

## 摘 要

磁悬浮技术之所以得到飞速发展，主要是磁悬浮轴承相对于传统轴承有一个最大的优势是表现为非接触和可控制两个方面。在磁悬浮转子系统设计中，传感器检测的转子位移信号是控制器对轴承进行主动控制的依据，是整个系统研究的重点之一。

目前，电涡流位移传感器是目前为止在磁力轴承系统中应用最多的传感器，与其它位移传感器相比，具有灵敏度高、线性测量范围大的优点。但是电涡流位移传感器是通过转子表面的涡流信号的变化来测量转子轴心位移的。所以，位移测试信号不能反应转子的轴心运动。

同时，由于磁悬浮转子表面存在一定的机械几何形状误差和运动误差，这些误差都会被传感器当成位移信号混叠到转子轴心位移中，这增加了转子的可控性的难度。特别随着主轴转速增大，转子的柔性特性增强，由此产生的位移控制信号频率的增强，回转轴心位移的幅值增加，导致回转精度降低。这样随着周期性的几何误差产生的多余的控制信号，使转子产生振动，增加了控制的难度，当控制信号的频率和转子固有频率相同时，就会使转子振幅增大，直至轴承失效。

由于磁悬浮轴承转子位移测量数值和转子的几何形状误差是同一个数量级。所以转子的机械几何误差必须在位移信号中分离出去。

本文通过对转子几何误差信号特性的分析，对目前主要的误差分离方法总结比较。并结合了磁悬浮传感检测方法的基础上提出了针对磁悬浮转子的误差分离方法。对在线检测和分离的方法进行了初步的摸索和研究。

通过以上的研究，提出了磁悬浮转子几何误差的补偿方式，从而有效的减少了几何误差对磁悬浮转子控制精度的影响。

关键词：磁悬浮转子 几何误差 误差分离

## Abstract

Magnetic suspension technology has been developed rapidly. Compared to traditional bearing, the biggest superiority of a magnetic bearing is maneuverability and on-contact. In the magnetic suspension rotor system design, the sensor examination's displacement signal of rotor is the basis of the controller to the active control. It is the key of the whole research system.

At present, the eddy current displacement sensor has the advantages of high sensitivity and linear measurement in the magnetic bearing systems. Compared to other displacement sensors, the eddy current displacement sensor has been extensive used, which through the rotor surface of the vortex signal measures displacement of the rotor center. Therefore, the displacement of test signals can not respond anchor point movement.

Such as the cyclical geometric error causes the extra control signals, so that rotors will have vibration and increase more difficult of control. When the control signals in the frequency as same as the natural frequency of it, the rotor will increase the amplitude of the rotor until the bearing failure.

As the magnetic bearing rotor displacement measurement value is in the same order of magnitude with it, the rotor geometric error in the displacement signal must be separated.

By the analysis of the rotor geometry error signal, the thesis has compared with and summed up the major method of error separation.

Based on the combination of the magnetic suspension sensor detection method and the geometric error separation, the separation method of the magnetic suspension is put forward. So the on-line detection and error separation method is proposed.

Through the above study, a geometry error compensation method of the magnetic suspension is presented. It effectively decreases the impact of geometric error on the magnetic suspension rotor's control accuracy.

**Keyword:** Maglev Rotor    Geometric error    Error Separation

## 独创性声明

本人声明，所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得武汉理工大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中明确的说明并表示了谢意。

研究生签名：\_\_\_\_\_日期\_\_\_\_\_

## 关于论文使用授权的说明

本人完全了解武汉理工大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

(保密的论文在解密后遵守此规定)

# 第 1 章 绪论

## 1.1 概述

### 1.1.1 磁悬浮技术发展概述

人类利用磁力悬浮的梦想，自从 19 世纪 40 年代英国剑桥大学的恩休 (S.Earnshaw) 教授从理论上证明了唯有采用抗磁性材料并依靠选择恰当的永磁结构和相应的磁场分布才能实现稳定的悬浮后，磁悬浮梦想才真正实现<sup>[43]</sup>。

从 70 年代末到 80 年代初，随着现代控制理论的发展，电子元器件技术的日臻完善，人们逐步开始将主动磁力轴承推广应用到工业设备中，相应的控制方法也从单自由度控制（古典控制理论）发展到多自由度控制（现代控制理论）。在日本，1981 年，日本的松村文夫等人采用现代控制理论，建立了多输入多输出的径向磁力轴承数学模型。NTN 东洋轴承公司于 1984 年推出了高速铣削磁力轴承主轴、超高速磨削主轴部件，并有已标准化的径向磁力轴承和轴向磁力轴承产品。

这一时期研究的主要特点是：将转子作为刚体处理；忽略陀螺效应的影响；尽管建立了多输入多输出的数学模型，控制系统还是采用单自由度控制，即忽略各自由度之间的耦合；商业化的磁力轴承控制系统均为模拟控制。

进入 90 年代，随着机械向高速度、高精度发展，将转子作为刚体来处理无法满足精度要求，磁悬浮控制开始转向柔性转子的控制。将转子进行离散化，建立磁悬浮系统的状态方程，从而进行磁悬浮控制系统的设计，这使得磁力轴承的控制系统越来越复杂。因此，采用滑模控制、模糊控制、非线性控制、 $H_\infty$  控制、 $\mu$  控制等先进控制理论进行磁悬浮研究的越来越多。

然而，由于磁力轴承研究涉及到机械、电子、计算机、控制、传感等多学科技术，国内的研究从整体上来说还处在理论研究阶段，没有成功的应用实例。到目前为止，国内外还没有一套成熟的理论和设计方法，阻碍了磁力轴承进一步的推广应用。

纵观国内外磁力轴承的应用与发展，21 世纪有关磁力轴承的理论研究与发展呈现以下趋势：

- ◆ 从模拟控制转向数字控制；
- ◆ 从 PID 稳定性控制转向采用现代控制理论、鲁棒控制理论、非线性控制

理论、自适应控制理论、智能控制理论的应用研究；

- ◇ 从刚性转子的研究转向柔性转子的研究；
- ◇ 将传感器与轴承进行混合控制，提出了无传感器的磁力轴承；
- ◇ 将驱动与轴承进行混合控制，引入了无支承电机的概念；
- ◇ 提出零功耗磁力轴承，即超导磁力轴承等。

### 1.1.2 磁悬浮技术优点及面对的问题

磁悬浮技术之所以得到飞速发展，主要是磁悬浮轴承相对于传统轴承有一个最大的优势是表现为非接触和可控制两个方面。

由于磁力轴承具有以上一系列独特的优越性，有着极其重要的商业价值，在工业中有着广泛的应用前景。可以广泛的应用于国防军事，医疗卫生，石油化工，加工制造等方面。所以磁悬浮技术把我们带入了一个前所未有的科研领域，即将深刻的改变人们生活的各个领域。

目前在磁力轴承的研究方面仍存在着以下问题：

- ◇ 将转子作为柔性体进行处理导致了磁力轴承控制系统的复杂化，如何处理转子结构的非线性与控制系统的非线性；
- ◇ 探索更为有效的磁力轴承先进控制理论与方法；
- ◇ 磁力轴承控制系统与转子结构动态特性之间的协调与匹配；
- ◇ 磁力轴承支承特性对转子特性的影响；
- ◇ 磁力轴承结构与控制的耦合、各控制系统之间的耦合；
- ◇ 磁力轴承结构与控制系统的综合优化设计；
- ◇ 磁力轴承系统的设计理论和设计方法，通用的设计软件；
- ◇ 磁力轴承生产的标准化和批量化；

只有很好地解决上述问题，才能有力地推动磁力轴承的工业化应用。

本文着眼于磁力轴承的结构与控制系统优化这一个环节，对磁力轴承转子几何机构及一些柔性特性对位移检测和控制反馈的影响加以研究，使集成了结构，检测和控制的磁力轴承转子系统能够真正的发挥应有的特性。

由于磁悬浮轴承转子表面存在一定的几何形状误差，这就增加了转子的可控性的难度。特别随着主轴转速的增大，由此产生的位移控制信号频率的增强，回转轴心位移的幅值增加，导致回转精度降低。磁力轴承主轴回转精度的测试和磁悬浮主轴的可控性是其静态特性和动态特性的研究的重要课题之一。高速旋转磁悬浮转子的回转精度对整个系统至关重要。

由于磁悬浮轴承转子位移测量数值和转子的几何形状误差是同一个数量级，转子的几何误差也会被当作测试信号反馈到控制信号中去，当转子轴心没有产生位移时，磁力轴承也会产生不必要的控制力。

## 1.2 磁悬浮轴承基本组成

磁力轴承系统按工作原理可分为三类：主动磁力轴承（Active Magnetic Bearing）、被动磁力轴承（Passive Magnetic Bearing）、混合磁力轴承（Hybrid Magnetic Bearing）。

由于本文主要以主动磁力轴承为研究对象，这里着重介绍主动磁力轴承（Active Magnetic Bearing）。本文研究可以推广到气磁轴承和混合磁力轴承。

### 1.2.1 主动磁力轴承结构概述

主动磁悬浮轴承其结构原理如图 1.1 所示，它主要由机械系统、位移检测系统、控制器及功率放大器几个部分组成。系统工作原理及各个部分的作用是，主动磁悬浮轴承的定子是可控电磁铁，受功率放大器输出控制定子的吸力的大小。转子全悬浮，为被控对象。系统运行时，首先电磁转子悬浮起来，当处于悬浮中的转子受到外界干扰偏离平衡位置时，捕获将转子偏移信号，经过变送器处理后输出到控制部分，控制部分的位移信号采用一定的控制算法输出相应的控制信号，功率放大器根据大小调节电磁铁的电流的大小，来改变电磁铁吸引力的大小，用以把节回到平衡位置。传感器探头及变送器组成转子位移检测部分，传感器位移信号是控制器对轴承进行主动控制的依据，因而是整个系统研究重点之一。

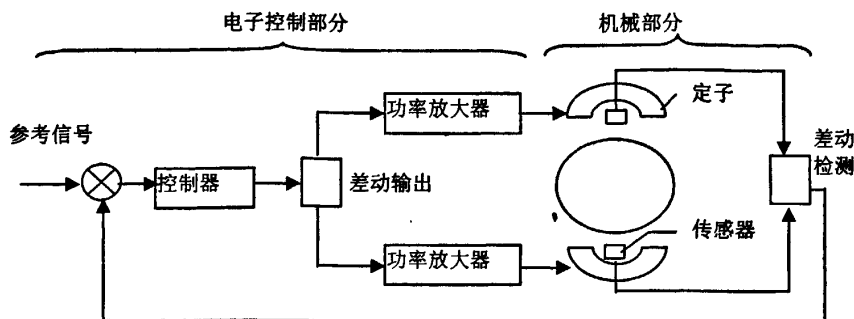


图 1-1 磁力轴承工作原理

主动磁悬浮轴承结构示意图 1-1，位移检测部分作为磁悬浮轴承的重要组成部分，必需满足以下要有以下要求<sup>[24]</sup>：

- (1) 非接触式。为了测量运动转子表面与定子内表面之间形成的必须使用非接触式位移传感器。理论上利用电容、电感、光敏、光栅、及激光传感器等均可达到此目的。
- (2) 具有较高的灵敏度、信噪比和线性度。磁悬浮轴承的定子与气隙允许变化范围较小，而且气隙越大转子的刚度及承载力就愈小。若检测出变化很小的信号，就必须要求传感器具有较高的灵敏度。
- (3) 具有很高的温度稳定性、抗干扰能力。由于磁悬浮轴承定子原因，转子温度变化明显、电磁干扰不可避免，故要求位移传感器能的工作温度范围，抗电磁交变的噪声干扰强。
- (4) 有较好的动态响应。磁悬浮转子的位移检测具有实时性，传感器必须具有足够态响应。

### 1.2.2 磁力轴承数学模型

参见图 1-1，同时考虑到磁力轴承采用差动激磁方式（上下电磁铁各一个，故有两个磁力作用于转子）以及受力的方向，转子在重力方向受到的磁力为上下磁铁的吸力之差：

$$f = k \left[ \frac{(i_0 + i_x)^2}{(x_0 - x)^2} - \frac{(i_0 - i_x)^2}{(x_0 + x)^2} \right] \quad (1-1)$$

其中  $i_0$  表示偏置电流,  $i_x$  表示控制电流,  $x_0$  表示平衡位置时的气隙,  $x$  表示转子相对于平衡位置的位移, 方向竖直向上。  $k = \mu_0 s_0 n^2 / 4$ , 其中  $\mu_0$  为真空中的磁导率,  $s_0$  为电磁铁的磁极面积,  $n$  为线圈匝数,  $F$  为总的电磁力, 且  $F$  的正方向与  $x$  一致。

$$F = k_x x + k_i i_x \quad (1-2)$$

$$\text{其中, } k_x = \frac{\mu_0 s_0 n^2 i_0^2}{x_0^3}, \quad k_i = \frac{\mu_0 s_0 n^2 i_0}{x_0^2}$$

式 (1-2) 即为在小偏差范围得到的合力线性化模型。称  $k_x$  为磁轴承的刚度, 因为  $F$  的正方向与  $x$  一致, 才使得  $k_x$  为正, 所以磁轴承实际上具备负刚度。

虽然随着对平衡点距离的增加, 方程 (1-2) 的精度在下降, 而且在某些极限状态, 例如当转子与轴承壁接触、强电流 (铁芯饱和) 或者线圈电流很小时, 就绝对不适合了。但是多年来的实践经验及理论都已经证实了简单的线性化方程 (1-2) 在很大范围内对控制器的设计是惊人的适合。

由牛顿定律得

$$m \ddot{x} = F - mg \quad (1-3)$$

即

$$m \ddot{x} = k_x x + k_i i_x - mg \quad (1-4)$$

对式 (1-4) 进行拉氏变换即可得到磁力轴承在一个自由度上以位移  $X$  为输出, 电流  $I$  为输入的传递函数模型为:

$$G(s) = \frac{X(s)}{I_x(s)} = \frac{k_i}{ms^2 - k_x} \quad (1-5)$$

由式 (1-5) 可看出该对象有两个实数极点, 其中一个在正实轴上, 另一个在负实轴上, 因而是一个不稳定的二阶对象, 只有通过闭环控制才有可能使之稳定地工作。



### 1.3 传感器的选用

从磁悬浮转子对位移的基本要求、以及当前研究现状来看，目前存在的非接触式位移传感器有霍尔元件式、差动变压器式、电容式、电涡流式、和光电式等都有可能成为磁悬浮转子位移检测的检测方式，由于他们的检测的原理不同，因而各有明显的优缺点。

#### 1.3.1 磁力轴承传感器分类及特点

当前磁悬浮中位移传感器的选用方面的研究日益增多，对比分析了目前存在的几种非接触位移传感器的性能、特点和应用范围，从而可以得出应该选用的传感器的种类（如表一）。

位移传感器	测量分辨率 ( $\mu\text{m}$ )
电容式	0.002
光纤式	0.01
电涡流式	0.05
激光式	0.1

表一 传感器对比图

- (1) 霍尔效应位移传感器具有非接触，小尺寸，灵敏度高，对粗糙的表而及周围环境要求条件低、成本低的特点，但是霍尔传感器也有精度低、易受干扰、温度特性差、易受老化影响等缺点。还需要进行相关的研究工作以改进；
- (2) 差动变压器式位移传感器优点是抗干扰能力强、测量精度较高、输出功率大、灵敏度高、输出电压相位能反映位移的偏移方向等优点。其缺点是灵敏度、线性度和测量范围相互制约：传感器本身的频率响应特性稍差，不适合快速动态测量。另外，与其他类型位移传感器相比它体积较大，需要频率和振幅稳定度要求较高的高频激励电源。因而该种传感器可能只是适用于大功率、大体积的磁悬浮系统；
- (3) 电容式位移传感器由于电容式位移传感器的电容量很小，环境的变化将

影响电容量，进而影响输出时期最明显的缺点。例如：在温度影响下，极板的尺寸、间隙的大小和介电常数等都会发生变化，在湿度影响下，介质的介电常数、绝缘电阻等也将发生变化，而极板表面潮气凝结成的薄膜将引起电容参数很大的变化。因此，电容式位移传感器的绝缘材料必须有高的绝缘性能、足够的机械强度、较高的形状稳定性和良好的抗湿性，材料及工艺要求较高；

- (4) 电涡流位移传感器作为无接触测量的传感器，具有结构简单、适用性强，不受油污等介质的影响等优点。但是它也具有温度稳定性差，用于微型转子位移检测时需要提高检测精度等问题。目前，国内对磁悬浮轴承转子位移检测的研究方面，很多单位都采用了涡流位移传感器，并对其进行研究；
- (5) 反射型光纤位移传感器‘通过理论及试验可以得到即离—电压曲线为“倒V”形，上升段和下降段斜率不等，仪器的灵敏度，测量范围与测头端面处光纤排列情况及反射而的情况都和有关。一般光纤束面积大时，线性测量范围也大。反射式光纤位移传感器具有抗电磁干扰强的明显优点，但是也有涉及到光纤，制作工艺较难得缺点。故只能在有相关条件的情况进行研究。

