

38 kW 级碟式光热发电系统机架结构的承载性能

彭佑多¹, 颜健¹, 易陈斐¹, 谢商育², 余佳焕¹

(1. 湖南科技大学 机械设备健康维护省重点实验室, 湖南 湘潭 411201; 2. 江麓机械集团 军代处, 湖南 湘潭 411100)

摘要:为实现太阳光能的高品位利用,设计了以抛物聚光器为聚光功能载体且配有双轴视日跟踪机构的碟式/斯特林热发电系统的机架结构.在机架承载和传力特性一致的基础上建立了机架的有限元模型,并基于数值风洞模拟的机架风载荷,计算得到了机架处于不同高度角时自重和风载作用的变形与应力分布,分析了机架承载的位移特性和薄弱位置的应力分布.结果表明,该机架在8级风载(17.1 m/s)作用时聚光器仍具有较好的几何“保型”能力,且在抗风运行以及12大风避险时结构均处于安全状态.

关键词:碟式聚光器;机架;风载荷;承载性能;有限元

中图分类号:TK514; TH122 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2015)01-0029-07

Frame bearing capacity mechanism of 38 kW solar dish string power system

Peng Youduo¹, Yan Jian¹, Yi Chenfei¹, Xie Shangyu², Yu Jiahuan¹

(1 Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment, Xiangtan 411201, China;

2. Military Agency Department, JiangLu Machinery Group, Xiangtan 411100, China)

Abstract: In order to improve the utilization of light energy, a frame structure was designed which consist of a parabolical concentrator and biaxial visual tracking institution used in the solar dish string power system. Based on the uniformity of frame bearing capacity and power transmission characteristics, the finite element model was built. Through numerical wind tunnel simulation, the wind load of the frame at different altitudes were obtained. The displacement characteristics and stress distribution at weak position of the frame structure were analyzed. Results indicated that the concentrator system has better ability in geometry shape. When running in the wind or facing hurricane, the frame structure is safe.

Keywords: dish concentrator; frame structure; wind load; wind load ability; finite element analysis

碟式/斯特林热发电系统是通过碟式聚光器将太阳光热聚集并加热工质进而驱动斯特林热机,最后经发电机将机械能转化为电能输出.由于系统光电转换效率高(高达29.4%)且使用灵活,已成为太阳能高品位利用中较活跃的研究方向^[1].机架结构是系统功能实现的载体并直接影响系统的发电效率,尤其是随着系统功率的增加,机架空间尺度增大(38 kW级聚光器半径为8.85 m),因自重或风载引起的结构变形对光热聚集影响更为显著,且要满足8级风作用的有效运行以及12级大风避险时结构的安全性.因此,碟式机架的合理设计与承载性能的研究尤为重要.

收稿日期:2014-05-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51275166);湖南省高校产学研基金项目(11CY020);湖南省科技计划项目(2012FJ6121);湖南科技大学研究生创新基金项目(S130019)

通信作者:彭佑多(1964-),男,湖南安化人,博士,教授,博士生导师,主要从事机械系统振动,新能源技术等研究. E-mail: ydpeng1964@163.com

国内外许多学者对碟式系统开展相关研究并研制了碟式样机^[2-7]. 中科院电工所^[2]和哈尔滨工业大学^[3]均研制了由多圆形反射镜构成的碟式光热发电系统. 王云峰等人研制了用于 GaAs 发电的多碟式共焦聚光器,并分析了接收面的能流分布^[4]. 李丽芳等提出了一种花瓣式新型碟式聚光器,并对其聚光优化进行了研究^[6]. Lovegrove K 等研制了聚光面积为 500 m² 的抛物聚光器^[7]. 还有作者课题组与湘电集团研制的 25 kW 级碟式光热发电系统,并对结构进行了数值风洞模拟和承载性能研究^[8-11],但对机架整体承载性能的研究仍显不足. 在工程应用中,我国内蒙古鄂尔多斯市建立了装机总容量为 100 kW 的碟式太阳能光热示范电站且已进入试运行阶段,其单机功率为 10 kW. 虽有工程应用,但从公开文献来看,对碟式整机结构承载性能研究的报道较少,尤其是 38 kW 大功率级的研究更为少见. 然而随着碟式光热发电技术的推进,现已着手 38 kW 级碟式系统的研制. 文中将以 38 kW 级碟式机架为研究对象,建立了机架结构有限元模型,开展了不同视日工况下机架在自重或风载作用的承载性能研究,为机架设计以及后续聚光性能的分析与评价提供依据,也为我国今后碟式太阳能热发电技术的工程化提供重要参考.

