



“持续额定功率”和“保持持续负载”之间的区别

本文旨在通过详细阐释伺服电机行业常见的术语“Stall (失速)”，针对在几乎没有运动的情况下主要以保持负载为目的的场景，对伺服电机选型的其他注意事项，以及常由此产生的沟通问题进行了探讨。然后，利用这些信息与轴的有效均方根力/转矩计算值进行对比，完成合理的电机选型。

闭环反馈系统在非传统类伺服电机中的进一步应用导致市场对其提出了更加专业的要求。此类伺服电机的一些应用场景要求电机的力和转矩能够确保其在更长时间内(相对于轴的运动轨迹)维持一致的负载。这就需要对几个相关的词或术语进行阐释；这几个词或术语的含义并不完全相同，或仅在特定运行环境或事件中具有相同的含义，但在涉及其他电机类型时，它们经常会被用户混淆。各方在沟通过程中出现的不一致可能会导致理解上的偏差，从而影响初始电机选型、机器编程、机器启动，或某些产品工艺问题的解决。

例如，“失速”或“失速转矩”不会出现在感应电机的产品规格中，但这两个词经常被用来描述电机负载大于满载或故障转矩容量时发生的情况。非伺服电机(例如我们所列举的感应电机)在不属于正常运行条件的某些状态下有时会被描述为“处于堵转或失速(零 RPM) 状态”；而如果因为所施加的负载大于电机的持续满载转矩而需要持续输入需用功率，电机将出现过热现象，并最终烧毁。

如果电机处于停转状态 ($0 \text{ RPM} < \text{实际 RPM} < \text{满载 RPM}$), 则电机消耗的电流会大于其持续功率, 而如果这种情况持续下去, 电机的绕组将会出现过热现象。理解这一点也同样重要。开环式感应电机的这些异常失速、停转情况通常不属于任何正常应用的范畴, 任何感应电机在上述任何一种情况下都是如此:

1. 受到电机消散热损耗的能力 (相对于其负载需求) 的影响; 以及
2. 造成电机绕组出现过热, 并且会因持续过载而烧毁。

失速的电机可能会以低于额定转速的速度继续运行一段时间, 但当其由于过载保护装置跳闸或因烧毁而停止运行时, 即不再处于失速状态 (因为电机在未通电或烧毁的情况下无法感知机械负载)。

但是, 对于特定的场景而言, 在特定负载下专门保持位置或保持一定的转矩和力以承受负载的**伺服控制**状态属于正常运行, 因此, 尽管此类情况通常也会被视作或表达为**失速**和/或**堵转**, 但这种状态与其在上述异步电机例子中的状态完全不同。因此, 对于用于任何特定运行条件的伺服电机, 如果选型正确, 则上述情况只是代表电机在执行指令, 而非出现异常。如果选型正确且正常操作, 伺服电机就能够在其定义的事件和/或运动轨迹 (选型的依据) 内处理指定的负载 (例如在特定负载下保持位置或保持一定的转矩和力以承受负载), 而不用担心出现过热问题。

由此可知, 伺服电机行业内对这些词和术语及其含义的混淆大多是由于伺服电机尺寸不正确或未能按照最初电机选型所参照的规格使用伺服电机。

通过这些类型的应用问题可以发现, 我们之所以会对所探讨的词好术语的含义产生混淆, 往往是由于对不同类型的电机系统 (例如开环控制和闭环控制) 存在不同的解释和理解。

