

航天器快速展开机构动态角度测量方法

赵卓茂, 于 杨, 丁 沛, 任海臣

(北京强度环境研究所, 北京 100076)

摘要:为在地面试验中获取航天器快速展开机构的动态旋转角度,提出以测量位移数据结合几何关系计算的解决思路;对靶线通断法、拉线位移法、三角激光法和高速摄像法四种方法的特点逐一梳理,分别总结出地面试验的适应性技术方案和试前注意事项;通过4种方法的优缺点分析和试验数据对比,归纳了应用于试验的参考意见。

关键词:快速展开机构;动态角度测量;位移测量;非接触

本文引用格式:赵卓茂,于杨,丁沛,等.航天器快速展开机构动态角度测量方法[J].兵器装备工程学报,2019,40(5):171-175.

Citation format:ZHAO Zhuomao, YU Yang, DING Pei, et al. Dynamic Angle Measurement of Expanded Mechanism in Space Vehicle[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(5): 171-175.

中图分类号:TJ06;TJ76

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2019)05-0171-05

Dynamic Angle Measurement of Expanded Mechanism in Space Vehicle

ZHAO Zhuomao, YU Yang, DING Pei, REN Haichen

(Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: In order to obtain the dynamic rotation angle of the spacecraft expanded mechanism in the ground test, a solution of measuring the displacement data combined with the geometric relationship calculation was proposed. Based on target wire method, cable-extension displacement method, laser triangulation method and high speed camera method, the technical scheme and details for dynamic angle measurement were put forward. Making a comparison of advantages and disadvantages of four methods, references for dynamic rotation angle experiment were suggested.

Key words: expanded mechanism; dynamic angle measurement; displacement measurement; non-contact

航天器在飞行过程中部件分离、姿轨控制等动作的指令,往往通过各类火工装置触发功能部件执行。关键性动作,如助推器分离、整流罩分离和级间分离等均需地面试验考核^[1]。快速展开机构覆贴在结构主体外围,同样需要地面试验验证支持。快速展开板绕固定轴旋转展开,展开角度一般不超过30°,需要实现气动特性功能。该机构多含有轴对称分布的数组结构组件,具有打开时间短,定位精度高和同步性高等特点。若打开动作执行不力,可能导致航天器整体性能损伤甚至失效^[2-3]。地面试验主要考核快速展开板打开同步性和验证限位功能可靠性。必要时还需获取旋转角

度随时间历程变化的详细动态数据,为建立和修正仿真模型提供支撑^[4]。

航天器的动态角度测量,一般采用在火工品工作完全结束后,由陀螺传感器获取角速度数据后积分的方法^[5-6]。火工品工作时,传感器处于振动环境,数据积分后精度很差。目前,关于涉火工装置的动态角度测量研究很少,尚未见到相关方法的系统分析。根据快速展开机构以刚性运动为主的特点,提出了位移测量结合几何关系计算获取快速展开板动态角度的问题解决思路。

出于技术沿用性和可靠性考虑,航天器火工装置动作行

收稿日期:2019-02-15;修回日期:2019-03-18

作者简介:赵卓茂(1987—),男,硕士,工程师,主要从事动力学试验、水下弹射试验技术研究。

程的测量常采用靶线传感器和拉线位移传感器。但其均为接触式测量,存在可能干扰功能性动作、精度较差的明显缺点,并非最优选择。而近年来发展迅速的非接触式传感器在地面试验中的优势逐步显现,数据捕捉相对更精细准确,是传统方法的替代或补充^[7]。其中的代表是激光测距和高速摄像测距。

结合以上四种方法的特点和以往试验经验分析,对于航天器快速展开机构展开试验的角度测量需求,应可给出针对性强、可实施的方案和技术实现细节,并能通过试验结果进一步总结各方法的优劣势和适应性。文中仅涉部分利于阐述和比较方法的数据,不再展开详述试验过程和全部数据对比分析。