1 机架结构概况

碟式热发电系统机架结构如图 1 所示. 由聚光器、支撑桁架、斯特林热机等构成视日跟踪部分(机架可运动部分),并采用图 2 所示的轴承支撑方式进行承载与传力. 基于 38 kW 级系统功率要求,聚光器的抛物曲面采光口半径 $R=8\ 850\text{ mm}$ 和焦半径 $f=9\ 490\text{ mm}$,聚光器与支撑桁架是经 U 形体采用高强度螺栓连接的. 机架整体采用立柱支撑,立柱高度为 $1.0 \times 10^4\text{ mm}$ 并采用多节段形式. 立柱下段采用卷制焊接锥状管,其壁厚为 20 mm、高度为 $6.0 \times 10^3\text{ mm}$ 、顶部外径为 800 mm、底部外径为 $1.0 \times 10^3\text{ mm}$. 立柱中段采用 $600 \times 25\text{ mm}$ 的圆管并通过法兰与下段连接. 立柱上段也采用 $600 \times 25\text{ mm}$ 的圆管,需满足方位角运动功能而采用蜗轮法兰与立柱中段连接,如图 2 所示.

图 2 为高度角-方位角双轴驱动机构. 其中方位角跟踪是以蜗轮为目标执行件,实现机架可动部分绕轴 D 的旋转功能. 而高度角跟踪是以螺旋升降机的丝杆为目标执行件,通过改变丝杆长度 L 来实现机架可动部分绕轴 C 的旋转功能.

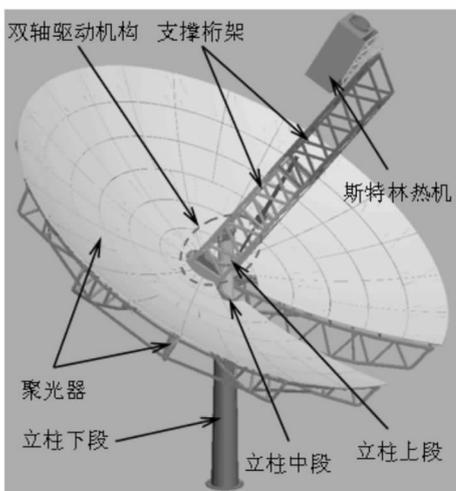


图1 碟式整机结构的三维模型

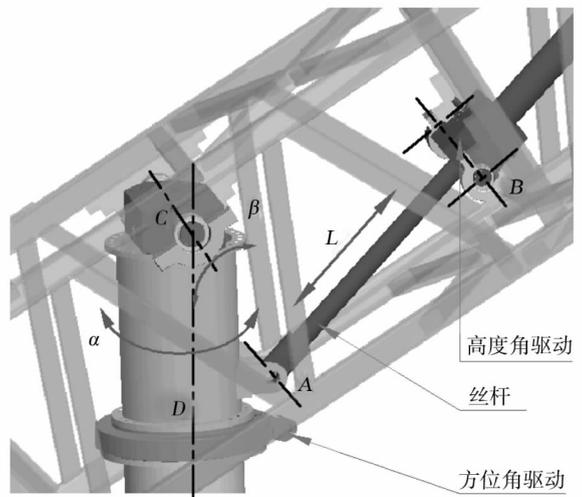


图2 高度角-方位角双轴驱动机构

2 物理模型简化与有限元力学模型建立

针对整机结构的复杂性,将在承载和传力特性一致的基础对其进行简化并建立有限元模型. 由于结构的承载失效往往是局部薄弱位置引起,根据整机的载荷传递分析可知,薄弱位置主要在支撑桁架的支撑段、双轴驱动机构、焊接铰耳、立柱过渡法兰以及 U 形体与各部件的连接等.

