



A Evolução das Regras no Casamento de Inércia

O princípio aceito no casamento de inércia do motor à inércia da carga não é mais pertinente, considerando os processadores velozes e algoritmos de controle avançados da atualidade.

Esse método ultrapassado aumenta os custos, adicionando massa desnecessária em aplicações onde a inércia da carga é alta e os requisitos de torque contínuo são baixos. A inércia do motor é apenas uma das considerações para o desenvolvimento de uma solução de desempenho ideal, que requer frequência de acomodação adequada e rigidez do servo.

A Origem Da Regra

Acreditava-se que o casamento de inércias habilitasse o controle estável de uma carga conectada a um servomotor. Na década de 1970, quando os servomotores com escovas começaram a substituir a hidráulica no mundo das máquinas-ferramentas, os projetistas calculavam os requisitos de inércia da carga, torque e velocidade com base no desempenho esperado da máquina. Selecionava-se um motor que atendesse aos requisitos desejados de torque e velocidade, se a inércia do motor refletida à carga não estivesse próxima da relação 1:1, substituíam-se o motor, por um com inércia mais alta ou se utilizava um redutor (o que reduziria a inércia refletida, vista pelo servomotor), aumentando assim o custo do sistema. Embora a transferência ideal de energia ocorra quando as inércias são correspondentes, isso não garante um sistema operacional eficiente. No melhor dos casos, a inércia total do sistema deve ser reduzida para obter menor consumo de energia. No entanto, um motor maior requer um torque superior para acelerar a inércia agregada do motor.

Há mais considerações no dimensionamento de aplicações do que apenas o casamento de inércia. Durante a transição de motores hidráulicos para elétricos, a análise rápida dos sistemas mecânicos e de controle foi limitada pela tecnologia

disponível. A construção desses sistemas de servos de malha fechada inclui elementos que podem afetar drasticamente o desempenho da máquina, como o motor, o dispositivo de feedback conectado, o acoplamento à carga e os recursos de tuning das malhas de controle. Para fornecer bom desempenho, as malhas de controle do servo são ajustadas para operar com a frequência de acomodação e rigidez de servo desejados, o que otimiza a resposta aos comandos do controlador com o mínimo de overshoot. O servomotor é controlado por um servodrive, utilizando malhas de controle de corrente, velocidade e posição. Cada malha de controle é ajustada para criar uma resposta aprimorada do sistema através da estabilidade, reações rápidas às perturbações de torque ou velocidade e operação suave. Nos anos iniciais, o tuning das malhas de controle do servo usava componentes e potenciômetros discretos para ajustar os ganhos do sistema, sendo determinados por experimentação. Ferramentas analíticas e poder de processamento limitados, combinados com componentes discretos obrigavam um casamento de inércia baixo entre o motor e a carga. Mesmo com o aprimoramento dos processadores e das análises das malhas de controle ajustadas digitalmente, a regra antiga de casamento de inércia ideal de 1:1 continuou a se perpetuar.

