

L'optimisation des systèmes de mouvement pour la découpe au laser haute précision et haut débit de produits médicaux cylindriques



L'optimisation des systèmes de mouvement pour la découpe au laser haute précision et haut débit de produits médicaux cylindriques

Par: Brian M. Fink
Chef de Produit, Aerotech

Introduction aux produits médicaux cylindriques

L'un des défis les plus universels de l'ingénierie de précision et de la conception de machines consiste à faire des arbitrages et des compromis de conception. Cela est particulièrement vrai dans la fabrication de produits médicaux cylindriques. Les ingénieurs, les gestionnaires et les chefs d'entreprise doivent régulièrement choisir entre fabriquer des pièces rapidement – mais avec des erreurs qui entraînent des taux de rebut post-traitement importants – et fabriquer des pièces de haute précision en volumes plus faibles à des coûts plus élevés.

Et s'ils pouvaient produire beaucoup plus de pièces dans un laps de temps donné sans compromettre la qualité ? En utilisant des stratégies fondamentales pour optimiser les systèmes de mouvement de découpe au laser, il est possible de minimiser ces compromis, permettant ainsi aux fabricants de produits et de dispositifs médicaux cylindriques d'atteindre plus facilement leurs objectifs, d'améliorer leurs opérations et d'acquérir un avantage concurrentiel.

De nombreux produits et dispositifs médicaux cylindriques sont découpés au laser à partir de tubes, notamment :

- Les composants cardiaques structurels, qui augmentent ou remplacent complètement les valves cardiaques endommagées dans des procédures telles que le remplacement de la valve aortique par cathéter (TAVR), la réparation de la valve mitrale par cathéter (TMVR) et les interventions sur la valve aortique bicuspide (BAV).
- Les stents coronaires, qui maintiennent ouverts les principaux vaisseaux sanguins pour améliorer l'apport sanguin au cœur comme traitement de la maladie coronarienne. Les stents sont placés dans le corps du patient au moyen d'une procédure appelée intervention coronarienne percutanée (ICP),

au cours de laquelle un cathéter guide le stent et le place à l'endroit approprié. Certains stents sont à élution de médicament, ce qui signifie qu'ils sont recouverts d'un médicament à libération prolongée qui aide à maintenir l'artère dégagée.

- Les stents neurovasculaires sont des produits à motifs très fins délivrés par le système vasculaire du patient jusqu'au cerveau. Leur fonction principale est de traiter les anévrismes, la maladie athérosclérose intracrânienne (ICAD) et les affections neurologiques similaires.
- Les dispositifs vasculaires périphériques, lesquels comprennent des stents utilisés pour traiter des affections qui obstruent les vaisseaux sanguins en dehors du cœur ou du cerveau. Les stents périphériques sont couramment utilisés pour traiter des affections telles que la thrombose veineuse profonde (TVP) et l'embolie pulmonaire.
- Les instruments peu invasifs, qui comprennent des tubes hypodermiques, des cathéters, des aiguilles hypodermiques et plus encore. Ces derniers sont utilisés dans diverses procédures chirurgicales pour naviguer dans les vaisseaux sanguins d'un patient, délivrer et placer des stents et soutenir diverses chirurgies laparoscopiques, endovasculaires et robotiques.

Ces produits médicaux cylindriques découpés au laser présentent des diamètres allant d'une résolution sous-millimétrique à quelques centimètres, avec des longueurs totales de pièces allant de quelques millimètres à plus d'un mètre.

Éléments de base des systèmes de mouvement pour le traitement laser des composants cylindriques

La conception d'une plate-forme de mouvement hautement dynamique nécessite une étude à l'échelle du système, y compris les étapes de positionnement pour la manipulation des pièces ; une tête de découpe au laser et un moyen de la positionner ; une mécanique pour faciliter le maintien et le passage des pièces ; et une structure comprenant une base de machine, un système d'isolation des vibrations, un cadre et un boîtier. Les étages linéaires et rotatifs, qui positionnent dynamiquement le dispositif tubulaire ou la pièce sous la tête de découpe au laser pour produire la géométrie caractéristique souhaitée, sont essentiels à la production économique de dispositifs tubulaires en grandes quantités.

La figure 1 montre les éléments clés du système de manipulation des pièces comprenant l'axe linéaire, l'axe rotatif, le mandrin à pince, le préhenseur pour l'avance du tube, le raccord et la tête de découpe au laser.

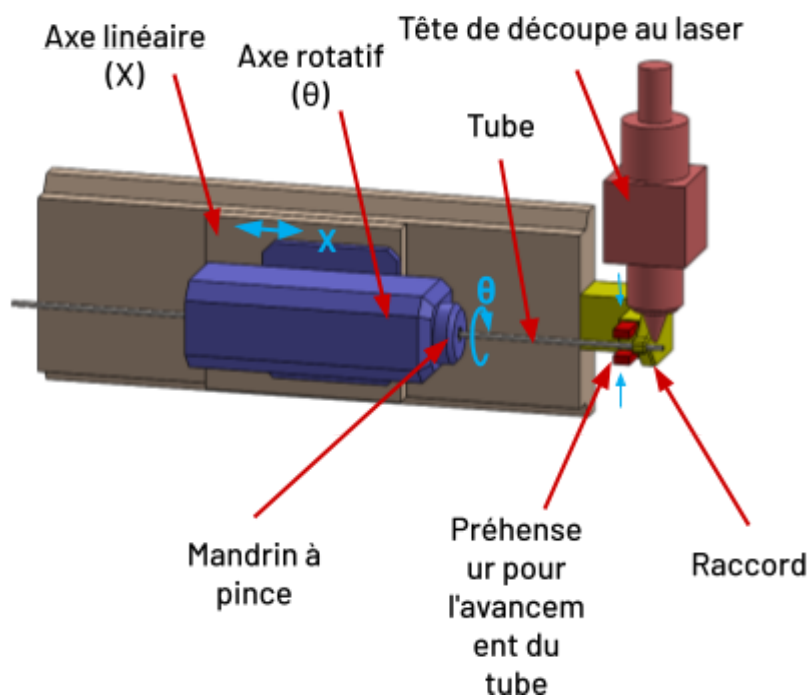


Figure 1. Composants mécaniques d'un système de mouvement de coupe de tubes de précision pour la manipulation de pièces.