由于本文所探讨的这些词汇经常会被混淆, 因此了解类似的术语在非伺服电机 (例如异步电机) 行业中的使用方式就变得很重要。对于通电的开环感应电机, 术语“Locked-Rotor (堵转)”实际上指的是确定电机在产生最大起动转矩 (堵转转矩 (LRT)) 时可能消耗的最大起动电流 (堵转电流 (LRC)) 的条件或过程。在实验室环境中对该最大起动电流及相应的最大起动转矩进行测量时, 需要将电机的转子固定在其位置上, 术语“堵转”由此而来。堵转电流在感应电机的铭牌上的标识通常为LRA, 即首次对处于零速的电机通电时 (转差率为最大值), 电机可能消耗的最大起动电流。在实际的感应电机场景中, 这是在电机首次通电后可能在短时间内间歇出现的最大电流, 并会在电机转子加速以减小转差率 (电枢磁场与转子之间的转速差) 之前, 让电机达到平衡的工作点, 与所施加的负载保持平衡 (理想情况下在其持续额定功率范围内)。电机首次通电时的加速过程中通常会出现感应电机开环间歇电流高于电机持续功率的情况, 这种情况也可能在工艺负载扰动期间出现。但是, 随时间变化的电机总体 RMS (均方根) 电流必须保持在电机的持续功率范围内。

与其他电机一样, 伺服电机也会受到电机消散热损耗的能力的影响, 不过由于其驱动放大器和其他可能的控制器编程内部的控制和反馈、闭环设置和限值, 很少会出现因过载状态而导致过热的情况。与开环感应电机的过载条件不同, 典型的伺服电机能够且会受到专门地控制, 使其能够在超出其持续功率的条件下间歇性地运行。但是, 与开环感应电机一样, 随时间变化的伺服电机 RMS 电流必须保持在电机的持续功率范围内, 否则电机的绕组将出现过热。伺服电机的间歇性过载状态具有特定的作用。如需执行特定功能或工艺, 则必须在选择电机和驱动器的过程中予以适当考虑, 以确保电机的轴在正常的机器运行、维护、潜在工艺/机器故障和安全事件期间能够正确地运行。

伺服电机在某些机器人、工业和/或工厂自动化工艺中的一个更加专业的用途是，在很少或没有电机运动的情况下，维持电机承受特定负载所需的特定转矩或力。这种应用场景可能非常简单，例如保持夹紧状态、对抗重力以保持垂直负载（如果采用恒速制动，会增加处理时间或降低精度）、保持承受特定负载的转矩/力以进行测试、在特定工艺中动态地保持部件位置或用于缓慢排出某种高粘度液体等等。除此以外，按照此类特定要求确定伺服电机和驱动器组合尺寸的一个关键要素就是相对于电机的热时间常数（电机和绕组）以及驱动能力，此有效连续负载（很少或不产生执行器运动）在电机运动轨迹或某些特定事件中所需的时间。对于用于特定场景的伺服电机，如果选型正确且在适当的驱动系统设置下运行，就不会出现过热、保护装置跳闸或烧毁的情况。在此类有计划的伺服电机应用场景中，伺服电机最坏的情况或状况实际上可能是电机在正常运行期间，或在机器停机或停产情况下或维护操作期间持续运行以承受所施加的负载（由于重力或其他原因）以及维持轴所需的有效 RMS 转矩/力（基于轴的运动轨迹计算得出）。

开环异步感应电机可能会出现为满足其负载需求而导致自身损毁的情况，而闭环伺服电机则与之不同；除了驱动器通过定时返送电路或编程设置的峰值电流限制（I_{rt} 返送，典型设置 = I_c(电机) 或 I_c(驱动器)），闭环伺服电机的转矩、速度和位置还受驱动器电流/速度/位置（环路增益和限值）的控制和限制。因此，即使伺服电机出现了物理上的失速或堵转状态，只要选型和编程正确，电机在持续功率范围内也能处于特定的受控状态，因此在电机的能力范围内能够充分消散自身的热损耗。在描述此类运行情况（尤其是存在与轴相关的问题时）时，我们经常用到本文所探讨的术语，只是在沟通过程中，不同的人对它们有着不同的理解和解释。

