[输电线路]

架空输电线路电气设计的问题及改进措施

文/邱康明
广东顺德电力设计院有限公司

架空输电线路电气的设计涵盖多个方面，包括导线选择、绝缘配置、线路参数计算、杆塔结构设计、接地系统规划及安全措施。这些方面对保证输电线路的经济性、安全性和可靠性至关重要。导线选择是设计的基础环节，涉及导线截面积的计算和选择。绝缘配置需要考虑环境条件、工作电压和线路运行情况。线路参数计算采用精确的电磁场理论方法。杆塔结构设计需要优化不同杆塔结构形式，并确保其在各种工况下的稳定性。接地系统规划包括基于土壤电阻率分布的优化设计，以及防雷击和电磁干扰的防护措施，以提高线路的安全性和稳定性，减少故障率和维护成本。

架空输电线路的电气设计涵盖多个方面，包括导线选择、绝缘配置、线路参数计算、杆塔结构设计、接地系统规划及安全措施。每一个方面都对确保输电线路的经济性、安全性和可靠性至关重要。首先，导线选择是架空输电线路设计中的基础环节。其次，绝缘配置涉及对绝缘材料的选择和布置。再次，在线路参数计算方面，基于电磁场理论的精确计算方法是研究重点。此外，杆塔结构设计则涉及对不同杆塔结构形式的优化分析。最后，接地系统规划及安全措施是保证输电线路安全运行的重要环节。研究基于土壤电阻率分布的接地系统优化设计，以及防雷击和电磁干扰防护措施，可以显著提高线路的安全性和稳定性，减少故障率和维护成本。

导线选择

1. 导线截面积

导线截面积的选择是架空输电线路设计中至关重要的一环，对传输效率、经济性和安全性有着直接影响。导线截面积的计算公式为

$$A=\frac{I}{J} \tag{1}$$

式中，A为导线截面积mm^2；I为线路电流，A；J为经济电流密度，A/mm^2。

在工程设计中，应用上式可以确保导线能够安全地传输电力，同时优化成本和减少能量损耗。经济电流密度见表1。

表1　经济电流密度

电压等级/kV	经济电流密度/A/（mm^2）
110	1.0
220	0.9
330	0.8
500	0.7

例如，某电站位于山区，装机容量为500 MW，额定电压为220 kV。根据负荷计算，输电线路的电流为2 272 A。如果选择经济电流密度为0.9A/mm^2，那么所需导线截面积为2 524.44 mm^2。选择导线截面积后，可以确保该电站在地理环境复杂的情况下，输电线路的损耗最小，经济效益最佳。

2. 导线钢芯截面选择

目前，钢芯铝绞线是架空输电线路中最常用的导线类型，常见型号包括LJG-240/40、LJG-300/25和LJG-400/35等，主要参数与价格对比见表2。

表2　LJG—240／40与LJG—300／25导线主要参数与价格对比

型号	导线截面积/mm²	单位长度重量/(kg/km)	拉断力/kN	价格/(元/km)
LJG-240/40	280	1 450	89	8 000
LJG-300/25	325	1 600	95	9 500

表3　LJG—300／40与LJG—400／35导线参数与价格对比

型号	导线截面积/mm²	单位长度重量/(kg/km)	拉断力/kN	价格/(元/km)
LJG-300/40	340	1 650	97	9 800
LJG-400/35	435	2 200	120	12 500

表4　LJG—400／35与LJG—400／50导线参数与价格对比

型号	导线截面积/mm²	单位长度重量/(kg/km)	拉断力/kN	价格/(元/km)
LJG-400/35	435	2 200	120	12 500
LJG-400/50	450	2 300	128	13 000

通过表2～表4数据，可以看出不同型号的导线在截面积、重量、拉断力和价格上有明显差异。LJG-400/50在拉断力和电流承载能力上具备优势，但其价格较高；而LJG-240/40虽然价格较低，但在拉断力方面相对不足。因此，应根据具体工程需求和经济条件进行综合权衡。

