。所以，对采用不同导线的直流线路，都采用同一量值的标称电场作为限值，并不能反映实际合成场的情况。对人的影响实际上是合成场强，标称场强只是合成场强的一部分，因此，直流输电线路的电场对人的影响原则应以合成电场衡量。

从前苏联的规定和我国直流线路运行经验看，直流线路临近民房时，地面合成场强不小于 10 kV/m。同时我国为慎重确定直流线路临近民房所在地面的合成电场的限值，在 2005 年 7 月，中国电力科学研究院会同湖北超高压局武汉分局，组织了老中青男女人员，在直流输电线路下进行了感受试验。试验中人处在的地面合成场强的范围为 6.1 kV/m～15.1kV/m。人体试验方式为：人触摸接地金属、人打伞触摸金属柄和人触摸架设在空中对地绝缘的 13m 长金属线时的感受。感受结果为：（1）穿普通鞋的人触摸接地金属体时无感觉；穿电工绝缘鞋的人触摸接地金属体时，在 15kV/m 的场强下时有明显但轻微的暂态电击感觉，在小于 12kV/m 的场强下无感觉。（2）人触摸架设在空中对地绝缘的 13m 长金属线时无感觉。（3）人打伞触摸金属柄，在地面合成电场小于 9.6kV/m 时，无感觉；在地面合成电场为 11kV/m～13kV/m 时有明显但轻微的暂态电击感觉；在地面合成电场为 14.6kV/m～15.1kV/m 时，放电很明显，放电声较大，有明显刺痛感，与人在干燥的地板上走动后再触摸水龙头的感觉类似。同时这与葛上直流工程时所做的感受试验一致。

±800kV 线路设计时，在国家环保总局组织的专家评审中，经过多方分析讨论，专家认为应充分考虑减少电击对人造成的不适或不快感，按 80％测量值不超过 15kV/m 考虑，这样符合一般合格评定的规则，与无线电干扰限值的意义也一致。按照专家评审的意见，修改合成场强为以 25kV/m（晴天）作为邻近民房的最大合成场强，同时满足 80％测量值不超过 15kV/m 为控制指标。最大离子流密度限值晴天不超过 100nA/m^2，雨天不超过 150nA/m^2。

关于 80％值和 50％值，假设测量数据为 100 组，将测量结果按照由小到大的顺序排列，第 81（或 51）个数值，即 80％（或 50％）测量值，此时小于或等于 15kV/m 为满足要求。对于因 80％和 50％的差距可能带来的问题，建议在监测方法中以规定风向和更小的风速来解决。

推荐±1100kV 线路采用±800kV 的相同的标准，当线路临近民房时，在湿导线情况下房屋所在地面的未畸变合成电场不得超过 15kV/m。

12.0.4　本条说明如下：

1　导线与建筑物之间的最小垂直距离

±1100kV 线路不应跨越经常住人或屋顶为燃烧材料的建筑物，对于非长期住人的耐火屋顶的建筑物，在取得有关方面同意时可以跨越。导线与建筑物之间的最小垂直距离，从电场强度来看，可采用交通困难地区的标准。220～500kV 级线路均在交通困难地区对地距离的基础上再增加 0.5m，±800kV 线路在交通困难地区的对地距离为 15.5m，在此基础上再增加 0.5m，取为 16m。±1100kV 线路在交通困难地区的对地距离为 21m，在此基础上再增加 0.5m，取值 21.5m。

若所跨越的建筑物为非长期住人建筑，尚需满足房屋所在位置地面处湿导线合成场强 15kV/m 控制要求。

2　导线在最大计算风偏时对建筑物的最小净空距离

国内 500kV 及 750kV 最大风偏时净距按跨越建筑物时的垂直距离减去 0.5m。考虑导线的最大计算风偏仅是短时性的，1000kV 线路按此原则执行，按跨越时的垂直距离减去 0.5m，取为 15m，与前苏联规程基本一致。±800kV 线路按此原则执行，按跨越时的垂直距离减去 0.5m，取为 15.5m。

±1100kV 线路仍按此原则执行，按跨越时的垂直距离减去 0.5m，取为 21m。

3　边导线与不在规划范围内城市建筑物之间的水平距离

在无风情况下，边导线需对其保持一定的水平间隔。最小水平距离的取值，主要是考虑在无风条件下，在脱冰或检修时，从导线掉落的冰块或坠落的异物不至于伤及线下房屋。

参考现行国家标准《110～750kV 架空送电线路设计技术规程》的规定，500kV 取值 5m，750kV 线路取为 6.5m，±800kV 直流 和 1000kV 交流线路取值 7m，±1100kV 直流线路推荐取值 7m。该水平距离为边导线几何中心至建筑物边缘的水平距离。

12.0.5　随着社会环保意识的不断加强，±1100kV特高压线路在跨越林木、植被覆盖等方面，应采取高跨和砍伐相结合，更好的保护生态环境。

观察发现，植物和动物对线路下的电场有很大的适应能力。线路走廊中生长的农作物，受电场的刺激，一般生长的高大，果实数量与无电场作用地区没有差别，甚至还有所提高。8kV/m～12kV/m 线路下生长的果树，受电场的作用使果实的质量提高。线路下和附近的乔木超过一定高度，树木端部会出现烧伤，测量表明，引起植物端部烧伤的电场强度在 20kV/m 以上，这种现象与电压等级并没有直接关系，美国、苏联等国家均在 500、750（765）kV 线路走廊内观察到类似的植物端部烧伤的现象。

1　导线与林区树木之间的垂直距离

我国 500kV 线路与树木的最小垂距，目前采用的数值大部分地区为 7.5m，华北地区多为 7m；广东地区多为 6.5m。线路与树木的净空距离，大部分地区 7m，华北、广东为 6.5m。线路与果树、经济作物的距离，大部分地区 6.5m，华北 8.5m，广东 6m。

加拿大安大略水电局《输电线路设计标准》规定：在导线最大弧垂或最大风偏时，导线与树木的任一部分之间的最小距离，对 345kV 和 500kV 线路为 4m～6m。

前苏联规定：在公园、自然保护区、绿化区、居民点四周、贵重林区，水域、铁路和公路的防护林带的线路通道宽度应按导线最大偏斜时到树冠的距离来确定。对 330kV～500kV 线路，水平距离不小于 5m；750kV 线路，水平距离不小于 6m；1150kV 和±750kV 线路，水平距离不小于 8m。

日本《架空送电规程》规定，500kV 与植物的最小垂直距离为 7.28m。

考虑树木超高生长，若不能及时砍伐可能导致对地放电，导线与林区树木之间的垂直距离需有较大的裕度。110～330kV 线路一般取为最大过电压间隙加上约 3m 的裕度，早期 500kV 线路最大过电压间隙为 3.8m，按此计算并归整应为 7m，在建设过程中，各地实际取值为 6.5m～7.5m，现行规程统一为在导线最大弧垂或最大风偏时，导线与树木（包括果树、经济作物林、城市行道树等）的最小距离为 7m。750kV 线路按最大过电压间隙加上 3.5m 裕度，取为 8.5m。

1000kV 线路按中相最大过电压间隙 7m 加上 3.5m 裕度，取为 10.5m 时，校核电场强度大于 20kV/m，容易引起树木端部烧伤，因此按场强 20kV/m 以下控制进行校核，1000kV 线路导线对树木最小垂直距离建议取值 14m。

