

Tudo sobre motores de passo

1ª Parte: Os fundamentos

Por Timothy G. Constandinou

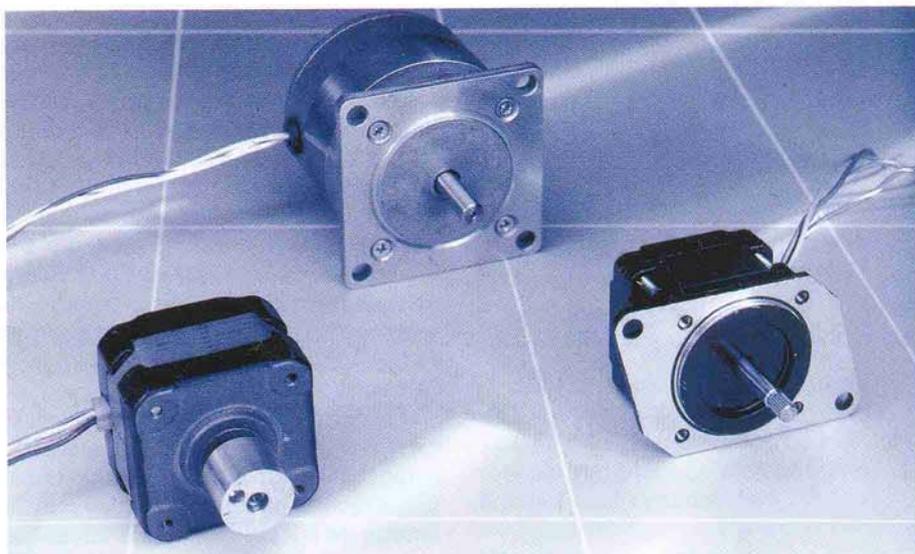
Os motores de passo, constituem uma dor de cabeça para muitos leitores, principalmente no que diz respeito à forma como são comandados. Este artigo de duas partes, pretende fornecer a informação necessária para compreender o funcionamento deste tipo de motores, bem como a forma de controlá-los. Na 2ª parte apresentaremos um circuito excitador com 4 canais, controlado por um computador PC.

Por vezes, num determinado aparelho é necessário um deslocamento angular ou linear, para posicionar com precisão um determinado componente. Embora seja possível utilizar um motor de corrente contínua ou alternada para executar este tipo de tarefa, é difícil determinar a posição exata do componente ou peça do mecanismo, a menos que se utilizem sensores de posição, codificadores, servos e sistemas de comando.

A melhor alternativa é usar um motor de passo. Trata-se de um componente eletromecânico, que converte pulsos em deslocamentos angulares precisos. A cada pulso, o eixo roda um pouco (passo) e permanece estável nessa posição se mais nenhum pulso for enviado. Aplicando uma série de pulsos, pode obter-se o deslocamento angular desejado. Se a série de pulsos não terminar, o eixo vai rodando constantemente com uma velocidade proporcional à frequência dos pulsos.

Aplicações clássicas

Os motores de passo são muito utilizados nos periféricos para computadores (scanners, discos rígidos, impressoras, etc), bem como nas câmeras de vídeo, nos sistemas de alinhamento de telescópios e antenas parabólicas, aparelhos usados em medicina, robótica, leitores de códigos de barras, máquinas, ferramentas, etc.



Tipos de motores de passo

À primeira vista os motores de passo são semelhantes aos outros motores, embora normalmente sejam menores, mais leves e possuam maior número de fios. No entanto, o processo de funcionamento é completamente diferente.

Motores de relutância variável

Este tipo de motores de passo não utiliza ímã permanente (figura 1). Por essa razão, o seu eixo roda livremente

sem qualquer restrição. São pouco comuns e usam-se principalmente em aplicações onde não é necessário um grande torque.