### 1.3.2 电涡流传感器的应用

电涡流传感器（如图 1-2）是电感传感器的一种，此类传感器是目前应用较广的非接触式传感器，电涡流位移传感器是目前为止在磁力轴承系统中应用最多的传感器与其它位移传感器相比，它除了具有灵敏度高、线性测量范围大的优点外，还具有成本低、体积小、制作简单的特点<sup>[2,43]</sup>。

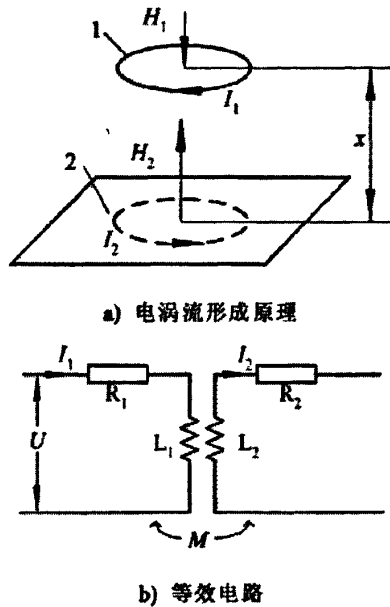


图 1-2 涡流传感器原理图

根据电磁感应原理，当导体处在高频交变磁场内时，由于通过导体中的磁通发生变化，导体内会产生相应的感生电流，由于导体的趋肤效应，这种电流一般都集中在导体表面并自行闭合，通常称之为电涡流。涡流位移传感器是基于导体的电涡流效应制成的。传感器探头部分的作用是把被测体的位移信号变换为与之对应的电量信号。（图 1-2）为电涡流传感器的工作原理图。当激励线圈 1 通以高频电流  $I_1$  时，其周围产生一交变磁场  $H_1$ ，线圈靠近被测导体时，导体中将产生与此磁场相交链的电涡流  $I_2$ ，而此电涡流又将产生一交变磁场  $H_2$  来阻碍  $H_1$  的变化。由于被测导体中存在涡流损耗和磁损耗，这种相互交链的结果，使线圈的等效电感  $L$  发生变化。根据等效电路，可列出方程式。

$$\begin{bmatrix} R_1 + j\omega L_1 & -j\omega M \\ -j\omega M & R_2 + j\omega L_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1-6)$$

经过整理，线圈等效电感方程为

$$L = L_1(\mu) - \frac{b^2 M^2}{b_2^2 + (\omega L_2)^2} L_2 \quad (1-7)$$

- $L_1$  为不计涡流效应仅考虑磁学效应时传感器线圈的电感
- $\omega$  为线圈激励电流的角频率
- $L_2$  为金属导体涡流回路的电感
- $M$  为线圈与导体涡流环间的互感系数
- $R_2$  为金属导体涡流回路的电阻

### 1.3.3 传感器应用中应该注意的问题

传感器在  $x$ 、 $y$  方向上有两种布置方式。一种是在  $x$ 、 $y$  方向上各布置一个传感器，如图 1-3A 所示，称为直接测量方式；另一种是在  $x$ 、 $y$  方向上各布置两个传感器，如图 1-3B 所示，称为差动测量方式<sup>[21]</sup>。

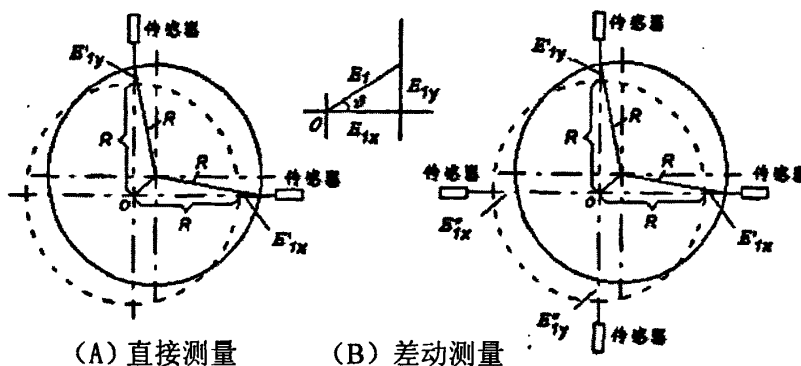


图 1-3 传感器布置对比图

由于磁悬浮转子的几何形状，传感器所测量的位置信号都不是转子轴心在磁力轴承处的实际偏移量，必须通过计算得出转子轴心在磁力轴承处的实际偏移量。由图 1-3 可以得出直接测量方式和差动测量方式的转子偏移量的计算公式。

直接测量方式:

$$\begin{cases} E_{1y} = E'_{1y} + R - \sqrt{R^2 - E_{1x}^2} \\ E_{1x} = E'_{1x} + R - \sqrt{R^2 - E_{1y}^2} \\ E_1 \cos \theta = E_{1x} \\ E_1 \sin \theta = E_{1y} \end{cases} \quad (1-8)$$

差动测量方式:

$$\begin{cases} E_{1y} = \frac{1}{2}(E'_{1y} + E''_{1y}) \\ E_{1x} = \frac{1}{2}(E'_{1x} + E''_{1x}) \end{cases} \quad (1-9)$$

式中符号的意义见图 1-3。第一个下标表示轴心偏移量发生的位置，第二个下标表示轴心偏移量在 x 了平面内的方向。例如 E<sub>1</sub> 表示传感器 1 处的轴心偏移量在 x 轴方向上的分量。

由式(1-8)可知:

采用直接测量方式时，磁悬浮转子系统传感器信号在 x、y 平面上存在着传感器偏置耦合，即 x 方向传感器的测量信号对 y 方向的传感器信号有影响。要得出 x 了平面内磁力轴承处的转子偏移量，必须同时知道磁力轴承处转子在 x、y 两个方向上的偏移量，以及传感器的测量值。

电涡流传感器有自己的工作特性，使用和安装中应该注意以下问题:

(1) 组成传感器系统的各部分之间必须相互配合

由于电涡流传感器采用高频振荡检波电路，前置器与探头之间同轴电缆上的分布电容对振荡器频率有很大的影响。一般高频电缆的分布电容为 50~100PF/m。若电缆长度变化会引起分布电容变化，将使振荡器的频率发生变化，这对测量结果影响很大。在实际工作中就要求匹配探头、同轴电缆和前置器，使其传输特性曲线在某一范围内呈线性。如果一个电涡流传感器系统不匹配，将导致不正确的前置器输出，错误的的影响系统的线性范围。

(2) 探头间相互影响

安装时，探头之间相互间距离不能太近，否则磁通链会有交汇区域，使探头测量产生互相干扰，传感器探头之间的间隔应该大于 3~4 倍的探头直径，这样可以保证探头之间不会相互干扰，使所采集的数据更见的准确。

### (3) 表面开孔尺寸

探头安装位置的开孔不当,或探头安装的开口尺寸不对,都可造成探头的测量受到壳体金属的影响,而导致测量误差。

### (4) 探头支架的刚度

若刚度不够,在机器运转时,支架也随之而振动,这显然会影响测量的刚度。一般要求其自振频率至少等于机器转速的 10 倍,原始安装时要尤其注意。

### (5) 磁悬浮转子的材质

由于被测材料的不同引起的误差在实际工作中最容易被忽视。不同的金属有不同的导电和导磁参数,用电涡流传感器来测量时,不同的金属会产生不同的响应特性曲线。当更换转子时,由于备件与原转子材料不一致,可能造成测量误差。

### (6) 同轴电缆和延长电缆本身就是一种屏蔽电缆,用来屏蔽外来干扰信号。

为了屏蔽外来的干扰,需要注意的有:整个系统要单点接地,不能形成接地回路。否则大地回路有可能产生附加干扰;对于信号,只能采用屏蔽电缆,同时保证屏蔽电缆要正确接地;要保证所有电缆和接头绝对安装良好,探头与同轴电缆相连的连接器要用绝缘塑料包好;信号电缆要远离噪声源。

## 1.4 国内外相关课题研究现状

随着形位误差检测理论和技术研究的深入,误差分离技术也得到了广泛的研究。误差分离技术是现代误差理论与计算机相结合的产物。即通过各种分离方法,将测量结果中的主轴系统误差剔除,得到更为精确的工件形位误差,提高测量精度。国内许多研究机构的学者对圆度测量中误差分离技术进行了研究,上海交大魏元雷等研究了平行三点法圆度误差分离技术的精度计算,巴西 O. Horikawa, N. Maruyama, M. Shimada 提出改进反向法。上海交大洪迈生和邓宗煌提出一种可实现在线测量和分离的时域两点法误差分离方法,其测量精度与频域三点法接近。同济大学的万德安等提出了利用多个传感器同时测量回转误差与工件圆度误差的误差分离方法。此方法利用工件运动的周期性,按传感器之间的相位角进行相位差分,从傅立叶级数展开中直接获得回转误差的各次谐波分量,从而实现对工件高精度圆度误差的测量。夏新涛等提出一种基于范数理论的误差分离方法,可将偏心与一次谐波严格区分<sup>[37-39]</sup>。Gao W 和 Kiyonos 提出

了组合三点法，但由于组合三点法的处理过程会受谐波抑制影响，且在重构中使用二次多项式插值法，所以在某些情况下会产生失真。后来，Gao W, Satoshi Kiyono and Tadatashi Nomura 又提出一种多头混合测量法，这种方法是通过两个相隔一定夹角的光学传感器测得两点的位移变化量和其中一点的旋转角度，经过滤波和数学处理分离主轴回转误差，得到圆度误差。这种方法和三点法相比不存在谐波抑制，能彻底分离圆度误差和系统误差，还可测量高频成分，通过选择合适的夹角可以在全频范围内提高分辨率，低频部分的分辨率比三点法高。

目前国内外对轴承转子精度分析跟误差误差分离<sup>[1-15]</sup>，都有过很多研究，并且有了相当的理论基础和可行的技术手段，许多文献对转子的误差测试和补偿以及诊断控制<sup>[30-32]</sup>、误差补偿<sup>[33-37]</sup>都提出很多有借鉴意义的方法。但是由于磁悬浮研究出现比较晚，且跟普通轴承有本质差别，所以目前国内研究非常少，由于出悬浮技术是集机械、电子、计算机、控制、传感等多学科技术，国内的研究从整体上来说还处在理论研究阶段。所以对于主动控制的刚度阻尼可以调节的控制的磁悬浮转子来说，误差分离有相当意义。由于磁悬浮转子加工技术和方法上的限制，转子几何误差不可避免，国内对磁悬浮转子的补偿机制，仿真研究，以及位移传感器误差建模、降低测量误差、转子几何形状重构和提纯也都有也一些文献发表，本文针对磁悬浮转子进行了几何误差分离算法的理论与方法研究，在实际应用中取得了很好的误差分离效果。通过对国内外形位误差评定与检测现状析，发现在磁悬浮几何误差检测领域还存在以下几个方面有待研究：

- 1) 目前没有发现针对磁悬浮转子形位误差非接触在线检测系统方面的成功报道，通过对国内相关行业和研究的发现，对磁悬浮转子的几何误差对控制与信号的影响和误差分离没有成功的应用，仍然在理论阶段摸索。并且对这一关键技术的实现的软件和硬件都没有所涉及，对于轴承转子的几何精度对磁悬浮轴承的影响只进行了一些分析；
- 2) 在本人所看到的关于误差分离方法的文献中，几乎都使用单一算法进行误差分离，并且主要是针对轴类零件的检测和误差评定的静态检测，没有见到在形位误差检测系统中应用多级误差分离方法的报道。基于几何误差技术的误差分离测试主要研究对象是普通轴承和转子；
- 3) 在几何误差分离中，针对磁力轴承或气磁轴承的在线动态分离和精确算法方面，都应该有很多工作需要进一步研究。虽然有少数学者提出了磁悬浮转子的圆度误差对系统的影响<sup>[46]</sup>，但是没有提出磁悬浮转子的误差分离和补偿方法及相应的算法。

## 1.5 论文目标及研究内容

### 1.5.1 论文研究的目的及安排

研究目标:

建立基于磁悬浮轴承转子几何误差的误差分离方法及理论。

研究内容:

- (1) 分析几何误差的特性对控制精度的影响;
- (2) 分析现有的几何误差分离的理论及方法;
- (3) 结合磁悬浮转子的几何误差进行误差分离;
- (4) 并提出控制精度补偿及修正方法和理论;

### 1.5.2 论文的课题支撑

本文得到以下科研项目支撑

国家自然科学基金资助项目(50675163)

同时,本论文也是在武汉理工大学数字制造实验室长期对磁悬浮轴承方向的研究基础上完成的。



## 第2章 磁悬浮转子的几何误差特性

磁悬浮转子和机械转子一样都是轴类构件，其形状精度对机械系统的装配质量与使用性能都有很大的影响，转子的圆度、圆柱度、表面粗糙度是评价轴类零件形状精度的重要指标，现在普通轴类零件的圆度，圆柱度，表面粗糙度检测方法和误差分离理论都有了相当高的水平。但是磁悬浮转子由于是集机械，传感器和控制的一体化的系统，转子的几何误差深刻的影响着磁悬浮的控制系统。现如今，磁悬浮随着高速高精度的方向发展，控制系统需要更快的响应速度和检测和控制精度。实际表面对于理想表面的几何形状的偏差现今划分为三类：形状误差、波纹度和表面粗糙度（如图 2-1）<sup>[28]</sup>。同一个加工表面往往受形状误差，波纹度和粗糙度这三类表面几何形状偏差的综合影响，图 2-2 所示的即是三类几何形状误差叠加在一起所形成的典型的表面轮廓形貌。

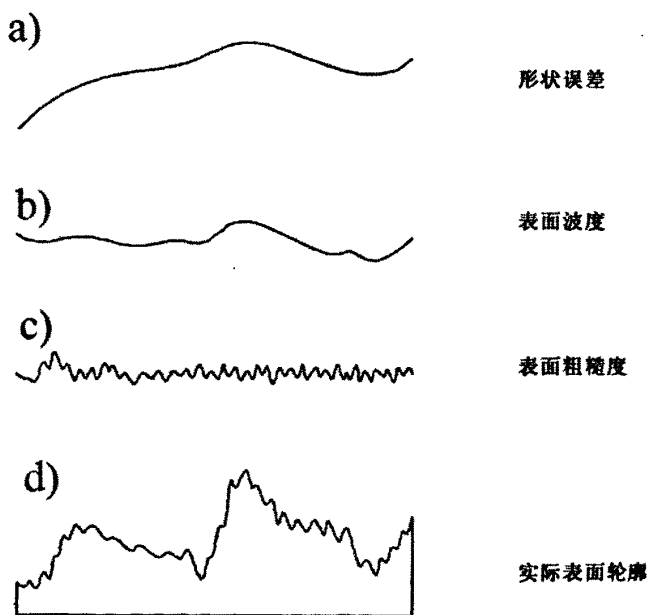
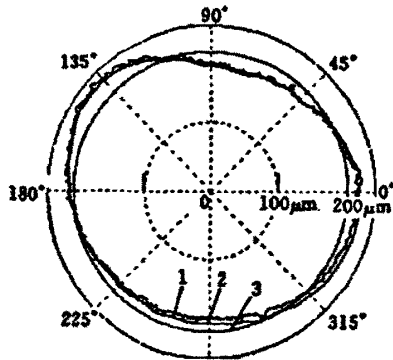


图 2-1 几何误差组成

电涡流位移传感器是通过检测转子表面位移来间接反映转子轴心的位移,如果转子为理想的圆形截面,则转子表面位移既是转子轴心位移。但实际上,转子表面都存在各种加工误差。这种误差会在测量的过程中引入到位移反馈信号中,从而影响系统的控制精度。



1. 原始测量数据 2.滤波后数据 3.最小二乘圆  
图 2-2 转子几何形状图

### 2.1 转子的表面粗糙度误差

在机械零件的切削过程中，刀具或砂轮遗留的刀痕，切屑分离时的塑性变形和机床振动等因素，会使零件的表面形成微小的峰谷。这些微小峰谷的高低程度和间距状况叫做表面粗糙度，也称为微观不平度，它是一种微观几何形状误差。表面粗糙度是机械零件的一个主要几何精度指标，它直接影响机器或仪器的使用性能和使用寿命。零件的表面粗糙度不仅影响零件的摩擦、磨损、密封、润滑、研合性等机械性能，而且还与导热、导电、应力、疲劳、腐蚀等物理性能和化学性能密切相关，特别是航空航天飞行器上的关键零件，其密封性、抗疲劳性、抗腐蚀性等均有较高要求。其形成原因主要有：

