

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.04.015

特高压柔直换流站阀厅屋盖结构选型与优化

石晓

(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]特高压柔性直流阀厅屋盖跨度远超以往工程,传统采用的梯形钢屋架结构体系已无法适用。[方法]在无经验可供借鉴的情况下,文章结合特高压柔性直流换流站阀厅的工艺特点,对阀厅大跨度屋盖的结构设计进行了研究,确定了大跨度阀厅屋盖的合理结构形式,并从网架层数、网架高度、节点形式、网格形式方面入手,对柔性直流大跨度阀厅的网架屋盖进行了优化设计。[结果]研究表明:优化后的三层斜放四角锥网架屋盖有良好的结构性能和经济效益,是特高压柔性直流阀厅屋盖适宜采用的一种优良结构形式。[结论]优化后的网架屋盖结构形式可供类似工程借鉴。

关键词: 特高压柔性直流输电; 阀厅; 大跨度屋盖; 优化设计

中图分类号: TU393.3

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2018)04-0098-07

Structural Selection and Optimal Design of Long Span Roof for VSC-UHVDC Valve Hall

SHI Xiao

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

Abstract: [Introduction] In voltage sourced converter based ultra-high voltage direct current (VSC-UHVDC) converter station, the roof span of valve hall far exceeds the previous project, and the traditional trapezoidal steel truss structure is no longer applicable. [Method] In the absence of experience for reference, the structural design of long span roof was studied based on the characteristics of the VSC-UHVDC valve hall, and a reasonable structural type was confirmed. Starting from the number of grid layers, the height of grid, the form of joints and the form of grid, the optimal design of the long span space grid roof was carried out. [Results] The results show that the optimized three-layers diagonal square pyramid grids roof has good structural performance and economic benefits, and is an excellent structural form the long span roof of VSC-UHVDC valve hall. [Conclusion] The optimized structure of the grid roof can be used for reference by similar projects.

Key words: VSC-UHVDC; valve hall; long span roof; optimal design

柔性直流输电技术作为一种新型输电技术,近些年来在国内发展迅速,特别是最近几年已有数个高压和超高压柔性直流输电工程相继建设,但是在 ± 800 kV特高压柔性直流输电领域,至今尚无工程实例^[1]。而目前正在开展设计的 ± 800 kV乌东德直流输电工程,如采用柔性直流技术方案,将成为世界上电压等级最高的特高压柔性直流工程。由于

电压等级提高,特高压柔直阀厅屋盖跨度远超以往工程,传统采用的梯形钢屋架等屋盖体系已无法适用于特高压柔直阀厅。在无经验可供借鉴的情况下,本文依托乌东德直流输电工程,重点对特高压柔性直流阀厅屋盖的结构选型设计进行研究,为本工程及后续类似工程提供参考。

1 阀厅工艺布置及结构特点

和常规直流换流站一样,特高压柔性直流换流站阀厅也分高端阀厅和低端阀厅,两者工艺布置相似但高端阀厅建筑体量更大。鉴于篇幅限制,本文

收稿日期: 2017-11-16 修回日期: 2017-12-11

基金项目: 中国能建广东院科技项目“高压大容量柔性直流换流站设计关键技术研究”(EY04701W)

以设计难度相对较大的高端阀厅为例开展论述。

本工程高端阀厅的柔性直流工艺布置方案如图1所示, 阀厅内核心设备——柔性直流换流阀布置在阀厅中部, 由于重量过大, 换流阀采用地面支撑式, 此外阀厅内还布置有避雷器、隔离开关等其他设备。阀厅南侧外的联接变压器与阀厅之间设置钢筋混凝土防火墙, 北侧墙面上布置高压出线套管。阀厅的内部空间尺寸由电气设备外形尺寸、电气净距要求、设备检修维护空间、升降平台车运行空间等因素确定^[2], 综合考虑上述因素后, 高端阀厅柱内净平面尺寸为86.5 m×89.5 m, 屋盖下净空高度为38.5 m。由于带电距离要求, 阀厅内部不能设置立柱, 整个阀厅为一个单层超大跨度空间结构。

