

# 多工况下经纬仪基座拓扑优化设计

吴迪<sup>1</sup>, 王冲<sup>1</sup>, 陈苡生<sup>1, 2</sup>, 王强龙<sup>1</sup>, 王晓明<sup>1</sup>

(1.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;

2.中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:**基座刚度对经纬仪垂直轴系晃动误差影响较大,垂直轴系晃动误差同时影响水平轴系误差以及光轴指向误差,进而影响经纬仪跟踪精度。经纬仪在跟踪过程中转台在基座上连续转动,光学系统的质量经过立柱传递到基座上的载荷位置不断变化,现有的圆周对称基座结构在三点支撑条件下,因为变形不均匀造成垂直轴系晃动误差较大。采用拓扑优化方法中的固体各向同性材料惩罚模型方法(SIMP),得到基座在综合考虑多种工况情况下的材料最佳分布。仿真分析对比现有基座结构和优化的基座结构的重量和最大轴向变形。拓扑优化产生的材料分布可以指导基座优化设计,改善极端工况下变形不一致情况,降低经纬仪垂直轴系晃动误差。

**关键词:**三点支撑;基座;多工况;拓扑优化

中图分类号: TH745

文献标志码:A

文章编号:1672-9870(2020)04-0063-04

## Topology Optimization Design of Theodolite Pedestal under Multiple Working Conditions

WU Di<sup>1</sup>, WANG Chong<sup>1</sup>, CHEN Yi-sheng<sup>1, 2</sup>, WANG Qiang-long<sup>1</sup>, WANG Xiao-ming<sup>1</sup>

(1.Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033;

2.Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

**Abstract:** The stiffness of the pedestal has great influence on the vibration error of the vertical axis system of theodolite. The jitter error of the vertical axis system affects the tracking accuracy of theodolite while affecting the horizontal axis system error and the optical axis pointing error at the same time. During the tracking process, the turntable rotates continuously on the pedestal. The load of the optical system passes continuously from the column to the pedestal. The existing symmetrical pedestal structure is supported by three points. Because of the uneven deformation, the shafting error of the vertical shafting is very large. In this paper, the method of penalty model of solid isotropic material (SIMP) in topology optimization is used to obtain the optimal material distribution of the pedestal under multiple conditions. The weight and the maximum axial deformation of the existing pedestal structure and the optimized pedestal structure are compared with the simulation analysis. The material distribution produced by topology optimization can guide the optimization design of the pedestal, improve the deformation inconsistency under extreme conditions, and reduce the shaking error of vertical axis system of theodolite.

**Key words:** three point support; pedestal; multiple load cases; topology optimization

收稿日期: 2019-04-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFF01011503); 吉林省科技厅项目(20190103015JH)

作者简介: 吴迪(1991-), 男, 硕士, 研究实习员, E-mail: 13578990590@163.com

现代靶场测控技术对光电经纬仪的跟踪精度和指向精度提出更高的要求,同时为了满足机动性要求<sup>[1]</sup>,光电经纬仪的设计不断向大口径、轻量化方向发展<sup>[2]</sup>。光电经纬仪的跟踪精度和指向精度主要取决于跟踪架的精度<sup>[3]</sup>,跟踪架包括基座、转台、四通等关键零件<sup>[4]</sup>。光学系统安装在带有四通的水平轴上,水平轴连同光学系统的载荷通过转台传递到基座上<sup>[5]</sup>。因此,基座承受光电经纬仪80%以上的载荷,基座的强度与刚度更是影响光电经纬仪精度指标的重要因素。随着基座的结构尺寸越来越大,重量越来越重,在三点调平的传统支撑条件下,基座变形不均匀现象越来越明显,这种情况直接从跟踪架精度检测过程中直接体现。本文将分析基座在转台转动条件下的受力情况并进行拓扑优化设计。

光电经纬仪工作过程中,基座局部各个点承受的载荷不是均匀的,并且随着转台的转动不断变化,在转台立柱周围所对应的区域,高于其他区域。基座承受的载荷是在局部分布且可以绕轴线变化,在三点支撑条件下,造成了基座轴向变形不同,针对这个问题,采用有限元方法及拓扑优化方法对基座进行评估及优化设计。使得转台在不同位置时,基座轴向变形趋于相同,提高跟踪架的测量精度。

## 1 基座有限元分析

基座安装在光电经纬仪底部且固定不动,为满足经纬仪调平功能,由三个支点支撑,如图1所示。基座上方承载转台、光学系统、控制电源等全部重力。简化整个模型并进行重力作用下的静载分析,有限元计算模型如图2所示。

