



CECS 417 : 2015

---

中国工程建设协会标准

# 开合屋盖结构技术规程

Technical specification for retractable roof structures

中国计划出版社

# 中国工程建设标准化协会公告

第 222 号

## 关于发布《开合屋盖结构技术规程》的公告

根据中国工程建设标准化协会《关于印发〈2013 年度第一批工程建设协会标准制订、修订计划〉的通知》(建标协字〔2013〕057 号)的要求,由中国建筑设计院有限公司等单位编制的《开合屋盖结构技术规程》,经本协会钢结构专业委员会组织审查,现批准发布,编号为 CECS 417 : 2015,自 2016 年 1 月 1 日起施行。

中国工程建设标准化协会

二〇一五年十月十二日

# 前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发〈2013 年度第一批工程建设协会标准制订、修订计划〉的通知》(建标协字〔2013〕057 号)的要求,规程编制组经广泛调查研究,认真总结工程实践经验,参考国外先进标准,与国内相关标准协调,并在广泛征求意见的基础上,制定本规程。

本规程共分 11 章和 4 个附录,主要技术内容包括:总则,术语和符号,基本规定,荷载和作用,结构体系,结构计算,驱动系统,控制系统,防腐蚀与防火设计,制作、安装、调试与验收,使用与维护等。

本规程编制的关键技术内容是:引入结构设计基本状态的概念,给出基于结构等效服役期的地震加速度峰值折减系数;提出“常开状态”、“常闭状态”、“刚性折叠结构”、“柔性折叠结构”、“轮式驱动”、“齿轮齿条驱动”等结构与机械传动方面的术语;提出考虑多振型参与的等效静力风荷载计算方法与围护结构局部风压系数极值计算方法;提出太阳辐射引起结构温升的计算方法;提出活动屋盖运行荷载及偶然事故荷载的计算方法;给出开合屋盖结构常用的驱动方式,并对其特点、适用范围及设计要点做了规定;提出活动屋盖结构及驱动控制系统的加工制作、现场安装、运行调试及质量验收的规定;提出活动屋盖驱动与控制系统运行操作、设备维护等方面的规定。

本规程由中国工程建设标准化协会钢结构专业委员会归口管理,由中国建筑设计院有限公司负责具体技术内容的解释。在执行过程中如有意见或建议,请寄送解释单位(地址:北京市西城区车公庄大街 19 号,邮政编码:100044)

**主 编 单 位:** 中国建筑设计院有限公司

**参编单位：**同济大学

浙江大学

北京交通大学

北京工业大学

天津大学

北京市建筑设计研究院有限公司

上海建筑设计研究院有限公司

中信建筑设计研究总院有限公司

总装备部工程设计研究总院

中冶京诚工程技术有限公司

浙江精工钢结构集团有限公司

江苏沪宁钢机股份有限公司

天弓(智唯)野营装备科技有限公司

上海栎汇铨杰工程技术有限公司

上海太阳膜结构有限公司

**主要起草人：**范 重(以下按姓氏笔画排序)

甘 明 刘中华 刘红波 刘志伟 杨庆山

张毅刚 陈以一 郑志荣 赵 阳 赵 然

胡纯炀 姜学宜 顾 昉 徐晓明 高继领

彭 翼 程书华 温四清

**主要审查人：**董石麟 傅学怡 赵基达 于革刚 冯 远

顾 明 王立军 葛家琪 张 伟

# 目 次

1	总 则 .....	( 1 )
2	术语和符号 .....	( 2 )
2.1	术语 .....	( 2 )
2.2	符号 .....	( 5 )
3	基本规定 .....	( 8 )
3.1	一般规定 .....	( 8 )
3.2	屋盖开合方式 .....	( 8 )
3.3	开合屋盖设计性能指标 .....	( 9 )
4	荷载和作用 .....	(11)
4.1	一般规定 .....	(11)
4.2	永久荷载与活荷载 .....	(11)
4.3	雪荷载 .....	(11)
4.4	风荷载 .....	(12)
4.5	温度作用 .....	(13)
4.6	地震作用 .....	(14)
4.7	活动屋盖运行荷载 .....	(14)
4.8	偶然事故荷载 .....	(15)
4.9	荷载组合 .....	(16)
5	结构体系 .....	(19)
5.1	一般规定 .....	(19)
5.2	活动屋盖结构 .....	(19)
5.3	支承结构 .....	(20)
5.4	围护结构 .....	(21)
6	结构计算 .....	(23)

6.1	一般计算原则	(23)
6.2	静力计算	(23)
6.3	稳定性计算	(24)
6.4	抗震计算	(24)
7	驱动系统	(26)
7.1	一般规定	(26)
7.2	轮式驱动系统	(27)
7.3	牵引驱动系统	(27)
7.4	齿轮齿条驱动系统	(28)
7.5	链条链轮驱动系统	(28)
7.6	液压驱动系统	(29)
8	控制系统	(30)
8.1	一般规定	(30)
8.2	控制系统	(30)
8.3	安全应急保障措施	(32)
9	防腐蚀与防火设计	(33)
9.1	防腐蚀	(33)
9.2	防火	(33)
10	制作、安装、调试与验收	(35)
10.1	一般规定	(35)
10.2	加工制作与出厂检验	(35)
10.3	轨道和活动屋盖安装与调试	(36)
10.4	工程验收	(38)
11	使用与维护	(41)
11.1	一般规定	(41)
11.2	运行管理	(41)
附录 A	活动屋盖基本开合方式	(43)
附录 B	围护结构局部风压系数极值计算方法	(46)
附录 C	太阳辐射引起的材料温升计算方法	(50)

附录 D 活动屋盖操作指南 .....	(55)
本规程用词说明 .....	(57)
引用标准名录 .....	(58)
附:条文说明 .....	(59)

# Contents

1	General provisions .....	( 1 )
2	Terms and symbols .....	( 2 )
2.1	Terms .....	( 2 )
2.2	Symbols .....	( 5 )
3	Basic requirements .....	( 8 )
3.1	General requirements .....	( 8 )
3.2	Moving patterns of retractable roof .....	( 8 )
3.3	Performance indexes of retractable roof design .....	( 9 )
4	Loads and actions .....	(11)
4.1	General requirements .....	(11)
4.2	Permanent load and live load .....	(11)
4.3	Snow load .....	(11)
4.4	Wind load .....	(12)
4.5	Thermal action .....	(13)
4.6	Earthquake action .....	(14)
4.7	Operational load of the retractable roof .....	(14)
4.8	Accidental load .....	(15)
4.9	Combination of loads .....	(16)
5	Structural system .....	(19)
5.1	General requirements .....	(19)
5.2	Moving roof .....	(19)
5.3	Supporting structure .....	(20)
5.4	Envelope structure .....	(21)
6	Structural analysis .....	(23)

6.1	General principles	(23)
6.2	Static analysis	(23)
6.3	Stability analysis	(24)
6.4	Seismic analysis	(24)
7	Driving system	(26)
7.1	General requirements	(26)
7.2	Self-driving wheels system	(27)
7.3	Cable-traction driving system	(27)
7.4	Rack and pinion driving system	(28)
7.5	Chain and sprocket driving system	(28)
7.6	Fluid power system	(29)
8	Control system	(30)
8.1	General requirements	(30)
8.2	Control system	(30)
8.3	Emergency measures for safety	(32)
9	Anticorrosion design and fire protection design	(33)
9.1	Anticorrosion design	(33)
9.2	Fire protection design	(33)
10	Fabrication, installation, commissioning and acceptance	(35)
10.1	General requirements	(35)
10.2	Fabrication and factory inspection	(35)
10.3	Operation and commissioning of rail and moving roof	(36)
10.4	Acceptance of engineering	(38)
11	Operation and maintenance	(41)
11.1	General requirements	(41)
11.2	Operation management	(41)
Appendix A	Typical retractable patterns of moving roofs	(43)

Appendix B Calculation method of local wind pressure coefficient ..... (46)

Appendix C Calculation method of temperature rise of materials caused by solar radiation ..... (50)

Appendix D Operating guidance of moving roof ..... (55)

Explanation of wording in this specification ..... (57)

List of quoted standards ..... (58)

Addition;Explanation of provisions ..... (59)

# 1 总 则

**1.0.1** 为适应开合屋盖建筑发展的需要,在开合屋盖设计及施工中贯彻执行国家的技术经济政策,做到安全适用、技术先进、经济合理、确保质量,制定本规程。

**1.0.2** 本规程适用于活动屋盖支承于地面或下部支承结构的开合屋盖结构以及驱动控制系统的设计与施工。

**1.0.3** 开合屋盖设计时,应结合建筑形式和使用功能,选用合理的结构体系、开合方式以及与之相适应的驱动控制系统,确保活动屋盖开闭运行可靠,便于维护,实现预期的性能目标。

**1.0.4** 开合屋盖的设计、加工制作、安装调试及使用维护,除应符合本规程的规定外,尚应符合国家现行有关标准的规定。

## 2 术语和符号

### 2.1 术 语

#### 2.1.1 开合屋盖结构 retractable roof structure

通过移动部分或整体屋盖实现屋顶开启或闭合的结构,使建筑物可在室内空间与室外环境之间进行相互转换。

#### 2.1.2 活动屋盖 moving roof structure

开合屋盖结构中屋盖可移动的部分,由一个或多个单元组成。

#### 2.1.3 固定屋盖 fixed roof structure

开合屋盖结构中屋盖不可移动的部分。

#### 2.1.4 支承结构 support structure

用于支承活动屋盖的结构,通常为下部支承体系或固定屋盖。

#### 2.1.5 开合屋盖结构的基本状态 fundamental state of retractable roof structure

活动屋盖的常驻位置,应根据建筑使用功能确定。

#### 2.1.6 开启率 opening ratio

开合屋盖结构中,活动屋盖处于全开状态时,开口投影面积与整体屋面投影面积比值的百分率。

#### 2.1.7 开合方式 retractable pattern

活动屋盖单元移动的方式,包括平行移动、绕枢轴转动、折叠移动等基本方式及其组合。

#### 2.1.8 沿平行轨道移动 moving along parallel tracks

活动屋盖单元沿若干互相平行的轨道进行移动的开合方式,根据轨道的形状和设置方向,可分为水平移动、空间移动和垂直移动三种。

#### 2.1.9 绕枢轴转动 moving around pivot

活动屋盖单元绕枢轴进行旋转移动的开合方式,根据枢轴设置的方向,可分为绕竖向枢轴转动和绕水平枢轴转动。

**2.1.10 折叠移动** moving by folding

通过柔性屋面材料的折叠或卷绕实现屋面开启与闭合,可分为水平折叠、空间折叠和放射状折叠三种方式。

**2.1.11 常闭状态** frequently closed state

在开合屋盖结构设计使用年限内,活动屋盖以全闭状态为主,建筑物通常作为室内空间使用。

**2.1.12 常开状态** frequently open state

在开合屋盖结构设计使用年限内,活动屋盖以全开状态为主,建筑物通常作为露天场地使用。

**2.1.13 等效服役年限** equivalent working life

计算开合屋盖结构非基本状态下的地震作用时,活动屋盖在非常驻位置的总计停留时间。

**2.1.14 等效静力风荷载** equivalent static wind load

根据随机振动理论计算分析结构的风振响应,按照风振响应极值等效的原则得到的静力风荷载值。

**2.1.15 太阳辐射吸收系数** absorbing coefficient of solar radiation

材料吸收的太阳辐射能与投射到材料表面的太阳辐射能的比值,是衡量材料吸收太阳辐射照度的性能指标。

**2.1.16 合拢温度** closure temperature

分段施工的主体结构连接为整体或形成约束时的环境温度。

**2.1.17 活动屋盖运行荷载** moving load of the retractable roof

活动屋盖运行过程中产生的荷载,包括运行阻力、水平推力和制动惯性力等。

**2.1.18 刚性折叠结构** rigid folding structure

活动屋盖结构由若干刚性组件构成,通过各组件的相对运动,

实现屋盖的开启与闭合。

#### 2.1.19 柔性折叠结构 flexible folding structure

活动屋盖结构采用索膜结构,依靠膜材的收纳与展开实现屋盖的开启与闭合。

#### 2.1.20 驱动系统 driving system

驱动活动屋盖运行所需动力装置与机械设备的统称。

#### 2.1.21 台车 trolley

支承活动屋盖在轨道上运行的装置,通常由车架、车轮及反钩轮等组成,根据其驱动方式可分为主动式台车和被动式台车。

#### 2.1.22 轨道 rail

直接支承活动屋盖台车车轮,引导台车行走的钢轨。

#### 2.1.23 控制系统 control system

实现活动屋盖可靠运行的电气控制系统,包括速度控制、同步性控制、紧急制动控制及安全报警等。

#### 2.1.24 轮式驱动 self-running wheel driving

将电动机安装于台车之上,电动机通过减速器驱动车轮,利用车轮与轨道之间的摩擦力驱动台车。

#### 2.1.25 牵引驱动 cable-traction driving

通过卷扬机的卷筒缠绕钢丝绳牵引活动屋盖。

#### 2.1.26 齿条齿轮驱动 rack and pinion driving

利用齿轮与齿条之间的啮合力驱动活动屋盖运行。

#### 2.1.27 链条链轮驱动 chain and sprocket driving

将链条的端部固定或将链条沿轨道固定,通过电动机驱动链轮,通过链轮与链条之间的啮合作用驱动活动屋盖运行。

#### 2.1.28 液压驱动 jack driving

电动机驱动油泵产生动力,通过液压元件(如油缸或液压马达)的伸缩运动实现活动屋盖的开启与闭合。

#### 2.1.29 锁定装置 locking device

活动屋盖处于全开状态、全闭状态以及紧急制动时,所需的固

定装置。

## 2.2 符 号

### 2.2.1 荷载与作用：

- $w_0$ ——基本风压；
- $w_k$ ——风压标准值；
- $\hat{C}_p$ ——局部风压系数极值；
- $\hat{C}_{pe}$ ——等效静力风压系数；
- $C_p$ ——风压时程的平均风压系数；
- $\bar{C}_p$ ——风压时程平均风压系数平均值；
- $C_B$ ——背景响应极值的等效静力风压系数；
- $C_{R,j}$ ——第  $j$  个主导振型的共振响应极值的等效静力风压系数；
- $\bar{\sigma}$ ——脉动风压均方根的平均值；
- $w_B$ ——背景响应极值对脉动响应极值的贡献率；
- $w_{R,j}$ ——第  $j$  个主导振型的共振响应极值对脉动响应极值的贡献率；
- $\mu_z$ ——风压高度变化系数(包括地形修正系数)；
- $g$ ——风压时程的峰值因子；
- $T_{0,\max}$ ——结构的最高初始平均温度；
- $T_{0,\min}$ ——结构的最低初始平均温度；
- $T_a$ ——室外温度峰值；
- $G_H$ ——水平面和垂直面的太阳辐射总强度；
- $G_D$ ——太阳直接辐射强度；
- $G_{d0}$ ——太阳散射辐射强度；
- $G_R$ ——太阳反射辐射强度；
- $\epsilon$ ——结构外表面太阳辐射热的吸收系数；
- $h$ ——结构外表面热对流系数；

- $C_t$ ——自然对流系数；  
 $V_0$ ——标准气象条件下的风速；  
 $\phi$ ——太阳方位角；  
 $\phi_{\text{axis}}$ ——构件轴线方位角(轴线在水平面上的投影与正北方向顺时针夹角)；  
 $\beta$ ——太阳高度角；  
 $\beta_{\text{axis}}$ ——钢构件轴线高度角(钢管轴线与水平面的夹角)；  
 $\rho_g$ ——地面或水平面的辐射反射率；  
 $\theta$ ——太阳光线入射角；  
 $\alpha$ ——入射面法线与水平面法线之间的夹角；  
 $\omega$ ——温度计算部位与最高温度位置在钢管截面内的偏离角；  
 $\xi$ ——太阳光线与圆管轴线的夹角。

### 2.2.2 荷载组合：

- $S_{\text{SG}k}$ ——支承结构的永久荷载效应值；  
 $S_{\text{RG}j}$ ——第  $j$  个活动屋盖单元在特定位置时的永久荷载效应值；  
 $S_{Q_i k}$ ——按第  $i$  个可变荷载  $Q_{i,k}$  计算的荷载效应值，其中  $S_{Q_{1k}}$  为诸可变荷载效应中起控制作用者；  
 $r_G$ ——永久荷载分项系数；  
 $r_{Q_i}$ ——第  $i$  个可变荷载分项系数；  
 $r_{L_i}$ ——第  $i$  个可变荷载考虑设计使用年限的调整系数；  
 $\phi_{c_i}$ ——第  $i$  个可变荷载  $Q_i$  的组合值系数；  
 $m$ ——开合屋盖活动单元数量；  
 $n$ ——参与组合的可变荷载数。

### 2.2.3 驱动控制系统：

- $P_s$ ——单侧轨道承受的横向推力；  
 $\sum P_i$ ——轨道受横向推力一侧的最不利轮压之和；  
 $P_{\text{cmax}}$ ——开合屋盖运行最大撞击力；

- $P_{ct}$ ——开合屋盖运行撞击力；  
 $v$ ——台车运行速度；  
 $\lambda$ ——水平横向载荷系数；  
 $\varphi$ ——活动屋盖运行冲击系数；  
 $\varphi_c$ ——活动屋盖撞击动力系数。

## 3 基本规定

### 3.1 一般规定

3.1.1 在进行开合屋盖设计时,活动屋盖结构形式、驱动系统应与建筑造型及支承结构相协调。

3.1.2 开合屋盖的开启率应根据建筑使用功能、工程造价、技术可靠性等因素综合确定。宜采用开启率较小、自重轻、经济性好的活动屋盖形式,中小型建筑可采用开启率较大或全部开启的方式。

3.1.3 开合屋盖的全开或/和全闭状态可作为结构设计的基本状态,基本状态、非基本状态以及活动屋盖运行移动状态应进行相应的承载能力极限状态设计与正常使用极限状态验算。

3.1.4 开合屋盖设计时,荷载与作用应符合国家现行有关标准的规定和本规程的要求。

3.1.5 开合屋盖建筑应根据建筑使用要求,制定相应的开合屋盖运行与维护管理规定。

3.1.6 在任何荷载作用下,活动屋盖与支承结构、活动屋盖各部分之间严禁发生碰撞,并不应出现阻碍活动屋盖正常运行的变形。

### 3.2 屋盖开合方式

3.2.1 开合屋盖的开合方式应根据建筑使用功能、建筑外形、地理环境、天气条件、运营管理方式等综合确定。

3.2.2 活动屋盖基本开合方式应符合本规程附录 A 的规定。

3.2.3 活动屋盖可由多个单元构成,各单元可采用基本开合方式或基本开合方式的组合。

### 3.3 开合屋盖设计性能指标

#### I 设计控制指标

3.3.1 开合屋盖结构的安全等级和设计使用年限应符合现行国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153 的有关规定。当活动屋盖跨度大于 60m 或悬挑长度大于 20m 时,整体结构的安全等级应为一级。

3.3.2 开合屋盖结构的基本风压与基本雪压应按 100 年重现期采用。

3.3.3 台车与活动屋盖之间连接部件的承载力以及台车与支承结构之间锁定装置的承载力,均不应低于与之相邻构件的承载力。

3.3.4 台车等驱动系统部件几何尺寸及其与周边部件的间隙应满足台车运行安全的要求。

#### II 变形控制指标

3.3.5 轨道梁在活动屋盖运行过程中所产生的变形不应超过活动屋盖驱动系统的容许变形值。当驱动系统设计文件无具体规定时,轨道梁挠度不应大于其跨度的  $1/800$ ,且不应大于 15mm。轨道在相邻台车之间的变形差不宜大于台车间距的  $1/1000$ ,且不应大于 10mm。

#### III 抗震性能指标

3.3.6 开合屋盖的结构构件、驱动系统部件的抗震性能指标,应根据设防烈度、场地条件、结构类型、结构规则性、结构构件的重要性、活动屋盖状态以及震后修复难易程度确定,并应分别进行多遇地震、设防烈度地震与罕遇地震作用下的验算。

3.3.7 直接支承活动屋盖轨道的桁架、轨道梁、轨道、台车及与支承结构连接的构件和节点,在设防烈度地震作用下应处于弹性状态。

#### IV 开合驱动控制系统性能指标

3.3.8 驱动系统机械部件的设计使用年限不宜小于 25 年,控制

系统主要元件的设计使用年限不宜小于 10 年。

**3.3.9** 活动屋盖的年开合运行次数和开合运行速度应结合建筑使用要求与综合技术经济性确定。

**3.3.10** 活动屋盖运行的加速度或减速度应结合移动单元的重量确定,活动屋盖启动和制动时的加速度或减速度宜控制在  $0.02\text{m/s}^2 \sim 0.2\text{m/s}^2$  范围内。

**3.3.11** 活动屋盖运行时的机械噪声不宜大于 60dB,当使用要求较高时,噪音不宜大于 50dB,并满足建筑使用需求和国家现行有关标准的规定。

**3.3.12** 活动屋盖运行时,最大雪荷载不宜大于  $0.1\text{kN/m}^2$ ,最大风速不宜超过  $15\text{m/s}$ ,运行时的环境温度不应超过设计允许的温度范围。

## 4 荷载与作用

### 4.1 一般规定

4.1.1 活动屋盖宜采用自重轻的结构体系与屋面围护结构,并宜减少活动屋盖的附加荷载。

4.1.2 开合屋盖结构应按活动屋盖全开、全闭状态确定荷载与作用,并应考虑活动屋盖运行时的移动荷载以及驱动装置故障引起的偶然作用。

### 4.2 永久荷载与活荷载

4.2.1 活动屋盖结构的永久荷载除应包括结构构件自重、屋面系统重量外,尚应包括驱动与控制系统等附属设备的重量。

4.2.2 活动屋盖处于全开或全闭状态时,其均布活荷载可取 $0.3\text{ kN/m}^2$ ;当活动屋盖投影面积小于 $100\text{m}^2$ 时,均布活荷载宜取 $0.5\text{ kN/m}^2$ ,集中检修荷载取 $1.5\text{ kN}$ 。活动屋盖处于运行状态时,均布活荷载可取 $0.1\text{ kN/m}^2$ 。屋面均布活荷载可不与雪荷载或积水荷载同时组合。

4.2.3 建筑屋面应采取合理坡度和有效排水措施。对于局部积水,应按最大可能积水深度确定积水荷载。

### 4.3 雪荷载

4.3.1 开合屋盖屋面积雪分布系数可按下列规定采用:

1 按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 中给出的适用屋面形式确定;

2 对于安全等级为一级或体型复杂的开合屋盖,宜由试验或数值模拟方法确定。

4.3.2 对多雪地区安全等级为一级的开合屋盖结构,可采用相应的除雪、融雪措施,并应考虑融雪过程中雪荷载的不利分布。

## 4.4 风 荷 载

4.4.1 开合屋盖结构的风荷载可按下列规定采用:

1 当建筑物的体型与现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 中的规定类似时,可按《建筑结构荷载规范》GB 50009 确定屋盖结构的风荷载;

2 安全等级为一级且体型复杂的开合屋盖结构应根据风洞试验确定屋面围护结构与主体结构的风荷载。

4.4.2 风洞试验应符合现行行业标准《建筑工程风洞试验方法标准》JGJ/T 338 的有关规定,试验工况除全开与全闭状态外,还包括活动屋盖运行移动过程中的多个状态。

4.4.3 围护结构的风荷载标准值可按下式计算:

$$w_k = \hat{C}_p \mu_z w_0 \quad (4.4.3)$$

式中: $w_k$ ——风荷载标准值;

$\hat{C}_p$ ——局部风压系数极值,可按本规程附录 B.1 的规定确定;

$\mu_z$ ——风压高度变化系数(包括地形修正系数),按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 的有关规定确定;

$w_0$ ——基本风压,按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 的有关规定确定。

4.4.4 围护结构风荷载的面积折减系数、全闭状态下的内压系数应按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 确定。

