

电网工程部送电电气专业技术培训专题

专题之十二 国外相关标准介绍及国内外标准对比

2011 年 12 月

批准：

审核：

校核：

编写：王志强 周彦军 王新宇

目 录

1. 国外相关标准介绍	1
2. 国内外标准对比	3
2.1 气象条件	3
2.1.1 国内标准中的气象条件（GB50545）	3
2.1.2 国外标准中的气象条件（IEC 60826）	5
2.2 导线和地线	6
2.2.1 国内标准中的导线和地线（GB50545）	6
2.2.2 国外标准中的导线和地线	7
2.3 绝缘子和金具	8
2.3.1 国内标中的绝缘子和金具（GB50545）	8
2.3.2 国外标中的绝缘子和金具	9
2.4 绝缘配合	12
2.4.1 国内标准中的绝缘配合（GB50545）	12
2.4.2 国外标准中的绝缘配合(IEC).....	16
2.5 荷载组合	31
2.5.1 国内标准中的荷载组合（GB50545）	31
2.5.2 国外标准中的荷载组合（IEC 60826）	33
2.6 荷载计算	35
2.6.1 国内标准中的荷载（GB50545）	35
2.6.2 国外标准中的荷载（IEC 60826）	37
3. 国内外导线风荷载计算对比	47
3.1 IEC、ASCE、GB50545 规范导线风荷载计算的对比	47
3.1.1 基本风速	47
3.1.2 导线风荷载对比分析	48
3.1.3 结论	50
3.2 中印规范关于导线风荷载计算的对比	50
3.2.1 印度荷载规范中风压计算式	50

3.2.2 两国规范参数取值对比	51
3.2.3 结论	53

前言

本培训专题将电网工程部近 10 年设计的国外输电线路工程中电气专业所涉及到的相关国外标准进行介绍说明。旨在通过使用本培训专题，使没有从事过国外工程设计的设计人员对相关国外设计标准有所了解，提高工程设计人员国外工程的设计水平，为建设国际型一流工程公司战略目标的实现进行基本专业知识储备。

1. 国外相关标准介绍

目前，我公司所设计的国外输电线路工程中，线路电气专业设计所涉及的国外标准主要有 IEC（国际电工委员会）标准、IEEE（电气和电子工程师协会）标准、EN（欧洲）标准等国际通用技术标准，以及尼日利亚国家电力行业标准。上述标准对线路工程设计所采用的材料、设备及设计方法等方面进行了相应规定。现将各相关标准目录列表介绍如下。

表 1—1 线路电气专业所涉及的 IEC 相关标准目录

IEC_60028-1925 铜电阻的国际标准
IEC_60888-1987 镀锌钢绞线
IEC_61089_AMD_1-1997 圆线同心绞架空导线
IEC_61232-1993 电工用铝包钢线
IEC_62219-2002 架空导线-常规导线，同轴布置，绞合导线
IEC_61395-1998 架空导线的蠕变试验
IEC_60104-1987 用于架空导线的铝镁硅合金导线
IEC_TR_61597-1995 架空绞合裸导线的计算方法
IEC_TR_61394-1997 铝、铝合金和裸钢架空导线的润滑脂性质
IEC_60105-1958 工业纯铝母线材料推荐
IEC_60114-1959 铝镁硅型热处理铝合金母线材料推荐
IEC_60121-1960 工业用退火铝导线推荐
IEC_60826-2003 架空线的设计标准
IEC_60826-1991 架空导线的负载强度
IEC_TR_61640-1998 用于 725kV 及以上电压等级的刚性高压、气体绝缘传输线
IEC_61865-2001 架空线电气元件带电部位与障碍物距离的计算
IEC_61284-1997 架空线设备的要求和试验
IEC_61854-1998 架空线间隔棒的要求和试验
IEC_61897-1998 架空线型风震减震器的要求和试验
IEC_60815-1986 不同污秽条件下绝缘子的选择原则

IEC_60720-1981 线路柱式绝缘子特性
IEC_60273-1990 额定电压 1000V 以上系统的户内户外柱式绝缘子特性
IEC_60305-1995 额定电压 1000V 以上架空线绝缘子-直流系统的陶瓷或玻璃绝缘子单元-碗式和针式绝缘子单元的特性
IEC_60433-1998 额定电压 1000V 以上的架空线绝缘子-直流系统陶瓷绝缘子-长棒式绝缘子特性
IEC_61325-1995 用于额定电压 1000v 以上架空线的绝缘子-用于直流系统的陶瓷和玻璃绝缘子的定义，试验和验收准则
IEC_61952-2002 架空线路绝缘子-交流额定电压大于 1000v 的复合线路柱式绝缘子
IEC_61109_AMD_1-1995 用于额定电压 1000v 以上的直流架空线的复合绝缘子-定义，试验方法和验收准则
IEC_60383-1-1993 用于直流系统的陶瓷或玻璃绝缘子单元-定义、试验方法和检验标准
IEC_60383-2-1993 额定电压 1000V 以上的架空线绝缘子-直流系统绝缘子串和绝缘子组定义、实验法方法和检验标准
IEC_60383-1983 额定电压 1000V 以上的架空线陶瓷材料或玻璃绝缘子的试验
IEC_60168-2001 额定电压 1000V 以上系统的户内户外陶瓷或玻璃柱式绝缘子试验
IEC_60137-2003 1000V 以上交流电压的绝缘套管
IEC_61466-1-1997 用于额定电压 1000v 以上架空线的复合绝缘子串-标准应力等级和终端部件
IEC_61466-2-1998 用于额定电压 1000v 以上架空线的复合绝缘子串-尺寸和机械特性
IEC_60120-1984 绝缘子串元件的球窝连接器尺寸
IEC_60372_AMD_2-2003 串式绝缘子单元球窝连接器闭锁装置的尺寸和试验
IEC_60437-1997 高压绝缘子的无线电干扰试验
IEC_60471_AMD_1-1980 槽型连接绝缘子串的尺寸
IEC_60507-1991-用于直流系统的高压绝缘子人造污染试验
IEC_60575-1977 绝缘子串的热机械性能试验和机械性能试验
IEC_60591-1978 将数据控制方法用于 1000v 以上架空线的陶瓷或玻璃绝缘子的机械和机电试验时的取样原则和验收准则
IEC_60797-1984 架空线玻璃或陶瓷绝缘子介质机械损坏后的残余应力
IEC_60071-1-1993 绝缘配合的定义、原则和规范
IEC_60071-2-1996 绝缘配合的应用指南

表 1—2 线路电气专业所涉及的 IEEE 相关标准目录

IEEE_1138-1994 用于电气电源线的光纤复合架空地线（OPGW）IEEE 标准结构
IEEE_987-2001 复合绝缘子应用指南
IEEE_1313~1-1996 绝缘配合标准-定义原则和规则
IEEE_1313~2-1999 绝缘配合应用指南
IEEE_1313~2-1999 绝缘配置的应用指南
IEEE_656-1992 架空线路可听噪声测量

表 1-3 线路电气专业所涉及的 EN 相关标准目录

BS EN 50341-1-2001 交流电压 45 kV 以上架空电力线. 通用规范
CEI EN 187200 电力线路使用的光缆, (OCEPL) -2001 年 5 月 10-18 日

表 1-4 线路电气专业所涉及的尼日利亚相关标准目录

TS3000_尼日利亚 MAKURDI-JOS 330kV 双回输变电总承包工程线路标准技术规范
TS3100_尼日利亚 MAKURDI-JOS 330kV 双回输变电总承包工程铁塔供货的标准技术规范
TS4600_尼日利亚 MAKURDI-JOS 330kV 双回输变电总承包工程线路导线、镀锌钢绞线、OPGW 标准技术规范
TS4610_尼日利亚 MAKURDI-JOS 330kV 双回输变电总承包工程线路绝缘子、金具串标准技术规范

2. 国内外标准对比

2.1 气象条件

2.1.1 国内标准中的气象条件 (GB50545)

1) 气象区

表 2.1 典型气象区

气 象 区		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	
大 气 温 度 ℃	最 高	+40									
	最 低	-5	-10	-10	-20	-10	-20	-40	-20	-20	
	覆 冰	-5									
	基本风速	+10	+10	-5	-5	+10	-5	-5	-5	-5	
	安 装	0	0	-5	-10	-5	-10	-15	-10	-10	
	雷电过电压	+15									
	操作过电压、年平均气温	+20	+15	+15	+10	+15	+10	-5	+10	+10	
风 速 m/s	基本风速	31.5	27	23.5	23.5	27	23.5	27	27	27	
	覆 冰	10*							15		
	安 装	10									
	雷电过电压	15	10								
	操作过电压	0.5×基本风速折算至导线平均高度处的风速(不低于15m/s)									
覆冰厚度 (mm)		0	5	5	5	10	10	10	15	20	
冰的密度 (g/cm ³)		0.9									

注：* 一般情况下覆冰同时风速10m/s，当有可靠资料表明需加大风速时可取为15m/s。

2) 国内关于气象条件的规定

a) 750kV、500kV 输电线路及其大跨越重现期应取 50 年。

110kV~330kV 输电线路及其大跨越重现期应取 30 年。

b) 确定基本风速时，应按当地气象台、站 10min 时距平均的年最大风速为样本，并宜采用极值 I 型分布作为概率模型，统计风速的高度应符合下列规定：

110kV~750kV 输电线路统计风速应取离地面 10m。

各级电压大跨越统计风速应取离历年大风季节平均最低水位 10m。

c) 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，并应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%。

d) 110kV~330kV 输电线路的基本风速，不宜低于 23.5m/s；500kV~750kV 输电线路，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。

e) 轻冰区宜按无冰、5mm 或 10mm 覆冰厚度设计，中冰区宜按 15mm 或 20mm 覆冰厚度设计，重冰区宜按 20mm、30mm、40mm 或 50mm 覆冰厚度等设计，必要时还宜按稀有覆冰条件进行验算。

地线设计冰厚，除无冰区段外，应较导线冰厚增加 5mm。

f) 设计用年平均气温，应按下列规定取值：

当地区年平均气温在 3℃~17℃时，宜取与年平均气温值邻近的 5 的倍数；

当地区年平均气温小于 3℃和大于 17℃时，分别按年平均气温减少 3℃和 5℃后，取与此数邻近的 5 的倍数值。

g) 安装工况风速应采用 10m/s，覆冰厚度应采用无冰，同时气温应按下列规定取值：

最低气温为-40℃的地区，宜采用-15℃；

最低气温为-20℃的地区，宜采用-10℃；

最低气温为-10℃的地区，宜采用-5℃；

最低气温为-5℃的地区，宜采用 0℃。

h) 雷电过电压工况的气温宜采用 15℃，当基本风速折算到导线平均高度处其值大于等于 35m/s 时雷电过电压工况的风速宜取 15m/s，否则取 10m/s；

校验导线与地线之间的距离时，应采用无风、无冰工况。

i) 操作过电压工况的气温可采用年平均气温，风速宜取基本风速折算到导线平均高度处的风速的 50%，但不宜低于 15m/s，且应无冰。

j) 带电作业工况的风速可采用 10m/s，气温可采用 15℃，覆冰厚度应采用无冰。

2.1.2 国外标准中的气象条件（IEC 60826）

1) 气象重现周期

输电电路设计有不同的可靠性等级。IEC 标准中把参考可靠性水平定义为气象条件的重现周期为 50 年以及强度的排除极限为 10% (用于选择最低可靠性的元件)。

可以通过增加气象条件的重现周期来提高线路的可靠性水平。

标准中提出了三个可靠性等级，认为这三个等级包含了大多数输电线路的可靠性范围。

表 2.2 传输线的可靠性水平

可靠性水平	1	2	3
气象重现周期 T	50	150	500

对于临时线路，一些木质杆或重要性等级要求不高的线路，可能取 25 年的重现周期比较合适。

重现周期介于 50-500 年之间的如 100、200、400 年根据当地的实际情况也可以考虑使用。

任何重现周期下的气象变量都可以用 50 年重现周期参考变量乘以表 2 中给出的荷载因数 γ_T 来估算。

表 2.3 荷载因数 γ_T ，用来调整重现周期不是 50 年的荷载

Return period T years	Wind speed	Ice variable		
	γ_{TW}	γ_{Ti} (Ice thickness)	or	γ_{TiW} (Ice weight)
50	1	1		1
150	1,10	1,15		1,20
500	1,20	1,30		1,45

2) 风速

表 2.4 地形分类

地形类型	地形特征	转换系数
A	广阔的水域或平坦的沿海地区	1.08
B	只有少量障碍物的空旷野外，如机场或少量数目和建筑的耕地	1.00
C	有很多低矮障碍物的地区，如围栏，树木，房屋	0.85
D	近郊地区或有很多高大树木的地区	0.67