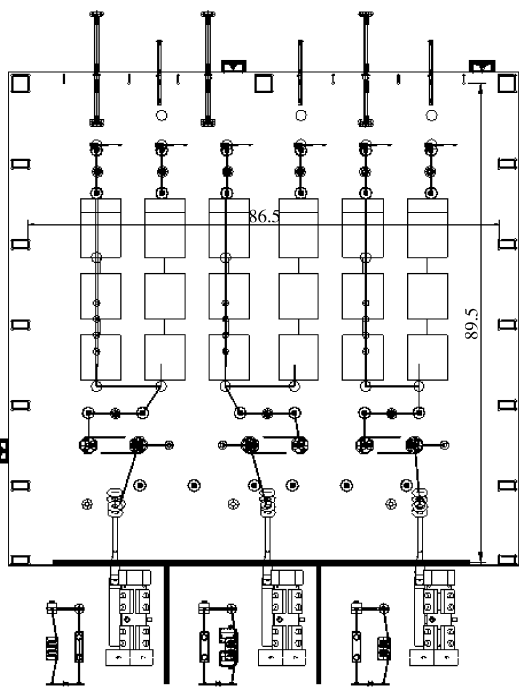


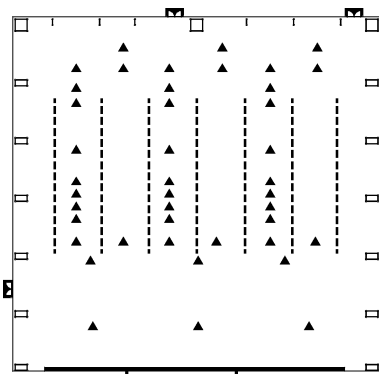
图1 高端阀厅电气平面布置图

Fig. 1 Electric arrangement of high-voltage valve hall

根据电气工艺布置方案, 特高压柔性直流阀厅结构特点如下:

- 1) 跨度大, 高度高。本工程高端阀厅屋盖跨度达到近90 m, 净空高度近40 m, 而以往工程中高端阀厅跨度通常在50 m以内, 净空高度在30 m以内, 特高压柔性直流阀厅平面尺寸和高度远超以往工程。随着阀厅跨度的显著增大, 屋盖结构选型是否合理就显得更加至关重要, 直接关系到整个换流站的安全性、可靠性和经济性。
- 2) 屋盖下悬吊设备和吊车。根据工艺布置要

求, 虽然重量最大的换流阀设备采用地面支撑式, 但屋盖下还是需要悬挂数量较多的避雷器、悬吊绝缘子等设备, 此外, 为便于后续运行过程中检修和更换阀组, 屋盖上还需设置7座5 t的单轨吊车, 如图2所示。这就要求屋盖结构下弦宜在同一平面内, 以便于电气设备和吊车的安装。



注: ---5 t单轨吊车; ▲—设备吊点。

图2 高端阀厅屋盖荷载布置图

Fig. 2 Loads distribution on roof of high-voltage valve hall

2 结构设计条件

2.1 结构安全等级

根据《高压直流换流站设计技术规定》(DL/T 5223—2005), 换流站阀厅结构安全等级为一级, 结构重要性系数1.1。

2.2 抗震设防类别

根据《电力设施抗震设计规范》(GB 50260—2013), ±330 kV及以上换流站阀厅为重点设防类(乙类)建筑^[3]。

2.3 抗震设防烈度

根据《中国地震动参数区划图》GB 18306—2015, 本工程站址在Ⅱ类场地条件下, 50年超越概率10%的地震动峰值加速度为0.05 g, 对应的地震基本烈度为Ⅵ度, 地震动反应谱特征周期均为0.35 s^[4]。

2.4 屋盖荷载

2.4.1 屋面附加恒载

附加恒荷载主要考虑屋面檩条、屋面板以及设备吊梁自重, 按照标准值为1.0 kN/m²的均布荷载考虑。

2.4.2 屋面活荷载

阀厅屋面按不上人屋面考虑,根据《±800 kV 直流换流站设计规范》(GB/T 50789—2012),不上人屋面活荷载标准值取 0.7 kN/m^2 ^[5]。

2.4.3 吊车及设备荷载

阀厅屋盖上的单轨吊车及悬挂设备荷载如图2所示。屋盖上设置7座单轨吊车,计算时考虑2座吊车同时运行。设备荷载按照集中荷载考虑,位置按实布置,每处吊点集中荷载标准值20 kN。

2.4.4 风荷载

根据《±800 kV 直流换流站设计规范》(GB/T 50789—2012),阀厅按100年一遇风压进行设计。本工程100年一遇基本风压取值 0.45 kN/m^2 ,相应风速为 26.8 m/s 。地面粗糙度类别为B类^[5]。

