

# 新型光学动态靶标结构刚度有限元分析

李 博<sup>1,2</sup>, 王伟娜<sup>3</sup>, 唐 杰<sup>1</sup>

LI Bo<sup>1,2</sup>, WANG Wei-na<sup>3</sup>, TANG Jie<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

3. 河南交通职业技术学院, 郑州 450052

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

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

3. Henan Communication Vocational Technology College, Zhengzhou 450052, China

E-mail: widely2005@163.com

LI Bo, WANG Wei-na, TANG Jie. Finite element stiffness analysis of novel optical dynamic target's structure. *Computer Engineering and Applications*, 2008, 44(14): 100-102.

**Abstract:** A novel optical dynamic target is devised to satisfy the need of indoor examination of photoelectric theodolite, and its merits and structure are also discussed. Three-dimensional entity model of novel target based on material mechanics is built on the platform of UG and the finite element model is built by the software named NX Nastran. According to the finite element stiffness analysis, the target's deformation figures are acquired and the accuracy of the whole target can be computed. The experimental result shows the novel optical dynamic target has reasonable structure and good stiffness. In addition, the target's error of elevation is 3.18", and error of azimuth angle is 2.98". It can measure dynamic movement performance accurately.

**Key words:** dynamic target; measure; finite element; stiffness

**摘 要:** 为了更好的对光电经纬仪进行室内检测, 提出了一种新型光学动态靶标, 并对其优点和结构进行分析。基于材料力学原理建立靶标三维实体造型, 以有限元分析软件 NX Nastran 为辅助工具, 对新型动态靶标的结构刚度进行分析, 得出各个部件在靶标工作过程中的变形量, 并计算靶标整体精度。结果表明, 新型靶标结构形式合理、刚度良好, 其俯仰角误差 3.18"、方位角误差 2.98", 能够初步满足光电经纬仪动态测角性能检测的需要。

**关键词:** 动态靶标; 检测; 有限元; 刚度

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2008.14.028 文章编号: 1002-8331(2008)14-0100-03 文献标识码: A 中图分类号: TP391.9

## 1 引言

光学动态靶标能够为待检光电经纬仪提供静态和动态模拟试验手段, 是一种在室内检测经纬仪的重要装置, 也是光电跟踪测量设备出厂验收时不可缺少的检测装置。人们利用光学动态靶标创建的各种试验条件, 来进行模拟仿真试验, 检验光电经纬仪各方面的性能指标, 其实现和模拟真实目标的效果, 直接影响设备的总体性能<sup>[1]</sup>。由于光学动态靶标的重要功用, 长期以来, 从事光电测量设备研制和检测的研究人员一直都在寻找提高其精度的理论和方法<sup>[2,3]</sup>。

现在常用的空间目标模拟装置是传统的旋转动态靶标, 但是它模拟目标运动轨迹单一固定、模拟目标区域有限、运动方向不可随意改变等缺点, 一直无法得到彻底改正, 特别是它无法对光电经纬仪的动态测角精度进行测定。为此, 本文在提出新型光学动态靶标基本结构基础上, 利用有限元法, 对新型动态靶标的结构刚度进行分析, 并初步确定了该靶标的测

量精度, 所得仿真数据及计算结果表明, 此种靶标结构能够初步满足对某些型号光电经纬仪的检测要求。

## 2 新型光学动态靶标结构分析

### 2.1 结构及工作原理

新型光学动态靶标由内、外框架、支架、编码器、三个驱动电机(DJ-1、DJ-2、DJ-3)、导电环、平行光管(模拟目标光源)、伺服控制系统和时间统一系统等组成(如图1所示)。

新型靶标整体采用吊挂式双层框架结构, 其中外框架(WK)为倒U形结构, 悬挂于支架上, 并且由安装于机架上的驱动电机DJ-3控制做旋转运动; 内框架(NK)为U形结构, 内框架的两侧端部与外框架下部通过转轴相连接, 内框架的驱动电机DJ-1、DJ-2也固定安装于外框架上, 分置两侧; 平行光管安装于内框架上, 随内框架一起做方位旋转运动, 使平行光管的中心轴与框架水平轴和垂直轴的交点重合; 而被检光电

**作者简介:** 李博(1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究领域为光学仪器机械结构设计; 王伟娜(1980-), 女, 硕士, 助教, 主要研究领域为计算机仿真及分布式数据库; 唐杰(1964-), 男, 研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为光学仪器结构设计。