4.4.5 进行主体结构设计时,当采用荷载效应组合时,可根据结构动力学或结构随机振动理论确定开合屋盖结构的风振响应极值,并与其他荷载作用下的结构效应直接组合;当采用荷载组合时,应根据主体结构的风振响应极值确定等效静力风荷载。

4.4.6 主体结构的等效静力风荷载标准值可按下列公式计算：

$$w_k = \hat{C}_{pe} \mu_z w_0 \quad (4.4.6-1)$$

$$\hat{C}_{pe} = C_p \pm \left( w_B C_B + \sum_{j=1}^m w_{R,j} C_{R,j} \right) \quad (4.4.6-2)$$

式中： $\hat{C}_{pe}$ ——等效静力风压系数；

$C_p$ ——风压时程的平均风压系数；

$C_B$ ——背景响应极值的等效静力风压系数；

$C_{R,j}$ ——第  $j$  阶主导振型的共振响应极值的等效静力风压系数；

$w_B$ ——背景响应极值对脉动响应极值的贡献率；

$w_{R,j}$ ——第  $j$  阶主导振型的共振响应极值对脉动响应极值的贡献率；

$m$ ——主导振型的个数。

## 4.5 温度作用

4.5.1 温度作用应考虑气温变化、太阳辐射及使用热源等因素，活动屋盖结构或构件上的温度作用应采用结构服役期间温度与结构施工合拢温度的差值进行分析。

4.5.2 计算结构或构件的温度作用效应时，常用材料的线膨胀系数  $\alpha_T$  可按表 4.5.2 采用。

表 4.5.2 常用材料的线膨胀系数  $\alpha_T$

材 料	线膨胀系数 $\alpha_T$ ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )
普通混凝土	10
钢、锻铁、铸铁	12
不锈钢	16
铝、铝合金	24
钢丝束	18.7
钢绞线	13.8
钢丝绳	19.2
钢拉杆	12.0

注：当金属结构构件处于室外环境时，应考虑当地极端气温的影响。

**4.5.3** 开合屋盖结构宜考虑极端气温的影响,基本气温  $T_{\max}$  和  $T_{\min}$  以及均匀温度作用的标准值可根据现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 的有关规定确定。

**4.5.4** 结构的最高初始平均温度  $T_{0,\max}$  和最低初始平均温度  $T_{0,\min}$  应根据结构合拢或形成约束时的温度确定,或根据施工时结构可能出现的不利温度确定。

**4.5.5** 对处于室内环境的结构,其平均温度应考虑室内外温差的影响;对于暴露于室外的结构或施工期间的结构,宜根据各部位的朝向和表面吸热特性确定太阳辐射的影响。

**4.5.6** 太阳辐射强度及太阳辐射引起的建筑表面温升可按本规程附录 C 的计算方法确定,太阳辐射吸收系数可按本规程表 C.2.2 采用。

**4.5.7** 温度作用引起的结构变形和轨道变形不得影响台车的正常运行。

**4.5.8** 开合屋盖结构驱动控制系统应避免温度过高引起电器与线缆使用寿命缩短、机电部件烧毁,以及低温运行导致的机械部件磨损与金属材料冷脆破坏。

## 4.6 地震作用

**4.6.1** 开合屋盖结构的地震动参数应根据其基本状态、非基本状态以及活动屋盖运行状态分别确定。

**4.6.2** 对于基本状态,应采用建筑物所在地区设计使用年限的地震动参数;对于非基本状态,可根据结构的等效服役年限对地震动参数进行折减,但折减系数不应小于 0.5。对于活动屋盖运行状态可不进行抗震验算,但应按现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 的有关规定采取相应的抗震构造措施。

## 4.7 活动屋盖运行荷载

**4.7.1** 应根据驱动系统的特点确定作用于活动屋盖结构的牵引

力, 应根据活动屋盖各种可能位置确定台车的最不利荷载。

**4.7.2** 对采用轮轨方式移动的开合屋盖, 应根据情况计入横向推力的影响。活动屋盖偏斜运行时, 轨道承受的横向推力  $P_s$  应按下列公式计算:

$$P_s = \frac{1}{2} \sum P_i \cdot \lambda \quad (4.7.2-1)$$

$$\lambda = \frac{0.15}{6} \left( \frac{S}{a} - 2 \right) + 0.05, 2 \leq \frac{S}{a} \leq 8 \quad (4.7.2-2)$$

$$\lambda = 0.05, \frac{S}{a} \leq 2 \quad (4.7.2-3)$$

$$\lambda = 0.2, \frac{S}{a} \geq 8 \quad (4.7.2-4)$$

式中:  $P_s$ ——单侧轨道承受的横向推力(kN);

$\sum P_i$ ——轨道受横向推力一侧的最不利轮压之和(kN);

$\lambda$ ——水平横向载荷系数, 与活动屋盖跨度  $S$  及台车有效轴距  $a$  有关;

$S$ ——活动屋盖结构跨度(m);

$a$ ——台车有效轴距(m)。

**4.7.3** 轨道接头和轨道不平整引起的水平及竖向冲击动力荷载, 应根据台车平稳运行时的水平与竖向作用力乘以运行冲击系数  $\varphi$  确定。运行冲击系数  $\varphi$  按下式计算:

$$\varphi = 1.1 + 0.058v\sqrt{h} \quad (4.7.3)$$

式中:  $\varphi$ ——运行冲击系数;

$v$ ——台车运行速度(m/s);

$h$ ——轨道接头处两轨道面的高度差(mm)。

**4.7.4** 活动屋盖结构在非事故状态下运行移动时, 计算可不考虑惯性力和制动力的影响。

## 4.8 偶然事故荷载

**4.8.1** 偶然事故荷载包括由制动失灵产生的撞击、非对称停靠及

脱轨引起的荷载效应。

## I 撞 击

4.8.2 当终点行程开关失灵,活动屋盖以额定速度冲击缓冲器时,采用弹簧缓冲器及液压缓冲器的活动屋盖运行撞击力分别按下列公式计算:

$$P_{ct} = \frac{\sum G_i}{gs} v^2 \quad (4.8.2-1)$$

$$P_{ct} = \frac{\sum G_i}{2gs} v^2 \quad (4.8.2-2)$$

式中: $\sum G_i$ ——活动屋盖自重载荷总和(kN);

$v$ ——额定运行速度(m/s);

$g$ ——重力加速度( $m/s^2$ );

$s$ ——缓冲器压缩量(m)。

4.8.3 活动屋盖发生撞击时,最大撞击力应按下式计算:

$$P_{cmax} = \varphi_c P_{ct} \quad (4.8.3)$$

式中: $P_{cmax}$ ——开合屋盖运行最大撞击力;

$\varphi_c$ ——撞击动力系数。对于弹簧缓冲器, $\varphi_c$ 取1.25;对于液压缓冲器, $\varphi_c$ 取1.5;

$P_{ct}$ ——活动屋盖以额定速度冲击缓冲器的撞击力。

## II 非对称停靠

4.8.4 对于有多个可移动单元的活动屋盖结构,当机械或控制系统故障导致移动单元停止于不对称或者非正常位置时,应考虑其对支承结构产生的不利荷载效应。

## III 脱 轨

4.8.5 驱动控制系统应设置防掀翻反力轮或者夹轨器,以防活动屋盖在开合过程中遭遇风荷载与地震作用时产生倾覆或漂移。

## 4.9 荷载组合

4.9.1 开合屋盖结构应按承载能力极限状态和正常使用极限状

态分别进行荷载组合,并取各自最不利的组合进行设计。除应符合本规程外,尚应符合现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 和《建筑抗震设计规范》GB 50011 的有关规定。

**4.9.2** 计算活动屋盖运行过程中的变形时,可采用正常使用极限状态的频遇组合;计算活动屋盖变形对其他结构和驱动设备的影响时,应采用标准组合。

**4.9.3** 活动屋盖结构事故荷载的承载能力极限状态设计时,仅考虑永久荷载标准值和本规程第 4.8 节规定的偶然事故荷载标准值的组合。

**4.9.4** 对于基本组合,开合屋盖结构荷载效应组合的设计值  $S_d$  应从下列组合中取最不利值确定:

1 由可变荷载控制的效应设计值,应按下式进行计算:

$$S_d = r_G S_{SGk} + r_G \sum_{j=1}^m S_{RGk_j} + r_{Q_i} r_{L_i} S_{Q_{i,k}} + \sum_{i=2}^n r_{Q_i} r_{L_i} \psi_{c_i} S_{Q_{i,k}} \quad (4.9.4-1)$$

式中: $r_G$ ——永久荷载分项系数,按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 的规定采用;

$r_{Q_i}$ ——第  $i$  个可变荷载分项系数,按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 的规定采用;

$r_{L_i}$ ——第  $i$  个可变荷载考虑设计使用年限的调整系数;

$S_{SGk}$ ——支承结构的永久荷载效应值;

$S_{RGk_j}$ ——第  $j$  个活动屋盖单元在特定位置时(全开、全闭或运行过程中的位置)的永久荷载效应值;

$S_{Q_{i,k}}$ ——按第  $i$  个可变荷载  $Q_{i,k}$  计算的荷载效应值,其中  $S_{Q_{i,k}}$  为诸可变荷载效应中起控制作用者;

$\psi_{c_i}$ ——第  $i$  个可变荷载  $Q_i$  的组合值系数,按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 的规定采用;

$m$ ——活动屋盖的单元数量;

$n$ ——参与组合的可变荷载数。

2 由永久荷载控制的效应设计值,应按下式进行计算:

$$S_d = r_G S_{SGk} + r_G \sum_{j=1}^m S_{RGk_j} + \sum_{i=1}^n r_{Q_i} r_{L_i} \psi_{c_i} S_{Q_i,k} \quad (4.9.4-2)$$

4.9.5 开合屋盖结构荷载标准组合的效应设计值  $S_d$  应按下式进行计算:

$$S_d = S_{SGk} + \sum_{j=1}^m S_{RGk_j} + S_{Q_1,k} + \sum_{i=2}^n \psi_{c_i} S_{Q_i,k} \quad (4.9.5)$$

## 5 结构体系

### 5.1 一般规定

- 5.1.1 开合屋盖结构体系应与屋盖开合方式及驱动控制系统相适应。
- 5.1.2 活动屋盖应采用自重轻、变形适应能力强的结构形式,宜采用高强材料。
- 5.1.3 活动屋盖宜采用对称结构。当采用不对称结构时,应采取减少结构不对称变形的影响。
- 5.1.4 活动屋盖单元的台车数量和位置应根据活动单元重量、台车负载能力等因素综合确定,各台车宜受力均衡。
- 5.1.5 活动屋盖应进行运行过程外形干涉检验,避免活动屋盖运行时发生碰撞。
- 5.1.6 活动屋盖的下部支承结构应具有足够的刚度,以满足活动屋盖在运行过程时对轨道变形的要求。
- 5.1.7 活动屋盖的屋面坡度应有利于排水,并宜避免不利积雪的影响。

### 5.2 活动屋盖结构

- 5.2.1 活动屋盖采用网格结构时,应符合下列规定:
  - 1 宜采用沿跨度方向传力为主的结构形式,如平面桁架、空间桁架及张弦桁架等单向受力结构;
  - 2 结构两端的推力宜均衡、对称,并应选择适当的约束条件,减小结构推力;
  - 3 应通过设置水平支撑体系等方式,确保单向受力结构平面外的稳定性;

4 当活动屋盖采用网架、网壳等空间结构时,应通过合理控制结构刚度,使各支座反力均匀;

5 直接与台车相连的活动屋盖边桁架,应具有变形适应能力,避免活动屋盖运行时变形差异对桁架内力产生显著影响;

6 活动屋盖单元重心的平面投影位置,宜接近该活动屋盖单元各台车所形成的多边形的形心位置;

7 水平旋转开启活动屋盖应设置旋转导向轴。导向轴宜仅承受屋盖开启过程中的水平动力荷载,并应设置多道平面圆弧轨道,形成以旋转导向轴为圆心的同心圆弧。

**5.2.2** 活动屋盖采用刚性折叠结构时,应符合下列规定:

1 刚性折叠活动屋盖宜通过自身各组件的相对运动,以折叠方式实现屋面开启与关闭。刚性折叠活动屋盖宜采用抗弯折性能良好的膜材作为屋面覆盖材料。

2 刚性折叠结构各组件之间宜通过锁铰相连接。折叠结构应根据展开成型后的稳定平衡方式分为自锁式结构与外加锁式结构。

3 折叠部位的锁铰节点应具有足够的强度和刚度,并保证所连接杆件在折叠、展开过程中运动平稳。

**5.2.3** 活动屋盖采用柔性折叠结构时,应符合下列规定:

1 柔性折叠结构以放射状折叠收纳式开合为主,应选用可折叠的膜材。

2 在支承结构的开口部位应设置刚性环梁,并根据建筑造型及支承条件等确定活动屋盖膜材的收纳位置。

3 柔性折叠结构的几何形态应保证膜面折叠与展开运动自如。闭合时膜面不得松弛,与支承结构应贴合紧密。在全开与全闭状态下,应分别满足强度、刚度和稳定性要求。

## 5.3 支承结构

**5.3.1** 根据建筑功能与使用要求,活动屋盖可直接支承于室外地

面、下部支承结构或固定屋盖结构之上,也可设置专门服务于活动屋盖的支承结构。支承结构的刚度应能满足活动屋盖运行过程中的变形要求。

**5.3.2** 当活动屋盖支承于地面时,宜在地面标高以下设置沟槽作为活动屋盖运行机构的支承结构,驱动系统宜设置在沟槽内,沟槽顶面应设置活动盖板。沟槽宜采用钢筋混凝土结构,周边土体应满足地基承载力及变形要求。

**5.3.3** 当活动屋盖支承于下部支承结构顶部时,下部支承结构不宜设置结构缝。

**5.3.4** 当活动屋盖支承于固定屋盖结构时,固定屋盖的几何形态应适应活动屋盖的运行需求。固定屋盖、支承轨道桁架以及开合洞口周边构件应具有足够的刚度,对活动屋盖全开、全闭以及运行状态下的各种可变荷载具有充分的适应性。固定屋盖结构的最大变形不宜大于其跨度的  $1/400$ 。

**5.3.5** 支承结构应满足在各种荷载工况作用以及活动屋盖各种可能位置时的承载力与刚度要求,直接支承轨道的杆件应满足活动屋盖最不利位置时的强度和变形要求。

**5.3.6** 支承结构和活动屋盖设计时,应考虑基础不均匀沉降的不利影响。当活动屋盖支承于地面时,相邻基础间的变形差不应大于其间距的  $1/1200$ 。

## 5.4 围护结构

**5.4.1** 活动屋盖围护结构宜选择轻质、保温隔热性好、透光率高的膜材、聚碳酸酯板或金属板做为屋面材料。

**5.4.2** 围护结构宜选用柔性或弯曲刚度小的材料,以适应活动屋盖运行过程中的变形。

**5.4.3** 屋面材料和连接件应进行强度验算和构造设计,并考虑积雪滑落的不利影响,确保屋面围护结构在各种荷载与作用下的安全性。

**5.4.4** 活动屋盖单元之间、活动屋盖与支承结构之间接缝处的构造应满足相应的防雨、防风、防冻等密闭要求。

**5.4.5** 围护结构设计应避免局部积水和积雪,在雪荷载较大地区,应加大屋面坡度和采取必要的防积雪措施。

**5.4.6** 采用膜材作为屋面材料时,应适当施加预应力,防止膜面在风荷载振动时引起膜材损伤。膜材应符合现行行业标准《膜结构技术规程》CECS158 和《膜结构用涂层织物》FZ/T 64014 的有关规定。

**5.4.7** 对于采用膜材作为屋面材料的折叠开合屋盖,设计时应考虑由于膜材反复折叠而导致的膜材强度降低,宜适当增加安全储备,并应采取措施防止雨、雪或冰凌进入折叠后膜面的凹面。

**5.4.8** 开合屋盖的声学效果应根据建筑声学环境要求进行评估,并采取相应的吸音措施。

## 6 结构计算

### 6.1 一般计算原则

6.1.1 开合屋盖结构应分别进行活动屋盖全开状态与全闭状态下静力计算、稳定性分析和抗震验算,并对活动屋盖运行过程中的不利位置进行相应计算。

6.1.2 荷载与作用的效应组合应按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 和本规程第 4 章的有关规定计算。地震作用效应和其他荷载效应的组合应按现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 的有关规定计算。

6.1.3 结构分析模型应根据结构实际情况确定,并能准确反映结构中各构件的实际受力状况,包括台车作用的正确模拟。应采用整体模型分析活动屋盖、固定屋盖与支承结构间的相互作用。

6.1.4 当开合屋盖结构施工安装阶段与使用阶段受力情况差异较大时,应根据施工安装顺序验算在不同阶段相应荷载作用下的结构内力和位移。

6.1.5 开合屋盖中膜结构的设计应按现行协会标准《膜结构技术规程》CECS 158 的有关规定执行。膜材可不考虑地震作用的影响,但膜结构的支承结构应按现行国家有关标准进行抗震设计。

6.1.6 对轨道、台车、端止缓冲器等机械部件应进行专门计算分析。

### 6.2 静力计算

6.2.1 静力计算应考虑永久荷载作用、可变荷载作用以及开合状态的影响,可变荷载包括活荷载、风荷载、雪荷载、温度作用和可能产生的积水荷载。

**6.2.2** 与驱动系统相连的部件进行承载力验算时,活动屋盖移动引起的内力应乘以 1.1 倍的动力放大系数。

**6.2.3** 支承结构设计应计算活动屋盖驱动力、横向推力以及端止缓冲器等对支承结构的作用。

**6.2.4** 对于活动屋盖运行过程中的多个位置,应分别建立整体计算模型,进行包络设计,包含全开状态、全闭状态和运行中的位置。

**6.2.5** 在设计使用年限内,年开合次数不多于 400 次的开合屋盖结构,结构构件可不进行疲劳验算。

### 6.3 稳定性计算

**6.3.1** 拱形、曲面壳形开合屋盖结构应进行稳定承载力计算,可按几何非线性的有限元法进行荷载一位移全过程分析。活动屋盖跨度大于 60m 或悬挑长度大于 20m 的开合屋盖结构,计算中宜考虑材料非线性的影响。

**6.3.2** 对于全开状态、全闭状态和运行状态应分别进行稳定性计算,除按满跨均布荷载外,尚应计算半跨等活荷载不利分布的情况。对有多个活动屋盖单元的结构,应根据控制系统特点,进行运行移动中活动屋盖单元不同步时的稳定性分析。

**6.3.3** 稳定承载力计算应考虑初始几何缺陷的影响。初始几何缺陷的分布可采用第一阶整体屈曲模态,最大值可取结构跨度的 1/300。

**6.3.4** 杆件的计算长度应根据杆件的边界条件及侧向支撑情况确定。

### 6.4 抗震计算

**6.4.1** 进行开合屋盖结构抗震设计时,应对基本状态和非基本状态分别进行地震作用效应分析,应计算水平地震与竖向地震的作用。对于质量和刚度分布不对称的结构,应计入双向水平地震作用下扭转效应的影响。

**6.4.2** 活动屋盖跨度大于 60m 或悬挑长度大于 20m、体型复杂的结构应采用时程分析法进行地震作用效应补充验算。当固定屋盖跨度或屋盖支承结构平面尺寸大于 300m 时,宜进行多点地震输入的效应分析。

**6.4.3** 采用时程分析法时,应按建筑场地类别和设计地震分组选用多组实际强震记录和人工模拟的加速度时程曲线。当取三组加速度时程曲线时,结构地震作用效应宜取时程分析法计算结果的包络值和振型分解反应谱法计算结果的较大值;当取七组及七组以上的加速度时程曲线时,结构地震作用效应可取时程分析法计算结果的平均值和振型分解反应谱法计算结果的较大值。

**6.4.4** 进行结构整体地震效应分析时,下部支承结构为钢结构,阻尼比可取 0.02;支承结构为混凝土结构,阻尼比可取 0.025~0.035。

**6.4.5** 开合屋盖结构构件的截面抗震验算与抗震构造措施应符合现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 的有关规定。支承结构中,与台车相邻的构件长细比不宜大于 120。

## 7 驱动系统

### 7.1 一般规定

**7.1.1** 活动屋盖驱动系统的驱动力和制动力应满足结构荷载设计值的要求,确保在最不利运行状态下能够驱动活动屋盖可靠运行。机电设备应满足国家现行有关标准的要求。

**7.1.2** 跨度较大的屋盖宜采用多台驱动装置,应保证多台驱动机构同步运行。当活动屋盖由多个单元构成时,应分别设置独立的驱动系统,确保各单元沿轨道同步移动,防止出现相互干涉或卡滞现象。

**7.1.3** 开合运行速度应与行程相匹配。平行移动式活动屋盖的运动速度不宜大于 5m/min,旋转式活动屋盖最远端的运动线速度不宜大于 5m/min。

**7.1.4** 应结合活动屋盖的外形尺寸和开合方式,设置清轨板、防倾翻装置、行程检测装置、终点缓冲限位装置以及安全插销等安全设备。

**7.1.5** 驱动系统应根据活动屋盖造型、体量、开合方式及支承结构等条件确定,并应操作简单,维护方便。宜设置检修马道,在轨道的任何部位均可进行维护,部件拆卸更换方便。

**7.1.6** 当活动屋盖采用简支体系时,轨道宜设置在支承结构之上,当活动屋盖悬挑跨度较大时,可将轨道设置于活动屋盖。

**7.1.7** 台车顶部应与活动屋盖可靠连接,宜设置高度与侧向调节装置。在活动屋盖运行过程中,各台车应受力均匀。台车的横向推力与水平位移不应超过设计文件规定的限值。

**7.1.8** 台车车轮的宽度与直径应满足实际空间的需要,车轮承载力计算应符合现行国家标准《起重机设计规范》GB/T 3811 的有

关规定。

**7.1.9** 轨道设计应符合现行国家标准《起重机设计规范》GB/T 3811 的有关规定,并满足竖向承压、受拉与侧向压力的需求,轨道刚度应满足台车运行的要求。

**7.1.10** 轨道加工制作应采用强度高、耐磨性好的材料,接头部位应平整光滑,加工精度应满足现行国家标准《起重机、车轮及大车和小车轨道公差》GB/T 10183.1 的有关要求。可采用设置伸缩缝的方式克服超长轨道温度变形的影响。安装轨道梁时,应在主体结构永久荷载全部施加后进行精细调节定位。

## 7.2 轮式驱动系统

**7.2.1** 轮式驱动系统可适用于无坡度或小坡度的直线或圆弧刚性轨道上运行的大型与重型活动屋盖。

**7.2.2** 根据荷载大小,活动屋盖台车可采用单轨单轮、单轨双轮、双轨多轮等多种形式。

**7.2.3** 电动机与减速器宜随活动屋盖一起运动,采用移动电缆或滑触线供电。车轮与轨道之间应具有可靠的摩擦力,避免出现打滑现象。

**7.2.4** 轮式驱动系统的轨道宜置于地面或刚性支承结构上,轨道平整度与平行度应满足台车运行要求。

**7.2.5** 轮式驱动系统的轨道应能承受台车竖向压力、倾覆上掀力与侧向推力。

## 7.3 牵引驱动系统

**7.3.1** 牵引驱动系统可适用于活动屋盖在水平面或空间的轨道上运行。

**7.3.2** 台车宜设置垂直反钩轮或垂直反滚轮,防止活动屋盖在风荷载、地震作用及运行水平力作用下的漂移与车轮脱轨。垂直于轨道方向宜设置弹簧装置,提高活动屋盖对垂直于轨道方向变形

的适应能力。在台车上宜安装压力、位移等传感器,根据检测数据和设定条件,动态调整台车运动参数,确保活动屋盖可靠运行。

**7.3.3** 开合屋盖牵引钢丝绳应选用强度高、柔韧性好、耐久性好的产品,并符合现行国家标准《重要用途钢丝绳》GB 8918 的有关规定。钢丝绳直径不宜大于卷筒直径的  $1/20$ ,安全系数不应小于 6.0。牵引钢丝绳与活动屋盖的连接构造应避免产生偏心力。