Les axes linéaires et rotatifs doivent présenter une précision, une répétabilité et une vitesse exceptionnelles :

- La précision décrit la proximité avec laquelle le système de mouvement peut atteindre une position cible commandée. Une grande précision est essentielle pour obtenir la géométrie de coupe souhaitée sur la pièce, y compris les dimensions précises, les tolérances et les emplacements des éléments.
- La répétabilité caractérise la variabilité de la position atteinte par le système de mouvement par rapport à la position commandée, lorsque les axes de mouvement sont dirigés à la même position plusieurs fois. Une répétabilité exceptionnelle est essentielle à la fabrication de pièces hautement reproductibles et peut minimiser le temps requis pour le post-traitement et l'inspection des pièces.
- La vitesse est une fonction des propriétés dynamiques telles que la vélocité et l'accélération, ainsi que de la précision et de la répétabilité requises, par rapport auxquelles la vitesse est inversement proportionnelle. Maximiser la vitesse de traitement de la machine aide les utilisateurs à produire plus de pièces par heure, ce qui contribue à réduire les coûts de fabrication.

Obtenir simultanément une précision et une répétabilité excellente ainsi qu'une dynamique élevée est un défi extraordinaire. Comme pour la conduite d'un véhicule, il est difficile de maintenir sa position sur la voie tout en prenant rapidement un virage serré. Ralentir est la

solution évidente, mais de combien ? Un semi-remorque devra ralentir plus qu'un SUV, qui à son tour devra ralentir plus qu'une voiture de sport. De même, dans le traitement laser cylindrique, l'équipement manipulant le tube sous le laser a une influence considérable sur la capacité du système à couper des composants précis et reproductibles avec un débit extrêmement élevé. Ainsi, la « voiture de sport » des systèmes de mouvement devrait avoir une faible masse mobile et une faible inertie, ainsi que de valeurs élevées de force et de couple, tout en étant capable de maintenir sa position de manière dynamique dans une fenêtre d'erreur définie.

Caractérisation de la précision et de la répétabilité

Bien que la précision et la répétabilité soient des caractéristiques importantes d'un système de mouvement de coupe de tubes cylindriques, la répétabilité est essentiellement plus importante que la précision. La répétabilité, qui caractérise la plage de positions atteintes lorsque le système de mouvement est commandé à une position donnée plusieurs fois, est une fonction de la construction du système, y compris les tolérances des composants, les propriétés du moteur et du dispositif de rétroaction, les qualités des composants des roulements et des vis d'entraînement, la qualité de fabrication et plus encore. Un axe répétable n'est pas nécessairement précis, mais si l'axe est intrinsèquement répétable, il peut être rendu précis grâce à diverses techniques d'étalonnage. La figure 2 illustre ce concept.

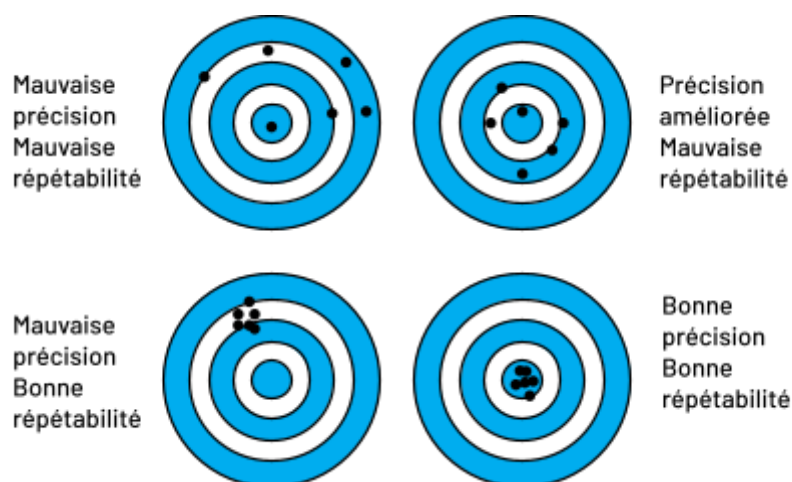


Figure 2. Une bonne répétabilité est une condition préalable à une bonne précision.

La définition et la compréhension des spécifications des phases telles que la répétabilité et la précision sont nécessaires pour quantifier et comparer les critères de performance aux exigences de l'application ou même à d'autres étapes. Il existe plusieurs méthodes d'évaluation différentes, notamment des normes de métrologie telles que :

- ISO 230-2 : Code de test pour machines-outils
- ASME B5.64 : Méthodes d'évaluation des performances des systèmes de positionnement linéaire à axe unique
- ASME B5.54 : Méthodes d'évaluation des performances des centres d'usinage à commande numérique par ordinateur

- VDI 3441 : Tests statistiques de précision opérationnelle et de positionnement des machines-outils
- JIS B 6192 : Code de test pour machines-outils

Ces normes quantifient la précision et la répétabilité en appliquant des traitements statistiques à un ensemble de données défini. Au-delà de cela, de nombreux fournisseurs d'applications de mouvement ont leurs propres méthodes et définitions de test et de rapport. Cette variation rend difficile la comparaison directe des spécifications entre différents fournisseurs. Par exemple, le fournisseur A peut reporter conformément à la norme ISO 230-2 ; le fournisseur B peut utiliser un traitement de plus ou moins 1,5 sigma ; le fournisseur C peut reporter des valeurs de moyenne quadratique (RMS) ; et le fournisseur D peut reporter des valeurs typiques. Pour exactement les mêmes données, les valeurs de précision et de répétabilité reportées par chaque fournisseur seraient différentes des autres. Demandez toujours aux fournisseurs potentiels comment ils rapportent leurs spécifications.

