

⑧

41-46

## 柔性结构振动主动控制 的气浮机动台实验系统

V416.6

古 渊 陈伟民<sup>✓</sup> 唐 军 石 荣 黄尚廉

(重庆大学智能结构研究中心、重庆, 400044; 第一作者 29 岁, 男, 博士生)

**摘 要** 针对目前存在的对具有刚性运动基的刚体——柔性体耦合结构的振动主动控制缺乏深入研究的状况, 阐述了建立该实验系统的意义, 详细介绍了气浮机动台实验系统的各组成部分及作用。整个系统已基本建成, 使运动基在气浮状态下以不同的角速度实现不同的角位移。

**关键词** 柔性结构 / 振动主动控制; 实验系统; 运动基  
中国图书资料分类法分类号 V416.5; TH113.1

气浮机动台

### 0 引 言

随着航天事业的发展, 空间飞行器上柔性结构的使用越来越多, 由此带来的振动问题也就越来越严重, 因此, 振动控制的研究越来越受到重视。从传统的被动控制、主动控制, 到目前倍受瞩目的基于智能结构思想的振动主动控制<sup>[1~11]</sup>, 除了理论上的研究外, 实验研究在验证理论结果、探索实用化道路等方面具有不可替代的作用, 而实验系统的建立正是实验研究的基础。

从目前的柔性结构振动主动控制研究中可以看到, 大多数情况下, 都是将柔性结构单独隔离出来进行研究, 而实际的空间飞行器的许多构件都是具有刚性运动基的刚体——柔性体耦合结构, 该类结构存在着柔性振动与刚体运动之间的耦合, 开展对此类结构的振动主动控制研究具有更加重要的实际意义。由于此类刚柔耦合结构比起单纯的柔性结构(杆、梁、板)更为复杂, 因而目前对它们的研究还处于起步阶段, 理论研究少, 实验研究则更少。为此, 笔者在开展这类结构振动主动控制的理论研究的同时, 把建立这种类型的实验系统作为整个研究工作的基础和重点。

针对这类空间柔性结构的特点, 实验系统必须具备以下功能: 1) 能模拟空间悬浮(失重)状态; 2) 能实现刚体运动基的旋转驱动, 以模拟空间飞行器的机动, 并激发柔性体的振动; 3) 能测量机动角位移和角速度, 以控制刚体的运动。因此, 需要分别建立气浮工作台子系统、电机驱动子系统和角位移传感子系统, 从而构成整个气浮机动台实验系统。为实现振动主动控制的理论与实验研究提供物质基础。

• 收文日期 1998-02-26

国家自然科学基金资助项目(59635140)

## 1 实验系统建立

### 1.1 气浮工作台子系统

为了能够模拟空间悬浮状态,提供良好的实验环境,建造了气浮工作台子系统。

该系统的主体是一空气静压轴承,它是由外部加压气体经节流器喷射到轴承表面的一种气体轴承。这股气流在轴承表面之间形成压力气膜,这层很薄的气膜使主轴悬浮在轴承套中,如图 1 所示。其中供气压力为  $P_0$ ,节流器出口处的气腔压力为  $P_d$ ,环境压力为  $P_a$ 。一般地气体静压轴承的正常工作条件为:

$$P_d / P_0 > (2 / (K + 1))^{K/(K-1)} \quad (1)$$

$K$  为气体比热比,对空气  $K = 1.40$ 。另外,表压力比为:

$$K_s = (P_d - P_a) / (P_0 - P_a) \quad (2)$$

它是表征气体静压轴承刚度与承载能力的重要指标,通常  $0.4 \leq K_s \leq 0.8^*$ 。

在轴承的顶端安装一个工作台,用以装载柔性板和驱动电机及飞轮,底端与光电编码器主轴相连。这样便构成了一个具有刚体运动基的刚柔耦合结构(图 2)。

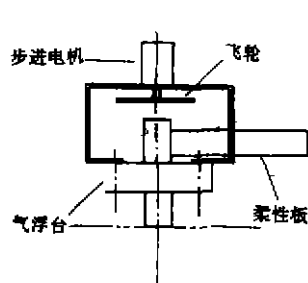


图 2 气浮台示意图和照片

为保证气浮工作台子系统工作稳定可靠,维持长期正常运转,必须重视空气的净化和气源稳压。把由空气压缩机提供的高压气体经过冷却筒、离心过滤筒、干燥筒等的处理,除去灰尘、油份和水份,然后储存在储气筒中供空气轴承使用。为了克服气体压力波动大的问题,又在压缩空气进入气体轴承前采用过滤减压阀和定值器进行稳压。整个过程如图 3 所示。

