

弹载红外相机静态质量质心配平

张生全, 赵劲松, 何红星, 罗敏, 康丽珠, 陶亮, 徐参军, 徐瑞
(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: 为了实现弹载红外相机静态质心配平, 在整机质量具有一定要求下, 设计了一套数量少、质量轻、工艺性好、互换性优的配重负载组合。针对狭小空间体积的弹载红外相机设计出配重负载以及合理安排负载组合的安装位置, 提出了先利用三维设计软件 Creo4.0 仿真出原始样机质心位置, 再结合整机的质心要求, 在空间两点采用力矩平衡原理计算出配重负载质量和质心应在位置的耦合关系, 在总结归纳了配重负载设计原则之上, 运用 Creo4.0 设计出配重负载方案。经过投图、加工、装配以及严格的质心测试论证, 结果表明, 该方法很好地实现了质心配平功能, 使得弹载红外相机满足质心要求。这种静态质心配平思路相较于试配法具有快速高效、布局合理等优势。

关键词: 弹载红外相机; 质心配平; 力矩平衡原理; 质心测试

中图分类号: V214 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2022)06-0622-06

Static Centroid Balancing for Missile Borne Infrared Cameras

ZHANG Shengquan, ZHAO Jinsong, HE Hongxing, LUO Min,
KANG Lizhu, TAO Liang, XU Canjun, XU Rui
(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: In order to realize the static centroid balancing of missile borne infrared cameras, a set of counterweight load combination with less quantity, light weight, fine technology and interchangeability is designed under requirements of the whole machine quality. In order to design the counterweight load quickly and efficiently and arrange the installation position of the load combination reasonably for the missile borne infrared camera with small space volume, a method is proposed to simulate the centroid position of the original prototype by using the three-dimensional design software Creo4.0, and then calculate the coupling relationship between the mass of the counterweight load and the centroid position by using the torque balance principle at two points of the space. On the basis of summarizing the design principles of counterweight load, the counterweight load scheme is designed by using creo4.0. After projection, processing, assembly and strict centroid test, the results show that the method can achieve the centroid balancing function well, and make the missile borne infrared camera meet the centroid requirements. Compared with the trial method, this static centroid balancing method has obvious advantages of high efficiency and reasonable layout.

Key words: missile-borne infrared camera, centroid trim, lever principle, centroid test

0 引言

质量特性参数是导弹总体设计和飞行控制的重要参数, 包括质量、质心、转动惯量和惯性积大参数。其中, 质量、质心是其他参数准确测量的前提, 质心参数直接影响航空航天产品的飞控精度^[1]。弹载红外相机是搭载红外导引头导弹的核心器件之一, 在总体单位要求下, 精确设计弹载红外相机的质量和质心对于准确分析导弹搭载能力、控制飞行姿态、提高弹道

控制精度、提升作战性能均具有重要意义^[2]。质量特性参数设计技术研究, 为弹体结构设计、舱内设备安装、调整等工作提供重要可靠性支撑^[3-4]。

针对传统弹载红外相机采用试配法对质量质心进行配平的周期长、通用性差等弊端^[5-8], 本文从实际设计要求出发, 利用三维设计软件进行质量特性参数仿真分析, 结合相关基本配平设计原则并运用力矩平衡的基本原理设计出配平负载及安装位置, 通过质量

收稿日期: 2021-11-24; 修订日期: 2022-03-18.

作者简介: 张生全 (1996-), 男, 安徽怀宁人, 硕士研究生, 研究方向: 光机系统设计及有限元分析。E-mail: saintranzhang@gmail.com.