Lorsque les fournisseurs spécifient et indiquent des valeurs crête à crête transparentes et facilement compréhensibles en matière de précision, de répétabilité et plus encore sur toute la plage de mouvement d'une scène, l'acheteur sait que chaque achat répondra ou dépassera les spécifications du catalogue publié. Cette approche conservatrice garantit une performance de 100 %, atténuant ainsi les risques et l'incertitude.

Comment les erreurs de mouvement affectent la performance de la table

En réalité, aucune phase ne présentera jamais un mouvement « parfait », exempt de toute erreur. Cependant, il est important de comprendre les sources d'erreur et la manière dont elles contribuent aux performances globales du système de mouvement. Des erreurs sur l'axe se produisent dans la direction du mouvement, ce qui a un impact direct sur la précision et la répétabilité. Les sources courantes d'erreurs sur l'axe comprennent :

- Erreurs du dispositif de rétroaction (par exemple, l'encodeur)
- Imprécisions de la transmission
- Engrènement du moteur
- Couple et vitesse d'ondulation
- Erreurs d'Abbe

L'erreur d'Abbe, du nom du Dr. Ernst Abbe, caractérise la manière dont les erreurs angulaires sont amplifiées sur une distance, ce qui donne lieu à ce qui semble être des erreurs linéaires sur l'axe. Dans une phase linéaire, l'erreur d'Abbe peut être causée par des erreurs de mouvement dans la direction du serrage. À mesure que le décalage du point fonctionnel (également appelé point de travail) augmente en hauteur au-dessus de la scène, l'ampleur de l'erreur d'Abbe augmente également. Ce principe est illustré dans la figure 3, avec une représentation des cinq directions d'erreur hors axe d'une phase linéaire.

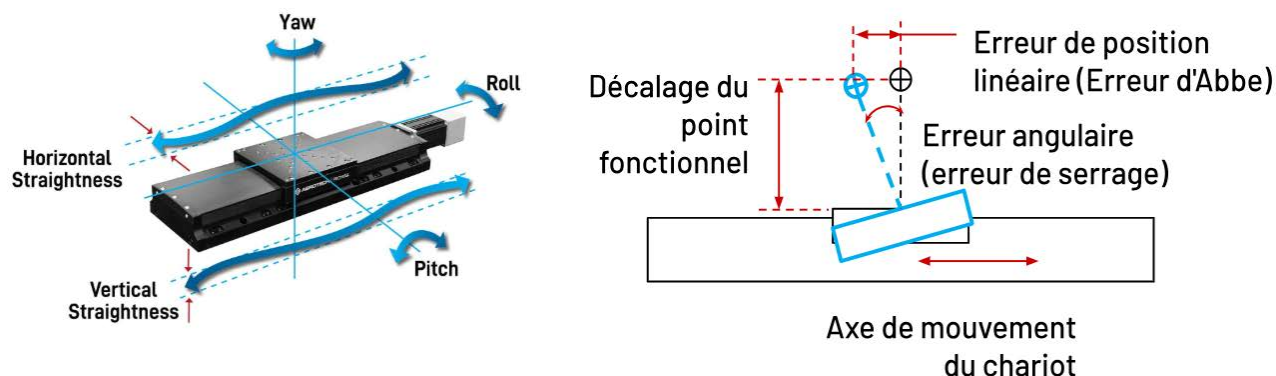


Figure 3. Représentation des cinq erreurs hors axe d'une phase linéaire (à gauche) et illustration du principe d'erreur d'Abbe (à droite).

Des erreurs hors axe se présentent cependant dans les cinq degrés de liberté restants, également représentés dans la figure 3. Pour une phase linéaire, ces erreurs hors axe comprennent la linéarité horizontale, la linéarité verticale (parfois appelée familièrement, et à tort, « planéité »), le tangage, l'orientation et le roulis. Pour un étage rotatif, les erreurs hors axe comprennent les erreurs axiales, radiales (deux directions) et d'inclinaison (deux directions). Il existe de nombreuses sources d'erreurs hors axe, et les plus répandues incluent :

- Erreur liée au guidage
- Géométrie et tolérances de la base et du chariot
- Tolérances et alignements d'assemblage
- Effets biméalliques
- Effets de friction
- Forces appliquées à l'extérieur

Bien qu'il soit impossible d'éliminer complètement ces erreurs, elles peuvent être gérées et atténuées grâce à une combinaison de bonnes pratiques, notamment :

- Sélection et configuration minutieuses des étages
- Minimisation de la distance de décalage par rapport au point fonctionnel
- Mesure et mappage des erreurs de phase au point fonctionnel

Les erreurs sur l'axe, y compris l'erreur d'Abbe, peuvent être directement compensées en mettant en œuvre diverses techniques d'étalonnage de précision. Les erreurs hors axe sont plus difficiles à corriger. Il est relativement simple de mesurer, de quantifier et même de cartographier ces mouvements d'erreur hors axe, mais des axes de mouvement supplémentaires sont généralement nécessaires pour les corriger physiquement, car un étage à axe unique ne peut être commandé que dans la direction de l'axe.

Intégrer chaque centre d'action dans l'analyse de performance de la table

Dans la conception de tables de précision, un centre d'action fait référence à un point ou à un axe autour duquel une force, un mouvement ou une charge est effectivement appliquée. La compréhension de ce concept est cruciale car il affecte directement les performances de positionnement de la phase dans des conditions de fonctionnement réelles. Même si la

grande majorité des fabricants de dispositifs médicaux cylindriques ne développeront pas une table de positionnement à partir de zéro, la compréhension des principes clés sous-jacents est utile dans les discussions avec les fournisseurs potentiels et lors des comparaisons et de la sélection des produits.

