

文章编号 1004-924X(2017)03-0632-09

KDP 晶体支撑系统工作姿态确定

苏瑞峰, 陈晓娟*, 朱明智, 吴文凯, 黄 湛, 汪宝旭
(中国工程物理研究院 总体工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 为了确定一个 KDP 晶体支撑系统的合理工作姿态, 研究了工作姿态对支撑系统变形、KDP 晶体偏转和激光束入射角的影响。首先, 提出了关键刚度分量的概念, 并采用这一概念对不同工作姿态时支撑系统在重力作用下的变形进行了理论分析。其次, 采用有限元方法计算了重力作用下支撑系统的变形, 以及由此引起 KDP 晶体的偏转和激光束入射角的变化。最后, 对不同工作姿态时支撑系统的变形、KDP 晶体的偏转和激光束入射角的变化进行比较, 并分析了关键刚度分量的影响。数值计算结果表明, 受关键刚度分量的影响, 不同工作姿态下支撑系统的变形、引起 KDP 晶体的偏转和激光束入射角的变化不同。支撑系统为最优工作姿态时, 激光束入射角的变化达到最小值 $76 \mu\text{rad}$ 。这一结果满足 KDP 晶体支撑系工作姿态确定的相关要求。

关键词: 惯性约束聚变; KDP 晶体; 支撑系统; 工作姿态; 关键刚度分量; 变形

中图分类号: TL632.1; TH122 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172503.0632

Ascertainment of operating posture of KDP crystal supporting system

SU Rui-feng, CHEN Xiao-juan*, ZHU Ming-zhi, WU Wen-kai, HUANG Zhan, WANG Bao-xu

(*Institute of Systems Engineering, China Academy of
Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

* *Corresponding author, E-mail: chenxj@caep.ac.cn*

Abstract: With the aim to investigate optimum operating postures of the supporting system of a KDP crystal, the influence of operating posture on the gravity-induced distortion of the supporting system, as well as the deflection of the KDP crystal and the incident angle change of the laser beam due to the distortion were studied. A concept of key stiffness component was proposed to theoretically analyze the gravity-induced distortion of the supporting system on the occasion of various operating postures. Using the finite element method, the gravity-induced distortions of the supporting system with different operating postures, the induced deflection of the KDP crystal and the incident angle change of the laser beam were calculated and then compared, thus the influence of the key stiffness components were figured out. The numerical results show that under the function of the key stiffness components, the distortion of the supporting system, the deflection of the KDP crystal and the induced incident angle change vary with the operating postures, and the minimum incident angle change is $76 \mu\text{rad}$ when the supporting system operates under the optimum operating posture. Hence, the optimum result meets the requirement for ascertainment of the operating posture of KDP crystal supporting systems.

收稿日期: 2016-10-10; **修订日期:** 2016-11-25.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2007AA804217)

Key words: Inertial Confinement Fusion(ICF); KDP crystal; supporting system; operating posture; key stiffness component; deformation

1 引言

为了实现惯性约束聚变,世界各国建立了众多大型固体激光装置,如美国的“国家点火装置”(National Ignition Facility, NIF)^[1]和中国的神光III装置^[2]。这些装置将多束高能激光束汇聚至靶点,实现聚变点火。每束光路中都安装一块大口径KDP晶体,以实现激光束的频率转换^[3]。每块KDP晶体都具有相应的支撑系统,支撑系统为一个复杂的光机结构,由多个零部件组成。重力作用下,支撑系统发生变形,引起KDP晶体偏转和激光束入射角的变化,最终导致激光束的频率转换效率下降。因此,需要对KDP晶体变形和支撑系统变形两个方面进行研究。在KDP晶体变形方面,早期的研究主要关注重力作用下KDP晶体的弹性变形。KDP晶体由一个夹持框夹持安装至支撑系统内部,夹持框的结构形式及夹持方式都对KDP晶体的弹性变形有较大影响^[4-5]。同时,受加工精度所限,KDP晶体和夹持框的加工误差导致二者的表面起伏不平,这对KDP晶体的弹性变形产生不利影响^[6-7]。在KDP晶体支撑系统变形研究方面,主要关注支撑系统的结构稳定性,通过对关键零部件进行结构设计、选择合理的结构参数,能够达到提高支撑系统刚度的目的^[8-9]。

目前,光学元件广泛应用于望远镜和空间相机等科学仪器,这些光学元件及其支撑系统同样面临重力等载荷作用下的变形问题,一般通过提高支撑系统刚度的方式来解决,相关研究可为KDP晶体支撑系统研制提供参考。光学元件支撑系统是一个复杂的光机结构,包含多个零部件,不同零部件对整体刚度的影响程度不同,合理分配零部件的刚度可有效提高支撑系统的整体刚度^[10-11]。另外,支撑系统合理的布局和形式^[12-14]、合适的光学元件支撑方案^[15-16]和合理分配支撑系统质量^[17]等整体结构设计也有助于提高支撑系统的刚度。对支撑系统内部关键零部件进行合理的结构设计,如选择合适的材料^[18-19]、设计合理的结构形式^[20]和结构参数^[21]等可以提高零部件自身的刚度,进而达到提高支撑系统整

