



ATC 电机主要参数介绍及测量方法说明

文档版本	1.1
撰写日期	2020-10-26

© 2013 - 2020 杰发科技

本文档包含杰发科技的专有信息。未经授权，严禁复制或披露本文档包含的任何信息。

由于产品版本升级或其他原因，本文档内容会不定期进行更新。

修订历史

版本	日期	作者	修订说明
1.0	2019-06-14	ATC	文档初版
1.1	2020-10-26	ATC	优化文档内容，修正一些错误描述

版权声明

本文档包含 AutoChips 公司的机密信息。禁止未经授权使用或披露本文档包含的信息。对因未经 AutoChips 公司授权而全部或部分披露此文档内容而给 AutoChips 公司带来的任何损失或损害，AutoChips 公司将追究责任。

AutoChips 公司保留对此处任何信息进行更改的权利，此处的信息如有变更，恕不另行通知。AutoChips 公司对使用或依赖此处包含的信息不承担任何责任。

本文档的所有信息均“按原样”提供，不提供任何形式的明示，暗示，法定或其他形式的保证。**AutoChips** 公司明确拒绝对适销性，非侵权性和针对特定用途的适用性方面的所有暗示保证。**AutoChips** 公司对本文档可能使用、包含或提供的任何第三方软件不提供任何担保，并且用户同意仅向该等第三方寻求与此相关的任何担保索赔。**AutoChips** 公司对于根据用户规格或为符合特定标准或公开论坛而产生的任何交付物，也不承担任何责任。

目录

修订历史.....	2
版权声明.....	3
目录 4	
1 简介	6
1.1 本文目的	6
2 PMSM 电气参数介绍	7
2.1 转子极数	7
2.2 定子电阻	7
2.3 dq 轴电感	7
2.4 转矩常数	7
2.5 反电动势系数	8
2.6 转动惯量	8
2.7 最大电流	8
2.8 额定转速	8
3 PMSM 电气参数的测量	9
3.1 转子极对数.....	9
3.1.1 测量原理	9
3.1.2 测量方法	9
3.2 定子绕组内阻	11
3.2.1 测量原理	11
3.2.2 测量方法	11
3.2.3 测试举例	12
3.3 dq 轴电感	13
3.3.1 时间常数测量法原理.....	13
3.3.2 最值法原理及方法.....	16
3.3.3 测试举例	17

3.4	反电动势常数	18
3.4.1	测量原理	18
3.4.2	测量方法	18
3.4.3	测试举例	20
3.5	转动惯量的测量	22
4	缩略语	23

1 简介

1.1 本文目的

对永磁同步电机（Permanent Magnet Synchronous Motor，简称 PMSM）的主要参数进行介绍，并提供部分参数的测量方法。

永磁同步电机主要参数介绍的目的是为了使用户了解 MotorLib 库中所需电机参数对应的实际物理含义。

电机参数测量方法是为了使用户在使用 MotorLib 库中的 FOC 算法期间，通过正确的方式测量电机的参数，从而获取准确电机参数作为算法计算的基础，这对于 FOC 算法运算特别是无传感控制算法尤为重要。

2 PMSM 电气参数介绍

2.1 转子极数

转子极数 (Rotor Poles)：三相交流电机每组线圈都会产生 N、S 磁极，每个电机每相含有的磁极个数就是极数。由于磁极是成对出现的，所以电机有 2、4、6、8……极（偶数）。

2.2 定子电阻

定子电阻 (Stator Resistance) 是指电枢内部 (定子线圈) 的电阻，一般指相电阻，单位为： Ω 。对于星型连接 (Y 接法) 的定子线圈，可以通过对定子电阻参数未知的电机测试得到三种组合 (U-V, V-W, W-U) 的线电阻值，线电阻是相电阻的 2 倍，可测取 3 组线电阻后计算相电阻的均值。

2.3 dq 轴电感

永磁同步电机根据永磁体的安装方式不同可分为两类：表贴式永磁同步电机 (SPMSM) 和嵌入式永磁同步电机 (IPMSM)。

表贴式永磁同步电机 (SPMSM) 本身具有各向同性的结构，即直轴和交轴是相同的 ($L_d=L_q$)。通常情况下，其机械结构产生更广泛的气隙，这反过来又意味着弱磁能力更低。

嵌入式永磁同步电机 (IPMSM) 显示出各向异性结构 ($L_d < L_q$)。这一特殊的磁场结构可以用来产生更大的电磁转矩。IPMSM 具有优良的机械结构，通常气隙很狭窄，从而弱磁能力更好。

对未知电感参数的电机， L_q 和 L_d 可以通过电感表来测得。方法如下：

将电机从电路中断开，用电感表接在电机的两相上，非常地缓慢转动电机转子（要防止感应电压对测量的影响），如果电感表测量数值的最大值与最小值差别不大（小于 10%），说明该电机为表贴式永磁同步电机 (SPMSM)，此时可以将两个值取平均即为电机相电感 ($L=L_q=L_d$)，否则为内嵌式永磁同步电机 (IPMSM)，且电感表测得数值的最大值为 2 倍的 L_q ，最小值为 2 倍的 L_d （对于 Y 形接法的电机来说，电感表测得的数据是两相绕组串连的电感）。

