

±500 kV 双回路直流耐张塔真型试验分析

陈廷君, 聂卫平

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要:“溪洛渡右岸电站送电广东 ±500 kV 同塔双回直流输电工程”是我国首个 ±500 kV 双回路直流输电线路工程, 本文介绍了铁塔设计要点, 选取 SJ101 双回路耐张塔进行了正常大风、锚线、断线等 8 个试验工况下的真型试验, 将试验结果与理论计算进行了比较, 分析了引起试验误差的主要原因, 试验结果表明: 试验塔的位移和应变值与理论计算值吻合程度较高, 铁塔在试验超载 120% 时发生破坏, 铁塔设计符合预期目标, 充分说明了铁塔设计的合理性, 为其他类似工程设计提供科学依据和参考。

关键词: ±500 kV; 直流; 双回路; 耐张塔; 真型试验。

中图分类号: TM753

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)S1-0055-05

Full-scale Test Analysis for Strain Tower Applied in UHV DC Double-circuit Transmission Line

CHEN Tingjun, NIE Weiping

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: Xiluodu right bank-Guangdong ±500 kV double circuit DC transmission project is the first ±500 kV double circuit DC transmission line in China. This paper introduces the key point of the tower designing. The SJ101 was subjected to design and test under cooperation conditions including wind, anchor-wire, broken wire etc. After comparing the test results with the theoretical calculation, the main causes of test error are analyzed. The result show that the actual displacement and stress of the tower SJ101 are in agreement with the theoretical calculation. Finally, the tower collapsed with the test overload 120%. The results are consistent with the design expectations, and show that the tower design is safe and reasonable, and provide the scientific basis and reference for the engineering design.

Key words: ±500 kV; DC; double-circuit; strain tower; full-scale test.

“溪洛渡右岸电站送电广东 ±500 kV 同塔双回直流输电工程”是“十二五”云电送粤的重要输变电工程项目之一, 作为国内首次设计的 ±500 kV 双回路直流输电线路, 该工程采用 4 分裂大截面导线, 荷载较大, 气象条件复杂、海拔差异大、地形种类繁多; 且目前国内外还没有冰区 ±500 kV 同塔双回直流输电铁塔的设计和运行经验。为检验杆塔主要杆件受力的理论计算与试验实测值之间的符合性, 确保杆塔刚度、强度、稳定性满足工程要求, 达到安全可靠运行目的, 有必要通过真型塔试验进行分析验证。本工程选出使用频率较高的 SJ101 双回路

耐张塔进行了真型塔试验, 本文主要介绍了该塔的试验情况, 对试验结果进行分析, 并与梁杆有限元模型计算的结果进行对比, 验证该塔设计的合理性, 为工程设计提供科学依据和借鉴^[1-6]。

1 SJ101 双回路直流耐张塔设计概况

1.1 结构设计依据及设计条件

SJ101 试验塔主要参照《110—750 kV 架空输电线路设计技术规范》、《高压直流架空送电线路设计技术导则》(DL/T436—2005)、《架空送电线路杆塔结构设计技术规定》(DL/T5154—2002)进行设计。

设计条件为: 风速 27 m/s, 导线设计覆冰 10 mm, 导线型号为 4 × LGJ-900/75 钢芯铝绞线, 地线 1 为 LBGJ-100-20AC 铝包钢, 水平档距 500 m, 垂直档距 650 m; 设计呼高 42.0 m, 铁塔总高

收稿日期: 2015-09-01

作者简介: 陈廷君(1982), 男, 广东广州人, 工程师, 硕士, 主要从事输电线路结构设计工作(e-mail)chentingjun@gedi.com.cn。

163.5 m, Q420 高强钢采用 C 级钢, 铁塔总重量为 84.2 t。

1.2 设计要点

1.2.1 高强钢的选用

合理选用高强钢对铁塔合理选型、降低铁塔重量起着关键作用, SJ101 耐张塔优化计算时, 其主材分别使用 Q420、Q460 两种材质进行设计试算, 得出该塔使用 Q460 主材重量比 Q420 主材重量轻约 4%, 整塔重量轻约 1%。但 Q460 钢原材料出厂价比 Q420 钢材高 5%, 考虑到 Q460 钢在线路使用的还很少, 塔厂在加工过程中仍需一定的试制作费, 且市场供应远少于 Q420 钢。综合起来, 对于本铁塔来说, 使用 Q420 比使用 Q460 更具优势。

