



管理永磁交流伺服电机过载： 热时间常数

当需要较高的间歇功率密度时，您可能不希望仅使用经典的均方根 (RMS) 计算方法和速度扭矩性能曲线作为选择伺服电机和驱动器的唯一依据。这样做可能会导致电机或驱动器的选型过小。

对于大多数伺服应用来说，使用基于 RMS 计算的经典性能曲线是完全可以接受的。但是，如果某个应用的间歇性扭矩在一段时间内相对于电机的连续承载能力来说偏大的话，则需要考虑所提出方案的热时间常数。当因可用空间不足而使情况更加不容乐观时，这种热限制就成为了需要额外关注的问题。

本文提出了一种可视化的改进方法，在应用需要实际电流 (I_{actual}) 长时间大于连续电流 ($I_{\text{continuous}}$) 的情况下，可用于进行风险管理，并帮助理解动态效应对伺服电机热时间常数的严重程度。

伺服电机因其内部损耗而产生热量，每台特定电机的散热能力决定了其额定连续承载能力。在传统的伺服电机应用中，对不同速度有多种要求，也即在确定的运动曲线上，对电机间歇能力的扭矩要求有高有低。

传统意义上讲，需要使用超出伺服电机连续承载能力的峰值电流来满足既定的加速和减速要求。运动曲线大多时候会在特定时间段（通常在毫秒级别）内需要这些峰值电流，且该时间段不会超过驱动放大器通常所能提供的最长 4 到 5 秒的时长。

在这些间歇性工作的常规情况下，通常没有必要根据应用在电机连续承载能力范围内的峰值扭矩要求来选择电机。我们只需应用均方根 (RMS) 公式来确定该应用的有效连续扭矩 (T_{rms}) 和速度 (N_{rms}) 要求，然后确保这一等效运行要求处于所选电机的连续承载能力范围内，也就是在其热容量范围内。同时，还要验证在所需的每分钟转数 (rpm) 下，所需的峰值扭矩 ($T_{\text{pk_required}}$) 是否小于所选电机和驱动器可提供的峰值扭矩 ($T_{\text{pk_available}}$)。

特殊应用条件

闭环运动控制技术在非传统应用中的扩展常常会产生一些特定的要求和(或)运行条件,而这些要求和条件超出了普通间歇性运行的范畴。不过,即使在常规应用中,我们有时也必须满足一些特殊条件。

示例:

在发生急停(紧急停止)的情况下,应用规范可能会要求在切断主电源之前,必须在特定的时间内将所有受控运动停下来。这在大多数应用中通常不是一个问题,但对于那些具有较大动能的大型机器而言,要使一个轴的运动停下来所需的时间很容易就会超过配套的电机-驱动器组合所能提供的典型最大峰值电流持续时间(4到5秒)[$I_c(\text{drive})$ 约等于 $I_c(\text{motor})$]。

虽然这一要求通常不需要更大的电机,但往往需要一个能提供更高连续电流的驱动器,以确保在急停减速过程中能够提供所需的峰值电流($I_{pk_required}$)。对于一些大型设备,急停时间要求在20秒到40秒范围内是很常见的。

过载:功率损耗的影响

根据需求的复杂程度,很多此类应用需要的扭矩和相应电流作为应用所需转速的函数(例如, N_{pk} 、 N_{rms}),会超出电机的连续承载能力(I_c 或 I_{rated})。我们需要考虑对电机的功率损耗进行限制或控制,以便在保护电机绝缘系统免受热过载影响的同时,满足工作或特定情况的需要。

在这种情况下,在相对于电机的整体热时间常数(TCT_{motor})而言足够长的一段时间内,电机的实际需求电流(I_{actual})大于电机的连续额定电流(I_c)能力。由于所使用的非均质材料之间存在相对的热传递速率,此时整体热时间常数主要由线圈热时间常数(TCT_{coil})决定。

对于这些特殊情况或事件,上述对给定运动曲线的RMS计算通常是无效的,不过为了确保满足整体的产品选型要求,仍需使用这种计算方法。在不同的应用中,那些需要电机处于过载状态的情况可能会有很大差异。

当今的许多伺服电机应用都有其具体的运行条件,或者在伺服电机选型过程中有需要考虑的特殊情况。

其他示例:

- 对于伺服电机来说,可能存在垂直轴方面的要求,即伺服电机要能够在静态制动器接合之前的特定时间内,承受大于其连续承载能力的负载,因为在正常生产周期中,频繁(接合和分离)使用静态保持制动器通常是不可取的。
- 可能会存在一种这样的轴要求,以应对负载被卡住或运动受阻的意外情况。在这种情况下,电机必须能够在执行指令下移动(但未正常工作)的整段时间内承受一定的峰值电流。

无论更换电机是否相对容易或困难(例如,在辐射暴露、太空或海底环境中),选择的伺服电机和驱动器组合都希望能将因不良事件导致故障的风险降低,大幅度地提高可靠性和安全性。

对于存在一些潜在工作要求的应用,或需要在一定时间内产生峰值扭矩(T_{pk})的特定峰值电流(I_{actual})的情况,我们还需要了解并确定电机绕组/线圈是否能够承受所需的过载电流,而不会损坏电机的绝缘。我们可以通过公式估算出电机线圈/绕组从冷启动(环境温度)到额定极限温度的时间($t_{ultimate}$):

$$t_{ultimate} = -TCT_{coil} (\text{已安装}) \times \ln[1 - (W_{loss}(\text{额定值}) / W_{loss}(\text{实际值}))]$$

或

$$t_{ult.} = -TCT_{winding} \times \ln[1 - (I_c^2 / I_{actual}^2)]$$

在此公式中, W_{loss} (额定值)由 I_c^2 或 I_{rated}^2 代换,
 W_{loss} (实际值)由 I_{actual}^2 代换

技术说明:

在这些条件下, I_{actual} 将大于电机的 I_c (伺服电机在低转速[失速]时的连续额定电流);在这种情况下,实际功率损耗 W_{loss} 将持续上升,超过额定值,若不能及时切断电源,就有可能导致热失控。

公式假设

当然，上述代换（分子和分母中都用适当的 I^2 来代替瓦特）假定在恒定的外加 [阶跃输入] 电流下功率耗散恒定。由于实际绕组温度会从环境温度（例如 $R_m(25^\circ\text{C})$ ）上升到基于 W_{loss} （实际值）的目标温度，所以这种假设是不正确的。然而，与求解动态非线性微分方程相比，这种方法在假定热态下的绕组电阻 R_m （热）为常数的情况下，提供了一种较为保守的分析方式。此外，在实际应用中，当电机从基于 I_{rms} 值的非环境温度条件下启动时，就需要进行更进一步的处理。

无论是否对公式进行调整，在需要时，执行的计算往往只在一个或两个点上进行，而往往忽略了在一段时间内施加大于连续承载能力 (I_c) 的实际电流 (I_{actual}) 所产生的实质性影响（没有得到具体直观的体现）。

如图 A 所示，我们给出了一种图示上的改进方法，用以展示所需功率损耗 ($W_{\text{atts_loss}}$) 大于连续承受能力的影响，并以图形方式确定了评估中特定条件下的相对 TCT（如果不是有效的），从而克服设计中遇到的难题。其中， I_{actual} （评估中）/ I_c （连续电流）之比大于 1，且已知用于产生应用所需的扭矩 (T_{required})。

用户还可以利用图表(图 B) 确定在其特定条件下有效 TCT_{motor} 和 TCT_{coil} （空气）之间的相对比较情况。然而，需要注意的是，在上述条件下，电机安装线圈的热时间常数 (TCT_{coil} （已安装）) 比 TCT_{motor} 更重要，而 TCT_{coil} （空气）可能过于保守，导致没有实际合理用途（因为此数据为根据磁线圈的特定质量计算得出，并未考虑到其安装在电机框架内）。 TCT_{coil} （已安装）被标识为 TCT_{winding} ，代表热非均相电机材料的第一层材料接触（例如线圈与环氧树脂/空气和接缝的接触）。

由于 I_{actual} （评估中）大于 I_c ，所以公布的 TCT [线圈（空气）、绕组（线圈已安装）和电动机] 不再恒定，因为当 I_{actual} 小于等于 I_c 时，所考虑的热量时间会随着电动机的实际功率损耗 (W_{loss} （实际值）) 而动态变化。例如，当实际电流（评估中）小于等于 I_c 时，已公布的特定伺服电机 TCT 可能处于以下相对范围： TCT_{coil} （空气）为 25 秒， TCT_{winding} 为 60 秒， TCT_{motor} 为 600 秒。然而，当 I_{actual} 大于 I_c 时，有效的 TCT 将明显低于作为函数 (W_{loss} （实际值）与 W_{loss} （额定值）的对比) 的已公布值。



