

激振器在卫星轨控发动机推力矢量转台中的应用

刘万龙, 孙树江, 邵 帅, 田国华, 朱昊伟

(北京航天试验技术研究所, 北京 100074)

摘 要: 490 N 发动机是目前国内应用最广的卫星轨控发动机, 其推力矢量的偏斜角、偏移量等参数对卫星轨道控制影响很大。转台是其推力矢量测量的常用方式。在转台中, 主轴作为动架, 动架与静架之间通过轴承连接定位, 动架可沿轴向滑动。为了减小摩擦力对轴向推力标定的影响, 尝试在转台上设置了激振器。通过使用激振器前后各 3 次试验的数据分析, 发现使用激振器后主推力和比冲的标准差有所下降, 表明通过激振器振动推力矢量转台是提高主推力和比冲测量精度一个值得研究的方向。但是, 目前所掌握的试验数据还不够充分, 需要进一步的试验来证明, 而且激振器不同输出能力及频率振动对测量结果的影响也有待于深入研究。

关键词: 激振器; 轨控发动机; 推力矢量; 转台

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2015) 03-0098-05

Application of vibrator in thrust vector measurement turntable for orbit-control engine of satellite

LIU Wan-long, SUN Shu-jiang, SHAO Shuai, TIAN Guo-hua, ZHU Hao-wei

(Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing 100074, China)

Abstract: Engine of 490 N thrust is the most widely-used orbit-control engine in Chinese satellites. The control of satellite orbit is influenced greatly by the oblique angle and offset of thrust vector. Turntable is the common thrust vector measuring device of the 490 N engine. Principal shaft is the moving support in the turntable. The moving support can slip axially by the bearing. In order to reduce the friction influence on axial thrust calibration, a vibrator was tried to set up on the turntable. Through data analysis of three tests before and after using the vibrator, it was found that the standard deviations of main thrust force and specific impulse were decreased. It is a worthy research direction to improve the measurement precisions of the main thrust force and specific impulse by using the vibrator in the turntable. However, the test data got now is not enough, and further tests are still needed to prove this result. The influences of the vibrator output force and frequency on measuring result are also needed to be studied in the future.

Keywords: vibrator; orbit-control engine; thrust vector; turntable

收稿日期: 2014-10-07; 修回日期: 2014-12-10

作者简介: 刘万龙 (1982—), 男, 博士, 工程师, 研究领域为火箭发动机试验及测试技术

0 引言

490 N 发动机是目前国内应用最广的卫星轨控发动机, 其推力矢量的偏斜角 α 、偏移量 δ 等参数对卫星轨道转移影响很大^[1-4]。自上世纪 90 年代开始, 国内开始使用推力矢量转台来测量 490 N 发动机的推力矢量^[4-5]。

该推力矢量测量系统采用二轴转台力矩法测量发动机推力矢量, 原理是将推力矢量的测量分解转化为测量沿 X 轴的轴向推力 F_x 和绕 Z 轴的转矩 M_z , 即一个轴向力 (即主推力) 及两个侧向力 F_{S1} 和 F_{S2} 的测量。其沿 X 轴的水平轴由特殊的密珠轴承支承, 发动机产生的推力通过水平轴作用于主推力传感器上。密珠轴承与水平轴之间的摩擦力是造成一次试验中不同点火次数中推力测量数据离散性的原因之一。长期的试验表明这种影响在水平轴伸缩后更为明显。本文探讨使用激振器来削弱摩擦力对推力测量影响的合理性和有效性。通过在转台适当位置设置激振器, 比较使用激振器前后推力及比冲测量的散布性。