1.2.2 大规格角钢的选用

大规格高强度角钢由于肢宽与肢厚均较大, 可大幅提高单构件承载力, 实现单肢大规格角钢替代组合角钢。同时, 单肢大规格角钢较组合角钢结构传力简洁, 避免了组合构件受力不均的问题, 可以优化构造, 大量减少连接螺栓与填板数量, 具有良好的经济性, 加工和安装更方便易行, 安全质量更有保障。经测算, SJ101 主材选用单肢大规格角钢与使用双拼十字组合角钢相比, 重量减轻约 5%, 因此该塔主材选用大规格角钢, 塔腿主材规格为 Q420L250×28。

1.2.3 塔身坡度的优化

塔身坡度是影响整个塔重的主要因素之一。塔身坡度的确定要综合考虑铁塔主斜材的受力、基础作用力的大小、铁塔根开的大小等因素。合理的塔身坡度不仅能主材应力分布的变化和材料规格的变化相协调、主材的受力状态较均匀、铁塔的钢材指标降低、刚度和强度稳定可靠, 而且外观也显得非常协调。经优化计算和分析, SJ101 耐张塔塔身坡度定为 0.12。

1.2.4 加强塔身抗扭刚度

结合本塔导地线及覆冰荷载的情况, 对本塔设计时应采取加强塔身抗扭刚度的措施:

1) 采用正方形断面的塔身并增设抗扭隔面来增加铁塔的抗扭转刚度。

2) 提高塔腿刚度, 控制塔腿斜材与主材的夹角不宜小于 20°。

3) 塔身斜材宜多采用交叉斜材布置, 尽可能少

用“K 型”布置, 据大量工程经验, “K 型”布置的塔身, 其扭转刚度要弱于交叉斜材布置的塔身。

4) 塔身斜材与水平面的夹角宜控制 30~50 度。

2 试验概况

为检验 SJ101 主要杆件受力的理论计算与试验实测值之间的符合性, 验证结构的安全可靠性, 于 2011 年在霸州特高压杆塔试验基地进行 SJ101 真型试验。

2.1 试验工况

试验选取了安装、事故、正常运行三种类型的工况, 并根据计算书选择了控制杆件较多和具有代表性的工况进行。具体工况如下:

1) 工况 1: 0 度转角: 上导线左前侧挂点紧导线、其余导线未紧(小号侧均未装)。

2) 工况 2: 0 度转角: 上导线左前侧挂点锚导线、其余导线未锚。

3) 工况 3: 20 度转角: 地线左后侧挂点断地线, 上导线左后侧挂点断导线。

4) 工况 4: 20 度转角: 上导线右前侧挂点紧导线、其余导线未紧(小号侧均已装)。

5) 工况 5: 20 度转角: 上导线左前侧挂点紧导线、其余导线未紧(小号侧均已装)。

6) 工况 6: 20 度转角: 上导线左后侧挂点锚导线、其余导线未锚。

7) 工况 7: 20 度转角: 下导线左后侧挂点锚导线、上导线左后侧已锚、其余导线未锚。

8) 工况 8: 45 度大风。

其中, 工况 1~7 均加载至设计荷载 100%, 工况 8 加载至设计荷载 100%、120%。

2.2 试验测点布置

SJ101 试验塔的位移测点及应变布置分别见图 1 和图 2。

3 试验结果分析

3.1 位移结果分析

试验塔位移测点布置见图 1, 位移测点分布在杆塔地线支架、横担和塔身关键部位。主要测点实测位移值(已考虑残余应变修正后的位移值)和理论计算值见表 1, 正常 45 度大风工况杆塔横向位移见图 3 所示, 各数值均为各工况加载至设计荷载 100% 时的位移值。