如今，大多数伺服电机的设计在电机绕组、叠片以及机壳之间都具有良好的热传导性能，尤其是那些采用环氧树脂灌封的伺服电机。然而，这些材料仍属于非均质材料，有着明显不同的热传递能力（即导热系数）。

过载对热时间常数 (TCT) 的影响

在图 A 中，通过 $W_{loss}(\text{实际值})/W_{loss}(\text{额定值})$ 的百分比，可以看出在特定条件下 I_{actual} (实际值) 大于 I_c (电机) 的重要影响。在图中，这两个值都与计算出的热时间常数 (TCT) 乘数相对应 (例如， I_{actual} 等于 5 倍 I_c 时，要求绕组耗散的功率比额定连续承受能力高 2500% (25 倍))。

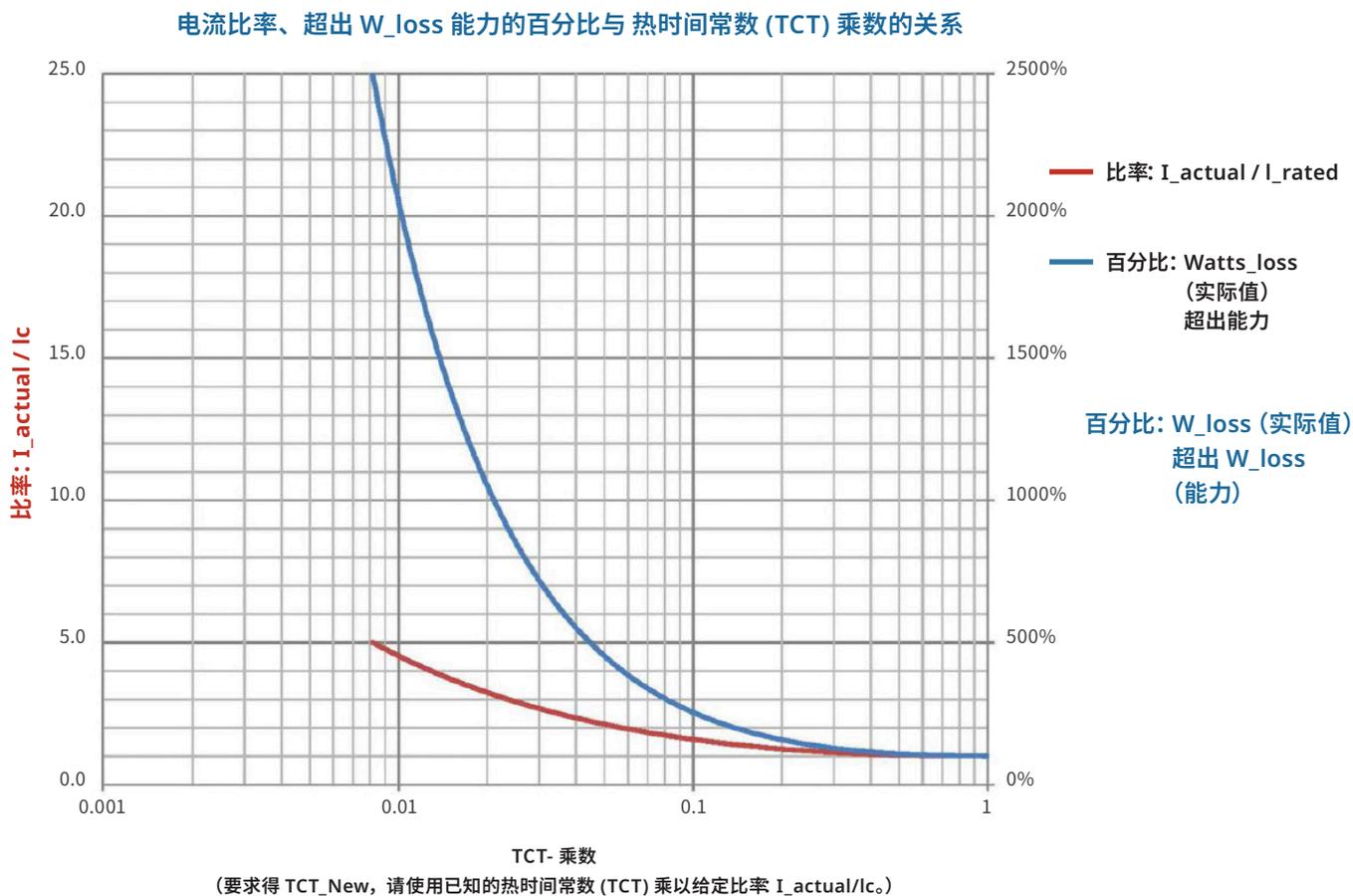
