

深圳欢乐谷中心剧场膜结构穹顶

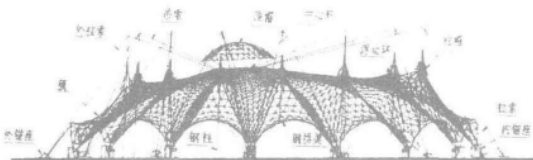
张文英 李中立

摘要 本文介绍了欢乐谷中心剧场膜结构穹顶的设计计算过程,包括张拉膜结构的找形分析、荷载分析及裁剪分析;关键节点的构造措施、施工安装过程及预应力的施加方法。可为将来类似工程结构提供一些可以借鉴的数据资料。

关键词 张拉膜结构 找形分析 荷载分析 裁剪分析 预应力

1 工程概述

深圳欢乐谷中心剧场膜结构穹顶是继长沙世界之窗大剧场之后又一个我国技术人员自行设计、制作和安装的大型张拉膜结构,膜结构穹顶的水平投影面积约 5809m²,从设计到竣工仅用 8 个月时间,于 1998 年 10 月 1 日如期投入使用。图一为找形分析后的计算机有限元网格图,图二为建成后的实景照片。



图一 找形分析后有限元网格图



图二 实景照片

结构布置平面呈圆形,钢柱、钢拱梁和外拉索的支座分别位于直径为 63 米、86 米和 98 米的同

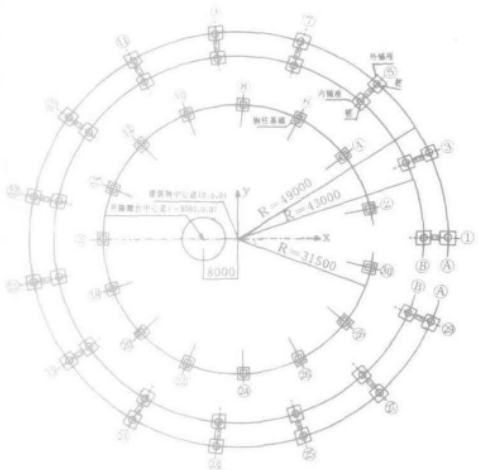
心圆上,平面尺寸如图三。膜体内边缘依附在中心环上,整个体系的竖向荷载通过中心环经过吊索传至 15 根 $\Phi 610 \times 14\text{mm}$ 的钢柱上;膜体外边缘连接在 15 根 $\Phi 325 \times 8\text{mm}$ 的钢拱梁上,通过外拉索与外锚座相连。整个体系是由脊谷式膜单元组成,脊索和谷索相间布置形成膜体的支撑和起伏,并传递主要的风荷载和活荷载,其构件的相对布置如剖面图四所示。

2 设计计算分析

张拉膜结构一般是由钢或钢筋混凝土等刚性构件提供支撑,通过钢索张拉膜布,使之形成一定的空间形状,作为覆盖结构的一种空间结构形式。由于钢索、膜材本身是柔性材料,自身没有抗弯刚度,且抗剪刚度也很小,必须施加一定的预应力才能使体系具有一定的刚度以抵御外荷载的作用。在建筑造型控制点坐标一定时,不同的索、膜中预应力取值以及不同的预应力组合时会产生不同的空间形状,因此,膜结构在进行内力分析前,首先必须确定其满足预应力分布的初始平衡形状,这个过程称作找形分析。在初始形状满足建筑、功能等要求后,根据当地实际情况确定外部荷载的取值,并施加在初始平衡形状上用几何非线性有限单元方法进行整个体系的空间协同工作分析,以确定体系内力及位移的分布,计算结果一般要保证任何工况下索、膜中应力不小于零及关键点位移满足一定的限值条件;否则,应改变预应力值的

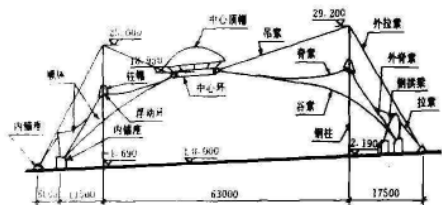
张文英 北京纽曼帝·莱蒙膜建筑技术有限公司设计部主任 工程师
李中立 北京纽曼帝·莱蒙膜建筑技术有限公司副总工程师 博士

