

飞行器角速度测试方法的研究

马思宇 周鑫 宋歌 田晓阳 曹萌

(中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)



摘要: 从理论原理出发, 论述了基于科里奥利力原理建立数学计算模型, 通过电量转换得到相应的角速度参数。并利用飞行器搭载 MEMES 传感器的方式, 实现将科里奥利力理论原理应用实践在现实飞行器角速度的测试工作中, 获得飞行器瞬时角速度等飞行参数。

关键词: 飞行器; 角速度; MEMES 传感器; 科里奥利力

Research on Test Method of Angular Velocity of Aircraft

Ma Siyu Zhou Xin Song Ge Tian Xiaoyang Cao Meng

(China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076)

Abstract: Based on the theoretical principles, this article discusses how to establish a mathematical calculation model based on the Coriolis force principle, and obtain the corresponding angular velocity parameters through the conversion of electricity. Using the method of the aircraft carrying the MEMES sensor, the principle of Coriolis force theory is applied in the test of the actual aircraft angular velocity, and the flight parameters such as the instantaneous angular velocity of the aircraft are obtained.

Key words: aircraft; angular velocity; MEMES sensor; coriolis force

1 引言

在飞行器研制的过程中, 飞行姿态的测试是一项非常重要的设计指标。为了确定运动的轨迹和飞行姿态, 需要多次进行姿态测试, 其中瞬时角速度是姿态测试当中的重要参数之一。本文基于科里奥利力原理, 利用飞行器搭载 MEMES 传感器建立了一种三维数学模型并将其应用于跟踪飞行器瞬时角速度等飞行参数研究。相较于传统光学测试方法, 该种电测方法能更加准确、全面反馈飞行器相关飞行参数, 具有较大的应用前景。

2 角速度测试系统的原理

角速度测试系统的核心是 MEMES 传感器。传感器输出的测量电压经过放大、采集、记录, 变成可以被后续处理的角速度数据。其中 MEMES 陀螺仪传感

器的原理如图 1 所示。

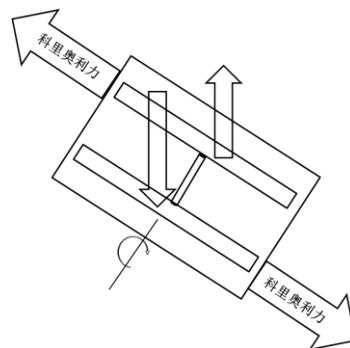


图 1 MEMES 传感器工作原理模拟图

图中, 当振子以速度 v 运动时, 如果传感器按图示方向旋转, 振子将在正交方向收到科里奥利力的作用。由于传感器的运动不是惯性运动, 当以传感器为参考系描述动力过程时, 必须引入一个假想的力, 这

作者简介: 马思宇 (1993), 工程师, 自动化专业; 研究方向: 导弹武器系统。

收稿日期: 2020-04-21

个力就是科里奥利力。该力等效于惯性参考系中，振子惯性运动偏离径向的倾向。引入科里奥利力后，可以像处理惯性参考系中的运动一样简单地处理旋转参考系中的运动过程。

取得科里奥利力值后，根据科里奥利力的计算公式计算即可得到角速度值。

2.1 科里奥利力的数学计算模型

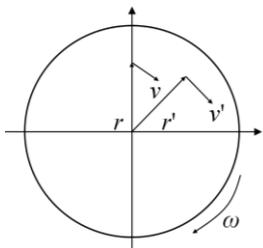


图2 惯性系匀速直线运动在转动参考系中的情形

科里奥利力是转动参考系中定义的匀速直线运动与惯性系中的匀速直线运动不同所致：转动参考系中的匀速直线运动是指物体相对于旋转面的相对速度不变的运动；惯性系中的匀速直线运动是指相对于静止质心速度不变的运动。因此，当物体在转动参考系中做匀速直线运动时，在惯性系中的轨迹是一条曲线，反之亦然。设有一个物体在惯性系中做匀速直线运动，它在转动参考系中的情形如图2所示。