质心实测数据成功论证仿真分析结果,证明该方法切实有效。

1 红外相机质心配平方案设计

1.1 相关技术要求

弹载红外相机质量技术要求: $3.5 \pm 0.2 \text{ kg}$; 质心技术要求: ①质心沿光轴方向距离安装面 $26.3 \pm 5 \text{ mm}$; ②相对于中心光轴不大于 5 mm , 偏第三象限不大于 3 mm 。结构象限分布如图1所示, 安装基准面如图2所示。

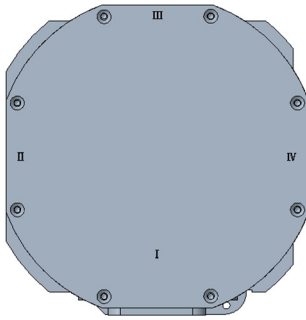


图1 象限分布

Fig.1 Quadrant distribution

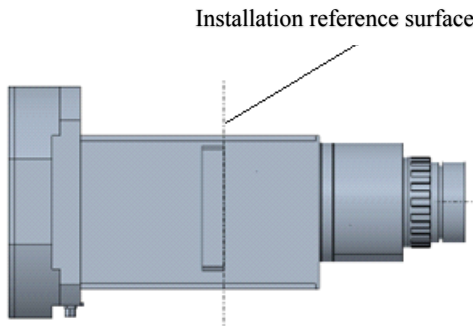


图2 安装基准面

Fig.2 Installation reference surface

1.2 系统方案设计

在总体单位给出的系统方案设计要求下, 利用数字化设计软件 Creo 自顶向下设计出样机三维模型, 主要由主壳体、盖板、支架、探测器组件、光学镜头、电路组件等组成。弹载红外相机模型如图3所示, 光学镜头组成如图4所示, 模型内部布局如图5所示。

2 原始样机质量、质心仿真

利用 Creo 对未添加配重负载的样机模型进行质量、质心仿真计算。在进行质心仿真计算之前, 需要对各个零、部件进行材料赋值, 不同的零、部件赋值参数不尽相同。对于常规类单一均匀密度零、部件只需赋值材料密度, 如主壳体、支架、镜头、镜片、盖

