

柔性巨型摩天轮结构的非线性分析

赵 奋¹, 丁洁民², 杨晖柱², 郭小农¹

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 建筑设计研究院, 上海 200092)

摘要: 结合某摩天轮工程实例, 分析柔性巨型摩天轮结构轮缘和拉索的受力状态, 合理选择初始态预应力度, 优化结构性能. 考虑初始缺陷分别对轮盘以及摩天轮整体结构进行稳定分析, 研究其非线性屈曲特征. 同时考虑几何非线性和材料非线性进行弹塑性极限分析, 全面揭示其结构特性. 分析和研究结果表明: 预应力拉索的引入使得柔性巨型摩天轮结构具有明显的非线性特征, 初始态预应力决定了结构受力状态, 由辐射状拉索和立体桁架组成的轮盘结构提供了强大的抗侧和抗扭刚度, 柔性巨型摩天轮结构稳定性能良好, 塑性发展机制理想, 最终破坏表现为强度破坏, 弹塑性极限承载能力比较大, 能满足摩天轮正常运行和暴风状态的要求.

关键词: 柔性巨型摩天轮; 初始态预应力; 几何非线性; 非线性屈曲; 材料非线性; 弹塑性极限分析

中图分类号: TU 394

文献标识码: A

Nonlinear Analysis of Flexible Giant Ferris Wheel

ZHAO Fen¹, DING Jiemin², YANG Huizhu², GUO Xiaonong¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. The Architectural Design and Research Institute of Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Combined with a project example of flexible giant Ferris wheel, mechanical performance of rim and cable was analyzed. The rational initial prestressing force was chosen to optimize the structural behaviour. The initial imperfection was considered to perform the stability analysis of rim and overall structure. Nonlinear buckling characteristics was researched. Taking both the geometrical and material nonlinearity into account, the elasto-plastic limit bearing capacity analysis was carried out and its results comprehensively revealed the structural characteristics. The results of analytical study indicate that nonlinear characteristics of flexible giant Ferris wheel is obvious due to the introduction of prestressed cable.

Mechanical performance of the structure depends on the initial prestressing force. The wheel consisting of radiate spoke cables and space truss provides strong lateral stiffness as well as torsional stiffness and the stability performance is favorable. The mechanism of plastic development is appropriate and its failure mode belongs to the strength failure. The elasto-plastic limit bearing capacity is so large that the wheel can satisfy the need both for operating condition and for storm condition.

Key words: flexible giant Ferris wheel; initial prestressing force; geometrical nonlinearity; nonlinear buckling; material nonlinearity; elasto-plastic limit bearing capacity analysis

摩天轮是各种工业能力综合水平的产物, 融合了许多最新的科研成果. 随着科技的发展, 摩天轮正朝着更大、更高的方向发展, 它已经成为很多城市的地标性建筑, 充分展示了科学技术应用于娱乐所产生的魅力. 柔性巨型摩天轮 (flexible giant ferris wheel) 是轮盘全部采用钢缆索体系的超大型观览车. 其结构体型庞大, 结构形式非常特殊, 沿高度方向和水平方向的质量分布不均匀, 刚性轮缘与柔性拉索相结合, 边界条件复杂, 存在着温度、缺陷和冗余度等敏感性因素影响, 需要系统地对其进行非线性分析与研究. 本文结合某巨型摩天轮工程实例, 对柔性巨型摩天轮结构的缆索预应力分析、稳定分析以及弹塑性极限分析进行了系统的研究.

1 柔性巨型摩天轮的结构体系

巨型摩天轮结构主要由轮盘、支撑系统和驱动系统等 3 部分组成. 轮盘结构形式主要有刚性、柔性和刚柔相结合等形式^[1]. 刚性结构形式是指轮盘全

收稿日期: 2010-08-26

第一作者: 赵 奋 (1974—), 男, 博士生, 主要研究方向为大跨度钢结构. E-mail: stoutandbrave@yahoo.com.cn

通讯作者: 丁洁民 (1957—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为大跨度钢结构. E-mail: djm@tjadri.com

部采用桁架结构体系;柔性结构形式是指轮盘采用钢缆索体系;刚柔相结合形式是指轮盘结构以缆索为主并设置一定数量的桁架。

随着高强度缆索的发展和应用,为了使结构外观轻盈,现多采用钢缆索体系以及缆索和桁架相结合的体系,例如“伦敦眼”和“新加坡飞轮”等摩天轮。柔性巨型摩天轮中刚性轮缘和柔性轮辐索的主要优势在于张紧的轮辐索为轮缘提供连续支撑,构成一个自平衡的体系,而索内的拉力被转化为圆形轮缘内的环形压力,充分发挥了拉索材料高强抗拉的优点和圆形轮缘结构环向受压的特点。