图 3(a) 是双轴驱动机构与整机支撑的有限元模型,由于轴承座刚度远大于支撑桁架,所以分析重点是支撑桁架的刚度与应力. 支撑桁架采用 beam188 梁单元,轴承座直接简化为 shell63 壳单元并与支撑

桁架梁单元共线来模拟刚性连接,其轴承座在分析中只用于传递载荷.高度角驱动的螺旋升降机在模型中不予考虑,而丝杆采用 beam188 梁单元模拟,且与升降机固定板采用 MPC 方式模拟刚性连接,与立柱焊接铰耳采用约束方程实现模拟真实铰接.同时对图 3(a)中标识的支撑位置均采用约束方程实现模拟真实铰接的承载传力特性.由于设计选型中已校核蜗轮部件的承载性能,因此整机分析中立柱上段与中段连接以直接刚性连接形式,立柱均采用 solid45 实体单元进行模拟.此区域失效主要集中在铰耳焊接根部.

图 3(b)是立柱中段与下段连接的有限元模型,不考虑法兰连接的螺栓失效,将两法兰盘连接直接简化为刚性连接,采用 solid45 实体单元模拟.该连接段主要承受整机自重的轴向载荷、水平风载荷以及弯矩等作用,所以法兰盘和立柱的焊接根部应力较大.

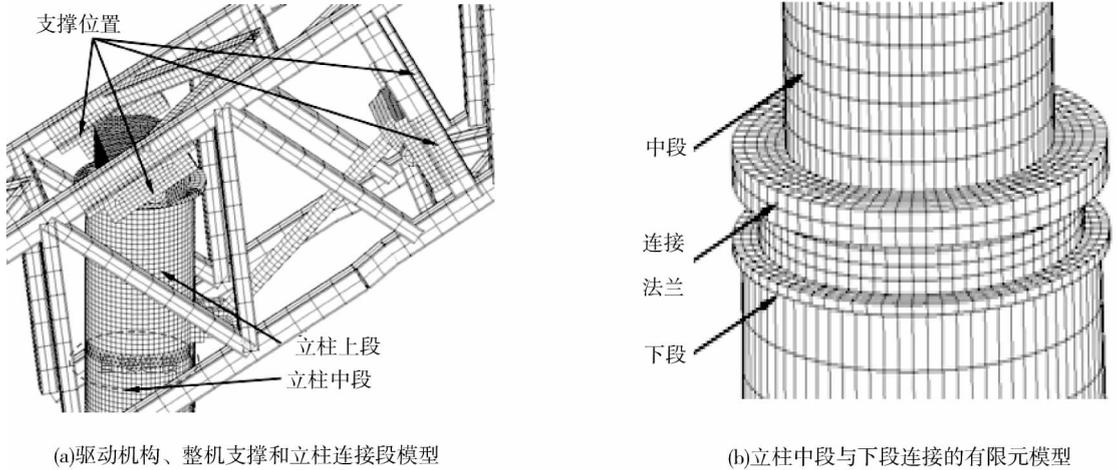


图 3 关键部位的有限元模型

图 4 为整机结构的有限元模型.由于聚光器网架的辐射梁(弦杆矩形 120 mm × 100 mm × 5 mm 和腹杆矩形 100 mm × 80 mm × 4 mm)为焊接件,且环杆(矩形 100 mm × 80 mm × 3 mm)是通过多螺栓与辐射梁连接,都能抵抗弯矩而采用 beam188 梁单元模拟.镜面单元(厚度 15 mm)采用 shell63 壳单元,且模型中不考虑反射镜和聚氨酯层.镜面安装螺栓采用 beam188 单元模拟,并与镜面单元采用共节点方式传递载荷.中心 U 形体是钢板焊接件而采用 shell63 壳单元模拟.整机模型中各部件的连接刚度对其空间位移结果影响显著,将辐射梁与 U 形体以 MPC184 刚性梁过渡来模拟真实的刚性连接,而支撑桁架是通过端面板与 U 形体采用多螺栓连接的,这里采用面-面接触的多点 MPC 技术模拟刚性连接.斯特林热机质量为 1 600 Kg,安装在支撑桁架的端部(f 位置),以 mass21 质量单元模拟.通过将立柱绕高度角轴旋转来建立整机的不同高度角模型,保持聚光器与整体坐标系的相对关系和图 4 一致,即 Y 轴指向聚光器焦点位置,便于后续聚焦性能研究时位移数据的使用.整机有限元模型共有单元约 12.6 万和节点约 13.4 万.有限元模型的材料属性:镜面单元密度为 350 kg/m³,弹性模量为 4.5×10^{10} N/m²(铝蜂窝基体);其他材料均为钢材其密度为 7 850 kg/m³,弹性模量为 2.06×10^{11} N/m².

