

文章编号 :1001 - 2486(2004)04 - 107 - 05

# 利用线阵 CCD 自动测量 MSBS 中悬浮模型的位置与姿态<sup>\*</sup>

谢海斌, 龙志强, 刘恒坤, 尹力明

(国防科技大学机电工程与自动化学院, 湖南长沙 410073)

**摘要** :以我国自行研制的磁悬挂天平系统为背景,主要研究了利用线阵 CCD 传感器构建 MSBS 的模型位置与姿态测量系统以及相应的传感器配置方案、信号转换、测量原理和测量流程等问题。该系统的位置与姿态测量系统以两组共 5 片线阵 CCD 作为 MSBS 中悬浮模型的 5 自由度位置与姿态传感器,以串联的多级惯性环节电路为脉宽 - 电压转换电路,将测量信号分别输入控制回路和校准测量回路。文中详细介绍了 5 片 CCD 传感器的配置方案及其测量原理,然后研究了使用多级惯性环节实现脉宽 - 电压信号的转换问题,并对该方案进行了理论分析和仿真,最后研究了利用 CCD 的测量信号反演悬浮模型位置与姿态的数学原理及其自动测量流程。

**关键词** :CCD ;磁悬挂天平系统 ;MSBS ;位置姿态测量 ;脉宽信号 ;电平信号 ;转换

**中图分类号** :TP21      **文献标识码** :A

## Auto-measuring the Position and Attitude of the Model Suspending in MSBS by Applying CCD Array

XIE Hai-bin, LONG Zhi-qiang, LIU Heng-kun, YIN Li-ming

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract** :Based on the magnetic suspension and balance system (MSBS), this paper mainly studies the problem of designing the position and attitude measurement subsystem of MSBS by CCD array sensors, and other relevant problems including sensors configuration, signal transformation, auto-measurement principle and flow. 5 CCD array sensors divided into two groups are used to measure the 5-degree freedom position and attitude of the model suspending in MSBS, and the multilevel inertial element circuits connected in series are used to transform the pulse width signal into voltage level signal. The position and attitude measurement subsystem of MSBS inputs its measurement signal to control loop and calibration & measurement loop of MSBS respectively. This paper introduces the configuration of 5 CCD array sensors and its measurement principle in detail. Then, the problem of the signal transformation using the multilevel inertial element circuits is discussed, and the theoretical analysis and simulation are presented. Finally, the mathematic principle and auto-measuring flow of achieving the position and attitude of the model suspending in MSBS by CCD array output signal are discussed.

**Key words** :CCD ;Magnetic Suspension and Balance System (MSBS) ;measurement of position and attitude ;pulse-width signal ;level signal ;transformation

磁悬挂天平系统 (Magnetic Suspension and Balance System :MSBS) 就是通过对多组电磁线圈电流进行实时控制,使磁性飞行器模型所受的电磁力、重力、空气动力以及其它干扰力达到力平衡状态而稳定悬浮于风洞实验段中,通过检测模型的位置与姿态信号和电磁线圈的控制电流信号实现精密测力的装置<sup>[1,2]</sup>。MSBS 运行过程中,悬浮模型的位置与姿态信息作为反馈信号,控制模型稳定悬浮于风洞试验段中。此外,当模型悬浮于非零攻角状态下,进行天平校准和气动力测量,以及进行天平动态校准时,都涉及到悬浮模型的位置与姿态的测量问题。因此,如何在不与模型发生机械接触的前提下,获取飞行器模型的位置和姿态信息,是 MSBS 的位置与姿态测量系统所要解决的主要问题<sup>[3,4]</sup>。

\* 收稿日期 2004 - 02 - 27

作者简介 :谢海斌 (1977 - ) 男, 博士生。

# 1 位置与姿态测量系统构成

MSBS 的位置与姿态测量传感器必须具有如下两个特点 (1)不受磁场的影响 (2)能够以较高的测量精度为控制回路和校准回路实时地输出模型位置与姿态信息。我国最新研制的 MSBS 选用 CCD 器件作为模型位置姿态的测量传感器,完全符合上述要求。