1 推力矢量测试原理及转台组成

1.1 推力矢量测试原理

推力矢量测试坐标系简图如图 1 所示, 图中都采用右手直角坐标系法则。

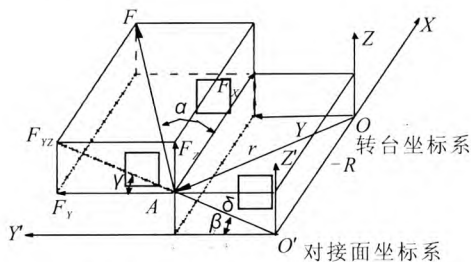


图 1 推力矢量坐标系简图

Fig. 1 Scheme of thrust vector coordinate system

图 1 中, $OXYZ$ 为转台坐标系, $O'X'Y'Z'$ 为发动机坐标系。发动机试车时产生的发动机推力矢量 F 作用于发动机安装对接面 ($Y'O'Z'$) 上的 A 点; 矢径为 R ; 北京航天试验技术研究所的颜雄雄及耿卫国推导出推力矢量 F 对转台中心 O 点

绕 Z 轴的转矩 M_z 为^[6-7]

$$-M_z = R \cdot F_x \cdot \tan \alpha \cdot \cos \gamma + \delta \cdot F_x \cdot \cos \beta \quad (1)$$

当推力矢量装置使 $Y'O'Z'$ 平面 (即发动机对接面) 绕 OX 轴旋转 θ_i 角 (转台坐标系不变), 并沿 OX 轴移动 R_i 后, 上式可写作

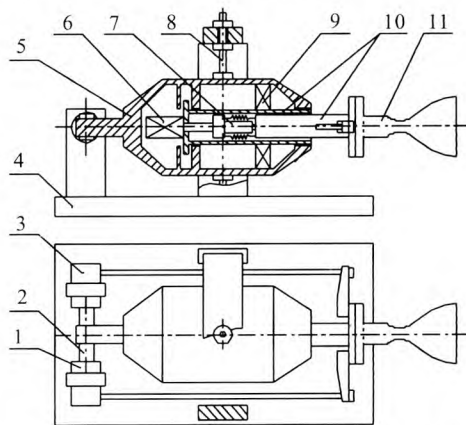
$$-M_z = F_x (R_i \cdot \tan \alpha \cdot \cos (\gamma + \theta_i) + \delta \cdot \cos (\beta + \theta_i)) \quad (2)$$

式中: α 为推力矢量 F 与 X 轴之间夹角; δ 为推力矢量作用点距发动机坐标系原点 O' 的距离; β 为 δ 与 $O'Y'$ 轴的夹角; γ 为侧向力 F_{Yz} 与 $O'Y'$ 轴的夹角; M_z 为推力矢量分力 F_{Yz} 在转台上产生的绕 Z 轴的力矩; F_x 为实测推力矢量轴向分力, 即主推力; R_i 为发动机安装定位面与转台 Z 轴之距离; θ_i 为发动机旋转角度。

公式 (2) 为转台力矩数学模型, 通过 $i \geq 4$ 次试车直接测量 M_z , F_x , R_i 和 θ_i 参数。通过计算机程序求解公式 (2), 即可算出推力矢量参数 α , β , γ 和 δ 。从公式 (2) 可以看出, 主推力 F_x 的测量精度对整个推力矢量测量结果都有影响。通常每次试验进行 10 次点火, 其中在最长轴位和最短轴位各有 5 次, 转角分别为 0° , 30° , 60° 和 90° 以及一次预点火。

1.2 推力矢量转台结构简介

推力矢量测试转台的结构见图 2 所示。



1-预紧力装置; 2-侧向推力传感器; 3-推力校准装置;

4-定架; 5-动架; 6-水平轴伸缩传动机构;

7-轴向推力传感器; 8-垂直轴; 9-水平轴旋转传动机构;

