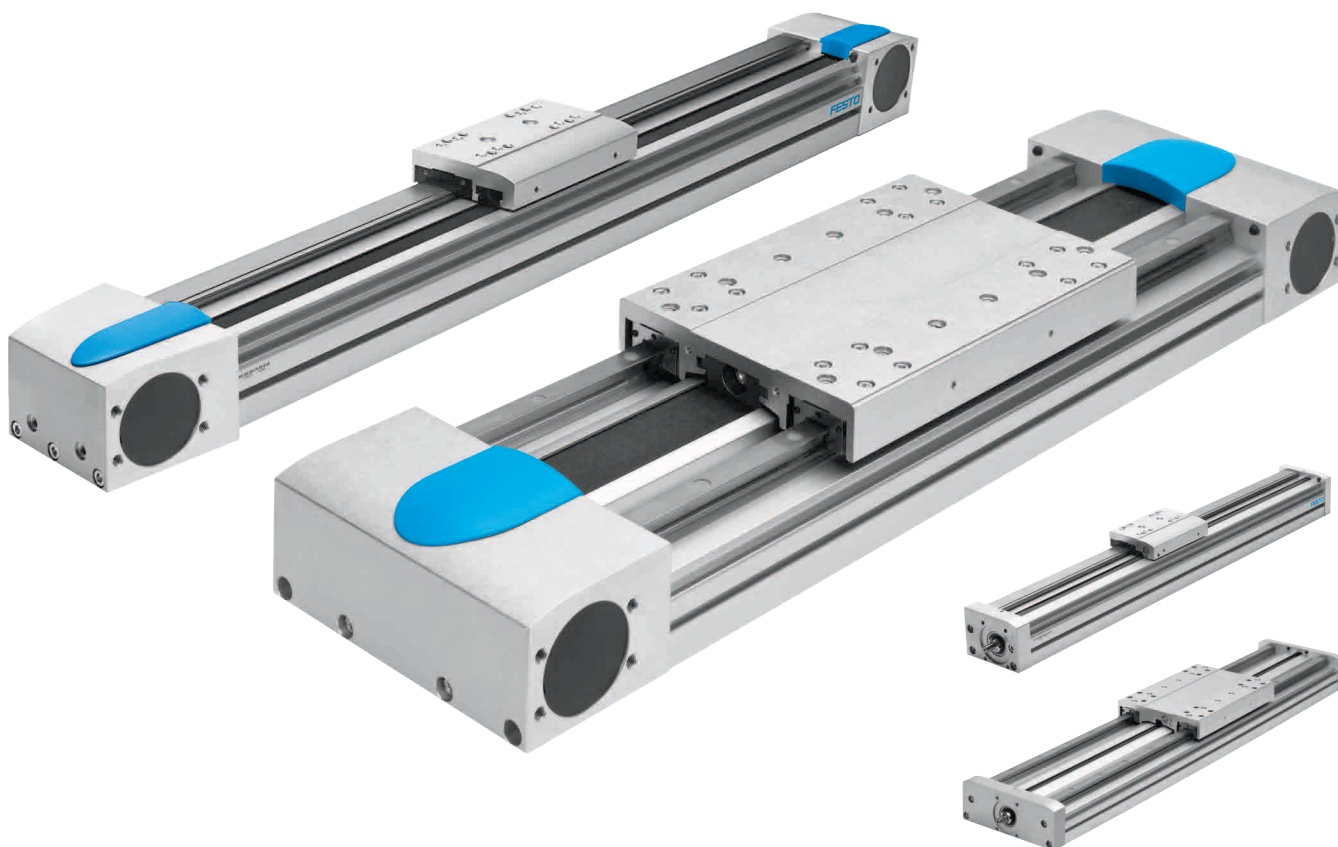
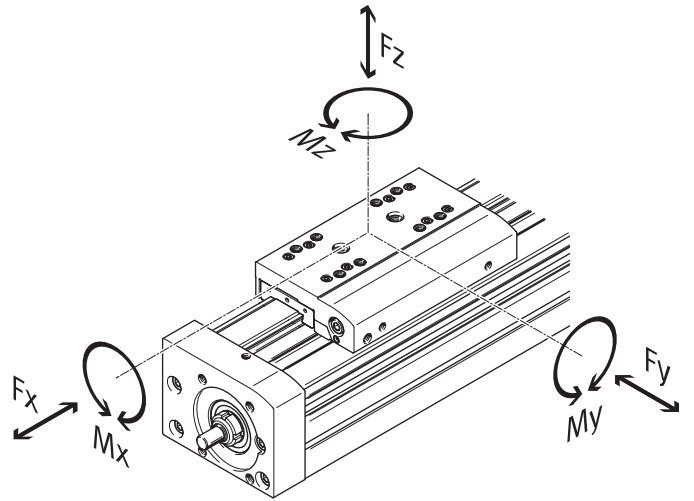


