

基于点估计法的杆塔结构平均可靠度分析

黄兴¹, 田雷², 杨洋¹, 廖邢军¹, 蒲凡¹, 李钟¹

(1. 西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021; 2. 国网北京经济技术研究院, 北京 102209)

摘要: 由于目前输电塔结构设计规范参照建筑结构规范编制, 所涵盖的设计对象大多针对荷载效应比不大于3的情况。然而, 输电塔自重轻, 活荷载效应比普遍较高, 导致其按照现有规范进行设计的构件可靠度水准降低。为了校准输电塔的可信度水平, 文中首次尝试将荷载效应比视为随机变量, 沿用点估计法的基本思想, 以荷载效应比的分布为输入, 得到基于荷载效应比分布的、具有统计意义的杆塔结构加权平均可靠度指标。首先, 通过大量实际结构分析得到杆塔结构构件风荷载效应比的样本值, 基于这些样本值进行分布拟合, 得到荷载效应比的分布; 其次, 利用点估计法基本思想, 选取荷载效应比分布的积分点, 计算这些积分点处的可靠度指标, 再根据各对应积分点的权重值, 得到平均可靠度指标。最后, 文中分别计算了不同风速下, 不同线条风占比和不同结构重要性系数下的平均可靠度指标。

关键词: 输电塔杆塔结构; 构件可靠度; 点估计法; 分布拟合; 平均可靠指标

中图分类号: TH212; TH213.3

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2018)02-0127-05

0 引言

由于不可避免的随机性, 可靠度成为结构设计的基础, 实用设计表达式则是可靠度在结构设计中最直接的体现。然而, 对输电塔杆塔结构而言, 其可靠度与规范的目标可靠指标并不一定相同, 究其根源, 主要原因在于: 目前输电塔结构设计规范基本上是参照建筑结构规范进行编制的^[1], 而建筑结构规范中所涵盖的设计对象大多针对荷载效应比不大于3的情况^[2]。然而, 对于输电塔结构, 其杆塔的自重较轻, 承受的活荷载较高, 导致其荷载效应比往往高于一般结构构件。当荷载效应比较高时, 按照实用设计表达式设计出的构件可靠度水平则会降低。为研究输电塔杆塔构件荷载效应比对其可靠度水准的影响, 许多专家学者对现有输电塔规范的可靠度水平进行了校准。冯云芬等^[3]考虑恒荷载与风荷载的简单组合, 研究了风荷载效应比变化范围为0.1~100时可靠度水准的变化; 李峰等^[4]研究了风荷载效应比为4.0~8.0的可靠度水准平均值; 王松涛^[5]则计算了风荷载效应比范围为4.0~10.0的可靠度指标平均值; 刘静波^[6]研究了风荷载效应比1.0~40.0范围内可靠度指标的变化, 并得到可靠度指标的平均值。可以看出, 现有研究的一般做法为: 先假定荷载效应比的取值范围, 再在该范围内选取多个离散的荷载效应比值, 计算这些离散点处的可靠度指标, 并计算这些可靠度指标的

平均值。然而, 荷载效应比范围的设定以及离散点的选取过于主观, 得到的可靠指标平均值不具有统计意义。因此, 如何全面客观地考虑荷载效应比的取值, 是研究荷载效应比对可靠度水准影响的关键。

为此, 文中首次尝试将荷载效应比视为随机变量, 沿用点估计法的基本思想, 以荷载效应比的分布为输入, 得到基于荷载效应比分布的、具有统计意义的杆塔结构加权平均可靠度指标。

1 荷载效应比分布拟合

1.1 样本点选取

不失一般性, 文中选取恒荷载+风荷载简单组合(下称恒风组合)下的轴心受压杆件为例, 其它荷载组合下不同受力方式杆件的分析可依次类推。轴心受压杆件的风荷载效应比 ρ_w 的计算公式为:

$$\rho_w = \frac{N_{wk}}{N_{Gk}} = \frac{N_w/\gamma_Q}{N_G/\gamma_G} \quad (1)$$

式中: N_{wk} 为风荷载引起的杆件轴心压力标准值; N_{Gk} 为恒荷载引起的杆件轴心压力标准值; N_w 为风荷载引起的杆件轴心压力设计值; N_G 为恒荷载引起的杆件轴心压力设计值; γ_Q 为活荷载分项系数; γ_G 为恒载分项系数。