物体在0时刻位于转动参考系中r处，dt时刻位于转动参考系中r'处，0时刻瞬时速度为v，dt时刻瞬时速度为v'，转动参考系的转速为ω。假设0时刻转动参考系与惯性系坐标轴重合，则该物体在惯性系中运动的情形如图3所示。

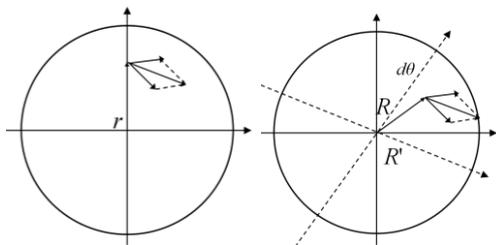


图3 惯性系中匀速直线运动的情形

物体在惯性系中的运动速度为U，保持不变。Vt为转动参考系在惯性系中0时刻的运动速度，Vt'为转动参考系在惯性系中dt时刻的运动速度。R、R'为dt时刻转动参考系r、r'在惯性系中的对应位置。(以下各等式中×表示外积)

显然 $Vt = \omega \times r$, $U = v + Vt$ 。于是有：

$$U = \omega \times r + v \tag{1}$$

类似的，有 $Vt' = \omega \times R'$, $U = v'' + Vt'$ 。于是有：

$$U = \omega \times R' + v'' \tag{2}$$

由于物体在0时刻位于r处，在dt时刻运动到了R'处，考虑到物体在惯性系中做匀速直线运动，因此：

$$R' = r + U \times dt \tag{3}$$

综合式(1)、式(3)有：

$$R' = r + \omega \times r \times dt + v \times dt \tag{4}$$

然而，由于dt时刻转动参考系本身也转过了一个角度dθ，v''并不是v'。为了得到v'，需要将v''对应转动一个角度θ。考虑到dt是一个极短的时间，dθ极小， $d\theta \times v' \approx d\theta \times v$ ；进而忽略高阶误差，有如下关系：

$$v'' = v' + d\theta \times v \tag{5}$$

将式(5)与式(1)、式(2)、式(4)相减，可得：

$$v' - v = -\omega \times (\omega \times r) \times dt - 2 \times \omega \times v \times dt \tag{6}$$

该等式左侧为速度差。考虑到dt是一个极短的时间，可以认为v'-v就是速度微分dv。因此，式(6)实际上就是转动参考系中的惯性速度微分公式。

显然，转动参考系中的惯性加速度公式是：

$$A = dv/dt = -\omega \times (\omega \times r) - 2 \times \omega \times v \tag{7}$$

其中：第一部分 $-\omega \times (\omega \times r) = \omega^2 r$ 与速度无关，为转动参考系中的离心加速度；第二部分与速度一阶相关，就是科里奥利加速度。所以，科里奥利加速度的计算公式 $a = -2\omega \times v$, a为科里奥利加速度；v为径向运动速度；ω为旋转角速度。

科里奥利力的计算公式 $F = -2m\omega \times v$, F为科里奥利力；m为质量。

2.2 角速度测试系统的工作过程

MEMES 传感器的工作过程为：对固定框架施加交变电压，让振子做振荡式来回运动。当传感器整体旋转时，会产生科里奥利加速度。科里奥利力将使得振子在正交方向上发生弹性运动，改变测量电路在正交方向上的电容值。通过测量该电容值对应的电压变化可以实现对科里奥利力测量。

由于科里奥利力与振子的振荡式运动方向正交，根据科里奥利力的计算公式 $a = -2\omega \times v$, 可得角速度值 $\omega = -a/(2v)$, 式中：a为科里奥利加速度值；v为径向运动速度值；ω为旋转角速度。

其中，v正比于驱动振子运动的交变电压值。因此只需将测量得到的电压与交变电压进行比较，即可取得角速度值。

MEMES 传感器输出的电压非常微弱。经过角速

度测试系统的放大、采集、记录，变成可以被后续处理的角速度数据。

3 实践应用与试验

3.1 飞行器姿态记录器

根据上述角速度测试系统的数学计算模型与工作过程，结合以往飞行器试验电测的理论与实践基础，研发应用飞行器姿态记录器，姿态记录器用于地面试验飞行器角速度及加速度的记录。姿态记录器采用 MEMES 加速度计和 MEMES 陀螺作为传感器，利用存储测试技术将传感器所测数据存于电路模块的 FLASH 中。姿态记录器由电路模块、MEMES 加速度计和 MEMES 陀螺组成，结构见图 4。