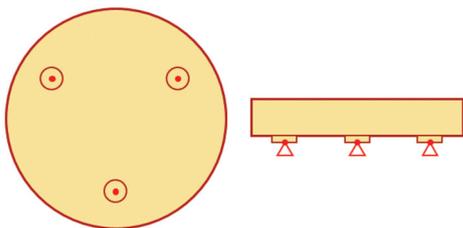


图1 三点支撑约束示意图

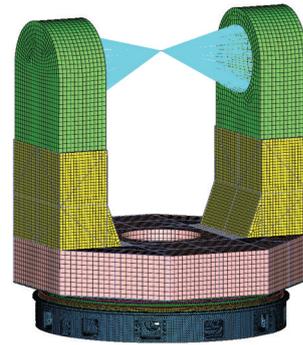


图2 有限元计算模型

经纬仪主要材料如表1所示,划分网格后单元总数470 653,节点总数195 026。将主系统简化为约5 000 Kg等效质量点施加到立柱上。完全约束三个支撑点,进行分析计算。

表1 经纬仪主要部件材料属性

零件	材料	密度/(Kg/m <sup>3</sup> )	弹性模量/10 <sup>11</sup> Pa	泊松比
立柱	HT300	7 300	1.43	0.27
转台	16Mn	7 870	2.12	0.31
轴承环	GCr15SiMn	7 820	2.16	0.3
基座	HT300	7 300	1.43	0.27

基座上外环半径约为800 mm、内环半径约为700 mm的环带为承载面,提取基座承载面的应力云图,选取转台旋转的三个角度,应力分布结果如图3所示。图中点划线为水平位置,选定为0°位置。三个三角形表示支撑点,两个长方形表示转台立柱所在的位置。图3(a)表示转台两立柱中心连线与水平夹角为0°,即转台立柱中心连线与水平线重合。图3(b)表示转台旋转15°,图3(c)表示转台旋转30°。可以看出,基座承载面的受力主要集中在每个立柱投影位置的两侧。不同旋转角度,有支撑点处和对应成180°无支撑点处压力分布不同,基座应力云图分布的差异,验证了基座所受载荷随转台的转动而变化。

## 2 基座优化分析

### 2.1 拓扑优化简介

拓扑优化是以连续体结构作为主要研究对象<sup>[6]</sup>,在给定边界的设计域内,通过寻求实体及孔洞的具体位置,获得最优的材料分布,以求达

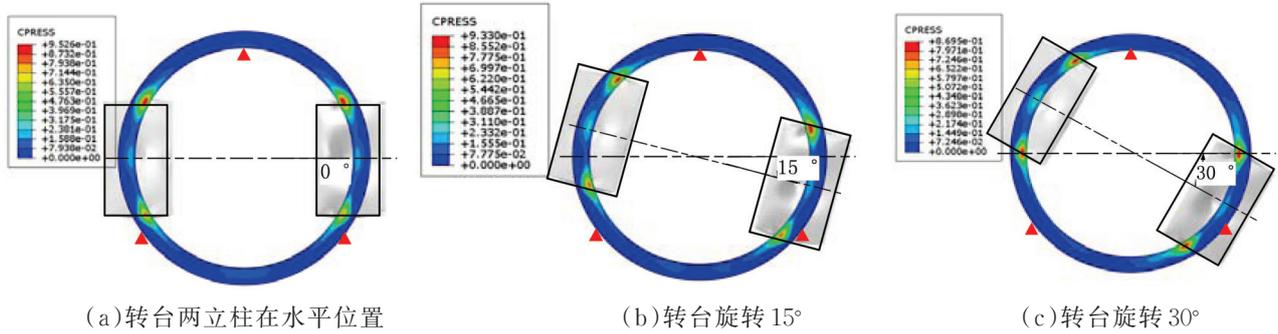


图3 基座端面接触压力分布云图

到最佳的目标性能<sup>[7]</sup>。由于该方法对于工程设计具有很强的指导意义及广阔的应用前景<sup>[8-9]</sup>, 在过去三十年逐渐受到了相关学者及工程设计人员的重视<sup>[10-11]</sup>, 一系列拓扑方法也随之产生, 当前主要有固体各向同性材料惩罚模型方法(SIMP: Solid Isotropic Material with Penalization)、渐进结构均匀化方法(ESO: Evolutionary Structure Optimization)、水平集方法(LSM: Level Set Method)等, 其中, SIMP方法提出时间较早, 应用也最为广泛<sup>[12-14]</sup>。本文采用SIMP方法对基座进行优化。