1 展开角度的几种测量方法

航天器快速展开机构示意图如图1所示,数组快速展开机构沿结构主体中心轴对称环向分布。每组快速展开机构接到发控指令后,动作器牵动快速展开板绕固连在结构主体上的旋转轴,由内向外从竖直方向开始展开直至限位。限位机构在动作执行后应可靠自锁,并保证快速展开机构的整体刚度和稳定性。快速展开机构整个动作时间为数百毫秒,快速展开板大幅旋转持续时间为几十毫秒。为快速执行动作,动作器由火工品触发,不局限于顶杆形式^[8]。为保证快速展开机构动作的一致性,多快速展开板可共用1个动作器或设置联动机构。试验不要求小角度测量的准确性和高分辨率。靶线通断法、拉线位移法和三角激光法均需要同时布置多套传感器,一套传感器对应一个快速展开板。高速摄像法仅需一台像机即可同画幅囊括整个试件。

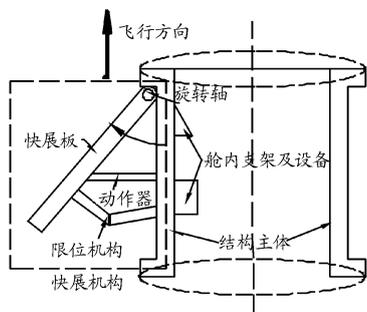


图1 航天器快速展开机构示意图

1.1 靶线通断法

靶线通断法常见于军品弹药性能测试,一般用于获取炸药爆速、弹丸弹道速度和分离切割物的断开时间等^[9]。其原理为被测物体高速穿破靶线,形成通—断或断—通的电参数改变,可根据变化量来直接或间接计算求得变化时间或飞行速度,但不能直接得到连续位移信息。靶线一般选取延展率较低的纤细金属丝。如图2所示,对单个快速展开机构而言,可将一组不同长度的连续靶线分别固定在主体和快速展开板上。每组靶线含 $L_1 \sim L_5$ 共5根,按快速展开板完全张开

的5%、25%、50%、75%、95%调整连接长度后依次固定。各靶线串接对应电阻 $R_1 \sim R_5$ 后并联成一靶体,再整体串联 R_x 后两端施加预设电压 U 。当快速展开板展开时, $L_1 \sim L_5$ 依次在各预设角度断裂,采集器获取的 R_x 电压信号同时跃变,可据此判断快速展开板展开过程。

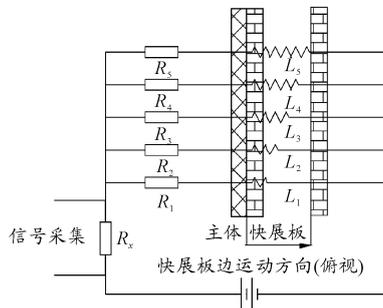


图2 一组靶线测量原理图

采集器获取的 R_x 两端电压的5次阶跃幅值应大致相等。直流电源的输出电压可设为12V,各电阻阻值应远大于靶线本体电阻且阻值不能随意选取。以 R_x 为参照电阻,各电阻阻值和计算电压值见表1。当参照电阻 $R_x = 1\ 000\ \Omega$ 时, R_1, R_2, R_3, R_4, R_5 应分别选333 $\Omega, 1\ 000\ \Omega, 2\ 000\ \Omega, 3\ 333\ \Omega, 5\ 000\ \Omega$ 阻值电阻或阻值相近的标准电阻。测量精度主要受靶线本身断裂时受拉变形和安装工艺影响。实际应用时,多组快速展开板数据间同步性对比散差会十分明显。靶线相对纤弱,在安装过程中和安装后容易脆断,极大限制了试验其他操作和应用环境。

表1 各电阻阻值及计算电压值

电阻	阻值	已断靶电阻	并联总电阻	R_x 端电压/V
R_1	$0.33 R_x$	无	$2 R_x$	10
R_2	$1 R_x$	R_1	$5 R_x$	8
R_3	$2 R_x$	$R_1 R_2$	$1 R_x$	6
R_4	$3.33 R_x$	$R_1 R_2 R_3$	$2 R_x$	4
R_5	$5 R_x$	$R_1 R_2 R_3 R_4$	$5 R_x$	2
R_x	$1 R_x$	$R_1 R_2 R_3 R_4 R_5$		0