在柔性巨型摩天轮结构中,竖向荷载包括恒载、活载,由轮缘通过轮盘下垂方向一定范围内的轮辐索传递至轴套;侧向荷载包括风载,由全轮盘截面范围内受拉一侧的拉索传递至轴套,这些荷载再经由轴套下的轴承传至轴芯,并由支撑轴芯的钢架柱传递至基础。

某柔性巨型摩天轮结构由支撑 48 个轿厢的轮盘结构和 A 形支架柱结构组成。轮盘结构轮缘、预应力轮辐索、轴套和轴芯组成,并由 A 型支架柱支撑。地面驱动导向支架结构为该轮盘提供侧向支撑,并且用于安放驱动和导向系统(DGU)以及风暴固定装置(STORMFIX)。斜拉索为 A 形支架提供侧向支撑。柔性巨型摩天轮结构体系详见图 1。

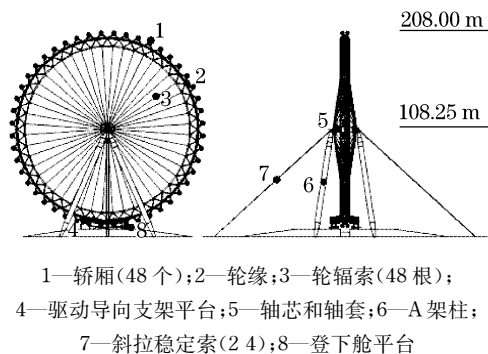


图 1 柔性巨型摩天轮结构体系
Fig.1 Structure system of flexible giant Ferris wheel

轮缘为空间三管桁架结构,主要包括 1 根内轮缘弦杆、2 根外轮缘弦杆、轮缘间斜腹杆、外轮缘横撑杆和外轮缘斜撑杆,轿厢通过轿厢支架与轮缘相连接。柔性巨型摩天轮的轮缘结构如图 2。

摩天轮的运转由驱动和导向系统单元(DGU)控制。在运行状态(OPC)下,DGU 通过外轮缘提供驱动和导向作用。在暴风状态(STC)下,DGU 与轮缘相脱离,暴风固定装置用于固定摩天轮,使之不发生转动。

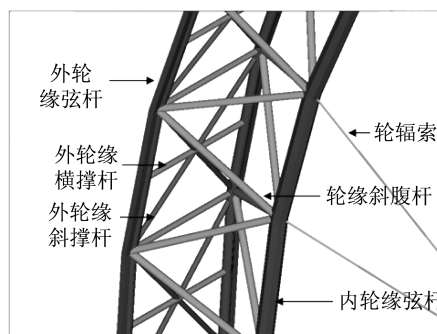


图 2 柔性巨型摩天轮轮缘结构
Fig.2 Rim structure of flexible giant Ferris wheel

2 计算模型与分析方法

2.1 计算模型

结构分析计算采用了 ANSYS 11 有限元程序,所有工况均进行非线性分析,计算模型如图 3 所示。

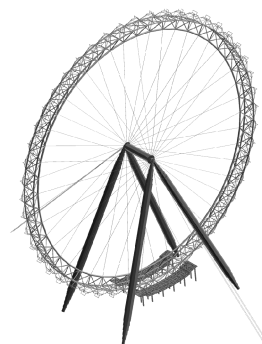


图 3 柔性巨型摩天轮结构有限元模型
Fig.3 Finite element model of flexible giant Ferris wheel

柔性巨型摩天轮结构的轮辐索和稳定索预拉力非常大,并受到较大的横向荷载,索体会产生较大的位移,呈现强几何非线性特性,采用非线性索单元 LINK 10。结构计算考虑了特殊的连接单元和约束,即轴承连接、驱动装置、导向装置和暴风固定装置。对这些非线性支承条件的准确模拟是结构分析的关键。一端的固定轴承连接采用弹簧单元 COMBIN 14,固定方向弹簧刚度根据连接构造措施经试算确定为 $10 \text{ MN} \cdot \text{mm}^{-1}$,其余两个方向按自由度进行耦合。驱动装置、导向装置和暴风固定装置也采用了弹簧单元 COMBIN 14,弹簧刚度按照间隙和约束条件经试算分析确定为:驱动单元弹簧刚度取 $60 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$,导向单元单侧弹簧刚度为 $30 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$,暴风固定装置的两个方向弹簧刚度取 $5 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。轿厢采用质量单元 MASS 21。其他构件采用 3 维线性有限应变梁单元 BEAM 188,可以考虑大变形引起的应力刚化效应,通过设置材料的弹塑性选项,同时激

活大位移求解控制器,可以跟踪全过程分析中结构和构件的非线性行为.

