

HVDC 用斜撑塔电力电容器组加工和安装方法研究

杨结春, 龙玉萍, 秦华忠, 蒋利军, 黄桂发, 王义

(桂林电力电容器有限责任公司, 广西 桂林 541004)

摘要: 斜撑塔电力电容器组具有重心稳定、抗震性能高等优点, 在 HVDC 中广泛应用。本文介绍了一种 HVDC 用斜撑塔电力电容器组加工和安装方法, 针对斜撑塔电力电容器组的结构特点, 通过对斜支座的加工方法、斜撑塔结构的加工装配方法以及斜撑塔电容器组现场安装方法的研究, 解决了斜撑塔电力电容器组加工和安装过程中的问题和困难, 提高了加工和安装工作效率和准确率。工程应用证明, 该方法能使斜撑塔电力电容器组生产加工和现场安装更为简单、方便和高效。

关键词: HVDC; 电力电容器组; 斜撑塔; 加工制造; 方法

Research on Processing and Installation Method of Inclined-support-tower Power Capacitor Bank for HVDC Application

YANG Jiechun, LONG Yuping, QIN Huazhong, JIANG Lijun, HUANG Guifa, WANG Yi

(Guilin Power Capacitor Co., Ltd., Guangxi Guilin 541004, China)

Abstract: The inclined support tower power capacitor bank has such advantages as stable center of gravity and high seismic performance, and is widely used in HVDC application. In this paper, a kind of processing and installation method of inclined support tower power capacitor bank for HVDC application is introduced. The problems and difficulties in the processing and installation process of the inclined support tower power capacitor bank are solved in accordance with the structural characteristics of the inclined support tower power capacitor bank and by way of studying the processing method of the inclined supports, the processing and assembly method of the inclined support tower structures as well as on-site installation methods of the inclined support tower capacitor bank, and the efficiency and accuracy of processing and installation work are improved. It is proven by the engineering application that this method can make the production processing of the inclined support tower power capacitor bank and its installation on site more simple, convenient and efficient.

Keywords: HVDC; power capacitor bank; inclined support tower; processing and manufacturing; method

0 引言

目前我国已运行的高压直流输电(high voltage direct current transmission, HVDC)工程达 49 项, 其中特高压直流工程 20 项、超高压直流工程 17 项、背靠背工程 9 项, 技术水平达到国际领先水平, 并具有完全自主知识产权^[1-9]。为了消除电网系统谐波、补偿无功功率和改善电压质量, 高压直流输电工程需要配置大量交、直流滤波器电容器^[10-13]。斜撑塔结构的电力电容器组具有重心稳定、抗震性能高等优点, 在高压直流输电工程的滤波器电容器中广泛应

用, 特别对于 ± 800 kV 特高压直流滤波器电容器, 电容器塔架高度达到 25 m, 重量超过 50 t, 抗震问题更加突出, 文献[14]通过对斜撑塔结构的 ± 800 kV 特高压直流滤波器电容器建立有限元模型^[15-21], 仿真验证了电容器塔架抗震能达到 0.25 g^[22-25]。

斜撑塔电力电容器组的结构特征是第 1-3 层电容器台架的层间支柱中心轴线向电容器塔架中心倾斜 10.4°, 第 4 层电容器台架及以上的层间支柱则逐层垂直安装。受倾斜角度的影响, 斜撑塔电力电容器组安装过程中可调节范围小, 安装角度和尺寸偏差很容易超标, 使得斜撑塔电力电容器组工厂