Motores de ímã permanente

Conhecidos em inglês com o nome de *canstack* e *tincan*, estes motores de passo possuem um rotor dotado de um ímã permanente (figura 2). Possuem baixa velocidade de rotação, baixo torque e grandes passos angulares de 45 ou 90

Vantagens dos motores de passo

- O ângulo de rotação é proporcional ao número de pulsos aplicados.
- A velocidade de rotação é proporcional à frequência dos pulsos.
- Sistema aberto sem necessidade de realimentação da posição do eixo.
- Excelente resposta à aceleração e desaceleração.
- Erros de posicionamento não cumulativos ($\pm 5\%$ do ângulo de passo).
- Funcionamento excelente em baixa velocidade e elevado torque, sem necessidade de engrenagens redutoras.
- Elevado torque de retenção quando energizado.
- Existência de torque apreciável mesmo quando não energizado.
- Funcionamento nos dois sentidos de rotação.
- Paradas prolongadas sem danos no motor.
- Ausência de escovas para maior vida útil.

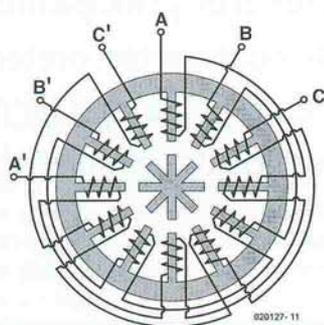


Figura 1. Motor de passo de relutância variável.

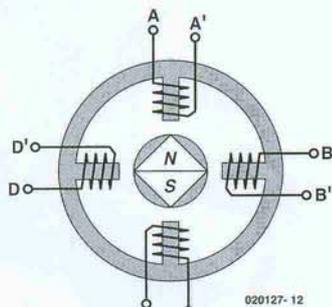


Figura 2. Motor de passo de ímã permanente.

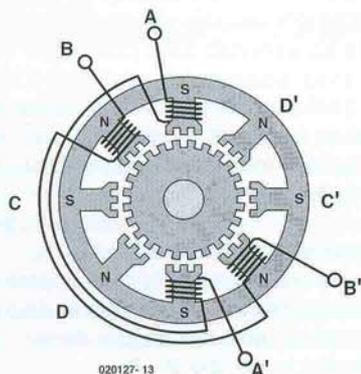


Figura 3. Motor de passo híbrido.

Inconvenientes

- Podem ocorrer ressonâncias no caso de controle inadequado.
- Funcionamento difícil em velocidades elevadas.
- No caso de sobrecarga (torque exagerado) podem ocorrer grandes erros de posicionamento.
- Geram menos torque do que os motores DC e AC do mesmo tamanho.

mente, a potência máxima faz elevar a temperatura do corpo do motor, 65° acima da temperatura ambiente. Se for possível montar um dissipador de calor no motor, a potência máxima poderá ser mais elevada.

Outros aspectos

Que mais necessitamos saber acerca dos motores passo-a-passo para os po-

dermos utilizar na prática?

graus. No entanto, a simplicidade da construção permite que sejam fabricados por baixo preço, sendo muito utilizados em aplicações de baixa potência como por exemplo nas impressoras.

Motores híbridos

Neste caso (figura 3), as vantagens dos motores de relutância variável e de ímã permanente são combinadas. Tanto o estator como o rotor de ímã permanente são dotados de vários dentes (pólos magnéticos), para o rotor poder rodar por múltiplos passos, normalmente $0,9^\circ$, $1,8^\circ$, ou $3,6^\circ$. Como regra geral rodam por passos de $1,8^\circ$.

Como possuem um grande torque estático e dinâmico e funcionam por pequenos passos, os motores híbridos são os mais utilizados nas várias aplicações industriais.

Tamanho

Por vezes os motores de passo são classificados em função do diâmetro do corpo. Por exemplo um motor com tamanho 23 possui um corpo cilíndrico com diâmetro de 2,3 polegadas. Os tamanhos mais encontrados são: 11, 17, 23, 34 e 42.

Potência

A potência varia desde algumas centenas de mW até vários Watts. A máxima potência que um motor de passo pode dissipar está relacionada com a temperatura desenvolvida nos enrolamentos e é sempre indicada claramente pelo fabricante. A potência é calculada com a fórmula $P=VI$.

