

文章编号 1004-924X(2017)增-0045-07

星球车质心测量系统的研制与误差估计

那 强¹, 王婉秋², 陶建国^{1*}

(1. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要:为了实现星球车悬吊式低重力补偿试验及测量不同工况下星球车的质心变化,研制了一套星球车质心测量系统,该系统可以通过一次在线测量和一次辅助测量获得星球车在不同工况下的质心位置。首先,提出并研制了主要由六套可升降关节臂式电子秤组成的星球车质心测量系统。该系统利用举升法和侧倾平台法结合的原理,通过各电子秤测量不同工况下各车轮的压力,经计算获得相应工况的整车质心;然后,阐述了系统的测量原理和步骤,给出了基于星球车各车轮的压力值的质心位置矢量及其各坐标分量的计算模型;最后,分析了包括系统误差、随机误差和粗大误差对测量结果的影响,给出了消除或减小误差的措施,并定量分析了系统由各类传感器测量产生的系统误差。计算分析表明:该系统各方向的最大测量误差分别为0.694, 0.163和0.255 mm,合成误差不大于0.757 mm,满足星球车不同工况下质心位置测量精度的要求。

关键词:星球车;质心测量;电子秤;关节臂式;误差分析

中图分类号:V416.8;V448.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172514.0045

Development and error estimation of centroid measurement system for planet rover

NA Qiang¹, WANG Wan-qiu², TAO Jian-guo^{1*}

(1. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China)

* Corresponding author, E-mail: jgtao@hit.edu.cn

Abstract: In order to realize low gravity compensation experiment of a overhung planet rover and understand the centroid variation of the planet rover in different working conditions, a planet rover centroid measurement system was designed. The system can measure the centroid position of the planet rover under different working conditions by one on-line measurement and one auxiliary measurement. Firstly, a centroid measurement system for planet rover was developed, which was mainly composed of six sets of height-adjustable and joint arm type electronic scale measuring unit. Combined lifting method with tilting-platform method, the rover centroid was calculated by measuring the pressure of every wheel in different operating conditions with every electronic scale. Secondly, the measuring steps and methods of the system were described. The calculation model of centroid position vector and its coordinate components were derived based on the measurement of every wheel pressure. Thirdly,

收稿日期:2017-08-28;修订日期:2017-09-15.

基金项目:国家教育部“111”计划资助项目(No. B07018)

the error of the measurement system was analyzed, including systematic error, random error and accidental error, and the measures to eliminate or reduce the errors were proposed. Moreover, the systematic errors caused by sensor measurements were quantitatively analyzed. The results show that the maximum measurement error in each direction is 0.694, 0.163 and 0.255 mm respectively, and the overall error is less than 0.757 mm. The proposed system can meet the planet rover center of mass measurement accuracy requirements in different working conditions.

Key words: planet rover; centroid measurement; electronic scale; joint arm type; error analysis

1 引言

星球车是一种能够在星球表面行驶并完成星球探测、考察、收集和分析样品等复杂任务的专用车辆,其中月球车也叫做“月表巡视探测器”,火星车也叫做“火星漫游车”。

质心位置参数是星球车的重要参数之一。首先,星球车的质心作为其定位的重要参考,对星球车的运动轨迹、行驶速度、运动方向等有着重要影响。其次,星球车的控制以质心位置为基准,质心位置的偏差使姿态调整需要更多能量,经过一定距离和时间的累积,星球车会偏离既定轨道。如果不能准确掌握星球车的质心位置,其控制性能会受到很大影响,进而使得能耗增加,影响其使用寿命。同时,由于星表地形的不确定性,星球车工作时往往会涉及到爬坡和越障,而质心位置是其运动稳定性及爬坡和越障能力的重要影响因素。所以,准确掌握星球车的质心位置信息,有助于掌握星球车的运动参数,提高星球车的控制性能、增加越障性能并减少能耗。

为了实现星球车悬吊式低重力补偿试验^[1]并准确了解不同工况下星球车质心的变化规律,在对其质心位置进行计算和模拟的同时,必须进行试验验证。目前,国内外测量质心位置有许多不同的方法和设备。质心测量方法主要包括两类:一类是静态测量方法,另一类是动态测量方法。静态测量方法包括悬吊法、零位法、质量反应法和多点支撑法等。动态方法包括复摆法、旋转平衡法和转动惯量法等。

