

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.03.013

空间管桁架在 ± 1 100 kV 户内直流场中的应用研究

杨雪平, 张肖峰, 韦文兵

(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: [目的]超高大跨度结构在电力行业应用越来越多,其结构选型对工艺适应性及安全经济性意义重大。[方法]通过 ± 1 100 kV 昌吉换流站直流场工程实例,介绍了超高大跨不规则特高压户内直流场结构选型过程。根据户内直流场工艺布置及荷载特点,详细阐述了该户内直流场采用空间管桁架结构方案技术优势、结构布置特点及工艺适应性,介绍该户内直流场结构整体计算及主要构件的设计计算结果,并同网架方案进行了技术经济对比分析,展望了空间管桁架结构在超高大跨度不规则电力建筑中的应用前景和注意事项。[结果]对比分析结果表明:空间管桁架结构为空间自稳定系统,结构安全性好,工艺适应性强,加工安装方便,造型美观简洁。[结论]对于超高大跨度电力建筑可以优先考虑选用空间管桁架结构方案。

关键词: ± 1 100 kV 换流站; 户内直流场; 空间管桁架; 超高大跨不规则电力建筑

中图分类号: TM756.2

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2018)03-0083-06

Research and Application on Space Tubular Truss in ± 1 100 kV Indoor DC Hall

YANG Xueping, ZHANG Xiaofeng, WEI Wenbing

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

Abstract: [Introduction] High big-span irregular structures are increasingly used in the power industry, and their structural selection is of great significance to process adaptability, structure safety and economy. [Method] Through ± 1 100 kV Changji DC Converter Station project, space tubular truss structure was introduced to be used in the indoor DC Hall structure design, which is a high big-span irregular electric structure. According to the electrical process layout and its loadings. This paper gave the process how to select the space tubular truss structural form, the structure characteristics and its technology advantages; the structure integral calculation and key component design calculation results were shown in the design; after comparing with the lattice grid structure form both in technical and economic aspect, prospects of using space tubular truss structure in high big-span irregular electric structures and its key matters in design was discussed. [Result] Analysis shows that the space tubular truss structure is a space self-stabilizing system with good structural safety, strong process adaptability, convenient processing and installation, simple and beautiful. [Conclusion] The space tubular truss structure will be a preferred choice for the design of high big-span irregular electric structures in the future.

Key words: ± 1 100 kV DC converter station; indoor DC hall; space tubular truss; steel truss beam; high big-span irregular electric structure

昌吉-古泉 ± 1 100 kV 特高压直流输电工程为世界上电压等级最高的直流输电工程,迄今尚未有

工程实施经验。对于 ± 1 100 kV 特高压换流站,空气间隙要求进一步提高,设备安全距离要求同样不断增加,由于空气间隙要求、环境条件影响及设备厂家的制造能力限制,直流场不好参照常规直流采用户外布置方案,而需要采用全户内布置。

± 1 100 kV 昌吉换流站位于新疆准东五彩湾地

收稿日期: 2017-08-02 修回日期: 2017-10-24

基金项目: 中国能建广东院科技项目“特高压户内直流场建筑结构
设计研究”(EX03611W)