La figure 4 illustre une coupe axiale d'une configuration de phase généralisée avec des composants correspondants, notamment le chariot mobile, les roulements de guidage linéaire, le piston de moteur linéaire, la boucle de gestion des câbles et une charge utile de l'utilisateur. Dans cet exemple, ces composants sont fixés au chariot mobile, ce qui donne un centre de masse composite situé au-dessus du chariot. En plus du centre de masse, il faut prendre en compte le centre de force, le centre de rigidité et le centre de friction.

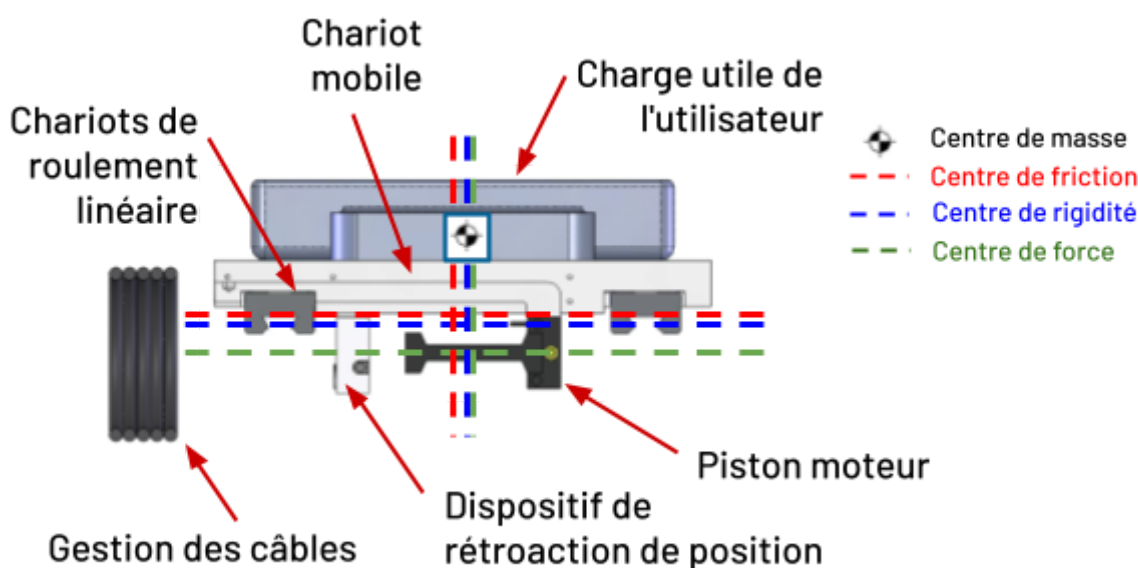


Figure 4. Illustration d'une section transversale de stade linéaire généralisée avec les centres d'action indiqués.

Dans ce cas, l'identification du centre de force est relativement simple : il est situé de manière coïncidente avec le plan correspondant à l'axe central du moteur. Notez qu'il existe une distance décalée entre le centre de force et le centre de masse. Cela signifie que le moteur applique non seulement une force linéaire dans la direction du mouvement, mais également un moment dans la direction du tangage. Les roulements linéaires encaissent la majeure partie de ce moment, mais il existe une déformation mesurable car les roulements ne sont pas infiniment rigides. Cette déviation peut être caractérisée comme une erreur de tangage.

Le centre de rigidité est l'emplacement autour duquel la scène présente une rigidité équilibrée dans toutes les directions. Étant donné que les roulements contribuent principalement à la rigidité de l'axe, il devient évident que le centre de rigidité est situé dans le plan des chariots à roulements linéaires. Dans des conditions idéales, lorsqu'une force est appliquée de manière axiale au centre de rigidité, le chariot subira un mouvement

purement translationnel sans mouvement de rotation et, par conséquent, aucune erreur angulaire ne sera générée par la force appliquée.

Similaire au centre de rigidité, le centre de frottement décrit l'emplacement où agit la force de friction résultante. Il est important de noter que le centre de friction diffère en termes d'emplacement du centre de rigidité. Bien que les roulements soient la principale source de friction, le système de gestion des câbles applique des perturbations de frottement supplémentaires au chariot, et ainsi le centre de friction est légèrement décalé par rapport au centre de rigidité.

Le design des tables de positionnement les plus performantes aligne ces centres d'action aussi proches que possible pour optimiser les performances. En pratique, il n'est cependant pas réaliste d'espérer qu'une conception réponde entièrement à cette condition. Des compromis de conception sont généralement faits entre les performances et d'autres facteurs tels que la largeur ou l'encombrement de la table, le coût, la facilité de fabrication, etc. Cependant, le placement intelligent des composants de la table, illustré dans la figure 4, augmente la première fréquence de résonance de phase et minimise son excitation. La sélection de roulements à rigidité élevée améliore davantage les capacités de performance dynamique. Ceci est essentiel pour permettre une dynamique plus importante sans compromettre la précision de manière significative.

Que se passe-t-il lorsque le centre de force ne s'aligne pas parfaitement avec les autres centres d'action ? L'application d'une force décalée, mal alignée par rapport aux autres centres, induit des moments de force indésirables. Ces moments provoquent le déplacement de la table dans une direction autre que celle prévue (c'est-à-dire dans une direction hors axe). Cela entraîne souvent une erreur de lacet dynamique et d'autres défauts qui se traduisent en erreurs de précision et de répétabilité au point de travail fonctionnel.