考虑风载荷作用方向具有随机性,文中将针对高度角 $\beta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 与风向角 $\varphi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$ 的 $5 \times 7 = 35$ 组工况进行研究,其中高度角 $\beta = 90^\circ$ 时为聚光器开口朝天,风向角与高度角的定义如图 4 和图 2 所示.为了便于表述,工况组合采用高度角-风向角的命名方式,例如 $30^\circ \sim 120^\circ$ 表示 30° 高度角下风场入流为 120° 作用于结构.同时为便于位移结果的处理与表达,在图中标记了 $a \sim h$ 点做为机架承载后位移的控制节点,其中 $b \sim d$ 在聚光器开口圆的象限位置, f 在斯特林热机安装位置, g 在立柱顶端位置, h 在聚光器的 U 形体中心.

3 机架结构的承载性能分析

聚光器抛物镜面是实现光热聚集的功能几何,但机架具有大尺度和大质量等特点,承载后镜面单元和热机接收器必然会产生空间位移,可能导致光斑部分落靶或热流分布不均以及更为严重的热管烧蚀等现象.因此,机架结构具有良好的刚度性能是提高系统容纳环境的能力、是保障系统高效运行以及增加发电总量的重要条件.

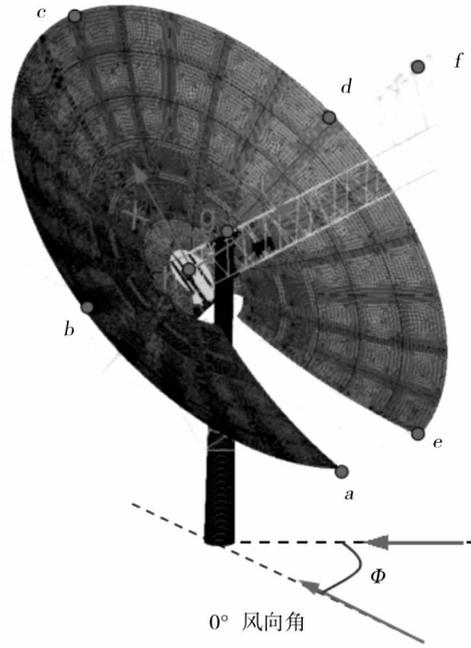
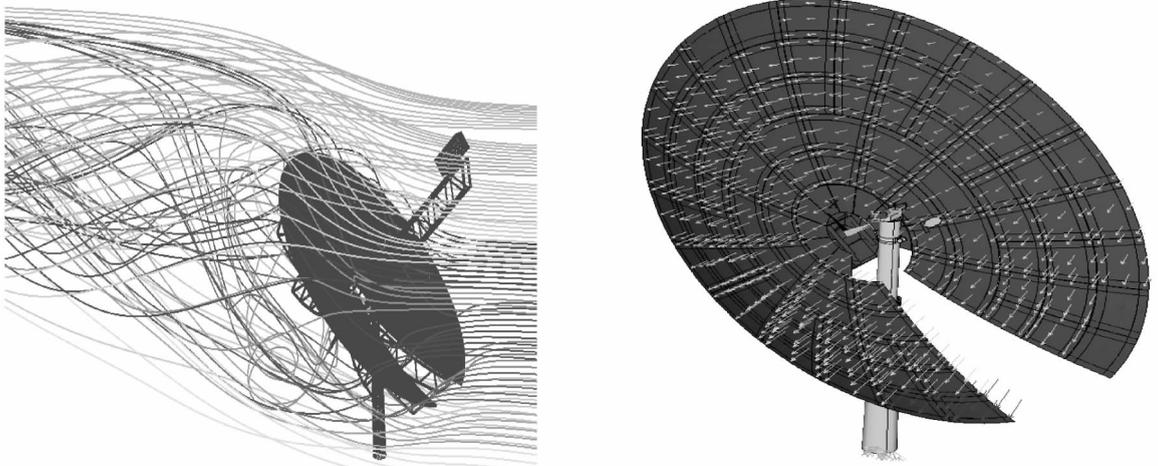