Libro blanco de la tecnología de cojinetes

Consideraciones clave para diseñadores de ejes lineales en la selección de sistemas de rodadura



La mayoría de los ejes electromecánicos utilizan perfiles de aluminio extruido en varios tamaños con un único carril de guía y una estructura del cojinete accionada por un motor eléctrico mediante una cinta o una configuración de tornillo de bolas. Hay limitaciones físicas a las fuerzas que un sistema de este tipo puede guiar de forma precisa y fiable. Este libro explora algunas estructuras de diseño alternativas para hacer frente a aplicaciones de mayor carga e identifica consideraciones de diseño observadas durante el desarrollo de un sistema de doble raíl de carga elevada de Festo.



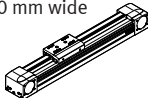
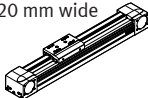
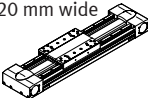
Tipo	Feed force F_x [N]	Max. velocity V [m/sec]	M_x Max. [Nm]	M_y Max. [Nm]	M_z Max. [Nm]	Max. working length [mm]
Eje de cojinete único de función estándar 70 mm wide 	100	5	16	132	132	5000
Eje de cojinete único de función estándar 120 mm wide 	800	5	144	680	680	8500
Eje de cojinete doble para tareas pesadas 220 mm wide 	1800	5	900	1450	1450	4750

Fig. 4 Tabla que muestra las dimensiones y las fuerzas habituales de varios diseños de ejes electromecánicos

Introducción

Desde 2008, Festo ha fabricado ejes electromecánicos con una gran aceptación [tipo: EGC, fig. 1]. Estos ejes se componen de una fijación para el motor, una estructura de transmisión por husillo o por cinta acoplada a un carro montado sobre un carril de guía de rodadura. Estos elementos están montados dentro de un perfil de aluminio muy rígido diseñado según el principio de bóveda de cañón (consulte la barra lateral de la página 4). Los tipos de cojinete utilizados son los de bolas recirculantes enjauladas [EGC-KF], que son considerados los mejores.



Fig. 1 Eje electromecánico de raíl con cojinete único [EGC]

Dentro del mercado de la automatización hay muchas aplicaciones para cargas elevadas, donde el tamaño de una disposición sencilla de perfil y cojinete sería demasiado grande y costosa. Por tanto, el requisito era identificar una unidad de guía rentable, dinámica, fácil de instalar y para cargas elevadas. Las aplicaciones habituales son el uso como eje Y en un sistema de manipulación de varios ejes [consulte la fig. 2 y la fig. 4 de los requisitos básicos del sistema: carrera, carga, momentos].

Muchos diseñadores logran una gran capacidad de carga utilizando dos unidades de guía electromecánicas en paralelo. La distancia entre las dos unidades de cojinete aumenta considerablemente la capacidad del sistema para resistir pares más elevados. Mientras que se ofrece un nivel elevado de flexibilidad al diseñador, esta solución es el doble de costosa y no resulta fácil predecir la vida útil del sistema. El diseñador debe encargarse de establecer la disposición de rendimiento óptima así como de añadir el coste adicional de intentar alinear los componentes en una estructura de la máquina muy rígida

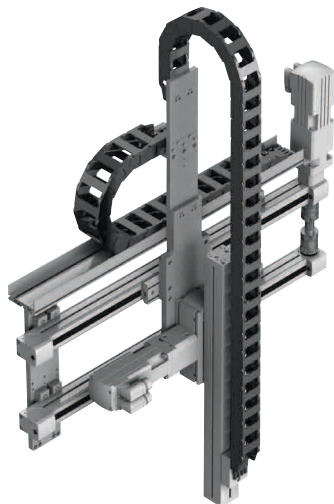


Fig. 2 Sistema de manipulación de varios ejes Y-Z con dos guías individuales en el eje Y

y de construir las placas de acoplamiento personalizadas, los ejes motrices, etc. La estructura seleccionada de la guía debe permitir cargas en todas las direcciones necesarias y debe ofrecer la vida útil general requerida por los sistemas totalmente con o sin un mantenimiento predeterminado. Los conjuntos modulares físicos están disponibles para permitir la combinación de dos ejes electromecánicos individuales pero sigue existiendo el problema de calcular el rendimiento final, la precisión y la vida útil.

