

1-4-2019

## Lateral Force Measurement and Processing of Planar Air-Bearing System for Microgravity Simulation

Xinfeng Li

*1. Key Laboratory of Space Utilization, Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; ;*

Xiang Dong

*2. Pneumatics Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;*

Xinghua Tian

*1. Key Laboratory of Space Utilization, Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; ;*

Wei Wei

*2. Pneumatics Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Lateral Force Measurement and Processing of Planar Air-Bearing System for Microgravity Simulation

## Abstract

**Abstract:** An approach of direct force measurement is proposed to estimate the lateral force of a planar air cushion system. *Lateral force gauges are arranged around the planar air bearing platform with preloading force exerted before afloat. Lateral force and its torque with respect to the geometric center can be obtained from the gauge variations while the afloat system reaches balance. Friction coefficient in every touch-spot can be evaluated with least square state estimation, which changes to a generic minimum problem with constraints since its solution matrix has a rank deficit.* The analysis based on the test of a specified platform reveals there is desirable difference between estimation with friction and one without, if the preloading force is less than the critical value across which the direction changes.

## Keywords

planar air-bearing system, lateral force, torque of lateral force, friction coefficient, deficit rank, singular value decomposition

## Recommended Citation

Li Xinfeng, Xiang Dong, Tian Xinghua, Wei Wei. Lateral Force Measurement and Processing of Planar Air-Bearing System for Microgravity Simulation[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(10): 3746-3752.

## 平面微重力模拟气浮系统的侧向力测量与处理

李新峰<sup>1</sup>, 向东<sup>2</sup>, 田兴华<sup>1</sup>, 魏伟<sup>2</sup>

(1.中国科学院太空应用重点实验室, 中国科学院空间应用工程与技术中心, 北京 100094;

2.哈尔滨工业大学气动技术中心, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 利用测力法可直接测量平面气浮系统的侧向力, 该方法通过在系统周向布设加载了预紧力的横向张力计, 根据浮起前后张力计的变化量可获得气浮系统侧向力及其绕中心转矩; 为进一步估计搭接位置的摩擦力, 对摩擦系数和侧向力进行联合估计, 为解决最小二乘算法的矩阵亏秩, 将求解状态问题转化为带约束的最小值问题。测试实例结果表明, 在一定的预紧力范围内, 当静摩擦力不改变测试的运动趋势时, 静摩擦有无参与联合状态估计对侧向力的特性估计结果影响有限。

**关键词:** 平面气浮; 侧向力; 侧向力转矩; 摩擦系数; 亏秩; 奇异值分解

中图分类号: V447+.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 10-3746-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201810019

## Lateral Force Measurement and Processing of Planar Air-Bearing System for Microgravity Simulation

Li Xinfeng<sup>1</sup>, Xiang Dong<sup>2</sup>, Tian Xinghua<sup>1</sup>, Wei Wei<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Space Utilization, Technology and Engineering Center for Space Utilization,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 2. Pneumatics Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** An approach of direct force measurement is proposed to estimate the lateral force of a planar air cushion system. Lateral force gauges are arranged around the planar air bearing platform with preloading force exerted before afloat. Lateral force and its torque with respect to the geometric center can be obtained from the gauge variations while the afloat system reaches balance. Friction coefficient in every touch-spot can be evaluated with least square state estimation, which changes to a generic minimum problem with constraints since its solution matrix has a rank deficit. The analysis based on the test of a specified platform reveals there is desirable difference between estimation with friction and one without, if the preloading force is less than the critical value across which the direction changes.