MSBS 的模型位置与姿态测量系统的工作原理框图如图 1 所示。

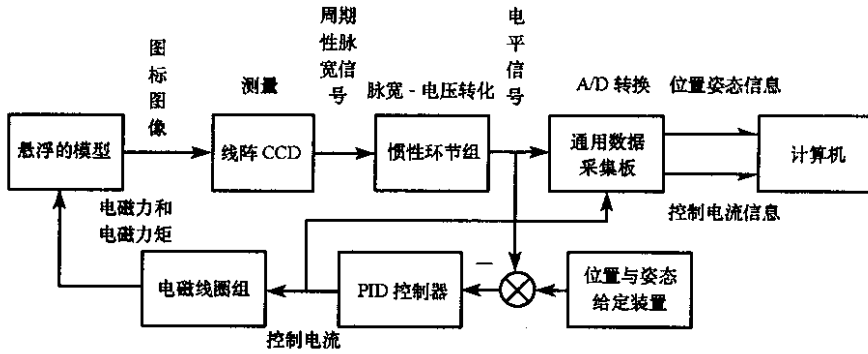


图 1 MSBB 模型位置姿态检测系统的工作原理框图

Fig.1 Working principle illustration for position and attitude measure subsystem of MSBS

其核心部件由两套 CCD 位置传感器构成,其中,一套用于测量模型阻力方向和俯仰方向的空间位置,另一套用于测量模型偏航方向的空间位置。这种配置方案能够实现测量悬浮模型五个自由度(三个平动自由度,两个转动自由度,轴向转动自由度不可测)运动的设计目标。CCD 传感器在驱动脉冲的作用下的输出为周期性的脉宽信号(即方波信号),对于磁悬挂天平这样的多输入多输出连续系统而言,以脉宽信号作为位置给定和反馈信号会严重影响控制性能和系统的稳定性,所以在测量系统中增加了一级脉宽—电压转换电路,将 CCD 传感器输出的周期性脉宽信号转换成与脉冲宽度具有良好线性关系的电压信号。转换后的电平信号蕴含着模型的位置姿态信息,它可直接反馈到控制回路,也可通过数据采集板输入计算机,应用于校准测量过程中求解模型的位置与姿态。

# 2 CCD 传感器配置方案

CCD 传感器的主要工作原理是:飞行器模型表面贴装的组合线形图标通过透镜成像在组合线阵 CCD 上,根据 CCD 上图标的成像位置就可以反演出飞行器模型的位置与姿态信息。

CCD 传感器配置方案及成像视图如图 2 所示。

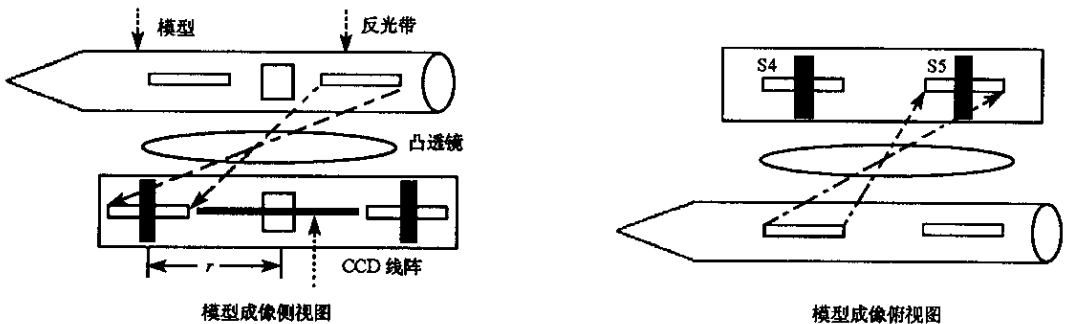


图 2 CCD 传感器配置方案及成像视图

Fig.2 Configuration of CCD sensors and imaging illustration

在黑色模型的侧面中间位置贴有“—|—”形白色图标,顶部中间位置贴有“— —”形图标,与它们相对应,侧面使用三片 CCD 线阵列排列成“|—|”形,顶部使用两片 CCD 线阵列排列成“| |”形,并将它

们分别放入相应的暗箱中。由固定在 MSBS 试验段外部的两支 50W 射灯将模型照亮,模型成像并聚焦在 CCD 阵列上。从侧视图中可见,中间条纹成像在横向安装的 CCD 阵列上,用以检测模型轴向位移,两条横向条纹成像在两个竖向安装的 CCD 阵列上,用以检测模型 Z 轴向位移和俯仰角的变化。同样,模型顶部贴装的图标成像用以检测模型 Y 轴向位移和偏航角的变化。当模型的位置与姿态变化时,模型上的图标在 CCD 上的成像位置也随之移动,CCD 像元受光照的单元发生变化,输出的位置信号和宽度信号也发生变化,将它们进行数学反演变换就可以得到模型的位置与姿态信息<sup>[5]</sup>。

