

主设人培训专题

架空送电线路荷载及负荷组合

前言

根据估算，线路杆塔投资约占本体投资的 30%-40%，由此可知，杆塔和基础设计对线路的投资影响非常大。而影响杆塔指标的主要因素在于荷载的大小及荷载的组合情况，因此，对线路的杆塔荷载及组合方案进行详细研究并确定杆塔荷载及组合原则，对降低线路的工程投资，保证输电线路的长期安全运行具有重大意义。

1. 关于架空送电线路的设计规定情况

历年来，关于架空送电线路的设计规定共经过三次大的变化，分别是：

《架空送电线路设计技术规程》SDJ 3-79，该规程对杆塔结构设计采用的是安全系数法和容许应力法。

《110kV～500kV 架空送电线路设计技术规程》DL / T 5092-1999，该规程对杆塔结构设计理论进行了修改，采用以概率理论为基础的极限状态设计法，用可靠指标度量结构构件的可靠度，具体采用分项系数的设计表达式。

《110kV～750kV 架空输电线路设计规范》GB50545-2010，该规程主要是针对 2008 年全国大规模覆冰倒塔作的规范修订。

2. 风荷载重现期的规定

在《架空送电线路设计技术规程》SDJ 3-79 中，规定的荷载重现期为：

- 1 大跨越重现期应取 30 年。
- 2 送电线路重现期应取 15 年。

在《110kV～500kV 架空送电线路设计技术规程》DL / T 5092-1999 中规

定的荷载重现期为：

- 3 500kV 大跨越重现期应取 50 年。
- 4 500kV 输电线路重现期应取 30 年。
- 5 110kV~330kV 大跨越重现期应取 30 年。
- 6 110kV~330kV 输电线路重现期应取 15 年。

在《110kV~750kV 架空输电线路设计规范》GB50545-2010 中规定的荷载重现期为：

- 1 750kV、500kV 输电线路及其大跨越重现期应取 50 年。
- 2 110kV~330kV 输电线路及其大跨越重现期应取 30 年。
- 3 在《±800kV 直流架空输电线路设计规范》（送审稿）规定，杆塔结构设计风荷载重现期按 100 年考虑。

可以看出，随着历次规范的推出，风荷载重现期不断增大，使杆塔的抗风能力不断加强。我国建设部颁布的《建筑结构荷载规范》（GB 50009—2001）把风荷载基本值的重现期由 30 年一遇提高到 50 年一遇；重现期由 30 年一遇提高到 50 年一遇，使得风速值提高约 5%，风压值提高了 11%左右，比原来对杆塔的抗风能力提高了很多。

3. 基本风速的确定

在《架空送电线路设计技术规程》SDJ 3-79 和 GB50545-2010 的规范中最大设计风速为 110kV~330kV 离地面 15 米高，500kV 离地面 20 米高；在《110kV~750kV 架空输电线路设计规范》GB50545-2010 中规定统计风速取离地面 10 米高，保持与《建筑结构荷载规范》（GB 50009—2001）一致，简化了资料换算，便于与其它行业比较。

4. 杆塔荷载分类

(1) 永久荷载。导线及地线、绝缘子及其附件和结构构件及杆塔上各种固定设备等的自重荷载。

(2) 可变荷载。风和冰(雪)荷载；导线、地线及拉线的张力；安装检修的各种附加荷载；结构变形引起的次生荷载以及各种振动动力荷载。

(3) 特殊荷载：断线所引起的荷载、地震所引起的荷载。

5. 杆塔荷载方向

可以分为横向荷载、纵向荷载和垂直荷载三种。横向荷载是沿横担方向，纵向荷载是垂直于横担方向的荷载，垂直荷载是垂直于地面方向的荷载。

横向荷载主要有：风荷载、角度荷载。

纵向荷载主要有：风荷载、张力荷载。

垂直荷载主要有：重力荷载。

悬垂型杆塔应计算最大设计风向与线路方向成 0° ， 45° ， 60° ，及 90° 的四种最大风速的风向；对一般耐张型杆塔可只计算 90° 一个风向；对终端杆塔，除计算 90° 风向外，还需计算 0° 风向；对悬垂转角塔和耐张转角塔转角度数较小时，还应考虑与导、地线张力的横向合力相反的风向。