Festo vio la oportunidad de ofrecer a los fabricantes de máquinas una solución de eje combinado único con un perfil individual más ancho y con varios carriles de guía para las aplicaciones de carga elevada [tipo EGC «carga pesada» o EGCHD, consulte la fig. 3]. Aunque esto parecía una tarea sencilla, en la realidad, desarrollar una solución como esa ha sido más difícil de lo que se creía al principio y ha destacado algunas nociones útiles para los ingenieros de diseño.

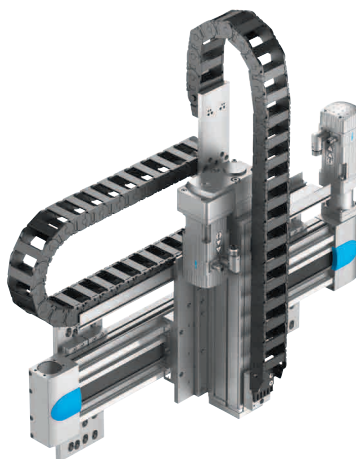


Fig. 3 Sistema de manipulación de varios ejes Y-Z que utiliza un eje guía doble integrado

Los diseños iniciales requerían un concepto basado en lo mismo, un perfil de aluminio muy rígido con bóveda de cañón, dos carriles de guía montados de forma precisa y rígida lo más separados posible y los cartuchos de cojinete de jaula de bolas hasta ahora bien probados. El proceso duró más de dos años y se probaron varios sistemas de cojinetes de diferentes proveedores.

Diseño del soporte perfilado

Para asegurarse de mantener la vida útil del cojinete en el eje de cojinete doble, las tolerancias se definieron cuidadosamente para las superficies de contacto del perfil con el carril de guía del cojinete lineal. Se determinó que para ofrecer un sistema de guía de alto rendimiento, el perfil de aluminio de soporte debería ser extremadamente fuerte, rígido y se debería fabricar de forma precisa. Para garantizar la vida útil del sistema, el eje debería estar disponible en longitudes de hasta 9 m, instalado con un paralelismo de $\pm 0,05$ mm y una desviación de la planicidad inferior a 0,2 mm.

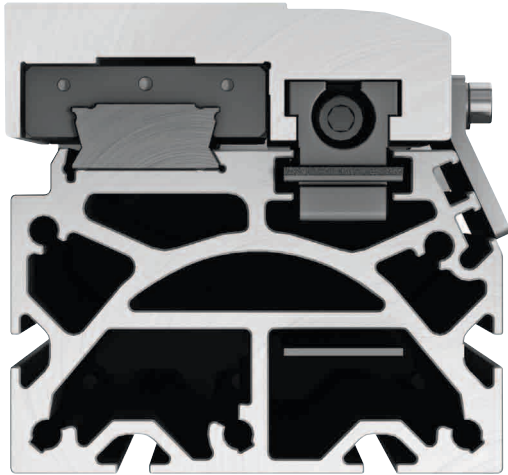


Fig. 5 Sección transversal del eje electromecánico con cinta de transmisión del eje guía **único** (perfil de la bóveda destacado)

Al trabajar en gran medida con varios fabricantes de extrusión, se determinó que usando el principio de arco interno es posible fabricar un perfil según las tolerancias de rigidez necesarias para el eje, pero no podían ofrecer la superficie de montaje llana para el cojinete. En su lugar, se desarrolló una máquina herramienta especial para fresar la superficie de la extrusión donde se une al carril de guía en el perfil estándar de 5,5 m o en el perfil extendido de pedido especial de 9 m de longitud. Las investigaciones han demostrado que estos tamaños de perfil abarcan la mayoría de las aplicaciones del cliente. Aunque un tratamiento extra añade costes de producción general adicionales, se estima que supera los beneficios gracias a una mejora diez veces superior en la precisión. La creación de esta máquina resultó ser un reto, ya que los perfiles pueden pesar 125 kg, por lo que de nuevo, fue una creación personalizada solo para este producto.