**Keywords:** planar air-bearing system; lateral force; torque of lateral force; friction coefficient; deficit rank; singular value decomposition

## 引言

气浮系统克服了物体表面的摩擦, 抵消重力后可实现多自由度的运动模拟, 有利于实现大运动位

移、频度高的长期闭环试验, 因此得到了国际上不同研究团组<sup>[1-2]</sup>的长期关注, 在卫星编队运动验证<sup>[3-5]</sup>、星间抓捕控制验证<sup>[6-7]</sup>、空间机械臂控制验证<sup>[8]</sup>等地面试验中得到了广泛应用, 这些具有平动与转动的多自由度的微重力模拟系统由下部平动级和上部转动级构成。对于转动级或仅有3个转动自由度的卫星姿态控制模拟气浮系统, 自由转动部分的重心与转动中心不重合时造成的倾侧力矩



收稿日期: 2016-04-08 修回日期: 2016-07-23;  
基金项目: 中科院前沿重点研究项目(QYZDY-SSW-JSC03);  
作者简介: 李新峰(1975-), 男, 河南, 博士, 高工, 研究方向为动力学与控制; 向东(1981-), 男, 湖北, 博士, 研究方向为气动控制。

<http://www.china-simulation.com>

• 3746 •

需要通过滑块的运动补偿控制获得平衡<sup>[9-13]</sup>。

多自由度气浮系统底部布局的平动级或单纯模拟平面内微重力的平面气浮运动存在水平面的侧向运动干扰, 该侧向干扰使得气浮系统偏离初始平动位置, 且通常带有沿垂直方向的转动, 平面气浮系统的倾侧力及其力矩是造成漂移及整体转动的直接因素。侧向力的因素来自于多个方面<sup>[14]</sup>: 包含了底部台面残余倾斜、气浮轴承与支撑负载的残余摩擦造成的平面气浮轴承的倾侧, 各轴承气膜厚度不均等, 这些都是形成侧向力的因素。

当前平面气浮的侧向力主要通过视觉测量或控制间接得到。通过光学视觉测量安装在气浮台上的已知靶标<sup>[15-18]</sup>, 利用气浮台运动的长期的积分位移及转角, 结合运动时间, 可获得气浮系统的侧向力及侧向力转矩。但在台体运动时, 不同气浮轴承底面与局部的倾侧特性也有一定幅度的变化, 这种方法通常会将气浮系统运动时不同台面接触区域局部不同倾侧特性、轴承在不同位置对应的不同气膜特性引入到测量结果中, 获得平均运动效应; 在实际试验调试时发现, 在闭环试验前就需要使系统具有低侧移条件, 以达到减小控制时气瓶喷气消耗、延长单次气浮试验有效时间的目的。

因此, 需设计一种直接测量方法, 以评估气浮试验开展前静态条件下的平面气浮系统侧向力特性, 本文采用横向力传感器测量气浮系统的侧向力特性, 对于方法中存在搭接点摩擦影响的不确定性问题, 依据相应的接触力条件下有关静摩擦力的假设, 提出了同时获得倾侧力及搭接点静摩擦特性的数据处理方法, 获得气浮系统的侧向力及转动力矩, 最后结合实际的气浮微重力实验系统, 给出了相应实验结果。