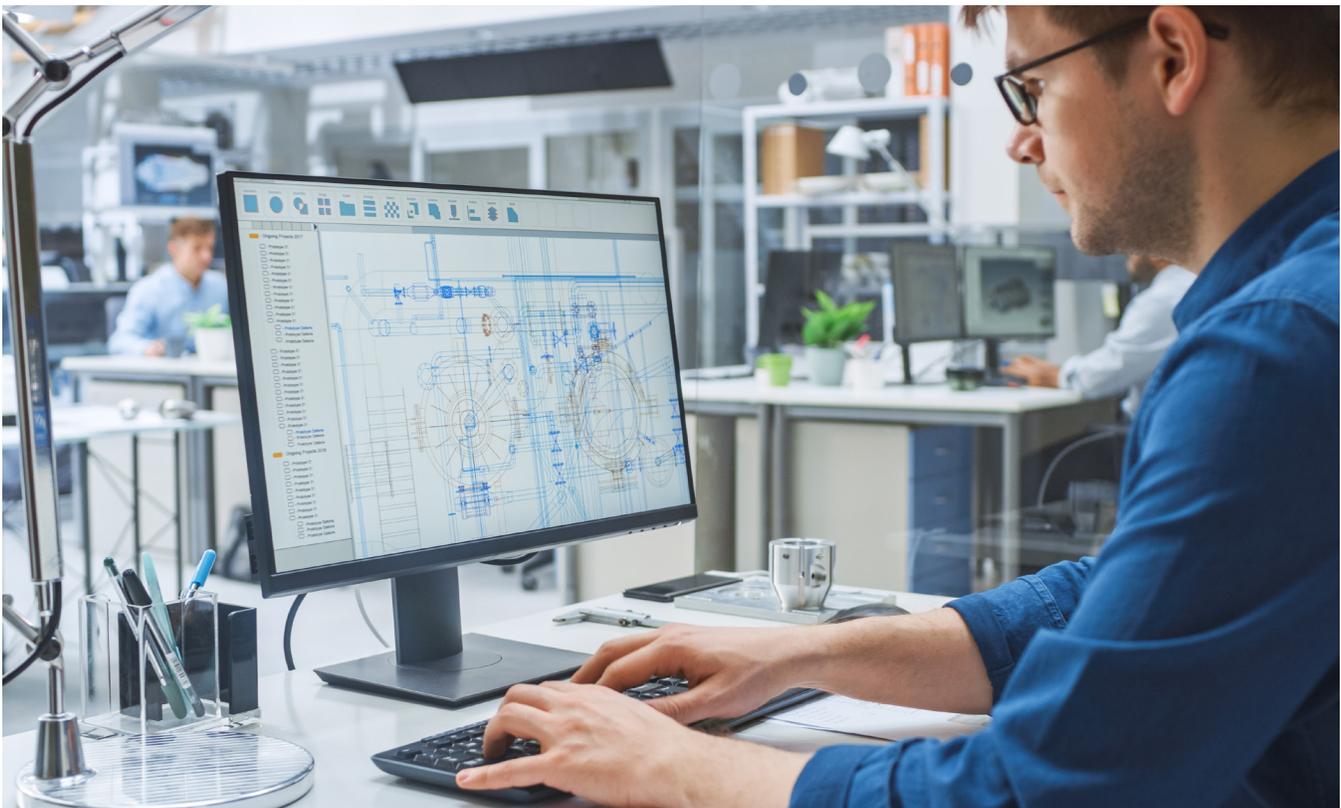
O Avanço Tecnológico

Com a chegada da tecnologia de motores sem escovas, ímãs de alta energia (Neodímio-Ferro-Boro) e ajuste digital das malhas de controle, o protocolo de casamento de inércias encontrou novas complicações. Os ímãs de alta energia localizados no rotor reduziram significativamente a inércia do motor, em comparação com os predecessores do tipo escova. Os motores que atendem às capacidades de torque contínuo e de pico exigidas pela aplicação apresentaram incompatibilidades maiores com a inércia do motor. Embora o ajuste digital das malhas de controle do servomotor facilitem consideravelmente o ajuste de ganhos e filtros para fornecer um controle estável, baixas velocidades do processador, dispositivos de feedback de baixa resolução e outros fatores limitantes, levaram ao

desenvolvimento de opções de motores sem escovas com inércia adicional.

O aumento da capacidade de processamento permitiu que análises complexas criassem uma modelagem matemática precisa e simulação das respostas do sistema. Os recursos modernos que incorporam as poderosas ferramentas integradas de servodrives, criam análises interativas de sistemas mecânicos complexos, simplificando a otimização dos sistemas de servo. A análise avançada também permite que o projetista da máquina entenda precisamente as características do sistema mecânico e como lidar com as limitações de desempenho.