收稿日期: 2007-09-05 修回日期: 2007-12-17

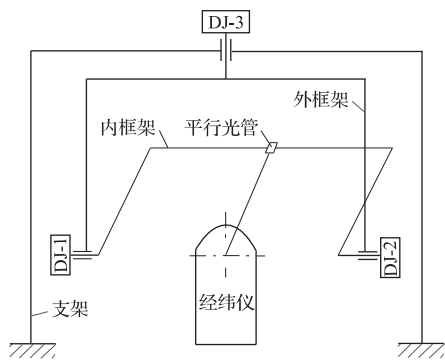


图1 新型靶标结构示意图

经纬仪的水平轴与垂直轴的交点应与靶标框架交点重合,在框架的水平轴与垂直轴处分别设有角度传感器,给出模拟无穷远目标的空间角位置。

靶标工作时,安装在内框架上的平行光管形成无穷远目标,投向光电经纬仪的跟踪测量系统。在进行检测前,为保证空间光学模拟目标能够进入光电跟踪系统的视场,首先应保证平行光管与经纬仪视准轴的对心,由于新型靶标的结构优越性,只需保证模拟空间目标能够在经纬仪跟踪系统中成像就可,所以当平行光管中心轴和光电经纬仪视准轴中心出现偏差时,并不妨碍检测的正常进行,而且此时经由新型靶标所测得数据可以认为是完全有效的。

进行跟踪性能检测时,三个驱动电机共同作用可以使空间模拟目标做方位与俯仰运动,与电机同轴安装的角度传感器可以实时给出模拟目标的空间角位置,并与光电经纬仪测得模拟目标空间角位置同步比对后,得到经纬仪跟踪精度与测量精度。

## 2.2 优点分析

新型光緒动态靶标的结构特点和全新的设计思路决定了它拥有传统靶标所无法比拟的优点:

(1) 新型光学动态靶标目标在检测地平式经纬仪时,模拟的空域是全方位的,通过轴系的复合运动,目标模拟空域可以覆盖地平线以上的整个半球。

(2) 新型光学动态靶标的水平轴与垂直轴的交点与被检光电经纬仪的水平轴与垂直轴的交点重合,即二者的运动坐标系是一致的,所以靶标的角度传感器可以直接显示出模拟目标空间的具体位置,而无需再经过任何坐标变换,减小不必要的计算误差。

(3) 新型靶标模拟目标点的运动状态由水平轴与垂直轴的复合运动产生,并且俯仰运动和方位运动可以分别控制,因此其速度与加速度的匹配更接近真实情况,它能更全面地模拟空间目标的运动状态。

(4) 当新型动态靶标的精度足够高时,在靶标的控制系统与光电经纬仪的控制系统间加入时间统一系统,可直接获得经纬仪的动态测角误差,同时也可间接获得不同状态下经纬仪上不同传感器的输出滞后量。这也是新型靶标最为显著、最为实用的特点。

## 3 靶标结构部件初步设计

### 3.1 结构初定

新型光学动态靶标的结构部件主要有内框架(NK)、外框

架(WK)和支架(ZJ)三部分,如图2所示,即为省去电机后靶标三维造型装配图。

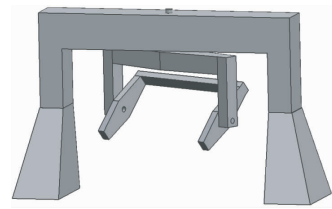


图2 靶标三维实体造型

### 3.2 材料选择

根据各部件在靶标整体精度中的决定作用,以及部件自身变形对靶标整体刚度的影响,选用不同材料,列入表1。

表1 部件材料属性表

部件名称	选用材料	弹性模量 E/Mpa	泊松比 $\mu$	密度 $\rho$ / (kg/mm <sup>3</sup> )
内框架(NK)	铝合金 5086	72 000	0.30	2.66e-006
外框架(WK)	35 钢	207 000	0.30	7.83e-006
支架(ZJ)	HT300	140 000	0.25	7.15e-006

## 4 仿真分析

### 4.1 分析流程

利用UG NX4.0在三维实体造型上面的强大功能,构建出各个部件的实体造型,并将部件细节进行合理简化,如忽略小倒角、小圆角、小孔等,这样可使节点和单元总数减少许多,提高计算速度;然后利用NX Nastran进行三维网格划分,网格划分过程中应重视网格单元参数的选择,尽量使单元大小均匀、疏密合适,保证有限元网格的协调性要求和拓扑一致性。因为结构比较均匀,没有明显过薄之处,为提高仿真分析精度,采用十节点四面体网格。熟知NX Nastran软件的人都知道,在利用其分析单个部件时能够简单准确的对部件施加约束及载荷,并且与部件实际工作状况的贴合度很高,但同时分析多个部件时,则较为复杂,因此,对内、外框架及支架逐个进行分析,最后进行靶标整体刚度和精度的评判。