10-水平轴; 11-发动机

图 2 推力矢量测试转台结构组成

Fig. 2 Structure diagram of thrust vector measurement turntable

测试台的动架有一个垂直轴和水平轴,两轴严格相交并垂直。动架由垂直轴悬吊并由垂直轴轴承支撑,水平轴不仅可以绕自身轴线转动而且可以沿轴向移动一段距离,用来改变发动机的角度和矢径。电机丝杠移动系统带动水平轴沿轴向移动,改变发动机安装半径 R_i (最长轴位和最短轴位);水平轴由特殊的密珠轴承支承,发动机产生的推力通过水平轴作用于主推力传感器上。水平轴的转动由一个组合式电机-谐波减速器驱动,经齿轮传动同时带动水平轴旋转,旋转角度由专门的角度传感器测出。水平轴的移动和转动都是独立地运动,互不影响。

侧向力传感器成对安装于动架的左端,远离发动机。当有侧向力作用于动架时,动架的尾翼通过阻尼器将力传递给侧向力传感器。

双组元推进剂管路固定于动架尾翼上,末级管路加软管盘绕结构,最后由硬管进入发动机电磁阀入口,末级管路在轴向移动及角向转动时与发动机同步同角运动。

1.3 推力矢量测试系统组成

推力矢量测试系统组成如图3所示。推力矢量测试系统由推力矢量转台、推力校准装置、直流稳压电源、反馈监视仪表、数据采集设备和矢量计算软件等组成,其中数据采集设备是 PACIFIC 6000 数据采集装置。

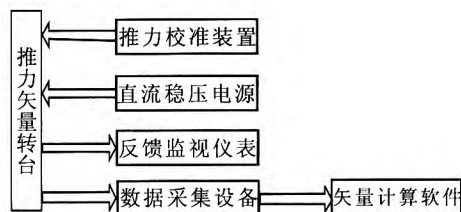


图3 推力矢量测试系统组成示意图

Fig. 3 Composition diagram of thrust vector measurement system

通过反馈监视仪表监控推力矢量监控转台的转角和矢径,通过推力校准装置对主推力和侧向力进行现场校准,试验时推力传感器输出由数据采集设备测量,再通过矢量计算软件计算出推力矢量。

2 激振器的使用

在推力测量中,摩擦力会对测量精度产生影响^[8]。图4是主推力校准装置示意图。在推力校验时,为了消除摩擦力的影响,常用人工加载振动进行校验,由于每次校验的操作人员不一样,所提供的振动量不一致,随机性较大,且火箭发动机真空测试时,操作人员无法进入真空舱内操作,导致无法消除摩擦力的影响。

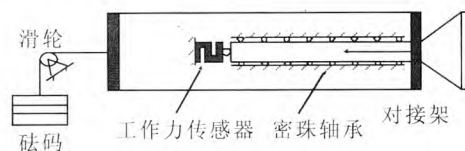


图4 主推力校准装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of main thrust force calibration device

在经过若干次尝试后,推力测量团队决定采用激振器振动的方法来消除轴向摩擦力。按激励型式的不同,激振器分为惯性式、电动式、电磁式、电液式、气动式和液压式等型式^[9-13]。激振器可产生单向的或多向的、简谐的或非简谐的激励力。本文采用惯性式激振器,利用偏心块回转产生所需的激励力^[9]。图5为激振器安装示意图,激振器固定在推力矢量转台与发动机连接的法兰上。为了避免与发动机干涉,具体安装在法兰背离发动机的一侧。通过真空舱上法兰里的真空绝缘插头连接真空舱内和真空舱外的激振器供电线路,使用开关远程控制激振器开启和关闭。激振器施加的简谐激振力 f 大小约为 1.88 N,其频率为 83.3 Hz,其沿 X 和 Y 方向的分力函数分别为

$$f_x = 1.88 \cos(166.6\pi \cdot t) \quad (3)$$

$$f_y = 1.88 \sin(166.6\pi \cdot t) \quad (4)$$

式中: f_x 和 f_y 分别为激振力沿 X 轴 Y 轴的分力, N; t 为时间, s。电路示意图见图5所示。在推力校验每档加载后数据采集前,使用激振器对推力矢量转台进行 15 s 的振动。在发动机试验中的每次点火前,使用激振器对推力矢量转台进行 15 s 的振动后,再启动点火程序。