直流线路导线与林区树木之间的最小垂直距离取值，以操作过电压间隙加上一定的裕度为基础，并校核电场强度，比较取其较大者。例如，±660kV 线路导线与树木最小垂直距离，按操作过电压间隙 5.0m 加上 3.5m 裕度，为 8.5m；按静电场强 27kV/m，合成场强雨天 60kV/m，晴天 52kV/m 计算则为 10.5m。±660kV 线路导线对树木最小垂直距离取为 10.5m。

±800kV 线路导线对树木最小垂直距离可按操作过电压间隙 7.5m 加上 3.5m 裕度，取为 11m。按合成场强雨天 60kV/m，晴天 52kV/m 校核，±800kV 线路导线对树木最小垂直距离取 13.5m。

±1100kV 线路导线对树木最小垂直距离可按操作过电压间隙 10m 加 3.5m 裕度，取为 13.5m。校核电场强度见下表。

表 26　线至树顶距离计算结果　（m）

场强	水平 V 串

静电场 18kV/m，合成场强雨天 42kV/m，晴天 35kV/m	22.0
静电场 22kV/m，合成场强雨天 50kV/m，晴天 42kV/m	19.4
静电场 27kV/m，合成场强雨天 60kV/m，晴天 52kV/m	16.9

按合成场强雨天 60kV/m，晴天 52kV/m 校核，±1100kV 线路导线对树木最小垂直距离，推荐取值 17m。

2　导线最大风偏时与树木之间的净空距离。

考虑最大风偏的短时性，110kV～330kV 线路均在上述垂直距离的基础上减少 0.5m，特高压线路由于原有导线与树木的垂直距离值较大，考虑风偏的短时性，最小净空距离按电气绝缘强度控制，±800kV 线路的该项距离取为 10.5m（对树木的最小垂直距离 13.5m）。参照±800kV 线路的取值原则，±1100kV 线路的该项距离取为 14m（对树木的最小垂直距离 17m）。

3　砍伐树木时，树木砍伐范围应按导线与树木之间的最小垂直距离及净空距离要求确定，并且对树木倾倒距离进行校核。

以杨树砍伐范围确定为例，按 1250/70 导线对地距离 25.0m、档距 550m，档中导线最大水平偏移 12.3m，导线对杨树的净空距离要求为 14m，满足电气净空距离要求的导线最低处砍伐宽度为线路边线左右各 26.3m（12.3m+14m），导线最低处对砍伐范围边缘地面的净空距离为 36.2m，杨树自然生长高度 28m，杨树倾倒时按导线不摆动，则杨树倾倒时对导线最低处的距离已满足工作电压间隙 3.2m 的要求。

4　导线与果树、经济作物、城市绿化灌木及街道树之间的垂直距离。

该类树木超高生长的可能性很少，但考虑该类树木人接触的机会较多，且大多采用跨越方案，故应在跨越一般树木的取值基础上适当增加安全裕度。±500kV 和±600kV 线路按照跨越一般林木的垂直距离的基础上考虑 1.5m 的裕度，分别取 8.5m 和 12m；±800kV 线路按静电场强 22kV/m，合成场强雨天 50kV/m，晴天 42kV/m 取值，导线对果树、经济作物、城市绿化灌木及街道树之间最小垂直距离取 15m。

±1100kV 线路也按照静电场强 22kV/m，合成场强雨天 50kV/m、晴天 42kV/m 取值，推荐取值 19.5m。

12.0.7　输电线路对各种交叉跨越物的距离，其取值原则由电场强度、电气绝缘间隙以及其他因素决定。输电线路与交叉跨越物的水平距离主要是为了避免输电线路对其他部门设施产生影响，如车辆行驶时电力线杆塔对司机视线的阻挡、电力线倒塔时对其他设施造成危害等。在现行线路设计规程中，其取值大多与电压等级无关，相关部门亦已认可，个别与电压等级相关的距离，按各电压等级取值的级差递增取值。

1　导线对铁路交叉跨越距离

1） 导线至铁路轨顶的垂直距离。国外及我国 500kV 以上线路的规定见表 27。

表 27　各国不同电压等级对铁路交叉垂直距离

国　别	电压等级（kV）	至铁路轨顶的垂直距离（m）	至接触网的垂直距离（m）
前苏联	1150	17.5	14.5（网线、杆顶）
前苏联	750	12	10（网线、杆顶）
前苏联	±750	13	10.5（网）、12（杆顶）
加拿大	735	l3.7	
中　国	500	电气轨 16、标轨 14、窄轨 13	6（网）、8.5（杆顶）
中　国	±500	16	7.6（网）、8.5（杆顶）
中　国	750	电气轨 21.5、标轨 19.5、窄轨 18.5	7（网）、10（杆顶）
中　国	1000	电气轨、标轨及窄轨 27	16
中　国	±800	电气轨、标轨建及窄轨 21.5	12.5

考虑我国的实际情况，±800kV 线路至标准轨距铁路轨顶的最小垂直距离参照跨越公路即居民区的要求，水平 V 串导线对标准轨距铁路轨顶的距离为 21m，水平 I 串导线对标准轨距铁路轨顶的距离为 21.5m，推荐取值 21.5m。±1100kV 线路至标准轨距铁路轨顶的最小垂直距离参照跨越公路即居民区的要求，推荐取值 28.5m。

导线至窄轨铁路轨顶的最小垂直距离比标准轨铁路可减少一些，我国现行线路设计规程中，一般均减少 1m。±800kV 及 1000kV 特高压线路按相同取值，建议±1100kV 线路也按相同取值。跨越电气化铁路时，考虑其等级及重要性较高，500kV 线路的规定，导线至轨顶的最小垂直距离一般要求比非电气化铁路大一些，该项距离比标准轨铁路增加取 2m。但±800kV 特高压直流线路跨越铁路时的对地距离由地面场强控制，最大电气间隙已有足够的安全裕度，因此不另外增加安全距离。±1100kV 参考±800kV 取值原则，跨越铁路时的对地距离由地面场强控制，最大电气间隙已有足够的安全裕度，不也另外增加安全距离，取 28.5m。因此±1100kV 特高压直流线路对标准轨距铁路及电气化铁路轨顶最小垂直距离建议取 28.5m，对窄轨铁路轨顶的最小垂直距

离建议也取 28.5m。

铁总办科技函[2016]165 号文规定，导线至轨顶的垂直距离，非电气化铁路与电气化铁路取相同的标准，直流±1100kV 不应小于 28.5 米，至铁路接触网和杆顶的距离不应小于 19.5m，对于输电线路跨越拟建铁路处，有铁路架桥机作业情况发生时，不应小于 30 米。

2） 导线至电气化铁路承力索或接触线的垂直距离

电气化铁路供电电压约为 30kV，铁路设计时，跨越铁路的天桥底部高度至接触线约 8m。即接触网的构造高度距轨面高度不超过 8m。±800kV 线路导线跨越电气化铁路承力索或接触线的垂直距离按最大电气间隙控制，操作过电压间隙取 7.5m，导线动态范围取 2m，裕度取 3m，取值 12.5m。±1100kV 参考上述原则，导线跨越电气化铁路承力索或接触线的垂直距离按最大电气间隙控制，操作过电压间隙取 10m，导线动态范围取 2m，裕度取 3m，推荐取值 15m。对于铁路承力索或接触线的塔顶最小垂直距离，为减少登杆维修人员受到的静电感应影响，降低杆塔顶的场强，需适当增在间距。为保证安全的基础上尽量减小导线交叉跨越高度，节约工程投资。一般接触网塔顶的离地面高度约 7m，±1100kV 各电场强度下计算垂直距离见表 28。