O aumento da capacidade de processamento permitiu que análises complexas criassem uma modelagem matemática e simulação de respostas do sistema precisas.



Conformidade – O terror das soluções com alta frequência de acomodação

A conformidade em um sistema mecânico é a elasticidade natural dos mecanismos entre a carga acionada e o motor, ela cria atrasos nos tempos de resposta, causando à redução da frequência de acomodação do sistema. Acrescente uma grande incompatibilidade de inércia no sistema e o problema é amplificado, como no caso de um motor pequeno com torque suficiente para mover uma carga excepcionalmente grande, mas conectada através de um dispositivo de acoplamento. Quando o motor pequeno aplica rapidamente torque à grande carga, a carga maior hesita em responder, pois um objeto em repouso tende a permanecer em repouso. O atraso é resultado da conformidade do acoplamento entre o motor e a carga, que introduz resistência antes que a carga comece a se mover. À medida que a carga se sincroniza com o motor, a grande inércia ultrapassa a velocidade alvo, fazendo com que o motor menor se ajuste diminuindo a velocidade. Quando o sistema ajusta o excesso de velocidade da grande inércia, a velocidade alvo é novamente ultrapassada, fazendo com

que o motor pequeno se ajuste novamente. Esse ciclo contínuo cria ressonância e um sistema instável.

A maioria dos sistemas mecânicos pode ser modelada e simulada matematicamente usando várias frequências de excitação para identificar rapidamente a resposta de frequência, onde ocorre uma ressonância. A frequência de acomodação de um sistema nunca pode exceder o ponto de antirressonância inicial do sistema. O objetivo ao aumentar a frequência de acomodação é descolar a frequência da ressonância inicial para cima, através da identificação e do tratamento da causa da ressonância. Em um sistema complacente, à medida que a conformidade ou elasticidade aumenta, a frequência do ponto de ressonância inicial é reduzida, diminuindo a frequência de acomodação. Quando a carga movida é acoplada diretamente ao motor para minimizar a conformidade, a incompatibilidade é atenuada, aumentando a frequência de ressonância inicial e criando um sistema de frequência de acomodação mais alta.

$$J_e = \frac{J_{mtr} J_{load}}{J_{mtr} + J_{load}} \quad F_{antires} = \sqrt{\frac{K}{J_{load}}} \quad F_{res} = \sqrt{\frac{K}{J_e}}$$

À medida que a razão entre J_{carga} e J_{mtr} aumenta, J_e se aproxima de J_{mtr} , portanto, se J_{mtr} diminuir, J_e diminuirá, causando o aumento da frequência de ressonância. Aumentar K também faz com que a frequência suba. A frequência antirressonante não muda, pois a inércia da carga é constante, mas aumenta a rigidez. Observe que a frequência (F) está em rad/s para essas equações.

Maior rigidez e inércia reduzida do sistema

Os modelos matemáticos que representam um sistema mecânico mostram que a solução definitiva para uma frequência de acomodação mais alta e um sistema economicamente viável é aumentar a rigidez mecânica e reduzir a inércia total do sistema.

Considere uma solução de acionamento direto em que a carga seja acoplada diretamente ao motor com conformidade quase nula. O controle preciso do sistema com boa frequência de acomodação pode ser alcançado mesmo com inércias superiores a 1000:1. Em um sistema

extremamente rígido (não complacente), o sistema servo deve ser dimensionado para fornecer o torque necessário para mover a inércia do sistema da maneira exigida pela aplicação específica. Como as soluções de acionamento direto não são adequadas para todas as aplicações, elementos complacentes serão introduzidos no sistema. As ferramentas analíticas avançadas da atualidade identificam rapidamente os elementos complacentes que reduzem o desempenho do sistema.

