

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2020.01.012

输电线路导地线和金具极限状态设计参数研究

张 研¹,杨 蕾¹,张 军²

(1. 河海大学力学与材料学院,江苏 南京 211100; 2. 中国电力科学研究院输变电工程研究所,江苏 南京 210000)

摘要:考虑到安全系数设计法存在的许多问题,为了保持设计的统一性,同时与国际接轨,采用可靠度设计法对输电线路的导地线和金具进行设计。通过对按现行国家标准 GB 50545—2010 和行业标准 DL/T 5154—2012 设计的导地线和金具进行可靠度校准,选取目标可靠指标计算得到导地线和金具极限状态的荷载和抗力分项系数。研究表明,对于导地线,当恒荷载与风荷载组合时,弧垂最低点和悬挂点的平均可靠指标分别为 4.372 和 3.968;当恒荷载、风荷载和覆冰荷载组合时,弧垂最低点和悬挂点的平均可靠指标分别为 3.157 和 2.898。金具的平均可靠指标为 3.99。导地线抗力分项系数 γ_R 的均值为 1.084,恒荷载分项系数 γ_G 的均值为 1.072,风荷载分项系数 γ_W 的均值为 1.828;金具抗力分项系数 $\gamma_{R'}$ 的均值为 1.165,导地线竖向荷载分项系数 γ_{Q_3} 的均值为 1.062,导地线风荷载分项系数 γ_{Q_5} 的均值为 1.797。若采用基于可靠度理论的设计方法,建议导地线各分项系数取 $\gamma_R=1.1$ 、 $\gamma_G=1.2$ 、 $\gamma_W=1.8$,金具各分项系数取 $\gamma_{R'}=1.2$ 、 $\gamma_{Q_3}=1.2$ 、 $\gamma_{Q_5}=1.8$ 。

关键词:输电线路;导地线;金具;可靠度校准;极限状态设计;分项系数

中图分类号: TM72 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2020)01-0079-08

Research on limit-state design parameters of grounding wire and fitting in transmission line

ZHANG Yan¹, YANG Lei¹, ZHANG Jun²

(1. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 211100, China;
2. Institute of Power Transmission and Transformation Engineering,
China Electric Power Research Institute, Nanjing 210000, China)

Abstract: Considering problems existing in the design method of safety factor, in order to maintain the uniformity of design and to keep up with the international standards, a reliability design method is used to design the grounding wire and fittings in transmission lines. Through the reliability calibration of grounding wire and fittings designed by the current national standard GB 50545—2010 and the industry standard DL/T 5154—2012, the partial coefficients of load and resistance for the grounding wire and fittings under the ultimate state are calculated by selecting the target reliability index. The results show that the average reliability indexes of the lowest sag point and the suspension point are 4.372 and 3.968, respectively, when combined with constant load and wind load, and 3.157 and 2.898 respectively, when combined with constant load, wind load and ice load. The average reliability index of fittings is 3.99. The average partial coefficient of grounding wire resistance γ_R is 1.084, the average partial coefficient of constant load γ_G is 1.072, and the average partial coefficient of wind load γ_W is 1.828. The average partial coefficient of fittings resistance $\gamma_{R'}$ is 1.165, the average partial coefficient of the vertical load of grounding wire γ_{Q_3} is 1.062, and the average partial coefficient of the wind load of grounding wire γ_{Q_5} is 1.797. If the design method based on reliability theory is adopted, it is suggested that the partial coefficients of grounding wire should be

基金项目: 国家自然科学基金(51579088);江苏省自然科学基金(BK20161507)
作者简介: 张研(1979—),男,教授,博士,从事材料和结构可靠度研究。E-mail: hhu_zhangyan@163.com
引用本文: 张研,杨蕾,张军. 输电线路导地线和金具极限状态设计参数研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(1):79-86.
ZHANG Yan, YANG Lei, ZHANG Jun. Research on limit-state design parameters of grounding wire and fitting in transmission line [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(1): 79-86.

taken as $\gamma_R=1.1$, $\gamma_G=1.2$, and $\gamma_W=1.8$, and the partial coefficients of fittings should be taken as $\gamma_{R'}=1.2$, $\gamma_{Q_3}=1.2$, and $\gamma_{Q_5}=1.8$.

Key words: transmission line; grounding wire; fittings; reliability calibration; limit-state design; partial coefficient

架空输电线路是电力系统的重要组成部分,其运行状态的好坏将会对整个系统运行的可靠性产生较大影响^[1]。随着中国经济的快速发展,对电力的需求更是呈直线增长,高压架空输电线路在实现电力的远距离、大容量输送方面发挥了重要作用。近年来,架空输电线路向着大截面、多分裂的方向发展,事故更趋频繁,严重威胁电网的安全稳定运行^[2]。作为架空输电线路的重要元件,导地线和金具的可靠性更是直接影响了整个输电系统的安全和稳定。

