

文章编号:1673-2049(2013)01-0092-12

鄂尔多斯东胜体育场活动屋盖驱动与控制系统设计

范重¹, 胡纯炀¹, 程书华², 顾昉³, 王义华¹, 杨苏¹, 栾海强¹

(1. 中国建筑设计研究院, 北京 100044; 2. 长江精工钢构(集团)股份有限公司, 浙江 绍兴 312030;
3. 上海栎汇机电科技有限公司, 上海 201400)

摘要:在鄂尔多斯东胜体育场活动屋盖中采用钢丝绳驱动系统,对传统的钢丝绳驱动方式进行了重大改进,卷扬设备牵引相对较远一侧的活动屋盖,传力直接明确,作用于固定屋盖的反力显著减小,驱动可靠性提高。在活动屋盖每榀桁架端部设置2个台车,形成扁担效应,增加了结构的稳定性,减小单个台车的荷载,大大降低了轨道桁架杆件与轨道梁的局部压力。台车设置了竖向变形与横向变形调节装置,确保活动屋盖运行平稳,可以有效避免单个台车超载。开合控制系统具有完善的信号采集、监控以及诊断功能,通过均布荷载与纠偏控制,可以实现高精度同步控制,具有完备的安全应急保证系统,保证开合操作在各种紧急情况下的安全性,此外,还针对该工程制定了详细的活动屋盖运行管理规定。鄂尔多斯东胜体育场投入使用后,活动屋盖运行情况良好,在驱动与控制系统方面的成果可供类似工程参考。

关键词:活动屋盖;驱动系统;控制系统;钢丝绳驱动系统;台车;维护

中图分类号:TU391 **文献标志码:**A

Design of Driving and Control System of Retractable Roof for Ordos Dongsheng Stadium

FAN Zhong¹, HU Chun-yang¹, CHENG Shu-hua², GU Fang³, WANG Yi-hua¹,
YANG Su¹, LUAN Hai-qiang¹

(1. China Architecture Design and Research Group, Beijing 100044, China; 2. Changjiang & Jinggong Steel Building (Group) Co., Ltd, Shaoxing 312030, Zhejiang, China; 3. Shanghai Lihui Mechanical & Electrical Technique Co., Ltd., Shanghai 201400, China)

Abstract: The driving system of wire rope was adopted in Ordos Dongsheng Stadium, which was a significant improvement to the traditional driving system of wire rope. The retractable roof on the relatively further side was drawn by winch equipment, force transmission was directly clear, the value of the reaction force that acting on the fixed roof significantly decreased, and the driving reliability increased. Two trolleys were set up in the end of each single-span truss, pole effect was formed, so the stability of the structure increased, the load of a single trolley decreased. Meanwhile, the partial pressure of the rods of track truss and track beam significantly decreased. The adjusting device of vertical deformation and lateral deformation was set in trolley, to ensure the smooth running of the retractable roof, and avoid single trolley load too large. The opening

收稿日期:2012-12-08

基金项目:中国建筑设计研究院研究项目(2010-2120)

作者简介:范重(1959-),男,北京市人,教授级高级工程师,工学博士,E-mail:fanz@cadg.cn。

and closing control system of consummate had the function of signal acquisition, monitoring and diagnostic, high-precision synchronization control could be realized by uniform load and rectifying control. The system had complete safety emergency guarantee system which could ensure the security of the opening and closing operation in a variety of emergency situations. In addition, detailed management requirements of the operation of flexible roof were formulated according to the project. Since Erdos Dongsheng Stadium is put into use, the retractable roof running has been in good condition, and the experience on the driving and control system can provide references for the similar projects.

Key words: retractable roof; driving system; control system; driving system of wire rope; trolley; maintenance

0 引言

带有可开合屋盖的建筑可以满足全天候使用要求,能够根据使用功能与天气情况在室内环境与室外环境之间进行转换,使用者既能够享受阳光与新鲜空气,又可以避免受到风雨等恶劣天气的影响。

带有可开合屋盖的建筑应选择适当的开合驱动与控制方式,确保其运行的安全性、可靠性与耐久性。建筑物中的活动屋盖移动方式与轮轨式起重机有很大差异,门式吊车对轨道的安装精度与轨道的刚度要求较高,而活动屋盖的轨道设置在大跨度固定屋盖顶部时,轨道将随着结构发生显著的变形。迄今为止,各国活动屋盖包括轮式驱动、钢丝绳牵引、齿轮/齿条、链条/链轮、液压千斤顶这 5 种驱动方式。其中,钢丝绳牵引在活动屋盖中应用最为普遍,如日本的大分县体育场、小松穹顶和有明体育场、美国的瑞兰特体育场和维斯康星州米勒运动场、德国的 Gerry Weber 网球场和中国的南通体育会展中心等建筑物的开合屋盖工程均采用了钢丝绳牵引方式^[1-10]。

开合屋盖涉及的技术领域较多,属于交叉学科,需要与相关部门的技术人员互相配合,共同完成开合屋盖的设计工作,因此,需要结构工程师对开合屋盖所采用的驱动系统的特点及适用性有较为深入的理解。开合屋盖在设计时应遵循以下基本原则:

(1)应根据屋盖开合的移动方式与固定屋盖、活动屋盖结构的具体情况,选择相适应的驱动方式,通过开合机械设备的设计,使其能够将活动屋盖的作用力可靠地传递给固定屋盖及下部支承结构,确保活动屋盖的行走机能充分发挥。

(2)控制系统的设计应与开合机械设备和活动屋盖移动方式相适应,并能随时纠正活动屋盖运行中的人为操作失误。

(3)在活动屋盖运行中部件受到摩擦、冲击等作用,逐渐产生磨损与变形,需要考虑进行维修或更换。开合装置应经常进行检修,保证其性能正常。在不影响其他设备与结构安全的情况下,驱动与控制装置可进行维修与零件更换。

(4)可以通过锁定装置在活动屋盖全开状态、全闭状态以及半开状态进行位置固定。

(5)在活动屋盖启动或制动时,应采用反向牵引装置、端止设备等可靠措施,确保开合机械设备与开合结构处于安全状态。当设备运行结束后,应通过锁定装置进行可靠固定。

(6)活动屋盖驱动与控制系统应由具有相关资质与经验的专业厂家进行深化设计、加工制作和安装调试。

(7)应切实做好驱动与控制系统的运行管理和日常维护工作。

驱动与控制系统应充分考虑固定屋盖与活动屋盖的变形,其具有充足的自适应与补偿调整能力,机械液压系统可靠、耐久,与控制系统相协调。施工时应尽量消除结构安装误差与变形的不利影响,减少卡轨力,并通过工厂试验及现场安装调试,确保开合屋盖的顺畅运行^[11-12]。