Bien choisir les roulements et les moteurs

Les roulements limitent le mouvement aux degrés de liberté souhaités et aident à empêcher les mouvements indésirables dans d'autres directions. Les types de roulements linéaires les plus communs utilisés dans les phases de précision offrent des propriétés différentes en fonction de l'objectif de performance. Les technologies choisies peuvent être :

- Les guidages à recirculation de billes ou de rouleaux
- Les roulements à rouleaux croisés avec cages orientées orthogonalement coulissant entre deux rails de guidage
- Les paliers à air, qui consistent à maintenir un coussin d'air très précis entre la base de la table et son chariot mobile

Le mouvement est plus fluide avec les paliers à rouleaux croisés, car l'absence d'éléments roulants en recirculation entraîne moins de bruit et autres perturbations. La rigidité est

également supérieure dans les paliers à rouleaux croisés, bien qu'ils offrent une plage de déplacement plus limitée que les guides linéaires. De plus, les guides linéaires ont tendance à être moins coûteux que les paliers à rouleaux croisés.

Bien que les paliers à air surpassent presque toujours les guidages linéaires et les roulements à rouleaux croisés en termes de fluidité de mouvement et de performances géométriques, ils ne sont pas couramment utilisés dans les systèmes de découpe de tubes, en raison du risque plus élevé de contamination par les débris de traitement au laser et par tout fluide pouvant être utilisé dans le processus. De plus, les paliers pneumatiques ont tendance à être les plus coûteux des trois variantes décrites ici.

En termes de moteurs, il existe deux types fondamentaux que l'on retrouve couramment dans les étages de précision :

- Moteurs slotted Iron core
- Moteurs slotless ironless

Les moteurs linéaires et rotatifs peuvent être construits en variantes slotted ironcore ou slotless ironless. Les moteurs à fentes et sans fentes sont constitués d'un rotor (ou stator, dans le cas d'un moteur rotatif) contenant des bobines de cuivre enroulées, généralement encapsulées dans de l'époxy et une piste magnétique constituée d'une structure en acier sur laquelle des aimants en terres rares sont soigneusement appliqués (avec les moteurs rotatifs, cela s'appelle le rotor).

Dans une conception de moteur ironcore slotted, le fil de cuivre est enroulé à travers des fentes, ou des dents, dans une pile de plaques d'acier laminées. Les moteurs Ironcore présentent des densités de force plus élevées que leurs homologues slotless ironless, car les fentes aident à concentrer le flux magnétique dans l'entrefer entre les aimants et les enroulements. Cela entraîne une augmentation de la densité du flux et, par conséquent, fournit des quantités de force ou de couple plus élevées.

Cependant, les moteurs Ironcore à dents (slotted) peuvent générer plus d'erreur que les moteurs Ironless sans dents (slotless), en raison de l'interaction entre le moteur et la voie d'aimants (pour les moteurs rotatifs, entre le rotor et le stator). Chaque dent d'un moteur Ironcore a une position d'équilibre par rapport à chaque aimant. Une force de détente est nécessaire pour éloigner la dent de cette position. C'est ce qu'on appelle communément la force de cogging. Cette dernière est indépendante de la force appliquée par le moteur et de la vitesse de la table. Elle provoque de petites ondulations de force ou de couple observables lors de son déplacement. Le cogging peut être problématique lors de la fabrication de produits médicaux tubulaires avec des caractéristiques et des tolérances de niveau micrométrique, en raison des erreurs de vitesse qu'il peut introduire, ce qui entraîne des erreurs de positionnement des pièces et des caractéristiques de tube mal positionnées ou dimensionnées. Bien qu'il existe des techniques permettant d'atténuer les effets du cogging, il est impossible de les éliminer complètement pour les moteurs ironcore.

Les moteurs ironless slotless, à l'inverse, sont intrinsèquement exempts de cogging et ne présentent donc pas d'erreurs de vitesse de cette manière. Le piston n'a pas de dents en acier et se compose uniquement de bobines de cuivre étroitement enroulées. Le mouvement est considérablement plus fluide, ce qui permet des coupes plus précises et des produits médicaux tubulaires plus reproductibles. Les inconvénients des moteurs sans fer comprennent un coût plus élevé en raison de la complexité de fabrication accrue et d'une densité de force plus faible par rapport aux moteurs à noyau de fer ; cependant, dans des applications exigeantes comme la découpe de stents, où le produit final réside dans le corps d'un patient, la qualité supérieure des pièces et la reproductibilité l'emportent presque toujours sur ces inconvénients légers.

Les principales différences dans la construction des moteurs à noyau de fer à fentes et des moteurs sans fer à fentes sont clairement visibles dans la figure 5.

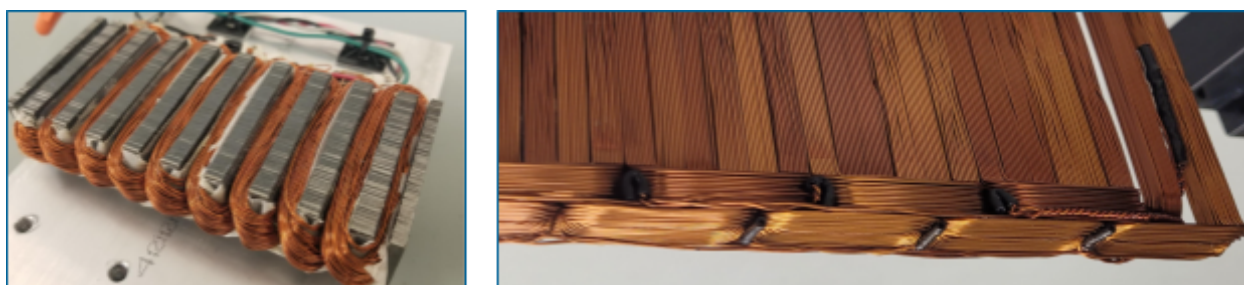


Figure 5. Un exemple de moteur linéaire ironcore (à gauche) et de moteur linéaire ironless slotless .
Notez la présence des dents en acier dans le primaire moteur et leur absence dans le moteur ironless slotless.