文中选取安徽到上海某条实际输电线路工程, 并统计如表1所示8个不同工况下的直线塔的风荷载效应比。实际杆塔设计中, 部分按照构造要求设计的辅材和按照统材要求设计的杆件不由设计表达式控制。综上所述, 文中基于道亨软件, 仅选取应力百分比大于50%的杆件作为风荷载效应比的

收稿日期: 2017-11-07; 修回日期: 2017-12-15

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(SGTYYHT/14-JS-88)

有效样本进行统计分析,样本点共计 1253 个。

表 1 工况选取

工况	风角度	重力
1	90°大风	G_{\max}
2	60°大风	G_{\max}
3	45°大风	G_{\max}
4	0°大风	G_{\max}
5	90°大风	G_{\min}
6	60°大风	G_{\min}
7	45°大风	G_{\min}
8	0°大风	G_{\min}

其中,大风代表施加风速为 30 m/s 的风荷载; G_{\max} 为重力荷载不利工况; G_{\min} 为重力荷载有利工况。

1.2 分布拟合

基于以上样本,进而对样本的总体分布进行拟合。文中采用 MATLAB 软件的分布拟合工具箱近似得到总体分布密度函数曲线^[7-9],共选取 7 种不同分布类型进行拟合,选用分布类型如表 2 所示。

表 2 选用分布及简称

类型	简写
Birnbaum-Saunders	B-S
布尔分布(Burr)	Burr
伽马分布(Gamma)	Gamma
广义极值分布(Generalized extreme value)	GeExtrVa
Log_Logistic	Log-Log
Logistic	Logis
对数正态分布(Lognormal)	Logn

根据上述 7 种分布类型进行分布拟合,可以得到如图 1 所示的概率密度函数的拟合,以及如图 2 所示的累计分布函数的拟合。

通过对比 7 种不同的分布,文中选取其中拟合程度较好的 Log_Logistic 分布,对应的均值和标准差分别为 5.556 2 和 4.659 9。

2 基于点估计法的可靠度指标均值

2.1 功能函数的建立

DL/T 5154—2012 架空送电线路杆塔结构设计技术规定^[10]关于铁塔结构承载能力极限状态的设计表达式,是根据 GB 50068—2001 建筑结构可靠度设计统一标准的有关原则确定的。在结构可靠度分析中,结构的极限状态可由其功能函数来表达,功能函数形式为^[11]:

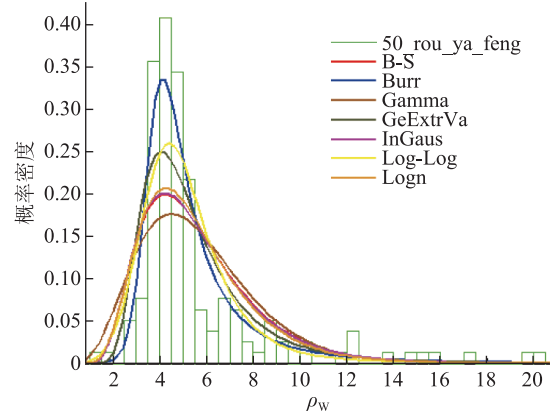


图 1 风荷载效应比的概率密度函数

Fig.1 PDF of wind load effect ratio

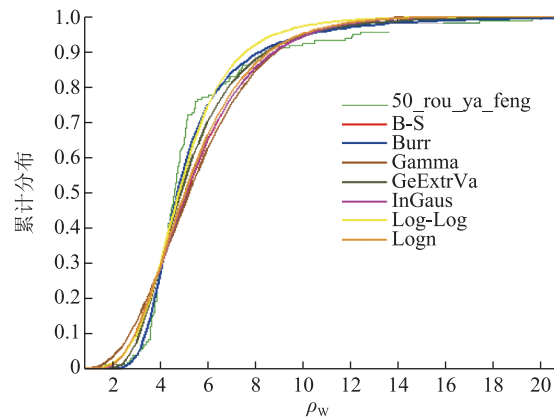


图 2 风荷载效应比的累计分布函数

Fig.2 CDF of wind load effect ratio

$$Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (2)$$

式中: $X = [X_1, X_2, \dots, X_n]$ 为工程结构中存在的各种不确定信息的随机变量。从性质上来说,可以分为结构参数和荷载参数 2 类:第一类是结构抗力,用 R 表示;另一类是荷载的作用或作用效应,用 S 表示。当仅以荷载效应 S 、结构构件抗力 R 作为 2 个基本随机变量时,功能函数可表示为:

$$Z = g(R, S) = R - S \quad (3)$$

当 $Z < 0$ 时,结构处于失效状态;当 $Z > 0$ 时,结构处于可靠状态;当 $Z = 0$ 时,结构处于极限状态。

文中仅选取恒风组合下杆塔结构中轴心受压构件进行可靠度校准,其对应的功能函数为^[12]:

$$Z = R - S_G - S_W \quad (4)$$

式中: R, S_G, S_W 分别为输电塔杆塔构件的抗力随机变量、恒载随机变量和风荷载随机变量。

为计算式(4)的可靠度,需要得到上述随机变量的统计参数和分布类型。其中,值得注意的是,随机变量的均值由变量标准值乘以均值系数得到。

不失一般性,假设 $S_{Gk} = 1, S_{Wk} = \rho_w$ ^[12]。对于杆塔结构的实用设计表达式,李峰等^[7]在规范基础上

考虑了导线线条风荷载调整系数和不同重现期基本风压换算系数的影响;王松涛等^[5]进一步考虑了最小设计风速影响系数的影响。然而,已有研究并未考虑档距利用率和截面利用率的影响。因此,文中所采用的实用设计表达式在已有研究的基础上进一步引入了档距利用率和截面利用率,抗力标准值 R_k 如下式所示:

$$R_k = \gamma_0 \gamma_R \gamma_A \{ \gamma_G (S_{Gk}) + \gamma_Q [\beta_v ((1 - \chi) S_{Qk} + \beta_c \chi S_{Qk} / \gamma_{\text{档距}})] \} \quad (5)$$

式中: γ_0 为结构重要性系数; $\gamma_{\text{档距}}$ 为档距利用率,根据实际经验取 1/0.9; γ_R 为抗力分项系数; γ_A 为截面利用率,根据实际经验取 1/0.95; γ_G 为恒载分项系数; γ_Q 为可变荷载分项系数; S_{Gk} 为永久荷载标准值; S_{Qk} 为风荷载标准值; R_k 为结构构件的抗力标准值; β_v 为最小设计风速影响系数, β_c 为导线风荷载调整系数, β_v 和 β_c 的取值见表 3; χ 为线条风荷载效应占风荷载总效应的比值,根据相关文献^[3-5]和工程经验,取值范围为 0.2~0.4。

表 3 最小设计风速影响系数 β_v 及
导线风荷载调整系数 β_c
Tab.3 Value of β_v and β_c

风速 $v/(m \cdot s^{-1})$	β_v	β_c
22	1.51	1.10
24	1.27	1.10
26	1.08	1.10
27	1.00	1.10
29	1.00	1.10
30	1.00	1.20
32	1.00	1.20
34	1.00	1.20
35	1.00	1.30

将 $S_{Gk} = 1$, $S_{Wk} = \rho_w$ 代入式 (15) 中,可进一步得到:

$$R_k = \gamma_R \gamma_0 \gamma_A \{ \gamma_G + a \rho_w \} \triangleq F(\rho_w) \quad (6)$$

式中: $a = \gamma_Q \{ \beta_v [(1 - \chi) + \beta_c \chi / \gamma_{\text{档距}}] \}$ 。

综上所述,式 (4) 中随机变量的分布参数和分布类型如表 4 所示^[5]。

表 4 基本随机变量的统计信息
Tab.4 Statistical information of basic variables

基本变量	均值	变异系数	分布类型
R	$1.096F(\rho_w)$	0.098	对数正态
S_G	1	0.05	正态
S_W	$1.147\rho_w$	0.205	极值 I 型

