



## 用于伺服驱动器的伺服电机参数及其正确换算与比较

**想要实现所需的机械性能，按照驱动器制造商所规定的正确计量单位使用伺服电机参数十分重要。但是，如果不能正确地理解电机与驱动器参数细节相关的规定术语、单位、命名法和参数之间的换算方式，那么很可能会使用错误的单位，进而增加机器设计开发和制造过程的难度。**

本白皮书详细说明了机器设计人员如何克服伺服电机参数相关困难，并将它们正确用于各种电机或驱动器，以满足具体要求。文中全面介绍了惯用的伺服单位标准和常用的命名以及它们之间适用的换算方式。

尽管输入伺服驱动器的电机参数数据必须使用设计人员特别规定的单位，但是这类数据与它们在电机数据表中所对应的规定计量单位之间往往存在着差异。

如果没有及早发现的话，这种差异可能会变得十分棘手，将对机器设计开发和制造过程产生负面影响。这种问题存在的原因很简单 - 在伺服行业中，没有统一采用的方法来发布伺服电机数据，没有用于伺服驱动器电机参数输入的标准单位集或术语表，也没有可用的不同伺服换向方法。

只有正确理解电机参数的换算方式，才能实现驱动器参数输入、电机对比、轴操作微调和故障排除。否则，机器设计人员就会很容易遇到机器运行缺陷，并且无法意识到根本原因在于错误的参数单位！要实现所需的伺服控制回路运行效果，输入正确的驱动器参数单位就至关重要。如果输入不准确，伺服驱动器的控制算法就无法根据反复变化的机制（命令、负载和反馈信号）正确地执行与重复执行操作。

所幸的是，用于无刷直流或交流 PM（永磁）、3 相 (Ø) 同步伺服电机换向的主要电子控制方法仅有两种：正弦波和 6 步换向（即梯形换向）。尽管大多数伺服电机参数使用三种方式中的其中一种进行表示，但它们通常会在两种不同的电子换向方式之间混用。（请参阅第 6 页的电机参数换算表。）

用于描述伺服电机的一般术语有:无刷直流伺服电机 (BLDC 或 BLDCM)、无刷直流/交流同步伺服电机、交流永磁 (PM) 伺服电机以及其他类似的命名规则。其中大部分术语由多家著名的伺服制造商在 20 世纪 80 年代提出。他们的目标是鼓励市场采用,并深入理解采用带有电子换向的交流永磁式伺服电机 (PM AC 电机) 可以取代永磁直流有刷伺服电机的伺服功能这一理念。

