



惯量匹配规则的演变

随着处理器速度不断加快,控制算法日益精密化,以往公认的电机与负载惯量匹配原则已经无法适应当前趋势。

这种过时的方法在高负载惯量、低连续转矩要求的应用中会增加成本以及不必要的质量。在开发兼顾带宽和伺服刚度的高性能解决方案时,电机惯量只是其中的一个考量因素。

规则的起源

众所周知,惯量匹配主要解决伺服电机连动负载的控制稳定性问题。在70年代,有刷伺服电机逐步取代机床上的液压系统,为此设计人员会根据机器的预期性能先计算出负载惯量、转矩和转速要求,然后根据转矩和速度要求来挑选电机。如果电机惯量和负载惯量不接近1:1,则使用更大惯量的电机或变速箱(减少折算到伺服电机上的惯量),由此增加了系统成本。尽管惯量匹配有利于优化功率传递,但无法保证系统的运行效率。理想情况下,应减少总体系统惯量,以降低能耗。然而,电机越大,增加电机惯量的同时,对电机的转矩要求也会提高。

除了惯量匹配外,还应更多的考虑应用定容。在液压系统向电机过渡的过程中,现有技术不利于对整个机械和控制系统进行快速分析。在这类闭环伺服系统的结构中,某些元件会显著影响机器性能,例如电机、附加反馈装置、与负载的耦合以及伺服回路整定能力。为提供良好性能,就要

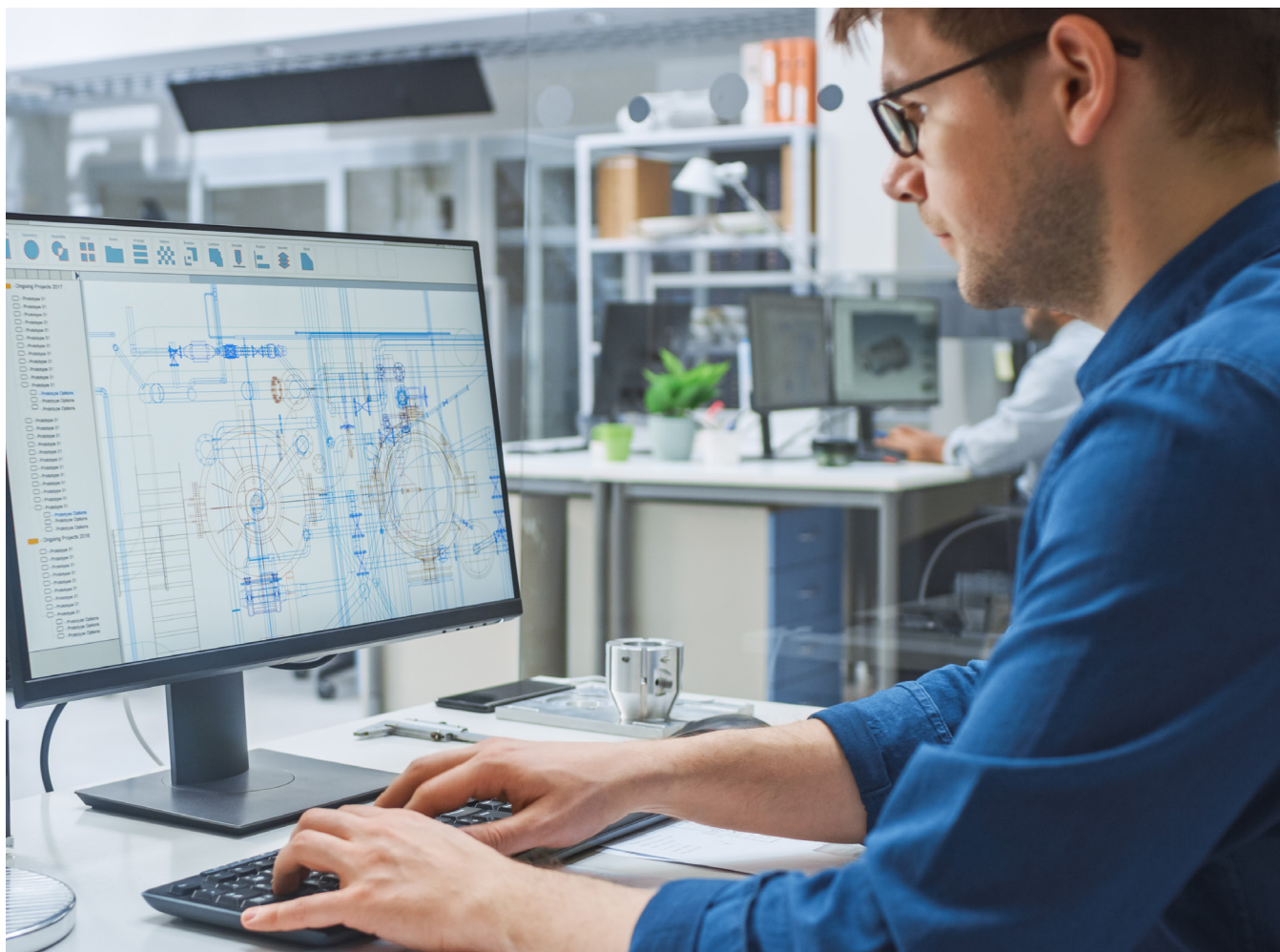
对伺服回路进行整定,使其按所需的带宽和伺服刚度运行,从而以最小的超调优化对控制器命令的响应。伺服驱动器主要通过电流、速度和位置三个回路来控制伺服电机。每个回路可以通过整定对转矩或速度变化做出快速、稳定的响应,实现运行平稳,以此增强系统响应。在早期,伺服回路整定依赖于分立元件和电位器来试探性调整回路增益。其有限的分析工具和处理能力再加上分立元件,要求电机和负载之间必须具备紧密的惯量匹配。即使处理器和分析技术不断改进,伺服回路数字化整定技术日益成熟,但传统的1:1黄金匹配规则仍沿用至今。