板、调整垫圈等。对于复合材料零部件而言, 需要通过实验测出其具体质量以及质心位置, 将实测的质量和质心数据赋值在零、部件三维模型上。具体参数如表1所示。

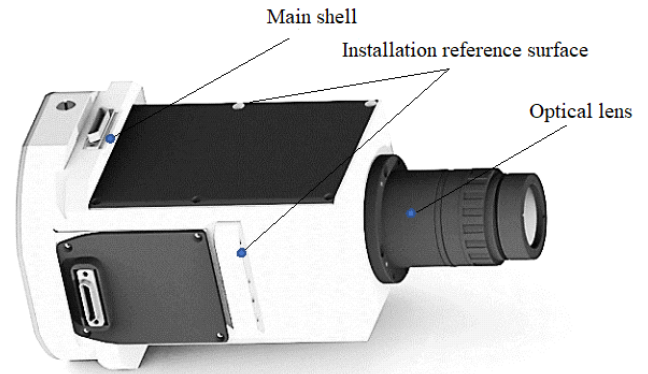


图3 整机结构模型

Fig.3 Machine structure model

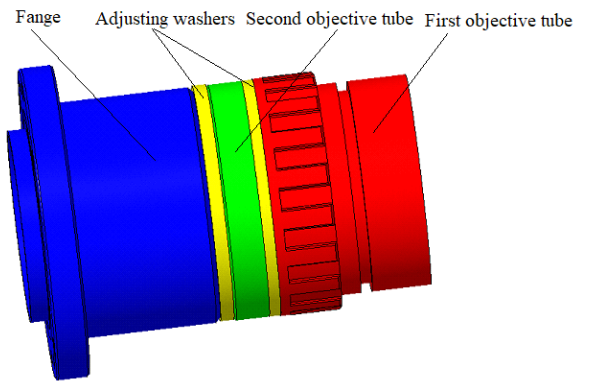


图4 光学镜头结构模型

Fig.4 Optical lens structure model

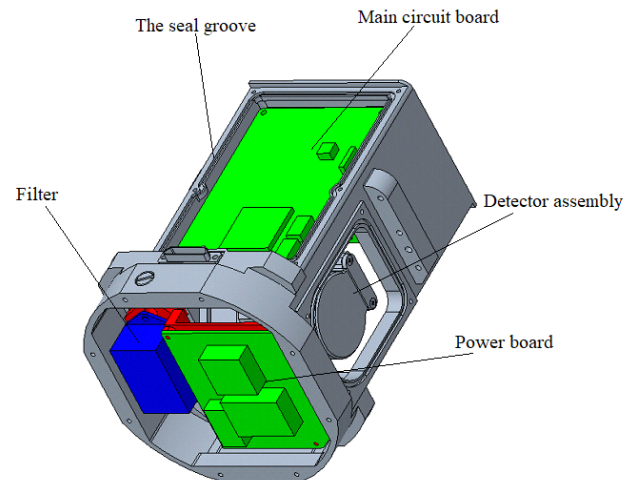


图5 模型内部布局图

Fig.5 Internal layout of the model

表1 材料参数赋值

Table1 Assignment of material parameters			
Materials/Parts	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	m/kg	Centroid
Aluminum alloy	2.7×10^3	-	Simulation
Brass	8.6×10^3	-	Simulation
Detector assembly	-	0.76	Measurement
Main circuit board	-	0.12	Measurement
Power board	-	0.096	Measurement
Lens one	4.47×10^3	-	Simulation
⋮	⋮	⋮	⋮
Lens seven	2.329×10^3	-	Simulation

特别地,在进行质心仿真计算之前,需要将总体单位要求的质心数据赋值在样机三维模型上,且将质心条件赋值为三维坐标原点,即 $(x, y, z)=(0,0,0)$ 。通过Creo的仿真计算求得样机质量 $M_0=3.13\text{kg}$,质心位置坐标: $x_0=-16.84\text{mm}$, $y_0=3.11\text{mm}$, $z_0=-3.81\text{mm}$,可得 $|\sigma_x|=16.84\text{mm}$, $|\sigma_y|=3.11\text{mm}$, $|\sigma_z|=3.81\text{mm}$,其中 σ_x 表示当前质心沿光轴相较于安装基准面的距离; σ_y 表示当前质心沿Y方向相较于光轴的距离; σ_z 表示当前质心沿Z方向相较于光轴的距离。显然, $|\sigma_x|>5\text{mm}$, $|\sigma_z|>3\text{mm}$,X、Z方向超出前文所提指标要求。通过计算与对比,未加配重负载的样机质量、质心均不满足总体方案要求,故需要设计配重方案。

3 设计配重方案

3.1 计算配重负载质量与安装位置

根据提供的质量、质心条件以及未加配重负载整机的仿真结果,如图6所示,在系统空间中两刚性质点上,利用力矩平衡原理,计算配重负载质量与其质心应在位置的函数关系。所有零部件视为刚体,将整个杠杆系统视为整机系统,以条件要求最终质心的位置作为杠杆的支点, m 为配重负载总质量, l 为配重负载的质心与条件要求最终质心的距离, M 为未添加配重负载的整机质量, L 为未添加配重负载整机的质心与条件要求最终质心的距离。空间质心力矩平衡图如图7所示。