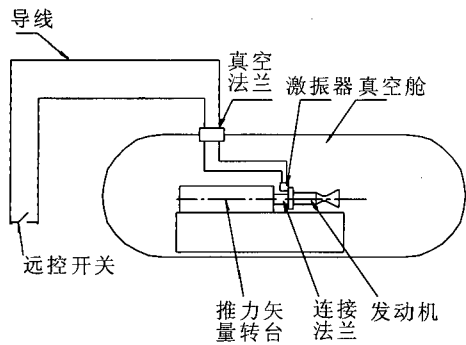


图 5 激振器安装示意图

Fig. 5 Schematic diagram of vibrator installation

3 试验数据分析

表 1 列出了使用激振器前与使用激振器后各 3 次试验中各次点火时主推力 F_x 和比冲 I_s 的平均值, 可对使用激振器前后推力测量数据的离散性进行比较。表中点火序号 1~9 所对应的转台旋转角度分别为 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 90^\circ, 90^\circ, 60^\circ, 30^\circ, 0^\circ$ 。 F_x 以及 I_s 的后缀符号中 a 和 b 分别表示使用激振器前和使用激振器后, 1, 2, 3 分别表示试验 1、试验 2 和试验 3。

表 1 使用激振器前后的 3 次试验中各次点火时主推力 F_x 和比冲 I_s 数据

Tab. 1 Main thrust force F_x and specific impulse I_s at each ignition in three tests before and after using vibrator

点火 序号	F_{xa1}/N	$I_{sa1}/(N \cdot s)$	F_{xa2}/N	$I_{sa2}/(N \cdot s)$	F_{xa3}/N	$I_{sa3}/(N \cdot s)$	F_{xb1}/N	$I_{sb1}/(N \cdot s)$	F_{xb2}/N	$I_{sb2}/(N \cdot s)$	F_{xb3}/N	$I_{sb3}/(N \cdot s)$
1	482.3	3 085	483.4	3 094	484.8	3 074	485.6	3 071	488.1	3 073	486.8	3 069
2	484.7	3 097	482.4	3 094	486.3	3 084	485.2	3 072	487.5	3 074	487.5	3 076
3	484.8	3 099	483.8	3 108	485.3	3 084	485.0	3 072	486.5	3 072	487.3	3 075
4	483.9	3 095	481.3	3 089	482.8	3 091	486.1	3 080	486.6	3 073	485.6	3 066
5	483	3 088	480.8	3 087	479.3	3 087	483.4	3 066	483.1	3 060	483.9	3 063
6	484	3 091	482.5	3 090	482.4	3 090	485.4	3 074	485.3	3 067	487.1	3 069
7	485.4	3 093	483.6	3 095	482.1	3 087	484.9	3 075	485.8	3 069	487.1	3 070
8	484.3	3 090	484	3 094	481.7	3 082	484.4	3 068	485.0	3 063	486.0	3 066
9	483.7	3 083	482.6	3 085	481.7	3 081	483.4	3 062	484.5	3 059	484.8	3 061

方差和标准差是测算离散趋势常用的指标。样本中各数据与样本平均数的差的平方和的平均数叫做样本方差; 样本方差的算术平方根叫做样本的标准差。样本方差和样本标准差都是衡量一个样本波动大小的量, 样本方差或样本标准差越大, 样本数据的波动性就越大。标准差与方差不同的是, 标准差和变量的计算单位相同, 比方差清楚, 因此在分析时选用标准差来分析。表 2 为