**7.3.4** 对于采用牵引钢丝绳的开合屋盖结构,控制系统应具有冗余校验功能。每根钢丝绳上均宜安装测力检测装置,实时判断牵引钢丝绳有无异常或断索情况。

**7.3.5** 牵引钢丝绳转向滑轮、托辊等的固定支架应与主体结构可靠连接,并应考虑牵引连接部件对主体结构产生的反作用力。

## 7.4 齿轮齿条驱动系统

**7.4.1** 齿轮齿条驱动可适用于活动屋盖在平面轨道上移动,当活动屋盖存在倾覆上掀力时,应设置防倾覆装置。

**7.4.2** 活动屋盖运行距离大于活动屋盖单元尺寸时,驱动装置宜设置在活动屋盖上,齿条固定于支承结构;活动屋盖运行距离小于活动屋盖单元尺寸时,驱动装置宜设置在支承结构上,齿条固定于活动屋盖。

**7.4.3** 齿轮和齿条应选用高强度、高耐磨性的钢材。齿轮齿条间应良好啮合,并采取防锈蚀与防积灰措施。

**7.4.4** 齿轮、齿条加工制作应满足现行国家标准《齿轮几何要素代号》GB/T 2821 与《齿条精度》GB/T 10096 的有关规定。

## 7.5 链条链轮驱动系统

**7.5.1** 链条链轮驱动系统可用于在水平直线轨道或水平圆弧轨道上运行的活动屋盖。

**7.5.2** 链条链轮驱动系统的驱动装置宜设置于活动屋盖,链条固定于支承结构。也可将驱动装置设置于支承结构,链条固定于活

动屋盖。链轮和链条应可靠啮合。

**7.5.3** 在活动屋盖驱动系统中,链条的安全系数不宜小于 4.0。

**7.5.4** 链条与链轮的设计与加工制作应符合现行国家标准《齿形链和链轮》GB/T 10855 的有关规定。

## **7.6 液压驱动系统**

**7.6.1** 液压驱动系统可用于绕轴转动、行程较短的水平移动或组合转动的开合方式,也可用于活动屋盖固定插销等部件的驱动。

**7.6.2** 当活动屋盖采用液压驱动时,驱动系统应设置于支承结构上,避免高压油管过长。

**7.6.3** 液压驱动系统的负载能力额定值与设计负载值之比不应小于 1.4。

**7.6.4** 液压驱动系统除应符合现行行业标准《液压千斤顶检定规程》JJG 621 中的有关规定外,尚应保证液压系统密封的可靠性。

**7.6.5** 在有液压源的前提下,液压马达可代替电动机使用。

## 8 控制系统

### 8.1 一般规定

- 8.1.1 控制系统的设计应与开合驱动系统及活动屋盖运行方式相适应。
- 8.1.2 控制系统设计应确保活动屋盖运行平稳,并对外部条件的变化具有较好的适应性。
- 8.1.3 活动屋盖应按预先设定的参数精确运行,避免活动屋盖出现偏斜或活动屋盖单元之间相互干涉。
- 8.1.4 控制系统应具备快速响应能力,及时反应设备状态。一旦出现意外情况,应能快速纠正或切断电源,确保人员、结构和设备的安全。
- 8.1.5 开合屋盖控制系统设计应具有适当的冗余度,当某一部位出现故障时,不应影响其他部位工作。

### 8.2 控制系统

#### I 常规控制

- 8.2.1 大型开合屋盖多台车驱动时宜采用总线控制技术,各活动屋盖单元均应设置独立的控制系统,活动屋盖的数量和终端控制器的数量相一致,各片屋盖的终端控制器通过总线和控制室的主控设备相连。
- 8.2.2 各活动屋盖单元的控制子站和该单元上的驱动设备、检测设备应构成闭环系统,屋盖终端控制器按照指令程序运行。
- 8.2.3 在活动屋盖运行过程中,相互关联的运动部件,应按互锁逻辑线路方式进行设计。
- 8.2.4 大、中型开合屋盖宜优先采用自动控制操作系统,并可实

现自动与手动两种操作模式之间的自由切换。

**8.2.5** 控制系统中应设置紧急停止开关按钮,屋盖运行遇到故障或特殊情况时,应随时可以触动开关,切断运行主回路。

**8.2.6** 控制台及相关电气设备应放置在专门的控制室中。控制室应邻近活动屋盖位置,并具有良好的视野,便于随时观察活动屋盖运行情况。控制台应设置电源开关、分部件操作开关、速度选择开关、图像显示设备和通信设备等。

## II 驱动同步控制

**8.2.7** 控制系统在启动阶段应保证匀加速,避免对结构和机械部件产生冲击;在运行阶段应保持匀速,各驱动装置相互协调,确保同步控制;在停止阶段,应在预设减速位置设置触发器,保证各点匀减速。

**8.2.8** 控制系统设计应实现对驱动机械的高精度同步控制。对电动机的控制可利用变频技术实现调速,液压马达可通过伺服系统对流量的控制实现调速。

**8.2.9** 活动屋盖运行过程中,沿轨道方向的运行允许偏差不应大于相邻轨道中心距的 $1/2000$ ,且不应大于 $10\text{mm}$ ,到达终点时的允许偏差不应大于 $5\text{mm}$ 。

## III 台车均载控制

**8.2.10** 台车可设置均载装置,通过控制系统调节装置的位移量,使各台车在运行过程中的荷载基本相同。

## IV 运行纠偏控制

**8.2.11** 控制系统应设置偏斜运行紧急制动装置,当活动屋盖偏斜率超过规定范围时应能紧急制动,避免由于多个驱动系统不同步产生的安全隐患。

**8.2.12** 台车可设置压力传感器、位移传感器和调整装置,主控器通过数据采集分析,及时调整台车动作及驱动力大小,随时纠正活动屋盖的运行姿态。

## V 检测、监控与自诊断系统

**8.2.13** 控制系统应具有冗余校验功能,根据检测信号互相之间

的关联关系,编制自诊断程序。一旦某一关联关系遭到破坏,可判断为故障。

**8.2.14** 活动屋盖应设置实时监测系统,实现活动屋盖运行状态及各机械部件状况的远程监控,并应保证控制室与屋面及地面之间的通讯畅通。

**8.2.15** 大型活动屋盖应设置大气温度与风速监测仪器,每个活动屋盖单元应设置不少于一个风速仪。

**8.2.16** 控制系统应带有信号采集与自诊断功能,实现设备运行状态的实时显示,并通过工控机存储器准确记录运行数据。系统发生故障,可通过历史记录查找原因。

### **8.3 安全应急保障措施**

**8.3.1** 驱动系统应采用断电锁紧设计,能单独提供停电制动功能。

**8.3.2** 控制系统在正常情况下,可通过采集和发出信号控制活动屋盖运行。当控制系统无信号或发生故障时,驱动系统应自动停止工作。

**8.3.3** 在进行活动屋盖驱动控制系统设计时,可根据消防设计要求预设相应的火灾报警联动功能。

**8.3.4** 开合屋盖建筑防雷装置应根据活动屋盖驱动控制系统的具体情况合理设置。

## 9 防腐蚀与防火设计

### 9.1 防 腐 蚀

9.1.1 开合屋盖结构防腐蚀设计应以基本状态为基础。常开状态宜按室外结构进行防腐蚀设计；常闭状态可按室内结构进行防腐蚀设计，当密闭条件较差时，其防腐蚀等级应适当提高。当钢结构处于露天环境时，应按室外结构采取防腐蚀措施。

9.1.2 开合屋盖结构防腐蚀设计应符合现行行业标准《建筑钢结构防腐蚀技术规程》JGJ/T 251 的有关规定。

9.1.3 涂层构造与涂层厚度应根据结构的使用环境类别、腐蚀性分级和防护层使用年限确定。

9.1.4 活动屋盖结构构件的防腐蚀做法应与支承结构的防腐蚀做法协调一致。

9.1.5 驱动与控制系统部件的防腐蚀做法应根据其设计使用年限确定，驱动控制系统部件与结构构件之间连接件的防腐蚀标准应与所连接的主体结构相同。对易磨损的部位应采取特殊的防腐蚀措施。

9.1.6 在使用过程中，应对钢结构及驱动控制系统定期进行防腐蚀检查和维修。

### 9.2 防 火

9.2.1 开合屋盖结构消防设计应符合现行国家标准《建筑设计防火规范》GB 50016 的有关规定，宜采用活动屋盖与消防报警联动的方式，并结合活动屋盖的基本状态确定其耐火等级、耐火极限及相应的防火措施。必要时，可通过消防性能化评估确定其相应的防火标准。

**9.2.2** 开合屋盖结构体系中预应力钢结构部分的防火应符合现行协会标准《预应力钢结构技术规程》CECS 212 的有关规定。

**9.2.3** 开合屋盖结构的防火涂料应符合现行协会标准《钢结构防火涂料应用技术规程》CECS 24 的有关规定,并应与防腐涂装有较好的相容性。优先选用轻质、强附着性的薄型防火涂料。防火涂料的施工应符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205 的有关规定。

**9.2.4** 驱动控制系统设计时,除应符合相关行业标准外,尚应符合开合屋盖建筑的消防要求。

## 10 制作、安装、调试与验收

### 10.1 一般规定

**10.1.1** 下部支承结构和活动屋盖在工厂加工制作前,应对原材料进行复验;在驱动与控制系统组装前,应检查所有成品标准件的合格证明,并在加工前对非标准加工件的原材料进行复验。结构构件及驱动控制系统部件均应经检验合格后方可运至现场安装。

**10.1.2** 施工时应根据设计文件编制施工详图、工艺控制流程及现场安装方案,保证结构与驱动控制系统达到设计要求。

**10.1.3** 施工时应重点控制与活动屋盖运行有关的轨道、啮合部件、台车、连接法兰及驱动系统等部件的安装精度,保证活动屋盖平稳运行。

**10.1.4** 调试应分为部件单独调试、部件综合调试以及全系统综合调试等阶段。

**10.1.5** 验收可根据安装工程的进度分阶段进行,对隐蔽工程随时验收并做好记录。

### 10.2 加工制作与出厂检验

**10.2.1** 开合屋盖钢结构的加工制作应符合现行国家标准《钢结构施工规范》GB 50755 和《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205 的有关规定。

**10.2.2** 大型开合屋盖结构应结合施工顺序进行模拟分析,并根据活动屋盖全闭状态与全开状态下的变形规律和变形值采取预变形措施。

**10.2.3** 当轨道梁的支承结构分段加工制作时,宜进行预拼装。

**10.2.4** 台车出厂前应进行检测与调试,检测与调试项目应包括

下列内容：

- 1 各转动组件如车轮、轴承、齿轮及链传动等回转情况检查；
- 2 按 1.25 倍的设计最大承载能力进行静载试验；
- 3 带自驱动装置的主动台车应进行通电空载运行试验；
- 4 台车液压装置带载调整能力等动作试验和保压、密封试验；
- 5 车轮和轨道额定运行速度下的承载能力与过载能力测试、台车运动阻力测试、刹车系统可靠性测试。

**10.2.5** 安全锁定装置应在出厂前通电试运转，锁销动作方向、顺序符合设计要求，将动作极限位置调整到位，限位反馈信号检测正常。

**10.2.6** 出厂前应对电气控制程序进行调试，并对控制系统通讯网络的稳定性、可靠性进行测试，通过多工况组合模拟测试，优化和改进控制程序及控制参数。

### **10.3 轨道和活动屋盖安装与调试**

**10.3.1** 轨道与活动屋盖的安装应包括轨道系统、活动屋盖钢结构、台车、牵引设备、电气控制设备及监控系统等部分。

**10.3.2** 活动屋盖安装与调试应编制专项施工方案，经设计、监理会签，并经专项评审后方可实施，并由第三方进行安装全过程的施工监控。

**10.3.3** 活动屋盖安装时应保证对下部支承结构的作用力均匀对称并不超过设计限值。活动屋盖的安装、调试应在支承结构卸载完成后进行。

**10.3.4** 轨道安装前，应对轨道支承构件的标高、水平位置及垂直度进行复测，并清理轨道梁与轨道贴合面的铁屑、杂物、锈蚀及焊渣等杂物。

**10.3.5** 轨道安装宜从中间向两侧推进，通过在垂直轨道方向调整定位，减小活动屋盖对轨道的水平推力。

**10.3.6** 活动屋盖安装时,宜在支承结构顶面设置临时支撑代替台车承托活动屋盖,活动屋盖安装完成后,将台车与活动屋盖、轨道临时固定,并精确调整各台车与活动屋盖的相对位置。

**10.3.7** 全部台车与活动屋盖连接完成后,可根据竖向液压千斤顶压力传感器测量结果,对实际承担载荷与设计载荷偏差超过10%的台车进行微调。

**10.3.8** 在现场调试前,首先应进行静态检查,检查应包括下列内容:

- 1 动力线路、控制与通讯线路、接地保护线的连接;
- 2 各种信号开关、检测电气元件的安装位置与方式;
- 3 机柜对地电阻的安全性;
- 4 配电柜内配线有无接触不良。

**10.3.9** 活动屋盖运行前,应进行通电检查与测试,并应包括下列内容:

- 1 总电源动力线电压;
- 2 从站控制柜电源有无开路现象;
- 3 急停按钮、限位开关及保护开关的动作信号;
- 4 控制系统网络通讯信号;
- 5 电机运转方向与动力驱动装置动作;
- 6 压力传感器与位移传感器读数;
- 7 编码器等检测元件标定。

**10.3.10** 活动屋盖运行调试时,应按不同的运行加速度、速度、移动距离进行手动与自动运行控制调试,并在此基础上进行控制参数与程序的优化。

**10.3.11** 活动屋盖应进行单元同步运行调试与活动屋盖整体纠偏测试,通过修正闭环控制参数实现同步。

**10.3.12** 活动屋盖应进行开合极限行程检测,按额定运行速度全程自动开合,当活动屋盖运行及启停状态满足要求后,精确固定锁定和缓冲装置。

**10.3.13** 活动屋盖调试过程中应记录相关数据,并形成调试报告。

## **10.4 工程验收**

**10.4.1** 开合屋盖结构应按子分部工程,根据现行国家标准《建筑工程施工质量验收统一标准》GB 50300、《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204、《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205 和本规程的有关规定,对工程的施工质量进行验收。

**10.4.2** 支承结构、活动屋盖结构与驱动控制系统应在屋盖运行调试完成后进行总验收,验收时应选取活动屋盖处于全闭与全开两个状态的位形作为验收状态,验收过程中应执行不少于两次开闭循环运动。

**10.4.3** 验收时应着重对连接件可靠性、轨道变形、台车点位差、累计误差等进行检查,对紧急制动响应及时性、开合运行的速度、平稳性、同步性、噪音、密闭性等指标进行检验。

### **I 支承结构与活动屋盖验收**

**10.4.4** 预埋钢板应分别测量四个角点的相关尺寸,条形预埋件除应测量角点外,中间测点间距不应大于1m。对于超过设计图纸规定的正误差应进行修正。

**10.4.5** 轨道顶面平整度的允许误差不应大于1/1000,活动屋盖全闭状态下,相邻两根平行轨道同一位置标高的相对偏差不应大于5mm,轨道接头两侧高差不应大于0.5mm,轨道接头的平面错位不应大于0.5mm,轨道接头处间隙不应大于2mm。

**10.4.6** 齿条顶面平整度的允许误差不应大于1/2000,全长误差不应大于3mm。齿条接缝时应有可靠的定位装置。

**10.4.7** 验收时应重点检查驱动系统、防倾翻设备、终点安全插销或锁定装置安装的可靠性,以及各相关连接件的连接紧密性、屋盖的密闭性等。

**10.4.8** 验收时应应对活动屋盖与台车的连接、牵引系统与活动屋

盖的连接、轨道或齿条与轨道梁的连接、终点安全锁销与活动屋盖的连接、车档与支承结构的连接进行全数检查。

## II 驱动控制系统验收

**10.4.9** 驱动控制系统验收应包括外观检查、安全设备测试、机械性能测试、设备运动状态测试、电气系统检查、控制系统各项功能测试及安全标记检查等。

**10.4.10** 开合屋盖结构安全功能测试应包括：工作行程开关和超行程开关、与主机的连锁开关、安全防护装置、超速保护、超载保护、同步运动误差控制、紧急停止控制、不同控制点控制元件互锁及安全警示信号等项目。

**10.4.11** 机械性能测试应包括速度测试、停位精度测试、同步精度测试及设备连锁运动测试，应符合下列规定：

1 速度测试：开合屋盖的实际开合时间与设计开合时间偏差不宜大于10%。在设计调速范围内，特别是低速运转时，调速设备能够平稳运转；

2 停位精度测试：在额定速度条件下，通过活动屋盖全行程运动，检查终点停位精度，反复次数不少于3次，测量停位误差；

3 同步精度测试：在额定速度条件下，进行成组设备的同步精度测试。设定不同行程（通常为全行程的1/3以上）进行3次测量，组内设备最大绝对误差值的平均值不超过设计的允许误差；

4 设备连锁运动测试：在正常连锁条件下，设备应按指令运转；当人为模拟事故状态、破坏连锁条件时，设备应停止运转。反复3次以上，每次均可正确工作。

**10.4.12** 电气系统设备检验与测试应包括柜内布线是否整齐美观、导线及电缆接头是否牢固、标记是否准确、设备使用元件与设计是否相同，并应进行电气系统绝缘、接地、屏蔽、电源隔离、电压保护以及电磁兼容等性能的测试。电气设备的验收除应符合本规程外，尚应符合现行国家和行业有关标准的规定。

**10.4.13** 控制系统检查测试应包括下列内容：

- 1 控制台的各种开关/按钮、指示灯、显示器等的正确性；
- 2 在主控制台,按设计要求和程序进行手动、自动、预选等操作,必要时手动介入进行功能检查,采用便携式操作盒(盘)进行上述操作检查；

- 3 紧急停机功能及信号显示正确性；

- 4 警示系统(光、声)信号盒与设备状态的一致性。

**10.4.14** 对于体育场馆或用于会议的开合屋盖结构,应进行噪声测试。屋盖以额定速度运行,测试3处~5处,距离屋盖噪音源最近的座席处噪音级别应符合设计文件规定。

# 11 使用与维护

## 11.1 一般规定

11.1.1 活动屋盖机械驱动系统与控制系统属于特种设施应通过严格的管理,确保其安全性、可靠性与耐久性。

11.1.2 应根据开合屋盖构造形式及其驱动方式,制定详细的操作使用说明书,严格按照操作使用说明书的规定进行实施操作,并应符合本规程附录 D 的规定。

11.1.3 开合屋盖的使用手册应对运行条件(气温、风力、降雪、降雨等)、维护注意事项,以及发生事故时的应急预案做出明确规定。

11.1.4 活动屋盖开合过程应通过人员或摄像监控设备进行全面监测。

11.1.5 活动屋盖系统应进行定期检查或临时检查,及时发现并排除驱动系统的故障。

11.1.6 定期检查钢结构部件之间的紧固件,钢结构与台车的紧固件不得松动。定期检查屋面的密封情况,发现漏水等现象应及时处理。

## 11.2 运行管理

11.2.1 活动屋盖操作应由经过专门培训、具备资格的被授权人员承担。操作人员应熟练掌握屋盖机械装置的操作规程、安全措施、警示标记、信号含义和故障紧急处理措施,并具备预知故障、判断和处理事故的能力。

11.2.2 管理人员应熟悉和掌握屋盖驱动机械设备和电气控制系统的基本构造、工作原理、主要功能、可能出现的故障和排除方法、故障紧急处理流程、设备的关键零部件、易损件及其更换方法。

**11.2.3** 定期对设备进行运行、保养,确保机械零件处于良好的工作状态,驱动和控制系统应保持稳定运行至设计使用年限。

**11.2.4** 为确保设备处于良好状态,应对活动屋盖设备进行三个层级的维护管理和定期大修:

1 一级维护管理为日常维护管理,由操作人员自行管理,设备定期的卫生清扫擦拭、定期加注润滑油;检查维护各开关/按钮的灵敏性;检查各紧固件有无松弛情况。如长期不使用,宜定期(不得多于1个月)开启、关闭屋盖一次。及时更换坏损电器元件,并填写维护保养记录单;

2 二级维护管理宜每年进行1次,可请相关厂家协助,检查更新机械设备的易损件;检查更新损毁的电器元件;检查屋盖各处密封件有无损毁和需更换等。应填写维护保养记录表;

3 三级维护管理每3年进行一次,必须请相关厂家或集成商协助,强制报废、更新已过时的电气元器件;更换已老化的电线电缆;更换磨损严重的机械零部件;更换屋盖接缝处的所有密封条,确保屋盖的机械性能达到良好状态;

4 根据活动屋盖的实际情况,制定大修年限,宜6年或9年进行一次,大修内容包括:检查钢结构的锈蚀情况,并重新涂刷油漆;检查屋面材料有无破损并进行维修保养;强制报废和更新已过时的电气元器件;更换机械设备的易损件等,确保大修后的活动屋盖机械性能达到最佳状态。

**11.2.5** 电气设备均应防雨、防潮。当出现淋雨和受潮现象时,应立即擦拭干净并烘干,绝缘性能符合要求后方可通电使用。

**11.2.6** 易耗零件应有必要储备,或建立通畅的供货渠道满足及时更换的需求。

## 附录 A 活动屋盖基本开合方式

**A.0.1** 活动屋盖沿平行轨道移动开合可采用水平移动[图 A.0.1(a)]、空间移动[图 A.0.1(b)]和竖直移动[图 A.0.1(c)]三种方式。

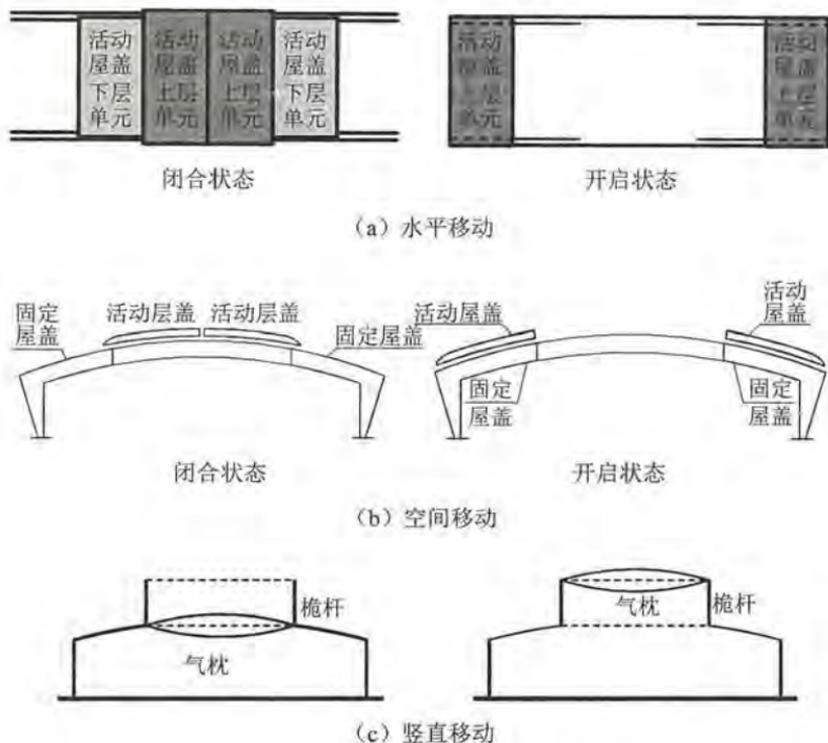
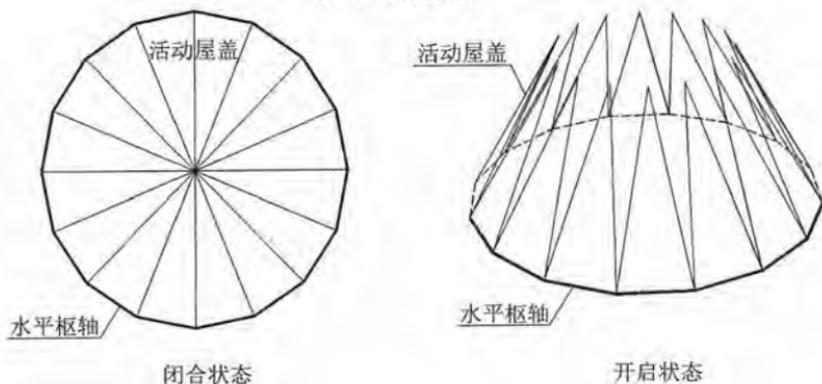


