

文章编号:1001-5078(2021)09-1185-06

· 红外技术及应用 ·

基于红外热像仪的调焦机构受力分析及电机选型

于昊征, 张超, 张俊蓉, 徐明轩

(中国电子科技集团公司第十一研究所, 北京 100015)

摘要:目前, 红外热像技术在国内受到广泛的关注, 在侦察、监视、枪瞄、制导等方面发挥重要作用, 而调焦组件作为热像仪中重要的组件之一, 是完成光学调焦的主要的机械结构, 热像仪在调焦过程中能否保持运动平稳、运动精度能否达到要求, 直接影响到最终的成像效果以及跟踪效果。本文针对凸轮式调焦机构对其进行受力分析及电机选型, 综合考虑转动惯量、摩擦力矩的因素, 通过计算及仿真分析, 找到影响凸轮效率的因素, 并提出优化建议。

关键词:调焦机构; 凸轮调焦; 受力分析; 电机选型; 优化建议

中图分类号:TH122; TN219 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2021.09.012

Force analysis and motor selection of focusing mechanism based on infrared thermal imager

YU Hao-zheng, ZHANG Chao, ZHANG Jun-rong, XU Ming-xuan

(The 11th Research Institute of CETC, Beijing 100015, China)

Abstract: At present, infrared thermal imaging technology is widely concerned in China, and plays an important role in reconnaissance, surveillance, gun aiming, guidance, etc. As one of the important components in the thermal imager, the focusing component is the main mechanical structure to complete optical focusing. Whether the thermal imager can keep stable motion and meet the requirements in the focusing process directly affects the final imaging effect and tracking effect. In this paper, the force analysis and motor selection of cam focusing mechanism are carried out, and the factors of moment of inertia and friction moment are considered comprehensively. Through calculation and simulation analysis, the factors affecting cam efficiency are found, and optimization suggestions are put forward.

Keywords: focusing mechanism; CAM focusing; force analysis; motor selection; optimization suggestion

1 引言

调焦机构作为热像仪中不可或缺的组件之一^[1], 其调焦性能会直接影响最终的成像和跟踪效果, 因此, 对于调焦组件整体受力分析, 找到影响调焦效率的因素及最优电机选型是势在必行的。

目前国内常用的调焦机构有丝杠螺母调焦机构, 调焦方式采用螺纹传动如图1所示; 采用蜗轮、蜗杆传动如图2所示; 凸轮传动的方式如图3所示。螺纹传动的方式^[2]结构简单, 但对于调焦镜筒和凸轮的装调有很高的要求, 微小的误差对于成像有很

大影响。杜一民^[3]等人利用蜗轮蜗杆传动特点, 通过此传动方式带动偏心凸轮旋转, 从而实现调焦, 研究发现, 蜗轮、蜗杆传动的调焦方式更适用于调焦量不大的微调组件, 蜗轮、蜗杆传动的优点是有较大的传动比, 具有自锁功能, 其不足之处是磨损严重, 体积较大, 发热量大; 安源^[4]等人发明了一种直线形式的调焦机构, 通过丝杠直接使镜筒完成直线运动, 而镜筒通过直线导轨进行约束, 丝杠、螺母传动的调焦方式的特点是结构较为简单, 重量轻、体积较小, 缺点是装配比较繁琐, 而且对于装配精度的要求很