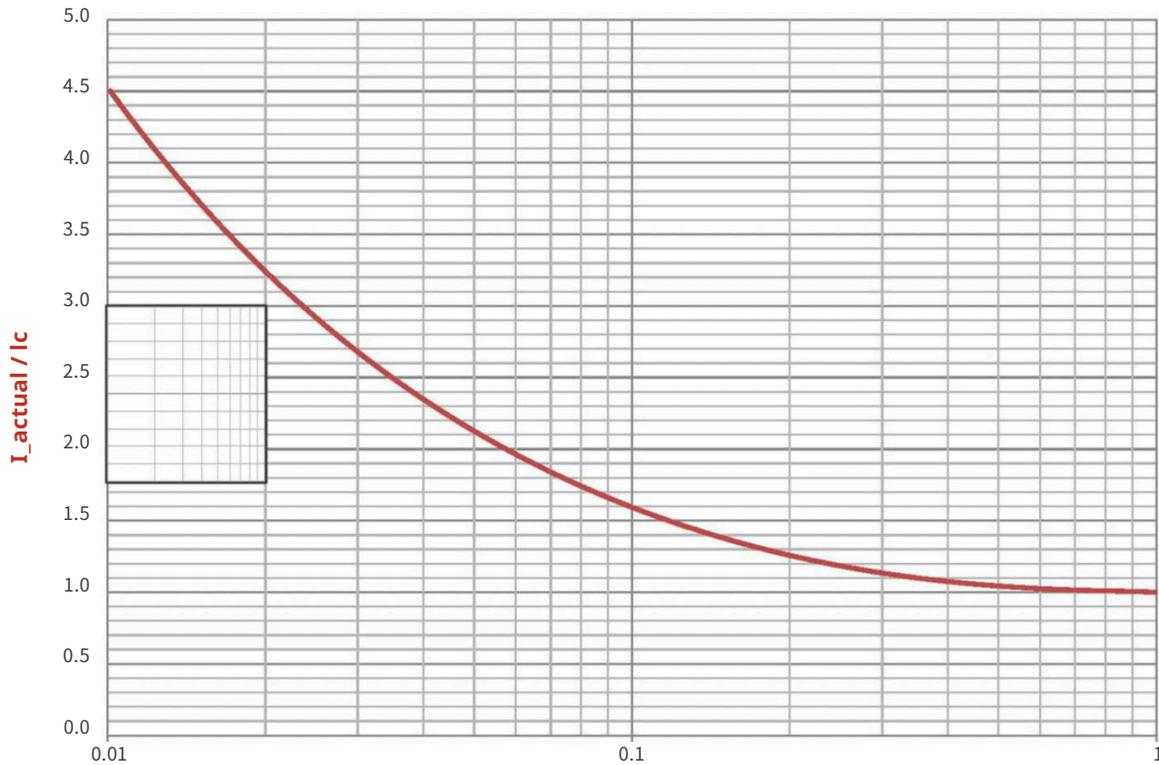


图 A: 显示热时间常数 (TCT) 在 I_{actual} 升高超过 I_c 时所产生的影响。

图 B 使我们能够以图形方式确定特定的 TCT，进而确定评估中特定条件下达到最终温度所需的时间。方法是将 X 轴的相应 (TCT) 乘数作为所需 I_{actual} 相对于已知 TCT 的函数，然后将结果乘以 5，得出达到最终温度所需的时长。

电流比率与热时间常数 (TCT) 乘数的关系



TCT 乘数 (使用已知热时间常数 (TCT) 的值来根据给定 I_{actual}/I_c 比率求出 TCT_{New} , 例如 $TCT_{New}(\text{绕组}) = TCT_{winding} \times TCT_{multiplier}$)