注意：

1. K_R 为各种地形下风速的转换系数，以 B 类型为基准。
2. 当地形介于两种类型之间时，保险起见取更平滑类型。
3. 当线路沿着峡谷时，始终选择 C 型

(IEC 60826)

2.2 导线和地线

2.2.1 国内标准中的导线和地线 (GB50545)

1) 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。

2) 导、地线在弧垂最低点的最大张力，应按下式计算：

$$T_{\max} \leq \frac{T_p}{K_c}$$

式中： T_{\max} ——导、地线在弧垂最低点的最大张力 (N)；

T_p ——导、地线的拉断力 (N)；

K_c ——导、地线的设计安全系数。

3) 在稀有风速或稀有覆冰气象条件时，弧垂最低点的最大张力，不应超过其导、地线拉断力的 70%。

悬挂点的最大张力，不应超过导、地线拉断力的 77%。

4) 地线采用镀锌钢绞线时与导线的配合应符合表 3.1 的规定。

表 2.2.1 地线采用镀锌钢绞线时与导线的配合

导线型号		LGJ-185/30 及以下	LGJ-185/45~LGJ-400/35	LGJ-400/50 及以上
镀锌钢绞线最小 标称截面 (mm ²)	无冰区段	35	50	80
	覆冰区段	50	80	100

注：500kV 及以上输电线路无冰区段、覆冰区段地线采用镀锌钢绞线时最小标称截面应分别不小于 80mm²、100mm²。

5) 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。当无资料时，镀锌钢绞线的塑性伸长可采用 1×10^{-4} ，并降低温度 10℃ 补偿；钢芯铝绞线的塑性伸长及降温值可按表 3.2 的规定确定。

表 2.2.2 钢芯铝绞线的塑性伸长及降温值

铝钢截面比	塑性伸长	降温值 (℃)
4.29~4.38	3×10^{-4}	15
5.05~6.16	$3 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-4}$	15~20
7.71~7.91	$4 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-4}$	20~25
11.34~14.46	$5 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{-4}$	25 (或根据试验数据确定)

注：对铝包钢绞线、大铝钢截面比的钢芯铝绞线或钢芯铝合金绞线应由制造厂家提供塑性伸长值或降温值。

2.2.2 国外标准中的导线和地线

1) 导线和地线设计要在相应控制档距内单位长度导线承受最严重结果的荷载情况下进行。在这种情况下， $\phi_N = \phi_S = \phi_Q = 1.0$ ，最大导线张力不应超过在表 3.1 中定义的值。需要时，导线试验应当符合 IEC61089 的最新版本。(IEC60826)

表 3.3 导线和地线的损伤和故障极限

导线和地线	损伤极限	故障极限
所有类型	三者中最低值： 1 震动极限 2 对重要间隙的破坏 3 75%额定拉力的特性强度（通常范围在 70%-80%）	极限拉应力（破裂）

2) 不管是用一般方法还是经验方法，用于额定耐张强度的导线安全系数都不能小于 1.5。（也就是导线在档距内任何一点的张力荷载不能超过导线额定耐张

强度的 66.67%)，不同的安全系数要在项目说明里进行说明。(BS EN 50341-1-2001)

2.3 绝缘子和金具

2.3.1 国内标中的绝缘子和金具（GB50545）

2.3.1.1 污秽分级标准

表 2.3.1 高压架空线路污秽分级标准

污秽等级	污 湿 特 征	线路爬电比距 (cm/kV)		
		盐密 (mg/cm ²)	220kV 及以下	330kV 及以上
0	大气清洁地区及离海岸盐场 50km 以上无明显污染地区	≤0.03	1.39 (1.60)	1.45 (1.60)
I	大气轻度污染地区，工业区和人口低密集区，离海岸盐场 10~50km 地区，在污闪季节中干燥少雾(含毛毛雨)或雨量较多时	>0.03~0.06	1.39~1.74 (1.60~2.00)	1.45~1.82 (1.60~2.00)
II	大气中等污染地区，轻盐碱和炉烟污秽地区，离海岸盐场 3~10km 地区，在污闪季节中潮湿多雾(含毛毛雨)但雨量较少时	>0.06~0.10	1.74~2.17 (2.00~2.50)	1.82~2.27 (2.00~2.50)
III	大气污染较严重地区，重雾和重盐碱地区，近海岸盐场 1~3km 地区，工业与人口密度较大地区，离化学污染源和炉烟污秽 300~1500m 的较严重污秽地区	>0.10~0.25	2.17~2.78 (2.50~3.20)	2.27~2.91 (2.50~3.20)
IV	大气特别严重污染地区，离海岸盐场 1km 以内，离化学污染源和炉烟污秽 300m 以内的地区	>0.25~0.35	2.78~3.30 (3.20~3.80)	2.91~3.45 (3.20~3.80)

注：爬电比距计算时可取系统最高工作电压。上表()内数字为按标称电压计算的值。

2.3.1.2 绝缘子

1) 绝缘子机械强度

绝缘子机械强度的安全系数，应符合表 4.2 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 2.3.2 绝缘子机械强度安全系数

情 况	最大使用荷载		常年荷载	验算	断 线	断 联
	盘型绝缘子	棒型绝缘子				
安全系数	2.7	3.0	4.0	1.5	1.8	1.5

绝缘子机械强度的安全系数 K₁应按下式计算：

$$K_I = \frac{T_R}{T} \quad (2.3-1)$$

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、断线、断联、验算荷载或常年荷载（kN）。

注：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。断线的气象条件是无风、有冰、-5⁰C。断联的气象条件是无风、无冰、-5⁰C。

2) 330kV 及以上线路的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。

3) 地线绝缘时宜使用双联绝缘子串。

2.3.1.3 金具

金具强度的安全系数应符合下列规定：

- 1) 最大使用荷载情况不应小于 2.5；
- 2) 断线、断联、验算情况不应小于 1.5。

2.3.2 国外标中的绝缘子和金具

2.3.2.1 污区分类

表 2.3.3 污区分类

污染级别	典型环境示例
I - 轻度	<ul style="list-style-type: none"> — 没有工业的区域，及低密度带加热设备的房屋的区域 — 具有低密度工业或房屋的区域，但经受遭受风及/或雨 — “农业区域 — 山区 <p>所有这些区域应该离海至少 10 公里到 20 公里，并且不应该直接暴露于海风¹⁾</p>
II - 中等	<ul style="list-style-type: none"> — 具有不会产生特别污染烟的区域及/或具有一般密度带加热设备的房屋的区域 — 具有高密度房屋及/或工业的区域，但经常遭受风及/或雨 — 暴露于海风的区域，但不太靠近海岸(至少几公里距离)^{a)}
III - 重度	<ul style="list-style-type: none"> — 具有高密度工业的区域及具有高密度产生污染加热设备的大型城市郊区 — 靠海区域或任何情况下暴露到相对强海风²⁾

IV -十分重度	— 通常中等程度区域，遭受传导灰尘及产生特别浓传导沉淀物的工业烟 — 通常中等程度的区域，十分靠近海岸，并且暴露于海浪或来自海的强大及污染风 — 沙漠区域，长期无雨，暴露于带沙及盐的强风，并且遭受
----------	--

通过喷洒方式使用化肥，或燃烧庄稼剩余物，由于风扩散，可以产生更高污染级别。

离海岸的距离取决于海岸区域的地理位置以及极端风条件。

(IEC60815)

2.3.2.2 绝缘子和金具的机械强度

1) IEC 中关于绝缘子和金具强度的规定

a) 绝缘子串的设计是基于他们与相连的导线的关系。处理方法与杆塔和基础的方法相同。关键设计荷载应从元件连接的最大计算导线荷载得到。

绝缘子的特征强度 R_c 应该符合下面的要求：

$$R_c \geq \frac{\text{基础设计荷载}}{\Phi_N \Phi_S \Phi_Q \Phi_C}$$

Φ_N 从表 2.3.4 中得到。

$\Phi_S = \Phi_{S2} = 0.90$ 对所有的绝缘子串，绝缘子串的 COV 一般在 7% 之下。

$\Phi_C = 1$ $\Phi_Q = 1$ (除非材料质量非常差)

上面的要求之外，尤其是在覆冰的国家，建议选择终端绝缘子的特性强度至少等于连接的导线的特性强度，类似的，建议设计终端金具故障时要耐受大于 15% 导线特征强度。需要时，金具试验要符合 IEC61284 的最新版本。

表 2.3.4 对应遭受最严重荷载强度的元件数量的强度因数 Φ_N

N	Coefficient of variation of strength v_r						
	0,05	0,075	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30
1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	0,98	0,98	0,97	0,94	0,91	0,87	0,84
5	0,96	0,94	0,92	0,85	0,80	0,72 (0,83)	0,64 (0,80)
10	0,94	0,92	0,89	0,81	0,72 (0,82)	0,62 (0,77)	0,51 (0,73)
20	0,93	0,90	0,85	0,77 (0,83)	0,66 (0,77)	0,53 (0,73)	0,38 (0,68)
40	0,92	0,87	0,83	0,72 (0,80)	0,59 (0,74)	0,44 (0,69)	0,26 (0,64)
80	0,91	0,86	0,79 (0,84)	0,68 (0,77)	0,53 (0,71)	0,36 (0,65)	0,16 (0,60)
160	0,90	0,85	0,79 (0,83)	0,67 (0,76)	0,52 (0,69)	0,34 (0,62)	0,13 (0,57)

(IEC60826)

b) 表 2.3.4 中给出了系统线路元件的损伤极限和故障极限。在没有相关的数据时，就取这些值为设计极限。

表 2.4.5 连接元件的损伤和故障极限

连接元件类型	损伤极限	故障极限
电缆接头 终端和连接金具 悬挂金具	不能接受的永久变形（包括滑动）	破裂
绝缘子（陶瓷和玻璃）	70%额定强度或破损伞群（只对玻璃）	针，帽，水泥和伞群
器件	关键性永久变形	器件的破裂或螺栓的断裂
说明 1：通常，器件在设计时要尽量减少或消除了磨损。由于点对点的连接产生的磨损在设计时应当考虑进去。在这种情况下，损伤极限变成“超过预期磨损”		
说明 2：定义关键性永久变形为金具不能轻易别拆开的状态		

(IEC60826)

2) 欧标中关于绝缘子和金具强度的规定

a) 绝缘子要满足指定的机械强度设计要求。当采用经验方法进行设计时，所有类型绝缘子的安全系数最小值为 2.0。（就是说绝缘子荷载不能超过导线额定强度的 50%）更高的安全系数的取值要再项目说明中进行说明。

b) 架空线的设计要满足机械强度的要求，所有类型线路金具安全系数最小值为 1.6。采用更高的安全系数时要再项目说明里进行说明。对于人要站立其上的金具，要能耐受 1.5kN 的集中荷载。

(BS EN 50341-1-2001)

2.4 绝缘配合

2.4.1 国内标准中的绝缘配合（GB50545）

2.4.1.1 绝缘子片数

输电线路的绝缘配合，应满足线路在工频电压、操作过电压、雷电过电压等各种条件下安全可靠地运行。

在海拔高度 1000m 以下地区，操作过电压及雷电过电压要求的悬垂绝缘子串绝缘子片数，应符合表 5.1 的规定。耐张绝缘子串的绝缘子片数应在表 7.0.2 的基础上增加，对 110kV~330kV 输电线路应增加 1 片，对 500kV 输电线路应增加 2 片，对 750kV 输电线路不需增加片数。

表 2.4.1 操作过电压及雷电过电压要求悬垂绝缘子串的最少片数

标称电压 (kV)	110	220	330	500	750
单片绝缘子的高度 (mm)	146	146	146	155	170
绝缘子片数 (片)	7	13	17	25	32

全高超过 40m 有地线的杆塔，高度每增加 10m，应比本规范表 7.0.2 增加 1 片相当于高度为 146mm 的绝缘子，全高超过 100m 的杆塔，绝缘子片数应根据运行经验结合计算确定。由于高杆塔而增加绝缘子片数时，雷电过电压最小间隙也应相应增大；750kV 杆塔全高超过 40m 时，可根据实际情况进行验算，确定是否需要增加绝缘子片数和间隙。