2.2 计算分析方法

柔性巨型摩天轮结构属于游艺设施,应分别按照正常运行状态和暴风状态进行结构分析计算^[2].对结构进行荷载态计算之前还考虑了从轮辐索和稳定斜拉索张拉找形开始到结构施工完成的影响.在非线形静力分析、初始态张拉分析和几何非线性屈曲分析中,假定材料为弹性,只计及几何非线性和支承条件变化引起的状态非线性.在进行弹塑性极限承载力分析时,考虑几何、材料以及支承条件变化引起的所有非线性因素^[3].

非线性有限元的基本方程采用基于 U. L. 列式(updated lagrangian formulation)的虚位移原理来推导建立

$$(\mathbf{K}_{l,t} + \mathbf{K}_{nl,t})\mathbf{U} = \mathbf{R}_{t+\Delta t} - \mathbf{F}_t \quad (1)$$

式中: $\mathbf{K}_{l,t}$, $\mathbf{K}_{nl,t}$, \mathbf{U} , $\mathbf{R}_{t+\Delta t}$, \mathbf{F}_t 分别为 t 时刻的线性单元刚度矩阵、几何刚度矩阵、位移向量、节点荷载力向量和初应力等效节点力向量. U. L. 列式下线性单元刚度矩阵不包含初位移矩阵.

求解分析时采用 Newton-Raphson 法和 Arc-length 法对结构平衡的全过程路径进行跟踪,全面揭示其结构特性.在整个分析过程中,对索力和轮缘顶点位移进行监控,确保摩天轮结构的整体安全性.

3 缆索预应力分析

影响摩天轮结构中轮辐索索力的主要影响因素,分别为自重(包括恒荷载、轿厢活荷载)、风荷载以及初始预应力.自重导致上半部分轮辐索拉力减少,下半部分轮辐索拉力增加;风荷载导致迎风面的轮辐索拉力增加,背风面的轮辐索拉力减少;在仅考虑初始预应力的作用下,轮辐索中的拉力均匀地增加至初始态张拉值.因此,在正常使用状态下,摩天轮中轮辐索的内力分布大体上是从 0° (12 点钟位置)到 180° (6 点钟位置)逐渐增大.轮辐索和轮缘构

件的受力性态如图 4 所示^[4-6].图中, T 表示拉力, C 表示压力.

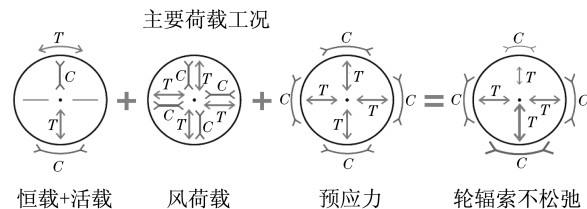


图 4 轮辐索和轮缘构件的受力性态

Fig.4 Mechanical performance of spoke cable and rim system

在典型工况:1.0 恒荷载 + 1.0 预应力 + 1.0 垂直轮盘的 0° 暴风荷载下,轮盘 180° 处,初始预拉力产生的拉索内力占轮辐索中总内力的成分最大,为 60%,其次是轮缘自重所产的内力,由风荷载所产生的内力很小,仅占 13%.因此,调整初始预张力是控制轮辐索中索力的有效手段.由于轮辐索的极限抗拉强度已经确定,通过调整轮辐索截面面积也可以相应地提高拉索的极限承载力.

分别考虑各种初始预应力和轮辐索截面面积对 0° 索的松弛、 180° 索的安全系数、 90° 索的垂度、轮缘的压缩变形和椭圆度等的影响,最终确定了最优初始预应力为 3 300 kN.轮辐索选用截面为 7×253 的平行钢丝束,截面面积为 97.37 cm^2 ,抗拉极限强度 $f_{uk} = 1\,670 \text{ MPa}$.稳定斜拉索的初始预应力为 3 000 kN,选用截面为 7×199 的平行钢丝束,截面面积为 76.62 cm^2 ,抗拉极限强度 $f_{uk} = 1\,670 \text{ MPa}$.安全度分析、松弛分析和疲劳分析结果表明:在正常工作状态下,轮辐索的最小安全系数为 3.17,满足《公路斜拉桥设计细则》(JTG/T D65—01—2007)和《预应力钢结构技术规程》(CECS212:2006)中规定的安全系数不低于 2.5 的要求;轮辐索在暴风状态下不会发生松弛;采用弯矩限制器后,轮辐索的疲劳寿命为 13 年^[7].在最不利工况下,部分拉索失效时,摩天轮整体的安全性也满足要求.各典型工况下索力、安全系数和外轮缘顶点位移见表 1.