2.2 基于点估计法的平均可靠指标计算

通过上述分析可知,基本随机变量的统计参数是荷载效应比 ρ_w 的函数,当荷载效应比 ρ_w 确定时,

即可利用 JC^[11]法求解式 (4) 的可靠指标 β 。因此,可靠指标 β 可以表达为荷载效应比 ρ_w 的隐式函数,如式 (7) 所示:

$$\beta = f(\rho_w) \quad (7)$$

式中: $f(\cdot)$ 表示 β 与 ρ_w 的关系,为隐式函数。对于任一给定的 ρ_w , β 可方便地由 JC 法确定^[13]。进而,可靠度指标的均值可表示为:

$$E(\beta) = E[f(\rho_w)] = \int_{\Omega_p} f(\rho) p(\rho) d\rho \quad (8)$$

式中: Ω_p 为 ρ 的取值域; $p(\cdot)$ 表示概率密度函数。

沿用点估计法的基本思想^[14-18],对上式采用一维 Gauss-Hermite 数值积分,可靠度指标的均值即平均可靠指标可由式 (9) 表示:

$$\begin{cases} E(\beta) = \sum_{l_0=1}^l \frac{\omega_{GH,l_0}}{\sqrt{\pi}} f(\rho_{GH,l_0}) \\ \rho_{GH,l_0} = R^{-1}[\Phi(x_{GH,l_0})] \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\omega_{GH,i}$ 是 Gauss-Hermite 积分的权系数; $x_{GH,i}$ 是根据 Gauss-Hermite 积分的节点; $\Phi(\cdot)$ 表示标准正态分布的分布函数; $R^{-1}(\cdot)$ 表示 Rosenblatt 逆变换函数^[19]; $\rho_{GH,i}$ 是根据 $x_{GH,i}$ 的 Rosenblatt 逆变换得到的对应荷载效应比的值; l 为积分点总数,文中取 $l=7$, Gauss-Hermite 7 点积分的权系数与节点示于表 5。

表 5 Gauss-Hermite 7 点积分的权系数与节点
Tab.5 Abscissas and weights for
Gauss-Hermite quadrature with $l=7$

i	$x_{GH,i}$	$\omega_{GH,i}$
1	-2.651 96	0.000 97
2	-1.673 55	0.054 52
3	-0.816 29	0.425 61
4	0	0.810 27
5	0.816 29	0.425 61
6	1.673 55	0.054 52
7	2.651 96	0.000 97

3 风荷载下输电塔可靠度的校准

基于以上平均可靠指标的计算方法,分别讨论在不同风速下 (22 m/s, 24 m/s, 26 m/s, 27 m/s, 29 m/s, 30 m/s, 32 m/s, 34 m/s, 35 m/s), 不同线条风占比 ($\chi = 0.2, 0.3, 0.4$) 和不同的结构重要性系数 ($\gamma_0 = 1.0, 1.1, 1.2$) 对平均可靠指标的影响,可靠度校准结果如表 6—11 所示。

综合上述,根据表 6—11 所示平均可靠度指标,可进一步求得当 $\gamma_0 = 1$ 时,可靠指标的均值为 3.38; $\gamma_0 = 1.1$ 时,可靠指标的均值为 3.76; $\gamma_0 = 1.2$ 时,可靠指标的均值为 4.11; 而基于此分布模型下采用规

