

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2012.06.015

# 高精度无阻尼直线运动跟随系统

丁力, 高翔, 单晓杭, 袁巧玲, 张利

(浙江工业大学机械工程学院, 浙江杭州 310014)

**摘要:**对卫星太阳能帆板进行模拟太空低重力环境测试时,常通过吊挂跟随来实现。针对目前国内相应的跟随系统无法满足实时动态跟随、易产生震动等缺点,文章提出了一种简单易行的被测件直线运动跟随方案。该方案基于气浮组件的无摩擦相对运动特性,利用长距离直线滑轨及电磁力装置,解决了跟随系统在水平跟随运动过程中保持吊点与帆板质心铅垂的技术难点。结合软硬件控制系统,最终实现长距离高精度无阻尼直线运动跟随系统的设计。试验表明,所设计的跟随系统完全符合航天器的测试要求。图4参11

**关键词:**直线运动;跟随测试;气浮

中图分类号:TP216 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2012)06-0058-04

## High Precision and Undamped Linear Movement Following System

DING Li, GAO Xiang, SHAN Xiaohang, YUAN Qiaolin, ZHANG Li

(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** The test to satellite solar energy canvas plate in the condition of simulated space low gravity environment is usually managed by suspended following system. Because of the bad real-time dynamic following performance and easily caused vibration of current following systems, the paper proposed a simple and practicable tested linear movement following method. The method which based on the characteristics of dampingless relative movement in gas floated device, had made use of long length slide track and electromagnetic force device, to solve the goal of following system controlled as near as solar energy canvas plate in horizontal following movement. Combined with soft-hardware control system automated control system, the paper successfully designed a high precision following system which fulfilled the long-travel dampingless linear following movement. The test results show that the designed following system splendidly meets with the test demand of spacecraft. [ Ch, 4 fig. 11 ref. ]

**Key words:** linear movement; following movement test; gas floated device

### 0 引言

应某航天研究院项目要求,提供一套在模拟太空低重力环境下的测控系统,要求能够达到高速高精度的跟随性能:最高跟随速率0.8 m/s,最大允许跟随偏离角1°。目前同类项目测控系统常采用挂砝码式跟随方案,其性能无法满足该指标,故文章提出了一种基于机电闭环控制的跟随测控方案,具有高可靠性、高精度、可直接获取所需的测试数据等优点。

### 1 系统总体方案

为了实现系统的跟随指标,即跟随的快速性、准确

性和稳定性。在王海华<sup>[1]</sup>发表的论文中提到了一种利用直线电机拖动的方法来实现小惯量直线跟随。但是,在长行程的应用中,尤其是文中所阐述的3 m超长行程的设计中,显然无能为力,因此,本设计采用伺服电机加滚珠丝杠的第一级直线运动方案,由此也必将带来系统惯量大的缺点,通过选择更大功率伺服电机的方法来弥补这一缺点。在第二级的跟随中,系统采用无摩擦气浮随动设计,为了补偿气浮套惯性力大的缺点,系统引入电磁力装置<sup>[2-3]</sup>。

系统由上位机、控制箱、采样控制设备、机械执行

收稿日期:2011-10-11;修回日期:2011-10-30

基金项目:浙江省自然科学基金(Y1111137)