对于空间移动式开合屋盖,采用钢丝绳牵引驱动的方式最为普遍。由于被动式台车的体积较小,对建筑效果影响不大,得到建筑师与结构工程师们的青睐。传统的做法是将驱动系统设置在被牵引活动屋盖的同一侧,在接近固定屋盖的顶部设置定滑轮,实现牵引方向的变换,如日本的小松穹顶与大分穹顶。同时,为了防止钢索松弛,可以设置相应的张紧装置。

钢丝绳牵引是在台车上或其他部位设置电动卷扬机,通过电动卷扬机的卷筒缠绕钢丝绳牵引活动屋盖,适用于活动屋盖在平面或空间的平行轨道上

行走。钢索驱动系统的主要优点是动力传动可靠性高、技术成熟、受轨道变形与台车行走姿态的影响小、驱动系统故障容易排除。由外力引起的钢丝绳伸长对精确定位有一定影响,且钢索连接点容易引起结构局部受力集中。在进行驱动系统设计与使用阶段,应避免钢丝绳断裂与松弛、电动卷扬机失效、电源故障等活动屋盖运行安全性的不利影响,通过日常检修与维护保养使驱动与控制系统处于良好的状态,对电动卷扬机等关键部件设置预警系统,并能在发生突发事件时使活动屋盖立即制动。

1 工程概况

鄂尔多斯东胜体育场位于内蒙古自治区鄂尔多斯市,地上 3 层,总建筑面积 100 451 m²,共有观众座席 40 500 个,其中,固定座席 35 100 个,活动座席 5 400 个。体育场固定屋盖投影为椭圆形,长轴为 268 m,短轴为 220 m,巨拱高度 129 m,跨度 330 m,拱与地面垂线夹角 6.1°,屋盖顶标高 54.742 m。

鄂尔多斯东胜体育场由看台结构、固定屋盖、活动屋盖、巨拱+钢拉索以及裙房组成。体育场碗状看台采用现浇钢筋混凝土结构,由斜柱、楼层梁与看台梁形成的径向刚架作为径向抗侧力体系;由环向楼面梁连接各榀径向刚架形成环向框架,并在周边柱顶处设置刚性环梁,形成环向抗侧力体系。

体育场结构结合内蒙古草原弓箭的造型,巧妙地采用钢管拱桥的设计理念,通过钢索将屋盖大部分重力荷载传给巨拱,水平荷载则由下部看台混凝土结构承担,使大跨度屋盖桁架的高度大大降低,钢材用量明显减少,结构体系新颖、合理。鄂尔多斯东胜体育场屋盖结构的布置如图 1 所示。

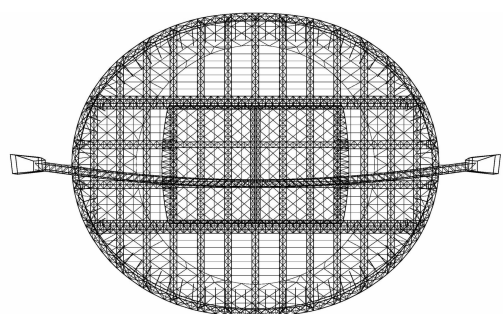


图 1 屋盖结构的布置
Fig. 1 Roof Structure Layout

鄂尔多斯东胜体育场最大可开启面积(水平投影)10 076.2 m²,开启或闭合时间为 18 min,是目前中国规模最大的开闭屋顶体育建筑。体育场单片活动屋盖质量约 500 t,屋盖的开闭采用钢丝绳牵引方

式。活动屋盖采用管桁架结构,屋面采用 PTFE 膜结构,可有效地适应活动屋盖的变形,且防水性能优越,可全天候使用。体育场单片活动屋盖由位于两侧轨道的 14 个台车支承。鄂尔多斯东胜体育场短轴方向的剖面如图 2 所示。

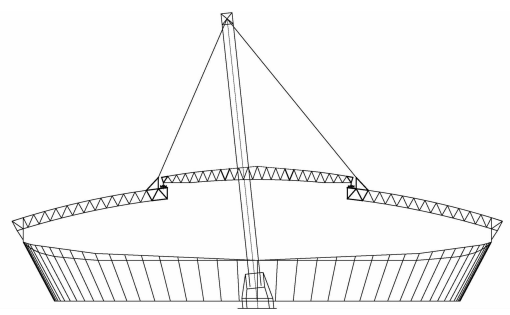


图 2 短轴方向的剖面

Fig. 2 Cross-section Along Short Axis Direction

鄂尔多斯东胜体育场活动屋盖驱动系统的基本运行方式是活动屋盖沿着圆弧形轨道从两侧向屋盖中心移动闭合或反向移动开启。采用创新的钢丝绳牵引活动屋盖远端的驱动方式,通过电动卷扬机、钢丝绳牵引活动屋盖,大大减小了钢索转向引起固定屋盖的反力。每片活动屋盖两边各有 7 个台车,活动屋盖通过台车、轨道等部件将活动屋盖的荷载传至固定屋盖。

在鄂尔多斯东胜体育场驱动与控制系统设计中,重点解决了以下技术难题:

(1)本工程的斜拱拉索+固定屋盖为非对称结构,活动屋盖运行时,两侧的轨道将产生非对称的竖向变形及水平变形。为适应活动屋盖运行过程中的相对变形及台车姿态变化,台车需要具有多方向的调节功能,保证活动屋盖顺利运行,且能够应对风沙天气等状况,防止台车导向轮过载和卡轨,消除过大的卡轨力损伤轨道和结构。

(2)活动屋盖驱动与控制系统设计为多学科协作的系统工程,涉及到结构工程、机械设备、自动控制、加工制作、安装与调试、施工验收等诸多方面,相关单位必须密切配合,共同制定技术方案,对各个环节精心设计,严格控制施工精度,才能确保开合屋盖工程的顺利实施。因此,机械开闭系统的设计应尽早介入,以使建筑、结构、机械开闭系统三者之间相互协调。

2 活动屋盖驱动系统

2.1 驱动系统组成

鄂尔多斯东胜体育场采用 2 套双绳卷扬系统驱

动额定质量为 500 t 的单片活动屋盖,2 片活动屋盖共采用 4 套卷扬系统进行驱动。单片屋盖上的 2 套卷扬驱动系统布置在水平投影为直线的 2 道主桁架上,每套驱动系统由 2 根钢丝绳牵引。每套卷扬开合驱动系统主要由卷筒驱动机构、下部转向滑轮、上部转向滑轮、导向滑轮、托辊导向轮及均衡梁组成。2 根钢丝绳通过均衡梁作用在活动屋盖上,在卷筒的驱动下牵引活动屋盖行走,活动屋盖的开启是在钢丝绳的牵引下依靠重力下滑。鄂尔多斯东胜体育场采用的开合屋盖驱动系统如图 3 所示。