2.4 转矩常数

转矩常数：电动机所产生转矩的比例系数，一般表示每安培电枢电流所能产生的转矩大小，单位为： $N \cdot m/A$ 。

2.5 反电动势系数

电动机旋转时，电枢绕组内部切割磁力线所感应的电动势相对于转速的比例系数，也称为发电系数或感应电动势系数。单位为：V/rpm。

2.6 转动惯量

惯量是具有质量的物体维持其固有运动状态的一种性质。转动惯量是指电机转子和负载转动惯量之和，单位为： kg m^2 。转动惯量会影响到 FOC 速度环 PI 调节器的比例和积分增益，还有开环启动阶段的加速度。如果无法得到准确的值，可以用手转动电机和负载根据电机转子的转动惯量来大致估计整体的转动惯量。

2.7 最大电流

电机最大电流，单位为：A。指电机相电流的峰值。该参数非常重要，无法通过测量方式获取，可通过查询电机规格书得到。电机算法工作的标幺电流大小一般根据此电流进行。

2.8 额定转速

电机额定转速，单位为：rpm。电机能达到最大扭矩输出的最高转速。该参数无法通过测量方式获取，可通过查询电机规格书得到。

3 PMSM 电气参数的测量

3.1 转子极对数

3.1.1 测量原理

转子极对数定义了机械角度和电角度之间的比值。转子极对数是指转子中所包含的 S 极与 N 极永磁体的数量。

3.1.2 测量方法

测量转子极对数所需要用到仪器取决于所测量的方法。

3.1.2.1 极对数较少时的测量方法

测试步骤：

1. 将电机的 A 相线缆连接在直流电压源的正接线柱，B、C 相线缆连接在直流电压源的负接线柱上。
2. 将电源的电流限制设定为电机额定电流的 10%，手动转动转轴，以便让转轴转向在一个稳定的角度位置。
3. 在转子转动后的每个稳定位置做个标记。
4. 转子极对数即等于稳定位置的个数。

当电机相序不明确时，可以任意一相接电源正端，另外两相接负端，按上述步骤记录稳定位置的个数。



图 1 转子极对数（数量较少时）的测量方法

3.1.2.2 极对数较多时的测量方法

当极对数较多时，有两种方法来测量。每种方法都需要示波器。

- 方法 1：使用电流表加上三相逆变器，三相逆变器用于产生驱动电流带动电机旋转的方式来测量。
- 方法 2：使用电压表和用于驱动被测电机旋转的驱动电机。

测试方法 1 步骤：

1. 控制板通过三相逆变器以固定的频率旋转，转速尽可能高一些。
2. 通过示波器测量相电流的频率。如果控制正确，电机相电流的频率与三相逆变器产生的电频率一定相等。
3. 通过测速装置测量转子的转速。
4. 最后通过以下公式即可计算出极对数。取计算结果最接近的整数值，即为 PMSM 的极对数。

$$p = \frac{60 \cdot f}{n} = \frac{60 \times 53.76}{1600} = 2$$

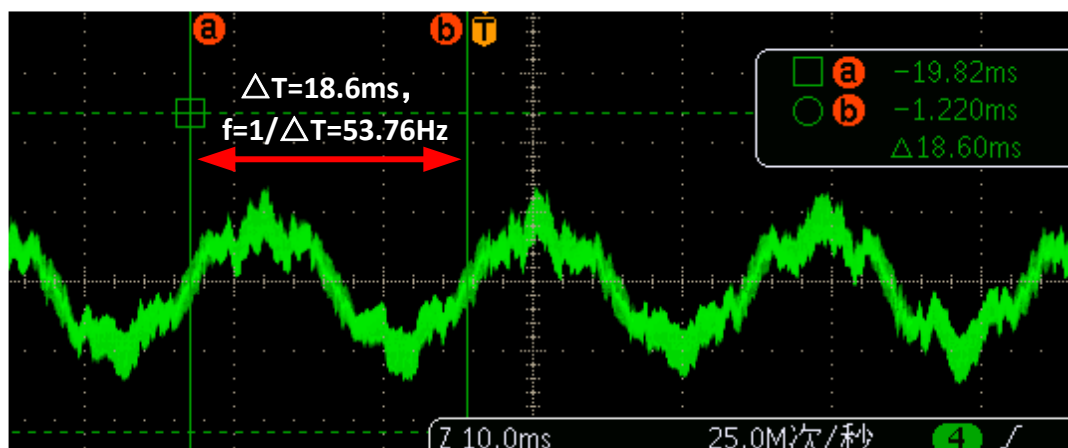


图 2 电流波形计算极对数示例

测试方法 2 步骤：

1. 利用外部驱动电机拖动待测 PMSM 以恒定的速度旋转。
2. 测量 PMSM 绕组上所产生的电压（反电势）的频率。
3. 通过测速装置测量转子的转速。
4. 与方法 1 相同的公式计算极对数。