作者简介:丁力(1987),男,浙江江山人,浙江工业大学在读硕士研究生,主要研究方向为机电一体化。E-mail:dlxibei@163.com

机构 4 部分组成。上位机负责指令输入、各种参数的读取与图形参数保存,下位机控制箱负责子系统的传感器采样与跟随闭环控制,其系统结构框图如图 1 所示。

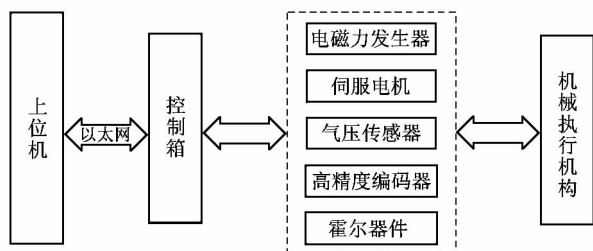


图 1 系统结构框图

Figure 1 System structure diagram

## 2 机械结构设计

为了实现跟随机构的高速高精度要求,系统执行机构在原理上希望全程无摩擦设计,原理设计时的机构结构关系为:跟随系统吊挂点固定在气浮套上,恒压气源直接供给气浮套,实现气浮套在气浮轴上的全程无摩擦滑动,因此,在被测件自身重力的影响下,吊挂绳恒处于铅垂状态,吊挂点自然会随着被测件随动,从而跟随无需控制系统辅助。

在工程设计中,由于气浮轴与气浮套之间有较高的配合要求,轴与套的间隙要控制在  $15\ \mu\text{m}$  以内,由此衍生出气浮轴的同轴度加工、弯曲刚度、可靠性、维护性、加工成本等一系列可预知与不可预知的问题。从工程的角度来看,要达到设计要求长度 ( $>3\ \text{m}$ ) 的超长的气浮轴几乎无法加工。因此,在实际设计时设想了一种长距离滑轨配合短距离气浮的设计方案替代原理设计,工程设计的机构结构如图 2 所示。

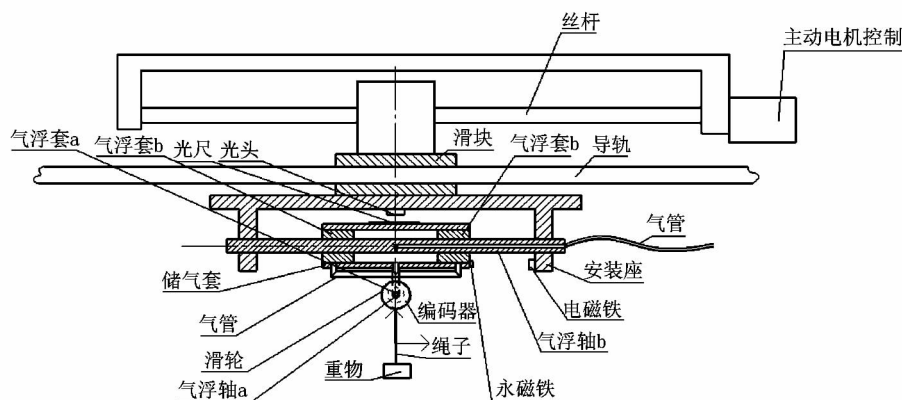


图 2 气浮导轨机械结构

Figure 2 Gas lubricated slideway's mechanical structure

跟随系统吊挂点固定在气浮套上,气浮套在短距离气浮轴上无摩擦滑动,整个气浮模块固定在长行程滑轨的滑块上利用闭环控制下的伺服电机拖动实现,控制目标为气浮套始终处于滑块中部,其位置偏离值由光头从光尺读出。由此,引入传感器与控制器组成的闭环系统,同样保证了被测件直线运动全程无摩擦吊挂的要求,系统将机械设计与加工上的难点转移到系统控制上来,长行程气浮轴不可加工性与长行程无摩擦设计指标之间的矛盾迎刃而解。此外,为了提高系统的启停特性,消除气浮套在运动过程中大惯性力的影响,系统引入电磁力发生装置,在启停过程中提供一个反向于惯性力的推力,使气浮套启停时无惯性力影响,从而完善系统<sup>[4-5]</sup>。

## 3 测控的控制系统设计<sup>[6-8]</sup>

为了提高系统的控制频率以达到系统所要求的性能指标,测控系统采用自研控制箱实现超过  $1\ 000\ \text{Hz}$  的采样与控制频率,是一般基于 labview 的 PCI 采样与控制板卡所实现的的测控系统无法达到的。测控系统控制框图如图 3 所示。

为了保证测试系统的稳定性与可靠性,系统采用自研线性隔离电源,通过交直流滤波模块滤波后,电源输出具有低噪、稳定、相互间无互扰的特点。同时,由于是线性电源,保证了机箱内部具有良好的电磁环境。