图 A.0.1 平行轨道移动开合方式

**A.0.2** 活动屋盖绕枢轴转动开合可包括绕竖向枢轴转动[图 A.0.2(a)]和绕水平枢轴转动[图 A.0.2(b)]两种方式。



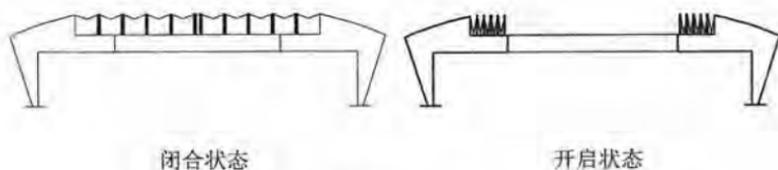
(a) 绕竖向枢轴转动



(b) 绕水平枢轴转动

图 A.0.2 绕枢轴转动开合方式

A.0.3 活动屋盖折叠移动开合可包括水平折叠[图 A.0.3(a)]、空间折叠[图 A.0.3(b)]和放射状折叠[图 A.0.3(c)]三种方式。



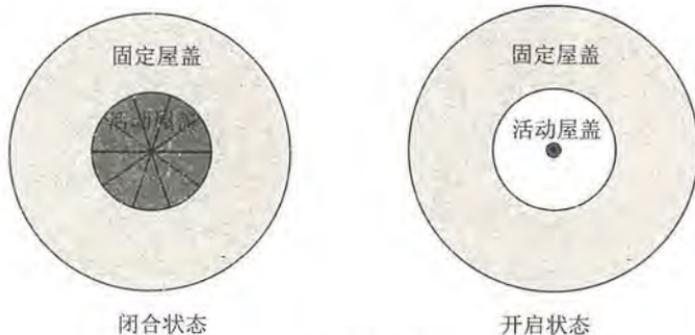
(a) 水平折叠



闭合状态

开启状态

(b) 空间折叠



固定屋盖

固定屋盖

闭合状态

开启状态

(c) 放射状折叠

图 A.0.3 折叠移动开合方式

## 附录 B 围护结构局部风压系数极值计算方法

**B.0.1** 围护结构的局部风压系数极值可按下列公式确定：

$$\hat{C}_p = \bar{C}_p \pm g\bar{\sigma} \quad (\text{B.0.1-1})$$

$$\bar{C}_p = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_{p,i} \quad (\text{B.0.1-2})$$

$$C_{p,i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \quad (\text{B.0.1-3})$$

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma_i \quad (\text{B.0.1-4})$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_j - C_{p,i})^2} \quad (\text{B.0.1-5})$$

对于迎风面围护结构,  $g=3.0$

对于非迎风面围护结构, 峰值因子  $g$  取 10 个以上样本的风压时程峰值因子的平均值；

$$g = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g_i \quad (\text{B.0.1-6})$$

式中： $\bar{C}_p$ ——样本数不少于 10 的风压时程平均风压系数的平均值；

$C_{p,i}$ ——第  $i$  个风压时程的平均风压系数；

$x_j$ ——风压时程  $j$  时刻的值；

$n$ ——风压时程样本点数；

$\bar{\sigma}$ ——脉动风压均方根的平均值, 样本数不少于 10 的风压时程均方根平均值；

$\sigma_i$ ——第  $i$  个风压时程的均方根；

$g$ ——风压时程的峰值因子；

$g_i$ ——第  $i$  个风压时程的峰值因子, 可按表 B.0.1-1、B.0.1-2 取值。

表 B.0.1-1 式(B.0.1-1)取正号时风压时程峰值因子  $g_t$  的取值

		三阶中心矩																				
		-2.0	-1.8	-1.6	-1.4	-1.2	-1.0	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
1.6	2.0	2.0	2.0	2.1	2.1	2.1	2.2	2.2	2.3	2.4	2.4	2.5	2.6	2.7	2.9	3.0	3.2	3.4	3.7	4.0	4.3	4.4
1.8	2.0	2.0	2.0	2.1	2.1	2.2	2.2	2.3	2.4	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.1	3.3	3.6	3.9	4.3	4.4	4.4
2.0	2.0	2.0	2.0	2.1	2.1	2.2	2.3	2.3	2.4	2.4	2.5	2.6	2.7	2.9	3.0	3.3	3.5	3.9	3.9	4.3	4.4	4.4
2.2	2.0	2.0	2.1	2.1	2.2	2.2	2.3	2.4	2.4	2.5	2.6	2.8	3.0	3.2	3.4	3.8	3.9	4.0	4.3	4.4	4.4	4.4
2.4	2.0	2.0	2.1	2.1	2.2	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.9	3.1	3.3	3.7	3.8	4.0	4.1	4.3	4.4	4.4	4.4
2.6	2.0	2.0	2.1	2.1	2.2	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.8	3.0	3.2	3.6	3.7	3.9	4.1	4.1	4.3	4.4	4.4	4.4
2.8	2.0	2.0	2.1	2.1	2.2	2.2	2.3	2.4	2.6	2.7	2.9	3.1	3.5	3.6	3.8	4.0	4.1	4.1	4.3	4.4	4.4	4.4
3.0	2.0	2.0	2.1	2.1	2.2	2.2	2.3	2.4	2.6	2.7	3.0	3.3	3.5	3.7	3.9	4.0	4.1	4.2	4.3	4.4	4.4	4.4
3.2	2.0	2.0	2.1	2.1	2.2	2.2	2.3	2.4	2.6	2.9	3.1	3.4	3.6	3.8	4.0	4.1	4.2	4.3	4.4	4.4	4.4	4.5
3.4	2.0	2.0	2.1	2.1	2.2	2.2	2.3	2.5	2.7	3.0	3.3	3.5	3.7	3.9	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.5	4.5	4.6
3.6	2.0	2.0	2.1	2.1	2.2	2.2	2.3	2.6	2.9	3.1	3.4	3.6	3.8	4.0	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.6	4.6	4.7
3.8	2.0	2.0	2.1	2.1	2.2	2.2	2.5	2.7	3.0	3.2	3.5	3.7	3.9	4.1	4.2	4.4	4.5	4.6	4.6	4.6	4.7	4.7
4.0	2.0	2.0	2.1	2.1	2.2	2.3	2.6	2.8	3.1	3.3	3.6	3.8	4.0	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.8	4.8
4.2	2.0	2.0	2.1	2.1	2.2	2.4	2.7	3.0	3.2	3.4	3.7	3.9	4.1	4.2	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.8	4.8	4.9
4.4	2.0	2.0	2.1	2.1	2.3	2.6	2.8	3.1	3.3	3.5	3.8	4.0	4.1	4.3	4.5	4.6	4.7	4.8	4.8	4.8	4.9	4.9

四阶中心矩

续表 B.0.1-1

		三阶中心矩																				
		-2.0	-1.8	-1.6	-1.4	-1.2	-1.0	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
4.6	2.0	2.0	2.1	2.2	2.4	2.7	2.9	3.2	3.4	3.6	3.8	4.0	4.2	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	5.0	5.0	
4.8	2.0	2.0	2.1	2.3	2.5	2.8	3.0	3.2	3.5	3.7	3.9	4.1	4.3	4.4	4.6	4.7	4.8	4.9	5.0	5.0	5.0	
5.0	2.0	2.0	2.1	2.4	2.6	2.9	3.1	3.3	3.6	3.8	4.0	4.2	4.4	4.5	4.6	4.8	4.9	5.0	5.0	5.1	5.1	
5.2	2.0	2.0	2.2	2.5	2.7	3.0	3.2	3.4	3.6	3.9	4.1	4.2	4.4	4.6	4.7	4.8	4.9	5.0	5.1	5.1	5.2	
5.4	2.0	2.1	2.3	2.6	2.8	3.0	3.3	3.5	3.7	3.9	4.1	4.3	4.5	4.6	4.8	4.9	5.0	5.1	5.1	5.2	5.2	
5.6	2.0	2.2	2.4	2.7	2.9	3.1	3.3	3.6	3.8	4.0	4.2	4.4	4.5	4.7	4.8	4.9	5.0	5.1	5.2	5.2	5.3	
5.8	2.1	2.3	2.5	2.7	3.0	3.2	3.4	3.6	3.9	4.1	4.3	4.4	4.6	4.7	4.9	5.0	5.1	5.2	5.2	5.3	5.3	
6.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.1	3.3	3.5	3.7	3.9	4.1	4.3	4.5	4.7	4.8	4.9	5.0	5.1	5.2	5.3	5.3	5.4	

表 B.0.1-2 式(B.0.1-1)取负号时风压时程峰值因子  $g_t$  的取值

		三阶中心矩																				
		-2.0	-1.8	-1.6	-1.4	-1.2	-1.0	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
1.6	4.4	4.3	4.0	3.7	3.4	3.2	3.0	2.9	2.7	2.6	2.5	2.4	2.4	2.3	2.2	2.2	2.1	2.1	2.0	2.0	2.0	
1.8	4.4	4.4	4.3	3.9	3.6	3.3	3.1	2.9	2.8	2.7	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2	2.2	2.1	2.1	2.0	2.0	2.0	
2.0	4.4	4.4	4.3	3.9	3.9	3.5	3.3	3.0	2.9	2.7	2.6	2.5	2.4	2.3	2.3	2.2	2.1	2.1	2.0	2.0	2.0	
2.2	4.4	4.4	4.3	4.0	3.9	3.8	3.4	3.2	3.0	2.8	2.6	2.5	2.4	2.4	2.3	2.2	2.2	2.1	2.1	2.0	2.0	
2.4	4.4	4.4	4.3	4.0	4.0	3.8	3.7	3.3	3.1	2.9	2.7	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2	2.2	2.1	2.1	2.0	2.0	

续表 B.0.1-2

		三阶中心矩																				
		-2.0	-1.8	-1.6	-1.4	-1.2	-1.0	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
2.6	4.4	4.4	4.4	4.3	4.1	4.1	3.9	3.7	3.6	3.2	3.0	2.8	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2	2.2	2.1	2.1	2.0	2.0
2.8	4.4	4.4	4.3	4.1	4.1	4.0	3.8	3.5	3.5	3.5	3.1	2.9	2.7	2.6	2.4	2.3	2.2	2.2	2.1	2.1	2.0	2.0
3.0	4.4	4.4	4.3	4.2	4.1	4.0	3.9	3.7	3.7	3.5	3.3	3.0	2.7	2.6	2.4	2.3	2.2	2.2	2.1	2.1	2.0	2.0
3.2	4.5	4.4	4.4	4.3	4.2	4.1	4.0	3.8	3.6	3.6	3.4	3.1	2.9	2.6	2.4	2.3	2.2	2.2	2.1	2.1	2.0	2.0
3.4	4.6	4.5	4.5	4.4	4.3	4.2	4.1	3.9	3.7	3.7	3.5	3.3	3.0	2.7	2.5	2.3	2.2	2.2	2.1	2.1	2.0	2.0
3.6	4.7	4.6	4.6	4.5	4.4	4.3	4.2	4.0	3.8	3.6	3.6	3.4	3.1	2.9	2.6	2.3	2.2	2.2	2.1	2.1	2.0	2.0
3.8	4.7	4.7	4.6	4.6	4.5	4.4	4.2	4.1	3.9	3.7	3.7	3.5	3.2	3.0	2.7	2.5	2.2	2.2	2.1	2.1	2.0	2.0
4.0	4.8	4.8	4.7	4.6	4.5	4.4	4.3	4.2	4.0	3.8	3.6	3.3	3.1	2.8	2.6	2.3	2.2	2.2	2.1	2.1	2.0	2.0
4.2	4.9	4.8	4.8	4.7	4.6	4.5	4.4	4.2	4.1	3.9	3.7	3.4	3.2	3.0	2.7	2.4	2.2	2.2	2.1	2.1	2.0	2.0
4.4	4.9	4.9	4.8	4.8	4.7	4.6	4.5	4.3	4.1	4.0	3.8	3.5	3.3	3.1	2.8	2.6	2.3	2.2	2.1	2.1	2.0	2.0
4.6	5.0	5.0	4.9	4.8	4.7	4.6	4.5	4.4	4.2	4.0	3.8	3.6	3.4	3.2	2.9	2.7	2.4	2.2	2.1	2.0	2.0	2.0
4.8	5.0	5.0	5.0	4.9	4.8	4.7	4.6	4.4	4.3	4.1	3.9	3.7	3.5	3.2	3.0	2.8	2.5	2.3	2.1	2.0	2.0	2.0
5.0	5.1	5.1	5.0	5.0	4.9	4.8	4.6	4.5	4.4	4.2	4.0	3.8	3.6	3.3	3.1	2.9	2.6	2.4	2.1	2.0	2.0	2.0
5.2	5.2	5.1	5.1	5.0	4.9	4.8	4.7	4.6	4.4	4.2	4.1	3.9	3.6	3.4	3.2	3.0	2.7	2.5	2.2	2.0	2.0	2.0
5.4	5.2	5.2	5.1	5.1	5.0	4.9	4.8	4.6	4.5	4.3	4.1	3.9	3.7	3.5	3.3	3.0	2.8	2.6	2.3	2.1	2.0	2.0
5.6	5.3	5.2	5.2	5.1	5.0	4.9	4.8	4.7	4.5	4.4	4.2	4.0	3.8	3.6	3.3	3.1	2.9	2.7	2.4	2.2	2.0	2.0
5.8	5.3	5.3	5.2	5.2	5.1	5.0	4.9	4.7	4.6	4.4	4.3	4.1	3.9	3.6	3.4	3.2	3.0	2.7	2.5	2.3	2.1	2.0
6.0	5.4	5.3	5.3	5.2	5.1	5.0	4.9	4.8	4.7	4.5	4.3	4.1	3.9	3.7	3.5	3.3	3.1	2.8	2.6	2.4	2.2	2.0

四阶中心矩

## 附录 C 太阳辐射引起的材料温升计算方法

### C.1 太阳辐射强度计算方法

C.1.1 太阳辐射强度中,水平面和垂直面的太阳辐射总强度  $G_H$  应根据国家现行标准《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》GB 50736 的有关规定确定,非水平面和垂直面上的直接辐射强度  $G_D$ 、散射辐射强度  $G_{d0}$  与反射辐射强度  $G_R$  分别按下列公式计算:

$$G_D = \frac{G_H}{\sin\beta + C} \cos\theta \quad (\text{C. 1. 1-1})$$

$$G_{d0} = \frac{CG_H}{\sin\beta + C} \times \frac{1 + \cos\alpha}{2} \quad (\text{C. 1. 1-2})$$

$$C = 7.8763 \times 10^{-2} - 4.2177 \times 10^{-4} \times N + 1.9908 \times 10^{-5} \times N^2 - 1.0607 \times 10^{-7} \times N^3 + 1.5024 \times 10^{-10} \times N^4 \quad (\text{C. 1. 1-3})$$

$$G_R = \rho_g G_H \times \frac{1 - \cos\alpha}{2} \quad (\text{C. 1. 1-4})$$

式中: $\beta$ ——太阳高度角;

$C$ ——水平面上散射辐射与垂直入射的直接辐射的比值;

$\theta$ ——太阳光线入射角,若  $\cos\theta$  小于 0,表示表面处于太阳阴影中;

$\alpha$ ——入射面法线与水平面法线之间的夹角;

$\rho_g$ ——地面或水平面的辐射反射率,光滑地面取 0.2,绿化地取 0.05;

$N$ ——从 1 月 1 日算起的年序日。

### C.2 太阳辐射引起的构件温升计算方法

C.2.1 太阳辐射作用下,钢板的温度可由下式进行计算:

$$T = \frac{G + f(T_a, \cos\alpha) + h(T_a - 273.15) - 203.84}{h + 5.857} \quad (\text{C. 2. 1-1})$$

$$G = \varepsilon(G_D + G_{\text{diff}} + G_R) \quad (\text{C. 2. 1-2})$$

$$f(T_a, \cos\alpha) = (\alpha_1 + \alpha_2 \cos\alpha) T_a^4 \times 10^{-8} \quad (\text{C. 2. 1-3})$$

式中:  $T$ ——钢板温度( $^{\circ}\text{C}$ );

$T_a$ ——室外温度峰值(K);

$G$ ——钢板吸收的太阳辐射强度( $\text{W}/\text{m}^2$ ),对于阴影面的太阳辐射不计入直接太阳辐射强度  $G_D$ ;

$\varepsilon$ ——结构外表面太阳辐射热的吸收系数,可按表 C. 2. 2 采用;

$h$ ——结构外表面对流热交换系数( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ),根据式 (C. 2. 6)确定;

$\alpha_1, \alpha_2$ ——系数,可按表 C. 2. 1 取值,表中未列出的  $k$  值所对应的  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  值可线性插值求得。

表 C. 2. 1  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  取值表

$k$	1.00	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05	1.06	1.07
$\alpha_1$	4.411	4.503	4.598	4.696	4.797	4.900	5.007	5.116
$\alpha_2$	-0.129	-0.221	-0.316	-0.414	-0.515	-0.618	-0.725	-0.834
$k$	1.08	1.09	1.10	1.11	1.12	1.13	1.14	1.15
$\alpha_1$	5.229	5.345	5.464	5.587	5.713	5.842	5.975	6.111
$\alpha_2$	-0.947	-1.063	-1.182	-1.305	-1.431	-1.560	-1.693	-1.829

注: $k$ 为系数, $k = [\text{地面温度}(^{\circ}\text{C}) + 273.15] / [\text{室外峰值温度}(^{\circ}\text{C}) + 273.15]$ 。

**C. 2. 2** 计算太阳辐射作用下的结构或构件温度作用效应时,应考虑构件表面太阳辐射吸收系数的影响。常用面漆/防火涂料的太阳辐射吸收系数  $\varepsilon$  可按表 C. 2. 2 采用。

表 C. 2. 2 常用面漆/防火涂料的太阳辐射吸收系数  $\varepsilon$

面漆颜色/防火涂料类别	太阳辐射吸收系数
白色	0. 40
黄色	0. 61
灰色	0. 75
红色	0. 81
绿色	0. 86
超薄型防火涂料	0. 35
薄型防火涂料	0. 44
厚型防火涂料	0. 83

C. 2. 3 夏季箱形截面构件的翼缘板和腹板温度可根据本规程第 C. 2. 1 条确定。阴面钢板不考虑太阳直接辐射作用, 由于管内空气和钢材热传导引起的温度增大系数取 1. 1。

C. 2. 4 太阳辐射作用下 H 型钢的上翼缘和下翼缘的温度应按本规程式(C. 2. 1-1)~式(C. 2. 1-3)确定, 下翼缘一半区域受太阳直射辐射; 腹板各点处的温度由上下翼缘板的温度值插值确定。

C. 2. 5 太阳辐射作用下圆钢管的温度按本规程式(C. 2. 1-1)和式(C. 2. 1-2)确定, 钢管背光面最低温度计算时不考虑太阳直射辐射强度, 迎光面最高温度处的倾角  $\alpha$  和入射角  $\theta$  可按式(C. 2. 5-2)~(C. 2. 5-7)确定, 背光面最低温度处的倾角  $\alpha_s$  可按式(C. 2. 5-8)确定; 其余各处温度按式(C. 2. 5-1)确定。

$$t(\omega) = t_{\max} - (t_{\max} - t_{\min}) \sin \omega \quad 0^\circ < \omega \leq 360^\circ \quad (\text{C. 2. 5-1})$$

$$\cos \alpha = \frac{c}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (\text{C. 2. 5-2})$$

$$\alpha = \frac{\cos \phi_{\text{axis}} (\sin \phi \sin \phi_{\text{axis}} + \tan \beta \tan \beta_{\text{axis}}) - \cos \phi (\sin^2 \phi_{\text{axis}} + \tan^2 \beta_{\text{axis}})}{1 + \tan^2 \beta_{\text{axis}}} \quad (\text{C. 2. 5-3})$$

$$b = \frac{\sin\phi_{\text{axis}} (\cos\phi \cos\phi_{\text{axis}} + \tan\beta \tan\beta_{\text{axis}}) - \sin\phi (\cos^2\phi_{\text{axis}} + \tan^2\beta_{\text{axis}})}{1 + \tan^2\beta_{\text{axis}}} \quad (\text{C. 2. 5-4})$$

$$c = \frac{\tan\beta - \tan\beta_{\text{axis}} (\cos\phi \cos\phi_{\text{axis}} + \sin\phi \sin\phi_{\text{axis}})}{1 + \tan^2\beta_{\text{axis}}} \quad (\text{C. 2. 5-5})$$

$$\cos\theta = \sin\xi \quad (\text{C. 2. 5-6})$$

$$\cos\xi = \frac{\cos\phi \cos\phi_{\text{axis}} + \sin\phi \sin\phi_{\text{axis}} + \tan\beta \tan\beta_{\text{axis}}}{\sqrt{1 + \tan^2\beta} \sqrt{1 + \tan^2\beta_{\text{axis}}}} \quad (\text{C. 2. 5-7})$$

$$\alpha_s = \pi - \alpha \quad (\text{C. 2. 5-8})$$

式中： $t_{\text{max}}$ ——钢管最高温度值(°C)；

$t_{\text{min}}$ ——钢管最低温度值(°C)，通常为大气温度；

$\omega$ ——温度计算部位与最高温度位置在钢管截面内的偏离角；

$\alpha$ ——钢管最高温度处的倾角；

$\phi$ ——太阳方位角；

$\phi_{\text{axis}}$ ——钢管轴线方位角(轴线在水平面上的投影与正北方向顺时针夹角)；

$\beta_{\text{axis}}$ ——钢管轴线高度角(钢管轴线与水平面的夹角)；

$\xi$ ——太阳光线与圆管轴线的夹角；

$\alpha_s$ ——钢管最低温度处的倾角。

**C. 2. 6** 对流热交换系数  $h$  可按下列式计算：

$$h = \sqrt{[C_i (\Delta T)^{1/3}]^2 + [a V_0^b]^2} \quad (\text{C. 2. 6})$$

式中： $C_i$ ——自然对流系数，可按表 C. 2. 6 确定；

$\Delta T$ ——外表面和室外空气温度差(°C)；

$a, b$ ——常数，可按表 C. 2. 6 取值；

$V_0$ ——标准气象条件下的风速(m/s)。

表 C.2.6 自然对流系数  $C_i$  和常数  $a, b$

方 向	$C_i$	$a$	$b$
上风向	0.84	2.38	0.89
下风向	0.84	2.86	0.617

## 附录 D 活动屋盖操作指南

**D.0.1** 活动屋盖开合操作应按流程进行:检查清理障碍物→空载检查各个开关→打开附属的零部件→拔出终点锁紧插销→通电运转→到达终点后插上锁紧插销→切断电源。

**D.0.2** 活动屋盖开合操作前应完成下列工作:

- 1 检查清理轨道与机械设备上的一切障碍物,检查电线、电缆及接头、插座的连接情况;
- 2 空载检查各行程开关的可靠性;
- 3 至少两人协同操作,一人观察指挥,一人操作控制。