3.2 定子绕组内阻

3.2.1 测量原理

定子绕组的内阻 R_s 定义为：每相线圈的接线端子与绕组连接中心之间的电阻值。绕组的内阻与温度相关，常以冷态 25℃ 下的内阻值为准。

定子内阻 R_s 在特定的工作温度 t (℃) 下的值可通过在 t_0 下测量的电阻值来计算：

$$R_s = R_0(1 + \alpha\Delta t)$$

其中 α 是一个和材料相关的常数，对于电机绕组常用材料铜， $\alpha = 0.004K^{-1}$ 。当定子绕组温升达到 60℃（即绕组温度为 85℃）时，其电阻值变化为：

$$R_s = R_0(1 + 0.004 \times 60) = 1.24R_0$$

3.2.2 测量方法

定子内阻的测量可以采用普通的 RLC 表来测量（当电机电阻大于 2Ω 时），为了获取更高精度的电阻值，建议使用电桥测量。

当定子内阻大于 2Ω 时，内阻可以使用 RLC 表来测量，常见小功率电机的定子绕组一般是星型连接（Y 接）方式，所以定子内阻等于测量值的一半。下图展示了使用 RLC 表（UNI-T UT603 型）测量 Y 接电机定子内阻的方法。

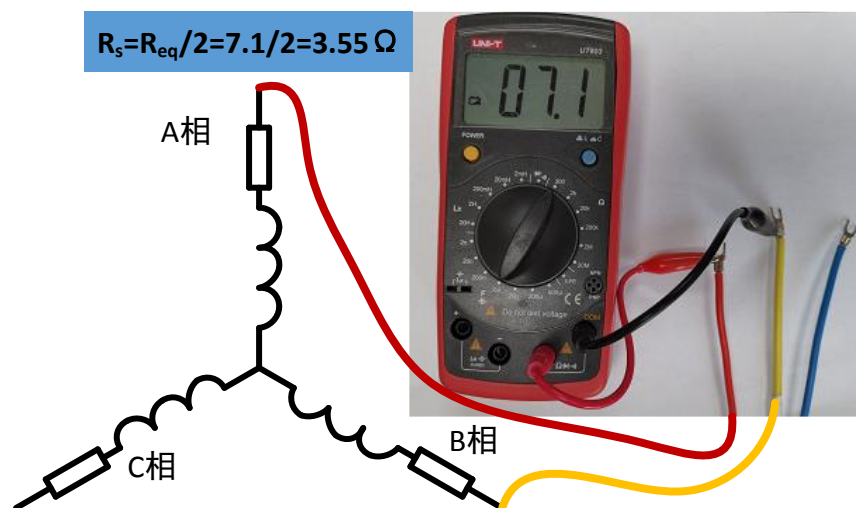


图 3 RLC 表测量 Y 接绕组定子内阻

对于定子绕组为三角形接法（△型）时，测量方法与 Y 接相同，但相电阻结果是电阻测量表显值的 1.5 倍。如图 4 所示。

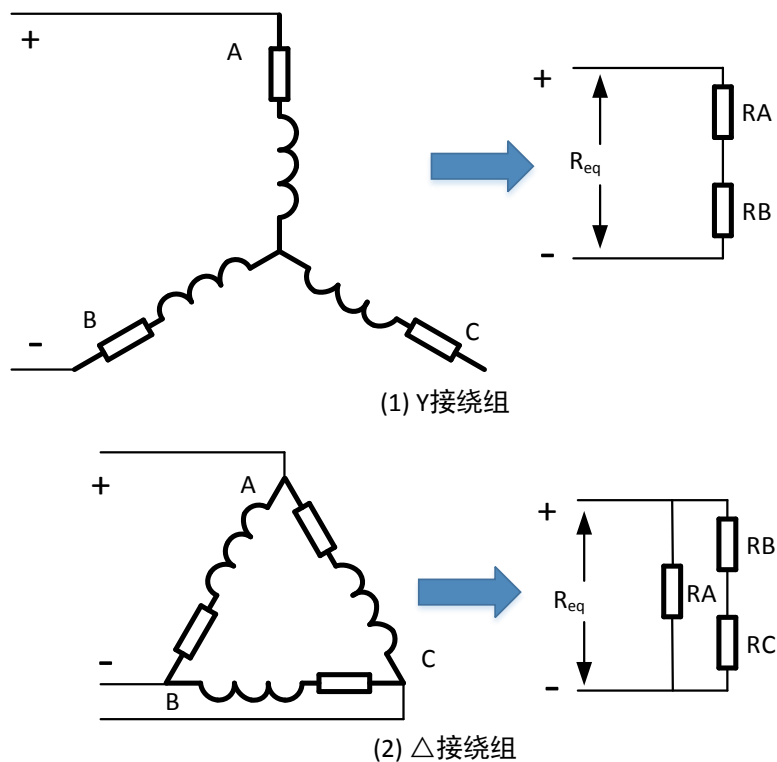


图 4 不同接法绕组的定子电阻测量

$$R = \begin{cases} 0.5R_{eq}, Y \\ 1.5R_{eq}, \Delta \end{cases}$$

式中 R_{eq} 是电阻测量的表显值。

当定子内阻值较小时，则应该采用精度较高的电桥来测量，电桥的测量范围一般在 $10\text{m}\Omega \sim 10\text{k}\Omega$ 之间。使用电桥测试电机电阻时，设置测量频率为 20Hz 为佳，测试方法同 RLC 表。

3.2.3 测试举例

以 LG-400W 电机测试为例：

测试时，定义三相线缆中白线为 A 相，绿线为 B 相，黑线为 C 相。采用数字电桥（KEYSIGHT E4980AL 型）测量 LG-400W 电机，分别测量了 AB 线电阻，BC 线电阻，AC 线电阻。测量的数据如下：