控制系统采用主板 + 多块自研功能性模块的设计。功能性模块与主板采用排线连接,使控制系统具有较高的灵活性与改进潜力。系统中主要有主板、电机控制模块、多通道采样模块、编码器输入模块以及 IO 控制模块组成。

主板采用意法半导体公司制造的工业级 ARM 芯片作为主控制器。主板通过板载以太网模块实现与上位机的通信,通信频率限制在  $50\ \text{Hz}$ ,有效通信传输速率为  $400\ \text{kb/s}$ ,可轻易实现主机所有采样值的上传与控制参数的下发。

系统所使用的基于 cpld 的编码器输入模块,可实现最高  $8\ \text{MHz}$  编码器 AB 相信号输入,可有效滤除  $16\ \text{MHz}$  以上频率的干扰信号。

自研的电机控制模块主要实现与伺服电机放大器的交互与闭环控制,闭环控制频率最高可达

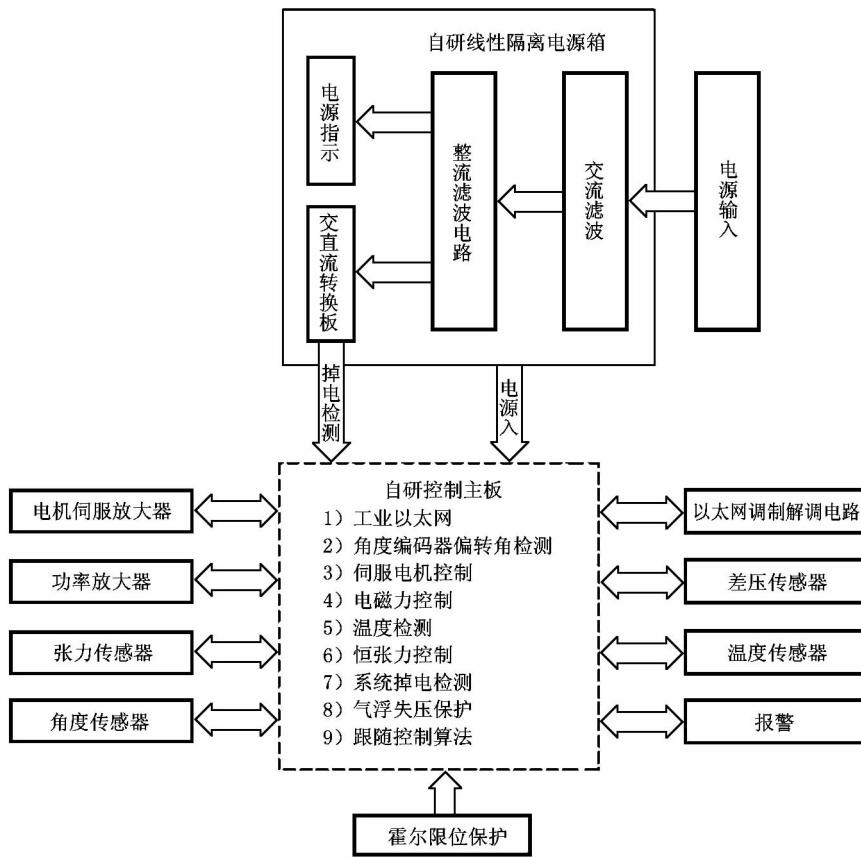


图3 测控系统控制框图

Figure 3 Measurement and control system's control block diagram

2 000 Hz。模块使用独立的 ARM 控制芯片,使模块具有较高的独立性与智能性,模块载有的 CPLD 实现 2 路编码器信号的读入与 2 路高速脉冲输出。因此,模块在有独立电源的情况下,可以独立实现电机位置模式下的电机控制。

自研的多通道采样模块采用微控制器自带的 10 位 AD 采用通道与专用的 24 位采样芯片 2 种采样并存的设计方案,实现高低搭配。采样卡主要实现差压传感器、温度传感器、张力传感器采样数据的采集与处理。