表6 风速 22 m/s 时平均可靠指标
Tab.6 Mean value of β at $v=22$ m/s

χ	结构重要性系数		
	1	1.1	1.2
0.2	4.34	4.72	5.07
0.3	4.37	4.76	5.11
0.4	4.41	4.79	5.14

表7 风速 24 m/s 时平均可靠指标
Tab.7 Mean value of β at $v=24$ m/s

χ	结构重要性系数		
	1	1.1	1.2
0.2	3.71	4.09	4.44
0.3	3.75	4.13	4.48
0.4	3.78	4.16	4.51

表8 风速 26 m/s 时平均可靠指标
Tab.8 Mean value of β at $v=26$ m/s

χ	结构重要性系数		
	1	1.1	1.2
0.2	3.13	3.52	3.87
0.3	3.16	3.55	3.90
0.4	3.20	3.59	3.94

表9 风速 27 m/s 时平均可靠指标
Tab.9 Mean value of β at $v=27$ m/s

χ	结构重要性系数		
	1	1.1	1.2
0.2	2.85	3.25	3.60
0.3	2.89	3.28	3.63
0.4	2.92	3.31	3.67

表10 风速 30 m/s 时平均可靠指标
Tab.10 Mean value of β at $v=30$ m/s

χ	结构重要性系数		
	1	1.1	1.2
0.2	2.92	3.31	3.67
0.3	2.99	3.38	3.73
0.4	3.06	3.45	3.80

表11 风速 35 m/s 时可靠指标
Tab.11 Mean value of β at $v=35$ m/s

χ	结构重要性系数		
	1	1.1	1.2
0.2	2.99	3.38	3.73
0.3	3.09	3.48	3.83
0.4	3.19	3.58	3.93

范规定的使用设计表达式计算可知,当 $\gamma_0 = 1$ 时,可靠指标的均值为 2.77; $\gamma_0 = 1.1$ 时,可靠指标的均值为 3.28; $\gamma_0 = 1.2$ 时,可靠指标的均值为 3.75。

4 结语

基于荷载效应比的分布拟合,并结合点估计法的基本思想,文中提出了输电塔杆塔结构构件平均可靠度指标的计算方法。与传统方法相比,文中方法首次尝试利用荷载效应比的分布校验现有规范内蕴的平均可靠水准。为验证方法的可行性,以输电塔恒风组合的轴心受压构件为研究对象,首先通过大量结构分析得到荷载效应比的样本点,再通过分布拟合得到荷载效应比的分布。基于该分布,分别计算了不同风速下,不同线条风占比以及不同结构重要性系数下的输电塔平均可靠指标。

参考文献:

- [1] GB/50068—2001 建筑结构可靠度设计统一标准[S]. 中国建筑工业出版社,2002.
GB/50068—2001 Unified standard for reliability design of building structures [S]. China Building Industry Press,2002.
- [2] 蒋友宝,杨伟军. 可变荷载效应占高比重时荷载分项系数取值研究[J]. 建筑结构学报,2012,33(12):130-135.
JIANG Youbao, YANG Weijun. Research on values of load partial factors with large ratios of variable load effects [J]. Journal of Building Structures,2012,33(12):130-135.
- [3] 冯云芬,贡金鑫. 输电线路杆塔构件可靠度校准[J]. 电力建设,2014,35(5):13-20.
FENG Yunfen, GONG Jinxin. Reliability calibration of tower members in transmission line[J]. Electric Power Construction,2014,35(5):13-20.
- [4] 李峰,袁骏. 我国输电线路铁塔结构设计可靠度研究[J]. 电力建设,2010,31(11):18-23.
LI Feng, YUAN Jun. Research on reliability of transmission tower structure design in china [J]. Electric Power Construction,2010,31(11):18-23.
- [5] 王松涛. 现行输电塔设计规范可靠度水准的评估与分析[D]. 重庆大学,2014.
WANG Songtao. Reliability assessment and analysis of the current design code for transmission towers [D]. Chongqing University,2014.
- [6] 刘静波. 输电塔结构设计表达式分项系数合理性及体系可靠度分析[D]. 重庆大学,2016.
LIU Jingbo. Rationality of partial coefficient in design expression and system reliability analysis of transmission tower [D]. Chongqing University,2016.
- [7] 曹俊涵,郭晓波. 用 MATLAB 曲线拟合工具箱计算药物溶出度 Weibull 分布参数[J]. 药学进展,2006,30(12):556-559.
CAO Junhan, GUO Xiaobo. Calculation of Weibull's distribution parameters for drug dissolution by MATLAB curvefit toolbox [J]. Progress in Pharmaceutical Sciences,2006,30(12):556-559.
- [8] 肖郑颖. 基于 MATLAB 的强度分布曲线的拟合研究[J]. 湖南农机,2012,39(7):36-36.