收稿日期: 2020-11-21; 修订日期: 2021-01-21

高;凸轮传动^[5]的调焦方式的优点是结构简单,工艺性好,结构成熟,高温性能良好。

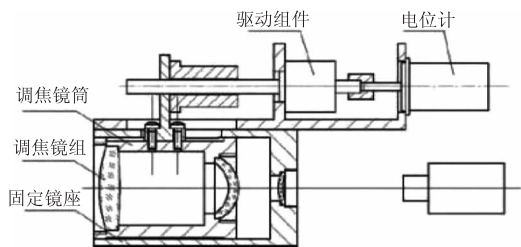


图1 丝杠调焦机构

Fig. 1 Lead screw of focusing mechanism

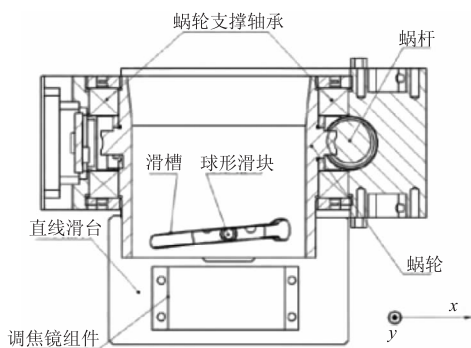


图2 蜗轮蜗杆调焦机构

Fig. 2 Turbine shaft of focusing mechanism

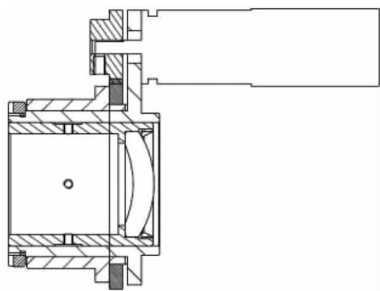


图3 凸轮式调焦机构

Fig. 3 Cam of focusing mechanism

通过对凸轮式调焦机构的力学性能进行分析,找到提高调焦效率、优化摩擦阻力的方法,这样在建模过程中就可以进行优化。凸轮制造选用的材料多为铝或铜,后面会对同一凸轮,不同材质进行对比找到最优材料,其次,借助力学性能的分析对于优化后的凸轮电机选型同样有很大帮助,通过计算选择最适合调焦机构的电机,不仅可以优化减重而且对经济成本也有很大节省。

2 凸轮式调焦的结构

2.1 凸轮式结构运动原理分析

目前使用的大部分热像仪均采用凸轮式调焦结构如图4所示,本文以核高基调焦凸轮为例进行分析,凸轮式调焦方式的优点是结构工艺简单,

便于装配,可靠性高,传动轻快,高温性能良好,所有传动环节采用滚动轴承,进一步的减少了摩擦。凸轮式调焦机构是由固定镜筒1、限位开关2、直流电机及编码器3、调焦凸轮4、移动镜筒5、导柱6等组成。

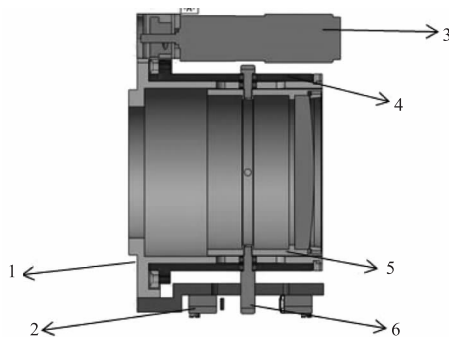


图4 凸轮式分解图

Fig. 4 Cam exploding image

其工作原理是:通过直流电机驱动调焦凸轮旋转,导柱就会按照凸轮曲线运动,此时移动镜筒在固定镜筒中进行直线往复运动。直流电机后面安装的编码器记录电机转动,从而确定调焦位置,控制电路接收到编码器的反馈,控制电机启停,实现对调焦位置的控制,下面的长导柱又可以触碰到限位开关,这是一种非常巧妙的结构设计,目前对于调焦组件受力分析的研究少之又少,伺服电机选型不明确,因此对调焦机构的受力分析是尤为重要的。

2.2 凸轮的力学性能分析

这种凸轮结构可看作简化版的螺纹副结构,其力学模型如图5所示,为了便于分析,用集中载荷 Q 代替,图中 Q 为调焦镜筒重力,设 Q 作用于调焦凸轮内径 d 圆周上一点,这样,当调焦凸轮相对于镜框旋转时,可以看做一滑块(镜筒)沿着内径 d 展开,斜度为凸轮的螺旋升角。

当凸轮旋转时,滑块通过水平力 F 向上运动,设滑块所受反力为 N ,摩擦力为 f ,滑块上升,摩擦力与运动方向相反,总反力 R 与 Q 之间的夹角为 $\phi + \rho$,由力的平衡可知, R 、 F 、 Q 组成三角形。

调焦过程中所需的力 $F = Q \times \tan(\phi + \rho)$,若求得 F 须知道镜筒重量,以及凸轮对固定镜筒的滑动摩擦系数。首先根据凸轮螺旋升角求得支持力 N ,结合滑动摩擦因数 q 可知 f, ρ 为摩擦角, $\rho = \arctan f$ 。在右边的三角形中 Q 与 R 的夹角即为 $\rho + \phi$ 。式(1)使得镜筒移动所需要加在凸轮上的力矩为:

$$T = Fd/2 = \frac{Q \times \tan(\phi + \rho) \times d}{2} \quad (1)$$

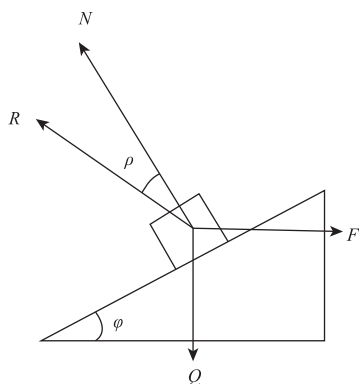


图5 力的简化合成图

Fig. 5 The force decomposition image

2.3 螺旋升角和效率

当凸轮曲线的螺旋升角增大时,同一旋转角度情况下,移动镜筒的行程随之增大,但并不意味着螺旋升角可以无限增大,随着角度的增大,会有更多的力转化为对凸轮槽的压力,最终可能导致曲线槽的变形。

设凸轮的调焦效率为 η ,指有用功与总功的比值,其中,凸轮旋转一周所需的功为:

$$W_1 = 2\pi d$$

有用功为:

$$W_2 = QS$$

其中, $S = \pi d \tan \phi$ 。因此,凸轮的调焦效率为式(2):

$$\eta = \frac{W_2}{W_1} = \frac{Q\pi d \tan \phi}{Q\pi d \tan(\phi + \rho)} = \frac{\tan \phi}{\tan(\phi + \rho)} \quad (2)$$

由上式可知,调焦的效率 η 与螺纹升角 ϕ 和摩擦角 ρ 有关,当摩擦角一定时,对上式求极值,通过计算可得当螺旋升角 $\phi \approx 40^\circ$ 时效率最高,且螺旋升角大于 20° 时,能够出现自锁。

2.4 凸轮机构的转矩

调焦凸轮套在固定镜筒做旋转运动,此时会在凸轮上产生转矩,计算转矩时首先要确定凸轮的旋转速度,设凸轮 t 秒内完成调焦,镜筒移动距离为 s ,凸轮曲线的螺距为 p ,凸轮在 t_1 秒内加速到匀速状态,绘制如折线图6所示。

加速、匀速、减速三部分面积和为镜筒的移动距离,即式(3)、式(4):

$$s = 1/2 \times t_1 \times v + (t_2 - t_1) \times v + 1/2 \times (t_3 - t_2) \times v \quad (3)$$

$$n = \frac{v}{p} \times 60 \quad (4)$$

根据静力学计算有:

$$M_{(\text{凸轮})} = I_m \times \frac{n}{9.6T} = (I_{m_1} + I_{m_2}) \times \frac{n}{9.6T} \quad (5)$$

其中, I_{m_1} 为凸轮的转动惯量; I_{m_2} 为齿轮的转动惯量; n 为转速, T 为加速时间。

$$I_{m_1} = \frac{1}{2} \times m_1 (R_1^2 + r_1^2) + \frac{1}{2} \times m_2 (R_2^2 + r_2^2) \quad (6)$$

$$I_{m_2} = \frac{1}{2} \times m (R^2 + r^2) \quad (7)$$

式中, m_1 为凸轮后半部分圆柱的质量; m_2 为安装大齿轮的质量; R_1, R_2, r_1, r_2 分别为前后部分的内径和外径。

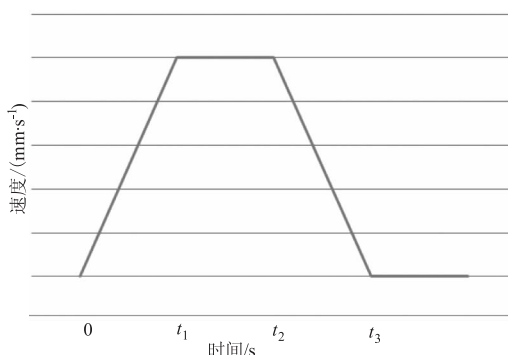


图6 工作工况

Fig. 6 Working condition

2.5 摩擦力矩的计算

摩擦力矩可分为三部分,第一是移动镜筒与固定镜筒间的摩擦力矩,第二是调焦凸轮与固定镜筒的摩擦力矩,第三是轴承的滚动摩擦力矩。

移动镜筒与固定镜筒摩擦力矩,根据摩擦力矩得到:

$$M_1 = (W_1 + W_2) \times f_0 \times R_3 \quad (8)$$

式中, W_1, W_2 为镜片与镜筒的重量; R_3 为镜筒的半径; f_0 为移动镜筒与固定镜筒摩擦系数。

凸轮与固定镜筒的摩擦力矩,凸轮的材质可以为铜或者铝,由于材料不同导致两者间的摩擦系数不同,摩擦力矩等于摩擦力乘以镜筒半径,有:

$$M_3 = W_3 \times f_1 \times R_4 \quad (9)$$

式中, W_3 为凸轮重量; R_4 为凸轮的半径; f_1 为凸轮与固定镜筒摩擦系数。

3 计算分析

以某项目的调焦镜筒参数为例计算,参数如表1、表2所示。

表1 组件参数

Tab.1 Component parameters

名称	内径/mm	外径/mm	质量/g
凸轮	64	小69、大78	277.6
移动镜筒	54	59	150.1
镜片压圈		4.9	
镜片		71.8	

表2 摩擦因数对照表

Tab.2 Comparison of friction factor

材料	摩擦因数
铝-黄铜	0.27
铝-铝	1.4

3.1 铜和铝材料的计算结果

凸轮采用铜材料,固定镜筒采用铝材料,黄铜与铝的动摩擦系数为 0.27,凸轮曲线节距 50 mm,导程为 23 mm,4 s 内完成调焦情况下,凸轮匀速运动所需要的的转矩为 $0.14 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。凸轮采用铝材料,固定镜筒采用铝材料,铝与铝的油润滑的动摩擦系数为 1.4,凸轮曲线节距 50 mm,导程为 23 mm,4 s 内完成调焦情况下,凸轮匀速运动所需要的的转矩为 $0.19 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

通过计算可知,当凸轮和镜筒选用铜材料的时候,使凸轮匀速旋转所需的扭矩远远小于铝材料,铜的自润滑效果远远大于铝,长时间的磨合会使铜的表面趋于光滑,而铝却不能达到这个效果。

3.2 Adams 中的分析

通过 Adams 仿真软件对调焦机构进行整体的仿真分析,其分析步骤首先在 creo 中将调焦机构简化绘图如图 7 所示。

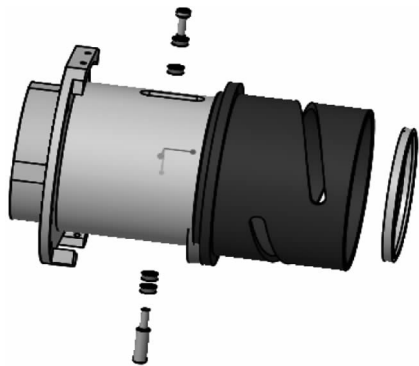


图7 仿真图形简化

Fig.7 Simplification of simulation graphics

将文件保存为中间格式 x_t 文件,打开 adams view,导入凸轮机构文件,下面就是进行仿真的预处理:首先定义重力方向,平行于凸轮轴线,然后添加材料关系,将固定镜筒,移动镜筒,导柱,轴承等按照要求添加对应材料,接着定义约束关系,添加固定副,固定镜筒与大地连接,导柱 1,2 与移动镜筒建立固定副关系,准直镜压圈,镜片与移动镜筒建立固定副关系,轴承与导柱间建立转动副关系,移动镜筒创建移动副关系,然后添加碰撞关系^[6-7],stiffness 根据材料设定,钢设为 10000,对于 Force Exponent 瞬时法向力指数金属材料选取 1.3 ~ 1.5,对于 damping 阻尼系数设置为 28,渗透深度默认 0.1。选择轴承与凸轮曲线的滑槽,滑动摩擦因数输入轴承的滚动摩擦因数 0.015,在转动副和移动副中添加上表 2 的滑动摩擦因数,接下来添加驱动,按照工况要求使用 STEP 函数完成要求 0 ~ 0.1 s 为加速阶段,0.1 ~ 3.9 s 为匀速阶段,3.9 ~ 4 s 为减速阶段。至此,预处理完成。点击仿真,待仿真结束后,进入后处理模块,点击 constraint 选择凸轮的旋转副,选择 element torque,生成曲线图如图 8 所示。

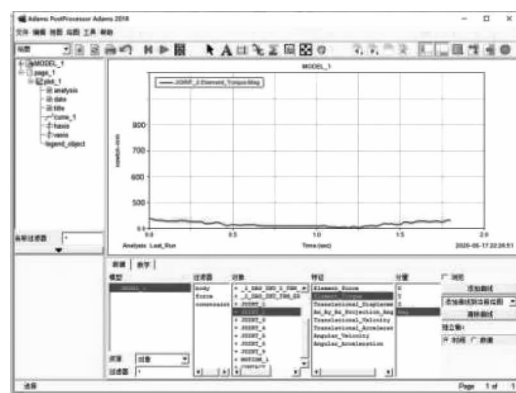


图8 仿真结果后处理

Fig.8 Post-processing of simulation results

将仿真数据结果导出为参数数据,在 excel 中处理如图 9 所示,凸轮的转矩在 $0.1 \text{ N} \cdot \text{m}$ 趋于稳定。将零件模型材料改为铝,仿真处理后得到图 10 数据。