结构可靠度理论采用概率论的方法描述结构的安全性,综合考虑了几何尺寸、所受荷载、材料性能、计算方法等不确定性因素,不同结构的安全性可以用可靠指标 β 统一衡量^[3]。以可靠度理论为核心的分项系数法,即将容许应力设计表达式中的安全系数通过分离函数分解成荷载分项系数和抗力分项系数^[4-6],比较好的解决了容许应力设计法存在的安全系数根据经验粗略取值、结构设计相当粗糙等问题,使结构设计更为科学合理。在国际上,随着结构可靠度理论不断完善,可靠度设计法在输电线路中的应用越来越广泛,一些电力系统的相关规程正在逐渐淘汰容许应力设计法。

在 1994 年以前,我国输电线路的设计方法采用的是安全系数法,又被称为容许应力设计法^[7]。用单一的安全系数来表示结构的安全度,没有考虑到作用于结构上的荷载和结构抗力的随机性,不具备科学性和严谨性,无法准确反映结构的安全性。在 1994 年之后,考虑到线条风荷载的影响,在输电线路设计表达式中加入了调整系数;1999 年随着 DL/T 5092—1999《110 ~ 500 kV 架空送电线路设计技术规程》^[8]的颁布,我国开始采用以概率论为基础的可靠度设计法和分项系数设计表达式。

在我国当前的输电线路设计规范中,杆塔和地基基础采用可靠度设计法,而导地线和金具依然采用传统的安全系数设计法进行设计,其中又分考虑和不考虑线条风荷载调整系数^[9]2 种情况,这使得我国输电线路在设计过程中需要采用 2 种不同的方法,可靠度水平没有一个明确的指标,加大了输电线路体系可靠度确定的难度。为了保持设计的统一性,同时与国际接轨,输电线路导地线和金具也采用可靠度设计法进行设计。

可靠度设计主要是通过数据分析,得到导地线和金具的抗力与荷载统计参数;然后,基于当量正态化法(JC 法)对按现行国家标准 GB 50545—2010^[10]和行业标准 DL/T 5154—2012^[11]设计的导地线和金具进行可靠度校准,得到对应的可靠指标,选取目标可靠指标计算得到导地线和金具的荷载和抗力分项系数,为实际输电线路工程的设计和可靠度理论在输电线路领域的推广提供了参考。

1 可靠度校准

极限状态是用来描述结构是否能符合结构设计中规定的某一个功能需求的状态,是用来区分构件的运行状态是否可靠的分界线,当超过极限状态时,就认为结构原来的特性发生了改变。可靠度校准的对象主要是按当前正在实行的规范 GB 50545—2010 和 DL/T 5154—2012 设计的输电线路的导地线和金具。

1.1 荷载统计参数

一般用均值系数 k 和离散系数 δ 来表示结构的荷载统计参数, k 为均值与标准值的比值, δ 为均方差与均值的比值。根据概率特性的不同,将输电线路可靠度设计过程中涉及的荷载按照其随时间变化的特性分成恒荷载和活荷载(活荷载一般考虑风荷载和覆冰荷载)。

1.1.1 恒荷载

恒荷载是指不随时间变化或者随时间变化的值与其均值比起来可以忽略不计的荷载。输电线路中的恒荷载主要指的是元件的自重。根据建筑结构规范的统计资料,恒荷载服从正态分布,均值系数取 $k=1.06$,离散系数取 $\delta=0.07$ 。

1.1.2 风荷载

风荷载在输电线路中的设计沿用了建筑结构规范中的相关模式,服从极值 I 型分布^[12],在设计过程中考虑 2 种组合情况。当考虑输电线路只承受自重和风荷载时,参考建筑结构设计规范,取风荷载的均值系数

$k_{WT}=0.999$,离散系数 $\delta_{WT}=0.193^{[13]}$ 。当考虑承受自重、风荷载和覆冰荷载时,由于覆冰存在时风速不会太大,可适当降低代表风速^[14],取 10 m/s。假设该风速为在 1 年中覆冰最严重的一个月的最大情况,风荷载均值的计算公式为

$$m_{Wt}=m_{WT}+\frac{\ln \frac{t}{T}}{\alpha_{WT}}=m_{WT}+\frac{\sigma_{WT} \ln \frac{t}{T}}{1.2826}=0.999 W_k+\frac{0.193 W_k \ln \frac{1}{600}}{1.2826}=0.036 W_k$$

(1)

式中: m_{Wt} ——结构承受风荷载与覆冰荷载时风荷载的均值; m_{WT} ——风荷载为结构承受的唯一活荷载时风荷载的均值; t ——1 年中覆冰最严重的时期; T ——风荷载的重现期(50 a); α_{WT} ——符合极值 I 型分布的尺度参数; σ_{WT} ——风荷载为结构承受的唯一活荷载时风荷载的均方差; W_k ——荷载规范^[15]规定的风荷载标准值。

由式(1)可得风荷载的均值系数 $k_{WT}=0.036$,仍假定风荷载的离散系数 $\delta_{WT}=0.193$ 。

1.1.3 覆冰荷载

当前能够直接观测到的自然覆冰的情况和相关气象资料不多时,想要统计分析相关的分布、进行定量计算相当困难。本文参考冯云芬^[7]的论文关于湖北恩施某输电线路观测站的导线 25 a 的年最大覆冰实测结果数据,进行了统计分析,并结合工程经验判断,覆冰荷载服从极值 I 型分布,均值系数取 1.1,离散系数取 0.3。