## 1 气浮系统侧向力直接测试与处理方法

### 1.1 气浮系统侧向力直接测试原理

侧向力的直接方法如图 1 所示, 中间多边形示

意被测气浮系统, 其上安装了四个相互垂直的结构, 用于搭接相应方向侧向力的横向张力计。

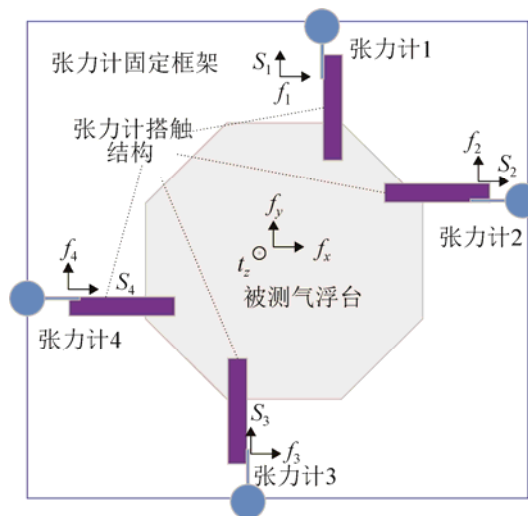


图 1 侧向力测试的原理图

Fig. 1 Diagram of lateral force measurement

横向张力计是一种依靠形变测量横向作用力的反力测量设备, 其线性度相对好, 但存在的问题是零偏大、一致性较差。在无横向力时, 恢复的零点都有一定的偏差。另外在实验时精密测量力的张力计应用出现以下实际问题: 如果从一开始为零或较小横向接触力搭触, 系统平衡前有些搭搭接点直接脱离无法得到测量结果。为解决这一问题, 采取的方法是: 在每个测量的搭接点, 预先施加一定的横向力(下面称为搭接点上施加的预紧力), 在以上的布局中, 相当于 1、2 号张力计对气浮系统的一个角落进行了约束, 而 3、4 号张力计对另一个对角进行了约束, 当测量点基本对称且预紧力数值相近时, 系统处于水平面内的过约束状态。通气后气浮系统在自身侧向力的作用下, 将重新建立其平衡, 张力计获得静态不变值时, 达到新的约束状态, 通过张力计变化量读数能够在台体静止状态下直接测量系统侧向力。根据是否考虑搭接点的接触摩擦, 分两种情况分别进行处理。

### 1.2 无搭接点静摩擦力假设的处理模型

如果不考虑搭接点上的静摩擦力, 假设垂直于接搭接点上搭触表面光滑, 仅有法向力, 分别

记为  $f_i (i=1\sim 4)$ ，且作为直接观测值，测量点距离中心的距离为  $l_i$ 。如果气浮系统  $x$  方向的侧向力分量为  $f_x$ ， $y$  方向侧向力分量为  $f_y$ ，侧向力围绕气浮系统几何中心的侧向力转矩为  $t_z$ 。根据力系平衡有以下方程：

$$X: f_x + f_1 + f_3 = 0 \quad (1)$$

$$Y: f_y + f_2 + f_4 = 0 \quad (2)$$

$$Z: t_z + \sum_{i=1}^4 f_i l_i = 0 \quad (3)$$

通过以上3个方程，单次测量就可获得侧向力及侧向力转矩。对于多次的直接测量结果，采用最小二乘处理，若系统的状态量为  $\mathbf{x}$ ：

$$\mathbf{x} \triangleq [f_x \ f_y \ t_z]^T \quad (4)$$

第  $j$  次的观测值记为：

$$\mathbf{y}_{(j)} \triangleq [f_1 \ f_2 \ f_3 \ f_4]^T \quad (5)$$

对应的单次测量力系平衡方程为：

$$\mathbf{I}\mathbf{x} = \mathbf{B}\mathbf{y}_{(j)} \quad (6)$$

式中： $\mathbf{I}$  为单位阵，观测的系数矩阵为：

$$\mathbf{B} = - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ l_1 & l_2 & l_3 & l_4 \end{bmatrix} \quad (7)$$

联立  $n$  次测量后的量测方程为：

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}\mathbf{x} \\ \mathbf{I}\mathbf{x} \\ \vdots \\ \mathbf{I}\mathbf{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}\mathbf{y}_{(1)} \\ \mathbf{B}\mathbf{y}_{(2)} \\ \vdots \\ \mathbf{B}\mathbf{y}_{(n)} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式(8)反解得到的最小二乘解具有以下均值形式：

$$f_x = -\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (f_{1(j)} + f_{3(j)}) \quad (9)$$

$$f_y = -\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (f_{2(j)} + f_{4(j)}) \quad (10)$$

$$t_z = -\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^4 f_{i(j)} l_i \quad (11)$$

