

# 某经纬仪垂直轴系的优化设计

王涛<sup>1,2</sup>, 唐杰<sup>1</sup>, 宋立维<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:** 垂直轴系是经纬仪的基础和主要承载部件, 它的强度、刚度和固有频率直接影响着经纬仪的精度、稳定性和跟踪性能。传统的经纬仪结构设计一般是在保刚度的前提下, 参照以往相似类型进行经验设计, 这种设计往往不是最佳设计, 都有改进、优化的余地。针对这种情况, 对经纬仪垂直轴系进行建模和有限元分析, 得到了垂直轴系的位移、应力和固有频率。基于轻量化的考虑, 对垂直轴系的主要承载件转台和垂直轴进行了优化设计, 在满足刚度等要求的前提下, 减轻了垂直轴系的重量。

**关键词:** 垂直轴系; 光电经纬仪; 有限元分析; 优化设计

中图分类号: TH745.2

文献标识码: A

文章编号: 1672 - 9870 (2010) 03 - 0014 - 03

## Optimization Design of Theodolite's Vertical Shaft

WANG Tao<sup>1,2</sup>, TANG Jie<sup>1</sup>, SONG Liwei<sup>1</sup>

(1.Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033;  
2.Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

**Abstract:** The vertical shaft is the basis and the main bearing components of theodolite, and its strength, stiffness and natural frequency of a direct impact on the accuracy of theodolite, stability and tracking performance. Structural design of the traditional theodolite is generally under the premise of stiffness in Bulgaria, taking into account the past experience of similar type design, which is often not the best design, there are improvements, optimized room. In view of this situation, the vertical shaft of the theodolite modeling and finite element analysis, has been the vertical shaft of the displacement, stress and natural frequency. Considerations based on lightweight, vertical shaft carrying pieces of the casting are also the main base of the turntable and the optimized design, to meet the stiffness requirements under the premise of reducing the weight of the vertical shaft.

**Key words:** vertical shaft; optical theodolite; finite element analysis; optimization design

现代光电经纬仪具有实时测量、高精度、自动跟踪监控和易于图像再现等优点, 广泛应用于航空、航天、武器试验、大地测量等科研和军事领域<sup>[1]</sup>。垂直轴系是光电经纬仪的基础和主要承载部件, 它形成了经纬仪的方位旋转轴线, 实现方位角测量、跟踪驱动和方位角位置反馈功能。垂直轴系的强度、刚度和固有频率直接影响着经纬仪的精度、稳定性和跟踪性能。传统的垂直轴系的结构设计往往是参照相似类型, 在保刚度的前提下进行估算和经验类比, 同时为了保证安全通常设计较大的安全系数。这种设计结果不仅增加了制造成本而且影响经

纬仪的机动性能, 已经不适应现代靶场机动、灵活布站的形式。

随着计算机技术的发展, 优化设计作为一种现代化设计理论已广泛应用于各个工业部门。优化设计是将优化原理和计算机技术结合应用于设计领域, 为工程设计提供一种重要的科学设计方法, 利用这种方法可以从众多的设计方案中找出最佳设计方案, 从而大大提高设计效率和质量。本文针对某成熟型号经纬仪的垂直轴系进行了有限元分析, 同时针对其主要承载铸件进行了优化设计, 在满足性能的前提下对垂直轴系进行了轻量化处理。

### 1 垂直轴系的有限元分析

有限元法的基本思想是将物体（即连续的求解域）离散成有限个且按一定方式互相联结在一起的单元的组合，来模拟或逼近原来的物体，从而将一个连续的无限自由度问题简化为离散的有限自由度问题求解的一种数值分析法。物体被离散后，通过对其中各个单元进行单元分析，最终得到对整个物体的分析<sup>[2]</sup>。

本文选取某成熟型号经纬仪的垂直轴系进行有限元分析。该垂直轴系是典型的地平式 U 型架结构，主要由调平机构、顶起机构、抗扭薄膜组件、基座、转台、电器机箱、止推轴承、径向轴承、力矩电机、编码器和垂直轴组成。在分析前首先进行三维建模和结构简化工作，建模时忽略非承载小孔、凸台及转折面，对螺钉孔、小倒角等进行忽略，同时略去对分析结果影响很小的密封盖板、机箱、编码器和承载圈等零部件。