- ◇ 加工过程中在工件表面留下的刀痕；
- ◇ 刀具和零件表面之间的摩擦；
- ◇ 切削分离时工件表面层的塑性变形；
- ◇ 切削过程中的残留物等。

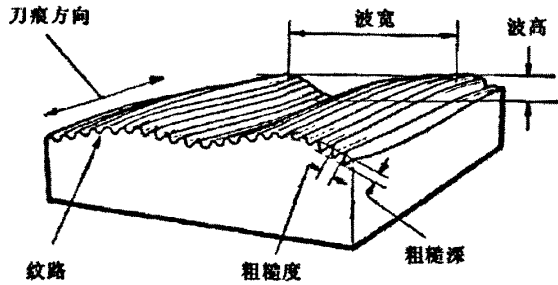


图 2-3 工件表面轮廓

表面粗糙度的评定本质上是三维的，但评定参数大都简化为二维参数，均是对粗糙表面的轮廓截线进行处理和研究，是表面的局部性质，不能反映零件的整体粗糙度。二维评定的基准有中线制和包络线制<sup>[29]</sup>。

表面粗糙度一维评定参数：幅度参数  $R_a$  和  $R_v$

1) 轮廓算数平均偏差  $R_a$

轮廓算数平均偏差  $R_a$  是指在取样长度  $l$  内，被测轮廓上各点到基准线的距离  $y_i$

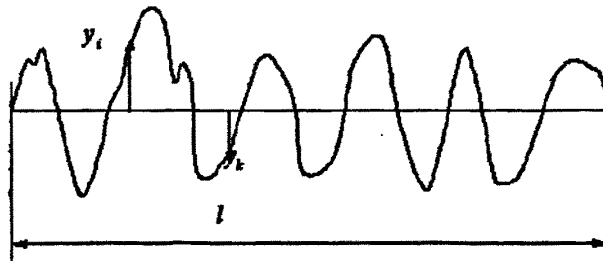


图 2-4 轮廓算术偏差  $R_a$

$$R_a = \frac{1}{n} \sum |y_i| = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx \quad (2-1)$$

式中：

$y_i$ ——被测轮廓上各点到基准线的距离

$l$ ——取样长度

2) 轮廓最大高度  $R_v$

轮廓最大高度  $R_v$  是在取样长度内轮廓峰顶线至轮廓谷底线之间的距离。

轮廓峰顶线是在取样长度内，通过轮廓最高点所作的一条平行于基准线的

线。轮廓谷底线是在取样长度内，通过轮廓最低点所作的一条平行于基准线的线

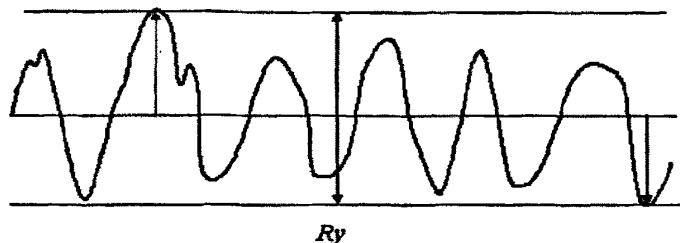


图 2-5 轮廓最大高度  $R_y$

对于轴类零件的加工方法，所以表面粗糙度是机械加工无法避免残留痕迹。对于磁悬浮转子控制来说，这些微观不平度，也影响着磁悬浮转子的控制系统。

## 2.2 转子的圆柱度误差

圆柱度误差是指被测的实际的圆柱面相对于理想圆柱面的变动量。圆柱度的评定和选择的理想圆柱面有关，即使同一个被测圆柱面，当理想圆柱面不同时，会得到不同的圆柱度误差值。

在几何量测量中，圆柱度误差测量是一种常见而又复杂的测量项目。根据所选坐标系的不同，通常有两种评定方法：

- 1) 是圆柱坐标测量法(半径测量法)。该测量法的数学模型与算法迄今为止已十分完善，但必须满足安装偏心小，采样点为偶数，且等角度间隔采样的成立条件。由于在三坐标测量机上，采样值为直角坐标值，保证等角度间隔采样极其困难，也极耗费时间与精力，因而并不可取。
- 2) 是直角坐标测量法。通常有两种：一种是直接将半径测量法中柱坐标采样值等量转换为直角坐标系中采样值。此方法并没有强调指出其成立条件，所以引用时须慎重。另一种是增加许多辅助测量，进行复杂的坐标变换，或过分依赖于初值的选取，从而使坐标测量法的使用受到一定限制。圆柱度误差通常有四种评定方法。

### (1) 最小区域圆柱面法(MZ)

最小区域圆柱面法是用两个同轴圆柱面包容被测圆柱表面，并使两圆柱面间的径向区域为最小，则该径向距离即为圆柱度误差。

(2) 最小二乘圆柱面法(LS)

最小二乘圆柱面是指被测圆柱表面上各点到该圆柱面距离的平方和为最小,

$$\text{即 } s = \sum (R_i - R_0)^2 = \min \quad (2-2)$$

式中:  $R_i$ —被测圆柱面上某点到最小二乘圆柱面轴线的距离;

$R_0$ —最小二乘圆柱面半径。

若  $R_{\max} = R_{\min}$  分别为被测圆柱面到最小二乘圆柱面轴线的最远点和最近点距离, 则圆柱度误差可由下式表示:

$$f = R_{\max} - R_{\min} \quad (2-3)$$

(3) 最小外接圆柱面法(ML)

最小外接圆柱面是外接被测圆柱面, 且截面半径为最小的圆柱面, 被测圆柱面上距最小外接圆柱面的最远点到该圆柱面的距离为圆柱度误差。

(4) 最大内切圆柱面法(MI)

最大内切圆柱面是指内切于被测圆柱面, 且截面半径为最大的圆柱面, 被测圆柱面上距最大内切圆柱面的最远点到该圆柱面的距离为圆柱度误差。

### 2.3 圆度误差的特性

圆度误差是指回转体的同一正截面上实际轮廓对其理想圆的变动量, 机械零件回转表面轮廓的圆度误差对机器和仪器的功能有直接的影响, 它是高精度回转体零件的一项重要精度指标, 也是检验回转体类零件加工质量的重要指标之一。圆度误差是机械零部件的一项重要参数, 对其测量是一个复杂、重要的工作。目前, 对其测量是应用圆度仪和进口的三坐标测量仪, 而圆度仪和进口的三坐标测量仪的价格都非常昂贵<sup>[16-18]</sup>。

目前, 计算参照圆的方法在国际上常用的有 4 种方法: 最小二乘圆(LSC)方法, 最大内切圆(MIC)方法, 最小外接圆(MCC)方法和最小区域圆(MZC)方法。

(1) 最小二乘圆法

最小二乘圆是个理想的圆, 它使从实际被测轮廓上各点到该圆周的距离的平方和为最小, 以其圆心为中心, 作两个同心圆包容实际被测轮廓,

该轮廓上至少有一个测点与内圆接触，有另一个测点与外圆接触。以这两个圆的半径差作为圆度误差值，如图所示。

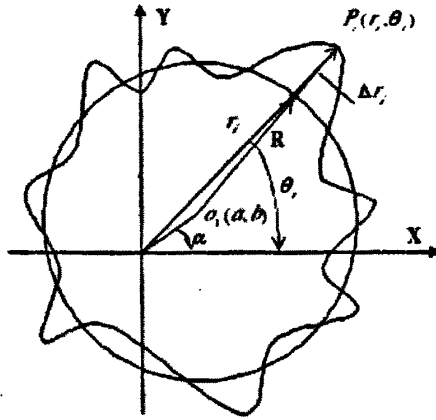


图 2-6 表面位子极坐标图

若实际被测表面的位置用极坐标  $(r_i, \theta_i)$  来表示，则

$$r_i = e \cos(\theta_i - \alpha) + [(R + \Delta r_i)^2 - e^2 \sin^2(\theta_i - \alpha)]^{1/2} \quad (2-4)$$

式中： $i$ ——测点数， $i=1, 2, \dots, n$

$\Delta r_i$ ——半径偏差值；

$e$ ——最小二乘圆圆心  $o_i(a, b)$  的偏移量， $a = \cos \alpha$ ， $b = \sin \alpha$ 。

### (2) 最小外接圆法

最小外接圆是指外接于实际被测轮廓的可能最小圆。其圆心  $O$  称为最小外接圆圆心。由最小外接圆包容实际被测轮廓时，实际被测轮廓上有三个测点与该圆接触，而这三点连成一个锐角三角形，该圆圆心位于此三角形内，或者实际被测轮廓上有两个测点与该圆接触，而由这两点连成直径恰为该圆的直径。

### (3) 最大内接圆法

最大内接圆是指内接于实际被测轮廓的可能最大圆，确定实际被测轮廓的可能最大圆的方法有：

1) 直径准则——实际被测轮廓上有两个测点与包容圆接触，而由这两点连成的直线恰为该圆的直径，此时的包容圆为被测实际轮廓的最大内接圆。

2) 三角形准则——实际被测轮廓上有 3 个测点与包容圆接触，而这 3

点连接成一个锐角三角形,且该圆心位于此三角形内,此时的包容圆为被测实际轮廓的最大内接圆。

(4) 最小区域法

用最小区域法评定圆度误差值,是指以形成被测实际圆最小区域的两同心圆的半径差作为圆度误差。由两个同心圆包容实际被测轮廓时,该轮廓上至少有四个点内外相间地与接触,则这两个同心圆之间的区域就是最小包容区域(简称最小区域)。这样两个同心圆叫做最小区域圆,它们的半径差,即为符合定义的圆度误差值。

## 2.4 本章小结

本章总结了磁力轴承转子的几何误差特征。较为详细的对转子的表面粗糙度误差、圆柱度误差、圆度误差进行了分析和总结。由于几何误差的不可避免,所以对磁力轴承的控制必然造成影响。

### 第3章 误差检测和分离方法

被测体表面的加工状况对电涡流传感器的测量结果有较大的影响,不规则的被测体表面会给实际的测量值造成附加误差,特别是在磁悬浮轴承系统当中的位移测量,对转子位移的控制有很大的影响,这个误差将会和实际的位置信号叠加在一起,在电气上很难分离,因此被测表面应该是光洁的,不应该存在刻痕、洞眼、凸台、凹槽等缺陷。通测表面粗糙度要求在  $0.4\sim 0.8\mu\text{m}$ ,目前精度较高的磁悬浮轴承当中的转子都在高精度磨床上进行了磨削加工,光洁度达到了  $0.1\mu\text{m}$  以下。大量的结果显示:主轴回转精度中以周期性成分为主,并且主要是以 1~4 阶的低阶谐波为主。随机误差成分也占有一定的比重,对于高精度测量不能忽视。我们把以非简单正弦信号的周期性成分为主,同时含有相当比重的随机误差成分以及噪声的复合信号称为准周期信号。

#### 3.1 几何误差的特征

##### 3.1.1 几何信号的分解

理论上,由于圆度误差是零件在机床上加工过程中形成的,具有周期性,所以可将几何误差写成付立叶级数形式,圆度测量信号是周期信号,因而总可以分解成如下的三角级数之和<sup>[1-17][37-39]</sup>:

$$y(\theta) = R + \sum_{m=1}^M [A_m \cos m(\theta) + B_m \sin m(\theta)] + \delta(\theta) \quad (3-1)$$

式中,  $y(\theta)$ —— $\theta$  处被测圆轮廓的极径

$\theta$ ——被测截面圆轮廓的角度变量

$R$ ——被测截面圆轮廓的直流分量

$M$ ——被测截面圆轮廓谐波分量的最大谐波阶数

$A_m$ ——被测截面圆轮廓  $m$  阶谐波分量的余弦系数

$B_m$ ——被测截面圆轮廓  $m$  阶谐波分量的正弦系数

当  $m$  取足够大时,  $\delta(\theta)$  对  $y(\theta)$  的影响很小,可以略去。于是有



$$y(\theta) = R + A_1 \cos(\theta) + B_1 \sin(\theta) + A_2 \cos 2(\theta) + B_2 \sin 2(\theta) + \dots + A_M \cos M(\theta) + B_M \sin M(\theta) \quad (3-2)$$

式中： $m=1$  为同轴度误差； $m=2$  为椭圆度； $m=3$  为三棱圆度误差； $m \geq 4$  为对应多棱圆度误差；而当  $m$  很大时为表面粗糙度，可通过对采样数据的处理来剔除。

### 3.1.2 信号偏心分离

上式中  $A_1 \cos(\theta) + B_1 \sin(\theta)$  式由于圆度测量偏心引起的，不属于圆度误差。消偏后测试信号可以表示为

$$\Delta(\theta) = \sum_{m=2}^M [A_m \cos m(\theta) + B_m \sin m(\theta)] \quad (3-3)$$

## 3.2 表面粗糙度检测和分离方法

对圆度误差进行动态测量时，采样数据中一般含有硬件本身引入的随机误差和工件表面粗糙度引起的误差值。测量数据中这些误差一般属高频成分，可采用数字低通滤波器去除<sup>[52]</sup>。

$$\Delta_n(\theta) = \sum_{m=2}^N [A_m \cos m(\theta) + B_m \sin m(\theta)] \quad N \leq M \quad (3-4)$$

式中  $N$  为低通截止波数， $\Delta_n(\theta)$  表示滤除了高次谐波后的误差信号。

## 3.3 圆度误差的检测和分离方法

几何误差中圆度误差对采集信号的影响最大，所以对于磁悬浮转子的几何误差分离，最主要的工作是对圆度误差的分离。根据圆度误差的评定模型，实际测量时产生多种测量方法，如：“多步转位法<sup>[12]</sup>”、“反向法<sup>[10-11]</sup>”、“两步法”<sup>[10]</sup>、“两点法”、“三点法”<sup>[3-8]</sup>、“四点法<sup>[15]</sup>”等。对于圆柱度的测量国内在吸收国外研究成果的基础上，提出了“四点法”、“五点法”等。

### 3.3.1 反向法

一个简单的方法由 Donaldson 1972 年提出,适用于转台式圆度仪。设主轴的误差是  $e(\theta)$ , 信号是  $S(\theta)$ , 测头测得的电压是

$$V_1(\theta) = S(\theta) + e(\theta) \quad (3-6)$$

然后将工件回转半圈, 移动测头并改变测量方向, 如图 3-1, 测得电压为

$$V_2(\theta) = S(\theta) - e(\theta) \quad (3-7)$$

得:  $e(\theta) = (V_1 - V_2) / 2$ ,  $S(\theta) = (V_1 + V_2) / 2$

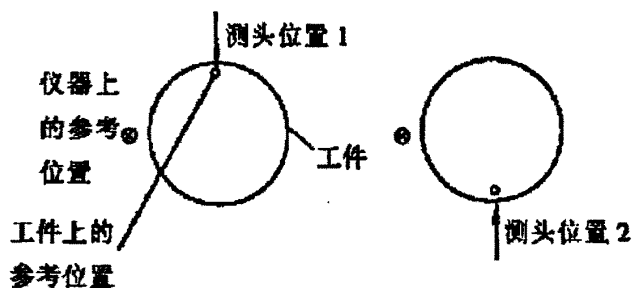


图 3-1 反向法

对于转台式圆度仪来说, 用手移动测头不会影响其测量准确度。该方法操作简单, 适用于准确度要求不是特别高的地方。

### 3.3.2 两步法

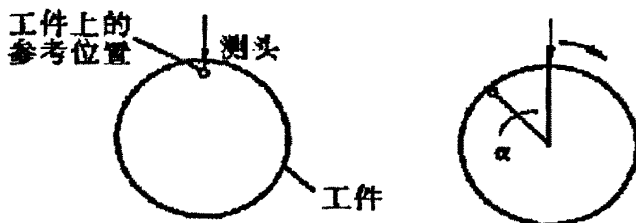


图 3-2 两步法

对于测头回转的圆度仪, 测量起始点设置在回转轴上, 第二次测量时, 主轴不

动,安装在可分度工作台上的工件转位一定角度  $\alpha$ ,如图 3-2。

两次测量的方程为

$$V_1(\theta) = S(\theta) + e(\theta) \quad (3-8)$$

$$V_2(\theta) = S(\theta + \alpha) + e(\theta) \quad (3-9)$$

两方程合起来  $V_1 - V_2$  得

$$y(\theta) = V_1(\theta) - V_2(\theta) = S(\theta) - S(\theta + \alpha) \quad (3-10)$$

设工件的采样间隔为  $\Delta\theta$ , 则传感器回转一周的采样数  $N = 2\pi / \Delta\theta$ , 对上式进行傅立叶变换得,  $y_r(k) = S_r(k)(1 - e^{jk\alpha})$  (3-11)

$G(k) = 1 - e^{jk\alpha}$  称为误差分离的权函数。

为了解出  $y_r(k)$ , 必须保证  $G(k)$  不在  $k \geq 1$  时不为零, 选择  $m$  时要注意不要使得  $G(k)$  太小, 以减小测量失真。若  $m$  选择得当, 除了  $S_r(0)$  不能分离外, 其他各阶谐波均可以分离, 故不又称为全谐波误差分离。