体刚度的目的。不过,一些特殊的结构或工况中,只需提高支撑系统某个方向的刚度即可,因此有针对性地设计可以在提高支撑系统刚度的同时,减小设计难度^[22-24]。

由于早期研究忽略了由支撑系统变形引起的KDP晶体刚体位移,而KDP晶体支撑系统具有多种工作姿态,不同工作姿态下支撑系统的变形不同,引起KDP晶体的刚体位移也不同,因此只研究整体刚度的影响已不能满足分析所需。本文提出一种关键刚度分量的概念,并将这一概念应用到KDP晶体支撑系统工作姿态确定的研究中。首先,基于关键刚度分量的概念对重力作用下支撑系统的变形进行了理论分析。其次,采用有限元方法分析了重力作用下支撑系统的变形,以及由此引起KDP晶体的偏转和激光束入射角的变化。最后,分别计算了不同工作姿态时支撑系统的变形、KDP晶体的偏转和激光束入射角的变化,并采用关键刚度分量的概念对计算结果进行了分析。理论分析及数值计算结果表明,关键刚度分量是影响KDP晶体支撑系统变形的重要因素,根据关键刚度分量可以确定KDP晶体支撑系统的工作姿态。

2 KDP晶体支撑系统

2.1 结构和功能

本文所研究的支撑系统主要用于支撑一块KDP晶体。KDP晶体在使用中有安装、定位和姿态调整等指标要求,支撑系统的结构主要根据这些指标来设计。支撑系统主要包括夹持框、安装框、调整框、基础框和基座等框架结构以及两个驱动组件和两个旋转轴系,如图1所示。KDP晶体由夹持框进行固定夹持,再安装至安装框,实现KDP晶体的安装要求。安装框与调整框固定连接,调整框与基础框以及基础框与基座均通过轴系连接,基座与固体激光装置的整体结构固定连接,保证上述各个框架的位置固定,以此实现KDP晶体的定位要求。两个驱动组件分别与基础框和调整框连接,驱动两个框架围绕相应的轴系转动,进而带动夹持框和KDP晶体转动,以此实现KDP晶体的姿态调整。

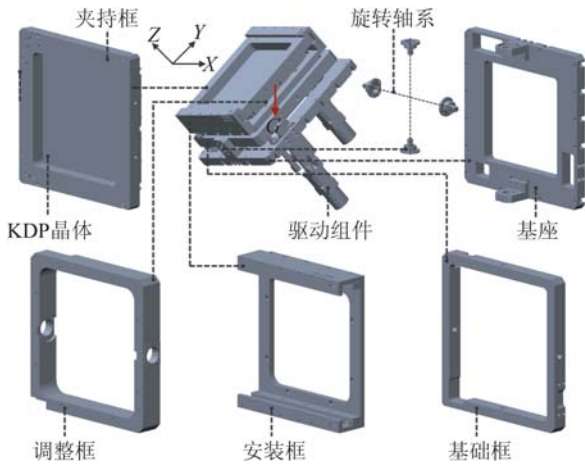


图 1 KDP 晶体支撑系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of supporting system for KDP crystal

2.2 工作姿态

激光束沿 $-Z$ 方向传播, 垂直入射至 KDP 晶

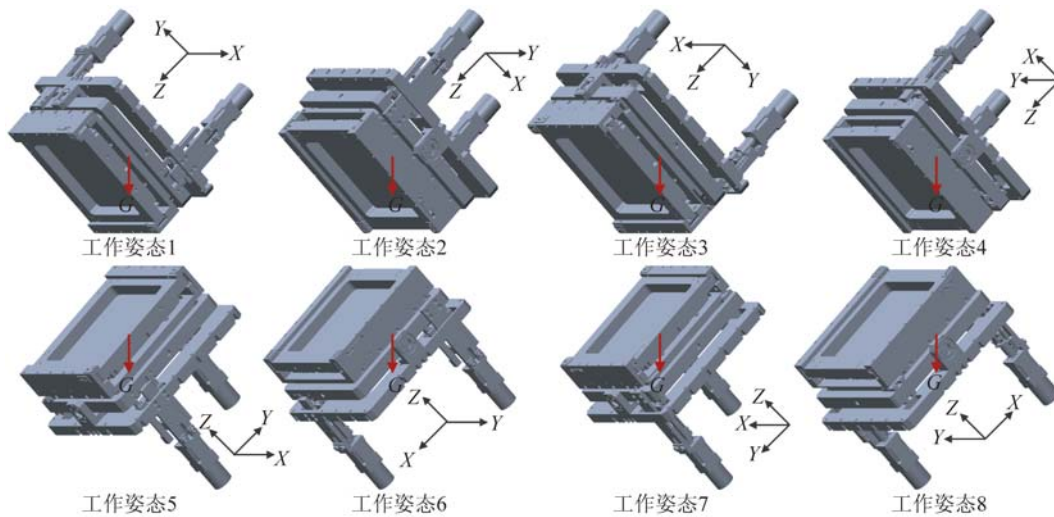


图 2 支撑系统的工作姿态示意图

Fig. 2 Schematic diagram of operating postures of supporting system

3 原理

3.1 支撑系统变形

重力作用下支撑系统发生变形, 根据机械系统静力学原理有:

$$\begin{bmatrix} K_x & 0 & 0 \\ 0 & K_y & 0 \\ 0 & 0 & K_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \\ G_z \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: K_x , K_y 和 K_z 分别为支撑系统在 X , Y 和 Z 3

体表面, 并在 KDP 晶体内部传播, 以此实现频率转换功能。与激光束的传播方向相匹配, 支撑系统倾斜安装在固体激光装置上, 倾斜安装方式有两种: 支撑系统的 $-Z$ 方向分别与重力方向成 $+45^\circ$ 和 -45° 角安装。对于每一种倾斜方式, 由于支撑系统的结构不对称, $+X$ 、 $-X$ 、 $+Y$ 和 $-Y$ 4 个方向分布的零部件也不相同, 因此共有 4 种空间分布情况。综上所述, 支撑系统共有 8 种空间分布情况, 令每一种空间分布情况为一种工作姿态, 则共有 8 种工作姿态, 如图 2 所示。由于结构不对称, 不同工作姿态时, 重力作用下支撑系统的变形不同, 引起 KDP 晶体的偏转和激光束入射角的变化也不同, 最终导致光学性能不同。为了减小支撑系统的变形和 KDP 晶体的偏转, 合理选择支撑系统的工作姿态是关键。

个方向的刚度, 与 3 个方向分布的零部件、结构形式及约束方式有关; δ_x , δ_y 和 δ_z 分别为支撑系统在 X , Y 和 Z 3 个方向的变形; G_x , G_y 和 G_z 分别为重力 G 在 X , Y 和 Z 3 个方向的分量, 是引起支撑系统变形的载荷。

3.2 关键刚度分量

由式(1)可知, 刚度是影响支撑系统变形的重要因素, 刚度提高时, 变形减小。式(1)只是一个通用公式, 对具体结构进行分析时, 还需对其进行适当的变换, 以满足具体结构的分析要求。

由于支撑系统具有多个工作姿态,不同工作姿态下同一方向的重力分量不同,有正向和负向两种可能,分别对支撑系统产生拉力和压力作用,此时需考查支撑系统相应方向承受拉力和压力的能力。由于支撑系统的结构复杂,某一方向承受拉力和压力的能力一般不同,由此导致支撑系统的变形不同。鉴于此,本文将式(1)中的刚度分量进一步分为抗拉刚度分量和抗压刚度分量两种类型,分别对应于重力分量的拉力作用和压力作用。X方向的抗拉刚度分量和抗压刚度分量分别用 K_{+x} 和 K_{-x} 表示,Y方向的抗拉刚度分量和抗压刚度分量分别用 K_{+y} 和 K_{-y} 表示,Z方向的抗拉刚度分量和抗压刚度分量分别用 K_{+z} 和 K_{-z} 表示。以Z方向为例,当支撑系统处于工作姿态1时,重力分量 G_z 的作用方向为+Z方向,对支撑系统产生拉力作用,此时Z方向的抗拉刚度分量 K_{+z} 起到承受重力分量 G_z 的主要作用;当支撑系统处于工作姿态5时,重力分量 G_z 的作用方向为-Z方向,对支撑系统产生压力作用,此时Z方向的抗压刚度分量 K_{-z} 起到承受重力分量 G_z 的主要作用。由于 K_{+z} 和 K_{-z} 不相等,则 G_z 以拉力和压力形式作用时,支撑系统在Z方向的变形不同,即工作姿态1和5下,支撑系统在Z方向的变形不同。

理论上,支撑系统的6个刚度分量 K_{+x} , K_{-x} , K_{+y} , K_{-y} , K_{+z} 和 K_{-z} 都对变形有影响,但不同刚度分量的影响程度不同,与支撑系统的工作姿态有关。8种工作姿态中,重力作用于YZ平面或XZ平面,由此可将重力在作用平面内分解至两个方向,两个方向的重力分量分别引起支撑系统相应方向的变形。此时,位于这两个方向、且与重力分量作用方向相对应的刚度分量起到承受重力的主要作用。二者的综合作用是影响变形的主要因素,称它们为关键刚度分量,其组合为关键刚度分量组合。以工作姿态1为例,重力作用于YZ平面,可将重力分解为Z方向和Y方向的两个重力分量,分别沿+Z方向和-Y方向作用于支撑系统,对支撑系统产生拉力和压力作用,此时,+Z方向的抗拉刚度分量 K_{+z} 和-Y方向的