NASA 哥达德空间飞行中心(Goddard Space Flight Center)的质心/转动惯量/惯性积三合一综合测试设备(MPMF)^[2],利用转动惯量法准确测量航天器的质心位置等质量特性。法国航天局

(CNES)的质心/转动惯量二合一测试设备^[3],利用多点支撑法可在一次试验同时获得被测件的质量和各方向的质心坐标。哈尔滨工业大学研制的两自由度电液伺服控制车辆质心测量系统^[4],利用静态称重原理能够完成对车辆质心位置的测量。厦门市产品质量监督检验院所研制的车辆质心位置测量系统^[5],利用举升法测量客车等车辆的质心位置。Nripen Mondal 和 Sanjib Acharyya 等采用无阻力扭转振荡法进行飞行器或潜艇的质心等参数,并根据不同部件的固有频率进行优化^[6]。Ping Xianyao 和 Tan Gangfeng 等根据车轮压力变化设计一种车载摩托车重力和质心测量系统,该系统可灵活移动、方便使用^[7]。S Zarovy 和 M Costello 等利用扩展监视器采用一种非线性算法来估算飞行中的直升机质量及其质心位置,并对直升机的维修和寿命给出指导建议^[8]。哈尔滨理工大学的杨丽君采用左右倾斜平台的方法测量大型车辆的质心位置^[9]。陆森兴等采用吊起法研制了一种专用汽车质心测量装置^[10]。周念等结合称重与力矩平衡两种方法,研制了一种测量校质量不规则物体质心的装置,能够有效地测量航天服等不规则物体的质心^[11]。魏新国等对星敏传感器质心定位系统误差的 S 曲线误差来源进行了分析,并给出补偿策略^[12]。但是,目前还没有用于六轮式星球车质心位置随太阳翼等车载机构展开而变化的测量设备。

星球车相比于一般被测元件有三个显著特点:(1)工作环境特殊。星球车工作在星球表面,所受的星球重力一般低于地球重力,如月球重力为地球重力的六分之一,火星重力为地球重力的 0.38 倍;(2)前后车轮相对位置可变。星球车在越障时会调整车轮位姿,这就使得其重心位置因姿态不同而发生变化;(3)车载太阳翼位置可变。在太阳翼处于展开和收拢状态时,其质心位置

不同。

针对上述特点,本文讨论了星球车质心测量系统,采用举升法与侧倾平台法相结合的原理,通过一次在线测量和一次辅助测量即可获得星球车在不同工况下的质心位置。本文介绍了星球车质心测量系统的构成和测量步骤,给出质心测量模型,并针对系统误差进行定量分析。

2 质心测量系统构成及其测量原理

2.1 测量系统构成

如图 1 所示,质心测量系统是由一个测试台和一个控制台组成的半自动化测量系统,测试台和控制台独立安装,控制台和测试台之间由电缆和信号线连接。

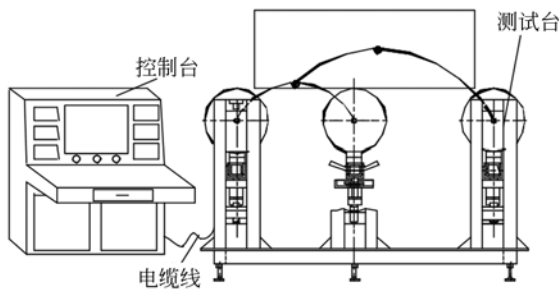


图 1 质心测量系统组成图

Fig. 1 Composition of centroid measurement system

测试台主要由一个底座平台、六套可升降关节臂式电子秤测量单元、一个可升降支承台单元、六个可调支脚和六个运动脚轮等组成,如图 2 所示。底座平台由六个可调支脚稳定支撑,六套可升降关节臂式电子秤测量单元左右对称安装在底座平台上,可升降支承台单元安装在底座平台上的中间位置。六个可调支脚升起时,底座平台由六个运动脚轮支承,可以方便移动测试台位置。