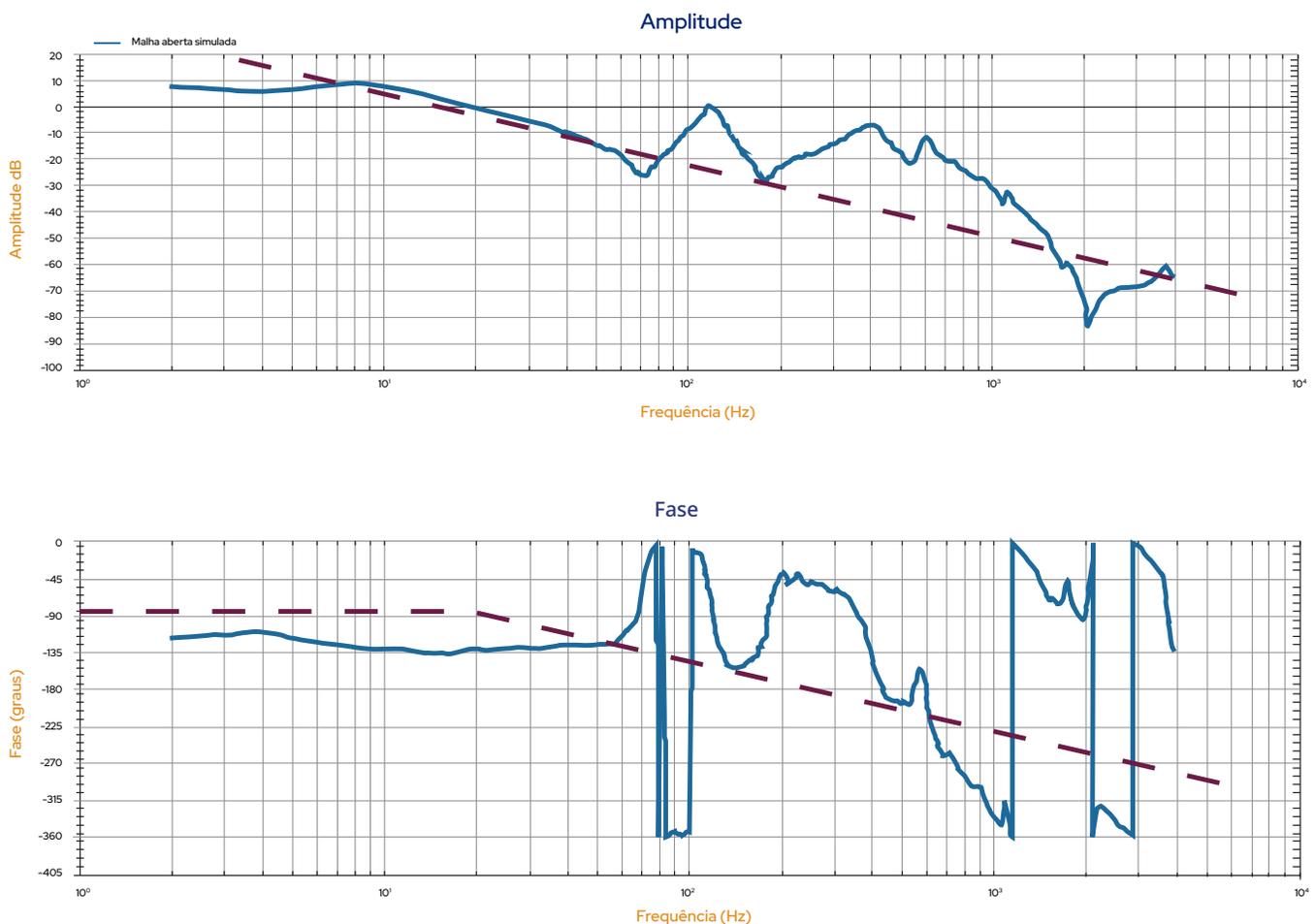
O diagrama de Bode

O diagrama de Bode é uma poderosa ferramenta analítica que consiste em dois gráficos que ilustram a resposta de frequência de um sinal injetado para identificar a amplitude e o atraso de fase do sistema. Frequência de acomodação, margens de fase e ganho, pontos de ressonância e antirressonância são apenas alguns elementos capturados em um diagrama de Bode. Ele também fornece pistas sobre a incompatibilidade de inércia, o número de corpos

