

# 鼠笼式异步电机能效辨识方法对比

王 庆, 王 峰

(江苏电力节能服务有限公司, 江苏 南京 210019)

**摘 要:** 在电机能效评估中, 现在普遍使用的效率测试方法是 IEEE 112B 法, 其特点是在实验过程中安装扭矩仪, 这使得在实际工程中电机转子轴输出机械转矩难以直接测出, 进而影响电机运行效率的辨识。针对上述问题, 本文将对三相异步电动机效率几种在线辨识方法的精度分别进行研究, 并对 T 型等效电路传统算法进行了改进。以一台 5.5kW、4 极异步电机为例, 对文中提出的方法进行了实验验证, 结果表明气隙转矩法辨识电机效率精度最高, 文中研究成果为工程实际中电机能效在线辨识提供了重要参考。

**关键词:** 异步电机; IEEE 112B 法; 精度; 在线辨识; 能效

## 0 引言

“十二五”规划纲要中提出落实节约优先战略, 大幅度提高能源资源利用效率, 加强重点用能单位节能管理。电动机作为主要的驱动设备, 广泛应用于各个领域。据统计在所有的高能耗产品中, 电动机的用电量几乎占到全国总用电量的一半。而且电机的长期低负荷运行造成了严重的能源浪费, 因此选择合适的高效率电机或节能电机对节能工程意义重大。在此过程中, 电机自身效率的精确辨识具有重要意义。电机系统能效评估中的一个重要环节就是电机运行效率的在线评估, 即利用电机输入功率和输出机械功率求出电机实时运行效率。而由于电机输出功率无法根据现场中电机的机端电气量直接测得, 导致电机效率无法精确辨识。为此本文将主要针对鼠笼式异步电机能效辨识方法进行研究讨论。

国内外有关鼠笼式异步电机能效辨识方法 [1]-[9] 的文献很多, 目前广泛应用的效率测试方法是 IEEE 112B 法, 也是标准中推荐的电机能效判定方法。IEEE 112B 法主要应用于电机实验中的能效判定, 其特点是在实验过程中, 在电机和负载之间安装扭矩仪, 实现对转矩和转速的精确测量, 进而求得电机效率。但扭矩仪的安装成本很高, 很难直接应用于工程实际中, 使得电机转子轴输出机械转矩难以直接测出, 导致输出机械功率求解十分困难, 进而影响电机损耗及运行效率的准确判定。

根据文献可以归纳目前能效辨识的基本方法

如下:

- (1) 铭牌法<sup>[2]</sup>;
- (2) 转差率法<sup>[3,4]</sup>;
- (3) 电流法<sup>[3]</sup>;
- (4) 损耗分析法<sup>[2,5]</sup>;
- (5) 等效电路法<sup>[2,6]</sup>;
- (6) 气隙转矩法<sup>[7,8,9]</sup>。

除上述方法之外, 能效辨识方法还可以在基本方法的基础上不断改进得到新的方法。例如, 电流法就是在铭牌法的基础上结合实测电机数据的改进法。本文将根据每种方法的原理及其误差精度进行对比研究, 以期有助于工作人员根据现场实际情况选出合适的辨识电机能效的方法。

电机能效的计算公式都可用下式表示:

$$\eta = P_2 / P_1 \quad (1)$$

其中:  $\eta$  为电机效率;  $P_2$  为输出功率;  $P_1$  为输入功率。由式可见效率是由电机的输出功率与输入功率的比值, 而在实际现场中输入功率从电源输入端可相对较容易地测定, 关键在于如何测定电机轴端的输出功率。

一般电机的损耗主要包括铜耗、铁耗、风摩耗和杂散损耗, 其损耗关系如图 1 所示。铜耗包括定子和转子铜耗, 它与电机负载电流平方成正比; 铁耗为定子和转子铁心中的损耗, 随磁通密度和频率而变; 风摩耗主要由轴承以及风阻等摩擦产生; 杂散损耗主要由定转子开槽和定转子磁动势中含有的谐波磁动势引起。其中铁耗和风摩耗为恒定损耗, 与负载无关; 铜耗和杂散损耗为可变损耗, 随负载