表 28　导线至电气化铁路承力索或接触线杆塔顶的距离计算（m）

场强	水平 V 串
静电场 18kV/m，合成场强雨天 42kV/m，晴天 35kV/m	22.0
静电场 22kV/m，合成场强雨天 50kV/m，晴天 42kV/m	19.4
静电场 27kV/m，合成场强雨天 60kV/m，晴天 52kV/m	16.9

由表 28 确定，推荐对接触网塔顶的场强按合成场强雨天 50kV/m，晴天 42kV/m 控制，±1100kV 线路导线至电气化铁路承力索或接触线杆塔顶的垂直距离推荐取值为 19.5m。

3） 交叉铁路的最小水平距离

交叉铁路时，铁塔基础外缘至轨道中心的最小水平距离现规程各级电压均为 30m，±800kV 特高压直流线路因电压等级较高，为提高安全运行可靠性建议最小水平距离提高到 40 米或按协议要求取值。

铁总办科技函[2016]165 号文规定，线路交叉跨越铁路时，杆塔外缘至轨道中心水平距离不应小于“塔高加 3.1 米”。当无法满足此要求时时，可适当

减小距离，任何情况下，不得小于 40 米，并采取必要的安全措施。

推荐±1100kV 特高压直流线路铁塔基础外缘至轨道中心的最小水平距离为塔高加 3.1m，无法满足要求时可适当减小，但不得小于 40m，或按协议要求取值。

4） 与铁路平行的水平距离

铁总办科技函[2016]165 号文规定，线路与铁路平行接近时，杆塔外缘至轨道中心的水平距离不小于塔高加 3.1 米，困难时协商确定。

在路径受限制地段，应当控制±1100kV 特高压直流线路与铁路的平行距离和长度，并对每一交叉段和接近段进行验算，以确定对铁路通信、信号和闭锁装置的干扰和危险影响。对电气化铁路，必须降低在铁路接触网的导线和承力索上所感应的电压。推荐±1100kV 线路在无风条件下边导线至接触网导线的距离应大于 40m。至非电气化铁路建筑物的净空距离，在最大风偏时应大于 21m。

5） 铁路其它规定

铁总办科技函[2016]165 号文规定，特高压输电线路跨越铁路处采取的加强措施：

① 基本风速、基本覆冰重现期应按 100 年一遇设计。

② 杆塔结构重要性系数应取 1.1。

③ 跨越铁路时采用独立耐张段，跨越档导线、地线不得设有任何接头。

④ 不应在铁路车站出站信号机以内跨越。

⑤ 跨越时，交叉角不应小于 45°。困难情况下双方协商确定，但不得小于 30°。

⑥ 为提高特高压线路的抗冰能力，跨越段应因地制宜，实行差异化设计。覆冰区段，导线最大设计验算覆冰厚度应比同区域常规线路增加 10mm，地线设计验算覆冰厚度增加 15mm。

⑦ 跨越段绝缘子串采用双挂点、双联“I”串或“V”串型式。

⑧ 导线最大弧垂温度按照相关国家标准执行，且不应小于 70℃。

⑨ 跨越铁路的特高压输电线路零部件要考虑防脱落措施。

⑩ 跨越铁路的特高压线路铁塔处应设置标志牌，标明以下信息：电压等级、走廊宽度、轨顶的导线最低点高度、相对轨顶的设施限高、安全绝

缘距离等。

2　导线对公路交叉跨越距离

1）　导线对公路路面的最小垂直距离

我国在第一批 500kV 线路设计时，控制地面场强小于 9kV/m，线下大型车辆感应的短路电流不超过 5mA 电流的。考虑以后车辆尺寸还可能增大，以及降低电击的影响，我国 500kV 线路跨越公路的场强标准控制在 7kV/m。前苏联的场强限值较高，场强标准控制在 10kV/m，但规定交叉公路处不允许运输车辆停留。美国则是控制人接触线下大型车辆时，通过人体的放电电流不超过 5mA。考虑我国的实际情况，很难限制运输车辆不在线下附近停留，故 1000kV 线路仍维持 7kV/m 的场强限值。

表 29　各国不同电压等级对公路交叉垂直距离

国　别	额定电压（kV）	场　所	场强限值（kV/m）	对地距离（m）
前苏联	1150	公　路	—	21～22
前苏联	750	公　路	10	16
前苏联	±750	公　路		12.5
美国 AEP	765	一般公路	7	16.8
美国 AEP	765	高速公路	5～8	19.5
加拿大	735	公　路	—	15.4
中　国	500	公　路	7	14
中　国	750	公　路	7	19.5
中　国	1000	公　路	7	27
中　国	±800	公　路	25（晴天）	21.5

±800kV 线路跨越公路时导线对公路路面的距离，按照居民区标准执行，取值 21.5m。推荐±1100kV 线路也按此原则，导线对公路路面的距离按照居

民区的标准执行，取 28.5m。

因为直流输电线路最大负荷仅为额定负荷的 110％，导线最大弧垂可按±70℃或按实际可能到达的温度计算。

2） 交叉公路的最小水平距离

线路交叉一级及以下公路时，在开阔地区，铁塔基础外缘至路基边缘的最小水平距离现规程对电压等级 110kV～500kV 均为 8m，750kV 线路取 10m。±800kV 直流及 1000kV 交流线路均取值 15m。推荐±1100kV 特高压直流输电线路取 15m 或按协议办理。交叉高速公路时，最新公路法要求已大为提高，如广东、湖北等地要求 80m。因此，推荐±1100kV 特高压直流线路铁塔基础外缘至高速公路隔离栏的最小水平距离与公路部门协商，按协议要求取值。

3） 与公路平行的水平距离

当线路与公路平行接近时，在开阔地区，电力线对公路的水平距离应不小于最高杆塔高度。当线路位于路径受限制地区时，最小水平距离现行规程一般随电压等级升高而适当增大，1000kV 特高压线路按地面电场为 7kV/m，边导线至路基边缘最小水平距离取值为 15m 或按协议要求。

考虑到我国土地资源在经济发达地区的越发宝贵，电力线路杆塔外缘至路基边缘最小水平距离不宜太大。±800kV 特高压直流输电线路，路径受限制地区边导线至路基边缘最小水平距离取 12m，则足以确保对行人及车辆的安全，或按协议要求。

±1100kV 特高压直流输电线路，在极间距离 26m，对地距离 25m，距线路中心 18m 处（合成场强最大值处），地面合成场强晴天为 25.5kV/m，雨天为 34.4kV/m，离线路中心 28m 处（距边导线 15m 处），地面合成场强晴天为 21.5kV/m，雨天为 29.3kV/m，这足以确保对行人及车辆的安全，推荐路径受限制地区边导线至路基边缘最小水平距离取 15m 或按协议取值。

3 对城际轨道交通的交叉跨越距离

1） 对城际轨道交通路面及接触网的最小垂直距离

±1100kV 特高压直流线路至城际轨道交通路面及接触网的最小垂直距离按照跨越电气化铁路的要求取值，即导线对路面取 28.5m，导线对承力索及接触线及塔顶垂直距离参考铁路数据，取为 19.5m。

2） 交叉城际轨道交通的最小水平距离

线路交叉城际轨道交通时，在开阔地区，铁塔基础外缘至路基边缘的最小水平距离，可以参考现规程中对电车道的规定，对电压等级 110kV～500kV 均为 8m，750kV 线路取 10m，1000kV 特高压交流线路和±800kV 特高压直流线路均取 15m。

