

开合屋盖结构设计关键技术研究

范重, 彭翼, 胡纯炀, 刘先明

(中国建筑设计研究院, 北京 100044)

摘要: 结合作者完成的开合屋盖工程设计经验, 对开合屋盖结构设计的关键技术进行了较为全面的论述。屋盖的开合方式应根据建筑方案、使用功能、自然条件、运营管理等因素综合确定, 应明确规定活动屋盖开合的基本状态; 从结构安全与经济性的角度来看, 将抵抗荷载与作用最有利的活动屋盖位置作为基本状态较为合理; 活动屋盖应采用整体刚度较小、对边界条件不敏感的柔性结构, 对安装误差与结构变形具有较大的适应能力; 固定屋盖, 尤其是轨道桁架应具有较大的刚度, 并严格控制施工精度; 活动屋盖位于全开、半开及全闭三种状态的荷载取值存在很大差异, 需要分别进行计算分析; 应考虑活动屋盖与固定屋盖之间的相互作用, 轨道桁架、台车及连接部件应在罕遇地震作用下保持弹性; 在活动屋盖处于非基本状态或行走过程中, 地震作用可适当折减; 应通过对多种驱动方式进行技术经济比较, 确定活动屋盖开合驱动与控制系统, 系统应便于操作与维修, 驱动控制系统的维护管理工作对保证活动屋盖运行的可靠性与耐久性非常重要。

关键词: 开合屋盖; 基本形态; 活动屋盖; 固定屋盖; 计算分析; 驱动与控制系统

中图分类号: TU393.3 文献标志码: A

Key techniques of structural design for retractable roof

FAN Zhong, PENG Yi, HU Chunyang, LIU Xianming

(China Architecture Design & Research Group, Beijing 100044, China)

Abstract: Based on the practice of retractable roof design, the key techniques were discussed in this paper. The retractable method of the roof is determined by factors such as architectural plan, function requirements, natural conditions and operation management. The concept of basic retractable state is defined explicitly in this paper, and from the safe and economic points of view, it is rational to set retractable roof condition with the maximum load resistance as the basic state. The movable roof favors the flexural structural system that is less sensitive to boundary conditions and can be adaptive to the large deformation and construction error. The fixed roof system, especially the runway truss system, should have sufficient stiffness, and the construction precision should be controlled strictly. Due to the load values are significantly different corresponding to different states of the moving roof, such as fully open, half open and fully closed states, the analyses for the three states are needed separately. The interaction between the moving roof and the fixed roof should be considered, and the runway trusses, trolleys and the linkage components should be kept elastic even under severe earthquake. The ground acceleration could be reduced to some degrees during the roof moving and in non-basic states. The driving system and the control system should be chosen based on the technical and economical comparisons, and the systems should be easy to operate and maintain. The maintenance and management are very important to ensure the long term reliability of the retractable roof.

Keywords: retractable roof; basic state; moving roof; fixed roof; structural analysis; driving system and control system

作者简介: 范重(1959—), 男, 北京人, 工学博士, 教授级高级工程师。E-mail: fanz@cadg.cn
收稿日期: 2010年4月

1 概论

1.1 开合屋盖的功能与特点

带有开合屋盖的建筑是一种较为新颖的建筑形式,它打破了传统室内空间与室外空间的界限,可以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,使用者既能够尽情享受阳光与新鲜空气,又可以避免风雨等恶劣天气的影响,可满足全天候的使用需求。

带有开合屋盖的建筑可按活动屋盖的位置分为全开、全闭与半开三种状态,通过专业人员对活动屋盖进行开启、关闭运行操作。开合屋盖的应用对象以游泳馆、网球馆、棒球馆等体育建筑为主,规模逐渐从小型建筑发展到大型工程。与传统的大跨度结构相比,开合屋盖除广泛采用现代建筑设计理念外,对结构设计技术、施工安装精度也提出了很高的要求。此外,由于活动屋盖的行走装置采用了很多机械传动与控制技术,因此在开合屋盖的设计中涉及到建筑、结构、机械、自动化控制等多个学科领域,是现代建筑科技的集中体现。

1.2 国内外开合屋盖工程进展

从上个世纪 80 年末开始,大型开合屋盖工程在发达国家得到快速发展。1989 年建成的加拿大多伦多天空穹顶是现代大型开合屋盖结构中的经典之作,美国 1998 年建成的亚利桑那州菲尼克斯棒球场,2000 年建成的休斯敦棒球场,2000 年建成的米勒棒球场均为开合屋盖结构^[1-4]。日本上世纪 90 年代初至本世纪初是开合屋盖建设的鼎盛时期,先后建成的开合屋盖有:1993 年建成的宫崎县海洋穹顶和福冈棒球场,1997 年建成的小松穹顶,2000 年建成的仙台穹顶,2001 年建成用于世界杯比赛大分县体育场和爱知县丰田体育场^[5-10]。在欧洲已经建成的开合屋盖建筑中,最知名的是 1997 年建成的荷兰阿姆斯特丹体育场和 2005 年竣工的英国温布利足球场^[11-13]。

目前国内已经建成的带有开合屋盖的大型建筑还比较少,2005 年建成的上海旗忠网球馆^[14]、2006 年建成的南通体育会展中心^[15]、2000 年建成的浙江黄龙体育中心网球中心^[16]等是国内规模较大的开合屋盖建筑。

1.3 开合屋盖设计中存在的问题

开合屋盖通常由活动屋盖、固定屋盖与驱动控制系统构成,目前国内外开合屋盖结构设计还处于探索研究阶段。国外开合屋盖在使用过程中存在的问题与出现故障的情况较多,发生过围护结构破损、机械故障、运行不畅等情况。与普通的大跨度空间结构相比,其技术复杂性大得多。

目前我国自主完成的开合屋盖设计还比较少,相关技术研究不够深入,对最佳开启方式、活动屋盖与固定屋盖结构体系、开合屋盖荷载与作用、驱动与控制系统等缺乏系统研究。我国尚未颁布有关开合屋盖结构技术规程,对开合屋盖结构安全性、活动屋盖运行可靠性、建造成本等方面的研究还处于工程案例层次,迫切需要通过学术研究与工程实践,不断提高设计水平。

与传统的结构形式相比,开合屋盖结构设计具有显著的特点。现结合作者完成的国家体育场、鄂尔多斯东胜体育场和国家网球中心新馆等大型工程的结构设计^[17-19],介绍在开合屋盖设计中采用的关键技术。

2 开合屋盖基本形态设计

2.1 工程概况

国家体育场位于北京奥林匹克公园中心区,是北京 2008 年奥运会的主体体育场,固定座席可容纳 8 万人,活动座席可容纳 1.1 万人,总建筑面积约为 250000m²,其“鸟巢”结构已经成为北京市的重要标志性建筑。在国家体育场原方案与初步设计中,大跨度屋盖可开启部分位于体育场田径跑道外沿的上方,国家体育场开合屋盖方案如图 1 所示。

