

## 二次设备舱结构的力学分析与设计

张道磊 刘慧峰

北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100097

**[摘要]**在国家及国家电网的大力推动下,智能变电站模块化建设得到了很大的发展和进步,出现了一次设备舱、二次设备舱、生活舱、一二次组合设备舱等多种类型的模块和模块组。本篇文章以二次设备III型舱为例,阐述一下预制舱结构的力学分析与设计。

**[关键词]**二次设备舱;力学分析;设计

DOI: 10.33142/ec.v5i12.7303

中图分类号: TM315

文献标识码: A

### Mechanical Analysis and Design of Secondary Equipment Cabin Structure

ZHANG Daolei, LIU Huifeng

Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Beijing, 100097, China

**Abstract:** With the strong promotion of the state and the national power grid, the modular construction of intelligent substations has made great development and progress. There are many types of modules and module groups, such as primary equipment cabin, secondary equipment cabin, living cabin, primary and secondary combined equipment cabin. In this paper, the mechanical analysis and design of the prefabricated cabin structure are described by taking the Class III cabin of secondary equipment as an example.

**Keywords:** secondary equipment cabin; mechanical analysis; design

#### 引言

二次设备舱这些年得到了广泛的应用和发展,有人问你,你为什么还要谈二次设备舱结构的力学分析与设计,还有这个必要吗?我可以很肯定地回答你:很有这个必要。之所以要谈二次设备舱的力学分析与设计,主要是在与舱体加工制作单位的技术人员交流过程中,发现很多技术人员对于舱体的计算模型、作用代表值、作用效应的组合、内力分析、构件设计等问题的认知上,存在很多的差异。舱体加工制作单位认为:二次设备舱,它是设备,不是建筑,不执行建筑设计规范。从国家电网企标《预制舱式二次组合设备技术规范》(Q/GDW 11157-2017)的名称上来看,国网确实把它定义为设备。但是,在国网企标中的“规范性引用文件”中,与结构内力分析相关的规范只有:《建筑结构荷载规范》、《建筑抗震设计规范》、《门式刚架轻型房屋钢结构技术规范》及《电力设施抗震设计规范》,再没有与力学分析有关的其它规范,由此推定:二次设备舱舱体的结构分析与设计,应该根据《建筑结构荷载规范》及2022年开始执行的《工程结构通用规范》(GB 55001-2021)进行荷载代表值的取值及承载能力极限状态、正常使用极限状态下的作用效应组合,按照《建筑抗震设计规范》及2022年开始执行的《建筑与市政工程抗震通用规范》(GB55002-2021)进行地震作用的计算及地震作用效应和其他荷载效应进行地震作用效应组合。拟通过二次III型舱为例,详细地介绍一下二次设备舱的力学分析与设计过程。

#### 1 二次设备舱的概况

与二次设备舱直接相关的规范性文件主要有三本,分

别是国家电网企业标准《预制舱式二次组合设备技术规范》(Q/GDW 11157-2017)、国家电网企业标准《预制舱式10KV~35KV一二次组合设备技术规范》(Q/GDW 11882-2018)及国家标准《智能变电站二次舱通用技术条件》(GB/T 36283-2018)。

根据舱体长度的不同,二次设备舱分为三类,分别为I型舱、II型舱和III型舱。I型舱的外形尺寸(长\*宽\*高)为6200mm\*2800mm\*3200mm,II型舱的外形尺寸(长\*宽\*高)为9200mm\*2800mm\*3200mm,III型舱的外形尺寸(长\*宽\*高)为12200mm\*2800mm\*3200mm。三类舱体在外轮廓上比较,仅长度不同,相邻型号的舱体长度相差3m,宽度和高度均相同。

III型舱内一般布置25面屏柜,如图1所示。800mm宽的屏柜共计25面,250Kg/面;900mm宽的屏柜共计2面,300Kg/面。舱体地面铺设防静电活动地板,活动地板与舱底板之间设置200~250mm净高的线缆夹层。在舱体的两个端部墙体上布置工业空调。