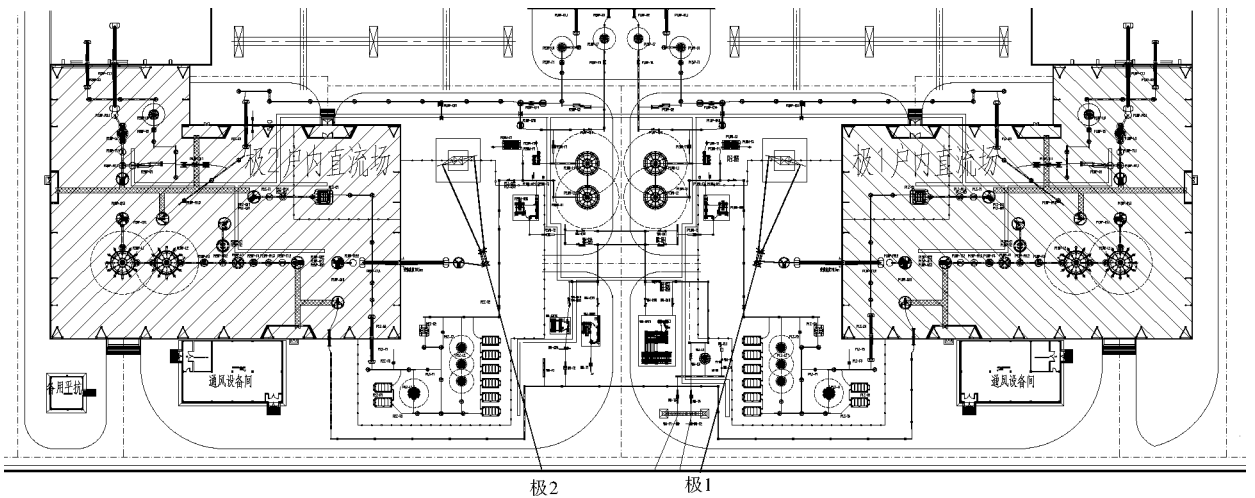


图1 户内直流场在换流站内平面位置示意图

Fig. 1 The position diagram of indoor DC hall in the converter station

区，户内直流场位于整个换流站站区的南侧，共两栋采用面对面布置，平面为L型，上部与换流站高端阀厅相邻，如图1所示。建筑物为单层大跨度工业厂房建筑，要求直流场内部空间无分隔。

单个户内直流场平面为不规则的L形，端部需抽柱，轴线尺寸为99 m×80 m，结构跨度分别为80 m和62.5 m，净空要求大于38 m，整个建筑物高度达到46 m，属于超大跨不规则空间结构，典型平面布置如图2所示。

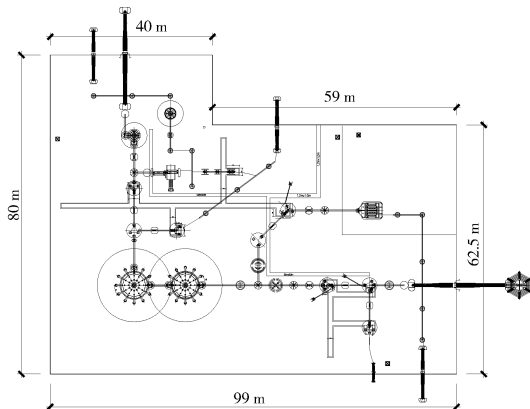


图2 户内直流场平面布置图

Fig. 2 Typical layout plan of indoor DC hall

建筑屋面和墙面均采用双层压型钢板，檩条采用高频焊接H型钢。该地区地震基本烈度为7度，设计基本地震加速度值为0.15 g；建筑场地类别II类；设计地震分组第一组；基本风压为0.73 kN/m²；基本雪压为0.63 kN/m²。

1 特高压直流户内直流场结构—三角形空间管桁架结构方案

1.1 特高压户内直流场工艺特点

由于直流场采用户外还是户内布置主要取决于两种因素：一是换流站的现场爬电距离或空气间隙；二是设备的制造能力。对于±1 100 kV特高压换流站，空气间隙大幅度增加，户外存在不均匀湿闪使间隙进一步增大，使设备高度达到18 m，设备的制造难度进一步加大，直流场极线设备受环境条件的影响日益增强，根据目前对设备极线设备厂家的设计制造能力调研分析，工艺需采用户内直流场的设计方案。户内直流场是将1 100 kV设备、直流滤波器高压电容器塔以及部分550 kV旁路设备装设于户内直流场。其它直流场设备布置均布置在户外。户内直流场可减小设备高度，降低设备制造难度，但需要增加建筑结构费用，还要加上空调、消防系统投资及长期的运行费用。

户内直流场建筑除了侧墙套管和屋架局部较小悬吊荷载外，基本没有其他的工艺荷载。影响户内直流场建筑的设计因素主要有以下三点：一是建筑平面尺寸主要由设备间距和空气净距决定；二是建筑净空高度主要由设备高度和空气净距决定；三是需要考虑到设备的安装检修所需汽车吊的运行路径和起吊净空要求，典型电气工艺断面如图3所示。

