



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 108089125 A

(43)申请公布日 2018.05.29

(21)申请号 201611036923.8

(22)申请日 2016.11.23

(71)申请人 中国科学院沈阳自动化研究所

地址 110016 辽宁省沈阳市东陵区南塔街  
114号

(72)发明人 张吉龙 宋向金 胡静涛 祝洪宇  
黄昊 高雷 白晓平

(74)专利代理机构 沈阳科苑专利商标代理有限  
公司 21002

代理人 王倩

(51)Int.Cl.

G01R 31/34(2006.01)

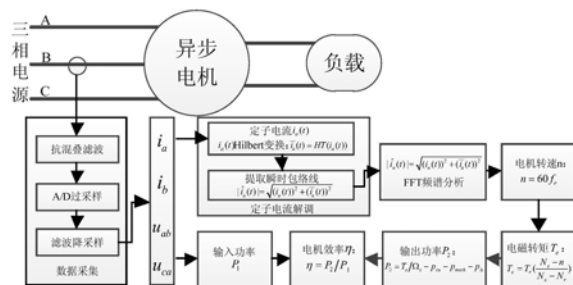
权利要求书2页 说明书5页 附图4页

(54)发明名称

基于在线监测的异步电机能效估计方法

(57)摘要

本发明涉及基于在线监测的异步电机能效估计方法。首先,通过分析采集到的异步电机定子电流中的固有偏心谐波信号辨识得出转子转速;其次利用异步电机机械特性的直线部分和转速得出电机转子轴电磁转矩;最后利用电磁转矩和电机同步角速度求出电机输出功率,进而达到辨识电机运行能效的目的。本发明基于定子电流中固有偏心谐波分析进行电机转速估计,因此能避免安装光电编码器,可以实现无速度传感器转速估计;基于异步电机机械特性的直线部分和转速得出电机转子轴电磁转矩,解决了电机转子轴电磁转矩无法直接测量的问题。该方法具有操作简单,降低系统成本,快速得出电机运行能效的目的。



1. 基于在线监测的异步电机能效估计方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤1, 设定定子电流和定子电压信号的采样频率 $f_s$ 和采样周期 $T_s$ , 采集异步电机的定子电流信号和定子电压信号; 定子电流信号包括A相电流 $i_a(t)$ 和B相电流 $i_b(t)$ , 定子电压信号包括AB线电压 $u_{ab}(t)$ 和CA线电压 $u_{ca}(t)$ ;

步骤2, 通过对采集的定子电流信号 $i_a(t)$ 做Hilbert变换 $\bar{i}_a(t)$ , 得到定子电流信号 $i_a(t)$ 的解析信号 $\hat{i}_a(t)$ ;

步骤3, 通过提取解析信号 $\hat{i}_a(t)$ 的瞬时包络线 $|\hat{i}_a(t)|$ , 并对瞬时包络线 $|\hat{i}_a(t)|$ 做FFT频谱分析提取异步电机固有偏心谐波频率 $|f_1 \pm f_r|$ 中的转子速度谐波频率 $f_r$ , 进而得到电机转子转速 $n$ ;  $f_1$ 为供电频率;

步骤4, 根据电机转子转速 $n$ 和异步电机机械特性的直线部分得到电机的电磁转矩 $T_e$ ;

步骤5, 根据电机电磁转矩 $T_e$ 和电机同步角速度 $\Omega_s$ , 得到电机的电磁功率 $P_e$ ;

步骤6, 根据电机电磁功率 $P_e$ 和电机损耗过程, 得到电机的输出功率 $P_2$ , 进而得到电机的运行效率 $\eta$ 。

2. 根据权利要求1所述的基于在线监测的异步电机能效估计方法,其特征在于,所述采样频率 $f_s \geq 2f$ ; 其中,  $f$ 为被采样信号的频率。

3. 根据权利要求1所述的基于在线监测的异步电机能效估计方法,其特征在于,所述通过对采集的定子电流信号 $i_a(t)$ 做Hilbert变换 $\bar{i}_a(t)$ , 得到定子电流信号 $i_a(t)$ 的解析信号 $\hat{i}_a(t)$ 具体为:

$$\bar{i}_a(t) = HT(i_a(t)) = i_a(t) * \frac{1}{\pi t}$$

$$\hat{i}_a(t) = i_a(t) + j\bar{i}_a(t)$$

其中, HT表示Hilbert变换, \*表示卷积。

4. 根据权利要求1所述的基于在线监测的异步电机能效估计方法,其特征在于,所述解析信号 $\hat{i}_a(t)$ 的瞬时包络线 $|\hat{i}_a(t)|$ 为:

$$|\hat{i}_a(t)| = \sqrt{(i_a(t))^2 + (\bar{i}_a(t))^2}。$$

5. 根据权利要求1所述的基于在线监测的异步电机能效估计方法,其特征在于,所述电机转子转速 $n = 60f_r$ ; 其中 $f_r$ 为转子速度谐波频率。

6. 根据权利要求1所述的基于在线监测的异步电机能效估计方法,其特征在于,所述电磁转矩 $T_e$ :

$$T_e = T_r \left( \frac{N_s - n}{N_s - N_r} \right)$$

其中,  $T_r = P_r / N_r$ 为电机额定转矩;  $P_r$ 为电机额定功率;  $N_r$ 为电机额定转速;  $N_s$ 为电机同步转速。

7. 根据权利要求1所述的基于在线监测的异步电机能效估计方法,其特征在于,所述电磁功率 $P_e$ 为:

$$P_e = \frac{T_e}{\Omega_s}$$

其中,  $\Omega_s = 2\pi N_s / 60$  为电机同步角速度。

8. 根据权利要求1所述的基于在线监测的异步电机能效估计方法, 其特征在于, 所述电机的输出功率  $P_2 = P_e - p_{cu} - p_{mech} - p_{\Delta}$ ; 其中,  $p_{cu} = sP_e$  为转子铜耗, 电机转差率  $s = (N_s - n) / N_s$ ;  $p_{mech}$  为机械损耗;  $p_{\Delta}$  为附加损耗。

9. 根据权利要求1所述的基于在线监测的异步电机能效估计方法, 其特征在于所述电机的运行效率  $\eta = P_2 / P_1$ ; 其中,  $P_1$  为电机输入功率。

## 基于在线监测的异步电机能效估计方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及异步电机状态监测领域,具体地说是一种基于在线监测的异步电机能效估计方法。

### 背景技术

[0002] 电机作为各种设备的驱动力,广泛应用于工业、农业、商业以及公用设施等各个领域。从全球范围看,电机系统的用电量平均占世界总用电量的50%以上、占工业用电量的70%左右。在目前能源紧张、能源价格不断上涨的情况下,研究异步电机的能效在线监测具有很重要的现实意义。

[0003] 现阶段,针对电机能效监测方法主要包括铭牌法、滑差法、专用仪器法、损耗分析法和等效电路法等,要实现异步电机能效进行有效的在线监测,其难点在于转速和输出转矩的辨识。目前,异步电机无传感器转速估计方法可分为三大类:(1)基于电动机数学模型计算转速;(2)基于闭环控制作用构造转速信号;(3)利用电动机结构特征提取转速信号。其中,利用电动机结构特征提取转速信号,由于不受电动机数学模型误差和参数变化的影响,得到了科研工作者的广泛研究。这一类方法主要是利用电机定子电流信号分析齿谐波估计转速,然而近年研究实践表明,齿谐波可能不存在于异步电机中,导致无法利用齿谐波估计转速。而对于输出转矩辨识多数采用转矩仪测出,但扭矩传感器的安装不仅破坏了异步电机结构简单、工作可靠和维护方便等的优势,也限制了其应用范围。

### 发明内容

[0004] 针对现有技术中存在的上述不足之处,本发明要解决的技术问题是提供一种基于在线监测的异步电机能效估计方法,在使用电机固有偏心谐波完成电机转子转速估计的基础上,结合异步电机机械特性直线工作部分完成电机输出功率的估算,进而实现异步电机能效在线监测。

[0005] 本发明为实现上述目的所采用的技术方案是:基于在线监测的异步电机能效估计方法,包括以下步骤:

[0006] 步骤1,设定定子电流和定子电压信号的采样频率 $f_s$ 和采样周期 $T_s$ ,采集异步电机的定子电流信号和定子电压信号;定子电流信号包括A相电流 $i_a(t)$ 和B相电流 $i_b(t)$ ,定子电压信号包括AB线电压 $u_{ab}(t)$ 和CA线电压 $u_{ca}(t)$ ;

[0007] 步骤2,通过对采集的定子电流信号 $i_a(t)$ 做Hilbert变换 $\overline{i_a}(t)$ ,得到定子电流信号 $i_a(t)$ 的解析信号 $\hat{i}_a(t)$ ;