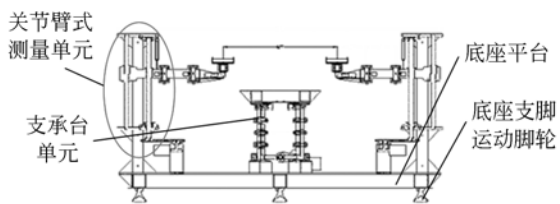


图 2 测试台机械结构图

Fig. 2 Mechanical structure of test bed

每套可升降关节臂式电子秤测量单元与星球车的一个待测车轮相对应,由支撑立柱、电动可升降关节臂、升降位移传感器、关节角度位移传感器和电子秤等部分组成,实现每个车轮的压力测量,如图 3 所示。由立柱支撑的电动可升降关节臂具有一个电控升降关节和三个被动的水平转动关节,可以适应星球车不同姿态的质心位置测量。机械臂的三个水平转动关节可以通过锁紧机构人工锁定。

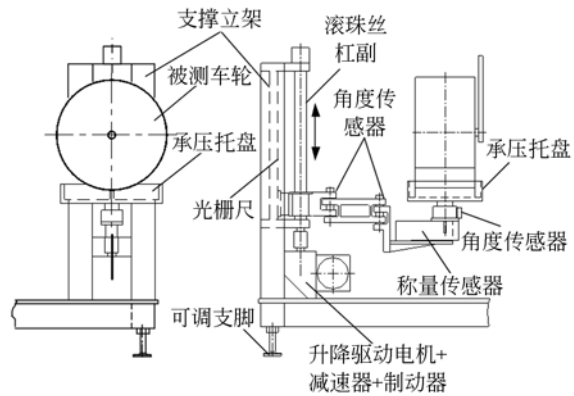


图 3 压力测量单元结构图

Fig. 3 Mechanical structure of pressure measurement unit

测试台可灵活移动位置,工作时可固定位置并调节水平。采用可升降关节臂式测量单元可以适应不同类型星球车,如月球车和火星车;同时可测量星球车在不同姿态下的质心位置。

2.2 测量步骤和原理

坐标系 $O-XYZ$ 建立在测试台上,其中原点 O 为中间两立柱连线中点, OX 轴为平台短边方向, OY 轴为平台长边方向, OZ 轴为竖直方向。称重传感器测力方向沿 OZ 轴。

求解参数为星球车质量 m ,星球车质心为 C 点的位置坐标 (x_c, y_c, z_c) 。将机械臂和车轮进行编号 1~6,机械臂升降移动关节编号为 1,水平转动关节分别编号为 2 和 3。已知机械臂立柱安装点的坐标: $(x_{i0}, y_{i0}, z_{i0}), i=1, 2, \dots, 6$,机械臂臂长: l_1, l_2, l_3 ,星球车车轮半径 R 和车轮中心距 L 。具体测量步骤如下:

第 1 步:利用支承台将星球车顶起,调节测试台机械臂高低位置并记录 $d_{i1}, i=1, 2, \dots, 6$ 。

第 2 步:降低支承台高度至最高电子秤单元的承压托盘与车轮接近时停止,调整各车轮对应的机械臂,使其承压托盘中心对准车轮。

第 3 步:继续降低支承台直至每个托盘中心对准对应车轮,星球车完全由托盘支撑,支承台与星球车脱离。记录机械臂关节 2 角度 θ_{2i} 和关节 3 角度 θ_{3i} , $i=1,2,\dots,6$ 。

第 4 步:使用恒定拉力系统对星球车施加拉力,模拟星球重力。记录各称重传感器测量值 G_i 和此时星球车倾角传感器得水平倾角数值 α , $i=1,2,\dots,6$ 。

第 5 步:辅助测量,将一侧的三个机械臂升高相同距离,记录此时各称重传感器的测量值 G_i' 和倾角传感器数值 α' , $i=1,2,\dots,6$ 。

第 6 步:重复第 1~5 步,将 3 次测量结果取平均值。

2.3 星球车星球重力及质心位置求解

星球车星球重力为:

$$G = \sum_{i=1}^6 G_i. \quad (1)$$

星球车质量为:

$$m = G/g_s, \quad (2)$$

其中 g_s 为星球重力加速度。

在固定坐标系下,托盘中心与车轮接触点的位置矢量为:

$$\mathbf{r}_i = \mathbf{r}_{0i} + \mathbf{r}_{1i} + \mathbf{r}_{2i} + \mathbf{r}_{3i}, i = 1, 2, \dots, 6, \quad (3)$$