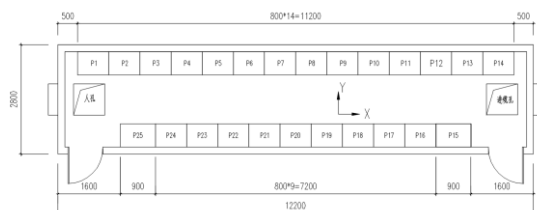


图1 二次设备III型舱平面布置图

舱体的墙体外墙板一般采用水泥加压板或钢板,墙体

的内饰板一般采用铝塑板或金属雕花板,外墙板与内饰板之间设置保温且不燃的材料,舱体的屋面外板一般采用不锈钢板,吊顶采用铝塑板或金属雕花板,吊顶与不锈钢之间设置保温且不燃的材料。

从结构受力的角度来看,预制舱主要由两大部分组成,一部分是舱体的钢结构底座,另一部分是底座上部的轻型钢结构房屋。在舱体吊装就位阶段,舱体底座需要承担着预制舱全部的重量;在舱体就位后的正常使用阶段,钢结构底座与混凝土基础顶面预埋件焊接,除传递着上部结构、设备的自重外,还传递着风荷载、雪荷载和地震作业。而舱体底座上部的轻钢结构,在吊装阶段,主要承受由于舱体底座的变形而引起的内力,在正常使用阶段,主要承受风荷载、雪荷载的作用。

舱体底座的周圈一般采用热轧 H 型钢或热轧槽钢,为了增强底座的整体性,同时兼顾大部分 800mm 宽屏柜的布置,一般沿着舱体长边方向每间隔 800mm 布置一根热轧槽钢或热轧窄翼缘 H 型钢。在舱体底座长边钢梁腹板上开孔,设置 4 个销轴,最终形成 8 个吊点。

二次设备舱最大的特点,就是完全在工厂加工、制作、屏柜安装,现场吊装就位、接线、调试后即可投入使用。它的特点,就要求我们的内力分析和设计分为三个设计状态:一是持久设计状况,即二次设备舱正常使用时的状态;二是短暂设计状况,即舱体在吊装就位时的状态;三是地震设计状况。不同的设计状况,在荷载的取值、荷载的组合有着不同的要求。

## 2 网企标对二次设备舱的技术要求

舱体设计使用年限为 40 年,舱体结构重要性系数按 1.0 考虑。海拔高度 $\leq 3000\text{m}$ ;抗震设防烈度 8 度,设计基本加速度 0.30g;设计最大风速 35m/s;地面活荷载标准值 4KN/m<sup>2</sup>;屋面均布活荷载标准值不小于 0.5KN/m<sup>2</sup>;屋面雪荷载标准值按舱体所在地取值。

## 3 结构内力分析与设计方法

二次设备舱为轻钢结构,结构构件很多采用冷弯薄壁型钢,属于 S5 级截面,薄壁构件的边缘达到屈服强度前,其腹板可能就已发生局部的屈曲,故舱体的内力分析采用一阶弹性分析方法。除抗震设计外,均采用以概论理论为基础的极限状态设计方法。所谓极限状态,是指整个结构或构件的作用效应,超出某一特定的状态,就不再满足设计规范规定的某一功能要求。国家标准要求按照承载能力极限状态和正常使用极限状态进行设计。承载能力极限状态的计算,主要是对结构、构件、连接节点的强度、稳定、倾覆、滑移的计算。正常使用极限状态的计算,是从使用者的观感和感受出发,主要是对结构、构件的变形、裂缝、振动的计算。

## 4 持久设计状况下荷载标准值的确定

### 4.1 风荷载标准值 $\omega_k$

(1) 基本风压的确定  
基本风速 $v_0 = 35\text{KN/m}$ ,根据《建筑结构荷载设计规范》

附录 E.2,空气密度 $\rho = 0.00125 * e^{-0.001z}$ ,其中 z 为海拔高度,从公式中可看出空气密度 $\rho$ 是 z 的降函数,暂取 z=5m 时,则基本风压 $\omega_0 = 0.5 * \rho * v_0^2 = 0.5 * 0.00125 * e^{-0.001 * 5} * 35^2 = 0.76 \text{KN/m}^2$ 。

