

# 高压 DC 马达测试原理

高压 DC 马达，本质上还是直流马达，符合直流电机的电势平衡方程和转矩平衡方程。高压 DC 马达的供电电源，是由交流市电，经整流桥的桥式整流后，变成桥式整流的脉动直流电。由于马达内部的 EMC 电路有电阻电容电感，其对桥式整流的脉动电压波形带有一定的滤波作用。

$$L \frac{die}{dt} + R \cdot ie + C_e \Phi n = U$$

$$J \cdot \frac{\pi}{30} \cdot \frac{dn}{dt} = C_M \cdot \Phi \cdot ie - M_z$$

式中： $ie$  —— 电枢电流

$n$  —— 转速

$M_z$  —— 电动机轴上等效负载转矩

$\Phi$  —— 励磁磁通

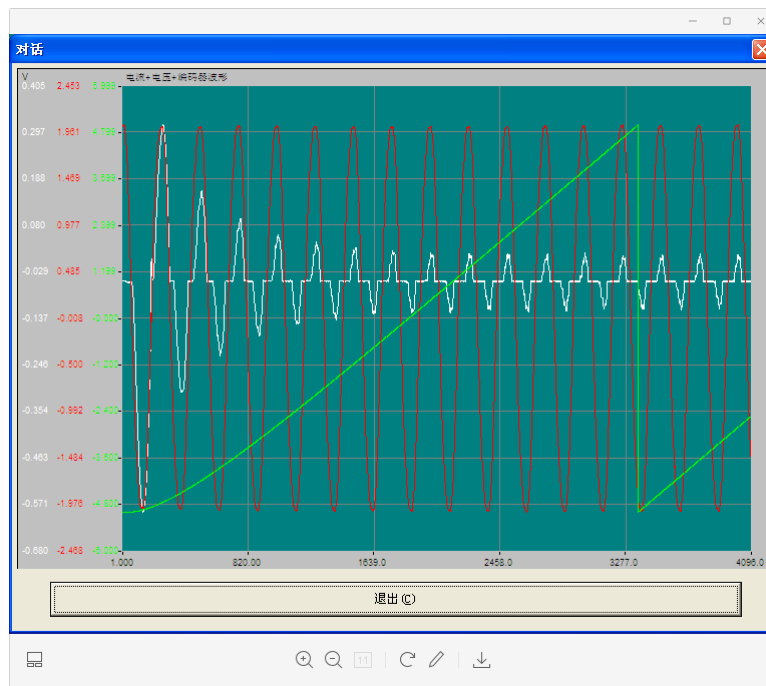
$L$  —— 电枢回路等效电感

$R$  —— 电枢回路等效电阻

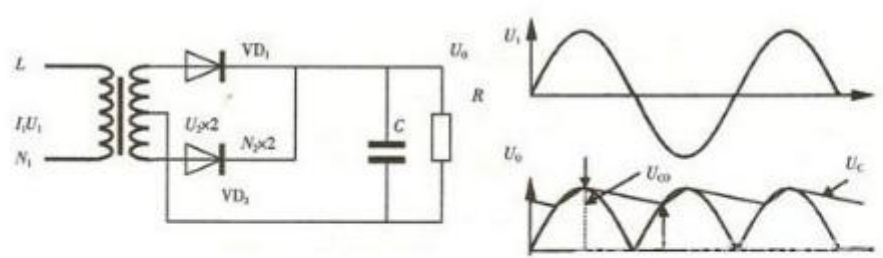
$J$  —— 电动机轴上等效惯性矩

$C_e \cdot C_M$  —— 电动机电势常数和转矩常数

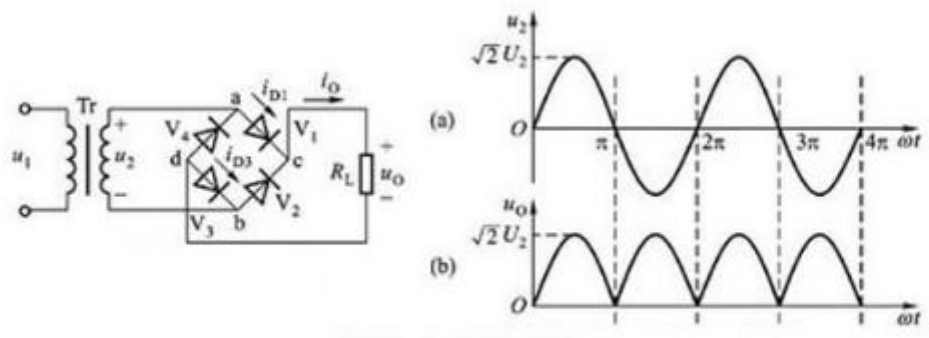
电机启动时，在交流一端的测试波形如下所示：



直流电机具有电压/转速升比的特性，这也是一般的直流电机 PWM 直流调速原理。交流电桥式整流后的电压，可以看成是纯直流供电时，因电机调速的需要，而出现的一种特殊调制波形。由于纯直流的免加载分析技术，是非常成熟的，对纯直流的免加载测试出参数后，再利用电压/转速升比的特性，可以推算出桥式整流后的电压下的免加载特性。再利用交流电的电流时间起动曲线，推算 3 次样条曲线，从而得到交流电的功率因素与电流的关系曲线，再根据能量守恒定律，从而推导出电流、电压、转速、力矩、输入功率、功率因素、输出功率等参数。