其中:立柱安装点位置矢量 $\mathbf{r}_{0i} = (x_{0i}, y_{0i}, 0)$; 关节 1 的相对位置矢量 $\mathbf{r}_{1i} = ((-i)^{i+1} l_1, 0, d_{1i})$; 关节 2 的相对位置矢量 $\mathbf{r}_{2i} = (l_2 \cos \theta_{2i}, l_2 \sin \theta_{2i}, 0)$; 关节 3 的相对位置矢量 $\mathbf{r}_{3i} = (l_3 \cos(\theta_{2i} + \theta_{3i}), l_3 \sin(\theta_{2i} + \theta_{3i}), 0)$

在固定坐标下系统处于静力平衡状态,即有:

$$\mathbf{r}_c \times \mathbf{G} + \sum_{i=1}^6 \mathbf{r}_i \times \mathbf{G}_i = 0. \quad (4)$$

质心位置水平方向的坐标为:

$$x_c = -H \sum_{i=1}^6 [G_i (x_{0i} + (-1)^{i+1} l_1 + l_2 \cos \theta_{2i} + l_3 \cos(\theta_{2i} + \theta_{3i}))], \quad (5)$$

$$y_c = -H \sum_{i=1}^6 [G_i (y_{0i} + l_2 \sin \theta_{2i} + l_3 \sin(\theta_{2i} + \theta_{3i}))], \quad (6)$$

其中 $H = (\sum_{i=1}^6 G_i)^{-1}$ 。

星球车处于水平倾角 α (角度为 $0 \sim 20^\circ$) 时,几何关系如图 4 所示。结合辅助测量可以求得质心 z 方向的坐标为:

$$z_c = d_{11} + R + x_c \tan \alpha + z_{c0} / \cos \alpha, \quad (7)$$

其中:

$$z_{c0} = -L \frac{\frac{G_2 + G_4 + G_6}{G \cos \alpha} - \frac{G_2' + G_4' + G_6'}{G' \cos \alpha'}}{\tan \alpha - \tan \alpha'}.$$

由式(5)~式(7)可知,星球车质心在固定坐标系下的位置矢量 $\mathbf{r}_c = (x_c, y_c, z_c)$ 。

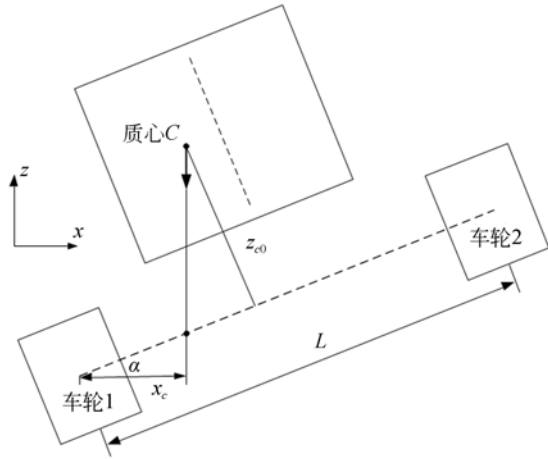


图 4 z 方向质心坐标测量

Fig. 4 Measurement of centroid coordinate in z direction

3 测量精度分析

3.1 误差来源

该星球车质心测量系统的测量误差可分为系统误差、随机误差和粗大误差。

系统误差主要包括:测试台机械加工误差、立柱安装位置误差,测试台的变形、机械臂关节间的摩擦力矩、传感器测量误差和传感器安装位置误差等。由加工安装引起的误差可以通过提高机械加工和安装工艺水平,对平台进行合理的分析设计以及关节的精密加工来减小;加工安装后的系统误差可通过修正补偿法来减小或剔除。

随机误差包括:称重和位置传感器的非重复性误差、测量环境变化引起的误差、人员测量操作

引起的误差等。随机误差由诸多不可调节因素造成,难以通过补偿的方法予以剔除。系统设计时应合理选用传感器的类型和精度等级,减小传感器的非重复性测量误差;同时,测量时应尽量避免环境因素的变化,如实验过程中的温湿度变化、噪声干扰、磁场扰动等对测量结果的影响;此外,测量人员应规范操作、准确读数,以规避人为因素引起的测量误差。