表 1 控制荷载组合下结构力学性态对比

Tab.1 Comparison of structural mechanics performance under dominant load combinations

控制荷载组合	0° 索索力/kN	180° 索索力/kN	轮辐索安全系数	轮缘顶点面外位移/mm
初始态张拉	3 300	3 300	4.93	0
$G + P + Q_c + Q_s + Q_b + 0.27W_0$ (OPC 组合 6)	1 347	5 138	3.17	127
$G + P + Q_c + 0.5Q_s + Q_b + E_y$ (OPC 组合 29)	3 159	6 255	2.60	—
$1.35G + 1.35P + 0.98Q_s + 0.84W_0$ (STC 组合 35)	1 091	7 032	2.31	376
$G + P + 0.6Q_s + E_y$ (STC 组合 116)	3 210	6 092	2.67	—

注: G 为恒荷载; P 为预应力; Q_c 为轿厢活荷载; Q_s 为雪荷载; Q_b 为刹车力; W_0 为垂直轮盘的 0° 暴风荷载,正常运行风荷载取 0.27 倍暴风荷载; E_y 为以 y 向为主方向的三向罕遇地震.

轮辐索分析表明:索的预应力大小分布直接影响到轮缘的变形、受力特性和结构整体性能,而轮辐索的内力又受到轮缘刚度影响并且沿轮缘周边变化;索采用的预应力水平应保证索不松弛,减少振动和疲劳问题,同时具有足够的安全储备.轮缘结构自重的大小影响到初始预应力的分布,而初始预应力的分布又回馈影响到轮缘为承担内部环向压力和局部集中拉力所需的截面大小,构成了一个循环,摩天轮达到最佳性能指标的关键在于减轻轮盘结构的自重^[4-6,8].

4 轮盘和整体结构的稳定分析

柔性巨型摩天轮结构的轮缘设计是由高预应力引起的抗屈曲能力所决定^[9-10].当抗屈曲能力与截面承载力比较低时,传统的线性分析方法不能直接解决这个问题,有必要对结构的稳定性能作出分析^[9-12].稳定性分析包括轮盘稳定性分析和整体稳定性分析^[13].

对于柔性巨型摩天轮结构,一方面,轮盘是由辐射状拉索和立体桁架组成的刚柔性结构体系,失稳前结构处于大变形状态;另一方面,预应力索的引入使结构具有明显的大挠度变形、应力刚化和垂度效应等非线性特征.为了考虑初始几何缺陷对结构理论屈曲强度的影响,对结构进行基于大挠度有限元理论的非线性屈曲分析.根据相关文献和规定取轮盘直径 $D/300$ 作为初始几何缺陷,按照轮盘线性屈曲失稳的第 1 阶模态,采用一致缺陷模态法进行计算.分别采用下列 6 个分析工况进行计算:工况 1,初始态预应力;工况 2(OPC 组合 1),1.0 恒载 + 1.0 预应力;工况 3(OPC 组合 6),1.0 恒载 + 1.0 预应力 + 1.0 轿厢活荷载 + 1.0 雪荷载 + 1.0 刹车力 + 1.0 0° 正常运行风荷载(垂直轮盘方向);工况 4(OPC 组合 10),1.0 恒载 + 1.0 预应力 + 1.0 轿厢活荷载 + 1.0 雪荷载 + 1.0 刹车力 + 1.0 90° 正常运行风荷载(平行轮盘方向);工况 5(STC 组合 35),1.35 恒载 + 1.35 预应力 + 0.98 雪荷载 + 0.84 0° 暴风荷载;工况 6(STC 组合 37),1.35 恒载 + 1.35 预应力 + 0.98 雪荷载 + 0.84 90° 暴风荷载.

4.1 轮盘的稳定分析

单独取轮盘进行稳定性分析,轮轴两端固结约束,外轮缘最下端结点施加切向约束.各工况下的线性屈曲和非线性屈曲系数如表 2 所示.表 2 中前 4 个工况 1 阶线性屈曲系数差异很小,组合 1,6,10 的

2 阶线性屈曲系数也几乎相同,只有初始预应力工况下的 2 阶线性屈曲系数略大于其后 3 种工况 10%.分析表明预应力是影响轮盘结构稳定性能的主要因素,恒荷载次之,风荷载和其他活载影响较小.考虑初始几何缺陷后,组合 6 和组合 35 的非线性屈曲荷载分别比线性屈曲荷载下降了 14% 和 22%,可见风荷载的方向对几何非线性屈曲荷载影响较大.

