

基于小波分析的直流电机转矩-转速特性测试

浙江大学(杭州, 310027) 黄进 黄建华 陈瞰 张伟

摘要 本文应用小波分析方法通过对直流电机空载起动过程进行测量来获取转矩-转速特性。系统采用PC机和数据采集卡直接对直流电动机起动过程中的电枢电流进行高速数据采集,然后利用小波分析和间接法测试原理从中提取转速信息和转矩信息,以此得到直流电机的转矩-转速特性。实验结果与仿真结果表明这种方法可实现直流电机无转矩转速传感器测试,有效地缩短了测试周期,提高了测试效率。

叙词 转矩 转速 特性 间接测量 数据系统

Measurement of DC Motor Torque-Speed Characteristic Based on Wavelet Analysis

Zhejiang University Huang Jin Huang Jianhua Chen Dun Zhang Wei

Abstract: This paper proposes a method for measuring the DC motor torque-speed characteristic during the starting process by the wavelet analysis theory. The system acquires the starting current of DC motor by the PC and Data Acquisition Card, and then analyzes these data by wavelet analysis theory, extracts the torque and speed parameters of DC motor, acquires the torque-speed characteristic. The experiment results and simulation results verify that this method can implement the sensorless measurement of DC motor performance while shortens testing time and improves testing efficiency.

Key words: Torque Speed Characteristic Nondirective method Data system

1 引言

在电机性能测试(包括型式试验与出厂试验)中,电机的转矩-转速特性是非常重要的电机特性,如何快速、准确地测量各类电机的转矩-转速特性历来是电机测试方法,电机测试系统所关心的重要问题和评价的重要标准。常规的测试方法中,转速、转矩的测量是通过各种转速传感器,转矩传感器将转速,转矩信号转化为相应的电信号,然后通过各种数字化测量方法进行测量,这种测量方法属于直接法;如果传感器与数字化测试方法匹配良好的话,可以达到比较高的精度。不足在于:

(1)传感器的引入增加了系统复杂度,严重影响测试效率(因为需要安装传感器);(2)如果应用

场合不适合安装转矩转速传感器的话,这种方法将失效;(3)在测量完整的转矩-转速特性曲线时,负载的动态调节需要较长的测量时间。

本文给出一种直流电机转矩-转速特性的无传感器测试方法。

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:^[1]

$$f_n = \frac{c \times k \times n \times p}{60} \quad (1)$$

式中 k ——换向片数

n ——电机转速

p ——电机极对数

c ——由换向片数的奇偶所决定的系数,当



黄进 1960年12月生,1982年毕业于浙江大学电力学院自动化专业,获学士学位。1987年在法国图普兹国立综合技术学院电气自动化专业获博士学位,教授。现在浙江大学电机系从事控制与机电一体化领域的教学和研究工作。

k 为偶数时, $c=1$; k 为奇数时, $c=2$

所以, 电枢电流高频分量的频率与电机转速成正比。如果能够测量出该高频分量的频率, 那么电机的转速也就可以间接地测量出来, 一般转速测量所必需的转速传感器就可以省去了, 即电机转速的无传感器化测量得以实现。

电机转速由上述间接法测量出来, 电机转矩也可以由间接法测量, 电机转矩与转速满足机械平衡方程

$$T_{em} - T_L - T_0 = \frac{GD_a^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (2)$$

式中 T_{em} ——电机电磁转矩

T_L ——负载转矩

T_0 ——空载阻尼转矩

G ——机组重量

D_a ——机组旋转直径

n ——电机转速

常规的转矩测量方法中, 转矩测量时, 电机转速一般都是稳定的, 所以式(2)右边项等于零, 电机电磁转矩等于负载转矩和空载阻尼转矩的和。一般而言, 要求转速完全稳定是不可能的, 大部分测试系统中都是保证电机转速的近似稳定而使电机电磁转矩近似等于负载转矩和空载阻尼转矩的和; 正因为如此, 这种方法的测量周期都比较大, 因为它要求在每一点上都保证电机转速近似稳定。

如果电机空载起动, 那么在起动过程中, 负载转矩等于零, 进一步忽略空载阻尼转矩(因为电机的电磁转矩远远大于阻尼转矩), 由式(2)知道, 电磁转矩与转速的导数成正比; 电机电磁转矩可以近似由转速的差分得到, 这是本文所基于的间接法测量电磁转矩的主要原理。