### 3 脉宽信号到电平信号的转换

对原始 CCD 传感器进行二次开发,使其在驱动脉冲的作用下,由内部的集成电路将在空间中变化的一维光学图像转换为两路周期性的电压脉宽信号(即方波信号),一路信号的脉宽反映被测标志图像的位置,另一路信号的脉宽反映被测标志图像的宽度。对于每个 CCD 传感器,测量系统只使用反映被测标志图像位置的脉宽信号。为了保证良好的控制性能和系统稳定性,必须将 CCD 传感器输出的周期性脉宽信号转换成电压信号,这个转换必须具有快速响应的能力,同时要求转换后的电压信号与脉冲宽度之间具有良好的线性关系以及具有脉动小的特点。经过理论分析、仿真实验及实践检验发现,多级惯性环节串联方案能够达到良好的转换效果。该方案克服了高频脉冲填充法和积分法等传统脉宽—电压转换方案局限于采样保持思想的缺点,使其具有物理实现简单,无需时序控制,无量化误差,转化精度高,线性度好,输出信号无突变、无尖峰、无死区、无饱和,易于实现参数调节等优点。以下将对该方案进行简单的分析论证。

首先分析周期性脉宽信号驱动一级惯性环节的时域响应。以  $y(t)$  表示输出,  $x(t)$  表示输入,惯性环节的状态空间表达式为:

$$y'(t) = -\frac{y(t)}{T_f} + \frac{Kx(t)}{T_f} \quad (1)$$

设阶跃信号为  $u(t) = \begin{cases} 1 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$ , 周期性脉宽信号可描述为:

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} [u(t - kT) - u(t - kT - \tau_0)] \quad (2)$$

其中,  $K$  为惯性环节的增益,  $T_f$  为其时间常数,  $\tau_0$  为周期性脉宽信号的脉宽,  $T$  为信号周期。为了便于理论分析,式中令  $t_0 \rightarrow -\infty$ , 并考虑系统初始状态为零,则周期性脉宽信号驱动一级惯性环节的时域响应为:

$$y(t) = K \left\{ \sum_{k=-\infty}^{+\infty} [1 - e^{-\frac{1}{T_f}(t-kT)}] u(t - kT) - \sum_{k=-\infty}^{+\infty} [1 - e^{-\frac{1}{T_f}(t-kT-\tau_0)}] u(t - kT - \tau_0) \right\} \quad (3)$$

由(3)式可得  $y(t+T) = y(t)$ , 故  $y(t)$  是以  $T$  为周期的周期信号。 $y(t)$  的均值为:

$$\begin{aligned} E[y(t)] &= \frac{1}{T} \int_0^T y(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T K \left\{ \sum_{k=-\infty}^{+\infty} [1 - e^{-\frac{1}{T_f}(t-kT)}] u(t - kT) \right. \\ &\quad \left. - \sum_{k=-\infty}^{+\infty} [1 - e^{-\frac{1}{T_f}(t-kT-\tau_0)}] u(t - kT - \tau_0) \right\} dt = K\tau_0/T \end{aligned} \quad (4)$$

信号幅值的最大变化量为:

$$\delta = y_{\max} - y_{\min} = y(kT + \tau_0) - y(kT) = K[1 - e^{-\frac{\tau_0}{T_f}}] \approx K\tau_0/T_f \quad (5)$$

定义信号的脉动系数为:

$$\delta/E[y(t)] = T/T_f \quad (6)$$

由以上分析可知,周期性脉宽信号驱动惯性环节的输出信号是直流信号叠加一高频信号,直流分量与脉宽信号的占空比成正比,高频信号的频率与脉宽信号频率相同,信号的脉动系数等于脉宽信号周期与惯性环节时间常数之比。为了实现脉宽到电压的转换,只需在惯性环节之后增加一级低通滤波器滤除信号中的高频信号即可。经过分析知道,惯性环节具有低通滤波特性,所以整个方案实质上是使用多