### 3.3.3 多步法

若转位次数超过两次, 即称为多步法。如果多次转位后刚好回到起始位置, 且每次转位的角度  $\alpha$  相同, 共转位  $M$  次,  $2\pi = \alpha \cdot M$  则称为等转角多步法。

$$V_i(\theta) = S(\theta + i\alpha) + e(\theta) \quad i = 0, 1, 2, \dots, M-1 \quad (3-12)$$

$$y(\theta) = S(\theta) - \frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^{M-1} S(\theta + i\alpha) \quad (3-13)$$

$$y_r(k) = S_r(k) \left[ 1 - \frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^{M-1} e^{jki\alpha} \right] \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (3-14)$$

当  $k = lM (l = 0, 1, \dots)$ ,  $G(k) = 0$ 。即在转位次数  $M$  的整数倍谐波分量上出

现谐波抑制。所以，提高转位次数可以提高工件形状误差的测量准确度。该方法操作过程比较麻烦，但可得到较高的测量准确度。

### 3.3.4 三点法

在工厂加工中,有时不可能将工件移到计量室中去测量,或为了提高生产效率,希望直接在加工机床上对零件进行在位测量误差分离。这项技术在60年代被提出后,经过三十多年的发展和完善,已经进入到实用阶段,它可以同时分离得到工件形状误差和主轴回转误差,机电部于1992年也推荐了三测点法误差分离技术的行业标准 JB/T5996-92。

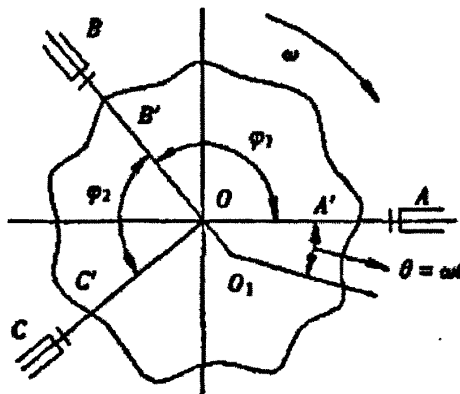


图 3-3 三点法圆度误差分离的原理如图

在圆周上设置3个传感器A、B、C,以O为中心和传感器A轴线重合为x轴,建立静止坐标系XoY,如图3-3所示。以时刻 $t=0$ 时,过 $O_1$ 点和x轴平行,且方向与x轴方向一致的线段为极轴,工件顺时针转动,极角 $\theta$ 以逆时针方向度量。 $\omega$ 为角速度。测头A、B、C轴线与轮廓交点为 $A'$ 、 $B'$ 、 $C'$ 。 $S(\theta)$ 为工件形状误差, $x(\theta)$ 、 $y(\theta)$ 为最小二乘圆心 $O_1$ 回转运动误差的水平 and 垂直分量<sup>[3-14]</sup>。

$$A(\theta) = S(\theta) + x(\theta) \quad (3-15)$$

$$B(\theta) = S(\theta + \varphi_1) + x(\theta) \cos \varphi_1 + y(\theta) \sin \varphi_1 \quad (3-16)$$

$$C(\theta) = S(\theta + \varphi_1 + \varphi_2) + x(\theta)\cos(\varphi_1 + \varphi_2) + y(\theta)\sin(\varphi_1 + \varphi_2) \quad (3-17)$$

其中  $A(\theta)$ ,  $B(\theta)$ ,  $C(\theta)$  分别为三个传感器的输出信号(已减去直流分量,并乘各自的标定系数)。引入记号

$$D(\theta) = S(\theta) + C_2s(\theta + \varphi_1) + C_3s(\theta + \varphi_1 + \varphi_2) \quad (3-18)$$

将上式离散化后,进行傅立叶变换得

$$S_f(k) [1 + C_2e^{j\varphi_1k} + C_3e^{j(\varphi_1+\varphi_2)k}] = D_f(k) \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3-19)$$

$$w(k) = 1 + C_2e^{j\varphi_1k} + C_3e^{j(\varphi_1+\varphi_2)k} \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3-20)$$

计算可以得出  $w(0) = 0$ ,  $w(1) = 0$ 。

$$S_f(k) = D_f(k) / [1 + C_2e^{j\varphi_1k} + C_3e^{j(\varphi_1+\varphi_2)k}] \quad (3-20)$$

对上式进行反傅立叶变换,即可求得被测件形状误差系列  $S(\theta)$

然后,把  $S(\theta)$  分别代人 (3-15) (3-16) 两式,再得到回转误差在 X、Y 两个方向上的分量的离散序列  $x(\theta)$ ,  $y(\theta)$ 。这样就求出了圆度误差和回转误差(运动误差)。

分析可以知道  $S_f(0)$  是工件形状误差的直流分量,  $S_f(1)$  是工件形状误差的偏心分量。

### 3.3.5 四点法以及其他新方法

#### 1) 四点法

在三点法基础上如图 3-3,再增加一个传感器,就变成了四点法,四点法在三点法基础上虽然只增加 1 个传感器,但实际上是用 4 个传感器组成了 3 组三点法的冗余并联设计。可得到两组权函数,两组权函数互相补充,得到一组各阶权函数都较大的值,从而减少了工件形状误差的谐波失真。由于其在误差分离过程中可以灵活选取加权系数以调整总权函数的取值,使其在各阶谐波分量上都均衡合理,提高了测量精度。当然,多增加 1 个传感器,就易多引入传感器标定误差,标定时必须多加小心。当然,布置 4 个传感器会使测量装置复杂、增加安装

调整的难度，往往受到测量空间的限制，尤其是针对加工中的临床测量。

### 2) 两点法

在三点法的基础上，还有对三点法进行简化而省掉一个测头的两点法。简化了测头的安装，但简化过程会带入原理性误差。二点法作为一种近似方法，自然存在原理误差。因近似而造成的各阶谐波分量的绝对误差或相对误差。量化分析后不难发现，当采样点数较大( $N \geq 128$ )时，这种近似造成的原理误差很小，仅为2%左右。且谐波分量的阶次及是否奇偶对误差也有一定的影响，二点法使得测量装置简化，在测量空间受到限制具有其优势，二点法易于实现圆度误差的时域递推分离，大大提高了运算速度。

### 3) 全谐波误差分离技术<sup>[2]</sup>

多步法误差分离技术不能完全分离仪器主轴系统误差和圆度误差。即在转位次数  $M$  的整数倍数次谐波上出现谐波抑制。全谐波误差分离技术是在多步法的基础上提出的，目的是进一步提高误差分离技术的测量准确度。其原理是在圆度仪的全通档用三种等角转位进行转位。对主轴系统误差和标准半球圆度误差进行谐波分析后，用三种等角转位中的能分离的谐波误差替换不能分离的谐波误差做谐波校正。最后做数字滤波和谐波合成，即可分别得到圆度仪主轴和标准半球的全谐波误差。其数据处理过程包括：

①误差分离:测量后可得测量矩阵  $A(M,N)$ 。此矩阵包含了主轴偏心、标准半球偏心等的误差。用最小二乘法对  $A(M,N)$  进行消偏心处理后，得到消偏矩阵  $B(M,N)$ ，然后进行误差分离。

②谐波分析:分别对  $S(N)$  和  $R(N)$  进行谐波分析。由于对  $S(N)$  和  $R(N)$  已进行过消偏心处理，一次谐波对主轴系统误差和标准半球圆度误差已不起作用，因为此时它们的一次谐波傅里叶系数为零，所以谐波次数可以从开始进行谐波分析。

③数字滤波和误差合成:数字滤波是对谐波分析后的  $S(N)$  和  $R(N)$  的傅里叶系数分别乘以各滤波档滤波特性的回归方程得到按滤波特性衰减的傅里叶系数。按衰减的傅里叶系数对谐波叠加即为误差合成。

## 3.4 本章小结

介绍了目前转子和轴系几种常见的几何误差分离方法。

考察圆度误差的在线测量分离技术，不难发现有以下性质：

- (1) 布置传感器时均需使某一或一些被测误差量在传感器中得到反映,可以借助测量系统配置的几何特征表达为该被测误差量在测量时间或空间的“时延”或“相移”,同时该被测误差量本身是被假定为周期性的,时不变的;
- (2) 被测量总是遵循阿贝原理,所以线值或相当于线值传感器的测量敏感方向总是在被测误差量的延长线上,因此,该误差量在传感器中的传递是1:1的;
- (3) 其它误差量则由测量系统的几何关系加权后反映到处于不同位置的测量传感器中,一般这些误差量在传感器中的反映不能表述为误差量在空间中的时移或相移。这些误差量可以是确定的,也可以是随机的。

## 第 4 章 几何误差与运动误差的分离

在本文分离几何误差的时候，传感器测得位移信号由运动误差和几何误差叠加的信号。对于静态的误差分离来说，上章的分离方法都可以根据分离精度要求实现可行的误差分离。但是磁力轴承有其特殊的地方，就是其在高速旋转的时候，磁力轴承经常工作在超临界，甚至超多临界的数万至数十万 RPM 范围内，因此磁悬浮转子表现为柔性转子的特性<sup>[54]</sup>。传统的磁力轴承我们把转子当作刚性转子来计算和分析。或者说当磁力轴承转速低于临界转速的时候，我们可以认为磁力轴承是刚性不变形的轴。随着转子的速度超临界工作，转子的柔性特性就成得不能忽略。对于磁悬浮控制系统的径向位移测量多采用涡流传感器的差动测量方法。但是影响转子运动位移测试信号的因素很多，对于超多临界转子位移的信号采集也涉及到转子几何形状误差，不平衡振动和柔性弯曲变形等综合因素的影响。

对于几何形状误差带来的影响文章开始都做了阐述。柔性转子的模态运动误差同样也是周期性误差，总是会与几何误差的混叠再一起，所以必须进行运动误差和几何误差的分离。

### 4.1 柔性转子的运动误差特性

#### 4.1.1 ANSYS 转子动力学分析模块简介

ANSYS 转子动力学分析中，两种参考坐标系可供选择：静止坐标系和旋转坐标系。

在静止坐标系下转子的动力方程为<sup>[54]</sup>：

$$[M]\{\dot{u}\} + ([C] + [C_{gr}])\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad (4-1)$$

$M$ 、 $C$ 、 $K$  为系统的质量、阻尼、刚度矩阵， $u$  为系统的广义坐标矢量， $F$  是作用在系统上的广义外力。 $[C_{gr}]$  为陀螺效应矩阵。

在旋转坐标系下转子的动力方程为：

$$[M]\{\dot{u}_r\} + ([C] + [C_{cor}])\{\dot{u}_r\} + ([K] - [K_{spin}])\{u_r\} = \{F\}, \quad (4-2)$$



$[C_{cor}]$ 为哥氏效应矩阵,  $[K_{spin}]$ 为旋转软化效应刚度矩阵。

#### 4.1.2 ANSYS 转子动力学分析模块计算功能和新技术

ANSYS /rotordynamics 是一个集成于 ANSYS 中的一个宏指令, 它使用户更准确、更直观的使用 ANSYS 处理转子动力学的问题。Rotordynamics 主要目的是创造一个最大限度地利用 ANSYS 软件的工具。如: 更简单的建立有限元模型、元素库、选择计算方法来计算需解决方案的特征值、模态轨迹、谐波振动及跃迁振动。该模块提供一个直观而简洁的直接参数输入、精确分析和结果评估的用户环境。

- ◇ 转子动力学模块的模态分析计算包含如下功能:
- ◇ 横向-扭振
- ◇ 阻尼-无阻尼分析
- ◇ 可变转速模态分析 (坎贝尔图)
- ◇ 临界速度, 稳定性, 模态轨迹
- ◇ 陀螺效应
- ◇ 预应力效应

#### 4.1.3 磁悬浮转子模型的建立

磁悬浮转子柔性特性应建立在柔性转子动力学的基础上, 而柔性转子的超临界模态分析对于磁悬浮转子的控制理论有非常深远的意义。磁悬浮转子柔性位移分析采用有限元法和转子模态分析方法来研究转子模态轨迹特性和运动规律, 从而为磁悬浮转子的位移控制提供补偿和修正。转子模化为含陀螺效应、由磁力轴承支承的多质量柔性集总参数系统。根据转子 Riccati 传递矩阵法, 转子单元截面状态矢量为

$$\bar{Z}_k = [\bar{M}_x, \bar{M}_y, \bar{F}_{s,x}, \bar{F}_{s,y}, \bar{r}_x, \bar{r}_y, \bar{\theta}_x, \bar{\theta}_y]_k^T \quad k=1,2,\dots,n \quad (4-3)$$

式中:

- $M$ ——弯矩状态复参数
- $F_s$ ——剪力状态复参数
- $r$ ——位移状态复参数
- $\theta$ ——偏角状态复参数
- $n$ ——转子单元总数

模型主要考虑柔性转子的径向位移变化对传感器的影响。由于涡流传感器的安装受到磁力轴承定子磁场的影响的，所以涡流传感器在安装位置所测量径向位移不能反应转子的实际位移，再加上柔性转子的高阶模态的变形，就会使测量数据产生放大，从而产生过量的控制信号，转子转速越高，模态变形越大，测量反馈的信号越大，最终使转子失去控制。所以必须对磁悬浮转子的高阶临界状态进行分析，对柔性转子挠曲量进行修正，才能使转子控制系统做出正确的判断，克服高速转子柔性产生的控制问题。

(1) 在 Ansys/rotordynamics 模块中建立有限元模型。本文设计的磁悬浮转子(如图一)的总长约 524mm，最大直径约为 54mm，径向磁力轴承转子安装轴径为 46mm。两个径向磁力轴承外径约为 76mm，将转子轴向分布的各组件质量集中为质量 disc1、质量 disc2 分别布置在所示位置。工作转速为 0~4000r/min。

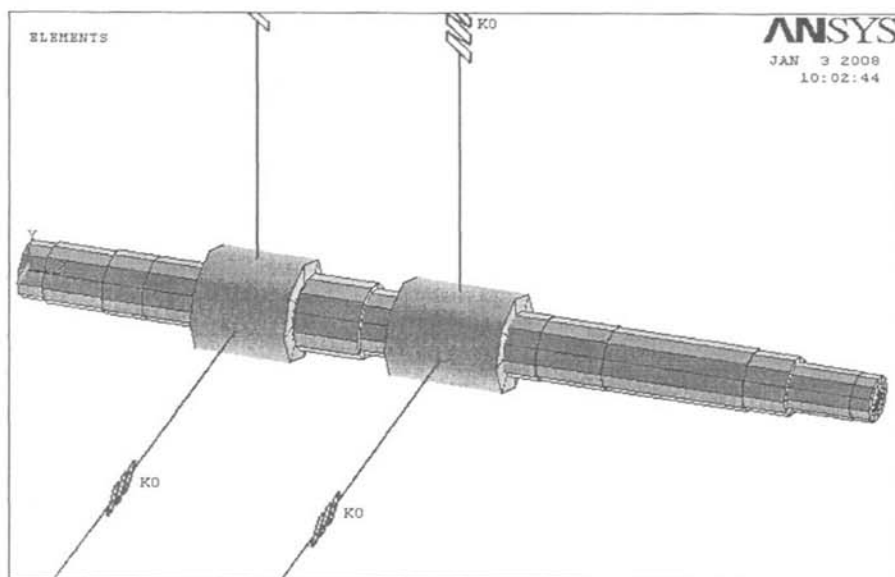


图 4-1 磁悬浮主轴有限元模型

材料属性(如表 4-1):

杨氏模量	$E=2.1E+11Pa$
泊松比	$\mu=0.3$
密度	$\rho=7850kg/m^3$
粘性阻尼	$\alpha=4sec^{-1}$

表 4-1 材料属性

集中质量结构属性 (如表 4-2):

质量 disc1	质量	$m_1=2.0\text{kg}$
	转动惯量	$J_{1,0}=0.01\text{kgm}^2$
	极惯性矩 <sup>2</sup>	$J_{1,p}=0.0002\text{kgm}$
质量 disc2	质量	$m_2=1.4\text{kg}$
	转动惯量	$J_{2,0}=0.01\text{kgm}^2$
	极惯性矩	$J_{2,p}=0.0005\text{kgm}^2$

表4-2 质量结构属性

(2) 在转子磁悬浮径向轴承处添加刚性和阻尼。

在本次研究中设定 (如表 4-3):

质量盘 1	刚度	$1\text{e}5\text{N/m}$
	阻尼	$2000\text{kg/m}$
质量盘 2	刚度	$1\text{e}7\text{N/m}$
	阻尼	$2000\text{kg/m}$

表 4-3 径向轴承的阻尼刚度

对于磁力轴承的转子来说,转子的刚度阻尼是可变的,如考虑其基础的弹性时,转子的支承就不是绝对刚性的。考虑了支承弹性后,整个系统的刚度将减少,这将导致各阶临界转速值下降。在某些情况下,临界转速值的下降是显著的。但是本次研究主要考虑柔性转子的位移变化。所以为简化研究对象,设定转子在固定的刚度阻尼的工作环境下。

## 4.2 计算结果及分析

当转子取 0~4000r/min 转速时,计算得到的转子前 4 阶临界转速(如表 4-4)。

临界转速	一阶	二阶	三阶	四阶
r/min	222.688	738.66	1771	2935

表 4-4 计算所得临界转速

本文以前四阶转子的柔性变形为主要研究对象,通过前四阶柔性转子的变形来分析临界柔性转子发生在各模态下位移变化。从而得知变形对于测试信号的影响。转子前四阶临界转速的变形图(如图4-2):