推荐±1100kV 特高压直流线路在±800kV 线路基础上适当增加，取值 20m。

3） 平行城际轨道交通的最小水平距离

当线路与城际轨道交通平行接近时，在开阔地区，电力线对城际轨道交通的水平距离应不小于最高杆塔高度。当线路位于路径受限制地区时，双方共同确定。

铁路与城际轨道交通平行接近时，可按平行电气化铁路的标准取值，推荐±1100kV 线路边导线至接触网导线的距离应大于 40m。至城际轨道交通建筑物的距离，在最大风偏时净空距离应大于 21m。

4 导线对弱电线的交叉跨越距离

1） 导线对弱电线的最小垂直距离

±800kV 特高压直流线路导线至弱电线的最小垂直距离按合成场强雨天 42kV/m、晴天 35kV/m 控制，取值 17m，较交叉铁路接触网杆顶的标准增加 2m。

±1100kV 线路该项距离推荐也按合成场强雨天 42kV/m、晴天 35kV/m 控制，取值 22m，较交叉铁路接触网杆顶的标准增加 2.5m。

2） 对弱电线的最小水平距离

现行国家标准《110kV～750kV 架空输电线路设计规范》GB50545 规定 110kV～750kV 在开阔地区，线路与弱电线平行接近时，线路边导线至弱电线的最小水平距离不小于平行地段线路的最高杆塔高度。±800kV、1000kV 特高压线路亦是如此规定，推荐±1100kV 特高压直流线路按此原则执行。

现规程规定在路径走廊受限制地区，边导线在最大风偏情况下对弱电线的水平距离，在 500kV 为 8m，750kV 取为 10m，1000kV 取为 13m，±800kV 特高压直流线路按与步行可以到达的山坡取值相同，为 13.0m。推荐±1100kV 特高压直流线路按与步行可以到达的山坡取值相同，为 15.5m。

5 导线对电力线的交叉跨越距离

1） 对电力线路导（地）线的最小垂直距离。前苏联规程规定，对环境空气温度为＋15℃时，1150kV、±750kV 线路与电力线交叉跨越最小距离满足 12m、11m 要求时，被跨越档的电力线铁塔不需采用特殊防雷措施。

我国规程规定与电力线交叉跨越应根据最高气温情况或覆冰无风情况的最大弧垂进行校核，比前苏联规定更严格。±800kV 特高压直流线路跨越电力线时，对导（地）线的最小垂直距离，按操作过电压间隙 7.5m，加上 3m 裕度，暂推荐取值为 10.5m(实际工程校核时，需另考虑导线动态范围)。

参考±800kV 取值原则， 推荐±1100kV 线路跨越电力线时，对导（地）线的最小垂直距离，按操作过电压间隙 10m，加 3m 裕度，推荐取值为 13m（实际工程校核时，需另考虑导线动态范围）。

2） 导线对电力线杆塔顶的垂直距离。±800kV 特高压直流线路导线对电力线杆塔顶的最小垂直距离可取交叉铁路接触网杆顶的标准及取值，取值为 15m。±1100kV 线路该项距离取值可按±800kV 线路的原则，取 19.5m。

3） 对电力线的最小水平距离。在开阔地区，线路电力线平行接近时，线路边导线至架空线边线最小水平距离不小于平行地段线路的最高杆塔高度。前苏联规定 1150kV 和±750kV 线路不小于 100，主要是为降低停电检修线路的导线和避雷线上的感应电压，但这一问题可采取安全措施加以解决。

在路径受限制地区边导线在最大风偏情况下对其它电力线边线之间的水平距离，500kV 为 13m，750kV 为 16m。1000kV 线路考虑相间过电压的差别，在 750kV 基础上增加 4m，取为 20m。±800kV 特高压直流线路导线在最大风偏情况下对其它电力线边线之间的水平距离取为 20m。推荐±1100kV 线路与平行电力线路边线的最小水平距离按最大风偏情况考虑，在最大风偏情况下取操作过电压间隙并增加一定裕度，参考±800kV 设计规范取值原则，在最大风偏时取 22m。

对路径狭窄地带，两线路杆塔位置交错排列时，前苏联中规定 1150kV 和±750kV 线路平行电力线在不偏斜时边导线之间距离不小于 30m，在最大风偏情况下，架空线路边导线至另一条平行的架空线路杆塔最近构件距离不小于 17m。±800kV 特高压直流线路对相邻线路杆塔在导线最大风偏情况下的最小水平距离取最大操作过电压间隙值，同时考虑杆塔在无风时上人检修，并留有适当裕度，按步行可以到达山坡考虑，取值为 13.0m。参考±800kV 取值原则，±1100kV 线路对相邻线路杆塔的最小水平距离，在导线最大风偏情况下，推荐按步行可以到达山坡考虑，取值为 15.5m。

6 对特殊管道的交叉跨越距离

1） 对特殊管道的最小垂直距离

特殊管道是架设在地面上输送易燃易爆物品的管道，导线对此类管道的最小垂直距离，前苏联，500kV 线路要求 6.5m，750kV 线路取值 12m，1150kV 取值 14.5m，±750kV 取值 10.5m；我国 500kV 线路实际采用 7.5m 或按协议要求取值，750kV 线路取为 9.5m 或按协议要求取值，1000kV 线路与跨越弱电线路相同取为 18m，或按协议要求取值。

±800kV 特高压直流线路，取值与跨越弱电线相同，取为 17m 或按协议要求取值。跨越索道可与跨越电力线相同，取为 10.5m。

参考±800kV 线路取值原则，±1100kV 线路与特殊管道的垂直距离，推荐取值与跨越弱电线相同，取 22m 或按协议要求取值。跨越索道可与跨越电力

线相同，取为 13m。

2） 对特殊管道的最小水平距离

前苏联的超特高压线路与地上天然气管道、石油管道、石油产品管道和载人索道交叉时的交叉角，建议尽可能采取 90 度。金属管道和索道应该在同线路交叉的范围内接地，而当 750 kV 及以上架空线路同管道和索道平行架设和接近时，在架空线路两侧距中心线各 100m 以内的地段也应该接地，接地电阻应不超过 25Ω。

前苏联的超特高压线路与地上管道、索道交叉或接近距离，见表 30，与地下管道、索道交叉或接近距离，见表 31。

表 30　前苏联的超特高压线路与地上管道、索道交叉或接近距离

交　叉　或　接　近　特　征	各级电压（kV）架空线路的最小距离（m）				
	330	500	750	1150	±750
导线至管道、索道垂直距离	6.0	6.5	12.0	14.5	10.5
基础至管道、索道水平距离（交叉、开阔地区）	杆塔高度				
基础至管道、索道水平距离（交叉、受限地区）	6.0	6.5	15.0	15.0	15.0
接近时不偏斜边导线至主干天然气管道水平距离	2 倍杆高，但不能近于防护区边界				
同上，至主干石油管道和石油产品管道水平距离	50m，但不小于杆塔高度				
同上，至泥浆管道	30	30	40	40	40
同上，在导线最大风偏时至其它管道、索道任何部分	15	15	25	25	15