## 全波整流



## 桥式整流

# 直流电机免加载原理

基于小波变换和小波包变换的基本原理，利用其在非平稳信号时频分析中独特的优越性，对直流电动机起动过程中的电流信号进行分析，得到电机的转矩-转速特性，从而实现了一种无转矩传感器的直流电机转矩-转速特性曲线的快速测试方法。

直流电机的启动电流波形，包含有换向器的换向信息。

## 直流电机起动过程中电枢电流信号

从直流电机的换向理论知道，由于换向的原因，直流电机的直流电枢电流上会叠加一个高频分量，该分量的频率满足如下关系：

$$f_n = \frac{c \times k \times n \times p}{60}.$$

式中： $k$  为换向片数； $n$  为转速； $p$  为极对数； $c$  为由  $k$  的奇偶决定的系数， $k$  为偶数时， $c=1$ ； $k$  为奇数时， $c=2$ 。

电机转矩与转速满足机械平衡方程式：

$$T_{\text{em}} - T_{\text{L}} - T_0 = \frac{GD_{\text{a}}^2}{375} \frac{dn}{dt}.$$

式中： $T_{\text{em}}$  为电磁转矩； $T_{\text{L}}$  为负载转矩； $T_0$  为空载阻尼转矩； $G$  为机组重量； $D_{\text{a}}$  为旋转直径； $n$  为电机转速。

## 2.2 数据采集

本系统采用 PCL-818 数据采集卡,图 1 为利用该采集卡系统对该永磁直流电动机起动过程中的电枢电流的采集结果.由图可见,在直流分量上叠加了一个高频分量,这个高频分量正是由换向引起的与电机转速成正比的分量.

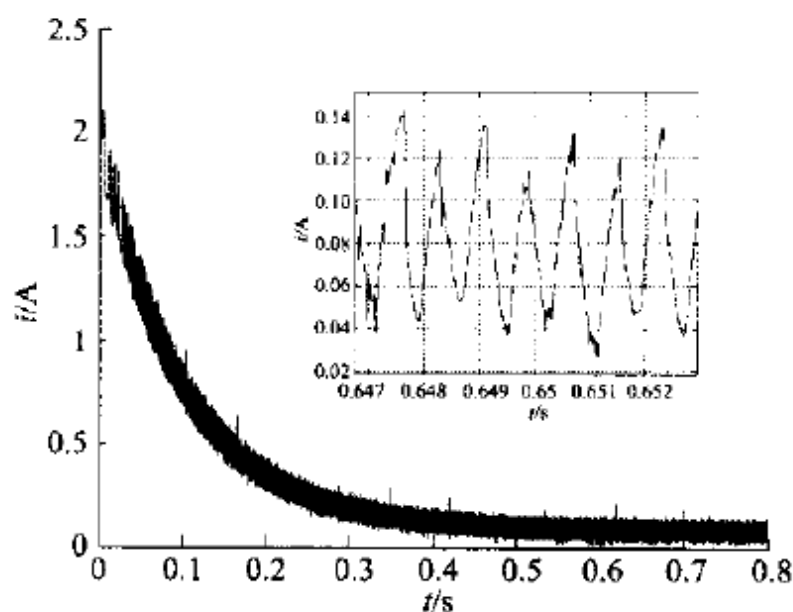


图 1 永磁直流电机起动电枢电流波形

Fig.1 Starting current of DC motor

### 2.3 平滑去噪环节

常规有刷直流电机采用电刷换向,换向时会产生火花等,因而在采集到的电流信号中不可避免地带有高频噪声,这里采用的小波滤波器滤除该噪声分量,采用 db20 小波,这是因为其有较好的分频效果.结果如图 2.