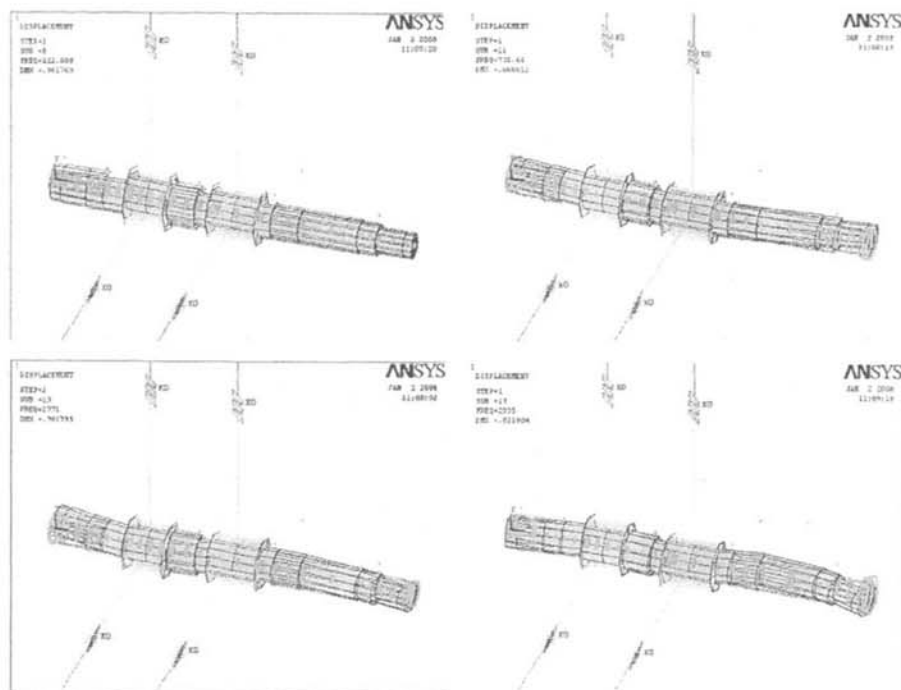


图 4-2 磁悬浮转子前四阶振型模型

NODE	UX	UY	UZ	ROTX	ROTY	ROTZ
1	0.0000	-0.32312	-0.44725E-02	0.0000	-0.22100E-01	1.6704
2	0.0000	-0.29639	-0.41191E-02	0.0000	-0.22105E-01	1.6704
4	0.0000	-0.23458	-0.33018E-02	0.0000	-0.22221E-01	1.6694
5	0.0000	-0.19285	-0.27463E-02	0.0000	-0.22434E-01	1.6676
6	0.0000	-0.14835	-0.20361E-02	0.0000	-0.22962E-01	1.6631
7	0.0000	-0.36115E-01	-0.52613E-03	0.0000	-0.24088E-01	1.6527
8	0.0000	0.28301E-01	0.41693E-03	0.0000	-0.23091E-01	1.6604
9	0.0000	0.21700	0.21968E-02	0.0000	-0.85956E-02	1.7760
10	0.0000	0.28882	0.24422E-02	0.0000	-0.47322E-02	1.8066
11	0.0000	0.44644	0.26115E-02	0.0000	-0.71622E-03	1.8383
12	0.0000	0.49394	0.26206E-02	0.0000	-0.34847E-03	1.8412
13	0.0000	0.56475	0.26208E-02	0.0000	-0.55402E-05	1.8439

表 4-5 磁悬浮转子一阶振型主轴各节点位移

从计算结果（表 4-5）可知：

- (1) 转子一阶振型径向位移都发生变化，随着频率的增高或者临界阶数的增高，柔性转子振型变化越大。
- (2) 离径向磁力轴承的远近，变形的位移变化没有明确的规律。阶数不同位移大小也不同。
- (3) 从表 4-5 的数据可知，模态各节点位移变化会对转子的测试信号产生控制反馈，这些位移变化必将引起控制信号产生多余控制量。

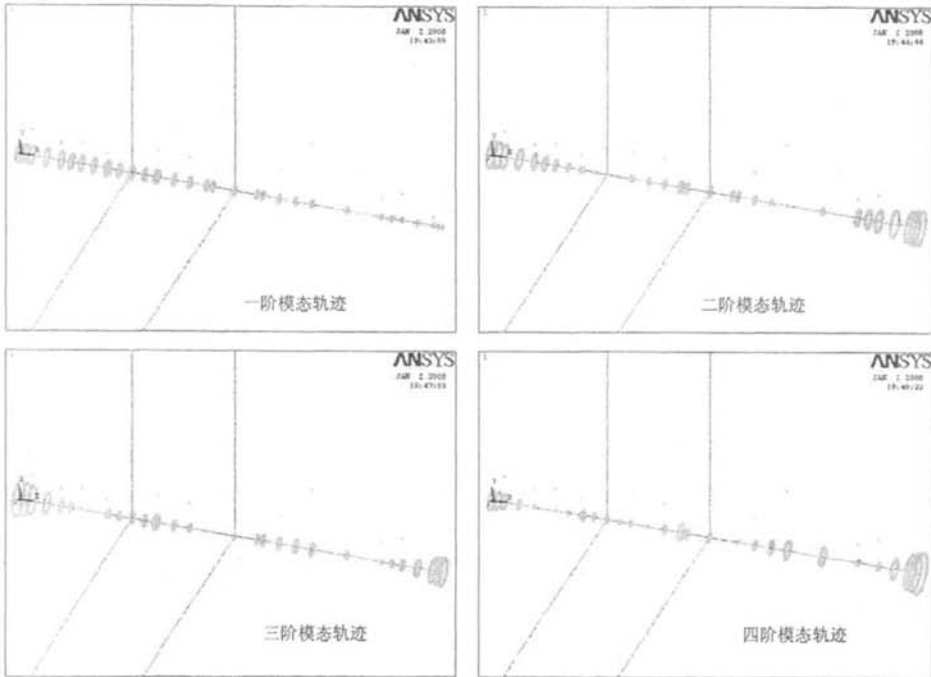


图4-3 前四阶模态轨迹图

从图 4-3 的各节点的模态轨迹图分析可知：

- (1) 各节点的模态轨迹都成不规则的椭圆形，在随轴向变化和阶数变化的各点模态轨迹均不相同。
- (2) 各节点在相同临界转速下的模态相位和方向均不相同，与转子的物理属性和转速有关，这对传感器模态位移分离提出了更高的理论要求。
- (3) 前四阶中各节点的模态位移的大小与转速和阶数没有关系，所以要想分离模态位移引起的传感器响应必须跟随模态的变化而改变。

通过 ANSYS /rotordynamics 转子动力学分析模块计算给出了磁悬浮柔性转子在前四阶临界转速下，柔性转子的位移变化状态。通过仿真计算得出如下结论。

- (1) 柔性转子各节点在柔性变形的状态下各点会产生不同状态的位移。
- (2) 各节点的位移将对位移传感器的测试信号产生影响，对位移量作出错误的判断。从而导致径向磁力轴承产生错误的控制，反而加剧转子的振动，破坏轴承的运动。
- (3) 以上的数据还表明柔性转子的模态轨迹是不规则的椭圆形，并且位移、方向及相位随轴向产生非线性变化。从而为模态位移的分离和补偿提供了理论证明及参考。
- (4) 因为涡流位移传感器离磁力轴承太近，测试信号与径向磁力轴承会产生耦合，但是随着位移传感器的离径向磁力轴承越远，模态位移变化越大，由此产生的影响会越大。此理论计算同时为径向位移传感器的合理放置提供了理论分析和参考。

### 4.3 运动误差分离方法

如何对柔性特性对传感器产生的运动误差分离，我们经行误差分离的一个重点之一，转子表现为柔性，从其模态轨迹图可知，柔性特性对传感器产生的运动误差，也会跟几何误差叠加在信号中，传感器感知的位移量便反馈到控制系统中去，柔性转子的摸态轨迹和几何误差有相同特性：

- 1) 都是周期信号，混叠在位移量中，传感器无法直接分离；
- 2) 柔性产生的运动误差和几何误差是同一个数量级；
- 3) 对磁悬浮转子控制精度产生重要的影响，降低磁悬浮的控制效果。

当对磁悬浮转子外圆轮廓与 X 轴正方向的交点到坐标原点的距离为  $d$ ，主轴回转时，位移传感器对于轴承转子表面信号的每个采样点，有如下关系<sup>[30-36]</sup>：

$$D_i = S_i + M_i \quad i = 0, 1, 2, \dots, n \times m \quad (4-4)$$

式中： $M_i$ ——主轴在 X 方向的回转误差；

$S_i$ ——主轴的形状误差数据；

$n$ ——每转采点数；

$m$ ——采样转数；

观察上式可知， $S_i$ 为主轴的几何形状误差，用变化的半径来表示。在连续的  $D_i$  数据中，它是严格的周期信号，并与转速同频。 $M_i$ 为主轴回转模态误差量，由于主轴轴心只能在一封闭区域内运动，所以  $M_i$ 也只能在一定范围内变化。对主轴连续采集  $m$  转，得到  $n$  又  $m$  个数据，考虑将相同采样标记点的数据相加求

平均值, 有:

$$\frac{\sum_{j=0}^{m-1} D(k+n \times j)}{m} = \frac{\sum_{j=0}^{m-1} M(k+n \times j)}{m} + \frac{S_k \times k}{m} \quad k=0,1,2,\dots,n-1 \quad (4-5)$$

理论上, 只要采集样本足够多,  $\frac{\sum_{j=0}^{m-1} M(k+n \times j)}{m}$  将趋向于常量 I, 其中 I 可看作为主轴回转平均轴心与坐标原点距离在 X 方向的分量。于是有:

$$S_k = \frac{\sum_{j=0}^{m-1} D(k+n \times j)}{m} - I \quad (4-6)$$

至此便将主轴得回转误差分离出去, 转化成常量 I。然而上式中的  $D_i$ , 并非传感器采集得到的数据, 需作如下一些转换。

$$D_i = L - X_i$$

式中:L-----传感器到坐标原点的距离;

$X_i$ -----传感器采集的数据序列;

主轴形状误差数据  $S_i$ , 传感器采集的数据  $X_i$ , 和主轴回转误差运动数据  $M_i$  中的

直流分量 S、X, 和 I 分别为:

$$S = \frac{\sum_{i=0}^m S_i}{n} \quad (4-7)$$

$$X = \frac{\sum_{i=0}^{n \times m} X_i}{n \times m} \quad (4-8)$$

$$I = \frac{\sum_{i=0}^{n \times m} M_i}{n \times m} \quad (4-9)$$

则有:

$$s_i = S + \Delta s \quad (4-10)$$

$$x_i = X + \Delta x \quad (4-11)$$

$$m_i = I + \Delta m \quad (4-12)$$

式中:  $\Delta m, \Delta x, \Delta s$  分别为主轴形状误差数据  $s_i$ , 传感器采集的数据  $x_i$ , 和主轴回转误差运动数据  $m_i$  减去各自直流分量后的数据。  $L$  于是有:

$$\begin{aligned} S_k = S + \Delta s &= \frac{\sum_{j=0}^{m-1} (L - X(k + n \times j))}{m} - I \quad (k = 0, 1, 2, \dots, n-1) \quad (4-13) \\ &= L - \frac{\sum_{j=0}^{m-1} X(k + n \times j)}{m} - I \\ &= L - X_k - I \end{aligned}$$

式中:  $X_k = \frac{\sum_{j=0}^{m-1} X(k + n \times j)}{m}$ , 是传感器  $X$  采集到的第  $k$  个标记点的位移数据的平均值;

由式(4-10)立即有:

$$\Delta s = L - I - S - X_k \quad (k = 0, 1, 2, \dots, n-1) \quad (4-15)$$

而:  $L = I + S + X$

$$\Delta s = X - X_k$$



$$= \frac{\sum_{i=0}^{n \times m} X_i}{n \times m} - \frac{\sum_{j=0}^{m-1} x(k+n \times j)}{m} \quad (k=0,1,2,\dots,n-1) \quad (4-16)$$

至此由一个传感器采集的数据序列计算得主轴外圆轮廓的形状误差。

同理可以得到运动误差：

$$M = X - X_k - S$$

$$= \frac{\sum_{i=0}^{n \times m} X_i}{n \times m} - \frac{\sum_{j=0}^{m-1} x(k+n \times j)}{m} - S \quad (4-17)$$

#### 4.4 本章小结

本章研究了运动误差中柔性转子模态轨迹对磁力轴承转子位移的影响同时借助于 ansys 分析软件，判别其性质。对转子的柔性下的模态位移和几何误差叠加进行了分离工作。使得几何误差能够被完全独立分离。

## 第5章 误差补偿

在主动磁力轴承系统中, 径向磁力轴承作为主要的支撑元件。通常情况下轴的实际回转中心不与几何中心重合。实际上, 通常一次谐波的幅值不一定相等, 形成一个椭圆, 其由视在运动误差和几何误差组成。如果在磁力轴承系统中把这些几何误差进行分离并且补偿掉。经过分离了几何误差和运动误差的控制电流经功率放大后送入磁力轴承, 驱动磁轴承产生磁力进行主轴位移补偿的控制。这样由外力引起的主轴位移运动就可以通过改变磁轴承中的控制电流, 进而改变磁轴承所产生的磁力, 实现对主轴的精确控制。

### 5.1 误差的补偿原理

在磁力轴承转子高速旋转运动时, 当主轴远离平衡位置时, 由磁轴承在与主轴偏离平衡方向的相反方向产生电磁力阻止轴心的偏离, 从而使主轴的运动轨迹维持在平衡位置。由于轴承运动存在形状误差和运动误差, 并且当主轴加工完成后, 表面误差就成为固定量。要改变机床硬件才能减小, 改变起来难度很大所以本方法先采用几何误差分离方法将这两种误差分离出来。

由于机械加工技术的提高有一定难度, 其圆度误差远大于回转精度, 通常为微米级。因此可以用传感器直接对主轴外轮廓采集数据, 采用数理统计法, 先行消除采得数据中主轴回转误差, 得到误差值比主轴回转误差精度值小 1~2 个数量级的主轴形状误差数据, 再用传感器采集的数据减去形状误差数据, 从而得到主轴的回转运动数据, 进而计算得主轴的回转精度。

通过传感器测出的位移变换量, 进行几何误差分离后, 几何误差存贮在计算机中, 当轴的回转运动控制在所要求的精度范围内, 当进行控制时从内存中调出, 从总的测量值中减去表面误差, 再通过磁轴承消除掉运动误差并调整轴的位置。其原理如图 5-1。

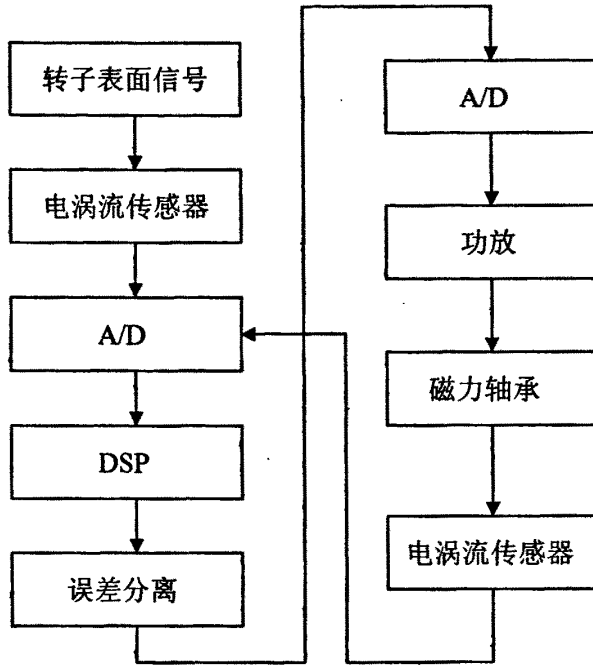


图 5-1 补偿原理图

计算处理模块主要实现传感器数据的计算、误差分离计算、圆度误差评定计算、主轴回转误差评定计算。传感器数据计算部分根据原始输入的主轴回转误差数据、形状误差数据及每个传感器布置的位置关系分别计算出每个传感器位置的位移变化数据序列以表示传感器拾取的数据序列。接着，该数据序列将通过误差分离算法重新分离出主轴回转误差数据及形状误差数据。最后将分离出的转子轴表面位移信号，转换成转子的回转中心的位移信号输入到控制系统中，进行磁力轴承的控制。

磁力轴承主轴回转精度已达到 0.025~0.05 微米。另外通过控制技术提高主轴的回转精度，也取得了突破，当然这种技术离实用还有一定的距离。而对于主轴的外圆轮廓，由于对主轴的外圆轮廓进行直接在线测量，从而能测量实际工况负载下的主轴回转精度，实现真正的在线检测和分离。