图 B: 显示实际 I_c 略大于 I_c 至 4.5 倍 I_c 时的热时间常数 (TCT) 乘数。

例如:

问题 1: 无论驱动器能否提供电流, 假定起始环境温度为 25°C, 电机能否承受 20 秒的峰值电流 (3 倍 I_c)? 如果使用最初为解决该应用正常运行问题而提议的电机, 其 $TCT_{winding}$ 等于 TCT_{coil} (已安装), 且均为 60 秒。

问题 1 答案: 使用图 B, 我们只需在左侧纵轴上找到对应 3 的位置 (3 倍 I_c), 然后沿水平方向移动直到与曲线相交, 然后在半对数刻度的 X 轴上读取相应的乘数, 再将其值应用到已公布的 $TCT_{winding}$ 上。对于 3 倍 I_c 的情况, 此交点位于 X 轴对数刻度上约 0.023 的位置。在 3 倍 I_c 时, 有效 $TCT_{winding}(3I_c) = 0.023 \times 60 =$ 约 1.38 秒。

注: 95% 的热升温将在 3 倍热时间常数, 也即约 4.14 秒 [3×1.38 秒] 内发生, 其中 $5 \times TCT = 99.3\%$ 的升温时间或 6.9 秒 (达到最终额定绕组温度的总时间)。

在这种情况下, 我们需要选择更大的电机或 $TCT_{winding}$ 更长的电机, 或者根据所需考虑的条件更改规格。

如果我们使用计算达到最终温度所需的公式 $t_{ultimate} = -TCT_{winding} \times \ln[1-(I_c/I_{actual})^2]$, 此处 $t_{ultimate} = -60 \text{ 秒} \times \ln[1-(1/3)^2] = 7.06 \text{ 秒}$, 由此得出 $TCT_{winding}(3I_c) = 7.06/5$ 或约等于 1.41 秒。

问题 2: 由于对于问题 1 中所期望的电机而言，使其在 3 倍 I_c 下运行 30 秒是不可能的，那么我们能否使该电机在 2 倍 I_c 下运行 20 秒呢？

问题 2 答案: 同样，使用图 B，对于 2 倍 I_c ，交点约处于 X 轴对数刻度上 0.057 的位置。在 2 倍 I_c 时，有效的 $TCT_winding(2I_c) = 0.057 \times 60 =$ 约 3.42 秒。已知 $5 \times TCT = 99.3\%$ 的温升时间约为 17.1 秒，这个值仍小于提议的规格要求：20 秒。所以，即便基于此更改后的规格要求（2 倍 I_c 下运行 20 秒），我们仍需要选择更大的电机或 $TCT_winding$ 更长的电机，或者再次根据所需考虑的条件更改规格。

注: I_c 的乘数越小， $TCT_winding$ 对电机整体热时间常数 (TCT_motor) 的实际影响就越小；当 I_{actual}/I_c 接近 1 时，电机的其他热不均匀材料（例如铝外壳）就会发挥作用。

在所有条件下都能实现出色性能

显然，在机器设计规划阶段有许多因素需要考虑。针对特定应用的伺服电机和驱动器选型，会影响机械装置在所有条件下（正常运行、紧急停止以及不可预见的潜在情况）达成预期性能的成功率。当为了实现特定目标，要求电机在较长时间内维持高于其连续承受能力的转矩和电流时，使用简化的图形化方法（图 B）有助于克服初始设计中的难题，进而做出全面的风险管理决策。

本文提供了一种了解 I_{actual}/I_c 过载情况严重程度的直观参考。当 I_{actual}/I_c 很高时，可以准确地估算出 $TCT_winding$ （新）或达到最终温度的时间，这是因为在保持 TCT_motor 优势的必要相对时间内，均质材料无法传递热量。不过，当比率 I_{actual}/I_c 接近一时，热力学响应会涉及到两个指数函数，每个函数都有其各自的时间常数 ($TCT_winding$ 和 TCT_motor)。

由于非均质材料的热时间常数相差甚远，这种混合使用的情况超出了本文的讨论范围，通常需要进一步评估和理解。

准备好向前迈进了吗？

[联系科尔摩根](#)，与科尔摩根的专家讨论您在伺服电机应用方面的需求和目标。

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，提供高性能且可靠的电机、驱动器、线性执行器、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。