风向与导、地线方向或塔面成夹角时，导线、地线风载在垂直和顺线条方向的分量，塔身和横担风载在塔面两垂直方向的分量，按下表选用。

表3.2-1 角度风吹时风荷载分配表

风向角 θ ($^\circ$)	线条风荷载		塔身风荷载		水平横担 风荷载	
	X	Y	X	Y	X	Y
0	0	$0.25W_x$	0	W_{ab}	0	W_{sc}
45	$0.5W_x$	$0.15W_x$	$K \times 0.424 \times (W_{sa} + W_{sb})$	$K \times 0.424 \times (W_{sa} + W_{sb})$	$0.4W_{sc}$	$0.7W_{sc}$

60	$0.75W_x$	0	$K \times (0.747W_{sa} + 0.249W_{sb})$	$K \times (0.431W_{sa} + 0.144W_{sb})$	$0.4W_{sc}$	$0.7W_{sc}$
90	W_x	0	W_{sa}	0	$0.4W_{sc}$	0

6. 杆塔荷载组合

6.1 国内外不同规范的荷载组合

(1) ASCE 荷载工况及组合

美国输电线路设计时通常考虑的荷载工况及组合如表所示。

ASCE荷载工况及荷载组合

工况名	荷载工况
类似与我国的正常运行工况	1) 任何方向的最大风；
	2) 最大覆冰和相应风载；
	3) 覆冰不平衡力，无风（需要时使用）；
	4) 覆冰时实际风荷载（需要时使用）；
类似于我国断线工况	1) 衡量阻止结构失效的标准荷载，如：断导线荷载等；
类似于我国安装工况	1) 结构建造荷载；
	2) 线条张力荷载；
法规工况	1) 法规荷载；
断线工况	无冰、无风、平均温度，对于重冰区应考虑覆冰的情况：
	1) 单回路，断任意一相导线或地线，或者是断任意一相导线+地线；
	2) 双回路，断任意两相导线或地线，或者是控制工况组合——断一相导线+地线；

(2) IEC 荷载工况及组合

IEC 规范中规定的输电线路设计时通常考虑的荷载工况及组合如表所示。

IEC荷载工况及荷载组合

工况名	荷载工况	
可靠性（对应于我国正常运行工况）	1) T 年荷载重现期的气候荷载，如风荷载，覆冰，覆冰+风荷载；	
	扭转荷载	无冰、无风、断一相导线或断相邻档地线；
	纵向荷载	作用在所有的连接点上，其值等于一跨为裸导线张力，相邻跨超载至两倍导线单位重所产生的不平衡力。或取纵向不平衡张力为 50%导线张力；
（结构）安全性要求（对应于我国断线工况）	<p>为了增加线路的安全性还应采取相应的附加安全措施：</p> <p>1) 高安全性的线路，每个点上的 RSL（静态残余张力）值增加 1.5 倍；</p> <p>2) 双回路或多回路线路，增加 RSL 作用点，如两相导线或地线；</p> <p>3) 转角塔或恶劣气候线路：通过取三年重现期的风荷载和覆冰荷载下对应的 RSL 平均值来使 RSL 值提高；</p> <p>4) 重冰区的重要线路，间隔着设置防串倒塔（即按断所有导线的极限状态设计）；</p>	
（生命）安全性（对应于我国安装工况）	建造物支持	要求挂点和相应构件的承载力至少等于 2 倍的提升构件的荷载，当有仔细控制的工况下可取 1.5 倍；
	挂导线和松导线	<p>1) 导线张力：导线移动拉力至少等于 2 倍的松弛张力；</p> <p>2) 垂直荷载：考虑任意荷载组合下了所有可能导线挂点；</p> <p>3) 横向荷载：忽略风荷载；</p> <p>4) 临时终端支持物的纵向（和垂直）荷载：纵向荷载作用在任意荷载组合下所有可能的导线挂点上；垂直荷载由临时拉线张力并考虑连接点的垂直荷载的影响来计算；</p> <p>5) 耐张塔的纵向荷载等于该相导线的重量 w (N/m) × 相邻档距最低点的高度差 (m)；</p>