抗压刚度分量 K_{-y} 起到承受重力的主要作用,它们是工作姿态1的关键刚度分量,其组合(K_{+z} , K_{-y})为工作姿态1的关键刚度分量组合,是影响工作姿态1下支撑系统变形的主要因素。8种工作姿态中,重力的分解方向和作用方向各不相同,相应的关键刚度分量和关键刚度分量组合也各不相同。工作姿态1~8的关键刚度分量组合分别为(K_{+z} , K_{-y})、(K_{+z} , K_{+x})、(K_{+z} , K_{+y})、(K_{+z} , K_{-x})、(K_{-z} , K_{-y})、(K_{-z} , K_{+x})、(K_{-z} , K_{+y})和(K_{-z} , K_{-x})。由于各个关键刚度分量承受重力的能力不同,不同关键刚度分量组合承受重力的能力也不同。

3.3 有限元法求解

理论上,可根据3.1节和3.2节中的原理对重力作用下支撑系统的变形进行解析求解;但由于支撑系统包括多个零部件,结构复杂,显性求解各个刚度分量较为困难,因此采用有限元方法进行数值求解。有限元方法的原理是将整体结构划分为有限个相互连接的单元和节点,首先在局部区域求解单元和节点的变形,之后再将局部解进行综合,以得出全局范围的整体解。由此得出的载荷作用下的变形,可视为刚度分量的隐性求解,解决了显性求解刚度分量的难题。

本文采用有限元软件ANSYS对支撑系统进行有限元建模和求解,建立的有限元模型如图3所示。模型主要包括KDP晶体、夹持框、安装框、调整框、基础框、基座和两个驱动组件等零部件,零部件通过实体建模方式建立,并采用实体单元划分网格,模型中共包括约55 000个网格和75 000个节点。基座四周的侧面全约束(ALL DOF),以表征整个支撑系统固定安装至固体激光装置。重力作用于支撑系统的YZ平面或XZ平面,与-Z方向成+45°或-45°,具体方向根据工作姿态确定。图3为工作姿态5的有限元模型。模型中所涉及的材料及其属性如表1所示,其中KDP晶体的泊松比和弹性模量具有各向异性的特点,二者通过式(2)来表征。

KDP晶体应力和应变间的关系如下:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & 0 & 0 & 0 \\ D_{12} & D_{11} & D_{13} & 0 & 0 & 0 \\ D_{13} & D_{13} & D_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ 2\epsilon_{yz} \\ 2\epsilon_{xz} \\ 2\epsilon_{xy} \end{Bmatrix}, \quad (2)$$

式中： σ 为应力， ϵ 为应变， $D_{11} = 71.2$ ， $D_{12} = -5.0$ ， $D_{13} = 14.1$ ， $D_{33} = 56.8$ ， $D_{44} = 12.6$ ， $D_{66} = 6.22$ (单位：GPa)。

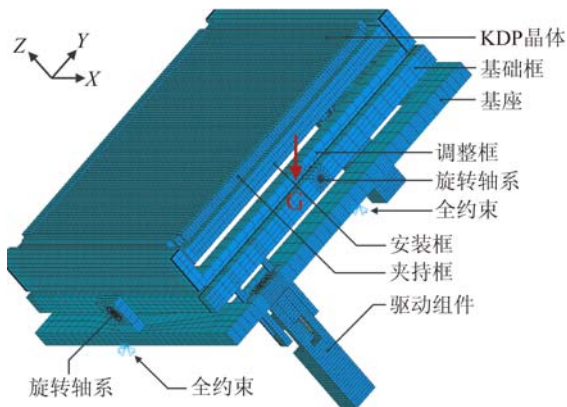


图 3 KDP 晶体支撑系统的有限元模型

Fig. 3 Finite element model of KDP crystal supporting system

表 1 支撑系统材料的性能

Tab. 1 Properties of materials in supporting system

材料	弹性模量/MPa	泊松比	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
KDP	—	—	2.34×10^3
钢	2×10^5	0.3	7.8×10^3