3 屋盖结构选型分析

平面梯形钢屋架具有传力清晰、承载力和竖向刚度大的优点,是以往直流换流站阀厅屋盖最多采用的一种屋盖形式,但对于本工程近90 m的跨度的阀厅屋盖而言,已远远超出平面梯形钢屋架的适用范围。对于这种大跨度结构屋盖,目前在工业建筑中最常采用的有网架结构和空间管桁架结构。

网架结构一般是以大致相同的格子或尺寸较小的单元(重复)组成的空间网格结构,通常将平板型的空间网格结构称为网架,将曲面型的空间网格结构简称为网壳。网架结构是一种空间网格结构体系,所有杆件均按照空间受力体系工作,传力途径简洁,具有重量轻、刚度大、整体性好、抗震性能强等优点。

管桁架结构与网架结构相比,省去了下弦纵向杆件和球节点,杆件间采用直接焊接的方式连接。最常见的空间管桁架是空间倒三角形管桁架,这种结构造型美观,线条流畅,安装方便,同时具有良好的自稳定性,还可满足各种不同建筑造型的要求,尤其是构筑圆拱和任意曲线形状比网架结构更有优势。

换流站阀厅作为工业建筑,对建筑外形并无特别要求,良好的空间受力性能和经济性,以及满足工艺需求是阀厅结构选型主要需要考虑的因素。

从空间受力性上来讲,网架结构类似板结构,空间整体性好,竖向荷载可沿双向、三向或者四向

传递,内力分布较为均匀。而管桁架的空间受力本质上是梁受力体系,屋面竖向荷载集中在桁架梁上,杆件内力分布较为集中,在相同结构高度和荷载的情况下,管桁架弦杆及腹杆的截面规格要比网架大的多。

从用钢量方面来讲,用钢量受较多因素影响,如边界条件、建筑平面尺寸等,但一般而言,对于建筑长宽比较大的建筑,类似于单向板受力体系,采用于空间桁架结构较为经济,而建筑长宽比较小的建筑,类似于双向板采,用多向传力的均匀的网架结构更为经济,本工程阀厅长宽比接近1,显然更适合采用网架结构体系。

从屋盖结构功能出发,本工程阀厅大跨度屋盖不仅是空间上的围闭结构,也是单轨吊车及电气设备的承载结构,这就要求屋盖结构必须具备较大的竖向承载力和刚度,网架结构整体性好,内力分布均匀,结构整体刚度较大,而管桁架内力分布较为集中,相同结构高度的情况下刚度比网架要小。

经过上述分析可知,对于本工程建筑长宽比接近1的阀厅而言,网架结构体系在空间受力性能、用钢量、结构整体性及刚度方面更优,因此本工程阀厅屋盖确定采用网架结构体系。

4 网架屋盖优化设计

网架结构可分交叉桁架体系和角锥体系两大类。对于平面形状为矩形且跨度超过60 m以上的大跨度屋盖,通常多采用刚度较大且受力均匀的正方四角锥和斜放四角锥网架^[6]。高端阀厅柱内净空尺寸为 $86.5 \text{ m} \times 89.5 \text{ m}$,考虑格构柱本体尺寸后,网架平面尺寸初步按照 $90 \text{ m} \times 90 \text{ m}$ 考虑;阀厅内部不设置竖向支撑结构,网架为周边支撑形式。

4.1 节点形式选择

网架球节点主要分为焊接空心球连接和螺栓球连接,如图3、图4所示。

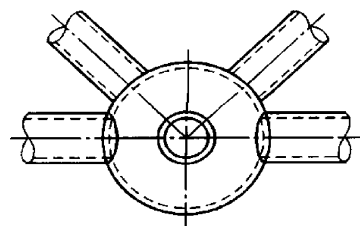


图3 焊接空心球节点

Fig. 3 Welded hollow spherical joints

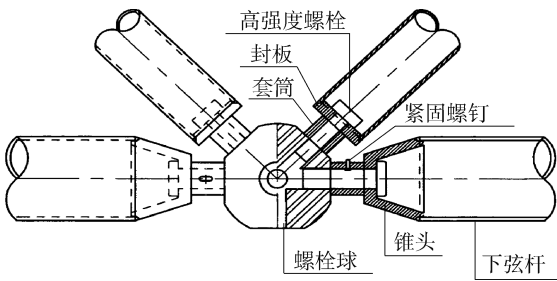


图4 螺栓球节点

Fig. 4 Bolt-sphere joints

焊接空心球节点的优点是构造和制造均较简单, 球体外形美观具万向性, 节点制作费较低; 缺点是节点与钢管交界处应力集中, 且焊接球节点均在现场焊接, 需要非常大的焊接工作量, 安装工期久, 且在多数情况下, 大型工件焊接时不能翻身, 对焊接要求高且难度大, 焊接质量不宜控制。