从理论上分析知道, 起动过程中直流电机的电枢电流的高频分量的频率的变化规律与转速的变化规律相同, 都是按指数规律上升至空载转速。它的幅值与直流分量成正比, 经过快速的上升过程后按指数规律下降。因此, 起动过程中的电枢电流信号为非平稳信号。对这类信号的分析一般要采用联合时-频域分析, 比如 STFT, Gabor 变换, 小波分析等等, 而其中又以小波分析用得较多。这里我们采用小波分析来从上述电流信号中提取转速信息。

2 小波分析基本理论

小波分析是近十年来在理论界与工程界广泛应用的一门数字信号处理方法, 它的发展可以追溯

到 1910 年 Haar 提出的正交小波基; 二十世纪 80 年代末与 90 年代初, 在一批应用数学家、物理学家和工程人员, 比如 Morlet, Grossman, Mallat, Coifman, Daubechies 等等的共同努力下, 小波分析理论发展迅速, 基本理论框架与处理方法已经成熟化。自此之后, 小波分析理论在工程实际中的应用不断扩大, 成为联合时-频域分析的重要工具。

定义 2.1: 如果函数 $\Psi \in L^1 \cap L^2$ 满足

$$C_\Psi = \int_R \frac{|\hat{\Psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (3)$$

$$\text{令 } \Psi_{a,b}(t) = \left| a \right|^{-\frac{1}{2}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (4)$$

则 $f \in L^2$ 的小波变换为

$$W_f(a,b) = \langle f, \Psi_{a,b} \rangle = \left| a \right|^{-\frac{1}{2}} \int_R f(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (5)$$

小波反变换为

$$f(t) = C_\Psi^{-1} \int_R \int \Psi_{a,b}(t) W_f(a,b) \frac{da db}{a^2} \quad (6)$$

式中 Ψ ——小波函数

a ——尺度系数

b ——平移系数

由 $\Psi(t) \in L^1(R) \Rightarrow \int_R |\Psi(t)| dt < \infty$, 即 $\Psi(x)$ 具有衰减性, 特别地, $\Psi(x)$ 是局部非零的紧支函数, 在这个意义上, 它是“小”的。又由式(3)知道 $\hat{\Psi}(0) = 0 \Rightarrow \int_R \Psi(t) dt = 0$, 所以 $\Psi(x)$ 具有波动性, 这是“小波”名称的由来。

小波变换按照其参数的离散性可以分为连续小波变换(CWT), 离散小波变换(DWT)。连续小波变换中 a, b 都为连续值, 离散小波变换中 a, b 都是离散的, 一般选择

$$a_m = a_0^{-m}, m \in \mathbb{Z}, a_0 > 1$$

$$b_n = nb_0 a_0^{-m}, m, n \in \mathbb{Z}$$

以便离散小波构成框架。实际应用中用得最多的是 $a_0=2, b_0=1$ 所对应的小波级数。

从应用数学领域所定义的小波与信号处理领域中的滤波器组, 计算机视觉中的多分辨分析异曲同工, 殊途同归。

小波变换对频域的划分是二进划分, 如果要求对频域进行均匀划分的话, 需要采用小波包变换。

3 硬件系统

本系统采用 PC 机与数据采集卡完成对直流电机起动过程中的电枢电流进行采集, 然后利用

PC 机的计算资源对采集到的数据作小波分析, 从中提取转速, 转矩参数, 整个硬件系统如下。

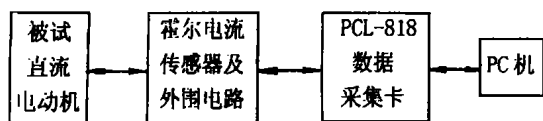


图1 硬件系统总体框图

LEM 电流传感器将电枢电流转化为电压信号, 这里采用的是瑞士LEM 公司的LA 25-NP 型霍尔电流传感器, 它属于磁平衡式电流传感器。数据采集卡为Advantech 公司的PCL-818 高性能数据采集卡, 它的A/D 位数为12 位, 最高采集速度为100K SPS, 采集方法可以采用查询法, 中断法, DMA 法。

PCL-818 的输入方式有两种: 单端输入方式与差动输入方式, 这里采用差动输入方式, 为了提高抗噪声能力, PCL-818 的模拟地不与反相端相连, 而是通过导线与外部输入信号地相连, 如图2 所示。