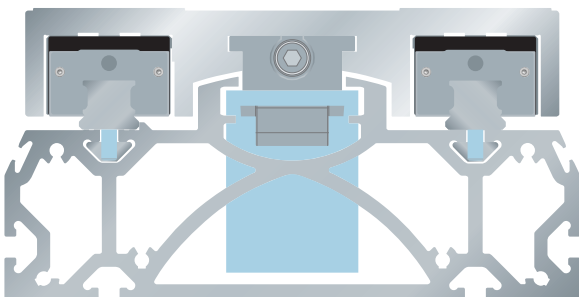


Fig. 6 Sección transversal del eje electromecánico con cinta de transmisión del eje guía **doble** (perfil de la bóveda destacado)

Bóveda de cañón: utilizada en la arquitectura y ahora en los ejes eléctricos y mecánicos

A menudo, los fabricantes de ejes mecánicos tienen carriles de gran calidad pero están atornillados a perfiles que no son especialmente rígidos; el resultado es que toda la estructura se flexiona; lo mismo sucede con un motor de gran rendimiento para automóviles que se atornilla a un chasis que se flexiona y se dobla al tomar una curva, por lo que se reduce el rendimiento general del vehículo.

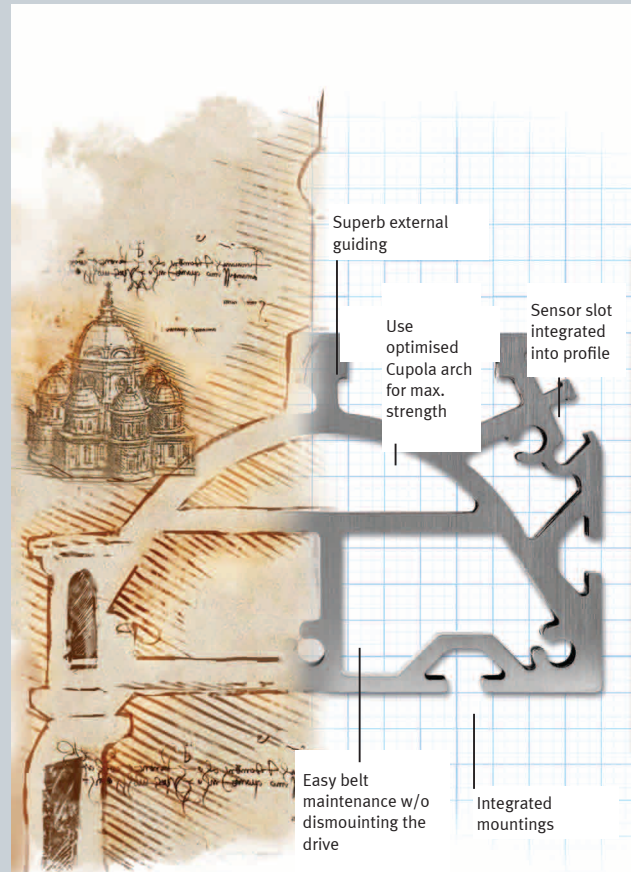


Fig. 7 Esquema que muestra la evolución y la aplicación de la bóveda de cañón rígida y muy fuerte

Para el eje estándar original y durante el desarrollo del sistema de eje doble, se desarrolló un perfil muy rígido usando un sistema de bóveda de cañón: un diseño creado por Da Vinci y utilizado en gran medida por Gaudí. Este perfil increíblemente rígido permite que haya un carril en el perfil para que no ceda: el propio eje se utiliza como parte estructural del sistema. En lugar de atornillar un eje mecánico a una parte estructural, con el sistema de bóveda de cañón, el eje mecánico se convierte en la parte estructural, lo que reduce considerablemente el peso, así como el tiempo de montaje y los costes asociados.

Fase de pruebas inicial

Gracias a la experiencia obtenida de la guía lineal utilizada en el eje estándar [EGC], el siguiente paso fue la prueba de durabilidad. Las muestras se colocaron en un laboratorio de ensayos de resistencia a la fatiga y se hicieron funcionar con la fuerza de avance máxima especificada en el catálogo. En estas pruebas iniciales, se tomaron tres muestras de cada tamaño con una vida útil superior a los 5 millones de ciclos equivalentes a unos 5000 km. No obstante, tras solo 500 km de pruebas, se produjo el primer fallo no esperado de los ejes; cuando las bolas del cassette del cojinete salieron expulsadas de la carcasa.