	维修荷载	所有的导线支持点应能够承受裸导线垂直荷载的 2 倍。当有仔细控制的工况下可取 1.5 倍。维修人员及附属物的重量取 1500N。
--	------	--

(3) 《110kV~750kV 架空输电线路设计规范》GB50545-2010 荷载工况及组合

《110kV~750kV 架空输电线路设计规范》GB50545-2010 规范规定输电线路设计时应考虑正常运行情况、断线情况、不均匀覆冰情况和安装情况下的荷载组合，如下表所示。

GB50545荷载工况及荷载组合

工况名	荷载工况		备注
正常运行 工况	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）；		
	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）；		
断线工况	直线塔	1) 任意一极导线有纵向不平衡张力，地线未断；	应按-5°、有冰、无风的气象条件计算
		2) 断任意一根地线，导线无纵向不平衡张力；	
	转角塔	1) 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；	
安装工况	直线塔	1) 提升导线、地线及附件时的作用荷载；	应按 10m/s 风、无冰、相应气温的气象条件计算
		2) 导线及地线锚线时的作用荷载；	
	转角塔	1) 锚塔在锚地线时，相邻档内的导线及地线均为架设；锚导线时，在同档内的地线已架设；	
		2) 紧线塔在紧地线时，相邻档内的地线架设或未架设，同档内的导线均未架设；紧导线时，同档内的地线已架设，相邻档内的导线已架设或未架设；	

根据前苏联和日本已建成的输电线路的分析和论证，无论是交流或直流，荷载组合的取值原则、组合方式其考虑方式都是相同的。

轻冰区杆塔荷载组合

从我国规范、ASCE、IEC 标准来看，各国对杆塔的基本荷载组合均分为三类，按我国的习惯表示方法，即为正常运行情况、安装情况及事故情况。因此输电线路轻冰区荷载工况即荷载组合也按这三类来采用。

(1) 正常运行工况

从前述分析可知，我国规范、ASCE、IEC 标准的正常运行工况及其荷载，除荷载重现期不同外，除 ASCE 规范考虑在需要时选用“覆冰不平衡力、无风”工况外，没有明显的差异。因此线路轻冰区杆塔在正常运行工况应有以下荷载组合：

- (a) 最大风速、无冰未断线（包括最小垂直荷载和最大水平荷载的组合）；
- (b) 最大覆冰、相应风速及气温、未断线；
- (c) 最低气温、无冰、无风、未断线（适用于终端和转角杆塔）；

(2) 安装情况

从前述分析可知，我国规范、ASCE、IEC 标准确定安装工况的基本原则是一致的，均需考虑导线的提升荷载、施工中导线张力、临时拉线的张力、维修在等。各类杆塔的安装情况，应按相应风速、无冰、相应气温的气象条件下考虑下列荷载组合：

- (a) 直线型（含悬垂转角型）杆塔
 - i) 检修时提升导、地线及其附件时发生的荷载；
 - ii) 导线及地线锚线作业时，导线及地线的锚线张力；
 - iii) 牵引导线时，产生的不平衡张力；
- (b) 耐张型杆塔

i) 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, 同一档内的地线已架设;

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

ii) 临时拉线所产生的荷载;

iii) 紧线牵引绳所产生的荷载;

iv) 安装时的附加荷载;

(3) 事故情况

(a) 直线型杆塔

i) 任意一极导线有不平衡张力, 地线未断、无风、设计冰;

ii) 断任意一根地线, 导线无不平衡张力、无风、设计冰;

iii) 对防串倒的加强型悬垂杆塔, 除按悬垂型杆塔工况计算外, 还应按所有导、地线同侧有断线张力(分裂导线纵向不平衡张力)计算;

(b) 耐张型杆塔

i) 在同一档内, 断任意一根地线, 任意一极导线有不平衡张力、无风、设计冰;