线电阻	阻值
R_{AB}	32.2mΩ
R_{BC}	31.7mΩ
R_{CA}	32.1mΩ

三相线缆的电阻差异不大，每相的内阻值可近似认为相等。由此求得定子绕组内阻：

$$R_s = \frac{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}}{3} \times \frac{1}{2} = \frac{32.2 + 31.7 + 32.1}{3} \times \frac{1}{2} = 16.0\text{m}\Omega$$

3.3 dq 轴电感

3.3.1 时间常数测量法原理

对于内嵌式永磁同步电机，因为其为凸极式电机，q 轴磁阻较低，其定子绕组的同步电感是不同的 ($L_d < L_q$)。表贴式永磁同步电机 (SPMSM) 绕组的同步电感几乎相等，因为永磁体是表贴式安装的，磁阻在每个位置都是相同的，也就是说：

$$\mu_{PM} \approx \mu_{air}$$

$$L_d \approx L_q$$

其中， μ_{PM} 是永磁体的相对磁导率， μ_{air} 是空气的相对磁导率。

下图显示了内嵌式 IPMSM 电机的 d 轴和 q 轴磁阻路径。

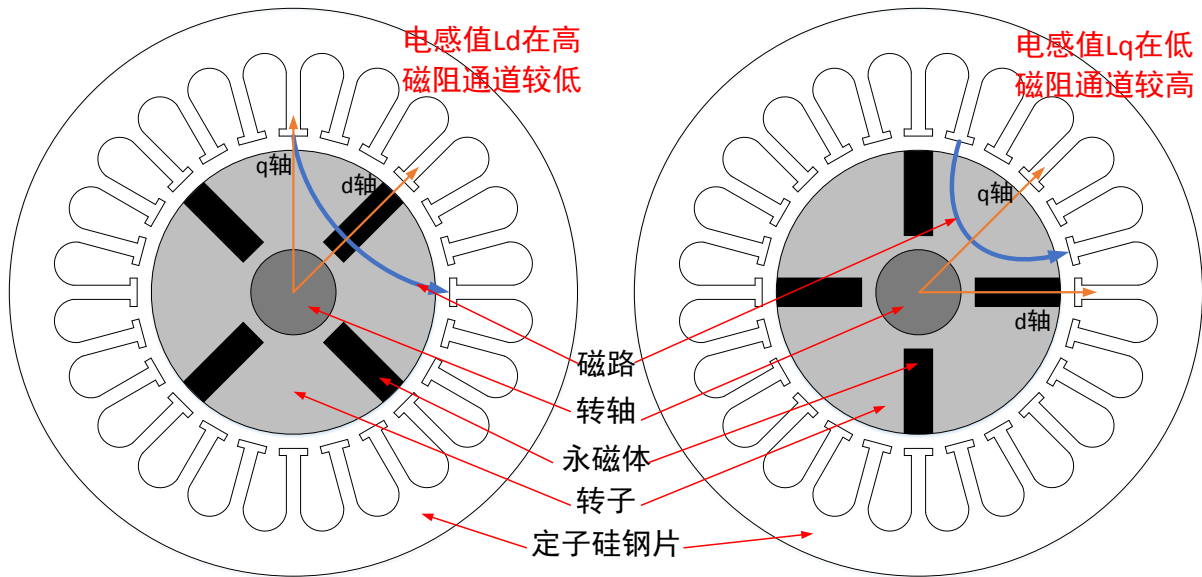


图 5 IPMSM 电机的 d 轴和 q 轴磁阻路径

为了测量同步电感，首先要创建一个平衡的三相电流条件。当转子磁极与 A 相线圈的中心对齐时，此时所测量出的等效电感可以推算出 L_d ，将转子转动一定角度则可以推算出 L_q 。测量电路如图 6 所示。