IO 模块主要实现针对功率放大器的 DA 输出、霍尔传感器的限位信号获取等功能。

#### 4 系统控制方案

控制系统通过电磁力装置实现惯性力补偿,在气浮轴运动时,根据吊挂绳偏转角,提供相应的电磁力,抵消气浮套惯性力大的影响,提高气浮套在启停时的快速响应能力。

通过电机的改进型 PID 闭环控制算法,实现滑块始终处于气浮套中部的控制目标,最终实现整体的跟

随控制。

#### 4.1 惯性力补偿

如图 2 所示,当被吊挂件沿与气浮轴 a 轴向平行的方向移动时,由于气浮组件的质量较大,拖动气浮组件移动时不能忽略惯性力的影响,如果气浮组件不能一致跟随,则吊挂绳不再垂直于储气套,倾斜角度为  $\alpha$ 。装在气浮滑轮上的编码器可以灵敏地测出  $\alpha$  的大小,并把该角度值传给多通道采样模块,采样模块将采样值通过主板传递给 IO 控制模块,IO 控制模块根据惯性力抑制公式计算出控制电磁铁的电流的大小与方向,并输出模拟量值给功率放大器输出所计算的电流值,安装座左端的电磁铁对储气套右端的永磁铁产生与惯性力相反的推力或吸力,推或拉储气套运动,从而弥补惯性力的影响。

具体的控制算法如下:

编码器可以测出吊挂绳任意时刻的角度  $\alpha$  变化值,绳长  $L$  和随动部件储气套与两个气浮套的总质量  $m$  已知。

线性速度

$$v = \frac{d(L\sin \alpha)}{dt}$$

线性加速度

$$a = \frac{d}{dt} \left[ \frac{d(L\sin \alpha)}{dt} \right]$$

则惯性力为

$$F' = m \frac{d}{dt} \left[ \frac{d(L\sin \alpha)}{dt} \right]$$

电磁铁线圈的匝数  $N$ ,铁芯横截面积  $S$  已知,电磁铁的吸力  $F$  计算公式如下

$$F = \frac{1}{2\mu_0} \frac{\varphi^2}{S}$$

其中  $S$  为铁芯横截面, $\mu_0$  为真空磁导率, $\varphi$  为磁通,对于直流电磁铁

$$\varphi = \frac{IN}{R_m}$$

所以

$$F = \frac{1}{2\mu_0} \frac{I^2 N^2}{R_m^2} \frac{1}{S}$$

其中  $I$  为通过电磁铁线圈的电流,  $N$  为电磁铁线圈的匝数。因为电磁铁的吸力  $F$  与随动件惯性力  $F'$  的大小相等, 方向相反, 则有

$$\frac{1}{2\mu_0} \frac{I^2 N^2}{R_m^2} \frac{1}{S} = m \frac{d}{dt} \left[ \frac{d(L \sin \alpha)}{dt} \right]$$

$$I = \sqrt{m \frac{d}{dt} \left[ \frac{d(L \sin \alpha)}{dt} \right] \frac{2\mu_0 R_m^2 S}{N^2}}$$

通过角度采样值控制电磁铁电流实现提供精确的补偿力。

#### 4.2 跟随闭环控制

PID 控制看似只需要通过修改比例系数  $K_p$ 、积分系数  $K_i$ 、微分系数  $K_d$  3 个参数就能得到较好的控制结果, 但是闭环控制的响应快速性和控制稳定性是一对无法调和的矛盾<sup>[9-11]</sup>。

在实际跟随过程中, 由于被吊测试机构运动速度较快, 因此就需要系统在保证不起振的前提下牺牲稳定性提高快速性。为达到高响应下不起振的系统性能, 系统对偏差值与测量值进行修正, 改良后的控制系统绝对值式 PID 结构原理图如图 4 所示。