**D.0.3** 活动屋盖开启应按下列操作 1-进行:

1 接通控制台电源后,电源信号灯、终点锁紧信号灯和关闭到位终点信号灯亮;

2 开动终点电动推杆,拔出终点锁紧插销后,插销开锁信号灯亮;

3 解除相关设备的制动;

4 设定屋盖运行速度,接通屋盖开启回路,电动机通电运转,屋盖按照设定的速度运行,屋盖运行过程信号灯亮;

5 运行到位后,电动机停止运转,屋盖停止运行,运行过程信号灯灭,开启到位时终点到位信号灯亮;

6 开动终点插销电动推杆,插上锁紧插销,终点锁紧信号灯亮;

7 切断电源,屋盖开启完成。

**D.0.4** 活动屋盖闭合应按下列基本操作流程进行:

1 接通控制台电源后,电源信号灯、终点锁紧信号灯和开启到终点信号灯亮;

2 开动终点电动推杆,拔出终点锁紧插销后,插销开锁信号灯亮;

3 设定屋盖运行速度,接通屋盖关闭回路,电动机通电运转,屋盖按照设定的速度运行,屋盖运行过程信号灯亮;

4 运行到位后,电动机停止运转,屋盖停止运行,运行过程信号灯灭,关闭到终点时到位信号灯亮;

5 开动终点插销电动推杆,插上锁紧插销,终点锁紧信号灯亮;

6 切断电源,屋盖开启完成。

**D.0.5** 活动屋盖开合操作应符合下列规定:

1 活动屋盖开合操作时,风速与雪荷载均应小于设计允许限值;

2 每一步操作完成并发出相应信号后,方可进行下一步操作;

3 屋盖运动过程中,应注意观察电缆拖动装置的工作情况,避免出现电缆被拉坏的现象;

4 遇到紧急情况时,应立即停止设备运行。如果运行过程中突然停止工作,应检查排除故障后方可继续运行。

# 本规程用词说明

1 为便于在执行本规程条文时区别对待,对要求严格程度不同的用词说明如下:

1) 表示很严格,非这样做不可的:

正面词采用“必须”,反面词采用“严禁”;

2) 表示严格,在正常情况下均应这样做的:

正面词采用“应”,反面词采用“不应”或“不得”;

3) 表示允许稍有选择,在条件许可时首先应这样做的:

正面词采用“宜”,反面词采用“不宜”;

4) 表示有选择,在一定条件下可以这样做的,采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为:“应符合……的规定”或“应按……执行”。

## 引用标准名录

- 《建筑抗震设计规范》GB 50011
- 《建筑结构荷载规范》GB 50009
- 《建筑设计防火规范》GB 50016
- 《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153
- 《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204
- 《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205
- 《建筑工程施工质量验收统一标准》GB 50300
- 《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》GB 50736
- 《钢结构施工规范》GB 50755
- 《齿轮几何要素代号》GB/T 2821
- 《起重机设计规范》GB/T 3811
- 《重要用途钢丝绳》GB 8918
- 《齿条精度》GB/T 10096
- 《起重机、车轮及大车和小车轨道公差》GB/T 10183.1
- 《液压千斤顶检定规程》JJG 621
- 《齿形链和链轮》GB/T 10855
- 《建筑工程风洞试验方法标准》JGJ/T 338
- 《建筑钢结构防腐蚀技术规程》JGJ/T 251
- 《钢结构防火涂料应用技术规范》CECS 24
- 《膜结构技术规程》CECS 158
- 《预应力钢结构技术规程》CECS 212
- 《膜结构用涂层织物》FZ/T 64014

中国工程建设协会标准

开合屋盖结构技术规程

**CECS 417 : 2015**

条文说明

# 目 次

1	总 则 .....	(63)
2	术语和符号 .....	(64)
2.1	术语 .....	(64)
3	基本规定 .....	(65)
3.1	一般规定 .....	(65)
3.2	屋盖开合方式 .....	(66)
3.3	开合屋盖设计性能指标 .....	(69)
4	荷载和作用 .....	(71)
4.1	一般规定 .....	(71)
4.2	永久荷载与活荷载 .....	(71)
4.3	雪荷载 .....	(71)
4.4	风荷载 .....	(71)
4.5	温度作用 .....	(73)
4.6	地震作用 .....	(74)
4.7	活动屋盖运行荷载 .....	(75)
4.8	偶然事故荷载 .....	(76)
4.9	荷载组合 .....	(76)
5	结构体系 .....	(78)
5.1	一般规定 .....	(78)
5.2	活动屋盖结构 .....	(79)
5.3	支承结构 .....	(83)
5.4	围护结构 .....	(84)
6	结构计算 .....	(86)
6.1	一般计算原则 .....	(86)

6.2	静力计算	(86)
6.3	稳定性计算	(87)
6.4	抗震计算	(88)
7	驱动系统	(90)
7.1	一般规定	(90)
7.2	轮式驱动系统	(91)
7.3	牵引驱动系统	(92)
7.4	齿轮齿条驱动系统	(94)
7.5	链条链轮驱动系统	(95)
7.6	液压驱动系统	(96)
8	控制系统	(98)
8.1	一般规定	(98)
8.2	控制系统	(98)
8.3	安全应急保障措施	(100)
9	防腐蚀与防火设计	(101)
9.1	防腐蚀	(101)
9.2	防火	(101)
10	制作、安装、调试与验收	(103)
10.1	一般规定	(103)
10.2	加工制作与出厂检验	(103)
10.3	轨道和活动屋盖安装与调试	(104)
10.4	工程验收	(106)
11	使用与维护	(109)
11.1	一般规定	(109)
11.2	运行管理	(109)
附录 A	活动屋盖基本开合方式	(110)
附录 B	围护结构局部风压系数极值计算方法	(111)
附录 C	太阳辐射引起的材料温升计算方法	(113)

# 1 总 则

**1.0.1** 本条是开合屋盖设计与施工中应遵循的原则。

**1.0.2** 本规程适用于大中小型带有活动屋盖的工业建筑与民用建筑,如体育场馆、文化建筑及机库等有屋盖开合要求的建筑物和构筑物。活动屋盖的轨道可敷设于地面,或支承于混凝土结构或固定屋盖结构等下部支承结构。

**1.0.3** 设计时应根据建筑使用功能,结合建筑造型、地理环境、气象条件以及运营管理方式等情况,综合确定合理的结构体系与开合方式,选择与结构体系及开合方式相适应的驱动控制系统,且技术成熟、性能可靠、维护方便、运行成本较低。

**1.0.4** 本规程仅针对在开合屋盖设计、施工及使用过程中不同于常规建筑之处做出明确的要求和规定,故依据本规程进行设计与施工的同时,尚应符合国家其他现行有关标准的规定。

## 2 术语和符号

术语和符号根据现行国家标准《工程结构设计通用符号标准》GB/T 50132、《工程结构设计基本术语标准》GB/T 50083 的规定，并结合本规程的具体情况给出。

### 2.1 术 语

本规程共给出了 29 个与开合屋盖设计、制作与安装相关的专业术语，并从工程的角度赋予其特定的涵义，但不一定是其严密的定义。所给出的英文译名是参考国外某些标准拟定的，亦不一定是国际上的标准术语。

## 3 基本规定

### 3.1 一般规定

**3.1.2** 开启率是衡量开合屋盖建筑效能的重要指标,对于不同的建筑使用功能,屋面开启率要求不尽相同。在建筑概念方案设计阶段,应由建筑师、结构工程师和机械专业工程师密切配合,共同确定屋盖可开启的范围与开启形式。在满足建筑使用功能、确保结构合理和驱动控制可靠的前提下,严格控制活动屋盖质量与驱动动力。

**3.1.3** 结构设计的基本状态根据建筑使用情况通常分为常闭状态或常开状态,也可根据使用情况将常开状态与常闭状态同时作为结构设计的基本状态。所谓常闭状态,即活动屋盖以全闭状态为主,一般作为室内空间使用,如游泳馆、网球馆、健身中心、练习馆等,室内可设空调,运动场可配备人工草坪。所谓常开状态,即活动屋盖以全开状态为主,一般作为大型体育场,进行田径、足球等运动,通常无空调设备,可育有天然草坪。开合屋盖建筑的基本状态的确定对于建筑功能、开合操作管理、结构设计标准以及工程造价均有很大影响。

**3.1.4** 开合屋盖结构的荷载与作用在结构设计基本状态和非基本状态下,取值有所不同,本规程对风荷载、地震作用、温度作用、活动屋盖运行时的荷载以及偶然事故荷载等,均给出了具体规定。

**3.1.5** 开合屋盖的运行及维护管理与结构安全密切相关,这也是开合屋盖建筑不同于常规建筑的特有问题。应根据建筑规模、开启方式、基本状态、开合频率和驱动控制系统特点制定相应的运行操作与维护管理规定,确保活动屋盖运行安全可靠。

## 3.2 屋盖开合方式

**3.2.1** 活动屋盖的移动方式是开合屋盖设计的重要内容。确定开合方式时,应综合考虑建筑物的平面、立面、空间形体以及建筑使用功能、周边环境(包括地理环境、气象条件)等多种因素的影响。同时,应尽量避免采用过于复杂的开合方式,以降低设计与施工的难度,提高活动屋盖运行的可靠性。

**3.2.2** 根据活动屋盖的移动方式,开合屋盖主要包括沿平行轨道移动、绕枢轴转动和折叠移动三种基本的开合方式。

1 沿平行轨道移动是指活动屋盖单元沿若干互相平行的轨道进行移动的开合方式,根据轨道的形状和设置方向,包括水平移动、空间移动和竖直移动三种移动方式。

水平移动方式[图 A. 0. 1(a)]指活动屋盖单元沿着互相平行的水平直线轨道移动。根据屋盖的水平投影用平行线将建筑平面划分为活动屋盖覆盖部分与固定屋盖覆盖部分,通过活动屋盖平行移动的方式打开屋盖,这是一种相对简单、技术最为成熟的开合方式。由于其突出的安全性,为世界各国的大型开合屋盖结构广泛采用,如日本阿瑞卡体育场、海洋穹顶、美国休斯顿安然棒球场、澳大利亚国家网球中心以及我国的国家网球中心(钻石球场)等均采用此种开合方式。

空间移动方式[图 A. 0. 1(b)]指活动屋盖单元沿着有一定坡度的曲线轨道移动。由于活动屋盖的自重会产生一定的移动阻力,因此活动屋盖面积与开启率通常较小,且技术难度较大。但由于容易满足建筑外形的美观要求,随着技术的不断进步,空间移动方式越来越受到青睐。日本大分体育场、小松穹顶、荷兰阿姆斯特丹体育场、英国卡迪夫千年体育场以及我国的南通体育场、鄂尔多斯东胜体育场均采用了空间移动的开合方式。

竖直移动方式[图 A. 0. 1(c)]指活动屋盖沿竖直方向移动达到屋盖开闭的目的。此类移动方式要求活动屋盖的自重越轻越

好,如西班牙马德里 Vista Alegre 多功能体育场的活动屋盖采用了双层充气膜结构以减轻结构自重。

**2 绕枢轴转动**是指活动屋盖单元绕某一枢轴进行旋转移动的开合方式,根据枢轴的设置方向,包括绕竖向枢轴转动和绕水平枢轴转动两类。

**绕竖向枢轴转动**[图 A. 0. 2(a)]也称水平旋转方式,指活动屋盖在水平的圆弧形轨道上绕垂直方向的枢轴转动。采用这种开合方式的典型工程有日本福冈穹顶、美国匹兹堡市民体育场、威斯康星州米勒棒球场等。当开合屋顶有多个活动屋盖单元时,各单元也可绕各自的枢轴转动,如上海旗忠网球中心。

**绕水平枢轴转动**[图 A. 0. 2(b)]指活动屋盖绕某一水平方向的旋转轴转动打开。目前采用这种开合方式的基本上为小型开合屋盖结构,如德国 2000 年博览会 Venezuelan Pavillion。

沿平行轨道移动与绕枢轴转动的开合方式中,活动屋盖单元本身可视为刚性结构,其运动为刚体运动,因此属于刚性开合方式。

**3 折叠移动**指通过各种形式的折叠或褶皱将屋面材料折叠或卷绕起来,从而达到屋面开启的目的。根据屋面材料的折叠方向,折叠移动通常包括水平折叠[图 A. 0. 3(a)]、空间折叠[图 A. 0. 3(b)]和放射状折叠[图 A. 0. 3(c)]等形式。为更好地满足折叠的要求,折叠移动中通常采用可折叠性能良好的柔性膜材作为屋面材料,实际工程中也有利用玻璃等刚性材料作为屋面材料的例子。

在水平折叠与空间折叠方式中,主体承重结构通常是单向传力的桁架结构,屋盖的开合通过各榀桁架的相对移动实现,膜材支承于各榀桁架之间,屋盖闭合时膜材处于张紧状态,屋盖开启时膜材处于松弛状态。因此,在这两类折叠方式中,桁架是承重结构,膜材只是屋面覆盖材料,处于闭合状态的活动屋盖可理解为骨架支承膜结构,本规程将这两类折叠移动称为刚性折叠方式(见

5.2.2节)。桁架沿水平直线轨道移动时称水平折叠[图 A. 0. 3(a)],典型的工程实例有英国温布尔顿中心球场改造工程;桁架沿有一定坡度的曲线轨道移动时称空间折叠[图 A. 0. 3(b)],典型的工程实例有日本丰田体育场。

在放射状折叠中,通常由索网或索桁架为膜材提供支承,沿放射向布置的索网或索桁架本身固定不动,通过膜材的折叠(卷绕)或展开实现屋面的开合。在这类折叠方式中,膜材既是屋面覆盖材料,又与索网共同构成承重结构,因此处于闭合状态的活动屋盖可理解为张拉索膜结构,本规程将这类折叠移动称为柔性折叠方式(见 5.2.3 节)。该类折叠方式最早的工程实例是 1976 年的加拿大蒙特利尔奥林匹克体育场,但在使用中会受气候条件的影响而使开合运行出现故障甚至造成膜材撕裂,因此发展应用一度受到制约,一般仅用于小型的开合屋盖结构。随着技术的进步,近年来放射状折叠方式在大型开合屋盖中的应用逐渐增多,如西班牙萨拉戈萨体育场、德国法兰克福新商业银行体育场、加拿大温哥华 BC Place 等。

除了上述三种基本开合方式外,还有一种利用可展结构的开合性能,通过结构自身的折叠、展开运动实现屋盖开合的可展结构移动开合方式。可展结构(deployable structure)的基本特征是将收缩折叠成捆状或其他形状的结构迅速展开。可展结构的形式很多,如由交叉杆系(剪式单元)构成的网格型结构、由板式单元构成的折叠板结构等,主要用于需要快速安装和拆除的临时性、流动性结构。目前,这种开合方式尚处于起步阶段,真正应用于开合屋盖的实际工程尚不多见,可展结构技术发展的主要目的在于快速建造而不在于开合屋盖结构,因此本规程没有涉及可展结构移动开合方式。

**3.2.3 组合方式为屋盖中的单片开合单元存在两种或两种以上的移动方式或者尽管各开启屋盖单元的运动方式单一,但各开启单元的移动方式不同,存在两种或两种以上的移动方式。采用最**

多的就是水平移动加绕竖轴旋转的方式,另外还有各片活动屋盖采用不同运动模态进行组合的开合方式。

### 3.3 开合屋盖设计性能指标

#### I 设计控制指标

**3.3.1** 根据《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153 附录 A 的规定,破坏后果很严重的大型公共建筑,其安全等级应为一級。体育场馆的规模分级以及抗震设防类别,可按现行国家标准《体育建筑设计规范》JGJ 31 和《建筑工程抗震设防分类标准》GB 50223 的规定。

**3.3.2** 大跨度的开合屋盖结构属于对风荷载与雪荷载敏感的结构形式,在风荷载与雪荷载作用下容易发生事故和故障。结合《建筑结构荷载规范》GB 50009 的规定,开合屋盖结构设计时应取用 100 年重现期的基本风压与基本雪压。

**3.3.3** 台车是活动屋盖与固定屋盖间关键的联系部件,应充分保证其连接部件与锁定装置的安全性,避免出现连接部件与锁定装置先于结构构件破坏,造成活动屋盖滑落的情况。

#### II 变形控制指标

**3.3.5** 轨道支承结构因重力荷载引起的变形可以通过预起拱等措施消除。开合屋盖结构变形控制的目的是保证支承结构及轨道梁具有足够刚度,防止因变形过大影响活动屋盖运行。根据相关工程经验,当轨道梁挠度不大于其跨度的  $1/800$  且不大于 15mm、轨道在相邻台车之间的变形差不大于台车间距的  $1/1000$  且不大于 10mm 时,可以满足活动屋盖运行要求。

#### III 抗震性能指标

**3.3.6** 对于跨度大、体型复杂的开合屋盖结构应进行设防烈度地震与罕遇地震作用效应验算,弹塑性时程分析时应考虑几何非线性的影响。支承结构跨度大于 120m、活动屋盖跨度大于 60m 或悬挑长度大于 20m 的开合屋盖结构,均应通过抗震超限审查。

**3.3.7** 支承活动屋盖轨道的桁架、轨道梁、轨道及台车、与支承结构的连接构件和节点是开合屋盖的关键构件,应确保其抗震性能。与支承结构的连接构件和节点包括与轨道相邻区(网)格内的结构构件以及与这些构件相连的节点。

#### IV 开合驱动控制系统性能指标

**3.3.8** 驱动系统机械部件包括台车、电动机、减速器、牵引钢索、卷筒、液压元件等。控制系统为操作控制上述元件的电器设备,主要包括线路板、控制器、面板与开关等。

**3.3.9** 活动屋盖的年开合次数根据实际使用情况差异很大,从一年开启数次至数百次不等,通常情况下可按 400 次/年考虑。运行速度与使用功能、运行距离及牵引动力有关,根据具体情况变化范围较大,开启和关闭时间通常不大于 30min。

**3.3.10** 活动屋盖启动时与制动时的加速度或减速度主要与牵引动力及移动单元的重量有关,对于小型活动屋盖可取用较大值,大型活动屋盖可取用较小值。为减小对牵引动力和对支承结构及运行部件的冲击作用,可采用加速度或减速度分段控制的方式。

**3.3.11** 对于带有开合屋盖的体育场馆,其噪声限值要求通常指屋盖运行时距离噪音源最近座席处的机械噪声。

**3.3.12** 为了保证活动屋盖运行安全,其运行时应满足一定条件,本条提出对最大雪荷载和最大风速的限值。此外,运行时的环境温度也不应超过驱动控制系统所允许的温度范围。

## 4 荷载和作用

### 4.1 一般规定

4.1.1 控制活动屋盖与围护结构重量,旨在降低对驱动牵引力的需求,减轻支承结构负载,从而降低工程造价。

4.1.2 开合屋盖结构不同于常规结构的最大特点,是活动屋盖可以处于全开、全闭以及运行过程等多种位置,因而需要对活动屋盖处于不同位置时的工况进行分析,以保证结构安全。

### 4.2 永久荷载与活荷载

4.2.1 活动屋盖运行时,应移除悬挂物,此时,运行过程的结构分析可不考虑悬挂物的自重。

4.2.2 活动屋盖的集中荷载应布置在最不利位置进行验算。

### 4.3 雪荷载

4.3.2 在多雪地区,雪荷载是结构设计的主要控制因素,采用适当的除雪、融雪措施可获得较好的技术经济效果。在大跨度结构的积雪融化过程中,可能出现积冰等不利情况,故此,重要的开合屋盖结构应予适当考虑。

### 4.4 风荷载

4.4.1 大跨屋盖风荷载的空间分布模式复杂多样,结构的多个振型参与风致振动,振型耦合现象显著。《建筑结构荷载规范》GB 50009—2012 的条文说明中指出,屋盖结构不宜采用与高层建筑和高耸结构相同的风振系数。目前,国内外荷载规范、专著、论文中介绍了一些开合屋盖的风荷载取值,但数量不多,还不足以归纳

总结出开合屋盖结构常用体型的风荷载。另一方面,包括开合屋盖结构在内的大尺度屋盖结构的体型多种多样,很难像低矮房屋、高层建筑那样给出统一的体型系数或风压系数。因此,开合屋盖结构的风荷载通常需要利用风洞试验确定。

**4.4.3 局部风压系数极值  $\hat{C}_p$**  相当于国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009—2012 中阵风系数  $\beta_{gz}$  与局部体型系数  $\mu_{sl}$  的乘积。由于气流遇到屋盖阻碍时会发生气流分离、旋涡脱落、再附着等特殊的绕流现象,阵风系数已经不再适用于屋盖结构。因此,本规程未使用《建筑结构荷载规范》GB 50009 中的阵风系数的概念,直接采用围护结构的局部风压系数极值作为围护结构构件抗风设计风荷载的取值依据。

确定围护结构的风荷载不需要考虑围护构件的振动效应,根据风洞试验直接确定围护结构表面一点的风荷载极值(吸力或压力),首先根据附录 B.0.1 计算各风向角下围护构件的风荷载极值,然后确定围护构件全风向的风荷载最不利极值。

**4.4.5 风振响应(例如位移、内力、应力)的极值**可直接与其他荷载产生的效应进行组合,进行构件设计。但目前我国结构设计中,多采用荷载组合方式,故提供进行结构分析及设计所需的等效静力风荷载。

**4.4.6 等效静力风压系数  $\hat{C}_{pe}$**  相当于国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009—2012 中风振系数  $\beta_z$  与体型系数  $\mu_s$  的乘积。根据结构动力学或结构随机振动理论计算分析主体结构每个风向角风荷载作用下的风振响应(例如位移、内力、应力),按照风振响应极值等效的原则确定每个风向角情况下的等效静力风压系数。

与《建筑结构荷载规范》GB 50009 的表示方法类似,主体结构等效静力风压系数采用三分量表达,即平均风压系数、背景分量等效风压系数及共振响应等效风压系数。开合屋盖的跨度一般较大,其在风荷载作用下的风振响应常常包含多个振型的贡献,且振

型贡献率不一定随着振型阶数的增高而降低,故需选择参与振动的主导振型,并可以累积能量参与系数达到 90% 为依据确定截断振型,也可以直接采用风荷载本征模式激起的 Ritz 向量作为主导振型。

本条给出的等效静力风荷载表达方式参考了“Holmes J. D., Effective static load distributions in wind engineering[J], Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90 (2): 91—109”和 ISO《风荷载规范》(ISO 4354: 2009)。式(4.4.6-2)适用于单一风向荷载作用下指定结构动力响应(包括位移、内力或应力)极值的等效静力风压系数的计算。

计算背景响应、共振响应的等效静力风压系数及其贡献率的方法有多种,设计人员可参考“Katsumura, A., Tamura, Y. and Nakamura, O., Universal wind load distribution simultaneously reproducing largest load effects in all subject members on large-span cantilevered roof[J], Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007, 95 (9—11), 1145—1165”;“Kasperski M., A consistent model for the codification of wind loads[J], Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007, 95(9): 1114—1124”;“Zhou X, Gu M, Li G., Response grouping method for calculating equivalent static wind loads based on modified LRC[J]. Journal of Vibration Engineering, 2010, 2: 1—6”;“Yang Q, Chen B, Wu Y, et al. Wind-Induced Response and Equivalent Static Wind Load of Long-Span Roof Structures by Combined Ritz-Proper Orthogonal Decomposition Method[J]. Journal of Structural Engineering, 2013, 139 (6): 997—1008”等文献根据具体情况合理选定。