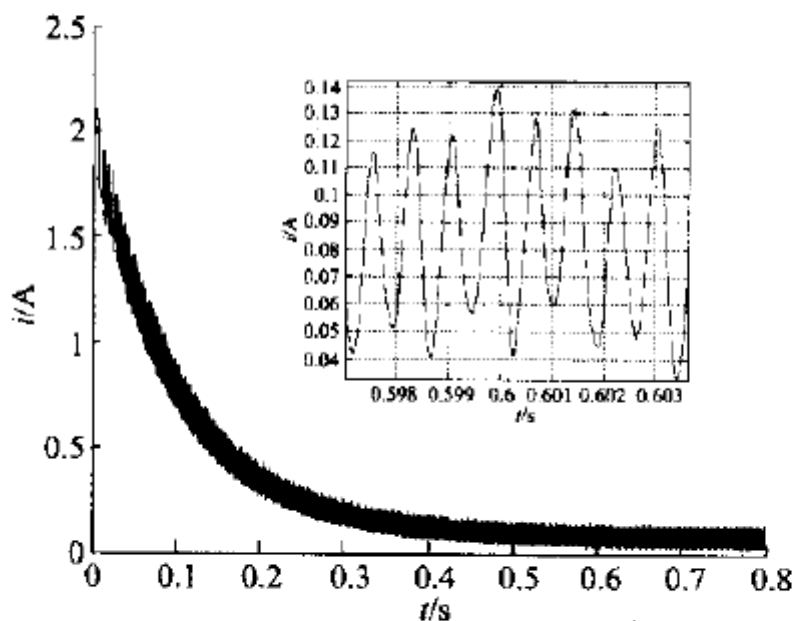


图 2 去掉噪声后的电枢电流波形

Fig. 2 Starting current after de-noising

### 2.4 滤波与重构环节

用小波半带低通滤波器(db20 小波,这里同样为了获得较好的分频效果)继续对去噪以后的信号进行  $N$  次分解,分解次数  $N$  一般为  $7 \sim 10$  次,最后得到的概貌信号可以看作滤除高频分量以后电流的近似平均分量,图 3 即为对图 2 中信号进行分解的结果.