[0008] 步骤3,通过提取解析信号 $\hat{i}_a(t)$ 的瞬时包络线 $|\hat{i}_a(t)|$ ,并对瞬时包络线 $|\hat{i}_a(t)|$ 做FFT频谱分析提取异步电机固有偏心谐波频率 $|f_1 \pm f_r|$ 中的转子速度谐波频率 $f_r$ ,进而得到电机转子转速 $n$ ;  $f_1$ 为供电频率;

[0009] 步骤4,根据电机转子转速 $n$ 和异步电机机械特性的直线部分得到电机的电磁转矩

$T_e$ ;

[0010] 步骤5,根据电机电磁转矩 $T_e$ 和电机同步角速度 $\Omega_s$ ,得到电机的电磁功率 $P_e$ ;

[0011] 步骤6,根据电机电磁功率 $P_e$ 和电机损耗过程,得到电机的输出功率 $P_2$ ,进而得到电机的运行效率 $\eta$ ;

[0012] 所述采样频率 $f_s \geq 2f$ ;其中, $f$ 为被采样信号的频率。

[0013] 所述通过对采集的定子电流信号 $i_a(t)$ 做Hilbert变换 $\bar{i}_a(t)$ ,得到定子电流信号 $i_a(t)$ 的解析信号 $\hat{i}_a(t)$ 具体为:

$$[0014] \quad \bar{i}_a(t) = HT(i_a(t)) = i_a(t) * \frac{1}{\pi t}$$

$$[0015] \quad \hat{i}_a(t) = i_a(t) + j\bar{i}_a(t)$$

[0016] 其中,HT表示Hilbert变换,\*表示卷积。

[0017] 所述解析信号 $\hat{i}_a(t)$ 的瞬时包络线 $|\hat{i}_a(t)|$ 为:

$$[0018] \quad |\hat{i}_a(t)| = \sqrt{(i_a(t))^2 + (\bar{i}_a(t))^2}$$

[0019] 所述电机转子转速 $n = 60f_r$ ;其中 $f_r$ 为转子速度谐波频率。

[0020] 所述电磁转矩 $T_e$ :

$$[0021] \quad T_e = T_r \left( \frac{N_s - n}{N_s - N_r} \right)$$

[0022] 其中, $T_r = P_r/N_r$ 为电机额定转矩; $P_r$ 为电机额定功率; $N_r$ 为电机额定转速; $N_s$ 为电机同步转速。

[0023] 所述电磁功率 $P_e$ 为:

$$[0024] \quad P_e = \frac{T_e}{\Omega_s}$$

[0025] 其中, $\Omega_s = 2\pi N_s/60$ 为电机同步角速度。

[0026] 所述电机的输出功率 $P_2 = P_e - p_{cu} - p_{mech} - p_{\Delta}$ ;其中, $p_{cu} = sP_e$ 为转子铜耗,电机转差率 $s = (N_s - n)/N_s$ ;  $p_{mech}$ 为机械损耗; $p_{\Delta}$ 为附加损耗。

[0027] 所述电机的运行效率 $\eta = P_2/P_1$ ;其中, $P_1$ 为电机输入功率。

[0028] 本发明提出的基于在线监测的异步电机能效估计方法,充分利用电机定子电流分析技术,通过对定子电流信号中的偏心谐波进行分析,完成了电机转子转速的无速度传感器估计;通过利用电机机械特性的直线部分和估计的转子转速,完成了对电机转轴输出功率的估计。在不增加系统成本的基础上,实现了电机运行效率的非侵入式监测。具体表现在:

[0029] 1.本发明基于定子电流信号分析技术,完成了电机转子转速和转轴输出功率的非侵入式估计,降低了系统成本。

[0030] 2.本发明利用定子电流信号中的偏心谐波估计电机转子转速,不仅适用于齿谐波出现的电机,也适用于无法利用齿谐波进行转速估计的电机。

[0031] 3.本发明所提供的电机能效监测方法,仅仅需要采集电机定子电流和定子电压信

号并对其进行数字信号分析即可,实用性强。

[0032] 4.本发明基于定子电流中固有偏心谐波分析进行电机转速估计,因此能避免安装光电编码器,可以实现无速度传感器转速估计;基于异步电机机械特性的直线部分和转速得出电机转子轴电磁转矩,解决了电机转子轴电磁转矩无法直接测量的问题。该方法具有操作简单,降低系统成本,快速得出电机运行能效的目的。

### 附图说明

[0033] 图1为本发明的异步电机能效在线估计系统框图示意图;

[0034] 图2为本发明的异步电机能效估计信号分析流程图;