收稿日期: 2024-10-29

基金项目: 桂林市科学研究与技术开发计划(20231D23738523)。

内加工制造和现场安装存在误差大、效率低、返工率高等问题和困难,造成一定的损失和不良影响。

本文介绍一种 HVDC 用斜撑塔电力电容器组加工和安装方法,可以较好地解决以上存在的问题和困难,实现斜撑塔电力电容器组工厂内加工制造和现场安装简单、方便、高效。

1 斜撑塔电力电容器组加工的主要问题

以某 ±800 kV 换流站高压直流滤波器电容器组 C₁(简称电容器组,下同)为例,电容器组现场安装见图 1。电容器组中的斜撑塔结构见图 2。



图1 电容器组现场安装图
Fig. 1 Installation diagram of capacitor bank on site

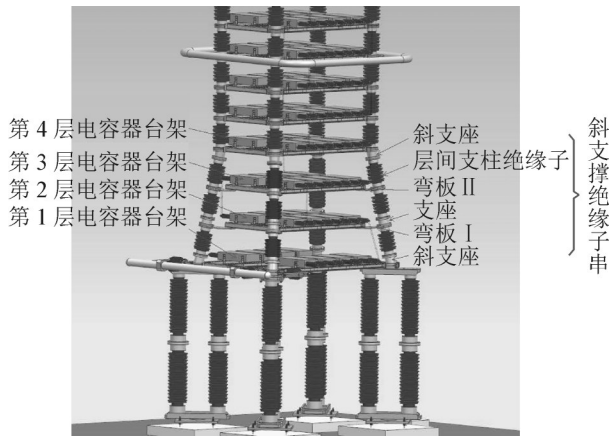


图2 斜撑塔结构示意图
Fig. 2 Schematic structural diagram of the inclined support tower

由图 2 可知,电容器组斜撑塔结构包含第 1~4 层电容器台架和 4 个相同的斜支撑绝缘子串,4 个斜支撑绝缘子串安装在第 1 层和第 4 层电容器台架之间。每个斜支撑绝缘子串由层间支柱绝缘子、支座、斜支座、弯板 I 和弯板 II 按照顺序采用螺栓等装配而成,其中斜支座的作用是保证整个斜支撑绝缘子串安装后的倾斜角度 10.4°,如图 3 所示。斜支撑绝缘子串顶部和底部对称各装配 1 件斜支座,使斜支

撑绝缘子串的上、下表面保持水平;弯板 I 示意图见图 4,作用是过渡连接第 2 层电容器台架与斜支撑绝缘子串的安装固定。弯板 II 示意图见图 5,作用是过渡连接第 3 层电容器台架与斜支撑绝缘子串的安装固定。弯板 I 和弯板 II 的折弯角度也是 10.4°,刚好抵消斜支撑绝缘子串的倾斜角度,使第 2 层和第 3 层电容器台架水平安装。支座是直立式结构,作用是增大第 2 层和第 3 层电容器台架的层间距。

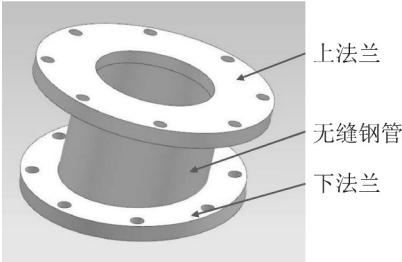


图3 斜支座示意图
Fig. 3 Schematic diagram of the inclined support

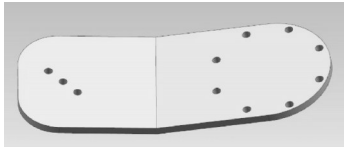


图4 弯板 I 示意图
Fig. 4 Diagram of the bending plate I

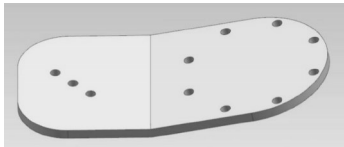


图5 弯板 II 示意图
Fig. 5 Schematic diagram of the bending plate II

通过分析电容器组斜撑塔结构,需要解决两个主要问题。

1.1 斜支座的加工问题

斜支座由上法兰、无缝钢管和下法兰组装焊接而成,其相对尺寸和角度要求较多,误差范围小,因此对加工制造精度要求很高。斜支座的加工存在两个难点问题:

- 1)斜支座的上、下法兰外表面中心连线与垂直方向成 10.4° 倾斜角度,即上、下法兰外表面之间的夹角为 10.4°,无缝钢管与上法兰拼接的水平切面为圆形,而与下法兰拼接的另一端水平切面则为椭圆形,组装焊接后除了要保证无缝钢管的中心轴线与上、下法兰外表面中心连线重合,满足倾斜角度外,还要保证上、下法兰安装孔的角度满足斜支撑绝缘子串的装配;
- 2)为保证斜支座的机械强度,无缝钢管需要嵌入上、下法兰一定深度,因此需要根据无缝钢管两