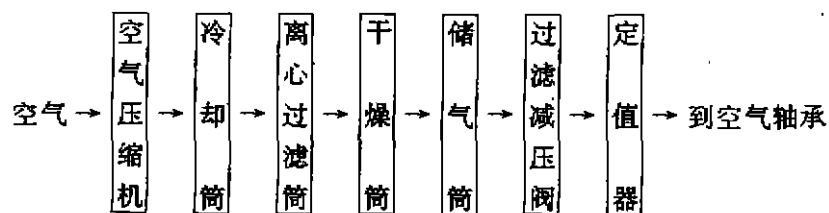


图 3 工作气体处理示意图

\* 钟先信. 高精度空气静压轴承的研究. 重庆大学光机所学术论文集, 1984. 145 ~ 164

## 1.2 电机驱动子系统

为模拟空间飞行器在机动时所引起的柔性结构的振动及其对中心刚体的影响,需要实现工作台在气浮状态下的驱动。如果用传统的电机-齿轮传动机构来驱动气体静压轴承,必然会给整个气浮工作台带来附加约束,从而破坏其自由悬浮的工作状态,因此传统的驱动方法不适用。所以笔者将驱动子系统安装在气浮工作台上,使其成为一个整体。当这个整体处于悬浮状态时,可以近似认为它满足动量矩守恒的条件。这样,当驱动子系统的运动部件运转时,整个气浮工作台及其附件将向反方向运转,从而达到模拟空间飞行器机动的目的。这与目前许多空间飞行器的实际情况也是相符的。

为此,笔者设计了电机-飞轮机构。飞轮安装在电机轴上,电机又装在支架上,支架固定在气浮工作台上(图 2)。根据动量矩守恒定理有:

$$J_1 \omega_1 = J_2 \omega_2 \quad (3)$$

$J_1$  为飞轮转动惯量,  $\omega_1$  为飞轮转动角速度,  $J_2$ 、 $\omega_2$  分别为系统其他组成部分的转动惯量和角速度。根据有关资料,可知  $\omega_2$  是很小的,一般  $\omega_2 < 10^\circ/\text{s}$ 。同时刚性体与柔性体的转动惯量可以取同一个数量级<sup>[8]</sup>。根据空气静压轴承的有关参数,求得其转动惯量约为  $0.00645 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。取柔性板尺寸为:  $400 \text{ mm} \times 120 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ , 材料为铝,其转动惯量约为  $0.00358 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。由于电机及支架的转动惯量相比很小,因此  $J_2$  约为  $0.01 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。

为便于控制,选用步进电机来带动飞轮。原理如图 4 所示。

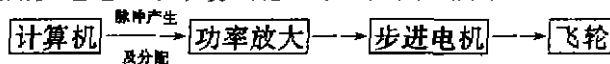


图 4 飞轮驱动原理

步进电机是一种电磁式增量运动执行元件,它的运动受输入脉冲控制,位移量决定于输入脉冲数;速度值决定于脉冲频率;其运动方向取决于控制绕组的通电顺序。

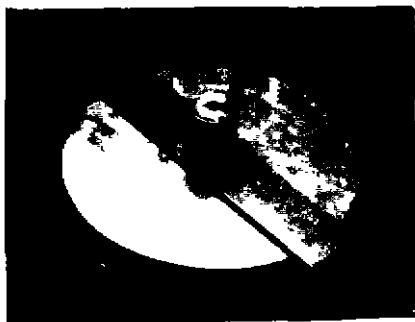


图 5 飞轮驱动系统

采用计算机来产生和分配脉冲,经功率放大来控制电机的转速、方向及转动角度,以实现不同的机动速度和范围。根据实验系统的具体条件,选用的步进电机为 BF 反应子式步进电动机,型号为 45BF005 I。根据它的矩频特性及对气浮台转动角速度  $\omega_2$  的要求,选取飞轮尺寸直径为  $300 \text{ mm}$ ,厚  $2 \text{ mm}$ ,材料为铝,算得其转动惯量  $J_1$  约为  $0.0013 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。通过实验测得电机