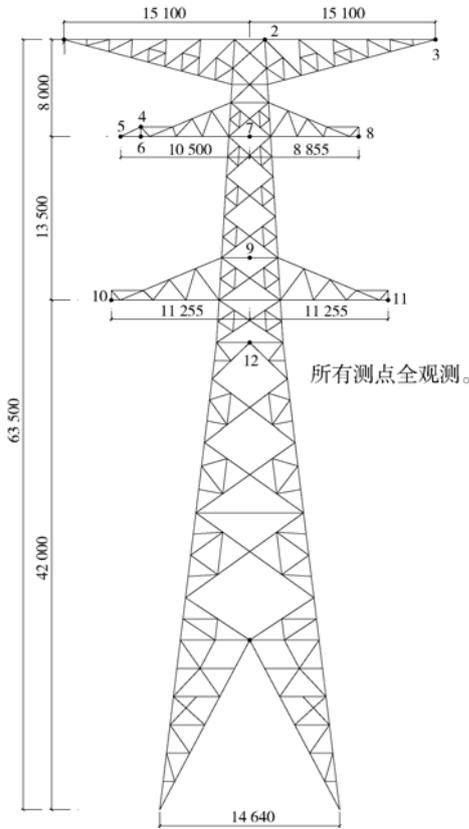


图 1 位移测点布置图

Fig. 1 Lay-out Drawing of Displacement Measurement

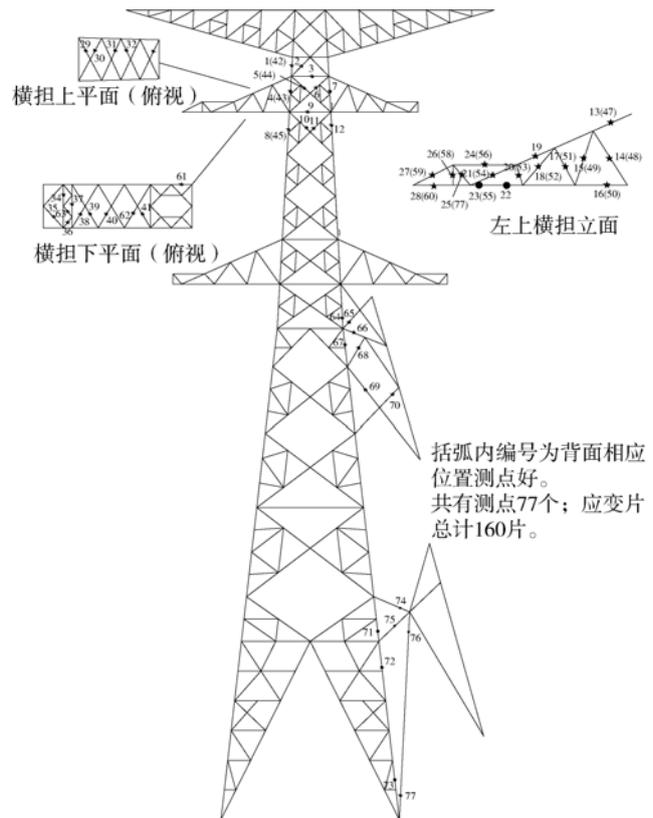


图 2 应变测点布置图

Fig. 2 Lay-out Drawing of Strain Measurement

表 1 各工况下实测位移与计算位移比较表

Table 1 Comparison of the Measured Displacement and The Calculated Displacement in Different Conditions

工况	最大位移测点	主要变形方向比较				
		主要变形方向	理论计算值	实测值	差值	相对偏差/100%
工况 1	6	竖向	54	51	-3	-6
工况 2	6	纵向	180	379	199	106
工况 3	1	纵向	-377	-581	-204	54
工况 4	8	纵向	286	343	57	20
工况 5	6	纵向	306	428	122	40
工况 6	6	纵向	242	530	288	19
工况 7	10	纵向	208	407	199	96
工况 8	1	横向	389	430	41	11

由表 1 和图 3 可知, 理论计算值均比实测位移值要小, 塔身在 45 度大风工况(工况 8)下塔身位移计算值与实测值较为接近, 最大位移相差 11%, 误差在可接受的程度内, 其结果充分检验了计算的合理性; 锚塔时(工况 2、7)横担位移计算值与实测值相差甚远, 最大相差 100% 左右; 安装及断线工况下横担位移计算值与实测值最大相差 50% 左右。

造成以上偏差的原因是多方面的, 如设计的结构布材形式、节点构造、连接方式, 加工精度及材料强度的偏差, 组装方式与螺栓紧固程度及测试方法等。而大风工况下位移实测值与计算值比较接近, 其原因可归结为两个方面。首先, 45 度大风横向位移单纯由水平力引起, 受力模式与计算模型一致; 其次, 真型塔塔身构造与计算模型比较接近, 而横担和地线支架由于预拱、安装误差及构造等原