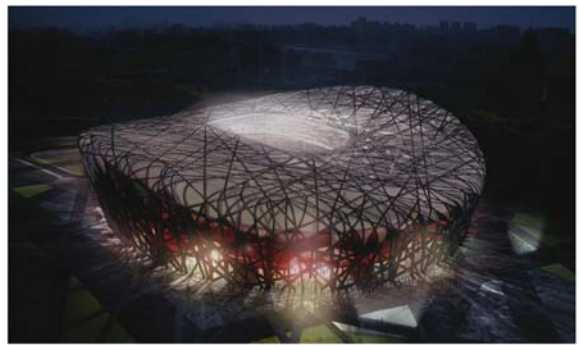


图 1 国家体育场开合屋盖方案
Fig. 1 Retractable roof plan of the Beijing National Stadium

鄂尔多斯东胜体育场位于内蒙古鄂尔多斯市,共有观众席 35000 座,总建筑面积为 86295m²。该工程巧妙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跨度 330m、高度 129m、倾斜 6.1°的大拱,该体育场是目前国内规模最大的带有开合屋盖的体育建筑(图 2)。

国家网球中心新馆位于北京市朝阳区奥林匹克公园北区场馆群网球中心,建成后将成为承办“中国网球公开赛”的专用比赛场馆,将成为北京地区最大、具有国际先进水平的网球比赛场馆,赛时看台区总座席数为 13598 个。建筑最大高度约为 46m,总建

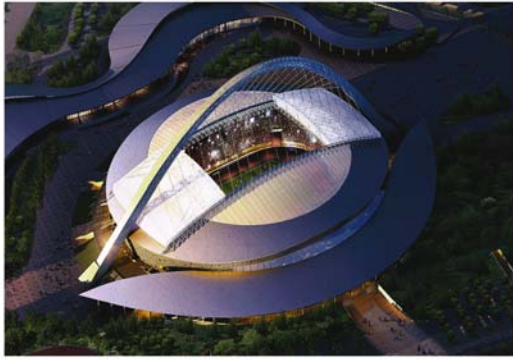


图2 鄂尔多斯东胜体育场

Fig. 2 The Erdos Dongsheng Stadium

建筑面积约 51199m²,大跨度屋盖中间带有可开启的活动屋盖。国家网球中心新馆如图 3 所示。



图3 国家网球中心新馆

Fig. 3 The New National Tennis Center

2.2 活动屋盖开启方式的确定

迄今为止,国内外已经建成的开合屋盖建筑有多种活动屋盖移动方式。开合方式应根据建筑形式、使用功能、地理环境、气象条件、运营管理方式等条件综合确定。活动屋盖的基本移动方式包括直线平行移动、旋转移动以及折叠移动等三种平面运动方式。通过对以上三种基本方式进行组合,可以形成更为复杂的开启方式。当活动屋盖沿着带有坡度的平行轨道移动时,形成空间移动方式。应尽量避免采取过于复杂的开启方式,降低设计与建造的难度,提高活动屋盖运行的可靠性。

开合屋盖根据可开启面积大小分为全部开启与部分开启两种情况。对于中小型建筑,整个屋面可以成为可移动的屋面;对于大型建筑,综合考虑使用功能、工程造价、技术可靠性等因素,一般仅有部分屋面可以移动。在确定开启率与开启部分形状时,应考虑开启后的固定屋盖阴影对场地使用的影响。

国家体育场开合屋盖方案设计与鄂尔多斯东胜体育场设计时,建筑平面呈椭圆形,体育场田径、足球场平面为矩形,东、西方向为主看台,根据观众视线与遮挡风雨等要求,采用活动屋盖沿固定屋盖圆弧面上平行轨道上的移动方式。由于屋盖开启率相

对较小,降低了活动屋盖结构自重,并采用膜结构作为屋面材料,有效控制了开合屋盖的造价。国家体育场开合屋盖方案与鄂尔多斯东胜体育场设计时采用的开合方式如图 4 所示,活动屋盖的两部分同时运动或停止。

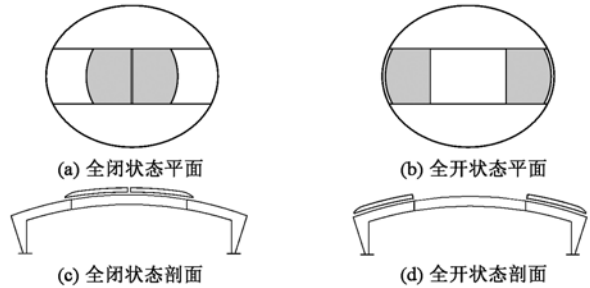


图4 国家体育场原方案与鄂尔多斯东胜体育场的开启方式

Fig. 4 Retractable methods of the National Stadium's original plan and the Erdos Dongsheng Stadium

国家网球中心新馆平面为圆形,观众席沿比赛场地环形布置。为了在圆形平面获得较大的开启面积,提出了一种折叠移动的开启方式,使屋盖开启面积率可以达到 50%。活动屋盖采用张紧的 PTFE 膜材作为围护结构,有效克服了在索结构中膜材皱褶开合方式长时间使用可靠性降低的缺点,建筑外观新颖别致。国家网球中心的折叠移动开启方案如图 5 所示。

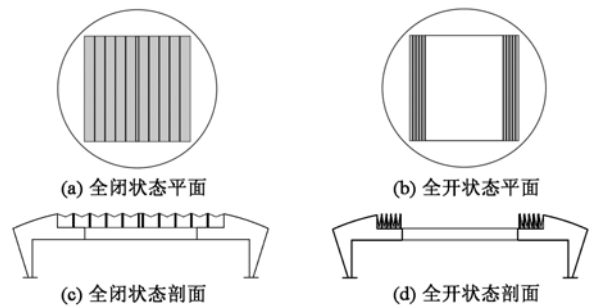


图5 国家网球中心的折叠移动开启方案

Fig. 5 Foldable roof plan of the New National Tennis Center

2.3 确定开合基本状态的原则

开合屋盖根据活动屋盖所处的位置分为全闭状态、全开状态及半开状态,在进行开合屋盖设计时,应首先根据建筑的使用条件,明确规定活动屋盖在大多数情况下(非使用与夜间无人值守时)所在的位置,可以称之为开合基本状态。应根据开合基本状态进行结构计算分析,并制定相应的运行管理规定。开合基本状态对于建筑功能、开合操作管理、结构设计标准以及工程造价均有很大影响。

开合基本状态根据建筑使用情况通常分为常闭或常开两种。

所谓常闭状态,即活动屋盖平时以全闭为主,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,运动场配备人工草坪。在国家网球中心新馆设计时采用常闭状态。

所谓常开状态,即活动屋盖平时以全开为主,一般用于田径、足球比赛等的大型体育场,通常室内无空调设备,运动场育有天然草坪。在国家体育场原方案与鄂尔多斯东胜体育场设计时采用常开状态。

活动屋盖根据使用情况开启的频度有很大差异,从一年两次到每年数百次不等。从国内外实际使用情况来看,开合屋盖实际开启次数一般远小于设计年开启次数。从结构安全性与经济性的角度来看,将对结构抵抗荷载与作用最有利的开闭状态作为基本状态较为合理。比如对某类开合屋盖形式,全开或全闭时的风荷载效应最大,在台风等风速很大时,可以将屋盖置于结构受力相对有利的全开或全闭状态,而在其他情况仅考虑较低风速的风荷载影响。由此可以看出,开合屋盖的使用管理与结构安全密切相关,这也是开合屋盖不同于普通建筑形式特点之一。此外,需要对活动屋盖在风、雨、雪等天气条件下运行提出明确的规定。