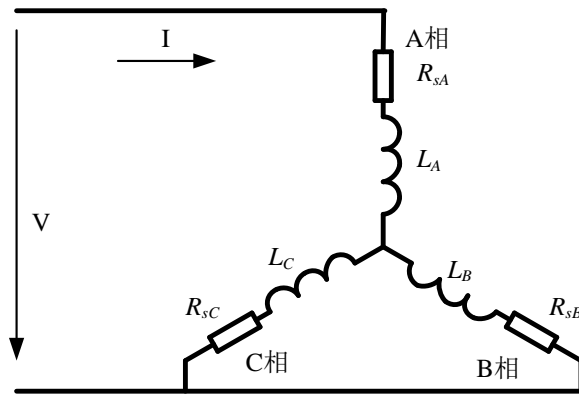


图 6 电感测量电路

根据转子角度 θ 可以测量出 d 轴和 q 轴的电感。

$$L_d = \frac{2}{3} L, (\theta = 0)$$

$$L_q = \frac{2}{3} L, \left(\theta = \frac{\pi}{2} \right)$$

其中，L 代表电感测量电路中定子绕组串并连接的总电感。

当转子与 A 相对齐 ($\theta = 0$) 后将转子锁定，则电感测量电路的电流响应为一阶 RL 电路。

$$i_d = \frac{V}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

其中 $\tau = \frac{L}{R}$ 为电路的时间常数。

测量到了 τ 之后，电感 L_d 可按照如下公式计算：

$$L_d = \frac{2}{3} \tau R$$

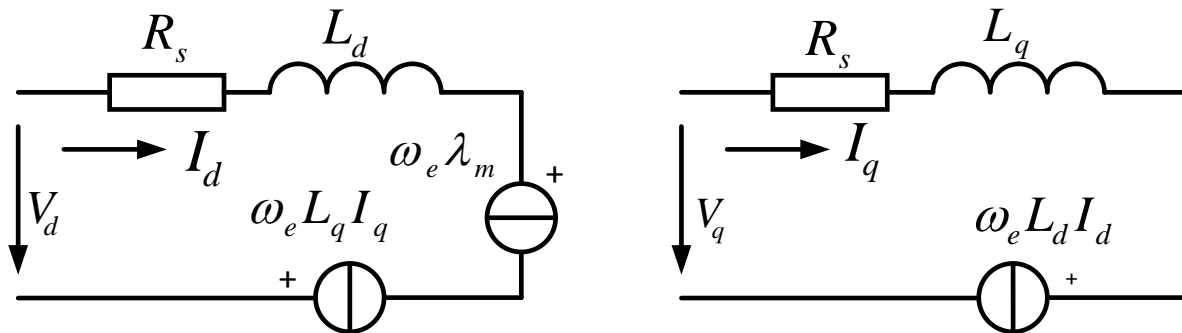


图 7 将转子转轴锁定在 d, q 轴时的 PMSM 等效电路模型

图中 λ_m 是永磁体 PM 所产生的磁链。

由于 $V_d = 2V/3$, $V_q = 0$ 并且 I 等于 I_d , 并且电路的总电阻等于 $3R_s/2$, 从电源端来看, 电路的等效电感等于 $3L_d/2$ 。

L_q 也可以将转子锁定在 90° 时采用类似的方式测量。q 轴的对齐方法：对准 q 轴可以通过将 B 相接端子连接电源的正接线端，C 相线圈接线端子连接电源的负接线端，A 相悬空来实现。

d 轴电感 L_d 测量步骤：

1. 将转子与 A 相对齐：将 A 相接端子连接直流电源的正端，B、C 相连接电源的负端。
2. 锁定转子转轴。
3. 施加阶跃电压：B、C 相接电源正端，A 相接电源负端。电压电平的设定以使产生的电流约为电机额定电流的 10% 为宜。
4. 使用电流传感器测量电流的阶跃响应。
5. 计算电感 L_d 。

q 轴电感 L_q 测量步骤:

1. 将转子与 q 轴对齐: 将 B 相连接电源正端, C 相连接电源负端, A 相悬空。
2. 锁定转子转轴, 防止 q 轴电压因阶跃响应产生电磁转矩。
3. 施加一个阶跃电压: A 相接电源正端, B、C 相接电源负端。电压电平的设定以使产生的电流约为电机额定电流的 10% 为宜。
4. 使用电流传感器测量电流的阶跃响应。
5. 计算电感 L_q 。

3.3.2 最值法原理及方法

DQ 轴电感也可以采用普通的 RLC 表来测量 (当电机电感为几十 mH 以上), 为了获取更高更精度的电感值时或电机电感为 μH 级时, 建议使用电桥测量。

当电机电感为几十 mH 以上, 电感可以使用普通的 RLC 测量仪来测量, 对于星型连接 (Y 接) 方式, 定子电感等于测量值得一半。测量方法可参考 RLC 测量仪测量定子电阻。

用 RLC 表接在电机的线-线端, 非常地缓慢转动电机转子 (要防止感应电压对测量的影响), 如果电感表示数的最大值最小值差别不大 (小于 10%), 说明该电机为表贴式永磁电机 (SPMSM), 此时可以将两个值取平均即为电机相电感 ($L_{\text{avg}} = L_q = L_d$), 否则为内嵌式永磁电机 (IPMSM), 且 L_q 是电感表测得数值的最大值的一半, L_d 为最小值的一半 (对于 Y 形接法的电机来说, 电感表测得的数据是两相绕组串连的电感)。

参考图 4, 与定子电阻的测量类似, 对于定子绕组为 Δ 接法的电机, 电感值是测量值的 1.5 倍。

对于 Y 接法:

$$L_d = 0.5L_{\min}$$

$$L_q = 0.5L_{\max}$$

对于 Δ 接法:

$$L_d = 1.5L_{\min}$$

$$L_q = 1.5L_{\max}$$

式中, L_{\min} 是表测电感值的最小值, L_{\max} 是表测电感值的最大值。

当电机电感较小或需要得到较高精度电感时, 建议使用电桥测试电机电感, 设置测量频率为 1kHz 为佳, 测试方法与电桥测量定子电阻类似, 电桥的两个接线端子分别接电机三相线的其中两相。

3.3.3 测试举例

以 LG-400W 电机测试为例：

测试时，定义三相线缆中白线为 A 相，绿线为 B 相，黑线为 C 相。电源输出调整为 0.3V。A 相线缆连接在直流电压源的正接线柱上，B、C 相线缆连接在直流电压源的负接线柱上。通电后转子运动到某一固定的角度位置，此为一个 d 轴；此时锁定转子让其固定在 d 轴位置上，然后断开电源。采用 RLC 仪表的正接线端连 A 相线缆，负接线端连 B、C 相线缆。此时测得的电感值为 146 μ H。