表 31　前苏联的超特高压线路与地下管道、索道交叉或接近距离

交　叉　或　接　近　特　征	各级电压（kV）架空线路的最小距离（m）

	330	500	750	1150	±750
由不偏斜导线至压力在 1.2MPa 以上的主干天然气管道及石油管道的水平接近距离	30	30	40	55	55
同上，在路径受限地区，架空线路接地装置或基础至上述管道、索道的水平接近距离	15	15	25	25	25
架空线路接地装置或基础至压力在 1.2MPa 以下的主干天然气管道及主干天然气管道支线和主干石油管道及石油产品管道支线的水平距离	10	10	10*	10*	10*
同上，至各种不同用途管道	3.0	3.0	10*	10*	10*
架空线路中心线至安装在主干天然气管道上的排汽筏的距离	300	300	300	300	300

注：*只是在遇有交叉，且又同 750kV 及以上架空线路接近时，才要将管道敷设在防护区以外。

当直流超高压线路同地下管道接近时，应考虑对钢管道采取保护措施，以防止由于地中电流引起的腐蚀。预防地下管道腐蚀最有效的办法是采取阴极保护。

国内相关标准、规范主要内容如下。

① 国家标准《城镇燃气设计规范》GB 50028-2006 规定如下：

地下燃气管道与建、构筑物和相邻管道之间的水平净距，＞35kV 电杆（塔）的基础之间的水平净距不小于 5m。

地下燃气管道与交流电力线接地体的净距（m），220kV 铁塔或电杆接地体为 10m。

地下液态液化石油气管道与建、构筑物和相邻管道之间的水平净距，架空电力线（中心线）1 倍杆高（考虑倒杆影响），且不小于 10 m（考虑电力线路运行时对液化石油气管道感应电位的影响）。

门站和储备站集中放散装置的放散管与站外建、构筑物的防火间距，＞380V 架空电力线 2.0 倍杆高。

液化石油气供应基地全压力式、全冷冻式储罐与基地外建、构筑物的防火间距，架空电力线（中心线）1.5 倍杆高，但 35KV 以上架空电力线应大于 40m。

② 国家标准《输油管道工程设计规范》GB 50253-2003 规定如下：

当埋地输油管道与架空电力线路平行敷设时，其距离应符合现行国家标准《66kV 及以下架空电力线路设计规范》（GB 50061）及现行国家标准《110-750kV 架空输电线路设计规范》（GB 50545-2010）（代替 DL/T 5092-1999）的规定。埋地液态液化石油气管道，其距离不应小于上述标准中的规定外，且不应小于 10m。

③　　国家标准《石油和天然气工程设计防火规范》（GB 50183-2004）规定如下：

石油天然气站场区域布置防火间距，35KV 以上架空电力线（中心线）1.5 倍杆高，且应不小于 30m（液化石油气和天然气凝液站场应不小于 40m）。

油气井与周围建（构）筑物、设施防火间距，35KV 以上及以下架空电力线（中心线）1.5 倍杆高。

埋地集输管道与其他地下管道、通信电缆、电力系统的各种接地装置等平行或交叉敷设时，其间距应符合现行国家标准《钢质管道及储管腐蚀控制工程设计规范》SY0007 的有关规定。

集输管道与架空输电线路平行敷设时，其安全距离应符合下列要求：

管道埋地敷设时， 其安全距离不应小于下表 32 规定。

当管道地面敷设时，其间距不应小于本段最高杆（塔）高度。

表 32　架空线路对管道安全距离

名　称	3kV 以下	3～10kV	35～66kV	110kV	220kV
开阔地区	最高杆（塔）高				
路径受限制地区（m）	1.5	2.0	4.0	4.0	5.0

注：1　表中距离为边导线至管道任何部分的水平距离。

2　对路径受限制地区的最小水平距离要求，应计及架空电力线路导线的最大风偏。

3　当管道地面敷设时，其间距不小于本段最高杆（塔）高度。

④ 《石油天然气管道保护条例》第 313 号国务院令规定如下：

第十五条　禁止任何单位和个人从事下列危及管道设施安全的活动：

（一）移动、拆除、损坏管道设施以及为保护管道设施安全而设置的标志、标识；

（二）在管道中心线两侧各 5m 范围内，取土、挖塘、修渠、修建养殖水场，排放腐蚀性物质，堆放大宗物资，采石、盖房、建温室、垒家畜棚圈、修筑其他建筑物、构筑物或者种植深根植物；

（三）在管道中心线两侧或者管道设施场区外各 50m 范围内，爆破、开山和修筑大型建筑物、构筑物工程；

（四）在埋地管道设施上方巡查便道上行驶机动车辆或者在地面管道设施、架空管道设施上行走；

（五）危害管道设施安全的其他行为。

第十六条　在管道中心线两侧各 50m 至 500m 范围内进行爆破的，应当事先征得管道企业同意，在采取安全保护措施后方可进行。

第二十三条　任何单位在管道设施安全保护范围内进行下列施工时，应当事先通知管道企业，并采取相应的保护措施：

（一）新建、改（扩）建铁路、公路、桥梁、河渠、架空电力线路；

（二）埋设地下电（光）缆；

（三）设置安全或者避雷接地体。

综合前苏联及我国相关规定，±800kV 直流架空线路对管道和索道交叉和接近距离规定如下：在开阔地区，线路与特殊管道平行接近时，线路边导线至管道任何部分的最小水平距离不小于平行地段线路的最高杆塔高度。在路径受限制地区，边导线在最大风偏情况下对特殊管道的水平距离，按步行可以到达山坡考虑并适当增加裕度，取值为 15m。±800kV 直流架空线路对管道和索道最小水平距离见表 33。

表 33　±800kV 直流架空线路对管道和索道最小水平距离

线路与管道和索道交叉或接近特征	最小（净空）距离（m）	备注
交叉、开阔地区，基础至架空管道、索道水平距离	杆塔高度	
交叉、受限地区，基础至架空管道、索道水平距离	15.0	
平行，边导线至架空天然气主管道	2 倍杆塔高度	无风时
平行，边导线至架空石油主管道	50，且不小于杆塔高度	无风时
平行，边导线至其他架空管道	15	最大风偏

平行，边导线至埋地油气主管道	55	无风时
平行或交叉，杆塔接地体或基础至埋地油气主管道	25	
线路中心线至天然气主管道排气阀	300	

综合前苏联及我国相关规定，参考±800kV 取值原则，±1100kV 直流架空线路对管道和索道交叉和接近距离规定如下：在开阔地区，线路与特殊管道平行接近时，线路边导线至管道任何部分的最小水平距离不小于平行地段线路的最高杆塔高度；在路径受限制地区，边导线在最大风偏情况下对特殊管道的水平距离，按步行可以到达山坡考虑并适当增加裕度，取值为 17.5m。

±1100kV 直流架空线路对管道和索道推荐最小水平距离见表 34。

表 34　±1100kV 直流架空线路对管道和索道最小水平距离

线路与管道和索道交叉或接近特征	最小（净空）距离（m）	备　注
交叉、开阔地区，基础至架空管道、索道水平距离	杆塔高度	
交叉、受限地区，基础至架空管道、索道水平距离	17.5	
平行，边导线至架空天然气主管道	2 倍杆塔高度	无风时
平行，边导线至架空石油主管道	55，且不小于杆塔高度	无风时
平行，边导线至其他架空管道	20	最大风偏
平行，边导线至埋地油气主管道	60	无风时
平行或交叉，杆塔接地体或基础至埋地油气主管道	30	
线路中心线至天然气主管道排气阀	300	