Por exemplo, um motor de tamanho 23 pode ser especificado para 6 V - 1 A por fase. Portanto, se for alimentado com duas fases, o motor pode dissipar 12 W. Normal-

Campo magnético rotativo

Quando um enrolamento é percorrido por corrente elétrica, desenvolve-se um campo magnético no estator e o rotor roda até os dois campos magnéticos ficarem alinhados. Este fenômeno pode ser observado se o leitor aproximar um pequeno ímã de outro. O segundo roda imediatamente para os dois campos magnéticos ficarem alinhados. Como o leitor deve saber, dois pólos magnéticos iguais repelem-se e dois de sinal contrário atraem-se.

Portanto, para fazer rodar o motor continuamente basta criar um campo magnético rotativo, por meio da sucessiva excitação dos vários enrolamentos.

Torque

O torque, ou seja, a força de rotação do eixo do motor, depende de vários fatores: frequência dos passos, corrente de excitação dos enrolamentos e tipo de excitação.

Nos motores de passo o torque é devido à força de atração dos fluxos magnéticos do estator e do rotor. O estator é construído com material de alta permeabilidade magnética e o fluxo fica concentrado nos pólos do estator quando o respectivo enrolamento é percorrido por corrente. O torque produzido é proporcional à intensidade do fluxo magnético gerado pela corrente elétrica.

Fases

Por fases deve entender-se o número de enrolamentos que dão origem a um fluxo magnético diferente. Normalmente, os motores de passo possuem duas fases embo-

ra também existam com três e cinco fases.

Por outro lado, existem duas técnicas de comando dos motores, que dependem da forma como os enrolamentos estão construídos. Nos motores unipolares, os enrolamentos possuem uma tomada intermediária para facilitar a aplicação de correntes nos dois sentidos, ou então existem dois enrolamentos separados por cada fase. Nos motores bipolares só existe um enrolamento por fase.

Ligação dos enrolamentos

Os motores de passo são fabricados com diferente número de terminais. Os modelos mais frequentes são:

Motor	Ligação
4 terminais	Bipolar
5 terminais	Unipolar
6 terminais	Unipolar Bipolar (ligação série)
8 terminais	Unipolar Bipolar (ligação série) Bipolar (ligação paralela)

A **figura 4** mostra a ligação dos terminais aos enrolamentos existentes no interior do motor.

Pólos

Os pólos magnéticos podem definir-se como os pontos de um corpo magnetizado para onde convergem as linhas de força do campo magnético. Designam-se por pólo norte (N) e pólo sul (S). Normalmente, o estator e o rotor de um motor de passo possuem igual número de pólos, mas tal não é obrigatório.

Ângulo de passo

Uma das características mais importantes de um motor de passo, é o número total de posições que o eixo do motor pode ocupar durante os 360 graus de uma rotação completa. O ângulo de passo obtém-se dividindo 360 graus pelo número de passos. Quando o estator e o rotor possuem o mesmo número de pólos magnéticos, o ângulo de passo (AP) é dado pela seguinte fórmula:

$$AP = 360 / (n_{ph} \times ph) = 360 / n$$

Onde:

n_{ph} = número de pólos por fase = número de pólos do rotor

ph = número de fases

n = número total de pólos contando todas as fases

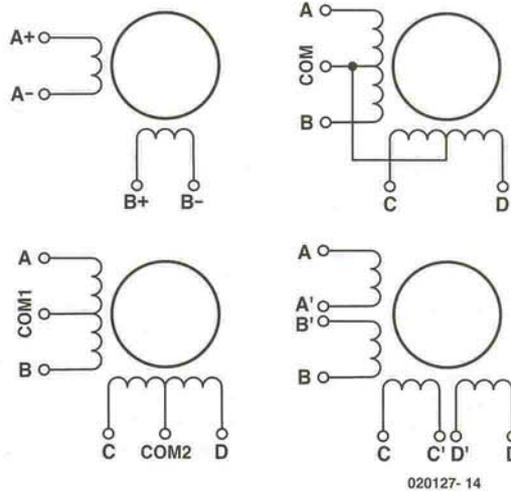


Figura 4. Motores de passo com 4, 5, 6 e 8 terminais.