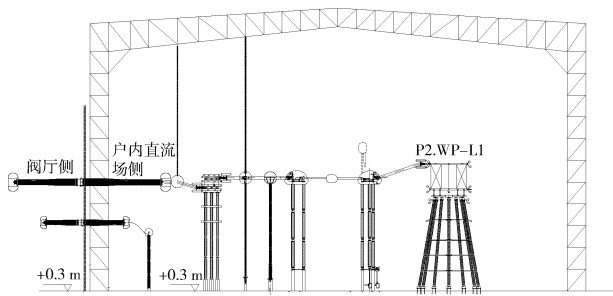


图3 户内直流场工艺断面图

Fig. 3 Electrical section of indoor DC hall

1.2 结构选型

根据户内直流场电气布置工艺要求, 户内直流场为平面不规则、超高跨度的单层厂房建筑, 设计控制荷载为风荷载和雪荷载。主要的设计重点在于屋架体系的选择, 适用大跨度的屋架体系有张弦梁、空间网架、空间管桁架等结构体系^[1-2]。张弦梁加工安装要求高, 影响建筑内净空; 网架结构用钢量最省, 屋架美观规整, 但对建筑物的平面要求尽量规则。由于户内场建筑的工艺要求, 平面不规则, 柱距不固定, 局部还需抽柱, 将导致网架的梁柱节点处理复杂, 且大跨度网架的安装难度高, 存在一定的风险; 空间管桁架可以形成自平衡体系, 适应跨度大, 造型美观, 节省建筑空间, 对平面的适应能力强。因此综合结构安全性、工艺适应性, 加工安装便易性以及总体经济性, 对 $\pm 110\text{ kV}$ 昌吉换流站的户内直流场选用空间管桁架体系^[3]。

空间管桁架可以采用四边形和三角形截面, 鉴于本工程的跨度和荷载属于正常水平, 从经济性出发, 采用变截面高度的倒三角形空间管桁架结构, 整体根据屋面排水要求进行起拱, 同时配合屋架体系, 对于钢柱也采用三角形空间管桁架结构, 山墙柱采用两肢平面桁架, 以便梁柱节点连接, 该结构体系由于各榀成独立的横向受力体系, 因此可以适用任何跨度和柱距, 抽柱位置采用转换梁进行处理。

整体结构沿高度方向设置平面桁架作为水平支撑, 山墙柱对应位置布置纵向次桁架, 在厂房端跨及中间跨位置共设置三道柱间支撑和屋架水平支撑提高整体刚度。整个厂房就形成了由主次桁架和支撑体系组成的空间管桁架结构体系, 如图4~图5所示。

1.3 结构计算

本结构的整体分析采用 MIDAS GEN 软件进

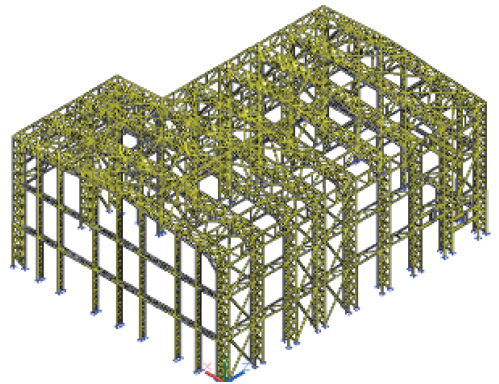


图4 户内直流场结构三维图

Fig. 4 Three-dimension model of indoor DC hall

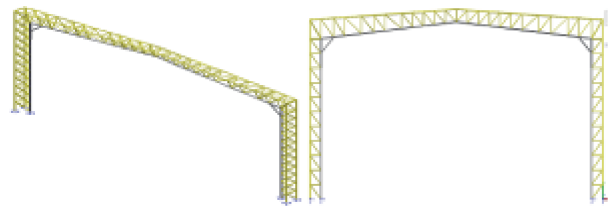


图5 户内直流场典型横向受力体系

Fig. 5 Transverse structural system of indoor DC hall

行, 立体桁架柱宽度均为 3 m , 高度均为 3 m ; 桁架梁宽度均为 3 m , 高度从 $4.5\text{ m} \sim 3\text{ m} \sim 4.5\text{ m}$ 渐变。内檐口最低净高 38.5 m 。屋面三角形桁架跨度为 62.5 m , 局部 80 m 。柱距为 11 m 、 12 m 和 13 m 不等。抗风柱采用平面桁架, 桁架高度 1.5 m 。

结构整体分析结果如下:

1.3.1 模态分析

采用多重 Ritz 向量法, 分别计算 30 个 X 向主周期、30 个 Y 向主周期和 150 个 Z 向主周期, 合计 210 个主周期, 计算后各向质量参与系数均大于 90%, 满足规范要求。其中第一扭转周期/第一平动周期 $= 0.758\ 3 / 0.975\ 6 = 0.777$ ^[4], 如表 1 所示。

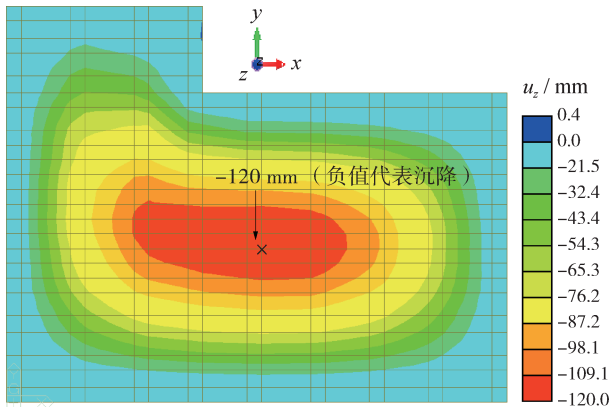
表1 自振周期表

Tab. 1 Structural vibration period

振型	周期/s	振型类别	周期比
第二振型	0.975 6	Y 方向平动	—
第三振型	0.851 7	X 方向平动	0.777 < 0.9
第四振型	0.758 3	扭转振型	—

1.3.2 屋盖挠度

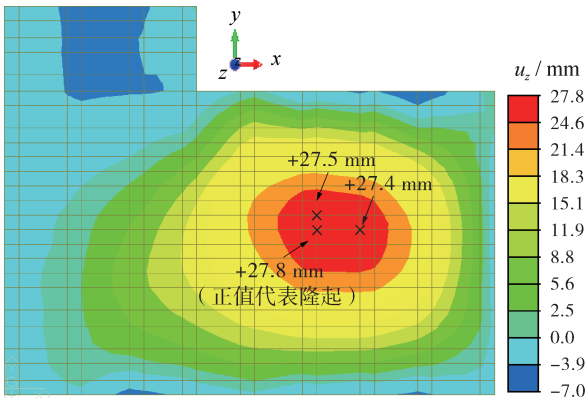
屋盖挠度云图如图6~图7所示。



注：最大值 -120 mm，跨度 62.5 m，挠跨比为 1/521。

图 6 D + L 下的变形

Fig. 6 Deflection under D + L load



注：最大值 27.8 mm，跨度 62.5 m，挠跨比为 1/2 248。

图 7 D + W 下的变形

Fig. 7 Deflection under D + W load

3) 柱顶位移

桁架柱顶侧向变形结果如表 2 所示。

表 2 桁架柱顶侧向变形汇总^[2]

Tab. 2 Truss column top lateral deformation

荷载与作用	柱顶侧向位移 u_{\max}/mm	$\frac{u_{\max}}{H}$	是否满足 $\leq 1/250$
WX	97.5	1/431	满足
WY	75.4	1/584	满足
EX	16	1/2 750	满足
EY	37	1/1 135	满足

4) 钢屋盖总体应力结果比率

钢屋盖总体应力结果比率如图 8 所示。柱脚采用外包式刚接柱脚，所有节点采用相贯焊缝，柱脚和相贯等节点设计均采用 MTStool 软件进行计算校核。挠度和位移均按照《空间网格结构技术规