开合屋盖建筑所处的环境与一般室内环境有很大不同,很多实际开合屋盖工程即使在全闭状态时也并不是完全密闭的。由于在开启状态时,场地内部暴露于室外大气环境中,可能遭遇风霜雨雪天气,建筑内表面也会受到风荷载的作用。因此,在选择材料性能与考虑结构构件的保护层或进行防腐涂层设计时,应充分考虑环境因素的影响,确保结构的耐久性。

由于目前国内尚未颁布开合屋盖建筑消防设计的相关规定,开合屋盖覆盖的空间作为室内或室外空间的界定尚不明确,一般需要通过专门的消防性能化设计确定相应的火灾防护措施。

2.4 对活动屋盖基本性能的要求

在设计中应提出开合屋盖系统的预期性能特征和设计标准,其中包括机械装置和控制系统的性能标准,明确开合屋盖体系所能接受的最低性能,指导驱动控制元件的设计和开发,并确保屋盖在整个使用年限中系统性能和适用性能能够保持稳定,确保风荷载、温度和地震作用等可以从活动屋盖顺畅地传递到固定屋盖上,并使活动屋盖与固定屋盖的预期位移满足设计要求。

在国家体育场、鄂尔多斯东胜体育场和国家网球中心新馆设计中,开合屋盖各组件的设计使用年限如表 1 所示,并考虑可能需要维修的所有部件的安全移除和重新安装。

鄂尔多斯东胜体育场活动屋盖运行控制参数如

表 2 所示。活动屋盖的运行速度与采用的驱动方式有关,但考虑到驱动力需求与运行安全性,一般速度不宜太快。活动屋盖在雨雪天气情况下可以运行,但当雪荷载较大时(如超过 0.1kN/m^2)不得进行开合操作。在地震发生时,地震传感器将自动切断活动屋盖运行,使活动屋盖处于锁定状态。

表 1 开合屋盖各组件的设计使用年限

Table 1 Designed service life of assemblies for retractable roof

项目	设计使用年限
活动屋盖结构构件	50 年
驱动装置(车轮,支座,电动机等)	25 年
控制系统(逻辑控制、限位开关和监控设备)	10 年

表 2 活动屋盖运行控制参数

Table 2 Main parameters of movement for moving roof

项目	限值要求
屋盖开启时间	$18 \pm 2\text{min}$
屋盖闭合时间	$18 \pm 2\text{min}$
最大开启和闭合循环次数	200 次/年
运动过程中发出噪音	55dB
最大风速	15.0m/s
最低气温	-29.8°C
最高气温	$+35.0^\circ\text{C}$

3 活动屋盖结构体系

3.1 活动屋盖结构设计要点

由于实际工程中存在轨道制作安装误差,加之固定屋盖伴随活动屋盖行走引起的变形、温度变形、基础不均匀沉降等因素,轨道的几何位形不可避免地存在偏差,当活动屋盖行走时,将造成各支点之间的不均匀变形。这些边界条件的变化将对屋盖结构内力产生影响,且随结构形式、跨度、支座变形量的变化而有所不同。因此,在进行屋盖计算分析时,应考虑轨道不平整、驱动装置误差对活动屋盖及下部结构受力状态与变形的影响,根据情况对台车位置变形差异的影响,考虑相应的边界条件。

对于大型活动屋盖,行走机构数量较多,如果活动屋盖结构刚度较大,支座反力将有很大差异。因此,活动屋盖应尽量采用对边界条件不敏感的柔性结构形式。活动屋盖的驱动控制系统应具有对于主体结构安装偏差、极端气象条件,如温度、风荷载、雪荷载等作用下结构变形的充分适应能力,确保在轨道不平整等情况下活动屋盖正常运行。此外,活动屋盖质量分布应比较均匀,并能保证闭合后板块之间接缝处的防雨构造贴合紧密。

在进行开合屋盖结构设计时,应符合安全可靠、

适用耐久的原则,确保活动屋盖顺畅运行。不同于普通大跨度结构,活动屋盖结构选型应遵循以下主要原则:①活动屋盖的结构形式应与屋盖开启方式紧密结合;②结构选型应尽量与固定屋盖的建筑风格与结构体系协调一致;③严格控制结构自重,减小屋盖移动驱动动力的需求,优先选择重量轻的膜材或金属屋面作为围护结构,当采用折叠开启方式的膜结构时,应选用可折叠的膜材;④活动屋盖的整体刚度不应过大,应具有较大的变形适应能力,屋面坡度应有利于排水;⑤活动屋盖支点的构造便于与驱动机械系统相结合。

3.2 国家体育场开合屋盖设计方案

国家体育场活动屋盖分为南、北两部分,两部分之间以富有传统特色的“阴阳”曲线形状在中间相接。每片屋盖跨度为75m,中心长度为70m。从平面投影来看,活动屋盖主次构件布置方式与固定屋盖完全一致,使活动屋盖在全开状态及全闭状态时,可与固定屋盖完全吻合。

活动屋盖在固定屋盖的顶面移动,它的底面与固定屋盖结构的上表面大约有1.8m的间隙。活动屋盖的上表面沿跨度方向剖面呈抛物线形,主桁架最大高度为8.5m,在两侧及后部下降至3m。

活动屋盖南、北部分均被分为5个板块,各块的结构由主桁架与次桁架组成,主桁架构件端部支承于两端的台车之上,次桁架用于保证主桁架的侧向稳定,形成屋盖的外轮廓与悬挑结构、支撑围护结构,并将荷载传至主桁架。每个板块均为三角形或具有三角形布置的主桁架。这种分离式的结构形式具有以下优点:

(1)对于三角形板块,每个板块的三个角点总能与固定屋盖保持接触,对固定屋盖的变形适应性很强,台车荷载容易控制,边界条件简明,活动屋盖结构体系对变形有很大的适应性。

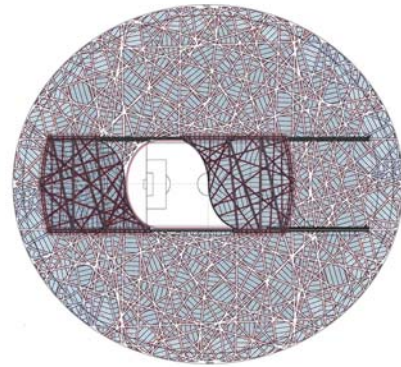
(2)分块式的屋盖对温度变形不敏感。

(3)屋盖板块可以在地面制作拼装,整体吊装,可以大大缩短现场的施工时间。

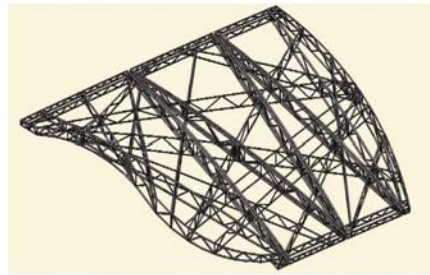
在两个相邻板块的边桁架之间留有缝隙,活动屋盖两弦杆宽度与缝隙之和与固定屋盖顶面构件的宽度非常接近。

国家体育场活动屋盖移动方式与活动屋盖结构板块划分如图6所示。

开合屋盖沿着固定屋盖之上的曲线轨道运行,最内侧的板块在全闭状态重心位置与水平面的夹角为 0.23° ,在全开状态重心位置与水平面的夹角为 4.77° ;最外侧的板块在全闭状态重心位置与水平面的夹角为 3.48° ,在全开状态重心位置与水平面的夹角为 8.02° 。活动屋盖结构总用钢量约为1500t。