高转速磁力轴承主轴的工作转速通常都达到 10000 转/分以上，采集 1000 转数据只需要短短的 6 秒钟，因此可以在较短的时间内采集到满足主轴回转运动统计规律特性的大量数据，从而有效的减小了温度漂移误差、外界环境引入的

随机误差等对测量数据精度的影响，提高了测得的主轴回转误差的精度等级。

变频线性调速磁力轴承主轴通常使用变频器来实现主轴转速的线性调节。为了保护主轴，主轴加、减速通常会设置一段时间，即上升时间和下降时间。用数理统计法进行误差分离时，要避免主轴形状误差与主轴回转误差严格同频叠加，这种情况大概只在理想的主轴工作状态并且在恒定转速下才可能发生。为了更好地进行误差分离，避开主轴形状误差与主轴回转误差严格同频叠加情况，可以在主轴的上升或下降时间里进行数据采集。

## 5.2 数理统计方法

采用在本文中介绍的三步法先行消除圆度误差的误差分离技术，得到主轴回转误差，然后再用传感器采集数据减去求得的主轴回转误差，得到圆度误差。但对于高速高精度主轴的回转精度测量，如果直接对主轴外圆采集数据，其外圆圆度误差远大于主轴的回转误差，采用先行消除数量级较大的圆度误差的误差分离技术(如多步法)，将会大大限制分离得的主轴回转精度的精度等级。然而使用数理统计法，采用先行消除数量级较小的主轴回转误差，得到误差相当小、精确度相当高的主轴圆度误差，再用传感器采集数据减去高精度度的主轴圆度误差从而得到主轴的回转误差。数理统计误差分离技术是针对高速高精度主轴的工作特点提出的，其相对于以往的误差分离技术具有如下优点<sup>[52]</sup>：

- (1) 安装方便、测量简单可灵活选择使用一个或两个传感器进行主轴回转误差的一维或二维测量。使用一个或两个传感器测量的数据处理方法统一；不需额外精密的装夹工具，安装简便。不必精确测量传感器的安装间隙，通过引传感器到坐标原点的距离  $L$ 、主轴回转轴心到坐标原点的距离  $I$  等，在数据处的过程中将  $L$ 、 $I$  等消去，从而避免了测量误差的积累。
- (2) 适用于高速、高精度主轴数理统计法测量的第一阶段通过采集大量数计算出精确的主轴圆度形状误差，由于高速主轴的转速非常高，采集所需数据常只需数秒，因而能有效避免温度漂移、外界环境引入的随机误差等的影响，高了数据的准确性。另一方面，进行主轴的二维回转误差测量时，虽然要使用个传感器，但两个传感器的数据处理相对独立，从而有效避免了多传感器测量(多点法)时传感器性能不一致造

成的计算误差，提高了计算精度。

- (3) 能实现实时、在线测量数理统计法主轴回转误差测量技术直接对主轴圆表面测量，不需安装标准球或标准棒，所以能够实现真正主轴工况下的回转误差测量，进行主轴工转负载时回转误差的状态监测。数理统计误差分离技术中，数据处理分两个阶段完成，其中第一阶段计算主轴圆度形状误差数据，只需在轴启动时执行一次即可。第二阶段则是主轴工况状态下的实时主轴回转误差的离计算，算法相对简单，运算量不大，能很好应用于实时测量。
- (4) 可专用于高精度圆度误差测量数理统计主轴回转误差测量的第一阶段计算主轴的圆度形状误差，该阶段计算得到的主轴圆度形状误差具有精度高的点，而且只需使用一个微位移传感器，不需精密安装夹具，没有较高的安装要求，因此能作为一种专用的圆度误差测量方法。
- (5) 能用于非周期性回转误差的测量过去很多的误差分离算法都将上轴回误差运动看作是严格的周期性运动，而忽略了主轴回转误差的非周期性，因此这些误差分离算法计得的主轴回转误差并不能真正反映真实主轴轴心回转运动，有些算法计得的只是很多圈数据的平均主轴轴心回转运动轨迹。事实上，主轴回转误差运动并不具有明显的周期性，非周期成分同样不能忽略。而数理统计在第一阶段测得精确的主轴圆度误差数据后，在第二阶段则是用该数据对传感采集的数据进行实时修正，从而得到主轴的实时回转误差数据，因此该法能更实测得实际的主轴回转轴心运动轨迹。

### 5.3 硬件构成

磁力轴承主要包括：电磁铁、转子、位移传感器、A/D、控制器、D/A、功率放大器七个部分。

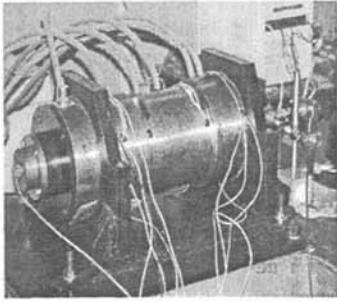


图 5-3 磁力轴承主轴实验装置

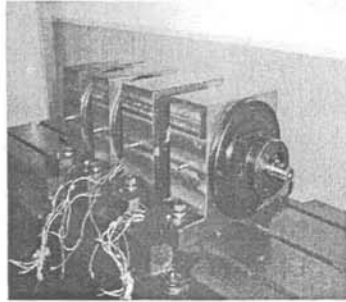


图 5-4 磁力轴承转子实验装置

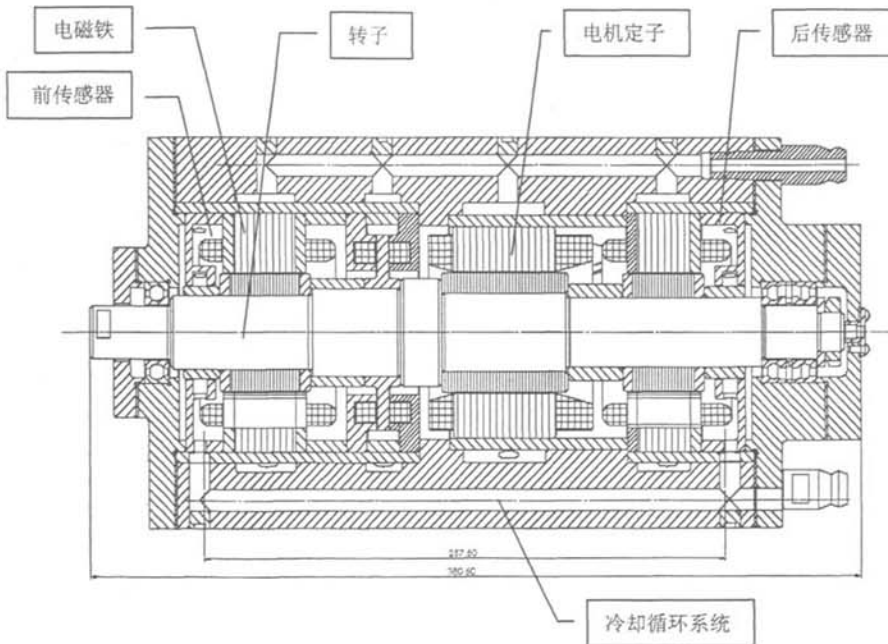


图 5-5 磁悬浮主轴结构图

### 5.3.1 控制器设计

控制系统可采用模拟控制和数字控制，模拟控制依靠模拟电路完成特定运算，故模拟控制运算速度快，成本低，但控制器一旦选定，参数不易修改，且很难实现复杂的控制算法。在磁力轴承中，模拟控制主要用于小轴承。数字控制相对灵活，相对模拟控制而言，有其特定的优越性：

- ◇ 使用灵活，调试方便，无需对硬件设备做任何改变，只需要改变程序就

可以改变控制系统的参数和性能。

- ◇ 系统体积小，可靠性高，元件可靠，抗干扰能力强。
- ◇ 可实现复杂的控制规律，可以获得比模拟控制更好的控制性能。
- ◇ 系统的更新换代由于常常只涉及软件而更为容易。
- ◇ 对意外和紧急情况以及相应的安全问题可以作出智能反应。

数字控制过程实际上是采集信号，经过数据处理和运算，然后再输出用于控制。它把大多数时间都用在了数字运算上。因此，在进行实时数字控制时，要同时兼顾运算精度和运算速度。

目前，磁力轴承主要采用数字控制。而数字控制一般采用单片机实现或 DSP 实现。磁力轴承系统是一个实时测控系统，要求快速响应和高的回转精度，对转子控制频率要求很高。若转子转速为 60000rpm、每转控制 4 次，则需要的采样周期为  $250\mu s$ ，如果应用 8098 单片机实现，控制周期一般超过  $400\mu s$ ，显然不能满足系统控制要求，造成主轴动态响应能力低、稳态误差大、刚度低。若用多个 8098 单片机作五自由度磁力轴承的微控制器，既达不到目的又使系统复杂化、故应该采用高速 DSP。

DSP 系统的设计还没有非常好的正规设计方法。图 5-6 是 DSP 系统设计的一般过程。

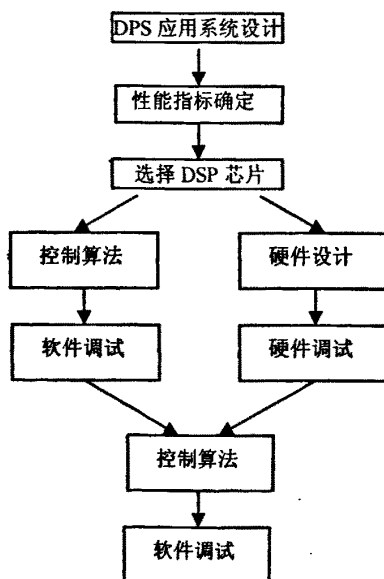


图 5-6 DSP 程序设计一般步骤

采用 DSP 的硬件电路从结构上主要分成信号输入、信号处理和信号输出三大部分，如图 5-7 所示。

### 1) 信号输入

将调理（滤波、信号放大等）过的传感器信号通过 A/D 转换器将信号量化为可以被信号处理电路所接受的数字信号，并将该数字量锁存足够长的时间以使其能够完全传递给信号处理电路。

### 2) 信号处理

核心器件为数字信号处理器，根据程序流程完成对来自上一级电路的数字信号的运算处理工作，并输出到下一级电路中。如有必要，这部分电路还应该包括为支持数字信号处理器正常工作所必须的扩展电路部分，如高速静态存储器（SRAM）、信号锁存电路、中断发生电路等。为了同 PC 机之间进行数据交换，可以增加上下位机的通信电路。在仿真阶段，还需要有 JTAG 接口以实现 DSP 系统的调试。

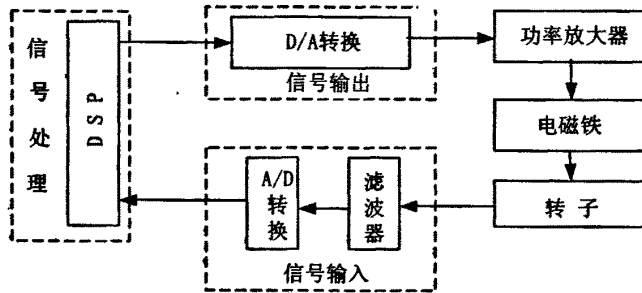


图 5-7 DSP 硬件结构图

### 3) 信号输出

处理完成后产生的控制信号通过 D/A 转换器转换成电压信号（当采用电流控制方式时，电压信号正比于控制电流的大小）后提供给功率放大电路，产生线圈的控制电流。

DSP 是新出现的高速、高性能微处理芯片。要根据转子的悬浮状态主动地调节磁场来保持转子自由、稳定地悬浮，必须要有反馈控制系统来实现。控制器是磁力轴承系统中最关键的部分，控制器的性能不仅决定了磁悬浮能否实现，而且还直接影响到转子的回转精度和承载能力等关键指标。所以控制器的选择和设计很重要。磁力轴承对控制器性能指标的基本要求如下：

- 1) 要求系统的动态响应时间短。
- 2) 要求磁力轴承控制系统抗干扰能力强。
- 3) 要求系统的阻尼特性好，系统的动态过程不应有较大的超调量。



设计 DSP 的应用系统, 选择 DSP 芯片是非常重要的一个环节。目前, DSP 芯片的主要供应商有美国的德州仪器公司 (TI)、AD、AT&T 公司、MOTOROLA 等。其中 TI 公司的 DSP 芯片占世界 DSP 芯片市场近一半, 在国内被广泛应用, 并广泛应用于各个领域。TI 公司 DSP 的主流产品包括 TMS320C2000 系列、TMS320C5000 系列、TMS320C6000 系列。

TMS320C2000 系列是适合于数字控制的一类 DSP。TI 公司提供了完整的数字控制 DSP 解决方案, 设计了工业级性能的 DSP 芯片, 并提供了很多实用代码。TMS320LF240X 系列是 TMS320C2000 家族中最新的、功能强大的 DSP 芯片。而最具革命性的产品是 TMS320LF2407/2407A, 它是世界上集成度最高、性能最强的运动控制 DSP 芯片。

TMS320LF2407 的主要特征包括:

(1) 采用高性能静态 CMOS 技术, 使得供电电压降为 3.3V, 减小了控制器的功耗; 外接晶振频率为 30MHz 时, 由于采用四级流水线, 使得指令周期缩短到 33ns, 从而提高了控制器的实时控制能力。

(2) 片内有高达 32KW ×16bit 的 Flash 程序存储器; 高达 3.5KW ×16bit 的数据/程序 RAM; 544 字双端口 RAM(DARAM); 2K 字的单口 RAM(SARAM)。

(3) 看门狗定时器模块。

(4) 10 位 ADC 转换器, 最小转换时间为 500ns、16 个或者 8 个多路复用的输入通道、可选择由两个事件管理器来触发两个 8 通道输入 A/D 转换器或一个 16 通道输入的 A/D 转换器。

(5) 5 个外部中断 (复位、两个电机驱动保护和两个可屏蔽中断)。

(6) 基于锁相环的时钟发生器。

(7) 可扩展的外部存储器总共 192K 字空间: 64K 字程序存储器空间; 64K 字数据存储空间; 64K 字 I/O 寻址空间。

(8) 采用哈佛结构, 哈佛结构是不同于传统的冯·诺依曼 (Von Neuman) 结构的并行体系结构, 将程序和数据存储在不同的存储空间中, 即程序存储器和数据存储器是两个相互独立的存储器, 每个存储器独立编址, 独立访问。系统中设置了程序总线 and 数据总线两条总线, 从而使数据的吞吐率提高了一倍。

在哈佛结构中, 由于程序和数据存储器在两个分开的空间中, 因此取指和执行能完全重叠运行。为了进一步提高运行速度和灵活性, TMS320 系列 DSP 芯片在基本哈佛结构的基础上作了改进, 允许数据存放在程序存储器中, 并被算术运算指令直接使用, 增强了芯片的灵活性。

(9) 流水线

与哈佛结构相关，DSP 芯片广泛采用流水线以减少指令执行时间，从而增强

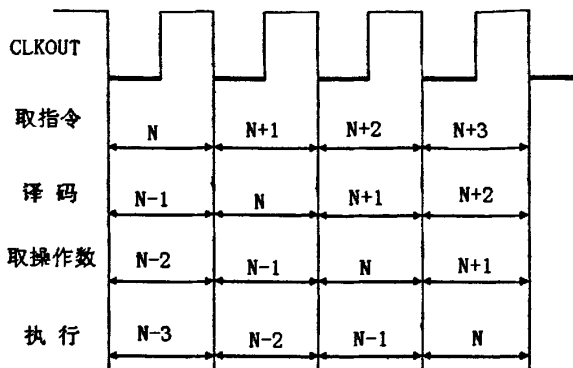


图 5-8 四级流水线示意图

了处理器的处理能力。TMS320 系列处理器的流水线深度从 2~6 级不等。第一代 TMS320 处理器采用二级流水线，第二代采用三级流水线，而第三代则采用四级

流水线。TMS320LF2407 采用四级流水线。也就是说，处理器可以并行处理 4 条指令，每条指令处于流水线上的不同阶段：取指令、指令译码、取操作数以及指令执行。由于四个阶段是独立的，所以这些操作可以重叠。如图 5-8 所示为一个单字、单周期指令且无等待状态执行的四级流水线操作。

#### (10) 专用的硬件乘法器

在一般形式的 FIR 滤波器中，乘法是 DSP 的重要组成部分。对每个滤波器抽头，必须做一次乘法和一次加法。乘法速度越快，DSP 处理器的性能就越高。在通用的微处理器中，乘法指令是由一系列加法来实现的，故需许多个指令周期来完成。相比而言，DSP 芯片的特征就是有一个专用的硬件乘法器。

#### (11) 特殊的 DSP 指令

DSP 芯片的另一个特征是采用特殊的指令。例如 DMOV 就是一个特殊的 DSP 指令，它完成数据移位功能。又例如特殊指令 LTD，它在一个指令周期内完成 LT、DMOV 和 APAC 三条指令。