- XIAO Zhengyin. The curve fitting research of intensity profiles based on MATLAB [J]. Hunan Agricultural Machinery, 2012, 39(7):36-36.
- [9] BOTEV Z I, GROTOWSKI J F, KROESE D P. Kernel density estimation via diffusion [J]. Annals of Statistics, 2010, 38(5): 2916-2957.
- [10] DL/T 5154—2012 架空输电线路杆塔结构设计技术规定 [S]. 中国计划出版社, 2012.
DL/T 5154—2012 Design of latticed steel transmission structures [S]. China Planning Press, 2012.
- [11] 赵国藩. 工程结构可靠度 [M]. 北京:水利出版社, 1984.
ZHAO Guofan. Reliability for engineering structures [M]. Beijing: Hydraulic Press, 1984.
- [12] 李继华. 建筑结构概率极限状态设计 [M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1990.
LI Jihua. Probabilistic limit state design of building structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1990.
- [13] 赵国藩. 工程结构可靠性理论与应用 [M]. 大连:大连理工大学出版社, 1996.
ZHAO Guofan. Reliability theory and its applications to engineering structures [M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 1996.
- [14] FAN W L. Adaptive estimation of statistical moments of the responses of random systems [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2016, 43: 50-67.
- [15] 范文亮, 李正良, 韩 枫. 单变量函数统计矩的点估计法性能比较 [J]. 工程力学, 2012, 29(9): 1-10.
FAN Wenliang, LI Zhengliang, HAN Feng. Comparison of point estimate methods for probability moments of univariate function [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(9): 1-10.
- [16] 范文亮, 李正良, 韩 枫. 多变量函数统计矩点估计法的性能比较 [J]. 工程力学, 2012, 29(11): 1-11.
FAN Wenliang, LI Zhengliang, HAN Feng. Comparison of point estimate methods for probability moments of multivariate function [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(9): 1-10.
- [17] RAHMAN S, XU H. A univariate dimension-reduction method for multi-dimensional integration in stochastic mechanics [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2004, 19(4): 393-408.
- [18] XU H, RAHMAN S. A generalized dimension-reduction method for multi-dimensional integration in stochastic mechanics (Int. J. Numer. Meth. Engng 2004, 61: 1992-2019) [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2006, 65(13): 2292-2292.
- [19] ROSENBLATT M. Remarks on a multivariate transformation [J]. The Annals of Mathematical Statistics, 1952, 23(3): 470-472.

作者简介:



黄 兴

黄 兴 (1974—), 男, 本科, 高级工程师, 从事输电线路相关工作 (E-mail: huangxing@swepdi.com);

田 雷 (1973—), 男, 本科, 高级工程师, 从事输电线路相关工作 (E-mail: ren_mo_love@126.com);

杨 洋 (1974—), 男, 本科, 高级工程师, 从事输电线路相关工作。

Average Reliability Analysis of Transmission Tower Structure Based on Point Estimation Method

HUANG Xing¹, TIAN Lei², YANG Yang¹, LIAO Xingjun¹, PU Fan¹, LI Zhong¹

(1. Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610021, China;

2. State Power Economic Research Institute, Beijing 102209, China)

Abstract: At present, the codes of transmission towers are almost based on the construction of building codes, and the design objects are mostly aimed at the load-effect ratio not greater than 3. However, the living load effect of the transmission towers is higher than that of the existing codes, and the reliability of the components is reduced. In order to calibrate the reliability level of transmission towers, regarding the load-effect ratio as a random variable based on the point estimation method is firstly attempted, the weighted average reliability index of tower structure is obtained based on the distribution of load effect ratio as input. Firstly, the samples of wind load-effect ratio of tower structural members are obtained through a large number of structural analyses, and the distribution fitting is exploited to fit the distribution of load effect ratio. Secondly, applying the point estimation method, the abscissas of the fitted load-effect ratio distribution are selected, the reliability index of these points is calculated, and then the average reliability index according to the weight of each corresponding point. At last, the average reliability index under different wind speed and different structure importance coefficients is calculated.

Key words: transmission tower structure; component reliability; point estimation; distribution fitting; average reliability index

(编辑 方 晶)