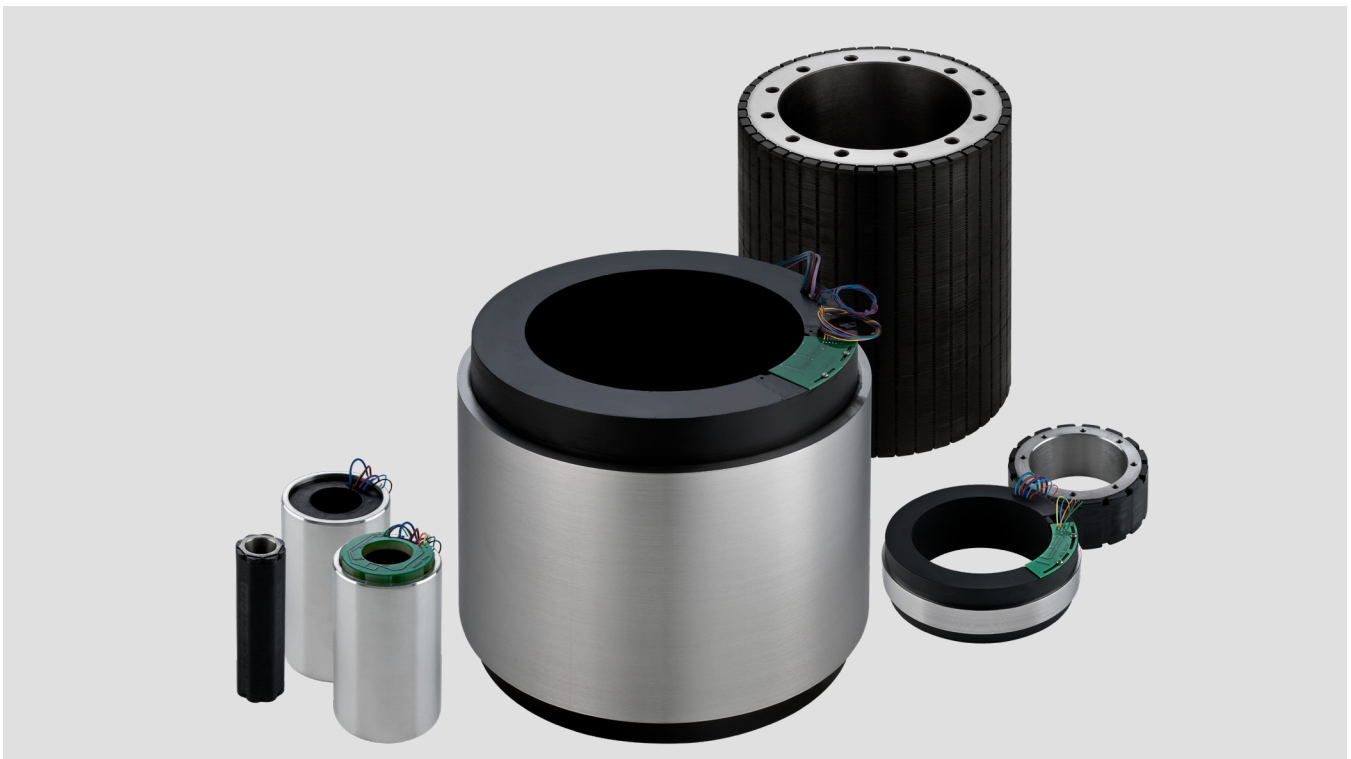
无论它们的命名规则有何不同,这些电机基本采用了相同的设计,因为它们均为 3 相 (Ø) 交流 PM 同步电机。多年来,关于业内命名规则的差异一直存在许多种解释,比如那些强调反电动势特性的命名规则:纯正弦波换向即为正弦换向,梯形换向即为六步换向。而导致这些差异的原因与克服市场中有关技术壁垒的错误认知有着更大的关系。

最常用的换向控制方法通常是 (1) 正弦波或正弦换向和 (2) 6 步或块换向 (即梯形换向), 其中的每个电循环被定义为六个换向步骤。

按照定义, 计量单位表示某种物理量的特定量, 我们根据惯例和法律对其予以规定和采用, 以用作同一物理量的计量标准。<sup>1</sup> 因此, 前文所述的不同伺服电机换向方法会发展出不同的惯用标准参数单位也就显得十分合理了。

为此, 我们提出了一个重要的要求, 用于在每一种应用场景中实现理想的伺服电机性能。要实现理想的运行效果, 必须根据伺服驱动器制造商所规定的具体定义, 将电机的特定物理参数、特定数量和单位进行正确换算并准确输入到控制驱动器的数据库中。对于微调轴操作、排除故障以及对比伺服电机而言, 理解具体的参数和单位同样很重要。