#### (12) 快速的指令周期

哈佛结构、流水线操作、专用的硬件乘法器、特殊的 DSP 指令再加上集成电路的优化设计，可使 DSP 芯片的指令周期在 200ns 以下。

把 DSP 用于磁力轴承时，要注意以下方面：

(1) TMS320LF2407 使用嵌入到 CPU 内核的锁相环 PLL 电路, 将一个低频率的外部时钟倍频为片内的时钟。为了使 TMS320LF2407A 工作时指令周期为 40MHz, 则 CPU 时钟频率应该为 40MHz, 故在选择外接晶振频率时要满足

$$\text{外接基频} \times \text{倍频} = \text{系统时钟频率}$$

其中的倍频在系统控制和状态寄存器 1 (SCSR1) — 地址 7018h 中的位 11~9 设定。

(2) DSP 与外部程序、数据存储器的扩展和时序配合: DSP 高速度给硬件设计增加了许多麻烦, 使得 DSP 与外围器件之间时序配合显得极为重要。许多硬件在逻辑上是正确的, 但由于 DSP 的速度很快, 访问较慢速度的外部资源时, 造成时序无法匹配, 而使系统不稳或根本无法工作, 这种情况外部存储器需要插入等待状态, 为 CPU 访问外部存储器延长时间, 用以满足处理器定时要求的 READY 信号的状态, 匹配 DSP 和外设的不同运行速度。

TMS320LF2407 提供了两种产生等待状态的方法: 一是 READY 信号, 用 READY 信号从外部产生任意数目的硬件等待状态。二是片内软件等待状态产生器, 可以产生 0~7 个等待状态。READY 管脚可以用来产生任意数目的等待状态。但是, 即使 TMS320LF2407 全速运行时, 它也不能对第一个周期作出快速响应来产生一个基于 READY 的等待状态, 此时, 就应该先使用片内等待状态发生器产生第一个等待状态。等待状态发生器 (WSGR) 产生的等待状态与 READY 信号的状态无关, 通过设置 WSGR 的相关位, 可以分别为存储空间 (数据、程序或者 I/O 口) 插入 0~7 个等待状态, 等待状态的数量根据 WSGR 中的 DSW 位和 ISWS 的值来确定。

(3) TMS320LF2407 采用定点 16 位运算, 一般出于精度的需要, 都会用到小数, 这时, 在控制算法中, 采用定标的方式实现。用 TMS320LF2407 指令实现浮点运算, 必须先将十进制浮点数转化为十六进制定点数, 运算完成后再转化为浮点数。在定点 DSP 芯片中, 采用定点数进行数值运算, 其操作数一般采用整型数来表示。一个整型数的最大表示范围取决于 DSP 芯片的字长, TMS320LF2407 为 16 位。

DSP 芯片的数以 2 的补码形式表示。每个 16 位数用一个符号位来表示数的正负, 0 表示数值为正, 1 则表示数值为负。其余 15 位表示数值的大小。同样一个 16 位数, 若小数点设定的位置不同, 它所表示的数也就不同。例如: 对于 16 进制数 2000H, 若为 Q15 格式, 则代表 0.25, 若为 Q0 格式, 则代表 8192。但对于 DSP 芯片来说, 处理方法是完全相同的。

浮点数与定点数的转换关系可表示为:

浮点数(x)转换为定点数( $x_q$ ):

$$x_q = (\text{int})x \times 2^Q \quad (5-1)$$

定点数( $x_q$ )转换为浮点数(x):

$$x = (\text{float})x_q \times 2^{-Q} \quad (5-2)$$

由于在定标时,采用了向下取整,故产生了误差,在编写控制算法时应予以修正。若PID输出的积分部分定标位Q10,则化为小数时采用Q10=(Q10+512)>>10,就可以提高精度。

### 5.3.2 滤波器设计

在高精度的数据采集,模拟滤波器有着不容忽视的地位。这主要体现在以下两个方面:1)在数据采集过程中“抗混叠、去噪声”;2)提高系统的精度。

从传感器输出的信号经一系列调理后最终需要被转换为数字信号。在信号被采集之前,外界电路中产生的干扰有可能对需要采集的电信号产生影响。如果传感器采用电涡流式位移传感器,则电涡流位移传感器的输出带有高频的纹波干扰,如果不予滤波,必然会影响A/D转换器的转换结果,进而影响系统的控制效果。所以,在A/D转换前,必须进行模拟滤波。

为了避免噪声信号对有用信号产生混叠,则抗混叠滤波器的设计要满足香农采样定理(设采样频率为 $f$ ,被采样信号的最高频率为 $f_c$ ,则必须满足 $f \geq 2f_c$ )。对五路传感器信号,如果每路的采样频率为10kHz,则滤波器的截止频率 $f_c$ 应设计在小于5kHz。要保证截止频率 $f_c$ 以内的信号不受干扰,工程上认为应保证 $1.5f_c$ 以上的信号必须在30%以下。因此,抗混叠滤波器的设计要求为:

1) 截止频率为 $f_c=5$  kHz,在5 kHz以内的信号最大衰减量不大于3dB。

2) 当 $f \leq 2.5$  kHz时,  $\left| \frac{A - A_f}{A} \right| < 1\%$

3) 当 $f \geq 7.5$  kHz时,  $A_f/A < 30\%$

其中,A为滤波器通带增益, $A_f$ 为频率 $f$ 对应的增益。

最常用的低通有源滤波电路有三种,即巴特沃斯(Butterworth)、切比雪夫(Chebyshev)和贝塞尔(Bessel)滤波电路。巴特沃斯滤波电路的幅频响应在通带中具有最大平坦度,但从通带到阻带衰减较慢;切比雪夫滤波电路能迅速衰减,但允许通带中有一定纹波;而贝塞尔滤波电路着重于相频特性,其相移与频率基本成正比,即时延基本是恒定的,可得失真较小的波形<sup>[11][12]</sup>。通常用幅频响

应来表征一个滤波电路的特性，欲使信号通过滤波器的失真很小，则相位和时延响应亦需考虑。当相位响应作线性变化时，即时延响应为常数时，输出信号才可能避免失真。目前，巴特沃斯低通滤波电路最简单也最常用。

N 阶巴特沃斯低通滤波电路幅频响应的特性方程为：

$$\left| A\left(\frac{jw}{w_c}\right) \right| = \frac{A_0}{\sqrt{1 + K_{2n}\left(w/w_c\right)^{2n}}} \quad (5-3)$$

其中 n 表示电路的阶数，显然阶数越高，低通滤波效果越好。

通过观察巴特沃斯滤波器的衰减特性可知，当滤波器阶数大于 4 时，即可满足要求，考虑阶数不能太高，因此一般确定巴特沃斯滤波器的阶数为 6 阶比较合适。从可靠性、精度、功耗、体积等方面考虑，可以选择滤波器芯片 LMF60-50。LMF60-50 是一种高性能、精密、6 阶巴特沃斯有源低通滤波器，截止频率可调，其主要性能指标为：

截止频率范围 0.1HZ-30 kHz；

+5v 供电，允许失调电压为  $\pm 100\text{mv}$ ；

无需外围元件。

### 5.3.3 A/D 转换电路设计

A/D 采样通道在设计过程中首先要考虑的是采样频率问题。这在前面已经设计完毕。TMS320LF2407 器件带有片内模拟数字转换模块 (ADC)，其模块具有以下特性<sup>[13]</sup>：

带有采样/保持 (S/H) 的 10 位模数转换模块 ADC。

多达 16 个的模拟输入通道 (ADCIN0~ADCIN15)

多个触发源可以启动 A/D 转换：

外部：ADCSOC 引脚。

EVA：事件管理器 A(EVA 中有多个时间源可以启动 AD 转换)。

EVB：事件管理器 B。

软件：软件立即启动。

两个独立的最多可选择 8 个模拟转换通道的排序器 (SEQ1 和 SEQ2) 可以独立工作在双排序器模式，或者级联之后工作在一个最多可选择 16 个模拟转换通道的排序器模式。

可单独访问 16 个结果寄存器 (RESULT0-RESULT15) 用来存储转换结果。

在给定的排序方式下, 4 个排序控制器(CHSEL SEQ<sub>n</sub>)决定了模拟通道的排序通道转换的顺序。

经过滤波器滤波后的电压信号送入后继的 A/D 转换电路进行 A/D 转换。因为磁力轴承系统的控制精度与采用的 A/D 转换器的位数有关, 位数越高, 系统的控制精度就越高。在实际的 A/D 转换中, 一般不采用 DSP 内部自带的 A/D 模块, 而采用外扩的 A/D 转换电路。同时考虑到高速度与低成本的问题, 可以采用 12 位的 A/D 转换器, 例如 MAXIM 公司的 MAX115 或者 MAX125 均可。其中 MAX115 是 12 位、2 × 4 通道的高速 A/D 转换器, 它具有高速的并行接口, 可以与 DSP 直接相连。内部具有同步采样/保持电路, 单通道的转换时间位 2 μs, A/D 通道的电压输入范围为 -5~5V。A/D 转换器的片选信号以及转换的启动信号由 DSP 的地址线经过 GAL16V8 译码实现。它内部有四个转换通道, 可以按差动方式或者共模方式来转换。四个通道的工作模式可通过数据总线写入适当的编码来选择。工作频率为 16MHz, 可以接单独的有源晶振, 或者通过 DSP 分频实现。

传感器将磁力轴承的五自由度位移信号转换成电信号, 由 A/D 采样到 DSP, 经过 PID 运算后, 输出到功率放大器, 产生相应的控制电流, 驱动电磁线圈。而把 DSP 控制器的数字控制量转换成功率放大器的连续电流指令, 必须经过 D/A 转换电路将数字信号转换为模拟信号。

从精度和成本角度考虑, D/A 转换芯片一般采用 12 位的 D/A 转换芯片。例如 MAXIM 公司生产的 Mx7545, 是并行加载的 12 位精度的 DAC 芯片, 只需要提供片选信号 CS 以及写入有效信号 WR, 即可以完成对 Mx7545 的数据写入操作。D/A 按工作原理分类主要有倒 T 型网络 D/A 转换器和权电流型 D/A 转换器。Mx7545 属于倒 T 网络型 D/A 转换器。

在实际应用中, D/A 转换器输入的数字量有正也有负。这就要求 D/A 转换电路能将不同极性的数字量对应转换为正、负模拟电压, 工作于双极性方式。双极性 D/A 转换常用的编码有: 偏移二进制码、2 的补码及符号—数值码 (符号位加数值码)。偏移二进制码与无符号二进制码形式相同, 它实际上是将二进制码对应的模拟量的零值偏移至 800H (对十二位二进制码而言), 使偏移后的数中, 大于 2048 的才是正数, 小于 2048 的为负数。所以, 若将单极性 12 位 D/A 转换电路的输出电压减去  $V_{ref}/2$ , 就可得到极性正确的偏移二进制码输出电压。

对于磁力轴承而言, 要求的是差动输入方式, 一边电流为偏置电流  $i_0$  加上控制电流  $i_x$ , 另一边是偏置电流  $i_0$  减去控制电流  $i_x$ 。为此, 相应的功率放大器输

入电压采用差动输入即可满足输出电流的差动。因此，采用 Mx7545 D/A 转换器时，该芯片的连接如图 5-9 所示。为了防止模拟电路与数字电路、强电与弱电之间的相互干扰，DSP 的输出数据经过光电隔离后再进行相应的连接。光电隔离芯片可以采用美国德州仪器公司生产的 6N137，该器件隔离效果好，速度快，共模抑制比高。DSP 的低 12 位数据与 Mx7545 的 12 位数据总线连接。其中，由于输入的是 12 位的二进制补码，故采用硬件方式将其转换为二进制偏移码，也就是把第 12 位数据经过反相器后再与 Mx7545 相连接。可导出  $V_{out}$  的表达式为

$$V_{out} = -\frac{N_B + 2048}{4096} V_{ref} \quad (5-4)$$

其中  $N_B$  为来自 DSP 的 12 位二进制补码。 $V_{ref}$  为 -5V 的参考电压。

在  $V_{out}$  的后继电路中，接上电压跟随器（要求输入阻抗高，输出阻抗低），输出即为所要求的第一路输出  $V_{out1}$ ，同时  $V_{out}$  接另一集成运放的反相端，根据基尔霍夫定律可得

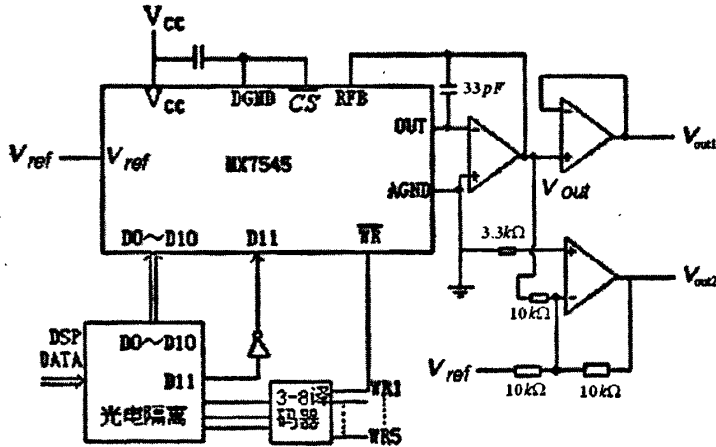


图 5-9 Mx7545 连接图

$$\frac{V_{ref}}{10k\Omega} + \frac{V_{out2}}{10k\Omega} + \frac{V_{out}}{10k\Omega} = 0$$

因此

$$\begin{cases} V_{out1} = V_{out} & (5-5a) \\ V_{out2} = -V_{ref} - V_{out1} & (5-5b) \end{cases}$$

综合前面的各表达式，可得图 5-9 所示的 D/A 转换电路在各种数字量输入情况下的输入输出。显然，能够实现差动激励的功能，其偏置电压为  $-V_{ref}/2$ 。当 D/A 转换电路的输出数字控制量为 0 时，D/A 输出均为  $-V_{ref}/2$ ，此时对应

偏置电流。

### 5.4 几何误差分离系统的实现

误差分离技术要求对主轴的外圆轮廓严格定点采样。实现定点采样主要有两类办法:一是在主轴恒速时等时间间隔采样,可以通过以主轴转速频率乘每转采样点数的值作为采样频率进行数据采集来实现;二是等旋转角度间隔

采样,可以通过在主轴上安装旋转编码器实现,也可以在主轴上作采样点标记,通过反射式光电头读取标记产生脉冲信号实现。等时间间隔不需额外硬件,实现简单,但是要求主轴稳定恒转速工作,具有一定制约性。为了实现变速严格定点采样,考虑到在动平衡要求较高的高速主轴上额外安装旋转编码器易产生较大的动不平衡量,而且不便于在线工况的测量,我们可以通过在主轴外圆上作采样点标记,用光电头读取标记,产生时钟信号,输入到数据采集卡的外部采样时钟端口来控制数据的采集,从而解决严格定点数据采集的问题。标记纸带是一条在上面等间距帖有反光白纸条的黑色卡纸,把标一记纸带贴到主轴上即可。

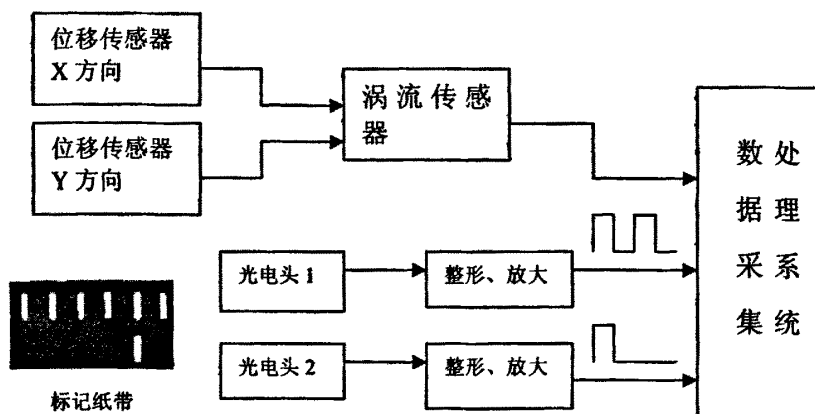


图 5-10 信号采集原理图

测试系统硬件原理图如图所示。测量开始时,首先由光电传感器 2 读取采样点标一记带的起始标记点,触发数据采集卡开始执行数据采集。接着,光电传感器 1 连续读取采样点标一记带的采样点标记,输出采样时钟信号控制数据采集



卡采集电涡流传感器的微位移数据，从而实现主轴外轮廓的定点数据采集。

磁力轴承误差动态误差分离系统的主要工作部分有三个:传感器数据采集系统,是数据采集的控制,分离技术要求主轴工作时在主轴外圆轮廓上严格定点采集数据,既不能漏采,也不能多采,否则将会使得各周期采样数据不相等,使数据产生偏移,划分周期时产生错乱,这样应用几何误差分离技术计算几何误差和运动误差将会产生较大偏差。本系统中,使用光电头读取标记纸带产生的信号经整形后作为采样时钟来控制采集卡进行数据的采集,从而保证严格定点采样。数据采集的控制是一个关键的功能,必须正确地设置外部采样时钟源,才能保证系统按误差分离算法的要求正确采集到所需的数据,才能保证误差分离结果的正确性。另外,软件还提供“对齐原点”采集的