## 4.5 温度作用

### 4.5.1 结构施工合拢主要指结构形成较大体量、且变形受到边界

条件约束的情况。结构受到约束时,温度变化将在结构中产生内力。

**4.5.2** 本条给出的拉索线膨胀系数是在对钢绞线、钢丝束和钢丝绳线膨胀系数的相关理论研究和试验数据基础上得到。试验中钢绞线采用 $1\times 7\times 12.7$ 和 $1\times 7\times 15.2$ 两种规格,半平行钢丝束采用 $19\Phi 5$ 、 $37\Phi 5$ 、 $37\Phi 7$ 和 $55\Phi 7$ 四种规格,钢丝绳采用了直径为4.2mm、5.1mm、6.2mm、7.7mm、9.3mm、11mm和12.5mm七种规格。每种规格的拉索各取6根,分别采用空气和水域两种仪器各测试3根。其它材料的线膨胀系数参考国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009—2012确定。

**4.5.4** 开合屋盖的合拢温度一般可取合拢时的日平均温度,并应根据情况考虑太阳辐射的影响。进行结构设计时,往往难以准确把握施工工期,因此,结构合拢温度通常采用温度区间值,该区间值应涵盖施工中可能出现的合拢温度。

## 4.6 地震作用

**4.6.2** 在我国现行抗震设计方法中,多遇地震、设防烈度地震和罕遇地震50年的超越概率分别为63%、10%和2%~3%。地震的危险性程度主要取决于预期的使用年限以及可以承受的风险水平这两个因素。由于开合屋盖处于非基本状态与活动屋盖运行状态的时间较短,可根据建设地点、建筑功能与活动屋盖使用情况,取用低于基本状态的地震动参数,根据设定的地震作用进行结构计算分析。

日本建筑学会在《开合屋盖结构设计指南》中建议,运行状态开合屋盖的地震作用可根据设计人的判断适当降低,当经验不足时,可将地震作用降至50%左右。周锡元院士等研究了服役期内地震烈度的超越概率与年发生率和服役期之间的关系,提出一种用于估计不同服役期结构设防烈度的简便算法,可以反映设防烈度随服役期的变化情况,并给出了不同服役期结构的抗震设防烈

度。因此本条规定对于基本开合状态地震加速度不调整,对于非基本状态地震加速度可以折减,但折减系数不得小于 50%,是考虑了地震作用的不确定性而留有余地的。由于活动屋盖运行时间很短,调整后地震作用很小,可通过抗震构造以及制动系统的应急措施来保证安全性。

## 4.7 活动屋盖运行荷载

**4.7.1** 因活动屋盖运行时所处位置不同,移动荷载的方向与大小发生变化。在结构分析时,应充分考虑各台车荷载的不均匀性,必要时,可对台车作用于轨道的荷载适当放大。

**4.7.2** 台车偏斜运行时的水平横向荷载是指台车在作稳定状态的运行时,发生在它的导向装置(例如导向滚轮或车轮边缘)上由于导向的反作用引起的一种偶然出现的荷载。当活动屋盖沿平行轨道移动时,因轨道之间的距离、轨道本身的精度、开合屋盖的角度、直线轨道定位不准等因素,将在垂直轨道的方向产生水平侧向力。用横向荷载系数 $\lambda$ 乘以台车自重与额定载重量之和来计算。横向荷载系数 $\lambda$ 根据屋盖结构跨度和有效轮基距确定。

**4.7.3** 当结构沿轨道运行时,必须考虑轨道接头和轨道不平而引起的水平和竖向力。由于活动屋面的移动速度很慢,所以大部分情况下可以忽略这个竖向力,但若轨道竖向变形较大或者当轨道维修保养条件不好时,必须考虑这个冲击力的影响。我国国家标准《起重机设计规范》GB/T 3811—2008 中对因轨道接头、轨道不平等因素产生的力作了考虑。根据德国起重机标准《起重机 一般设计 第 3-1 部分:钢结构性能的极限状态和合格检验》(DIN CEN/TS 13001-3-1 Berichtigung 1—2006 )-General design 的规定,当移动速度不大于 60m/min 时,自重增大系数可按 1.1 考虑。

**4.7.4** 除特殊情况或事故情况外,应按慢速启动或制动原则进行驱动系统和控制系统设计,故可不考虑惯性力和制动力的影响。当有制动构造的情况,应考虑制动反力,即台车在水平面内进行制

动时,台车自重和承载量的水平惯性力,按该质量与运行减速度乘积的  $\varphi$  倍计算,但不大于主动车轮与轨道之间的黏着力, $\varphi$  可取 1.5,用来考虑台车突变时结构的动力效应。

## 4.8 偶然事故荷载

**4.8.3** 现行国家标准《起重机设计规范》GB/T 3811 中规定,当起重机运行速度小于 40m/min 时,不必考虑撞击力,但对于自重巨大的活动屋盖,虽然运行速度小于 40m/min,建议仍要考虑动载系数,并比对起重机的要求有所提高。根据经验,液压缓冲器的撞击动力系数大于弹簧缓冲器。

**4.8.4** 对于带有多片活动屋盖单元的结构,在正常情况下,各片活动屋盖应按照预先设定的运行程序进行移动,并遵循对称、同步的运行模式。当驱动或控制系统发生故障或进行检修时,活动屋盖的停止位置可能出现对结构受力不利的情况,在设计时需要给予相应的考虑。

**4.8.5** 由于活动屋盖与围护结构的自重较轻,风吸力往往起控制作用,因此一般需要在台车上设置防掀翻的反钩装置。此外,应有措施防止活动屋盖在地震时脱轨、碰撞等事故的发生。在地震多发地区设计大型开合屋盖结构时,应设置地震传感器,当活动屋盖运行中遭遇地震,且达到某一烈度时,夹轨器等刹车装置可将活动屋盖临时锁定在轨道之上,确保结构安全。

## 4.9 荷载组合

**4.9.2** 开合屋盖结构在满足一定的条件下才能进行开合操作,故运行时结构上的活荷载、雪荷载、风荷载等不同于设计基本状态。进行运行过程的承载能力极限状态计算时,仍应符合基本组合的相关规定;进行正常使用极限状态计算时,由于行走过程时间相对短暂,故可考虑采用频遇组合。

**4.9.3** 对偶然事故荷载组合的计算,关于结构抗力的取值应采用

材料强度标准值。

**4.9.4** 开合屋盖结构与传统建筑结构的最大区别在于活动屋盖可以处于全开、全闭以及运行过程中的任意位置。因此,在进行结构计算分析时,工况数量显著增加,需要建立相应多个计算模型,计算工作量显著增大。

## 5 结构体系

### 5.1 一般规定

**5.1.2** 活动屋盖系统自重越大,对驱动系统的要求越高,从而造成工程造价与后期维护成本的提高,故此,设计中应严格控制屋盖结构自重,尽量采用高强材料,同时屋盖围护材料尽量选择重量轻的膜材或金属屋面。

**5.1.3** 当活动屋盖沿平行轨道运行时,不对称变形会导致轨道间距发生变化,容易发生卡轨现象。当必须采用非对称结构时,不均衡变形很难避免,此时,驱动控制系统应具有调节不均衡变形的能力。

**5.1.4** 为避免台车轮压过大,可适当增加台车数量,减小单个台车的荷载,将较大的集中力转化为多个分布均匀的较小荷载,可有效减小轨道桁架和轨道梁的截面尺寸,降低结构成本。

**5.1.5** 在设计开合屋盖结构时,宜采用三维实体模型或其它方法进行干涉检查,并考虑结构变形后位形的影响,避免活动屋盖在运行时发生碰撞现象。

**5.1.6** 根据目前的工程实践,当下部支承结构变形过大时,容易出现卡轨情况,这是引发活动屋盖故障的主要原因之一。因此,规定支承结构应具有足够的刚度,从而有效控制轨道在活动屋盖运行过程中的变形。

**5.1.7** 工程实践表明,很多事故是由建筑屋面积水或积雪造成的,尤其当采用柔性屋面围护材料时,极易产生屋面积水或积雪的情况。设计时如考虑过大的积水与积雪荷载将造成建造成本的增加,影响结构设计的经济性。最经济的方法是利用屋盖坡度,使积水自然排放。

不同屋面材料,对坡度的要求有所不同,当屋面围护结构采用膜材时,屋面排水坡度不宜小于5%,当屋面围护结构采用金属材料时,屋面排水坡度不宜小于2%,同时采取措施避免渗漏。如果由于建筑造型等方面限制无法保证自然排水的屋面坡度,也可采取虹吸式排水。

而对于雪荷载而言,在多雪的地区也应尽量利用屋面坡度减小积雪荷载,但积雪滑落要求屋面的坡度很大,根据现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009的规定,当屋面坡度大于 $25^{\circ}$ 时,才能考虑雪的滑落效应。但在通常情况下,过大的屋面坡度不仅与建筑方案相冲突,同时也会造成驱动力需求增大。因此,为了避免多次积雪累加从而导致结构的安全隐患,可设置屋面融雪装置。目前开合屋盖的融雪装置主要分为两类:一类是整体加热,将加热后的空气吹入屋顶围护系统,空气温度保持在 $20^{\circ}\text{C}$ 左右,保证屋顶与轨道无积雪或结冰的情况,室内温度适宜;另一类是在轨道设置融雪除冰装置,如采用电加热板等措施,保证活动屋盖在冬季能够正常运行。

## 5.2 活动屋盖结构

**5.2.1** 活动屋盖一般采用单跨结构的形式,少数采用多跨连续支承的方式(如南通体育场、日本大分体育场),故活动屋盖结构多采用沿跨度方向以单向受力为主的桁架、张弦桁架等结构形式,且应具有必要的面外刚度,在保证结构平面外稳定的同时,还可使活动屋盖运行时易于同步。

当采用网架、网壳等空间结构时,应通过优化结构布置和构件截面等方式,调整结构的传力途径,使空间结构的支座反力尽量均匀。

由于活动屋盖的水平推力直接作用于台车顶部,其大小直接影响台车、驱动系统和支承结构的造价,故此,应尽量减小活动屋盖结构的水平推力。

边桁架既是活动屋盖单元的边缘构件,也是各台车之间的联系构件,如果边桁架刚度过大,运行过程中各台车之间的变形差异将引起边桁架内力的显著变化,故此,应适当减小边桁架的刚度,降低边桁架内力对各支点变形差异的敏感性。

台车既是活动屋盖的运行装置,又是活动屋盖结构的支座。活动屋盖单元重心的平面投影应尽量接近该活动屋盖单元各台车所形成的多边形的形心位置,避免出现台车受力悬殊过大、甚至出现结构倾覆的情况。

多道平面圆弧轨道应取 3 道以上,以便形成稳固的支撑面。

### 5.2.2 刚性折叠结构设计时应注意下列事项:

1 本规程的刚性折叠结构是指活动屋盖采用单向传力的桁架等结构形式,通过各榀桁架之间的相对运动,实现活动屋盖的开启和闭合。

刚性折叠结构的屋面材料应具有良好的变形能力以适应桁架的相对运动,同时由于在屋盖反复折叠、展开的过程中屋面材料容易出现损伤与破坏,因此折叠结构应尽量采用抗弯折性能良好的膜材作为屋面材料。折叠结构使用膜材屋面还具有屋盖闭合时可充分利用自然光、施工速度快等优点。

刚性折叠结构采用膜材屋面时,桁架作为刚性承重结构,柔性膜材作为围护结构,处于全闭状态时的活动屋盖可理解为骨架支承膜结构。这种开合方式是刚性结构与柔性膜材的理想结合,既可充分利用膜材的可折叠性,又由于刚性结构的存在,可有效避免膜材折叠方式容易出现运行故障甚至膜材撕裂的问题。

根据活动屋盖的运行方式,刚性折叠结构主要包括水平折叠、空间折叠两类,其中水平折叠方式在工程中应用较多,如英国伦敦的温布尔登网球场等。

2 折叠结构在折叠、展开过程中是一个可变体系,到达预定的展开状态时必须由机构转变为稳定体系。根据结构展开后的稳定平衡方式,折叠结构的锁定形式可分为自锁式及外加锁式两类。

自锁结构包括几何自锁和构件自锁两种形式。几何自锁式结构的自锁原理主要由结构的几何条件及杆件材料特性决定,锁铰中的杆件只有在完全折叠及完全展开两种状态下才与结构的几何状态相适应,杆件应力为零;在折叠展开过程中杆件会产生不同程度的弯曲变形及弯曲应力,储存外荷能量,结构完全展开后反方向释放能量,恢复直杆状态。几何自锁式结构展开方便、迅速,但对结构几何构型要求高,且杆件弯曲刚度较小,承受外荷载能力较差,仅适用于小跨度结构。构件自锁式结构的自锁机理主要是通过铰接处的销钉在结构展开时自动滑入杆件端部预留的槽孔处而锁定结构。目前,自锁式结构(特别是构件自锁式结构)主要应用于航空航天领域,如可展天线、伸展臂等,应用于民用建筑领域的较少。

外加锁式结构在折叠展开过程中,杆件内不产生应力,达到预定展开状态时仍是机构体系,需附加构件(刚性杆件或柔性索)、约束或其他锁定装置,才使其成为具有承载能力的结构。外加锁式结构杆件刚度较大,可用于较大跨度结构。

3 空间结构中的节点是结构安全承载的重要保证。对于折叠结构,运动折叠部位的节点除应满足节点的强度、刚度等要求外,还应避免所连接的部件与节点连接处出现较大摩擦或弯曲变形,确保活动屋盖在折叠、展开过程中运动自如。

### 5.2.3 柔性折叠结构设计时应注意下列事项:

1 柔性折叠结构的开合主要依靠膜材的展开与收纳来实现,所以膜材必须具有良好的可折叠性。根据膜材的收纳位置主要分为桅杆收纳(图1)、塔楼收纳(图2)以及索网收纳(图3)三种开合方式。



图1 桅杆收纳开合

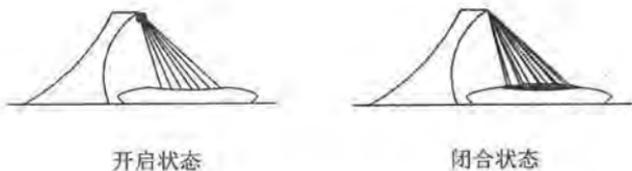


图 2 塔楼收纳开合



图 3 索网收纳开合

桅杆收纳被称为“Bunchable”方法,适用于室内空间允许设置桅杆的场馆,该方式已应用于法国“Carnot 游泳馆”。对室内空间不允许有柱的场馆可采用塔楼收纳或周边支撑索网收纳,塔楼收纳应用于加拿大蒙特利尔奥林匹克体育场,索网收纳应用于西班牙萨拉戈萨体育场。

2 由于柔性折叠结构需要施加预应力以形成结构刚度抵抗外部荷载,在支承结构的开口部位应设置刚性环梁以平衡索膜的预应力。

3 柔性折叠结构的闭合状态需要形成膜结构所需要的合适曲面,并通过对吊索、边界钢索和膜面补强钢索施加适当的预张力,保证在最不利荷载作用下屋面几何形态的稳定性。由于柔性折叠结构自身的材料刚度有限,拉索和膜材中的预应力形成的几何刚度是柔性折叠结构刚度的主要部分。拉索或膜材出现松弛会导致结构刚度的降低,在风荷载作用下易出现剧烈振动,甚至可能导致膜材撕裂。同时,膜材的松弛会导致膜材的褶皱,影响建筑美

观和排水性能,所以在正常使用状态下,膜材和拉索均不应出现松弛现象。在各种荷载组合作用下,膜面各点的最大主应力应满足强度要求。在按正常使用极限状态设计时,膜结构的变形不得超过规定的限值。

### 5.3 支承结构

**5.3.1** 当固定屋盖作为活动屋盖的支承结构时,通常可采用网架、桁架、拱、网壳、索-桁架、索-拱等结构形式。当下部混凝土结构作为活动屋盖的支承结构时,通常可采用框架、框架-抗震墙、框架-支撑等结构形式。支承结构应具有足够的刚度,以满足活动屋盖运行过程中驱动系统对变形的要求,对于多单元活动屋盖,还应控制支承结构在各活动屋盖单元运行过程中的变形差。

**5.3.2** 当活动屋盖直接支承于地面时,可在地面设置专用的轨道沟槽,不运行时以盖板进行封闭,便于车辆与人员通行。

**5.3.4** 对于活动屋盖来说,为保证运行可靠,需要尽可能加大支承结构的固有刚度,尤其是支承轨道的构件以及开合洞口周边构件,更应保证其具有较大的刚度。本条给出了固定屋盖结构的最大变形限值作为其刚度控制的量化指标,其中跨度指固定屋盖的跨度,此时应考虑预应力和施工预起拱对变形的有利影响。从工程经验看,结构自振周期也是反映结构自有刚度的一个量化值,控制自振周期可有效控制结构刚度。

**5.3.5** 为确保活动屋盖运行的可靠性,支承结构应具有足够的固有刚度,使活动屋盖开合过程中支承结构的变形满足驱动系统运行需求,此时对支承结构的变形控制为相对变形值,不应考虑预应力和施工预起拱对结构绝对变形的改善作用。

**5.3.6** 上部结构计算应建立混凝土结构和屋顶结构的整体模型,引入的基础沉降计算值可取沉降差,乘以放大系数后以支座强制位移的形式输入结构模型。

## 5.4 围护结构

**5.4.1** 根据建筑物所在地域与使用特点,选用适当的围护结构形式。尽量选择重量轻、保温隔热效果好的围护材料,以减小对驱动力的需求,降低使用期间的能源消耗。

ETFE 是 Ethylene Tetra-Fluoro-Ethylene polymers(乙烯-四氟乙烯共聚物)的缩写,由生料挤压成型,是一种典型的非织物类膜材,使用寿命至少为 25~35 年,是用于永久性屋顶结构的理想材料。ETFE 膜材具有透光率高、抗老化性、自洁性好等优点,适用于对透光率有较高要求的建筑物。针对膜材透光过高会导致夏季室内温度过高的问题,ETFE 膜材表面可通过镀点处理及印刷图案来降低透光率,并可涂覆白色颜料使膜材变成半透明以降低日光照射。同时,ETFE 膜材多采用两层或三层气枕结构,通过调整各个气腔之间的压力差,使中间层的不透明图案相互重叠或错开,可使气枕的遮阳率呈现不同的变化。在建筑设计中,利用 PTFE/PVC 膜材和 ETFE 膜材在透光率方面的差别,以及膜材不同层数造成的透光率的差别,不仅可以调节室内采光量,而且能收到较好的建筑效果。

**5.4.4** 活动屋盖单元之间、活动屋盖与支承结构之间的密闭性设计是此类结构设计的重点和难点之一。活动屋盖与固定屋盖间的防水构造,通常采用双重橡胶挡水片与二次天沟排水的双重防水措施。在寒冷地区,围护结构还应采取防结露及阻断冷桥等措施。

**5.4.5** 位于严寒及寒冷地区的游泳馆(含室内水上乐园)、滑冰馆及滑雪馆等开合屋盖建筑,应避免围护结构局部积水和积雪引起的超载。

**5.4.6** 可通过对膜边界钢索、膜面压索进行张拉或支顶膜面等方式对膜面施加预张力,同时应考虑围护结构膜材张拉对主体结构杆件应力与变形的影响。围护结构中使用的膜材应符合现行协会标准《膜结构技术规程》CECS 158 中的规定,G 类指在玻璃纤维

织物基布的表面涂覆聚合物连续层的涂层织物；P类指在聚酯纤维织物基布的表面涂覆聚合物连续层的涂层织物。

**5.4.7** 对于可折叠的P类膜材及基布非玻璃纤维的EPTFE膜材,尽管在反复弯折后材料强度降低很少,但从安全角度考虑,建议根据活动屋盖开启次数和折叠时膜材的皱褶情况,适当增加膜材的安全储备。

## 6 结构计算

### 6.1 一般计算原则

**6.1.1** 本规程规定开合屋盖的全开或/和全闭状态作为基本状态,当活动屋盖运行到不同位置时,支承结构的内力和位移会有较大变化。这是由于屋面开了大型的“天窗”,结构的整体刚度尤其是竖向刚度会小于相同结构体系的全覆盖屋面。因此应根据活动屋盖的结构形式、运行方式选择其可能的荷载不利位置进行补充验算。对于沿水平轨道移动的刚性活动屋盖,一般可选择移动到跨中的  $1/2$  和  $1/4$ 、 $3/4$  等位置。

**6.1.3** 开合屋盖结构通常由下部混凝土结构、固定屋盖和活动屋盖构成,活动屋盖通过台车与固定屋盖相连,各部分的结构形式、质量、刚度及阻尼比特性差异很大,各子结构之间相互作用机理非常复杂,因此,应通过包含下部混凝土结构、固定屋盖和活动屋盖的组装模型的计算分析,反映其整体结构特性,结构位移和构件内力满足设计要求。台车可以用刚度较大的杆单元模拟,上端与活动屋盖铰接,下端与支承结构刚接。

**6.1.5** 开合屋盖中的索膜构件可按照国家现行标准《索结构技术规程》JGJ 257 和《膜结构技术规程》CECS 158 相应的计算分析与必要的施工过程验算。

**6.1.6** 可按现行国家标准《起重机设计规范》GB/T 3811 等标准的规定,根据活动屋盖驱动系统的工作级别、使用等级、荷载情况和钢材牌号及其许用应力,计算确定各部件的截面尺寸与规格。

### 6.2 静力计算

**6.2.1** 轨道、端止缓冲器等驱动系统部件及各种设备管线等可视

为永久荷载,台车及各种临时吊挂设施可以视为可变荷载。

**6.2.2** 虽然活动屋盖驱动系统属于慢速运行机构,但为了确保结构安全,适当考虑了惯性力的影响,此时内力放大系数可取 1.1。

**6.2.4** 除应建立活动屋盖全开状态、全闭状态的计算模型以外,还应对活动屋盖运行移动过程中的位置进行计算分析。对于小型开合屋盖结构,中间位置计算模型的数量不应少于一个,大、中型开合屋盖结构,中间位置计算模型不应少于三个。开合屋盖在全开和全闭状态时,所受的风荷载差别较大,应分别进行相应状态的风洞试验,确定相应的风荷载;全开和全闭状态下所受的雪荷载不同,也应具体考虑;在运行过程中,基本风压可以取 10 年一遇的基本风压。

**6.2.5** 根据国内外开合屋盖工程的实际使用情况,开合操作次数差异很大,通常最大开合次数不超过 400 次/年。

### 6.3 稳定性计算

**6.3.1** 行业标准《空间网格结构技术规程》JGJ 7—2010 规定,单层网壳以及厚度小于跨度 1/50 的双层网壳均应进行稳定承载力计算。为满足建筑造型以及室内空间效果需求,由拱或曲面网壳组成开合屋盖结构的矢跨比一般较小,以承受整体薄膜内力为主,存在整体失稳的可能性,稳定性可能起控制作用,因而对这类结构应进行整体稳定性计算。

结构的稳定极限承载力可取荷载一位移全过程分析求得的一个临界点处的荷载值。行业标准《空间网格结构技术规程》JGJ 7—2010 规定了网壳稳定容许承载力标准值应等于网壳稳定极限承载力除以安全系数  $K$ 。对单层球面网壳、柱面网壳和双曲扁网壳的分析表明,按弹性全过程分析时  $K$  为 4.2,按弹塑性全过程分析时  $K$  取 2.0。行业标准《拱形钢结构技术规程》JGJ/T 249—2011 也规定了当按弹塑性全过程分析时  $K$  可取 2.0。对其他形状更为复杂的曲面网壳尚无系统分析,宜进行弹塑性全过程分析。

**6.3.3** 初始几何缺陷包括节点位置安装偏差、杆件的初弯曲、杆

件对节点的偏心等,对结构稳定承载力有较大影响,应在计算中考虑。根据对网壳结构的研究表明,当初始几何缺陷按一阶屈曲模态分布时,求得的整体稳定承载力是可能的最不利值,故本规程推荐这一方法。初始几何缺陷的最大计算值,按理应采用施工的最大允许偏差。但网壳结构的大量算例表明,当缺陷达到跨度的1/300左右时,其影响才充分展现。从偏于安全的角度考虑,本条参照行业标准《空间网格结构技术规程》JGJ 7—2010 的规定,取结构跨度的1/300 作为理论计算的取值。