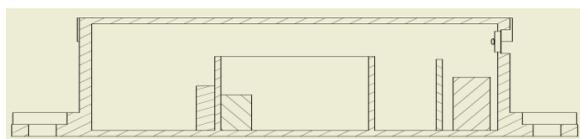


图 4 姿态记录器结构简图

记录器内置 X, Y, Z 三轴传感器，由高性能加速度计和偏航与速率陀螺组成，陀螺仪和加速度传感器安装于内部垂直面上，安装面加工垂直度为七级。

表 1 记录器的采样率

采样率/kHz	记录时长/min
50	4
20	10
10	20
5	40

装置可以连续记录飞行器的运动姿态，包括：角速度及加速度。可以装定延时时间，实现在上电后指定时间自动开始记录。并可以设定采样率，满足不同的采样要求。采样率如表 1 所示。

3.2 试验应用与数据分析

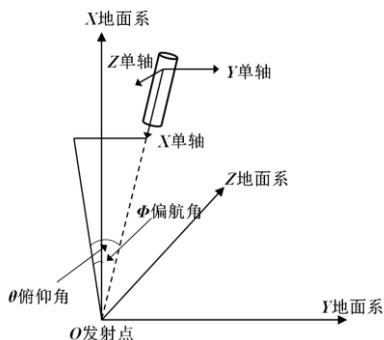


图 5 记录器安装坐标系

飞行器姿态记录器在地面飞行试验的应用过程中，需通过法兰盘将记录器安装于伴飞对象上，坐标系安装如图 5 所示。

通过飞行过程中姿态记录器的加速度计与陀螺仪传感器纪录姿态参数，并存于电路模块的 FLASH 中，试验结束后将数据导入 MATLAB 软件当中，根据上文中的飞行器角速度测试系统工作原理与科里奥利力数学计算模型，进行数据分析，可得到如表 2 所示试验数据与图 6 和图 7 所示的试验数据曲线。

表 2 试验数据结果

伴飞对象号	传感器号	位置	飞行时间 /ms	落地时刻俯仰角/(°)	最大速度 /m s ⁻¹
8	6	I 象限	271	-28.3	28.4
2	5	II 象限	253	-5.3	29.1

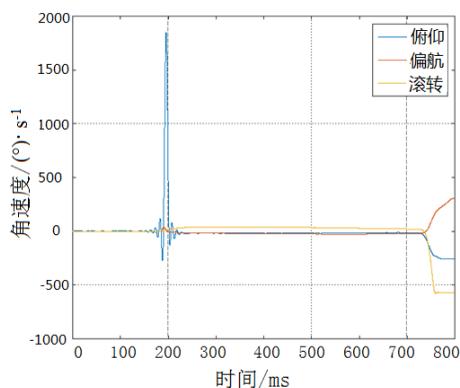


图 6 三轴角速度数据曲线

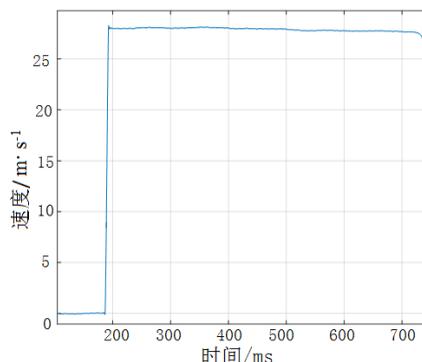


图 7 飞行期间最大速度曲线

4 结束语

使用角速度测试系统，通过将角速度测试系统放置在飞行器内，随飞行器一起运动，可以利用 MEMES 传感器，基于科里奥利力原理，建立数学模型并对加速度进行数据处理，准确测量飞行器的瞬时角速度。