技术进步

随着无刷电机技术、高能永磁体和数字整定回路的出现，惯量匹配遇到了新的难题。与以往的有刷式电机相比，采用高能磁铁转子的电机能够显著降低惯量。某些电机可以满足应用所需的持续和峰值转矩要求，但其负载和电机之间的惯量不匹配度很高。尽管伺服电机数字整定回路可以很容易的通过调节增益和滤波器来实现稳定控制，但低处理器速度、反馈设备的低分辨率等不利因素，推动了带附加惯量的无刷电机方案的发展。

处理能力的提高使得人们能够进行复杂分析，建立精确的数学模型并模拟系统响应。结合强大的集成伺服驱动工具的现代能力，能够对复杂机械系统进行交互分析，从而简化了伺服系统的优化过程。高级的分析技术还允许机器设计师深入了解机械系统的精确特性，以及如何解决性能限制。

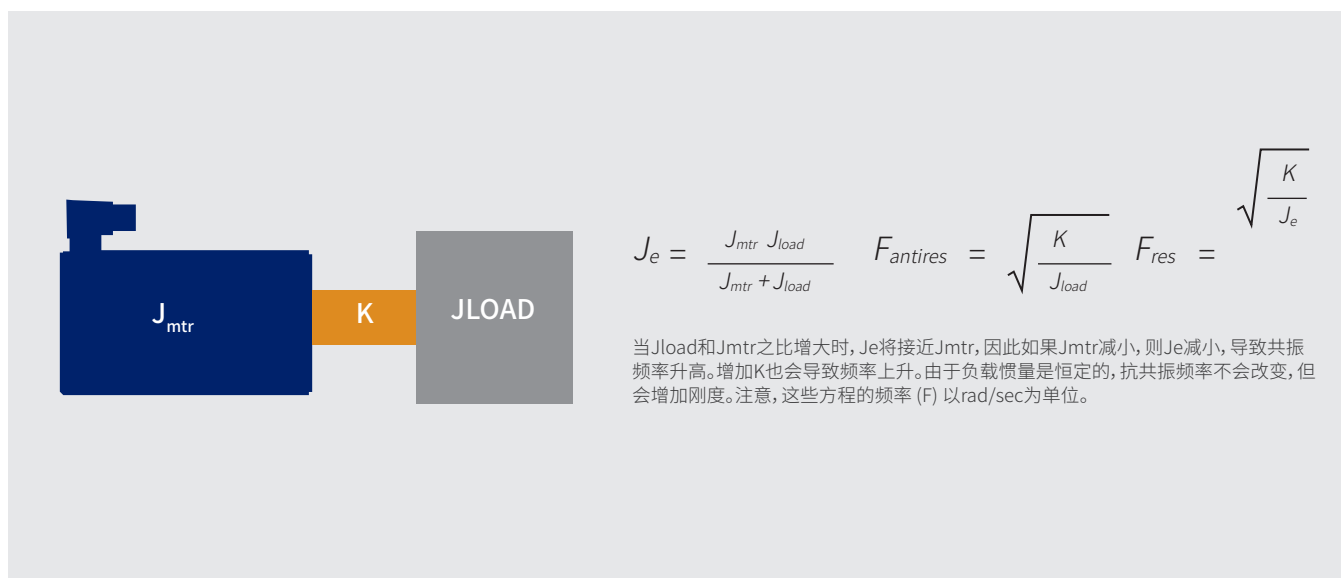
处理能力的提高使得人们能够进行复杂分析，建立精确的数学模型并模拟系统响应。



柔度 – 高带宽解决方案的克星

机械系统的柔度是指驱动负载和电机之间的自然弹性,它会造成响应时间延迟,导致系统带宽减少。在系统中引入大的惯量不匹配会将该问题放大,比如一台小型电机有足够的转矩来移动一个巨大的负载,但两者是通过耦合装置连接。当小型电机快速向大负载施加转矩时,越大的负载其响应就越迟缓,因为静止的物体会趋向于保持静止。该延迟是由于电机和负载之间的耦合柔度造成的,在负载开始移动之前会产生弹性变形。