

دانشکده مهندسی برق

**رساله مقطع کارشناسی‌ارشد مهندسي مکاترونیک**

بررسی روش های طراحی و ساخت موتور مسطح با استفاده از شناوری مغناطیسی

علیرضا امیری

**استاد راهنما:**

دکتر مهدی علیاری شوره‌دلی، دکتر اسماعیل نجفی

**خرداد ماه 1403**



**چکيده**

در صنایع تولیدی انعطاف‌پذیر، سیستم‌های شناوری مغناطیسی به دلیل عدم تماس فیزیکی بین سطوح، 6 درجه آزادی و سرعت و دقت بالا، جایگزینی مناسب برای نوارهای نقاله محسوب می‌شوند. این سیستم‌ها به طور فزاینده‌ای در موتورهای مسطح به کار گرفته می‌شوند. در این پژوهش، روش‌های مختلف طراحی و ساخت سیستم‌های شناوری مغناطیسی برای موتورهای مسطح بررسی می‌شوند.

آرایش آهنربا، انتخاب جنس برای قسمت متحرک و ثابت سیستم، و روش‌های مدل‌سازی از جمله عوامل کلیدی در طراحی و ساخت این سیستم‌ها هستند. آرایه‌های هالباخ یک‌بعدی یا دو‌بعدی، آهنربای دیسکی، و ترکیب آهنربا در قسمت‌های متحرک و ثابت، از جمله گزینه‌های موجود برای آرایش آهنربا به شمار می‌روند.

مدل‌سازی سیستم‌های شناوری مغناطیسی با استفاده از روش‌های تحلیلی (معادلات نیروی لورنتز و ماکسول)، روش‌های عددی (روش المان محدود)، روش‌های تخمین مدل (هارمونیک، بار ذره‌ای، بار صفحه‌ای) و روش‌های مبتنی بر داده (یادگیری ماشین، شبکه‌های عصبی) امکان‌پذیر است. در این پژوهش، به بررسی و مقایسه این روش‌ها پرداخته می‌شود

کليد واژه: شناوری مغناطیسی، موتور مسطح، تولید انعطاف‌پذیر، آرایه هالباخ، contactless operation ،

###### فهرست مطالب

عنوان صفحه

[فهرست شکل‏ها ‌د](#_Toc168824461)

[فصل 1- مقدمه 5](#_Toc168824462)

[1-1- پيشگفتار 5](#_Toc168824463)

[1-2- مقدمه‌ای بر تولید انعطاف‌پذیر 5](#_Toc168824464)

[1-3- مقدمه‌ای بر شناوری مغناطیسی 7](#_Toc168824465)

[فصل 2- تاریخچه 10](#_Toc168824466)

[2-1- طراحی سیستم‌ها 10](#_Toc168824467)

[2-1-1- استفاده از آهنربای دیسکی در طراحی متحرک 10](#_Toc168824468)

[2-1-2- استفاده از آرایه هالباخ یک بعدی در طراحی متحرک 11](#_Toc168824469)

[2-1-3- استفاده از آرایه هالباخ دو بعدی در طراحی متحرک 12](#_Toc168824470)

[فهرست مرجع‏ها 13](#_Toc168824471)

فهرست شکل‏ها

عنوان صفحه

[شکل 1 Flex conveyor 6](file:///D:\University\KNTU\Semester%202\Seminar\Thesis\تمرین%20نوشتاری2.docx#_Toc168824472)

[شکل 2 omnidirectional wheels 6](#_Toc168824473)

[شکل 3 طراحی سیستم جابه‌جایی با شناوری مغناطیسی 7](#_Toc168824474)

[شکل 4 الف) ساختار نوع 1، استاتور ساخته شده از سیم‌پیچ ب) ساختار نوع 2، متحرک ساخته شده از سیم‌پیچ 8](#_Toc168824475)

[شکل 5 انواع سیستم های شناوری مغناطیسی با آهنربای دیسکی 11](#_Toc168824476)