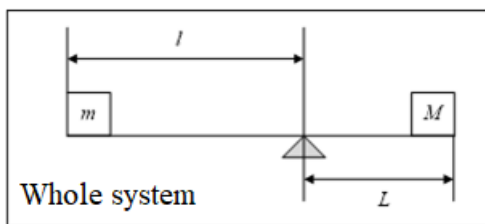


图6 整机系统的力矩平衡示意图

Fig.6 Schematic diagram of torque balance of the whole system

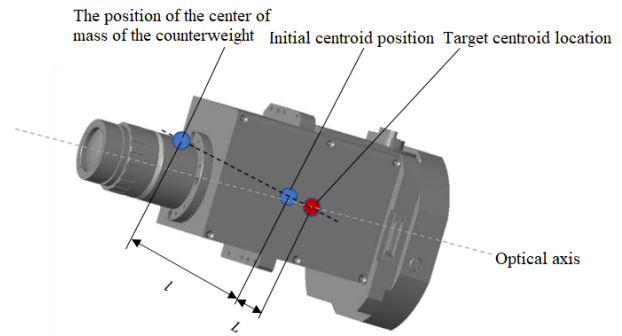


图7 空间质心力矩平衡

Fig.7 Space centroid moment balance

根据力矩平衡原理:

$$mg \cdot l = M_0 g \cdot L \quad (1)$$

可得: $l = \frac{M_0}{m} \cdot L$ 。

根据空间两点距离公式:

$$L = \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2 + (z_0 - z)^2} \quad (2)$$

式中: $x_0=-16.84$, $y_0=3.11$, $z_0=3.81$, $M_0=3.13$,即 $L=17.54\text{mm}$ 。

综合解得: $l=56.64/m$,其中,由于 $3.30 \leq M_0 + m \leq 3.70$,所以 $0.27 < m < 0.67$ 。

考虑到红外相机内部布线以及接插件的质量,通过简单测算可引入质量冗余参数 $\varepsilon=0.1$ 。系统总质量若选定为 M ,则 $M=M_0+m+\varepsilon$ 。若选择 $M=3.50\text{kg}$,即 $m=0.37\text{kg}$,同时可得 $L=148.37\text{mm}$ 。已知 L 的取值,即可确定配重质心大概应在的位置。

3.2 配重负载设计原则

设计配重负载应本着以下几点原则^[9-12]:

1) 配重负载组合的数量尽可能少;由于前期设计时产品质心的不确定性,所以一般质心配平的负载往往是以组合的形式出现,采用组合形式的配重负载,不仅具有更好的灵活性,其互换性更是比单一的配重负载要好。但是,数量过多的配重负载也会导致红外相机整机的可靠性降低,且装配工作费时费力。

2) 满足整机重量要求的前提下,重量尽可能轻;对于航空航天类的产品,重量轻意味着运载成本更低,续航里程更远。同时,产品重量的降低也会使生产成本降低,避免了不必要的浪费。

3) 安装方式简洁方便;一方面,简单快捷的安装方式可以有效地节省整机装配的时间。另一方面,特别是在做质心试验时,不同样机实物的质心数据可能有所异同,必要时会更换不同尺寸的配重负载来配平某单个产品的质心,所以简洁的安装方式可以为装配、试验节省很多不必要花费的时间。

4) 互换性好; 弹载红外相机整机是在狭小空间内由众多零件装配而成, 且对内部空间密封有严格要求, 一般充入氮气。如果配重负载装配在红外相机主壳体外部, 将大大提高配重负载的互换性。

- 5) 强度满足使用环境要求;
- 6) 制造成本低;
- 7) 形状简易且尽可能采用共形设计。

3.3 配重负载方案设计

根据仿真计算出的质心范围选取合适的质心位置, 再结合以上几点设计原则, 弹载红外相机配重负载方案如下: 未添加配重的整机质心偏向第三、四象限, 所以配重负载的质心应该在第一象限。根据计算出的配重负载质心位置 l 以及其安装方式的考量, 采用方案为半黄铜 (Cu-Zn 合金) 半硬铝 (Al) 的组合式环形配重负载如图 8 所示, 通过增加配重厚度的方式达到平衡且其安装方式为与整机的前镜头转接座联接。

