

换流站升级改造工程阀厅结构分析计算研究

周耀俊¹ 徐晓明¹ 柏强¹ 陈佳¹ 万军¹ 郑孝清²

1. 国网上海市电力公司超高压分公司 上海 200063

2. 中国电力工程顾问集团华东电力设计院有限公司 上海 200333

摘 要:我国较早的换流站阀厅主要建造于1980年代,其结构多数由外国公司设计,主要为单层钢框架-支撑结构。随着社会发展,换流站急需升级改造以应对猛增的电力需求。由于阀厅结构多数是由外国公司按照当时的外国标准进行设计,其结构设计理念和标准与我国存在差异。换流站升级改造工程中,按照常规的结构分析计算方法,阀厅结构将产生巨大的加固量,对工期、经济性以及施工难度等方面,均产生较大影响。本文以葛洲坝-南桥直流输电工程南桥换流站阀厅结构改造项目为例,通过精细化的结构分析和计算,合理降低结构加固量,对后续其他同类改造工程具有重要的参考价值和指导意义。

关键词: 换流站阀厅; 升级改造; 结构分析; 计算长度系数; 屋面传力体系

1 引言

葛洲坝-南桥直流输电工程是我国第一条 $\pm 500\text{KV}$ 直流输电工程,工程于1982年规划、1985年开工建设、1990年双极建成投产,位于上海奉贤区的南桥换流站是葛-南直流工程的受端站,是华东地区第一座 $\pm 500\text{KV}$ 换流站。

目前,我国已建的 $\pm 500\text{kV}$ 换流站阀厅、控制楼、户内直流场等换流建筑物基本上都是由国外设备厂商设计供货^[1]。南桥换流站由德国设计公司BROWN BOVERI CONSORTIUM Siemens AG设计,运营至今34年,亟需通过技术改造和设备升级解决部分设备老化严重和运行不稳定等问题。本次改造工程主要涉及站内两座阀厅的设备升级,同时对阀厅主体结构进行了整体加固改造。

南桥换流站升级改造工程是国内首次开展阀厅结构的大型加固改造工程,在本工程之前可供借鉴和参考的类似工程经验和资料非常少。阀厅结构于1980年代由德国人设计,其结构设计理念不同于现代的门式刚架厂房,如果按照门式刚架结构采用目前常规的结构分析计算方法,将产生巨大的加固量。本文在对南桥换流站阀厅钢柱计算长度、屋面传力体系以及柱间支撑形式等方面深入分析基础上,进行更加精细化的分析计算,与常规计算方法对比,大大降低了加固量,本文结构分析计算方法对后续其他同类改造工程具有重要的参考价值和指导意义。

2 结构分析计算

2.1 阀厅结构形式

极1和极2阀厅的建筑布局、使用功能等完全相同,上部结构均为钢框架-支撑结构房屋,屋面为单坡屋面,单体建筑南北向总长为41.24m,东西向总宽为20.50m,

层高在21.10mm~22.855m之间。

两阀厅均设有3组阀塔设备, 每组设备均通过阀门梁、4根钢吊杆和阀吊钢平台组成的阀吊系统悬吊于屋面钢桁架梁下方, 阀门梁顶面标为21.100~22.855m。图1为阀厅典型刚架示意图。