**科尔摩根的 KBM 伺服电机系列可直接内置于机器中, 利用机器自身的轴承来支撑转子。**

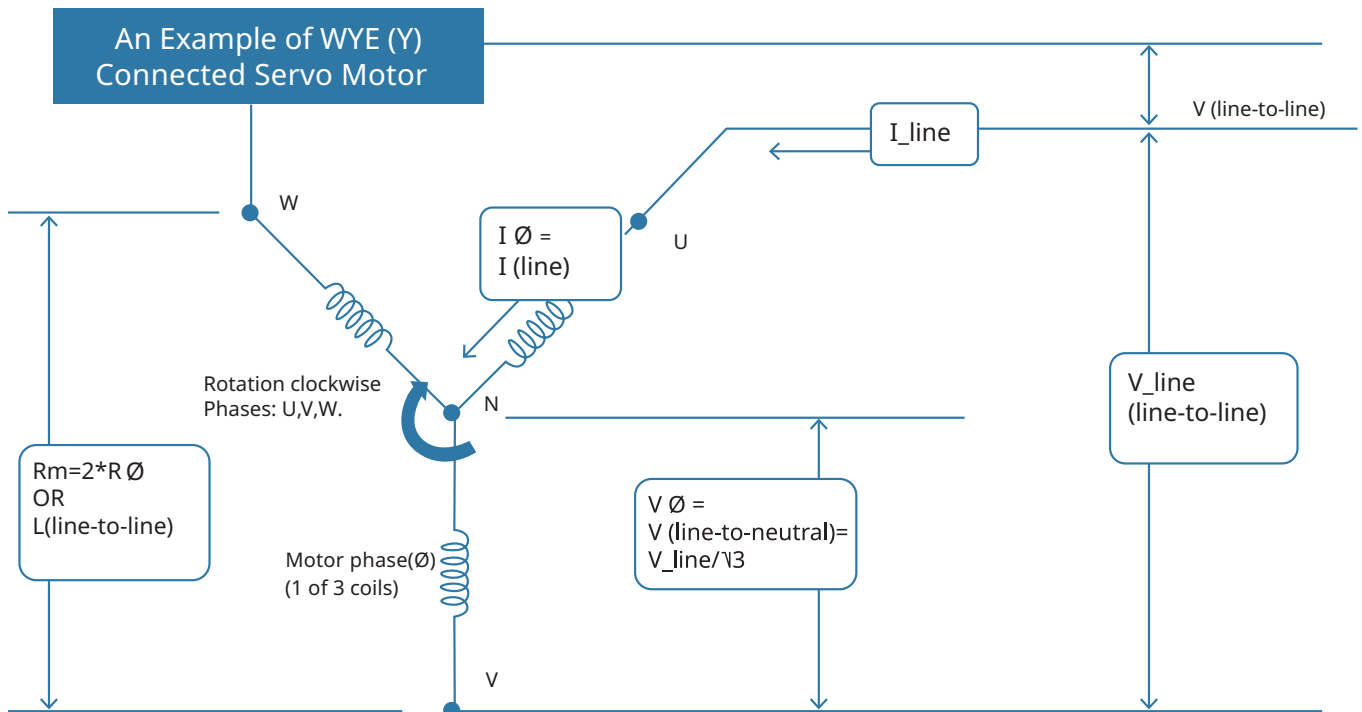


**观察发现:**问题的源头往往在于两种换向方法的表示单位和命名规则十分模糊，以及电机与驱动器制造商所用参数和表示单位的不统一。

为了有效克服这类问题并实现您的目标，只有加深对于电机单位和命名法的理解，才能正确地进行伺服电机对比并完成伺服驱动器的参数换算与输入。

由于运动控制领域的知识与技术已经发展成熟，大多数 3 相 (Ø) 交流 PM 伺服电机都采用了星形 (Y 形) 绕线式电枢，特别是对于正弦换向而言。在本文中，我们同样采用了星形 (Y 形) 绕线式电枢来说明不同的惯用标准单位以及它们之间的换算方式。

**下图设定条件:**我们选择了一台 3 相星形 (Y 形) 接线电机，当它被反向驱动用作发电机时，它通常能够呈现出 3 相正弦电动势波形，并且相比于三角形 (Δ) 绕线式电枢，它具有电平衡的绕组方式。请注意:扭矩角推进、磁场削弱和谐波问题不在本文讨论范围之内。



1.“计量单位”，《国际计量学词汇 — 基础通用概念和相关术语 (VIM)》(第 3 版)，计量学指南联合委员会，2008 年，第 6-7 页。

## 重要说明

仅由于驱动器的命名与本文所述一致，并不代表所需单位与特定制造商所表示的单位相同。此外，驱动器的所需单位与本文所述一致，不代表其定义相同。例如，在电力行业中，一些对象单位通常会采用标准化的 RMS 值，但缺少通过下标定义均方根 (RMS) 的特定符号。但是，在这个特定的运动控制领域中，缺少特殊下标的所需单位很容易传达出错误的单位含义。