对  $N$  次分解得到的各层小波系数重构,即得

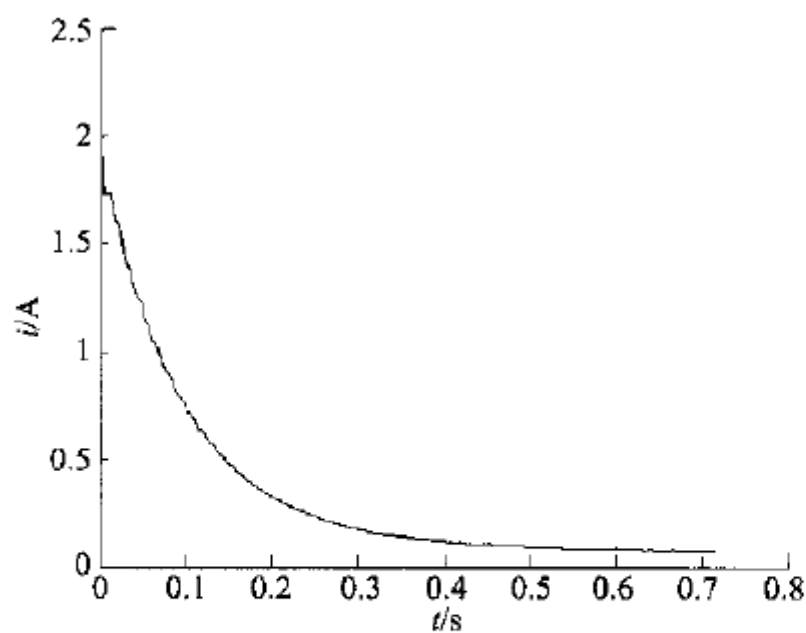


图 3 电枢电流低频分量

Fig. 3 Low-frequency component of the signal

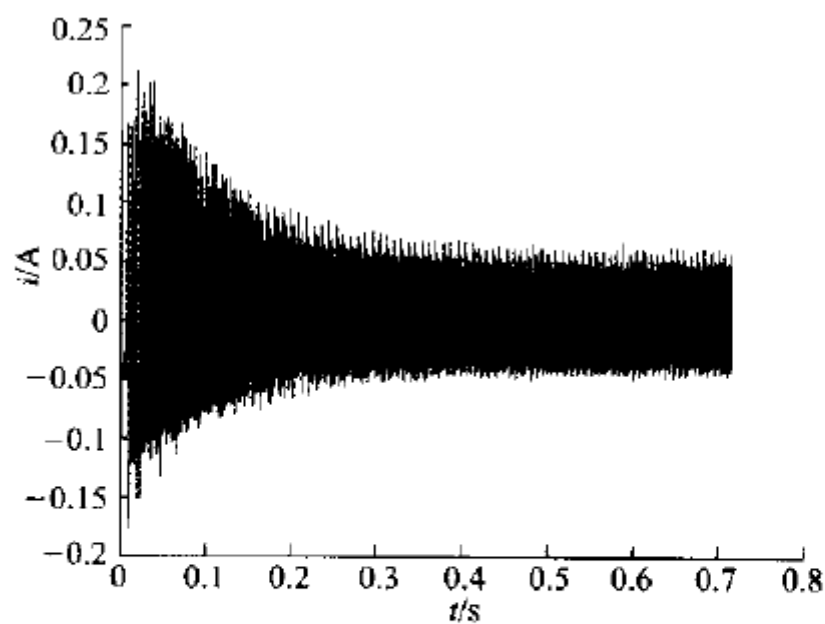


图 4 电枢电流高频分量

Fig. 4 High-frequency component of signal

到电枢电流中的脉动分量,如图 4.

## 2.5 小波包分解程序

使用小波包分解的方法,提取图 4 中高频分量的频率信号.用小波包进行  $N$  层分解,得到  $2^N$  个系数包,每个系数包对应一个频带,而系数包里面的系数则按时间顺序排列,每个系数代表一个时频原子.但是,小波包分解出来后的系数包是按所谓“自然顺序”排列的,所以必须对其重新排序,使其按频率递增顺序排列.

得到按频率排序的系数包后,找出每个系数包的最大系数,该最大值出现的时间就是该中心频率分量表现最强烈的时域点,因此,对应  $2^N$  个系数包,在时域上可以找到  $2^N$  个对应的时域点.根据频域点与时域点的对应关系,可以作出信号时-频分布图.由于信号频率对应电机转速(正比关系),时-频分布图(除以一个系数以后)实质上就是转速-时间曲线.

