

文章编号:1671-6833(2009)02-0057-04

张弦立体桁架支撑的带飞杆的膜结构找形分析

马跃强¹, 童丽萍²

(1. 同济大学 建筑工程系, 上海 200092; 2. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 张弦立体桁架支撑的带飞杆的膜结构集膜结构、飞杆与张弦立体桁架等多种受力特性于一身, 给出了带飞杆的膜结构找形分析时在 ANSYS 上的实现过程和关键处理, 并以青海省西宁市亲水中心大厅屋盖为案例进行了找形。结果表明, 找形形状接近建筑初步设计造型的要求, 且膜上的应力分布比较均匀。通过提升后与最终找形飞杆顶端节点的竖向坐标值对比, 证实了带飞杆的膜结构找形时必须和弹性构件一起联合找形。张弦立体桁架支撑的带飞杆的膜结构找形分析时可不考虑结构自重, 但需要考虑张弦立体桁架支撑的协同作用。

关键词: 带飞杆的膜结构; 张弦立体桁架; 找形分析; 自重

中图分类号: TU 398⁺. 9

文献标识码: A

0 引言

膜结构是现代空间结构体系一个重要分支, 其设计必须通过找形来寻求满足建筑造型并与某种自平衡预应力分布状态相对应的结构几何形状^[1]。张弦立体桁架支撑的带飞杆的膜结构集膜结构、飞杆与张弦立体桁架等多种受力特性于一身, 形式新颖独特。文献[2]用力密度法分析了带飞杆的伞形膜结构的找形问题, 但需要通过自编程来实现。另外, 文献[3-5]对膜结构与下部支承体系的协同分析进行了一定的研究, 但边界都是采用环梁、索穹顶和拱等结构形式, 而对于张弦立体桁架支承形式的讨论涉及很少。因此, 笔者给出了带飞杆的膜结构找形分析时在 ANSYS 上的实现过程和关键处理, 并以青海省亲水中心大厅屋盖为例进行找形, 实现了飞杆、拉索等弹性构件与膜结构的联合找形, 同时探讨了结构自重和张弦立体桁架支撑对膜面形状和应力的影响, 为类似膜结构工程的找形分析提供参考。

1 工程简介

青海省亲水中心位于青海西宁市市政广场, 由5个场馆和1个大厅组成, 其中中心大厅屋盖采用张弦立体桁架支撑的带飞杆的膜结构体系, 该设计方案独具匠心, 其最大跨度为92.3 m, 建筑投影面积约为7 800 m², 主要由两大部分构成, 即张弦立体桁架支承系统和带飞杆的膜结构系

统, 建筑效果如图1所示。

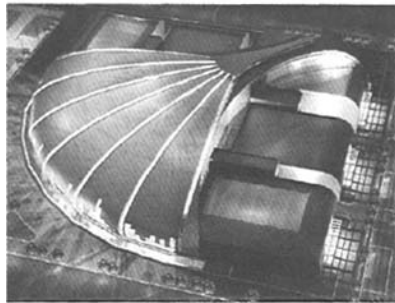


图1 建筑效果图

Fig. 1 Architectural Rendering

1.1 张弦立体桁架支撑系统

张弦立体桁架支撑系统是将平面张弦立体桁架按15°夹角辐射状布置而成的空间受力体系, 为主要的受力构件。平面张弦立体桁架由上弦杆、下弦杆、腹杆、撑杆和下拉索组成, 分别选用 $\Phi 450 \times 20$ 钢管、 $\Phi 450 \times 15$ 钢管、 $\Phi 245 \times 8$ 钢管、 $\Phi 299 \times 7.5$ 钢管和301 $\Phi 7$ 高强度低松弛镀锌钢丝束, 如图2所示。桁架1.5 m等宽, 矢高为2 m。张弦立体桁架高端相互连接, 连接处支撑在圆柱形混凝土柱上, 低端通过环梁连接在一起, 张弦立体桁架与环梁交接处与竖向钢桁架柱相连。张弦立体桁架上弦杆之间安装不锈钢板, 在现场用电焊搭接连接。撑杆上销轴与桁架连接, 下端通过索球与钢索连接。

收稿日期:2008-10-09; 修订日期:2008-12-05

作者简介:马跃强(1982-), 男, 河南洛阳人, 同济大学博士研究生, 主要从事钢结构方面的研究, E-mail: yongyuan-laoma@yahoo.com.cn.