### 1.3 搭接点动静摩擦力等效假设处理模型

第二种情况考虑测量搭接点上的摩擦力。每次

测试时，在气浮系统平衡前各测点的力没有达到稳定，此时微小滑移引起的滑动摩擦，当系统平衡张力计有稳定值时，横向张力计与气浮系统间保持静止。

由于单次测量施加预紧力不同，这使得每次测量的静摩擦力也不同，因此不能按照相同的静摩擦力对所有结果进行统一估计；如果记垂直于各搭接点上的静摩擦力为  $s_i$ ，静态摩擦力作用点的力臂为  $d_i$ 。根据力系平衡，有以下方程：

$$X: f_x + f_1 + f_3 + s_2 + s_4 = 0 \quad (12)$$

$$Y: f_y + f_2 + f_4 + s_1 + s_3 = 0 \quad (13)$$

$$Z: t_z + \sum_{i=1}^4 f_i l_i + \sum_{i=1}^4 s_i d_i = 0 \quad (14)$$

实验过程中4个搭接点在每次设置预紧力时，安装的外部框架工装位置不变。系统在侧向力作用下达到平衡，对应各点接触面上的滑动摩擦转换为静摩擦，在每个搭接点处，不同预紧力实验接搭接点几何特性保持不变。气浮平衡后可进行以下假设：每个测量点上静摩擦力与该点的滑动摩擦相同或基本接近。张力计末端触点与工装接平面搭接，预紧力垂直于该平面，根据实验情况观察，侧向力及其对应气浮平衡前后变化量不大时，将预紧力近似为搭接点上的法线力，在以上条件下静摩擦力  $s_i$  表示为：

$$s_i = \mu_i N \quad (15)$$

其中各点滑动摩擦系数  $\mu_i$  是未知待求量，若系统的状态量为  $\mathbf{x}$ ，包含了侧向力及摩擦系数：

$$\mathbf{x} \triangleq [f_x \ f_y \ t_z \ \mu_1 \ \mu_2 \ \mu_3 \ \mu_4]^T \quad (16)$$

每次观测值仍为(5)式所定义，若每次施加的预紧力为  $N_{(j)}$ ，对应的单次测量力系平衡方程(13)改写为：

$$\mathbf{A}_{(j)}\mathbf{x} = \mathbf{B}\mathbf{y}_{(j)} \quad (17)$$

状态的系数矩阵  $\mathbf{A}_{(j)}$  与预紧力  $N_{(j)}$  有关：

$$\mathbf{A}_{(j)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, N_{(j)} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ d_1 & d_2 & d_3 & d_4 \end{bmatrix} \quad (18)$$

而观测的系数矩阵仍为(7)式，联立所有观测，

多次测量后的量测方程为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_{(1)} \\ \mathbf{A}_{(2)} \\ \vdots \\ \mathbf{A}_{(n)} \end{bmatrix} \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}\mathbf{y}_{(1)} \\ \mathbf{B}\mathbf{y}_{(2)} \\ \vdots \\ \mathbf{B}\mathbf{y}_{(n)} \end{bmatrix} \quad (19)$$

根据最小二乘原理, 该等式左乘系数矩阵的转置  $[\mathbf{A}_{(1)}^T \quad \mathbf{A}_{(2)}^T \quad \dots \quad \mathbf{A}_{(n)}^T]$ , 得到的方程为:

$$\left[ \sum_{j=1}^n \mathbf{A}_{(j)}^T \mathbf{A}_{(j)} \right] \mathbf{x} = \sum_{j=1}^n \mathbf{A}_{(j)}^T \mathbf{B}\mathbf{y}_{(j)} \quad (20)$$

如定义矩阵  $\mathbf{A}'$  和矢量  $\mathbf{y}'$

$$\mathbf{A}' \triangleq \sum_{j=1}^n \mathbf{A}_{(j)}^T \mathbf{A}_{(j)} \quad (21)$$

$$\mathbf{y}' \triangleq \sum_{j=1}^n \mathbf{A}_{(j)}^T \mathbf{B}\mathbf{y}_{(j)} \quad (22)$$