后 5 种分析工况下的屈曲模态基本相同,第 1 阶屈曲模态为以轮轴水平线为对称轴的上下 2 个轮盘面外弯曲整体失稳,在轮盘面内变形呈 4 个半弦波.第 2,3,4 阶屈曲系数相近,模态均为下部外轮缘撑杆和外轮缘的屈曲失稳,失稳范围由底部约束处逐步沿外轮缘环面扩散至轮轴水平线下的下半部轮缘,属于轮盘面内平动失稳模态.由于高预应力缆索和轮缘桁架结构提供的抗扭刚度较大,直到第 5 阶才出现轮缘扭曲的屈曲模态,同时伴随着下半部外轮缘面的环状屈曲.在 OPC 组合 6 作用下轮盘的屈曲模态如图 5.

表 2 控制荷载组合下轮盘的屈曲系数
Tab.2 Buckling coefficients of wheel under dominant load combinations

控制荷载组合	第 1 阶线性屈曲系数	第 2 阶线性屈曲系数	第 3 阶线性屈曲系数	考虑几何非线性屈曲系数	双重非线性屈曲系数
初预应力	5.43	8.13	9.03	—	—
组合 1	5.40	7.34	7.69	5.51	4.26
组合 6	5.40	7.27	7.63	4.64	3.77
组合 10	5.40	7.27	7.63	5.31	4.10
组合 35	4.00	5.43	5.69	3.13	2.36
组合 37	4.00	5.41	5.70	4.20	3.32

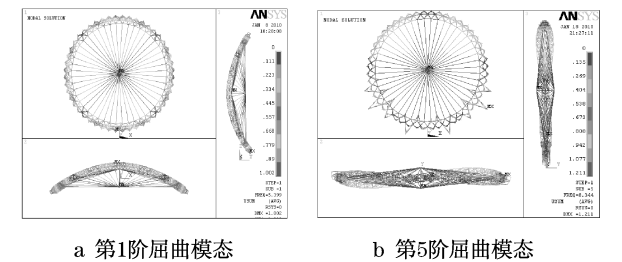


图 5 OPC 组合 6 的轮盘屈曲模态
Fig.5 Buckling mode of wheel under OPC load combination 6

STC 组合 35 下,仅考虑几何非线性时轮缘顶点的荷载—位移曲线和屈曲模态如图 6.当荷载因子达到 1.5 时,结构刚度才开始弱化,直至荷载因子达到 3.13 时,结构发生侧向弯曲的整体屈曲失稳,轮缘顶点面外位移达 13.8 m,轮盘弯曲变形显著.

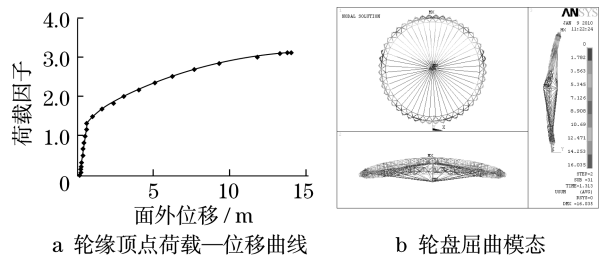


图 6 组合 35 下轮缘顶点荷载一位移曲线和轮盘屈曲模式
Fig.6 Load-displacement diagram and buckling mode of wheel under load combination 35

4.2 摩天轮结构的整体稳定分析

摩天轮结构整体稳定分析时,各工况下的线性屈曲和非线性屈曲系数如表 3 所示. 与轮盘结构模型分析类似,前 4 个工况第 1,2 阶的线性屈曲系数差异很小,说明影响整体结构稳定性能的主要因素是预应力,恒荷载次之,风荷载和其他活载影响较小.同时组合 6 和组合 10 以及组合 35 和组合 37 的前 3 阶线性屈曲系数基本相同,说明风荷载的方向对整体结构线性屈曲荷载影响很小.但考虑初始几何缺陷后,组合 6 和组合 35 的几何非线性屈曲荷载分别比线性屈曲荷载下降了 29%和 18%,组合 35 的非线性屈曲系数仅为组合 37 的 76%,可见摩天轮结构几何非线性的影响比较明显,风荷载的方向对几何非线性屈曲荷载影响显著.整体模型下前 4 个工况第 1 阶线性屈曲系数较轮盘模型大 25%,但非线性屈曲系数差别较小,表明 OPC 和 STC 不同的边界支承条件对线性屈曲系数影响较大,对非线性屈曲影响相对较小.