使用激振器前和使用激振器后 3 次试验主推力 F_x 和比冲 I_s 平均值与方差。

对比试验数据可看出, 在加激振器前主推力标准差范围为 0.95~2.17 N, 比冲标准差范围为 5.17~6.68 N·s; 加激振器后主推力标准差范围为 0.91~1.55 N, 比冲标准差范围为 5.01~5.85 N·s。这两组数据表明: 通过激振器模拟发动机振动效果, 可以提高推力和比冲测量的精度。

表 2 使用激振器前后的 3 次试验主推力 F_X 和比冲 I_s 平均值与方差
Tab. 2 Mean values and variances of main thrust force F_X and specific impulse
 I_s in three tests before and after using vibrator

点火 序号	F_{Xa1}/N	$I_{sa1}/(N \cdot s)$	F_{Xa2}/N	$I_{sa2}/(N \cdot s)$	F_{Xa3}/N	$I_{sa3}/(N \cdot s)$	F_{Xb1}/N	$I_{sb1}/(N \cdot s)$	F_{Xb2}/N	$I_{sb2}/(N \cdot s)$	F_{Xb3}/N	$I_{sb3}/(N \cdot s)$
平均值	484.0	3 091	482.7	3 093	482.9	3 084	484.8	3 071	485.8	3 068	486.8	3 068
标准差	0.95	5.36	1.11	6.68	2.17	5.17	0.91	5.24	1.55	5.85	1.25	5.01

4 结 论

尝试使用激振器来削弱摩擦力对推力测量的影响, 通过使用激振器前后各 3 次试验的数据分析, 发现主推力和比冲的标准差都有所下降, 表明通过激振器振动推力矢量转台是提高主推力和比冲测量精度的一个值得研究的方向。但是, 目前所掌握的试验数据还不够充分, 需要进一步的试验来证明, 而且激振器不同输出能力及频率振动对测量结果的影响也有待于深入研究。

参考文献:

[1] 周红玲, 徐方涛, 张绪虎, 等. 490 N 远地点发动机抗氧化涂层厚度对性能的影响[J]. 宇航材料工艺, 2011, 41(5): 66-68.
[2] 周红玲, 姜文龙, 刘昌国. 国内外卫星用液体远地点发动机发展综述[J]. 火箭推进, 2011, 37(5): 1-8.
[3] 周红玲, 姚锋, 杨成虎. 星用远地点发动机真空比冲与推进剂温度关系[J]. 推进技术, 2011, 32(5): 732-736.
[4] 周长省, 许宝庆. 影响固体火箭发动机推力偏心特性的

误差源研究[J]. 南京理工大学学报, 1998, 22(4): 293-296.
[5] 张学军. 火箭发动机推力矢量测试设备研制[J]. 推进技术, 1997, 18(1): 22-25.
[6] 颜雄雄, 耿卫国. 小发动机推力矢量的测量[J]. 推进技术, 2000, 21(3): 86-88.
[7] 唐家鹏. 某卫星液体火箭发动机推力偏心测试技术研究[J]. 机械管理开发, 2008, 23(1): 25-26.
[8] 赵万明, 王军钢. 液体火箭发动机试验负推力修正[J]. 火箭推进, 2010, 36(6): 57-61.
[9] 徐波, 王树林, 李生娟, 等. 自同步振动磨惯性激振器设计[J]. 矿山机械, 2006, 34(4): 35-36.
[10] 邱明, 廖振强, 焦卫东, 等. 自调式激振器对高方平筛停车阶段共振的影响[J]. 振动与冲击, 2010, 29(12): 169-172.
[11] 赵玉成, 马占国, 李兴华. 一种新型宽频激振器的设计及动力学仿真[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(6): 800-804.
[12] 陈海明, 胡新华, 杨继隆, 等. 共振式电磁激振器振动系统的仿真分析[J]. 机床与液压, 2004, 32(7): 20-22.
[13] 程辉, 俞浙青, 阮健, 等. 新型电液激振试验台的高频特性研究[J]. 液压与气动, 2010, 32(6): 28-30.

(编辑: 陈红霞)