[0035] 图3(a)为电机固有偏心谐波频率附近频谱图形;

[0036] 图3(b)为电机齿谐波频率附近频谱图形;

[0037] 图4(a)为电机固有偏心谐波频率附近频谱图形;

[0038] 图4(b)为电机齿谐波频率附近频谱图形;

[0039] 图5为3kW三相异步电动机在额定380V电压,空载条件下利用定子电流瞬时包络线进行FFT频谱分析得出的频谱图形;

[0040] 图6为3kW超高效率三相异步电动机在额定380V电压,空载条件下利用定子电流瞬时包络线进行FFT频谱分析得出的频谱图形;

[0041] 图7为异步电机机械特性曲线;

[0042] 图8为异步电机功率流程图。

### 具体实施方式

[0043] 下面结合附图及实施例对本发明做进一步的详细说明。

[0044] 本发明方法包括以下步骤:

[0045] 步骤1,设定定子电流和定子电压信号采样频率 $f_s$ 和采样周期 $T_s$ ,采集定子电流信号 $i_a(t)$   $i_b(t)$ 和定子电压信号 $u_{ab}(t)$   $u_{ca}(t)$ ;定子电流信号包括A相电流 $i_a(t)$ 和B相电流 $i_b(t)$ ,定子电压信号包括AB线电压 $u_{ab}(t)$ 和CA线电压 $u_{ca}(t)$

[0046] 步骤2,通过对采集的定子电流信号 $i_a(t)$ 做Hilbert变换 $\overline{i_a(t)}$ ,得到定子电流信号 $i_a(t)$ 的解析信号 $\hat{i}_a(t)$ ;

[0047] 步骤3,通过提取解析信号 $\hat{i}_a(t)$ 的瞬时包络线 $|\hat{i}_a(t)|$ ,并对瞬时包络线 $|\hat{i}_a(t)|$ 做FFT频谱分析提取异步电机固有偏心谐波频率 $|f_1 \pm f_r|$ 中的转子速度谐波频率 $f_r$ ,进而得到电机转子转速 $n$ ;  $f_1$ 为电网供电频率。

[0048] 步骤4,根据步骤3得出的电机转子转速 $n$ 和异步电机机械特性的直线部分得到电机的电磁转矩 $T_e$ ;

[0049] 步骤5,根据步骤4得出的电机电磁转矩 $T_e$ 和电机同步角速度 $\Omega_s$ ,得到电机的电磁功率 $P_e$ ;

[0050] 步骤6,根据步骤5得出的电机电磁功率 $P_e$ 和电机功率流程图,得到电机的输出功率 $P_2$ ,进而得到电机的运行效率 $\eta$ ;

[0051] 所述步骤1中,定子电流采样频率 $f_s$ 满足的条件为:

[0052]  $f_s \geq 2f$

[0053] 其中,  $f$  为被采样信号的频率。

[0054] 所述步骤2中, 定子电流信号  $i_a(t)$  的Hilbert变换  $\bar{i}_a(t)$  和解析信号  $\hat{i}_a(t)$  分别为:

$$[0055] \quad \bar{i}_a(t) = HT(i_a(t)) = i_a(t) * \frac{1}{\pi t}$$

$$[0056] \quad \hat{i}_a(t) = i_a(t) + j\bar{i}_a(t)$$

[0057] 其中, HT表示Hilbert变换, \*表示卷积。

[0058] 所述步骤3中, 异步电机转子转速信号  $n$  为:

$$[0059] \quad n = 60f_r$$

[0060] 其中  $f_r$  为转子速度谐波频率。

[0061] 所述步骤4中, 电机的电磁转矩计算公式为:

$$[0062] \quad T_e = T_r \left( \frac{N_s - n}{N_s - N_r} \right)$$

[0063] 其中,  $T_r = P_r / N_r$  为电机额定转矩;  $P_r$  为电机额定功率;  $N_r$  为电机额定转速;  $N_s$  为电机同步转速。

[0064] 所述步骤5中, 电机的电磁功率计算公式为:

$$[0065] \quad P_e = \frac{T_e}{\Omega_s}$$

[0066] 其中,  $\Omega_s = 2\pi N_s / 60$  为电机同步角速度。

[0067] 所述步骤6中, 电机的输出功率计算公式为:

$$[0068] \quad P_2 = P_e - p_{cu} - p_{mech} - p_{\Delta}$$

[0069] 其中,  $p_{cu} = sP_e$  为转子铜耗,  $s = (N_s - n) / N_s$  为电机转差率;  $p_{mech}$  为机械损耗, 可以通过电机空载试验测出;  $p_{\Delta}$  为附加损耗, 为额定输入功率的0.5%。