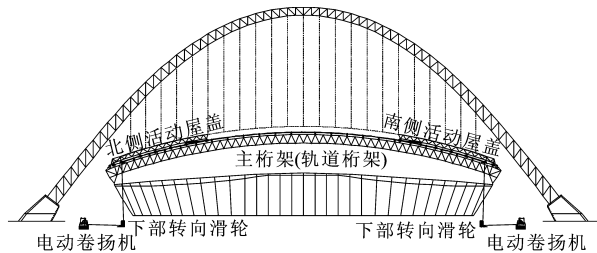


图 3 开合屋盖的驱动系统

Fig. 3 Driving System for Opening and Closing Roof

在固定屋盖的 2 个主桁架上安装鱼腹式轨道梁,然后在轨道梁上铺设轨道,活动屋盖由在轨道上行走的台车支承。单片活动屋盖共由 14 个台车支承,各台车的布置如图 4 所示。

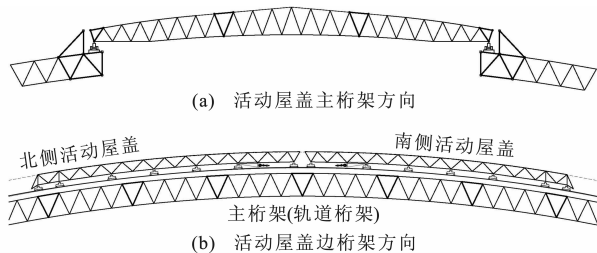


图 4 活动屋盖台车的布置

Fig. 4 Arrangements of Trolleys for Retractable Roof

由于单片活动屋盖由多个台车支承,台车支承反力的分布受到活动屋盖的形状与尺寸、开闭位置、台车位置、固定屋盖及活动屋盖的刚度等因素的影响。通过结构的整体计算分析,可以得到各台车的支承反力。

在自重的作用下,固定屋盖主桁架及活动屋盖将产生一定的变形。活动屋盖除竖向变形外,其桁架下弦在垂直于轨道方向也将有所伸长。同时,活动屋盖的重力荷载对主桁架产生反方向的横向推力,因此,活动屋盖的台车与固定屋盖拱形桁架两者之间存在显著的横向变形差异。活动屋盖运行在不同的位置,活动屋盖与固定屋盖的纵向和横向相对变形不同,全闭位置时最大。

此外,受到温度作用、钢丝绳牵引力以及施工安装误差的影响,活动屋盖的台车与固定屋盖拱形桁架在顺轨道方向与垂直于轨道方向也会产生位移。

2.2 驱动方式与台车布置

结合建筑造型,经多方案比选优化后,确定采用钢丝绳对拉驱动方式,大大简化了机械驱动的复杂程度,解决了转向滑轮受力过大的问题,有效降低了结构设计的难度。

在设计中利用建筑固定屋盖的圆弧造型,通过调整屋盖的圆弧半径,使得台车主要依靠活动屋盖自重下滑力完成开启,仅需在活动屋盖爬升时利用台车驱动,简化了开合屋盖的机械系统与结构设计。设置了下滑反向牵引保障系统,当在特殊情况下活动屋盖无法开启时,可用于克服初始摩擦力。

与以往工程相比,在鄂尔多斯东胜体育场中对驱动方式进行了重大改进:活动屋盖全部采用被动式台车,将卷扬设备设置在轨道端部相应的专用地下机房中,用钢丝绳牵引相对较远一侧的活动屋盖,传力直接明确,转向轮作用于固定屋盖的反力大大减小,使钢索系统大大简化,适应能力更强,驱动可靠性提高。2 个方向钢丝绳平面的位置错开,可以防止相互干扰。鄂尔多斯东胜体育场钢丝绳驱动方式如图 5 所示。

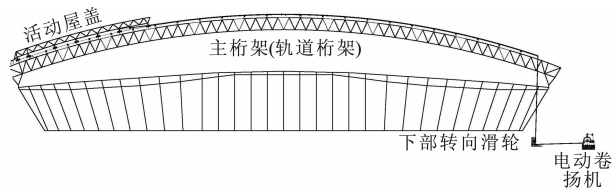


图 5 单侧活动屋盖的驱动方式

Fig. 5 Driving Mode for One of Retractable Roofs

鄂尔多斯东胜体育场单侧活动屋盖在跨度方向共有 4 道桁架,在机械开闭系统方案设计中,最初在单片活动屋盖每侧各布置 4 个台车,将台车设置在活动屋盖桁架的端部。由于桁架间距接近 20 m,单个台车的支承反力超过 1 000 kN。为了控制各台车受力不均匀,需要适当减小活动屋盖边桁架的刚度。为了避免对活动屋盖桁架的侧向稳定性产生不利影响,将活动屋盖每侧台车的数量由 4 台增至 7 台,除内侧 1 根桁架负载较小保持不变外,其余均在桁架端部设置 2 个台车,形成扁担效应,有效增加了结构的稳定性,减小了单个台车的负载,从而改善了结构受力的均匀性和活动屋盖对运行变形的适应能力,大大降低了固定屋盖拱形桁架杆件与轨道梁的局部压力,取得了很好的技术经济效果。图 6 为鄂

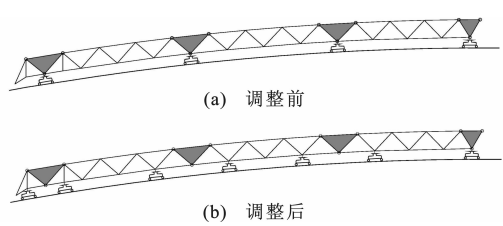


图 6 调整前、后活动屋盖台车的布置

Fig. 6 Retractable Roof Trolley Layout Before and After Adjustment

鄂尔多斯东胜体育场调整前、后活动屋盖台车的布置。

3 驱动系统主要部件设计

3.1 台车

行走台车由台车架、垂直反钩或反滚轮、弹簧装置等组成。台车在顺轨道方向和垂直于轨道方向设有平衡机构,其采用无轮缘的宽踏面车轮,适应轨道梁可能产生的垂直于轨道方向的变形,垂直于轨道方向的水平力由水平轮承受。在与活动屋盖相连的台车上,设置了垂直于轨道方向的滑槽,以适应活动屋盖在开闭过程中产生的变形。在台车上设置了垂直于轨道方向的弹簧装置,以减缓活动屋盖在垂直于轨道方向的变形。

活动屋盖的支座通过法兰盘和高强螺栓与台车顶部相连。在台车设计时应充分考虑台车在运行时承受的横向力以及在风荷载与地震作用下产生的拉力与侧向力,在台车上设置了垂直反钩或垂直反滚轮,保持台车在风荷载、地震作用及运行水平力作用下的位置,防止活动屋盖漂移、车轮脱轨。在活动屋盖运行过程中,驱动系统需要适应轨道水平方向与垂直方向的变形以及两侧轨道的变形差异。在断电或故障维修状态下,通过锁定装置将台车固定在屋盖轨道的任意位置上。鄂尔多斯东胜体育场台车的主要设计参数如表 1 所示。