1.2 拉线位移法

拉线位移传感器内设旋转编码器和绞盘组件,因其具有结构小巧、便于布置、价格低廉的优势,在制造业中普遍应用^[10]。传感器引出拉线测量直线位移,可作单轴位移测量和动态空间测量。根据不同个数的排布特点,可分为一站法、二站法、三站法以及四站法,实现空间点坐标测量的要求。在航天领域,该类传感器在地面和飞行试验中均可见到,常用于运载器和武器的整流罩分离、各级间分离和尾罩分离等关键时刻的相对行程参数位置判断,是重要的弹上“两器”部件^[11]。

展开试验选点应以无干涉、位移最大化,以及拉线延长

线与结构主体轴线垂直相交为原则。如图3所示,传感器主体通过支架安装在主体近末端内壁,牵引线水平拉出后将端头固定在快速展开板上,保证初始位置落入测量有效区间。

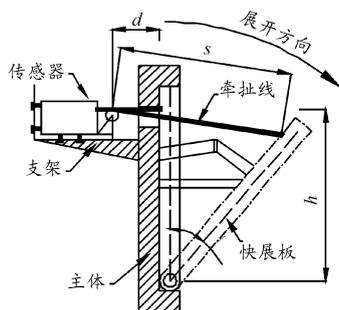


图3 拉线位移安装及几何关系示意图

快速展开板旋转会改变引出线与水平线的夹角,需根据牵引线运动路径范围在结构壁面预扩长条通孔,起到避免测量时牵引线因刮蹭致弯曲或损坏的作用。忽略快速展开板厚度,可推导出快速展开板张开角 α 与引出线位移 s 间的关系为:

$$s^2 = h^2(1 - \cos\alpha)^2 + (d + h\sin\alpha)^2 \quad (1)$$

式(1)中: h 是引出线快速展开板固定点到旋转轴的长度, d 是初始位置牵拉长度。

由于火工品的作用,拉线位移传感器实际往往处于高速拉伸状态,在加速和减速两阶段会因力的相互作用而拉伸变形或形成过冲,导致数据失真。所以实测数据的判读应当审慎,必要时需对拉线传感器进行动态标定,或结合其他手段辅助判读。

1.3 三角激光法

激光测距是快速发展的新兴技术,优势在于结构简单、精度高、速度快和非接触等,广泛应用于工业测量领域^[12-14]。但目前仍存在难以兼顾精度和量程,长时监测和功耗能力不够完善,激光设备对力学环境要求相对苛刻等局限。这使得激光测距技术在航天器地面试验的应用远多于飞行试验。快速展开板打开角度同样可由快速展开板特征位置的位移根据几何关系求得。三角法是其中一种优选的激光位移测量方式。

以图4直射式测量原理为例,激光源发射出一束激光,穿过聚焦透镜 L_1 打到快速展开板特定位置,经反射通过接收物镜 L_2 至光电耦合器件成像。激光源、快速展开板和接收器之间形成一个几何三角关系。当快速展开板转动时,带动表面的光斑位置信息改变,从而使接收器元件上的光斑位置信息和传感器输出电量相应变化。一般为保证测量的准确度,激光三角法严格要求传感器安装方式,要求被测表面与光源路径夹角垂直,移动路径与光源路径相同^[15]。同时被测表面与光源间距离在传感器有效测量范围内严格受限。例如参与试验的某型高精度激光传感器允许的测量范围是55~135 mm。

根据布置关系计算传感器固定工装高度和倾斜角 β ,以使快速展开板在转动全程中避免与传感器接触,且利用到传感器的近2/3量程,即70~125 mm。光源路径应与转动半程时的快速展开板表面法线一致。快速展开板打开角 α 与激光测距响应距离 Δs 相关:

$$a = \tan^{-1}(\Delta s \cdot \cos\beta \cdot (h - \Delta h)^{-1}) \quad (2)$$

式(2)中: $\Delta s = s_0 - s + \eta$, $\Delta h = \Delta s \cdot \sin\beta$, h 是激光光斑到旋转轴的距离, s_0 、 s 分别是传感器输出的初始距离和实时距离, η 是因非垂直入射产生的趋势项。