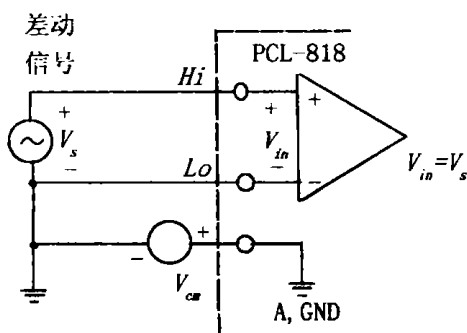


图2 PCL-818 与输入信号连接方法

4 软件系统

本系统的软件系统是基于Microsoft Windows NT 的, 整个系统包括三个部分: 数据采集程序, 滤波/重构程序与小波包分解程序。

4.1 数据采集程序

本系统采用中断法对直流电机起动过程中的电枢电流进行采集, 整个采集程序由主程序与监控程序构成, 主程序框图如图3 所示, 它根据采集任务的要求(采样速率, 采样时间或者采样点数等等)对数据采集卡进行配置, 起动直流电机, 调用数据采集卡底层驱动程序。

监控程序为在NT 下运行的线程, 它负责监视数据采集卡的状态, 如果数据采集任务已经完成, 那么监视线程将给主程序发送特定消息, 以指示主程序进行采集结果保存及采集现场消除。

对一永磁直流电动机起动过程中的电枢电流

的采集结果如图4。

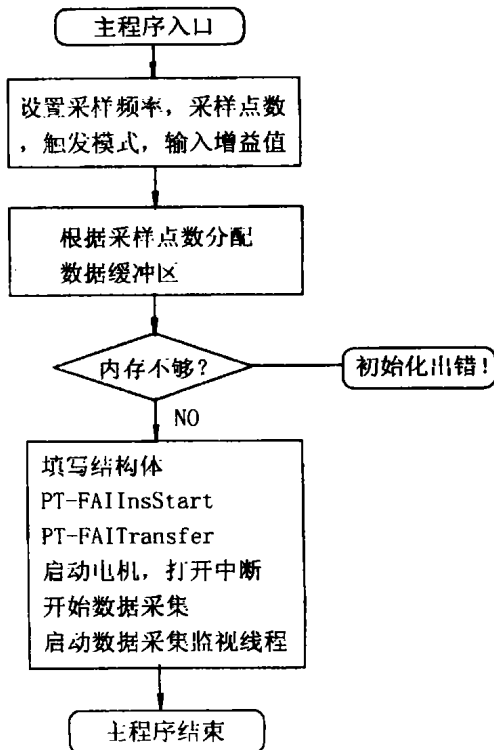


图3 主程序框图

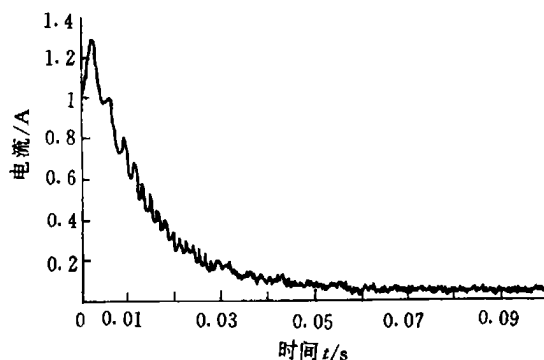


图4 永磁直流电机起动电枢电流波形

4.2 小波滤波/重构程序

本文采用Daubechies-6 小波构造正交滤波器(QMF)组, 对采集到的信号进行滤波/重构。因为直流电机在换向过程中不可避免地会引入噪声, 这里的滤波程序不仅可以将一些高频噪声滤除, 而且还可以将滤波后的信号分解为低频直流分量与高频分量。

对采集程序采集到的电枢电流波形进行下述三个步骤的处理结果为图5~ 图7。

(1) 首先对采集到的原始数据, 采用 M 个半带低通滤波滤除数据中的高频噪声(M 依赖于信号的频带), 这里半带滤波次数由滤波后信号总能量占原始信号的百分比确定。