绝缘配置

1. 架空线路绝缘配置的因素

架空线路绝缘配置主要受到环境条件、工作电压和线路的运行情况的影响。不同海拔地区和气候条件下，绝缘配置存在显著差异，如高海拔地区需要考虑空气密度降低对绝缘性能的影响。高海拔地区绝缘配置的计算方式需要根据实际气体状态进行修正，绝缘和大气击穿电压与标准状态下的数学关系式为

$$U_h=(1+\frac{h}{8\ 150})\ U_0 \tag{2}$$

式中，U_h为海拔高度h m下的击穿电压；U_0为标准状态下的击穿电压。

修正后相对密度见表5。

表5　海拔高度、相对密度和修正后的相对密度数据

海拔高度/m	相对密度	修正后相对密度
0	1.0	1.0
500	0.95	0.95
1 000	0.89	0.89
2 000	0.78	0.78
3 000	0.70	0.70
4 000	0.62	0.62
5 000	0.54	0.54

2. 架空输电线路绝缘和空气间隙配置算法

架空输电线路绝缘和空气间隙配置的关系式通常表示为

$$S=kU \tag{3}$$

式中，S为空气间隙距离；k为空气间隙修正系数；U为线路的工作电压。

绝缘和空气间隙配置中主要考虑的要素包括工作电压、海拔高度、气候条件和绝缘子的类型等，具体见表6。

表6　架空输电线路带电部分与杆塔构件的最小空气间隙值

电压等级/kV	相对空气间隙/mm	海拔修正系数k	最小空气间隙值/mm
110	1 200	1.0	1 200
220	2 100	1.1	2 310
330	3 100	1.2	3 720
500	5 000	1.3	6 500

3. 配置原则

1）安全性原则。绝缘配置应确保线路在各种运行和环境条件下的安全运行，防止绝缘击穿和闪络事故。

2）经济性原则。选择绝缘子和空气间隙时，应在满足安全性前提下，尽量降低成本，提高经济效益。

3）适应性原则。根据线路所处的地理和气候条件，如高海拔、潮湿等，选择合适的绝缘配置，确保线路的可靠性。

4）标准化原则。绝缘配置应符合国家和行业的相关标准和规范，确保设计和施工的一致性和可操作性。

线路参数计算

在输电线路设计中，线路参数的计算是非常重要的一部分。线路参数包括电阻、电抗和电导等，它们直接影响输电线路的性能和效率。

1. 导线电阻计算

导线电阻是线路参数中的一个重要指标，它影响到线路的损耗和电压降。导线电阻计算公式为

$$R=\frac{\rho \cdot L}{A} \tag{4}$$

式中，R为导线电阻，Ω；ρ为导线材料的电阻率，Ω·mm²/m；L为导线长度，m；A为导线截面积，mm²。

常见导线材料电阻率见表7。

表7　常见导线材料电阻率

材料类型	电阻率/（Ω·mm²/m）
铝	0.028 2
铜	0.017 2

2. 导线电抗计算

导线的电抗决定线路的感抗和容抗，影响线路的功率传输能力。电抗计算公式为

$$X=\omega L \tag{5}$$

式中，X为导线的电抗，Ω；ω为角频率，rad/s，其值为$2\pi f$；f为频率，Hz；L为导线的电感，H。

导线的电感可以根据导线的几何形状和相对位置进行计算。在架空线路中，通常使用以下公式近似计算导线的电感

$$L=2\times10^{-7}\times I_{n}(\frac{D}{r}) \tag{6}$$

式中，L为电感，H/m；D为导线之间的距离，m；r为导线的半径，m。

3. 导线电导计算

导线的电导反映线路的漏电特性，通常用以下公式计算

$$G=\frac{1}{Rs} \tag{7}$$

式中，G为导线电导，S；R_s为导线的绝缘电阻，Ω。

绝缘电阻一般由导线的绝缘材料和外部环境决定。

4. 实例计算

假设有一条输电线路，使用LJG-400/50型导线，导线长度为100 km，工作频率为50 Hz。

（1）电阻计算

导线截面积 $A=450$ mm²，铝的电阻率 $\rho=0.0282$ Ω·mm²/m，导线长度$L=100\times103$ m，$R=\frac{0.028\,2\times100\times10^{3}}{450}\approx6.27\,\Omega$。

（2）电抗计算

角频率$\omega=2\pi\times50\approx314$ rad/s，导线电感（假设导线间距$D=0.5$ m，导线半径$r=0.01$ m），$L=2\times10^{-7}\times\ln(\frac{0.5}{0.01})\approx2\times10^{-7}\times3.91\approx7.82\times10^{-7}$H/m。此时，导线总电感$L_{total}=7.82\times10^{-7}\times100\times10^{3}\approx0.078\,2$ H，$X=\omega\cdot L_{total}=314\times0.078\,2\approx24.56\,\Omega$。