的变化而变化。

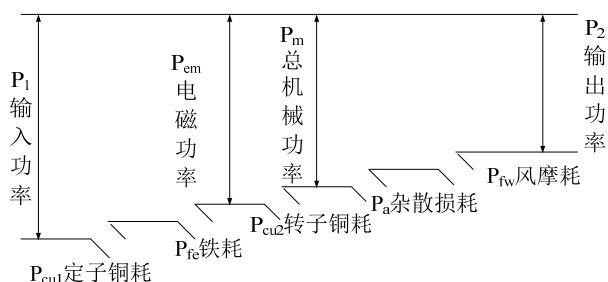


图 1 电机损耗示意图

通过上述损耗分析，现场辨识能效需要测试的数据及其相应的步骤如下：

- (1) 铭牌参数；
- (2) 转速传感器读取转子转速；
- (3) 电流互感器测定子电流；
- (4) 电压互感器测电机线电压；
- (5) 定子绕组电阻；
- (6) 空载实验；
- (7) 堵转实验。

## 1 鼠笼式异步电机效率辨识法

电机能效监测和评估通常是在现场条件下进行，因此所采用的能效辨识方法要求适用于现场条件，并具有一定的准确性。电机是量大面广的用电设备，因此其效率的现场测试方法也受到了相当的关注。使用者了解电机的效率往往是通过铭牌数据，铭牌上的效率为电机额定运行满载时的效率，而实际运行时的负载并不是恒定不变的。另外，实际工程现场中有相当一部分电机是经过维修的，例如更换定转子绕组，其额定运行时的效率也会与铭牌数据不同。因此仅依靠铭牌获得电机实时效率远远不够，必须通过其他方法在现场测得电机实际运行效率。下面将分别介绍几种电机效率现场测试方法的原理。

### 1.1 铭牌法<sup>[2]</sup>

最简单的现场能效辨识方法就是根据电机的铭牌数据直接获取。这种方法假定电机的效率是个恒定值且等于铭牌效率。但是电机的铭牌数据是电机在满载、额定电压情况下的数据，在实际工程中电机的机端电压与负载是不断变化的，尤其对于小功率、多级数的电机，电机的效率随着电压与负载变化更大。另外如果电机经过更换定转子绕组等维修，其铭牌数据更不能代表实际运行状态。可见这

种方法所得的效率误差很大。

### 1.2 转差率法<sup>[3,4]</sup>

转差率法假设电机负载与额定负载的比值等于转差率与额定负载转差率的比值，如此，电机的输出功率如下所示：

$$P_2 = (s/s_N) * P_N \quad (2)$$

式中： $s$ 为测量转差率； $s_N$ 为额定负载转差率； $P_N$ 为额定功率。

由式（2）可以看出转差率法的关键在于测取电机的实际转差率。这只需要在现场通过光感测速计获取电机转子转速即可实现，操作简单。然而在实际工程中电机的转速会受到负载的影响，一般允许电机的实际转差率与额定转差率有 $\pm 20\%$ 的偏差，尤其在轻载情况下，电机转速基本接近同步转速，这样电机的转差率误差很大，使效率的辨识产生较大误差。

### 1.3 电流法<sup>[3]</sup>

电流法假定电机负载与额定负载的比值等于电机电流与额定负载电流的比值，因此，电机轴端输出功率可表示如下：

$$P_2 = (I/I_N) * P_N \quad (3)$$

式中： $I$ 为实测定子电流； $I_N$ 为额定负载电流； $P_N$ 为额定输出功率。

由于电机定子电流中包含空载电流，且这部分电流不随负载的变化而变化，因此为了避免产生较大误差，应当对电机进行空载试验，测取空载电流，进而可以修正式（3）得出电机输出功率如下：

$$P_2 = ((I - I_0)/(I_N - I_0)) * P_N \quad (4)$$

式中： $I_0$ 为空载电流。

通过上述分析，式（3）往往在低负载时过高地估计负载值，而式（4）往往计算所得的负载要较实际负载低，因此最好的方法是将以上两式所获得的轴端输出功率取平均值，这将能较好地接近电机实际运行的负载。应该指出，对于一般通用的异步电机其铭牌电流值与实际满载电流值可能有10%的偏差，从而使这种方法的准确性受到较大影响。