(a) 活动屋盖移动方式



(b) 活动屋盖结构分块

图6 国家体育场活动屋盖示意图(原设计方案)

Fig. 6 Sketch of moving roof for

the Beijing National Stadium(original plan)

3.3 鄂尔多斯东胜体育场

鄂尔多斯东胜体育场开合屋盖,活动屋盖由两个单元块组成,在中间直线相交,闭合时可与固定屋盖完全吻合。活动屋盖最大可开启面积(水平投影)长113.524m,宽88.758m,全闭状态时重心处的圆弧角为 5.88° ,全开状态重心处的圆弧角 15.11° ,活动屋盖最大爬坡角度 9.41° ,单片活动屋盖自重(含膜结构)约为500t。

该工程活动屋盖驱动系统的基本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。驱动系统设计应达到保证结构的可靠性与经济性等目标。采用钢缆绳牵引的驱动方式,通过卷扬机、钢缆绳牵引活动屋盖。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。

每片活动屋盖沿跨度方向共设置4道主桁架,主桁架跨度为83.758m,主桁架最大高度为约6.0m,最小高度为2.5m,宽度为4.5m,平面位置与固定屋盖完全对应。沿活动屋盖纵向布置两道桁架,以增强主桁架的侧向稳定,并为尾部的弧形部分结构提供支撑。

边桁架作为主桁架的支承结构,每片活动屋盖两侧各有7个台车安装于边桁架下方,支承整个活动屋盖。边桁架在台车之间保持为直线,传力直接。

牵引钢索通过边桁架下弦前部的均衡梁,将驱动拉力传递给活动屋盖。屋面采用交叉檩条体系,作为活动屋盖水平支承与膜结构的支撑杆件。活动屋盖屋面采用 PTFE 膜结构,可有效适应活动屋盖的变形,防水性能优越。

鄂尔多斯东胜体育场活动屋盖结构布置如图 7 所示。

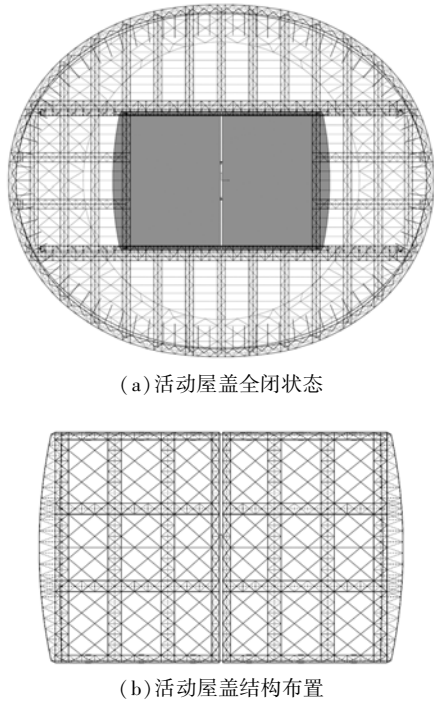


图 7 鄂尔多斯东胜体育场活动屋盖
Fig. 7 Retractable roof of the Erdos Dongsheng Stadium

3.4 国家网球中心新馆

在国家网球中心新馆开合屋盖设计过程中,先后采用了折叠移动与平行移动两种方案。

3.4.1 折叠移动方案

沿跨度方向共设置 10 榀三角形空间桁架,桁架跨度为 72m,两侧台车的位置相对应。活动屋盖采用上弦支承形式,在纵向布置可滑动式刚性系杆,增强桁架的侧向稳定性。屋面采用 PTFE 膜结构,材料强度高,透光性好,可折叠性能好。膜结构在活动屋盖开合过程中,始终处于张紧状态。

活动屋盖为双向对开式,在中间对接处采用密闭防水构造措施,采取防风、沙尘、雨雪措施,实现活动屋盖关闭后舒适的室内环境。国家网球中心新馆活动屋盖折叠移动方案如图 8 所示。

3.4.2 平行移动方案

平行移动方案为活动屋盖采用双层弓式结构,通过滑移轨道放置于固定屋盖中弦层之上。活动屋盖由四个单元构成,上层两个单元宽度为 16m,跨度为 74.6m,下层两个单元宽度为 16m,跨度为 71m。国家网球中心新馆活动屋盖平行移动方案见图 9。

4 固定屋盖结构体系

4.1 固定屋盖设计要点

固定屋盖在各种荷载作用下应具有足够的强度与刚度,保证支承活动屋盖台车轨道主桁架足够的刚度,对于确保活动屋盖运行顺畅至关重要。

开合屋盖的施工精度应严格控制,并通过预起拱等措施保持活动屋盖准确的外形尺寸,这对于保证轨道安装的精度与活动屋盖板块之间的密封非常重要。

与普通大跨度结构不同,除需考虑结构自重、建筑屋面做法、天沟马道、照明音响等吊挂荷载及检修荷载外,对于开合屋盖大跨度结构,固定屋盖需要承托活动屋盖巨大的移动荷载。固定屋盖结构设计时尚应遵循以下主要原则:①屋盖的几何形态应适应活动屋盖的运行需求;②采用结构刚度特别是竖向刚度较大的结构形式;③对活动屋盖全开、全闭以及运行状态的各种可变荷载具有良好的适应性;④轨道支撑结构应具有很大的刚度,严格控制轨道在活动屋盖行走过程中的变形量。

4.2 国家体育场固定屋盖

国家体育场建筑平面为椭圆形,长轴为 332.3m,短轴为 296.4m,椭圆长轴位于南北方向,短轴为东西方向。在最初的开合屋盖设计方案中,根据观众席视线及开合屋盖轨道布置的要求,在建立固定屋盖的曲面形状时,沿体育场短轴方向设置半径为 719.900m 的向上圆弧 R_1 ,沿体育场长轴方向设置半

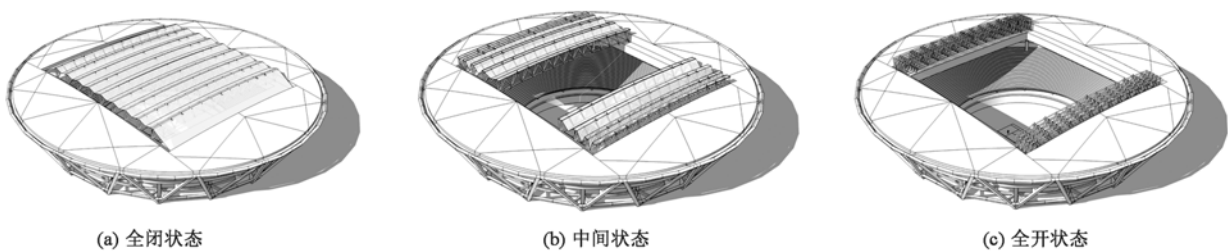
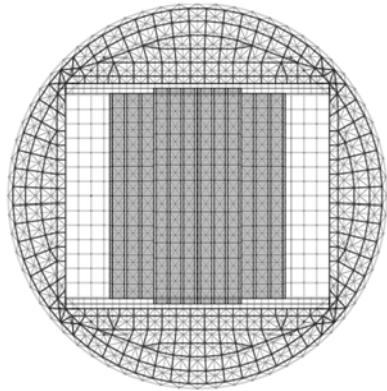
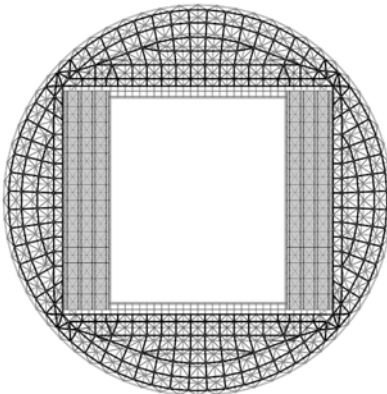