完成建模工作后对简化的模型设置各零件的材料属性<sup>[3]</sup>，主要包括弹性模量、泊松比和密度。各主要零件的材料属性见表 1。

表 1 主要零件的材料属性

Tab.1 Material properties of the main parts

零件	材料	弹性模量 GPa	泊松比	密度 Kg/m <sup>3</sup>
基座	HT250	1.23×10 <sup>11</sup>	0.3	7000
转台	ZL24	1.03×10 <sup>11</sup>	0.3	2700
垂直轴	40Cr	2×10 <sup>11</sup>	0.3	7900
止推轴承环	GCr15SiMn	2.06×10 <sup>11</sup>	0.3	7900

设置材料属性后按照零件的工作状态进行约束，各零件均以静载荷分析<sup>[4]</sup>，除重力外还模拟头部质量在转台的上端面施加 3000N 的工作载荷。分析前处理工作结束后对垂直轴系进行了网格划分<sup>[5]</sup>，共划分节点 170687 个，单元 90435 个。划分网格后的垂直轴系模型见图 1。

对网格后的垂直轴系模型进行有限元分析<sup>[5]</sup>，主要计算其位移变形和谐振频率。经计算，垂直轴系的一阶谐振频率为 137.24Hz，其位移变形云图如图 2 所示。

由分析结果可知，该垂直轴系的位移和谐振频率都满足经纬仪的使用要求且具有一定的优化空间。

### 2 垂直轴系的优化设计

由于垂直轴系的结构比较复杂，所以本文选取

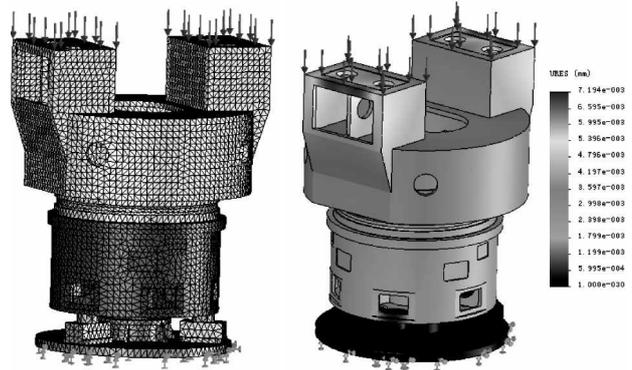


图 1 网格后的垂直轴系模型

图 2 位移变形云图

Fig.1 The grid model of the vertical shaft

Fig.2 Displacement deformation cloud

对整机重量影响较大的铸件转台和主要抗倾覆零件垂直轴进行优化设计<sup>[6]</sup>。

转台的优化设计<sup>[7]</sup>主要选取承重墙和筋的壁厚作为设计变量，以降低零件重量作为目标函数，以位移变形、许用应力以及设计变量的允许变化范围作为约束条件，建立数学模型如下。

$$\text{求 } x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_{10}]^T \text{ 使转台的质量:}$$

$$f(x) \rightarrow \min$$

且满足约束条件:

$$h_k(x) \leq 0.01 \text{ mm}$$

$$\sigma(x) \leq [\sigma]$$

$$10 \leq X_1 \leq 20$$

$$10 \leq X_2 \leq 20$$

$$6 \leq X_3 \leq 18$$

$$40 \leq X_4 \leq 120$$

$$10 \leq X_5 \leq 20$$

$$10 \leq X_6 \leq 20$$

$$10 \leq X_7 \leq 20$$

$$10 \leq X_8 \leq 20$$

$$5 \leq X_9 \leq 15$$

$$5 \leq X_{10} \leq 15$$

转台的设计变量见 3 所示。

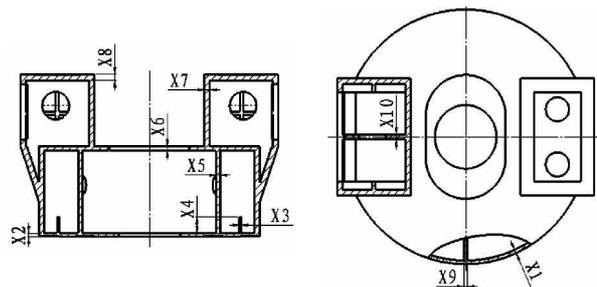


图 3 转台的设计变量

Fig.3 Design variables of turntable

经过 68 次迭代后计算出满足条件的设计变量。  
优化后的设计变量结果见表 (优化结果圆整)。

表 2 优化后的设计变量结果 (mm)  
Tab.2 The results of the optimized design of variables

X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>
10.5	10.5	6.5	47	12	11	16	17.5	10.5	15