最优估计代数方程为:

$$\mathbf{A}' \mathbf{x} = \mathbf{y}' \quad (23)$$

求解该代数方程可获得状态的最小二乘估计。

#### 1.4 系数矩阵的奇异特性

经过仔细分析发现, 2.3 节最小二乘的代数方程系数(22)式的矩阵  $\mathbf{A}'$  不可逆, 这是由于(18)式中  $\mathbf{A}_{(j)}$  矩阵与预紧力相乘的子矩阵是行满秩的, 但在进行累加时, 不同的预紧力仅作为外部系数, 最终结果是系数矩阵  $\mathbf{A}'$  的右下角  $4 \times 4$  分块矩阵具有如下形式:

$$\mathbf{A}' = \sum_{j=1}^n N_{(j)}^2 \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ d_1 & d_2 & d_3 & d_4 \end{pmatrix}^T \times \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ d_1 & d_2 & d_3 & d_4 \end{pmatrix} \quad (24)$$

该  $4 \times 4$  矩阵不是满秩的, 这使得直接通过最小二乘求解(23)式出现了困难, 这是测量方法在考虑摩擦时建模过程自有的特性, 是 4 个约束点测量布局以及状态选择的综合结果。

从纯粹矩阵特性的数学角度, 如果将预紧力相乘的  $3 \times 4$  矩阵变成  $3 \times 3$  的矩阵, 以上累加矩阵将是满秩的, 但从系统测量的布局上对应物理意义是: 仅有 3 个静摩擦相关的状态量、仅有 3 个测量位置进入计算。在无法掌握侧力特性时, 无法分配

这 3 个点上的力以保证待测气浮系统处于稳定约束状态且不脱离横向张力计的触点。

#### 1.5 矩阵奇异问题的处理

对前面状态系数矩阵  $\mathbf{A}'$  的亏秩问题, 在附加特定假设时, 仍可以对系统的侧向力特性及各点的静摩擦特性进行估计。其步骤如下:

第一步: 将(23)式改造为行满秩形式。对于半正定矩阵  $\mathbf{A}'$ , 通过奇异值 UV 分解, 获得对角形式矩阵  $\mathbf{A}$ :

$$\mathbf{A}' = \mathbf{U}\mathbf{A}\mathbf{V}^T \quad (25)$$

其中的变换矩阵  $\mathbf{U}, \mathbf{V}$  为正交阵。由于  $\mathbf{A}'$  存在亏秩, 将对角阵写成非零对角子阵  $\mathbf{A}_{nz}$  及零对角子阵:

$$\mathbf{A} \triangleq \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{nz} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (26)$$

将上式代入到(23)式得到:

$$\mathbf{A}\mathbf{V}^T \mathbf{x} = \mathbf{U}^T \mathbf{y}' \quad (27)$$

如果选择对角阵非零对应的行选择矩阵为  $\mathbf{C}$ , 使得:

$$\mathbf{C}\mathbf{A} \triangleq [\mathbf{A}_{nz} \quad \mathbf{0}] \quad (28)$$

代入(27)式后有:

$$\mathbf{C}\mathbf{A}\mathbf{V}^T \mathbf{x} = \mathbf{C}\mathbf{U}^T \mathbf{y}' \quad (29)$$

因此对(20)改造后, 变成了左系数矩阵行满秩的等式约束形式(29)。

第二步: 设定摩擦差异最小假设的代价函数。如果四个张力计与搭接工装的几何虽然各处都有具体细微差异, 但是其差异不大, 得到的(20)式可作为等式约束条件, 以寻找一个“滑动摩擦系数差异最小解”。为了求得该最小差异解, 需设定一个代价函数, 该函数考虑摩擦力方向的不确定性, 摩擦系数符号就代表了摩擦力的方向, 因此定义以下高阶代价函数:

$$J = \sum_{i=1}^4 \left( \mu_i^2 - \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \mu_i^2 \right)^2 \quad (30)$$