有一段时期，在大部分应用场景中，电机在零运动期间（相对于场景中的总体运动轨迹）不会承受实质性负载，而伺服电机额定功率的确定方法正是从这个时期发展而来的。因此，在考虑这些非典型场景时，需要针对特殊条件/事件对其相应的要求进行评估，评估结果可能会或不会取代这些场景的有效 EMS 转矩计算值。

伺服电机行业的术语“失速”通常被用作转矩/力的下标或其他形式，以定义伺服电机在指定环境温度下且热损耗在整个电机绕组内均匀、稳定分布时，基于特定的温升和散热器（安装板）尺寸达到前述最大转矩所需的最大可获得持续转矩（T_c）及相应的持续电流（I_c）。因此，这个词此时产生了一个特定的含义，与失速（停滞）一词的定义以及感应电机不再能够以其设计的转速承受施加的负载的情况（表现为堵转（失速/停止）、停止（正在停止的过程中）或停转（以低于额定转速但不为零转速的速度运行））相比，有着截然不同的意义。一个普遍的误解是整个伺服电机行业对这些词的理解和用法都是相同的，而实际情况并非如此。

由于对这个词和术语所代表的含义存在误解，一些制造商的出版物中甚至写着：“失速”即零转速或转子无运动，但事实并非如此！

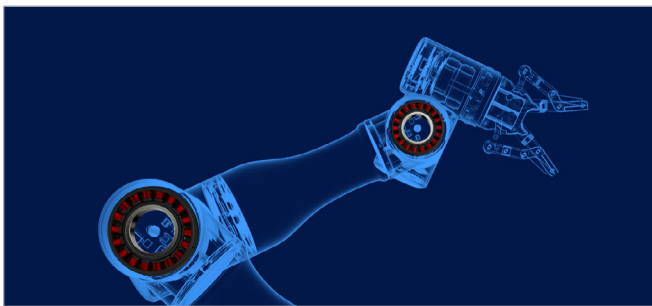
这样就出现了一个问题：如果一个场景需要在某个时间段内连续保持转矩/力（很少或不会发生物理运动），直到轴的运动轨迹有效 RMS 计算值变得无效（由于电机内部的热损耗分布不均匀），则对于此类场景，如何确定交流/无刷永磁伺服电机的尺寸，以避免电机绕组过热？

我们可以通过一个应用实例来回答这个问题；但是首先我们需要理解制造商的持续电流额定值 I_c（电机）及其确定方式。我们将假定一个带正弦波换相的 RMS 电流值；不过，不同制造商可能会以其他不同的方法确定/规定 I_c。

通常情况下, 伺服电机的额定功率定义为在整个电机内部绕组损耗分布均匀的情况下能实现的最大持续功率。这意味着, 在额定功率确定过程中, 电机内部的电循环速度既要快到足以实现均匀的内部损耗分布, 又要慢到能够确保电机内部的 jXL 和铁损基本为零。此物理测试速度通常约为 1-4_rps (每秒转数), 但也可能更慢或更高, 取决于电机的磁极对。大多数制造商都根据此速度或与之相近的速度确定其电机的持续转矩 (T_c) 以及相应的电流 (I_c)。已公布的持续转矩和电流规格也经常会被认为是失速转矩 ($T_{c_失速}$) 和失速电流 ($I_{c_失速}$), 而不考虑换相类型以及相应电流的单位。

请注意术语“失速”的不同含义: 它在此处用于在受控闭环动态测试中确定伺服电机的最大持续功率, 与我们之前讨论的“失速”、“停止”和“停转”的含义不同, 与超过感应电机最大能力的过载情况有关 (无论转子是否已停止运动)。

此外, 对于主要用于持续承受特定负载 (很少或无运动) 的伺服电机, 我们还需要了解此类伺服电机的输出情况。由于我们在示例中采用的是正弦环流, 因此受控的三相交流输出端实际上处于静止状态, 呈现出连续性的 PWM 非移动三相输出, 其振幅值 (与伺服电机的换相位置对应) 也可视为在该位置上的瞬时快照 (可以在脑海中将其想象为移动正弦波的瞬时快照)。