3.4 KDP 晶体偏转和激光束入射角变化

重力作用下，支撑系统发生变形，但由于结构、载荷和约束不对称，支撑系统的变形不均匀，部分

结构变形较大，而部分结构变形较小。受此影响，KDP 晶体发生刚体位移，且不同方向的位移不同，由此导致 KDP 晶体发生偏转，即 KDP 晶体分别在 XY、YZ 和 XZ 平面内旋转过一定角度(旋转轴分别垂直于 3 个平面)，如图 4 所示。KDP 晶体发生偏转后，激光束在 KDP 晶体表面的入射角随之改变，但 KDP 晶体不同平面内的旋转对激光束入射角变化的影响不同。由于激光束沿 $-Z$ 方向传播，则 KDP 晶体在 XY 平面内的旋转对激光束入射角无影响，而在 YZ 和 XZ 平面内的旋转分别引起相应平面内激光束入射角的变化。与 KDP 晶体的光学性能相关，本文只研究激光束入射角在 YZ 平面内的变化。由于激光束的传播方向保持不变，则激光束入射角在 YZ 平面内的变化与 KDP 晶体在 YZ 平面内的旋转角度相等。由于 KDP 晶体发生刚体位移，则 KDP 晶体在 YZ 平面内的旋转角度可根据 Z 方向的位移计算得出：

$$\varphi_{\text{laser}} = \varphi_{\text{KDP}} \approx \tan \varphi_{\text{KDP}} = \frac{|d_1 - d_2|}{l}, \quad (3)$$

式中： φ_{laser} 为激光束入射角在 YZ 平面内的变化值； φ_{KDP} 为 KDP 晶体在 YZ 平面内的旋转角度，由于其数值较小，可以约等于其正切值 $\tan \varphi_{\text{KDP}}$ ； d_1 和 d_2 分别为 KDP 晶体的 $+Y$ 边界和 $-Y$ 边界在 Z 方向的位移，二者之差取绝对值只是为了保证 $\tan \varphi_{\text{KDP}}$ 取正值； l 为 $+Y$ 方向边界和 $-Y$ 方向边界间的距离。

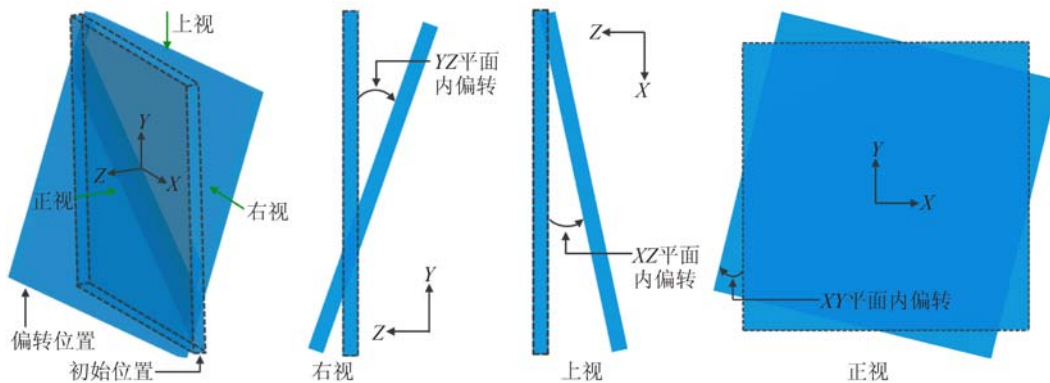


图 4 KDP 晶体偏转示意图

Fig. 4 Schematic diagram of deflection of KDP crystal

4 仿真结果与讨论

4.1 支撑系统变形

支撑系统由多个零部件组成,支撑系统变形的实质为各个零部件变形的综合。零部件的变形主要分为弹性变形和刚体位移。所谓零部件的弹性变形,即重力作用下零部件自身发生的弯曲和扭转等变形,主要与零部件自身的刚度和约束有关。刚度大、约束强时,变形小,反之亦然。由于各个零部件的刚度和约束不同,则各个零部件的弹性变形不同。至于零部件的刚体位移,各个零部件直接或间接连接,某一零部件的变形会引起相连零部件的刚体位移,这与零部件间的连接刚度有关,即起连接作用零部件的刚度。连接刚度大时,变形引起的刚体位移小,反之亦然。由于连接刚度一般不同,则各个零部件的刚体位移一般不同。各个零部件的弹性变形和刚体位移构成了支撑系统的整体变形。由于各个零部件的弹性变形和刚体位移不同,所以支撑系统的整体变形分布不规则,部分结构变形大,部分结构变形小。工作姿态7下支撑系统的变形如图5所示。不同工作姿态下,各个零部件的自身刚度和连接刚度承受重力的情况不同,即支撑系统的关键刚度分量组合不同,最终导致支撑系统的整体变形不同,详细分析见4.3节。