结合以上两步的条件及该代价函数, 带奇异最小二乘解算在等效摩擦接近的假设条件下, 求解系统状态的亏秩最小二乘问题就转换成为一个受等式约束的极小值问题:

$$\min \left( \sum_{i=4}^7 \left( x_i^2 - \frac{1}{4} \sum_{i=4}^7 x_i^2 \right)^2 \right) \quad (31)$$

$$\text{sub.to: } A_{nz} V^T \mathbf{x} = C U^T \mathbf{y}'$$

对于以上线性等式约束的高次代价函数, 最优问题可采用数学工具如 matlab 的优化工具 `fminsearch` 获得可行域内稳定的收敛解。

## 2 气浮系统测量实验分析

### 2.1 气浮系统的测量实例

作为测量实验的实例, 这里选定了模拟平面微重力实验环境条件的气浮实验系统。该系统工作在花岗岩台面上, 经数字水平仪测量, 台面的水平度最大误差为  $7.2 \mu\text{m}$ 。该气浮系统总重  $46 \text{ kg}$ 。平台气瓶等组件采用对称布局, 测点处选取的张力计型号为 HTS-10, 最小分辨率为  $2 \text{ mN}$ , 最大  $100 \text{ mN}$  的量程, 如图 2 所示。在垂直于探头的两个侧向进行测量。气浮系统测试现场如图 3 所示。



图2 HTS-10 横向张力计  
Fig. 2 HST-10 lateral force gauge



图3 实例平面气浮系统的测量现场图  
Fig. 3 in-situ measurement photo of a specified planar air-bearing system

### 2.2 测量结果与处理分析

气浮台安装搭接工装后, 搭接处相对中心的力臂值如表 1 所示, 实验原始记录结果见表 2。

表1 张力计相对气浮中心位置  
Tab. 1 Arrangement of force gauges w.r.t. air-bearing system's center

序号	法向力臂 $l_i / \text{mm}$	摩擦力臂 $d_i / \text{mm}$
1#位	386	286
2#位	410	37
3#位	-410	-287
4#位	-431	-38

表2 实验的原始结果  
Tab. 2 Raw data of measurement

次序	浮前搭接点初 始预紧力/mN	气浮前后各点张力计变化值/mN			
		(1#)	(2#)	(3#)	(4#)
1	10	4	-2	-4	3
2	20	4	1	-5	-1
3	30	8	9	5	6
4	40	4	5	-2	2
5	50	8	2	-6	-4
6	60	-1	-2	1	2
7	70	-3	-4	2	4
8	24	3	-2	-2	4
9	15	4	-1	-5	3
10	35	7	-3	-7	4
11	45	5	-1	-4	2
12	55	4	-3	-2	0
13	64	-2	-2	5	-2

在试验顺序的编排上, 有意打乱了预紧力的顺序, 以排除可能存在的张力计或气浮内部压力变化因素对测量趋势的影响, 从表 2 数据看, 当预紧力施加到某个值以上时, 4 个表位读出的趋势发生方向性的明显改变, 初步判断为预紧力较大时, 引起的静摩擦力也较大, 系统性改变了气浮系统水平运动及旋转的趋势(后面处理也验证了此判断)。后文处理时对表 2 中的第 6、第 7、第 13 组数据进行了剔除处理。

另外, 根据图 1 所示的关系, 3#测点的浮起前后变化的增加值为  $x$  轴正向, 1#测点测量到的增加值为  $x$  的负向; 同样 4#测点的浮起前后变化的增加值为  $y$  轴正向, 2#测点测量到的增加值为  $x$  的负

向; 因此对表 2 原始变化数据的 1#与 2#表位变化值得符号取负值。

对于 1.5 节给出的 (31)式代表的最小化问题, 代入以上表格的测量值后, 获得的奇异值分解后的矩阵主对角元, 取前 6 个特征值作为极小值问题的约束, 采用 matlab 的通用非线性优化工具, 采用了多种初值及优化算法选项, 都获得了相同的收敛值。将两种方法得出的结果对比如表 3 所示。