两种主要换相方法的主要区别在于: 6 步/块换相 (即未修改的梯形) 只能让电流在任何给定时间流经三 (3) 个电机相位中的两 (2) 个 (2-ON, 1-OFF; 始终如此); 而正弦波或正弦换相则能让电流同时流经三个电机相位 (在适当的时候), 且电机的每个电周期都以正弦波的形式呈现给伺服电机。

如今, 在大多数旋转式伺服电机的设计中, 电机绕组、叠片和机架之间都具有良好的导热性, 在环氧树脂封装的情况下尤为如此; 然而, 对于不同的设计, 电机绕组和机架之间的导热性能各不相同, 这就需要实施大量的热建模或实际测量或测试, 以确定每种电机的能力。因此, 在本论文中, 我们还将假设每个电机绕组都是独立安装的线圈, 所有线圈都不会将热量传递给电机内的其他绕组/线圈, 因此所有线圈的热传导能力是一样的。

在伺服电机满载运行的情况下, 可确定以下两个情况最差的换相位置:

1. 全部 (100%) 电流 ($I_{actual} = I_c(rms) \times \sqrt{2}$) 通过一个绕组, 50% 的电流通过剩余两个绕组 (**图 B**)
2. 全部可用 (86.6%) 电流仅通过两个绕组 ($I_{actual} = I_c(rms) \times \cos(30^\circ) \times \sqrt{2}$) (**图 C**)。

这些是电机绕组可能面临的最差情况, 前提是驱动器的峰值电流在一段时间后 (通过 I^2t 电路/程序控制) 返送至所公布的电机额定持续电流 ($I_{c_失速}$, 通过保持均匀的热损耗分布即低 RPM 实现)。

因此, 对于条件 (**1; 图 B**), 如果 $I_{c(电机)_失速} = 10_Arms$, 换相位置和负载需要 10_Arms 通过 U 相以在 10_Nm 的负载要求下保持所述静止位置, 则 U 相将有 14.14 的直流电流 [$10_Arms \times \sqrt{2}$] (经脉宽调制) 持续通过。此时该特定绕组会尝试消散 ($14.14^2 \times R_{m\emptyset}$) 的功率损耗以及 ($10^2 \times R_{m\emptyset}$) 的功率损耗, 这相当于其功率的两倍, 因此当然无法持续进行!

同样地, 对于条件 **(2;图 C)**, 两个线圈都要消散 $(12.247^2 \times R_{m\emptyset})$ 的功率损耗以及 $(10^2 \times R_{m\emptyset})$ 的功率损耗 (比每个线圈的功率要高出 50%)。从这些算法中可以看出, 在电机选型过程中, 需要考虑的一个关键因素就是在保持特定负载有效静止时所需的有效止转电流 (相对于电机在这些条件下消散绕组损耗的能力)。

因此, 我们需要的是持续额定转矩等于所需 $T_{hold} \times \sqrt{2}$ RMS 值的电机; 这并不是因为我们需要电机提供额外的转矩, 而是因为我们需要电机的每个绕组都能在有效持续时间内承受移动正弦波电流的瞬时峰值。

在这些条件下 (假设为标称值且无裕量), 在需要 10_Nm 以无限保持垂直负载的场景中使用额定转矩为 $T_c(stall) = 10_Nm$ 的伺服电机是不够的, 而应选择一个转矩为 $T_c(stall) \Rightarrow 14.14Nm$ 的型号稍大一点的电机。此外, 如果驱动器有额定 $Arms$, 则仅需产生电机实现 10_Nm 所需的持续 RMS 电流即可 (例如, 如果伺服电机的 $K_t = 1_Nm/ Arms$, 则约为 10_Arms)。

我们可以通过这种方式进行证明: 首先确定以持续额定功率运行时的功率损耗能力 (图 A), 然后针对三相电机线圈的两个最差的换相点 (其电流分别是 100%、50%、50% **(图 B)** 和 86.6%、86.6%、0% **(图 C)**) 比较功率耗散能力。

