بسم الله الرحمن الرحيم
نستعين ونبه

دانشگاه صنعتی امیرکبیر

عنوان:

کنترل بهینه ارتعاشات آزاد و واداشته یک ورق با استفاده از مجموعه‌ی بهینه‌ای از المانهای پیزوالکتریک

ارائه شده برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

توسط:

مهدی رضاپوریان قهفرخی

استاد راهنما:

دکتر فیروز بختیاری نژاد

دانشکده مهندسی مکانیک

شهریور ۱۳۷۸

شماره :
تاریخ :

فرم اطلاعات پایان‌نامه کارشناسی ارشد

مشخصات دانشجو

نام و نام خانوادگی : مهدی رضاپوریان قهفرخی **دانشجونوبت دوم**

شماره دانشجویی : ۸٤۱۲٦۰۷۰ دانشکده : مهندسی مکانیک **رشته تحصیلی : طراحی کاربردی**

نام و نام خانوادگی استاد راهنما / استادان راهنما: دکترفیروز بختیاری نژاد

عنوان به فارسی : کنترل بهینه ارتعاشات آزاد و واداشته یک ورق با استفاده از مجموعه‌بهینه‌ای از المانهای پیزوالکتریک

عنوان به انگلیسی : Optimal Control of free and forced vibration of a Plate Using an Optimal Number of Piezoelectric Elements

نوع پروژه : کارشناسی ارشد **کاربردی** ☐ **بنیادی** ☐ **توسعه‌ای** ■ **نظری**

تاریخ شروع : ۸٦/۰۱/۱۳ **تاریخ خاتمه : ۸۷/۰٦/25** **تعداد واحد :** **۶**

سازمان تأمین کننده اعتبار : معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی امیرکبر

واژه های کلیدی به فارسی : ورق نازک، پیزوالکتریک، فرکانسهای طبیعی، الگوریتم تصویر گرادیان، الگوریتم رگولاتور مربعی

واژه های کلیدی به انگلیسی : thin plate , piezoelectric , natural frequencies , gradient projection algorithm, quadratic regulator algorithm

---

نظرها و پیشنهادها به منظور بهبود فعالیت‌های پژوهشی دانشگاه :

استاد راهنما / استادان راهنما : دکترفیروز بختیاری نژاد

« من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق »

بدین وسیله از زحمات بی شائبه‌ی استاد ارجمند و گرانسنگم جناب آقای دکتر فیروز بختیاری نژاد که در تمام مراحل انجام پروژه با مهربانی مرا یاری کردند، کمال تشکر و قدردانی دارم و از خداوند بزرگ برای ایشان آرزوی توفیق و کامیابی دارم.

از دوست عزیزم جناب آقای مهندس سید علی قریشی نیز تشکر و قدردانی می‌نمایم.

تقدیم به پدر و مادر مهربانم

تعهد نامه

اینجانب مهدی رضاپوریان قهفرخی متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این پایان نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب تحت نظارت و راهنمایی اساتید دانشگاه صنعتی امیرکبیر بوده و به دستاوردهای دیگران که در این پژوهش استفاده شده است، مطابق مقررات و روال متعارف ارجاع و در فهرست منابع و مآخذ ذکر گردیده است. این پایان نامه قبلا برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارائه نگردیده است.

در صورت اثبات تخلف در هر زمان مدرک تحصیلی صادر شده توسط دانشگاه از درجه اعتبار ساقط بوده و دانشگاه حق پیگیری قانونی خواهد داشت. کلیه نتایج و حقوق حاصل از این پایان نامه متعلق به دانشگاه صنعتی امیرکبیر می‌باشد.

هر گونه استفاده از نتایج علمی و عملی، واگذاری اطلاعات به دیگران یا چاپ و تکثیر، نسخه برداری، ترجمه و اقتباس از این پایان نامه بدون موافقت کتبی دانشگاه صنعتی امیرکبیر ممنوع است. نقل مطالب با ذکر مأخذ بلامانع است.