粗大误差为明显超过误差预期的误差,多由某些突发性因素造成,可人为剔除,也可按照一定的判决标准予以剔除。

3.2 误差估计

在假定无随机误差和粗大误差的条件下,分析由位移、角位移和称重传感器等四类测量产生的系统误差对质心测量结果的影响。质心测量系统所用的传感器类别、测试参数及精度见表 1。

由前述分析可知,质心位置可表达为测量值的函数:

$$\mathbf{r}_c = f(\mathbf{d}_1, \boldsymbol{\theta}_2, \boldsymbol{\theta}_3, \mathbf{G}), \quad (8)$$

$$\Delta x_c = -H \left\{ \sum_{i=1}^6 [G_i (-l_2 \sin \theta_{2i} - l_3 \sin(\theta_{2i} + \theta_{3i})) \cdot \Delta \theta_{2i}] + \sum_{i=1}^6 [G_i (-l_3 \sin(\theta_{2i} + \theta_{3i})) \cdot \Delta \theta_{3i}] + H \sum_{j=1}^6 [(x_{j0} + (-1)^{j+1} l_1 + l_2 \cos \theta_{2j} + l_3 \cos(\theta_{2j} + \theta_{3j})) \sum_6 (G_i \cdot \Delta G_j)] \right\}, \quad (10)$$

$$\Delta y_c = -H \left\{ \sum_{i=1}^6 [G_i (l_2 \cos \theta_{2i} + l_3 \cos(\theta_{2i} + \theta_{3i})) \cdot \Delta \theta_{2i}] + \sum_{i=1}^6 [G_i (l_3 \cos(\theta_{2i} + \theta_{3i})) \cdot \Delta \theta_{3i}] + H \sum_{j=1}^6 [(y_{j0} + l_2 \sin \theta_{2j} + l_3 \sin(\theta_{2j} + \theta_{3j})) \sum_6 (G_i \cdot \Delta G_j)] \right\}, \quad (11)$$

$$\Delta z_c = \Delta d_{11} + \Delta x_c \tan \alpha. \quad (12)$$

误差为:

$$|\Delta \mathbf{r}_c| = \sqrt{\Delta x_c^2 + \Delta y_c^2 + \Delta z_c^2}. \quad (13)$$

即误差数值可表示为测量值的函数: $\Delta \mathbf{r}_c = f(\mathbf{d}_1, \boldsymbol{\theta}_2, \boldsymbol{\theta}_3, \mathbf{G})$ 。由该函数作图分析,在工作范

表 1 传感器测量参数

Tab. 1 Parameters of measurement sensors

类别	测量参数	精度	参数范围
光栅尺	d_{i1}	$5 \mu\text{m}$	1000 mm
角度传感器	θ_{2i}	0.05°	90°
角度传感器	θ_{3i}	0.05°	120°
称重传感器	G_i	0.01 N	750 N

其中:

$$\mathbf{d}_1 = (d_{11}, d_{12}, \dots, d_{16})^T,$$

$$\boldsymbol{\theta}_2 = (\theta_{21}, \theta_{22}, \dots, \theta_{26})^T,$$

$$\boldsymbol{\theta}_3 = (\theta_{31}, \theta_{32}, \dots, \theta_{36})^T,$$

$$\mathbf{G} = (G_1, G_2, \dots, G_6)^T.$$

由误差传递理论和应用^[13,14]可知,质心位置测量系统误差与测量误差间的关系为:

$$\Delta \mathbf{r}_c = \frac{\partial \mathbf{r}_c}{\partial \mathbf{d}_1} \Delta \mathbf{d}_1 + \frac{\partial \mathbf{r}_c}{\partial \boldsymbol{\theta}_2} \Delta \boldsymbol{\theta}_2 + \frac{\partial \mathbf{r}_c}{\partial \boldsymbol{\theta}_3} \Delta \boldsymbol{\theta}_3 + \frac{\partial \mathbf{r}_c}{\partial \mathbf{G}} \Delta \mathbf{G}. \quad (9)$$

将式(4)~式(7)代入式(9),忽略高阶小项可得质心坐标分量误差为:

围内各测量参数变化与质心位置误差间的关系如图 5 所示。由于各种传感器测量相对独立,在分析某类参数测量误差时,假定其他参数测量误差为零。独立分析各类误差后,将其合成,即为质心位置因传感器测量产生的最大系统误差。

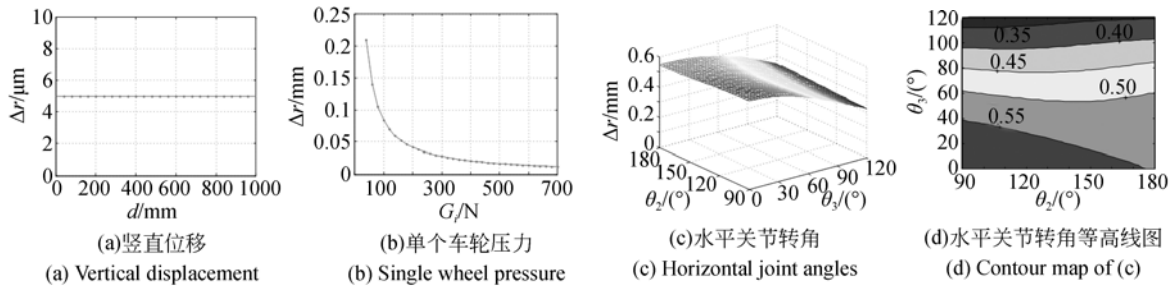


图 5 质心位置误差与测量参数关系图

Fig. 5 Relationship between centroid measuring error and measurement parameters

由图 5(a)可知,在工作范围内机械臂移动关节 1 位移测量引起的质心位置误差较稳定,误差为: $\Delta r_1 \approx 5 \times 10^{-3}$ mm。

从图 5(b)可知,称重传感器测量值越大,引起的质心位置误差越小。在量程范围内,最大误差约为: $\Delta r_4 \approx 0.215$ mm。

由于机械臂由转动关节 2 和关节 3 相连,两关节存在耦合关系。所以同时分析转动关节 2 和关节 3 的工作范围与质心位置误差的关系。从图 5(c)可知,关节 2 转角越大,关节 3 转角越小时误差较大。从图 5(d)可知,由机械臂转动关节 2、3 测量引起的误差最大值约为: $\Delta r_{23} \approx 0.584$ mm (火星车倾角 $\alpha=20^\circ$)。

合成上述误差,由传感器测量引起的星球车质心测量系统误差的最大值为: $\Delta r \approx 0.757$ mm,各误差分量见表 2。

表 2 误差计算结果

Tab. 2 Result of error calculation

误差源	Δx	Δy	Δz	Δr
d_1 测量	0	0	0.005 0	0.005
θ_2 与 θ_3 测量	0.550 0	0.013 1	0.198 0	0.584
G _i 测量	0.144 0	0.150 0	0.052 4	0.215
合成	0.694 0	0.163 1	0.255 4	0.757

参考文献:

- [1] 刘振. 星球车单吊索重力补偿与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
LIU ZH. *Single-cable Gravity Compensation for Planetary Rovers and Experimental Researches* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [2] ROSS B P, MCLEOD C. Upgrade of the goddard space flight center's mass properties measuring facility[J]. *Dupadhkuhk*, 2004, 129(3360): 1415-1416.
- [3] 王洪鑫, 徐在峰, 赵科, 等. 航天器质量特性测试技术新进展[J]. *航天器环境工程*, 2011, 28(2): 171-174.
WANG H X, XU Z F, ZHAO K, *et al.*. Recent advances of mass property measuring technology for spacecraft[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2011, 28(2): 171-174. (in Chinese)

4 结 论

本文根据星球车特点,利用举升法与侧倾法相结合的原理,研制了一套测量六轮式星球车质心位置测量系统,用以分析测量星球车的质心位置。该系统可以测量星球车在太阳翼等车载机构展开等不同工况下,以及进行悬吊式低重力补偿试验时的质心位置。该系统采用可升降关节臂式测量单元,通过一次在线测量测得车体质心二维坐标,附加一次辅助测量可以得出不同工况下星球车质心位置的三维坐标,同时还可以测量不同类型星球车的质心位置,如月球车和火星车。介绍了星球车质心测量系统的组成和测量步骤,并结合测量原理给出质心测量公式,然后对系统误差、随机误差和粗大误差进行分析。最后,根据误差理论定量分析系统误差值,计算得出系统各方向的最大测量误差分别为 0.694, 0.163 和 0.255 mm,合成误差不大于 0.757 mm,满足星球车不同工况下质心位置测量精度的要求。