Modos de funcionamento

Os motores de passo podem ser excitados de várias formas. As mais frequentes são:

Comando por vaga

Neste modo de funcionamento, denominado *Wave Drive* em inglês, a corrente só é aplicada em uma fase de cada vez. No caso dos motores unipolares isto significa que só são utilizados 25% dos enrolamentos existentes, em comparação com 50% no caso dos motores bipolares. Vejamos para o caso de um motor de duas fases, qual é a sequência de pulsos necessária para o eixo rodar 360 graus. Note que Fase A' e Fase B' significam correntes nas fases A e B mas de sentido contrário. Uma rotação completa do eixo é executada em 4 passos.

Ordem	Fase A	Fase B	Fase A'	Fase B'
1				
2				
3				
4				

Comando por passos completos

Neste modo duas fases são excitadas ao mesmo tempo. Portanto, no caso de motores unipolares são utilizados 50% dos enrolamentos existentes e no caso de motores bipolares são utilizados

Ordem	Fase A	Fase B	Fase A'	Fase B'
1				
2				
3				
4				

100%. Uma rotação completa do eixo é executada em 4 passos.

Comando por meios passos

Neste modo, as sequências de comando por passos completos e por vaga são alternadamente combinados, para o rotor poder executar meios passos. No

Ordem	Fase A	Fase B	Fase A'	Fase B'
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				

caso de motores unipolares utilizam-se 37,5% dos enrolamentos existentes e 75% no caso de motores bipolares. Uma rotação completa do eixo obtém-se ao fim de 8 meios passos.

Comando por micro-passos

Neste modo de comando, as correntes nos vários enrolamentos variam continuamente para ser possível dividir um passo completo em pequenos passos (micro-passos). Esta técnica não será abordada neste artigo.

Terminologia

Torque de retenção em serviço (Holding Torque)

Máxima força que é possível aplicar no eixo de um motor energizado sem provocar a sua rotação.

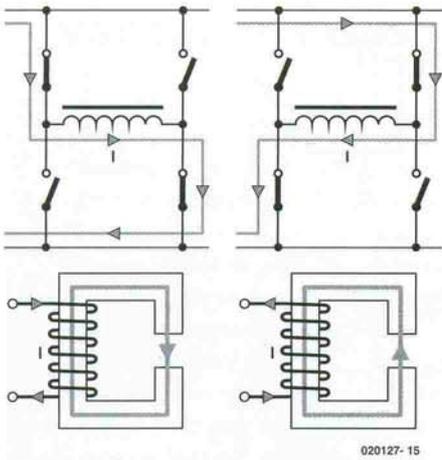


Figura 5. Excitação bipolar.

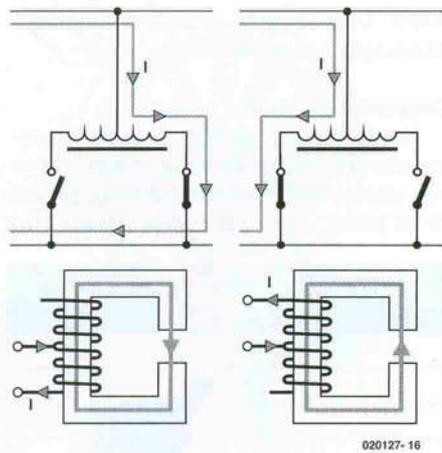


Figura 6. Excitação unipolar.

Torque de retenção desativado
(*Detent torque*)

Máxima força que é possível aplicar no eixo de um motor não energizado sem provocar o seu movimento.

Curva velocidade/torque

O valor do torque em função da velocidade do eixo do motor depende do circuito de excitação, do método de comando e da inércia da carga.

Máxima frequência de arranque

Trata-se da máxima frequência dos pulsos a que um motor pode arrancar sem carga, rodar sem ocorrerem erros de posicionamento e parar sem executar mais passos do que pulsos.

Torque em velocidade constante
(*Pull-out Torque*)

Máximo torque que é possível aplicar no eixo de um motor para rodar em velo-

cidade constante sem ocorrerem erros de posicionamento (passos falhados).

Torque de serviço (*Pull-in Torque*)

Máximo torque a que um motor pode arrancar, parar e inverter o sentido de rotação sem ocorrerem erros de posicionamento (passos falhados).