[0070] 所述步骤6中, 电机的运行效率计算公式为:

$$[0071] \quad \eta = P_2 / P_1$$

[0072] 其中,  $P_1$  为电机输入功率。

[0073] 下面结合实例阐述所提出的基于在线监测的异步电机能效估计方法, 图1为异步电机能效在线估计框图示意图, 主要通过电流传感器采集电机定子电流信号, 并使用Hilbert变换对定子电流进行解调, 提取其瞬时包络线并进行FFT频谱分析, 以达到抑制基频频谱泄露和提取转子速度谐波频率的目的, 进而得到电机转子转速, 最终完成电机能效估计。

[0074] 图2为异步电机能效估计信号分析流程图, 主要由数据采集, 定子电流解调, 转速估计, 电磁转矩估计, 输出功率估计, 输入功率估计和电机效率估计组成。

[0075] 以Y-100L-4型三相异步电动机为例, 如图3(a)~图3(b)所示:

[0076] 图3(a)~图3(b)为3kW三相异步电动机在额定380V电压, 空载条件下对定子电流进行FFT频谱分析所得到的定子电流频谱图, 其中图3(a)为电机固有偏心谐波附近频谱图形; 图3(b)为电机齿谐波附近频谱图形;

[0077] 以YE3-100L-4型超高效率三相异步电动机为例, 如图4(a)~图4(b)所示:

[0078] 图4(a)~图4(b)为3kW超高效率三相异步电动机在额定380V电压,空载条件下对定子电流进行FFT频谱分析所得到的定子电流频谱图,其中图4(a)为电机固有偏心谐波附近频谱图形;图4(b)为电机齿谐波附近频谱图形;

[0079] 通过分析图3(a)~图3(b)和图4(a)~图4(b)可知,本发明利用定子电流信号中的偏心谐波估计电机转子转速,不仅适用于齿谐波出现的电机,也适用于无法利用齿谐波进行转速估计的电机。

[0080] 图5为以Y-100L-4型三相异步电动机定子电流瞬时包络线FFT频谱分析得到的频谱图形。

[0081] 图6为以YE3-100L-4型超高效率三相异步电动机定子电流瞬时包络线FFT频谱分析得到的频谱图形。

[0082] 通过分析图5和图6可知,对定子电流信号做Hilbert变换,提取定子电流信号瞬时包络线以进行转速估计,可以有效抑制基频频谱泄露对转速估计的影响。

[0083] 异步电机机械特性曲线如图7所示,利用机械特性曲线直线工作部分可以快速的从得到的转速信号中估计出异步电机电磁转矩,进而得出电磁功率。

[0084] 异步电机功率流程图如图8所示,将得到的电磁功率减去转子铜耗、机械损耗和附加损耗即得得到电机的输出功率,将输出功率除以输入功率即可得到电机的运行效率。