端的切面外形在上、下法兰上加工相应的凹台面。无缝钢管与上法兰拼接的水平切面为圆形,上法兰加工凹台面的位置比较容易确定,而无缝钢管与下法兰拼接的水平切面为椭圆形,比较难确定下法兰加工凹台面的准确位置。

1.2 斜撑塔结构的装配问题

在安装电容器组4个斜支撑绝缘子串时,由于倾斜角度和装配误差的原因,4个斜支撑绝缘子串之间会产生不同的角度和位移尺寸偏差,再加上零部件的加工制造误差,使得弯板Ⅰ和弯板Ⅱ按理论计算的安装孔不能安装第2层和第3层电容器台架,因此,需要解决斜撑塔结构电容器台架与弯板之间的装配问题。

2 斜支座的加工方法

2.1 加工斜支座的零件

1)加工上法兰。在上法兰上加工出安装孔、流锌孔和与无缝钢管切面拼接的凹台面。圆形凹台面加工深度5 mm,直径比无缝钢管外径大1 mm,方便无缝钢管插入和转动调节。流锌孔的直径比无缝钢管内径小10 mm。

2)加工下法兰。在下法兰上加工出安装孔和流锌孔,流锌孔的直径比无缝钢管内径小15 mm。

3)加工无缝钢管。无缝钢管与下法兰拼接的切面为椭圆形,切面夹角 10.4° 。无缝钢管要各嵌入上、下法兰凹台面5 mm深度,因此总长度需要考虑10 mm冗余量。

2.2 设计制作斜支座加工工装

利用三维设计软件绘制出斜支座的三维模型图,测量出斜支座各尺寸和角度,根据测量尺寸制作好斜支座加工工装,工装示意图见图6。斜支座加工工装设置为开放式,方便无缝钢管移动和调节;工装的上、下表面各设置6个安装孔,安装孔与斜支座的上、下法兰安装孔尺寸相同,用于加工斜支座时固定上、下法兰,保证上、下法兰安装孔的角度满足要求。

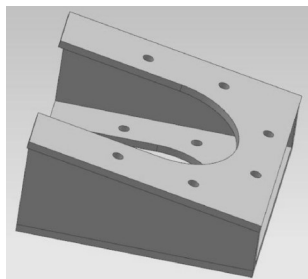


图6 斜支座加工工装示意图

Fig. 6 Schematic diagram of processing tooling of the inclined support

2.3 加工斜支座

用定位销将下法兰和斜支座工装的下表面固定,根据工装确定出斜支座下法兰与无缝钢管切面拼接的椭圆形凹台面位置。加工下法兰椭圆形凹台面,加工深度5 mm,椭圆形凹台面的直径比无缝钢管大1 mm~2 mm,方便无缝钢管插入和转动调节。

将已加工制作好的上法兰、无缝钢管和下法兰装配在工装上,适当转动调节无缝钢管,使上、下法兰与工装完全贴合和安装孔对齐后,再用定位销固定,斜支座工装定位示意图见图7。

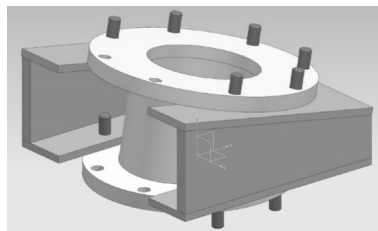


图7 斜支座工装定位示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the tooling positioning of the inclined support

拼接处点焊初步固定成型,然后移除工装,拼接处进行全密封焊接。适当铣削上、下法兰表面,使斜支座整体尺寸达到设计要求,至此完成斜支座的加工。

3 斜撑塔结构的加工装配方法

针对斜撑塔结构的装配问题,提供一种工厂内斜撑塔结构的加工装配方法步骤,同时验证整个斜撑塔结构安装的可行性。

3.1 搭建基础平台,安装第1层电容器台架

搭建的基础平台为4组底座支柱绝缘子,4组底座支柱绝缘子的上端部均安装有底座,底座表面保持水平,将第1层电容器台架的4个角分别固定在4个底座上。

3.2 装配斜支撑绝缘子串

按图2各零部件顺序由下往上装配斜支撑绝缘子串,并依次用螺栓锁紧,装配的4个斜支撑绝缘子串总高度偏差控制在2 mm以内。弯板Ⅰ与第2层电容器台架安装处暂不开螺栓孔,弯板Ⅱ与第3层电容器台架安装处暂不开螺栓孔。