表 1 台车的主要设计参数

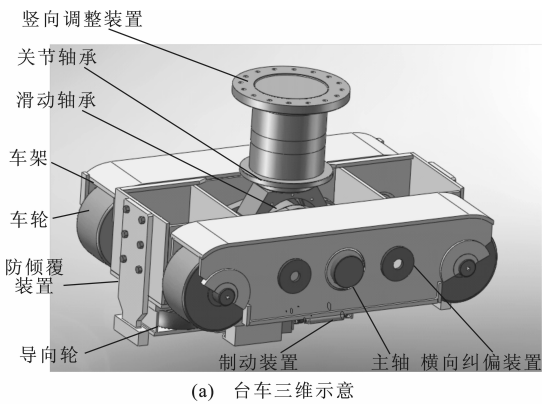
Tab. 1 Main Design Parameters of Trolleys

参数	设计值
台车横向承载力/kN	≥100
台车竖向承载力/kN	≥1 000
台车水平调整量/mm	≥±100
台车垂直调整量/mm	≥±100
台车主轴承载力/kN	1 500
单个车轮承载力/kN	375

根据国家现行《起重机械设计规范》进行计算,确定台车轮宽 250 mm,车轮直径 $D_c=500$ mm,车轮轴直径 $d_c=110$ mm,安全系数为 2.5。鄂尔多斯

东胜体育场台车的三维示意如图 7(a)所示。

本工程台车采用油缸调整台车和活动屋盖之间的相对位置,运行时可以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以调整台车顶部的高度,防止台车过载。台车顶部油缸的构造如图 7(b)所示。



(a) 台车三维示意



(b) 台车顶部油缸的构造

图 7 活动屋盖的台车构造

Fig. 7 Trolley Construction for Retractable Roof

为适应活动屋盖在运行过程中的相对变形及台车姿态变化,支承活动屋盖的油缸具有 3 个转动方向和横向滑动的自由度。通过在关节轴承内圈安装滑动轴承,套在台车的主轴上,可以在垂直于轨道方向左右滑动。

台车在运行过程中,既要灵活适应固定屋盖和活动屋盖之间的水平相对变形,防止台车导向轮过载和卡轨,又要保证固定屋盖能够提供足够的约束反力,以便对活动屋盖进行纠偏。为实现这个目的,在水平方向滑动轴套与台车之间通过有源阻尼器(油缸+弹簧阻尼器)连接。

关节轴承内、外圈之间可自由转动与滑动。油缸既可以在正常运行时灵活运动,又可以在纠偏时提供可控的纠偏力。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,可以实时监控台车导向轮和轨道的横向受力情况以及活动屋盖的偏斜姿态。为了控制建造成本与结构的安全性,

还应严格控制台车及附属设备的质量。

采用精密的控制系统设计与现场总体调试,可有效避免两侧台车偏斜导致的卡轨。通过日常检查、运行监控、常规保养等措施,避免台车车轮处的轴承、关节轴承与滑动轴承等关键部件失效,防止雨水进入与锈蚀,确保台车处于正常工作状态。

为保证台车达到设计要求的承载能力,在出厂前进行模拟实际工况的试验,可将运行过程中台车出现故障隐患的可能性降至最低。专门研制的试验设备完全可以模拟台车运行的实际情况,测试台车在额定运行速度下的承载力和耐久性、竖向与横向调节能力、运动阻力与制动装置的可靠性等,试验如图 8 所示。



图 8 台车承载力与加载状态下的运行能力试验

Fig. 8 Trolley Test for Load Carrying Capacity and Movement Capacity Under Loading

3.2 轨道

轨道对于活动屋盖顺畅运行至关重要,可以参照《通用门式起重机》(GB/T 14406—93)^[13]和《起重机设计规范》(GB/T 3811—2008)^[14]中的相关规定,根据台车的轮压进行设计。轨道应满足竖向承压、受拉与侧向压力的需求,台车运行的侧向压力与轮压大小相关。轨道应具有足够的强度与刚度,减小台车在运行中的变形量。在满足活动屋盖运行轨道刚度要求的前提下,应尽量减少轨道自重。轨道应采用强度高、硬度与耐磨性好的材料。轨道对安装精度的要求很高,在主体结构卸载完成后方可安装就位,使其连接构造能够充分适应主体结构的变形。轨道及接头部位应平整光滑,在连接处将焊缝打磨平整,也可以采用设置伸缩缝的方式克服超长轨道温度变形的影响。台车的轨道梁与支承结构如图 9 所示。

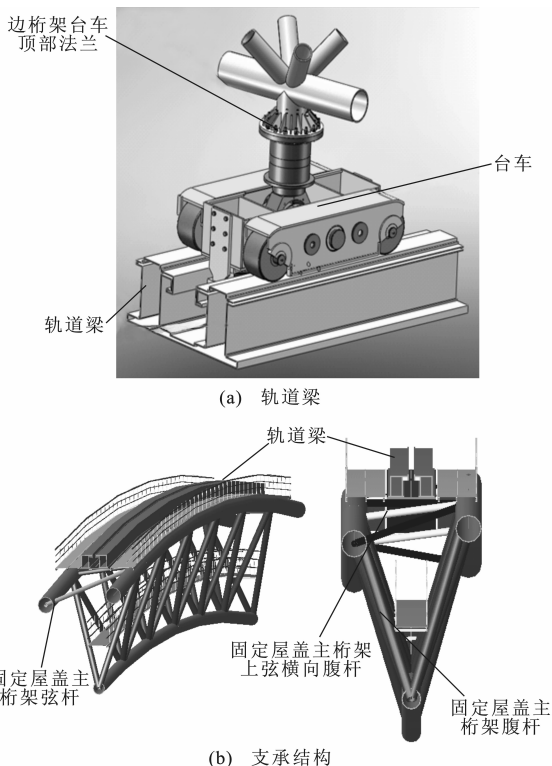


图 9 台车的轨道梁与支承结构

Fig. 9 Track Beam and Support Structure of Trolley

在固定屋盖主桁架上安装轨道梁时,应对其位置进行精细调节。轨道梁校正包括标高、平面位置和垂直度,保证轨道梁位于理想的圆弧曲线上。轨道接缝位置与轨道梁接缝位置不得重合,轨道的平面位置和垂直度的校正应同时进行。垂直度采用挂线锤测量,发现偏差可在轨道梁底部加垫片进行校正,轨道顶面圆弧应平滑过渡。

轨道顶面平整度的允许误差不应大于 $1/1\,000$,全闭状态同一截面内 2 根平行轨道标高的偏差不应大于 5 mm,轨道接头间隙不大于 5 mm。台车轨道的施工安装如图 10 所示。



图 10 台车轨道的施工安装

Fig. 10 Construction and Installation of Trolley Tracks

3.3 牵引钢丝绳

本工程共采用 4 台 110 kW 电机,电机功率与

活动屋盖运行动力需求相匹配。牵引钢丝绳应具有 良好的性能,选用强度高、柔韧性好、耐久性好的大 直径钢丝绳,同时应考虑启动与制动时惯性力引起 的动力放大系数。由于钢丝绳承受反复荷载,安全 性至关重要,安全系数应在 6.0 以上。钢索弯折角 度不能太小,卷筒直径与钢索直径之比不应小于 20。