7　对河流的交叉跨越距离

1）　跨越通航河流的最小垂直距离

跨越河流时，我国 500kV 第一代线路设计标准：距通航河流 5 年一遇洪水位 l0m，距最高船桅 6m。不通航河流：距 100 年一遇洪水位 7m，冬季至冰面 12m。目前第二代设计：全国大部分地区的设计距通航河流 5 年一遇洪水位 9.5m，距最高船桅：东北地区为 5.5m，其余地区多为 6m。对不通航河流距 100 年一遇洪水位，东北、华东地区为 6.5m；其余地区仍多为 7m。冬季至冰面：都按 11m 设计（三角排列铁塔取 10.5m）。根据上述情况，在跨越通航河流时，导线至五年一遇洪水位的最小垂直距离参照我国 500kV 线路的要求首先考虑最大操作过电压间隙，考虑小型船只活动高度 3.5m，加裕度 3m。500kV 线路取 9.5m，750kV 线路取 11.5m，1000kV 线路为保证洪水面场强不大于 20kV/m，最小交叉垂直距离单、双回路分别取 14m 和 13m。

根据目前工程办理通航河流跨越手续情况，航道部门对输电线路跨越通航河流的垂直距离主要考虑两方面因素：一是导线最大弧垂时至最高航行水位桅顶要满足操作过电压间隙加上合理裕度；二是导线最大弧垂至最高航行水位最高层甲板满足人员活动时的电磁环境限制要求。

±800kV 特高压直流线路考虑最大操作过电压间隙 7.5m，考虑小型船只活动高度 3.5m，加裕度 3m，取值 14.0m 时，校核洪水面场强标称场强 21.3kV/m，合成场强雨天 49.3kV/m、晴天 40.5kV/m；±800kV 特高压直流线路导线对洪水面的场强按合成场强雨天 50kV/m、晴天 42kV/m 控制，推荐取值为 15m。导线至最高航行水位的最高船桅顶的最小垂直距离按导线最大操作过电压间隙 7.5m 加 3m 裕度，取为 10.5m。

±1100kV 昌吉-古泉输电线路工程在办理通航协议时，航运部门提出，电力线路跨越通航河流，导线距船舶人员活动范围（驾驶室甲板）的垂直距离要按照场强限值来考虑。

跨越通航河流时，设计单位应充分调查船舶人员活动面及桅杆高度，并取得航运部门认可。华东院在设计长江大跨越时，进行了大量调查，经交通运输部专家评审，建议长江万吨级海轮和内河千吨级船舶人员活动面至桅杆顶部取 7m，内河 300 吨级、500 吨级船舶人员活动面至桅杆顶部取值 5.5m。

参考±800kV 线路的取值原则，±1100kV 线路跨越通航河流时，导线至最高航行水位的最高船桅顶的最小垂直距离按导线最大操作过电压间隙 10m 加上 3m 裕度，取值 13m。至船舶驾驶甲板或人员活动平台按合成场强雨天 50kV/m、晴天 42kV/m 控制，推荐取值为 19.5m。

2） 跨越不通航河流的最小垂直距离

跨越不通航河流时，导线至百年一遇洪水位的最小垂直距离 500kV 线路取为 6.5m，750kV 线路取为 8m，1000kV 线路取为 10m。±800kV 特高压直流线路考虑最大操作过电压间隙 7.5m，考虑漂浮物高度 2m，加裕度 3m，取值 12.5m。±1100kV 直流线路跨越不通航河流时，距百年一遇洪水位的距离考虑最大操作过电压间隙 10m，考虑漂浮物高度 2m，加裕度 3m，取值 15m。冬季导线至冰面的最小垂直距离按非居民区（农业耕作区）的要求，推荐取值 25m。最高洪水位时，有抢险船只航行的河流，垂直距离应通过协商确定。

3） 与河流的水平距离

导线与河流的水平距离，塔位至按河堤的最小水平距离，按河堤保护范围之外或按协议取值。

12.0.10 输电线路与管道在平行接近具体距离很长时，需要按线路的参数和管道的特性具体分析计算确定是否需要采用特殊的防护措施。

输电线路平行接近低压线或电信线时，在输电线路正常运行的情况下，由容性耦合可能对人产生危险；在输电线路发生短路接地故障的情况下，由感性耦合可能对低压线和电信线的用电设备产生危险影响。

目前我国采用的电信线路主要分为三类：架空明线电信线路、全塑电缆电信线路和光缆电信线路。根据中国电科院研究报告，各种电信线路和低压线的危险影响感应电压允许值为：

（1）架空明线电信线路：感应电压允许值为 3000V（峰值）。

（2）全塑电缆电信线路：感应电压允许值为 6000×0.85=5100V（峰值）。

（3）光缆电信线路：光缆金属构件（加强芯）上的感应电压允许值为 20000×0.85=17000V（峰值）。无金属构件和无金属线的光缆电信线路不考虑危险影响。

（4）低压线：低压线上的感应电压允许值应由设备的安全电压和人身安全电压共同确定，允许值为 2121V（峰值）。

中国电科院经过计算，输电线路发生接地短路，与电信线或低压线平行接近时，线路短路时由感性耦合产生的纵感应电动势如下表。设计单位可根据电信线路和低压线的危险影响感应电压的允许值，确定平行间距及平行长度。

表 35　±1100kV 直流架空线路与低压线平行接近时的感应电动势

	7m	57m	107m	157m	207m	257m	307m	357m	407m	457m	507m	557m	607m	657m	707m	807m	907m	1007m	1507m	2007m	3007m
0.2km	331	260	217	188	167	150	136	125	115	107	100	93	87	82	77	69	62	56	39	32	28
0.4km	662	520	434	376	333	300	273	250	231	214	199	186	175	164	154	137	124	112	77	64	56
0.6km	992	780	651	564	500	450	409	375	346	321	299	280	262	246	231	206	186	169	116	96	85
0.8km	1323	1041	868	752	667	600	546	501	462	428	399	373	349	328	308	275	248	225	155	128	113
1km	1654	1301	1085	940	833	750	682	626	577	535	499	466	437	411	384	343	309	281	194	160	141
1.2km	1985	1561	1302	1128	1000	900	819	751	693	642	598	559	524	493	461	412	371	337	232	193	169
1.4km	2316	1821	1518	1315	1166	1050	955	876	808	750	698	652	611	575	538	481	433	393	271	225	197
1.6km	2646	2081	1735	1503	1333	1200	1092	1001	924	857	798	745	699	657	615	550	495	449	310	257	226
1.8km	2977	2341	1952	1691	1500	1350	1228	1126	1039	964	897	839	786	739	692	618	557	506	348	289	254
2km	3308	2601	2169	1879	1666	1500	1365	1251	1155	1071	997	932	874	821	769	687	619	562	387	321	282
2.2km	3639	2861	2386	2067	1833	1650	1501	1377	1270	1178	1097	1025	961	903	846	756	681	618	426	353	310
2.4km	3970	3122	2603	2255	2000	1800	1638	1502	1386	1285	1196	1118	1048	985	923	824	743	674	465	385	338
2.6km	4300	3382	2820	2443	2166	1950	1774	1627	1501	1392	1296	1211	1136	1068	1000	893	805	730	503	417	366
2.8km	4631	3642	3037	2631	2333	2100	1911	1752	1617	1499	1396	1305	1223	1150	1076	962	866	787	542	449	395
3km	4962	3902	3254	2819	2500	2250	2047	1877	1732	1606	1496	1398	1310	1232	1153	1030	928	843	581	481	423
3.2km	5293	4162	3471	3007	2666	2400	2184	2002	1847	1713	1595	1491	1398	1314	1230	1099	990	899	620	514	451
3.4km	5624	4422	3688	3195	2833	2550	2320	2127	1963	1820	1695	1584	1485	1396	1307	1168	1052	955	658	546	479
3.6km	5954	4682	3905	3383	2999	2700	2456	2253	2078	1927	1795	1677	1572	1478	1384	1237	1114	1011	697	578	507
3.8km	6285	4943	4122	3571	3166	2850	2593	2378	2194	2034	1894	1770	1660	1560	1461	1305	1176	1067	736	610	536
4km	6616	5203	4338	3759	3333	3000	2729	2503	2309	2141	1994	1864	1747	1642	1538	1374	1238	1124	774	642	564
4.2km	6947	5463	4555	3946	3499	3150	2866	2628	2425	2249	2094	1957	1834	1725	1615	1443	1300	1180	813	674	592
4.4km	7278	5723	4772	4134	3666	3300	3002	2753	2540	2356	2194	2050	1922	1807	1692	1511	1361	1236	852	706	620
4.6km	7608	5983	4989	4322	3833	3450	3139	2878	2656	2463	2293	2143	2009	1889	1768	1580	1423	1292	891	738	648
4.8km	7939	6243	5206	4510	3999	3600	3275	3003	2771	2570	2393	2236	2096	1971	1845	1649	1485	1348	929	770	677
5km	8270	6503	5423	4698	4166	3750	3412	3129	2887	2677	2493	2329	2184	2053	1922	1717	1547	1405	968	802	705