表 3 处理结果对比表

Tab. 3 Comparison between results of two approaches

解算状态	无搭接点静摩擦假设	搭接点动静摩擦等效假设
侧向力 x 分量	8.30 mN	7.04 mN
侧向力 y 分量	-1.40 mN	-4.59 mN
侧向力转矩	1.68 mN·m	2.07 mN·m
搭接点 1 摩擦系数	—	0.029
搭接点 2 摩擦系数	—	0.016
搭接点 3 摩擦系数	—	0.069
搭接点 4 摩擦系数	—	0.022

从实验测试的处理结果来看, 两者的结果在趋势上基本相同。侧向力的分量在 x 轴的分量最大, 两者结果都具有此特点, x 轴分量的相差 18%; 但在 y 轴分量上有较大差异, 虽然二者获得相同方向的值, 但静动摩擦等效假设处理得到的 y 轴分量为无摩擦假设处理结果约 3 倍; 在侧向力模值上看, 无摩擦假设处理获得侧向力的模为 8.4 mN, 而静动摩擦等效假设处理得到的模值 8.3 mN, 虽然具体的各分量有一定的差, 两者模值无太大差异。在侧向力绕气浮系统中心转矩的估值方面, 静动摩擦等效假设处理结果偏大, 无摩擦假设处理的情形高出 23%。

无摩擦假设处理时, 处理方法获得的(10)式在计算上相当于求解多次的测量的均值; 静动摩擦等效假设处理时, 等效的摩擦系数在 0.02~0.069 之间的范围, 对于 55 mN 左右较大的预紧力, 按照估计得到的摩擦系数, 单个搭接点的预紧力约为 3.8 mN, 如果再考虑其对面搭接点位置的静摩擦力造成的叠加, 其数值上与侧向力 y 分量的结果 4.5 mN 比较接近, 这种接近验证了前文中数据

处理前对三组方向改变的较大预紧力数据进行剔除的判断。

从两种方法的结果比较分析可以看出, 通过接触力的直接静态侧向力测量方法, 静摩擦难以直接测量、且影响到测量的结果, 但经过建模仍可以将静摩擦作为影响因素来联合估计系统侧向作用特性。

### 3 结论

采用直接力测量方式评估平面气浮系统侧向力作为一种新方法, 通过气浮浮起前在平面内布设具有预紧力的约束点, 在浮起后达到自平衡, 可方便地根据力的读数变化评估平面气浮系统的侧向力特性; 当考虑搭接点存在的摩擦力时, 虽不能直接或间接测量, 但通过动静摩擦等效的假设, 仍可将摩擦系数与侧向力进行联合估计, 测量数据及其两种方法处理的结果可对侧力特性估计进行相互印证。

### 参考文献:

- [1] Jana L Schwartz, Mason A Peck, Christopher D. Hall: Historical Review of Air-Bearing Spacecraft Simulators [J]. Journal of Guidance Control and Dynamics (S0731-5090), 2003, 26(1): 513-521.
- [2] 许剑, 杨庆俊, 包刚, 等. 多自由度气浮仿真试验台的研究与发展 [J]. 航天控制, 2009, 27(6): 96-101.  
Xu Jian, Yang Qingjun, Bao Gang, et al. Research and Development of Air Bearing Spacecraft Simulator on the Multiple Degrees of Freedom [J]. Aerospace Control, 2009, 27(6): 96-101.
- [3] Markus Schlotterer, Stephan Theil. Testbed for on-orbit servicing and formation flying dynamics emulation [C]// AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Canada, 2010. USA: AIAA, 2010.
- [4] William R Wilson, Laura L Jones, Mason A Peck. A Multi-module Planar Air Bearing Testbed for CubeSat-Scale Spacecraft [J]. J. Dyn. Sys., Meas. Control (S0022-0434), 2013, 135(4): 045001-045001-10.
- [5] Youngho Eun, Chandeok Park, Sang Young Park. Design and Development of Ground-Based 5-DOF Spacecraft Formation Flying Testbed [C]// AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference, 2016. USA: AIAA, 2016.