### 4.2 仿真结果

#### 4.2.1 内框架(NK)

内框架结构采用“回”形截面,壁厚10 mm~14 mm,其有限元网格如图3,以NK-1、NK-2、NK-3表示内框架三段结构;旋转轴线距离NK-3内侧660 mm,NK-3跨度2 100 mm(文中所涉及的靶标结构参数,都是针对某型号光电经纬仪所进行的设计)。

根据内框架结构特点,采用十节点四面体单元,电机DJ-1、DJ-2刚度较大,可将其视为刚体处理,与内框架固定连接;所加约束在与外框架的连接处,约束5个自由度,仅剩下一个内框架的旋转自由度;所受载荷为重力、旋转引起的离心力,以及加速旋转所产生的惯性力;划分节点总数为18 095个,单元总数为9 096个,如图3所示。图4为内框架工作时处于0°位置时的位移变形。

#### 4.2.2 外框架(WK)

外框架结构采用“回”形截面,壁厚20 mm~25 mm,以WK-1、WK-2、WK-3代表外框架三段结构;框架内侧距离WK-1、WK-2上轴孔中心线800 mm,WK-3跨度2 350 mm。

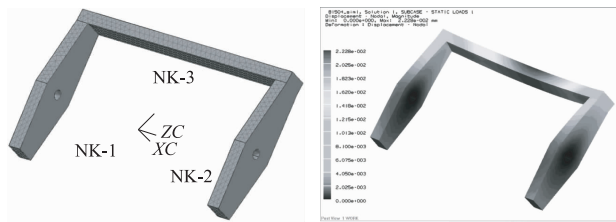


图3 内框架有限元网格

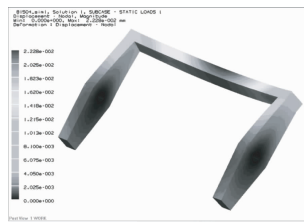


图4 内框架处于0°(水平位置)时位移变形云图

单元类型采用十节点四面体单元,与之相连的电机 DJ-3 固定联结在支架上,可视为刚体;约束施加于两处:与支架连接处,约束 5 个自由度,剩下外框架的旋转自由度;与内框架连接处,增加一个水平运动约束;外框架所承载荷有:自身重力、下部支撑内框架重力所受的反作用力、旋转引起的离心力,以及加速旋转所产生的惯性力;部件共划分 10 353 个节点,5 200 个单元,如图 5 所示。图 6 所示为外框架工作仿真结果图。

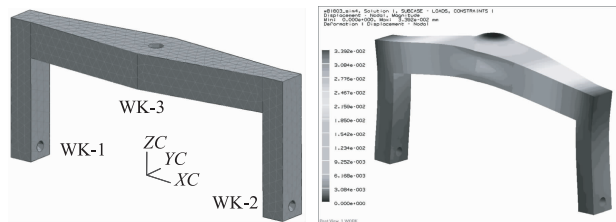


图5 外框架有限元网格

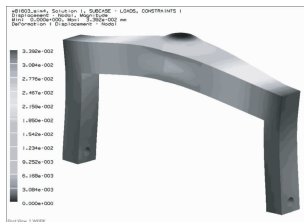


图6 外框架工作中位移变形云图

#### 4.2.3 支架(ZJ)

支架结构采用铸造中空截面,壁厚 25 mm ~ 30 mm,以 ZJ-1、ZJ-2、ZJ-3 代表外框架三段结构;支架内侧跨度 2 980 mm,内侧距支架底部平面 2 480 mm。单元类型采用十节点四面体单元;约束施加于底部平面、与地基接触的 6 个自由度全部固定;所承载荷为自身重力、内外框架和电机对其中部的压力;整体共划分节点 4 120 个,单元 2 077 个,如图 7 所示。仿真结果如图 8。