3.3 安装固定斜支撑绝缘子串

将装配好的4个斜支撑绝缘子串分别安装在第1层电容器台架的4个角上,并用螺栓等锁紧。

3.4 吊装电容器台架

将第2层电容器台架吊至弯板Ⅰ上,将第3层

电容器台架吊至弯板Ⅱ上。将第4层电容器台架安装在斜支撑绝缘子串顶部,并用螺栓等锁紧。

3.5 设置铅垂线、作安装孔标记

在第4层电容器台架的4个侧面设置8条铅垂线,每个侧面设置两条。测量第2层电容器台架每个侧面与铅垂线的距离,适度调整第2层电容器台架的位置使得相对两侧面与铅垂线的距离相等为止,然后在弯板Ⅰ与第2层电容器台架的安装孔处做好孔位置标记。

测量第3层电容器台架每个侧面与铅垂线的距离,调整第3层电容器台架位置使得相对两侧面与铅垂线的距离相等为止,然后在弯板Ⅱ与第3层电容器台架安装孔处做好孔位置标记。

3.6 作零部件标记

在斜支撑绝缘子串中各零部件显眼处作好各零部件连接配装位置唯一的标识。

3.7 弯板钻孔

将弯板Ⅰ和弯板Ⅱ取下,依据3.5节做好的安装孔位置标记钻孔。至此即完成了工厂内斜撑塔结构的加工和装配。

4 斜撑塔电容器组现场安装方法

工程现场安装斜撑塔电容器组时,安装方法步骤如下:

1)安装好底座支柱绝缘子基础平台和第1层电容器台架;

2)依据步骤3.6节各零部件连接配装位置唯一的标识,装配斜支撑绝缘子串;

3)吊装第2层电容器台架,将第2层电容器台架吊至弯板Ⅰ上,适度调整电容器台架位置至与弯板Ⅰ的安装孔对齐后,用螺栓锁紧;

4)吊装第3层电容器台架,将第3层电容器台架吊至弯板Ⅱ上,适度调整电容器台架位置至与弯板Ⅱ的安装孔对齐后,并用螺栓锁紧;

5)吊装第4层电容器台架,将第4层电容器台架吊至斜支撑绝缘子串顶部,并用螺栓锁紧。依次逐层安装完其余电容器台架,从而完成整个斜撑塔电容器组现场安装。

5 工程应用

本斜撑塔电力电容器组加工和安装技术方案,通过制作斜支座加工工装,提高了斜支座的加工制造效率和准确性;通过对斜支撑绝缘子串中各零部件做好位置唯一标识,确保了装配误差最小和安装准确;通过设置铅垂线的方法调整第2层和第3层

电容器台架安装位置,保证了连接弯板与电容器台架的安装无偏差;通过先装配好斜支撑绝缘子串后再逐层安装电容器台架,提高了斜撑塔电力电容器组的安装效率和准确性。

目前,本技术方案已成功应用在昌吉—古泉 ± 1100 kV特高压直流工程、白鹤滩—江苏 ± 800 kV特高压直流工程、巴基斯坦默蒂亚里—拉合尔 ± 660 kV高压直流工程、土耳其凡城背靠背工程等20多项国内外HVDC工程的交、直流滤波器电容器。现场安装表明:斜撑塔电力电容器组安装过程简单,安装效率高,一次安装成功率100%,得到了行业专家和国内外用户的认可。

6 结语

通过对斜撑塔电力电容器组加工和安装方法的研究,提高了斜撑塔电力电容器组加工和安装效率,操作简单、实用性强,准确性高。该技术方案也获得了发明专利授权^[25],具有完全自主知识产权,受国家专利保护,具有较高的推广和应用价值。但该方法在加工过程中对斜支撑绝缘子串各零部件做好位置唯一标识,较为麻烦,经过不断迭代和改进,控制各零部件的误差,可以研究取消标识,进一步减少工厂内加工和现场安装的工作量。