### 2.2 问题描述及优化列式

本文考虑的问题: 以三点调平机构所在位置为全约束点, 在接触压力的作用下, 获得基座在特定设计域内的最优结构布局。该问题不同于经典静力学问题的关键在于, 在转台处于不同方位角时, 接触压力各不相同, 由于仪器旋转速度很低, 因此可不考虑动态效应, 将该问题看作不同方位角下静态问题的叠加<sup>[15]</sup>。选取几个特定角度下的工况进行分析, 这样就将一个动态问题转化为多工况的静态优化问题。以单元密度作为设计变量, 结构柔度最小为目标, 优化列式<sup>[16]</sup>如下:

$$\begin{aligned} & \underset{\rho_e}{\text{minimize:}} && c(\rho_e) = \sum_{m=1}^M \omega_m f_m^T \cdot u_m \\ & \text{subjectto:} && \left( \sum_{e=1}^N \rho_e^p K_e \right) u_m = f_m, \quad m=1, \dots, M \\ & && \sum_{e=1}^N v_e \rho_e - \bar{V} \leq 0 \\ & && 0 < \rho_{\min} \leq \rho_e \leq 1, \quad e=1, \dots, N \end{aligned}$$

其中,  $\rho_e$  为单元密度;  $c$  表示结构柔度;  $\omega_m$  是第  $m$  种工况的目标权重系数;  $f_m$  是第  $m$  种工况下的外载向量;  $u_m$  表示第  $m$  种工况下的位移向量;  $p$  是密度惩罚系数, 通常取  $p=3$ ;  $K_e$  是实体材料的单元刚度矩阵;  $v_e$  表示单元体积;  $\bar{V}$  表示体积上限值。  $N$  表示单元个数;  $\rho_{\min}$  为密度下限值, 为了避免数值奇异性, 一般取  $\rho_{\min} = 10^{-3}$ 。

以体分比为 0.1 进行优化计算, 得到优化结果如图 4 所示。从优化后的结果可以看出, 结构具有高度对称性。可以清晰地看出基座在现有工况叠加作用下力的传递路径和受力大小区别, 对抵抗变形贡献越大的地方, 材料越多。在主要承力的支撑点及对应成 180° 无支撑点处同时得到加强。

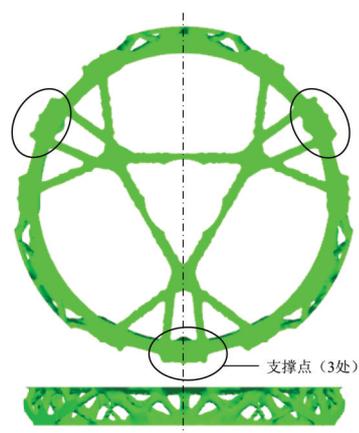


图4 拓扑优化结果

### 3 结果与讨论

现有的基座多为圆周对称结构, 对于转台两立柱下方一端有支撑, 一端无支撑的工况, 垂直轴系倾角最大。对现有基座和拓扑优化后的结

构赋予相同材料,施加相同载荷,进行相同工况仿真分析,得到二者变形云图,如图5所示。统计最大应力和最大变形等参数如表2所示。

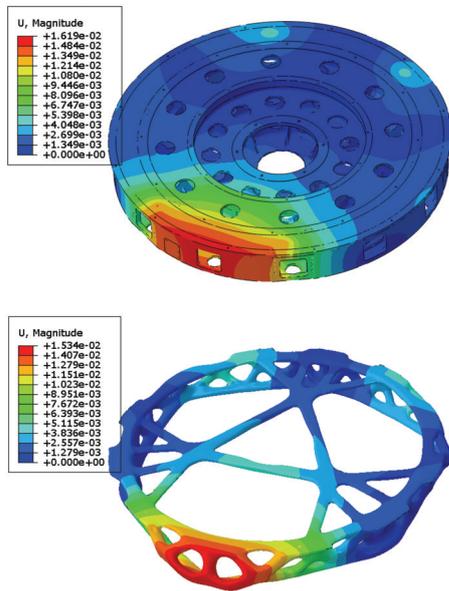


图5 优化前后基座轴向变形云图

表2 基座优化前后仿真分析结果对比

项目	重量/Kg	最大轴向变形/ $\mu\text{m}$	最大倾角/( $^{\circ}$ )
优化后基座	388	15.34	2.22
现有基座	560	16.19	2.35

