

文章编号 :1001 - 2486(2005)03 - 0058 - 04

## 基于调制/解调的动态响应测试方法\*

樊树江,吴峻,李璐,常文森

(国防科技大学 机电工程与自动化学院,湖南长沙 410073)

**摘要** 在磁悬浮列车中,悬浮控制系统要求间隙传感器的动态特性,但无法用机械方法测试较高频率时的动态特性。根据传感器工作机制,用模拟涡流场来代替被测导体的涡流效应,提出基于调制/解调原理的动态特性测试方法,并分别对正弦信号和方波信号的测试方法进行了探讨。最后给出了两种特征信号的传感器动态特性测试结果。实验表明,这种方法能够满足测试要求,相对于机械方法有很大的优越性。

**关键词** 电涡流传感器;调制/解调;动态特性;测试方法

中图分类号:TM938.82 文献标识码:A

## The Measurement Method of Dynamic Response Based on Modem

FAN Shu-jiang, WU Jun, LI Lu, CHANG Wen-sen

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

**Abstract** The dynamic characteristics of the gap sensor necessary for suspensive control system in maglev vehicle, are difficult to measure at high frequency by mechanical methods. The eddy current effect of the measured conductor is replaced by the simulative eddy current field. The measurement method of dynamic response based on modem is presented and discussed with sinusoidal signal and impulse adopted. The result of relevant experiments is given. Compared with the mechanical methods, the proposed method is proved to be more effective.

**Key words** eddy current sensor; modem; dynamic characteristics; measurement method

电涡流传感器的检测线圈发射高频电磁波,高频电磁波在被测导体中产生涡流,涡流磁场在检测线圈中产生感应电压,从而改变检测线圈两端的交流电压峰值。涡流的大小与被测导体电阻率、磁导率、线圈与被测导体间隙、激励频率有关,当间隙变化而其它参数不变时,检测线圈的交流电压峰值反映了该间隙变化。电涡流间隙传感器能够在多尘、潮湿的环境中工作,动态响应快,用于为磁悬浮列车悬浮控制系统提供间隙信号。

控制系统对传感器的静态特性和动态特性均有要求,设计控制系统时,需要明确传感器的静态特性和动态响应特性,知道传感器的传递函数。传感器的静态特性用标定方法就可得到,其动态响应特性较难得到,主要方法有:利用机械转台或振动台,针对不同的振动频率或转速,计算出每个频率点的幅值和相位,绘制出传感器的幅频和相频曲线,得到传感器在机械振动频率或转速范围内的动态特性;给传感器施加不同频率的电激励信号,记录传感器的输出,得到频率响应曲线。前一种方法只能得到几十赫兹范围内的动态特性,而对控制系统需要的数百至上千赫兹的频率特性则很难测出。后一种方法克服了较高频率的测试问题,但需要考虑合适的施加环节和施加方式。

### 1 传感器间隙信号产生机制

电涡流传感器电路分为两个部分:包含检测线圈的模拟电路部分和信号后期处理的数字电路部分。

\* 收稿日期:2004-12-20  
基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(03JJY3108)  
作者简介:樊树江(1975—),男,博士生。

模拟电路主要包括检测线圈、振荡及射极跟随电路、检波电路。数字电路部分主要为 A/D 采样电路、DSP 处理器、D/A 模拟输出或 CAN 总线数据输出, DSP 处理器加载线性化扩展等处理算法。在 A/D 采样输入端直接加载不同测试频率的正弦或阶跃信号,通过对输出数据的分析可以得到数字部分的动态特性。但模拟电路部分不能直接加载测试信号。

传感器振荡器产生的振荡信号为高频等幅正弦信号,其作为激励信号通过检测线圈发射高频电磁波,从而在被测导体中产生涡流,涡流场反作用于检测线圈,产生的感应电压与激励电压叠加在检测线圈上。检测线圈与被测导体之间的间隙保持不变时,输出的交流信号为等幅的,在其它电参数不变时,该信号的峰值反映了两者的间隙;当间隙变化时,振荡输出幅值跟着变化,经峰峰检波和滤波后就得到与间隙成比例关系的输出电压。以低频正弦振荡方式改变间隙,振荡输出就相当于在高频信号基础上叠加了低频正弦信号,即输出为调制度小于 1 的调幅波,这是调制过程,峰峰检波器输出为叠加的低频正弦信号,这是解调过程。由此可见,电涡流传感器检测间隙变化的实质是在高频载波基础上的信号调制和解调。间隙引起的感应电压为调制信号,而振荡源产生的高频恒幅信号则为载波。