绝缘配合设计可采用爬电比距法，也可采用污耐压法选择合适的绝缘子型式和片数。当采用爬电比距法时，绝缘子片数应按下式计算：

$$n \geq \frac{\lambda U}{K_e L_{o1}}$$

式中：n——海拔 1000m 时每串绝缘子所需片数；

λ ——爬电比距（cm/kV）；

U——系统标称电压（kV）；

L_{o1} ——单片悬式绝缘子的几何爬电距离(cm)；

K_e ——绝缘子爬电距离的有效系数，主要由各种绝缘子几何爬电距离在试验和运行中污秽耐压的有效性来确定；并以 XP-70、XP-160 型绝缘子为基础，

其 K_e 值取为 1。

高海拔地区悬垂绝缘子串的片数，宜按下式计算：

$$n_H = ne^{0.1215m_1(H-1)}$$

式中： n_H ——高海拔地区每串绝缘子所需片数；

H ——海拔高度（km）；

m_1 ——特征指数，它反映气压对于污闪电压的影响程度，由试验确定。

2.4.1.2 间隙

在海拔不超过 1000m 的地区，在相应风偏条件下，带电部分与杆塔构件(包括拉线、脚钉等)的最小间隙，应符合表 2.4.2 和 2.4.3 的规定。

表 2.4.2 110kV~500kV 带电部分与杆塔构件(包括拉线、脚钉等)的最小间隙（m）

标称电压（kV）	110	220	330	500	
工频电压	0.25	0.55	0.90	1.20	1.30
操作过电压	0.70	1.45	1.95	2.50	2.70
雷电过电压	1.00	1.9	2.30	3.30	3.30

表 2.4.3 750kV 带电部分与杆塔构件(包括拉线、脚钉等)的最小间隙（m）

标称电压（kV）		750	
海拔高度（m）		500	1000
工频电压	I 串	1.80	1.90
操作过电压	边相 I 串	3.80	4.00
	中相 V 串	4.60	4.80
雷电过电压		4.20（或按绝缘子串放电电压的 0.80 配合）	

注：1 按雷电过电压和操作过电压情况校验间隙时的相应气象条件，可按本规范附录 A 的规定取值。

2 按运行电压情况校验间隙时风速采用基本风速修正至相应导线平均高度处的值及相应气温。

3 当因高海拔而需增加绝缘子数量时，雷电过电压最小间隙也应相应增大。

4 500kV 空气间隙栏，左侧数据适合于海拔高度不超过 500m 地区；右侧是用于超过 500m 但不超过 1000m 的地区。

在海拔高度 1000m 以下地区，带电作业时，带电部分对杆塔接地部分的

校验间隙应符合表 2.4.4 的规定。

2.4.4 带电作业，带电部分对杆塔与接地部分的校验间隙

标称电压 (kV)	110	220	330	500	750
校验间隙 (m)	1.00	1.80	2.20	3.20	4.00/4.30 (边相 I 串/中相 V 串)

注：1 对操作人员需要停留工作的部位，还应考虑人体活动范围 0.5m。

2 校验带电作业的间隙时，应采用下列计算条件：气温+15℃，风速 10m/s。

海拔高度不超过 1000m 的地区，在塔头结构布置时，相间操作过电压相间最小间隙和档距中考虑导线风偏工频电压和操作过电压相间最小间隙，应符合表 5.5 的规定。

表 2.4.5 工频电压和操作过电压相间最小间隙 (m)

标称电压 (kV)		110	220	330	500	750
工频电压		0.50	0.90	1.60	2.20	2.80
操作过电压	塔 头	1.20	2.40	3.40	5.20	7.70*
	档距中	1.10	2.10	3.00	4.60	5.40

注：*表示操作过电压相间最小间隙为单回路紧凑型模拟塔头试验值。

空气放电电压海拔修正系数 K_a ，可按式计算：

$$K_a = e^{mH/8.15}$$

式中：H——海拔高度 (km)；

m——海拔修正因子，工频、雷电电压海拔修正因子 $m=1.0$ ；操作过电压海拔修正因子可按海拔修正因子 m 与电压的关系（图 5.1）中的曲线 a、c 取值。

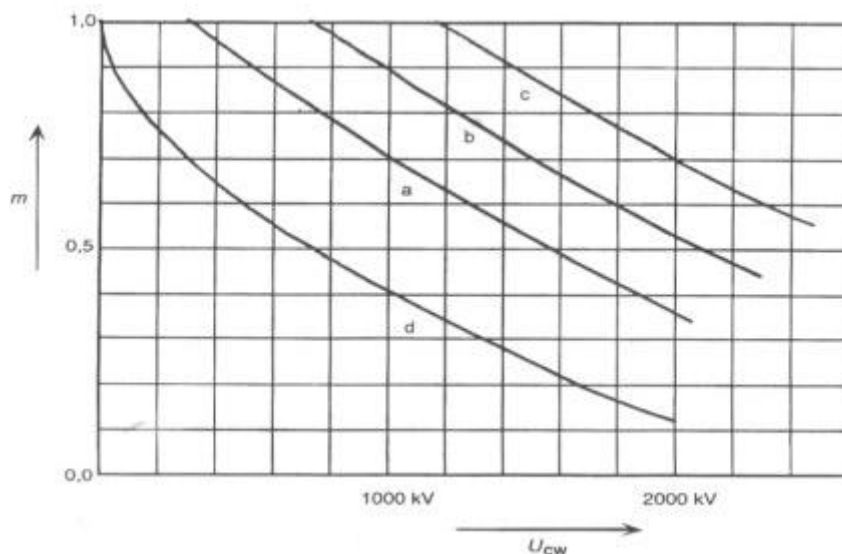


图 2.4.1 海拔修正因子 m 与电压的关系

a—相对地绝缘；b—纵向绝缘；c—相间绝缘；d—棒—板间隙

2.4.1.3 线路的防雷

输电线路的防雷设计，应根据线路电压、负荷性质和系统运行方式，结合当地已有线路的运行经验，地区雷电活动的强弱、地形地貌特点及土壤电阻率高低等情况，在计算耐雷水平后，通过技术经济比较，采用合理的防雷方式，应符合下列规定：

1) 110kV 输电线路宜沿全线架设地线，在年平均雷暴日数不超过 15 或运行经验证明雷电活动轻微的地区，可不架设地线。无地线的输电线路，宜在变电所或发电厂的进线段架设 1km~2km 地线。

2) 220kV~330kV 输电线路应沿全线架设地线，年平均雷暴日数不超过 15 的地区或运行经验证明雷电活动轻微的地区，可架设单地线，山区宜架设双地线。

3) 500kV~750kV 输电线路应沿全线架设双地线。

杆塔上地线对边导线的保护角，应符合下列要求：

1) 对于单回路，330kV 及以下线路的保护角不宜大于 15° ，500kV~750kV 线路的保护角不宜大于 10° ；

2) 对于同塔双回或多回路，110kV 线路的保护角不宜大于 10° ，220kV 及以上线路的保护角均不宜大于 0° ；

- 3) 单地线线路不宜大于 25° ；
- 4) 对重覆冰线路的保护角可适当加大。

杆塔上两根地线之间的距离，不应超过地线与导线间垂直距离的 5 倍。
在一般档距的档距中央，导线与地线间的距离，应按下式计算：

$$S \geq 0.012L + 1$$

式中：S——导线与地线间的距离（m）；

L——档距（m）。

注：计算条件为：气温 $+15^{\circ}\text{C}$ ，无风、无冰。

有地线的杆塔应接地。在雷季干燥时，每基杆塔不连地线的工频接地电阻，不宜大于表 5.6 规定的数值。土壤电阻率较低的地区，当杆塔的自然接地电阻不大于表 7.0.16 所列数值时，可不装设人工接地体。

表 2.4.6 有地线的线路杆塔不连地线的工频接地电阻

土壤电阻率 ($\Omega \cdot \text{m}$)	100 及以下	100 以上至 500	500 以上至 1000	1000 以上至 2000	2000 以上
工频接地电阻 (Ω)	10	15	20	25	30 (注)

注：如土壤电阻率超过 $2000 \Omega \cdot \text{m}$ ，接地电阻很难降到 30Ω 时，可采用 6~8 根总长不超过 500m 的放射形接地体或连续伸长接地体，其接地电阻不受限制。

中性点非直接接地系统在居民区的无地线钢筋混凝土杆和铁塔应接地，其接地电阻不应超过 30Ω 。

2.4.2 国外标准中的绝缘配合(IEC)

2.4.2.1 漏电距离

“最小特定漏电距离”揭示了污染条件下承受电压及漏电距离之间的线型关系

表 2.4.7 漏电距离

污染级别	最小公称特定漏电距离 ⁵ ($\text{mm}/\text{kV}^{2/3}$)
I - 轻度	16
II - 中等	20
m - 重型	25

IV -十分严重	31
¹⁾ 对于实际漏电距离，适用指定的制造容忍度(参见 IEC Publication 273: 公称电压大于 1000V 系统用室内及室外柱状绝缘子及柱状绝缘子设备尺寸，IEC Publication 305: 帽盖针形类型串绝缘子设备的特征，IEC Publication 433: 长棒型串绝缘子设备的特性，及 IEC Publication 720: 线柱状绝缘子特性)。 ²⁾ 相及地测量的漏电距离比率超过 r.m.s. 设备最高电压的相对相值(参见 IEC Publication 71-1)	

说明 1: 在十分轻度污染区域，根据工作经验使用低于 16 mm/kV 的特定公称漏电距离，12 mm/kV 看起来是一个较低极限。

2: 一对于异常污染严重性，31 mm/kV 的特定公称漏电距离可能不足够，根据工作经验及/或实验室测试结果，可以使用特定漏电距离的较高值，但在一些情况下，可能必须考虑清洗或涂油。

(IEC60815)

表2.4.8 推荐的爬电距离

污秽程度	典型环境的实例	最小额定比爬电距离mm/kV 1)
I 轻度	<ul style="list-style-type: none"> - 没有工业的区域，区域内部只有低稠密度的带采暖装置的住房。 - 区域内有低稠密度的工厂或住房，但是经常有风及/或降雨。 - 农业区域，2) - 多山地区。 - 所有这些区域应该位于距离海滨至少10千米到20千米，并且不应该直接暴露于来自海上的海风。3) 	16.0
II 中度	<ul style="list-style-type: none"> - 这些区域拥有不产生特殊污秽烟雾及/或拥有有平均密度的带采暖装置的住房。 - 区域内有稠密度的住房或工厂，但是经常有风及/或降雨。 - 此区域暴露于海风中，然而距离海岸不近（至少若干千米的距离）。3) 	20.0
III 严重	<ul style="list-style-type: none"> - 区域内有稠密的工厂，和拥有稠密加热装置产生污秽的大城市郊区。 - 区域接近大海，或在任情况下，暴露于比较强 	25.0

	的海风。3)	
IV 非常严重	<ul style="list-style-type: none"> - 通常具有中等范围的区域，受到导电性粉尘，并且受到工业烟雾污秽，产生特别厚传导性沉积。 - 通常是具有中等范围的区域，非常接近海岸，暴露于海浪的浪花，或暴露于非常强和污秽的海风。 - 沙漠区，特征是长久期间没有降雨，暴露于携砂和盐的强风中，并且受到经常性的冷凝水。 	31.0
<p>注：此表应该仅适用于玻璃或瓷制绝缘，并且不包括一些环境情况例如严重污秽中的雪和冰、暴雨、干旱地区等等。</p> <p>1) 根据IEC 815，相线和地线之间的绝缘子最小爬行距离和最高系统电压（相间）有关。</p> <p>2) 由于风的扩散作用，喷洒方式施肥，或烧熔作物残茬能够导致高污秽程度。</p> <p>3) 与海岸的距离取决于沿海地区的地形，并且取决于极端的海风情况。</p>		

(IEC60071)

2.4.2.2 过电压的分类

在 IEC 71—1 标准中，根据电压应力对绝缘或对保护装置的影响，电压应力由合适的参数分类，例如工频电压的时长或过电压的形态。在这些分类中的电压应力具有若干起因：

- A 连续（工频）电压：起源于在正常操作条件下的系统操作。
- B 暂时过电压：它们可以起源于故障、开关操作，例如甩负荷、共振条件、非线性度（铁磁 谐振）或起源于这些因素的综合。
- C 缓波前过电压：它们可以起源于故障、开关操作或直接雷击到架空线的导线上；
- D 陡波前过电压：它们可以起源于开关操作、闪电击中或故障。
- E 极陡波前过电压：它们可以起源于气体绝缘变电站（GIS）的故障或开关操作。
- F 组合过电压：它们可以具有上述的任何起因。它们发生在系统的各相之间（相相对相线），或在系统的同相独立部件之间（纵向）。

操作电压和暂态过电压决定了所需绝缘子的串长度以及用于污染地点的绝缘子的形式。对于电压值高于 72.5KV 的输电线路而言，感应过电压可以忽略不计，而线路的耐雷性能只取决于闪电直接击中线路的情况。