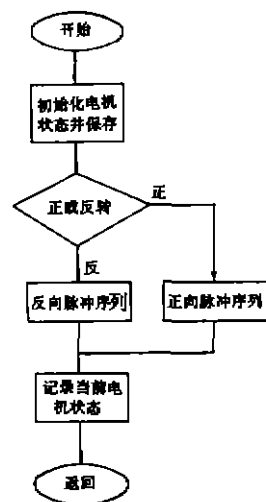


图 6 电机驱动子程序流程图

带动该飞轮的最高转速可达 3 转/秒, 即  $1080^\circ/\text{s}$ , 由此算得  $\omega_2$  最大可达  $1080^\circ \times 0.0013/0.01 \approx 140^\circ/\text{s}$ , 完全满足  $\omega_2$  最大值的需求 ( $\omega_2 < 10^\circ/\text{s}$ , 实际情况是  $\omega_2$  不会大于  $10^\circ/\text{s}$ ,  $140^\circ/\text{s}$  是能够达到的最大转速)。实验装置如图 5 所示, 相应的电机驱动子程序流程图如图 6 所示。

### 1.3 角位移传感子系统

理论上可以根据步进电机驱动脉冲数及驱动时间求得飞轮的角速度  $\omega_1$ , 进而根据式 (3) 可求得  $\omega_2$ , 即气浮工作台的角速度, 积分可得角位移  $\theta_2$ , 从而为控制工作台的机动范围和速度提供依据。但由于计算  $J_1$ 、 $J_2$  时作了近似处理, 加上步进电机本身固有的延迟, 失步等因素的影响, 根据式 (3) 求得的  $\omega_2$  和  $\theta_2$  将会与实际情况有较大的误差。为准确地获取  $\omega_2$  及  $\theta_2$  数值, 设计建造了专门的角位移传感子系统。

该系统由光电编码器和信号处理与接口电路板组成。光电编码器是目前在圆分度和角位移测量方面精度很高, 技术非常成熟的一种传感器。它具有量程大、分辨率高, 可实现动态测量的特点, 具有较强的抗干扰能力<sup>[12]</sup>。根据实际情况, 选用 LBJ 型微型光电编码器, 这种编码器具有体积小, 重量轻, 力矩小, 多脉冲 (A、B、Z 三相), 可靠性高, 寿命长等特点。具体选用的型号是 LBJ-001-1800, 每转输出脉冲数为 1800, 电源电压为 5 V, 电压输出方式。光电编码器安装在空气静压轴承主轴底端。测量原理如图 7 所示。

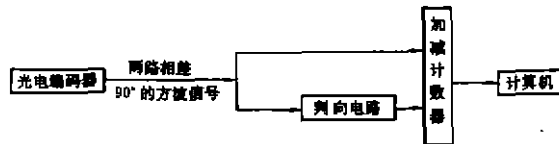


图 7 角位移测量原理

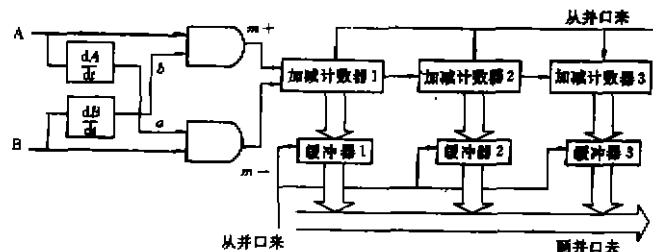


图 8 信号处理与接口电路原理图

气浮工作台转动时带动光电编码器主轴转动, 光电编码器输出两路相差  $90^\circ$  的方波信号 A 与 B。A 超前 B  $90^\circ$ , 代表沿一个方向转动; B 超前 A  $90^\circ$ , 代表沿反方向的转动。一个方波脉冲代表  $360^\circ/1800 = 1^\circ/5 = 12'$  的角位移。用加减计数器记录输出脉冲数, A、B 两路信号经判向电路处理后输出控制信号, 实现加计数和减计数。计数器的输出被输入计算机, 经处理就可获得角位移, 角速度和角加速度值。

信号处理与接口电路板负责两路脉冲信号的判向、计数以及与计算机交换数据。其组成

• 《微型光电编码器使用说明书》, 长春市第一光学仪器厂

如图8所示。

由于气浮台机动有正反向之分,因而选取加减计数器以真实地反映机动的角位移大小。选用的是4位二进制加减计数器74LS193<sup>[13]</sup>。因为考虑机动一周要产生1800个脉冲,因此需要3片74LS193才够用。用计算机并行打印口的状态口来读入计数值,而状态口只有5根线因此要分三次读入,每次读取一个计数器,所以在状态口与计数器之间又加了三个缓冲器74LS367<sup>[13]</sup>。控制加减计数器的清零和打开缓冲器的信号由并口的控制口发出。