### (2) 风压高度变化系数 $\mu_z$

暂按 B 类地面粗糙度考虑, $\mu_z = 1.0$

### (3) 风荷载体型系数 $\mu_s$

依据《建筑结构荷载规范》表 8.3.1 可知:当风速沿着+Y 时,墙

体迎风面 $\mu_s = 0.8$ ,墙体背风面 $\mu_s = -0.5$ ,与 Y 方向平行的墙面 $\mu_s = -0.7$ ,屋面迎风面 $\mu_s = -0.6$ ,屋面背风面 $\mu_s = -0.5$ 。

当风速沿着+X 方向时,墙体迎风面 $\mu_s = 0.9$ ,墙体背风面 $\mu_s = -0.2$ ,屋面及与 X 轴平行的墙面 $\mu_s = -0.8$ 。

(4) 风荷载脉动增大系数 $\beta$ ,《工程结构通用规范》要求不得小于 1.2,本文取 $\beta = 1.2$ 。

### (5) 风荷载标准值 $\omega_k$

风速沿着+Y 方向时,墙体迎风面 $\omega_k = \beta * \mu_z * \mu_s * \omega_0 = 0.73\text{KN/m}^2$ ,墙体背风面 $\omega_k = -0.46\text{KN/m}^2$ ,与 Y 方向平行的墙面 $\omega_k = -0.64 \text{KN/m}^2$ ,屋面迎风面 $\omega_k = -0.55\text{KN/m}^2$ ,屋面背风面 $\omega_k = -0.46\text{KN/m}^2$ 。

风速沿着+X 方向时,墙体迎风面 $\omega_k = 0.82\text{KN/m}^2$ ,墙体背风面 $\omega_k = -0.18\text{KN/m}^2$ ,屋面及与 X 轴平行的墙面 $\omega_k = -0.73\text{KN/m}^2$ 。

## 4.2 雪荷载标准值 $S_k$

### (1) 基本雪压 $S_0$

二次舱的上部结构为轻钢结构,对雪荷载比较敏感,参照国家电网企业标准《预制舱式 10KV~35KV 一二次组合设备技术规范》(Q/GDW 11882-2018),取特殊地区使用条件下的基本雪压 0.75KN/m<sup>2</sup>。

### (2) 屋面积雪分布系数 $\mu_r$

①当屋面雪荷载均匀分布时, $\mu_r = 1.0$ 。

②当屋面雪荷载不均匀分布时,半跨 $\mu_{r1} = 0.75$ ,半跨 $\mu_{r2} = 1.25$ 。

### (3) 屋面雪荷载标准值 $S_k$

①雪荷载均匀分布时, $S_k = \mu_r * S_0 = 0.75 \text{KN/m}^2$ 。

②雪荷载不均匀分布时,半跨 $S_{k1} = 0.56 \text{KN/m}^2$ ,半跨 $S_{k2} = 0.94 \text{KN/m}^2$ 。

屋面活荷载 0.5 KN/m<sup>2</sup>。

## 4.3 地面等效均布活荷载标准值

网企标要求地面活荷载标准值 4KN/m<sup>2</sup>,参考《变电站建筑设计技术规程》表 4.3.1 注 1,“表中所列标准值为等效均布荷载,包括设备荷载及其在楼面的安装、运行、检修荷载。”舱体地面活荷载的输入,就可以有两种方式输入。方式一:不再单独地输入屏柜的重量,舱体地面均按 4.0KN/m<sup>2</sup>的等效均布活荷载输入;方法二:屏

柜的重量作为永久作用,按照均布线荷载布置在屏柜底座 X 方向的钢梁上,除屏柜所占的区域,均布置 4.0KN/m<sup>2</sup> 的均布活荷载。

#### 4.4 其他荷载

(1) 在舱体计算模型中没有建立的墙板、屋面板、保温材料、防静电地板、空调等材料或设备,作为永久荷载,按照实际重量施加到计算模型的构件上。

(2) 在模型中已经体现出来的结构构件,计算程序会根据材料的容重自动计算构件的自重。

### 5 短暂设计状况下荷载标准值的确定

#### 5.1 风荷载

根据《建筑施工起重吊装工程安全技术规范》(JGJ 276-2012)第 3.0.12 条,“大雨、雾、大雪及六级以上大风等恶劣天气应停止吊装作业”的规定,在吊装阶段,基本风压按六级风的风速计算。依据《大气科学名词》(第三版)可知,6 级风的风速为 10.8~13.8m/s。本设计按照 14m/s 风速确定风荷载标准值。计算步骤同本文的 4.1 条。计算结果如下:

基本风压  $\omega_0 = 0.12\text{KN/m}^2$ 。

风速沿着+Y 方向时,墙体迎风面  $\omega_k = \beta * \mu_z * \mu_s * \omega_0 = 0.115$

KN/m<sup>2</sup>,墙体背风面  $\omega_k = -0.072\text{KN/m}^2$ ,与 Y 方向平行的墙面  $\omega_k = -0.101\text{KN/m}^2$ ,屋面迎风面  $\omega_k = -0.086\text{KN/m}^2$ ,屋面背风面  $\omega_k = -0.072\text{KN/m}^2$ 。

风速沿着+X 方向时,墙体迎风面  $\omega_k = 0.130\text{KN/m}^2$ ,墙体背风面  $\omega_k = -0.029\text{KN/m}^2$ ,屋面及与 X 轴平行的墙面  $\omega_k = -0.115\text{KN/m}^2$ 。

屋面均布活荷载标准值取 0。

#### 5.2 屋面雪荷载标准值 $S_k$

(1) 基本雪压  $S_0$

参照国家电网企业标准《预制舱式 10KV~35KV 二次组合设备技术规范》(Q/GDW 11882-2018),取一般地区使用条件下的基本雪压 0.25KN/m<sup>2</sup>。

(2) 屋面积雪分布系数  $\mu_r$  同本文中 4.2 条

(3) 屋面雪荷载标准值  $S_k$

①雪荷载均匀分布时,  $S_k = \mu_r * S_0 = 0.25\text{KN/m}^2$

②雪荷载不均匀分布时,半跨  $S_{k1} = 0.188\text{KN/m}^2$ ,半跨  $S_{k1} = 0.313\text{KN/m}^2$

#### 5.3 地面活荷载

防静电活动地面的等效均布活荷载取 0,但是屏柜的重量应按永久荷载按照实际重量输入。

### 6 地震设计状况下水平地震作用标准值的确定

由于国网企标对地震计算所需要的计算参数还不够全面、完整,从理论上讲应该按照二次设备舱布置的实际情况进行选取,本文暂且补充如下:

舱体的抗震设防类别为丙类,抗震设防烈度为 8 度

(0.30g),场地类别按 II 类考虑,设计地震分组按第一组考虑,水平地震影响系数 0.24,特征周期为 0.35s,舱体结构的阻尼比取 0.05。

水平地震作用的计算,主要有底部剪力法、振型分解反应谱法及时程分析法。结合舱体结构的实际情况,本文采用振型分解反应谱法进行水平地震作用的计算。为确保地震作用计算的正确性,所选取的振型数量,能够确保振型参与质量之和不得小于总质量的 90%。

结构地震力的计算,本质上是对结构的动力计算,根据达朗伯原理,通过引入惯性力,即可将动力计算问题转化为静力平衡问题来解决,但这仅仅是形式上的转换,是一种动态的、瞬间的力学平衡。地震力的大小,与舱体结构的质量和刚度有很大的关系。

《建筑与市政工程抗震通用规范》第 4.3.1 条规定,计算地震作用时,建筑与市政工程结构的重量荷载代表值应取结构和构配件自重标准值和可变荷载组合值之和,屋面雪荷载的组合值系数取 0.5,屋面活荷载不予考虑,地面活荷载组合值系数取 0.5。即重量荷载代表值=1.0\*舱体的永久荷载(含屏柜的重量)+0.5\*屋面雪荷载+0.5\*地面等效均布活荷载。