牵引钢丝绳与活动屋盖的连接构造应满足结构 体系之间传递牵引力的要求,避免产生显著的偏心 荷载。在鄂尔多斯东胜体育场活动屋盖驱动钢索连 接处设置了均衡梁,从而有效避免了结构偏心受力 的不利影响。本工程活动屋盖与均衡梁的连接构造 如图 11 所示。钢丝绳绕过均衡梁的 2 个滑轮,两边 钢丝绳均经过托辊和滑轮后其端部与卷筒固定。这 样既保证了两边钢丝绳受力均等,又避免绳头与活 动屋盖铆固连接,降低了安全风险。在均衡梁上安 装测力销,可随时监测运行过程中两边钢丝绳拉力 之和,作为驱动系统操作的重要控制参数。本工程 钢丝绳驱动系统的设计参数如表 2 所示。

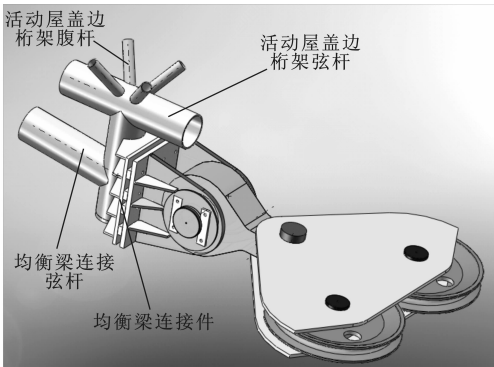


图 11 活动屋盖与均衡梁的连接构造

Fig. 11 Connection Structure of Retractable Roof and Balance Beam

表 2 活动屋盖钢丝绳驱动系统的设计参数

Tab. 2 Design Parameters of Wire Rope Driving System for Retractable Roof

参数	设计值
年作业循环次数	200
工作循环总次数	10 000
移动距离/m	60
移动速度/($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	3
单片屋盖驱动功率 P/kW	148
单片屋盖驱动电机台数	2
单台电机实际驱动功率 P_e/kW	74(选择 110 kW 的电机)
单根钢丝绳最大静荷载 F_{sh}/kN	550.5
钢丝绳公称直径 d/mm	72
最小破断拉力/kN	3 520
安全系数	6.0

设置 4 个均衡梁,单个质量为 8 t,外形尺寸为 2 176.3 mm×800 mm×800 mm。在活动屋盖安装 完成后焊接均衡梁与边桁架下弦的连接件,待电动 卷扬机、轮系等部件安装完成后安装主钢丝绳。

3.4 转向滑轮、导向滑轮与托辊

钢索的转向滑轮受到很大的集中力,其固定支 架应与主体结构进行可靠连接,但同时也应避免连 接构造引起明显局部偏心弯矩。为了防止台车运行 时出现牵引乱绳与钢索滑脱的情况,沿钢索长度方 向在一定间隔处设置了托辊与导向滑轮,其构造如 图 12 所示。

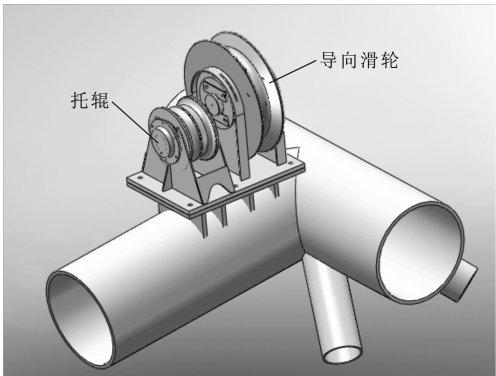


图 12 托辊与导向滑轮

Fig. 12 Idlers and Guide Wheels

托辊为主要受压部件,其安装前必须根据上部 转向滑轮轴线位置进行定位安装,根据现场实际位 置进行配装。

3.5 插销

为了防止活动屋盖自由滑动,当活动屋盖闭合 后,作为保护措施,采用液压驱动的电动插销将 2 片 活动屋盖相互锁定在一起。2 片活动屋盖之间可以 传递水平力,有效增加了活动屋盖的稳定性。安全 插销装置如图 13 所示。

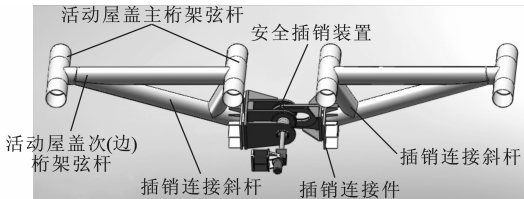


图 13 安全插销装置

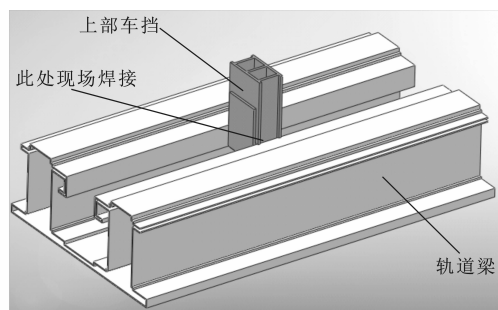
Fig. 13 Safety Latch Device

当屋盖在全开和全闭状态下时,使用安全插销 将屋盖可靠固定,使其保持静止状态。安全插销只 承受顺轨道方向的荷载,垂直于轨道方向的荷载由 水平轮承受,竖向荷载由运行轮承受。作为一种安 全手段,在开合行程两端设置缓冲限位装置。

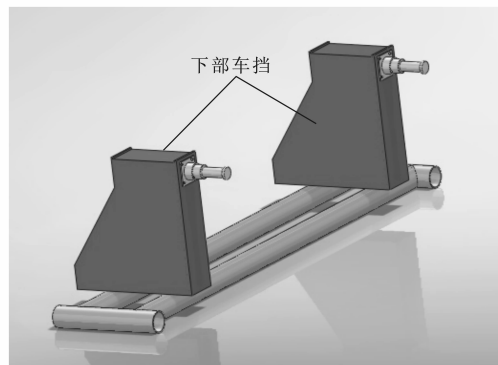
插销在活动屋盖拼装结束后进行焊接。屋盖合龙后,插销需经过不小于 10 次的开合操作,根据现场实际位置进行配装。

3.6 车挡

在轨道端部设置台车运行端止装置(车挡)与缓冲器。活动屋盖达到最大开启位置后,由固定屋盖上的车挡对其限位。车挡采用液压装置,减少接触时的撞击并减小活动屋盖与车挡接触的不均匀性。车挡及连接构造应具有足够的强度,能够阻止正常速度运行的开合式屋盖,并有效控制各个车挡受力的同步性。当个别车挡出现超载时,可以自动将作用力转移至其他车挡,以确保结构体系的安全性。上部车挡共有 4 处,用于活动屋盖全闭状态;下部车挡缓冲器共有 12 处,用于活动屋盖全开状态,如图 14 所示。单个下部车挡质量为 3 t,外形尺寸 2 040 mm×400 mm×1 158 mm。车挡在安装完毕后,需经过不小于 10 次的开合操作,并根据现场实际情况进行安装调试。



