

## 基于可控式被动阻尼的静电陀螺仪启动控制系统

刘春宁, 田蔚风, 金志华

(上海交通大学仪器工程系, 上海 200030)

**摘要:** 静电陀螺仪 (ESG) 的启动阻尼是一个转子最大惯性主轴与转轴对准的过程。采用直流磁场的可控式被动阻尼方法有效地解决了转子极性倒置问题。文中介绍了基于可控式被动阻尼 ESG 启动控制系统的设计和研制, 该系统以浮点 DSP 芯片 TMS320C32 为核心电路, 具有转子阻尼、极性识别与控制、故障检测、转速测定、恒速控制和 RS232 通讯等功能。在气浮装置上证实了所研制的系统能有效实现上述功能。

**关键词:** 静电陀螺仪; 可控式被动阻尼; 极性控制; DSP

**中图分类号:** U666.1

**文献标识码:** A

## ESG Startup Control System by Controllable Passive Damping

LIU Chun-ning, TIAN Wei-feng, JIN Zhi-hua

(Department of Instrumentation Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** The damping of ESG rotor during initial spin up is an alignment process of rotor maximum principal axis of inertia with spin axis. Passive damping by applying a strong DC magnetic field is adapted to hollow ESG rotor. Controllable passive damping is adopted which can effectively overcome the indetermination of rotor's polarity. The paper introduces the design and development of an ESG startup control system based on controllable passive damping. By using DSP as the core circuit, this system can fulfill damping of rotor, identification of rotor's polarity, rotor's polarity control, malfunction detection, rotation rate control and communicating with PC by RS232. The experiments on the air-bearing device prove the effectiveness of this system.

**Key words:** ESG; controllable passive damping; polarity control; DSP

### 0 引言

静电陀螺仪 (ESG) 是一种利用电场力将高速旋转的球形转子支承在超高真空电极腔体中的自由转子陀螺仪。由于不受机械约束, 转子启动时在驱动磁场的作用下并不会限定绕某一固定轴旋转, 而是可能会绕转子任意轴转动。转子绕最大惯性主轴旋转是最稳定并且能量损失最少, 因此是所期望的旋转轴。ESG 转子在加转磁场的驱动下达到工作转速, 如果在此过程中不对转子进行阻尼, 当驱动结束后由于转子极轴与转轴方向不一致而产生自然规则进动<sup>[1,2]</sup>。为进行 ESG 信号读取, 必须对转子进行阻尼, 使自然规则进动转化为绕最大惯性主轴的永久转动。

主动阻尼和被动阻尼是两种常用的阻尼方法。主动阻尼方法可利用施加大小和方向可控制的阻尼力

**收稿日期:** 2005-03-02

**作者简介:** 刘春宁 (1978—), 男, 上海交通大学博士研究生, 从事新型惯性器件技术研究。

矩,在转子加转时间内实现阻尼,同时可控制转子极性。文献[3][4]提出一种半球施矩的主动阻尼方法,半球施矩所用的转子被划分成明暗两个半球,两个半球之间的边界为锯齿形图案,以实现精阻尼以及阻尼终止判定。文献[5]中提出一种针对质量不平衡调制(MUM)信号读取的质量偏心实心转子 ESG 主动阻尼方法,该方法无须在转子上刻线,利用 MUM 信号所包含的相关信息实现转子主动阻尼,同时可以解决转子极性不确定问题。采用强直流定中磁场的被动阻尼一般适用于空心转子 ESG,这是由于空心转子转动惯量差率比较大(约为 0.2),其阻尼时间小于加转时间。但是对空心转子 ESG 采用被动阻尼会遇到转子极性不确定问题,对漂移建模和误差补偿带来困难,通常需要重复启动以获得正确的极性,这样会增加转子的发热,延长陀螺的热平衡时间,而且操作也不便。文献[6][7]提出的可控式被动阻尼方法利用转子侧面刻线,通过侧光电传感器信号输出来判定转子极性,并在转子极性为负的情况下进行极性翻转,同时利用直流定中磁场对转子进行阻尼。该方案简单易行,能有效解决空心转子 ESG 极性倒置问题。

本文设计并研制了基于可控式被动阻尼 ESG 启动控制系统。系统以浮点 DSP 芯片 TMS320C32 为核心,利用其运算速度快、并行体系的哈佛(Harvard)结构,强大的运算及控制能力及 C 语言开发工具等优点,实现了转子阻尼、极性识别、极性控制、故障检测、转速测定、恒速控制和 RS232 通讯等功能。