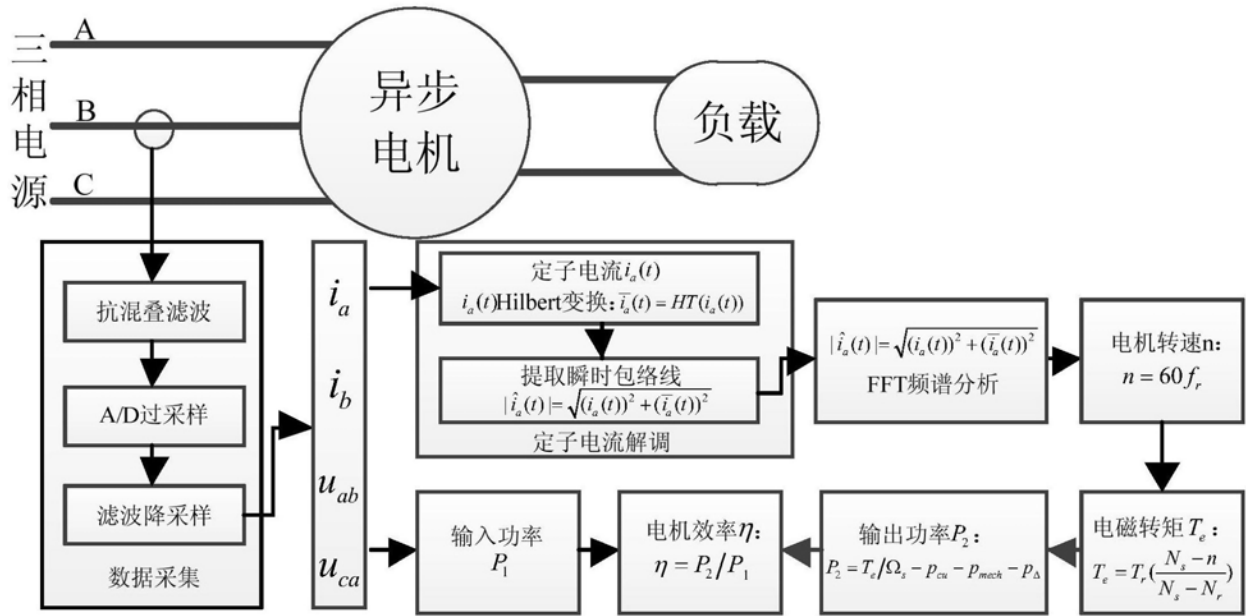


图1

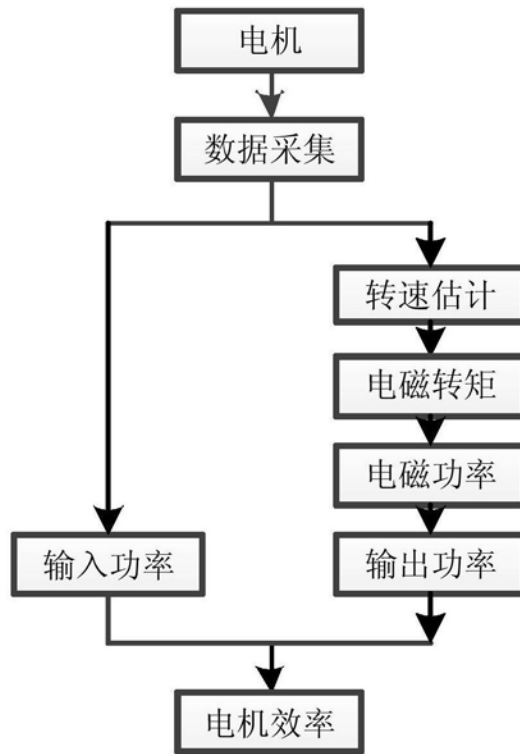


图2

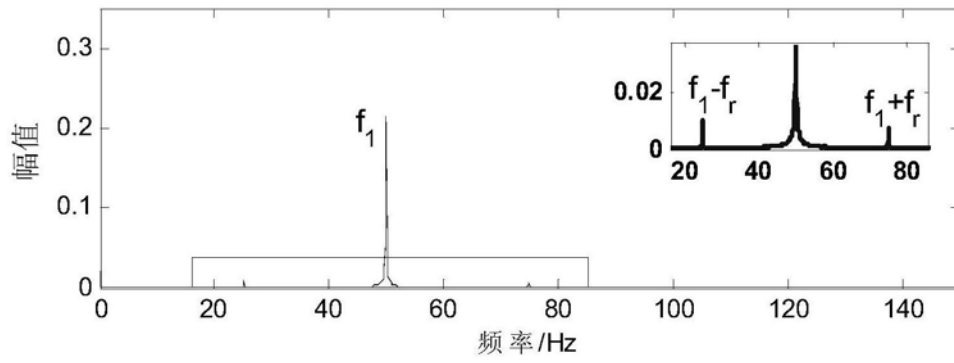


图3 (a)

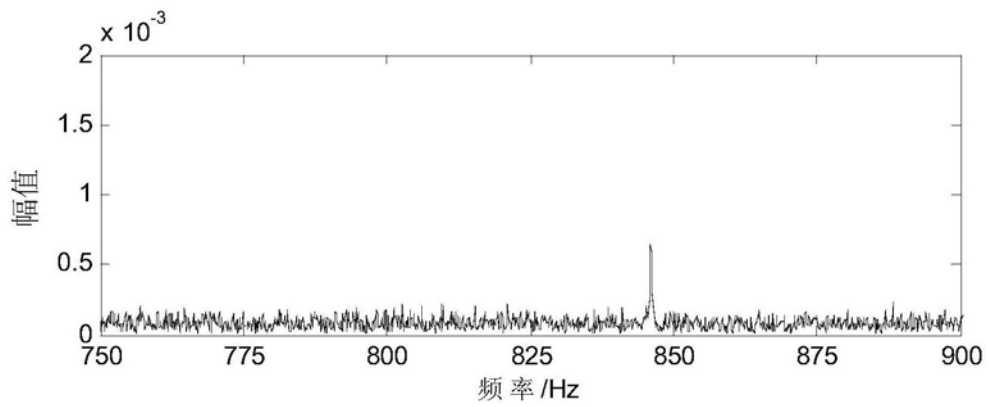


图3 (b)