1.2 抗力统计参数

输电线路元件的抗力是构件抵抗各项荷载的能力,通过其整体的破坏荷载统计参数和计算模式不确定性来体现,不需要涉及几何尺寸、材料性能等其他参数。

1.2.1 导地线的抗力

根据收集到的 4 种类型导地线的拉断力计算得到的导地线统计参数如表 1 所示。

经过计算^[7]得到导地线拉断力的统计参数 $k_{Tp}=1.038$, $\sigma_{Tp}=0.093$, $\delta_{Tp}=0.09$ 。导地线的抗力可表示为

$$R=\Omega_{p_1} T_p$$

(2)

式中: Ω_{p_1} ——导地线抗力计算模式不确定性系数,用以描述导地线在实际受力和试验受力状态下的区别; T_p ——导地线的拉断力。

导地线抗力的均值系数和离散系数为

$$k_R=\frac{m_R}{R_k}=\frac{k_{p_1} T_p}{T_{pk}}=k_{p_1} k_{T_p} \qquad \delta_R=\sqrt{\delta_{p_1}^2+\delta_{T_p}^2}$$

(3)

式中: m_R ——导地线抗力的均值; R_k ——导地线抗力的标准值; T_{pk} ——导地线拉断力的标准值; k_{p_1} 、 δ_{p_1} ——导地线抗力计算模式不确定性系数的均值系数和离散系数,分别取 1.05 和 0.07。

由式(3)得到导地线抗力的统计参数 $k_R=1.09$ 、 $\delta_R=0.114$,认为导地线的抗力服从对数正态分布。

1.2.2 金具的抗力

金具是指在电力系统中用于将电线与电线,以及电线与设备或材料进行固定、连接、接续、保护的已经定型化的金属部件。根据收集到的 4 种类型金具的破坏荷载计算得到的金具统计参数如表 2 所示。

计算得到金具破坏荷载的统计参数 $k_{P_b}=0.981$, $\sigma_{P_b}=0.091$, $\delta_{P_b}=0.092$ 。金具的抗力可表示

$$R'=\Omega_{p_2} P_b$$

(4)

式中: Ω_{p_2} ——金具抗力计算模式不确定性系数,反映金具在实际受力和试验受力状态下的区别; P_b ——金具的破坏荷载。

金具抗力的均值系数和离散系数为

$$k_{R'}=\frac{m_{R'}}{R'_k}=k_{p_2} \frac{P_b}{P_{bk}}=k_{p_2} k_{P_b} \qquad \delta_{R'}=\sqrt{\delta_{p_2}^2+\delta_{P_b}^2}$$

(5)

表 1 导地线拉断力统计参数

Table 1 Statistical parameters of grounding wire resistance

导地线类型	$k_{T_p,j}$	$\sigma_{T_p,j}$	$\delta_{T_p,j}$
JL/G1A-300/25	1.021	0.042	0.041
JL/G1A-400/35	0.972	0.101	0.104
JL/G1A-240/30	1.114	0.048	0.043
JL/G1A-300/40	1.047	0.030	0.029

注: $k_{T_p,j}$ 、 $\sigma_{T_p,j}$ 、 $\delta_{T_p,j}$ 分别为拉断力的均值系数、标准差和离散系数。

表 2 金具破坏荷载统计参数

Table 2 Statistical parameters for failure loads of fittings

金具类型	$k_{P_b,j}$	$\sigma_{P_b,j}$	$\delta_{P_b,j}$
NY-300/25	0.906	0.117	0.129
NY-400/35	0.977	0.083	0.085
NY-240/30	1.018	0.094	0.092
NY-300/40	1.021	0.068	0.066

注: $k_{P_b,j}$ 、 $\sigma_{P_b,j}$ 和 $\delta_{P_b,j}$ 分别为破坏荷载的均值系数、标准差和离散系数。

式中: $m_{R'}$ ——金具抗力的均值; R'_k ——金具抗力的标准值; P_{bk} ——金具破坏荷载的标准值; k_{P_2} 、 δ_{P_2} ——金具抗力计算模式不确定性系数的均值系数和离散系数,分别取 1.05 和 0.07。

由式(5)得到金具抗力的统计参数为 $k_{R'}=1.03$ 、 $\delta_{R'}=0.116$,考虑金具的抗力服从对数正态分布。

1.3 荷载和抗力统计参数汇总

恒荷载服从正态分布,均值系数取 1.06,离散系数取 0.07;风荷载服从极值 I 型分布,活荷载仅为风荷载时均值系数取 0.999、离散系数取 0.193,活荷载为风荷载和覆冰荷载时均值系数取 0.036、离散系数取 0.193;覆冰荷载服从极值 I 型分布,均值系数取 1.1,离散系数取 0.3。导地线和金具的抗力都服从对数正态分布,均值系数分别取 1.09 和 1.03,离散系数分别取 0.114 和 0.116。