图4 整机结构的有限元模型(45°高度角)

3.1 风载荷的计算

机架具有空间尺度大且体型复杂,在以往载荷规范中难以获得有效的风载荷,因此采用数值风洞技术^[8],模拟得到机架在各工况的风载荷及绕流特性.图5(a)是工况45°~0°的机架风场绕流情况,图(b)是有限元模型的风压加载,可以看出各镜面单元的载荷大小是不同的,是能够较好符合实际风场作用的.限于篇幅,文中将只着重分析机架的承载性能.



(a)工况45°~0° 整机的数值风洞模拟

(b)工况45°~0° 有限元模型的风压加载

图5 机架整体风载荷模拟与有限元模型加载

3.2 机架承载的位移分析

自重作用的结构变形对聚光性能的影响是全生命周期的,其聚光器沿焦轴(Y 轴方向)的位移以及热机接收器沿 X 和 Z 轴方向的位移对光热聚集影响是最为显著,图6给出了自重作用下机架位移随高度角的变化.

由图(a)可知:热机安装座 f 点沿 X 轴的位移随高度的增大而减小,0°高度角时为-12.90 mm,90°高度角时重力沿 Y 轴负方向,此时沿 X 轴位移为-4.24 mm.是因为支撑桁架悬臂长且热机质量大(质量1 600 kg)而质量力矩作用显著.

由图(b)可知:各关键点沿Y轴位移随高度角的增大而减小.在0°高度角时c点沿Y轴位移有8.02 mm,而实际结构可能更小,这是因为有限元模型的结构重心偏离立柱轴线,对立柱有弯矩作用导致其顶端h点沿Y轴有2.19 mm的位移.而立柱顶端位移将使聚光器产生整体牵引位移.这也说明大质量特点的碟式机架质量力矩平衡设计是重要的.

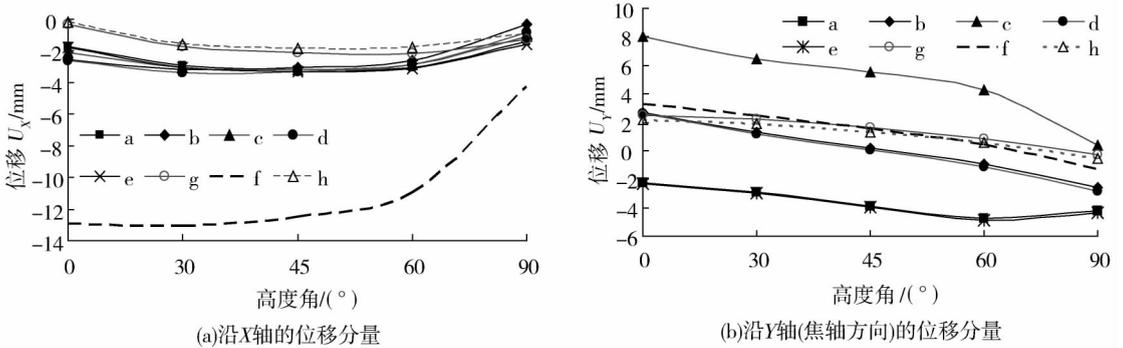


图6 重力作用下机架关键节点位移

图7是八级风(17.1 m/s)时机架关键点位移随工况的变化,图10是8级风载作用的机架变形云图.

1)文中所研究的0°,30°,45°和60°高度角,各关键点沿Y轴位移随风向角变化趋势基本一致,因此文中只给出了部分曲线.在90°高度角时结构整体刚度的改善且风载荷的减弱使曲线存在一定差异.图9(a~c)中的b和d点是以g点曲线近似呈“8”字形对称,并且在90°风向角是反对称的,说明此时机架主要是绕某轴的旋转变形.还可以看出立柱顶端g点、U形体中心h点以及热机安装座f点的沿Y轴位移随风向角变化趋势均一致且数值基本相等.这说明风载荷的水平分力使立柱顶端产生位移并导致视日部分整体产生牵连位移.在图(d)中由于机架背部迎风时质量力矩的叠加效应导致点f的位移增大,而工作面迎风时风载荷力矩与质量力矩是有部分抵消的.