**6.3.4** 现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 在确定构件轴心受压稳定系数  $\varphi$  时,考虑了杆件初始弯曲的影响。在计算中考虑杆件初始弯曲的影响时,可将杆件划分为3~4个梁单元,杆件轴线为正弦曲线,曲线的最大矢高取杆件长度的1/1000。当杆件的边界条件与作用力难以确定时,可采用整体计算模型进行稳定分析。根据整体结构达到一阶失稳模态时的稳定系数,计算杆件的计算长度系数。当杆件为受拉构件时,不考虑构件计算长度系数的影响;当受压构件达到稳定承载力时,构件的强度应力值已经超过钢材的屈服强度,其计算长度可按1.0考虑;当受压构件在达到稳定承载力时,构件的强度应力值尚未达到钢材的屈服强度,其计算长度系数  $\mu$  按欧拉公式计算:

$$\mu = \frac{1}{l} \sqrt{\frac{\pi^2 EI}{P_{cr}}} \quad (1)$$

$$P_{cr} = K \cdot N \quad (2)$$

式中: $l$ ——构件的几何长度;

$P_{cr}$ ——杆件的临界承载力;

$K$ ——结构的稳定系数;

$N$ ——构件轴向压力设计值。

## 6.4 抗震计算

**6.4.1** 已有的工程经验表明,活动屋盖对水平地震力放大效果明

显,活动屋盖的位置对结构的地震响应也有一定影响,因此本条强调了应对基本状态和非基本状态分别进行抗震计算,并且考虑多个方向地震作用的影响。设计中尽量减小活动屋盖的总质量,对减小结构地震反应非常有效。

**6.4.3** 根据地震动的频谱特性、强度和持续时间,合理选择地震波,实际强震记录的数量不应小于总数的  $2/3$ 。选取的多组实际强震记录与人工模拟的加速度时程曲线,其平均地震影响系数曲线应与现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 所给出的阵型分解反应谱法所采用的地震影响系数曲线在统计意义上相符,所谓“在统计意义上相符”指的是,用选择的加速度时程曲线计算单质点体系得出的地震影响系数曲线与振型分解反应谱法所采用的地震影响系数曲线相比,在不同周期时相差均不大于  $20\%$ 。为了与设计要求的地震烈度相当,选用的地震加速度时程曲线应按最大值相等的原则进行放大或缩小,即最大值应与采用的抗震性能指标所对应的地震加速度时程最大值相等。应选择足够长的地震动持续时间,以包含地震记录最强的部分,对于开合屋盖结构建议取不小于结构基本周期的  $10$  倍。

**6.4.5** 根据现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 的规定,对开合屋盖结构采用抗震性能化设计。由于活动屋盖支座以及相邻两个区(网)格内的构件位置关键,故应满足中震弹性要求,且构件长细比不宜大于  $120$ 。活动屋盖在移动过程中遭遇地震的概率极低,可不进行相关抗震验算,但应考虑防止出现脱轨、碰撞等事故的抗震构造措施。

## 7 驱动系统

### 7.1 一般规定

**7.1.1** 所谓最不利运动状态指:活动屋盖满载(积雪荷载)、爬坡、最大风载荷的方向与活动屋盖运动方向相反、支承结构变形等情况。各种驱动方式的冗余度应较接近,一般来说,驱动系统的安全度应远大于结构及构件的安全度。

**7.1.2** 多台电动机应采用对称配置、型号相同的电机,便于调速控制与管理。平行移动式开合屋盖的轨道距离一般较大,每条轨道均设置独立的驱动系统,并进行同步控制,便于实现活动屋盖顺畅运行。对于旋转运动式开合屋盖,通常活动屋盖单元的大小、构造形式、自重、载荷等基本相同,各自的驱动系统也应相同,便于同步调速控制,防止互相干涉。

**7.1.3** 对于小型活动屋盖开启时间一般控制在 10min 以内,对大、中型活动屋盖,其开启时间一般控制在 30min 以内,平行移动式活动屋盖的运动速度一般取  $2\text{m}/\text{min}\sim 5\text{m}/\text{min}$ 。旋转式活动屋盖的尺寸不同,其旋转速度也不应相同,设计旋转式屋盖时,其最远端点的运动线速度不大宜于  $5\text{m}/\text{min}$ ,避免速度过快造成惯性力过大。

**7.1.4** 活动屋盖一般都是设置在高空,受风载荷影响较大,必须设置相应的安全装置,如防倾覆装置和防风夹轨器,应保证屋盖的安全性。终点缓冲限位装置当发生故障时才会使用,台车正常停止时,距离缓冲器应保持一定距离。多个活动单元之间宜设置插销等闭锁装置,闭锁装置仅传递水平力,不传递竖向力。

**7.1.6** 当活动屋盖在支承结构轨道上运行时,应根据需要选择不同的轨道敷设方式。轨道附属对象主要服从于开合方式和使用效

果,但考虑到轨道自身的自重和自有刚度,应尽可能地将其附属于支承结构,以确保支承结构刚度大于活动屋盖,并减少活动屋盖的自重。

**7.1.7** 台车是将活动屋盖的荷载传递到支承结构的重要部件,二者的连接必须可靠,连接方式通常采用铰接的形式。为了避免个别台车过载,引起轨道及下部支承结构受力过于集中,可在台车顶部设置高度调节器,以确保各台车受力均匀。高度调节应包括静态调节和运行调节。台车在运行过程中受到活动屋盖的横向推力,可通过在台车上设置侧向车轮抵抗该横向推力。台车横向力的大小应根据计算确定,必要时可调整屋盖结构布置,以减小对台车的侧向推力。

**7.1.8** 为降低建造成本,保证结构的安全性,应严格控制台车及附属设备的重量。

**7.1.9** 轨道设计应符合现行国家标准《起重机设计规范》GB/T 3811 的相关规定,根据台车的轮压进行设计。

**7.1.10** 轨道应采用强度高、硬度与耐磨性好的材料,并应在主体结构卸载完成后安装就位,其连接构造能够充分适应主体结构的变形。轨道梁安装时应进行校正,包括标高、平面位置和垂直度等方面,确保轨道梁就位精确。轨道拼接处焊缝应打磨平整,轨道接缝位置不得与轨道梁接缝位置重合。

## 7.2 轮式驱动系统

**7.2.1** 轮式驱动属于自驱动方式;可直接借鉴门式起重机的设计经验,技术成熟,可靠性高。驱动电动机安装在台车上,通过减速器驱动车轮,利用轮轨之间的摩擦力驱动台车,机械原理如图4所示,其中电动机、减速器、制动器可以形成一体,使机构更为紧凑。该驱动方式台车对于轨道的反力较大,对下部结构刚度要求高,轨道变形量控制严格,轨道沟槽占用空间较多。钢轮驱动主要适用于轨道无坡度的情况,当轨道有坡度时,需采用聚氨酯等高摩擦系

数材料。

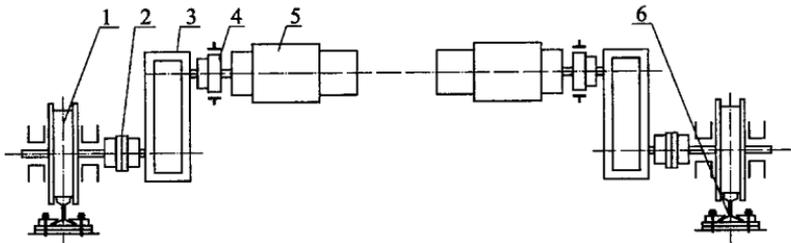


图 4 轮式驱动系统的机械原理

1—滚轮；2—联轴器；3—减速器；4—制动器；5—电动机；6—钢轨

**7.2.3 保证车轮与轨道之间的摩擦力是采用轮式驱动系统的必要条件。**

**7.2.4 轮式驱动系统的轨道平整度与平行度对屋盖的平稳运动影响较大，按现行国家标准《起重机规范》GB/T 3811 的规定，轨道变形量不大于 1/2000。**

**7.2.5 轨道主要承受台车车轮的压力，此外，防倾覆装置与夹轨器均以轨道为受力支点，故此，轨道的安全性非常重要。当台车的侧向推力较大时，应专门设置侧向轨道进行支撑。**

### 7.3 牵引驱动系统

**7.3.1 沿平面轨道运行的活动屋盖宜采用主动式牵引驱动系统，将卷扬机设置在活动屋盖台车之上。通常采用卷扬机、钢丝绳驱动，电动机、减速器固定不动，钢丝绳通过定滑轮、动滑轮与活动屋盖连接，通过卷扬机正反方向旋转，实现活动屋盖的开启与闭合。当屋盖沿着空间轨迹移动，轮轨间的摩擦力值变化较大，不能满足轮驱动方式所需的最小摩擦力时，应优先采用牵引式驱动，其机械原理如图 5 所示。**

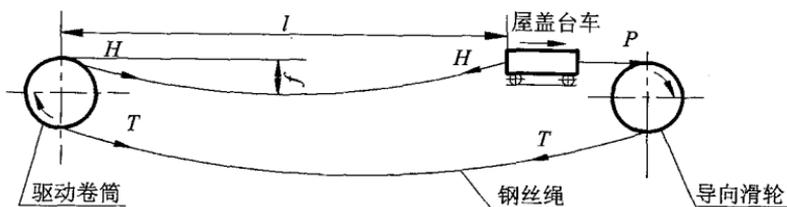


图 5 牵引式驱动系统的机械原理

空间轨道活动屋盖宜采用被动牵引方式,在地面层设置专用卷扬机房,牵引驱动系统驱动不足时,可利用结构自重下滑实现活动屋盖的开启、通过牵拉钢丝绳实现活动屋盖的闭合。牵引驱动系统动力传动可靠性高,技术成熟,受轨道变形、台车行走姿态的影响小,驱动系统故障容易排除,但外力会引起钢丝绳伸长,两侧轨道台车的同步控制难度较大,钢索连接点引起结构局部受力集中。

**7.3.2 台车设计时应充分考虑台车在运行时承受的横向推力以及在风荷载与地震作用下产生的倾覆力,防止活动屋盖漂移与车轮脱轨。台车在顺轨方向和垂直轨道方向应设置平衡机构,以适应轨道梁可能产生的垂直于轨道方向的变形。可通过压力传感器检测每个台车所承受的荷载,通过位移传感器检测油缸的行程调整台车顶部的高度,防止台车过载。此外,还可在导向轮上安装测力装置以及在阻尼油缸上安装压力和位移传感器,实时监控台车导向轮及轨道的横向受力情况和活动屋盖的偏斜姿态。**

**7.3.3 牵引钢丝绳还应满足现行国家标准《起重机设计规范》GB/T 3811 的相关规定。考虑到活动屋盖一般用于大型公共建筑,人流集中,安全性要求高,参考国内游乐设施相关标准,牵引钢丝绳的安全系数应在 6.0 以上。目前,小直径钢丝绳(直径小于 42mm)一般采用国产产品,大直径钢丝绳均采用进口产品。**

**7.3.4 钢丝绳上安装测力销装置后,当突发断索情况时,会及时发出信号并传输至中央控制器,此外,变频电机上的力矩变化情况**

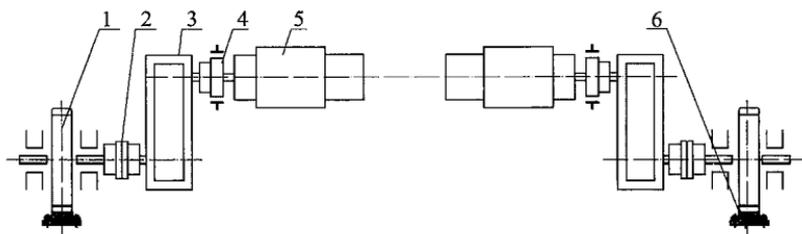
也会通过信号传输到中央控制器,从而使中央控制器作出相应的反应,自动实现工作状态停止。

**7.3.5** 应沿钢丝绳长度方向一定间隔设置导向滑轮与托辊,以防止出现乱绳及钢丝绳滑脱的情况。托辊安装前应根据上部转向滑轮轴线位置进行定位,并根据现场实际位置进行配装。

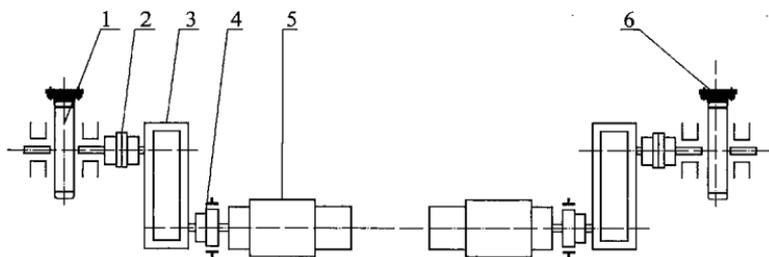
## 7.4 齿轮齿条驱动系统

**7.4.1** 齿轮齿条驱动主要适用于中、小型活动屋盖,当活动屋盖存在倾覆上掀力时,还应单独设置抗上掀的轮轨系统。

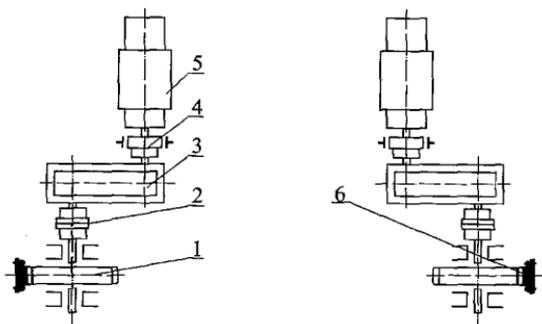
齿轮机沿着齿条行走,实现屋盖的开启与闭合,原则上适用于各种刚性屋盖的开合移动方式,机构示意图见图 6(a),齿条通常固定在活动屋盖上,电动机随活动屋盖一起运动。为提高活动屋盖运行的安全性,减少因为硬质杂物落在齿条上,造成齿轮齿条的损坏,可把齿条安装在上部或侧面,如图 6(b)、6(c)所示,电动机、减速器固定不动。



(a) 齿条位于齿轮下部



(b) 齿条位于齿轮上部



(c) 齿条位于齿轮侧面

图 6 齿轮齿条驱动系统的机械原理

1—齿轮或链轮；2—联轴器；3—减速器；4—制动器；

5—电动机；6—齿条或链条

**7.4.2 齿轮齿条驱动系统**多采用安装于活动屋盖的电动机—减速器—齿轮与固定于支承结构的齿条相啮合的驱动方式，也有将电动机—减速器—齿轮固定于活动屋盖的情况。齿轮与齿条之间的啮合力大，传动效率高，每个台车均为主动台车，动力比较均匀，易于实现精确的同步控制。但是该驱动方式对轨道变形适应能力较差，受温度变化影响较大，并且由于轨道偏移等原因，容易产生磨损，需要高精度的机加工，并定期清洁，制作与维护成本相对较高。当驱动电机安装于支承结构时，运行不需要移动电缆或滑触线供电。

**7.4.3 齿轮齿条**应采用强度高、耐磨性好的材料，工程中可以采用 40Cr 或 45# 钢。由于齿轮齿条啮合精度要求较高，故此需要重视其安装精度与维护保养，在使用过程中避免出现明显的磨损。

## 7.5 链条链轮驱动系统

**7.5.1 链条链轮驱动系统**适用于中、小型开合屋盖，当采用异型链条时，该驱动系统也可用于大型开合屋盖建筑。链轮链条驱动系统的工作原理与齿轮齿条驱动基本相同，但当链条固定于活动

屋盖时,需采用异形链条。行程较小的开合屋盖工程也可采用链条直接牵引活动屋盖的方式。

**7.5.2 链条链轮驱动系统**可采用电机-减速器-链轮安装于活动屋盖与安装于支承结构的链条相啮合的驱动方式,也可将电动机-减速器-链轮固定于活动屋盖。链条链轮驱动方式的优势在于链条与链轮始终啮合,位置保持性能好,运行时比较容易实现精确的同步定位,每个台车均为主动台车,动力比较均匀,加工安装方便,经济性好。但是在长期使用荷载作用下容易发生链条伸长、部件磨损的情况。固定链条安装调试比较复杂,故障排除难度较大,定期清洁与维护工作量较大。

**7.5.3 安全系数**,也称工作情况系数或工况系数,一般情况下,设备的设计都是按理论值计算的,但因设备的使用场合、环境、工作时间等都不相同,所以要将理论值乘一个系数,即安全系数,以确保设备的使用安全。对于链条链轮驱动系统,用于工业设备时,链条载荷安全系数一般不小于 1.8,《齿形链和链轮》GB/T 10855 中规定,对于非正常工况或极端恶劣的工作条件,安全系数应适当放大。考虑到开合屋盖一般用于重要的公共建筑,故此对其安全系数进行适当放大。

## 7.6 液压驱动系统

**7.6.1 液压驱动系统**通过液压千斤顶的顶推运动,可提供很大的顶推力,驱动活动屋盖平移或翻转,实现活动屋盖的开启与闭合。液压系统技术成熟,但其有效行程较短,且液压系统容易漏油造成污染,影响其他设备的使用,同时液压设备的维护要求和费用比较高,故此,液压驱动系统在开合屋盖结构中较少采用,在温布尔登网球场采用了液压千斤顶与悬臂组合形成驱动装置。对于短行程或翻转开启方式的活动屋盖可考虑采用液压系统。日本小松穹顶的雨雪挡板与鄂尔多斯东胜体育场的活动屋盖固定插销均采用了液压驱动方式。液压马达体积小、自重轻,当活动屋盖采用短行程

的水平直线运动或旋转开合方式时宜采用液压马达代替电动机驱动。

**7.6.4** 液压元器件应满足相应的国家、行业或企业标准的要求，便于使用与维修。同时，应保证液压系统无外泄漏，尽量减少内泄漏。

## 8 控制系统

### 8.1 一般规定

8.1.1 活动屋盖控制系统主要包括以下内容：

1 启动、停止(制动)加速度控制；

2 速度与同步性控制,防止出现卡轨、蛇形运动,对于轨道不均匀变形具有即时调适能力；

3 紧急制动控制可以防止开合式屋盖在电气故障、供电突然中断或机械系统发生严重故障时出现滑落事故,保证活动屋盖在风、地震及其他特殊情况下的安全性；

4 防止运行过程中的辐射电讯干扰；

5 防雷保护；

6 安全报警装置,在活动屋盖安装前照灯、传感器、风速仪等报警装置。

8.1.2 开合屋盖建筑在使用期间,外界条件可能出现在设计允许范围内的剧烈变化,如大风、暴雨、暴雪、降温等情况,故此要求活动屋盖控制系统设计时应具有较好的适应能力,确保活动屋盖正常运行。

8.1.3 控制系统应通过对加/减速度、速度、距离等参数的综合控制,实现对活动屋盖运行的精确控制。

8.1.5 开合屋盖控制系统设计应考虑适当的冗余度。控制系统应具有过电流保护、漏电保护、短路保护等措施,保证电动机能在额定载荷范围内正常运转。

### 8.2 控制系统

#### I 常规控制

8.2.1 活动屋盖的同步性控制即保证各点在同一时刻位移相等，

在运动过程中,位移是时间的函数,位移控制是通过其对时间的倒数—速度控制实现的。由于轨道在活动屋盖运行中产生变形,各驱动系统相互影响,需要通过解耦算法进行控制。小型开合屋盖可采用一般控制,大型开合屋盖可采用总线控制。

8.2.2 可根据情况设置分控盒,分控盒表面信号可以简化,但必要的操作开关/按钮必须保留。分控盒与主操纵台必须实现操作互锁。

8.2.3 线路设计应由机械专业工程师负责提出要求,由控制专业工程师负责技术设计。

8.2.4 除小型开合屋盖结构或运行简单的单片活动屋盖以外,均宜采用自动控制操作系统,避免人工操作引起的误操作。

8.2.5 紧急停止开关应设置安全罩,由值班操作人员管理操作。

8.2.6 控制台的电源开关、分部件操作开关和速度选择开关均应设置相应的信号灯,整个控制台面信号明确,方便操作。

## II 驱动同步控制

8.2.7 控制系统分为启动、运行、停止三个阶段,通过对启动加速、匀速运行和制动减速进行控制,减小活动屋盖对支承结构的冲击力。控制系统应满足开合屋盖驱动系统的技术要求,采用两台型号相同的变频电机分别驱动活动屋盖单元两侧的台车时,其同步运行控制原理如图7所示。

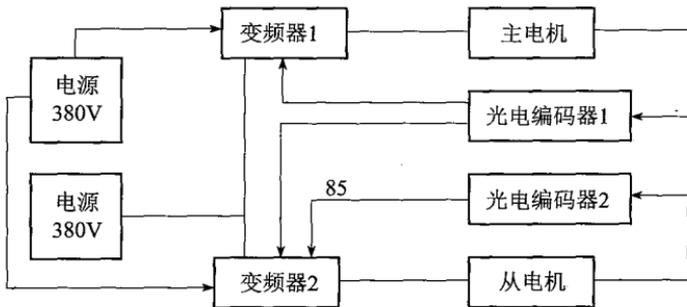


图7 活动屋盖单元控制系统原理

### Ⅲ 台车均载控制

**8.2.10** 在台车设置均载装置后,控制系统对装置的行程和压力随时进行检测,通过调节装置的位移量,使得各台车在行走过程中的荷载基本相同。

### Ⅳ 运行纠偏控制

**8.2.11** 当活动屋盖具有多个驱动系统时,各驱动系统之间存在一定程度的不同步属正常情况,但当活动屋盖偏斜变形超过规定范围时,容易引发重大安全事故,需要采取紧急制动措施。

**8.2.12** 活动屋盖的偏斜主要由安装误差、结构变形导致台车受卡或活动屋盖驱动不同步等原因引起的,通过随时调整活动屋盖的运行姿态,使活动屋盖平稳、安全地开启与关闭,通常使用编码器纠偏。国家网球中心的轨道距离为 72m,允许偏差为 0.08%~0.24%。对于终点没有插销式闭锁要求的设备,允许偏差可以适当放松。

### Ⅴ 检测、监控与自诊断系统

**8.2.13** 为确保系统的安全运行,本控制系统的检测信号具有不同的冗余校验功能。有些是直接冗余,例如插销间隙检测采用双位移传感器,同一屋盖有 4 组转角检测等。有些是通过间接关联形成冗余,如张力检测与变频电机力矩检测、卷筒码盘同步检测与台车接近开关检测等。由于主要状态均用于检测,因此系统具备了自校验故障的报警功能。虽不能形成多数表决的容错控制,但可使系统源一旦发生故障立即处于最安全的事故工况。根据检测到的失常信号,确定故障位置和性质,使操作人员可在第一时间进行故障排除,确保系统的安全。

## 8.3 安全应急保障措施

**8.3.1** 各活动屋盖单元通过现场总线系统互连,由于其在空间上的延伸,容易受到耦合电涌的威胁。断电锁紧系统,即在高速转轴上安装常闭式制动器,在低速转轴上安装夹紧制动装置。

## 9 防腐蚀与防火设计

### 9.1 防 腐 蚀

9.1.1 由于开合屋盖结构经常在全开状态与全闭状态之间进行转换,故此,其防腐蚀设计与普通钢结构差异较大。考虑到经济性等原因,开合屋盖宜根据情况确定室外钢结构的防腐设计。由于很多开合屋盖建筑即使在全闭状态时也并不是完全密闭的,因此,基本状态为常闭状态的开合屋盖结构可根据具体情况,比纯室内结构防腐等级适当提高。

9.1.2 开合屋盖结构的防腐蚀涂装方案尚应满足协会标准《钢结构防腐蚀涂装技术规程》CECS 343:2013 中的具体规定。

9.1.3 防腐蚀涂层构造包括底层、中间层和面层的涂料名称、涂刷遍数和涂层厚度。对防腐蚀要求较高的重大工程,设计人员可提出防腐蚀性能目标要求,由专业厂家提出防腐方案,综合比选确定实施方案。