1.4 可靠指标计算

1.4.1 导地线可靠指标计算

参考 GB50545—2010 中关于导地线设计的规定,导地线的最大张力为

$$T_{\max} \leq \frac{T_{pk}}{K_c} \tag{6}$$

式中: $T_{\max}$ ——导地线在弧垂最低点的最大张力设计值; K_c ——导地线的设计安全系数,风荷载和恒荷载作用时,弧垂最低点和悬挂点分别不小于 2.5 和 2.25(风荷载、恒荷载和覆冰荷载共同作用时,弧垂最低点和悬挂点分别不小于 1.4 和 1.3)。

按照 GB50545—2010 的规定,得到最小失效荷载的标准值为

$$R_k = T_{pk} = K_c T_{\max} = K_c (T_{Gk} + \sum T_{Qik}) \tag{7}$$

式中: T_{Gk} ——导地线恒荷载产生的拉力标准值; T_{Qik} ——第 i 个可变荷载作用于导地线产生的拉力标准值。

导地线的受力的功能函数方程为

$$Z = R - T_G - \sum T_{Qi} \tag{8}$$

式中: T_G ——导地线恒荷载产生的拉力; T_{Qi} ——第 i 个可变荷载作用于导地线产生的拉力。

导地线恒荷载产生的拉力的均值和均方差可表示为

$$m_{T_G} = k_{T_G} T_{Gk} \quad \sigma_{T_G} = \delta_{T_G} m_{T_G} = \delta_{T_G} k_{T_G} T_{Gk} \tag{9}$$

式中: δ_{T_G} 、 k_{T_G} ——导地线恒荷载产生的拉力的离散系数和均值系数。

第 i 个可变荷载作用于导地线产生的拉力的均值和均方差为

$$m_{T_{Qi}} = k_{T_{Qi}} T_{Qik} \quad \sigma_{T_{Qi}} = \delta_{T_{Qi}} m_{T_{Qi}} = \delta_{T_{Qi}} k_{T_{Qi}} T_{Qik} \tag{10}$$

式中: $\delta_{T_{Qi}}$ 、 $k_{T_{Qi}}$ ——第 i 个可变荷载作用于导地线产生的拉力的离散系数和均值系数。

考虑 2 种荷载组合的情况:

a. 恒荷载与风荷载组合。当恒荷载与风荷载组合时,由式(9)可得到恒荷载的均值和均方差,由式(10)可得到风荷载作用于导地线产生的拉力的均值和均方差。导地线抗力的均值为

$$m_R = k_R R_k = k_R K_c (T_{Gk} + T_{Wk}) = k_R K_c T_{Gk} (1 + \rho_W) \tag{11}$$

式中: T_{Wk} ——风荷载作用于导地线产生的拉力标准值; ρ_W ——风荷载效应与恒荷载效应之比。

取 $\rho_W = T_{Wk} / T_{Gk} = 1.0 \sim 12.0$,导地线抗力的可靠指标可用 JC 法计算得到,如图 1 所示。由图可知,导地线抗力可靠指标 β 与 ρ_W 成反比,弧垂最低点的可靠指标高于悬挂点。导地线弧垂最低点的平均可靠指标为 4.372,悬挂点的平均可靠指标为 3.968。

b. 恒荷载、风荷载和覆冰荷载组合。当恒荷载、风荷载和覆冰荷载组合时,根据式(9)计算恒荷载的均值与均方差,由式(10)可分别计算风荷载和覆冰荷载作用于导地线产生的拉力的均值和均方差。导地线抗力的均值为

$$m_R = k_R R_k = k_R K_c (T_{Gk} + T_{Wk} + T_{Ik}) = k_R K_c T_{Gk} (1 + \rho_{Wl} + \rho_l) \tag{12}$$

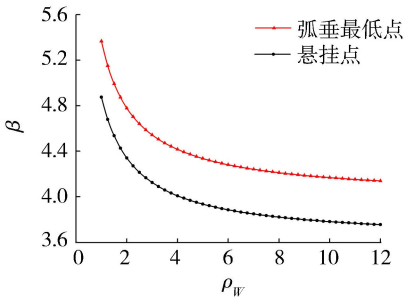


图1 导地线抗力可靠指标(恒荷载+风荷载)
Fig.1 Reliability index of grounding wire resistance under dead load and wind load

式中: $T_{W_{pk}}$ ——荷载组合下风荷载产生的导地线拉力的标准值; T_{lk} ——荷载组合下覆冰荷载产生的导地线拉力的标准值; ρ_{w_l} ——导地线覆冰时风荷载与恒荷载的比值; ρ_l ——导地线覆冰时覆冰荷载与恒荷载的比值。

取 $\rho_{w_l}=T_{W_{pk}}/T_{Gk}=1.0\sim3.0$ $\rho_l=T_{lk}/T_{Gk}=1.0\sim4.0$,采用 JC 法计算得到导地线抗力可靠指标,如图 2 所示。由图 2 可知,导地线抗力可靠指标与 ρ_{w_l} 成正比,与 ρ_l 成反比。导地线弧垂最低点的平均可靠指标为 3.157,悬挂点的平均可靠指标为 2.898。