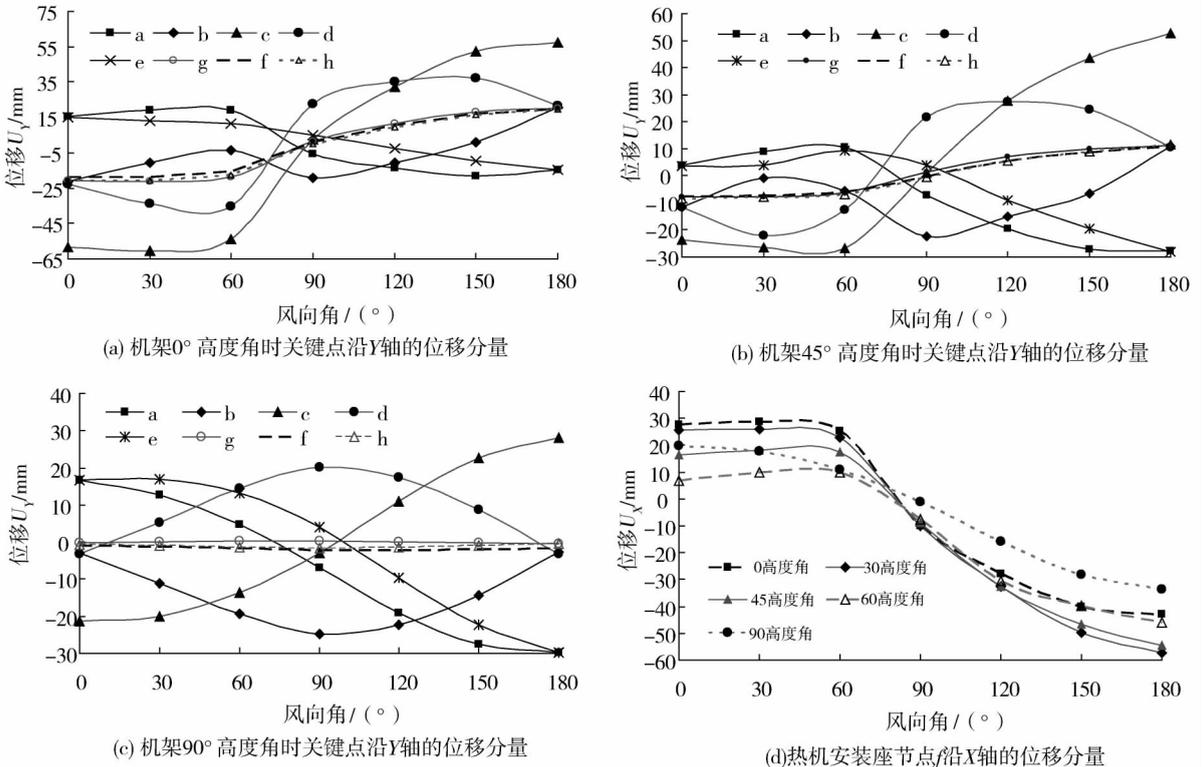


图7 8级风载作用时机架关键点位移随工况的变化

2)由图8可知,视日跟踪部分存在绝对位移为0 mm的区域,这说明结构的承载变形是由绕轴旋转位

移和平动位移的叠加. 图 8(a) 的 $45^\circ \sim 180^\circ$ 工况, 立柱顶端 h 点沿 X 轴位移为 -4.02 mm , 沿 Y 轴位移为 11.43 mm , 其水平面总位移是 12.11 mm . 立柱绕地基产生了转角位移, 由几何关系求得转角满足 $\tan(\theta) = 12.11 \times 10^{-4}$. 牵引位移相当于将视日部分与立柱看成整体并绕地基旋转 θ 角度, 求得 f 点的空间总位移为 20.47 mm , 沿 X 轴的牵引线位移是 -18.34 mm , 同时自重作用的 f 点位移 $X = -12.49 \text{ mm}$, 因此由风载荷作用的沿 X 轴净位移只有 -23.56 mm . 同理聚光器 c 点 Y 位移也是带有整体牵引位移的.