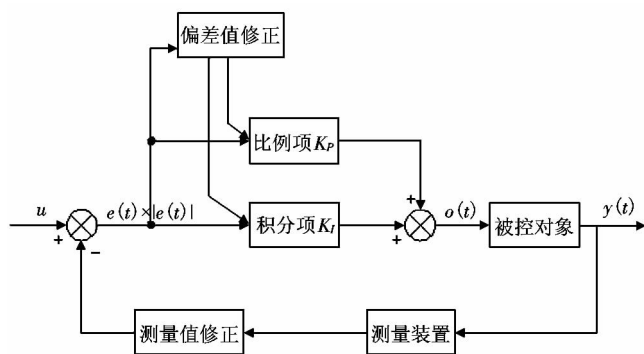


图 4 改进型 PID 结构原理图

Figure 4 Schematic diagram of improved PID algorithm structure

闭环控制目标为滑块始终处于气浮套中部, 光头偏移量为 0, 由于系统所采用的编码器为绝对型光电编码器, 因此在上电后需要编码器零点调校, 即将滑块与气浮套对中。在调校完成后, 编码器光头偏离零点的误差量即为电机闭环控制的控制输入  $u$ 。在气浮轴套偏离滑块中点后, 电机拖动滑块向偏离方向运动, 使气浮套始终处于滑块中点位置附近。

为了提高电机移动的响应特性, 通常情况下会直

接增大比例系数  $K_p$ , 而此时, 由于机械振动或者采样值精度问题会导致  $K_p \times e_p$  计算值的跳动占输出值的比重过大, 从而使系统无法回归到稳态过程, 容易发生机械振动损坏滑轨。在工程中, 为了达到瞬态响应高, 稳态控制稳定性好, 许多闭环系统多采用分段 PID 的算法, 但该算法程序复杂, 分段边界难以确定, 因此, 在测试系统中采用平滑后近似于抛物线的偏差修正方法取代分段改变系数的控制方法, 使  $e_p' = e_p \times |e_p|$ , 将原有的偏差值  $e_p$  由计算后的  $e_p'$  替代。此外, 控制系统采用采样值限制与修正、控制死区设置、瞬态输出变向抑制等方法提高系统在高响应下的跟随稳定性。

#### 5 结语

文中所述的跟随系统采用改进型 PID 闭环控制下的电机跟随与惯性力抑制算法, 消除了气浮模块自身惯量大的缺点, 提高了瞬态控制响应速度与稳态跟随精度。测控系统通过工控机进行人机交互, 提供了模拟环境的实时参数, 大大提高了测试效率。该装置的研制, 将改变国内低重力环境模拟设备的研制现状, 为航天事业做出较大的贡献。

#### 参考文献 (References):

- [1] 王海华, 殷跃红. 基于 DSP 的高加速度快起停位置跟随系统研究 [J]. 机械科学与技术, 2004, 21(2): 26-28.
- [2] 章秀君, 赵燕伟, 孙建辉, 等. 模态试验悬挂系统长行程电磁力装置的磁场分析与仿真 [J]. 轻工机械, 2009, 27(3): 67-70.
- [3] 孙建辉, 王时杰, 单晓杭, 等. 模态试验悬挂系统附加质量惯性力抑制效果检验技术研究 [J]. 轻工机械, 2010, 28(4): 87-90.
- [4] 丁亮亮, 赵东标, 陆永华, 等. 直线电机气浮精密平台的设计与控制 [J]. 机械与电子, 2011(4): 34-37.
- [5] 林振华, 董云峰. 基于单轴气浮台摆动特性的调节平衡方法 [J]. 科技导报, 2010, 28(2): 46-49.
- [6] 徐继克, 张永表. 基于单片机扩展 RAM 研究 [J]. 苏州科技学院学报: 工程技术版, 2010, 23(4): 71-75.
- [7] 邹乾, 李兴根. 步进电机的自适应 PI 调速系统 [J]. 轻工机械, 2009, 27(1): 73-75.
- [8] 王述彦, 师宇, 冯忠绪. 基于模糊 PID 控制器的控制方法研究 [J]. 机械科学与技术, 2011, 30(1): 166-172.
- [9] 牟春燕, 吴凯, 姜革, 等. 基于 PID 控制策略的电动助力转向系统研究 [J]. 机械科学与技术, 2011, 30(4): 622-624.
- [10] 周毅, 刘春辉, 孔超. 基于模糊 PID 控制的气动负载模拟器研究 [J]. 机床与液压, 2011, 39(11): 70-72.
- [11] 顾凯, 李长春, 周欣. 电液伺服系统同步控制研究 [J]. 液压与气动, 2010(6): 1-3.