当节点处连接杆件轴力均小于 1 MN, 且满足构造要求的球节点直径不大于 300 mm 时, 可采用螺栓球节点^[7]。螺栓球节点优点是制作精度由工厂保证, 现场转配快捷工期短, 拆装方便; 缺点是制作费用比焊接球节点高; 此外结合面处需进行密封防腐处理, 特别在南方地区应重视防腐。

焊接空心球节点和螺栓球节点各有优劣, 总体而言, 焊接球节点适应性好, 承载力高, 而螺栓球节点现场焊接工作量少, 施工速度快。柔性直流换流站中通常有高、低端阀厅共 4 座, 若全采用焊接空心球节点, 则焊接安装工作量非常大, 相比之下螺栓球节点在缩短工期方面具有明显优势。为节约工期, 本工程网架节点优先采用螺栓球节点, 仅当个别部位杆件内力过大或螺栓球构造不满足要求时, 才采用焊接空心球节点。

4.2 网架高度及形式优化

网架高度是网架选型的关键点之一。平板型网架的力学模型可等效成一块考虑剪切变形的夹层板, 为了保证必要的刚度, 网架的高度随跨度 L 的增加而增大, 网架高度既是控制网架变形的主要因素, 同时也影响着网架杆件内力的大小, 相应也影响着网架节点形式的选取。一般来说网架高度越高, 网架刚度就越大, 杆件受力越小, 但是并非越高越好, 网架高度太高一方面会增加施工安装的难度, 另一方面由于杆件长细比增加导致杆件截面加大, 最终反而可能导致网架用钢量增加。因此合理

的网架高度应该是在满足承载力和变形要求的前提下, 尽量减小网架杆件数量和用钢量, 通常采用试算法来确定合理的网架高度。

根据《空间网格结构设计技术规程》(JGJ 7—2010), 一般平板网架的高度取其跨度的 $1/10 \sim 1/18$ 。由于本工程阀厅跨度达到 90 m 且悬挂较大荷载, 如采用常规的双层网架, 则杆件长度基本都在 7~9 m 之间。网架的轴力杆中, 压杆的长细比起控制作用, 杆件截面会很大, 相应的也会导致球节点直径加大, 用钢量会增加, 因此本工程网架考虑采用三层网架, 可将腹杆长度减小一半, 相应也减小了杆件截面和球节点大小^[8]。

考虑到正方四角锥和斜放四角锥两种布置形式受力特性不同, 杆件内力传递与分布存在差异, 因此需对这两种网格形式均进行试算, 在相同边界条件下按照不同网架高度和网格尺寸, 分别计算两种网格形式的杆件内力、跨中挠度和用钢量, 最终对比确定最为合理的网架形式。

4.3 试算比较

正方四角锥和斜放四角锥三层网架均由上弦杆、中弦杆、下弦杆以及上腹杆和下腹杆组成。由于屋面跨度太大, 屋面排水如采用小立柱找坡, 小立柱高度会超过 2 m, 很容易失稳, 故考虑采用网架变高度找坡, 上弦和中弦间变高度, 中弦和下弦间等高度。网架支座设置在中弦层上, 支座沿四周均匀布置。试算时荷载考虑阀厅屋面附加恒荷载、屋面活荷载、设备吊点以及吊车荷载。计算模型和计算结果分别如图 5、图 6 和表 1、表 2 所示。