当负载最终与电机同步时,大惯量将使目标速度过冲,这又促使小型电机进行降速调整。但当系统调整大惯量的超速时,将再次越过目标转速,又一次触发小型电机进行再次调整。这种持续的循环会导致共振和系统不稳定。

大多数机械系统可以进行数学建模,并模拟其对不同的激励频率的响应,以快速识别频率响应——共振发生的地方。系统的带宽永远不能超过系统的初始抗共振点。因此,提高带宽的目标就变成了:通过确定和解决共振的原因来提高初始共振频率。在柔性系统中,随着柔度或弹性的增加,初始共振点的频率降低,从而降低了带宽。当驱动负载直接耦合到电机上时,系统柔度最小,不匹配性会得到缓解,这可以提高初始共振频率,增加系统带宽。



增加刚度和减小系统惯量

机械系统的数学模型表明, 对于带宽更高、成本效益更高的系统, 最终的解决方案是增加机械刚度和减小系统总惯量。

并非适用于所有应用, 因此将在系统中引入柔性环节。目前先进的分析工具能够很容易识别出会降低系统性能的柔性环节。

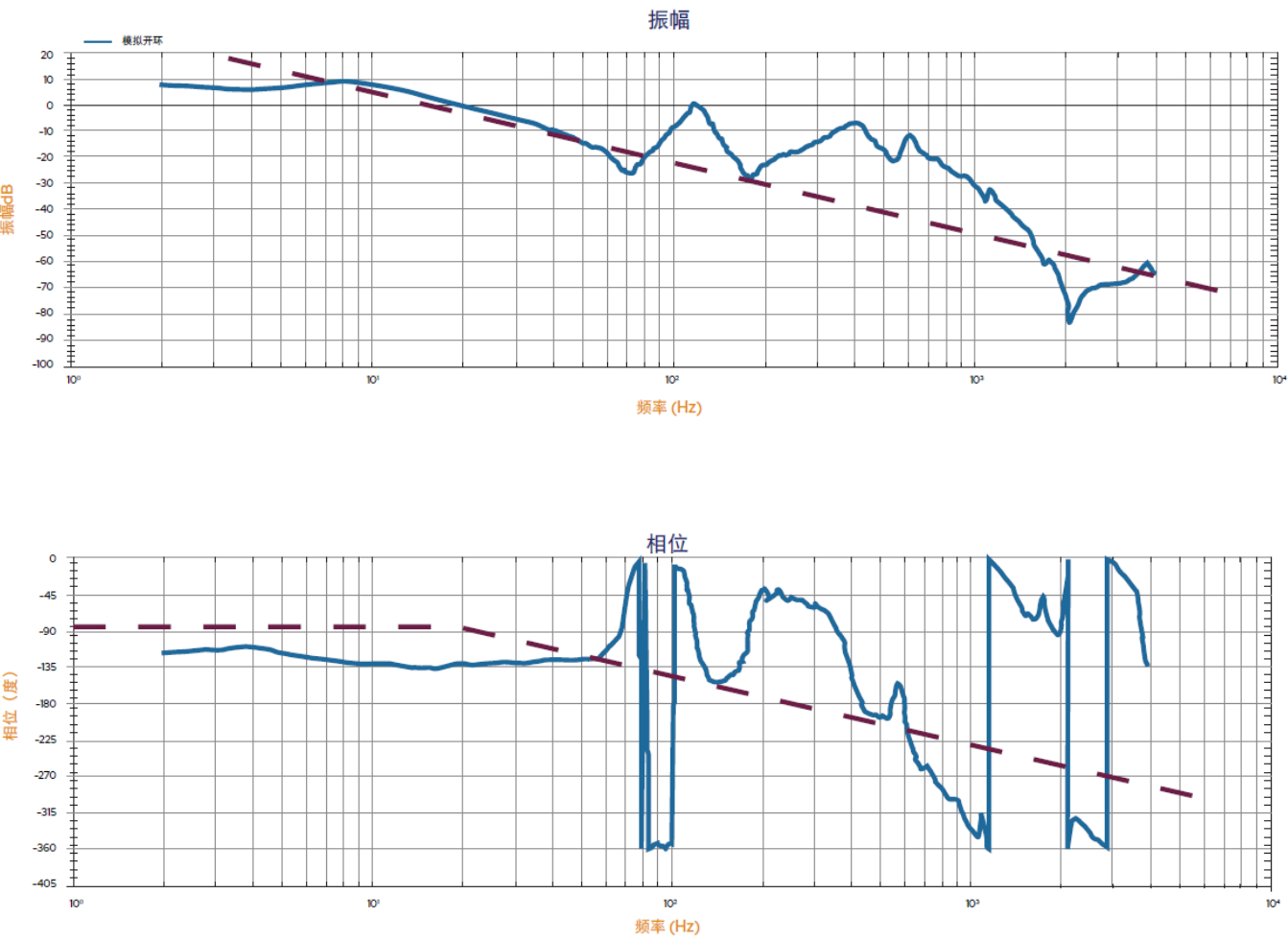
假定在直驱解决方案中, 负载以接近零的柔度直接耦合到电机上。则即使惯量不匹配超过1000:1, 也可以实现对系统带宽的精确控制。在一个刚度非常大(没有柔度)的系统中, 应对伺服系统进行尺寸配置, 以提供必要的转矩, 按具体应用所需的方式来移动系统惯量。由于直驱解决方案