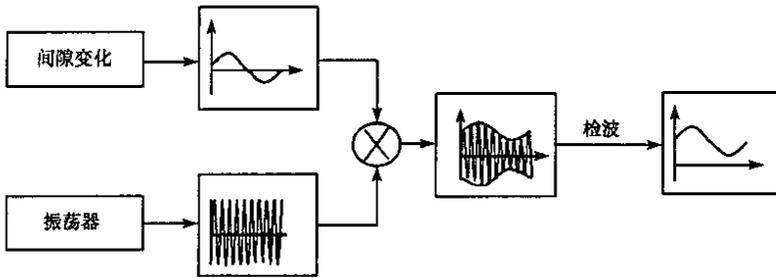


图 1 间隙传感器信号流程

Fig.1 Signal process of the gap sensor

由图 1 所示,间隙变化导致检波后的电压变化,振荡器产生的高频振荡信号是作为载波出现的,这说明间隙信号传递的本质是一个调制解调过程。测试传感器动态特性的根本目的是找到传感器动态条件下的输入输出关系。间隙变化改变被测导体中的涡流大小,检测线圈的感应电压也跟着间隙变化,检测线圈与被测导体之间是电磁耦合关系,产生的涡流磁场和信号激励电磁场也是电磁耦合关系,没有直接的电气连接,在传感器的线圈上施加低频电测量信号比较困难,只有将测试低频信号通过电磁耦合感应到检测线圈上,才能与真实的情况相符。控制系统要求得到 0~1.6kHz 的特性,在该频率范围内的测试信号是不可能发射电磁波的,也不可能直接进行电磁耦合。涡流场是与传感器激励信号同频率的电磁场,当间隙变化时,涡流场的振幅随间隙变化。若能找到模拟该涡流场的方法,在检测线圈中产生感应电压就能够克服测试信号的局限性。这样,改变附加于模拟涡流场上的振幅变化频率,传感器输出的幅值和相位随之变化。该涡流场可以由高频调幅波模拟,载波频率与传感器的激励频率相同,调制信号频率动态响应测试频率。

## 2 基于调制/解调的动态特性测试

### 2.1 调制/解调原理<sup>[2]</sup>

根据调制方式,调制波可分为调幅波、调频波和调相波。电涡流传感器的模拟涡流场是由调幅波产生的。调幅波的载波是幅值和频率不变的余弦波,载波表示为

$$v_c(t) = A \cos(\omega t + \phi_0)$$

其中,  $A$  为载波振幅,  $\omega$  为载波角频率,  $\phi_0$  为载波初相。

测试调制信号也为单一频率的余弦波,表示为

$$v_m(t) = A_m \cos pt$$

其中,  $A_m$  为调制信号振幅,  $p$  为信号角频率。

经过调制后的调幅波为

$$v_{AM}(t) = A(1 + k \cos pt) \cos(\omega t + \phi_0) \tag{1}$$

其中,  $k$  为调制度,  $k = A_m/A$ , 正常调制时  $0 < k \leq 1$ 。

当采用二极管电路进行信号调制或解调时, 二极管输出电流与加载电压关系为

$$i_0 = I_0 + a_1 v_i + a_2 v_i^2$$

将(1)式代入得

$$i_0 = I_0 + a_1 A(1 + k \cos pt) \cos \omega t + a_2 A^2(1 + k \cos pt)^2 \cos^2 \omega t \tag{2}$$

其中, 第三项为平方项, 表示为  $i_0(2)$ , 展开为

$$i_0(2) = a_2 A^2 \left\{ \left[ \left( \frac{1}{2} + \frac{k^2}{4} \right) + k \cos pt + \frac{k^2}{4} \cos^2 pt \right] + \left[ \left( \frac{1}{2} + \frac{k^2}{4} \right) + k \cos pt + \frac{k^2}{4} \cos^2 pt \right] \cos 2\omega t \right\} \tag{3}$$

其中,  $a_2 A^2 k \cos pt$  为检波电路的解调信号。

这种调制方式要求调制度  $k < 1$ , 即使 100% 调制, 调幅波包含信号的功率也只是载波功率的 50%, 调制变浅, 功率更小。经过耦合后传感器实际得到的信号幅度非常小, 只有 200mV 左右。采用双边带波调制方式 (BSB) 来抑制载波。采用平衡调制器, 调制输出为

$$i_0 = 2a_1 \cos pt + 4a_2 A A_m \cos pt \cos \omega t \tag{4}$$

平衡调制器去掉了直流和载波频率及二次谐波成分, 提高信号的输出功率, 从而使传感器的检测线圈得到比较大的感应信号。动态特性测试信号调制电路采用平衡调制器。

解调过程与调制过程类似, 只是输入信号为已经调制好的调幅波。传感器二极管检波电路的本质就是非线性解调或平方解调, 通过取出高频调幅波的幅值变化电压, 把调制信号解调出来。