为了保证行业符号与定义的一致性，我们所使用的指定常数术语定义如下：

- 1. 电压(电动势)常数:**  $K_e$  (又称  $K_{emf}$ 、 $K_E$  和  $K_b$ )，定义为每个特定速度单位所产生的最大线间电压。

**请注意:** 当电压常数速度单位为弧度/秒 (rad/second) 并且  $K_t$  的单位为 Nm/A 时，特定的电机常数相等：

$$K_e(V/\text{rad}/\text{sec}) = K_t(\text{Nm}/\text{A})$$

这同样适用于 PM 直流有刷伺服电机，其中的  $K_e(V/\text{rad}/\text{sec}) = K_t(\text{Nm}/\text{AMPS}_{DC})$ ，不考虑高温和低温单位之间的差异。

**两个常用的  $K_e$  单位为:** V/rad/sec 以及 V/kRPM，其中的  $V/\text{kRPM} = 1000\{K_e(V/\text{rad}/\text{sec})\}/\{(60_{\text{sec}}/\text{min})/(2\pi_{\text{rad}}/\text{转})\} = 1000\{K_e(V/\text{rad}/\text{sec})\}/9.55$ 。

### 具体说明:

- (a)  $V = \text{VDC-bus}$**  等于可用的最大 (波峰) 电压 (VDC-bus 适用于大多数驱动系统)，但不属于 RMS 单位。
- (b) 电压(电动势)常数  $K_e$**  使用 V/rad/sec 还是 V/kRPM (或其他等效单位) 单位，通常取决于使用 6 步换向还是正弦波换向。
- (c) 对于星形 (Y 形) 绕线式电枢**，如果电机数据表将电压 (电动势) 常数定义为每个特定速度单位所产生的相 (Ø) (线与中性点间) 电压，那么它必须乘以  $\sqrt{3}$  才能获得编号 1 (上方) 所定义的线间  $K_e$  单位。

- 2. 电压(反电动势)常数:**  $K_b$  (又称  $K_{Bemf}$ 、 $K_B$  和  $K_e$ )，定义为每个特定速度单位所产生的线间 RMS 电压。

$$K_b(\text{Vrms}/\text{kRPM}) = K_e(V/\text{kRPM})/\sqrt{2} \text{ 或}$$
$$K_b(\text{Vrms}/\text{rad}/\text{sec}) = K_e(V/\text{rad}/\text{sec})/\sqrt{2}, \text{ 其中的 } K_b(\text{Vrms}/\text{kRPM}) = 1000\{K_e(V/\text{rad}/\text{sec})/9.55\}/\sqrt{2}.$$

### 具体说明:

(a) **电压(反电动势)常数:**  $K_b$  使用 Vrms/rad/sec 还是 Vrms/kRPM (或其他等效单位) 单位，取决于使用正弦波换向还是 6 步换向。

(b) 如果电机数据表将**电压(反电动势)常数定义为每个特定速度单位所产生的 Ø (线与中性点间) RMS 电压**，那么它必须乘以  $\sqrt{3}$  才能获得上方编号 2 所定义的线间  $K_b$  单位。

**扭矩常数:**  $K_t$  (又称  $K_\tau$ )，定义为特定扭矩 (T) 单位与每安培之间的比率，其中的安培为 **(a.)** 最大 (波峰) 电机相 (Ø) 电流 (线与中性点间) 或 **(b.)** RMS Ø 电流 (线与中性点间)。

### 具体说明:

由于 6 步与正弦波换向控制方法之间的常规差异， **$K_t$  术语存在着两种不同的规范**。因此，不应假设两种  $K_t$  电流单位 (如此处所使用的 A 和 A-rms) 之间的关系。此外，扭矩常数是指每个特定电流单位通过星形 (Y 形) 绕线式电枢一相 (Ø) 所产生的扭矩，这一专业知识通常属于假设认定，因此电机制造商并不总是会将其发布在电机数据表中。对于星形 (Y 形) 绕线式电枢，线间电流等于线与中性点间电流。