(a) 上部车挡



(b) 下部车挡

图 14 活动屋盖端部限位装置

Fig. 14 End Limit Device for Retractable Roof

3.7 自锁装置

在大风与地震作用下活动屋盖发生事故的可能性较大,单靠行走机构的制动装置可靠性不高。为防止地震及台风作用下活动屋盖产生移动,在行走机构上设置锁定销栓装置。在轨道两端和中间区域

的轨道支承结构上布设插座,以便在半开状态以及发生地震、暴风、故障等紧急状态时,台车上的销栓插入轨道支承结构的插座后即可锁定活动屋盖。自锁销栓与插座之间允许存在一定的偏差,用于适应温度变化引起屋盖结构的伸缩变形。由于地震作用时的滑移与反复撞击,需要充分考虑作用于自锁销栓水平力的不均匀性。

4 控制系统设计

4.1 基本原则

控制系统通过对驱动系统的控制,确保活动屋盖能够在轨道上无偏斜移动。为防止人工误操作,引入了自动控制操作系统,实现自动/手动 2 种操作模式之间的自由切换。活动屋盖控制系统主要包括以下 6 个方面:

(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现象,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信干扰。

(5)防雷保护。

(6)在活动屋盖上安装前照灯、传感器、风速仪等安全报警装置。

开合屋盖控制系统设计应考虑适当的冗余度,当某一个部位出现故障时,不应影响其他部位。

4.2 基本要求

开合屋盖采用多台车驱动方式,运行时需要一个完善、精确的控制系统,操作人员需要时刻了解各处设备的运行情况。控制系统自身构成多级闭环网络,在正常情况下,操作人员只需按下启动按钮,活动屋盖就可以自动完成开合。各工程开合屋盖系统所选用的控制器各不相同,但控制框架基本相似,都采用总线结构,将各个控制设备连接在一起。采用总线的优点是减少了各个设备之间的接线,将复杂的指令、数据信号通过一根总线传达到每个终端设备,同时将需要了解的运行参数上传到总控制器中。

开合屋盖的每一片屋盖均设置单独的控制系统,可以单独启动,活动屋盖的数量和终端控制器的数量相一致,各片屋盖的控制器通过总线和监控中心的主控设备相连。控制每片屋盖的子站和该屋盖

上的驱动设备、检测设备构成闭环系统,屋盖终端控制器只要接到指令,就可以按照既定程序运行。

4.3 驱动同步控制

由于开合屋盖具有多个驱动单元,如果多点驱动的不同步性不好,就会出现活动屋盖走偏、歪斜的现象。如何实现高精度的同步控制,成为开闭屋盖技术的关键。在屋盖开闭的不同阶段,精度优先保证的参数是各不相同的,通常开闭动作基本可分为启动阶段、运行阶段和停止阶段。启动阶段加速运动,距离一般不长,多在 1~5 m 之间,该阶段各种因素所造成的误差较小,重点是对加速度的控制,以保证在预定位置达到一定速度,加速度的变化要平稳,避免加速度大幅度的变化对结构产生冲击。运行阶段匀速运动,各驱动机械相互协调,通过调节速度,保证各点位置同步、姿态良好。停止阶段减速运行,达到预设减速位置时,触发器发出信号,进入减速停止阶段,要求各点到停止前位移相同,避免碰撞。在屋盖开闭过程中对轨道两侧偏移的限值要求较高,鄂尔多斯东胜体育场活动屋盖行程约为 60 m,允许相对偏差为 0.08%~0.24%。

对驱动机械的高精度同步控制是开合屋盖的关键技术,以电机与液压马达为同步控制对象。电动卷扬机用变频调速器实现无级调速,用力矩和张力控制,液压马达则通过伺服系统对流量的控制实现调速。屋盖在运行时是动态的,运行时位移是关于时间的函数,对位移的控制是通过其对时间的倒数——速度控制实现的。

4.4 控制系统

控制系统采用西门子 S7 控制器、Profibus 工业总线分布式控制系统,主控制器采用 S7-300,从控制器采用 S7-200,每个台车上安装有 S7-200 控制器对台车进行终端控制。与 PLC 相匹配,安装有研华工控系统记录运行参数和运行自诊断程序,中控室内还装有多路视频监视系统,可直观显示设备运行状况。

4.4.1 屋盖开启过程

屋盖开启过程为电动卷扬机放出钢丝绳、活动屋盖在重力作用下缓慢下移的过程。屋盖开启过程可以分为以下 3 个阶段:

(1)打开安全插销。屋盖在关闭时,2 个屋盖用安全插销紧固在一起,使屋盖不会下滑,钢丝绳在全闭时处于松弛状态,所以需要首先打开安全插销。控制系统控制电动卷扬机缓慢张紧钢丝绳,待钢丝绳达到一定的张力后,控制系统控制起动机,拔出安

全插销。

(2)控制屋盖开启。安全插销完全打开后,控制系统控制电动卷扬机减小牵引力,屋盖在重力作用下缓慢下移,屋盖按照一定的加速度下移,逐渐达到正常速度,这时电动卷扬机处于发电制动状态。

(3)减速停止过程。当活动屋盖接近全开位置时,控制系统开始增大电动卷扬机的牵引力,使活动屋盖逐渐减速,当检测到完全开启信号时,控制台车上的制动器停止屋盖移动,并控制电动卷扬机使钢丝绳保持较小的张力,命令电动卷扬机上的制动器进行制动,电机停止运转,屋盖开启过程完成。

4.4.2 屋盖关闭过程

屋盖关闭是开启的反过程,控制系统先控制电动卷扬机使钢丝绳达到一定的张力,然后继续控制电动卷扬机增加牵引力,使屋盖缓慢上移,并按一定的加速度达到正常速度后保持匀速。当屋盖快要关闭时,控制电动卷扬机减小牵引力,使活动屋盖逐渐减速,当检测到接近安全插销位置的信号时(通过屋盖位移传感器信号),控制电动卷扬机逐渐减小牵引力,并启动安全插销电机,插进安全插销;当屋盖完全闭合时(屋盖位移传感器检测到的距离小于一定值),缓慢减小钢丝绳张力,达到预定张力后,控制台车上的制动器制动,并继续放松钢丝绳,使钢丝绳处于松弛状态;电动卷扬机制动器制动,屋盖完成关闭过程。鄂尔多斯东胜体育场活动屋盖开合控制系统流程如图 15 所示。