综上所述可知: 提高立柱刚度以及减小支撑桁架的转角变形均能有效减小承载的结构位移. 同时根据整体的牵引位移分析可知反射镜曲面仍具有较好的“保型”能力, 当采用光电探测装置进行辅助视日跟踪时, 建议安装在聚光器 U 形体位置.

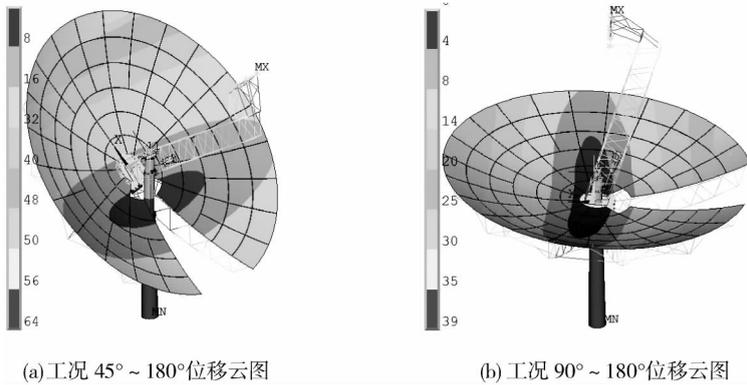


图 8 8 级风载作用的机架结构位移云图

3.3 机架承载的应力分析

机架承受自重作用时, 因质量力矩作用而导致支撑桁架段的应力较大, 在 0° 高度角时最大为 72 MPa , 而在 90° 高度角时支撑桁架承受拉力其应力只有 37 MPa , 机架其他位置在各高度角工况的应力均小于 45 MPa .

机架要求满足 8 级风载的抗风运行, 文中计算了高度角和风向角的组合工况共 35 组, 分析得到应力峰值均在支撑桁架段. 限于篇幅, 这里仅给出了应力较大且具有代表性工况的应力分布, 如图 9 所示. 其中 $0^\circ \sim 30^\circ$ 是风载荷水平分力最大的, $0^\circ \sim 90^\circ$ 是侧向力最大以及方位力矩最大的 $0^\circ \sim 120^\circ$ 工况, 可以看出支撑桁架的应力峰值均控制在 110 MPa 以内, 即机架在 8 级风环境的运行是安全的.