大小重新进行找形分析,直到满足上述条件,这个过程称作荷载分析。之后要进行裁剪分析,就是如何用二维的膜布以允许的误差来模拟空间不可展曲面的问题。



图二 结构平面布置图

中心剧场钢柱支点及拉锚点平面布置在三个同心圆上(如图三),钢柱及钢拱梁支座分别布置在直径63m和86m的圆上,拉索锚座在最外层直径为98m的圆上。中心环由15根吊索悬挂拉起向各柱顶,转换成30根外拉索拉向外锚座。为增加建筑效果,中心环向左偏离圆心8m,且有一定倾角;柱顶标高从左至右依次增加0.6m,整个形状似一银白色的外星飞碟。为此,膜片布置内边界在中心环上,外边界在钢拱梁上,由钢柱提供支点从而形成脊谷式膜单元布置,通过给膜、脊、谷索施加一定的预应力,吊索及外拉索设置为定长索经找形分析后,形成光滑的等应力曲面,结果满足了建筑效果要求。



图四 结构剖面图

上述形态生成后要进行整体结构的内力分析计算。由于膜结构是柔性结构,自重很小,外荷载作用下位移较大,必须采用几何非线性有限元法进行计算。一般地说,对膜结构而言风荷载为控制荷载,对于张拉膜结构其体型是相当复杂的一系

列曲面,每一有限元网格膜单元上的法向量均不同,因此体型系数的确定将是相当复杂和至关重要的事情。本次计算是根据美国 UBC 规范按不同膜单元上法矢量的方向与不同风向时的夹角(α 、 β)分别赋予不同的体型系数值,由计算机程序自动实现。通过反复试算(找形分析 \leftrightarrow 荷载分析),最后确定膜中预应力为 3kN/m,脊索预应力为 90kN,谷索预应力为 75kN,外脊索预应力 100kN,这时,最大吸风时中心环向上位移 80mm,最不利活荷时中心环向下位移 150mm,最小排水坡度在 10%左右。脊索最大力 290kN,选用 SNS/S-5 \times 37 规格 F45mm 直径的钢索,谷索最大拉力 641kN,选用 SNS/S-5 \times 61 规格 Φ 55mm 直径的钢索,吊索和外拉索选用 SNS/S-5 \times 55 规格 Φ 50mm 直径和 SNS/S-5 \times 19 规格 Φ 35mm 直径的钢索,钢柱轴压力 1266kN,选用 F610 \times 14mm 无缝钢管。膜材料选用德国 FR-1000Premium,其抗拉强度为 120kN/m,厚度 0.85mm,自重为 1.02kg/m²,具有不透光、自洁、阻燃等特性。

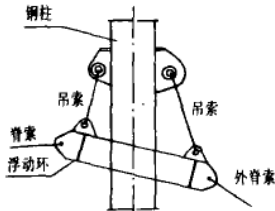
裁剪分析就是在预应力状态下的曲面形体上寻求合理的裁剪线位置及其分布,为物尽其用,一般要按照膜材幅宽进行裁剪,但要兼顾曲面的曲率变化情况,并且由于膜材具有双向异性性能,故裁剪线的布置要与计算时所设的膜材径向一致,才能保证计算结果与实际相符。膜材的裁剪通常是在无应力下进行的,如何在预应力的形体上进行无应力状态的裁剪,国内外学者已提出了诸如“几何法”,“最小二乘原理”,“有限单元法”,“平面热应力问题动态规化法”等,将空间不可展曲面转换成二维的平面,然后用“补偿法”最后确定二维膜片的几何尺寸。“补偿法”就是根据膜中预应力的大小和膜材径纬向的材料特性,并考虑其徐变影响而综合确定经纬向补偿值,然后沿经纬向在各点坐标上分别进行补偿。裁剪分析的另外一个难点是裁剪线的布置、位置的确定,通常做法是在找形分析后的预应力状态形体上,保证边界条件不变(包括任何索边界),然后根据膜材幅宽的要求重新布置膜曲面网格,即使如此,要想使裁剪出来的膜片经过补偿后再加上膜片间的搭缝宽度要求,使之正好与幅宽一致(一般来说最后裁剪成的二维膜的最宽处不得大于膜材幅度,也不易小于