通过曲线图可知,黄铜凸轮旋转的最大扭矩在 $0.124 \text{ N} \cdot \text{m}$ 左右,公式计算的结果为 0.14 N ,当凸轮及移动镜筒选择铝材时,凸轮的最大扭矩为 $0.20 \text{ N} \cdot \text{m}$,公式计算结果为 $0.19 \text{ N} \cdot \text{m}$,通过仿真验证了理论计算的结果。

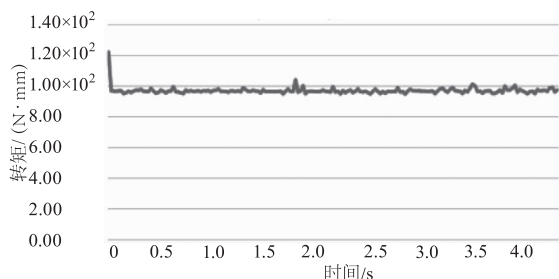


图9 铜凸轮的转矩

Fig. 9 The torque of copper cam

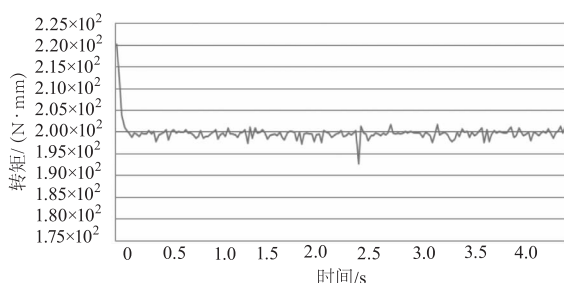


图10 铝凸轮的转矩

Fig. 10 The torque of aluminum cam

3.3 直流电机选型

在轻量化、经济化设计需求日益提升的环境下,驱动电机选型直接影响到设计结构整体的尺寸和质量。传统电机选型方法在一定程度上可以满足需求,但同时也存在了很多不足。对很多影响较大的因素没有被考虑,例如对体积较小零件的转动惯量和摩擦直接忽略,调焦机构为热像仪中的精密组件,电机选型尤为重要,通常选择瑞士的 MAXON 和德国的 FAULHABER 微型直流电机,拥有毫秒级的时间常数,适合光机组件的需求^[8],通过上文的计算与仿真,得到了摩擦力矩与转矩后,首先通过查询电机手册,找到减速器的输入速度和连续输入转矩,根据负载转速计算减速器的减速比 i ,减速箱的减速比应比计算的结果小一些,然后选择传动级数,根据电机选型手册查找对应减速器的传动效率 η ,最后计算折算到电机轴的转矩和转速,根据公式:

$$M_{\text{电机}} = \frac{M_{\text{减速器}}}{i \cdot \eta}$$

$$n_{\text{电机}} = i \cdot n_{\text{负载}}$$

进行求解,与此同时还要对调焦凸轮加速阶段的转矩进行计算:

$$M_{\alpha} = J_L \cdot \frac{\pi}{30} \cdot \frac{\Delta n}{\Delta t}$$

将电机的加速转矩 M_{α} 与折算到电机轴上的转

矩,与摩擦力矩相加后为电机正常工作状态下所需的转矩。下面按 3.1 节中的参数为例进行选型计算。凸轮转动所需的力矩为 $0.124 \text{ N} \cdot \text{m}$,调焦齿轮的减速比为 160:28,经过第一级调焦齿轮的减速升矩后,输入减速箱的转矩为 $0.0217 \text{ N} \cdot \text{m}$,据此所选的减速器最大连续转矩至少为 $0.025 \text{ N} \cdot \text{m}$,通过查看 maxon 电机手册找到行星齿轮箱 GP 10A 型号,此减速器的推荐输入转速为 3000 rpm,因此最大允许的减速比为:

$$i_{\text{max}} = \frac{n_{\text{减速器}}}{n_{\text{负载}}} = 75:1$$

减速器的减速比应比 75:1 小一些,因此选择最为接近的 64:1 的三级转动减速器,最高传动效率为 73%,则传递到电机轴的转速和扭矩为:

$$n_{\text{电机}} = i \cdot n_{\text{负载}} = 2560 \text{ rpm}$$

$$M_{\text{电机}} = \frac{0.025}{75 \times 0.73} \approx 0.46 \text{ mN} \cdot \text{m}$$