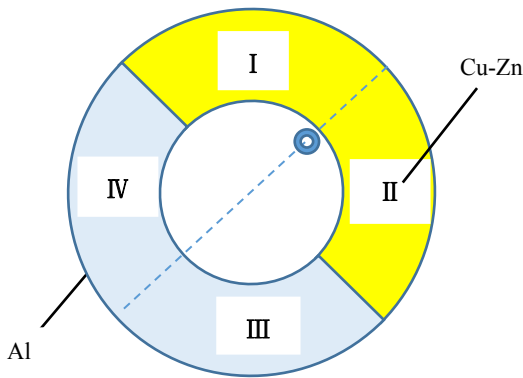


图 8 配重组合方式

Fig.8 Counterweight combination

由于黄铜的密度大约是硬铝密度的 3.25 倍, 所以两部分配重负载质量分配也为 1:3.25, 即黄铜部分的质量为 0.283 kg, 硬铝部分 0.087 kg。根据 Creo 仿真, 可以得出配重负载的厚度 h , 经计算 $h=41$ mm, 如图 9 所示。

4 加配重负载后的整机质量、质心仿真计算

装有上述配重方案的光机系统, 可以通过改变配重厚度 h 调节 X 向质心, 增大 h 可使质心沿 X 负向偏移, 反之正向偏移, 如图 10 所示。通过改变安装角度 θ 可以调节 YOZ 平面的质心位置, 如图 11 所示。综上所述, 此方案理论上可以调节本光机系统空间上的质心位置。

添加配重负载后的整机仿真计算, 求得样机质量 $M_0=3.486$ kg, 质心位置坐标: $x_0=-1.956$ mm, $y_0=3.11$ mm, $z_0=-3.813$ mm, 可得 $|\sigma_x|=1.956$ mm, $|\sigma_y|$