### 1.4 损耗分析法<sup>[2,5]</sup>

损耗分析法是根据电机的定子铜耗、转子铜耗、铁耗、杂散损耗和风摩擦与输入功率之间的关系求取电机的输出功率。由于现场条件下并不能完全获得这些损耗值，因此这种方法经常与前述方法

相结合,通过对电压、电流、输入功率、绕组电阻及转速的测定,结合一些经验数据,然后求得五项损耗的数值,进而求得电机效率。这种方法与 IEEE 112E 法比较相近,但是其需要一台电机与被试电机用联轴器连接,辅助电机施以额定频率、额定电压,并在实验过程中使频率和电压保持不变。除此之外还需要做反转试验来求取电机的杂散损耗。可以看出这种方法试验要求很高,在现场中不易实现。本文采用 IEC 法估算电机杂散损耗的方法,规定额定负载时的杂散损耗约为电机额定输入功率的 0.5%。

求取电机各种损耗的具体方法如下:

1. 定子铜耗  $p_{cu1}=3*I_1^2*R_1$ ;
2. 铁耗  $p_{fe}=(E_1/E_2)^2*p_{ofe}$ ,  $p_{ofe}$  为空载铁耗;
3. 电磁功率  $P_M=P_1-p_{cu1}-p_{fe}$ ;
4. 转子铜耗  $p_{cu2}=s*P_M$ ;
5. 杂散损耗  $p_a$  大约为额定输入功率的 0.5%;
6. 风摩耗  $p_{fw}$  由空载试验获得。

由上推导公式可得电机输出功率为:

$$P_2=P_1-p_{cu1}-p_{cu2}-p_{fe}-p_{fw}-p_a$$

### 1.5 等效电路法<sup>[2,6]</sup>

等效电路法辨识电机效率是建立在电机等效电路的 6 个参数之上,即定子电阻  $R_1$ 、转子电阻  $R_2$ 、定子漏电抗  $X_1$ 、转子漏电抗  $X_2$ 、激磁电阻  $R_m$  和激磁电抗  $X_m$ , 如图 2 所示。

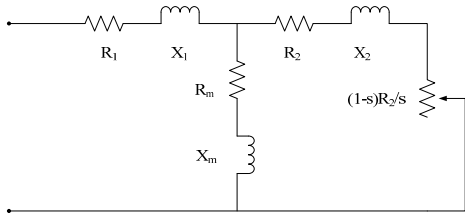


图 2 异步电机等效电路

等效电路法的特点在于在等效电路的 6 个参数已知的情况下便可求得任何负载情况下的电机效率。所以该方法中等效电路参数的求取尤为重要。而等效电路的参数并不是恒定不变的,比如转子电阻,这是因为电机转速由满载到空载之间变化较大,且受到鼠笼深槽效应和磁滞饱和等因素的影响。等效电路参数可以通过空载试验与堵转试验获得,然后利用有关参数与电机机端电气量求得不同转速情况下的输入功率、输出功率以及效率。这种方法与 IEEE 112F 法比较相近,其中杂散损耗是按照 IEC 法估算求得。

基于上述方法,空载实验和短路实验所测得的转子电阻、电抗并不能反应实际状况下电机的参数,这样导致电机效率估算出现较大偏差,为此提出一种基于可测电气量的转子电阻、电抗辨识方法。通过机端电压、电流与功率因数的关系通过下式求解电机的转子参数。

首先根据 T 型等效电路求取电机总阻抗如:

$$\frac{\dot{U}}{\dot{I}} = Z \quad (5)$$

然后从路的方法出发,求取电机的总阻抗为:

$$Z = (R_1 + jX_1) + \frac{(R_m + jX_m)Z_2}{(R_m + jX_m) + Z_2} \quad (6)$$

进而求得电机的转子电抗为:

$$Z_2 = \frac{(R_m + jX_m)(Z - R_1 - jX_1)}{(R_m + jX_m + R_1 + jX_1 - Z) + Z_2} \quad (7)$$