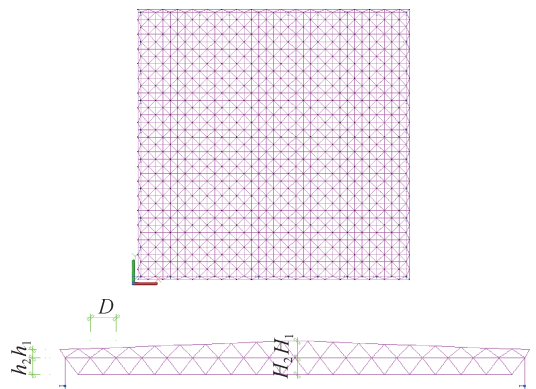


图5 正放四角锥三层网架

Fig. 5 Orthogonal pyramid three layer space girder

注: D —网格宽度; H_1 —网架跨中上层高度; H_2 —网架跨中下层高度; h_1 —网架端部上层高度; h_2 —网架端部下层高度。

表1 正方四角锥三层网架计算结果表

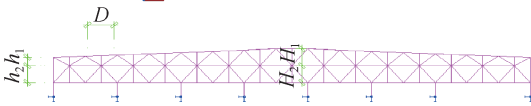
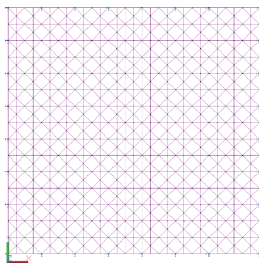
Tab. 1 Calculation results of orthogonal pyramid three layer space gird

网格尺寸/m	网架高度/m		最大挠度 (D+L) /mm	最大内力/kN			螺栓球 节点 数量/个	焊接球 节点 数量/个	总用 钢量/t
	跨中 H_1+H_2	端部 h_1+h_2		上层最大 内力	中层最大 内力	下层最大 内力			
5×5	3.6+3.6	1.8+3.6	248.8	-2 042.6	-112.8	2 065.2	923	162	457.7
5×5	3.8+3.8	2.0+3.8	227.4	-1 902.7	-113.9	1 958.6	955	130	459.9
5×5	4.0+4.0	2.2+4.0	213.3	-1 674.5	-77.9	1 623.9	977	108	455.8
5×5	4.25+4.25	2.45+4.25	199.8	-1 587.9	-69.0	1 477.6	976	109	454.5

表2 斜方四角锥三层网架计算结果表

Tab. 2 Calculation results of diagonal pyramid three layer space gird

网格尺寸/m	网架高度/m		最大挠度 (D+L) /mm	最大内力/kN			螺栓球 节点 数量/个	焊接球 节点 数量/个	总用 钢量/t
	跨中 H_1+H_2	端部 h_1+h_2		上层最大 内力	中层最大 内力	下层最大 内力			
6×6	3.6+2.8	1.8+2.8	235.9	-1 228.9	656.5	1 273.8	1 163	39	457.1
6×6	3.6+3.2	1.8+3.2	216.4	-1 091.7	550.4	1 055.2	1 172	30	455.7
6×6	3.6+3.6	1.8+3.6	201.6	-1 008.3	541.4	1 137.1	1 180	22	446.8
6×6	4.0+3.6	2.2+3.6	189.2	-965.4	552.3	1 048.8	1 190	12	439.6



注: D - 网格宽度; H_1 - 网架跨中上层高度; H_2 - 网架跨中下层高度; h_1 - 网架端部上层高度; h_2 - 网架端部下层高度。

图6 斜放四角锥三层网架

Fig. 6 Diagonal pyramid three layer space gird

4.4 试算结果分析

通过对比表1和表2可以看出:

1) 斜放四角锥三层网架比正放四角锥三层网架刚度大, 在相同的荷载及支撑条件下, 斜放四角锥三层网架跨中挠度较小。阀厅屋盖挠度按照1/400控制, 跨中最大挠度允许值为225 mm, 在不考虑预起拱的情况下, 正放四角锥网架要8 m高才能满足挠度要求, 斜放四角锥网架高度大于6.8 m时即可满足挠度要求。

2) 斜放四角锥三层网架受力较为均匀, 跨中弦杆内力相对较小, 弦杆最大内力出现在对角线及靠近支座位置, 相应的焊接球节点主要分布在对角线

及支座附近; 而正放四角锥网架跨中弦杆受力较大, 螺栓球节点主要集中在跨中。

3) 相同网架高度下, 斜放四角锥三层网架焊接球节点较少, 在跨中高度7.6 m时, 采用斜放四角锥网架仅有12个焊接球节点, 而同样高度下, 正放四角锥网架要130个焊接球节点。