根据减速器推荐搭配里的型号,找到既满足转矩又满足转速的型号,A-max12,6 V,0.5 W 这一款,经过最终的上机试验,凸轮稳定运行,满足了使用需求,并且再一次验证了上面计算与仿真结果的准确性。

通常在电机选型中,我们总是选择冯哈勃 1724T006sr 这一款,它的输出转矩为 $4.5 \text{ mN} \cdot \text{m}$,很明显远远大于负载所需转矩,造成不必要浪费。

4 结 论

对凸轮式调焦机构的受力分析,可知,影响凸轮调焦效率的第一个因素是凸轮曲线的设计,选择合适的螺旋升角,既可以提升调焦效率同时也可以防止出现卡死现象,螺旋升角在 40° 时效率最大,且为了实现自锁,螺旋升角至少要大于 20° ;第二的材料的选择,铜具有很好的自润滑性,铜的质地较铝软一些,这样在凸轮曲线进行加工时精度更为准确,且铜的滑动摩擦因数小于铝,通过深入计算青铜的滑动摩擦因数要小于黄铜的,设计凸轮时在不强制要求整体质量时,优先考虑这两个因素,其次在调焦组件装调时,适当在固定镜筒内壁、外壁使用脂润滑,可以进一步减小摩擦力,使负载上的摩擦转矩更小;通过电机选型的详细分析,可以使我们在今后选择一款更加贴近工况需求的电机,节约成本和尺寸。

参考文献:

- [1] Lin Weicai, Wang Jing. A high precision focal system de-

- sign[J]. Changchun Institute of Optics; Chinese Academy of Sciences, 2010, 10(4): 40–42. (in Chinese)
- 林为才, 王晶. 一种高精度调焦机构设计[J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2010, 10(4): 40–42.
- [2] Shen Junli, Zhang Chunlin, Wang Shouyin. Analyzing comprehensive mechanics performance of the sleeve sliding type focusing mechanism[J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical, 2015, 28(6): 55–57. (in Chinese)
- 申军立, 张春林, 王守印. 套筒滑动式调焦机构综合力学性能分析[J]. 机电产品开发与创新, 2015, 28(6): 55–57.
- [3] Du Yimin, Jia Xuezhi, et al. Design and analysis of focusing mechanism for a high resolution space camera[J]. Infrared Technology, 2019, 41(4): 305–310. (in Chinese)
- 杜一民, 贾学志, 等. 高分辨率空间相机调焦机构设计与分析[J]. 红外技术, 2019, 41(4): 305–310.
- [4] An Yuan, Qi Yingchun. Design of straight-line focusing mechanism for space camera[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(3): 609–614. (in Chinese)
- 安源, 齐迎春. 空间相机直线调焦机构的设计[J]. 光学精密工程, 2009, 17(3): 609–614.
- [5] Huang Heping. Design on the focusing mechanism of long focus IR system[J]. Laser & Infrared, 2005, (10): 40–42. (in Chinese)
- 黄和平. 大口径、长焦距红外系统调焦机构设计[J]. 激光与红外, 2005, (10): 40–42.
- [6] Ma Zhibin. Kinematic characteristics analysis of tamping device based on ADAMS[J]. China Plant Engineering, 2020, (10): 99–101. (in Chinese)
- 马智彬. 基于 ADAMS 的捣固装置运动特性分析[J]. 中国设备工程, 2020, (10): 99–101.
- [7] Xie Zuiwei, Wu Xinyue. Collision simulation analysis based on Ad-ams[C]//China Dynamics Conference, 2007: 345–348. (in Chinese)
- 谢最伟, 吴新跃. 基于 ADAMS 的碰撞防仿真分析[C]//中国动力学会, 2007: 345–348.
- [8] Wu Haitao, Fan Dapeng. Motor selection of opto-electronic servo system[J]. Journal of Applied Optics, 2015, 36(6): 829–835. (in Chinese)
- 吴海涛, 范大鹏. 光电伺服电机选型问题研究[J]. 应用光学, 2015, 36(6): 829–835.