- [4] 赵新通, 姜洪洲, 韩俊伟. 车辆质心位置测量系统的研制[J]. *哈尔滨商业大学学报: 自然科学版*, 2004, 20(3): 304-306, 312.
ZHAO X T, JIANG H ZH, HAN J W. Study on development of vehicle mass and centroid measurement system[J]. *Journal of Harbin University of Commerce: Natural Sciences Edition*, 2004, 20(3): 304-306, 312. (in Chinese)
- [5] 倪栋, 王一峰. 车辆质心位置测量系统的研制[J]. *工程机械*, 2011, 42(2): 19-21.
NI D, WANG Y F. Research of a measuring system for mass center position of vehicles[J]. *Construction Machinery and Equipment*, 2011, 42(2): 19-21. (in Chinese)
- [6] MONDAL N, ACHARYYA S, SAHA R, *et al.*. Optimum design of mounting components of a mass property measurement system [J]. *Measurement*, 2016, 78: 309-321.
- [7] PING X, TAN G, LIU B, *et al.*. On-board mass

- and center of gravity of motor vehicles measurement system[R]. SAE Technical Paper 2017-01-0431, 2017.
- [8] ZAROVY S, COSTELLO M. Extended state observer for helicopter mass and center-of-gravity estimation[J]. *Journal of Aircraft*, 2015, 52(6): 1939-1950.
- [9] 杨丽君. 基于侧倾法的车辆质心测量台技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2015.
YANG L J. *Research on Technologies of the Vehicle Centroid Measurement Platform Based on the Tilting Method*[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [10] 陆森兴. 专用汽车质心位置计算及验证方法[J]. 现代商贸工业, 2015, 36(10): 185-186.
LU S X. Calculation and verification method of center of gravity for special vehicle[J]. *Modern Business Trade Industry*, 2015, 36(10): 185-186. (in Chinese)
- [11] 周念, 张万欣, 司怀吉. 小质量不规则物体质心测量方法研究[J]. 载人航天, 2017, 23(3): 408-413.
ZHOU N, ZHANG W X, SI H J. Research on centroid measurement method of small mass and irregular structure objects [J]. *Manned Spaceflight*, 2017, 23(3): 408-413. (in Chinese)
- [12] 魏新国, 徐佳, 张广军. 星敏感器质心定位的 S 曲线误差补偿[J]. 光学精密工程, 2013, 21(4): 849-857.
WEI X G, XU J, ZHANG G J. S-curve error compensation of centoiding location for star sensors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(4): 849-857. (in Chinese)
- [13] 刘博, 叶东, 车仁生. 火箭喷管三维运动测试的校准装置及误差分析[J]. 光学精密工程, 2009, 17(7): 1553-1560.
LIU B, YE D, CHER SH. Calibration equipment for rocket nozzle motion testing and its error analysis[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(7): 1553-1560. (in Chinese)
- [14] 余跃庆, 田浩. 运动副间隙引起的并联机器人误差及其补偿[J]. 光学精密工程, 2015, 23(5): 1331-1339.
YU Y Q, TIAN H. Error and compensation of parallel robot with joint clearances [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(5): 1331-1339. (in Chinese)

作者简介:



那 强(1993—),男,黑龙江牡丹江人,硕士研究生,2014 年于上海交通大学获得学士学位,主要从事宇航空间机构的研究。E-mail:1142636895@qq.com



王婉秋(1980—),女,北京人,高级工程师,2002 年于北京科技大学获得学士学位,2007 年于中国空间技术研究院获得硕士学位,主要从事航天器地面环境试验及相关设备的研究工作。E-mail:wangwanqiu87@126.com

通讯作者:



陶建国(1964—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,教授,博士生导师,2009 年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要研究方向为特种机器人技术、宇航空间机构及控制。E-mail:jgtao@hit.edu.cn