مهدی رضاپوریان قهفرخی

چکیده:

ارتعاشات یک عامل مزاحم و در برخی موارد تخریب کننده در سازه ها و سیستم ها به شمار می رود. از طرفی به علت ماهیت ارتعاشی بودن همه سازه‌های پیوسته و وجود فرکانس های طبیعی بیشمار، خطر وقوع پدیده تشدید وجود دارد. بنابراین لازم است که این ارتعاشات را شناسائی و به گونه ای در کنترل خود در آوریم. بخصوص در صنایع هوافضا، که احتمال قرار گرفتن سازه‌ها در معرض نیروهای برانگیزش خارجی وجود دارد، کنترل ارتعاشات به عنوان مساله‌ای مهم تلقی می‌گردد. در این میان استفاده گسترده از مواد هوشمند، نظیر پیزوالکتریکها بعنوان حسگر و تحریک کننده که برروی سطح سازه‌ها نصب می گردند برای کنترل دقیق آنها کاملا مشهود است.

در این رساله به بررسی رفتار ارتعاشی یک ورق نازک پرداخته شده است . رفتار ورق مورد نظر بر پایه تئوری کلاسیک ورق نازک استوار بوده و شرایط مرزی آن بصورت **CCCF** می‌باشد. برای کنترل ارتعاشات آن از پیزوالکتریک به عنوان عملگر استفاده خواهد شد. با استفاده از روش مودهای فرضی فرکانسهای طبیعی ورق تعیین شده‌اند. سپس با در نظر گرفتن دو المان پیزوالکتریک در بالا و پایین وسط صفحه تاثیر غیر فعال این وصله‌ها بر فرکانسهای طبیعی ورق مطالعه شده است. در گام بعدی با بررسی اثر فعال این دو المان پیزوالکتریک مشخص می‌شود که خاصیت الکترومکانیکی پیزوالکتریکها بر ورق سبب ایجاد یک تابع برانگیزش برای هر مود ارتعاشی است. با پیدا کردن نقاط بیشینه تابع برانگیزش پیزوالکتریک برای هر مود معیاری برای نصب بهینه پیزوالکتریک حاصل می-گردد. در این نقاط با یک ولتاژ مشخص بیشترین نیرو به ورق وارد می‌شود. با توجه به معیار ارائه شده، پنج مکان برای نصب پیزوالکتریک(برای پنج شکل مود) مشخص می‌گردد. با توجه به اینکه هدف، کنترلِ سه مود اول ارتعاشات صفحه است، در مکانهای بهینه مربوط به سه مود اول، المانهای پیزوالکتریک نصب خواهند شد. لازم به ذکر است که در این سه نقطه المانها بصورت جفتی در بالا و پایین ورق نصب می‌شوند. پس در این حالت ورق دارای شش وصله‌ی پیزوالکتریک است و با توجه به تاثیر این وصله‌ها بر ماتریسهای سختی و جرم ورق دوباره به بررسی این تاثیر پرداخته شده است. در

این بررسی ضخامت چسب بین المان پیزو و ورق که در مراحل قبلی نادیده گرفته شده بود را لحاظ کرده و دوباره فرکانسهای طبیعی ورق در این حالت تعیین شده‌اند.

برای کنترل ارتعاشات ورق سه مود ارتعاشی آنرا در نظر گرفته و با استفاده از دو الگوریتم کنترلی تاثیر خاصیت الکترومکانیکی پیزوالکتریک را مطالعه می‌کنیم. در الگوریتم دوم با در نظر گرفتن محدودیت بر المان پیزوالکتریک به کنترل سه مود ارتعاشی ورق پرداخته شده است که نتایج حاصله در مقایسه با روش قبلی نشان می‌دهد که روش دوم (تصویر گرادیان) به خاطر توان ایجاد محدودیت برای ولتاژ اعمالی به پیزوالکتریک و همچنین توانایی در میرا کردن بهتر ارتعاشات ورق، کارامد تر است.

کلمات کلیدی : ورق نازک، پیزوالکتریک، فرکانسهای طبیعی، الگوریتم تصویر گرادیان، الگوریتم رگولاتور مربعی خطی.