1.2 带飞杆的膜结构系统

带飞杆的膜结构呈辐射状分布于两楹张弦梁之间,其前端连接在环梁上弦,其它边界连接于张弦梁上弦边上,膜面通过 14 组飞杆和下拉索顶升而成。带飞杆的膜结构由膜、索上膜、飞杆、下拉索和飞杆连接索等构件组成,如图 2 所示。膜采用美国 Tacoulc Sofus™ 玻璃纤维 PTFE - 1100HT 膜,膜上索、飞杆下拉索和飞杆连接索分别采用截面为 $31\Phi 5$ 、 $199\Phi 5$ 和 $109\Phi 5$ 的半平行钢丝拉索;飞杆为 $\Phi 245 \times 8$ 钢管,最长为 8.71 m,向两端逐渐缩短,形成了一个近似水珠状的膜面。

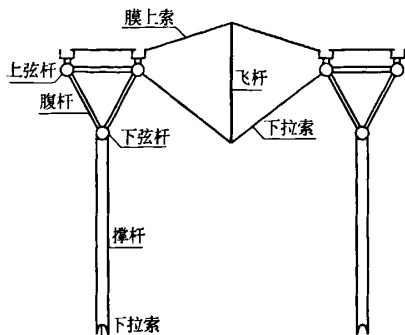


图 2 张弦立体桁架、飞杆和索示意图

Fig. 2 Spatial truss string, flying bar and cable

2 找形分析

2.1 膜边界的处理和索膜预张力值的确定

本工程由刚性边界和柔性边界组合而成。膜与张弦立体桁架的边界为刚性边界,对膜面形状确定起着决定作用。找形分析时,忽略摩擦影响,不考虑膜和张弦立体桁架之间的相对滑移,将其做刚接处理。飞杆和下拉索等弹性支撑为柔性边界。找形分析时,需要通过改变控制节点位置、膜预应力、膜上索预应力、下拉索预应力和飞杆连接索预应力等参数,以得到相应的膜面形状。

索膜初始预张力的选取是设计的关键,其选取依据以下两点^[6]:①膜结构中预张力控制在其单轴极限抗拉强度的 7.5% 以内,其中 A 类膜预张力为 4 ~ 10 kN/m;②钢索预张力为 4% ~ 10% 的破断极限强度,不大于破断极限强度的 20%。经多次试算,初步选定膜、膜上索、下拉索和飞杆连接索的预应力分别为 8 MPa、81 MPa、108 MPa 和 9 MPa。

2.2 找形计算分析

首先建立不考虑结构自重和张弦立体桁架支撑的带飞杆的膜结构的找形,主要基于以下考虑:①给出带飞杆的膜结构找形分析时在 ANSYS 上的实现过程和关键处理;②为了与考虑自重和考

虑张弦立体桁架支撑两种找形结果比较,以探讨自重和张弦立体桁架支撑对膜面形状和应力的影响。首先忽略支撑变形对找形的影响,即假定膜的边界固定,各楹单元之间相互不影响,因此,六楹膜结构找形的膜面形状和应力是相同的。笔者选取第一楹为研究对象,综合应用支座位移提升法、节点平衡法和小弹性模量技术,采用位移和不平衡力相结合的收敛准则进行初步找形,具体找形过程如下:

(1)建立膜结构平面有限元模型。索和膜均只能受拉而不能受压,分别采用 LINK10 单元和 SHELL41 单元,在提升时索和膜弹性模量分别取真实值的 1/1 000 和 1/100。通过设置膜上索的初始预应变,给定膜上索的预应力为 81 MPa。为了防止提升时关键点发生偏移,将边界节点施加三向约束。

(2)解除边界节点竖向约束,提升它们到各自的目标坐标,重新施加竖向约束,依次恢复索和膜的真实弹性模量,并通过降温给膜单元施加预应力 8 MPa,迭代计算得到初始平衡曲面。

(3)在平衡结构的基础上添加飞杆、下拉索及飞杆连接索,将飞杆的“柱帽”简化为节点,飞杆采用 LINK8 单元。通过设置下拉索与飞杆连接索的初始预应变,分别给定下拉索和飞杆连接索预应力为 108 MPa 和 9 MPa。

(4)删去飞杆顶端与膜结合处节点三向约束,反复迭代得到第一楹的膜面找形,如图 3 所示。



图 3 第一楹膜面形状图

Fig. 3 The shape of the first membrane surface

2.3 找形结果分析

2.3.1 膜面应力分析

第一楹找形膜面的应力如图 4(a) 所示,膜上应力最大值为 11.87 MPa,最小值为 10.58 MPa,膜面大部分应力区域在 11.0 MPa ~ 11.5 MPa 之间,最小和最大应力集中在膜边界附近,且分布区域相对较小,可见膜单元应力分布比较均匀,同时膜面上没有出现应力负值区,膜结构找形形状接近建筑造型要求。

2.3.2 膜面形状分析

膜面形状主要由飞杆顶端节点竖向坐标决

定,因而对提升后与最终找形的飞杆顶端节点竖向坐标进行对比分析,见表 1,其中第一楹飞杆顶端节点号从膜前端到膜尖依次为 45,47,49,⋯,63,65,67.由表 1 可知,提升后飞杆顶端节点的竖向坐标值与最终找形结果有较大差别,说明飞杆顶端节点的竖向坐标值与控制节点提升值有关外,还与膜预应力、膜上拉索预应力、下拉索预应力和飞杆连接索预应力等参数不同取值有关,因此带飞杆的膜结构找形时必须将结构中飞杆、拉索等弹性构件与膜结构一起联合找形^[2].