(a.) **扭矩常数:**  $K_\tau$  (又称  $K_t$ )，定义为特定扭矩 (T) 单位与最大 (波峰) 相 (Ø) 电流 (线与中性点间) 之间的比率，其中的  $K_\tau$  单位扭矩/A 取决于使用 6 步/块控制换向还是正弦波换向。**请注意:** 采用这种规定的换向方法，在 3 相星形 (Y 形) 接线伺服电机中，电流仅会流经三 (3) 个电机线圈中的两个 (2-ON, 1-OFF, 始终如此)。

(b) **扭矩常数:**  $K_t$  (又称  $K_v$ )，定义为特定扭矩 (T) 单位与 RMS 相 ( $\emptyset$ ) 电流 (线与中性点间) 之间的比率，其中的  $K_t$  单位 T/A-rms 取决于使用正弦波换向还是 6 步换向。**请注意:**对于这种使用 3 相星形 (Y 形) 接线伺服电机的换向方法，电流可能会同时流经全部三个线圈。

请注意，如果制造商发布正弦波换向的扭矩常数单位为: T/Amp (正弦波峰)，那么  $T/A-rms = \sqrt{2} \times T/Amp$  (正弦波峰)。

两种换向方法之间的扭矩常数换算公式为:

(a)  $K_t(T/A) = K_t(T/A-rms) / \sqrt{1.5}$  以及

(b)  $K_t(T/A-rms) = K_t(T/A) \times \sqrt{1.5}$ 。

因此，对于同一台电机来说，实现最大电机功率所需的连续电流  $I_c$  (RMS) 值会低于使用  $I_c$  (正弦波峰或直流式) 电流表示的值。就和预期的一样!

请注意，对于 6 步换向系统和正弦波换向系统之间扭矩常数 ( $K_t$ ) 和电流的  $\sqrt{1.5}$  换算系数，其正式推导过程不在本文讨论范围之内。但是，6 步与正弦波功率 (损耗) 计算结果相等，这证明了它的正确性 (请参阅第 6 页的电机参数换算表)。此外，需要注意的是，大多数常见的换算错误来自于不正确地使用正弦波形波峰值及其有效稳态值之间的 RMS (均方根) 换算系数  $\sqrt{2}$  代替换算系数  $\sqrt{1.5}$ 。但是，从 6 步换向系统到正弦换向系统 (或反之)，正如两种换向控制方法以及生成特定扭矩所需的相应电流不同， $\sqrt{2}$  RMS 换算和电机的  $K_t$  (扭矩/A) 与 (扭矩/A-rms) 之间的单位换算也不相同。

**驱动器选择:**为了举例说明，假设客户选择的驱动器为正弦换向控制器，所需的电机参数单位如下:

1. **连续电机电流单位:** A-rms【 $I_c$  (电机) 为每  $\emptyset$  (线与中性点间) 的电机持续能力 RMS 值】
2. **峰值电机电流限制:** A-rms【 $I_p$  (电机) 为每  $\emptyset$  (线与中性点间) 的电机峰值限制 RMS 值】
3.  **$K_t$  常数单位:** T/A-rms【扭矩/A-rms，正弦波控制器，线与中性点间 RMS ( $\emptyset$ ) 电流】
4.  **$K_b$  常数单位:** Vrms/kRPM【每 1000\_RPM 的 RMS 线间电压】
5.  **$R_m$  (通常为 20 或 25 °C:室温) 电阻单位:** 欧姆 ( $\Omega$ ) (线间)【两相串联:  $R_{m-\emptyset} = R_m (L-L)/2$ 】
6. **L 或  $L_m$ ，电感单位:** 毫亨 (mH) (线间)【两相串联:  $L_{-\emptyset} = L_m(L-L)/2$ 】
7.  **$J_m$  — 电机转子惯量单位:** Kg.cm<sup>2</sup>