## 1 系统的组成

可控式被动阻尼的基本过程是:1)启动 ESG 后,在转子转速较低时采用强直流定中磁场对转子进行阻尼;2)利用赤道光电传感器检测转子刻线识别当前转子极性;3)如果转子极性为负,施加一个方向垂直于加转力矩的拉偏力矩使角动量向量方向偏离一个微小角度,然后施加一个方向与加转力矩相反的翻转力矩,当转速衰减到接近于零时,转子极性将会发生翻转,此时去掉转子支承,在这一状态下同时施加加转及定中力矩,然后支承转子,将获得正确的极性<sup>[6,7]</sup>。

根据上述过程,设计启动控制系统,其结构如图 1 所示。DSP 控制电路实现故障检测、转子极性判别及转速计算、施矩控制信号的输出和通过 RS232 串行接口与 PC 机通信等功能。信号发生与功放电路产生两路相位差为  $90^\circ$  的正弦电压,经功率放大后接入气浮装置加转线圈(X 线圈和 Y 线圈)或定中线圈(Z 线圈),可对转子施加定中、加转、拉偏、翻转力矩。LED 显示系统

工作状态及转子转速。通过拨盘可输入转子工作转速设定值。图中虚线框部分为信号模拟电路,由于试验在气浮装置上实现,故障检测信号模拟电路产生 0~5 V 可调电压,用以模拟支承、温度、真空度、备用电源等信号。极性信号模拟电路利用单片机实现,产生频率递增的脉冲信号用以模拟极性信号,用来进行系统的功能调试。

## 2 转子极性识别

ESG 转子的赤道上沿经线方向刻有长 8 mm 的三条线,如图 2 所示(z 轴为转子极轴)。刻线间隔分别为  $10^\circ$  和  $20^\circ$ 。转子加转后在定中磁场作用下极轴向定中线圈轴线方向靠近,当章动角减少到约  $12^\circ$  时,赤道光电传感器就可以拾取 3 个脉冲信号。一周内脉冲之间的时间间隔为  $T_1$ 、 $T_2$  和  $T_3$ , 用来进

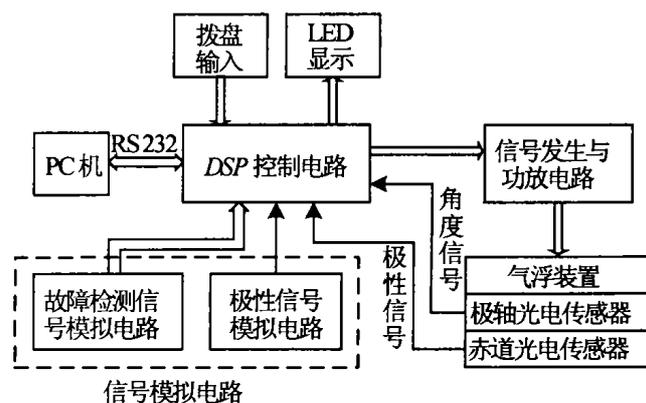


图 1 ESG 启动控制系统结构

行转子极性判定和转速计算(图3)。由于初始条件的不确定性,检测到的第一个时间间隔可能是图中  $T_1$ 、 $T_2$  和  $T_3$  中的任意一个,  $T_1$ 、 $T_2$  和  $T_3$  的各种大小组合一共只有6种。根据图3中脉冲间隔规律可得到转子极性和脉冲时间间隔之间的关系如表1所示,图3是表1中第一行对应的情形。

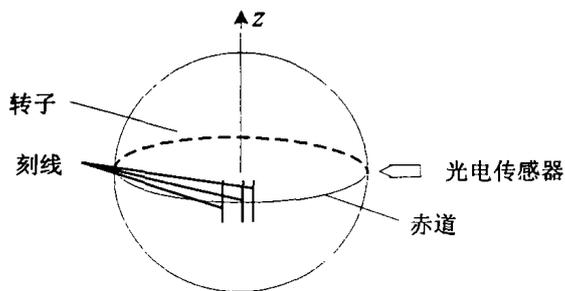


图2 转子刻线

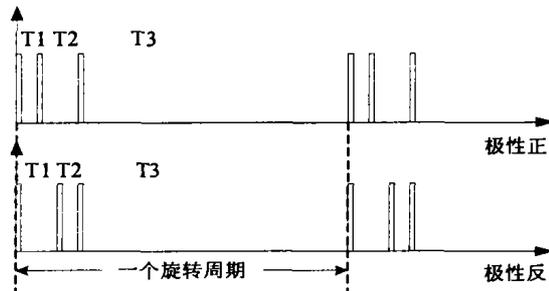


图3 极性信号

根据表1得出极性判别规则: 1) 若  $T_1 < T_2 < T_3$  或  $T_3 < T_1 < T_2$  或  $T_2 < T_3 < T_1$ , 则极性为正; 2) 若  $T_2 < T_1 < T_3$  或  $T_1 < T_3 < T_2$  或  $T_3 < T_2 < T_1$ , 则极性为负; 3) 否则, 极性判断错误, 重新判断。