表 3 控制荷载组合下柔性巨型摩天轮结构的屈曲系数
Tab.3 Buckling coefficients of flexible giant Ferris wheel under dominant load combinations

控制荷载组合	第 1 阶线性屈曲系数	第 2 阶线性屈曲系数	第 3 阶线性屈曲系数	考虑几何非线性屈曲系数	双重非线性下屈曲系数
初预应力	6.68	7.57	9.06	—	—
组合 1	6.73	7.36	7.71	5.56	3.96
组合 6	6.73	7.29	7.63	4.77	3.58
组合 10	6.72	7.29	7.65	5.35	3.81
组合 35	4.05	4.87	5.36	3.32	2.57
组合 37	4.05	4.86	5.43	4.35	2.80

在 STC 暴风荷载组合 35 下,线性屈曲分析系数最小,为 4.05,几何非线性屈曲系数为 3.32,表明摩天轮整体结构稳定性能良好.整体和轮盘两种模型下屈曲系数差异较小,验证了计算的可靠性.

整体模型下,OPC 和 STC 状态的屈曲模式不相同.OPC 状态时,第 1 阶为轮盘面外弯曲失稳.其原因在于轮盘底部在 DGU 的弹簧约束下,垂直于轮盘的侧向风荷载作用在轮盘时,轮盘侧向刚度弱于面内刚度而失稳.第 2 阶为轮缘面内平动失稳模式,下部外轮缘撑杆和外轮缘产生环状屈曲失稳,第 3 阶才出现轮缘的扭转失稳模式,并伴随着下半部外轮缘面的环状屈曲失稳.而 STC 状态时,第 1 阶就出现了轮缘的扭转失稳模式,呈对称的 4 个半弦波形状,且屈曲系数较低.第 2 阶为轮盘面外整体弯曲失稳模式,第 3 阶为底部外轮缘撑杆和外轮缘屈曲的面内平动失稳模式.这表明暴风荷载下,轮缘的抗扭转刚度弱于其侧向剪切刚度,轮盘首先出现扭转失稳.OPC 组合 6 和 STC 组合 35 下轮盘的屈曲模式如图 7 所示.

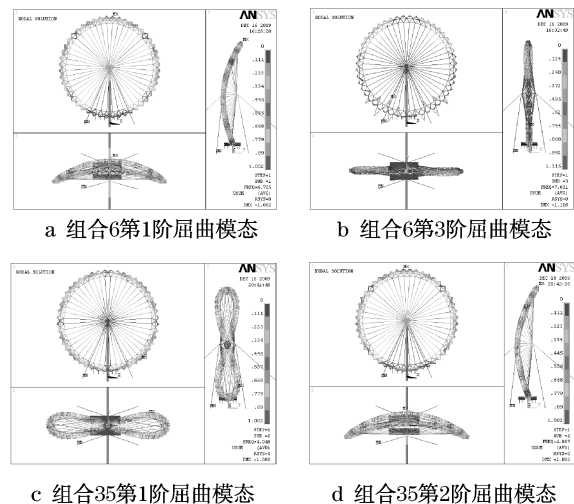


图 7 组合 6 和 35 下的柔性巨型摩天轮结构屈曲模式
Fig.7 Buckling mode of flexible giant Ferris wheel under load combination 6 and 35

STC 组合 35 下,仅考虑几何非线性时轮缘顶点的荷载一位移曲线和屈曲模式如图 8 所示.当荷载

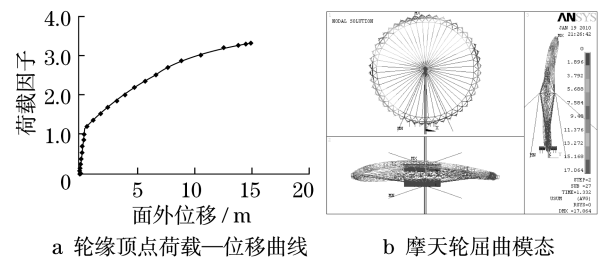


图 8 组合 35 轮缘顶点荷载一位移曲线和摩天轮屈曲模式
Fig.8 Load-displacement diagram and buckling mode of flexible giant Ferris wheel under load combination 35

因子达到 1.1 时,结构刚度就开始弱化,直至荷载因子达到 3.32 时,结构发生伴有扭转的整体侧向弯曲屈曲失稳模态,此时轮缘顶点面外位移达 14.9 m,整个摩天轮结构产生很明显的侧向弯曲变形。

5 弹塑性极限承载力分析

对于柔性巨型摩天轮这类大型复杂预应力钢结构,构件的部分截面在整个结构达到临界点之前可能已进入弹塑性状态.要得到真实的极限荷载,需考虑全过程的几何非线性以及材料非线性,得到理想结构的荷载一位移全过程曲线,从而清楚地呈现结构强度、稳定性以至刚度的整个变化历程^[14].