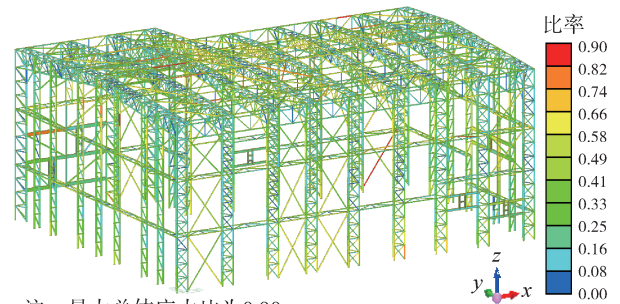


图 8 钢屋盖总体应力结果比率

Fig. 8 Stress result of steel roof

程》(JGJ—2010)相关规定进行控制，对于特殊局部位置，如套管支架等需要按照工艺变形要求进行控制。

2 空间管桁架方案与网架结构方案技术经济比较

由于户内直流场建筑净空要求 38 m 且为平面不规则结构，竖向受力体系已经超出钢筋混凝土柱的经济适用范围，需采用更为经济的钢桁架柱，结构选型主要在于屋架结构型式的选择，本文对户内直流场屋架分别采用空间管桁架和网架两种结构型式进行技术经济比较。在相同的设计输入和控制条件下，分别对两种方案进行计算和施工图设计，钢桁架柱由于受到侧墙电气套管对于结构变形的限制，两种方案的钢柱用钢量均较大，网架结构由于屋架与钢柱连接构造影响，钢柱用钢量比管桁架每平米多 10 kg，屋架用钢量比管桁架少 5 kg 左右，综合单价因素，管桁架方案每平米造价比网架方案高 5% 左右，如表 3 所示^[5]。

表 3 结构方案造价对比

Tab. 3 Different structure cost comparison

结构方案	钢柱及支撑/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	屋架/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	单价/ ($\text{元} \cdot \text{t}^{-1}$)	合计/ ($\text{元} \cdot \text{m}^{-2}$)	相对值/ %
管桁架方案	110	60	7 000	1 190	105
网架方案	120	55	6 500	1 137.5	100

除了经济对比，同时对管桁架结构和网架结构方案进行了详细地技术对比，如表 4 所示。主要对比要素为：结构安全性；户内直流场工艺的适用性；施工简易性；造价经济性等。对比结果表明管桁架结构体系在超高大跨度不规则户内直流场建筑中的优势明显。

表4 结构方案技术对比

Tab. 4 Different structure technique comparison

方案	管桁架方案	网架方案
安全性	在超高, 超大跨度单层建筑结构中应用较多, 技术成熟, 方案可行, 结构安全可靠。	在大跨度, 平面规则建筑中应用较多, 技术成熟, 方案可行, 结构安全可靠。
工艺适用性	管桁架每榀横向受力体系类似门式刚架, 跨度和柱距布置灵活, 利用转换梁可以实现局部抽柱; 屋架梁可以根据弯矩要求高度可调, 建筑内部净空较好, 且具备较好的屋架承载力, 可以承受一定的设备吊载。	网架网格布置规则, 要求平面尽量规整统一, 对于局部抽柱、柱距变化及跨度变化位置节点处理较为复杂; 大跨度网架的矢高较大, 建筑内部净空较差, 且屋架的承受吊重有限。
加工安装难易	管桁架梁柱根据运输吊装分段要求采用相贯焊缝工厂焊接, 现场可以类似平面钢屋架进行分榀吊装, 加工和吊装难度较小, 安装风险较小 ^[6] 。	网架结构需现场采用高空拼接或者地面拼装整体提升施工方法, 现场安装难度较大, 对于超高大跨结构而言, 现场存在一定的风险因素 ^[7] 。
经济性	造价比网架结构高5%左右。	造价稍低。

3 空间管桁架结构在超高、大跨及不规则电力建筑中的应用展望

3.1 未来超高, 大跨及不规则电力建筑特点^[8]

1) 户内配电装置主要特点是单层布置, 净空较高, 平面布置多样化, 存在侧墙支撑和屋顶悬吊设备。

2) 输变电电压等级越来越高, 受空气净距影响, 电力建筑平面尺寸和建筑净空高度将越来越高^[9]。

3) 由于穿墙设备的空气净距影响, 需要建筑立面局部抽柱, 开洞。

4) 侧墙支撑和屋顶悬吊设备对建筑变形位移要求较为严格。

5) 建设工期紧张: 电力工程由于电网运行的需要, 有时候由于前期规划和征地耗时较多, 真正施工工期都非常紧张, 因此设计方案对施工工期的考虑越来越重要。

3.2 管桁架结构适用情况

1) 空间管桁架结构属于自稳定桁架体系, 每榀桁架类似门式刚架, 可以适用不同的跨度和柱距, 利用转换梁结构, 可以实现局部抽柱工艺要求, 因此可以适用大跨度及平面不规则电力建筑, 如大跨度户内直流场, 柔性直流阀厅等。

2) 空间管桁架结构可以根据屋架及侧墙荷载情况采用倒三角截面或者四边形截面, 桁架柱和屋架采用刚性连接, 且可以根据弯矩情况, 对桁架高度进行变化处理, 可以适用于净空要求高, 荷载要求