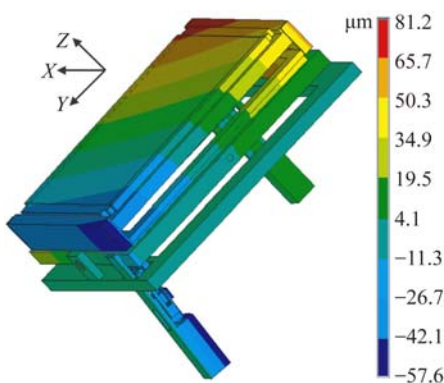


图5 工作姿态7下支撑系统的变形

Fig. 5 Distortion of supporting system under posture 7

4.2 KDP晶体偏转

各个零部件分布于KDP晶体四周,对KDP晶体进行直接或间接支撑,零部件的弹性变形和

刚体位移同样会引起KDP晶体的刚体位移。由3.4节分析可知,这里只分析YZ平面内的偏转,可根据KDP晶体Z方向的位移计算。工作姿态7时KDP晶体Z方向的位移如图6所示。KDP晶体Z方向位移的等高线相互平行且逐渐变化,表明KDP晶体Z方向的位移均匀变化,这是刚体位移的结果。等高线倾斜分布,同时沿Y方向和X方向变化,这是由于KDP晶体同时在YZ平面和XZ平面内发生了偏转,而且在YZ平面内的偏转程度较大,所以等高线在Y方向的变化程度大。支撑系统在不同的工作姿态下,各个零部件的弹性变形和刚体位移不同,即支撑系统的变形不同,最终导致KDP晶体的偏转不同,这同样是由关键刚度分量组合不同引起的,详细分析见4.3节内容。

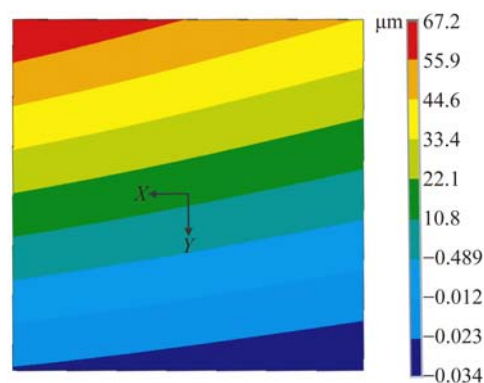


图6 工作姿态7时KDP晶体Z方向的位移

Fig. 6 Z-direction displacement of KDP crystal with supporting system under posture 7

4.3 工作姿态的影响

支撑系统在不同的工作姿态下,重力分量和关键刚度分量组合不同,支撑系统的变形不同,引起KDP晶体的偏转不同,导致激光束入射角的变化也不同。8种工作姿态下,重力分量、关键刚度分量和激光束入射角的变化如表2所示。

由表2可知,支撑系统的工作姿态不同,关键刚度分量组合不同,激光束入射角的变化值也不同。比较8种工作姿态,工作姿态7下激光束入射角的变化值最小,这主要是由于工作姿态7的关键刚度分量组合为 (K_{-z}, K_{+y}) ,这一关键刚度分量组合的综合作用最强,此时支撑系统承受重

力的能力最大,发生的变形最小,引起 KDP 晶体的偏转也最小。同理,工作姿态 5 时激光束入射角的变化值最大,这主要是由于工作姿态 5 的关键刚度分量组合为 (K_{-z}, K_{-y}) ,这一关键刚度分量组合的综合作用最弱,此时支撑系统承受重力的能力最弱,发生的变形最大,引起 KDP 晶体的偏转也最严重。

表 2 支撑系统在不同工作姿态下的重力分量、关键刚度分量组合和激光束入射角变化

Tab. 2 Gravity components, combination of key stiffness components and incident angle change of laser beam under different operating postures

工作姿态	重力分量	关键刚度分量组合	入射角变化 $\varphi_{\text{laser}}/\mu\text{rad}$
1	(+Z, -Y)	(K_{+z}, K_{-y})	77
2	(+Z, +X)	(K_{+z}, K_{+x})	233
3	(+Z, +Y)	(K_{+z}, K_{+y})	402
4	(+Z, -X)	(K_{+z}, K_{-x})	176
5	(-Z, -Y)	(K_{-z}, K_{-y})	420
6	(-Z, +X)	(K_{-z}, K_{+x})	173
7	(-Z, +Y)	(K_{-z}, K_{+y})	76
8	(-Z, -X)	(K_{-z}, K_{-x})	231

为了减小激光束入射角的变化,需减小支撑系统的变形。由上述分析可知,选取综合作用最强的关键刚度分量组合承受重力载荷时,即可使激光束入射角的变化达到最小值。由于关键刚度分量组合与支撑系统的工作姿态一一对应,关键刚度分量组合确定之后,支撑系统的工作姿态也随之确定。由表 2 可知,关键刚度分量组合 (K_{-z}, K_{+y}) 的综合作用最强,则工作姿态 7 为首选工作姿态。

需要说明的是,上述分析只是以支撑系统变形为依据对工作姿态进行确定。实际工程中,还需考虑多种因素,如激光束传播方向和支撑系统拆装空间等。考虑这些因素时,工作姿态 7 可能不是最优选择,此时则需要对其它几种工作姿态