5.1 结构塑性发展机制和极限承载力

施加 OPC 组合 6 荷载于整体模型上.整个摩天轮结构的塑性发展顺序见表 4.当荷载因子达到 2.70 时,A 架柱上端柱头由于局部的应力集中首先出现塑性,但塑性区极小,未扩散.由于内外轮缘塑性的不断发展,结构的整体性急剧下降,当荷载增加到 3.58 倍的组合 6 荷载时,结构达到极限承载力.此时,轮缘顶点面外侧移达 5.87 m,结构变形显著.轮辐索的最大轴力达到 12 100 kN,仍小于破断力 16 267 kN.稳定索索力很小,仅为 2 697 kN.轮缘和 A 架柱是摩天轮的主要传力构件,它们处于有效工作状态,较迟进入屈服,这就保证了摩天轮具有较高的极限承载力.分析结果表明,柔性巨型摩天轮结构未有明显的薄弱部位,主要传力构件不先于次要受力构件失效,具备了理想的塑性发展机制.同时由表 3 可知,5 种组合下,考虑几何和材料双重非线性分析的摩天轮极限屈曲荷载系数是仅考虑几何非线性的 64%~77%,其中最小值为 STC 组合 35 的 2.57,弹塑性极限承载力较大,能满足摩天轮结构正常运行使用状态和暴风状态下承载能力极限状态的要求。

表 4 柔性巨型摩天轮结构的塑性发展机制

Tab.4 Plastic development mechanism of flexible giant Ferris wheel

构件名称	荷载因子	轮缘顶点面外位移/m
A 架柱上端柱头	2.70	2.54
轮缘斜腹杆	3.20	4.10
下部外轮缘	3.36	4.69
背风处 A 架柱中段	3.53	5.41
外轮缘撑杆	3.56	5.66
迎风处 A 架柱中段	3.56	5.66
内轮缘	3.57	5.73
轿厢主撑杆	3.58	5.87

5.2 结构的非线性力学特性

图 9 为轮缘顶点的荷载一位移曲线.当结构开始加载时,轮辐索和稳定索轴力较小,刚度较低,但刚性结构的刚度大,结构整体刚度也大.当荷载因子达 1.7 时,轮缘斜腹杆、内外轮缘以及 A 架柱柱身应力迅速增大,轮缘的抗侧刚度下降,同时 A 架柱支承条件减弱,结构整体刚度急剧下降.随着荷载的增加,当荷载因子达到 2.7 时,轮缘斜腹杆和 A 架上端柱头逐渐进入塑性,结构变形增大,拉索的轴力增加,但因材料软化而削弱的结构刚度,超过了由于索力增大而增加的刚度,结构整体刚度降低.由此可知,刚性结构刚度大小对结构整体刚度起控制作用.当荷载因子达到 3.36 时,下部外轮缘等主要受力构件逐渐进入塑性,结构整体刚度再一次急剧下降.当荷载因子达到 3.58 时,大部分主要结构构件已进入塑性,结构因无法完成内力重分布而失效,结构达到极限承载力.图 10 为摩天轮结构达到弹塑性极限承载力时的位移图.顶点最大位移达 6.68 m,结构整体侧倾,最终破坏为强度破坏,不发生失稳破坏。

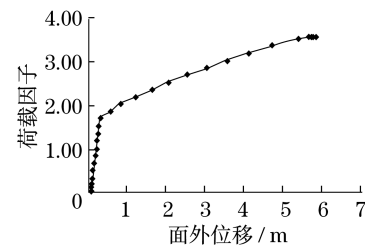


图 9 柔性巨型摩天轮结构组合 6 的轮缘顶点荷载一位移曲线

Fig.9 Load-displacement diagram of flexible giant Ferris wheel under load combination 6

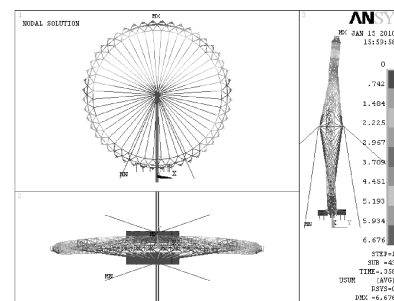


图 10 柔性巨型摩天轮结构达到弹塑性极限承载力时位移图

Fig.10 Displacement diagram of flexible giant Ferris wheel under the state of elasto-plastic limit bearing capacity