(2) 对初次滤波后的数据再进行 N 次(N 为固

定值, 一般取 7~10) 半带低通滤波。最后得到的低通信号可以看作电流的近似平均分量。

(3) 对第二步的滤波结果进行选择性的重构得到电枢电流中的高频分量。

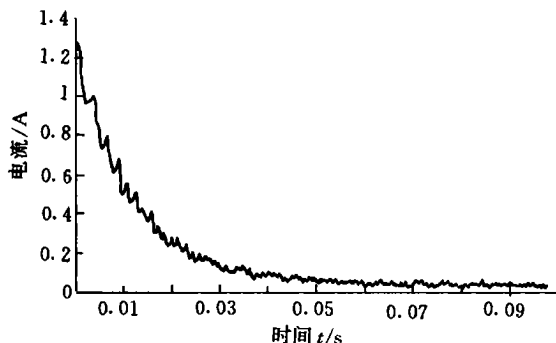


图5 去掉噪声后的电枢电流波形

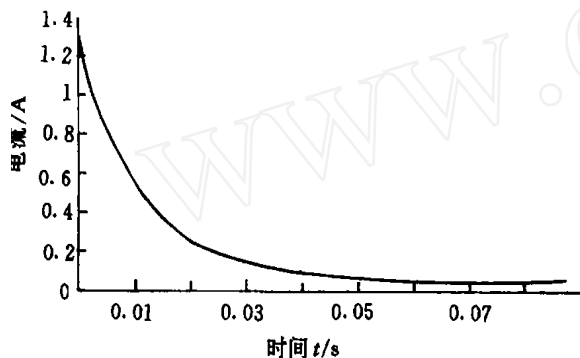


图6 电枢电流低频分量

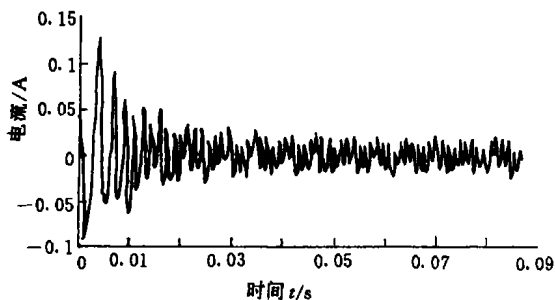


图7 电枢电流高频分量

4.3 小波包分解程序

首先对滤波/重构后的信号在小波包下正交分解成 2^N 个信号系数包 (该系数为小波包变换下的系数, N 代表分解程度), 每一个包对应某一中心频率下的整个时域范围内的小波包变换系数; 比较这些系数, 系数最大的时域点可以认为是该中心频率分量表现最强烈的时域点 (这样的点是唯一的); 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, 可以作出信号的时-频分布图。由于信号频率对应电机转速 (正比关系), 所以, 时-频分布图实质上就是转速-时间曲线。采用 Daubechies-6 正交小波包对一空载转速为 2500 r/min 的直流电机起动过程

中电枢电流仿真数据进行分析的结果见图 8、图 9。

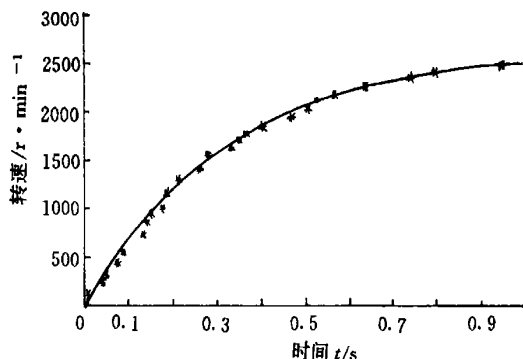


图8 转速曲线

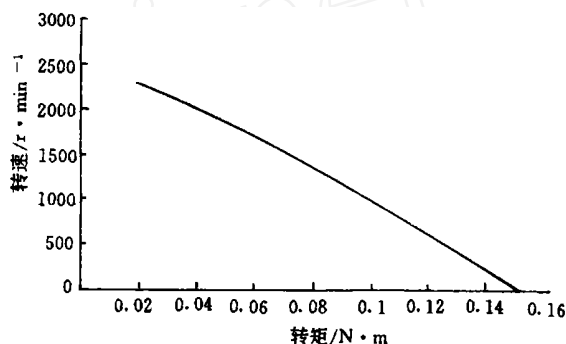


图9 转矩-转速曲线

5 总结

图 8 所示的转速曲线, 图 9 所示的机械特性曲线都与直流电机理论上的特性很好地符合。

本文所介绍的小波分析方法适应高速或超高速电机转速的测量, 因为电机转速越高, 相同的起动时间里面, 各频率分量的“周期”数越多, 小波包系数的比较的范围越广, 判断越准确; 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, 这种情况下的测量往往不太容易实现。而本论文所介绍的方法中不牵涉到负载的调节, 可以达到快速地测量电机的转速曲线、转矩曲线、机械特性曲线。