可选功能,当选中该选项后,采集卡将在接收到标记纸带上的原点信号后触发数据采集的开始,从而保证了每次数据采集从标记的原点开始,亦即保证了每次采集数据信号的相位相同。

对主轴几何误差的分离测量,第一阶段完成数据采集后,即可计算得到主轴的圆度误差,接着进入第二阶段数据采集。第二阶段每当采集够用户指定转数的数据后即可计算得到一组主轴的回转运动误差,如此不断重复,即实现了主轴运动精度的动态测试。信号计算分离部分,包括数据的处理、分析,包括传感器电压数据转换成位移数据的计算、误差分离计算、主轴圆度误差评定计算和主轴回转误差评定计算。控制输出部分等;我们设计的软件系统程序流程如图

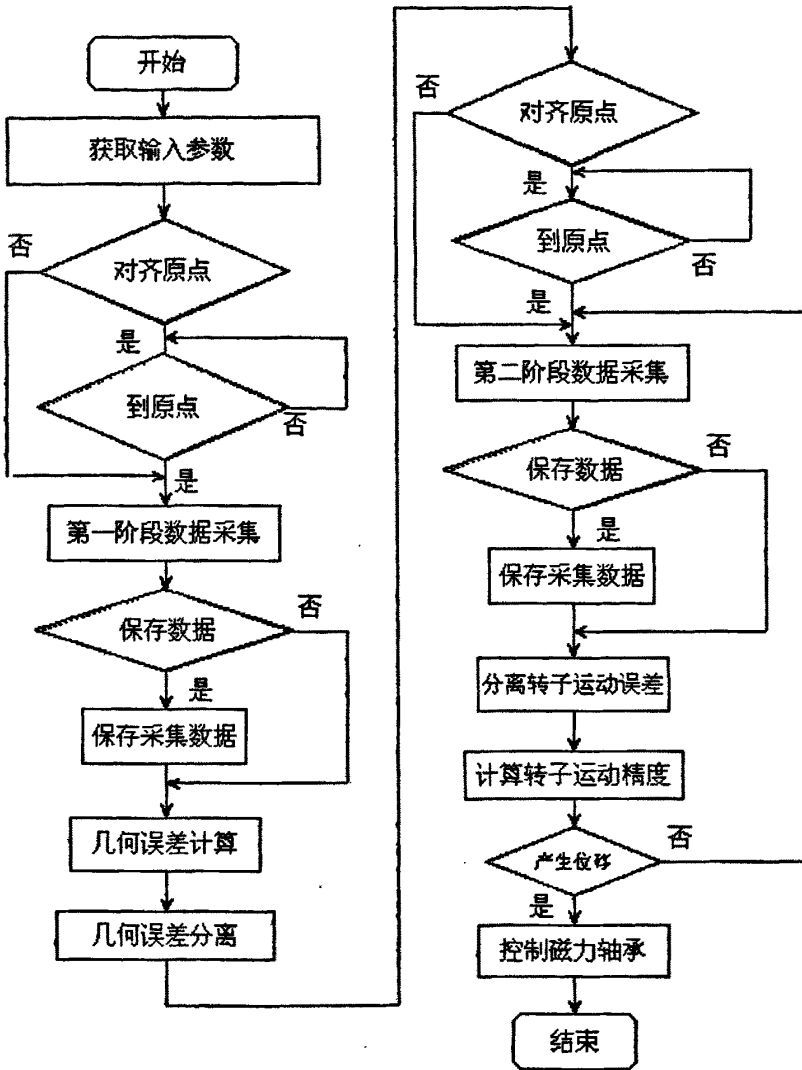


图 5-11 误差分离原理图

### 本章小结

对几何误差分离和补偿的原理，进行了具体的分析，并对于误差分离中涉及的理论方法，硬件设计都做了相关的补充。并对理论和操作流程进行了探讨和分析。

## 结论

超精密磁力轴承的控制技术是磁悬浮技术的关键技术之一。几何误差随着控制精度的提高和转子的速度的提高已经变成其运动精度的主要因素之一。主轴运动精度是评价磁悬浮转子动态性能的一项重要指标。现代高速超精密磁力轴承的运动精度已经进入到亚微米甚至纳米级别。主轴的高速高运动精度特性一方面给传统方法的主轴运动精度动态测试带来了困难，另一方面却又使得我们可以利用这些新特性改进和研究新的动态测试理论和转子的控制规律。

本文对磁力轴承的几何误差分离技术进行了深入的理论研究，提出了一种能准确、有效地分离主轴的形状误差及其运动误差的分离技术，建立了对磁力轴承转子几何误差分离技术的理论，给出了具体测量方法和系统的相关问题。本文针对磁力轴承和气磁轴承的普遍适用的方法。本文介绍的方法，测量系统安装方便，不需精密的装夹工具，测量方法简单、灵活。能够实现主轴的几何误差在线动态测量和动态的分离。

以往的磁力轴承都是忽略了几何误差对位移信号的影响。因此用这些涡流传感器测得的主轴运动并不能真正反映真实主轴轴心回转运动，有些算法计得的只是很多转数据的平均主轴回转运动轨迹。因此必需对几何误差进行分离，才能还原主轴的真正的回转轴心运动。才能为主轴的运动控制起到真正的参考和反馈作用。研究表明：几何误差分离技术系统中很好地分离得到精确的主轴圆度误差数值。日后为提高采集精度及抗干扰能力，并对硬件系统进行精确的标定；将几何误差分离算法写入嵌入式系统芯片，开发几何误差动态测试系统；完成高精度的主轴几何误差动态分离程序。这些工作有待老师和同学们在今后的研究中完成。

## 参 考 文 献

- [1] 李济顺, 张洛平, 洪迈生. 误差分离统一理论—时域频域分离一致性. 计量学报, 2002年7月, 第23卷第3期
- [2] 陈永当, 李少康. 圆度测量误差分离方法. 西安工业学院学报, 2000年12月, 第20卷第4期
- [3] 张宇华, 王晓琳, 张国雄, 李真. 测头读数及定位误差对三点法圆度测量精度的影响. 中国机械工程师, 1995年5月, 第10卷第五期
- [4] 于铁民, 李振华. 测量圆度误差数学建模与实践. 吉林建筑工程学院学报, 2006年9月, 测量圆度误差数学建模与实践第23卷第3期
- [5] 青木保雄, 大园成夫. 3点法圆度测定法の一展开. 精密机械, 1966, 32(12):831~836
- [6] 魏源迁, 庞学慧, 白恩远. 三点法误差分离技术理论分析. 计量学报, 1991, 12(3):199~205
- [7] 李庆华, 母德强, 李振华. 三点法轴径圆度误差精度分析. 长春大学学报, 2003年12月13卷第6期
- [8] 韩正桐, 洪迈生, 李自军. 三点法圆度误差分离及演化形式与精度分析. 上海交通大学学报, 2002年9月, 第36卷第9期
- [9] 吴琦, 刘红斌, 胡德金. 基于误差分离技术的圆度误差在位测量. 中国机械工程, 第17卷增刊2006年8月
- [10] 雷贤卿, 李言, 李济顺, 周彦伟, 潘为民. 多步法圆度误差分离的演化形式及其谐波抑制分析. 工业仪表与自动化装置, 2006年第1期
- [11] 洪迈生, 蔡萍. 多步法误差分离技术的比较分析. 上海交通大学学报, 2004年6月, 第38卷第6期
- [12] 张国雄, 李真. 多点法圆度及轴系误差分离方法的若干问题. 北京理工大学学报, 1999年6月, 第19卷第3期
- [13] 魏元雷, 洪迈生, 苏恒, 李自军. 平行三点法圆度误差分离技术的精度分析. 机械科学与技术, 2003年第1期1月, 第22卷
- [14] 洪迈生, 邓宗焯, 陈健强, 大园成夫. 精确的时域三点法圆度误差分离技术. 上海交通大学学报, 2000年10月, 第34卷第10期
- [15] 韩正桐, 洪迈生. 圆度误差分离三法及其演化式精度分析. 机械设计与制造, 2002年4月

- [16] 刘占生, 迟鼎南, 李锋, 赵广. 电磁轴承转子表面圆度误差对系统的影响. 机械科学与技术, 第 24 卷第 9 期 2005 年 9 月
- [17] 康牧. 一种测试圆度的新算法. 河南师范大学学报, 2005 年 2 月
- [18] 徐可伟, 朱训生, 陈正昕. 几种常用圆度误差分离方法的分析及比较. 计量技术, 2000 年
- [19] 洪迈生, 魏元雷, 苏恒基. 于主轴回转运动误差在线检测的二次相移三点法. 光学精密工程, 2001 年 8 月, 第 9 卷第 4 期
- [20] 王晓光, 胡业发, 江征风, 周祖德. 小轴向尺寸磁悬浮转子系统机械耦合的研究. 中国机械工程第 14 卷第 10 期 2003 年 5 月下半月
- [21] 赵永成, 郭丽平. 无轴承电机转子位移测量系统中电涡流传感器的安装. 机械制造与自动化, :2006-09-29
- [22] 顾金凤, 唐炜. 高精度电涡流测微系统的研究. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2006 年 02 月, 第 20 卷第 1 期
- [23] 蔡财华. 磁悬浮转子系统中电涡流传感器工作特性的研究. 武汉理工大学硕士论文, 2006, 5
- [24] 王海. 磁悬浮硬盘转子动态位移涡流检测系统研究, . 武汉理工大学硕士论文, 2004
- [25] 陈维. 基于同步采样的磁力轴承位移检测系统的研究 武汉理工大学硕士论文, 2007 年 4 月
- [26] 许桢英, 王匀, 费业泰. 位移传感器动态测量系统的误差建模研究. 工具技术, 2006 年 2 月
- [27] 张庆春, 姜军, 李国栋, 梁迎春. 降低电磁轴承系统中位置测量误差方法轴承 2005 年第 9 期
- [28] 王玉景. 基于图像的车削表面粗糙度测量. 哈尔滨理工大学硕士论文, 2007, 3
- [29] 石米娜. 基于分形几何的轴类零件表面粗糙度检测. 吉林理工大学硕士论文, 2007, 5
- [30] 王天煜. 回转类零件形位误差的非接触精密测量系统研究. 辽宁工程技术大学硕士毕业论文, 2005 年 1 月
- [31] 谢振宇, 丘大谋, 虞烈, 谢友柏. 电磁轴承系统回转精度影响因素的分析. 中国机械工程第 11 卷第 8 期 2000 年 8 月
- [32] 李树森, 孟庆鑫, 马兰兰. 气磁轴承主轴系统误差补偿技术的研究. 林业机械与木工设备, 2005 年, 第 12 期第 33 卷
- [33] 洪迈生, 邓宗煌. 三点法误差分离技术中的两个基本问题. 计量技术, 1994 第 1 期
- [34] 万德安, 刘海江. 高精度测量回转运动误差的新方法[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 1999, 27(3): 328~332

- [35] 雷贤卿,李言,周彦伟. 3点法圆度误差分离技术的新算法. 兵工学报,第28卷第1期  
2007年1月
- [36] 何钦象,张华容,杨静. 高速电磁主轴回转精度的分析. 机械科学与技术,第18卷第  
4期1999年7月. 电磁轴承转子
- [37] 胡如夫. 圆度测量中的分离方法. 宁波高等专科学校学报. 1995年6月,第2卷第1  
期
- [38] 唐文彦,袁怡宝,强锡富. 用FFT和IFFT计算圆度误差. 哈尔滨工业大学学报,1994  
年4月,第26卷第2期
- [39] 雷贤卿,李言,周彦伟,李济顺,杨丙乾,崔凤奎. 截面最小二乘圆心偏心误差运动的分  
离方法. 农业机械学报,2006年10月第37卷第10期
- [40] 雷贤卿,李言等. 一种圆柱度测量基准的误差分离方法. 中国机械工程,第17卷第20  
期2006年10月
- [41] 田湍,刘国良,朱训生. 基于误差分离技术的几种圆柱度测量模型分析. 机械设计与  
制造,2003年8月,第4期
- [42] 洪迈生,李自军,李济顺,苏恒,魏元雷. 圆柱度表面形貌重构基准的提纯. 上海交通大  
学学报,第36卷第8期2002年8月
- [43] 胡业发,周祖德,江征风. 磁力轴承的基础理论与应用. 机械工业出版社
- [44] 文湘隆,胡业发,陈龙. 一种轴向磁力轴承定子结构参数的确定方法. 轴承2005年第7  
期
- [45] 胡业发,郭顺生,余先涛,杨明忠. 数控磁悬浮智能转子系统的研究,武汉汽车工业大  
学学报,第22卷第3期2000年6月
- [46] 马兰兰,李树森,苏健民. 气磁轴承混合轴系的一种误差补偿方法. 林业机械与木工设  
备,2006年6期
- [47] 李树森,孟庆鑫,刘永良. 超精气磁轴承主轴系统的结构设计与控制. 机械工程师2005  
年第10期
- [48] 胡业发,郭顺生,盛步云,杨明忠. 磁力轴承系统的虚拟设计. 中国机械工程第11卷第  
9期2000年9月
- [12] 刘晓军,刘小英,胡业发,柴苍修. 磁悬浮轴承系统的试验研究. 华中科技大学学报第  
35卷第1期
- [49] 胡业发,高小明,吴华春. 磁悬浮转子不平衡补偿的研究. 机械制造44卷504期
- [50] 雷贤卿,李言,周彦伟,李济顺,崔凤奎. 圆柱表面重构基准的曲线拟合提纯法. 机电  
产品开发与创新,2006年3月,第19卷第2期
- [51] 王世刚,林景凡,顾晓华,王中双. 圆度误差的动态测量及误差分离技术. 齐齐哈尔大

- 学学报, 2001年9月, 第17卷第3期
- [52] 王少衡. 高速高精主轴回转误差在线动态测试技术研究. 广东工业大学硕士论文, 2006, 5
- [53] 吴华春, 胡业发等. 柔性磁悬浮转子动态特性的研究[J]. 机械工程与自动化, 2005年10月第5期(总第132期)
- [54] 唐钟麟, 冯志华, 黄晓蔚. 电磁轴承柔性转子系统分析方法[J]. 机械工程学报, 1999年4月第35卷第2期
- [55] 首群, 韩琳, 卢华阳. 电磁轴承柔性转子系统动态响应分析[J]. 机械科学与技术, 2007年第26卷2月第2期
- [56] 赵永成, 郭丽平. 无轴承电机转子位移测量系统中电涡流传感器的安装[J]. 机械制造与自动化, 2007期, 36(2):124~125, 12
- [57] 闻邦椿, 顾家柳, 夏松波, 王正. 高等转子动力学——理论、技术及应用[M]. 机械工业出版社, 1998年8月
- [58] Gao W, S. Kiyono. On-machine Profile measurement of machined surface using the combined three-point method. JSME Int. J C, 1997
- [59] Evans C. J., Hoeken R. J., Estler W. T. Self-Calibration: Reversal, Redundancy, Error Separation, and Absolute Testing. CIRP Ann. 45(2) P617-634
- [60] Zhg G X, Wang R K. F-point Method of Roundness and Spindle Error Measurements. Annals of CIRP, 1993, 42(1):593~596
- [61] Horikawa O, Maruyama N, Shimada M. A low cost, high accuracy roundness measuring system. Precision Engineering, 2001, 25(3):200~205
- [62] Erie Marsh, Jeremiah Couey, Ryan Vallanee. Nanometer-Level Comparison of Three Spindle Error Motion Separation Techniques. Transactions of the ASME. February 2006, P180-187
- [63] Mitsui K. Development of new measuring method for spindle rotation accuracy by three points. Proceedings of 23-rd International MTDR, 1982:115~121.
- [64] Aoki Y, Ozono S. On a new method of roundness measurement based on the three-point method [J]. J JSPE, 1966, 12: 27-32

## 致谢

本文的选题、试验研究和撰写工作是在导师胡业发教授的精心指导下完成的。导师高深的学术造诣、严谨的治学态度、活跃的思维方式使学生领略到科学的深奥和求学的乐趣，他由浅入深、细致生动的讲解令人如沐春风。两年多的求学生活中，从入学手续办理到就业指导，胡老师始终给予了学生无微不至的关怀。值此论文完成之际，谨向尊敬的导师胡业发教授表示崇高的敬意和由衷的感谢！在课题研究过程中，王晓光、文湘隆老师给予了大力的支持，两位老师丰富的实践经验使本文的试验得以顺利进行。在论文的撰写过程中，胡教授给予了细致的指导，并提出了许多中肯的建议。在此，一并向他们表示衷心的感谢！

再次感谢所有关心、帮助过作者的老师和朋友！



## 攻读学位期间发表的学术论文

- 1 刘伟,文湘隆,胡业发.基于 ANSYS/rotordynamics 磁悬浮柔性转子运动特性的研究[J], 机械制造(录用).