Precisão

É definida como a diferença entre a posição teórica e verdadeira do eixo do motor, expressa em porcentagem do ângulo de passo. Regra geral, a precisão é da ordem de 5% e este erro de posicionamento não é cumulativo.

Erro de histerese

Define-se como erro máximo acumulado entre a posição teórica e verdadeira, tanto no sentido de rotação direto como inverso.

Ressonância

Um motor de passo responde a séries de pulsos e cada um deles faz avançar o rotor um passo. Para executar um passo, o eixo tem de acelerar, desacelerar e parar. Portanto, a rotação é sempre feita aos solavancos, fato que é tanto mais notório quanto menor for o número de passos necessários para se obter uma rotação completa. Este fato origina vibração, ruído e erros de posicionamento. Além disso, o motor pode recusar-se a rodar a uma dada velocidade, relacionada com a sua frequência de ressonância. Quando se projeta um sistema, é necessário que a gama de velocidade desejada não contenha a frequência de ressonância. Este problema pode ser resolvido utilizando amortecedores mecânicos e eletrônica externa.

Controle do motor

Na 2ª parte deste artigo vamos descrever a construção de um circuito capaz de controlar quatro motores de passo, mas para se compreender bem o seu funcionamento temos de fornecer mais um pouco de teoria. O circuito de controle tem de executar duas tarefas principais:

1. Controlar o sentido da corrente para alterar o sentido do fluxo magnético gerado pelos enrolamentos.
2. Variar e limitar a amplitude da corrente nos enrolamentos, garantindo tempos de crescimento e decréscimo tão curtos quanto possível, para se obter o funcionamento ideal.

Controle do fluxo

Para o eixo do motor poder rodar é necessário alterar o sentido do fluxo magnético independentemente em cada fase do motor. Esta alteração é feita comutando o sentido da corrente por dois processos diferentes, conforme a alimentação do motor seja bipolar ou unipolar.

Controle bipolar

Como neste caso os enrolamentos não possuem tomada intermediária, para inverter a corrente são necessários quatro interruptores (transistores comutadores por exemplo) por cada enrolamento, tal como mostra a figura 5.

Controle unipolar

Neste caso a tomada central do enrolamento está sempre ligada ao mesmo potencial, de forma que apenas são necessários dois interruptores para inverter o sentido da corrente, tal como mostra a figura 6. É claro que existe sempre metade do enrolamento que não é utilizado.

Controle da intensidade

Para limitar a dissipação de energia na resistência do enrolamento e para controlar o torque, a intensidade da corrente tem de ser ajustada. Existem vários métodos para limitar a corrente, e que se aplicam tanto a motores bipolares como unipolares.

Controle por resistência série

Tal como mostra a figura 7, neste método utiliza-se uma fonte de tensão constante (+V_D) e uma resistência série para limitar a corrente nos enrolamentos. A desvantagem deste método é que

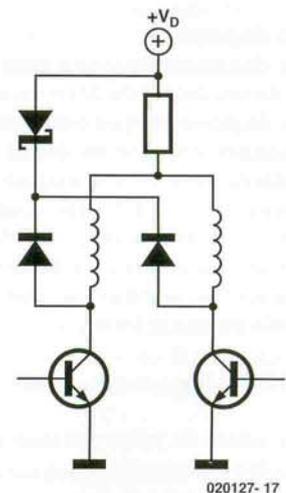


Figura 7. Resistência série para limitar a corrente no motor.

a queda de tensão na resistência origina perda de energia devido à dissipação de calor que ocorre na resistência.

Controle por dupla tensão

Neste caso utiliza-se uma segunda tensão de alimentação ($+V_1$), mais elevada do que a tensão normal ($+V_D$), tal como mostra a **figura 8**. A tensão V_1 só é ligada no início, quando é necessário um rápido crescimento da corrente, e é desligada quando a intensidade atinge o valor nominal. O inconveniente reside na necessidade de duas fontes de alimentação.

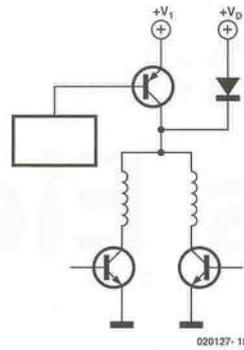


Figura 8. Limitação por meio de duas tensões.