Pour la sélection des guidages et des moteurs, comme pour de nombreux aspects de l'ingénierie de précision, il faut évaluer et décider les compromis en fonction des priorités de conception. Les fournisseurs de solutions de contrôle de mouvements expérimentés peuvent fournir des conseils précieux et spécifiques à l'application pour aider à ces décisions de configuration.

Considérations sur le système de préhension

Un autre élément crucial de l'optimisation des systèmes de mouvement pour la fabrication de dispositifs médicaux cylindriques concerne la manière dont le tube est maintenu et manipulé par la platine rotative ou la broche. Une fois de plus, cela implique d'évaluer plusieurs compromis, et la décision est basée sur des facteurs tels que le diamètre de la pièce (ou la gamme de diamètres possibles), la longueur finale de la pièce finie et le cas d'utilisation prévu de la machine (par exemple, le système de découpe de tubes sera-t-il utilisé pour fabriquer un nombre limité de types de pièces différents dans un environnement de production à grande échelle ? est-il davantage destiné à la recherche, au développement et aux efforts de prototypage rapide ? ou sera-t-il utilisé dans un environnement d'atelier ?).

Le tube est généralement maintenu et avancé à l'aide d'un mécanisme de pince ou d'un mandrin à trois mâchoires. Les pinces peuvent être classées en deux catégories : flottantes et à longueur morte. Des exemples de chacun sont fournis dans la figure 6.



Figure 6. Pinces flottantes de type ER (à gauche), pinces de type TF et W (au centre) et mandrin pneumatique à trois mâchoires (à droite).

Les pinces à collet flottant de type ER sont souvent utilisées dans les applications de coupe de tubes. La pince elle-même est un manchon cylindrique de type flexible avec un cône à une extrémité qui s'accouple avec un autre cône à l'intérieur d'un écrou. Lorsque la pince est forcée axialement dans l'écrou d'accouplement, elle se comprime radialement pour se fermer sur le tube. Étant donné que la pince doit être actionnée dans le sens axial pour être fermée, il est courant d'observer un mouvement axial indésirable du tube de l'ordre de quelques centaines de micromètres. Cela rend plus difficile la production de pièces plus longues qui nécessitent l'avancement et le double serrage du tube sur toute la longueur de la pièce. Ce mouvement axial indésirable peut entraîner des erreurs sur la pièce, ce qui peut nécessiter une retouche importante, voire la mise au rebut de la pièce. Il est possible d'atténuer ces effets en mesurant le déplacement du tube et en le compensant dans le programme de pièce, mais cette complexité supplémentaire ralentit le temps de cycle du processus. Les pinces flottantes peuvent endommager la surface du tube en raison du mouvement axial relatif de la pince et du tube lors de l'ouverture et de la fermeture, ce qui est particulièrement gênant pour les matériaux spéciaux qui sont facilement rayés ou endommagés.

Néanmoins, les pinces à collet flottant sont largement utilisées pour leur polyvalence et leur plage de serrage relativement large (généralement de 0,5 mm à 1,0 mm pour une seule pince), permettant de traiter une plus grande variété de diamètres de pièces sans avoir à changer de pince. Ils sont raisonnablement abordables et largement disponibles, ce qui facilite l'entretien d'un ensemble complet de pinces pour répondre à presque tous les dispositifs médicaux tubulaires. Cela rend les pinces flottantes particulièrement utiles dans les environnements d'atelier où l'opérateur peut avoir besoin de produire de nombreuses pièces différentes sur une courte période de temps. Et même si les pinces flottantes sont sujettes à l'usure au fil du temps, leur nature économique et omniprésente les rend simples à remplacer.

En revanche, les pinces à longueur morte – ce qui inclut les pinces de type C, de type D, de type W et de tour automatique de type suisse – restent pratiquement immobiles pendant les opérations d'ouverture, de fermeture et d'avance du tube. Les utilisateurs peuvent

s'attendre à moins de 10 micromètres de mouvement du tube. Cependant, ces pinces sont moins polyvalentes car elles sont « sur mesure », ce qui signifie qu'elles sont fabriquées selon le diamètre nominal exact de la pièce. L'opérateur de la machine doit changer la pince à chaque fois que le diamètre de la pièce change. Les opérateurs qui traitent de nombreuses pièces de diamètres différents doivent conserver à portée de main une quantité importante de tailles de pinces de serrage de longueur morte. Certains types de pinces à longueur morte sont coûteux, ce qui peut rendre financièrement difficile le maintien d'un jeu complet à portée de main. Il existe néanmoins plusieurs types de pinces à longueur morte qui sont raisonnablement abordables. Quel que soit le coût, les pinces de serrage à longueur morte contribuent à augmenter la qualité et le débit du processus en minimisant les effets du mouvement axial indésirable du tube pendant l'avancement et le double serrage du tube.

Soit les pinces à collet flottant, soit les pinces à longueur morte, sont caractérisées par une inertie relativement faible, ce qui est bénéfique pour obtenir de bonnes performances dynamiques. Ils présentent également un faible faux-rond radial, ce qui contribue en fin de compte à renforcer la qualité des pièces. Une illustration des différences entre l'architecture et le fonctionnement des pinces à collet flottant et des pinces à longueur morte est fournie dans la figure 7.