图 8 国家网球中心新馆活动屋盖折叠移动方案
Fig. 8 Folding process of retractable roof for the New National Tennis Center



(a) 全闭状态



(b) 全开状态

图9 国家网球中心新馆活动屋盖平行移动方案
Fig. 9 Horizontal moving method of the New National Tennis Center's retractable roof

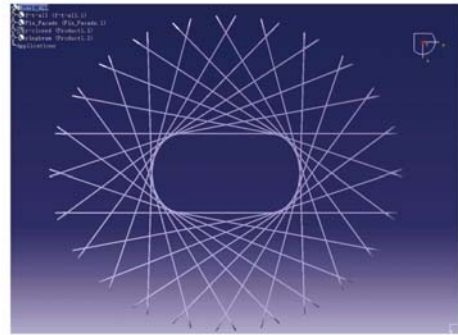
径为 882.706m 的向下圆弧 R_2 , 将 R_1 以 R_2 为母线平行滑动, 可得到屋顶上表面的鞍形曲面, 最高点高度为 68.5m, 最低点高度为 40.1m。

在体育场周边设置了 24 根桁架柱, 柱距为 37.958m。可开启部分位于体育场田径跑道外沿的上方, 长度为 142m, 宽度为 75m。通过 24 根内柱的形心作直线与屋盖内环相切, 可以得到交叉布置的主结构平面定位轴线, 主桁架围绕固定屋盖的可开启部分放射形布置。主桁架高度为 12m, 其中贯通于南北方向的两个平行主桁架作为活动屋盖轨道的支承结构, 如图 10a 所示。

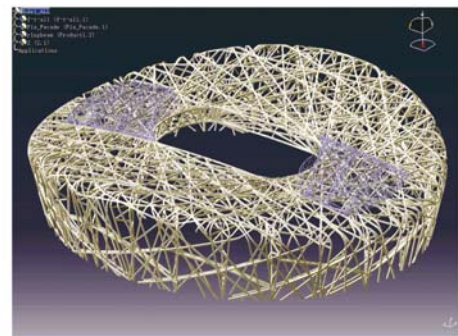
交叉布置的主结构与屋面及立面的次结构一起形成了“鸟巢”的特殊建筑造型, 结构刚度很大。“鸟巢”活动屋盖全开状态如图 10b 所示。体育场看台部分采用钢筋混凝土框架-剪力墙结构体系, 与大跨度钢结构完全脱开。

4.3 鄂尔多斯东胜体育场

鄂尔多斯东胜体育场固定屋盖顶面球形曲面, 外径 359.5m, 以满足屋面排水与活动屋盖台车运行的需求。在沿活动屋盖运行轨道方向布置主桁架,



(a) 主桁架布置



(b) 三维模型

图10 国家体育场开合屋盖结构方案示意图
Fig. 10 Retractable roof structural sketch of the Beijing National Stadium

在与主桁架垂直的方向布置次桁架。在屋盖周边布置环向桁架以增加屋盖结构的整体刚度。在整个屋盖结构面内布置檩条与交叉支撑体系, 以增加屋盖结构的面内刚度。

主桁架采用复杂截面空间管桁架, 截面总高度为 10.0m, 平面尺寸满足设置活动屋盖轨道及台车行走的空间。在主桁架轨道的外侧设置突出屋面的三角形桁架以便与巨型钢拱的钢索相连接, 三角形桁架高度跨中部为 5m, 靠近固定屋盖端部逐渐缩小为零。

次桁架与主桁架同高, 截面采用三角形立体桁架, 高度 5m, 宽度为 5m。屋盖周边布置的环向桁架是屋盖结构与下部混凝土结构之间重要的过渡构件, 与混凝土框架外柱柱顶的球形支座相连接, 将主、次桁架端部的集中力较为均匀地传给下部混凝土结构。环向桁架截面形状为四边形, 高度为 5m, 最大宽度为 5m 左右。

巨型钢拱采用钢管桁架, 采用近似悬链线线形, 拱所在平面与地面垂线夹角 6.1° , 在临近钢拱拱脚 4 个节间的弦管中灌筑混凝土, 以提高钢拱在罕遇地震作用下的承载力。在对应固定屋盖与钢拱桁架的节点位置布置了 23 组钢索, 连接位置设在轨道桁架上弦节点, 可以有效减小固定屋盖在活动屋盖运行时的变形量, 使大跨度屋盖桁架高度有效降低, 水平

荷载则由下部刚度较大的混凝土看台结构承担。固定屋盖、巨型钢拱与钢索形成整体受力体系,共同承担各种荷载效应。鄂尔多斯东胜体育场结构体系如图 11 所示。

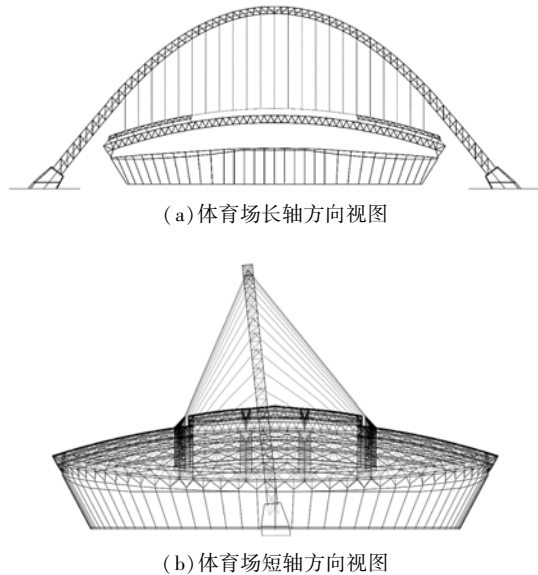


图 11 鄂尔多斯东胜体育场结构体系

Fig. 11 Structural system of the Erdos Dongsheng Stadium

4.4 国家网球中心新馆

国家网球中心新馆主体结构采用钢筋混凝土框架结构体系,外立面布置 16 组钢筋混凝土 V 形柱,各榀环向框架、径向框架与立面 V 型柱共同构成抗侧力体系。

固定屋盖平面呈圆形,最大直径为 140m,最大高度约为 46m,在场地中央上空设置 70m × 60m 的矩形洞口。固定屋盖采用网格结构,在活动屋盖可移动范围内为双层平面网格结构,结构高度为 3.6m;活动屋盖的运行范围以外改为三层网格结构,使屋盖结构刚度有效增大,同时能够很好地满足建筑立面对活动屋盖遮挡的要求。固定屋盖支承在下部 16 组 V 形柱顶的环梁之上,在看台结构的四个角部各有一根混凝土柱向上延伸,作为固定屋盖的中间支点,有效增加了屋盖刚度,减小结构变形量,有利于活动屋盖平稳运行。在进行结构网格划分时,充分考虑其受力特点,对屋盖开口周边,尤其是轨道桁架部位进行了加强,如图 12 所示。

5 开合屋盖结构计算分析要点

由于大型开合屋盖结构的重要性与复杂性,在设计时应全面考虑结构自重、建筑屋面、天沟马道、照明音响及机电设备等恒荷载、检修荷载、雪荷载、风荷载、温度作用、地震作用、活动屋盖移动荷载等