波特图

波特图是一种强大的分析工具,通过两个图表来显示系统对注入信号的频率响应,以确定系统的振幅和相位滞后。除了带宽、相位和增益裕度、共振点和反共振点外,它还提供了惯量不匹配、连接体数量、摩擦水平的信息,并识别开环和闭环带宽、相位和增益裕度以及共振频率。在通过调整回路增益、安装各种数字滤波以及机械装置调整来进行系统整定以获得卓越性能时,这些信息极为有用。

绘图测量

波特图由增益和相位图组成,具有如下特性。



在一个完美的系统中,我们预期振幅图是一条-20dB/decade的负斜率直线。相位图应从-90°度开始,从振幅跨过0dB的点起以负斜率下降。

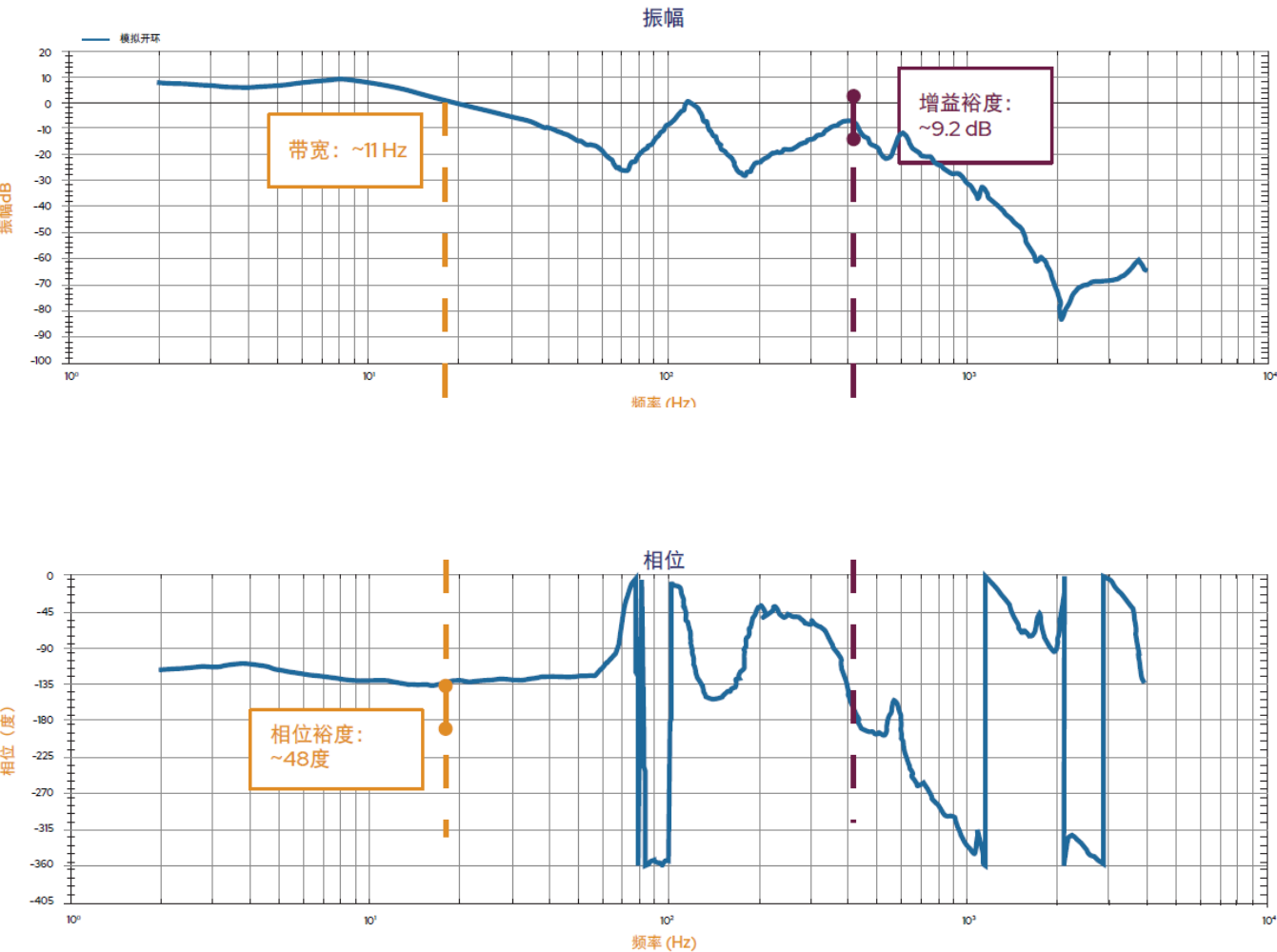
计算带宽 – 相位和增益裕度

使用有效的波特图，可以确定开环和闭环带宽，以及相关的增益和相位裕度。带宽由开环图中达到0dB (~11Hz) 的频率表示。相位裕度是-180度 (~48度) 以上的度数，增益裕度是对应于-180度 (~9.2db) 相位的幅度测量值。下面的例子说明了如何在不考虑惯量不匹配的情况下，通过改进解决方案的系统刚度成功优化性能和成本。

轴刚度的增加降低了柔度，从而改善了性能。

以下图表示通过消除惯量匹配方法，可以提高机械刚度和减少惯量，从而提升性能并节省成本。