9.1.5 对销轴及其相应连接板等易磨损构件可采用镀锌等附着性更好的防腐措施。

### 9.2 防 火

9.2.1 开合屋盖结构应根据活动屋盖的常驻位置和使用功能确定适当的耐火极限与防火做法。通过消防性能化设计,可以模拟实际火灾温升,分析结构的抗火性能,采取合理、有效的防火保护措施。根据国内设计经验,当活动屋盖开启与消防报警装置联动时,可将建筑视为室外空间,从而大大降低消防扑救的标准。为保证开合屋盖结构驱动控制系统在火灾时的有效性,设备及电缆等应具有相应的防火性能。

当活动屋盖离楼(地)面超过一定高度且活动屋盖下的墙面、楼(地)面为不燃材料时,屋盖的承重钢结构受火灾的影响较小,经防火性能化评估后,防火措施可适当降低。

**9.2.3** 活动屋盖结构可采用薄涂型钢结构防火涂料保护或设置喷水灭火保护系统。活动屋盖防火涂料工程应在钢结构安装工程施工质量验收合格后进行,应采用符合设计和相应产品标准的防火涂料。

## 10 制作、安装、调试与验收

### 10.1 一般规定

**10.1.1** 开合屋盖的结构体系、驱动系统、控制系统之间差异较大,因此,各部分质量验收要求应区别对待。支承结构与活动屋盖的原材料应按国家现行标准《钢结构质量验收规范》GB 50205 的规定执行。对于机械系统的非标准部件,应复核其材料质量合格证明,包括材料的规格、化学成分、力学性能和交货状态等,若有热处理等要求时,尚应检验热处理合格报告。对驱动与控制系统中的采购成品件,应检查其附带合格证是否满足相应设计要求。电气设备可在现场进行通电检验。

**10.1.2** 根据设计文件编制的施工组织方案在获得工程监理单位的批准后方可实施。

**10.1.3** 机械驱动系统采用齿轮齿条或链轮链条方式时,应严格控制啮合部件的安装精度,避免由于安装误差而引起整个系统运行不稳定、噪音过大等异常现象。

**10.1.4** 部件单独调试时,应首先脱开联轴器,进行电气设备空转调试,一切正常后再接通联轴器。所有部件单独调试合格后方可进行部件综合调试。

**10.1.5** 开合屋盖结构验收工作对于保证活动屋盖运行的可靠性非常重要,应根据工程实际情况确定验收阶段与验收方法。

### 10.2 加工制作与出厂检验

**10.2.2** 开合屋盖支承结构变形一般包括结构自重变形、安装误差、活动屋盖运动变形和环境温度变形,其中自重变形一般可按全闭状态下结构的变形值通过预起拱进行补偿。安装误差可通过在

支承结构卸载后再进行轨道梁安装,对轨道梁与支承结构的可调连接构造进行调整,运动变形和温度变形则通过台车的调节能力解决。

**10.2.3** 轨道梁的支承结构通常为大跨度桁架,分段进行加工制作。考虑到轨道系统对下部支承结构安装精度要求较高,应进行预拼装,预拼装方式可以选择实体预拼装或数字模拟预拼装。

**10.2.4** 宜研制专门的实验设备模拟台车的实际运行情况。驱动系统部件应在出厂前进行空载试验、额定荷载试验、超载试验等检验与测试。1.1倍额定荷载的全行程运转试验主要用于检验台车的运行可靠性,1.25倍超载试验主要用于检验驱动系统动力情况。通过试验验证台车的竖向带载调整能力、竖向调整锁母的可靠性、横向油缸的带载调整能力和横向油缸的阻尼特性,保证台车达到设计的功能要求和承载能力,将实际运行过程中台车出现故障隐患的可能性降至最低。

**10.2.6** 出厂前应对电气控制系统各功能组件试进行运转测试,其主要目的在于确保电气接线正确、可靠;系统内各设备在相应运行工况下的控制程序符合预期的设计要求;各检测仪表(压力表等)及检测反馈元件(力传感器、位移传感器等)反馈数据正常;各限位保护开关(行程开关、光电开关、压力继电器等)反馈信号正常;故障或异常情况,系统安全保护措施到位。厂内调试包括单机调试、分组联动调试以及系统联动调试等几方面,主要目标在于优化控制程序和控制参数,对现场运行工况进行模拟,为电气控制系统现场调试做准备。

### **10.3 轨道和活动屋盖安装与调试**

**10.3.2** 轨道与活动屋盖施工专项方案应根据开闭系统的特点及设计要求制定针对性的施工方法及措施。包括轨道系统、活动屋盖及驱动控制三方面内容。

1 轨道系统施工方案应包括安装所需条件(即支承结构的所

处状态)、竖向及水平偏差调整措施以及测量控制方法等;

2 活动屋盖施工方案应包括活动屋盖结构安装方式、在轨道系统上的临时支撑条件及相关技术要求;

3 台车及驱动系统施工方案应包括台车临时固定措施、台车吊装就位方法与工艺、台车与活动屋盖连接固定的条件、卷扬机及钢丝绳的安装方法(如有)等。

**10.3.3** 对于采用牵引驱动方式的活动屋盖系统,当卷扬机不安装在支承结构上时,其安装可不受此条限制。

**10.3.4** 轨道系统安装前,应对轨道支承构件(轨道梁或混凝土梁上的预埋件)的位置进行复测,轨道系统安装完成后,活动屋盖钢结构安装前,应对轨道位置进行再次复测。

**10.3.5** 为了保证活动屋盖相对下部轨道系统的对称性及活动屋盖自重作用下水平推力的释放,提出对安装轨道时横向调节的要求。轨道安装宜从中间向两侧推进,先将轨道初步放置的轨道梁中间,然后对轨道梁进行精确定位,完成定位后马上对称安装轨道紧固压块,并将固定紧固压块的高强螺栓拧紧至设计值的50%。轨道全部安装完成后静置3d~5d,利用温度变化引起支承结构的往复变形对轨道产生的作用,最大程度使轨道与支承结构变形相协调。然后对轨道整体进行精整微调,调整完成后将轨道固定高强螺栓拧紧至设计值100%。

**10.3.6** 不直接利用台车进行活动屋盖钢结构固定的主要原因,是考虑施工过程的安全性及台车调整的便利性。

**10.3.7** 由于施工误差等原因,台车在运行过程中所承担的竖向载荷可能存在明显变化,因此,需要根据安装的位置及状态,对台车反力进行测量,寻找超差原因并进行相应调整。

**10.3.10** 活动屋盖运行调试时一般按以下方式进行:

1 采取手动控制,慢速、短距离移动的方式,确保屋盖移动过程中无干涉、磕碰等;屋盖运行平稳,无异响或抖动;起动、制动、停止无异常。

2 将活动屋盖移动速度调整至额定速度,逐步增大开合移动距离,多次手动控制活动屋盖移动并记录相应数据;精确调整驱动电机加减速时间、转矩限制值等一系列参数值,优化控制程序。

3 按不同的运行速度、不同的开合移动距离,进行活动屋盖单元自动开合调试,进一步优化控制参数和程序。

4 分段记录各驱动电机的输出电流、输出转矩、运行频率等参数,以及各个传感器的反馈数据,对数据进行分析处理,找出活动屋盖的最佳控制参数。

**10.3.12** 活动屋盖进行开合极限行程检测时,还应同时进行感应元件校准及微调。按额定运行速度完成 10 次~15 次全程自动开合运行。

## 10.4 工程验收

**10.4.1** 除了现行国家标准《建筑工程施工质量验收统一标准》GB 50300、《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204、《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205 和设计图纸外,还要参考产品对土建的有关要求。预埋件验收、钢结构施工质量验收、驱动控制系统安装质量验收与活动屋盖的验收关系最为密切。

**10.4.3** 综合国内已经实施的开合屋盖工程,支承结构采取合理的安装顺序,并通过轨道安装时对变形误差的补偿,均可满足台车适应性要求。对于具体工程,如果由于构造空间或其它因素的限制,无法通过轨道梁及轨道的调整满足台车运行要求,应提高支承结构的制作与安装精度。轨道的平面位置和垂直度的校正应同时进行。垂直度用挂线锤测量,发现偏差可在轨道梁底加垫片进行校正,轨道顶面圆弧应平滑过渡。

### I 支承结构与活动屋盖验收

**10.4.4** 预埋件歪斜非常普遍,对设备安装影响很大,故此,预埋板件必须测量四个角点。正误差是指高出平面标高或墙面。

**10.4.5** 开合屋盖结构对轨道接头处的安装精度要求较高,本条

参考了国内外相关工程经验和现行国家标准《通用桥式起重机标准》GB/T 14405 的规定。

**10.4.7 驱动系统安装的可靠性检查**包括支撑滚轮是否全部与轨道接触、齿轮齿条与相关部件的啮合情况、润滑点是否能顺利加注润滑脂、紧固件连接的牢固性等。防倾翻设备检查包括设备安装的正确性、相关部件是否有干涉。终点安全插销或锁定装置的可靠性检验包括安全插销位置的准确性、插销运动的顺畅性和信号的正确性。在进行相关部件连接紧密性检查时,用 0.1kg 榔头进行敲击检查,抽查数量不少于 10%。供电设备检查包括电缆收放顺畅性、滑触线接触性能,采用拖链式供电时,拖链运动的稳定性。屋盖密闭性检查应注意接缝处的密封性能,不得有漏水现象。

## II 驱动控制系统验收

**10.4.9 驱动控制系统验收的前提条件为:**开合屋盖驱动控制系统所有试验、调试已完成并达到合格标准,具备正常运转条件;外部永久性供电工程已经完成;操作使用说明书已经提交。

由于机械系统整体安装完成后,不能对单台设备进行运行测试,现场工程验收时只审查资料,并对整组设备进行联机验收。

机械性能测试包括活动屋盖运行速度、行程、停位精度等内容,应满足运行平稳、加减速时无冲击、开合时间等设计要求。

**10.4.10 安全功能的测试与判定方法如下:**

(1)各种安全开关:先人工触发 5 次,每次均能符合要求,然后以额定速度运动 5 次触发这些开关,每次均能符合要求。

(2)锁定装置:检查设备的锁定装置的锁定与解锁是否灵活可靠。

(3)紧急停机控制元件:在额定速度情况下,触动紧急停止元件,确认实现紧急停机,反复 5 次,每次均能符合要求。

(4)不同控制点控制元件的互锁:在某一控制点上操作对某设备的设置指令,在另一控制点的控制盘上操作同样指令,判断被拒绝,反复五次,每次均能符合要求。

(5)安全信号:检查信号与设备运行状态的一致性。

(6)设备特性和安全标记:检查设备铭牌和安全警示信号(声、光、标志牌)。

(7)如果有液压系统,应在工厂按照液压系统有关标准进行测试检验。

**10.4.11** 同步精度测试时,同组设备中3次不同行程下的测量数据间偏差若超过30%,则该组数据作废,增加测量次数,重新检测。

**10.4.12** 电气设备包括:电源柜、配电柜、交流器柜、变频器柜、隔离开关柜等。在进行电气设备的验收时,还应遵守如下现行国家标准规范:

《低压配电设计规范》GB 50054

《通用用电设备配电设计规范》GB 50055

《电气装置安装工程电缆线路施工及验收规范》GB 50168

《电气装置安装工程接地装置施工及验收规范》GB 50169

《电气装置安装工程旋转电机施工及验收规范》GB 50170

《电气装置安装工程盘、柜及二次回路接线施工及验收规范》  
GB 50171

《电磁兼容限值》GB/T 17625.1~6

《电磁兼容试验盒测量技术》GB/T 17626.1~12

**10.4.13** 控制操作系统包括:控制(器)柜、PLC柜、分配柜、计算机柜、主操纵台、便携式操纵盒(盘)、紧急停止开关等。

# 11 使用与维护

## 11.1 一般规定

**11.1.1** 与传统的建筑结构不同,开合屋盖结构对运行操作、维护保养要求很高,否则难以保证其使用功能安全可靠。

## 11.2 运行管理

**11.2.1** 操作人员应具有相应的机械、电气等专业知识和教育背景,或经过专业培训,熟悉屋盖传动设备构造及电气知识。活动屋盖操作规定一般包含以下内容:

(1)每次屋顶开合操作前,维修人员应对机械、控制设备进行全面检查;

(2)操作前应检查控制系统是否正常,启动监测系统;

(3)检查风速仪数据,并记录;

(4)在开合操作过程中,操作人员与指挥人员保持联系,根据指令动作;

(5)屋顶在半开状态停留时间不能过长,在全闭状态时应插上安全插销。设备运行过程中,要利用监测系统监视开合全过程,观察系统运行状态是否有异常,并及时填写屋顶开合运行记录表;

**6** 在屋盖开合全过程中,操作人员严禁脱离岗位。

举办大型活动时,应提前对开合结构进行全面检查,保证开合屋盖的正常工作。

## 附录 A 活动屋盖基本开合方式

**A.0.1** 水平移动开合方式多为双侧开启,每侧可采用单个或多个活动单元。多个活动单元在屋盖全开状态时平面位置重叠,可以实现较大的开启率。空间移动开合方式常用双侧开启方式,每侧为单个活动单元。竖直移动开合方式可采用整体活动屋盖。

**A.0.2** 绕竖向枢轴转动开启,通常采用多片(瓣)活动屋盖单元,活动屋盖单元沿周边轨道绕中心竖轴旋转,各片(瓣)单元的自重相应较小。绕水平枢轴转动开启,各片(瓣)活动屋盖单元围绕各自的水平轴旋转,多用于小型活动屋盖。

**A.0.3** 水平折叠方式和空间折叠开启方式,可采用双侧开启或单侧开启。放射状折叠开启在全开状态时,活动屋盖膜材通常收纳于场地中央的上空。

## 附录 B 围护结构局部风压系数极值计算方法

**B.0.1** 由风洞试验实测得到的风压系数均值、均方根等统计量具有很大的不确定性。为了减小不确定性,并且考虑经济因素,本规程建议采用至少 10 个以上 10min 样本确定围护结构构件的局部风压系数极值。

风洞实验与现场实测表明,迎风面风压时程一般服从正态分布,按照 Davenport 峰值因子法确定的峰值因子为 3.5。考虑到以下两个原因:①基于历史原因,GB 50009—2012 中确定主体结构设计风荷载时的峰值因子为 2.5;②现场实测风压时程的峰值因子一般较风洞试验中的略小,本规程建议用于围护结构设计的迎风面风压时程峰值因子取为 3.0。

风洞试验及现场实测表明,屋面、侧面、背风面墙等位置处的风压时程不服从正态分布。计算风压极值及峰值因子的方法有多种,设计人员可参考“Sadek F, Simiu E., Peak non-Gaussian wind effects for database-assisted low-rise building design[J], Journal of Engineering Mechanics, 2002, 128(5): 530-539”;“Ding J. and Chen X. Z., Assessment of methods for extreme value analysis of non-Gaussian wind effects with short-term time history samples[J], Engineering Structures, 2014, 80(1): 75—88”;“Yang Q. S. and Tian Y. J., A model of probability density function of non-Gaussian wind pressure with multiple samples[J], Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, 140: 67—78”等根据具体情况合理选定。这里提

供根据风压时程的三阶中心矩(偏斜系数)  $m_3 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_j -$

$C_{p,j})^3 / \left[ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_j - C_{p,j})^2 \right]^{3/2}$  和四阶中心矩 (峰态系数)  $m_4 =$   
 $\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_j - C_{p,j})^4 / \left[ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_j - C_{p,j})^2 \right]^2$  确定相应于正态分布峰  
 值因子 3.0 的非正态分布时程峰值因子的取值见表 B. 0. 1-1、  
 B. 0. 1-2。

## 附录 C 太阳辐射引起的材料温升计算方法

### C.1 太阳辐射强度计算方法

C.1.1 太阳辐射强度各分量采用 ASHARE 晴空模型确定,即:

$$\text{垂直入射的太阳辐射强度: } G_{\text{ND}} = \frac{A}{\exp(B/\sin\beta)} C_{\text{N}}$$

$$\text{太阳直接辐射强度: } G_{\text{D}} = G_{\text{ND}} \cos\theta$$

$$\text{太阳散射辐射强度: } G_{\text{dB}} = CG_{\text{ND}} F_{\text{ws}}$$

$$F_{\text{ws}} = \frac{1 + \cos\alpha}{2}$$

$$\text{地面反射辐射强度: } G_{\text{R}} = G_{\text{H}} \rho_{\text{g}} F_{\text{wg}}$$

$$F_{\text{wg}} = \frac{1 - \cos\alpha}{2}$$

式中:  $A$ ——大气质量为 0 时的太阳辐射强度;

$B$ ——大气消光系数;

$\beta$ ——太阳高度角;

$C_{\text{N}}$ ——大气清洁度;

$F_{\text{ws}}$ ——表面与天空之间的角度系数;

$F_{\text{wg}}$ ——表面对地面之间的角度系数;

$\rho_{\text{g}}$ ——地面或水平面的反射率;

$G_{\text{H}}$ ——落在壁面之前的水平面或地面上的总辐射量(直接辐射加散射辐射)( $\text{W}/\text{m}^2$ )。

晴天太阳辐射强度的衰减与太阳光线通过大气层的路径长度有关,可用大气质量来表征该距离,表示大气层对物体表面接收太阳辐射的影响程度。大气质量为 0 时的太阳辐射强度表示大气层边界处的太阳辐射强度,不考虑大气层的吸收和散射作用。

由于垂直入射的太阳辐射强度计算较烦琐,而国家现行标准

《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》GB 50736 中已给出我国大部分地区水平面上的太阳辐射总强度  $G_H$  值,根据水平面上 ASHARE 晴空模型太阳辐射强度关系式,可得出  $G_{ND}$  基于水平面上的太阳辐射总强度  $G_H$  的计算公式:

$$G_{ND} = \frac{G_H}{\sin\beta + C}$$

## C.2 太阳辐射引起的构件温升计算方法

**C.2.1** 在确定太阳辐射下钢板的温度计算公式时,考虑了太阳辐射、周围环境的长波辐射以及与周围空气的对流换热等因素。根据 Stefan-Boltzman 定律,可求得钢板与周围环境的辐射换热强度,即:

$$q_r = \epsilon_f \sigma F_{ws} (T_s^4 - T^4) + \epsilon_f \sigma F_{wg} (T_g^4 - T^4)$$

式中:  $\epsilon_f$ ——表面长波发射率,对于钢材可取 0.8;

$\sigma$ ——Stefan-Boltzman 常数,取  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \times \text{K}^4)$ ;  
该常数为斯蒂芬-玻尔兹曼定律中表征绝对黑体吸收热量的数值;

$T_s$ ——有效天空温度(K),通常取比空气温度低 6K;

$T_g$ ——地面温度(K)。

钢构件表面与外界大气的对流换热遵循牛顿冷却定律,即:

$$q_c = h(T - T_a)$$

式中:  $h$ ——结构外表面的对流热交换系数( $\text{W}/\text{m}^2 \times \text{K}$ );

$T$ ——钢板的温度值(K);

$T_a$ ——空气温度值(K)。

由于钢板具有较高的导热性,可认为钢板沿厚度方向的温度是均匀的,根据传热学原理,可得温度计算公式:

$$\begin{aligned} T &= \frac{q_r + G}{h} + T_a \\ &= \frac{G + \epsilon_f \sigma F_{ws} (T_s^4 - T^4) + \epsilon_f \sigma F_{wg} (T_g^4 - T^4)}{h} + T_a \end{aligned}$$

考虑到夏季正午时刻前后钢板最高温度范围在 30℃ 至 65℃ 之间,空气温度范围在 25℃ 至 50℃,在这两个范围内对上式中钢板温度  $T$  的四次项进行线性拟合,并对周围空气温度  $T_a$  的四次项进行简化,同时设地面温度  $T_g(K)$  与空气温度  $T_a(K)$  之间的比值为  $k$ ,可得到本条规定中温度计算简化公式:

$$T = G + [(2.141 + 2.27k^4) + (2.141 - 2.27k^4)\cos\alpha]$$

$$T_a^4 \times 10^{-8} + h(T_a - 273.15) - 203.84/h + 5.857$$

$$\text{令 } \alpha_1 = 2.141 + 2.27k^4, \alpha_2 = 2.141 - 2.27k^4$$

$$f(T_a, \cos\alpha) = (\alpha_1 + \alpha_2 \cos\alpha) T_a^4 \times 10^{-8}$$

则:

$$T = \frac{G + f(T_a, \cos\alpha) + h(T_a - 273.15) - 203.84}{h + 5.857}$$

**C.2.2** 在太阳辐射作用下,结构或构件吸收太阳辐射强度的大小与构件表面材料的太阳辐射吸收系数有关,常用面漆材料的太阳辐射吸收系数根据试验研究确定。根据工程中常用的颜色,测试面漆颜色选取了白色、红色、黄色、绿色和灰色;根据工程中常用的钢结构表面防腐涂料,选择了3种面漆、2种中间漆、2种底漆。此外,选取了分别涂有超薄型、薄型和厚型的防火涂料试件。通过对各情况下太阳辐射吸收系数的测量和统计分析,得到了不同涂覆条件下的太阳辐射吸收系数值。测试结果表明,面漆颜色是影响太阳辐射吸收系数最重要的因素,而面漆种类对吸收系数的影响有限,中间漆和底漆对吸收系数基本无影响。故此,本条规定中仅列出了不同面漆颜色的太阳辐射吸收系数和防火涂料的太阳辐射吸收系数。

**C.2.5** 正午时刻前后,圆钢管的最高温度位置可认为在过钢管轴线的太阳直射光线与圆钢管截面的相交处,可通过圆钢管轴线与太阳直射光线的空间几何关系得到,如图8所示。

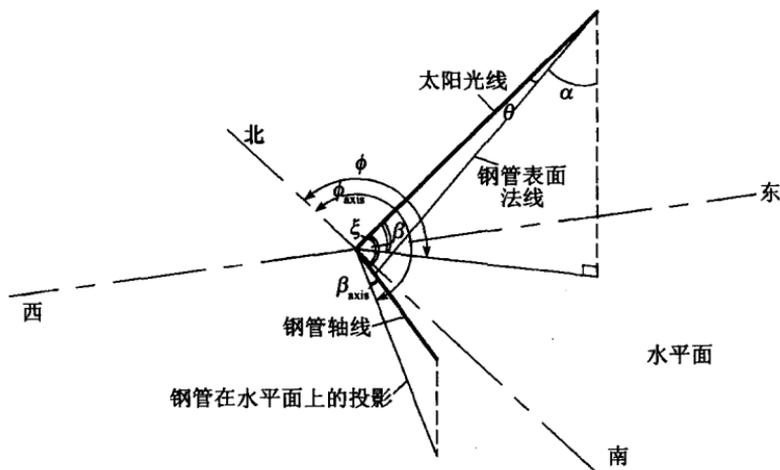


图 8 圆钢管轴线与太阳直射光线的几何关系

图中,  $\phi$  为太阳方位角(太阳光线在水平面上的投影以顺时针方向与北向之间的夹角);  $\beta$  为太阳高度角(太阳光线与其在水平面上投影之间的夹角);  $\phi_{\text{axis}}$  为圆钢管轴线方位角(钢管轴线在水平面上的投影以顺时针方向与北向之间的夹角);  $\beta_{\text{axis}}$  为圆钢管轴线高度角(钢管轴线与其在水平面上投影之间的夹角)。圆钢管的最低温度位置可认为与最高温度位置关于钢管中心对称。

**C. 2. 6** 对流热交换系数  $h$  与建筑表面形状、风速、周围空气温度等因素有关。目前国内外学者结合试验和理论研究已提出多种关系式。Yazdanian 和 Klems 提出的公式(C. 2. 6)在建筑中应用方便,且准确度较好,因此在本规程中采用。