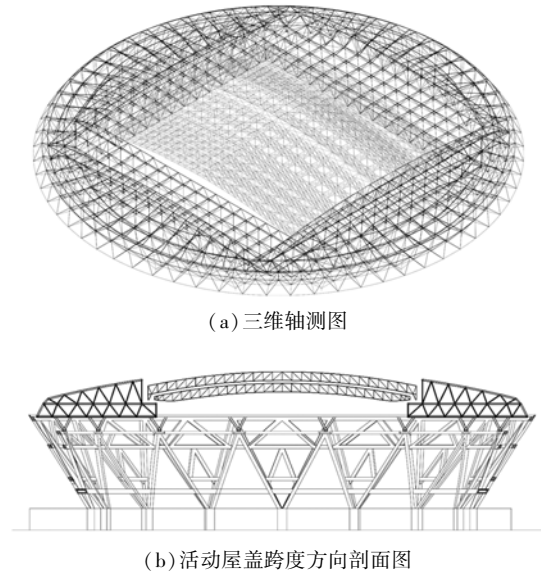


图 12 国家网球中心新馆结构

Fig. 12 Structural system of the New National Tennis Center

各种荷载。对开合屋盖进行全面的计算分析,确保活动屋盖与固定屋盖结构体系在各种不利荷载工况组合下的安全性。与普通大跨度结构不同,开合屋盖除需要考虑活动屋盖行走引起的移动荷载外,需要分别对活动屋盖全开、全闭及半开状态进行计算分析。此外,活动屋盖全开、全闭及半开三种状态的荷载取值也存在较大差异。

当活动屋盖处于基本开合状态时,屋盖结构应该能够承受各种最大的荷载与作用,其他状态荷载值可根据具体情况适当减小。进行开合屋盖计算分析时,主要荷载与作用的特点如下。

5.1 雪荷载

雪荷载根据地域气候条件差异很大,应针对开合屋盖可能出现的开合状态,分别考虑雪荷载的影响。活动屋盖的开合状态对雪荷载效应有很大影响。在一般情况下,屋盖全开状态降雪在屋面堆积量小,比屋盖全闭状态有利。如果在此条件下进行设计与计算,当后期运营管理不到位时,结构将出现危险状况。

应充分考虑气候环境特点与屋盖的形状、屋面积雪漂移、滑落引起的不均匀分布以及局部堆积的可能性,根据实际情况确定雪荷载的不对称分布与局部较大积雪荷载。在多雪地区,活动屋盖一般设定为常闭状态,可以考虑设置热风系统等屋面融雪装置,控制雪荷载的影响。

当屋面积雪后进行活动屋盖开合移动是比较困难的。为保证安全,减小驱动控制系统成本,应尽量避免活动屋盖在积雪状态下操作,但应适当考虑在早期少量积雪情况下能够运行。在鄂尔多斯东胜体

育场活动屋盖设计中,当雪荷载不超过 $0.1\text{kN}/\text{m}^2$ 时,可以进行开合操作。

5.2 温度效应

在开合屋盖设计时,应根据当地气象条件确定结构设计 with 活动屋盖运行采用的极端最高温度与极端最低温度,一般应保证开合屋盖在绝大多数气象温度条件下能够正常运行。需要在极端温度条件下的运行时,如严寒地区冬季的极低气温天气,尚应考虑驱动系统的低温工作性能。

大跨度开合屋盖大多采用钢结构体系,太阳照射可能引起很大的变形。当温度变化引起的内力与变形不能忽略时,在结构设计时应考虑温度变化的影响,并通过温度场分析确定温度分布情况。结构计算温差根据屋盖的形状、建筑做法、使用功能及施工情况有很大差异,当开合屋盖铺设屋面板及保温材料时,太阳辐射温度的影响相对较小。

由于温度的变化,开合屋盖各结构单元的内力与变形可能产生差异,应充分考虑不均匀变形引起活动屋盖无法正常行走的可能性。

5.3 风荷载

为了防止风雨吹入,考虑大风条件下开合屋盖处于全闭状态的情况较多,但在暴风情况下将活动屋盖置于受力较为有利的全开状态也很常见。应分别对全开状态、全闭状态以及半开状态进行风荷载验算,必要时也可进行风动力时程分析。在确定结构风荷载时,考虑到开合屋盖结构的复杂性,一般应通过风洞试验确定建筑表面的风压分布情况。当采用风洞试验确定的风压系数时,还应考虑室内外压差及风压高度变化系数的影响。国家体育场与国家网球中心新馆风洞试验情况如图 13 所示。对于形状简单的小型开合屋盖工程,也可参考工程经验,根据情况确定风荷载体型系数。

应考虑屋盖的形状与开启状态对脉动风压的影响,特别对于膜结构等轻质屋面材料,风振效应比较显著。

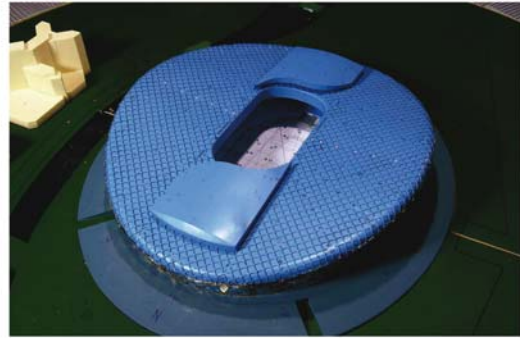
当开合屋盖采用暴风关闭的运营模式时,在全开状态与半开状态时,结构设计应采用该地区发生频度较高的强风。考虑到机械故障等因素,为确保安全,可取 10 年重现期的风荷载。

在活动屋盖移动过程中,应对风速进行严格控制,宜控制风速在 $5 \sim 10\text{m}/\text{s}$ 以下,使开合屋盖安全顺畅地行走。

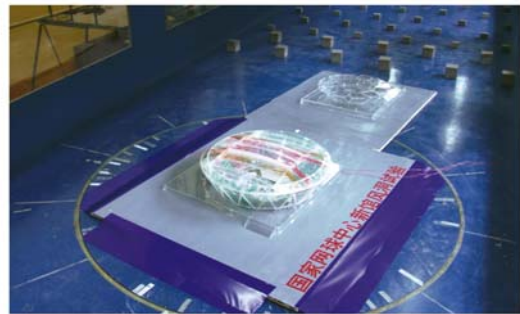
考虑到开合屋盖运营的需要,应加强对风速的监控,每栋建筑应至少设置 2 个风速测点。

5.4 地震作用

开合屋盖结构应分别对全开与全闭状态进行抗震设计,还应特别注意活动屋盖在移动过程中发生



(a) 国家体育场



(b) 国家网球中心新馆

图 13 开合屋盖风洞试验

Fig. 13 Wind tunnel test of retractable roofs

地震时的安全性。

当进行活动屋盖在非基本状态与行走过程中抗震设计时,可根据建设地点、建筑功能以及活动屋盖使用情况,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。在活动屋盖移动过程中,发生大震的概率极低,但需要考虑防止出现脱轨、碰撞、晃动等事故的措施。对于大型开合屋盖结构,应考虑设置地震传感器,当地震达到某一烈度时,及时刹车,并自动锁定活动屋盖,确保结构安全。