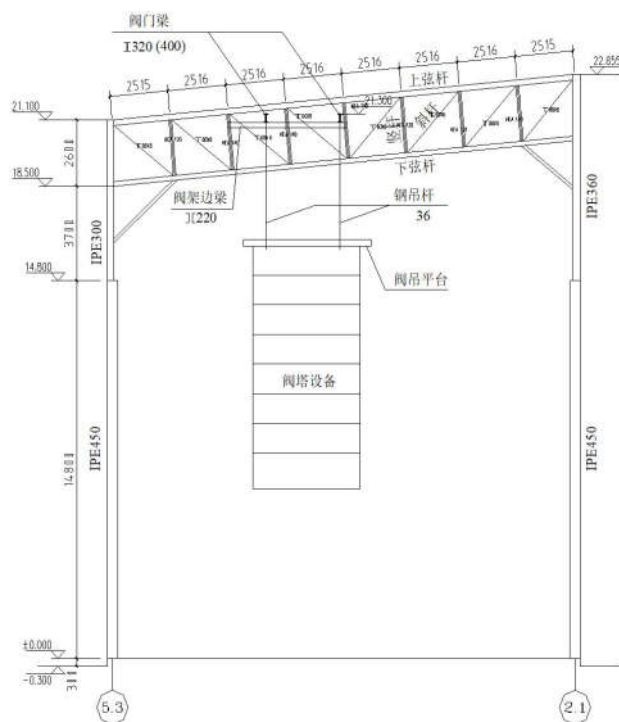


图1 阀厅刚架示意图

2.2 荷载（作用）取值

本次改造工程对每个阀厅各更换3组阀塔设备、1组四重阀避雷器和一组穿墙套管，每组阀塔设备重约为35t、每组四重阀避雷器重约为1.6t、直流穿墙套管重约为

2.6t。另相应更换或增加水管、风管等辅助设施，考虑相应荷载。荷载（作用）取值详见表1。

表1 荷载取值

荷载（作用）类型	荷载（作用）取值及布置方式
恒荷载	屋面板为压型钢板夹芯板轻钢屋面，总厚约175mm，取 0.40kN/m^2 ；屋面暖电设备附加荷载取 0.3kN/m^2 ，合计取值 0.7kN/m^2 ；围护墙主要为压型钢板夹芯板 0.3kN/m^2
活荷载	屋面活荷载按不上人屋面取 0.7kN/m^2 ；设备荷载根据设备总量（每组阀塔设备重约为35t、每组四重阀避雷器重约为1.6t、直流穿墙套管重约为2.6t）按集中荷载施加在吊挂位置（阀塔设备本身无振动，不考动力系数）；检修荷载取 2.0kN/m^2 布置于巡检走道区域
风荷载	上海地区50年一遇基本风压 0.55kN/m^2 、C类
雪荷载	50年一遇基本雪压 0.20kN/m^2 ，与不上人活荷载不同时组合
地震作用	7度（ $0.1g$ ），地震放大系数0.8（按后续使用年限30年考虑），结构阻尼比0.04

2.3 刚架柱计算长度的分析与确定

2.3.1 刚架柱的支撑条件

刚架柱为分上、下两段的阶形柱（图1），下段柱典型截面尺寸为欧标H型钢IPE450（ $450\text{mm}\times190\text{mm}\times9.4\text{mm}\times14.6\text{mm}$ ），柱高14800mm；上段柱典型截面尺寸为IPE300（ $300\text{mm}\times150\text{mm}\times7.1\text{mm}\times10.7\text{mm}$ ）和IPE360（ $360\text{mm}\times170\text{mm}\times8.0\text{mm}\times12.7\text{mm}$ ），柱高为6.300m和8.055m。

上段柱、下段柱之间采用焊接连接，按刚接节点考虑；下段柱柱脚通过连接板和地脚螺栓与混凝土基础顶锚固，按铰接考虑；上段柱与屋面桁架梁的上下弦杆件和斜撑，通过螺栓连接，连接节点按铰接考虑。按照以上连接形式的分析，刚架的计算简图如图2所示。

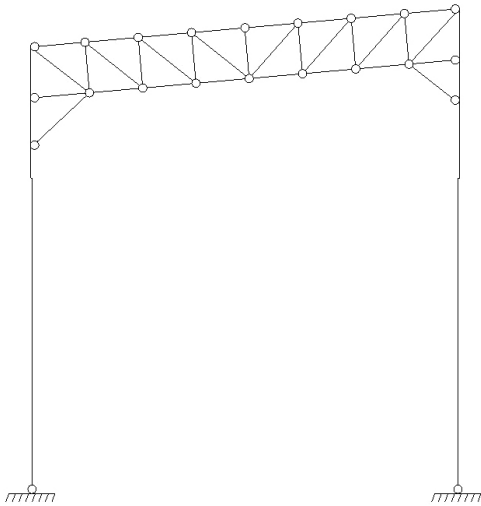


图2 刚架计算简图

其中，上段柱与屋面桁架梁之间有三根杆件通过铰接连接，使得在计算钢柱时，上段柱上端部既不是铰接、也不是刚接，而是“半刚性”连接。

根据现行标准《钢结构设计标准》（GB 50017-2017）8.3.3节相关规定^[2]，按照铰接连接或者刚性连接计算刚架柱的计算长度系数均不能准确反映钢柱的实际受