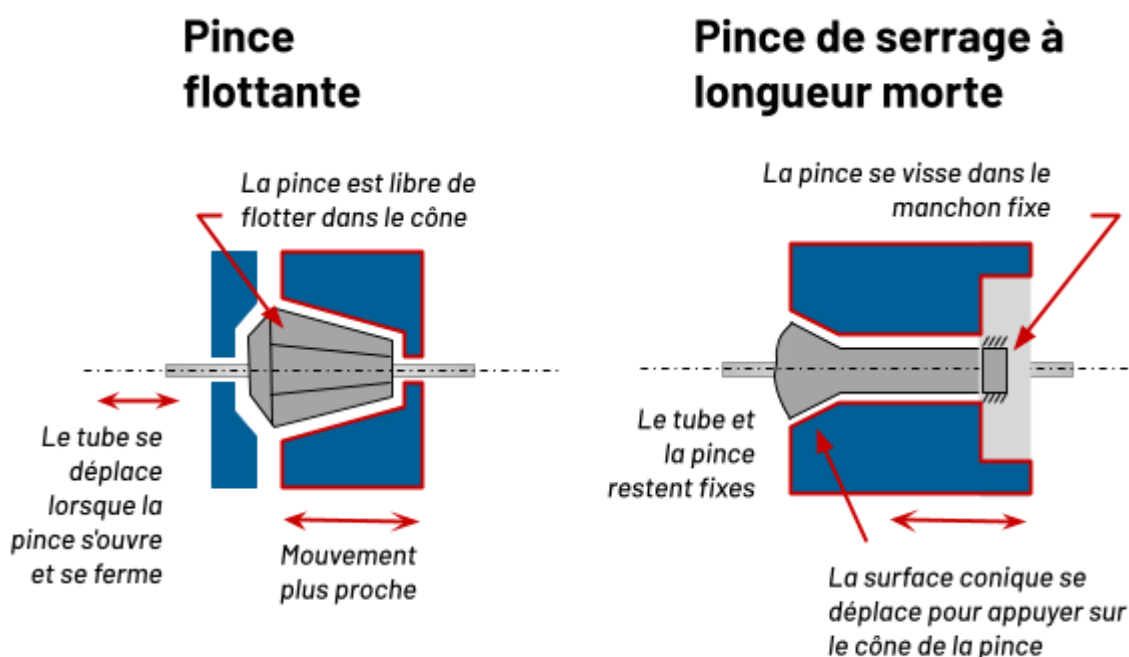


Figure 7. Une pince à collet flottant de type ER (à gauche) est libre de se déplacer de l'ordre de centaines de micromètres dans la région conique lorsqu'elle est ouverte, ce qui entraîne un mouvement axial de la pince et du tube lors de la fermeture. Une pince de serrage à longueur morte (à droite) est vissée dans un manchon fixe, réduisant considérablement le mouvement axial du tube lors de l'ouverture et de la fermeture à des niveaux micrométriques à un chiffre.

Les mandrins à trois mâchoires sont un autre moyen de maintenir le tube. Couramment utilisés sur les tours, ils maintiennent les pièces entre trois mâchoires actionnées par un

mécanisme à volutes. L'un des principaux avantages des mandrins à trois mors est leur gamme extrêmement large de diamètres de tubes autorisés. La course des pinces peut atteindre des dizaines de millimètres, ce qui permet une grande polyvalence dans la production de pièces de différentes tailles à l'aide d'un seul mandrin - aucun changement de pince n'est requis. Cependant, les mandrins à trois mâchoires sont sujets à des niveaux de faux-rond radial plus élevés que les pinces, ce qui peut compromettre la qualité et la reproductibilité des pièces. Les mandrins à trois mâchoires sont en outre affectés par une inertie relativement élevée, ce qui limite les performances dynamiques et augmente le temps de cycle de la pièce.

Une fois de plus, un fournisseur de mouvement ou un constructeur de machines expérimenté peut évaluer les exigences de l'application et fournir des conseils sur le choix du mécanisme de maintien de la pièce.

Intégration et optimisation des systèmes

À première vue, l'association et l'intégration des étapes linéaires et rotatives d'un système de découpe de tubes cylindriques peuvent sembler simples. En pratique, cependant, de nombreux détails subtils doivent être pris en compte pour obtenir une plate-forme de mouvement de haute précision et à haut débit, notamment :

- Conception de l'interface de montage linéaire-rotatif
- Alignement des axes linéaires et rotatifs l'un par rapport à l'autre
- Hauteur de montage de l'axe rotatif au-dessus de l'axe linéaire
- Conception de la gestion des câbles
- Métrologie et étalonnage
- Réglage avancé

Une interface de montage soigneusement conçue entre les tables linéaires et rotatives doit être suffisamment rigide, en particulier dans le sens du lacet. Si l'interface est trop souple, elle peut être une source de vibrations dans le système. Maximiser la rigidité de cette interface permet d'augmenter la première fréquence de résonance, réduisant ainsi les erreurs liées aux vibrations. L'interface de montage doit également être suffisamment plate pour éviter de déformer les composants clés et d'induire des erreurs.

L'assemblage des étages linéaires et rotatifs exige également de la précision. Il ne suffit pas de boulonner simplement la platine rotative à la platine linéaire ; il est essentiel d'aligner précisément l'axe de rotation sur l'axe de translation, en particulier dans les directions de tangage et de lacet, car les erreurs d'alignement entraîneront des coupes imprécises et mal localisées. Cet alignement peut être réalisé à l'aide d'une broche de test de précision et d'un dispositif de mesure tel qu'un indicateur numérique.

Une autre considération de conception importante consiste à placer l'axe de rotation de la table rotative aussi près de la table linéaire que raisonnablement possible. Cela donne un système de mouvement à profil plus bas, mais plus important encore, cela réduit le décalage entre le centre de gravité de la masse en mouvement et les centres d'action de la

platine linéaire. Tout ça génère des fréquences de résonance élevées, permettant ainsi un fonctionnement à plus grande vitesse sans exciter ces fréquences. Obtenir un alignement précis peut s'avérer difficile lorsque des objectifs de conception concurrents sont pris en compte. La réduction de la hauteur de l'axe rotatif et l'optimisation correspondante des centres d'action peuvent par exemple entraîner un encombrement supérieur de la platine linéaire et peuvent même compromettre la rigidité de l'interface linéaire-rotative. Les ingénieurs concepteurs doivent évaluer soigneusement les exigences du système et choisir un équilibre idéal.