$=3.11$ mm, $|\sigma_z|=3.81$ mm。

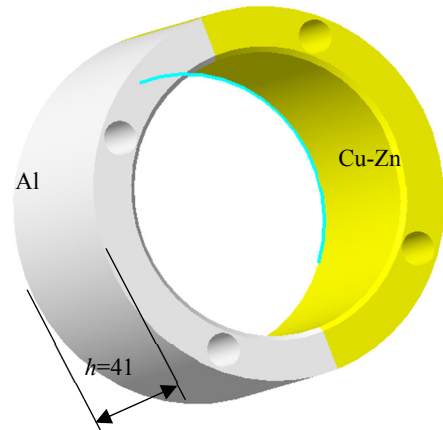


图 9 质心配重三维模型

Fig.9 3D model of the center of mass counterweight

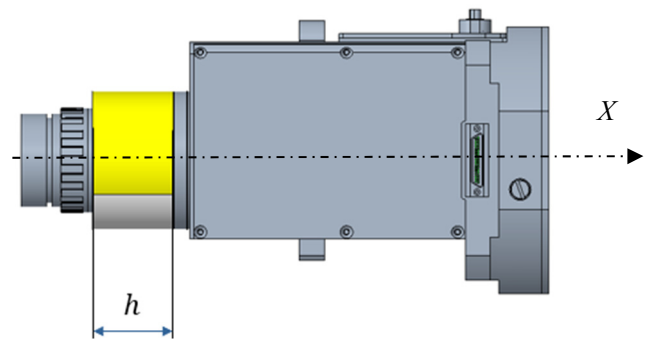


图 10 X 向质心调节

Fig.10 X-direction centroid adjustment

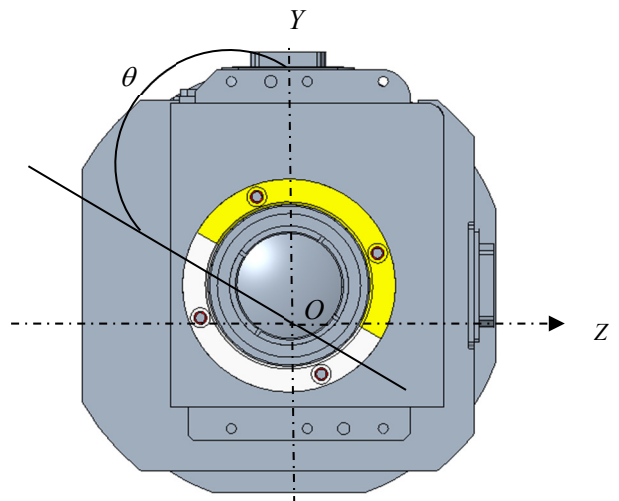


图 11 YOZ 面质心调节

Fig.11 YOZ surface centroid adjustment

5 质心测试

测试温度 12℃；相对湿度：80%RH；测试质量范围：0.5~20 kg，测试精度：10 g；X 方向测试精度：0.2 mm；Y 方向测试精度：0.2 mm；Z 方向测试精度：0.2 mm。单个整机质心需要不同安装方式测试两次，第一次测试 X 向质心数据，安装方式如图 12 所示。第二次更换工装，调整整机摆放姿态测试 Y、Z 向质心数据，安装方式如图 13 所示。测试结果如表 2 所示，与基准值换算结果如表 3 所示。从与基准值换算后的数据可知，质心测试结果符合总体要求。

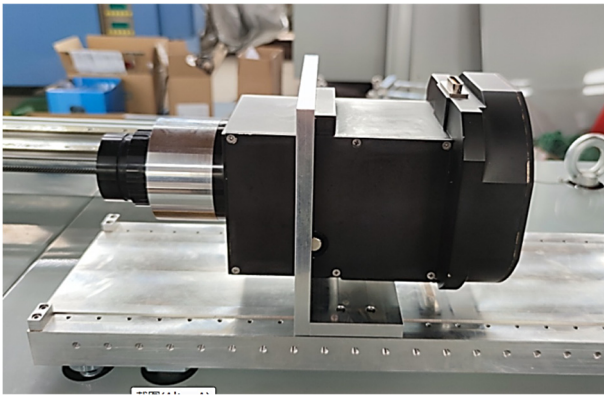


图 12 X 向质心测试

Fig.12 X direction centroid test

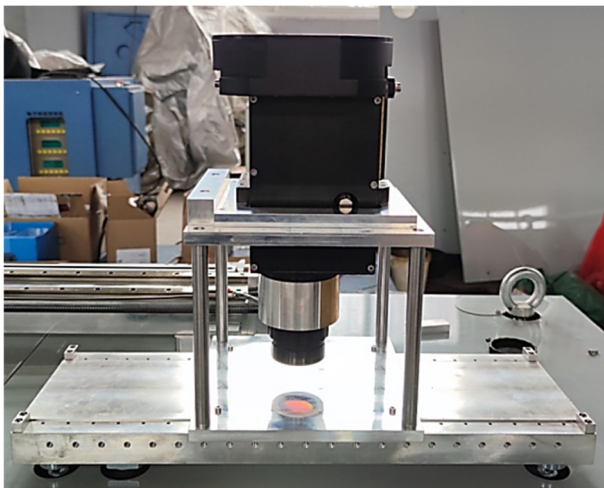


图 13 Y、Z 向质心测试

Fig.13 Y, Z direction centroid test

表 2 质心测试数据

Table 2 Centroid test data

Test items	M/kg	G _x /mm	G _y /mm	G _z /mm
Camera-1#	3.6484	21.52	51.76	48.94
Camera-2#	3.5911	21.11	51.85	49.40

表 3 与基准值对比数据

Table 3 Comparison data with reference value

Test items	ΔM/kg	ΔX/mm	ΔY/mm	ΔZ/mm
Camera-1#	0.1484	-4.78	+4.76	-2.1
Camera-2#	+0.0911	-4.89	+4.85	-1.6

6 结论

传统质心配平方法还停留在依靠工程师的经验感觉来判断操作，耗时费力的同时还无法给出配平后具体的质心偏差量，不利于模型的优化。本文对配平过程进行系统化梳理，总结出一套高效实用的数字化配平方法，其意义在于不仅能够提高配平效率，而且能够提高配平精度，并最终数字化输出配平结果，以利于精准建模，提高整机性能。质心测试结果表明，该方法切实有效。