（3）电导计算

假设绝缘电阻 $R_s=1\times10^{9}$ Ω，则$G=\frac{1}{R^{s}}=\frac{1}{1\times10^{9}}=1\times10^{-9}S$。

通过上述计算，可以得到导线的主要参数，这些参数将用于进一步分析和优化输电线路的设计，确保其在实际应用中的可靠性和效率。

杆塔结构设计

架空输电线路的杆塔结构设计是确保线路安全、稳定和经济运行的重要环节。在杆塔结构设计时，需要综合考虑多种因素，包括线路电压等级、地理环境、气候条件以及经济性等。

1. 杆塔类型选择

根据输电线路的电压等级和使用环境，常见的杆塔类型包括：①直线塔，用于线路直线段，承受垂直荷载；②耐张塔，用于线路转角、跨越障碍物或需要额外支撑的地方，承受较大的水平荷载和垂直荷载；③终端塔，用于线路终端，承受全部导线的拉力；④分支塔，用于线路分支处，承受分支线路的拉力和垂直荷载。

2. 杆塔荷载设计

杆塔设计需要考虑各种荷载，包括：①自重，杆塔自身结构的重量；②风荷载，风作用在杆塔和导线上的力；③冰荷载，积冰作用在导线和杆塔上的重量；④导线张力，导线对杆塔施加的拉力；⑤短路力，故障电流引起的电动力。

此外，在进行杆塔结构设计时，需要确定以下主要参数：如杆塔高度、杆塔基础和杆塔材料。

3. 杆塔设计计算

（1）风荷载计算

根据以下公式计算风荷载

$$F_{风}=C_{d}Ap_{风} \tag{8}$$

式中，$F_{风}$为风荷载，N；C_d为风载体型系数；A为迎风面积，m²；$p_{风}$为风压，N/m²。

（2）冰荷载计算

根据以下公式计算冰荷载

$$F_{冰}=A\gamma_{冰}d_{冰} \tag{9}$$

式中，$F_{冰}$为冰荷载，N；A为积冰面积，m^2；$\gamma_{冰}$为冰的密度，N/m^3；$d_{冰}$为冰的厚度，m。

（3）导线张力计算

根据以下公式计算导线张力

$$T=\frac{\omega L^2}{8s} \tag{10}$$

式中，T为导线张力，N；w为导线单位长度重量，N/m；L为导线跨距/m；s为导线弧垂，m。

4. 实例设计

设计一座用于220 kV输电线路的耐张塔，主要参数为：导线型号LJG-400/50；导线悬挂高度，30 m；导线跨距500 m；地形平坦；风速30 m/s；积冰厚度20 mm。

1）风荷载计算。假设风载体型系数C_d=1.2，风压$p_{风}$由风速计算得出$\rho_{风}=0.613\times\upsilon^2=0.613\times30^2\approx552.3\ N/m^2$；导线单位长度迎风面积$A$=0.01 m×500 m=5 m^2；$F_{风}=1.2\times5\times552.3\approx3\ 313\ N8.$。

2）冰荷载计算。假设冰密度$\gamma_{冰}$=900 kg/m^3，导线单位长度积冰面积$A=\pi\times0.01\times500\approx15.7\ m^2$；$F_{冰}=15.7\times900\times0.02\approx282.6\ N$。

3）导线张力计算。导线单位长度重量w=0.028 2 N/m，弧垂s=15 m。

通过对杆塔荷载的计算和结构设计，可以确保架空输电线路的安全、可靠和经济运行。杆塔结构设计不仅要满足力学性能要求，还要考虑施工、维护和经济性，实现整体优化。

接地系统规划

接地系统是架空输电线路设计中至关重要的组成部分，其主要功能是保障人身安全、设备安全以及减少雷击和电气故障对系统的影响。接地系统的规划和设计需要综合考虑多种因素，包括地理环境、电气参数和土壤电阻率等。