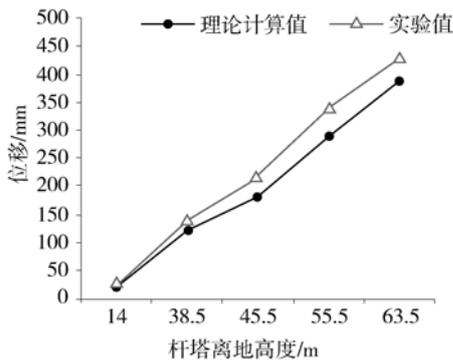


图3 正常45°大风工况横向位移图

Fig. 3 Transverse Displacement in The Condition of 45° Degree

因造成横担的实测位移与计算值相对塔身差别大。

3.2 应力结果分析

SJ101 试验塔整塔应变测点布置位置见图2所示。试验数据经整理发现，部分测点实测值与理论计算相对误差较大，尤其是应力值较小时，为了找出主要的规律，用控制工况下测得的一个测点的多个应变片平均值以及最大值分别与计算值比较，并舍弃应力在 100 MPa 以下的结果，成果见表2及表

3，以下各数值均为各工况加载至设计荷载 100% 时的应力值。

从上表各测点应力情况分析，主要结论如下：

1) 双面连接主材中，应力在 200 MPa 以上的，试验值与计算值符合度较好，应力在 200 MPa 以下的误差相对较大，最大达 32%。

2) 单面连接材料中，误差相对较大，个别杆件误差超过 100%，且平均值与最大值差别非常大，通过结果发现，连接肢为压应力而自由肢为拉力，这说明构件存在弯曲应力导致其截面受力不均，施工图中此杆两端为两颗螺栓，一定程度上约束了构件的转动能力，且构件本身承载力较小和可能存在的残余应力，因此两端附加弯矩对构件产生的影响较大，这是导致实测值与理论计算值相差较大的主要原因。

经分析，造成以上误差的原因是多方面的，主要有以下几点：

1) 应变片测量误差的影响，试验中因安装应力的存在使得应变片初始值不为零，而试验中是很难

表2 双面连接的主材

Table 2 The Double Connected Main Material

测点	计算值/A	实测最大值/B	B/A	实测均值/C	C/A	测点	计算值/A	实测最大值/B	B/A	实测均值/C	C/A
7	-105	-134	1.28	-123	1.17	67	-255	-189	0.74	-179	0.70
8	-104	-136	1.32	-74	0.71	71	-299	-310	1.04	-292	0.97
12	-126	-119	0.94	-71	0.57	72	-306	-286	0.93	-262	0.86
64	-262	-303	1.16	-278	1.06	73	-285	-356	1.25	-237	0.83

注：表中计算值及实测最大值单位均为为 N/mm²，负号表示压力，正号表示拉力，下表相同。

表3 单面连接的材料

Table 3 The One Side Connected Material

测点	计算值/A	实测最大值/B	B/A	实测均值/C	C/A	测点	计算值/A	实测最大值/B	B/A	实测均值/C	C/A
3	114	149	1.31	55	0.48	41	-141	-165	1.17	3	-0.02
5	-141	-94	0.67	-19	0.13	44	-105	-68	0.65	14	-0.14
6	-134	-124	0.93	-56	0.42	46	-175	-120	0.69	-60	0.34
9	-154	-206	1.34	-85	0.56	47	200	256	1.28	147	0.74
10	-162	-215	1.32	-45	0.28	50	-253	-331	1.31	-137	0.54
11	-101	-29	0.29	-16	0.16	54	166	148	0.89	114	0.68
13	122	122	0.99	71	0.58	55	-188	-365	1.95	-262	1.4
16	-235	-349	1.48	-145	0.62	56	101	130	1.28	58	0.57
19	117	107	0.91	74	0.63	57	-129	-213	1.65	-12	0.09
36	100	121	1.21	55	0.55	58	131	171	1.3	-6	-0.04
37	-116	-47	0.4	8	-0.07	62	-106	-181	1.71	-12	0.11
38	-106	-238	2.24	-65	0.61	63	-100	-173	1.73	-57	0.58
39	-141	-311	2.21	-27	0.19	65	-100	-302	3.04	-95	0.95