Fig. 8 Microscopios electrónicos utilizados para realizar un análisis detallado de los cojinetes dañados

Inicialmente, la investigación del equipo de diseño sobre el fallo se centró en la propia guía lineal y se decidió repetir la prueba con las mismas guías lineales pero desde un aspecto de producción diferente. Se inició una nueva prueba de durabilidad y se observaron demasiado rápido los mismos resultados deficientes.

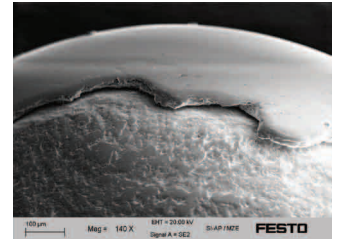
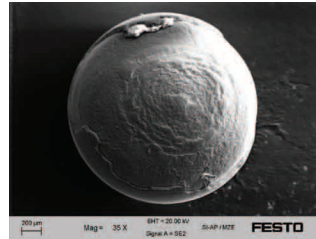


Fig. 9 y 10 Imágenes del microscopio electrónico de los cojinetes de bolas de rodillos que muestran la delaminación del exterior duro con una ampliación de 20 y 35 veces

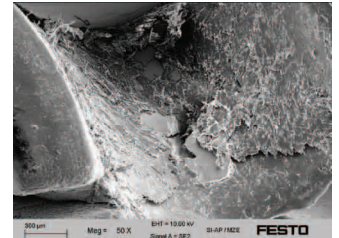
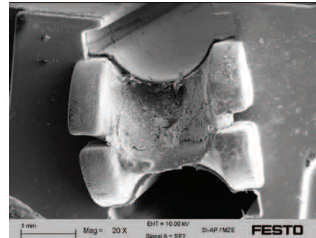


Fig. 11 y 12 Imagen del microscopio electrónico de los daños en el cartucho de bolas recirculantes con una ampliación de 20 y 35 veces

La investigación se centró entonces en el propio sistema de cojinete. Está claro que en un sistema de doble raíl, los dos ejes nunca están completamente paralelos, siempre hay algo de tolerancia a la desviación. En los sistemas habituales que utilizan dos ejes electromecánicos separados pero alineados, la placa que conecta los dos carros de cojinetes compensa una parte de este error de alineación deformándose hasta cierto grado. El problema con el nuevo sistema de bóveda de cañón único era que no había prácticamente elasticidad, la estructura es muy rígida y los cojinetes luchan entre sí, lo que provoca un desgaste prematuro y el fallo; se determinó que esta era la causa de los malos resultados de las pruebas iniciales.

Sistema de cojinete

Durante la fase de desarrollo, el enfoque principal era la rigidez del sistema de cojinete. En los ensayos iniciales, se utilizó el sistema probado de jaula de bolas del sistema de eje único existente [EGC] pero como se ha identificado, estos sistemas fallaron a los 500 km; no solo una vez, sino también en la repetición de la prueba.

La guía lineal seleccionada en un principio era idéntica al diseño probado utilizado en los sistemas de raíl único, una solución de gran rendimiento y muy rígida. Pero en esta ocasión, las bolas y el raíl del cojinete no estaban diseñados para sufrir una desviación y, por tanto, no compensaron las tolerancias de alineación en el diseño de raíl doble, de ahí el fallo.

Existen muchas disposiciones para cojinetes de bolas y los diferentes fabricantes de cojinetes pueden seleccionar muchas variables para optimizar sus soluciones, como el número y el tamaño de las bolas en contacto, su disposición, los ángulos de contacto y la forma en que se retienen las bolas.

Cada fabricante de cojinetes construye estructuras diferentes; un cojinete que tiene una disposición en O y está enjaulado, por ejemplo, no tiene por qué tener las mismas características y un rendimiento similar de un fabricante a otro. Esto puede deberse a otras diferencias en el diseño, puede que las dimensiones sean mayores o que el tamaño de las bolas no sea el mismo. Efectivamente, las diferentes combinaciones de sistemas de cojinetes disponibles en el mercado varían enormemente y resulta difícil elegir el sistema óptimo, por lo que es importante establecer una relación cercana con el fabricante del cojinete.