6 结论

(1) 分析了柔性巨型摩天轮结构轮缘和拉索的

受力性态,分别考虑各种初始预拉力和轮辐索截面面积对索的松弛、安全系数与轮缘的压缩变形等的影响,合理选择轮辐索的初始态预应力度和面积,优化结构性能,满足了摩天轮运行的安全系数要求。

(2) 考虑初始缺陷分别对轮盘以及摩天轮整体结构进行稳定分析,研究其非线性屈曲特征.分析表明由辐射状拉索和立体桁架组成的轮盘结构提供了强大的抗侧和抗扭刚度,影响整体结构稳定性能的主要因素是预应力,恒荷载次之,风荷载和其他活荷载影响较小,摩天轮结构几何非线性的影响比较明显,整体结构屈曲系数较大,稳定性能良好。

(3) 同时考虑几何非线性和材料非线性进行了弹塑性极限分析,全面揭示柔性巨型摩天轮结构的力学特性.分析和研究结果表明:柔性巨型摩天轮结构的塑性发展机制理想,最终破坏为强度破坏,刚性结构刚度大小对结构整体刚度起控制作用,弹塑性极限承载力较大,能满足摩天轮结构正常运行使用状态和暴风状态下承载能力极限状态的要求。

参考文献:

- [1] 王小盾,石永久,王元清.摩天轮结构及其工程应用研究[J].建筑科学与工程学报,2005,22(3):30.
WANG Xiaodun, SHI Yongjiu, WANG Yuanqing. Research on structure and engineering application of Ferris wheel[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(3): 30.
- [2] 刘志学,邢友新,张宏伟,等. GB 8408—2008 游乐设施安全规范[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
LIU Zhixue, XING Youxin, ZHANG Hongwei, et al. GB 8408—2008 Amusement device safety code[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [3] 丁洁民,何志军,康晓菊. 2008 奥运乒乓馆预应力钢屋盖非线性分析与研究[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2007, 35(7):871.
DING Jiemin, HE Zhijun, KANG Xiaojun. Nonlinear analysis and study of prestressed steel structure roof of table tennis gymnasium for the 2008 olympic games[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35(7): 871.
- [4] McNiven B, Dallard P. The Singapore flyer and design of giant observation wheels [C]//IStructE Asia-Pacific Forum on Structural Engineering: Innovations in Structural Engineering, Singapore: [s. n.], 2007: 2—3.
- [5] Andrew Allsop, Pat Dallard, Heng Kok Hui, et al. The Singapore flyer [J]. Structural Engineering International, 2009, 19(1): 12.
- [6] Andrew Allsop, Pat Dallard, Brendon McNiven. The Singapore flyer and design of giant observation wheels [J]. The Arup Journal, 2008, 2: 2.
- [7] prEN 1993—1—11: 2003 Eurocode 3: design of steel structures [S]. Brussels: European Committee for Standardisation, 2003.
- [8] Robert L Reid. High flyer [J]. American Society of Civil Engineers, 2009, 10: 42.
- [9] 王永昌, Allan Mann. 英国航空公司伦敦眼的结构和建造[J]. 建筑钢结构进展, 2003, 5(3): 1.
WANG Yongchang, Allan Mann. Construction of the British Airways London Eye, London [J]. Progress in Steel Building Structures, 2003, 5(3): 1.
- [10] Thompson N, Roberts J M. The British Airways London Eye. part 1: background [J]. Institution of Structural Engineers, 2001, 79(2): 16.
- [11] Berenbak J, Lanser A, Mann A P. The British Airways London Eye. part 2: structure [J]. Institution of Structural Engineers, 2001, 79(2): 19.
- [12] Desflammas P, Mann A P. The British Airways London Eye. part 3: capsules [J]. Institution of Structural Engineers, 2001, 79(2): 29.
- [13] 朱洪翔, 马明, 宋涛, 等. 天津慈海桥摩天轮结构的稳定性分析 [J]. 建筑结构, 2007, 37(3): 69.
ZHU Hongxiang, MA Ming, SONG Tao, et al. Stability analysis of skyscraper wheel structure in Tianjin Cihai Bridge [J]. Building Structures, 2007, 37(3): 69.
- [14] 丁洁民, 何志军. 北京大学体育馆钢屋盖预应力桁架壳体结构分析的几个关键问题 [J]. 建筑结构学报, 2006, 27(4): 44.
DING Jiemin, HE Zhijun. Several key issues of structural analysis of prestressed steel truss shells roof of Beijing University Gymnasium [J]. Journal of Building Structures, 2006, 27(4): 44.