### 7 荷载或荷载效应组合

二次设备舱在使用、吊装过程中,可能同时出现的荷载,应该按照承载能力极限状态和正常使用极限状态下的要求,分别采用荷载或荷载效应的基本组合、标准组合、地震组合,然后取其最不利的组合进行结构构件的设计。结构构件的强度计算、稳定计算采用荷载的基本组合,构件的挠度、节点的位移的计算采用荷载的标准组合。结构构件的抗震验算效应组合应采用地震作用效应和其他效应的基本组合。

#### 7.1 组合公式

基本组合:

$$\sum_{i \geq 1} \gamma_{Gi} G_{ik} + \gamma_{Q1} \gamma_{L1} Q_{1k} + \sum_{j > 1} \gamma_{Qj} \psi_{cj} \gamma_{Lj} Q_{jk} \quad (\text{公式 1})$$

$$\text{标准组合: } \sum_{i \geq 1} G_{ik} + Q_{1k} + \sum_{j > 1} \psi_{cj} Q_{jk} \quad (\text{公式 2})$$

$$\text{地震组合: } S = \gamma_G S_{GE} + \gamma_{Eh} S_{Ehk} + \gamma_{Ev} S_{Evk} + \sum \gamma_{Di} S_{Dik} + \sum \psi_i \gamma_i S_{ik} \quad (\text{公式 3})$$

公式 1~公式 3 符合的含义请参见《工程结构通用规范》(GB 55001-2021)及《建筑与市政工程抗震通用规范》(GB 55002-2021)。

#### 7.2 荷载或效应组合的说明

D—永久荷载标准值, L—活荷载标准值, LR—屋面活荷载

W1—+Y 向风荷载标准值, W2—+Y 向风荷载标准值, W3—+X 向风荷载标准值, S1—均布雪荷载, S2—不均布雪荷载(前半跨大,后半跨小), S3—不均布雪荷载(前半跨小,后半跨大), Ex—X 方向地震力, Ey—Y 方向地震力,永久作用的荷载分项系数:当对结构不利时,取 1.3;



当对结构有利时，取 1.0。

可变作用的荷载分项系数：当对结构不利时，取 1.5；当对结构有利时，应取 0。

地震组合时，重力荷载的分项系数取 1.3。

地震作用的荷载分项系数：当仅计算水平地震作用时，取 1.4；当仅计算竖向地震时，取 1.4；同时计算水平地震和竖向地震时，当以水平地震为主时，水平地震的分项系数取 1.4，竖向地震的分项系数取 0.5；当以竖向地震为主时，水平地震的分项系数取 0.5，竖向地震的分项系数取 1.4。

### 7.3 舱体内力分析的荷载或效应的组合

表 1 舱体内力分析的荷载或效应的组合

序号	名称	类型	说明
1	C1	代数和	$1.3*D + 1.5*1.0*L + 1.5*0.7*RL$
2	C2	代数和	$1.0*D + 1.5*1.0*L + 1.5*0.7*RL$
3	C3	代数和	$1.3*D \pm 1.5*W$
4	C4	代数和	$1.0*D \pm 1.5*W$
5	C5	代数和	$1.3*D + 1.5*1.0*L \pm 1.5*0.6*W$
6	C6	代数和	$1.0*D + 1.5*1.0*L \pm 1.5*0.6*W$
7	C7	代数和	$1.3*D + 1.5*0.7*1.0*L \pm 1.5*W$
8	C8	代数和	$1.0*D + 1.5*0.7*1.0*L \pm 1.5*W$
9	C9	代数和	$1.3*(D+0.5L) \pm 1.4*1.0*Ex$
10	C10	代数和	$1.3*(D+0.5L) \pm 1.4*1.0*Ey$
11	C11	代数和	$1.0*(D+0.5L) \pm 1.4*1.0*Ex$
12	C12	代数和	$1.0*(D+0.5L) \pm 1.4*1.0*Ey$
13	C13	代数和	$1.3*D + 1.5*1.0*(L+S)$
14	C14	代数和	$1.0*D + 1.5*1.0*(L+S)$
15	C15	代数和	$1.3*D + 1.5*1.0*(L+S) \pm 1.5*0.6*W$
16	C16	代数和	$1.0*D + 1.5*1.0*(L+S) \pm 1.5*0.6*W$
17	C17	代数和	$1.3*D + 1.5*0.7*1.0*(L+S) \pm 1.5*W$
18	C18	代数和	$1.0*D + 1.5*0.7*1.0*(L+S) \pm 1.5*W$
19	C19	代数和	$1.3*(D+0.5*(L+S)) \pm 1.4*1.0*Ex$
20	C20	代数和	$1.3*(D+0.5*(L+S)) \pm 1.4*1.0*Ey$
21	C21	代数和	$1.0*(D+0.5*(L+S)) \pm 1.4*1.0*Ex$
22	C22	代数和	$1.0*(D+0.5*(L+S)) \pm 1.4*1.0*Ey$
23	C23	代数和	$D + (L+RL)$
24	C24	代数和	$D \pm W$
25	C25	代数和	$D + L \pm 0.6*W$
26	C26	代数和	$D \pm W + 0.7*L$
27	C27	代数和	$(D + 0.5*L) \pm 1.0*Ex$
28	C28	代数和	$(D + 0.5*L) \pm 1.0*Ey$
29	C29	代数和	$D + (L+S)$
30	C30	代数和	$D + (L+S) \pm 0.6*W$
31	C31	代数和	$D \pm W + 0.7*(L+S)$