4.4.3 均载控制

本工程控制系统在活动屋盖上的每个台车装有一个均载油缸。控制系统通过对油缸行程和压力检测,计算出每个台车的荷载,通过调整顶升油缸的压力和位移,使得每个台车在运行过程中的荷载基本相同。

4.4.4 纠偏控制

控制系统中台车的纠偏控制是为避免安装误差或结构变形引起台车受卡及活动屋盖运行过程中的走偏而形成的卡轨。每个台车上设有纠偏调整油缸、压力传感器和位移传感器,主控制器把这些压力传感器和位移传感器采集的数据经过一定的计算,即时调整台车动作以及钢丝绳牵引力大小,并随时调整屋盖的运行姿态,使活动屋盖平稳、安全地开启与闭合。

4.4.5 检测、监控与自诊断系统

(1)检测系统的冗余和自校验

在设计时大量采用闭环控制,闭环控制的优点

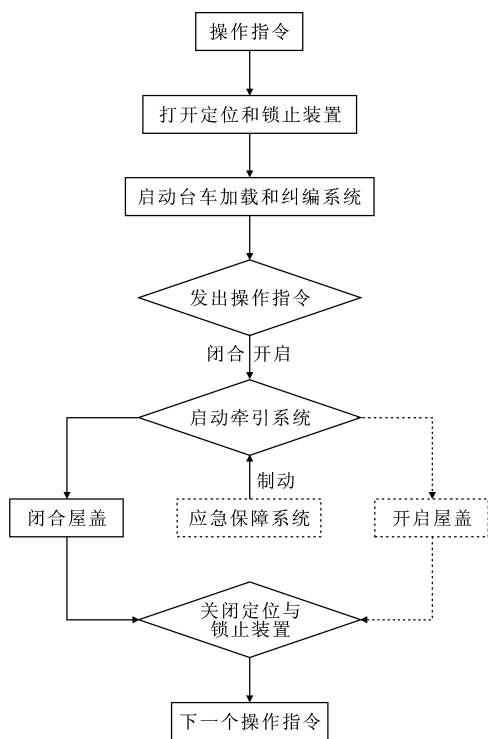


图 15 活动屋盖开合控制系统流程

Fig. 15 Flowchart of Opening and Closing Control System for Retractable Roof

是能够自动修正外部因素的影响,保持目标值的稳定。为了确保系统的安全运行,检测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,如插销间隙检测采用双位移传感器,同一屋盖有 2 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。

由于主要状态均实现冗余检测,因此本系统具备了自校验故障的报警功能,当系统源一旦发生故障时,立即切入最安全的安全事故工况。

(2) 监控系统

为便于操作人员远程监控屋盖的运行状态,设置了多个摄像头,可以监控各个台车、2 片活动屋盖之间的插销位置以及牵引驱动机房等实时情况。通过操作室的大屏幕多画面显示器,可以监控机械设备各个部分的运行状况。监控系统可保存视频信号,一旦系统发生故障可以通过历史记录查找故障原因^[15]。

(3) 信号采集记录与自诊断

本工程控制系统装有一套工控机系统,通过组态软件可将设备的运行状态实时地显示在屏幕上,工控机的海量存储器可将安装运行数据准确无误地记录在硬盘上,以备随时查验。

由于工控机具备快速数据处理能力,检测系统满足冗余和自校验的功能,因此可以根据检测信号相互之间的关联关系,编制自诊断程序,一旦某一关联关系遭到破坏,即可判断为故障。工控机的自诊断程序根据失常的检测信号,指明故障位置和故障性质,可使操作人员在第一时间进行故障排除。

4.5 安全应急保障系统

(1) 停电状况下的安全应急措施

牵引系统全部采用断电抱闸控制,在高速转轴上装有断电抱闸制动系统,同时在低速转轴上装有夹紧制动装置,断电抱闸制动系统能单独提供相当可靠的停电制动功能。

(2) 控制系统故障时的安全应急措施

开闭系统在正常状态下通过控制系统安全有序地工作,通过采集和发出信号,一旦控制系统出现故障,整个开闭系统会自动停止运行。

(3) 断索状况下的安全应急措施

控制系统在每根钢丝绳上均装有测力装置,一旦发生断索现象,立即会发出信号,同时该信号会传输到中央控制器。在发生断索的情况下,其余变频电机上的力矩检测会及时发现力矩增大情况,该情况会通过信号传输到中央控制器,从而使中央控制器做出反应。2 种检测信号均反映到中央控制器上,通过控制系统对异常信号做出反应,第一时间通知操作人员,并能自动实现工作状态停止。这种安全措施能使某根钢丝绳断裂的情况下及时制止其继续发生,从而不会发生多根索断裂的恶性循环。

钢丝绳采用的安全系数为 6.0,一个电动卷扬机控制箱控制 2 根钢丝绳。由于控制系统的安全措施,不会发生 2 根及以上钢丝绳断裂的情况。在某根钢丝绳断裂的情况下,对应的台车能及时做出制动响应,与其他没有断裂的钢丝绳一起作用将活动屋盖缓慢停在原位,从而能安全地牵引整个活动屋盖,不致发生整个系统瘫痪的恶劣状况。

电动卷扬机制动器采用的安全系数为 1.5,在某根钢丝绳断裂的情况下,引起的其余制动器的力矩增加不会导致非正常工作状态的发生,因此,该系统在断索情况下具有良好的安全保障措施。

(4) 火灾状况下的安全应急措施

体育场馆发生火灾的可能性很小,但在开闭系统的设计中必须考虑各种最不利因素,制动的冗余设计,特别是机械制动能力(台车制动能力、钢丝绳制动能力、电动卷扬机制动器等常闭型制动能力)设计让开闭系统在火灾发生时使整个系统处于安全状

态下。

鄂尔多斯东胜体育场活动屋盖控制系统的操作台见图 16,建成后的体育场实景见图 17。



图 16 活动屋盖控制系统的操作台

Fig. 16 Driving Control System Console for Retractable Roof



图 17 鄂尔多斯东胜体育场实景

Fig. 17 Photo of Ordos Dongsheng Stadium

5 活动屋盖驱动与控制系统的管理

鄂尔多斯东胜体育场活动屋盖机械驱动系统与控制系统属于重要的特殊设施,需要通过严格的管理措施确保其安全性、可靠性与耐久性。切实做好驱动与控制系统的维护管理工作对保障活动屋盖正常运行非常重要。在开合方式和驱动与控制系统设计时,应考虑方便运行操作与维修管理,加注润滑脂等使维护保养容易进行,在轨道上的所有部位均可进行维修,需要修理的部件拆卸、更换方便。应通过人员或摄像监控设备对屋盖开合过程进行监测,专用监控室应设在能够看到活动屋盖运行情况、视线良好的位置,并通过定期检查或临时检查,及时发现驱动系统的故障与缺陷。根据开合屋盖基本状态与使用要求,明确全开、全闭状态以及开合屋盖运行的条件,并制定相应的管理措施。