Para el EGC-HD se consideró un sistema de cojinete de guía lineal alternativo, que utilizaba cojinetes con bolas de mayor diámetro.

Las bolas más pequeñas tienen más puntos de contacto para acomodar la carga y ofrecen una buena rigidez.

Las bolas más grandes suponen que haya menos bolas en el cassette del cojinete y, por tanto, menos puntos de contacto. No obstante, con tamaños de bola mayores, la propia bola se puede comprimir ligeramente, compensando así las pequeñas pero importantes tolerancias del error de alineación; imagínese un balón de fútbol presurizado a 10 psi, el balón se podrá aplastar o deformar con más facilidad que una pelota de tenis con la misma presión. Por tanto, se determinó que un tamaño de bola superior se deformaría mínimamente y sería técnicamente mejor para este sistema, con una rigidez inherente increíble y, aún así, se cumplirían las tolerancias.

En este sistema de raíl doble, hay cargas pesadas, por tanto, el tamaño de la bola del cojinete está comprometido y el tamaño óptimo debe seleccionarse cuidadosamente. El perfil del raíl es muy rígido, por lo que hay poca deformación, todo movimiento debe ser ajustado por las propias bolas. Por ello, el tamaño de bola elegido para el sistema de raíl doble era ligeramente superior a los utilizados en el eje de raíl único. Con todo, se evaluaron diferentes sistemas de cojinetes de diferentes proveedores. Los diseñadores seleccionaron una solución probada que había funcionado de forma fiable durante muchos años, pero este ejemplo demuestra que a veces, la rueda no debe ser reinventada para obtener la solución correcta. Lo que funciona bien en una configuración no se puede simplemente cortar y pegar en otra.

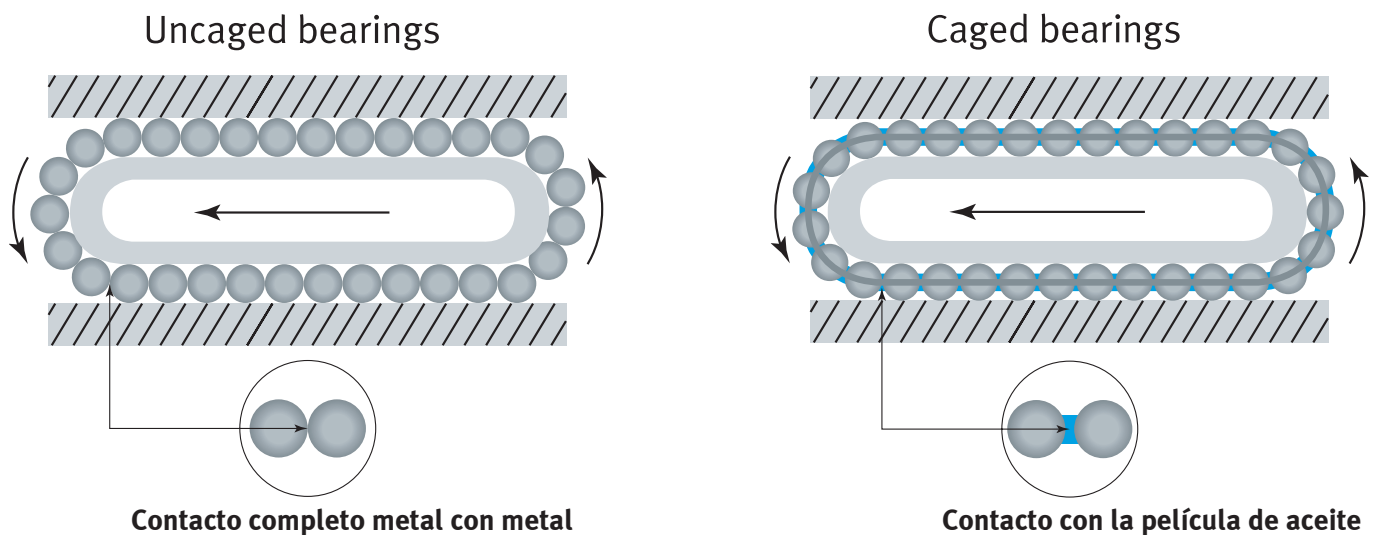


Fig. 13 Diagrama que muestra las diferencias entre los sistemas de cojinetes con jaula y sin jaula

Diferencias fundamentales entre las disposiciones en X y en O

La orientación de las bolas dentro de la carcasa del cojinete tiene un impacto significativo en el grado de resistencia a la deformación de la guía lineal. Existen dos geometrías de montaje: cara a cara (X) y espalda contra espalda (O).