进行考查。由表 2 可知,工作姿态 1 下激光束入射角的变化值略大于工作姿态 7 下的值,而小于其它几种工作姿态下的值。由此可知,关键刚度分量组合 (K_{+z}, K_{-y}) 的综合作用略弱于 (K_{-z}, K_{+y}) ,而强于其它几种关键刚度分量组合。这表明,当工作姿态 7 不满足工程要求时,则应优先考查工作姿态 1 是否满足要求。以此类推,当工作姿态 1 仍不满足工程要求时,则应依据关键刚度分量组合的综合作用由强至弱依次对其它工作姿态进行考查。

此外,刚体位移之外,支撑系统变形也会引起 KDP 晶体的弹性变形。KDP 晶体发生弹性变形后,面形相应发生变化,同样会造成激光束入射角的变化。但由于夹持框的保护作用,KDP 晶体发生的弹性变形很小,因而发生的面形变化也很小,对激光束入射角的影响可以忽略不计,所以本文未在这一方面进行讨论。

5 结 论

本文提出一种关键刚度分量的概念,并采用这一概念对一个 KDP 晶体支撑系统的工作姿态进行了研究。研究表明,关键刚度分量组合是影响重力作用下支撑系统变形的主要因素。同时,关键刚度分量组合与支撑系统的工作姿态一一对应,不同工作姿态的关键刚度分量组合不同,由此造成支撑系统的变形也不同。因此,可根据关键刚度分量组合研究支撑系统的工作姿态,即选取合适的关键刚度分量组合来承担重力,那么支撑系统的工作姿态也随之确定。当选择工作姿态 7 时,支撑系统的变形最小,激光束的入射角变化最小,为 $76 \mu\text{rad}$ 。当支撑系统的工作姿态确定后,采取相应措施、有针对性地提高关键刚度分量,可进一步减小支撑系统的变形。同时,实际工程中,支撑系统变形并不是工作姿态确定的唯一标准,还需考虑具体工程要求。本文的研究结果同样适用于其它光机结构,并为相应的光机结构设计提供参考。

参考文献:

- [1] MOSES E I, the NIC Collaborators. The national ignition campaign: status and progress [J]. *Nuclear Fusion*, 2013, 53: 104020.
- [2] ZHU Q H, ZHENG W G, WEI X F, *et al.*. Research and construction progress of SG-III laser facility [J]. *SPIE*, 2013, 8786: 87861G.
- [3] AOYAMA M, HARIMOTO T, MA J, *et al.*. Second-harmonic generation of ultra-high intensity femtosecond pulses with a KDP crystal [J]. *Optics Express*, 2001, 9(11): 579-585.
- [4] 贾凯, 袁晓东, 徐旭, 等. 夹持方式对 KDP 晶体三倍频转换效率的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(6): 1553-1558.
JIA K, YUANG X D, XU X, *et al.*. Influence of clamping modes in KDP crystal on conversion efficiency of third harmonic generation [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(6): 1553-1558. (in Chinese)
- [5] 崔凯洪, 张彬, 贾凯, 等. 夹持方式对频率转换 KDP 晶体耍弄的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(6): 1538-1542.
CUI K H, ZHANG B, JIA K, *et al.*. Effect of clamps on surface profiles of harmonic generation KDP crystals [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(6): 1538-1542. (in Chinese)
- [6] 熊召, 崔凯洪, 张彬, 等. 加工误差引入的薄型 KDP 晶体附加面形[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(2): 343-348.
XIONG ZH, CUI K H, ZHANG B, *et al.*. Additional surface variation of large-aperture thin KDP crystal caused by fabrication errors [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(2): 343-348. (in Chinese)
- [7] 徐攀, 崔凯洪, 张彬, 等. 夹持方式和加工误差对大口径薄型 KDP 晶体附加面形的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(9): 2079-2084.
XU P, CUI K H, ZHANG B, *et al.*. Effect of clamping modes and fabrication errors on additional surface variation of KDP crystals [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(9): 2079-2084. (in Chinese)
- [8] 乔战峰, 赵东峰, 戴亚平, 等. “神光-II”第九路终端光学系统稳定性分析[J]. *强激光与粒子束*, 2006, 18(3): 419-422.
QIAO ZH F, ZHAO D F, DAI Y P, *et al.*. Stability analysis of final optical system of additional beam in “Shengguang-II” laser facility [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(3): 419-422. (in Chinese)
- [9] 赵东峰, 华能, 章亚男, 等. “神光-II”装置第九路靶场终端光学组件的研制[J]. *强激光与粒子束*, 2007, 19(2): 245-248.
ZHAO D F, HUA N, ZHANG Y N, *et al.*. Development of final optics assembly for additional beam in “Shengguang-II” laser facility [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(2): 245-248. (in Chinese)
- [10] 杨飞, 刘国军, 安其昌. 基于结构函数的大口径望远镜光机系统误差分配[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(1): 117-121.
YANG F, LIU G J, AN Q CH. Error allocation of opto-mechanical system for large aperture telescope based on structure function [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(1): 117-121. (in Chinese)
- [11] 杨飞, 刘国军, 赵宏超, 等. 30 m 望远镜三镜系统刚度分配与分析[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(1): 152-159.
YANG F, LIU G J, ZHAO H CH, *et al.*. Stiffness allocation and analysis of TMT M3S [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(1): 152-159. (in Chinese)
- [12] 郭疆, 何欣. 大口径空间遥感相机主反射镜支撑设计[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(9): 1642-1647.
GUO J, HE X. Design of support for primary mirror of space remote sensing camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(9): 1642-1647. (in Chinese)
- [13] 张雷, 贾学志. 大型离轴三反相机桁架式主支撑结构的设计与优化[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(3): 603-608.
ZHANG L, JIA X ZH. Design and optimization of trussed supporting structure for off-axis three-mirror reflective space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3): 603-608. (in Chinese)
- [14] 梁彪, 刘伟, 陈程. 平面光栅支撑结构设计及其面形分析计算[J]. *光子学报*, 2011, 40(10): 1514-1520.
LIANG B, LIU W, CHENG CH. Design of supporting structure for plane grating and surface deformation calculation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(10): 1514-1520. (in Chinese)
- [15] 伞晓刚, 孙宁, 卓仁善, 等. 大口径光电经纬仪主反射镜支撑结构设计[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(12): 3111-3117.