转速计算公式为  $\Omega = 1/(T_1 + T_2 + T_3)$ 。在工作转速为 360 Hz 时,  $T_1 \approx 77 \mu s$ 、 $T_2 \approx 154 \mu s$ 、 $T_3 \approx 2541 \mu s$ ,

DSP 计数器内部计数频率为 10 MHz, 分辨率为 0.1  $\mu s$ , 可以满足要求。

表1 极性正反与检测到脉冲时间间隔关系

极性正			极性反		
$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_1$	$T_2$	$T_3$
小	中	大	中	小	大
中	大	小	小	大	中
大	小	中	大	中	小

### 3 系统硬件设计

系统可工作在手动及自动两种控制方式下, 其硬件主要由 DSP 控制电路和信号发生及功放电路组成。DSP 控制电路的结构如图4所示。多路开关 ADG406 提供 16 路信道, 与 12 位 A/D 采样芯片 AD574 和采样保持芯片 AD585 构成信号采集电路, 对 +5 V、+15 V、-15

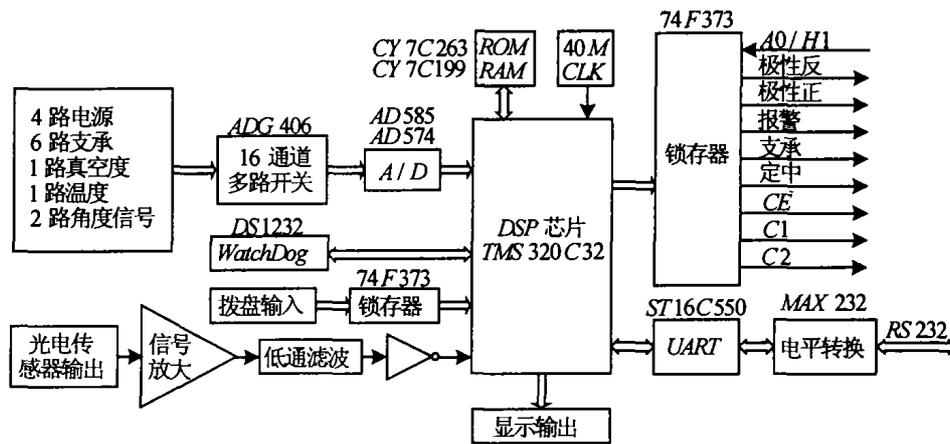


图4 DSP控制电路结构图

V 和 GND 等 4 路电源, 以及 6 路支承、1 路真空度、1 路备用电源、1 路温度共 13 路信号进行数据采集, 把采集到的数据作为故障检测原始数据。为了利用 DSP 强大计算功能对 ESG 输出信号进行数据处理, 系统中保留了两路 ESG 角度信号数据采集接口。光电传感器输出脉冲经放大整形及滤波后, 作为极性信号接在 DSP 芯片外部中断 INT1 引脚上, 在中断程序中利用 DSP 内部 10 MHz 计数器检测极性信号脉冲时间间隔。DS1232 组成的 Watchdog 电路提供系统上电复位及错误复位功能。ROM 和 RAM 分别采用四片  $8K \times 8$  的 CY7C263 及一片  $32K \times 8$  的 CY7C199。这两种芯片都是 Cypress 公司的高速存储芯片, 它们可以使 TMS320C32 在不等待的状态下进行高速的数据读写, 采用外部内存 8 位, 数据格式

32 位方法连接。RS422 串行通讯部分由通用异步收发器 (UART) ST16C550 实现, MAX232 将 TTL 输出转化为 RS232 接口标准电平。拨盘通过锁存器 74F373 进行额定工作转速输入。LED 数码显示转子转速及系统工作状态。DSP 通过锁存器 74F373 输出 CE、C1、C2、定中和支承控制信号; 输出报警、极性正和极性反状态信号; 输入 A0/H1 进行控制方式检测。