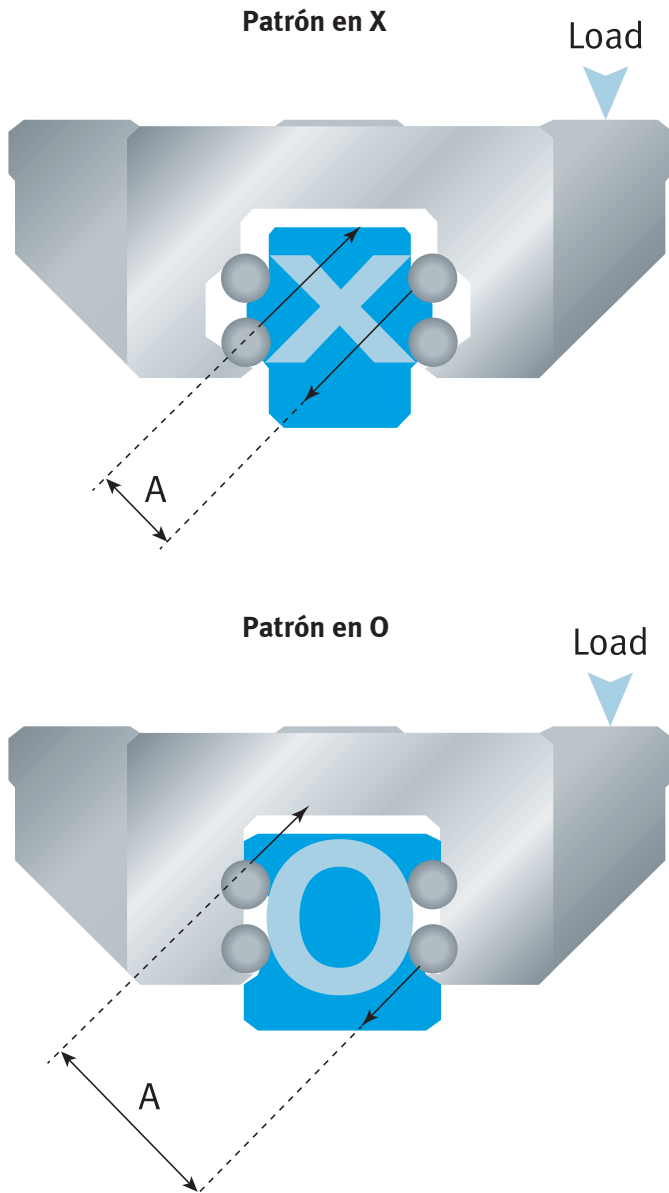


Fig. 14 Diagrama que muestra las diferencias entre las configuraciones de cojinetes en X y en O

En la disposición en X, las bolas entran en contacto con el raíl en una configuración orientada hacia el interior, lo que crea un patrón en X dentro del raíl. Este espacio pequeño entre las líneas centrales de las bolas ofrece rigidez a la guía, lo que reduce la capacidad de la guía para manipular cargas de momento o de flexión.

En la disposición en O (consulte el diagrama de la fig. 15), donde hay una orientación de las bolas hacia el exterior, el espacio entre las bolas es mucho más ancho, lo que ofrece una mayor resistencia a las fuerzas de momento aplicadas que en la disposición en X, así ofrece una mejor rigidez a la guía lineal. En resumen, cuanto más anchamente distribuya las fuerzas la disposición general en O, mas uniforme será el sistema de guía. En la guía lineal original utilizada en el eje único, no había que gestionar cargas de momento inherentes, por lo que la disposición en X ofrecía una solución muy superior; para los ejes de raíl doble, sin embargo, estas fuerzas se materializaron durante la fase de prueba. En esencia, la disposición en X aumentaba las fuerzas de contacto en el raíl guía y los bloques de cojinetes, una de las causas principales del fallo.