表 2.4.9 过电压的类别和形态、标准电压形态和标准耐受电压试验

类别	低频		瞬态		
	持续	暂时	缓波前	陡波前	极陡波前
电压或过电压形态					
电压或过电压形态的范围	$f = 50 \text{ Hz}$ 或 60 Hz $T_1 \geq 3600 \text{ s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0,02 \text{ s} \leq T_1 \leq 3600 \text{ s}$	$20 \mu\text{s} < T_p \leq 5000 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$0,1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$T_f < 100 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$
标准电压形态	 $f = 50 \text{ Hz}$ 或 60 Hz T_1^a	 $48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_1 = 60 \text{ s}$	 $T_p = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2500 \mu\text{s}$	 $T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	a
标准耐受电压试验	a	短时电源频率试验	转换脉冲试验	雷电脉冲试验	a

^a 由相关设备委员会规定。

(IEC60071)

2.4.2.3 IEC 中对于间隙的规定

表 2.4.10 标准额定雷电脉冲耐受电压与最小空气间隙间的关系

标准额定雷电脉冲耐受电压	最小间隙	
	mm	
kV	线棒—结构	导体—结构
20	60	
40	60	
60	90	
75	120	
95	160	
125	220	
145	270	

170	320	
200	380	
250	480	
325	630	
380	750	
450	900	
550	1 100	
650	1 300	
750	1 500	
850	1 700	1 600
950	1 900	1 700
1 050	2 100	1 900
1 175	2 350	2 200
1 300	2 600	2 400
1 425	2 850	2 600
1 550	3 100	2 900
1 675	3 350	3 100
1 800	3 600	3 300
1 950	3 900	3 600
2 100	4 200	3 900
注：标准额定雷电脉冲耐受电压适用于相间和相地。 对于相地，适用导体-结构和线棒-结构的最小间隙。 对于相间，适用线棒-结构的最小间隙。		

表 2.4.11 标准额定转换脉冲耐受电压与最小相地空气间隙间的关系

标准额定转换脉冲耐 受电压 kV	最小相地间隙 mm	
	线棒-结构	导体-结构
750	1900	1600
850	2400	1800
950	2900	2200
1050	3400	2600
1175	4100	3100
1300	4800	3600
1425	5600	4200
1550	6400	4900

表 2.4.12 标准额定转换脉冲耐受电压与最小相间空气间隙间的关系

标准额定转换脉冲耐受电压			最小相间间隙 mm	
相地 kV	相间值	相间 kV	导体-导体并联	线棒-导体
	相地值			
750	1,5	1125	2300	2600
850	1,5	1275	2600	3100
850	1,6	1360	2900	3400
950	1,5	1425	3100	3600
950	1,7	1615	3700	4300
1050	1,5	1575	3600	4200
1050	1,6	1680	3900	4600
1175	1,5	1763	4200	5000
1300	1,7	2210	6100	7400
1425	1,7	2423	7200	9000
1550	1,6	2480	7600	9400

(IEC60071)

2.4.2.4 欧标中间隙的规定

对于架空线的绝缘配合程序包括下面三步：

- 1) 典型电压的确定 (U_{tp})
- 2) 绝缘耐压的确定 (U_{cw})
- 3) 要求耐压的确定 (U_{rw})

过电压分类:

- 1) 持续工频过电压
- 2) 短时过电压
- 3) 短波前过电压
- 4) 陡波前过电压

持续工频过电压和短时过电压决定了要求的最小绝缘子串长。绝缘子形状要符合现场污秽强度的要求；短波前过电压时确定 245kV 以上系统电气间隙距离的一个决定条件。对于一些类型的绝缘子，绝缘子金具是关键的设计内容；配合耐压取值为更高或等于能够从雷击点传播到多级塔的过电压。当没有精确的计算方法时，相对地的过电压取绝缘子的雷电耐压(绝缘子串 90%

的雷电耐压 $U_{90\%_{ff_{is}}}$)。这是定义架空线雷电性能的主要因素；要求耐压是由配合耐压配以大气条件校正系数得到的。

线路绝缘的介质强度受海拔高度的影响，海拔系数为 K_a 。

$$U_{rm}=U_{cw}/K_a$$

K_a 值适用于海拔 1000 米以下的情况。

表 2.4.13 不同配合耐压下的海拔系数

Altitude (m)	Altitude factor K_a				
	up to 200 kV	from 201 kV to 400 kV	from 401 kV to 700 kV	from 701 kV to 1 100 kV	above 1 100 kV
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
100	0,994	0,995	0,997	0,998	0,999
300	0,982	0,985	0,990	0,993	0,996
500	0,970	0,975	0,982	0,987	0,992
1 000	0,938	0,946	0,959	0,970	0,978
1 500	0,904	0,915	0,934	0,948	0,960
2 000	0,870	0,883	0,906	0,923	0,938
2 500	0,834	0,849	0,875	0,896	0,913
3 000	0,798	0,815	0,844	0,867	0,885
NOTE The K_a values have been taken from the document IEC 61472.					

K_g 间隙系数

表 2.4.14 间隙系数的取值

空气间隙的性质	配置	慢波前过电压的间隙系数 $K_{g_{sf}}=K_g$
外部间隙	导线—物体（安全间隙）	1.30
内部间隙	塔窗呢 导线和塔结构之间空气间隙 •塔窗内的垂直串或 V 串	1.25
	连接在横担端头的可自由摇摆的绝缘子串的导线和铁塔结构之间的间隙 •铁塔端部的垂直串	1.45

	•V 串	
	导线—导线	1.60

避免闪络的电气间隙距离

目前标准中考虑的 5 种电气间隙距离

- 1) D_{el} 能够避免在陡波前和慢波前过电压时相导线和地面物体发生破坏性放电的最小空气间隙。
- 2) D_{pp} 能够避免在陡波前和慢波前过电压时相导线之间发生破坏性放电的最小空气间隙。 D_{pp} 是内部间隙。
- 3) $D_{50Hz_p_e}$ 能够避免工频过电压时相导线和地面物体见发生破坏性放电的最小空气间隙。 $D_{50Hz_p_e}$ 是内部间隙。
- 4) $D_{50Hz_p_p}$ 能够避免工频电压下相导线之间发生破坏性放电的最小空气间隙。 $D_{50Hz_p_p}$ 是内部间隙。
- 5) Aa_{som} 线路的最小 a_{so} 值。这是活动部分和地面物体的最小直线距离。

表 2.4.15 耐受雷电过电压的间隙 D_{el} 和 D_{pp}

线路绝缘子串的雷电耐压 $U_{90\%_ff_is}$ (kV)	D_{el} (单位米) $K_g=1.3$ K_a (1000m)	D_{pp} (单位米) $K_g=1.6$ K_a (1000m)
250	0.48	0.54
300	0.58	0.65
350	0.67	0.74
400	0.77	0.85
450	0.85	0.96
500	0.95	1.06
550	1.04	1.17
600	1.14	1.26
650	1.23	1.37
700	1.33	1.47
750	1.41	1.58
800	1.50	1.68
850	1.60	1.79
900	1.69	1.89
950	1.78	2.00
1000	1.88	2.08
1050	1.97	2.19

1100	2.05	2.29
1150	2.14	2.40
1200	2.23	2.50
1250	2.33	2.60
1300	2.42	2.71
1350	2.51	2.81
1400	2.61	2.92
1450	2.70	3.02
1500	2.79	3.13
1550	2.89	3.23
1600	2.98	3.33
1650	3.07	3.44
1700	3.17	3.54
1750	3.26	3.65
1800	3.35	3.75
1850	3.45	3.86
1900	3.54	3.96
1950	3.63	4.06
2000	3.72	4.17
2050	3.82	4.27
2100	3.91	4.38
2150	4.00	4.48
说明：表中给出了 1000 海拔下的间隙值。如果海拔高于或低于 1000m 时，间隙距离用表 4.1 中的海拔系数进行校正。		

表 2.4.16 耐受操作过电压间隙 Del 和 Dpp

操作过电压 $U_{2\%_{sf}}$ (kV)	D_{el} (单位米) $K_g=1.3$ K_a (1000m)	D_{pp} (单位米) $K_g=1.6$ K_a (1000m)
400	0.88	1.02
450	1.01	1.18
500	1.14	1.32
550	1.29	1.49
600	1.44	1.67
650	1.59	1.86
700	1.73	2.06
750	1.90	2.24
800	2.07	2.45
850	2.25	2.67
900	2.44	2.91
950	2.64	3.15
1000	2.84	3.41

1050	3.02	3.68
1100	3.24	3.96
1150	3.47	4.26
1200	3.71	4.57
1250	3.96	4.90
1300	4.22	5.24
1350	4.49	5.60
1400	4.77	5.97
1450	5.06	6.36
1500	5.37	6.78
1550	5.69	7.21
1600	6.02	7.66
1650	6.37	8.14
1700	6.73	8.63
1750	7.11	9.16
1800	7.50	9.70
说明：表中给出了 1000 海拔下的间隙值。如果海拔高于或低于 1000m 时，间隙距离可以用表 4.1 中的海拔系数进行校正。		

使用的电气间隙选用雷电耐压和操作过电压对应的间隙中较大的值。

耐受工频电压的电气间隙值用于大风条件时的内部间隙。表 2.4.17 中给出了相应的间隙值。

表 2.4.17 耐受工频电压的最小电气间隙（用在大风条件下）

最高系统电压 U_S (kV)	$D_{50Hz_p_e}$ (单位 米) $K_g=1.45$ 导线—结构	$D_{50Hz_p_p}$ (单位 米) $K_g=1.60$ 导线—导线
52	0.11	0.17
72.5	0.15	0.23
82.5	0.16	0.26
100	0.19	0.30
123	0.23	0.37
145	0.27	0.42
170	0.31	0.49
245	0.43	0.69
300	0.51	0.83
420	0.70	1.17
525	0.86	1.47
765	1.28	2.30

所有这些最小电气距离都是只基于绝缘配合要求。其他要求可能会导致更大的间隙。

表 2.4.15-2.4.17 中的数值是用理论计算的方法得到的，下面表 2.4.18 中的数值是用经验的方法得到的，这些数值时基于对欧洲常用的数值分析得到的，实践证明也是可以满足安全需要的。

表 2.4.18 间隙 D_{el} 和 D_{pp}

最高系统电压 U_s (kV)	D_{el} (单位米)	D_{pp} (单位米)
52	0.60	0.70
72.5	0.70	0.80
82.5	0.75	0.85
100	0.90	1.05
123	1.00	1.15
145	1.20	1.40
170	1.30	1.50
245	1.70	2.00
300	2.10	2.40
420	2.80	3.20
525	3.50	4.00
765	4.90	5.60

当把这些值用于外部间隙的说明时，需要校核过电压发生时对人或物体的计算距离大于 a_{som} 的 110%。

说明：关于内部和外部间隙。内部间隙只是用于设计具备耐受过电压的能力。（在 EN60071-2 和 EN60071-1 中规定，在电网的经济设计中，一些重要的内部间隙如导线和铁塔间隙发生有限次数的闪络时允许的。）外部间隙的目的是避免对公众、对在线路附近工作的人以及线路维修人员发生闪络的危险。

间隙计算的荷载条件

- 1 最大导线温度
- 2 用于确定电气间隙的冰荷载
- 3 用于确定电气间隙的风荷载
- 4 风冰联合荷载

档距内和塔上间隙

表 2.4.19 档距内和铁塔上的最小间隙

	间隙情况：档距内和铁塔上				
	档距内		铁塔上		
荷载情况	导线-导线	导线-地线	相间或回路之间	相导线和接地部分之间	附注
最大导线温	D_{pp}	D_{el}	D_{pp}	D_{el}	无风时荷载

度					
冰荷载	D_{pp}	D_{el}	D_{pp}	D_{el}	无风时荷载
风荷载，不包括最大风荷载	$k_1 D_{pp}$	$k_1 D_{el}$	$k_1 D_{pp}$	$k_1 D_{el}$	由于有可能在导线被风吹动的同时发生过电压，所以要乘以 k_1 来减小间隙
最大风荷载	$D_{50Hz\ p\ p}$	$D_{50Hz\ p\ e}$	$D_{50Hz\ p\ p}$	$D_{50Hz\ p\ e}$	
<p>如果地线在铁塔上的挂点高于相导线的挂点，那么地线的弧垂不能低于相导线弧垂</p> <p>说明：如果线路使用相似的导线（同样的横截面、材料、架设和弧垂）要采用近似的方法来计算档距内无风时要求的间隙，以确保有风时间隙仍能满足要求。方法要再 NNAs 中和项目说明中给出。</p>					