式中:  $\dot{U}$  输入电压;  $\dot{I}$  输入电流;  $Z_2$  为转子阻抗;  $R_m$  为激磁电阻;  $X_m$  为激磁电抗;  $R_1$  为定子电阻;  $X_1$  为定子电抗。

与前述方法相比,传统 T 型等效电路在空载和堵转运行条件下对电机的 T 型等效电路做了理想化近似,空载时忽略了转子回路,堵转时忽略了励磁回路,这样近似必然会引入误差。而新型 T 型等效电路通过电机可测电气量求解电机的转子阻抗避免了上述因素引起的误差,大大增加了电机效率辨识的精度。

T 型等效电路算法统一如下:

1. 定子铜耗  $p_{cu1}=3*I_1^2*R_1$ ;
2. 铁耗  $p_{fe}=3*I_m^2*R_m$ ,  $I_m=(U-I_1*Z_1)/Z_m$ ;
3. 转子铜耗  $p_{cu2}=3*I_2^2*R_2$ ,  $I_2=I_m-I_1$ ;
4. 杂散损耗  $p_a$  大约为额定输入功率的 0.5%;
5. 风摩耗  $p_{fw}$  由空载试验获得。

由以上推到公式可得电机效率为:

$$P_2=P_1-p_{cu1}-p_{cu2}-p_{fe}-p_{fw}-p_a \quad (8)$$

### 1.6 气隙转矩法<sup>[7,8,9]</sup>

在估算输出转矩的过程中,首先测试输入端电压和电流,得出  $\Delta t$  时间内的平均输入功率<sup>[6]</sup>  $P_1$ :

$$P_1 = \frac{\int (u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c) dt}{\Delta t} \quad (9)$$

其中,

$$\begin{cases} u_a = \frac{d\psi_a}{dt} + r i_a \\ u_b = \frac{d\psi_b}{dt} + r i_b \\ u_c = \frac{d\psi_c}{dt} + r i_c \end{cases} \quad (10)$$

式中： $u_a$ 、 $u_b$ 、 $u_c$ 为电动机相电压； $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$ 为电动机相电流。

将式(10)代入式(9)中可得：

$$P_1 = i_a \left( \frac{d\psi_a}{dt} + r i_a \right) + i_b \left( \frac{d\psi_b}{dt} + r i_b \right) + i_c \left( \frac{d\psi_c}{dt} + r i_c \right) \quad (11)$$

其中输入功率减去铁耗和铜耗等项后可得气隙转矩方程式如下：

$$T_{gap} = \frac{\sqrt{3}P}{6} [(i_A - i_B)\psi_{CA} + (2i_A + i_B)\psi_{AB}] - \frac{60P_{fe}}{2\pi n_1} \quad (12)$$

式中 $\psi_{CA}$ 和 $\psi_{AB}$ 分别代表 $t$ 时刻线电压 $u_{CA}$ 和 $u_{AB}$ 对应的绕组磁链。

$$\begin{cases} \psi_{CA}(t) = \psi_{CA}(0) + \int_0^t u_{CA}(\xi) + R(2i_A(\xi) + i_B(\xi))d\xi \\ \psi_{AB}(t) = \psi_{AB}(0) + \int_0^t u_{AB}(\xi) - R(i_A(\xi) - i_B(\xi))d\xi \end{cases} \quad (13)$$

式中： $\psi_{CA}(0)$ 和 $\psi_{AB}(0)$ 分别表示线电压 $u_{CA}$ 和 $u_{AB}$ 对应的绕组的初始磁链； $i_A$ 、 $i_B$ 为线电流； $u_{CA}$ 、 $u_{AB}$ 为线电压； $R$ 为线间电阻值； $P$ 为电机极对数。下图为气隙转矩法试验图。