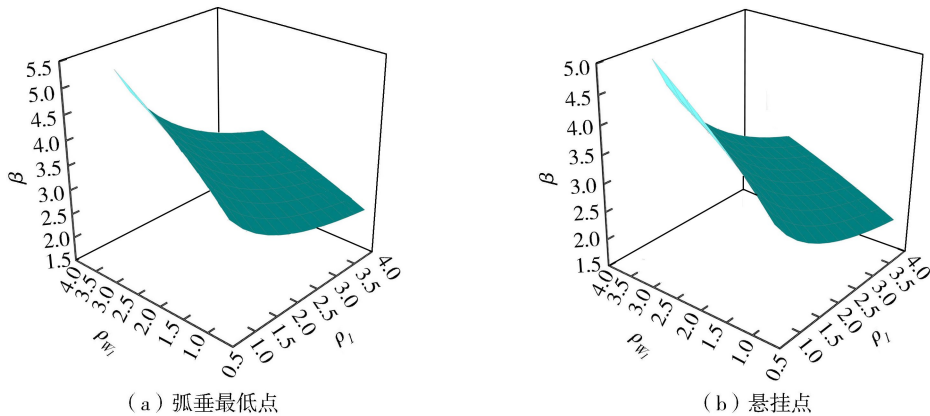


图 2 导地线抗力可靠指标(恒荷载+风荷载+覆冰荷载)

Fig.2 Reliability index of grounding wire resistance under dead load, wind load and ice load

1.4.2 金具可靠指标计算

金具的恒荷载为导地线的竖向荷载对金具产生的拉力,所受活荷载为导地线的横向荷载(风荷载)对金具产生的拉力。考虑导地线的活荷载只有风荷载的情况,金具的恒荷载均值系数取 $k_{w_3}=1.06$,离散系数取 $\delta_{w_3}=0.07$,活荷载均值系数取 $k_{w_5}=0.999$,离散系数取 $\delta_{w_5}=0.193$ 。

参考 GB50545—2010 中的相关规定,金具承载力验算表达式为

$$K_1=\frac{P_{bk}}{P_k} \tag{13}$$

式中: K_1 ——金具机械强度安全系数,运行状态下取 2.5^[16]; P_k ——金具正常运行时的荷载标准值。

若金具刚好满足设计要求,则

$$R'_k=P_{bk}=K_1P_k=K_1\sqrt{(L_hW_{5k})^2+(L_vW_{3k})^2} \tag{14}$$

式中: L_h 、 L_v ——水平档距和垂直档距; W_{5k} ——导地线的风荷载标准值; W_{3k} ——导地线的竖向荷载标准值。

金具的功能函数为

$$Z'=R'-\sqrt{(L_hW_5)^2+(L_vW_3)^2} \tag{15}$$

式中: W_5 ——导地线的风荷载; W_3 ——导地线的竖向荷载。

金具受到的导地线竖向荷载和风荷载产生的拉力的均值和均方差分别为

$$\begin{aligned} m_{W_3} &= k_{W_3}L_vW_{3k} & \sigma_{W_3} &= \delta_{W_3}m_{W_3} = \delta_{W_3}k_{W_3}L_vW_{3k} \\ m_{W_5} &= k_{W_5}L_hW_{5k} = k_{W_3}\rho_{W_{53}}L_vW_{3k} & \sigma_{W_5} &= \delta_{W_5}m_{W_5} = \delta_{W_5}k_{W_3}\rho_{W_{53}}L_vW_{3k} \end{aligned} \tag{16}$$

式中: $\rho_{W_{53}}$ ——导地线风荷载与竖向荷载标准值的比值。

金具抗力的均值为

$$m_{R'}=k_{R'}R'_k=k_{R'}K_1\sqrt{(L_hW_{5k})^2+(L_vW_{3k})^2}=k_{R'}K_1L_vW_{3k}\sqrt{\rho_{W_{53}}^2+1} \tag{17}$$

根据实际输电线路中导地线的受力监测统计结果,取 $\rho_{W_{53}}=L_hW_{5k}/(L_vW_{3k})=0.1\sim12$ 。采用 JC 法计算得到金具的可靠指标并绘制成图(图 3)。由图 3 可知,可靠指标 β 随着 $\rho_{W_{53}}$ 的增大而减小。金具的平均可靠指标为 3.99。

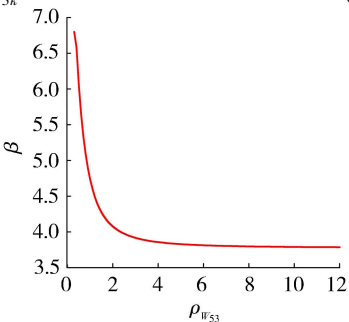


图 3 金具的可靠指标(恒荷载+风荷载)
Fig.3 Reliability index of fittings under dead load and wind load

1.5 可靠度校准结果汇总

不同荷载效应比时,对导地线和金具分别进行可靠度校准,得到了平均可靠指标。当恒荷载与风荷载组合时,导地线弧垂最低点和悬挂点的平均可靠指标分别为 4.372 和 3.968;当恒荷载、风荷载和覆冰荷载组合时,导地线弧垂最低点和悬挂点的平均可靠指标分别为 3.157 和 2.898。考虑导地线的活荷载仅为风荷载的情况,金具的平均可靠指标为 3.99。