表 2.4.20 在远离建筑、公路、铁路和水道地区最小对地间隙

	在没有障碍物乡村的对地间隙		对树间隙			
荷载情况	正常的地形	岩面或陡坡	线路下面		线路旁边	
			不能爬的树	能爬的树	不能爬的树（水平间隙）	能爬的树（水平间隙）
最大导线温度	5m+ D _{el}	2m+ D _{el} ；要大于3m	D _{el}	1.5m+ D _{el}	D _{el}	1.5m+ D _{el}
冰荷载	5m+ D _{el}	2m+ D _{el} ；要大于3m	D _{el}	1.5 m+D _{el}	D _{el}	1.5m+ D _{el}
风荷载	5m+ D _{el}	2m+ D _{el} ；要大于3m	D _{el}	1.5m+ D _{el}	D _{el}	1.5m+ D _{el}
附注	基本要求是车辆或行人从线路下通过是没有危险。当条件确实满足不了间隙要求时（陡坡等）可以适当减小间隙，当一定要保证人员的安全				如果无法避免由于树木倒了导致的接地故障，要减小树木的高度或者他们的离线路的水平距离要进行限制。	

说明 1 在一些国家，可能会跨越树林避免砍伐，在这种情况下，要预留出数目的未来生长高度。

说明 2 这些间隙是基于 5m 高车辆

对建筑物、交通线路、其他线路和休闲地区的间隙

表 2.4.21 对居民区和其他建筑的最小间隙

	间隙情况：居民区和其他建筑					
	线路位于建筑之上			线路紧邻建筑	天线、路灯、旗杆、广告牌等类似的建筑	
荷 载 情 况	带有阻燃屋顶，其坡度大于15 ⁰	带有阻燃屋顶，其坡度小于等于15 ⁰	带 有 非 阻 燃 屋 顶 和 易 燃 设 施，如 燃 气 站		天 线 和 防 雷 设 施	路 灯、旗 杆、广 告 牌 和 类 似 的 建 筑
最 大 导 线 温 度	2m+D _{el} ，要 大 于 3m	4m+D _{el} ，要 大 于 5m	10m+D _{el}	2m+D _{el} ，要 大 于 3m（水平间隙）	2m+D _{el}	2m+D _{el}
冰 荷 载	2m+D _{el} ，要 大 于 3m	4m+D _{el} ，要 大 于 5m	10m+D _{el}	2m+D _{el} ，要 大 于 3m（水平间隙）	2m+D _{el}	2m+D _{el}
风 荷 载	2m+D _{el} ，要 大 于 3m	4m+D _{el} ，要 大 于 5m	10m+D _{el}	2m+D _{el} ，要 大 于 3m（水平间隙）	2m+D _{el}	2m+D _{el}
最 大 冰 荷 载	D _{el}	D _{el}	—	—	—	—
附 注	考虑到了有可能人会站在屋顶上或使用手握的工具。在发生严重覆冰的时候认为人不会使用屋顶。	考虑到了有可能人会站在屋顶上或使用手握的工具。在发生严重覆冰的时候认为人不会使用屋顶。	间 隙 要 满 足 不 会 发 生 由 感 应 电 压 引 起 火 的 可 能	如果水平距离无法咱组时，线路高于建筑的垂直间隙一定要满足。	即便是在建筑倒向朝着线路导线的方向，间隙 D _{el} 都要满足。	
说明 在一些国家，一般不允许跨越或靠近建筑，那么上面的间隙就不适合这些国家，要在 NNAs 中定义电力线距离建筑物的距离。						

表 2.4.22 线路跨越公路、铁路和水道时的最小间隙

间隙情况：线路跨越公路、铁路和水道							
荷载情况	到公路表面或铁路顶部（如果没有使用电气牵引系统）	到铁路电气牵引系统元件或到有轨电车线或索道	到索道牵引绳	到共同通航水道的计量器	到索道固定点或铁路牵引系统的固定元件	到铁塔或索道的支撑和牵引绳	在下部交叉情况下到索道设备
最大导线温度	6m+ D _{el}	2m+ D _{el}	2m+ D _{el}	2m+ D _{el}	2m+ D _{el}	4m+ D _{el}	2m+ D _{el}
冰荷载	6m+ D _{el}	2m+ D _{el}	2m+ D _{el}	2m+ D _{el}	2m+ D _{el}	4m+ D _{el}	2m+ D _{el}
风荷载	6m+ D _{el}	2m+ D _{el}	2m+ D _{el}	2m+ D _{el}	2m+ D _{el}	4m+ D _{el}	2m+ D _{el}
特殊荷载情况 1	—	2m+ D _{el}	2m+ D _{el}	—	—	—	—
特殊荷载情况 2	—	—	2m+ D _{el}	—	—	—	—
特殊荷载情况 3	—	—	—	—	—	—	2m+ D _{el}
附注	对于次级公路，在 NNAs 中定义时间隙可以减小 1m				水平间隙	水平间隙	
特殊荷载情况 1 是指在 NNAs 中规定的某个温度下由于变化的风荷载导致上部交叉时导线发生的摆动，同时牵引系统下部交叉导线荷载处于最小弧垂。							
特殊荷载情况 2 是指在 NNAs 中规定的某个温度下由于变化的风荷载导致上部交叉时导线发生的摆动，并且牵引绳最大张力增加 25%。在估算水平间隙时要考虑下面两种荷载情况： —由于风吹向装置固定元件导线产生的摆动 —索道装置的摆动绳索相对架空线元件的最大摆动教为 45 度的情况							
特殊荷载情况 3 是指下部交叉导线的最小弧垂和牵引绳的最大弧垂的情况。另外还要考虑客舱的高度。							
说明 1 对于距轨面的间隙，间隙应当根据火车测量计来确定而不是根据轨面顶部。							
说明 2 如果发生非常严重的冰荷载时，考虑使用更小的间隙。当跨越没有电议牵引系统的铁路时，当设计架空牵引系统的转换时要得到铁路部门的允许。							

表 2.4.23 距离相邻公路、铁路和航行水道的最小间隙

间隙情况：线路紧邻公路、铁路和航行水道

荷载情况	距离铁路或有轨电车线路的电气牵引线路装置元件或荷载测量计	距索道装置元件	距高速公路，公路，乡村道路或水道的车行道的外边缘	架空线路最近部分和铁路最近轨道的外边缘的水平距离
最大导线温度	0.5m+ D _{el} ，但是要大于1.5m	4m+ D _{el}	0.5m+ D _{el} ，但是要大于1.5m	4m
冰荷载	0.5m+ D _{el} ，但是要大于1.5m	4m+ D _{el}	0.5m+ D _{el} ，但是要大于1.5m	4m
风荷载	0.5m+ D _{el} ，但是要大于1.5m	4m+ D _{el}	0.5m+ D _{el} ，但是要大于1.5m	4m
特殊荷载 4	—	4m+ D _{el}	—	—
附注	如果水平间隙不能满足,那么跨越铁路装置的间隙要满足表 4.10 中的要求。			如果到电气牵引系统的换算计划15m
特殊荷载情况 4: 另外, 认为索道装置的支撑和牵引绳朝着架空线的摆动角度是 45 ⁰				

表 2.4.24 距离其他电力线或架空通信线路的最小间隙

	跨越线路		普通建筑之上的平行线路	单独建筑之上的平行或汇聚的线路
荷载情况	上部线路最低导线和线路活动部分或接地元件之间的垂直间隙	摆动导线垂直轴线和通信线路元件之间的水平间隙	单独公共设施线路导线间的间隙	
最大导线温度	D_{pp} , 但要大于 $1m^a$	—	D_{pp}^a	D_{pp} , 但要大于 $1m^a$
冰荷载	D_{pp} , 但要大于 $1m^a$	—	D_{pp}^a	D_{pp} , 但要大于 $1m^a$
风荷载	D_{pp} , 但要大于 $1m^a$	水平间隙 $2m$	D_{pp}^a	D_{pp} , 但要大于 $1m^a$
附注	要特别注意跨越线路和平行线路的情况。间隙要大于绝缘子串放电间隙 a_{som} (定义为活动部分和接地部分之间的直线距离) 的 1.1 倍			
		如果水平间隙不能满足,	如果单独的公共设施线	

		那么上部线路的最低导线和下部线路的活动部分或接地元件之间的垂直距离要满足。	路位于普通建筑之上，则互相之间影响的可能性就最小。另外，要考虑选择横担的使用，绝缘子损坏的影响以及感应和维修	
^a D_{pp} 是两条线路 D_{pp} 值中较大者				

表 2.4.25 距休闲场所的最小间隙

	上面线路				紧邻线路
荷载情况	距一般运动场所	距高水平的游泳池	距航行设施的测量计	距永久安装的娱乐设施，如露营设施和攀岩设施	距所有娱乐设施的水平距离
最大导线温度	$7m + D_{el}$	$8m + D_{el}$	$1m + D_{el}$	$3m + D_{el}$	$3m + D_{el}$
冰荷载	$7m + D_{el}$	$8m + D_{el}$	$1m + D_{el}$	$3m + D_{el}$	$3m + D_{el}$
风荷载	$7m + D_{el}$	$8m + D_{el}$	$1m + D_{el}$	$3m + D_{el}$	$3m + D_{el}$
附注	如果运动时要投掷东西或设计，要保证距离导线的距离小于 $2m + D_{el}$	在有跳板的情况，要保证人要距离 D_{el} 以上			如果水平间隙不能满足时，那上部线路的垂直距离要满足
说明 在一些国家，一般不允许线路跨国或靠近娱乐场所，表中的间隙则不适用这些国家，这些国家要在 NNAs 中定义线路距离娱乐场所多远。					

(BS EN 50341-1-2001)

2.5 荷载组合

2.5.1 国内标准中的荷载组合 (GB50545)

各类杆塔的正常运行情况，应计算下列荷载组合：

(1) 正常运行：

各类杆塔的正常运行情况，应计算下列荷载组合：

- 1) 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、相应风速及气温、未断线。
- 3) 最低气温、无冰、无风、未断线(适用于终端和转角杆塔)。

(2) 事故工况：

- 1) 断线
- 2) 不均匀覆冰

(3) 安装工况

2.5.1.1 正常运行工况

(1) 导地线气象条件的重现期为 30、50 年（与电压等级有关）。

(2) 基本风速取离地 10m 高、10min 时距平均的年最大风速为样本，并宜采用极值 I 型分布作为概率模型。

(3) 对线路基本覆冰，划分为轻、中、重三个等级，采用不同的设计标准。覆冰同时风速一般取为 10m/s；考虑实际冰凌受风面积增大，计入风压增大系数 1.1-1.5。必要时按稀有覆冰条件进行验算。地线设计冰厚，除无冰区外，应较导线增加 5mm。

2.5.1.2 事故工况

(1)断线工况

断线情况，应按-5℃、有冰、无风的气象条件。并要求，按照回路数、以及直线或耐张塔型，分别计算断导线、断地线的荷载。

同时，导地线的断线张力，分别按规程规定选取（最大使用张力的百分数），垂直冰荷载按 100%设计覆冰荷载。

(2) 不均匀覆冰工况

10 mm 冰区不均匀覆冰情况，按-5℃、有不均匀冰、10m/s 风速的气象条件计算；不均匀覆冰的导、地线不平衡张力应不低于表 10.1.8 值。垂直荷载按不小于 75%设计覆冰荷载计算。

各类杆塔均应考虑所有导地线同时同向有不均匀覆冰的不平衡张力，使杆塔

受到最大扭矩和弯矩。

2.5.1.3 安装工况

各类杆塔的安装情况，应按 10m/s 风速、无冰、相应气温的气象条件下考虑下列荷载组合：

(1) 直线塔：1) 提升导、地线及其附件时的作用荷载。包括提升导、地线、绝缘子和金具等重量(一般按 2.0 倍计算)、安装工人和工具的附加荷载，应考虑动力系数 1.1。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° ，正在锚线相的张力应考虑动力系数 1.1。

(3) 耐张塔：

1) 导线及地线荷载：

锚塔：锚地线时，相邻档内的导线及地线均未架设；锚导线时，在同档内的地线已架设。

紧线塔：紧地线时，相邻档内的地线已架设或未架设，同档内的导线均未架设；紧导线时，同档内的地线已架设，相邻档内的导、地线已架设或未架设。

2) 临时拉线所产生的荷载：

锚塔和紧线塔均允许计及临时拉线的作用，临时拉线对地夹角不应大于 45° ，其方向与导、地线方向一致，临时拉线一般可平衡导、地线张力的 30%。

3) 紧线牵引绳产生的荷载：

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

2.5.2 国外标准中的荷载组合（IEC 60826）

IEC60826 关于荷载的规定：

表2.5.1 IEC60826关于荷载的规定

要求	荷载类别	极限状况	备注
可靠性要求	气象：冰、风及组合荷载	损伤极限	不允许材料永久性变形
稳定性要求	故障：断线时相应的扭力矩和纵向弯矩荷载	破坏极限	不允许事故扩大

安全性要求	安装和检修荷载	损伤极限	不允许材料永久性变形
-------	---------	------	------------

2.5.2.1 正常运行工况

(1) IEC 与 GB 在基本风速的确定原则上是一致的，只是 GB 根据不同的电压等级采用不同的重现期，参考的重现期为 50 年。根据重现期确定荷载系数，其值在 0.75~1.45 之间。因此在国外工程中首先必须明确工程的安全等级要求。