级惯性环节实现脉宽到电压的转换。在 MSBS 中, CCD 传感器的输出脉宽信号周期为 0.001s, 在转换方案中, 采用三级惯性环节串联方案, 时间常数分别取 0.0033s, 0.033s, 0.33s, 图 3 是脉宽信号的占空比分别取 0.3、0.5 和 0.7 时的转换结果。

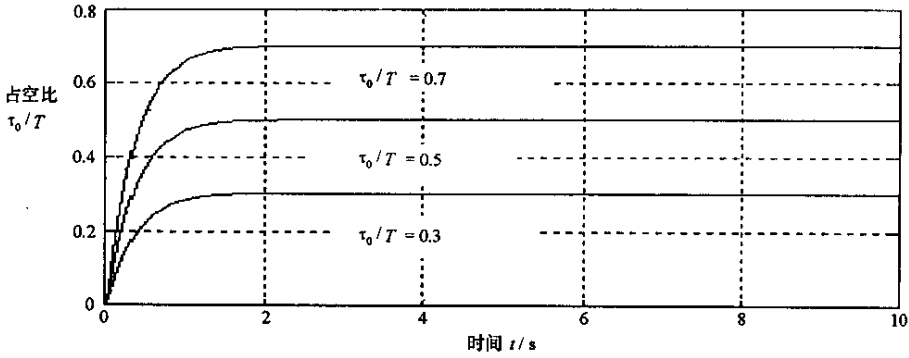


图 3 对应于不同占空比时的转换效果

Fig.3 Transformation result correspond to different duty ratio

### 4 利用 CCD 线阵解算模型位置姿态信息的基本原理

令模型以静态零攻角悬浮于 MSBS 中心时, 模型质心为坐标原点的惯性坐标系为地心坐标系, 此时模型上的各条图标在各自对应的 CCD 线阵上所成的像的位置记为零位置。当模型以任意姿态悬浮于 MSBS 中时, 用  $x_c, y_c, z_c$  表示模型质心在地心坐标系中的坐标,  $\psi$  和  $\theta$  分别表示模型的俯仰角和偏航角,  $s_1, s_2, s_3, s_4, s_5$  分别表示各条图标在对应的 CCD 线阵上的成像离该 CCD 线阵零位置的位移。模型在 CCD 线阵上的成像如图 4 所示, 设成像的位置与姿态用  $(x_c, y_c, z_c, \psi, \theta)$  表示。

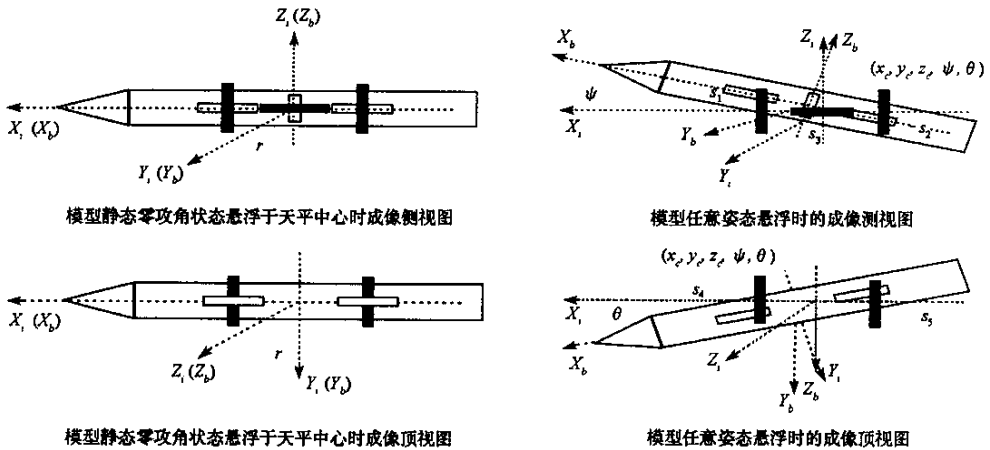


图 4 模型在 CCD 线阵上的成像示意图

Fig.4 Imaging illustration of model in CCD array

由于  $s_1, s_2, s_3, s_4, s_5$  与传感器输出的电压完全成线性关系, 所以, 设  $I_i = k_i s_i$ ,  $I_i$  为与  $s_i$  对应的电压值。根据图 4, 像的姿态与  $s_1, s_2, s_3, s_4, s_5$  之间的关系如下:

$$\begin{cases} s_1 = z_c + (r - x_c) \tan \psi \\ s_2 = z_c - (r + x_c) \tan \psi \\ s_3 = x_c \\ s_4 = y_c + (r - x_c) \tan \theta \\ s_5 = y_c - (r + x_c) \tan \theta \end{cases} \quad (7)$$