4) 随着网架高度增加, 网架用钢量变化不大, 且正放四角锥网架和斜放四角锥网架用钢量也基本相同, 说明在一定范围内增加网架高度并不能显著节省用钢量。

5) 综合而言, 斜放四角锥受力更为合理, 刚度较大, 并且焊接球节点数量较少, 因此本工程阀厅屋盖采用斜放四角锥三层网架。

5 屋盖整体计算

5.1 整体模型建模

采用选定的三层斜放四角锥网架进行整体模型计算。阀厅屋盖平面尺寸90 m×90 m, 考虑到试算过程中网架边界条件较为理想, 且未考虑温度、地震等作用, 因此实际选用的斜放四角锥三层网架高度按照跨中4 m+3.5 m=7.5 m, 端部2.2 m+3.5 m=5.7 m考虑, 网架支座设置在下弦平面, 下弦标高39.7 m。

阀厅东西两侧采用四肢钢管格构柱, 柱距11.25 m, 柱顶设置网架支座, 格构柱四肢中心距

1.2 m × 2.5 m。直流场侧由于套管电气距离要求，只能采用双肢格构柱，双肢间距 1.5 m。双肢格构柱柱顶设置矩形刚性托梁，在托梁上设置网架支座。

钢柱从下到上设置 4 道水平刚性杆件，水平系杆采用平面桁架，两端与钢柱铰接。在东、西侧钢柱中间部位设置两道 X 型交叉支撑，柱间支撑采用平面桁架，两端与钢柱铰接。

网架与防火墙、直流场侧托梁的连接采用板式橡胶支座，与东西侧钢柱柱顶连接采用普通平板支座。阀厅整体模型如图 7 所示。

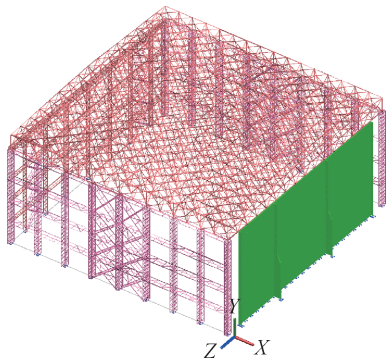


图 7 高端阀厅计算模型

Fig. 7 Calculation model of high-voltage valve hall

构件约束及边界条件：网架结构均采用热轧无缝钢管，各杆件之间全部铰接。网架与东西侧钢柱采用铰接连接。钢柱间刚性系杆，交叉支撑均与钢柱铰接。桁架柱支管底部按照刚接考虑。

网架与防火墙、直流场侧支座采用板式橡胶支座，橡胶支座尺寸选为 400 mm × 400 mm × 49 mm，橡胶支座水平刚度 3.278 kN/mm，竖向刚度 1 913.8 kN/mm，竖向承载力约 1.521 MN。

整体模型采用整体有限元软件计算分析。

5.2 整体计算结果

高端阀厅整体模型计算结果如表 3 所示，其中网架屋盖的内力、挠度及前三阶振型及周期如图 8 ~ 图 11 所示。

表 3 阀厅计算结果表

Tab. 3 Calculation results of valve hall

计算参数	计算结果	备注
网架高跨比	1/12	建议值：1/10 ~ 1/18
杆件最小夹角/(°)	38.19	不宜小于 30°
跨中挠度(D+L)/mm	220	限值 225 mm

计算参数	计算结果	备注	
水平位移/mm	WX	48	限值按 160 mm
	WY	51	
	EX	22	
	EY	45	
杆件最大规格	上层弦杆	D180 × 12	Q345
	中层弦杆	D140 × 10	Q345
	下层弦杆	D159 × 12	Q345
节点数量/个	螺栓球	1 348	—
	焊接球	14	—
屋盖用钢量/t	465.2	单位用钢量：57 kg/m ²	