(4) 不均匀脱冰

轻冰区杆塔的不均匀脱冰工况应考虑所有导、地线同时同向有不均匀覆冰的不平衡张力。即考虑纵向弯矩组合情况, 以提高杆塔的纵向抗弯能力。

杆塔设计的不同荷载组合, 应按下表的规定考虑各个方向的荷载与作用。表中符号“O”表示该方向必须包括这项荷载。

表 3.4-5 荷载组合的作用与方向

塔型	荷载情况		塔身风压				导、地线荷载与塔的重力荷载										备 注
			风向与Y轴夹角				X方向				Y方向				Z方向		
			90°	60°	45°	0°	W _X	T _X	P _X	M _X	W _Y	T _Y	P _Y	M _Y	G _t	G _e	
直线塔	正常运行	大风	0				0	0				0			0	0	悬垂转角塔还需计算-90°风
				0			0	0			0	0			0	0	
					0		0	0			0	0			0	0	
						0		0			0	0			0	0	
	覆冰	不均匀脱冰	0				0	0		0		0			0	0	
			0				0	0		0		0			0	0	
	安装断线	安 装	0				0	0		0		0		0	0	0	
		断 线						0	0	0		0	0	0	0	0	
耐张塔	正常运行	大风	0				0	0				0			0	0	角度较小时还应计算-90°风
					0		0	0			0	0			0	0	
						0		0			0	0			0	0	
		覆冰低温	不均匀脱冰	0				0	0		0		0			0	0
	0						0	0		0		0			0	0	
	安装断线	安 装	0			0		0		0		0		0	0	0	
		断 线						0	0	0		0	0	0	0	0	
							<div>注1: W_X, W_Y -- 导线、地线和绝缘子风压在X、Y方向的分量;</div> <div>注2: T_X, T_Y -- 导线、地线张力和不平衡张力在X、Y方向的分量;</div> <div>注3: G_t -- 塔和设备质量;</div> <div>注4: P_X, P_Y -- 导线、地线断线张力在X、Y方向的分量;</div> <div>注5: M_X, M_Y -- 不对称张力或不对称垂直质量引起的扭矩或弯矩在X、Y方向的分量;</div> <div>注6: G_e -- 导线、地线和绝缘子等质量, 以及安装时导线、地线张力的垂直分量。</div>										

中冰区杆塔荷载组合

对中冰区杆塔, 除不均匀脱冰工况与轻冰区有所区别外, 其余工况与轻冰区荷载工况相同。

中冰区杆塔的不均匀脱冰工况应考虑:

- (1) 所有导、地线同时同向有不均匀覆冰的不平衡张力。即考虑纵向弯矩组合情况, 以提高杆塔的纵向抗弯能力。
- (2) 所有导、地线同时不同向有不均匀覆冰的不平衡张力。即考虑扭矩组合情况, 以提高杆塔的抗扭能力。

7. 杆塔荷载组合注意事项

7.1 悬垂型杆塔基本风速工况，除了 0° 风向和 90° 风向的荷载工况外， 45° 风向和 60° 风向对杆塔控制杆件产生的效应很接近。因此，通常计算 0° 、 45° 及 90° 三种风向的荷载工况。但是，对塔身为矩形截面或者特别高的杆塔等结构，有时候可能由 60° 风向控制，此时应计算 60° 风。

7.2 耐张型杆塔的基本风速工况，一般情况由 90° 风向控制，但由于风速、塔高、塔型的影响， 45° 风向有时也会控制塔身主材。对于耐张分支塔等特殊杆塔结构，还应根据实际情况判断其他风向控制构件的可能性。

7.3 考虑到终端杆塔荷载的特点是不论转角范围大小，其前后档的张力一般相差较大。因此，规定终端杆塔还需计算基本风速的零度风向，其它风向（ 90° 度或 45° 度）可根据实际塔位转角情况而定。

7.4 正常运行情况、断线（含分裂导线时的纵向不平衡张力）情况和安装情况的荷载组合是各类杆塔的基本荷载组合，不论线路工程处于何种气象区都必须计算。当线路工程所处气象区有覆冰条件时，还应计算不均匀覆冰的情况。

7.5 基本风速、无冰、未断线的正常运行情况应分别考虑最大垂直荷载和最小垂直荷载两种组合。

7.6 断线（含分裂导线的纵向不平衡张力）情况，当实际工程气象条件无冰时，应按 -5°C 、无冰、无风计算。断线工况均考虑同一档内断线（或分裂导线的纵向不平衡张力）。