序号	名称	类型	说明
32	C32	代数和	$(D + 0.5(L+S)) \pm 1.0*Ex$
33	C33	代数和	$(D + 0.5(L+S)) \pm 1.0*Ey$
34	C34	代数和	C1~C22 组合的包络
35	C35	代数和	C23~C33 组合的包络

### 8 舱体结构构件的设计

舱体结构构件的力学分析完成以后，还需要根据《钢结构设计标准》、《冷弯薄壁型钢结构技术规范》(GB 50018-2002)的要求对结构构件及连接节点进行设计，确保结构构件在强度、稳定、变形及构造上满足设计规范的要求。在舱体结构体系内，主要存在三类构件，一是受弯构件，二是轴心受力构件，三是拉弯、压弯构件。

受弯构件，主要对构件的受弯强度、受剪强度、构件的整体稳定、局部稳定及挠度的计算。需要特别注意的是受弯构件的容许挠度有两个指标，一个是在永久荷载标准值+可变荷载标准值作用下容许的挠度值 $[v_T]$ ，另一个是仅在可变荷载标准值作用下容许的挠度值 $[v_Q]$ 。舱体底座周围的钢梁及屋面梁挠度，不得超过 $[v_T]=1/400$ 、 $[v_Q]=1/500$ 的容许值，屋面檩条的挠度不得超过 $[v_T]=1/240$ 的容许值。

轴心受力构件，主要对它的截面强度、轴线受压构件的稳定性及长细比进行控制。舱体内的柱间支撑在计算模型中一般都是按照轴心受力构件来计算的。在设计过程中，需要特别关注舱体的吊装阶段，确保设计模型与吊装方案保持一致，同时需要对吊装销轴对孔壁的局部抗压强度的计算。

舱体的柱子一般都是安装拉弯或压弯构件进行设计的。主要对它的截面强度、构件的稳定性及长细比进行控制。在风荷载或多遇地震标准值的作用下，柱顶位移不得大于 $h/60$ ，其中 $h$ 是柱子的高度。

#### [参考文献]

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部、国家市场监督管理总局. 工程结构通用规范:GB 55001-2021[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021:6-22.
  - [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部、国家市场监督管理总局. 建筑与市政工程抗震通用规范 GB 55002-2021[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021:14-15.
  - [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. 建筑结构荷载规范 GB 50009-2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012:8-11
- 作者简介: 张道磊(1980.9-), 男, 毕业于北方交通大学, 电力系统继电保护, 目前就职于北京四方继保自动化股份有限公司, 集成设计部部门经理, 中级工程师; 刘慧峰(1966.12-), 男, 毕业于大连理工大学, 工业与民用建筑专业, 目前就职于北京四方继保自动化股份有限公司, 工程设计主管, 高级工程师。