conectados e os níveis de atrito, além de identificar a frequência de acomodação de circuito aberto e fechado, as fases e as margens de ganho e as frequências de ressonância. Essas informações são inestimáveis para ajustar o sistema para obter o desempenho ideal, ajustando os ganhos da malha de controle, instalando vários filtros digitais e considerando os ajustes na mecânica.

Misurazioni del diagramma

Os diagramas de Bode consistem em um diagrama de Amplitude e outro de Fase e terão características como mostrado abaixo.



Em um sistema perfeito, esperamos que o gráfico de amplitude seja uma inclinação negativa direta, -20 dB/década. O gráfico de fase deve começar em -90° e cair em uma inclinação negativa a partir do ponto em que a amplitude cruza 0 dB.

Cálculo da frequência de acomodação – Fase e margens de ganho

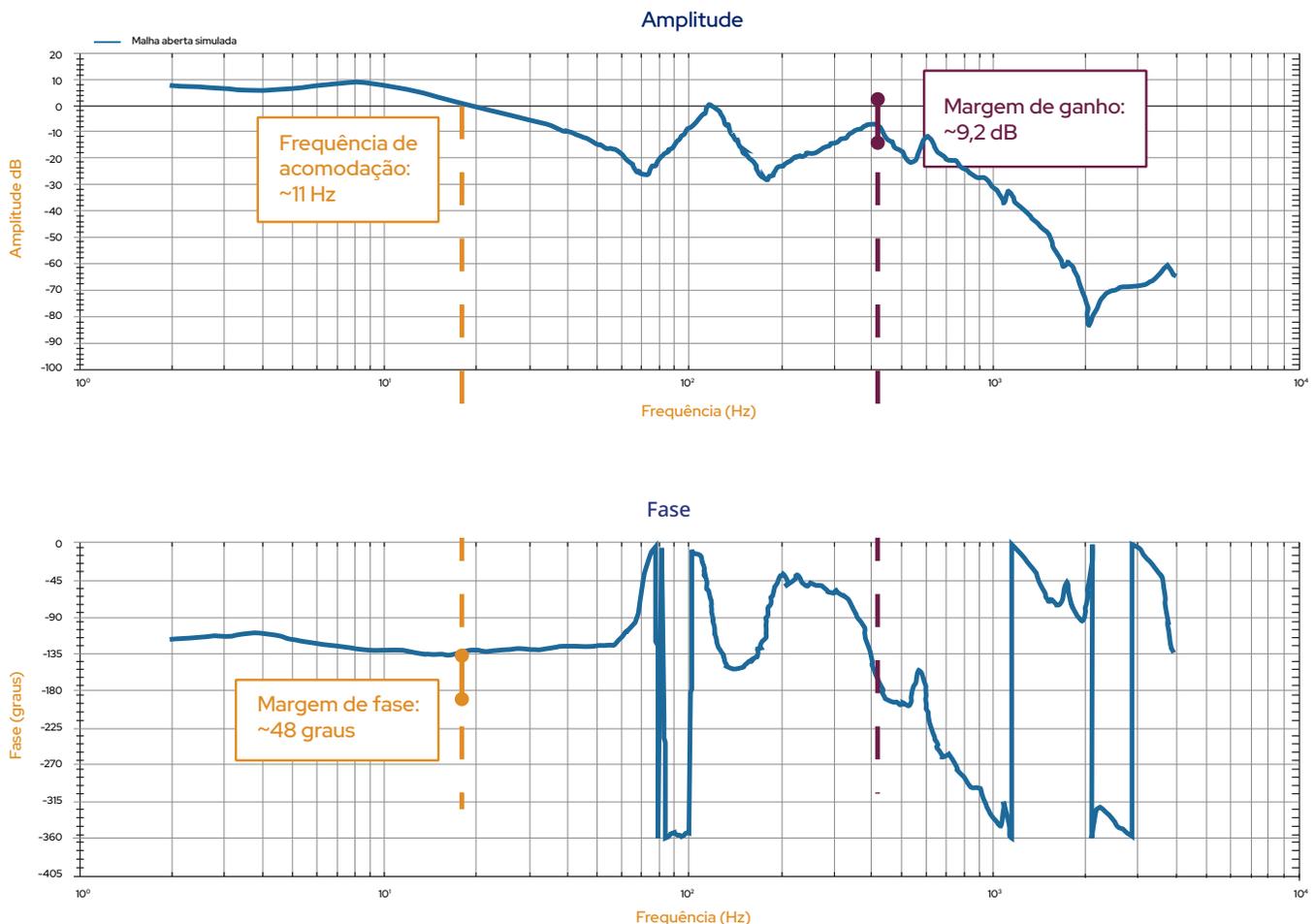
Usando um diagrama de Bode válido, é possível determinar as frequências de acomodação de malha aberta e fechada, bem como o ganho e as margens de fase associados. A frequência de acomodação é representada pela frequência na qual o diagrama de malha aberta atinge 0 dB (~11 Hz). A margem da fase é o número de graus acima de -180 graus e a margem de ganho é a medição de amplitude correspondente a uma fase de -180 graus (~9,2 dB).