- SAN X G, SUN N, ZHUO R SH, *et al.*. Design of supporting structure for primary mirror of large aperture theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(12): 3111-3117. (in Chinese)
- [16] 吴小霞, 李剑峰, 宋淑梅, 等. 4 m SiC 轻量化主镜的主动支撑系统[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(9): 2451-2457.
- WU X X, LI J F, SONG SH M, *et al.*. Active support system for 4 m SiC lightweight primary mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(9): 2451-2457. (in Chinese)
- [17] 沙巍, 陈长征, 许艳军, 等. 离轴三反空间相机主三镜共基准一体化结构[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(6): 1612-1619.
- SHA W, CHENG CH ZH, XU Y J, *et al.*. Integrated primary and tertiary mirror components from common base line of off-axis TMA space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(6): 1612-1619. (in Chinese)
- [18] 郭疆, 邵明东, 王国良, 等. 空间遥感相机碳纤维机身结构设计[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(3): 571-578.
- GUO J, SHAO D M, WANG G L, *et al.*. Design of optical-mechanical structure made of CFC in space remote sensing camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(3): 571-578. (in Chinese)
- [19] 安源, 贾学志, 张雷, 等. 基于碳纤维复合材料的空间相机高比刚度主承力板优化设计[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(2): 416-422.
- AN Y, JIA X ZH, ZHANG L, *et al.*. Optimizing design of CFRP based main backbone with high stiffness ratio for space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2): 416-422. (in Chinese)
- [20] 付世欣, 周超, 曹玉岩, 等. 基于拓扑优化的 4 m 望远镜底座结构设计[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(8): 2441-2447.
- FU SH X, ZHOU CH, CAO Y Y, *et al.*. Structural design of 4 m telescope mount base based on topology optimization method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(8): 2441-2447. (in Chinese)
- [21] 付锦江, 颜昌翔, 刘伟, 等. 快速控制反射镜两轴柔性支撑平台刚度优化设计[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(12): 3378-3396.
- FU J J, YAN CH X, LIU W, *et al.*. Stiffness optimization of two-axis flexible supporting platform for fast steering mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(12): 3378-3386. (in Chinese)
- [22] 张雷, 金光. 同轴反射式空间相机新型次镜支架结构[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(9): 2401-2404.
- ZHANG L, JIN G. New supporting structure of secondary mirror for coaxial reflective space telescope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2401-2404. (in Chinese)
- [23] 汪宝旭, 朱明智, 陈晓娟, 等. 三自由度柔性镜框结构力学性能分析[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(12): 3398-4005.
- WANG B X, ZHU M ZH, CHEN X J, *et al.*. Mechanical analysis of 3-DOF flexure optical mount structure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 3998-4005. (in Chinese)
- [24] 段宝岩, 仇原鹰, 张福顺, 等. 提高超大型天线索支撑结构刚度的方法及其对电性能的影响[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(3): 138-143.
- DUAN B Y, QIU Y Y, ZHANG F SH, *et al.*. Method to enhance the stiffness of cable-suspended structure for supper antenna and its effect on the electronic performance [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(3): 138-143. (in Chinese)

作者简介:



苏瑞峰(1984—),男,内蒙古鄂尔多斯人,博士,工程师,2008年、2010年、2015年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事 ICF 装置精密光机结构的设计与研究。
E-mail: suruif@hotmail.com



陈晓娟(1974—),女,陕西乾县人,高级工程师,1995年于西安理工大学获得学士学位,主要从事 ICF 装置精密光机结构的设计与研究。E-mail: chenxj@caep.ac.cn