力形式，图2所示计算简图的刚架柱，其计算长度系数也无法直接根据规范计算得到。

2.3.2 通过屈曲分析确定柱的计算长度系数

通过建立刚架实际计算模型，定义节点连接形式，施加指定荷载，通过屈曲分析计算柱的计算长度系数。具体步骤如下：

（1）建立有限元计算模型。按实际尺寸建立模型，按图2计算简图定义节点连接形式，借助结构设计有限元分析软件建立计算模型（图3）。

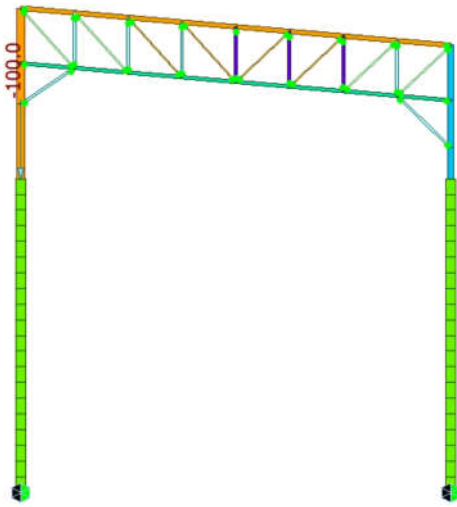


图3 刚架计算模型（MIDAS）

（2）指定计算荷载。在各段柱的柱顶施加指定荷载 P （本项目施加竖向力100N）。

（3）计算得到临界荷载系数 η 。

（4）根据临界荷载系数计算临界荷载 P_{cr} 。

$$P_{cr} = P \cdot \eta$$

（5）根据欧拉公式计算柱计算长度系数 μ_x 。 μ_x 为刚架平面内方向（钢柱强轴方向）的计算长度系数；刚架平面外方向（钢柱弱轴方向）的计算长度系数 μ_y ，考虑到钢柱位于纵墙内，且纵向设有柱间支撑，柱弱轴长度可取侧向支撑点高度， $\mu_y = 1.0$ 。

$$\mu_x = \frac{\pi}{L} \sqrt{\frac{EI}{P_{cr}}}$$

根据以上方法，分别计算得到各柱刚架平面内的计算长度系数取值如下表2。

表2 各柱计算长度系数取值

柱位置		η	P_{cr} (N)	计算长度系数	
				μ_x	μ_y
高柱 (图1中2.1轴)	下段柱	6.672×10^3	$6.6.672 \times 10^5$	2.11	1.0
	上段柱	6.470×10^3	6.470×10^5	3.34	1.0
低柱 (图1中5.3轴)	下段柱	6.129×10^3	6.129×10^5	2.21	1.0
	上段柱	6.021×10^3	6.021×10^5	3.36	1.0

2.4 屋面檩条的支撑作用

阀厅屋面檩条型号主要为IPE200 (200mm×100mm×5.6mm×8.5mm)，檩条之间设有拉条，钢桁架梁上弦之间设有交叉支撑(图4)，主要为等边角钢L140×13、L120×10、L80×8。

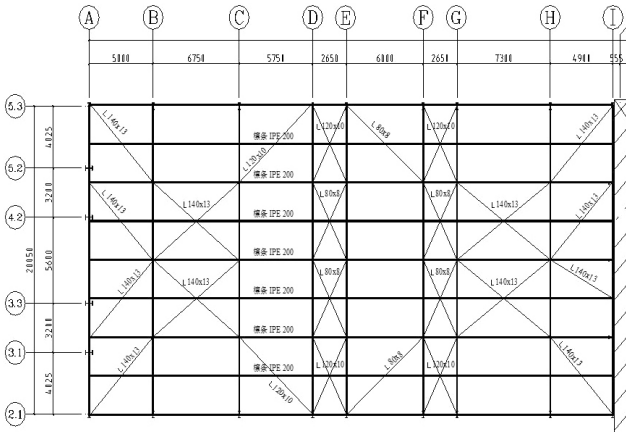


图4 阀厅结构屋面檩条及支撑系统平面布置图

现行规范的门式刚架钢结构轻型房屋，在结构分析计算时，一般不考虑屋面檩条对于整体结构承载能力的贡献。对于阀厅，在进行结构分析计算中，按不考虑考虑屋面檩条(方案一)和考虑屋面檩条(方案二)，两种情况分别建立计算模型，除因檩条建模屋面荷载取值不同外(方案一：屋面檩条不建入计算模型中，屋面恒荷载标准值取0.7kN/m²；方案二：屋面檩条建入计算模型中，屋面恒荷载标准值取0.5kN/m²)，其他计算参数均相同。