对其做到完全归零,虽说初应变不大,但对于受力不大的杆件,所占的比例就很大。

2)实测应变未计及塔体自重的影响,而理论计算则考虑了自重。

3)理论计算时节点统一视为铰接,但实际中节点刚度较大,并非理想铰接点,所以导致实际传力与理论计算有一定的差异,实测应变和计算值有差异。

4)由于实际结构中存在构造偏心,杆件受力并非理想的轴心受力,与计算假定存在差异。

5)荷载加载方式存在的差异,由于试验场地、器具等的限制,风荷载及部分荷载点被合并加载到同一个点上,导致其与理论计算地加载方式存在一定的差异。

6)塔身主材受力明确,轴心压力是其产生应力的主要原因,很容易确定受力方向和位置,便于测量;而斜材因其偏心受力,在杆件中存在压弯、弯扭应力,在测量中不易确定最大受力位置和方向,这是造成主材和斜材实测应力和计算应力差别大的原因。因而对于主材的实测应力可以直接参考,对于斜材的实测应力需要用有限元理论进行分析,得出断面的应力分布,再进行理论分析。

3.3 超载破坏分析

试验塔超载工况为正常45度大风,当荷载加至100%时,第1、3观测点的横向位移分别为438 mm、457 mm;当荷载加至120%时,第1、3观测点的横向位移分别为535 mm、543 mm。当荷载加至120%时,试验塔发生倒塔破坏。D腿主材由下向上第三个节间首先屈服,导致整塔倒塌。

根据理论计算结果,腿部主材在设计工况荷载 P 下材料应力比仅为90%,要使腿部主材应力比达到100%,则荷载需超载 $\Delta P = 1.1 \times P \div 0.9 - P = 0.22 P$ (1.1为考虑材料分项系数),此时主材屈服,铁塔产生较大的变形及位移,在继续加载的情况下,进入强化阶段,铁塔破坏。这与真型试验超载20%时整塔倒塌的结果非常吻合,这充分验证了计算方法和设计的正确性以及杆塔的安全可靠性,同时也验证了目前国内的Q420大角钢的质量安全可靠。

根据发生屈服的塔腿主材应力分析,超载115%时72号测点中心及肢尖实测应力分别为431 MPa和318 MPa,73号测点中心及肢尖实测应力分

别为610 MPa和132 MPa,由此可见,测点72位置受力较73号测点均匀,两个测点最大实测应力远超过钢屈服点,进入强化阶段,构件破坏。由此分析得出以下结果:

1)Q420大角钢的材质是过硬的,塑性发展能力超过预期,破坏点出现在预期中的杆件上,很好地实现了设计意图,也说明设计思想的正确性。

2)73号离塔座板较近,而此处与靴板连接的刚度很大,可近似考虑为刚接,因此位于塔腿主材和靴板连接区域由于附加弯矩、加工精度等的影响导致肢尖与肢背的应力差别变大。

4 结论

1)本试验塔共进行了8种工况的真型试验,其设计杆塔为预期超载115%~125%时破坏、实际试验中超载120%时杆塔坍塌的试验结果,充分表明设计是安全经济的,达到了预期的要求和目的,取得了圆满成功。

2)针对溪洛渡右岸电站送电广东±500 kV同塔双回直流输电工程直流线路工程试验塔SJ101的受力特点进行了结构形式、塔身坡度和节点优化,使杆塔传力清晰,受力合理且指标最优,并通过真型铁塔试验验证其合理性,为工程设计提供科学依据和借鉴。

3)通过分析试验塔的位移和应变,得出理论计算模型总体上和实际铁塔吻合程度较高,计算理论和设计理念能够保证杆塔的安全性和合理性。

参考文献:

- [1] 国电电力建设研究所. DL/T 899—2004 架空线路杆塔结构荷载试验[S]. 北京:中国电力出版社,2005.
- [2] 张殿生. 电力工程高压送电线路设计手册[M]. 2版. 北京:中国电力出版社,2003.
- [3] 中华人民共和国建设部. GB 50017—2003 钢结构设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2003.
- [4] 国电电力建设研究所. DL/T 899—2004 架空线路杆塔结构荷载试验[S]. 北京:中国电力出版社,2005.
- [5] 中国电力工程顾问集团公司. DL/T 5154—2012 架空送电线路杆塔结构设计技术规定[S]. 北京:中国计划出版社,2012.
- [6] 秦庆芝,耿景都. 特高压交流J1转角塔设计及真型试验[J]. 电力建设,2005,29(10):5-9.

(责任编辑 林希平)