### 2.2 测试方法

传感器动态响应测试框架由两部分组成:

信号调制电路和待测试传感器。信号调制电路产生振幅调制的高频信号, 与传感器检测线圈规格一致的耦合线圈是该调制信号的负载, 调制信号的载波振荡频率与传感器振荡器频率相同。

调整耦合线圈和待测传感器的检测线圈平行抵近放置, 由耦合线圈发射的电磁场作用在检测线圈上, 来模拟检测线圈与被测导体间隙引起的感应电压。测试方法如图 2 所示。

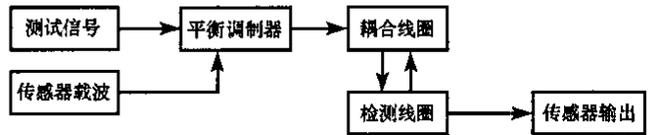


图 2 测试方法框图

Fig.2 Block diagram of measurement method

由耦合线圈发射的电磁场作用在检测线圈上, 来模拟检测线圈与被测导体间隙引起的感应电压。测试方法如图 2 所示。

施加大峰值检测信号时, 传感器检波后信号波形为连续的正弦半波波形。半波的电压峰峰值即为感应电压引起的传感器高频振荡信号振幅变化, 该半波的峰峰值反映了该频率下的传感器幅频特性。检测信号与最终检波电压之间数学关系比较复杂, 但是当两线圈相互位置确定后, 测试出不同频率下的检波电压峰峰值, 作归一化处理, 可以得到传感器的幅频特性。而相频特性的分析相对就麻烦一些, 可以利用两路 A/D 采样电路对测试信号和检波信号进行采样, 采样频率远远大于测试信号频率, 对得到的测试信号和检波信号数据进行处理, 得到传感器的相频特性<sup>[1]</sup>。

采用正弦波激励信号是从频域的角度得到动态特性, 也可从时域的角度考虑问题, 通过改变间隙的方法测试阶跃响应是很困难和不真实的, 因为阶跃信号含有的高频成分远不是机械作用可以产生的。类似模拟涡流场原理, 同样可以采用低频方波信号进行激励, 从而得到传感器的阶跃响应。经分析, 模拟电路部分影响传感器动态特性的主要环节为振荡环节、检波充电回路和放电回路, 可以等效为两个一阶环节串联而成。当分别测出检波回路的充电回路和放电回路的时间常数, 就可以得到传感器动态特性<sup>[3]</sup>。

### 3 动态响应测试实验及分析

根据上述的动态特性测试方法, 对电涡流传感器进行动态特性测试。将低频方波信号作为测试信号, 得到传感器的阶跃响应, 分析曲线即可以获得传感器动态特性。信号调制电路输出通过线圈耦合方式施加到传感器上, 检波输出上升沿为传感器振荡和检波环节充电回路的正阶跃响应, 下降沿主要为检波环节放电回路的负阶跃响应。振荡环节的时间常数也可以根据测试结果进行计算, 把信号调制电路

输出施加到检波环节上,输出上升沿为检波环节充电回路的正阶跃响应,下降沿为检波环节放电回路的负阶跃响应。根据上升沿曲线的参数差异,可以得到振荡环节的一阶模型时间常数。低频方波调制的阶跃响应测试结果如图3,其中,负阶跃响应输入幅值与纵轴刻度电压无关。