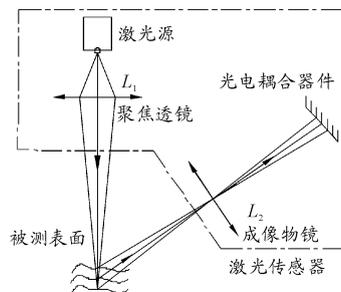


图4 激光三角法测量原理

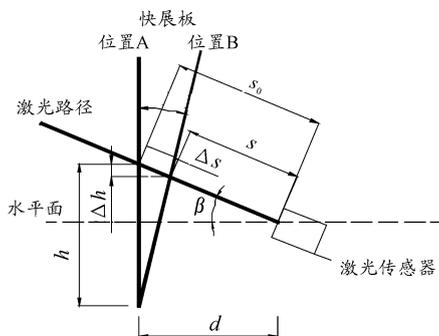


图5 三角激光法测量方案示意图

由于不满足垂直入射条件,当快速展开板转动时,激光路径不变,传感器输出位移随角度变化会产生一定的趋势性误差^[16-17]。虽然该误差不影响快速展开机构打开同步性的判定,但不能直接用数据通过几何关系判断快速展开板转动角度。试验前实物标定,剥离混杂的被测物位移和转角数据,直接获得转角和传感器输出值的关系曲线,可以消除这一误差。由于光电耦合器件对光照的敏感性,使用时要注意将传感器放置在昏暗环境下,以保证性能正常发挥。试验前应注意避免传感器长时间通电,否则可能出现严重时飘。快速展开板表面光洁度差时,应适当打磨或覆盖更优的标识物面。

1.4 高速摄像法

高速摄像法是航天器地面试验中较常见的非接触测量方法。一般见于火工品参与的分离、高速撞击和旋转等试验,用于记录结构体的位置、状态、运动姿态和电连接器的分离特性等性能参数。测量方法多为等待式测量,即高速摄像机静置固定后对目标区域标定,试验时由时统信号触发启动,通过光学原理对动态目标拍摄序列图像。后利用数字图

图5是三角激光法测量方案示意图。将产品整体倒置,

像处理分析技术和解算算法对目标物进行准确测量或合理估计。根据摄像机参数、目标物和目标区域的不同,拍摄频率多在 $200 \sim 50\,000 \text{ 帧 s}^{-1}$ 。除获取物体运动信息数据、测量范围大、精度高和非接触外,最大的优势是同时能直观地记录试验时的其他现象^[18-19]。

试验可由图 6 所示的 1 台高速摄像机俯拍完成测量。由被测物直径尺寸和快速展开板张开包络确定机位高度。产品就位后摄像单元调试,利用标定设备及标定软件进行测量标定。产品四周应布置充足的新闻灯,提供满足 $2\,000 \text{ 帧 s}^{-1}$ 的照明条件。与火工发控系统时统联试后可实施试验。试验获得的照片可以直观地对比各组快速展开板在同一时刻的瞬间位置和相对状态。根据标定结果和制定关键追踪点,通过程序对图像的自动分析处理,解算快速展开板标识物位置和速度。角度换算关系与可参照拉线位移测量方法。

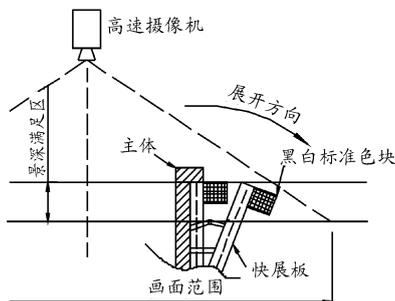


图 6 高速摄像法测量方案示意图

快速展开板标识物通常是粘贴在快速展开板移动边缘的黑白标准色块。快速展开板边缘相对较薄,但成像处理有分辨率下限要求,所以该方法需要按照预先计算结果配置满足像素要求的高速摄像机。像机技术能力略欠缺时,快速展开板端部可以粘贴数个带有标识物的胶质块,增大标识视场比。若序列图像噪声相对较大,应对图像滤波去噪,采用小波变换或其他算法增强图像弱边缘区域,从而提高数据精度。另外,像机景深必须包络快速展开板垂直向的运动范围。机位的高空架设和垂直度保证也应在试验前予以考虑。