5.1 运行管理

制定开合屋盖使用手册,对运行条件(气温、风力、降雪、降雨等)做出明确规定,相关人员专门培训,运行管理专人负责。应制定活动屋盖运行与维

护的相关规定与注意事项,确保活动屋盖安全操作和使用,制定活动屋盖发生事故时的应急预案。

保证定期运行、保养,确保机械零件处于良好的工作状态。活动屋盖在全开、全闭以及运行过程中保持姿态正确无误,机械驱动系统应当能够运转 5 年而不大修。在外部天气条件允许的情况下对系统功能进行检查,机械驱动系统在轨道上的所有部位都可以进行维修。

5.2 维护保养

(1)定期进行运行检查,屋盖每月至少打开或关闭 1 次,保持设备的良好运行状态。

(2)每次动作前,应检查钢索位置与张拉是否正确,轨道处不准有任何杂物;夹轨器是否能够打开,电动插销推杆是否正常工作。

(3)每月进行维护保养,注意检查各个行程开关,使其保持良好的状态。检查各部件连接螺栓的紧固状况,防止螺栓松脱;检查焊接部位的情况,发现焊接裂纹及时记录报告。

(4)每月检查各个控制台、配电柜、配电箱等设备,使其保持良好的工作状态;检查内容填写到维护保养记录表中。

(5)每半年对整个机械、控制系统进行一次全面的维护保养;各个加油点每半年加注一次润滑脂,必须保证整个系统运行的灵活性,并填写半年维护保养记录表。

(6)严格按照使用要求定期更换润滑脂与电池。

(7)每 2 年由专业维护工程师对整个屋盖机械传动系统进行一次全面的检查与维护保养。

(8)电气设备均应防雨、防潮,如果出现淋雨和受潮现象,立即擦拭干净,并用烘干机烘干,检查绝缘性能符合要求后,才允许通电使用。

(9)遇到紧急情况时,应立即停止设备运行。

(10)如果设备运行过程中突然停止工作,必须查明原因,才允许其继续工作。

(11)及时清理设备污渍,保持设备的整洁。

(12)定期对固定屋盖、活动屋盖进行全面检查,出现异常情况应及时记录处理。

5.3 屋盖开合操作

(1)每次屋盖开合操作前,维修人员应对机械、控制设备进行全面检查。

(2)在开合操作过程中,操作人员与指挥人员用对讲机随时联系,根据指令动作。

(3)在屋盖开合的全过程中,操作人员严禁脱离岗位。

(4)操作前应检查控制系统是否正常,并启动监控系统。

(5)检查风速仪数据,并记录。

(6)屋盖在半开状态的停留时间不能超过 10 min,在全闭状态应插上插销。设备运行过程中,要利用监控系统监控开合全过程,观察系统运行状态是否有异常,并及时填写屋盖开合运行记录表。

(7)以下情况严禁屋盖开合操作:①灾害性天气(如风速超过 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的大风、地震、中雨及以上);②机械设备检查有异常情况,机械工程师不同意运行;③控制系统检查有异常情况,自控工程师不同意运行;④屋盖设备(如灯光、音响等)、排水系统等检修维护;⑤其他非正常工作状态。

6 结 语

通过对传统的钢丝绳驱动方式进行改进,使钢索系统作用于固定屋盖的反力显著减小,驱动可靠性提高。在活动屋盖每榀桁架端部设置 2 个台车,增加了结构的稳定性,减小单个台车的负载,大大降低了轨道桁架杆件与轨道梁的局部压力,取得了很好的技术经济效果。控制系统具有高智能化、高冗余度的特点,可以确保开合操作在各种紧急情况下的安全性。在台车设置了多向调节装置,可以根据运行情况调整台车姿态与反力,成功地解决了活动屋盖的左、右轨道变形不对称问题。针对本工程制定了详细的活动屋盖运行管理规定,对于确保开合屋盖长期运营的可靠性具有重大意义。

参考文献:

References:

- [1] MOGAMI K. The Ohita Dome and Retractable Structure in Japan[C]//SECWC. SECWC'98. San Francisco:SECWC,1998:1-12.
- [2] ISHII K. Structural Design of Retractable Roof Structures[M]. Southampton:WIT Press,2000.
- [3] BRADSHAW R, CAMPBELL D, GARGARI M, et al. Special Structures: Past, Present, and Future[J]. Journal of Structural Engineering,2002,128(6):691-709.
- [4] 刘锡良. 现代空间结构[M]. 天津:天津大学出版社,2003.

- LIU Xi-liang. Modern Spatial Structures[M]. Tianjin: Tianjin University Press,2003.
- [5] PINTO C, ABRUZZO J, DESCENZA R. New Pivot Bearings for Miller Park's Moveable Roof Hit a Home Run with the Park's Owners and the Team's Fans[J]. Modern Steel Construction,2004(5):1-6.
- [6] KASSABIAN P, YOU Z, PELLEGRINO S. Retractable Roof Structures[J]. Structures and Buildings,1999,134(2):45-56.
- [7] MANN S, TOKARCZYK B. The Past, Present, and Future of Retractable Roofs[J]. Structure Magazine,2004(11):33-39.
- [8] 陈以一,陈扬骥,刘 魁,等. 南通体育场开闭式屋盖钢结构设计[J]. 工业建筑,2004,34(增):84-90.
CHEN Yi-yi, CHEN Yang-ji, LIU Kui, et al. Steel Structure Design of Nantong Stadium Retractable Roof[J]. Industrial Construction,2004,34(S):84-90.
- [9] RIBERICH B L. Retractable Stadium Roofs and Flooring[J]. Interface,2009(1):12-21.
- [10] 范 重,赵长军,李 丽,等. 国内外开合屋盖的应用现状与实践[J]. 施工技术,2010,39(8):1-7.
FAN Zhong, ZHAO Chang-jun, LI Li, et al. Application Situation and Practice of Retractable Roof in China and Abroad [J]. Construction Technology,2010,39(8):1-7.
- [11] 管 军,顾大强,段福斌. 移动屋盖开合机械的设计方法[J]. 机械设计与研究,2004,20(5):77-80.
GUAN Jun, GU Da-qiang, DUAN Fu-bin. Design Method of Retractable Mechanical of Mobile Roof [J]. Mechine Design & Research,2004,20(5):77-80.
- [12] 周良金,顾大强. 屋盖开合机械装置设计[J]. 起重运输机械,2010(7):8-13.
ZHOU Liang-jin, GU Da-qiang. Design of Retractable Mechanism for Retractable Roof [J]. Hoisting and Conveying Machinery,2010(7):8-13.
- [13] GB/T 14406—93,通用门式起重机[S].
GB/T 14406—93, Universal Gantry Crane[S].
- [14] GB/T 3811—2008,起重机设计规范[S].
GB/T 3811—2008, Design Codes for Cranes[S].
- [15] WNUK V P. Monitoring System Proves Rooftop Safe After Seattle Earthquake [J]. Experimental Techniques,2001,25(3):21-25.