注：横列为平行距离，单位 m；纵列为平行长度，单位 km；感应电压单位为 V。

13　走廊通道

13.0.2　对于档距较小，树木较高的情况，有可能满足导线风偏距离，但不满足树木倾倒对导线的距离，故需校核。

13.0.3　拟封闭、拆迁的厂矿、企业等大型障碍设施，应在评估机构的配合下，对于确需封闭、拆迁的厂矿、企业等障碍设施，建设管理单位应在初步设计阶段开展与矿权人或企业业主就经济补偿进行实质性谈判，确定补偿费用并签订意向性协议，相关费用需计入初设概算；协议签订时，如经济补偿谈判难度较大，必要时可申请政府部门介入，协调解决，同时设计单位予以配合；如因补偿费用而无法达成一致时，设计单位应增加避让方案，并对避让方案与原拆迁、封闭方案进行技术经济比较，并最终确定所采取的路径方案。

13.0.4　参考《±800kV 直流架空输电线路设计规范》GB 50790-2013 中的规定：±800kV 线路与甲类火灾危险性的生产厂房、甲类物品库房、易燃、易爆材料堆场，以及可燃或易燃、易爆液（气）体储罐的防火间距，不应小于杆塔全高加 3m。根据《汽车加油加气站设计与施工规范》GB 50156-2012 规定：加油站、加油加气合建站的油罐、加油机和通气管口与架空电力线路的防火距离不应小于表 36 数值。

表 36　线路与加油站防火距离

埋地油罐（一级站）	埋地油罐（二级站）	埋地油罐（三级站）	通气管管口	加油机
1.5 倍杆塔高且不应小于 6.5m	1 倍杆塔高且不应小于 6.5m	6.5m	6.5m	6.5m

13.0.5　现行标准《爆破安全规范》GB 6722-2014中规定，一般工程爆破个别飞散物对人员的安全距离不应小于表37的规定；对设备或建（构）物的安全允许距离，应由设计确定。

表 37　爆破个别飞散物对人员的安全允许距离

爆破类型和方法		个别飞散物的最小安全允许距离/m
露天岩土爆破	浅孔爆破法破大块	300
	浅孔台阶爆破	200(复杂地质条件下或未形成台阶工作面时不小于 300)
	深孔台阶爆破	按设计，但不大于 200
	硐室爆破	按设计，但不大于 300
沿山坡爆破时，下坡方向的个别飞散物安全允许距离应增大 50%。		

现行《电力设施保护条例实施细则》第十条规定，任何单位和个人不得在距电力设施范围 500 米内（指水平距离）进行爆破作业。因工作需要必须进行爆破时，应当按国家颁发的有关爆破作业

的法律法规，采取可靠的安全防范措施，确保电力设施安全，并征得当地电力设施产权单位或管理部门的书面同意，报经政府有关管理部门批推。在规定范围外进行的爆破作业必须确保电力设施的安全。

故考虑人员的巡视安全，线路距露天开采的矿山安全距离一般为300m，同时亦可看出《电力设施保护条例实施细则》并未禁止在电力线路周围500米内（指水平距离）进行爆破作业。

13.0.6　主要考虑如下情况。

1　在有条件的情况下，线路应尽量远离炸药库，若因线路走廊限制，线路对爆破器材库最小距离应满足以下规定：

（1）线路与民用爆破器材库的安全距离，应根据存放的危险品等级、计算药量、建筑物危险等级等，参考《民用爆破器材工程设计安全规范》GB 50089-2007执行。线路与危险品生产区1.1级建筑物、危险品总仓库区1.1级建筑物的外部安全距离应不低于下表规定。

表38　220kV以上的架空输电线路与危险品生产区1.1级建筑物的外部安全距离

单个建筑物存药量（kg）	20000	18000	16000	14000	12000	10000	9000
与库区距离（m）	1040	1010	970	940	880	830	810
单个建筑物存药量（kg）	8000	7000	6000	5000	4000	3000	2000
与库区距离（m）	770	740	700	670	610	560	490
单个建筑物存药量（kg）	1000	500	300	200	100	50	/
与库区距离（m）	400	350	320	300	280	250	/

表39　220kV以上的架空输电线路与危险品总库区1.1级建筑物的外部安全距离

单个建筑物存药量（kg）	200000	180000	160000	140000	120000	100000	90000
与库区距离（m）	2000	1930	1850	1760	1680	1580	1530
单个建筑物存药量（kg）	80000	70000	60000	50000	45000	40000	35000
与库区距离（m）	1480	1400	1330	1260	1210	1170	1120
单个建筑物存药量（kg）	30000	25000	20000	18000	16000	14000	12000
与库区距离（m）	1060	990	940	900	860	830	770
单个建筑物存药量（kg）	10000	9000	8000	7000	6000	5000	2000
与库区距离（m）	740	720	680	650	630	590	430
单个建筑物存药量（kg）	1000	500	300	100	/	/	/
与库区距离（m）	380	310	290	280	/	/	/

注：1　以上数值取自《民用爆破器材工程设计安全规范》GB 50089-2007。

2　表中距离为220kV以上架空输电线路数值，建议±1100kV线路按照不低于220kV以上线路要求值执行。

3　表中外部距离适用于平坦地形，遇有利地形可适当折减，遇不利地形宜适当增加。有关地形利用的条件及增减值见《民用爆破器材工程设计安全规范》GB 50089-2007附录A。

（2）对于地下炸药库，应根据其地质、地形特点及炸药当量，满足《地下及覆土火药炸药仓库设计安全规范》GB 50154-2009要求。对于缓坡地形岩石洞库，爆炸飞石外部允许安全距离应按下表取值后，再乘以相应的折减系数。

表40　线路与缓坡地形岩石洞库爆炸飞石的外部允许距离

装药等效直径（m）		3.79	3.44	3.01	2.39	2.22	2.01	1.76	1.40
存药量（t）		200	150	100	50	40	30	20	10
与峒库口轴线交角（α）	0°＜α＜50°	2500	2250	1950	1530	1400	1280	1100	860
	50°＜α＜60°	1750	1575	1365	1071	980	896	770	602
	60°＜α＜70°	1500	1350	1170	918	840	768	660	516
	70°＜α＜80°	1250	1125	975	765	700	640	550	430
	80°＜α＜90°	1000	1000	780	612	560	512	440	344