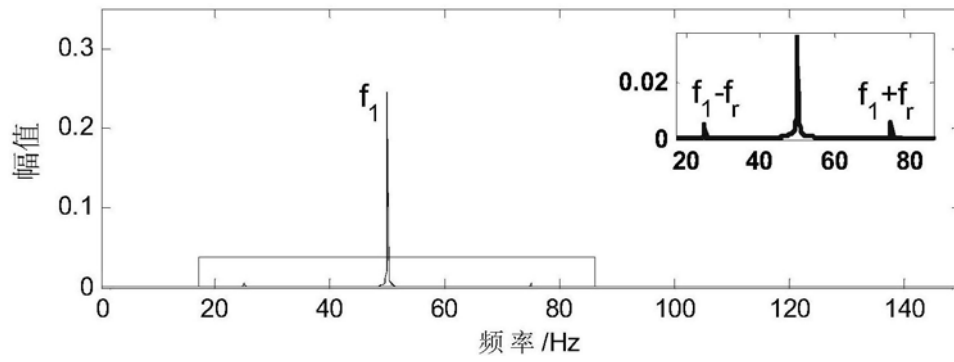


图4 (a)

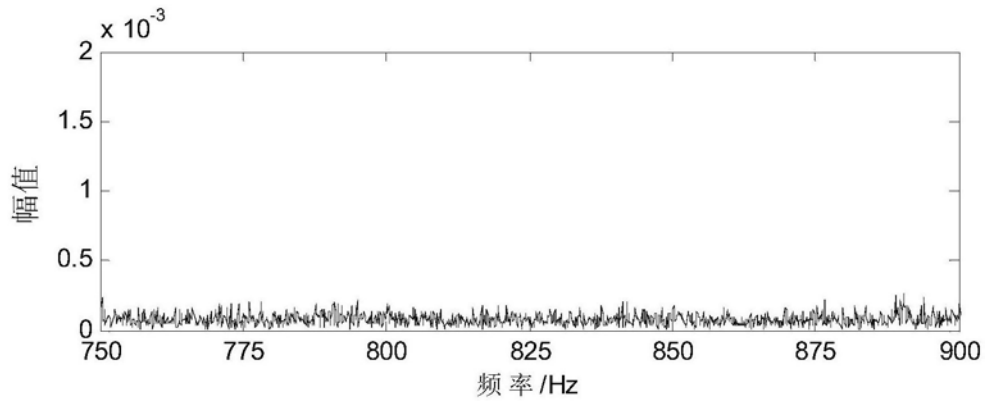


图4 (b)