[شکل 6 MLPM با 4 آرایه هالباخ یک بعدی 11](#_Toc168824477)

[شکل 7 MagPad 12](#_Toc168824478)

# فصل 1- مقدمه

در این فصل، ابتدا مقدمه‌ای درباره‌ی تولید انعطاف‌پذیر بیان شده و چرایی استفاده از این روش در صنایع مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه، پس از معرفی فناوری‌های موجود برای پیاده‌سازی این شیوه‌ی تولید، ویژگی‌ها و مزایا و معایب هر یک از آنها ارزیابی می‌شوند. در نهایت در راستای هدف این پژوهش، ساختارهای مبتنی بر شناوری مغناطیسی در بخش نهایی معرفی شده و با توجه به ویژگی‌های انحصاری این فناوری، موارد استفاده‌ی آن در صنایع دیگر نیز ذکر می‌شوند.

## مقدمه‌ای بر تولید انعطاف‌پذیر

با رشد صنایع تولیدی مدرن و افزایش تنوع محصولات، خطوط تولید سنتی دیگر نمی‌توانند به سرعت به تغییرات پاسخ دهند. هرگونه تغییر در این خطوط نیازمند جابه‌جایی دستگاه‌ها یا تغییر مسیر نوارهای انتقال است که این کار هزینه‌های زیادی به همراه دارد و به دلیل زمان‌بر بودن و هزینه‌های بالا، اغلب عملی نیست.

"تولید انعطاف‌پذیر" به سامانه‌ای از ماشین‌آلات صنعتی اشاره دارد که به‌طور کنترل‌شده قادر به پردازش مقدار متوسطی از محصولات به‌صورت هم‌زمان هستند. این رویکرد با کنار گذاشتن روندهای خطی سنتی و بهره‌گیری از فرایندهای پیچیده‌تر، امکان تولید سریع‌تر را فراهم می‌کند.

یکی از الزامات اصلی برای پیاده‌سازی تولید انعطاف‌پذیر، طراحی جایگزین‌هایی برای نوارهای انتقال است تا کنترل دقیق‌تری بر محصولات در جریان تولید اعمال شود. امکان جابه‌جایی محصولات در دو راستای طولی و عرضی، به‌عنوان نخستین گام در ارتقای خطوط تولید و افزایش انعطاف‌پذیری مطرح است و برای دستیابی به این هدف، روش‌های متعددی ارائه شده است.

یکی از این روش‌ها که در پژوهش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته، استفاده از چرخ‌های چندجهته است که می‌تواند راهکاری مناسب برای کنترل موقعیت محصولات باشد. در این سازوکار، با تغییر وضعیت چرخ‌های مختلف و تنظیم جهت چرخش آنها، امکان جابه‌جایی محصولات در راستاهای طولی و عرضی، و همچنین چرخش حول محور عمودی فراهم می‌شود که به‌طور مؤثری به افزایش انعطاف‌پذیری خطوط تولید کمک می‌کند. استفاده از ربات‌های چرخ‌دار که قادر به جابه‌جایی در محیط‌های مسطح هستند نیز به‌عنوان یک راهکار برای انتقال محصولات در برخی صنایع معرفی شده است. با این‌ حال، فناوری‌های مبتنی‌ بر چرخ به‌ دلیل تماس فیزیکی ناگزیر میان محصولات و ماشین‌آلات با محدودیت‌هایی روبه‌رو هستند که استفاده از آن‌ها را در صنایع خاص دشوار می‌کند. یکی از چالش‌های اصلی این روش، وجود اصطکاک میان چرخ‌ها و محصولات است که در گام اول، به‌عنوان عاملی غیرقابل‌ پیش‌بینی در حرکت محصولات عمل کرده و دقت جابه‌جایی را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد. علاوه‌ بر این، اصطکاک موجود، سرعت و شتاب حرکت محصولات را محدود کرده و از عملکرد بهینه جلوگیری می‌کند.