参考文献

- [1] 郭贤珊,厉璇,王庆,等.特高压直流输电技术发展现状与思考[J].新型电力系统,2024,2(3):237-250.
GUO Xianshan, LI Xuan, WANG Qing, et al. Status and thoughts on the development of ultra high voltage direct current (UHVDC) transmission technology[J]. New Type Power Systems. 2024, 2(3): 237-250.
- [2] 左强林,赵彦军,孙振瑜.HVDC用直流滤波电容器组均压技术研究[J].电力电容器与无功补偿,2024,45(4):1-5.
ZUO Qianglin, ZHAO Yanjun, SUN Zhenyu. Study on grading technology of DC-filter capacitor bank for HVDC [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(4):1-5.
- [3] 倪学锋,贾华,赵倩.我国高压电容器几个关键问题的研究[J].电力电容器与无功补偿,2024,45(4):86-90.
NI Xuefeng, JIA Hua, ZHAO Qian. Research on several key issues of high-voltage capacitors in china[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(4): 86-90.
- [4] 饶宏,张东辉,赵晓斌,等.特高压直流输电的实践和分析[J].高电压技术,2015,41(8):8-14.
RAO Hong, ZHANG Donghui, ZHAO Xiaobin, et al. Practice and analyses of UHVDC power transmission[J]. High

- Voltage Engineering, 2015, 41(8):8-14.
- [5] 周春红,蒋利军,吴维柏,等.特高压直流输电工程用直流滤波器高压电容器H型接线不平衡保护方案研究[J].电力电容器与无功补偿,2020,41(1):1-7.
- ZHOU Chunhong, JIANG Lijun, WU Weibai, et al. Study on H-type wiring unbalance protection scheme of DC filter capacitor in UHVDC transmission project[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020,41(1):1-7.
- [6] 李威,符劲松,张欢,等.特高压直流滤波器电容器组不平衡电流保护整定计算分析[J].电力电容器与无功补偿,2018,39(6):1-6.
- LI Wei, FU Jingsong, ZHANG Huan, et al. Calculation analysis of unbalanced current protection setting for capacitor bank of UHVDC filter[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018,39(6):1-6.
- [7] 赵建明,蒙毅.特高压直流输电技术的分析与探究[J].科技创新与应用,2021,11(33):109-112.
- ZHAO Jianming, MENG Yi. Analysis and exploration of ultra high voltage direct current transmission technology[J]. Technology Innovation and Application, 2021,11(33):109-112.
- [8] 杨结春,秦华忠,黄有祥,等.特高压直流输电工程750 kV交流滤波电容器保护方案研究[J].电力电容器与无功补偿,2019,40(3):1-4.
- YANG Jiechun, QIN Huazhong, HUANG Youxiang, et al. Study on protection scheme of 750 kV AC filter capacitor for UHVDC transmission project[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019,40(3):1-4.
- [9] 何贤彪.特高压直流输电技术现状以及我国的应用前景[J].通讯世界,2018(2):216-217.
- HE Xianbiao. The current status of ultra-high voltage direct current transmission technology and its application prospects in China[J]. Telecom World, 2018(2):216-217.
- [10] 文俊,孟伟,殷威杨,等. ± 800 kV特高压直流输电工程交流滤波器优化设计[J].高电压技术,2010,35(5):6-11.
- WEN Jun, MENG Wei, YIN Weiyang, et al. Optimizing design of AC filters of ± 800 kV UHVDC transmission projects [J]. High Voltage Engineering, 2010,35(5):6-11.
- [11] 梅念,李银红,陈东,等.HVDC工程交/直流滤波器高压电容器不平衡保护的判据研究[J].电网技术,2011,35(12):229-234.
- MEI Nian, LI Yinhong, CHEN Dong, et al. Criteria of unbalance protection for high voltage capacitors in AC/DC filters of HVDC power transmission projects[J]. Power System Technology, 2011,35(12):229-234.
- [12] 马为民,樊纪超.特高压直流输电系统规划设计[J].高电压技术,2015,41(8):2545-2549.
- MA Weimin, FAN Jichao. Planning and design of UHVDC transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2015,41(8):2545-2549.
- [13] 杨结春,林峰,秦华忠,等. ± 1 100 kV特高压直流工程1 000 kV交流滤波电容器组的研制[J].机电工程技术,2024,53(6):282-285.
- YANG Jiechun, LIN Feng, QIN Huazhong, et al. Development of 1 000 kV AC filter capacitor bank for ± 1 100 kV UHVDC transmission project[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2024,53(6):282-285.
- [14] 廖斌,梁晨,林峰,等.UHVDC用支撑式特高压直流滤波电容器组塔架抗震性能分析[J].电力电容器与无功补偿,2017,38(3):7-11.
- LIAO Bin, LIANG Chen, LIN Feng, et al. Anti-seismic performance analysis on supported ultra-high voltage DC filter capacitor bank tower for UHVDC[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017,38(3):7-11.
- [15] 龙驭球.有限元法概论[M].北京:人民教育出版社,1978.
- [16] 王焕定,吴德伦.有限单元法及计算程序[M].北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [17] 王呼佳,陈洪军,包陈. ANSYS工程分析进阶实例[M].北京:中国水利水电出版社,2006.
- [18] 胡聿贤.地震工程学[M].北京:地震出版社,1988.
- [19] 李天,李杰,沈祖炎.电力系统地震灾害分析[J].世界地震工程,2000,16(4):19-24.
- LI Tian, LI Jie, SHEN Zuyan. Earthquake damage analysis of electric power system[J]. The world's earthquake engineering, 2000,16(4):19-24.
- [20] 曹资,薛素铎.空间结构抗震理论与设计[M].北京:科学出版社,2005.
- [21] 工程抗风设计计算手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2005.
- [22] 电力设施抗震设计规范:GB 50260—2013[S].2013.
- Code for seismic design of electrical installations: GB 50260—2013[S].2013.
- [23] 特高压瓷绝缘电气设备抗震设计及减震装置安装与维护技术规程:Q/GDW 11132—2013[S].2013.
- Technical specification for seismic design of ultra-high voltage porcelain insulating equipments and installation/ maintenance to energy dissipation devices: Q/GDW 11132—2013[S].2013.
- [24] 高压开关设备和控制设备的抗震要求:GB/T 13540—2009[S].2009.
- Seismic qualification for high-voltage switchgear and controlgear: GB/T 13540—2009[S]. 2009.
- [25] 杨结春.一种斜塔电力电容器组加工及装配方法 ZL202111122437.9[P].2022-12-06.
- 作者简介:
- 杨结春(1986—),男,高级工程师,主要从事电力电容器技术研究工作。