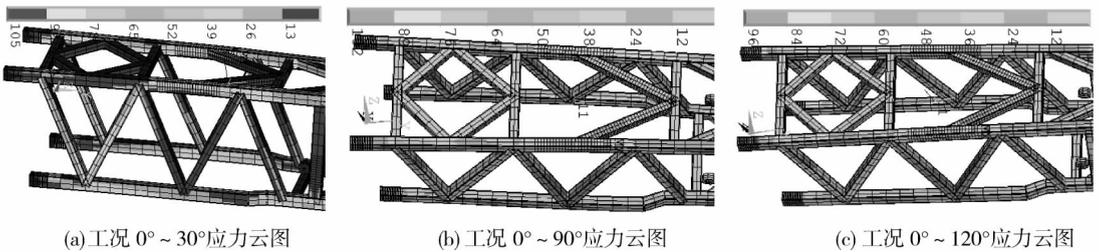


图 9 8 级大风作用的应力分布

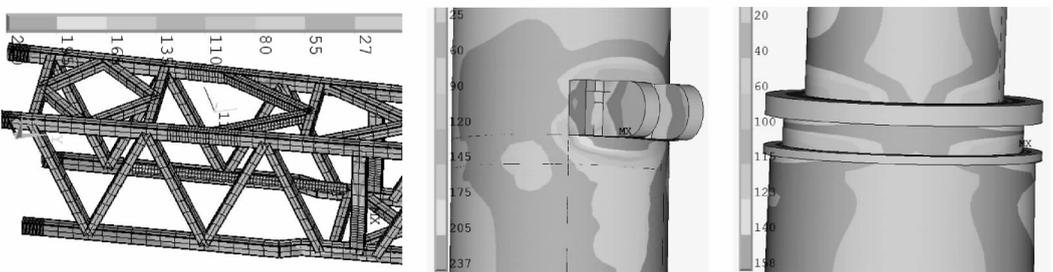


图 10 12 级大风作用工况 $90^\circ \sim 180^\circ$ 的应力分布

在 12 级大风(32.55 m/s)时机架处于避险工况(高度角为 90°),计算了不同风向角作用的机架应力分布,给出了如图 10 所示应力最大的 $90^\circ \sim 180^\circ$ 工况.由图 10 可知:在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 工况丝杠连接铰耳的根部应力最大为 237 MPa,但根据力学分析可知是压应力.立柱中段与下段的连接法兰压应力为 158 MPa 而对侧的拉应力为 132 MPa.支撑桁架的应力峰值达到 220 MPa,位置在螺旋升降机的固定梁上,是由于机架结构的力矩平衡而使丝杆轴向力达到 417 kN,所以对铰耳以及升降机固定梁的作用显著,而结构设计中支撑桁架前段是采用高强度焊接钢,能够满足强度要求.

避险工况中 $90^\circ \sim 0^\circ$ 是应力最小的,其中铰耳处拉应力为 184 MPa,支撑桁架应力为 157 MPa 也是在升降机固定梁上,立柱连接法兰的应力只有 116 MPa.综上分析,应力峰值均小于材料的许用应力即机架结构是安全有效的.

4 结论

根据 38 kW 碟式机架原型,对物理模型进行合理简化并建立了机架结构有限元模型,同时对各工况的承载性能进行了分析.得到如下结论:

1) 提高立柱和支撑桁架的刚度能有效减小视日跟踪部分的牵引转角,进而有效控制机架承载的空间位移.从整体牵引位移角度看,机架在 8 级风载作用时聚光器仍具有较好的几何“保型”能力,但焦轴是随转角位移变化的,当采用光电探测装置进行辅助视日跟踪时,建议安装在聚光器 U 形体位置.

2) 机架在 8 级风环境中运行时应力最大在支撑桁架且均为 110 MPa 以内,在 12 级大风的 $90^\circ \sim 180^\circ$ 避险工况铰耳根部的压应力为 237 MPa,支撑桁架的应力峰值达到 220 MPa 在升降机固定梁位置,而支撑桁架前段是采用高强度焊接钢.因此机架结构的承载是安全有效的.

3) 机架承载的位移结果能为后续系统聚光性能的分析与评价提供依据,同时承载分析也显露出机架结构仍具有较大优化的潜力.

参考文献:

- [1] 纪军,何雅玲. 太阳能热发电系统基础理论与关键技术战略研究[J]. 中国科学基金,2009,6:331-336.
- [2] 杨敏林,杨晓西,林汝谋,等. 太阳能热发电技术与系统[J]. 热能动力工程,2008,23(3):221-228.
- [3] 夏新林,戴贵龙,孙创. 多碟聚集器聚集太阳能热流分布特性研究[J]. 太阳能学报,2012,33(9):1524-1528.
- [4] 王云峰,季杰,何伟,等. 抛物碟式太阳能聚光器的聚光特性分析与设计[J]. 光学学报,2012,32(1):1-8.
- [5] 颜健,彭佑多,肖蓉,等. 基于结构特征及镜面单元安装误差的碟式聚光器聚焦分析[J]. 光学技术,2014,40(6):508-514.
- [6] Lifang L I, Steven D. A new design approach for solar concentrating parabolic dish based on optimized flexible petals[J]. Mechanism and Machine Theory, 2011(46):153-1548.
- [7] Lovegrove K, Burgess G, Pye J. A new 500 m² paraboloidal dish solar concentrator[J]. Solar Energy, 2011,85:620-626.
- [8] 颜健,彭佑多,龙东平,等. 大型碟式太阳能聚光器三维定常风场数值仿真[J]. 计算机仿真,2014,34(1):111-116.
- [9] 颜健,彭佑多,龙东平,等. 大型碟式光热太阳能聚光器风致振动响应分析[J]. 机械科学与技术,2014,33(11):1665-1671.
- [10] 何轶,彭佑多,龙东平,等. 大型碟式光热太阳能聚光器结构风荷分析[J]. 机械设计与制造,2014(3):259-261.
- [11] 胡燕平,董林林,赵尚红,等. 碟式太阳能镜面风荷系数的数值分析[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版),2013,28(2):20-26.