2 方法对比分析

4 种方法的最主要差异是接触与否。因方法的相对优缺点与试验目的、试验适应性设计和操作工艺密切相关,基于某试验状态的量化分析参考意义不大,所以给出了用于动态角度测量的各方法的定性对比,见表 2。非接触式方法不干涉试验过程和不损伤产品,天然比接触式方法有较大优势。从测量精度看,两种非接触式方法更好,但它们的问题是使用条件较为苛刻,扩大应用范围有待相关技术的进一步发展。参与飞行遥测试验时,技术方案会受到箭上空间狭小,环境复杂,仪器设备可能面临海量级冲击振动、高温强光考验的局限,按目前现有的技术条件可能只能选择拉线位移法。但地面试验可以同时利用多种手段获取数据,后根据天

地差异再类比分析修正拉线位移数据。所以实际使用时应根据试验特点选用其中一种或多种组合方法。一般地,靶线法干扰因素较多,同步性分析时一般不建议优先使用。其余三种方法均能较好地满足快速展开板打开的一致性测量需求。如需更准确的快速展开机构角度随时间历程数据,应尽可能地完成特种标校以提高精度。

表 2 动态角度测量手段优缺点对比

	靶线法	拉线法	激光法	摄像法
精度	低	较低	高	高
试验费用	低	较低	较低	高
形变捕捉	无	无	无	有
实现难度	简单	一般	简单	一般
数据信息量	少	一般	一般	多
是否损伤产品	否	是	否	否
是否需要标定	是	是	是	是
应用场景	地面	飞行/地面	地面	地面

3 试验验证

依照四种方法对应的技术方案,选用了靶线通断法、拉线位移法和三角激光法实施试验,基本达到了预期效果。采集发控系统主要由传感器组、采集器、电阻模块盒、地面发控台、直流稳压电源和电缆网等构成,设计框图见图 7。

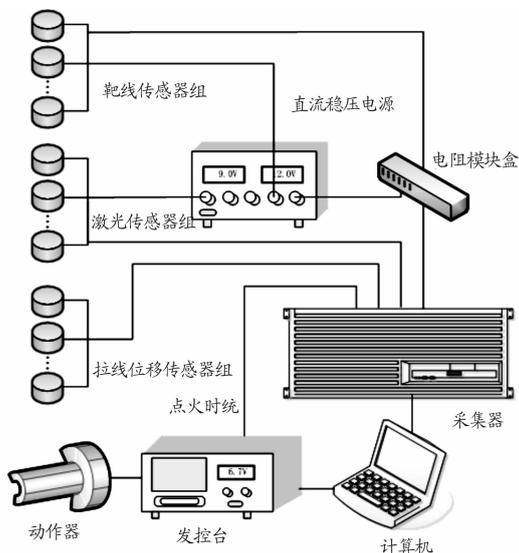


图 7 采集发控系统框图

试验舍弃高速摄像法的主要原因是三角激光法和高速摄像法对光照要求互斥,不便同时使用。同时,高速摄像法在航天地面试验中应用更为成熟,相对可以不再验证其可行性和实施效果。另考虑到试验目的、成本和多方法互补的原

因,拉线位移传感器也未动态标定。

数据处理后发现,试验结果和数据特点基本符合前文分析。三角激光法测量结果最为理想,信号曲线光滑完整,呈现了快速展开机构快速展开板开始转动、凹口螺钉断裂、快速展开板限位、火工品动作结束和快速展开板回缩至稳定等5个关键点和变化过程,与物理规律一致,可作为试验的主要依据。图8中挑选了两组同步性较差的快速展开板旋转动态角度试验数据。其中,靶线信号阶跃明显,可清晰判读靶线断裂对应打开角的时间点。虽然点位数据与激光结果基本相符,但散差相对较大,不利于同步性判定。拉线位移法数据同步性区分度高,能够确定快速展开板的限位时刻。但出现难以忍受的“延迟-过冲”现象,如果不对照动态标定进行修复处理,动态角度数据则是无效的。