یکی دیگر از محدودیت‌های سیستم‌های چرخ‌دار، ساختار مکانیکی آن‌ها است که می‌تواند باعث ایجاد گرد و غبار در محیط شود و به همین دلیل در صنایعی که نیاز به فضای بدون آلودگی یا خلا دارند، نمی‌توان از این فناوری استفاده کرد.

در مقابل، موتورهای مسطح مبتنی‌ بر شناوری مغناطیسی توانسته‌اند بسیاری از این محدودیت‌ها را برطرف کنند. با حذف تماس فیزیکی بین محصولات و سطح، نیروی اصطکاک از معادلات حرکت به‌طور کامل حذف می‌شود و این امکان فراهم می‌آید که حرکت محصولات با دقت بسیار بالایی کنترل شود. در این فناوری، نیروی اعمال‌شده به جسم متحرک از طریق میدان‌های مغناطیسی ناشی از جریان الکتریکی در سیم‌پیچ‌ها تولید می‌شود و به همین دلیل، می‌توان با دقت بالایی میزان نیروی واردشده و جابه‌جایی محصول را محاسبه و تنظیم کرد. همچنین این روش برخلاف روش‌های مبتنی‌ بر چرخ، امکان جابه‌جایی محصولات با سرعت و شتاب بالا و بدون ایجاد گرد و غبار را فراهم می‌کند. علاوه‌ بر این، اجزای متحرک در این سامانه‌ها می‌توانند تا شش درجه آزادی داشته باشند و بدون هیچ محدودیتی روی سطح استاتور حرکت کنند.

## مقدمه‌ای بر شناوری مغناطیسی

شناوری مغناطیسی به معنای اعمال نیروهای مغناطیسی به اجسام به‌گونه‌ای است که این نیروها بتوانند بر نیروی جاذبه غلبه کرده و جسم را بدون تماس فیزیکی و به‌صورت پایدار در هوا معلق نگه‌دارند. این نیرو می‌تواند به دو شکل جاذبه یا دافعه اعمال شود. در حالت جاذبه‌ای، نیروی مغناطیسی از بالا به جسم وارد شده و نیروی جاذبه زمین را خنثی می‌کند، درحالی‌که در حالت دافعه، نیرو از پایین به جسم وارد شده و آن را به سمت بالا نگه می‌دارد. در صورتی‌که جسم فقط دارای خاصیت رسانایی باشد، تنها امکان جذب‌شدن وجود دارد، اما اگر جسم از مواد مغناطیسی مانند آهنرباهای دائمی یا الکتریکی ساخته شود، می‌تواند هم جذب و هم دفع شود.

کنترل نیروهای مغناطیسی معمولاً با استفاده از آهنرباهای الکتریکی انجام می‌شود، به‌طوری‌که عبور جریان الکتریکی از سیم‌پیچ‌ها میدان مغناطیسی ایجاد کرده و تنظیم این جریان‌ها باعث تغییر در شدت میدان و نیروی وارده به جسم می‌شود. از این طریق، می‌توان با کنترل دقیق جریان، جسم را به‌طور پایدار در حالت معلق نگه داشت.

در موتورهای مسطح مبتنی‌ بر شناوری مغناطیسی، نیروی مغناطیسی همواره از بخش زیرین به جسم وارد می‌شود. در این سیستم‌ها، دو نوع طراحی رایج است: یا آهنرباهای الکتریکی در بخش استاتور قرار می‌گیرند و بخش متحرک از آهنرباهای دائمی ساخته می‌شود، یا برعکس، استاتور شامل آهنرباهای دائمی است و آهنرباهای الکتریکی در بخش متحرک جای می‌گیرند. در هر دو حالت، با تنظیم جریان در سیم‌پیچ‌های بخش متحرک، نیروی اعمالی کنترل شده و حرکت جسم تنظیم می‌شود.