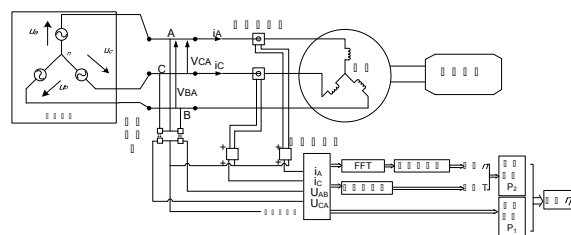


图3 气隙转矩法流程图

通过以上分析可知，将气隙转矩减去机械损耗和负载杂耗所对应转矩即可求出电机输出转矩，进而求得电机输出功率如下所示：

$$P_2 = T_{gap} * 2\pi * n / 60 - p_{fw} - p_a \quad (14)$$

根据上述求取电机输出转矩可知，电机风摩耗 $p_{fw}$ 和 $p_a$ 并不能从电机的机端电气量中直接获取，所以气隙转矩法仍需进行空载试验，这在工程实际中有点困难，但可以根据经验进行估算。气隙转矩法的优点在于我们可以通过电机机端电气量直接求取输出转矩，而不必考虑电机不平衡等因素。

## 2 实验验证

本文针对一台Y132S-4、5.5kW，定转子槽数为36/32的鼠笼式异步电机，分别利用上节的各种辨识方法计算其在不同电压不同负载下的电机效率并进行比较，如表1所示。其中空载电流 $I_0$ 为2.9A，额定转速为1440r/min，额定电流 $I_N$ 为11.64A。

表1 实测不同电压不同负载电机

		满载			75%负载			50%负载		
	U(V)	400	380	360	400	380	360	400	380	360
	$P_1$ (W)	6179	6138	6118	4590	4498	4563	3290	3238	3239
扭矩仪实测	$\eta$	0.86	0.857	0.848	0.866	0.867	0.865	0.856	0.864	0.869
转差率法	$P_2$ (W)	4400	4950	5775	3162	3712	4125	2337	2612	2887
	$\eta$	0.712	0.806	0.943	0.69	0.825	0.904	0.71	0.807	0.891
电流法	$P_2$ (W)	5206	5251	5485	3829	3705	3806	2869	2620	2530
	$\eta$	0.829	0.844	0.889	0.734	0.714	0.732	0.652	0.564	0.53
等效电路法	$P_2$ (W)	5067	5003	4919	3814	3738	3787	2707	2694	2718
	$\eta$	0.82	0.815	0.804	0.831	0.831	0.83	0.823	0.832	0.839
损耗分析法	$P_2$ (W)	5453	5402	5367	4061	3981	4061	2872	2847	2887
	$\eta$	0.882	0.88	0.877	0.844	0.885	0.89	0.873	0.879	0.891
气隙转矩法	$P_2$ (W)	5530	5586	5542	4147	4030	4078	2939	2893	2982
	$\eta$	0.867	0.877	0.863	0.871	0.871	0.869	0.868	0.871	0.879
		0.81%	2.33%	1.76%	0.57%	0.46%	0.49%	1.4%	0.81%	1.15%

根据有关分析，一般认为采用IEEE 112B进行试验，其试验值与设计值的差别将受到下面三方面因素的影响：设计计算的准确性：影响效率精度约为±0.5个百分点；制造和材料的波动：影响效率精

度约为±0.5个百分点；试验的精度：影响效率精度约为±0.5个百分点。由此可见，效率的设计值和试验值的最大偏差可达±1.5个百分点。

对于各种电动机效率的现场测试方法，无疑扭

矩仪实测方法精确度最高。这种方法是将转矩传感器代替联轴器放在电动机与负载设备之中间,通过电机轴端输出转矩和转速的直接测定来求取电机效率,不包含任何假定值如风摩耗、负载杂耗等,因此在原理上是最准确的,其测量精度如上述评估约为 $\pm 1\%$ (即对应于制造波动和试验误差)。应该指出,这种方法虽然精度较高,但在现场很难实施,在此主要作为试验精度比较的一个参照基准。