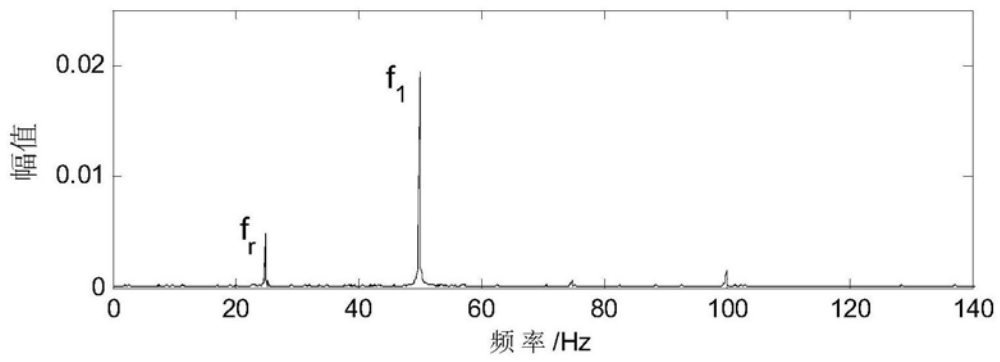


图5

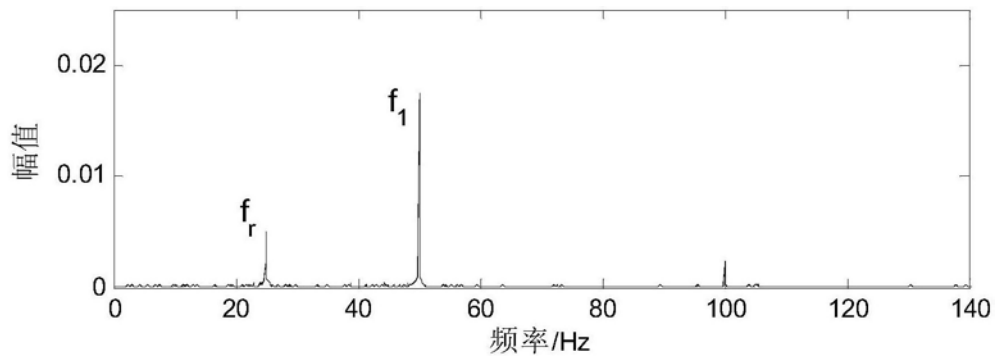


图6

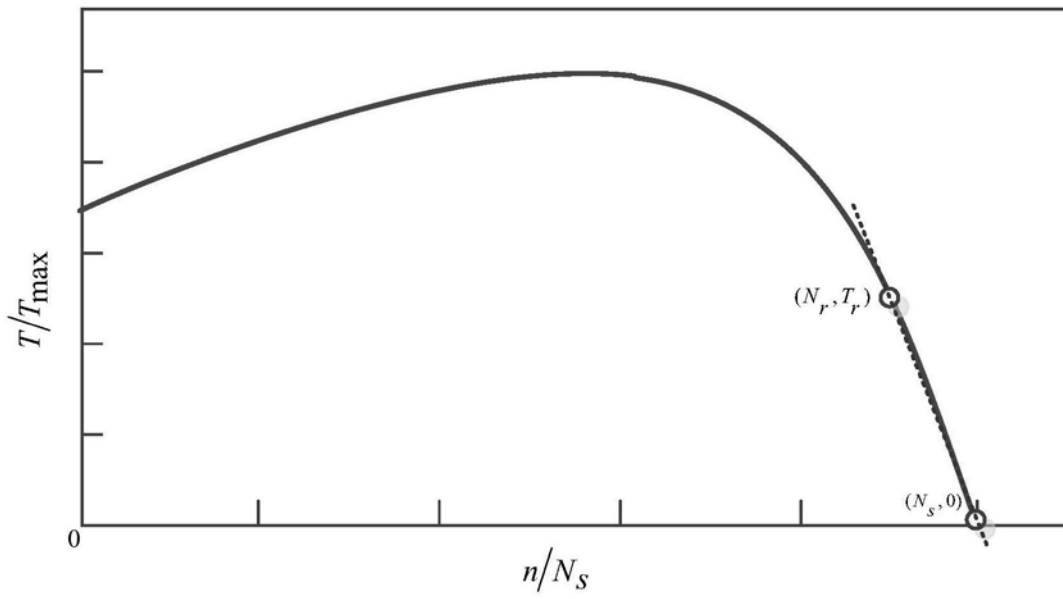


图7

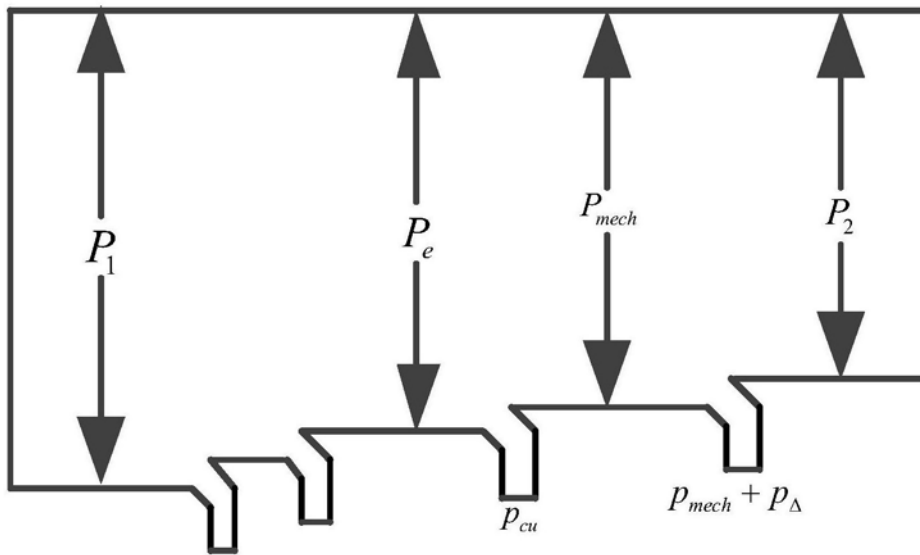


图8