2 设计参数研究

2.1 目标可靠指标

目标可靠指标是指考虑构件的材料特性和形状、受力特征等众多因素后选出的作为设计依据的可靠指标。根据建筑规范中的相关规定^[17]:延性破坏安全等级为一级、二级和三级时,对应的目标可靠指标分别为 3.7、3.2 和 2.7;脆性破坏安全等级为一级、二级和三级时,分别取目标可靠指标为 4.2、3.7 和 3.2。对于工程结构来说,可以认为年失效率小于 10^{-4} 是较安全的,小于 10^{-5} 是安全的,而小于 10^{-6} 则是很安全的。一般结构的设计基准期是 50 a,因此当在结构的设计基准期内失效概率分别小于 5×10^{-3} 、 5×10^{-4} 、 5×10^{-5} 时,可以认为结构较安全、安全和很安全。可靠指标 β 与失效概率 P_f 的对应关系^[18] 如下: β 为 1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、4.5 时,对应的 P_f 分别为 1.59×10^{-1} 、 6.68×10^{-2} 、 2.28×10^{-2} 、 6.21×10^{-3} 、 1.35×10^{-3} 、 2.33×10^{-4} 、 3.17×10^{-5} 、 3.40×10^{-6} 。由此可知,结构安全相应的可靠指标约在 2.5~4.0 之间。

由可靠度校准结果可知,当仅受恒荷载和风荷载作用时,按当前输电线路设计规范设计的导地线和金具的可靠指标远高于安全等级为一级的属延性破坏的结构构件的目标可靠指标 3.7。参考 GBJ 68—84《建筑结构设计统一标准》^[18],取目标可靠指标为 3.2。

2.2 分项系数

2.2.1 导地线的分项系数

导地线受力的功能函数(式(8)),为线性功能函数,在已知可靠指标时,选用一般分离法得到导地线的分项系数。 Z 的均值和均方差为

$$m_Z = m_R - m_{T_G} - \sum m_{T_{Q_i}} \quad \sigma_Z^2 = \sigma_R^2 + \sigma_{T_G}^2 + \sum \sigma_{T_{Q_i}}^2 \tag{19}$$

由可靠指标 β 和分离函数 α ^[19] 计算得到导地线抗力,恒荷载和第 i 个可变荷载的分项系数分别为

$$\gamma_{0R} = 1 - \alpha_R \delta_R \beta \quad \gamma_{0G} = 1 + \alpha_{T_G} \delta_{T_G} \beta \quad \gamma_{0Q_i} = 1 + \alpha_{T_{Q_i}} \delta_{T_{Q_i}} \beta \tag{20}$$

式中: α_R 、 α_{T_G} 、 $\alpha_{T_{Q_i}}$ ——导地线抗力、恒荷载和第 i 个可变荷载的分离函数。

由式(20)计算得到的分项系数为均值的分项系数,而规范中的极限状态设计公式中的分项系数为标准值的分项系数。式(21)为二者的换算关系。

$$\gamma_R = \gamma_{0R} k_R^{-1} \quad \gamma_G = \gamma_{0G} k_{T_G} \quad \gamma_{Q_i} = \gamma_{0Q_i} k_{T_{Q_i}} \tag{21}$$

考虑导地线所受荷载为恒荷载和风荷载,取可靠指标为 3.2,根据式(20)和式(21),可计算得到导地线的抗力分项系数 γ_R ,恒荷载分项系数 γ_G 和风荷载分项系数 γ_W ,如图 4 所示。

由计算结果可知,抗力分项系数的均值为 1.084,恒荷载分项系数的均值为 1.072,风荷载分项系数的均值为 1.828。考虑到当前对恒荷载分项系数的研究已经很成熟,参考当前规范恒荷载的分项系数取 1.2,因此经过分项系数优化,建议分项系数取 $\gamma_R=1.1$, $\gamma_G=1.2$, $\gamma_W=1.8$ 。

2.2.2 金具的分项系数

金具受力的功能函数(式(15))为非线性函数,假设 $Q_5=L_h W_5$,
 $Q_3=L_v W_3$,则其功能函数可写成 $Z'=R'-\sqrt{Q_5^2+Q_3^2}$,将功能函数 Z' 在验算点 $x_i^*(R',Q_3,Q_5)$ 处按泰勒级数展开并取其一阶近似式,由于设计验算点在失效边界上,有 $g(R'^*,Q_3^*,Q_5^*)=0$,可以得到 Z' 的均值和均方差,根据分离函数和可靠指标 β' 的计算公式^[19],计算得到金具的抗力,导地线竖向荷载和风荷载的均值分项系数分别为