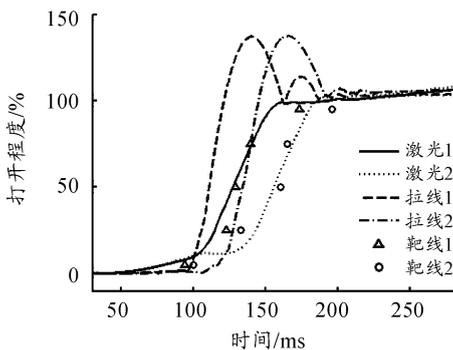


图8 两组快速展开板动态角度

4 结论

结合航天器典型快速展开机构展开地面试验需求,提出了利用位移参数测量结合几何关系获取旋转动态角度的解决思路,并对四种测量手段进行了逐一分析和给出了适应性参数获取方案。从技术特点、优缺点分析和试验结果看,四种方案均具有可操作性。实际中可按照具体试验目的和实施条件选择相应的技术方案。整体上,非接触式方法相较接触式方法更具先进性和发展空间。后续应当对两种光学测量方法从标定方法、精度和误差等方面继续深入研究。

参考文献:

[1] 刘陆广,蔡劭佳,赵卓茂,等. 大型整流罩地面分离技术[J]. 兵工学报,2016,37(Suppl. 2):197-202.
 [2] 彭文胜,张建国,王丕东,等. 混合不确定信息航天机构可靠性综合分析法[J]. 宇航学报,2015,36(5):596-604.
 [3] 李俊花,潘会平,孔峻峰,等. 某型作动类火工品作用失效研究[J]. 新技术新工艺,2006(3):97-99.

[4] 李富贵,赵洪. 有限试验状态下面对称飞行器气动建模方法[J]. 固体火箭技术,2016,39(3):417-421,443.
 [5] 卢晓东,周军,刘小军. 基于航天器舵面信息的惯导姿态角速率滤波方法[J]. 中国惯性技术学报,2011,19(3):281-285.
 [6] ZHANG Y, CHENG J, HUANG Z. Robust filtering and its application to SINS alignment[C]//International Symposium on Underwater Technology, IEEE, 1998:4983-4992.
 [7] STADEK J, OSTROWSKA K, KOHUT P, et al. Development of a Vision Based Deflection Measurement System and Its Accuracy Assessment[J]. Measurement, 2013, 46(3):1237-1249.
 [8] 徐峻楠,魏岗,杜辉,等. 一种新型潜航器应急救生装置-暴涨式气囊工作原理初探[J]. 船电技术,2018,38(2):8-17.
 [9] 郝建春,俞金良. 雷管破片速度初探[J]. 含能材料,2004,12(1):59-61.
 [10] 罗振军,孙思嘉,梅江平,等. 基于拉线位移传感器的机器人标定应用研究[J]. 航空制造技术,2017(5):43-47.
 [11] 刘华,许玮熠,霍晓飞,等. 拉线位移传感器测试仪测控软件设计与应用[J]. 宇航计测技术,2016,36(2):52-56.
 [12] 黄战华,罗曾,李莎,等. 激光三角法大量程小夹角位移测量系统的标定方法研究[J]. 光电工程,2012,39(7):36-30.
 [13] CARL CH, LIE B, KEITH C, et al. Distance measurement utilizing image-based triangulation[J]. IEEE Sensors Journal (S1530-437X), 2013, 13(1):234-244.
 [14] 张劲锋,张继业. 基于激光三角法的倾斜角测量系统[J]. 光电工程,2016,43(1):18-23.
 [15] 黄潇苹. 激光传感器位移测量精度分析及不确定度评定[D]. 大连:大连理工大学,2012.
 [16] 李兵,孙彬,陈磊,等. 激光位移传感器在自由曲面测量中的应用[J]. 光学精密工程,2015,23(7):1939-1946.
 [17] 李冬冬,王永强,许增朴,等. 激光三角法在物面倾斜时的测量误差研究[J]. 传感器与微系统,2015,34(2):28-29.
 [18] 孙海波,王晓斌,吴瑞斌,等. 高速摄像技术在火箭橇头罩分离试验中的应用[J]. 航天器环境工程,2016,33(3):327-332.
 [19] 洪涛,赵佃云. 高速摄像环境下航天电连接器分离边缘提取算法[J]. 中国机械工程,2017,28(9):1074-1078.