但是, 如果电机的转速比较低, 采集到的电流波形中, 频域窗中的波形“振荡”次数比较少的话 (高频时的要求更加严格), 它将会被小波包“淹没”, 从而, 相应的时域点将没有任何意义。这是本方法的一个不足, 另外一点, 间接法测量的精度一般都不能与直接法相比较。

电机测试作为一个比较传统的学科领域, 近年来, 随着电机工业的发展, 电机测试的要求越来越高, 出现的被测信号日益多种多样, 对一些复杂过

VNT 振动噪声检测仪在电机噪声测量中的应用

上海电器科学研究所(200063) 马久旭 王传军

摘要 文章叙述了基于振速法原理的VNT 振动噪声检测仪在电机噪声测量中的应用及应用时的注意事项。

叙词 振动 噪声 检测仪表



马久旭 1949 年 10 月生, 1982 年毕业于哈尔滨电工学院自动控制系, 高级工程师。现在上海电器科学研究所从事电机检测及测试装置的开发与研究工作。

Application of VNT Vibration Noise Detection Meter to Noise Measurement for Electric Machine

Shanghai Electrical Apparatus Research Institute Ma Jiuxu Wang Chuanjun

Abstract: The paper introduces the application of VNT vibration noise detection meter to noise measurement for electric machine and its attention.

Key words: Vibration Noise Detection meter

1 引言

随着人类社会的发展, 对环境噪声的要求越来越高。用振速法测量噪声是一项新的测量技术, 由于其测量时不受环境噪声的影响, 故引起人们的极大兴趣。我国对此研究已历经多年, 近年来基于振速法的VNT 振动噪声检测仪在中小型电机和微电机行业的噪声测量应用中已日趋成熟。本文就该仪器的实际应用及应用中的若干问题进行探讨。

2 VNT 振动噪声检测仪的原理及测量

以往测量电机的噪声通常是采用声级计进行声压级测量。即测量电机一定距离包络面上的平均

声压级, 再换算成声功率级, 以评价电机的噪声质量。由于声压法测量受环境噪声的影响, 因此在不少场合, 如, 在生产流水线上逐台测量电机噪声时; 或被测电机的噪声小于环境噪声时, 都会由于其他声源的影响以及反射噪声的影响使得声级计无法测得电机的实际噪声。用声强法测量, 其仪器价格昂贵, 且测试过程复杂, 难以在生产现场使用。振速法则是一种十分简便而有效的方法。其原理是当物体出现声频范围内的振动时, 会激发周围空气介质相应振动, 从而以声波形式向外辐射噪声。这种结构噪声可以通过物体表面的振动速度级及其辐射效率来表征。因此通过测量其固有辐射效率的表面振动速度级, 可以用来确定其噪声辐射。由于该测量方法不受环境噪声的影响, 故引起人们的极大兴

程的分析也日益增多, 因而各种新的方法, 新的理论, 特别是数字信号处理理论, 被不断应用到测试领域, 并且显示了其新兴的生命力。论文作者籍此论文来尝试探讨一些新的理论在电机测试领域的应用问题, 相信进一步的分析一定可以证明象小波分析这些新兴理论必将能在电机领域发挥其独到的价值与作用。

参考文献

- 1 陈雅文. 直流微电机测速新方法. 微电机, 1999(1).
- 2 Michel Misiti, Yves Misiti, Georges Oppenheim, Jean-Michel Poggi MATLAB Wavelets Toolbox, User's Guide, Version 1, MathWorks Inc 1996.
- 3 Advantech Co. Ltd, User's Manual of PCL-818, 1990
- 4 [美]崔锦泰, 程正兴译, 白居宪审校. 小波分析导论. 西安交通大学出版社, 1995.
- 5 程正兴. 小波分析算法与应用. 西安交通大学出版社, 1998.

收稿日期: 2000-03-16