应该指出,在对电动机效率现场测试方法进行比较时,除了要求其准确性之外,还应考虑现场实施的可行性和经济性。例如某些电机运行现场,不允许将电动机与被驱动机械在机械连接上分解,也没有可改变电压的电源,因此就不可能进行空载试验来确定铁耗和风摩耗,于是一些精度尚可的测试方法,如等效电路法和损耗分析法就很难实施。针对此通常将这些方法与统计方法结合,对部分损耗或参数采取实测统计数据,使其既能方便操作,又能满足一定的精度。

从表 1 可以看出,转差率法辨识的电机效率随着电压的变化有很大波动,且误差最大达到 20%;电流法辨识电机效率随着负载而变化,误差最大达到 13%;传统等效电路法因为在空载和堵转运行条件下对电机的 T 型等效电路做了理想化近似,空载时忽略了转子回路,堵转时忽略了励磁回路,改进后的等效电路通过电机可测电气量获得的电机参数避免了上述原因的影响,其效率辨识精度有了很大的改善,综合上述不同方法得出误差为 4%左右;损耗分析法通过求取各个部分电机损耗,避免了依赖电机参数对效率的影响,其误差在 1.6%左右;气隙转矩法通过气隙磁场对电机转矩进行分析,仅仅依靠电机的机端电压与电流,大大避免了其他因素的影响,其误差约为 1.1%左右。

根据上述表格分析,可以得出现场辨识电机效率的精确度由高到低分别为:气隙转矩法、损耗分析法、T 型等效电路法、转差率法、电流法、铭牌法。

### 3 结束语

本文对三相异步电动机效率几种在线辨识方法的原理和误差精度分别进行了研究与分析;并对 T 型等效电路传统算法进行了改进,使其避免了依靠堵转试验求取转子电阻对电机能效精度的影响,大大提高了电机能效的辨识精度。最后以 5.5kW 鼠

笼式异步电机为例进行实验研究,对其在不同电压不同负载情况下利用不同方法辨识电机能效的精度进行了统计,结果表明气隙转矩法辨识精度最高,误差约为 1.1%,基本满足工程的要求。

本文研究成果对现场能效辨识应根据现场的实际条件、经济性以及测试方法的准确性提供了重要支持。

### 参考文献:

- [1] Kang S. J., Sul S. K.. Direct torque control of brushless DC motor with nonideal trapezoidal back EMF [J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 1995, 10(6): 796-802.
- [2] 李发海, 朱东起. 电机学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [3] John S. Hsu, John D. Kueck, Mitchell Olszewski. Comparison of Induction Motor Field Efficiency Evaluation Methods[J]. IEEE Transactions of Industry Applications, 1998, 34(1): 117-125.
- [4] Austin H. Bonnett. An Update on AC Induction Motor Efficiency[J]. IEEE Transactions On Industry Applications, 1994, 30(5): 1362-1372.
- [5] Charles L. Beanel, John W. Kilgore, Edgar F. Merrill. Determining Motor Efficiency by Field Testing[J]. IEEE Transactions On Industry Applications. 1987, 23(3): 440-443.
- [6] Paul G. Cummings, W. D. Bowers, Walter L. Martiny. Induction Motor Efficiency Test Methods[J]. IEEE Transactions On Industry Applications, 1981, 17(3): 253-272.
- [7] J. S. Hsu, H. H. Woodson, W. F. Weldon. Possible Errors In Measurement Of Air-Gap Torque Pulsations Of Induction Motors[J]. IEEE Transactions On Energy Conversion, 1992, 7(1): 202-208.
- [8] John S. Hsu, Patrick L. Sorenson. Field Assessment of Induction Motor Efficiency through Air-Gap Torque[J]. IEEE Transactions On Energy Conversion, 1996, 11(3): 489-494.
- [9] John S. Hsu. Field Test of Motor Efficiency and Load Changes through Air-Gap Torque [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2003, 18(3): 477-483.

### 作者简介:

王 庆(1988-), 男, 陕西渭南人, 硕士, 主要从事电力系统能效分析、电力需求侧管理等方面研究工作,  
E-mail: 15261873870@163.com;

王 峰(1978-), 男, 江苏南京人, 主要从事电力节能工

作, 13851999767@139.com。