Mientras que la mayoría de ingenieros asumen que los cojinetes con jaulas de bolas son superiores a los que no tienen jaulas, esta situación no era así de sencilla al tratar con cargas elevadas. Una gran parte del espacio dentro de un cartucho de cojinete con jaula era utilizado por la propia jaula, lo que reducía el espacio disponible para las bolas. Los cojinetes sin jaula de bolas ofrecen más espacio para las bolas y, por tanto, una mayor zona de contacto que los diseños con jaula, y esta mayor capacidad de carga ayuda en aplicaciones de tareas pesadas. Al utilizar cojinetes sin jaula, la velocidad máxima permitida del sistema final no es tan elevada como la que se puede alcanzar con cojinetes con jaula. Sin embargo, en un eje capaz de soportar mil kilos, la velocidad no es la consideración principal.

Se determinó que la disposición de las cuatro cadenas de bolas en la guía lineal era un factor clave. La disposición en X utilizada en la solución original de eje único ha demostrado ser demasiado rígida en las pruebas para una disposición de doble guía, por lo que se utilizó una disposición en O. La selección de una configuración sin jaula compensa en parte el tamaño superior de las bolas, lo que permite que haya más bolas (más zona de contacto) dentro del mismo tamaño de cartucho.

Fase de pruebas final

Una vez finalizado el diseño e integrado el nuevo sistema de cojinete, se reinicia la prueba de durabilidad de 6 meses, esta vez sin fallos. Tras 5000 km, no se detectaron signos de desgaste, por lo que las pruebas se ampliaron. Incluso tras 10.000 km todo seguía bien. Se calcula que la vida útil media de un eje de este tipo dentro de una máquina es de aproximadamente 3600 km, por tanto, el nuevo diseño ofrece cómodamente el margen de seguridad operativa necesario.

Recorrido [km]

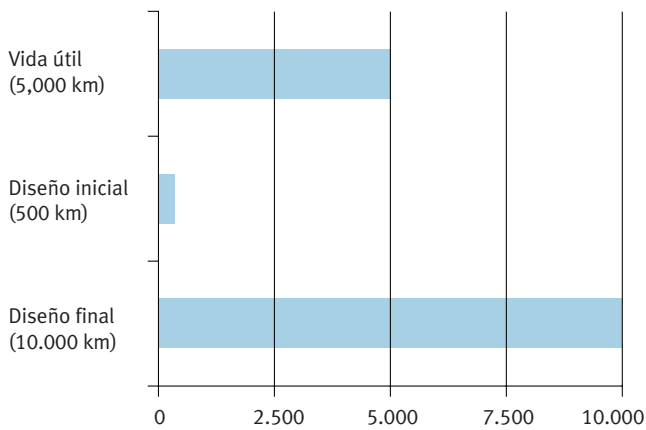


Abb. 15: Ergebnisdarstellung der Lebensdauertests

Lecciones que se deben aplicar

Mientras que se necesita un perfil (bastidor) muy rígido y preciso para aplicaciones de gran precisión, se debe tener una consideración especial con la falta de elasticidad de tal sistema.

Los sistemas de cojinete lineal simples pueden ser modificados de forma precisa y se puede predecir su rendimiento, pero los sistemas de cojinetes pueden volverse complicados y los modelos por ordenador existentes no pueden tener en cuenta todas las variables y predecir con precisión su vida útil.

No hay una selección simple del mejor cojinete: con jaula o sin jaula, con disposición en X o en O, el tamaño de la bola, etc., todo se debe determinar y ajustar a la aplicación.

Los ingenieros deben tener en cuenta la elección del sistema de guía utilizado en su diseño general, especialmente en los sistemas que lleven grandes masas y que suelen estar conectados a una estructura rígida.

Conclusión

Para un diseñador de máquinas especiales únicas, no sería práctico comenzar la evaluación de las opciones [tiempo o coste] y la tentación sería la de aplicar demasiada ingeniería en sus soluciones o arriesgarse a que se produzca un fallo prematuro en la máquina.

Autór:

Nigel Dawson
Product management
Festo Great Britain

Jörg Tertünte
Marketing Electric Automation
Festo Germany

Your local partner:

Festo AG & Co. KG

Post Box
73726 Esslingen
Ruiter Strasse 82
73734 Esslingen
Phone +49 (0)711 347 0
Fax +49 (0)711 347 26 28
E-mail: info_de@festo.com