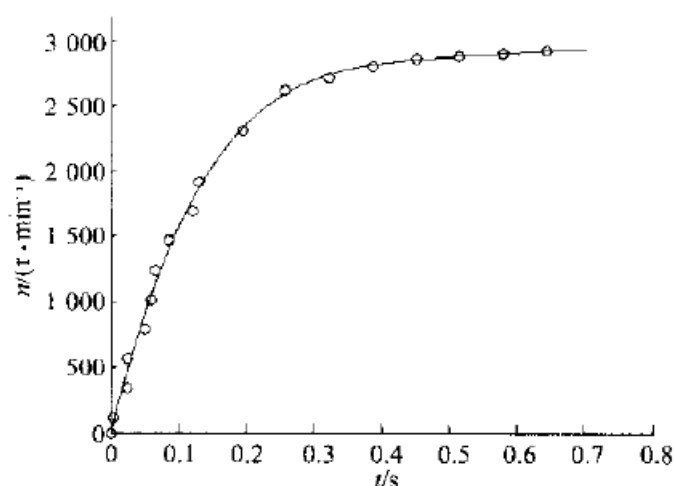


图 5 转速-时间曲线

Fig. 5 Speed-time curve

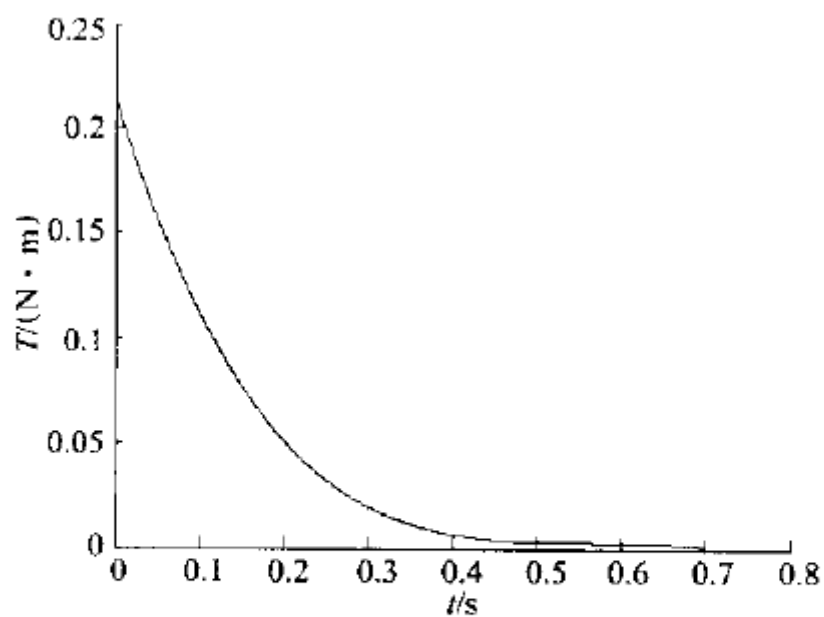


图 6 转矩-时间曲线

Fig. 6 Torque-time curve

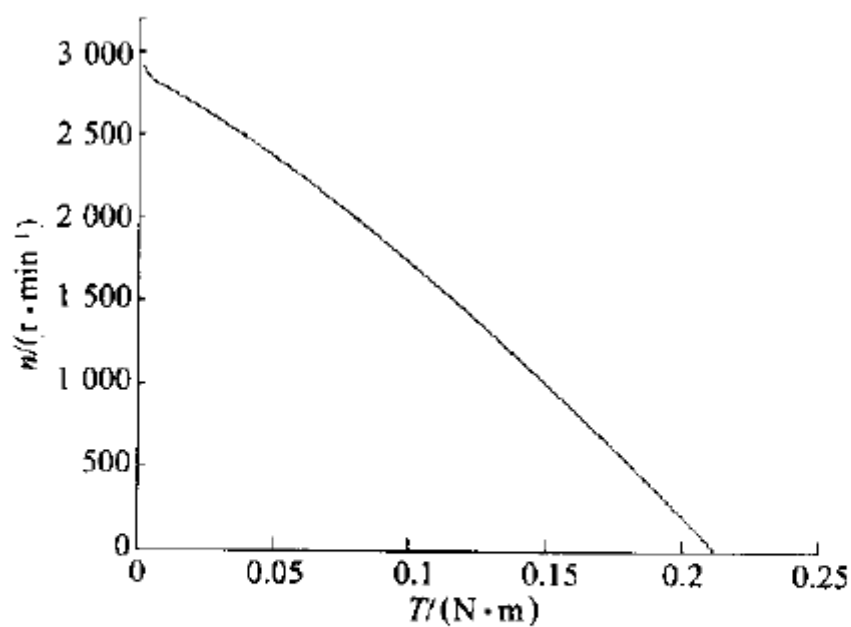


图 7 转矩-转速特性曲线

Fig. 7 T-n curve torque-speed curve



### 3 结 语

以上介绍的用小波包分析进行电机性能测试的方法不仅适用于直流电机,同样可以推广到交流电机的测试中,由于齿槽的存在,可以通过分析其齿谐波来获取转速信号.该方法具有测试周期短,系统结构简单,无需转矩-转速传感器等优点,尤其适合于传感器安装不方便,要求进行快速测试的场合.

本方法适应高速或超高速直流电机转速的测量,因为电机转速越高,在相同的起动时间里,各频率分量的“周期”数越多,小波包系数的比较范围越广,有效系数包越多,分析精度也越高.而且在电机转速很高的情况下,常规测速传感器的响应速度不一定能够跟随转速的变化,后续的硬件处理的速度要求也比较高,对电机稳定运行的每一点的转速进行测量,往往牵涉到负载的动态调节,这种情况下的高速测量用传统的方法往往不太容易实现.