判向原理为:分别对A、B两路相差90°的信号取微分 $a = \frac{dA}{dt}$ ,  $b = \frac{dB}{dt}$ ,然后取 $m^+ = A \cdot b$ ,  $m^- = B \cdot a$ ,仔细分析可知, $m^+$ 与 $m^-$ 中只有一路有脉冲信号而另一路为低电平。 $m^+$ 与 $m^-$ 的两种状态分别对应两种相反转动方向,从而实现了判向。角位移传感子系统配套的软件流程图如图9所示。

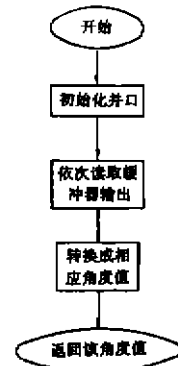


图9 角位移传感子程序流程图

## 2 结 语

经过努力,由气浮工作台子系统、电机驱动子系统和角位移传感子系统构成的实验系统已基本建成,通过计算机的控制,将三者连接成为一个整体,如图10所示。图11则给出了控制气浮台机动的程序流程图。

目前,该实验系统已具备了使附着了柔性板的运动刚体在气浮状态下以不同角速度机动不同的角位移,基本上达到了设计要求。

该系统的建成为柔性结构振动主动控制的理论结果与实际相结合提供了基本的实验保障,有关该结构的振动主动控制的理论与实验研究成果有待进一步研究。

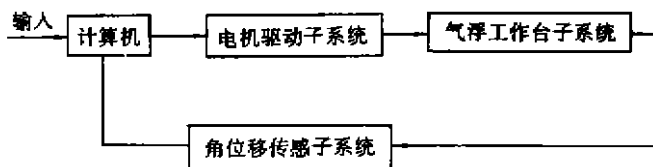


图10 实验系统整体框图

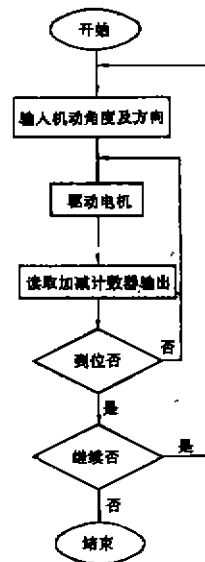


图11 气浮机动控制程序流程图

## 参 考 文 献

- 1 Kim Y. Optimal slewing and vibration control of smart structures. SPIE, 1995, 2443: 157~170
- 2 Khorrami F. Rapid slewing and pointing of a flexible structure with embedded piezoceramics. SPIE, 1993, 1917: 25~36
- 3 Pietsch C R. Active damping control systems for satellites. SPIE, 1994, 2361: 254~257
- 4 Hall E K. The aerospace corp coupled vibration isolation suppression system for space applications: aspects of structural design. 1995, 2443: 136~144
- 5 Charon W. Active mechanical components; a step towards adaptive structure in space. J Intelligent material systems and structures, 1995, 6: 347~354
- 6 郑兆昌, 侯之超. 大型空间柔性结构动力分析研究. 见: 一般力学(动力学、振动与控制)最新进展. 北京: 科学出版社, 1994. 162~167
- 7 唐永杰. 振动主动阻尼控制的理论原理及控制策略. 振动工程学报, 1992, 5(1): 53~57
- 8 李季苏. 挠性结构振动特性测试及振动抑制仿真试验研究. 控制工程, 1996, 2: 13~19
- 9 王晓明. 机敏材料和机敏结构的力学分析. 力学进展, 1995, 25(2): 209~222
- 10 Crawley E F, Luis J. Use of piezoelectric actuators as elements of intelligent structures. AIAA J, 1987, 25: 1 373~1 385
- 11 Im S, Atluri S N. Effect of piezo-actuators on a finitely deformationed beam subjected to general loading. AIAA J, 1989, 27: 1 801~1 807
- 12 强锡富. 传感器. 北京: 机械工业出版社, 1989. 208~209
- 13 中国集成电路大全编委会. 中国集成电路大全——TTL 集成电路. 国防工业出版社, 1985. 204~210, 403~405

## Experimental Setup of Rotating Air-bearing Table System for Active Vibration Control of Flexible Structure

*Gu Yuan Chen Weimin Tang Jun Shi Rong Huang Shangjian*

(Research Center of Intelligent Structure, Chongqing University)

**ABSTRACT** In accordance with the present situation that there is a lack of deeper investigation of active vibration control of rigid-flexible coupled structures with rotating rigid base, the significance of the buildup of experiment system is emphasized, and every component and its function of the experiment system is introduced in detail. The experimental setup has been finished so as to make rigid base rotate within some range at some different angular speed in the state of air-bearing.

**KEYWORDS** flexible structures / active vibration control; experiment system; rotating base

(责任编辑 张小强)