优化后的转台质量减轻了 26.7%，从 117.52Kg 减至 86.083Kg。优化后一阶谐振频率为 509.35 Hz，最大位移为 7.34μm，最大应力为 3.486MPa。优化后的转台位移和应力分布云图见图 4。

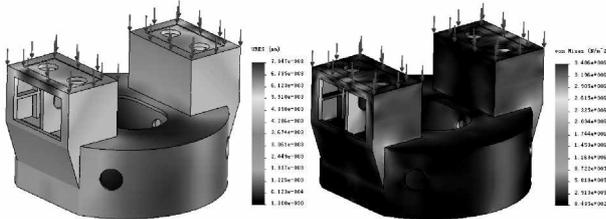


图 4 优化后的转台位移和应力分布  
Fig.4 Displacement and stress distribution of optimized turntable

垂直轴的优化设计主要选取非接口壁厚作为设计变量，建立数学模型如下。

求  $x = [x_1 \quad x_2]^T$  使垂直轴的质量：

$$f(x) \min$$

且满足约束条件：

$$h_i(x) \leq 0.004\text{mm}$$

$$\sigma(x) \leq [\sigma]$$

$$10 \leq X_1 \leq 20$$

$$6 \leq X_2 \leq 25$$

底座的设计变量尺寸见图 5 所示。

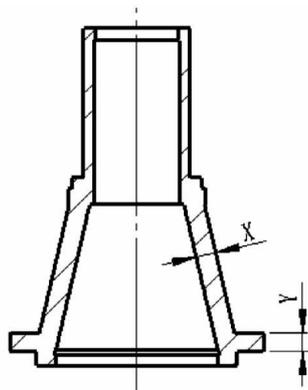


图 5 底座的设计变量  
Fig.5 Design variables of vertical

经过 11 次迭代后计算出满足条件的设计变量。  
优化后 X=10.9mm，Y=8mm (优化结果圆整)。

优化后的垂直轴的质量减轻了 23.9%。从 12.47Kg 降至 9.48Kg。优化后的垂直轴的位移和应力分布云图见图 6。

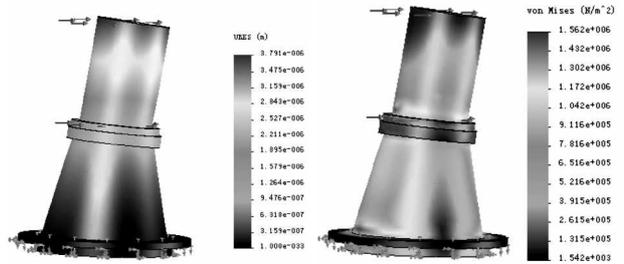


图 6 优化后的垂直轴位移和应力分布云图  
Fig.6 Displacement and stress distribution of optimized vertical

将优化后的零件模型更新至垂直轴系后进行整体分析，最大位移变形为 7.85μm，一阶谐振频率为 117.7Hz，与优化前的分析结果差别不大，但垂直轴系的重量减轻了 40.43Kg，达到了轻量化的目的。

### 3 结论

将优化设计理论融入垂直轴系的结构设计中，使得设计可以在边界条件内获得最佳设计结果，为以后设计和改进经纬仪垂直轴系的结构提供了可靠依据，减少了传统设计的盲目性，增加了科学依据。

#### 参考文献

- [1] 赵学颜,李迎春.靶场光学测量[J].装备指挥技术学院, 2000 4- 35.
- [2] 张洪信,赵清海.ANSYS 有限元分析完全自学手册[M].机械工业出版社,2008 2- 12.
- [3] 徐灏.机械设计手册(第二版)[M].机械工业出版社, 2003.
- [4] 类成华,王守印,李延伟.某经纬仪垂直轴系刚度分析[J].计算机仿真,2008 25(4) 313- 316.
- [5] 杜平安.有限元网格划分的基本原则[J].机械设计与制造,2000 12(1) 26- 27.
- [6] 梁文科,刘顺发,徐征峰.光电跟踪系统整机结构力学分析[J].机械制造,2007 45(518) :12- 14.
- [7] 孙靖民,梁迎春.机械优化设计[M].机械工业出版社, 2008 :1- 3.
- [8] 后建敏,卓仁善,苏宁.基于有限元法的光电经纬仪主镜轻量化设计[J].长春理工大学学报,2008 31(4) :77- 80.