信号发生及功放电路结构如图 5 所示。在自动控制方式下, 系统通过 MOS 开关逻辑组合控制施矩; 在手动控制方式下, 通过手动控制开关组合控制施矩。系统利用信号 A0/H1 判断当前系统工作在自动还是手动控制方式, 低电平时为自动控制方式, 高电平时为手动控制方式。极性负和极性正信号输出当前极性状态。报警信号输出当前故障状态, 检测错误时该信号为高电平, 否则为低电平。支承信号控制转子起支。定中信号为高电平时, 定中继电器置常开, +12 V 直流电压加到定中线圈上产生定中力矩。当该信号为低电平时, 定中继电器常闭, Z 路功放输出加到 Z 线圈输出上, 与 X 线圈产生拉偏力矩。CE、C1 和 C2 为施矩控制信号, 用以控制加转、制动或拉偏力矩的施加。

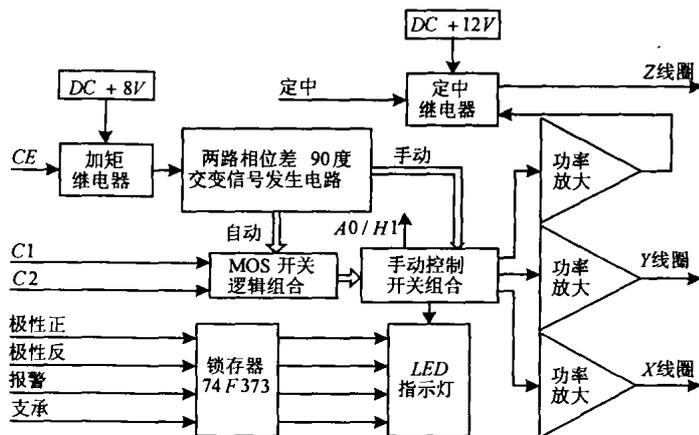


图 5 信号发生及功放电路结构图

#### 4 系统软件设计

系统 DSP 软件流程框图如图 6 所示。系统启动后首先进行故障检测, 然后检测系统的工作方式。手动控制方式时仅作极性判定和转速计算 (图中虚线框中部分), 施矩过程由手动控制开关的切换来完成。自动控制方式时首先检测  $T_1$ 、 $T_2$  和  $T_3$  进行极性识别, 如果极性为正, 则施加加转力矩并使 ESG 恒定到工作转速, 然后进行故障检测及串口通信; 如果极性为负, 则施加拉偏力矩拉偏转子极轴, 然后施加翻转力矩。当转速衰减到接近于零时, 转子极性将会发生翻转。极性翻转过程完成后,

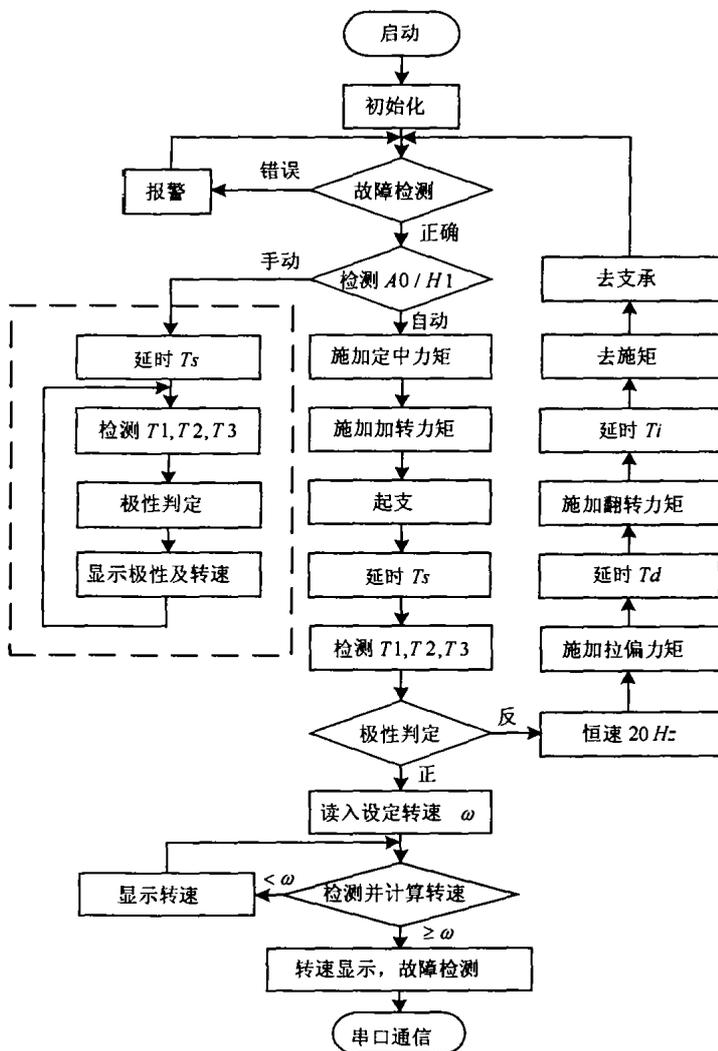


图 6 ESG 启动控制器 DSP 软件流程框图

为避免正确的极性丢失, 在对转子起支前需要先施加定中力矩及加转力矩。 $T_s$ 、 $T_d$  和  $T_i$  三个时间参数分别代表转子定中时间、拉偏力矩作用时间和翻转力矩作用时间。这三个时间参数需要通过手动控制方式