10毫米),也需要多次反复地试裁才能完成。

3 节点设计

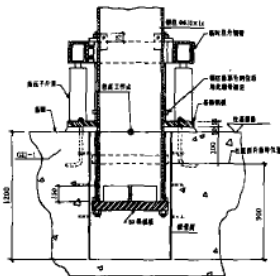
膜结构中的节点设计是一项即需认真细致又富创造性的工作,节点构造合理与否会直接影响着体系的力学性能与安全,还关系到施工安装的难易与观瞻。

该体系中钢柱柱中节点是柱与脊索和外脊索的连接点,如设计成直接连接,经荷载分析知道柱中将产生相当大的弯矩,不仅增大了柱的截面尺寸,而且节点构造也相当复杂,经反复讨论推敲,我们创造性地提出了“浮动环”的概念(如图五),使之在不平衡力作用下可以左右摆动,内、外脊索自相平衡,柱几乎不承受弯矩,钢柱直径从900mm降到600mm,这样不仅大大节约了用钢量,也改善了体系的受力性能和设计工作量。



图五 柱中节点

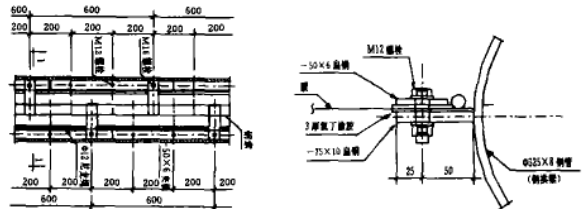
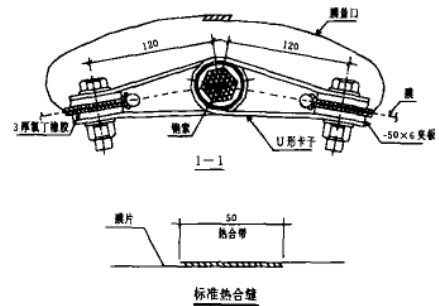
选择适当的给体系施加预应力的方法对张拉膜结构来讲也是至关重要的,通常有拉、压、顶等多种手段。经反复讨论比较,最后选择通过在柱底顶升15根钢柱完成向体系施加预应力,钢柱柱底节点的设计应保证千斤顶顺利实施顶升与拆卸,柱与基础之间还应满足铰接连接(如图六),我们称这种柱为杰克柱(或千斤柱)。另外,还有膜片与膜片的连接,膜片与钢索的连接及膜片与刚性边界的连接节点作法等(如图七),这些都是张拉膜结构较常见的节点作法。



图六 柱底节点

4 制作与施工安装

膜的制作是在专用膜材料加工厂完成的,热合设备一般是进口大功率高频热合机,车间的温度和湿度直接影响着热合缝的质量与强度,因此,加工车间必须是无尘、恒温、有一定湿度要求的大空间。技术人员根据按前述裁剪分析得到的膜材料裁剪图,严格控制测量误差进行膜片的裁剪下料之后,我们用进口FIAB全自动电脑控制膜材料专用焊接机,按设计的热合缝宽度、强度设定焊接延时时间、电流强度与气压等进行加工制作。



图七 常见节点做法

对于膜片的正确运输与安装需要细心且计划周详。膜材料可以说是一种非常娇气且特殊的建筑材料,膜片在车间制作好后要按一定的方法折叠,以便利于现场膜的展开且保证不打死折,然后用保护膜包装好,包装膜外面写好编号,以便到现场后能准确地将膜片打开和定位。膜片被运到现场后,首先要在展开位置铺设一层垫膜,根据平面图按编号展开膜片,然后将膜片与中心环、浮动环和钢索连接固定,最后通过顶升钢柱将膜拉伸绷紧。在安装过程中,严格禁止在膜片上行走,必须时要换穿软底运动鞋,不允许膜片上有任何划伤与污染。天气的变化对膜片及施工人员的生命安全影响很大。遇到刮风下雨的天气,膜结构的高空作业就必须停止;遇到大雨,积聚的雨水重量很容易将膜片损坏;遇到大风就更有危险,不但膜片有