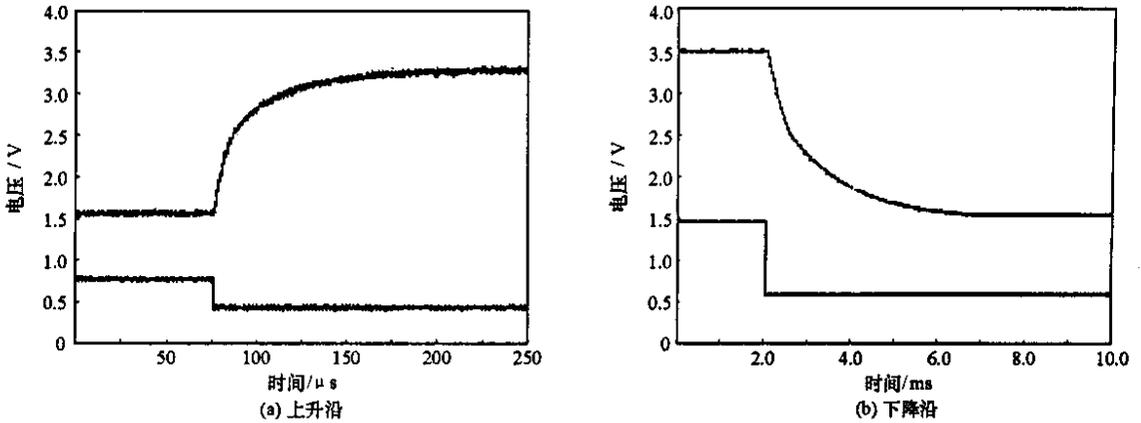


图3 阶跃信号测试

Fig.3 Measurement by step signal

对测量结果进行分析,得到传感器振荡环节和检波充电回路等效的惯性环节时间常数为  $0.022ms$ ,放电回路时间常数为  $0.8ms$ ,推算传感器的带宽频率约为  $1.2kHz$ 。所以检波电路放电回路时间常数过大是影响动态特性的主要原因,通过改变放电回路参数和进行动态校正来改善动态特性。采用正弦信号作为调制信号,来测试动态特性,选取两个频率进行比较,测试结果如图4。对两图的比较分析可以发现,随着测试信号频率的提高,检波输出幅值在减小,做归一化处理认为,当测试频率为  $500Hz$  时的幅值为 1,则测试频率为  $1.6kHz$  时的幅值大于  $1/2$ ,所以带宽频率大于  $1.6kHz$ ,更精确的动态特性需要对采样数据进行处理分析。

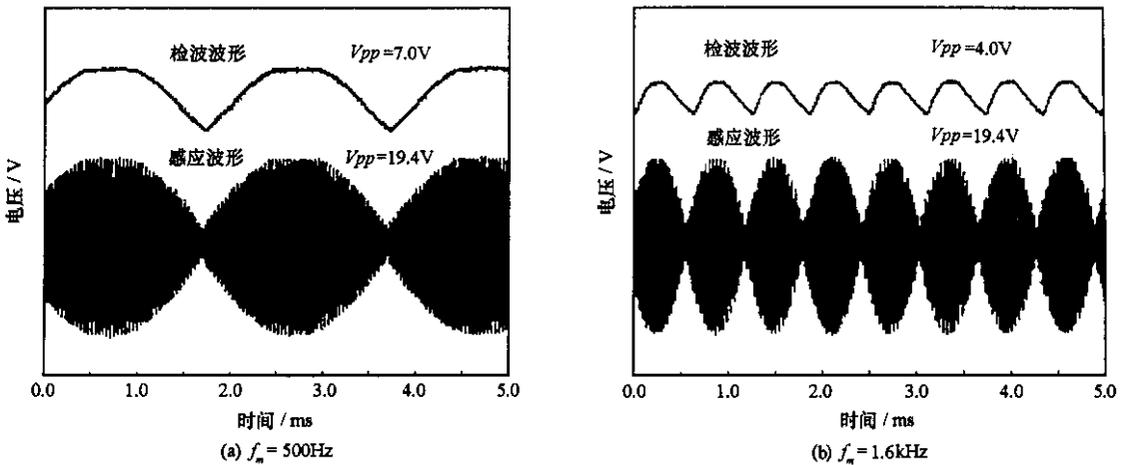


图4 正弦信号测试

Fig.4 Measurement by sinusoidal signal

通过以上分析得知,基于调制/解调的动态特性测试方法可以实现调制频率范围内的传感器动态特性测试,测试频率可以达到几十千赫兹,这一点只是受制于传感器的载波频率。该方法已用于电涡流传感器的检测,对于采样后的传感器数据分析仍需要进一步的研究。

## 参考文献:

- [1] 李慧敏,张滨秋,常贵宁. 加速度传感器频响的自动标定[J]. 传感器技术, 1999, 18(3): 33-35.
- [2] 雨宫好文,小柴典居. 振荡/调制解调电路[M]. 北京:科学出版社,2000.
- [3] 樊树江,李璐,吴峻,等. 新型电涡流传感器的动态响应分析[J]. 传感器技术, 2004, 23(3): 21-23.
- [4] 李瀚荪. 电路分析基础[M]. 北京:高等教育出版社,1994.
- [5] Ogata K. 现代控制工程[M]. 北京:电子工业出版社,2000.