大的电力建筑, 如高电压等级的直流场、GIS室及常规直流及柔性直流换流站阀厅等。

3) 空间管桁架结构采用相贯焊接, 较普通型钢结构大大减少了节点构造, 整体建筑简洁、轻盈、美观; 可以大大减少钢结构外表面积, 减少防腐及防火土层材料消耗, 同时所有构件基本是焊接连接, 可以大大减少钢结构接地工作量。

4) 空间管桁架结构采用钢管截面, 属于二力杆件, 理论上每根杆件可以独立设计截面, 有利于节省用钢量, 大部分构件采用工厂加工、现场拼接安装, 工期更短。

3.3 电力建筑中应用管桁架结构的注意事项

1) 空间管桁架结构适用于超高、大跨度及不规则建筑, 对于净空低和跨度较小的建筑需要与其它适用结构形式进行比较后采用。

2) 管桁架柱距选择时除满足工艺要求外, 还需要考虑围护结构设计需要。单位面积檩条用钢量受柱距影响较大, 对于大体量建筑来说, 檩条总用钢量较大, 因此要综合主体结构 and 围护结构总用钢量来选择经济合理的柱距。

3) 电力建筑中空间管桁架梁建议根据屋面找坡要求采用平屋面桁架, 不建议采用拱桁架。

4 结论

随着输变电电压等级升高, 电力技术更新, 环境要求增加, 电力建设中的超高, 大跨及不规则电力建筑越来越普遍, 以往采用的混凝土结构或型钢结构已不能完全适用于复杂多变的电力建筑要求, 依据 ± 1100 kV 户内直流场结构选型设计经验, 以

及本文的技术经济分析,空间管桁架结构具有受力可靠,工艺适应性强,加工安装便易,造价经济合理的优势,对于超高、大跨及不规则电力建筑中推荐采用该结构型式。

参考文献:

- [1] 王秀丽. 大跨度空间钢结构分析与概念设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 空间网格结构技术规程: JGJ 7—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社出版, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People Republic of China. Technical specification for space frame structures: JGJ 7—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [3] 齐煜, 刘伟, 曹延波, 等. 某大跨度空间管桁架结构设计及分析 [J]. 钢结构, 2016, 31(3): 66-68.
QI Y, LIU W, CAO Y B, et al. Structural design and analysis of a long-span spatial pipe truss [J]. Steel Construction, 2016, 31(3): 66-68.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社出版, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People Republic of China. Code for seismic design of building: GB 50011—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [5] 蒋宇. 空间结构的经济性比较与立体管桁架精细化有限元分析 [D]. 天津: 天津大学, 2014; 27-31.
JIANG Y. Economic comparison of space structures and refined finite element analysis of hss truss [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014; 27-31.

- [6] 雷鹏旭. 大跨度空间倒三角形管桁架施工技术研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2013; 2-4 +13-26.
LEI P X. Research on construction technique for large span space inverted triangular truss [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013; 2-4 +13-26.
- [7] 蔡俊. 大跨度钢网架结构整体提升施工关键技术应用研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2016; 3-10.
CAI J. Application research on key construction technology for integral lifting of large span steel truss structure [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016; 3-10.
- [8] 杨雪平, 张肖峰, 韦文兵. SRC 混合结构在大型风电场柔直户内换流站建筑中的应用 [J]. 南方能源建设, 2015, 2(3): 95-100.
YANG X P, ZHANG X F, WEI W B. Application of SRC hybrid structure in indoor substation of large wind farms transmission through VSC HVDC [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(3): 95-100.
- [9] 郭金川, 周敏, 孔志达, 等. 柔性直流换流站空气净距研究 [J]. 南方能源建设, 2015, 2(增刊1): 50-54.
GUO J C, ZHOU M, KONG Z D, et al. Study on air clearance of voltage source converter station [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(Supp. 1): 50-54.

作者简介:



YANG X P

杨雪平(通信作者)

1983-, 男, 江西九江人, 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司高级工程师, 同济大学结构工程硕士, 主要从事特高压输变电结构设计工作、海外输变电工程设计工作 (e-mail) yangxueping@gedi.com.cn.

(责任编辑: 李辉)



世界首个 ± 1100 kV 换流站户内直流场主钢结构