图 8 RLC 表测 Ld

断电后，将 B 相接线端子连接电源的正接线端，C 相线圈接线端子连接电源的负接线端，A 相接线端子悬空。转子运动到某一固定的角度位置，此为一个 q 轴；此时锁定转子让其固定在 q 轴位置上，然后断开电源。采用 RLC 仪表的正接线端连 A 相线缆，负接线端连 B、C 相线缆。此时测得的电感值为 153 μ H。



图 9 RLC 表测 Lq

由此算出 d 轴电感、q 轴电感分别为： $L_d=73\mu\text{H}$ ， $L_q=76.5\mu\text{H}$ 。

3.4 反电动势常数

3.4.1 测量原理

反电动势（BEMF）常数可以通过驱动转子以 ω_m 的恒定转速运动的情况下，获取电机接线端子上的无负载线电压 V_{pk} 来获得。反电动势常数为反电动势电压和电角速度/频率的比值。

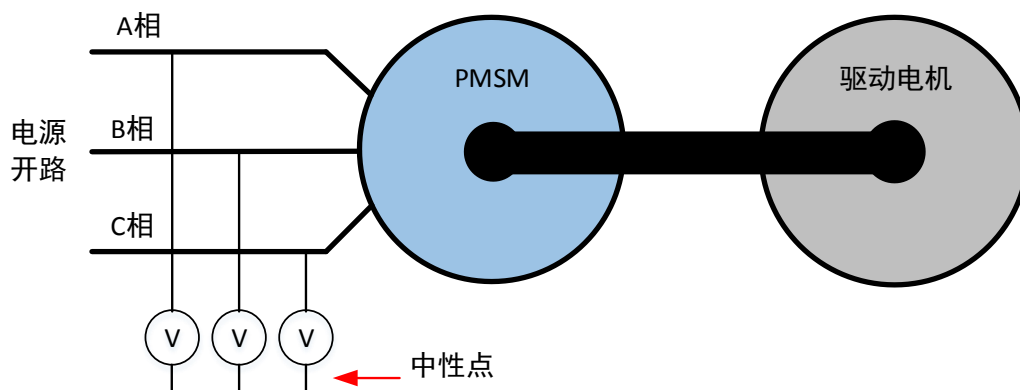


图 10 反电动常数三相测量方法

3.4.2 测量方法

测量反电动势常数需要的设备有：示波器，电压（差分）探头，驱动电机。

反电动势常数的测量步骤：

1. 外部驱动电机以恒定的转速旋转，转速尽可能高一些。因为感应电压一般较小，过小的感应电压会降低测量精度。
2. 单相测量：测量产生的相电压（某一相的接线端子中性点之间的电压）。通常中性点不容易获得，那么可以测量线电压。

三相测量：如果中性点不容易获得，可以通过将三个电压探头的一边连接到一起来创建一个人参为参考的中性点。

3. 若以 $\text{V}/\text{krpm}/\text{相}$ 为单位, 根据下面的公式计算反电动势常数：

$$K_e = \frac{E}{n} \times 1000$$

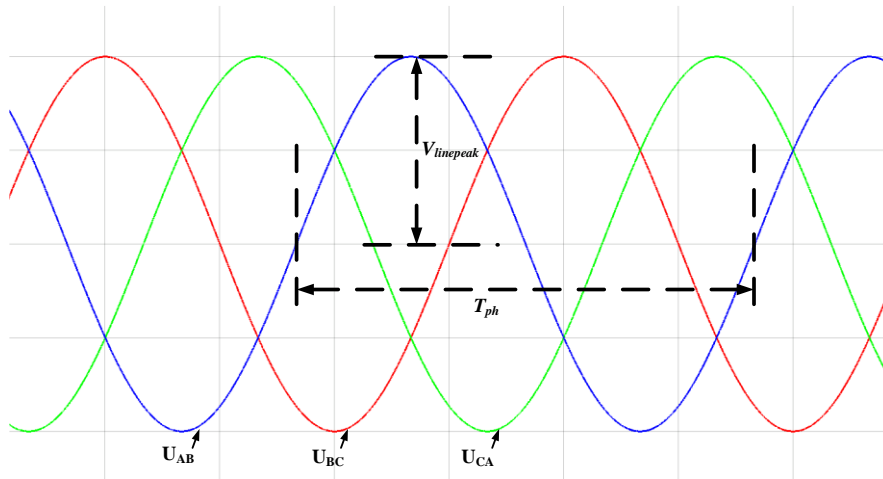
4. 若以 V s/rad 为单位, 根据下面的公式计算反电动势常数。

单相测量的情况（线电压测量）：

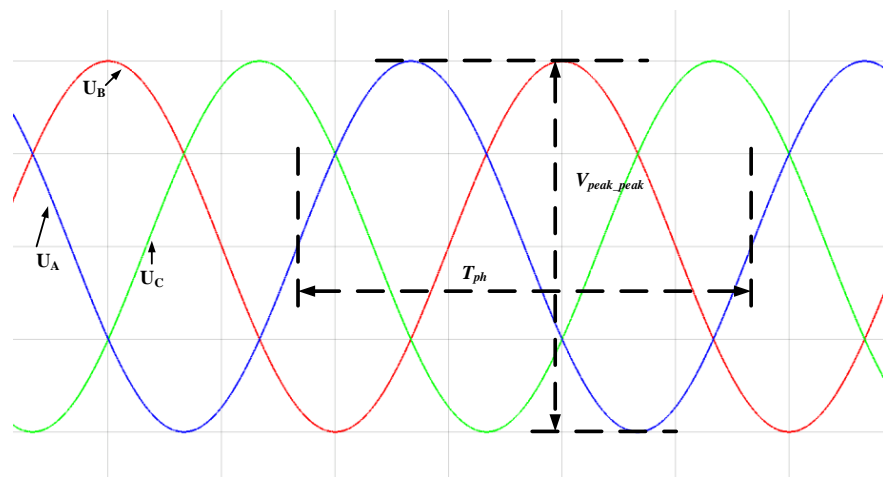
$$K_e = \frac{V_{linepeak}}{\sqrt{3}\omega_e} = \frac{V_{linepeak} \times T_{ph}}{\sqrt{3} \times 2\pi}$$