优化后的基座质量是现有基座质量的69.3%,在现有基座基础上减重30.7%。变形以轴向变形为主,优化后基座变形量是现有基座变形量的94.7%,变形量降低5.3%。此基座支撑点所在直径为1400mm的圆周上,算得使用优化后基座的垂直轴系最大倾角是使用现有基座的94.4%,倾角减小5.6%。本文分析的工况是经纬仪工作过程中基座变形最大的极端情况,拓扑优化结果只是在基座变形相同这一种约束条件下得到的结果,基座的工程应用过程中还要考虑抗扭刚度、谐振频率、力矩电机的安装空间等其他约束条件。虽然拓扑优化的结构无法直接应用于经纬仪,但是优化结果清晰地展示了等位移约束条件下基座的受力情况,可以作为参考对现有基座进行改进。为设计人员提供现有工程结构的优化思路,将对拓扑优化理论的工程应用具有更大的实际意义。

## 4 结论

本文在转台分别于 $0^{\circ}$ 、 $15^{\circ}$ 、 $30^{\circ}$ 位置时,对基座进行静载荷有限元分析,提取承载面压力分布情况,发现随着转台的转动,基座轴向变形量不同。进而提取承载面分布力的大小和范围,以其作为载荷,对基座进行刚度最大为目标的多种角度工况共同作用下的拓扑优化设计。对比分析现有基座和优化后基座在相同载荷下的变形,并提取最大轴向变形计算经纬仪垂直轴系最大偏角。最终得出,经过拓扑优化得到的结构,重量减轻的同时,提高了基座的刚度,减小了经纬仪垂直轴系晃动误差。

## 参考文献

- [1] 江波,周泗忠,姜凯,等.车载经纬仪的垂轴误差分析[J].红外与激光工程,2015(5):1623-1627.
- [2] 谢军.基于接触和振动仿真的经纬仪结构设计及轻量化研究[D].长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2017.
- [3] 赵勇志,王文攀,段文.1.2m望远镜跟踪架结构设计与分析[J].长春理工大学学报(自然科学版),2019,42(1):64-67+82.
- [4] 杨立保,王晶,史国权.米级口径跟踪架的设计与模态分析[J].光电工程,2015(6):45-49.
- [5] 王涛,唐杰,宋立维.某经纬仪垂直轴系的优化设计[J].长春理工大学学报(自然科学版),2010,33(3):14-16.
- [6] 周克民.结构拓扑优化的一些基本概念和研究方法(1)[J].力学与实践,2018,40(3):245-252.
- [7] Guo X, Cheng G D. Recent development in structural design and optimization[J].Acta Mechanica Sinica,2010(26):807-823.
- [8] 朱维兵,杨阳,巫发茂,等.基于宽容分层序列法的机载控制台拓扑优化设计[J].机械设计,2018(7):52-56.
- [9] 张卫红,周莹,酒丽朋,等.特征驱动的结构拓扑优化方法[J].中国科学:技术科学,2019(10):1177-1185.

(下转第111页)

- [6] 邹利波,于存贵,郭昭蔚,等.线膛身管有限元网格参数化建模方法[J].国防科技大学学报,2019,41(3):77-82.
- [7] Jun Kawamura, Naohiko Tamaya. A finite element analysis of the effects of archwire size on orthodontic tooth movement in extraction space closure with miniscrew sliding mechanics [J]. Progress in Orthodontics, 2019, 20(1): 35-36.
- [8] He L, Lv J C. Efficient finite element numerical solution of the variable coefficient fractional sub-diffusion equation [J]. Advances in Difference Equations, 2019, 2019(1): 43-42.
- [9] 徐寅生,岳涛.基于有限元法的悬架系统振动传递函数研究[J].汽车实用技术,2018(15):124-126.
- [10] 武新峰,雷勇军,李家文.基于有限元分析的复杂结构弹性振动传递函数建模[J].振动与冲击, 2012, 31(11): 57-61+77.

---

(上接第66页)

- [10] 柳鸣,李丹妮,张国玉,等.基于拓扑优化技术的光电平台弹性轴优化设计[J].长春理工大学学报(自然科学版),2015,38(3):33-36.
- [11] 李英磊,曹宗杰.飞机结构拓扑优化方法研究[J].机械制造,2018(7):14-17.
- [12] Bendsoe M P. Optimal shape design as a material distribution problem [J]. Structural optimization, 1989, 1(4): 193-202.
- [13] Xie Y M, Steven G P. A simple evolutionary procedure for structural optimization [J]. Computers & Structures, 1993, 49(5): 885-896.
- [14] Allaire G, Jouve F, Toader A. Structural optimization using sensitivity analysis and a level-set method [J]. Journal of Computational Physics, 2004, 194(1): 363-393.
- [15] 王强龙,谢军,官鹏,等.基于动态柔度极小目标的光电跟踪设备拓扑优化方法研究[J].长春理工大学学报(自然科学版),2018,41(4):35-40.
- [16] Bendsoe M P, Sigmund O. Topology optimization: theory, methods, and applications [M]. Springer Science & Business Media, 2013.