在进行结构抗震设计时,应采用结构整体模型,考虑活动屋盖与固定屋盖之间的相互作用,同时考虑水平方向与垂直方向的地震作用。应分别进行反应谱计算与时程分析,并考虑几何非线性与材料非线性效应的影响。

应针对结构部位与构件重要性,采用不同的抗震性能指标,对重要与关键部位提出更高的性能要求,如固定屋盖中支承轨道的桁架、连接活动屋盖与固定屋盖的台车及连接件等,应在罕遇地震作用时保持弹性。

5.5 移动荷载

活动屋盖在运行过程产生的各种荷载,是开合屋盖结构设计中特有的荷载,包括移动荷载、运行水平力、冲击力、制动惯性力和端止缓冲器冲击荷载。

(1) 移动荷载

活动屋盖在行走过程中,空间位置不断变化;活

动屋盖重量很大,单片活动屋盖可达数百吨;台车轮数量多,轮压不均匀。在结构计算分析过程中,应全面考虑上述因素的影响。

(2) 运行水平力

活动屋盖沿直线的轨道行走时,由于轨道安装误差、活动屋盖蛇行等引起车轮侧向力,与轨道方向垂直,其值与结构跨度与轮压有关。

(3) 冲击力

活动屋盖行走时在轨道接头产生的上下或左右方向冲击力。

(4) 制动惯性力

惯性与运行速度有关,由于活动屋盖运行速度较慢,制动惯性力一般不超过最大轮压的15%。

(5) 端止缓冲器冲击荷载

设计时假定活动屋盖以最高运行速度进行冲击,吸收运动能量,防止活动屋盖跌落。

6 驱动与控制系统设计

6.1 驱动与控制系统设计准则

开合屋盖应选择适当的活动屋盖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,其基本设计准则如下:

(1) 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,选择相应的驱动方式,进行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屋盖开合移动方式相适应,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,需要在设计时考虑能够进行维修或更换。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性的情况下,驱动与控制装置可进行维修与零件更换。

(4) 活动屋盖应可以通过锁定装置在全开状态、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。在运行结束后,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、加工制作与安装调试。

(7) 切实做好驱动与控制系统的运行管理和日常维护工作。

6.2 驱动方式与开合机械设备

建筑物中的开合屋盖移动方式与起重机的情况有很大不同,轨道的刚度差异很大。对于门式吊车来说,对轨道的安装精确与轨道的刚度要求高,这与活动屋盖轨道设置在柔性固定屋盖上的情况完全不同。迄今为止,活动屋盖常用的驱动系统包括轮式驱动、钢丝绳牵引、齿轮与齿条、链条与链轮等。

6.2.1 轮式驱动系统

轮式驱动是将电动机安装于台车之上,通过电动机驱动车轮,利用车轮与轨道之间的摩擦力驱动台车,适用于活动屋盖在水平面的直线或圆弧刚性轨道上行走。轮式驱动系统的主要优点有:①大量借鉴门式起重机的设计经验,技术成熟,可靠性高;②可以根据荷载大小采用单轨单轮、单轨双轮、双轨多轮等形式;③能够驱动大型与重型的活动屋盖。

轮式驱动系统的主要缺点有:①台车对于轨道的反力较大;②对下部结构刚度要求高,轨道变形量控制严格;③轨道沟槽占用空间较多。

6.2.2 钢丝绳牵引系统

钢丝绳牵引是在台车上或其他部位设置卷扬机,通过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有:①动力传动可靠性高,技术成熟;②受轨道变形、台车行走姿态的影响小;③驱动系统故障容易排除。

钢索驱动系统的主要缺点有:①由外力引起钢丝绳伸长,对精确定位有一定影响;②进行平行轨道两侧台车的精度同步控制难度较大;③钢索连接点引起结构局部受力集中。

6.2.3 齿条与齿轮系统

齿轮与齿条驱动是将电动机安装于台车之上,通过电动机驱动齿轮沿固定于轨道的齿条上行走,利用齿轮与齿条之间的咬合力驱动台车,主要适用于下部结构刚度很大、轨道变形量很小的情况。齿条、齿轮系统的主要优点有:①齿轮与齿条之间的咬合力大,传动效率高;②每个台车均为主动台车,动力比较均匀;③易于实现精确的同步控制。

齿条和齿轮系统的主要缺点有:①对轨道变形适应能力差,受温度变化影响较大;②由于行走轨道偏移等原因,容易产生磨损;③定期清洁、维护量大。

6.2.4 链条与链轮驱动系统

链条与链轮驱动是将链条的端部固定或将链条沿轨道固定,台车上的电动机驱动链轮,通过链轮与链条之间的咬合作用驱动台车,适用于活动屋盖在平面或空间的平行轨道上行走。链条与链轮驱动系统的主要优点有:①链条与链轮始终咬合,位置保持性能好;②每个台车均为主动台车,动力比较均匀;

③运行时比较容易实现精确的同步定位。

链条与链轮驱动系统的主要缺点有：①长期使用荷载引起链条伸长，部件容易产生磨损；②固定链条安装调试比较复杂，故障排除难度较大；③定期清洁、维护量大。

在驱动系统设计时，应综合考虑可靠性与经济性指标，经过对多种驱动方式进行全面的技术经济比较后，最终确定在国家体育场方案与鄂尔多斯东胜体育场中采用钢丝绳牵引系统，在国家网球中心新馆折叠移动方案中采用链条与链轮驱动系统。鄂尔多斯东胜体育场钢丝绳驱动系统如图 14 所示，与以往工程相比，对驱动方式进行了很大改进，28 部台车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，作用于固定屋盖的反力置大大减小，适应性强，可靠性高。

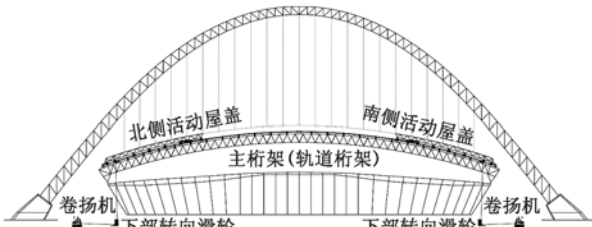


图 14 鄂尔多斯东胜体育场活动屋盖驱动系统

Fig. 14 Driving system for retractable roof of the Erdos Dongsheng Stadium

6.3 钢丝绳牵引系统主要部件设计

钢丝绳牵引是目前在活动屋盖应用较多、适应性强、可靠性高的驱动方式。驱动系统的组件应具有足够的强度与刚度，减小摩擦耗损、结构变形等对开合操作的影响。钢丝绳驱动系统通常由台车、轨道、驱动钢索、转向滑轮、插销、车挡等构成。

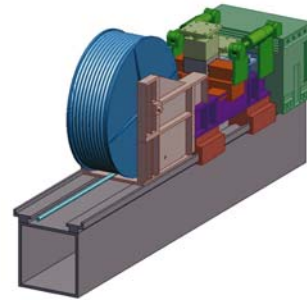
(1) 台车

活动屋盖的支座通过法兰盘、高强螺栓与台车顶部相连，并严格控制台车及附属设备的重量。在台车设计时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，在台车上设置防倾覆机构，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，驱动系统能够适应轨道水平与垂直方向变形，以及两侧轨道存在的变形差异。