表 1 提升后与最终找形飞杆顶端节点的竖向坐标值对比
Tab.1 The comparison of the vertical coordinate on topmost nodes of flying bars after lifting and final form - finding m

节点	$Z_{1,0}$	Z_1	ΔZ_1	节点	$Z_{1,0}$	Z_1	ΔZ_1
45	17.207	17.357	0.150	57	26.198	26.251	0.053
47	19.479	19.587	0.108	59	26.830	26.878	0.048
49	21.401	21.489	0.088	61	27.293	27.336	0.043
51	23.003	23.078	0.075	63	27.615	27.654	0.039
53	24.315	24.381	0.066	65	27.821	27.856	0.035
55	25.370	25.429	0.059	67	27.918	27.950	0.032

注: $Z_{1,0}$ 、 Z_1 为提升后和最终找形后飞杆顶端节点的竖向坐标值; $\Delta Z_1 = Z_1 - Z_{1,0}$.

2.4 考虑结构自重的找形分析

由于自重的存在,膜表面上每一点并不都具有相同的张拉应力,有可能导致应力集中或安装时在膜表面产生皱褶;但是膜材很薄,厚度仅 0.000 8 m 左右,虽然自重相对于外荷载来说比较小^[7],有必要探讨自重对膜结构找形的影响程度.

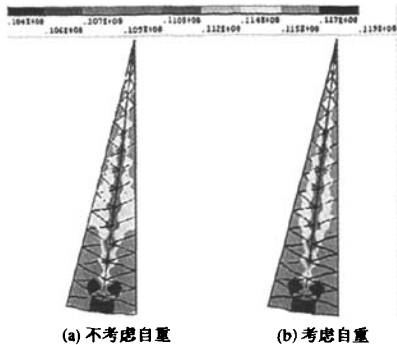


图 4 第一楹膜面应力图
Fig. 4 The stress of the first membrane surface
考虑结构自重最终找形的膜面应力如图 4(b)所示.和图 4(a)对比,膜面应力最大和最小值变化不大,应力分布仍比较均匀.

不考虑自重与考虑自重影响飞杆顶端节点的竖向坐标对比如表 2 所示,由表 2 可知,考虑自重

前后飞杆顶端节点竖向坐标相差很小,不影响膜结构的最终整体形状.综上,自重对本工程的膜面形状和应力分布影响很小,简化计算过程可不考虑.

表 2 考虑自重下飞杆顶端节点竖向坐标
Tab.2 The vertical coordinate on topmost nodes of flying bars with structural self - weight considering m

节点	$Z_{2,0}$	Z_2	ΔZ_2	节点	$Z_{2,0}$	Z_2	ΔZ_2
45	17.357	17.353	-0.004	57	26.251	26.250	-0.001
47	19.587	19.585	-0.002	59	26.878	26.877	-0.001
49	21.489	21.487	-0.002	61	27.336	27.336	0
51	23.078	23.077	-0.001	63	27.654	27.653	-0.001
53	24.381	24.380	-0.001	65	27.856	27.855	-0.001
55	25.429	25.428	-0.001	67	27.950	27.950	0

注: $Z_{2,0}$ 、 Z_2 分别为不考虑自重和考虑自重后最终找形飞杆顶端节点的竖向坐标值; $\Delta Z_2 = Z_2 - Z_{2,0}$.

2.5 考虑张弦立体桁架支撑协同找形分析

为了探讨张弦立体桁架支撑对带飞杆的膜结构找形结果的影响,在初步找形结果基础上,导入张弦立体桁架支撑,按照节点连接方式将带飞杆的膜与张弦立体桁架连接点合并,删除连接点处约束,同时约束张弦立体桁架体系,从而使张弦立体桁架与带飞杆的膜结构形成整体协同作用,开始迭代计算直至达到平衡,得到考虑张弦立体桁架支撑影响的膜面应力和膜面形状,分别如图 5 (a)和(b)所示.