假定电机的相关信息为:

$$T_c(stall) = 10_Nm$$

$$I_c(stall) = 10_Arms$$

$$K_t = 1.0_Nm/Arms$$

$$R_{m(L-L)}_{25^\circ C} = 1.006_ohms, \text{ 其中 } R_{m(L-L)}_{150^\circ C} = (1.006_ohms \times 1.491); \text{ 以及}$$

$$R_{m\emptyset}_{150^\circ C} = 1.5/2 = 0.75_ohms$$

$$\text{温度 (持续运行的极限绕组温度)} = 150^\circ C$$

$$\text{温升 (从 } 25^\circ C \text{ 环境温度开始至最大值)} = 150^\circ C - 25^\circ C = 125^\circ C$$

图 A: 基于已公布的数据可获得的最大总功率损耗。

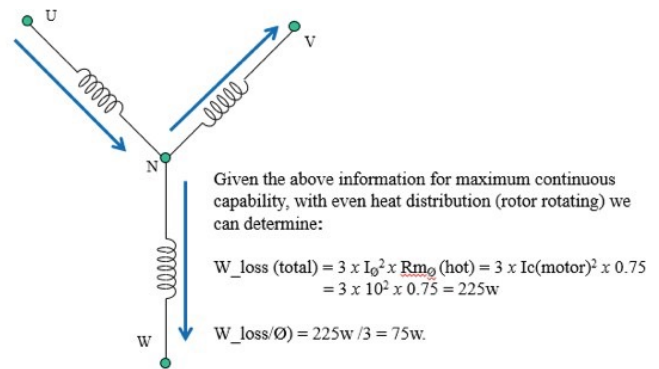


图 B: 100% RMS 电流 (I_c) 进入 U 相, 然后分成两部分别进入 V 相和 W 相

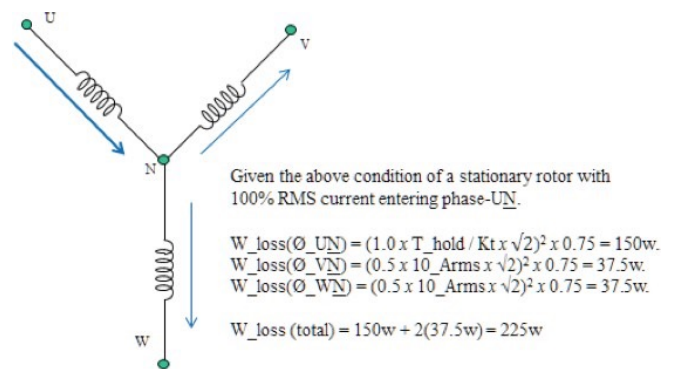
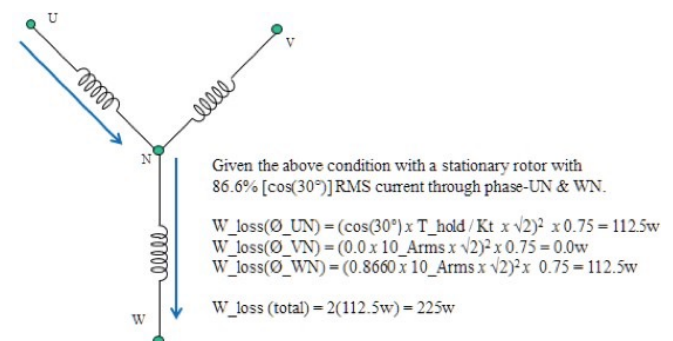


图 C: 进入 U 相并流出 W 相的电流为 $I_c \times \cos(30^\circ)$; V 相绕组电流 = 0.0。



因此,根据给出的信息、条件和假设,每个电机绕组都是独立的相位(\emptyset)分支或线圈,均没有向其他绕组热区域传输热量的优势;各个绕组的耗散功率可达 75 瓦。