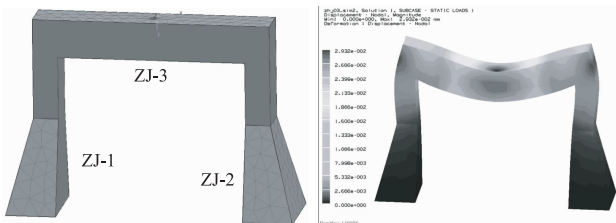


图7 支架有限元网格

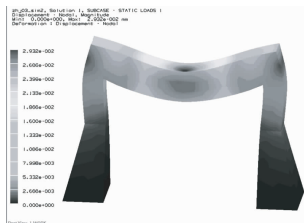


图8 支架工作中位移变形云图

### 5 靶标精度计算

根据靶标结构自身特点,对影响靶标结构中可能影响精度的变形逐个分析。

#### 5.1 内框架(NK)

新型动态光学靶标针对地平式光电经纬仪设计,而这种经纬仪的最大缺点是在天顶角 15° 附近有个天顶跟踪盲区<sup>[4]</sup>,故此在对它进行室内调校时,主要在其的工作俯仰角范围内(0° ~ 65°)进行各种性能的检测,所以内框架俯仰角的有效范围即为:0° ~ 65°。

由于自重的影响,内框架在进行俯仰运动时,在各个位置由重力引起的变形是不同的。根据以往工程上的设计经验<sup>[5]</sup>

及对内框架各个位置的仿真分析结果可知:由于框架跨度较大,在安装平行光管及配重后,靶标内框架自重引起的变形是影响动态靶标总体精度的主要误差源之一。

再者,由仿真云图可知,内框架的变形主要集中在三个位置: NK-1 与 NK-3 结合处、NK-2 与 NK-3 结合处、NK-3 中部(安装平行光管处)。NK-3 所受重力影响,无论内框架处于什么位置,其必然有竖直向下沿重力方向的变形,而这个变形使得安装在其上的平行光管在随其运动中始终产生竖直向下的平动,但是对与光电经纬仪来说,平行光管发出的光进入主镜筒时,只要不产生角度变化,就不影响经纬仪对模拟目标的跟踪和测量,也就是说,平行光管的平动不会对靶标精度产生影响。

根据内框架在各个位置的变形云图,测得内框架肩部(即 NK-1 与 NK-3 结合处、NK-2 与 NK-3 结合处)的变形量如表 2 所示。由表可知,内框架处于水平位置时肩部变形最大为: 3.783 e-003 mm。

表2 内框架处于不同角度时的肩部变形量

俯仰角度/°	0	15	30	45	60	65
肩部变(×10 <sup>-3</sup> mm)	3.783	3.663	3.312	2.757	2.062	1.820

依照内框架实际情况中的工作状态,可将内框架肩部变形近似看成悬臂梁受力<sup>[6]</sup>:

悬臂梁在受端部集中载荷力时,端截面转角为: $\theta = Pl^2 / 2EI$ ,端部最大挠度为  $f = Pl^3 / 3EI$ ,故此有: $\theta = 3f / 2l$ 。其中: $P$  是端部集中载荷; $l$  是悬臂梁长度; $E$  是材料弹性模量; $I$  是惯性矩。

根据端面转角和端部最大挠度的关系,可以计算靶标俯仰角最大误差:

$$\sigma' = (0.003783 \times 3) / (2 \times 660) \times (180 / \pi) \times 3600 = 1.77''$$

根据工程中靶标设计的经验值,内、外框架联结处轴系晃动误差以 2'' 计,外框架与支架联结处轴系晃动误差以 1'' 计,平行光管安装误差以 1'' 计,角度传感器误差以 1'' 计,用均方根合成靶标俯仰角总误差为:

$$\sigma_E = \sqrt{1.77^2 + 2^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2} = 3.18''$$

#### 5.2 外框架(WK)

外框架 WK-1 与 WK-2 下部轴孔支撑内框架及两个驱动电机(DJ-1、DJ-2)的重力,和内框架成为一个整体进行水平旋转;由仿真结果可知,外框架的变形主要有:水平横梁 WK-3 弯曲变形,WK-1 与 WK-2 少量弯曲及下部拉伸变形。WK-3 的弯曲变形以及 WK-1 与 WK-2 下部的拉伸变形,都会引起内框架上平行光管的竖直平动,以上分析已经表明这种平动始终不会影响靶标方位角的测量精度,但是在确定靶标外框架安装位置时,需将此变形考虑在内。

影响靶标方位角精度的是 WK-1 与 WK-2 下端与内框架连接处的弯曲变形,由仿真云图测得两处变形均为 6.909 e-003 mm,依照外框架实际情况中的工作状态,可求其方位角误差为:

$$\arctan(0.007 / 1050) \times 3600 = 1.38''$$

同样利用工程中靶标设计的经验值,用均方根合成靶标方位角总误差:

$$\sigma_A = \sqrt{1.38^2 + 2^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2} = 2.98''$$