در کاربردهای صنعتی، به‌دلیل نیاز به بازدهی بالاتر در تبدیل انرژی مغناطیسی به نیرو، از آرایه‌های خاصی از آهنرباهای دائمی به نام "آرایه هالباخ" استفاده می‌شود. این آرایه‌ها به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که میدان مغناطیسی را به‌طور متمرکز در یک سمت تقویت کنند و در نتیجه، نیروی مغناطیسی بیشتری به جسم وارد شود. ساختارهای آرایه هالباخ یک‌بعدی و دوبعدی در تحقیقات پیشین به‌طور گسترده بررسی و استفاده شده‌اند.

برای پیاده‌سازی موفق یک سیستم شناوری مغناطیسی، عوامل متعددی باید در نظر گرفته شوند که شامل طراحی و بهینه‌سازی ساختار مکانیکی سیستم، پیاده‌سازی کنترلرهای دقیق برای تنظیم نیروهای مغناطیسی، و همچنین مدل‌سازی دینامیکی یا شناسایی رفتار سیستم برای کنترل بهتر آن است. این عوامل به‌طور مستقیم بر کارایی و پایداری سیستم تأثیر می‌گذارند و باید به‌دقت مورد بررسی و تنظیم قرار گیرند.

درباره‌ی

# تاریخچه

در این فصل، پژوهش‌های پیشین در زمینه‌ی موتورهای مسطح مبتنی بر شناوری مغناطیسی (MLPM) با تمرکز بر ویژگی‌های اساسی آنان که به طور کلی در بخش‌های زیر دسته‌بندی شده‌اند، مورد بررسی قرار می‌گیرند.

معماری دستگاه: بررسی انواع معماری‌های موجود برای MLPM و تأثیر آن‌ها بر عملکرد کلی سیستم.

ساختار آهنرباهای دائمی و الکتریکی: مرور انواع آهنرباهای الکتریکی و چینش‌های مختلف آهنربا‌های دائمی و نقش آن‌ها در بهینه‌سازی عملکرد سیستم.

طراحی کنترلر: معرفی روش‌های کنترل کلاسیک و مدرن برای این سیستم‌ها و چگونگی بهبود پایداری و دقت حرکت.

روش‌های شناسایی سیستم و مدل‌سازی دینامیکی: تحلیل روش‌های شناسایی و تخمین مدل‌های دینامیکی سیستم برای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی عملکرد.

در بخش‌های بعد، پژوهش‌های انجام‌شده بر اساس این ویژگی‌ها ارزیابی شده و مزایا و معایب هر روش مورد بررسی قرار می‌گیرد.

طراحی سیستم‌ها

### معماری دستگاه‌های MLPM

سیستم‌های شناوری مغناطیسی به دلیل ماهیت ناپایدارشان بدون استفاده از حلقه‌های کنترلی نمی‌توانند پایداری لازم را فراهم کنند. به همین دلیل، در تمامی ساختارهای پیشنهادی، از سیم‌پیچ‌های الکتریکی برای تولید میدان مغناطیسی با شدت کنترل ‌شده استفاده می‌شود. این سیم‌پیچ‌ها وظیفه دارند تا موقعیت جسم معلق را پایدار کرده و آن را در حالت مطلوب نگه ‌دارند.

در طراحی موتورهای مسطح، که از دو بخش ثابت (استاتور) و متحرک (Mover) تشکیل شده‌اند، امکان تغییر در طراحی و محل قرارگیری آهنرباهای الکتریکی و دائمی وجود دارد. نیروی مغناطیسی وارد بر بخش متحرک می‌تواند به‌صورت جاذبه‌ای از بالا یا دافعه‌ای از پایین اعمال شود. با این حال، در موتورهای مسطح به دلیل لزوم کم بودن فاصله میان سیم‌پیچ‌ها و اجسام معلق، اعمال نیروی جاذبه‌ای از بالا امکان‌پذیر نیست. به همین دلیل، در تمامی طراحی‌ها، نیروی مغناطیسی دافعه‌ای از سمت پایین به بخش متحرک وارد می‌شود که امکان جابه‌جایی اجسامی که بر روی آنها قرار می‌گیرند را فراهم می‌کند.