如果考虑这两种最差换相位置中的第一种(所有(100%) 电流($I_{actual} = I_c \times \sqrt{2}$),我们可以得出功率损耗(总计)仍为 225w 的结论(图 B);但是通过一个绕组(\emptyset_{UN})需要耗散的具体瓦数比之前计算的热功率(75 瓦)要高出 100%(图 A),而通过其他两个绕组耗散的瓦数各为计算数值的 50%。

在图 B 的情况下,为防止电机的任何绕组因该特定的换相位置而出现过热,我们需要将 $I_c(\text{drive})$ 限制为 $I_c(\text{motor})$ 的 70.7%。对于我们所举的这个例子,如果维持给定的 10_Nm 以保持负载,则所选择的电机要完成任务,就必定会出现过热。因此,一个可行的解决方案就是选择一个具有 $T_c \Rightarrow \sqrt{2} \times T_{hold}$ 能力的电机,并且最好具有大致相同的电机转矩常数 (K_t),从而在不更换驱动器的情况下维持所需的最大应用 RPM。

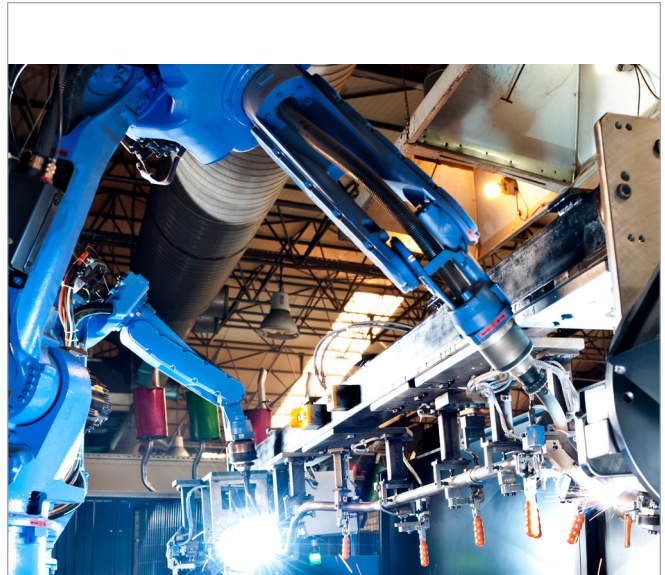
如果考虑第二种最差的换相位置(所有可用(86.6%) 电流仅通过两个绕组($I_{actual} = \cos(30^\circ) \times T_c(\text{motor}) \times \sqrt{2}$),我们可以得出功率损耗(总计)同样为 225w 的结论(图 C);但是通过两个绕组(\emptyset_{UN})和(\emptyset_{WN})需要耗散的具体瓦数比之前计算的每个绕组的热功率(75 瓦)(图 A)高出 50%。

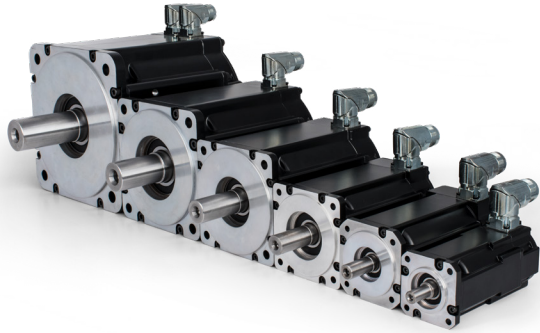
在这种情况下(图 C),为防止电机绕组因该特定的换相位置而出现过热,我们只需要将 RMS 驱动电流 ($I_c(\text{drive})$) 限制为 $I_c(\text{motor})$ 的 81.6% [$100 \times (75w/112.5w)^{1/2}$], 即可得出 $W_{loss}(\emptyset_{UN}) = W_{loss}(\emptyset_{WN}) = ((10_{Arms} / \sqrt{1.5} \times \cos(30)) \times \sqrt{2})^2 \times 0.75 = 75w$ 。