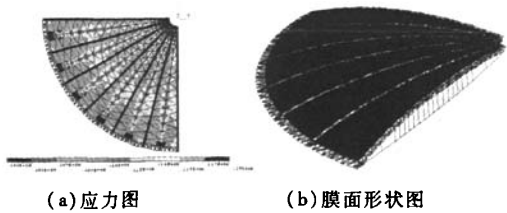


图 5 协同找形膜面应力图和形状图
Fig.5 The stress and shape of membrane surface after coordinated form - finding

图 5(a)和图 4(a)对比可知,膜面应力大小变化幅度不大,应力分布仍比较均匀;局部应力大小有所增加,但幅度小于 0.1 MPa,说明张弦立体桁架支撑对膜面应力大小及分布影响很小.

考虑和不考虑张弦立体桁架支撑的第一楹飞杆顶端节点竖向坐标对比见表 3,由表 3 可知,膜面整体向上产生位移,最大值为 137 mm,说明考虑与不考虑张弦立体桁架支撑竖向节点坐标相差较大,将影响本工程膜面的整体形状,因此本工程找形分析时需要考虑张弦立体桁架支撑的协同

作用。

表3 张弦立体桁架支撑影响下
第一榀飞杆顶端节点竖向坐标

Tab.3 Vertical coordinate on topmost nodes of flying
bars with support of spatial truss string considering m

节点	$Z_{3,0}$	Z_3	ΔZ_3	节点	$Z_{3,0}$	Z_3	ΔZ_3
45	17.357	17.441	0.084	57	26.251	26.373	0.122
47	19.587	19.649	0.062	59	26.878	27.012	0.134
49	21.489	21.55	0.061	61	27.336	27.473	0.137
51	23.078	23.153	0.075	63	27.654	27.782	0.128
53	24.381	24.469	0.088	65	27.856	27.965	0.109
55	25.429	25.538	0.109	67	27.95	28.028	0.078

注: $Z_{3,0}$, Z_3 分别为不考虑支撑和考虑最终找形飞杆顶端节点的竖向坐标值; $\Delta Z_3 = Z_3 - Z_{3,0}$ 。

3 结论

(1)给出了带飞杆的膜结构找形分析时在ANSYS上的实现过程和关键处理,并以青海省西宁市亲水中心大厅屋盖为案例进行了找形。结果表明,找形形状接近建筑初步设计造型的要求,且膜上的应力分布比较均匀。

(2)通过提升后与最终找形飞杆顶端节点的竖向坐标值对比,证实了带飞杆的膜结构找形时必须和弹性构件一起联合找形。

(3)自重对本工程的膜面形状和应力分布影响很小,为了提高找形分析效率,简化计算过程,可不考虑结构自重。

(4)张弦立体桁架支撑对膜面应力大小及分布影响很小,但膜面形状影响很大,因此找形分析时需要考虑张弦立体桁架支撑的协同作用。

参考文献:

- [1] 童丽萍,曹延波. 敞篷式体育场膜结构找形分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2008, 25(1): 111 - 112.
- [2] 苏建华,韩大建. 带飞杆的伞形膜结构找形分析[J]. 钢结构, 2005, 6(20): 1 - 3.
- [3] KAZUO I. Form finding analysis in consideration of cutting patterns of membrane structures[J]. International Journal of Space Structures, 1999, 14(2): 105 - 119.
- [4] 卫 东,沈世钊. 索穹顶中考虑薄膜与索协同工作对结构性能的影响[J]. 空间结构, 2000, (3): 24 - 29.
- [5] 刘 凯. 张拉式膜结构设计施工的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学土木工程学院, 2007: 12 - 14.
- [6] 童丽萍,曹延波. 黄河水利职业技术学院新校区雨操场膜结构找形分析[J]. 空间结构, 2008, 12(4): 51 - 52.
- [7] 曹延波. 基于几何非线性有限元的膜结构找形分析[D]. 郑州: 郑州大学土木工程学院, 2007: 11 - 12.

Form - finding Analysis of Spatial Truss String Supported Membrane Structure with Flying Bars

MA Yue - qiang¹, TONG Li - ping²

(1. Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Spatial truss string supported membrane structure with flying bars is composed of membrane structure, flying bar and spatial truss string. This paper provides the basic process and critical treatment on ANSYS of form - finding analysis of membrane structure with flying bars and carries out form - finding analysis for the roof of the hall of Qinsui Center in Xining city of Qinghai. Results show that the final form - finding meets the shape of initial architectural design and the stress in the membrane is evenly distributed. Through the comparison of the vertical coordinate on top nodes of flying bars after lifting and final form - finding, this paper proves that the design of membrane structure with flying bars are that displacements of the elastic bars must be taken into account during the form - finding. Results show that structural self - weight neednot be considered, but coordinated effect of spatial truss string must be taken into account during the form - finding of spatial truss string supported membrane structure with flying bars.

Key words: membrane structure with flying bars; spatial truss string; form - finding analysis; self - weight