预先测定,然后装订在 DSP 软件中去实现自动控制。 $T_s$ 、 $T_d$ 和 $T_i$ 需要精确测定,因为较小的 $T_s$ 将会使极性判定出错,而较大的 $T_s$ 将会使功耗加大;较小的 $T_i$ 将会导致翻转的失败,较大的 $T_i$ 将会增加极性翻转后转子的转速,从而使放下转子时损伤转子表面。为保证 $T_i$ 重复性与精确性,极性翻转前应将转子转速恒定在 20 Hz。较大的 $T_d$ 将会增加极性翻转后转子的转速,根据旋转磁场大小,限制 $T_d$ 使拉偏角度小于 $2^\circ$ 。

## 5 系统试验及结果分析

首先在气浮装置上采用手动控制方式进行了 4 次试验,用以确定 $T_s$ 、 $T_d$ 和 $T_i$ ,然后将参数装订到 DSP 软件中进行 4 次自动控制方式试验并进行参数检测。每次转子初始极性都为负,被动阻尼结束后转子都获得正确极性。当转子加转时,空气阻尼力矩将抑制转子旋转,最终与加转力矩平衡。通过降低加在转子上的气压,转子在气浮装置的最终转速可以达到约 25 Hz。由于空气阻尼力矩的作用,平均转子转速在加转力矩作用时以大约每秒 0.4 Hz 递增,而在翻转力矩作用时大约以每秒 0.6 Hz 递减。

$T_s$ 、 $T_d$ 和 $T_i$ 的测试结果见表 2。初始条件不同将会得到不同的 $T_s$ 。为了确保极性判定的正确性, $T_s$ 为 900 s 装订到 DSP 软件中进行自动控制试验。 $T_d$ 在所有试验中均设定为 1 s。进行 4 次手动控制方式实验后, $T_i$ 设定为 33 s,进行 4 次自动控制方式试验。由于气浮

表 2  $T_s$ 、 $T_d$ 和 $T_i$ 测试结果

试验次数	手动控制方式			自动控制方式		
	$T_s/s$	$T_d/s$	$T_i/s$	$T_s/s$	$T_d/s$	$T_i/s$
1	405	1	35	345	1	33
2	900	1	30	600	1	33
3	410	1	33	755	1	33
4	480	1	33	400	1	31

装置空气扰动力矩的影响, $T_i$ 在每次试验中有些不同。在第 4 次自动控制方式试验中,转子去支承时的转速约 1 Hz。在静电支承的情况下,通过将极性翻转前转子转速恒定到设定的转速, $T_i$ 可精确确定。

## 6 结束语

可控式被动阻尼方法能有效解决空心转子 ESG 启动中极性不确定问题,其关键是当转子极性反时进行极性翻转,通过依次施加加转和定中力矩、拉偏和翻转力矩实现该过程。本文较为详细地介绍了基于可控式被动阻尼、以 DSG 为核心的 ESG 启动控制系统的设计和研制。在气浮装置上的试验表明:所研制的 ESG 启动控制系统能有效实现转子阻尼、极性识别、极性控制、故障检测、转速测定、恒速控制和 RS232 通讯等功能。

## 参考文献:

- [1] [德]维滕伯格 J. 多刚体系统动力学[M]. 北京:北京航空学院出版社,1986.
- [2] 刘廷柱. 静电陀螺仪动力学[M]. 北京:国防工业出版社,1979.
- [3] Bradford W. Parkinson, Benjamin Lange. Active damping of free-rotor gyroscopes during initial spin-up[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1970, 7(6): 667-675.
- [4] Bradford W. Parkinson, Benjamin Lange. Experimental studies of the active damping of free-rotor gyroscopes[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1970, 7(6): 675-681.
- [5] Benjamin Lange. Active damping of ESG rotors with mass-unbalance readout[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1972, 9(2): 96-102.
- [6] 田蔚风,金志华,陆恺. 静电陀螺仪可控式被动阻尼方案研究[J]. 上海交通大学学报,1987,(1): 55-64.
- [7] 田蔚风,金志华,陆恺. 静电陀螺仪可控式被动阻尼的实验研究[J]. 上海交通大学学报,1988,22(1): 48-55.