با توجه به این موارد، دو طراحی کلی برای ساخت دستگاه‌های MLPM ارائه می‌شود که در ادامه به بررسی هر یک پرداخته خواهد شد.

#### سیم‌پیچ‌های متحرک و آهنرباهای ثابت

در این معماری بخش استاتور دستگاه از مجموعه‌ای از آهنرباهای ثابت تشکیل می‌شود که بتوانند میدان مغناطیسی ثابتی را در فضای اطراف خود ایجاد کنند. اما بخش متحرک سیستم، از تعدادی سیم‌پیچ‌ تشکیل می‌شود که با عبور جریان از آنها‌، میدان مغناطیسی متغیری تولید می‌شود که با تنظیم این جریان‌، نیروی وارد شده به آهنرباهای دائمی کنترل می‌شود. در نتیجه، به دلیل آنکه نیروهای وارد شده به سیم‌پیچ‌ها و آهنرباهای دائمی از جنس عمل و عکس‌العمل هستند، بنابراین طبق قانون سوم نیوتن مقدار آنها برابر بوده و در جهت عکس یکدیگر عمل می‌کنند. بنابراین با وارد شدن نیرو به آهنرباها از طرف سیم‌پیچ، خود سیم‌پیچ نیز دفع می‌شوند.

در پژوهش انجام شده در RN49 از ساختاری متشکل از سیم‌پیچ‌های چند لایه‌ متعامد در بخش متحرک استفاده شده است به طوری که لایه‌ی اول از این سیم‌پیچ‌ها در راستای x و z نیرو وارد می‌کنند و سیم‌پیچ‌های لایه‌ی دوم این نیرو را در راستاهای y و z وارد می‌کنند. جداسازی نیروهای وارد شده در دو جسم می‌تواند به کنترل سیستم کمک کند. همچنین به دلیل تفاوت فاصله‌ی این لایه‌ها با استاتور، نیروهای ناشی از هر لایه با یکدیگر تفاوت دارند که راه‌حل پیشنهادی در این پژوهش، افزایش ضخامت لایه‌های با فاصله‌ بیشتر است. اما به دلیل تفاوت ضخامت‌های این دو لایه و مشکلاتی که در فرایند تولید ایجاد می‌شود، ساختاری متشکل از سه لایه ارائه شده است که می‌تواند نیروی تولیدشده را افزایش دهد و همزمان، ضخامت یکسانی از سیم‌پیچ‌ها در هر راستا داشته باشد. در شکل ساختار این دستگاه نمایش داده شده است.

در پژوهش RN38، بخش متحرک از یک لایه سیم‌پیچ با چینش متعامد تشکیل شده که قابلیت اعمال نیرو در سه راستا را فراهم می‌سازد. در ادامه، پژوهش RN14 روشی تحلیلی برای بهینه‌سازی ضخامت این سیم‌پیچ‌ها ارائه کرده است که با در نظر گرفتن معیارهای مختلف، به بهبود عملکرد سیستم می‌پردازد. شکل این ساختار را نمایش داده است.

با وجود اینکه این معماری امکان دستیابی به شناوری پایدار و حرکت با شش درجه آزادی را فراهم می‌کند، اما در کاربردهای عملی با محدودیت‌هایی مواجه است که بر عملکرد نهایی سیستم تأثیرگذار هستند. نخستین محدودیت، نیاز به تأمین انرژی الکتریکی برای سیم‌پیچ‌ها از طریق سیم‌های فیزیکی است که این امر به‌طور اجتناب‌ناپذیری ارتباط فیزیکی میان جسم متحرک و محیط اطراف را برقرار می‌سازد، در نتیجه حرکت آزادانه کامل جسم متحرک محدود می‌شود. دومین محدودیت، چالش خنک‌کاری سیم‌پیچ‌ها است که به دلیل ماهیت متحرک و معلق بودن آن‌ها، اجرای یک سیستم خنک‌کننده کارآمد دشوار خواهد بود. این مشکلات، نیاز به ارائه معماری جدیدی را آشکار می‌کند که بتواند این چالش‌ها را برطرف سازد.