龙玉萍(1986—),女,经济师,主要从事电力电容器技术研究管理工作。
秦华忠(1973—),男,正高级工程师,主要从事电力电容器技术研究工作。
蒋利军(1984—),男,高级工程师,主要从事电力电容器

技术研究工作。
黄桂发(1976—),男,高级工程师,主要从事电力电容器技术研究工作。
王义(1972—),男,正高级工程师,主要从事电力电容器技术研究工作。

《电力电容器与无功补偿》2025 年 1 期广告单位

1 山东哈大电气有限公司	封面	11 西安金叶电力科技有限公司	前插 7
2 上海思源电力电容器有限公司	封二	12 陕西凯瑞宏星电器有限公司	前插 8
3 西安高压电器研究院股份有限公司(业务)	封三	13 桂林明富金属股份有限公司	前插 9
4 深圳市紫宸激光设备有限公司	封底	14 温州市凯泰特种电器有限公司	前插 10
5 东莞市东和电子制程有限公司	前插 1	15 山东海源泰和电气有限公司	前插 11
6 日新电机(无锡)有限公司	前插 2	16 深圳市三和电力科技有限公司	前插 12
7 新程(辽宁)电力电容器科技有限公司	前插 3	17 2月2日世界湿地日	前插 13
8 陕西泰普瑞电工技术有限公司	前插 4	18 西安高压电器研究院股份有限公司(认证中心)	前插 14
9 赛晶科技集团有限公司	前插 5	19 辽宁芯峻电气有限公司	前插 15
10 杭州精诚电力设备有限公司	前插 6	20 西安唯实输配电技术有限公司	前插 16