三相测量的情况（相电压测量）：

$$K_e = \frac{V_{phasepeak}}{\omega_e} = \frac{V_{peak_peak} \times T_{ph}}{2 \times 2\pi}$$



A. 单相测量



B. 三相测量

图 11 测量反电动势常数

3.4.3 测试举例

以 LG 400W 电机测试为例：

测试时，定义三相线缆中白线为 A 相，绿线为 B 相，黑线为 C 相。被测电机在驱动电机以 1000rpm 的转速驱动下，A，B，C 三相接线端子分别接示波器的三路信号测量通道：第一路为 A 相，第二路为 B 相，第三路为 C 相。A，B，C 三相并联三路 20kΩ 电阻，另一端接电机外壳（可认为是接地）。示波器波形如图 12 所示。此时转子所产生的感应电动势幅值为 3.7V。

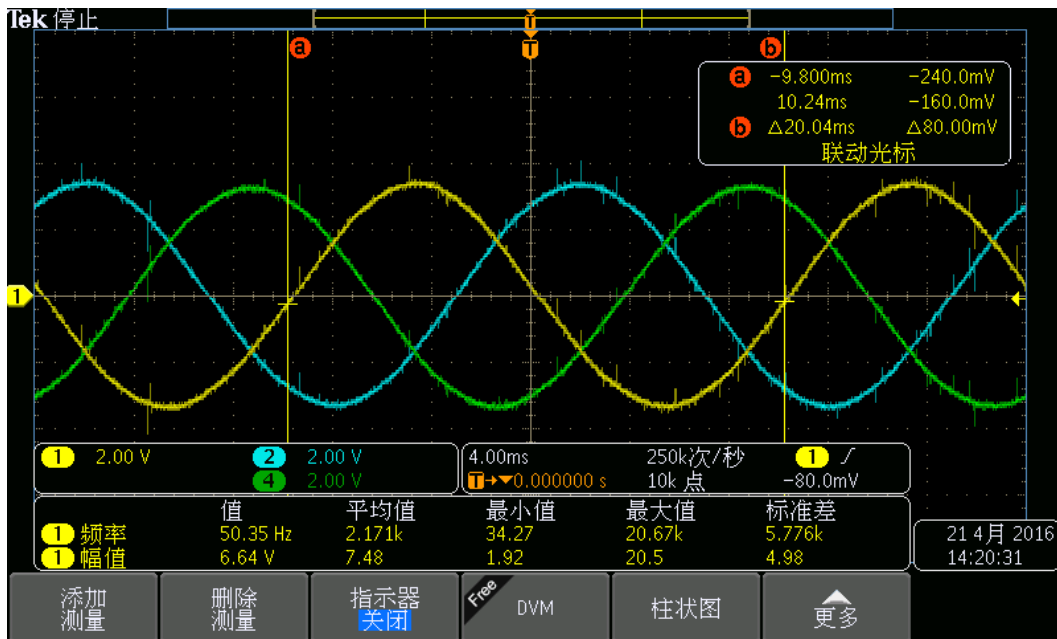


图 12 转子转速为 1000rpm 时的反电动势波形

被测电机在驱动电机以 625rpm 的转速驱动下，A，B，C 三相接线端子分别接示波器的三路信号测量通道：第一路为 A 相，第二路为 B 相，第三路为 C 相。A，B，C 三相并联三路 20kΩ 电阻，另一端接电机外壳（可认为是接地）。示波器波形如图 13 所示。此时转子所产生的感应电动势幅值为 2.2V。