#### آهنرباهای متحرک و سیم‌پیچ‌های ثابت

معماری دیگری که برای ساخت دستگاه‌های MLPM ارائه شده، قرار دادن سیم‌پیچ‌ها در استاتور دستگاه و طراحی متحرک با استفاده از آهنرباهای دائمی است. در این ساختار جدید که در پژوهش‌های زیادی مورد استفاده قرار گرفته است، مشکلات پیشین مانند محدودیت در جابه‌جایی متحرک و یا خنک‌کاری سیم‌پیچ‌ها برطرف شده و عملکرد بهتری حاصل می‌شود.

در پژوهش RN7، استاتوری از با استفاده از سیم‌پیچ‌ه

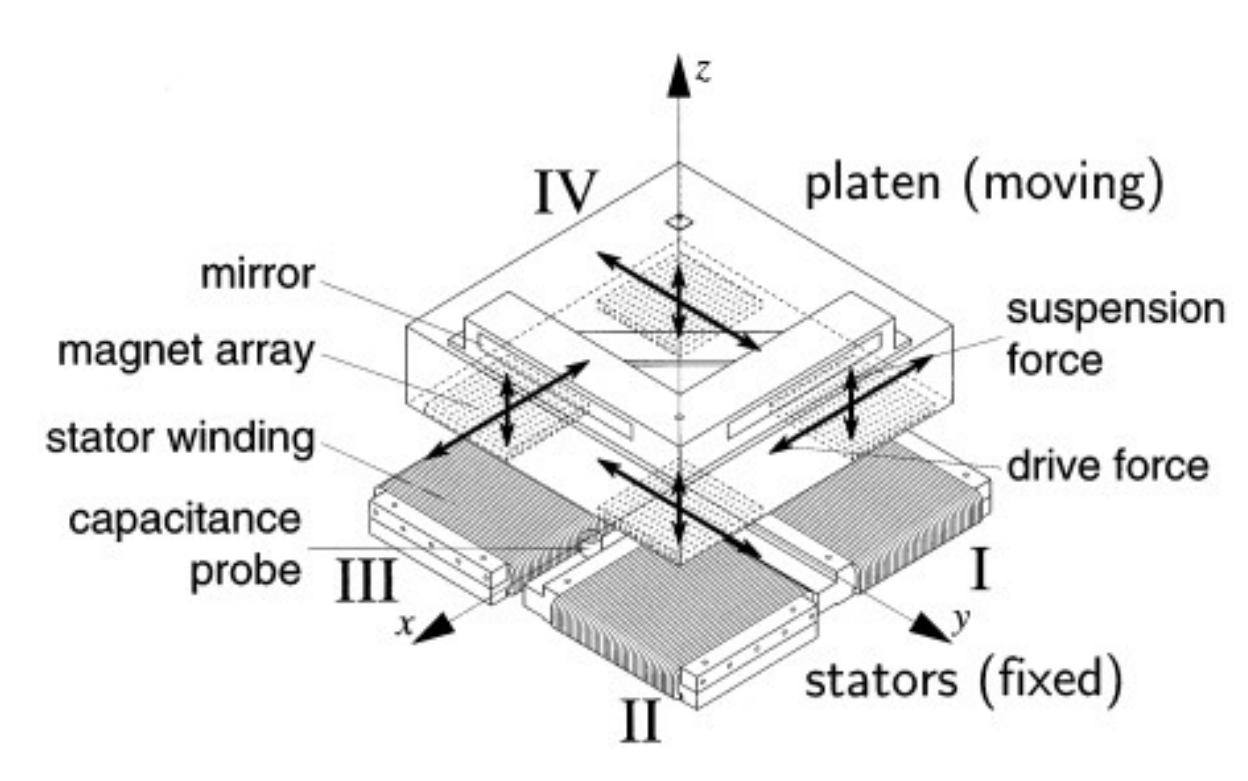
|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| الف) استفاده از دو آهنربای دیسکی [8] | ب) استفاده از چیدمانی از آهنرباهای دیسکی برای چرخش نامحدود [9] | پ) MagTable |