结论:

只有正确理解特定伺服电机行业的术语“失速”,工程师才能够正确考虑轴运动轨迹及其相对负载需求时间与总循环时间内不同负载需求的具体情况,从而确定并分析在正常运行或其他运行情况下进行尺寸计算、机器轴编程或故障排除的主导因素。这些主导因素可用于在以下结果之间进行合理分析:RMS 计算值和保持时间相对较长(与轴的总运动轨迹时间相比)的任何有效恒定或恒定负载、电机的热时间常数(TCT_电机和 TCT_绕组)以及伺服驱动器的 I^2t 返送算法。要正确理解轴的电机和驱动器选型,就必须充分了解电机在保持连续负载且实际上不运动时的最差换相位置,以及由此产生的静止 PWM 驱动器换相。与运动轨迹时间和热时间常数相比,如果为承受负载(外部负载或其他负载)而将转矩保持相对较长的时间,会得出错误的 RMS 结论。对于高间歇转矩要求(相对于运动轨迹的时间和要求)以及任何建议的电机热时间常数,也需要进行类似的考虑(另一个主题)。

同样地,如果没有将 10_Nm 的持续负载转矩重新指定为较小的值,则所选择的电机也无法完成任务(与图 B 的情况一样)。针对此特殊情况,我们可以选择一个具有 $T_c \Rightarrow \sqrt{1.5} \times T_{hold}$ 能力的电机;然而,这仍会导致在第一种换相情况下出现的 33.3% 的功率过载(图 B)。因此,在不考虑统计学上故障概率的情况下,更好的解决方案就是选择一个具有 $T_c \Rightarrow \sqrt{2} \times T_{hold}$ 能力的电机(如图 B 的信息所示)。





AKM2G 能帮助客户在缩小机器尺寸、减少占地面积和降低复杂性的同时, 仍然获得所需的功率和性能。

在实际应用场景中, 考虑到现在的电机绕组、叠片和机架之间具有良好的导热性, $\sqrt{2}$ 扭矩乘数可能会比较保守。不过, 根据作者多年来在电机设计和应用方面的有限反馈经验, 铁芯旋转伺服电机的 $\sqrt{2}$ 乘数一般可提供 9-11% 的安全裕量。虽然这一信息尚未得到具体验证, 但使用 $\sqrt{2}$ 乘数的最差情况似乎提供了足够的裕量, 能够克服 $\pm 10\%$ 的典型制造公差。因此, 在选择持续功率等于或略高于所需持续功率计算值的电机时使用 $\sqrt{2}$ 扭矩乘数似乎是合理的。然而, 对于无铁芯电机而言, 则不用考虑裕量。对于无铁芯伺服电机, 与所有情况一样, 最好具体考虑每个制造商对失速额定值的定义。在交流伺服电机行业中, 失速是一个有特定含义和限制性的术语; 然而并非不能针对某些特殊用途或特定类型的伺服电机 (如交流永磁无铁芯伺服电机) 对其部分或全部含义进行重新定义。无论“失速”一词及其衍生词与“失速”这一术语 (在伺服电机行业内被定义为正常参数化、运行或其他方面的一部分) 之间是否存在潜在的误解, 良好沟通的重要性都不容低估。

准备好向前迈进了吗?

请访问 kollmorgen.cn 联系科尔摩根, 并与科尔摩根的运动控制专家讨论您的需求和目标。

关于科尔摩根

科尔摩根是 Regal Rexnord 旗下的品牌, 拥有 100 多年的运动控制经验, 其高性能的电机、驱动器、线性执行器、AGV 控制解决方案和自动化控制平台均已在业界得到验证。我们提供的突破性解决方案兼具出色的性能、可靠性和易用性, 为机器制造商提供巨大的市场优势。