下一页 (第 6 页) 中的电机参数换算表用于将电机参数换算为驱动器所需的正弦输入单位，以便用于任何特定的星形 (Y 形) 绕线式电枢。

下面给出了表格说明，表格注释和术语等重要信息请见第 7 页。

我们强烈建议您对照阅读第 6、7 页，以便有效地理解电机参数换算表。

## 电机参数换算表

下表用于将电机参数换算为驱动器所需的正弦输入单位，以便用于任何使用三种参数形式之一的特定星形(Y形)绕线式电机。G列所需驱动器单位说明:

- **对于使用 B 列所示单位的任何电机参数:**使用 C 列的换算系数得出 D 列中的单位，然后使用 E 列的换算系数得出 F 列中的单位，再将该特定单位与 G 列驱动器单位进行匹配。
- **对于使用 D 列所示单位的任何电机参数:**使用 E 列的换算系数得出 F 列中的单位，再将该特定单位与 G 列驱动器单位进行匹配。

A 列	B 列	C 列	D 列	E 列	F 列	G 列
电机:X(星形绕线式电机):	单位:X, 6步 换向:	B列与D列换 算:	替代单位:6步 换向:	D列与F列换 算:	单位:Y, 正弦波 换向:	所需的驱动器单 位或正弦换向星 形绕组:
Tc	12.7_Nm	=	12.7_Nm	=	12.7_Nm	Tc(Nm)
Tp	41.2_Nm	=	41.2_Nm	=	41.2_Nm	Tp(Nm)
Ic(电流/Ø <sub>1</sub> )	13_A/Ø <sub>1</sub>	=	13_A <sub>1</sub>	÷√1.5 =	10.614_A-rms <sub>1</sub>	Ic(A-rms)/相(Ø) <sub>1&amp;7</sub>
Ip(电流/Ø <sub>1</sub> )	不适用	=	53.3_A <sub>1</sub>	÷√1.5 =	43.52_A-rms	Ip(A-rms)/相(Ø) <sub>1&amp;7</sub>
Kt	不适用	=	1.00 Nm/A	÷√1.5 =	1.224745 Nm/A-rms	Kt(Nm/A-rms)
Ke 或 Kb 或	0.57735 V(Ø)/ rad/sec	x√3 =	1.00 V(L-L)/rad/ sec	x(1000/9.55) ÷√2 =	74.05 Vrms(L-L)/kRPM	Kb(Vrms/kRPM)
	0.57735 V(Ø)/ rad/sec	√3x1000÷9.55 =	104.72 V(L-L)/ kRPM	÷√2 =	74.05 Vrms(L-L)/kRPM	
Rm(欧姆) <sub>3</sub> (线间);25°C	0.540_Ω/Ø <sub>3</sub>	x2 =	1.08_Ω(线间)	=	1.08_Ω(线间)	Rm(Ω:线间), 在 25°C 时
Lm <sup>2</sup> (mH)	4.25_mH/Ø <sub>2</sub>	x2 =	8.5_mH(L-L)	=	8.5_mH(L-L)	L 或 Lm(mH: 线间)
Jm(惯量)	0.00152 Kg.m <sup>2</sup>	x100 <sup>2</sup> =	15.2 Kg.cm <sup>2</sup>	=	15.2 Kg.cm <sup>2</sup>	Jm(Kg.cm <sup>2</sup> )
电机极数	10_极	=	10_极	÷2 =	5_极对	极对(PP)
热阻	0.460°C/W	=	0.460°C/W	=	0.460°C/W	
<b>等式:使用上表数据进行瓦特(损耗)功率计算</b>						
瓦特(损耗) 25°C 环境温度; 使用热阻 计算	不适用	不适用	{(155-25) ÷0.467}=278W	=	{(130°C_升温) ÷0.467}=278W	基于上方表格和换 算数据
功率(6步) <sub>5&amp;6</sub> = Vicosθ <sub>5</sub> = 2xIØ <sup>2</sup> xRmØ(高温) <sub>4</sub> = I_line <sup>2</sup> xRm(L-L;高温) <sub>4</sub>	2x13 <sup>2</sup> x (0.54x1.51) = 276W	=	13 <sup>2</sup> x(1.08x 1.51) = 276W	不适用	不适用	基于上述给定或 换算的数据进行 检验
功率(正弦波) (请注意:V=Vrms, I= Irms) = 3xVØxIØxcosθ <sub>5</sub> = 3xIØ <sup>2</sup> xRmØ(高温) <sub>4</sub> = 3xIØ <sup>2</sup> xRm(L-L;高温) <sub>4</sub> ÷2	不适用	不适用	不适用	不适用	3x10.614 <sup>2</sup> x (1.08x1.51)÷2= 276W	基于上述给定或 换算的数据进行 检验