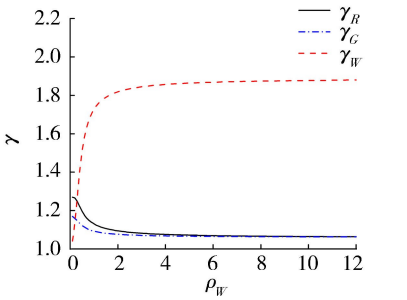


图4 导地线的分项系数
Fig.4 Partial coefficient of grounding wire

$$\gamma_{0R'} = 1 - \alpha_{R'}\delta_{R'}\beta' \quad \gamma_{0Q_3} = 1 + \alpha_{Q_3}\delta_{W_3}\beta' \quad \gamma_{0Q_5} = 1 + \alpha_{Q_5}\delta_{W_5}\beta' \quad (22)$$

式中: $\alpha_{R'}$ 、 α_{Q_3} 、 α_{Q_5} ——金具的抗力、导地线竖向荷载和风荷载的分离函数。

标准值分项系数为

$$\gamma_{R'} = \gamma_{0R'}k_{R'}^{-1} \quad \gamma_{Q_3} = \gamma_{0Q_3}k_{W_3} \quad \gamma_{Q_5} = \gamma_{0Q_5}k_{W_5} \quad (23)$$

取目标可靠指标 $\beta_0 = 3.2$,考虑导地线所受荷载为恒荷载和风荷载,根据式(22)和式(23),可计算得到 $\gamma_{R'}$ 、 γ_{Q_3} 、 γ_{Q_5} ,如图 5 所示。

由计算结果可知,金具抗力分项系数的均值为 1.165,导地线竖向荷载分项系数的均值为 1.062,导地线风荷载分项系数的均值为 1.797。经过分项系数优化,建议分项系数取值为: $\gamma_{R'} = 1.2$, $\gamma_{Q_3} = 1.2$, $\gamma_{Q_5} = 1.8$ 。

3 结 论

- a. 通过对按现行国家标准 GB50545—2010 和行业标准 DL/T5154—2012 设计的导地线和金具进行可靠度校准,得到如下结果:当导地线受恒荷载与风荷载作用时,弧垂最低点和悬挂点的平均可靠指标分别为 4.372 和 3.968;当导地线所受荷载组合中加入覆冰荷载时,弧垂最低点和悬挂点的平均可靠指标分别为 3.157 和 2.898。金具的平均可靠指标为 3.99。
- b. 取目标可靠指标为 3.2,对导地线和金具的分项系数进行计算并优化,得到导地线抗力分项系数 γ_R 的均值为 1.084,恒荷载分项系数 γ_G 的均值为 1.072,风荷载分项系数 γ_W 的均值为 1.828;金具抗力分项系数 $\gamma_{R'}$ 的均值为 1.165,导地线竖向荷载分项系数 γ_{Q_3} 的均值为 1.062,导地线风荷载分项系数 γ_{Q_5} 的均值为 1.797。
- c. 若采用基于可靠度理论的设计方法,建议导地线各分项系数取 $\gamma_R = 1.1$, $\gamma_G = 1.2$, $\gamma_W = 1.8$;金具各分项系数取 $\gamma_{R'} = 1.2$, $\gamma_{Q_3} = 1.2$, $\gamma_{Q_5} = 1.8$ 。

参考文献:

[1] 孙国强,朱超,卫志农,等. 基于综合集成赋权法的输电线路动态综合评估[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(3):272-277. (SUN Guoqiang,ZHU Chao,WEI Zhinong,et al. Dynamic comprehensive evaluation of transmission lines based on integrated weighting method[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2016,44(3):272-277. (in Chinese))

[2] 张子明,柯一丹,韩林,等. 声子晶体导线的振动带隙特性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(3):224-229. (ZHANG Ziming,KE Yidan,HAN Lin,et al. Vibration band gap characteristics of phononic crystal conductor[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2017,45(3):224-229. (in Chinese))

[3] 贡金鑫,李宏男,冯云芬,等. 输电线路跨越高铁关键技术研究:课题 1:跨越高铁输电线路的可靠度和技术方案研究[R]. 大连:大连理工大学,2013.

[4] HAARLA L,PULKKINEN U,KOSKINEN M,et al. A method for analysing the reliability of a transmission grid[J]. Reliability Engineering and System Safety,2008,93(2):277-287.

[5] BHUYAN G, LI Hong. Achieved reliability of the north american design approaches for transmission overhead structures[C]//KTH Royal Institute of Technology. 2006 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems. Sweden: IEEE,2007:1-5.

[6] RAO G V. Optimum designs for transmission line towers[J]. Computers & Structures,1995,57(1):81-92.

[7] 冯云芬. 可靠度理论在结构设计中的若干应用研究[D]. 大连:大连理工大学,2015.

[8] 中国国家标准化管理委员会. 110 ~ 500 kV 架空送电线路设计技术规程:DL/T 5092—1999[S]. 北京:中国电力出版社,1999.

[9] 肖洪伟,李喜来,廖宗高,等. 输电线路风荷载调整系数(风振系数)计算探讨[J]. 电力建设,2007,28(9):33-38. (XIAO Hongwei,LI Xilai,LIAO Zonggao,et al. Discussion on calculation of transmission line wind load adjustment coefficients (aeolian vibration coefficients)[J]. Electric Power Construction,2007,28(9):33-38. (in Chinese))

[10] 中国国家标准化管理委员会. 110kV ~ 750kV 架空输电线路设计规范:GB50545—2010[S]. 北京:中国计划出版社,2010.