注：1　表中距离为750kV线路要求距离，规范中未给出±1100kV线路要求距离值，建议±1100kV按照不低于750kV线路要求值执行。

2　表中存药量指梯恩梯当量，当为其他火药、炸药时，应换算为梯恩梯当量。

3　当洞库存药条件中横截面积比小于0.23时，其外部允许距离应按表中距离乘以0.85。

4　实际等效存药直径为中间值时，其相应存药量和外部允许距离应采用线性插入法确定。

5　表中距离指水平投影距离，由洞口的中心点算起。

2　在有条件的情况下，线路应尽量远离烟花爆竹仓库，若因线路走廊限制，线路对烟花爆竹仓库最小距离应满足以下规定：

对于地面爆破器材库，应满足《烟花爆竹工程设计安全规范》GB 50161-2009的相关规定。

表41　220kV以上的架空输电线路与危险品总仓库区1.1级仓库最小外部距离

计算药量（吨）	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
与地面库距离（m）	315	400	510	580	630	690
存药量（吨）	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	/
与地面库距离（m）	720	760	800	830	860	/

表42　220kV以上的架空输电线路与危险品总仓库区1.3级仓库最小外部距离

计算药量（吨）	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
与地面库距离（m）	70	110	120	130	140	150

存药量（吨）	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	/
与地面库距离（m）	160	170	180	190	250	/

注：1 表中距离为220kV以上的架空输电线路线路，建议±1100kV按照不低于220kV以上线路要求值执行。

2 表中距离应自危险性建筑物的外墙算起。

3 仓库建筑物风险级别应由仓库管理部门书面确认。

2 对于不满足安全距离要求的炸药库、烟花爆竹仓库等障碍设施按封闭或拆迁考虑。

13.0.7 直流输电线路对输油（气）管道的电磁影响从机理上可分为感性耦合影响、阻性耦合影响和容性耦合影响三类。直流输电线路对管道的电磁影响主要涉及对人身安全的影响、对管道安全的影响以及对管道的腐蚀影响等问题。线路与地埋输油（气）管道的最小交叉角度和平行接近距离，是否满足要求及防护措施，应根据线路和管道的具体参数计算确定。线路不应跨越输油（气）管道的泵站、排气阀等设施，同时还要满足其他有关规定。

13.0.8 为避免线路对邻近的电信线路产生的危险及干扰影响，应根据电信线路与输电线路的实际接近情况，按《直流架空输电线路对电信线路危险和干扰影响防护设计技术规程》DLT 5340-2015进行影响程度计算，并对影响超过标准的电信线路制定保护措施。对低压线影响的计算方法可参照电信线路危险影响计算执行。

13.0.9 根据目前的测量精度及控制原理，单一回路直流输电线路的不平衡电流允许值为±10A是完全可能的，多回路直流输电线路并行，如此小的不平衡电流情况下电流方向已不可控，需组合计算多回路直流输电线路与地磁观测点的距离。

14　环境保护和水土保持

14.0.1　输电线路设计应符合国家环境保护、水土保持和生态环境等相关法律、法规以及工程环境保护、水土保持方案书的要求。工程设计各阶段应落实环评、水保方案提出的相关措施，在设计文件中有所回应。为此，国家电网公司专门编制了《特高压直流输电线路工程环保、水保措施专项设计编制细则》（试行），工程设计中可参照执行。

14.0.2　输电线路对环境的电磁影响应遵照现行行标《环境影响评价技术导则输变电工程》HJ 24 的要求进行控制，应符合现行国标《电磁环境控制限制》GB8702、《高压交流架空送电线无线电干扰限值》GB 15707、《高压架空输电线、变电站无线电干扰测量方法》GB 7349 等的规定。输电线路噪声对周围环境的影响必须按现行国标《声环境质量标准》GB 3096 的规定进行控制。

14.0.3~14.0.5　输电线路的水土保持方案编制必须符合现行国标《水土保持综合治理技术规范》GB 16453 的有关规定以及现行行标《开发建设项目水土保持方案技术规范》SL 204 的要求。

1　输电线路设计中应采取以下治理措施：

1）　输电线路在选线过程应尽可能避开民居。

2）　山区线路应采用全方位高低腿加高低基础相组合，以适应地形发生的变化，减少塔位处植被的破坏。

3）　在输电线路塔基区域设置相应警告。

4）　输电线路的选线和建设应符合国家《全国生态环境保护纲要》的有关要求。根据绿化规划应因地制宜在输电线路塔基区、施工道路等周边地区种植草皮，恢复植被。

2　输电线路环境影响评价和编制水土保持方案中采用的手段与方法所涉及到的标准和规范主要有：

1）　输电线路环境影响评价中采用的手段与方法所涉及到的标准和规范：

《辐射环境保护管理导则 电磁辐射监测仪器和方法》HJ/T 10.2-1996 和《高压架空输电线、变电站无线电干扰测量方法》GB/T 7349-2002 对电磁辐射射频段测量方法的规定；

《工频电场测量》GB 12720-1991 对工频电场测量方法的规定；

《声环境质量标准》GB 3096-2008 中对环境噪声测量方法的规定；

《环境影响评价技术导则 生态影响》HJ 19-2011；

《环境影响评价技术导则 声环境》HJ 2.4-2009；

《辐射环境保护管理导则 电磁辐射环境影响评价方法与标准》HJ/T 10.3-1996；

《环境影响评价技术导则 输变电工程》HJ 24-2014。

2）　输电线路编制水土保持方案中采用的手段与方法所涉及到的标准、规范和规定：

国务院国发［2000］第 38 号文《全国生态环境保护纲要》；

关于印发《全国水土保持预防监督纲要》的通知，水保［2004］332 号；

《开发建设项目水土保持方案技术规范》SL 204-98；

《水土保持综合治理 技术规范》GB/T 16453.1～16453.6-2008；

《水土保持监测技术规程》SL 277-2002；

《土壤侵蚀分类分级标准》SL 190-2007；

《水利水电工程制图标准 水土保持图》SL 73.6-2001；

《防洪标准》GB 50201-2014；

《电力建设工程概算定额》。

15　劳动安全和工业卫生

本章内容针对国家对劳动安全与工业卫生工作的要求，结合输电线路的具体特点，参照有关标准的相关内容编制。

16　附属设施

16.0.1　巡线站的设置与否跟沿线交通条件关系很大，在交通方便地区一般不需要设置保线站。

16.0.2　按以往的惯例运行管理部门确有此需要，故一直沿用至今，根据近年来线路运行中发生的攀爬、触电事故，增加“设置高压危险，禁止攀爬杆塔和接近”，并增加“杆塔上固定标志的尺寸、颜色和内容还应符合运行部门的要求”。根据铁路部门的要求，跨越铁路时杆塔处应设置标志牌，标明以下信息：电压等级、走廊宽度、轨顶的导线最低点高度、相对轨顶的设施限高、安全绝缘距离等。

16.0.3　根据现在的通信条件完全没有架设检修专用通信线路的必要，对于大山、大森林或荒原等通信困难地段，也应采用适当的先进通信手段而不宜架设专用通信线，宜根据现有运行条件配备适当的通信设施。

16.0.4　休息平台设置在脚钉所在主材的对角位置，靠在塔身内，并采取相应的防滑措施。