对计算结果进行对比发现，考虑屋面檩条整体计

算，对阀厅结构承载力的提升有显著作用(见第3章计算结构对比)，分析原因，主要为：阀厅结构的屋面檩条设置较密，檩条构件的尺寸较大，檩条端部通过“搁板”、螺栓与各榀刚架的上弦杆连接，具有较强的支撑作用，另外，实际屋面结构中设有多道交叉支撑，檩条和交叉支撑的设置使得整个屋面结构具备了良好的整体性，不能粗糙地忽略檩条和交叉支撑对整体受力的贡献。

2.5 计算模型的建立

本次结构计算分析以北京盈建科软件股份有限公司开发的YJK结构计算分析软件为主，同时采用中国建筑科学研究院开发的PKPM计算软件的框排架模块对阀厅结构计算内力进行复核算。

计算模型按照两种方案建立：

方案一：屋面檩条不建入计算模型中，屋面恒荷载标准值取0.7kN/m²；

方案二：屋面檩条建入计算模型中，屋面恒荷载标准值取0.5kN/m²。

计算模型中刚架柱的计算长度系数均按2.3.2节的计算结果取值。其他参数取值均相同。

3 结构计算结果的对比

对两种计算方案的计算结果进行对比分析，对比结果表明：

(1) 钢柱的正截面应力比以及稳定应力比等，方案二的计算结果较方案一均有所降低，整体降低10%，表3列举了两种计算方案结构相同部位的钢柱计算结果；

表3 极1(极2) 阀厅钢柱计算结果对比表

钢柱位置		正截面强度验算应力比		稳定应力比			
		方案一	方案二	平面内		平面外	
				方案一	方案二	方案一	方案二
2.1/A轴	上柱	0.49	0.45	0.42	0.38	0.41	0.38
	下柱	0.50	0.46	0.46	0.41	0.60	0.55
2.1/B轴	上柱	3.09	2.81	2.66	2.42	7.76	7.05
	下柱	1.67	1.54	1.70	1.53	2.65	2.41

续表:

钢柱位置		正截面强度验算应力比		稳定应力比			
		方案一	方案二	平面内		平面外	
				方案一	方案二	方案一	方案二
2.1/C轴	上柱	3.18	2.89	2.75	2.50	8.17	7.42
	下柱	1.73	1.57	1.81	1.63	2.75	2.50
2.1/D轴	上柱	2.28	2.07	1.97	1.79	5.90	5.36
	下柱	1.25	1.14	1.34	1.21	2.03	1.84
2.1/E轴	上柱	2.28	2.07	1.97	1.79	5.91	5.37
	下柱	1.25	1.14	1.34	1.21	2.03	1.84
2.1/F轴	上柱	2.28	2.07	1.97	1.79	5.91	5.37
	下柱	1.25	1.14	1.34	1.21	2.03	1.84
2.1/G轴	上柱	2.61	2.37	2.26	2.05	6.78	6.16
	下柱	1.43	1.30	1.57	1.41	2.33	2.12
2.1/H轴	上柱	3.15	2.86	2.72	2.47	8.04	7.31
	下柱	1.73	1.57	1.83	1.65	2.75	2.50
2.1/I轴	上柱	0.49	0.45	0.43	0.39	0.42	0.38
	下柱	0.50	0.45	0.46	0.42	0.60	0.55

(2) 同样对比阀厅屋面钢桁架梁上、下弦杆以及斜杆计算结果, 同样方案二的计算结果要小于方案一。

4 结论

通过建立刚架实际计算模型, 定义节点连接形式, 施加指定荷载, 通过屈曲分析计算柱的计算长度系数的方法能够较为便捷地获得更加准确的结果。

阀厅结构的屋面檩条设置较密, 檩条构件的尺寸较大, 檩条端部通过“搁板”、螺栓与各榀刚架的上弦杆连接, 具有较强的支撑作用, 另外, 实际屋面结构中设有多道交叉支撑, 檩条和交叉支撑的设置使得整个屋面

结构具备了良好的整体性, 屋面檩条系统对阀厅结构承载力的提升有显著作用, 不能粗糙地忽略檩条和交叉支撑对整体受力的贡献。

对两种计算方案的计算结果进行对比分析表明: 钢柱的正截面应力比以及稳定应力比等, 方案二的计算结果较方案一均有所降低, 整体降低10%。

参考文献

[1]马永杰.换流站阀厅结构选型与抗震分析[J].电力建设,2009.2,30(2):37-40.
[2]GB 50017-2017 钢结构设计标准[S]