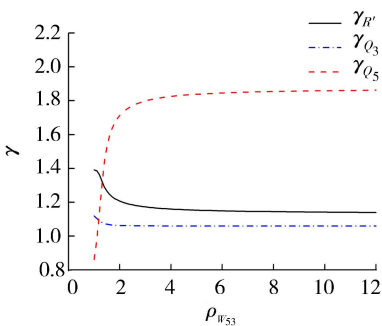


图 5 金具的分项系数
Fig. 5 Partial coefficient of fittings

[11] 中国国家标准化管理委员会. 架空送电线路杆塔结构设计技术规定:DL/T 5154—2012[S]. 北京:中国电力出版社, 2012.

[12] 韩枫. 特高压输电塔线体系的抗风可靠度研究[D]. 重庆:重庆大学,2012.

[13] 欧进萍,段宇博,叶骏. 等效随机静风荷载的模型及其参数确定[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报,1994,27(2):1-8. (OU Jinping, DUAN Yubo, YE Jun. Model and parameter determination of equivalent random static wind load[J]. Journal of Harbin Institute of Architectural Engineering,1994,27(2):1-8. (in Chinese))

[14] 冯径军,柳春光,冯娇. 输电塔线在覆冰与风载下的可靠性分析[J]. 水电能源科学,2011,29(10):203-206. (FENG Jingjun, LIU Chunguang, FENG Jiao. Reliability analysis of transmission tower lines under icing and wind load[J]. Hydropower and energy science,2011,29(10):203-206. (in Chinese))

[15] 中国国家标准化管理委员会. 建筑结构荷载规范:GB50009—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1974.

[16] 冯云芬,贡金鑫,李宏男,等. 输电线路绝缘子、金具和导地线可靠度校准[J]. 电力建设,2014,35(5):21-27. (FENG Yunfen, GONG Jinxin, LI Hongnan, et al. Reliability Calibration of Insulator, Fitting and Ground Wire in Transmission Line[J]. Electric Power Construction,2014,35(5):21-27. (in Chinese))

[17] 中国国家标准化管理委员会. 建筑结构可靠度设计统一标准:GB50068—2001[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.

[18] 中国国家标准化管理委员会. 建筑结构设计统一标准:GBJ68—84[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1984.

[19] 武清玺. 结构可靠度理论、方法及应用[M]. 北京:科学出版社,2014:52-60.

(收稿日期:2018-11-06 编辑:高建群)

· 征稿启事 ·

“长江保护与绿色发展”专题征稿

长江是我国第一大河,是中华民族的母亲河、生命河,是我国水资源配置的战略水源地,是我国经济发展最具活力和潜力的区域之一。但是,长期粗放、低环保的发展方式透支了长江的自净能力和资源环境承载能力,长江生态环境面临严峻挑战,如果现在不及时采取治理修复措施,长江生态环境将会持续恶化和受损,未来面临的问题将会更多、更复杂、更严重,治理修复的难度将会更大,付出的代价也将会更高。

习近平总书记先后于2016年1月和2018年4月2次视察长江,就长江保护与发展发表了重要讲话。党的十九大和全国生态环境保护大会也都对生态文明建设提出了明确的要求,为长江保护与发展提供了科学指南。归结起来,十八大以来中央作出的一系列战略部署就是要求我们坚持“生态优先、绿色发展”,在坚持生态环境保护的前提下,推动长江经济带科学发展、有序发展、高质量发展。2019年1月,中华人民共和国生态环境部、中华人民共和国国家发展和改革委员会联合印发《长江保护修复攻坚战行动计划》,围绕长江保护修复攻坚战的一系列行动紧锣密鼓展开,中国长江保护修复攻坚战全面打响。

2019年6月29日,长江保护与绿色发展研究院成立大会在河海大学举行。唐洪武书记在致辞中指出,学校会同南京水利科学研究院等单位共同组建长江保护与绿色发展研究院,是深入贯彻落实习近平总书记生态文明思想、推动长江经济带发展重要讲话精神和治水重要论述。研究院将立足长江、面向全国、走向世界,围绕长江流域的水资源、水环境、水生态、水工程及区域经济等方面,开展基础理论、应用技术和实用技术研究,为长江、为中国乃至全球大江大河治理保护提供智慧和方案。

在此背景下,《河海大学学报(自然科学版)》编辑部发起“长江保护与绿色发展”专题征稿,录用文章优先在正刊上发表,欢迎广大专家学者积极投稿。

- a. 征稿范围:(1)上游流域水土流失治理与生态保护;(2)河湖关系与两湖地区生态保护;(3)长江口生态保护与综合治理;(4)水环境生态监测、评估与风险控制。
- b. 征稿时间:2019年12月31日至2020年7月31日。
- c. 稿件格式详见《河海大学学报(自然科学版)》网站(jour.hhu.edu.cn/hhdxzbzr/ch/index.aspx)。

(本刊编辑部供稿)