(2) 导地线覆有设计重现期的冰重；覆冰同时风速的选取：a、从现场实测资料中分析选取；b、从沿线气象站资料中选择气温低于 0℃时的风速；c、采用当地最大风速乘以降低系数。

2.5.2.2 事故工况

(1)断线工况

断一相导线或一根地线，在重冰区，为提高断线残余张力，要求按覆冰断线考虑。

(2) 不均匀覆冰工况

耐张段内导地线同时有 1~3 档覆设计冰重的 70%，其余为 28%，使杆塔同侧二相导线和一根地线或三相导线或二根地线有不平衡张力，使杆塔受到最大扭矩和弯矩。

2.5.2.3 安装工况

(1) 所有挂线点、元件的强度，要按照施工挂线静态荷载的两倍进行校验，如果施工方法得当的话也可以用系数 1.5。

(2) 导线张力：应采用允许吊线、挂线的最低温度；吊线时的张力至少是最大弧垂时张力的 2 倍，不小于挂线完毕后导线张力的 1.5 倍。

(3) 垂直荷载：杆塔的外荷载计算时，采用上述导线张力；外荷载作用于挂线点或施工挂点，应考虑所有可能的挂线顺序与外荷载的组合。

(4) 横向负载：转角塔应能承受导线张力引起的横向荷载；虽然会在微风

条件下施工，但不计及微风荷载。

(5) 临时锚线塔的荷载：

纵向：锚线塔应考虑最大弧垂时的张力引起的纵向荷载

垂直：采用临时拉线平衡纵向荷载时，要考虑临时拉线引起的垂直荷载增加。

(6) 直线塔的纵向荷载：

导线在吊线滑轮中的情况下，需要考虑纵向荷载。此时，荷载等于导线单位荷重与两侧垂直档距差的乘积。一般情况下，此荷载远小于安全裕度要求的荷载，不予考虑；需要考虑此纵向荷载的特殊情况是，铁塔需要考虑 2 倍的上述荷载。

2.6 荷载计算

2.6.1 国内标准中的荷载（GB50545）

2.6.1.1 导地线风荷载计算

导线及地线的水平风荷载标准值和基准风压标准值，应按下式计算：

$$W_x = \alpha \cdot W_0 \cdot \mu_z \cdot \mu_{sc} \cdot \beta_c \cdot d \cdot L_p \cdot B \cdot \sin^2 \theta$$
$$W_0 = V^2 / 1600 \quad (2.6-1)$$

式中：W_x——垂直于导线及地线方向的水平风荷载标准值(kN)；

α——风压不均匀系数，应根据设计基本风速，按表 2.1 的规定确定，当校验杆塔电气间隙时，α 随水平档距变化取值按表 2.2 的规定确定。

β_c——500kV 和 750kV 线路导线及地线风荷载调整系数，仅用于计算作用于杆塔上的导线及地线风荷载(不含导线及地线张力弧垂计算和风偏角计算)，β_c 应按表 2.1 的规定确定；其它电压级的线路 β_c 取 1.0；

μ_z——风压高度变化系数，基准高度为 10m 的风压高度变化系数按表 2.4 的规定确定；

μ_{sc}——导线或地线的体型系数：线径小于 17mm 或覆冰时(不论线径大小)应取 μ_{sc}=1.2；线径大于或等于 17mm，μ_{sc} 取 1.1；

d——导线或地线的外径或覆冰时的计算外径；分裂导线取所有子导线外

径的总和（m）；

L_p ——杆塔的水平档距（m）；

B ——覆冰时风荷载增大系数，5mm 冰区取 1.1，10mm 冰区取 1.2；

θ ——风向与导线或地线方向之间的夹角（度）；

W_0 ——基准风压标准值（kN/m²）；

V ——基准高度为 10m 的风速(m/s)。

表 2.6.1 风压不均与系数 α 和导地线风载调整系数 β_c

风速 V (m/s)		≤ 20	$20 < V \leq 27$	$27 < V \leq 31.5$	≥ 31.5
α	计算杆塔荷载	1.00	0.85	0.75	0.70
	设计杆塔（风偏计算用）	1.00	0.75	0.61	0.61
β_c	计算 500、750kV 杆塔荷载	1.00	1.10	1.20	1.30

注：对跳线计算， α 宜取 1.0

表 2.6.2 风压不均匀系数 α 随水平档距变化取值

水平档距 (m)	≤ 200	250	300	350	400	450	500	≥ 550
α	0.80	0.74	0.70	0.67	0.65	0.63	0.62	0.61

2.6.1.2 杆塔风荷载计算

杆塔风荷载的标准值，应按下式计算：

$$W_s = W_0 \cdot \mu_z \cdot \mu_s \cdot \beta_z \cdot B \cdot A_s \quad (2.6-2)$$

式中： W_s ——杆塔风荷载标准值(kN)；

μ_s ——构件的体型系数；

A_s ——承受风压的投影面积计算值（m²）；

β_z ——杆塔风荷载调整系数。

表 2.6.3 杆塔风荷载调整系数

杆塔全高 H (m)		20	30	40	50	60
β_z	单柱拉线杆塔	1.0	1.4	1.6	1.7	1.8
	其他杆塔	1.0	1.25	1.35	1.5	1.6

注：1 中间值按插入法计算。

2 对自立式铁塔，表中数值适用于高度与根开之比为 4~6。

2.6.1.3 绝缘子风荷载计算

绝缘子串风荷载的标准值，应按下式计算：

$$W_I = W_0 \cdot \mu_z \cdot B \cdot A_I \quad (2.6-3)$$

式中：WI——绝缘子串风荷载标准值（kN）；

AI——绝缘子串承受风压面积计算值（m²）。

表 2.6.4 风压高度变化系数

离地面或海平面高度(m)	地面粗糙度类别			
	A	B	C	D
5	1.17	1.00	0.74	0.62
10	1.38	1.00	0.74	0.62
15	1.52	1.14	0.74	0.62
20	1.63	1.25	0.84	0.62
30	1.80	1.42	1.00	0.62
40	1.92	1.56	1.13	0.73
50	2.03	1.67	1.25	0.84
60	2.12	1.77	1.35	0.93
70	2.20	1.86	1.45	1.02
80	2.27	1.95	1.54	1.11
90	2.34	2.02	1.62	1.19
100	2.40	2.09	1.70	1.27
150	2.64	2.38	2.03	1.61
200	2.83	2.61	2.30	1.92
250	2.99	2.80	2.54	2.19
300	3.12	2.97	2.75	2.45
350	3.12	3.12	2.94	2.68
400	3.12	3.12	3.12	2.91
≥450	3.12	3.12	3.12	3.12

注：地面粗糙度类别：

A 类指近海面 and 海岛、海岸、湖岸及沙漠地区；

B 类指田野、乡村、丛林、丘陵以及房屋比较稀疏的乡镇和城市郊区；

C 类指有密集建筑群的城市市区；

D 类指有密集建筑群且房屋较高的城市市区。

2.6.2 国外标准中的荷载（IEC 60826）

荷载分为以下几类：

- a) 气象荷载，包括风荷载，有冰无风和有冰有风三种情况
- a) 建设和维护要求的荷载
- c) 故障工况下荷载

2.6.2.1 风荷载计算

1) 风速的选取

- a) 参考风速 V_R

选取方法：通常是在 10m 高，平均周期 10 分钟，B 地形条件的气象站获得，记为 V_{RB}

当测量的高度，时间，地形与标准条件不一样时，转换方法如下：

a. 高度不同
$$V_z = V_R \left(\frac{z}{10} \right)^a$$
 z 为高度

b. 地形不同
$$V = V_{x,10 \min} / K_R$$
 x 表示地形类型

c. 时间不同 $V_{x,1} / V_{x,10 \min}$ 的值见下图

- b) 当气象站离线路非常远时，可利用梯度风速来估算设计风速。

$$\bar{V}_m (B) = 0,5 \bar{V}_G$$

式中：

\bar{V}_G 年最大梯度风速的平均值

$\bar{V}_m (B)$ B 地形，10m 高的年最大风速平均值

\bar{V}_G 通常从国家气象机构获得

- c) 设计参考风速 V_R

计算方法：由年最大风速平均值计算得来，计算公式为：

$$V_R = \bar{V}_M - \frac{C_2 \sigma}{C_1} - \frac{\sigma}{C_1} \left\{ \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right] \right\}$$

注意：上面用到的各种风速认为是在大气温度为日最低气温的平均值下得到的。或者认为是 50 年重现期的年最低气温加上 15 度得到的。

2) 风荷载计算方法

由于风对线路元件（导线，绝缘子，杆塔的所有部分）的吹动产生的单位作用的特征值 a (N/m^2)

$$a = q_0 C_x G$$

q_0 为动态参考风压 (N/m^2 或 Pa)，它是由参考风速 V_R 通过地表粗糙度校验得来的。

$$q_0 = \frac{1}{2} \rho (K_R V_{RB})^2 \quad (V_{RB} \text{ in m/s, and } q_0 \text{ in N/m}^2)$$

ρ 单位体积的空气量，在 15 度，101.3kPa 下取 1.225kg/m^3

τ 空气密度校正系数，当限制风速需要进行海拔校正或者温度偏离 15° 很多时，它的取值见表 5，其他情况下取 1.0。

C_x 为拉拽系数，取决于元件的形状和表面特性。

G 联合风系数，考虑了元件离地表高度、地形、阵风和动态反应（元件作用）的影响。在导线荷载的情况下，该系数要分成为两个系数 G_L 和 G_C 。对于每个线路元件这些参数都应该分开考虑。

表 2.6.5 基于海拔和温度的动态参考风压的校正系数

Temperature °C	Altitude m			
	0	1 000	2 000	3 000
30	0,95	0,84	0,75	0,66
15	1,00	0,89	0,79	0,69
0	1,04	0,94	0,83	0,73
-15	1,12	0,99	0,88	0,77
-30	1,19	1,05	0,93	0,82
NOTE The reference value corresponds to 0 m altitude and a temperature of 15 °C.				

3)导线风荷载 AC (N)

计算公式：

$$A_c = q_0 C_{xc} G_c G_L d L \sin^2 \Omega$$

式中：

q_0 动态参考风压

C_{xc} 导线牵引系数，对于标准导线和风速取 1,通过直接测量或风漩涡试验得到的值也可以使用。

G_c 导线联合风系数

G_L 档距因数

d 导线直径，单位米

L 水平档距

Ω 风向和导线的夹角

4)绝缘子串风荷载

风对绝缘子的荷载由两部分组成，一部分是通过导线传过来的风对导线的荷载，另一部分是风压直接作用于绝缘子串的荷载。

风压直接作用荷载 A_i

$$A_i = q_0 C_{xi} G_i S_i$$

式中：

q_0 动态参考风压

C_{xi} 牵引系数，取 1.20

G_i 联合风系数，见图 5。随着地面粗糙度和绝缘子串重心的离地高度的变化而变化。可以利用导线的平均高度。

S_i 绝缘子串水平地投影到与绝缘子轴线平行的竖直面上的面积，为保险起见，对于多联绝缘子串可以取所有绝缘子投影面积之和。

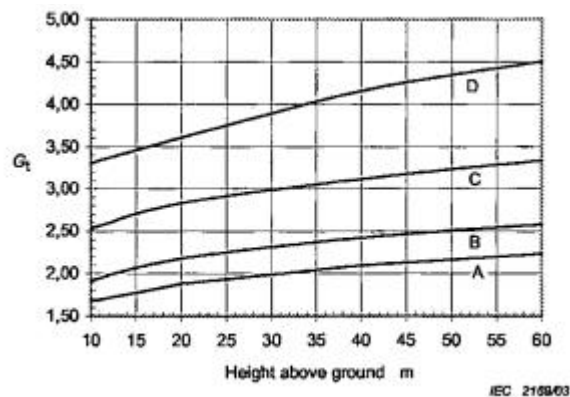


图 2.6.1 用在杆塔和绝缘子的联合风系数 G_i

2.6.2.2 无风冰荷载

1)冰荷载的计算方法

覆冰时的温度取 -5°C 。

导线的冰荷载包括多种，主要分为两类：沉淀结冰和云中结冰。沉淀结冰主要包括冻雨，湿雪沉淀，干雪沉淀。云中结冰是指云中温度很低的雨滴，遇到物体后迅速结冰。如位于云层以上的山上的线路结冰的情况。云中结冰主要包括：