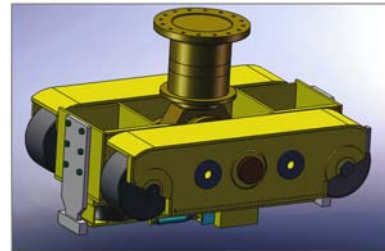
在国家体育场原设计中采用的主动台车与在鄂尔多斯东胜体育场中采用的被动台车见图 15。

(2) 轨道

轨道应满足竖向承压、受拉与侧向压力的需求，轨道运行侧向压力与轮压大小相关。台车轨道应具



(a) 主动台车



(b) 被动台车

图 15 主动式台车与被动式台车

Fig. 15 Active trolley and passive trolley

有足够的强度与刚度，控制在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，应尽量控制轨道自重。轨道应采用强度高、硬度与耐磨性好的材料。轨道对安装精度要求很高，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。轨道及接头部位应平整光滑，在连接处焊缝打磨平整，满足台车平稳运行要求。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。

(3) 牵引钢丝绳

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。由于钢丝绳承受反复荷载，安全性至关重要，安全系数应在 5.0 以上。钢索弯折角度不宜太小，卷筒直径与钢索直径之比不小于 20。

牵引钢丝绳与结构的连接节点构造应满足结构体系之间传递牵引力的要求，不得在主体结构的连接件上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点处设置了梁，从而有效避免了对结构体系可能不利影响的偏向力作用。

(4) 转向滑轮、导向滑轮与托滚

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，但也应同时避免连接构造造成明显局部偏心弯矩。为了防止台车行走时出现牵引乱绳与钢索滑脱的情况，沿钢索长度方向设置了导向滑轮与托滚。

(5) 插销

参 考 文 献

- 活动屋盖关闭后,作为连接保护措施,采用电动插销将两片活动屋盖相互锁定,满足两片活动屋盖之间内力传递的要求。
- (6)车档
- 在轨道端部设置台车行走端止设备(车档)与缓冲器。车档及连接构造应具有足够强度,当个别车档节点出现超载时,可以自动将作用力转移至其他车档,确保结构体系的安全性。
- ### 6.4 活动屋盖控制系统设计
- 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。为防止人工操作引起的误操作,引入自动控制操作系统,实现自动和手动两种操作模式之间的自由切换。
- 开合屋盖控制系统设计应考虑适当的冗余度,即使某一部位缺陷导致出现故障,不影响其他部位。设置必要的安全装置,在开合故障、运行失误或维护不当情况下,也不应引发重大安全事故。
- ### 6.5 运行管理与维护
- 切实做好驱动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。在开合方式与驱动控制系统设计时,应考虑方便运行操作与维修管理,加注润滑油等维护保养容易进行,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。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。
- ## 7 结论
- (1)在进行开合屋盖设计时,应结合建筑方案与使用功能,合理确定屋盖开启方式、开启率与基本开合状态,对确定结构抗力水平、活动屋盖运行可靠性、开合操作管理以及工程造价控制影响很大。
- (2)活动屋盖结构体系应与开启方式紧密结合,严格控制结构自重,结构整体刚度不应过大,对不均匀变形有较好的适应能力。
- (3)固定屋盖结构体系、特别是支承轨道的构件应该具有较大的刚度,确保活动屋盖运行顺利。
- (4)开合屋盖结构计算分析除需要考虑活动屋盖行走引起的移动荷载外,还应分别对活动屋盖全开、全闭及半开状态进行计算分析,对固定屋盖中支承轨道的桁架、连接活动屋盖与固定屋盖的台车及连接件等采用较高的抗震性能指标。
- (5)应通过全面的技术经济分析,根据具体情况选择适当的开合驱动与控制系统,确保活动屋盖运行的安全性、可靠性与耐久性。
- [1] Michael Allen C, Duchesne D P J. Toronto skydome retractable roof stadium: The roof concept and design [C]// Steel Structures: Proceedings of the sessions related to steel structures at structures congress. New York: ASCE, 1989:155-164.
- [2] Kawaguchi K. A new approach to retractable membrane structures[C]// IUTAM-IASS Symposium on Deployable Structures: Theory and Applications. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2000: 193-199.
- [3] Ishii, Kazuo. Retractable roof structures[J]. Journal of the International Association for Shell and Spatial Structure, 2001, 11(4), 135-136.
- [4] 刘锡良. 现代空间结构[M]. 天津: 天津大学出版社, 2003. (Liu Xiliang. Modern spatial structures [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2003. (in Chinese))
- [5] Ikuhide Shibata. Toyota Stadium, Toyota City, Japan [J]. Structural Engineering International, 2003, 13(3): 153-156.
- [6] Naraynan Subramanian. Space structure: Principles and practice[M]. Essex: Multi-Science Publishing, 2006: 761-778.
- [7] Kassabian P, You Z, Pellegrino S. Retractable roof structures[J]. Structures and Buildings, 1999, 134(1):45-56.
- [8] 日本建築学会. 開閉式屋根構造設計指針・同解説及設計資料集[S]. 1993. (Japan Architecture Institute. Recommendations for design of retractable roof structures with realized examples[S]. 1993. (in Japanese))
- [9] 张凤文, 刘锡良. 开合屋盖结构的发展及开合机理研究[J]. 钢结构, 2001, 16(54): 1-6. (Zhang Fengwen, Liu Xiliang. Research on development of retractable structures and retractable mechanism [J]. Steel Construction, 2001, 16(54): 1-6. (in Chinese))
- [10] 关富玲, 徐旭东, 杨超辉, 等. 开合屋盖结构的设计[J]. 力学与实践, 2008, 30(3): 15-23. (Guan Fuling, Xu Xudong, Yang Chaohui, et al. Design of retractable roof structures: Olympic stadiums and gymnasiums[J]. Mechanics in Engineering, 2008, 30(3):15-23. (in Chinese))
- [11] Mans Ir D G, Rodenburg J. The amsterdam arena: A multi-functional stadium[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings, 2000, 140(4): 323-331.
- [12] Lyle, John. The design and procurement of movable structures[J]. Structural Engineer, 2003, 84(20):40-47.
- [13] Norm Scott. Stadium boom continues[J]. Newsletter Commentary, 1999, 5(2): 1-4.

- [14] 智浩,李同进,龚奎成,等. 上海旗忠网球中心活动屋盖的设计与施工:机械结构一体化技术探索与实践[J]. 建筑结构,2007,37(4):95-100. (Zhi Hao, Li Tongjin, Gong Kuicheng, et al. Movable roof's design and construction of Shanghai Qizhong Tennis Center: Practice to integrative technology of mechanism and structure[J]. Building Structure, 2007, 37(4):95-100. (in Chinese))
- [15] 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(增刊):84-90.
- [16] 关富玲,杨治,程媛,等. 杭州黄龙体育中心网球馆开合屋面设计[J]. 工程设计学报,2005,12(2):118-123. (Guan Fuling, Yang Zhi, Cheng Yuan, et al. Structural design of retractable roof on Yellow-Dragon Sports Center [J]. Journal of Engineering Design, 2005,12(2):118-123. (in Chinese))
- [17] 奥雅纳工程顾问,中国建筑设计研究院. 北京国家体育场结构初步设计报告[R]. 北京:中国建筑设计研究院,2004.
- [18] 中国建筑设计研究院. 鄂尔多斯东胜体育场抗震超限审查报告[R]. 北京:中国建筑设计研究院,2008.
- [19] 中国建筑设计研究院. 国家网球中心新馆结构抗震超限审查报告[R]. 北京:中国建筑设计研究院,2009.