Controle por tensão comutada

Este é o método ideal para controlar a corrente, garantindo ao mesmo tempo um rápido crescimento da corrente. A idéia é utilizar uma tensão de alimentação mais elevada do que a tensão nominal do motor (**figura 9**). Assim é possível obter um rápido crescimento da corrente que inicialmente é igual a V/L . Depois, controlando o fator de trabalho dos pulsos aplicados, obtém-se uma tensão e corrente média apropriada para o motor em causa. A

regulação da intensidade de corrente é feita por meio de uma resistência sensora, colocada em série com o enrolamento do motor. Por meio de realimentação, a queda de tensão nesta resistência vai permitir ajustar o valor da corrente.

No próximo mês

Na 2ª parte deste artigo vamos descrever a construção de um circuito, que permite

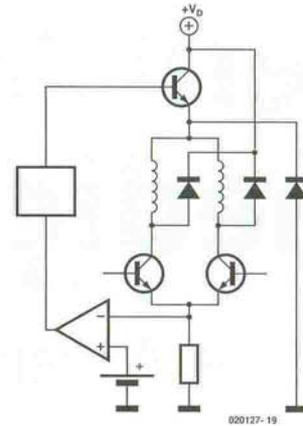


Figura 9. Excitação por comutação de tensão.

controlar até 4 motores passo-a-passo com a ajuda de um computador PC. O circuito utiliza um microprocessador PIC e comunica com o PC através de uma porta série.

(020127)

Artigo original: *Stepper Motors Uncovered* - November 2003

Excitação	Custo e componentes	Ruído elétrico	Torque - velocidade resolução	Rendimento	Obs.	Aplicação
1. Unipolar; tensão constante	Baixo, 4 transistores por motor.	Baixo	Torque de retenção depende da tensão de alimentação e temperatura motor. Torque variável no modo meios passos.	Baixo rendimento e máxima potência dissipada quando parado	Transistores excitadores devem suportar o dobro da tensão alimentação	Baixa velocidade e baixa potência. Normalmente utilizado com motores pequenos
2. Unipolar; 2 níveis, tensão constante	Baixo, 4 transistores por motor.	Baixo	Torque de retenção depende da tensão de alimentação e temperatura motor. Torque variável no modo meios passos.	Rendimento muito baixo e máxima potência dissipada quando parado.	Elevada dissipação nas resistências série	Baixa/média velocidade e baixa potência
3. Unipolar; 2 níveis alternados	Médio, 6 transistores por motor. Necessita uP ou temporizador.	Médio	Torque de retenção depende da tensão de alimentação e temperatura.	Rendimento médio	Controle do torque de retenção e precisão de passos difíceis se as duas tensões forem muito diferentes	Velocidade e potência baixa ou média
4. Unipolar; corrente constante	Médio/alto, 6 transistores por motor.	Médio/alto	Torque ótimo a altas velocidades. 70% do ótimo a baixas velocidades. Torque sem variações no modo de meios passos.	Rendimento médio/alto	Transistores excitadores devem suportar o dobro da tensão alimentação. Levem em conta perdas de indutância nos enrolamentos no projeto das redes de amortecimento.	Alta velocidade e potência média
5. Bipolar; corrente constante	Alto, 8 transistores por motor. Existem integrados excitadores para baixa/média potência	Elevado	Torque ótimo, tanto a baixa como alta velocidade.	Rendimento alto. Máxima potência saída e perdas nas resistências sensoras	Pode ocorrer ruído e interferências.	Alta velocidade e alta potência.
6. Bipolar; Corrente constante, micro-passos	Muito alto, 8 transistores por motor: Controle da corrente caro. Existem integrados excitadores para baixa/média potência	Elevado	Torque ótimo, tanto a baixa como alta velocidade. Ausência de ressonâncias a baixa velocidade. Resolução aumentada.	Rendimento alto. Máxima potência de saída e perdas nas resistências sensoras.	Pode ocorrer ruído e interferências.	Alta velocidade e alta potência. Ideal para alta resolução e ausência de ressonâncias.