شکل 5 انواع سیستم های شناوری مغناطیسی با آهنربای دیسکی

### استفاده از آرایه هالباخ یک بعدی در طراحی متحرک

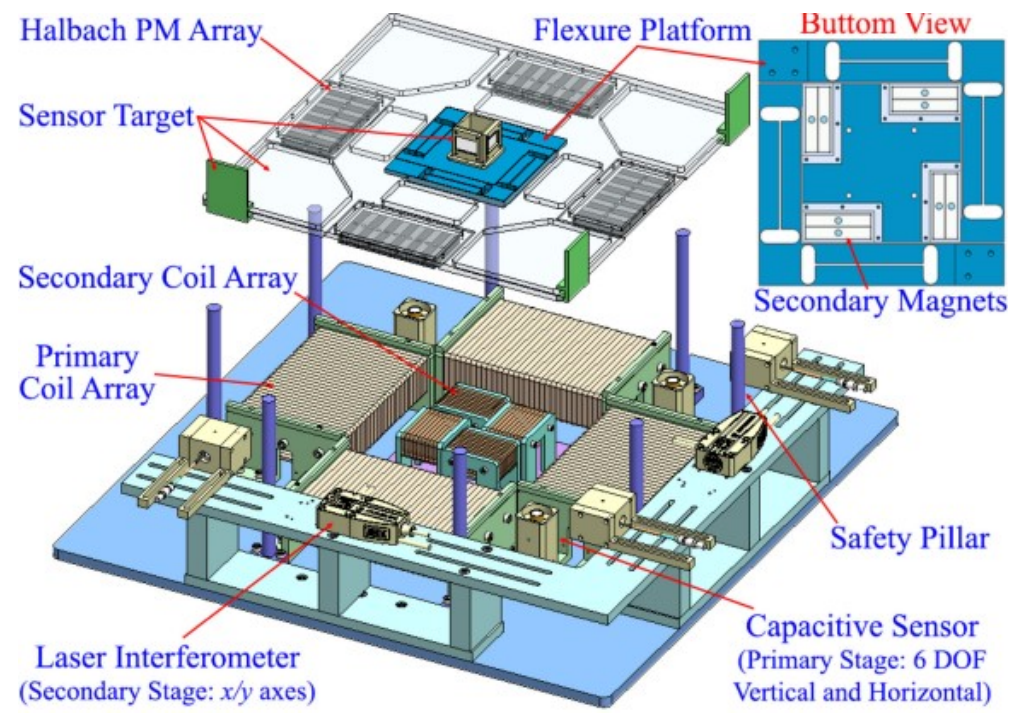
استفاده از آرایه‌های هالباخ به این دلیل که می‌توان شدت شار مغناطیسی آن را در نواحی مختلف با استفاده از روش های تحلیلی و عددی به دست آورد، در متحرک های سیستم‌های شناوری مغناطیسی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این طراحی‌ها، معمولا از 4 آرایه یک‌بعدی هالباخ استفاده می‌شود که به هر یک در دو راستای افقی و عمودی نیرو وارد می‌شود. با استفاده از چهار آرایه هالباخ می‌توان به حرکتی با 6 درجه آزادی دست یافت.