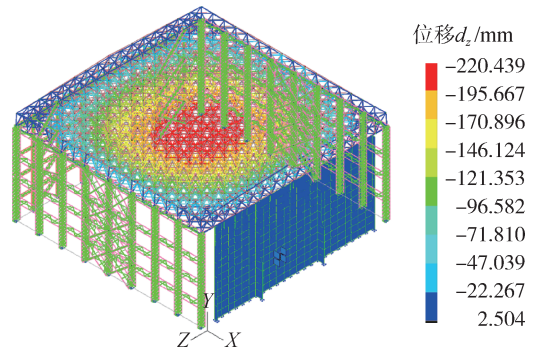


图 8 挠度图

Fig. 8 Deflection figure

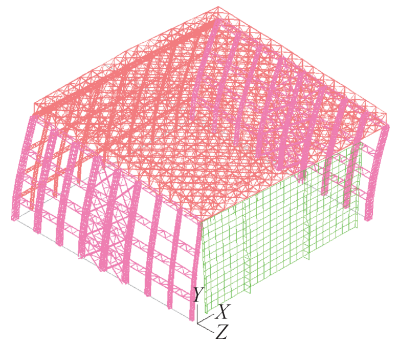


图 9 第一振型 T₁ = 1.720 s

Fig. 9 The first modal T₁ = 1.720 s

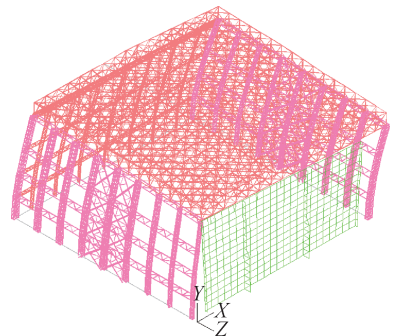


图 10 第二振型 T₂ = 0.804 s

Fig. 10 The second modal T₂ = 0.804 s

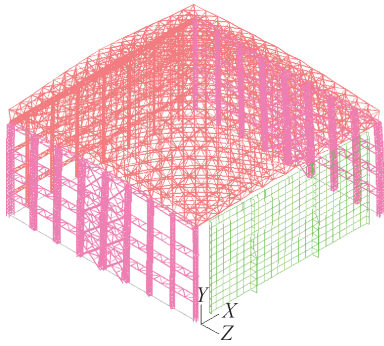


图 11 第三振型 $T_3 = 0.714$ s

Fig. 10 The third modal $T_3 = 0.714$ s

6 结论

依托乌东德直流输电工程, 本文对特高压柔性直流阀厅屋盖进行了结构选型与优化设计, 得到以下结论和建议:

1) 根据柔性直流大跨度阀厅的特点, 通过对网架结构体系和管桁架体系的特性进行对比可知, 网架结构体系在空间受力性能、用钢量、结构整体性及刚度方面较管桁架体系更优。

2) 对于跨度达 90 m 的柔直阀厅屋盖, 采用双层网架杆件长细比较大, 采用三层网架可减小杆件计算长度, 相应可减小杆件截面尺寸和球节点大小, 节约用钢量的同时还可降低施工难度。网架采用优先采用螺栓球节点, 仅在内力较大或构造不满足时采用焊接球节点, 能够节约工期和降低现场施工难度。

3) 试算结果表明, 在同等高度情况下, 斜放四角锥网架受力性能和刚度优于正方四角网架, 并且焊接球节点数量较少, 因此本工程阀厅屋盖采用斜放四角锥三层网架。整体模型计算表明, 优化设计后的网架屋盖用钢量仅为 57 kg/m^2 , 具有良好的经济性。

参考文献:

[1] 吴博, 李慧敏, 别睿. 多端柔性直流输电的发展现状及研究展望 [J]. 现代电力, 2015, 32(2): 9-15.

WU B, LI H M, BIE R. Current development and research prospect of VSC-MTDC [J]. Modern Electric Power, 2015, 32(2): 9-15.

[2] 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): 51-55.

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): 51-55.

[3] 中华人民共和国住房和城乡建设部 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 电力设施抗震设计规范: GB 50260—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.

[4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 中国国家标准化管理委员会. 中国地震动参数区划图: GB 18306—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.

[5] 中华人民共和国住房和城乡建设部 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. $\pm 800 \text{ kV}$ 直流换流站设计规范: GB/T 50789—2012[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.

[6] 中国建筑标准设计研究院. 钢网架结构设计: 07SG531[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.

[7] 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, 2011.

[8] 王丽娜, 陈刚, 杨先奎. 大跨度三层与双层新型组合式平板网架结构 [J]. 贵州工业大学学报(自然科学版), 2002, 31(3): 86-89.

WANG L N, CHEN G, YANG X K. Long span structure with three and two layer of lattice plates [J]. Journal of Guizhou University of Technology (Natural Science Edition), 2002, 31(3): 86-89.

作者简介:



SHI X

石晓(通信作者)

1986-, 男, 甘肃天水人, 工程师, 硕士, 主要从事变电站、换流站结构设计工作 (e-mail) shixiao@gedi.com.cn。

(责任编辑 高春萌)