1. 接地系统规划

（1）接地形式选择

根据输电线路的电压等级、地理环境和土壤电阻率等因素，常见的接地形式如下。

单点接地：适用于短距离线路和低电压等级的场合。

多点接地：适用于长距离线路和高电压等级的场合，有助于降低接地电阻。

环形接地：在需要增强接地系统可靠性和降低接地电阻的场合使用，如变电站和重要线路节点。

（2）接地电阻要求

接地电阻的设计需要满足以下要求。

人身安全：确保接地电阻足够低，以防止接地故障时接地点附近产生危险电位。

设备安全：保证设备接地电阻在规定范围内，以防止设备损坏。

雷电防护：降低雷击时接地电压，提高系统的雷电防护能力。

接地电阻要求见表8。

表8　接地电阻要求

电压等级/kV	接地电阻要求/Ω
110	≤10
220	≤5
330	≤3
500	≤1

（3）接地材料选择

接地材料应具备良好的导电性和耐腐蚀性，常用材料如下。

铜导体：导电性能优异，耐腐蚀，适用于各种接地系统。

镀锌钢导体：成本低，耐腐蚀性能较好，适用于一般环境。

复合材料：适用于特殊环境，如高腐蚀性土壤。

2. 接地系统设计

（1）接地电极布置

根据线路的具体情况，接地电极可以采用水平埋设、垂直接地极或组合形式。常见的布置方式如下。

水平接地极：适用于土壤电阻率较低的地区，接地极埋设深度一般为0.5～1 m。

垂直接地极：适用于土壤电阻率较高的地区，通过增加接地深度来降低接地电阻。

环形接地极：在变电站或重要节点处使用，形成闭环，提高接地系统的可靠性。

（2）接地电阻计算

接地电阻的计算公式为

$$R_g = \frac{\rho}{2\pi L}\ln\left(\frac{4L}{d}\right) \quad (11)$$

式中，R_g为接地电阻，Ω；ρ为土壤电阻率，Ω·m；L为接地极长度，m；d为接地极直径，m。

3. 安全措施

（1）防雷措施

1）在架空输电线路上安装避雷针和避雷线，引导雷电流入地下，避免对线路和设备的直接雷击。

2）在线路关键节点安装避雷器，保护设备免受雷电过电压的损害。

（2）接地故障保护

1）安装接地故障监测设备，实时监测接地系统的运行状态，及时发现和处理接地故障。

2）在接地故障发生时，过电流保护装置能够快速切断故障电流，防止故障扩大。

结束语

总之，架空输电线路的设计涉及多个关键方面，这些方面对确保输电线路的经济性、安全性和可靠性至关重要。

导线选择方面，导线截面积的选择是架空输电线路设计中的基础环节，对传输效率、经济性和安全性有直接影响。导线截面积的计算需要根据具体工程需求和经济条件进行综合权衡，确保安全性和经济性。选择导线钢芯时需考虑其物理和机械性能，以满足不同环境和负荷条件下的可靠性要求。绝缘配置受到环境条件、工作电压和线路运行情况的影响。高海拔地区需要考虑空气密度降低对绝缘性能的影响，并进行相应的计算修正。绝缘配置应符合国家和行业标准，确保设计和施工的一致性和可操作性。线路参数包括电阻、电抗和电导等，它们直接影响输电线路的性能和效率。精确计算这些参数是确保设计合理性和线路性能的关键。杆塔结构设计涉及对不同杆塔结构形式的优化分析，确保在各种工况下的安全性和稳定性。设计时需综合考虑力学性能、施工、维护和经济性，实现整体优化。接地系统是架空输电线路设计中至关重要的一部分，主要功能是保障人身安全和设备安全。根据输电线路的电压等级、地理环境和土壤电阻率等因素，选择合适的接地形式，如单点接地、多点接地和环形接地。通过实时监测和过电流保护装置，提高接地系统的可靠性和安全性，减少故障率和维护成本。EA

（收稿日期：2024-09-18）

参考文献

[1] 陈富国，赵盼盼，牛博，等．输电线路带电作业机器人的电磁分析与防护设计[J]．高压电器，2023，59(2)：81-88．

[2] 陈立帆，张琳琳，宋辉，等．基于图卷积神经网络的输电线路自然灾害事故预测[J]．电网技术，2023，47(6)：2549-2557．

[3] 巢亚锋，王峰，李豫湘，等．架空输电线路避雷器保护失效原因分析及建议[J]．电瓷避雷器，2022(3)：81-88．

[4] 罗楚楠，张胜，黄一威．考虑后续雷击的高压架空输电线路雷电过电压研究[J]．电瓷避雷器，2022(5)：25-30．