采用惯量匹配法对三轴激光切割机的轴电机进行选型。其需要对机器进行重新设计以减少成本和提升机器性能。对应用要求的总结表明：替代性电机解决方案可提高系统共振点，增加增益和相位裕度，并提升稳定性。选用的伺服电机减小了系统的总惯量，增大了轴径较大(共振频率较高)的轴的刚度，在较小的外形尺寸中提供了较高的功率密度。



轴	原始Jm (kg-cm ²)	新Jm (kg-cm ²)	负载惯量 (kg-cm ²)	原始惯量不匹配	新惯量不匹配	提高%	成本节省%
X	120	67.7	256.75	2.14	3.79	77%	17%
Y	17	4.58	9.56	0.56	2.09	273%	34%
Z	121.6	80	29.4	0.24	0.37	54%	17%



结论

凭借先进的整定能力、高性能伺服电机设计及高分辨率反馈装置，现代伺服驱动器消除了负载和电机惯量不匹配的痼疾。在设计刚性机构过程中，合理地确定应用容量并借鉴卓越做法，可实现带宽更高、移动和稳定时间更好、动态控制性能坚实的高性能运动控制系统。

成为科尔摩根的合作伙伴，探寻最优的运动控制方案

科尔摩根不仅仅是供应商，更是合作伙伴，尽心尽力助您取得成功。您的工程师可与我们创建运动控制系统的工程师，以及了解如何满足特殊材料成型要求的设计人员直接交流。我们的自助式设计工具可帮助您在线建模、选择和优化产品。凭借遍布全球的制造、设计、应用和服务中心，您始终可以得到业内独一无二的可靠供应、工程协作专业知识和个性化技术支持。无论是升级现有机器还是为您的客户设计最先进的新一代机器，我们都能够帮助您打造卓越的产品。age.