软雾凇，霜凇和结晶冰。

冰荷载有两种表达方式，一种是导线单位长的覆冰重量 g ，单位 N/m ；另一种是导线径向的覆冰厚度 t ，单位 mm ，两者间的转换公式为：

$$g = 9,82 \times 10^{-3} \delta \pi t (d + t/1000)$$

其中：

g 为导线单位长的覆冰重量 N/m

δ 为冰密度 kg/m^3

t 为导线径向的覆冰厚度，认为在导线周围是均匀的， mm

d 为导线直径 mm

也可以通过气象数据分析方法估算年最大冰荷载。用于数据统计方法的数据可以通过分析 20 年来的天气和气候数据以及最少 5 年的线路观测数据来获得。

2)参考极限冰荷载

把 g_R 和 t_R 记为选择重现周期 T 下的参考极限冰荷载。 g_R 和 t_R 可以通过对直接测量、覆冰模型或二者结合的方法得到的数据进行分析来获得。下面分析中都是以 g_R 作为变量，它和 t_R 之间可以通过公式（ $g = 9,82 \times 10^{-3} \delta \pi t (d + t/1000)$ ）来转换。

如果数据测量是在标准条件（导线直径 30mm，高度 10m）下进行的，则不需要对数据进行调整，如果不是在标准条件下进行的，则得到的 g_R 需要再乘以直径系数 K_d 和高度系数 K_h 。

K_d 的数值如下图：

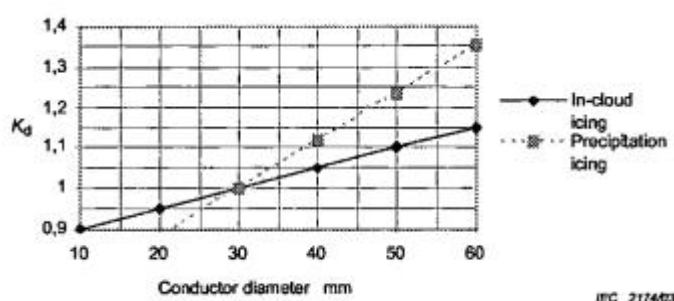


图 2.6.2 直径系数 K_d

对于两种类型的覆冰，当 $K_d x$ 大于 100N/m 时， K_d 的值就不再增加。如

果大于 100N/m 并且 d 大于 30mm, K_d 取 1。

K_h 描述了 g 随导线高度变化的情况，其值如下图

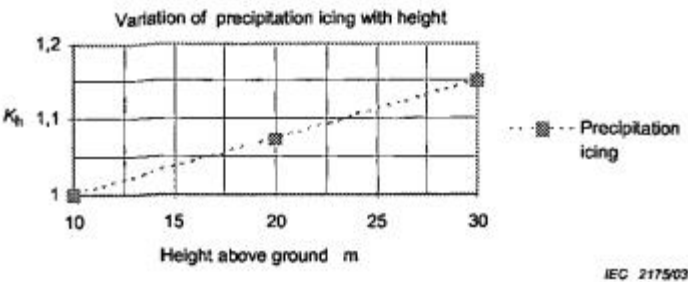


图 2.6.3 导线高度系数 K_h

为了简化，通常认为相同档距下导线和地线的 g_R 值相同， K_d 和 K_h 的值也可以用下面的公式来进行估算

对于云中结冰：

$$K_d \sim 0,15 \, d/30 + 0,85$$

对沉淀结冰：

$$K_d \sim 0,35 \, d/30 + 0,65$$

$$K_h = 0,075 \times z / 10 + 0,925$$

上面沉淀结冰中 K_h 的值是由一个简单的覆冰模型得来的，该覆冰模型的条件为 10m 高 25km/h 风速和水滴下落速度 5m/s

2.6.2.3 杆塔的冰荷载

在确定杆塔的荷载的时候应当考虑导线三种不同的结冰情况。这三种情况是最重要的，也包括了可能发生的大部分结冰情况。

- 1) 均匀冰，重力情况
- 2) 不均匀冰，纵向和横向弯曲情况
- 3) 不均匀冰，扭转情况

相邻的档距不均匀的冰积聚或脱落时会导致杆塔上产生严重不平衡的纵向荷载。不平衡的冰荷载会产生在结冰的过程或脱落的过程中。

非均匀冰的推荐配置参考表 6，杆塔类型见图 12：

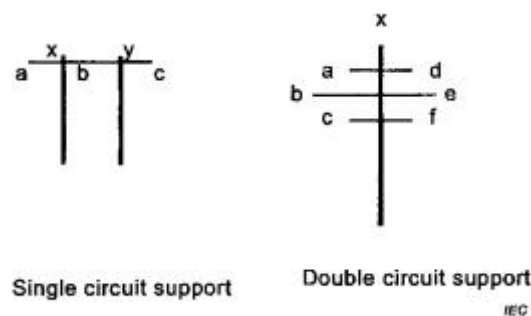


图 2.6.4 典型的杆塔类型

注意：对于多回线路，遭受非均匀冰荷载的相数可能不同，但不能少于双回线路的给定值。

表 2.6.6 非均匀冰荷载情况

杆 塔 的 类型	纵向弯曲情况		横向弯曲情况		扭转情况	
	左档距	右档距	左档距	右档距	左档距	右档距
单回路	xyabc	XYABC	XYabC	xYabC	XYabC	XYABC
双回路	xabcdef	XABCD EF	XabcDE F	XabcDE F	XabcDE F	XABCD EF
说明：表中，字母 ABCDEF 代表导线和档距承受荷载为 $0.7g_R$ ，字母 abcdef 代表导线和档距承受荷载为 $0.4 \times 0.7 g_R$ ，系数 0.7 和 0.4 是推荐系数，根据经验证实过的其他系数也可以采用。						

当导线所处的环境随档距不同而变化时，不平衡荷载会比前面描述的要大，这种情况需要考虑进去。在计算由于不平衡冰荷载而产生的对杆塔的径向荷载时，结构和绝缘子的弹性需要考虑进去在计算径向力时。简化条件是可以允许的只要他们计算出保守的结果。

当 OHL 特殊段处于在严重的云中冰下，相邻档距遭受不同程度的含水分的风吹，可以考虑杆塔的一边为最大冰荷载，另一边为裸导线。

2.6.2.4 风和冰的联合荷载

风对覆冰导线的作用包括至少三个变量：结冰时的风速，冰重和冰的形状（拉拽系数的影响）。这些会导致同时横向和纵向的荷载。

两种主要的覆冰类型，沉淀结冰和云中结冰，需要单独确定有风时的最大冰荷载。

如果没有风速和覆冰相结合的数据，可以假定 $g_L = g_R$ 和 $g_H = 0.4g_R$ ，如果风和覆冰结合的数据可以得到，统计的方法可以用来估算在选择的重现周期或年最大

平均风速下结合变量的值。

1)覆冰条件下风速的确定

a) 冻雨（沉淀结冰）

覆冰期间的风速可以通过对已知数据的计算来得到，但当没有数据时，按照下面的方法，参考风速要乘以衰减系数 B_i 。

$V_L = B_i \times V_R$ ，其中 $B_i = (0,60 \text{ to } 0,85)$ ， B_i 的范围认为对应于覆冰存在期间的参考风速（ $T=50,150$ 或 500 年）

$V_H = B_i \times V_R$ ，其中 $B_i = (0,4 \text{ to } 0,5)$ ， B_i 的范围认为对应于覆冰期间的年最大平均风速

上面公式中的给定值范围代表了覆冰期间风速的典型值，而且考虑了覆冰期间很少出现的最大风速。

当联合的数据可以获得时，风和冰负载的过程可以用来依照重现周期对每一种覆冰类型选择一个合适的值。

当风数据没有和覆冰严格地关联在一起时，需要借助于结冰期间且大气温度保持在 0°C 以下记录的年最大风速确定相应的最大风速（建议最大时间为 72 小时）

b) 湿雪（沉淀结冰）

基于当地气象条件和经验，风速 V_R 的减少可以采取与冻雨类似的方法（参考上一节），在没有具体的经验数据时，建议使用与冻雨相同的衰减系数。

c) 干雪（沉淀结冰）

在没有关于干雪的具体数据时，采用与湿雪同样的数据。

d) 霜淞（云中结冰）

在某些特定的地区，如在山顶，导线最大的霜雪覆冰往往发生在最大风速时，然而，在其他地区，最大冰往往发生在低于相应的荷载风速时。

基本的气象信息和地形信息用来估算沿着输电线路发生沿着云中覆冰的概率，相应的数据应当用在计算中。否则，就用冻雨的给定值。

2)覆冰导线的拉拽系数

只要可能，覆冰导线的拉拽系数都应当基于实际的测量值。在没有数据时，表 2.6.7 给出了有效的拉拽系数和冰密度。

表 2.6.7 覆冰导线的拉拽系数

	湿雪	干雪	霜凇	结晶冰
有效拉拽系数 c_{iH}	1.0	1.2	1.1	1.0
相应的冰密度 (kg/m ³)	600	600	900	900

有效的拉拽系数是对实际的覆冰形状假定成圆柱形的一个乘积因子，见图 13.两个证据可以证明覆冰导线拖拽系数的增加，一是由于不平衡直径的影响，二是由于覆冰的实际形状与假设的圆的光滑圆柱的差别。

说明：导线均匀冰厚对应于最小的整体直径，如最紧密的阴影区域。

假定 c_i 的值对于覆冰重现周期 50、150、500 年都是一样的

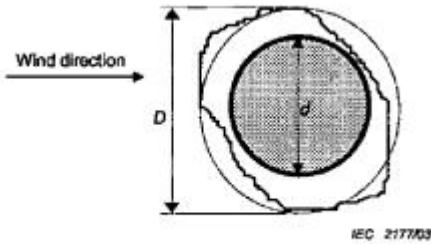


Figure 13 – Equivalent cylindrical shape of ice deposit

图 2.6.5 覆冰等效圆柱形

3)风对覆冰导线的的单位作用

风水平或垂直吹向导线时，对覆冰导线的单位风作用计算公式为：

$$a = q_0 C_i G_c G_L$$

$$q_{0L} = \frac{1}{2} \rho \kappa_R^2 V_{IL}^2 \quad \text{or} \quad q_{0H} = \frac{1}{2} \rho \kappa_R^2 V_{IH}^2 \quad \text{Pa (N/m}^2\text{)}$$

根据不同的荷载情况， $C_i = C_{iL}$ or C_{iH}

G_c 是导线联合风系数，

G_L 是档距因数

κ 是密度校正系数

2.6.2.5 建设和维护荷载（安全荷载）

1)杆塔的架设

所有提升点或所有元件的张力至少要用架设方法产生的静态荷载的两倍来进行校验。如果施工控制的很好的话也可以用系数 1.5。

2)导线张力

张力的计算应该在允许吊线和挂线的最低温度下进行计算。在计算结构荷载的过程中，推荐导线张力要至少两倍于导线移动时的挂线张力，至少 1.5 倍于的导线就位时的挂线张力。

3)垂直荷载

杆塔的附加负载应该利用导线的张力从垂直的角度进行计算。荷载应在加在导线连接点或导线拉线点上（如果不同的话），还应当考虑所有可能的导线吊线顺序在与任何负载的结合中，以及没有负载在代表导线吊线顺序的几个杆塔点。

4)横向负载

角度结构要能够承受由导线张力产生的横向负载。

尽管微风会发生在建设和维护的过程中，但是在计算中将其忽略。

5)维护荷载

所有导线杆塔点要能够耐受至少两倍的裸导线垂直荷载的挂线张力。

临时靠近导线正常连接点的用于维修和现场线路施工的提升或张挂点要能够耐受至少两倍裸导线荷载的挂线张力。

上面的荷载如果施工控制的好的话可以采用系数 1.5 不用 2。

维护时应当详细说明提拉的安排以确保杆塔不要应力过度。

所有的结构元件可能都会要求能够杆塔起一个施工人员，也就是 1500N 的荷载垂直作用于中点处，通常与维护时的应力一并考虑。所有这些都是基于无风和施工允许的最低温度下进行的。

3. 国内外导线风荷载计算对比

3.1 IEC、ASCE、GB50545 规范导线风荷载计算的对比

导线风荷载计算对比所采用的规范为：

《Design criteria of overhead transmission lines》(IEC 60826—2003)

美国标准《Guidelines for Electrical Transmission Line Structural Loading》
(ASCE74-2009)

《110kV~750kV 架空输电线路设计规范》(GB50545-2010)

3.1.1 基本风速

基本风速有关要素对比如下表：

表3.1-1 基本风速有关要素对比表

项目	IEC 60826	ASCE 74	GB 50545
基准高度	10m		
地面粗糙度	B 类	B 类	B 类
平均风速的时距	10min	3s	10min
最大风速样本	年最大风速		
重现期	50 年	50 年	按电压等级分类