参考文献：

- [1] 梁彦, 张驰, 梁明. 弹体质量质心测量系统的设计实现及误差分析[J]. 战术导弹技术, 2012(3): 29-33.
LIANG Yan, ZHANG Chi, LIANG Ming. Design implementation and error analysis of missile mass center measurement system[J]. *Tactical Missile Technology*, 2012(3): 29-33.
- [2] 陈阳. 质心位置偏移对导弹稳定回路的影响分析[J]. 兵工自动化, 2020, 39(12): 86-88, 92.
CHEN Yang. Analysis of influence of center of mass position offset on missile stability loop[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2020, 39(12): 86-88, 92.
- [3] 李鹏, 陈艳, 白彦伟, 等. 航天产品质量质心测试精度评估分析[J]. 制造技术研究, 2016, 12(6): 44-47.
LI Peng, CHEN Yan, BAI Yanwei, et al. Evaluation and analysis of the test accuracy of the center of mass of aerospace products[J]. *Manufacturing Technology Research*, 2016, 12(6): 44-47.
- [4] 陈燕. 某型号导弹质量质心测量系统的设计与误差分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
CHEN Yan. Design and Error Analysis of a Certain Type of Missile Mass Center Measurement System[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [5] 王德民, 张龙易, 许镇全, 等. 陆行车质心测量机设计与分析[J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2021, 44(3): 76-82.
WANG Demin, ZHANG Longyi, XU Zhenquan, et al. Design and analysis of land vehicle center of mass measuring machine[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2021, 44(3): 76-82.
- [6] 黄建民, 李三红, 李建功, 等. 一种质量可调并保持质心位置的配重

- 箱[P]. CN110207998A. 2019.
- HUANG Jianmin, LI Sanhong, LI Jiangong, et al. A counterweight box with adjustable mass and maintaining the position of the center of mass [P]. CN110207998A. 2019.
- [7] 陈小军. 基于NX运动仿真的偏心车夹具动平衡设计[J]. *装备制造技术*, 2019(3): 144-147.
- CHEN Xiaojun. Dynamic balance design of eccentric car fixture based on NX motion simulation[J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2019(3): 144-147.
- [8] 张群, 杨勇, 杨自鹏, 等. 基于多分离剖面的航天器质心优化技术[J]. *导弹与航天运载技术*, 2019(5): 23-28.
- ZHANG Qun, YANG Yong, YANG Zipeng, et al. Spacecraft centroid optimization technology based on multiple separation profiles [J]. *Missile and Space Vehicle Technology*, 2019(5): 23-28.
- [9] 徐远, 易均, 邓合, 等. 基于结构反求的折线轴无试重动平衡方法[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(22): 263-270.
- XU Yuan, YI Jun, DENG He, et al. Test-free dynamic balance method for broken line shaft based on structural inverse calculation [J]. *Vibration and Shock*, 2019, 38(22): 263-270.
- [10] 樊新华. 非规则外形产品定质心测量技术研究实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- FAN Xinhua. Research and Implementation of Center of Mass Measurement Technology for Irregular Shape Products[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012.
- [11] 沈惠平, 聂亚彪, 李菊, 等. 基于有限位置法的冲压机构摆动力完全平衡设计[J]. *农业机械学报*, 2021(4): 384-391.
- SHEN Huiping, NIE Yabiao, LI Ju, et al. Complete balance design of swing force of stamping mechanism based on finite position method[J]. *Journal of Agricultural Machinery*, 2021(4): 384-391.
- [12] 雷正保, 王胜. 可变自身质量 2.5~3.5 t 的碰撞试验台车优化设计[J]. *机械设计*, 2021, 38(5): 33-39.
- LEI Zhengbao, WANG Sheng. Optimal design of a crash test RIG with a variable mass of 2.5~3.5 t [J]. *Mechanical Design*, 2021, 38(5): 33-39.