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2012.06.016

# 可控硅串级使用触发电路

周浩<sup>1</sup>, 孙晓<sup>2</sup>, 杨永<sup>3</sup>, 肖强晖<sup>1</sup>, 易吉良<sup>1</sup>, 卢祥江<sup>2</sup>

(1. 湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007;  
2. 湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007; 3. 中国人民解放军 75123 部队, 广西 桂林 541005)

**摘要:**可控硅作为开关元件在高压测控领域中应用越来越多。为了更好的保证高电压作业条件下的人身安全、元器件性能稳定、测试数据更加精准,对可控硅串级使用中电路的改进显得尤为必要。文章利用 R-C 回路进行了动态均压保护以及并联 R 的静态均压保护方法,提出了一种在高电压条件下可控硅作为开关元件串级使用的触发电路的改进方法,使可控硅串级触发电路的稳定性有了进一步的提高,解决了使用中容易误触发、不能同步触发、温度过高等缺点。在现场试验中,串级后的可控硅各项性能稳定、可靠。图 3 表 1 参 9

**关键词:**可控硅;串级;保护;稳定

中图分类号:TM774 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2012)06-0062-03

## Design of the Trigger Circuit for SCR Cascade

ZHOU Hao<sup>1</sup>, SUN Xiao<sup>2</sup>, YANG Yong<sup>3</sup>, XIAO Qianghui<sup>1</sup>, YI Jiliang<sup>1</sup>, LU Xiangjiang<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 212007, Hunan, China;  
2. School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, Hunan, China;  
3. 75123 Unit of the PLA, Guilin 541005, Guangxi, China)

**Abstract:**In the high-pressure measurement and control field, SCR as a switching element in the circuit design is used more and more frequently. In order to better guarantee the personal safety of high-voltage operating conditions, components performance stable, accurate test data, the improvement of the SCR cascade circuit is particularly necessary. Resistor-capacitor circuit by using dynamic voltage protection, as well as parallel resistor static pressure protection, the paper proposed an improvement method—a high voltage conditions SCR as a switching element cascade trigger circuit, so that the SCR string level trigger circuit stability being further improved to solve the short comings, such as false triggering in use, fail to trigger synchronization, too high temperature etc. In field trials, the performance of SCR cascade proved stable and reliable. [ Ch,3 fig.1 tab.9 ref. ]

**Key words:**silicon controlled rectifier(SCR); cascade; protection; stable

## 0 引言

近年来,可控硅广泛的应用在各种测控行业,并且其串级使用时容易发生的误触发、不能同步触发等情况限制了它的应用。为了更好发挥可控硅的开关作用,获得更好的测控数据,一般需要一系列的措施,但是造成成本太高或者是效果不明显,文章对可控硅特性的分析,提出了一种能够对高压可控硅串级使用时

较好的进行静、动态均压保护的方法。该方法有效地保障了高压可控硅串级使用时的安全、可靠运行,从而获得较好的经济效益。

## 1 可控硅串级使用原理

在测控行业<sup>[1-2]</sup>中,如电机匝间耐压测试,往往加载在电机匝间中的电机高达几千,甚至几万伏,此时可控硅往往需要承受自身耐压值的几倍或者几十倍的电

收稿日期:2012-05-12;修回日期:2012-09-07

基金项目:住建部节能监管平台研制与节能改造项目资助(财建[2010]520-05)

作者简介:周浩(1987),男,湖南浏阳人,湖南工业大学硕士研究生,主要研究方向为智能系统。E-mail:zhouhao0903@yahoo.com.cn;通信作者:孙晓,副教授,硕士生导师,主要研究方向为机电控制与计算机技术。