撕烂的可能,甚至还会危及到施工人员的人身安全。这就要求我们在安装膜片时,时刻注意天气的变化,安装前做好充分的准备工作,每一片膜的安装时间要尽量缩短,保证当天收工前最后一片膜片安装固定到位。

这里还需要提及的是张拉膜结构对钢索拉锚点与柱脚的定位以及钢索与钢结构的制作误差都有很严格的要求,因为膜片的尺寸、钢索的长度都是事先在工厂严格下料加工好的,上述尺寸的偏差将会影响索膜体系中应力的分布,甚至会导致应力集中引起索膜的局部破坏,也有可能索膜根本就安装不上。对于张拉膜结构支撑体系的制作与施工,一定要满足具体工程施工图中说明的误差范围要求,保证索膜安装按原设计预应力的分布与分布顺利进行。

该中心剧场膜结构穹顶是一个典型的张拉膜结构体系,在顶升柱子(即施加预应力)之前,结构体系没有刚度,是个机动体系,在顶升的过程中各结构构件相对运动,索膜体系中预应力重新分布,最后达到各自设计预应力状态,各结构构件达到设计位置(工作点位置),整个体系具备设计的刚度及稳定性。杰克柱设计顶升距离为800mm,15根钢柱最终位置均在误差范围以内,整个顶升过程采用位移、应力双重控制,因此保证了结构体系最终时的几何、应力状态的正确性。

5 结语

张拉膜结构一开始从找形分析到荷载分析最

后到裁剪分析,都需要较深的数学与力学知识,充分体现了现代膜建筑的科技含量;它拥有优美的造型、卓越的性能和其它常规结构形式无法比拟的特点,受到建筑业人士的普遍欢迎,近几年在我国也得到了越来越广泛的应用。该中心剧场张拉膜结构穹顶的应用成功,标志着我国膜结构专业公司的科技人员已基本掌握了膜结构设计的关键技术与施工技术,有能力独立完成大型膜结构的设计与施工安装。但由于膜结构在我国应用实例不是很多,一些数据资料积累不够,目前设计还需借鉴国外一些标准与规定。因此,还需我国建筑业各方人士更多的关心与支持,齐心协力共同努力,尽快完善和解决膜结构在我国应用中遇到的各种技术和体制问题,才能保证我国膜结构事业沿着正确的方向迅速发展。

参考文献

- (1)李中立.张拉膜结构全过程分析及实验验证:[博士学位论文].天津:天津大学,1997.
- (2)R. E. Shaeffer. TENSIONED FABRIC STRUCTURES. Published by the American Society of Civil Engineers, 1996.
- (3)Horst Berger. Light Structures Structures of Light. Printed in Italy, 1996.
- (4)KAZUO ISHII. MEMBRANE STRUCTURES IN JAPAN. SPS PUBLISHING COMPANY, 1995.
- (5)混凝土结构设计规范(GBJ10-89)
- (6)钢结构设计规范(GBJ17-88)

(上接第19页)

经过调整,索力误差控制在3%以内。^[5]

六、总结

该体育场挑蓬采用斜拉网壳结构,其结构体系复杂,设计挑蓬时将挑蓬与下部结构结合在一起进行整体受力分析。设计时在满足结构受力性能要求的前提下,在结构构件规格、布置形式、节点构造等方面考虑了施工的方便性。对于斜拉索、稳定索的预应力张拉控制力根据现场实际进度顺序进行了计算,取得了很好的效果。该体育场结构现已完工。

参考文献

- [1]赵基达等,浙江黄龙体育中心主体育场挑蓬结构计算分析,第八届空间结构学术会议论文集,1997
- [2]钱基宏等,浙江省黄龙体育中心体育场挑蓬风荷载及内场风环境模拟实验研究,第八届空间结构学术会议论文集,1997
- [3]赵鹏飞等,浙江省黄龙体育中心主体育场挑蓬结构模型试验研究,建筑结构学报,第20卷第5期,1999
- [4]中国建筑科学研究院结构所,浙江省黄龙体育中心主体育场斜拉索锚固节点模型试验报告,1999
- [5]钱基宏等,浙江省黄龙体育中心主体育场挑蓬预应力斜拉索结构的施工建造,第九届空间结构学术会议论文集,2000