O exemplo a seguir ilustra como otimizar com êxito o desempenho e o custo aplicando uma rigidez aprimorada do sistema à solução, sem se preocupar com a incompatibilidade de inércia.

Uma máquina de corte a laser de três eixos foi projetada usando a abordagem de inércia para selecionar os motores

dos eixos. Um reprojeto foi solicitado para reduzir custos e melhorar o desempenho da máquina. Uma análise dos requisitos de aplicação mostrou que soluções alternativas de motores poderiam aumentar o ponto de ressonância do sistema para permitir ganhos e margens de fase adicionais, bem como maior estabilidade. O servomotor selecionado reduziu a inércia total do sistema, aumentou a rigidez do eixo através de um maior diâmetro (maior frequência ressonante) e forneceu maior densidade de potência em um pacote menor. A maior rigidez do eixo reduziu a conformidade, o que melhorou o desempenho.

A tabela a seguir ilustra o desempenho aprimorado e a economia com a eliminação da abordagem por casamento de inércia, em favor do aumento da rigidez mecânica e redução da inércia.



EIXO	Jm original (kg-cm ²)	Novo Jm (kg-cm ²)	Inércia da carga (kg-cm ²)	Incompatibilidade de inércia original	Nova incompatibilidade de inércia	% de aumento	% de economia
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%



Conclusão

Os servodrives modernos com recursos avançados de tuning e projetos de servomotores de alto desempenho que incorporam feedback de alta resolução eliminam as preocupações de incompatibilidade de inércia da carga em relação ao motor. O dimensionamento adequado da aplicação e as práticas recomendadas para projetar um mecanismo rígido proporcionam um sistema de motion de alto desempenho, capaz de maiores frequências de acomodação, tempos de movimentação e acomodação aprimorados e controle dinâmico robusto.

Sobre a Kollmorgen

A Kollmorgen, uma marca Regal Rexnord, tem mais de 100 anos de experiência em Motion, comprovada com motores, drives, atuadores lineares, soluções de controle para AGV e plataformas de controle de automação de maior desempenho e confiabilidade do setor. Oferecemos soluções inovadoras que são inigualáveis em desempenho, confiabilidade e facilidade de uso, dando aos fabricantes de máquinas uma vantagem inquestionável no mercado.