2014年9月。请注意:在使用本表时,由用户自行确定具体适合其应用场景的参数和单位。

**重要提醒:表格注释和术语参见第7页。**

我们建议您在查看电机参数换算表时对照阅读第6、7页。

## 表格注释

- 1. 电机电流的定义为相 ( $\emptyset$ ) 电流 (线与中性点间)**, 此信息通常会标注在制造商出版物中的某处, 但一般会默认用户在使用特定的电机数据表时已明确理解这一点。
- 2. 对于星形 (Y 形) 绕组, 如果给出了  $L_m=L\emptyset$  (线与中性点间)**, 那么将  $L\emptyset$  乘以 2 即可得出电机总电感:  $L_m$  (线间)。对于三角形绕组电机, 电感为  $L_m/\emptyset=L_m$  (线间)。但是, 如果驱动器要求输入星形 (Y 形) 绕组电机每相的电机电感参数 ( $L\emptyset$ : 线与中性点间), 并且电机电感 ( $L_m$ ) 表示为  $L_m/\emptyset$  (三角形绕组), 那么等效  $L\emptyset$  (线与中性点间, 星形绕组) = ( $L_m/\emptyset$ \_三角形绕组/3)。
- 3. 对于星形 (Y 形) 绕组, 如果给出了  $R_m=R\emptyset$  (线与中性点间)**, 那么将  $R\emptyset$  乘以 2 即可得出总电阻:  $R_m$  (线间)。对于三角形绕组电机, 电阻为  $R_m/\emptyset=R_m$  (线间)。但是, 如果驱动器要求输入星形 (Y 形) 绕组电机每相的电机电阻参数 ( $R\emptyset$ : 线与中性点间), 并且电机电阻 ( $R_m$ ) 表示为  $R_m/\emptyset$  (三角形绕组), 那么等效  $R\emptyset$  (线与中性点间, 星形绕组) = ( $R_m/\emptyset$ \_三角形绕组/3)。
- 4. 从 25°C 室温至 155°C**, 铜线电阻将会上升, 上升倍数约为 1.51 倍。
- 5. 当功率 (6 步换向) 被设为等于**  
 $2 \times V\emptyset \times I\emptyset \times \cos\theta = 3 \times V_{rms}\emptyset \times I_{rms}\emptyset \times \cos\theta$  处的功率 (正弦波计算) 时,  $\cos\theta$  系数可以从同一电机的计算方程中去除。
- 6. 传统的 3 相梯形 (6 步) 换向驱动器一次只能控制 2 个电机绕组** (2-ON, 1-OFF, 始终如此), 而正弦换向驱动器则能够同时控制全部三 (3) 个绕组并向其供电。
- 7. 对于正弦波换向, 如果 F 列中针对参数  $I_c$  (连续) 和/或  $I_p$  ( $I_{peak}$ ) 的特定驱动器输入单位为  $I_c$  (正弦波峰)/相 ( $\emptyset$ ) 和/或  $I_p$  (正弦波峰)/相 ( $\emptyset$ ), 那么 F 列中的对应值必须乘以  $\sqrt{2}$ ; 如果特定参数的输入单位为  $I_c$  (正弦波峰到峰)/相 ( $\emptyset$ ) 和/或  $I_p$  (正弦波峰到峰)/相 ( $\emptyset$ ), 那么 F 列中的对应值必须乘以  $2 \times \sqrt{2}$ 。**