可以看出：

(1) IEC与GB在基本风速的确定原则上是一致的，只是GB根据不同的电压等级采用不同的重现期，IEC按可靠性等级采用不同的重现期，参考的重现期为50年。

(2) ASCE与IEC、GB则有较大的区别，关键是时距上不同，其值也有较大的差异：3s的阵风速度与10min平均风速比是1.43：1，即IEC和GB的基本风速是30m/s，按ASCE设计时，对应的基本风速则为： $30 \times 1.43 = 42.9\text{m/s}$ 。

GB关于风速的规定：110kV~330kV输电线路的基本风速，不宜低于23.5m/s；500kV~750kV输电线路，基本风速不宜低于27m/s。这一规定一定程度上提高了线路的安全运行水平，减少了国内设计风速取值与国外的区别。

(3) 地面粗糙度系数（a）：

三个规范中，关于风速与地面粗糙度因素的关系，都是以同样的指数形式描述的。地面粗糙度系数取值见下表：

表3.1-2 粗糙度系数取值一览表

类别	IEC 60826		ASCE 74		GB 50545	
A 类	平坦的沿海地区	0.12	水面、平原	0.12	近海面和海岛、海岸、湖岸及沙漠地区	0.12
B 类	少量障碍物的空旷野外	0.16	少量建筑、树木的开阔地	0.16	田野、乡村、丛林、丘陵以及房屋比较稀疏的乡镇和城市郊区	0.16
C 类	低矮障碍物的地区	0.22	较多建筑、树木或丘陵地带	0.22	密集建筑群的城市市区	0.22
D 类	近郊地区、高大树木的地区	0.28	郊区或高大森林	0.28	密集建筑群且房屋较高的城市市区	0.30

从上表可以看出，A类地形的定义和取值接近；B-D类虽然取值接近，但定义有差别：丘陵地带和处郊区，a 取值比国外的略低。

其中，IEC规定：B类地形的风速为参考风速 V_{RB} ，其它各类地形下的基准风速与其转换关系为：

$$V_R = K_R \cdot V_{RB}$$

K_R 取值如下：

表 3.1-3 地形转换取值一览表

地形类型	K_R
A	1.08
B	1.00
C	0.85
D	0.67

3.1.2 导线风荷载对比分析

1) 线条风荷载计算公式对比分析

表3.1-4 线条风荷载对比表

标准	IEC 60826	ASCE 74	GB 50545
风压值公式	$W = \gamma \cdot V^2 / 1600 \cdot C_{xc} G_c G_L$	$W = \gamma \cdot V^2 / 390.625 \cdot K_z \cdot C_f \cdot G$	$W = \gamma \cdot V^2 / 1600 \cdot a \cdot \mu_z \cdot \mu_{sc} \cdot \beta_c$
风压值	W , 单位kN/m ²	W , 单位psf	W , 单位kN/m ²
风速	V , 单位m/s, 相应的高度单位m	V , 单位mph, 相应的高度单位ft	V , 单位m/s, 相应的高度单位m
体型系数	C_{xc} , IEC一般取1.0	C_f , ASCE一般取1.0	μ_{sc} , 线径小于17mm时取1.2 线径大于等于17mm时取1.1
风压高度变化系数	G_c , 与地形和高度有关, 但数值上比ASCE、GB要大很多。包含了风的脉动影响因素, 即GB中的风荷载调整系数	K_z , 与地形和高度有关, 与GB中的 μ_z 数值基本相当	μ_z , 与地形和高度有关
风压不均匀系数			a , 与风速大小有关, 在1~0.70之间
档距折减系数	G_L , 与档距有关, 档距越大, 折减越大, 取值在1~0.85之间		
阵风系数		G , 与档距和导线的高度有关, 随导线高度的增加而减小, 其意义上与GB中风荷载调整系数相同	
风荷载调整系数			在计算500kV、750kV杆塔荷载根据基本设计风速取值, 在1~1.3之间
荷载系数 γ	根据线路的电压等级和重要性选取重现期, 根据重现期确定其值, 50年为1.0, 150年为1.21, 500年为1.44	根据线路的重要性选取重现期, 根据重现期确定其值, 25年为0.85, 50年为1.0, 100年为1.15, 200年1.30, 500年为1.45	500kV、750kV重现期为50年, 均为1.4(也叫荷载分项系数), 对特别重要线路考虑重要性系数, 一般为1.1

2) 相关要素对比分析

a) IEC标准

IEC中的 G_c 不仅包含了与地形和高度有关的高度风压系数, 还包含了风的脉动影响因素。将IEC中的 G_c 除以GB中相应高度的 μ_z , 即得到与GB相当的风荷载调整系数, 见表3.1-5。可以看出, 它随高度增加而降低。

表3.1-5 IEC标准中包含的风荷载调整系数

h/m	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
G_c/μ_z	1.836	1.676	1.581	1.508	1.459	1.415	1.377	1.339	1.314	1.289

b) ASCE标准

ASCE中的阵风系数 G 不仅包含了3s种和10min风速的转换关系, 还包含了风的脉动影响因素。扣除转换因素后其值即相当于GB中的风荷载调整系数, 见表3.1-6, 它的规律与IEC一致, 随高度增加而降低。

表3.1-6 ASCE标准中包含的风荷载调整系数

塔高/m	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
$G/1.432$	1.97	1.82	1.78	1.73	1.697	1.66	1.64	1.62	1.59	1.57	1.55	1.54	1.52	1.509	1.49

c) GB标准

GB中风荷载调整系数：（1）对于导地线，规定500kV以上线路取值为1-1.3，主要是考虑风速放大作用，适当提高导地线荷载降低重要线路的倒塔事故；（2）对于杆塔，按《建筑结构荷载规范》GB50009计算，与塔型、塔的部位及高度都有关系。

3.1.3 结论

(1)IEC、ASCE 和 GB 标准在风荷载计算上有较大的差异，IEC 和 GB 基准风速的时距是 10min，ASCE 的时距 3s，风速之间的关系是 1:1.43。

(2)IEC、ASCE 根据不同的安全等级标准，确定重现期，从而确定荷载系数，其值在 0.75~1.45 之间，GB 的荷载系数是 1.4，是一个定值。因此在国外工程中首先必须明确工程的安全等级要求。

(3)IEC、ASCE 标准中风的脉动影响（相当于 GB 的风荷载调整系数），与塔型无关，且与 GB 的规律相反，随高度增加而减小。这也是标准差异较大的地方之一。

(4)IEC、ASCE 体型系数比 GB 略小。

3.2 中印规范关于导线风荷载计算的对比

印度风荷载规范 IS:875(part 3)-1987 是由印度结构安全组织委员会制定，国家工程学会分会理事会通过批准后，印度标准局采用的现行标准。

3.2.1 印度荷载规范中风压计算式

印度 IS:875(part 3)-1987 中规定：

设计风速 $V_z = V_b K_1 K_2 K_3$

离地面任意高度的设计风压 $p_z = 0.6 V_z^2$

式中:

K_1 为概率(危险)系数,为根据不同的风速区 and 设计年限确定的系数;

K_2 为地形、高度及建筑物尺寸系数,为根据不同的地形类别、结构类别及高度确定的系数;

K_3 为地形条件系数;

V_b 为基本风速。

3.2.2 两国规范参数取值对比

1) 基本风速

印度规范规定的基本风速为: 离地面10m高,地形类别2类,重现期为50年的3s平均最大阵风风速。

可以看出, 两个规范定义的基本风速,仅时距取值不同。

根据3s时距与10分钟时距的换算关系, 可以近似地按下式进行换算。

表3.2-1 不同时距平均风速的换算系数

时距	换算系数	时距	换算系数
1h	0.94	10s	1.35
10min	1.00	5s	1.39
1min	1.17	3s	1.42
30sec	1.25	0.5s	1.5

$$V_3/V_{600} = 1.42。$$

2) 基本风压

印度规范规定的基本风速为: 离地面任意高度的设计风压 $p_z = 0.6 V_z^2$ 。

中国规范定义的中国规范:基本风压 $w_0 = \rho * v^2 / 2$

取空气的密度 $\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$

$$w_0 = 0.625 v^2 \text{ (N/m}^2\text{)} = v^2 / 1600 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

3) 地面粗糙度

印度规范场地类别的划分与我国荷载规范基本一致,分为A、B、C、D四类。

4) 风荷载随高度变化系数

中国规范考虑风荷载随高度变化采用风压高度变化系数 μ_z 对基本风压进行修正。

印度规范中,考虑风荷载随高度变化采用系数 K_2 对基本风速进行修正。 K_2 为地形、高度及建筑物尺寸系数,是根据不同的地形类别、结构类别及高度确定的系数,取值见表3.2-2。

建筑物的类别A、B、C为根据建筑物的尺寸划分。

类别A:结构或构件,如围护、屋面等最大尺寸(最大水平或竖向尺寸)小于20m。

类别B:结构或构件,如围护、屋面等最大尺寸(最大水平或竖向尺寸)在20m~50m之间。

类别C:结构或构件,如围护、屋面等最大尺寸(最大水平或竖向尺寸)大于50m。

对山区建筑物:山峰、山坡、山间盆地、谷地等,印度规范采用系数 K_3 对基本风速进行修正来考虑地形的影响, K_3 为地形条件系数。

表3.2-2 K_2 的取值一览表

Height m	Terrain Category 1 Class			Terrain Category 2 Class			Terrain Category 3 Class			Terrain Category 4 Class		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
10	1.05	1.03	0.99	1.00	0.98	0.93	0.91	0.88	0.82	0.80	0.76	0.67
15	1.09	1.07	1.03	1.05	1.02	0.97	0.97	0.94	0.87	0.80	0.76	0.67
20	1.12	1.10	1.06	1.07	1.05	1.00	1.01	0.98	0.91	0.80	0.76	0.67
30	1.15	1.13	1.09	1.12	1.10	1.04	1.06	1.03	0.96	0.97	0.93	0.83
50	1.20	1.18	1.14	1.17	1.15	1.10	1.12	1.09	1.02	1.10	1.05	0.95
100	1.26	1.24	1.20	1.24	1.22	1.17	1.20	1.17	1.10	1.20	1.15	1.05
150	1.30	1.28	1.24	1.28	1.25	1.21	1.24	1.21	1.15	1.24	1.20	1.10
200	1.32	1.30	1.26	1.30	1.28	1.24	1.27	1.24	1.18	1.27	1.22	1.13
250	1.34	1.32	1.28	1.32	1.31	1.26	1.29	1.26	1.20	1.28	1.24	1.16
300	1.35	1.34	1.30	1.34	1.32	1.28	1.31	1.28	1.22	1.30	1.26	1.17
350	1.37	1.35	1.31	1.36	1.34	1.29	1.32	1.30	1.24	1.31	1.27	1.19
400	1.38	1.36	1.32	1.37	1.35	1.30	1.34	1.31	1.25	1.32	1.28	1.20
450	1.39	1.37	1.33	1.38	1.36	1.31	1.35	1.32	1.26	1.33	1.29	1.21
500	1.40	1.38	1.34	1.39	1.37	1.32	1.36	1.33	1.28	1.34	1.30	1.22

备注: 其中, 第一行为对应地面粗糙度的四类地形。

5) 重要性系数

印度规范, 对单独的荷载工况取重要性系数, 风荷载的重要性系数通过系数 K_1 考虑对基本风速进行修正; K_1 为概率(危险)系数, 为根据不同的风速区和设计年

限确定的系数,详见表3.2-3。

表3.2-3 K_1 的取值一览表

建筑物类别	平均年限	各级风速对应的重要性系数				
基准值	50	33	44	47	50	55
		1	1	1	1	1
临时建筑物	5	0.82	0.76	0.73	1.08	0.67
发生事故时,对生命和财产没有破坏性的建筑物,比如林区的独屋、农场房屋	25	0.94	0.92	0.91	0.9	0.89
重要建筑物,比如医院、电厂的大楼	100	1.05	1.06	1.07	1.08	1.08

中国规范中,风荷载计算中,不考虑重要性系数;对荷载效应组合的设计值统一取重要性系数,取值如下:

对安全等级为一级(破坏后果很严重的重要的建筑物)或设计使用年限为 100 年及以上的结构构件,不应小于 1.1;

对安全等级为二级(破坏后果严重的一般的建筑物)或设计使用年限为 50 年的结构构件,不应小于 1.0;

对安全等级为三级(破坏后果不严重的次要的建筑物)或设计使用年限为 5 年及以下的结构构件,不应小于 0.9;在抗震设计中,不考虑结构构件的重要性系数。

3.2.3 结论

- (1)中国规范与印度规范不同间距的风速可进行转化,以方便工程设计。
- (2)风压高度变化系数,印度规范考虑对风速进行修正,中国规范对基本风压进行修正。两国规范的地面粗糙度的定义基本相同。
- (3)风荷载体型系数,印度规范规定较为复杂,根据建筑物外形的具体尺寸规定了不同的取值,而中国规范对常见的外形明确了体型系数,应用比较方便。