De plus, les concepteurs doivent prendre soin de mettre en œuvre un système de gestion des câbles (CMS). Le CMS influence l'emplacement du centre de frottement, il faut donc prendre des mesures pour réduire ses influences de frottement. Le CMS peut également induire des forces perturbatrices entraînant des erreurs de lacet. Un CMS efficacement conçu minimise ces perturbations non symétriques, réduisant ainsi leur influence sur les performances de mouvement de la table.

Suivant l'assemblage et l'alignement, la métrologie doit être effectuée sur les platines linéaires et rotatives. Il est possible d'effectuer un étalonnage de précision en mesurant les erreurs de précision et de répétabilité sur l'axe et en générant une carte d'erreur, à partir de laquelle un tableau de correction de position peut être généré. À l'aide d'un interféromètre laser et d'un auto-collimateur, des techniciens qualifiés peuvent tracer les erreurs répétables et générer un fichier de correction pour le contrôleur. Il est important d'effectuer la métrologie et l'étalonnage aussi près que possible du point de travail pour compenser une certaine quantité d'erreurs hors axe telles que l'erreur d'Abbe. La figure 8 représente un technicien en métrologie utilisant un interféromètre laser pour effectuer un étalonnage de précision sur une platine linéaire.



Figure 8. Un technicien effectue la métrologie et l'étalonnage sur une platine linéaire.

Le réglage de l'asservissement, l'une des dernières optimisations au niveau du système à réaliser, consiste à déterminer un ensemble de gains de boucle d'asservissement qui correspondent le plus étroitement aux critères de performance souhaités. Pour les

systèmes de découpe de tubes, un réglage optimisé signifie qu'un système fonctionne avec sa bande passante la plus élevée possible. Contrairement à d'autres types de systèmes, où l'on pourrait optimiser la stabilité maximale du servo dans des conditions de charge variables, les systèmes de coupe de tubes ont une charge utile relativement faible par rapport à la masse totale en mouvement ; par conséquent, l'utilisation d'un schéma de réglage agressif offre généralement plus d'avantages que d'inconvénients.

Le réglage d'asservissement (tuning) est à la fois une science et un art. Il peut être modélisé, catégorisé et automatisé dans une certaine mesure ; cependant, il existe souvent une marge d'amélioration supplémentaire entre les mains d'un expert en réglage des servomoteurs. Certains contrôleurs de mouvement ont la capacité d'évaluer de manière autonome les propriétés d'un système. Idéalement, ce type d'outil d'autotune mesure et compense directement les résonances et le comportement non linéaire du système et applique des gains d'asservissement optimisés, des filtres et d'autres procédures de mise en forme de boucle. Cela permet d'optimiser le réglage du système en un seul clic de souris. Même avec un outil d'autotune, il est toujours important pour un technicien de confirmer et de valider les paramètres déterminés automatiquement, puis d'effectuer de petits ajustements et optimisations manuels si nécessaire. Dans tous les cas, un schéma de réglage agressif et rigide est nécessaire pour obtenir la combinaison optimale de vitesse et de précision dans les applications de fabrication de dispositifs médicaux cylindriques.

Pour un réglage de très haute performance, des fonctionnalités optionnelles du contrôleur telles qu'un suivi d'erreur de poursuite amélioré, une sortie synchronisée de manière ultra précise avec la position (fonction PSO) et des capacités de réglage de feedforward dans les boucles de contrôle peuvent contribuer à l'optimisation et à l'efficacité du système.

Résumé

L'optimisation des systèmes de mouvement pour transformer des tubes cylindriques en dispositifs médicaux vitaux peut être un défi, surtout lorsque le processus doit être à la fois rapide et précis. La clé du succès réside dans l'identification et l'optimisation des éléments de conception de la machine, afin que le tout soit supérieur à la somme des parties.

Dans la conception de machines de précision, tout compte, et certains aspects comptent plus que d'autres. Il est essentiel d'identifier les sources d'erreur de mouvement sur et hors axe, en particulier celles qui contribuent de manière significative aux erreurs dynamiques, et d'utiliser des techniques de conception intelligentes pour minimiser leur influence. Cela implique d'identifier et de comprendre les sources d'erreurs, de sélectionner des composants de machine tels que des roulements, des pinces de moteur et plus encore qui réduisent la contribution de ces erreurs et d'appliquer des techniques de contrôle avancées pour optimiser davantage les performances.

Les aspects clés pour obtenir simultanément une excellente précision et une vitesse élevée sont :

- Identifier et atténuer les sources d'erreur
- Prendre des décisions de conception qui permettent des performances hautement dynamiques
- Sélectionner un mécanisme de maintien optimal
- Associer la mécanique à un contrôleur doté de fonctionnalités et d'une technologie optimisant les performances
- Tenir compte qu'un système de mouvement spécialement conçu surpassera presque toujours les étages et les entraînements individuels qui sont assemblés en tant que composants

En abordant ces considérations, les fabricants de produits et dispositifs médicaux cylindriques – qu'ils soient constructeurs de machines OEM, intégrateurs de systèmes ou utilisateurs finaux – peuvent augmenter leur productivité tout en maintenant, voire en améliorant, la qualité et la cohérence des pièces, ce qui leur permet de mieux rivaliser sur le marché.



Informations sur l'auteur

Brian Fink est le chef de produit d'Aerotech ayant responsabilité sur les étages, les moteurs, les hexapodes et d'autres dispositifs mécaniques. Avec plus de 15 ans d'expérience dans le contrôle de mouvement de précision, il a occupé des postes dans la recherche et le développement, l'ingénierie des applications, les ventes et le marketing. M. Fink est titulaire d'une maîtrise en génie mécanique et en administration des affaires de l'Université de Pittsburgh.