**请注意:** 本文所使用的“波峰”一词旨在尽可能避免与电机和驱动器下标术语 (用于一个或另一个单位的峰值能力) 产生混淆, 即, 相对于正弦波峰值 (正弦波峰) 和正弦波峰峰值 (正弦波峰到峰) 而言。

## 术语:

- 1. emf** = 电动势 (请参阅有关电机运行的  $B_{emf}$ )。
- 2.  $B_{emf}$**  = 反电动势, 电机在任何时间点驱动负载所需电流所产生的反抗感应电压
- 3. 冒号 (:)** 在阅读时, 可将其理解为“即”
- 4. rad** = 弧度
- 5. sec** = 秒
- 6.  $\theta$**  = 电流与电压之间的角度。
- 7.  $\emptyset$**  = 通过星形 (Y 形) 绕组线圈一个分支的相 (线与中性点间) 电流或电压, 在本文中并非特指线间电压
- 8. Y** = 星形绕线式电枢
- 9.  $\Delta$**  = 三角形绕线式电枢
- 10. crest (波峰)** = 正弦波的最大可能电压或电流; 本文特地未使用“peak (峰值)”一词, 以尽量避免正弦波的波峰和 rms 单位与  $I_{peak}$  等电机-驱动器参数产生混淆, 无论是在波峰电流单位还是 rms 单位方面。
- 11. RMS 和 rms** = 均方根

## 结论：

**第 6 页的电机参数换算表可用作参考，以便于正确理解与换算参数单位和术语。**

要确认  $K_t$  和  $K_b$  (或  $K_e$ ) 是否均为常规正弦换向的 RMS 单位，有一个快速检查方法：使用我们认为是的  $K_b$  ( $V_{rms}/kRPM$ ) 除以  $K_t$  ( $Nm/A-rms$ )。如果相应的 RMS 单位是正确的，那么得出的商数将介于 60 到 65 之间 (理想情况为 60.46)，在少数因四舍五入导致的例外情况下，会产生小于 60 或大于 65 的商数。无论 PM 伺服类型如何，也无论所表示的是否为  $K_t$  与  $K_b/K_e$  的高温和/或低温单位，这一规则均适用。相反地，当得出的商数范围介于 ~103 到 113 之间 (理想情况为 104.72) 时，可以确认  $K_e(V/kRPM)$  和  $K_t(Nm/A)$  均为常规的 6 步/块换向单位。

正确理解伺服电机参数及其与制造商驱动器参数之间的换算方式，其中的重要性不容低估。它们会影响到一系列重要因素，这些因素将对机器设计开发和制造过程产生巨大影响。尤其是在驱动器参数输入、电机对比、轴操作微调和故障排除方面，它更是重要。

制造商之间之所以会存在差异，是因为在发布电机数据相关计量单位和术语时缺少统一的行业标准。本白皮书可以帮助用户克服这些困难，掌握有关伺服电机参数的复杂知识。文中提供了宝贵的详细信息和实用换算工具，可帮助用户正确理解、输入数据并进行计量，这些信息和工具可能无法从其他途径获得。本文同样全面地说明了精确的计算方式及其概念。



完整掌握本文知识的机器设计人员、工程师和技术人员，可以自信地参与下列工作，实现特定的目标：

- 在整个机器设计过程中做出经济高效、全面且及时的决策
- 微调运动控制组件，以提高机器性能、提升产品质量并增加产量

## 关于科尔摩根

作为 Regal Rexnord 旗下品牌，科尔摩根在运动控制领域拥有 100 多年的经验，致力于提供高性能且可靠的电机、驱动器、AGV 控制解决方案和自动化平台，享誉业界。我们提供的突破性解决方案在性能、可靠性和易用性方面更胜一筹，为机器制造商提供无可争议的市场优势。