اولین سیستم شناوری مغناطیسی با 6 درجه آزادی در سال 1999 ارائه شد. [10] و [6] این سیستم با دامنه حرکتی 50 میلیمتر در 50 میلیمتر قادر بود با دقت 5 نانومتر و شتاب G متحرک را جابه‌جا کند. پیاده‌سازی این سیستم، توانایی بالای MLPM در صنعت تولید نیمه‌رسانا را نشان می‌داد. ]شکل 2[



شکل 6 MLPM با 4 آرایه هالباخ یک بعدی

در بازطراحی این سیستم در [11] توسط A\*STAR که با عنوان MagPad شناخته می‌شود، به غیر از 4 آرایه هالباخ یک بعدی اصلی، از 4 آرایه‌ی ثانویه نیز استفاده شده است. آرایه‌ی اصلی وظیفه‌ی اجرای حرکات در برد بلند و آرایه‌ی ثانویه وظیفه‌ی تنظیم حرکات در برد کوتاه را بر عهده دارد.] شکل 7[



شکل 7 MagPad

فهرست مرجع‏ها

[1] S. H. Mayer, *Development of a completely decentralized control system for modular continuous conveyors*. KIT Scientific Publishing Karlsruhe, Germany, 2009.

[2] T. Sun, Y. Zhang, H. Zhang, P. Wang, Y. Zhao, and G. Liu, "Three-wheel driven omnidirectional reconfigurable conveyor belt design," in *2019 Chinese Automation Congress (CAC)*, 2019: IEEE, pp. 101-105.

[3] T. A. T. Dang, M. Bosch-Mauchand, N. Arora, C. Prelle, and J. Daaboul, "Electromagnetic modular Smart Surface architecture and control in a microfactory context," *Computers in Industry,* vol. 81, pp. 152-170, 2016.

[4] S. Zhang, X. Dang, K. Wang, J. Huang, J. Yang, and G. Zhang, "An Analytical Approach to Determine Coil Thickness for Magnetically Levitated Planar Motors," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics,* vol. 22, no. 1, pp. 572-580, 2017, doi: 10.1109/tmech.2016.2631571.

[5] S. Zhang, Y. Zhu, H. Mu, K. Yang, and W. Yin, "Decoupling and levitation control of a six-degree-of-freedom magnetically levitated stage with moving coils based on commutation of coil array," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering,* vol. 226, no. 7, pp. 875-886, 2012.

[6] Z. Xu, C. Trakarnchaiyo, C. Stewart, and M. B. Khamesee, "Modular Maglev: Design and implementation of a modular magnetic levitation system to levitate a 2D Halbach array," *Mechatronics,* vol. 99, 2024, doi: 10.1016/j.mechatronics.2024.103148.

[7] X. Zhang, C. Trakarnchaiyo, H. Zhang, and M. B. Khamesee, "MagTable: A tabletop system for 6-DOF large range and completely contactless operation using magnetic levitation," *Mechatronics,* vol. 77, 2021, doi: 10.1016/j.mechatronics.2021.102600.

[8] P. Berkelman and M. Dzadovsky, "Magnetic Levitation Over Large Translation and Rotation Ranges in All Directions," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics,* vol. 18, no. 1, pp. 44-52, 2013, doi: 10.1109/tmech.2011.2161614.

[9] M. Miyasaka and P. Berkelman, "Magnetic levitation with unlimited omnidirectional rotation range," *Mechatronics,* vol. 24, no. 3, pp. 252-264, 2014.

[10] W.-j. Kim and D. L. Trumper, "High-precision magnetic levitation stage for photolithography," *Precision engineering,* vol. 22, no. 2, pp. 66-77, 1998.

[11] H. Zhu, T. J. Teo, and C. K. Pang, "Magnetically levitated parallel actuated dual-stage (Maglev-PAD) system for six-axis precision positioning," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics,* vol. 24, no. 4, pp. 1829-1838, 2019.