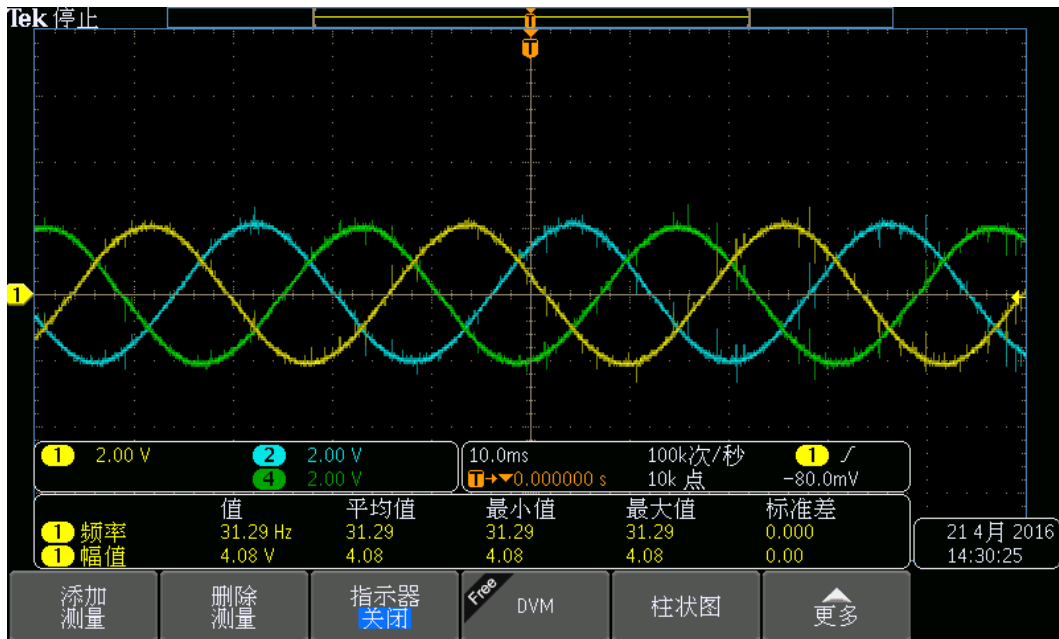


图 13 转子转速为 625 rpm 时的反电动势波形

被测电机在驱动电机以 500rpm 的转速驱动下，A，B，C 三相接线端子分别接示波器的三路信号测量通道：第一路为 A 相，第二路为 B 相，第三路为 C 相。A，B，C 三相并联三路 20kΩ 电阻，另一端接电机外壳（可认为是接地）。示波器波形如图 14 所示。此时转子所产生的感应电动势幅值为 1.8V。

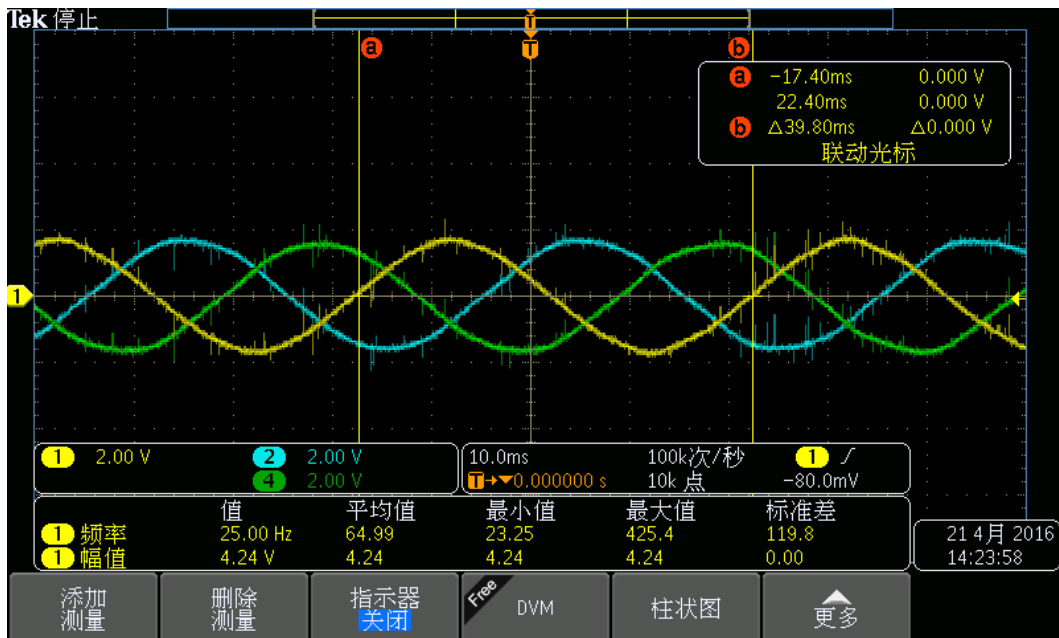


图 14 转子转速为 500 rpm 时的反电动势波形

转子转速(rpm)	反电动势幅值(V)	反电动势常数($V \cdot s / rad$)
1000	3.7	0.034
625	2.2	0.033
500	1.8	0.035

由此算得的反电动势常数为：0.034V s/rad

3.5 转动惯量的测量

根据简化的电机运动方程：

$$T_e - T_L = J \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$$

在电机恒转矩运行过程中，测量时间 Δt 内电机转速的变化 $\Delta\omega$ ，即可计算得转动惯量。

保持永磁电机定子端开路，首先用测功机以恒定转矩拖动电机加速运行，分别记录 t_1 与 t_2 时刻转速 ω_1 与 ω_2 ；然后让电机自由停机，并分别记录 t_3 与 t_4 时刻的转速 ω_3 与 ω_4 。列写方程组：

$$\begin{cases} J \frac{\omega_2 - \omega_1}{t_2 - t_1} = T_m - T_0 \\ J \frac{\omega_4 - \omega_3}{t_4 - t_3} = 0 - T_0 \end{cases}$$

式中 T_m 为测功机施加给永磁电机转子的转矩，可由测功机的功率与转速求得，即 $T_m = P / (n_p \omega)$ ， T_0 为空载转矩。解方程组即可得转动惯量 J 。

4 缩略语

PMSM	Permanent Magnet Synchronous Motor	永磁同步电机
SPMSM	Surface permanent magnet synchronous motor	表贴式永磁同步电机
IPMSM	Interior permanent magnet synchronous motor	内嵌式永磁同步电机
FOC	Field Oriented Control	磁场定向控制