由(5)式,可以解出模型的位置与姿态 $(x_c, y_c, z_c, \psi, \theta)$

$$\begin{cases} x_c = s_3 \\ y_c = [r(s_4 + s_5) + s_3(s_4 - s_5)]/2r \\ z_c = [r(s_1 + s_2) + s_3(s_1 - s_2)]/2r \\ \psi = \arctan[(s_1 - s_2)/2r] \\ \theta = \arctan[(s_4 - s_5)/2r] \end{cases} \quad (8)$$

设计 MSBS 时,即令模型以静态零攻角悬浮于 MSBS 中心时的模型质心(即 MSBS 的校准中心)到透镜的距离和透镜到 CCD 线阵的距离相等,设为  $d$ ,当模型的悬浮姿态偏离 MSBS 的校准中心时,由于  $\sqrt{x_c^2 + y_c^2 + z_c^2} \ll d$ ,因此,可以认为模型沿  $Y$  轴的运动不会影响  $s_1, s_2, s_3$  的成像位置,沿  $Z$  轴的运动不会影响  $s_4, s_5$  的成像位置,沿  $X$  轴方向的运动不影响  $s_1, s_2, s_4, s_5$  的成像位置,并且认为透镜仍然位于模型与 CCD 中央。基于这个假设,可以利用模型成像的位置与姿态 $(x_c, y_c, z_c, \psi, \theta)$ 来描述模型实际的悬浮位置与姿态。

## 5 悬浮模型位置与姿态的测量流程

根据 MSBS 的模型位置与姿态检测系统的工作原理框图(图 1)可知,模型位置与姿态信息用于控制和校准测量两个目的。悬浮模型表面贴装的图标经透镜成像到 CCD 上后,CCD 传感器便实时地输出脉宽与成像位置成线性关系的周期性方波信号,该信号通过惯性环节组被转换为与脉宽成线性关系的电压信号,该信号与位置给定装置的输出信号差分后,输入 PID 控制器产生控制电流,驱动电磁线圈组产生电磁力,控制模型稳定地悬浮。在进行校准测量过程中,转换后的电压信号经过 A/D 转换为数字信号输入到计算机中,计算机根据公式(8)解算出模型的位置与姿态,这些参数在求解校准公式和进行气动力测量时将被引用。这里需要指出,在应用公式(8)之前,必须对位置测量系统进行校准,确定出位移与电压之间的比例系数,应用公式(8)时,先计算出  $s_i (i = 1, 2, \dots, 5)$ ,然后计算位置与姿态。

## 6 结论

在磁悬挂天平系统运行过程中,悬浮模型的位置与姿态信息作为反馈信号,控制模型稳定悬浮于风洞试验段中。此外,当模型悬浮于非零攻角状态下,进行天平校准和气动力测量,以及进行天平动态校准时,都需要精确地测量悬浮模型的位置与姿态。本文以我国自行研制的磁悬挂天平系统为背景,主要研究了利用 CCD 传感器构建 MSBS 的位置与姿态测量系统,及其配置方案和信号转换问题,同时还研究了利用 CCD 的输出信号自动测量 MSBS 中悬浮模型的位置与姿态的数学原理和测量流程。

## 参考文献:

- [1] 尹力明,余龙华. 15cm × 15cm 磁悬挂天平技术研究 [A]. 空气动力学研究文集, Vol.7. 1997.
- [2] 谢海斌,谢红卫,龙志强. 磁悬挂天平校准关系的非线性拟合 [J]. 国防科技大学学报, 2001 (6).
- [3] Britcher C P. Application of Magnetic Suspension Technology to Large Scale Facilities-progress, problem and promises [R]. AIAA 97-0346.
- [4] Lin C E, Jou H L. A Dynamic Method for Magnetic Torque Measurement of Permanent Magnets [J]. CAC Journal of Control Systems and Technology, 1994, 2(1): 1-9.
- [5] 刘恒坤. 300mm × 300mm 磁悬挂天平技术研究 [D]. 长沙: 国防科技大学硕士学位论文, 2001.