- 对单回路悬垂型杆塔，应分别考虑一根导线断线（或一相导线有纵向不平衡张力）情况和断一根地线的情况。
- 对耐张塔和双回路及以上的悬垂型杆塔，尚应考虑地线和导线的断线

（或分裂导线的纵向不平衡张力）组合。

- 对导线水平排列的单回路耐张塔，某些杆件内力在边相作用一相导线断线张力（或分裂导线的纵向不平衡张力）时，可能比边、中相同时作用两相导线断线张力（或分裂导线的纵向不平衡张力）的情况还要大，因此要求考虑作用一相或两相断线张力（或分裂导线的纵向不平衡张力）的荷载组合。某些杆塔设计时，能够判断作用一相导线断线张力（或分裂导线的纵向不平衡张力）不起控制作用时，可以只计算作用两相导线断线张力（或分裂导线的纵向不平衡张力）的荷载组合，以简化计算。
- 对双回路或多回路耐张杆塔，由于各工程的导线排列型式不尽相同，也可能存在类似情况，荷载组合时应作考虑。
- 对于终端杆塔，由于变电所侧导线断线张力（或分裂导线的纵向不平衡张力）很小，线路侧导线断线张力（或分裂导线的纵向不平衡张力）相对很大，因此要求对单回路或双回路终端塔还要考虑线路侧作用一相或两相断线张力（或分裂导线的纵向不平衡张力），使终端塔的纵向荷载组合效应不低于耐张塔的纵向荷载组合。

7.7 为了提高地线支架的承载能力，对悬垂塔和耐张塔，地线断线张力取值均为 100%最大使用张力。

7.8 从历次冰灾事故情况来看，地线的覆冰厚度一般较导线要厚，故对于不均匀覆冰情况，地线的不平衡张力取值（占最大使用张力的百分数）较导线要大。无冰区和 5mm 冰区可不考虑不均匀覆冰情况引起的不平衡张力。

规范中不均匀覆冰的导、地线不平衡张力取值适用于档距 550m、高差不超过 15%的使用条件，超过该条件时应按实际情况进行计算。

7.9 加强型悬垂型杆塔除按常规悬垂型杆塔工况计算外，还应按所有导地线同侧有断线张力（或分裂导线的纵向不平衡张力）计算。以提高该塔的纵向承载能力。

7.10 悬垂型杆塔，导线或地线锚线作业时，挂线点处的线条重力由于前后塔位高差对其影响较大，一般应取垂直档距较大一侧的线条重力。

7.11 水平和接近水平的杆件，单独校验承受 1000N 人重荷载，而不与其它荷载组合。一般可将与水平面夹角不大于 30 度的杆件视为接近水平的杆件。如果某些杆件不考虑上人，应在设计文件中说明。校验时，可将 1000N 作为集中荷载，杆件视为简支梁，其跨距取杆件的水平投影长度，杆件应力应不大于材料的强度设计值。

7.12 为便于设计，对一般高度的杆塔在全高度内采用单一系数。根据过去部分实测结果和经验，总高度在 20m 及以下的杆塔的自振周期较小(一般在 0.25 秒以下)，可以不考虑风振的影响(即 $\beta_z=1.0$)。拉线杆塔的 β_z 值的规定主要是参照《高耸结构设计规范》的规定给予适当提高。总高度超过 60m 的杆塔，特别是较高的大跨越杆塔，其 β_z 宜采用由下而上逐段增大的数值，可以参照《建筑结构荷载规范》的有关规定确定；对宽度较大或迎风面积增加较大的计算段(例如横担、微波天线等)应给予适当加大。

7.13 基础的 β_z 值取对杆塔效应的 50%，即 $\beta_{基}=(\beta_{杆塔}-1)/2+1$ ，考虑到使用上方便，可取对 60m 以下杆塔为 1.0；对 60m 及以上杆塔为 1.3。

注：具体应用计算时，可参考《荷载组合计算程序 HZZHJS_2.4》

用法简介一文