فهرست مطالب

فصل اول- مقدمه ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- هدف، فرضیات و روش حل مساله ۳

۱-۳- ترتیب و رئوس مطالب ۴

فصل دوم- مدلسازی ریاضی ورق ۶

۲-۱- مقدمه ۷

۲-۲- مدلسازی تیر ۸

۲-۳- مدلسازی ورق ۱۰

۲-۴- بررسی اثرغیر فعال پیزوالکتریک بر ورق ۱۹

۲-۴-۱- معادله ارتعاشی ورق همراه با دو المان پیزوالکتریک ۱۹

۲-۴-۲- محاسبه فرکانسهای طبیعی ورق همراه با دوالمان پیزوالکتریک ۲۳

فصل سوم- بررسی مواد پیزوالکتریک و روابط ساختاری و اساسی حاکم بر آن ۲۷

۳-۱- کشف اثر پیزوالکتریک ۲۸

۳-۲- سازهها و مواد هوشمند ۲۹

۳-۲-۱- مواد هوشمند ۲۹

۳-۲-۲- سازههای هوشمند ۳۲

۳-۲-۳- سازه های هوشمند همراه با المانهای پیزوالکتریک ۳۳

۳-۳- اثر تنش و میدان الکتریکی در پیزوالکتریک ۳۳

۳-۳-۱- معادلات ساختاری پیزوالکتریک ۳۴

۳-۴- کاربردهای اثر معکوس پیزوالکتریک ۳۷

۳-۵- ملزومات مواد پیزوالکتریک به عنوان حسگر ۳۸
فصل چهارم- بررسی رفتار ورق همراه با اثر فعال پیزوالکتریک ۳۹
۴-۱- مقدمه ۴۰
۴-۲- مدلسازی ریاضی ورق همراه با اثر فعال المان پیزوالکتریک ۴۱
۴-۲-۱- تعیین مکان بهینه نصب المانهای پیزوالکتریک بر ورق ۴۷
۴-۲-۲- مقایسه مقدار دقیق و تقریب زده شده‌ی نیروی اعمالی به ورق ناشی از اثر فعال پیزوالکتریک ۵۰
۴-۳- بررسی فرکانسهای طبیعی ورق با المانهای بهینه شده‌ی پیزوالکتریک همراه با چسب. ۵۴
فصل پنجم- کنترل بهینه ارتعاشات سیستم ۵۸
۵-۱- مقدمه ۵۹
۵-۲- مساله رگولاتورهای مربعی خطی ۶۱
۵-۳- معادله ارتعاشی ورق در فضای مودال ۶۶
۵-۴- کنترل با استفاده از روش تصویر گرادیان ۷۱
فصل ششم- جمع بندی و پیشنهادات ۸۵
۶-۱- جمع بندی و نتیجه گیری ۸۶
۶-۲- پیشنهاد برای کارهای آینده ۸۸
مراجع ۸۹

فهرست شکل ها:

شکل-۲-۱- شماتیک صفحه مورد نظر با شرایط مرزی CCCF ۸

شکل ۲-۲- شکل مود اول ورق نازک با شرایط مرزی CCCF ۱۷

شکل ۲-۳- شکل مود دوم ورق نازک با شرایط مرزی CCCF ۱۷

شکل ۲-۴- شکل مود سوم ورق نازک با شرایط مرزی CCCF ۱۸

شکل ۲-۵- شکل مود چهارم ورق نازک با شرایط مرزی CCCF ۱۸

شکل ۲-۶- شکل مود پنجم ورق نازک با شرایط مرزی CCCF ۱۹

شکل ۲-۷- نحوه نصب المان پیزوالکتریک برروی ورق ۲۶

شکل ۴-۱- شکل شماتیکی ورق همراه با مکان بهینه نصب المانهای پیزوالکتریک ۴۹

شکل ۴-۲- خطای تقریب برای ترم مربوط به اثر فعال پیزوالکتریک ۵۱

شکل ۴-۳- منحنی نمایش تابع $G_1(\zeta,\eta)$ برای مود اول ورق CCCF ۵۲

شکل ۴-۴- منحنی نمایش تابع $G_2(\zeta,\eta)$ برای مود دوم ورق CCCF ۵۲

شکل ۴-۵- منحنی نمایش تابع $G_3(\zeta,\eta)$ برای مود سوم ورق CCCF ۵۳

شکل ۴-۶- منحنی نمایش تابع $G_4(\zeta,\eta)$ برای مود چهارم ورق CCCF ۵۳

شکل ۴-۷- منحنی نمایش تابع $G_5(\zeta,\eta)$ برای مود پنجم ورق CCCF ۵۴

شکل ۵-۱- منحنی نمایش مختصات مودال اول بدست آمده از الگوریتم LQR بر حسب زمان با اعمال ورودی بدون محدودیت ۶۸

شکل ۵-۲- منحنی نمایش مختصات مودال دوم بدست آمده از الگوریتم LQR بر حسب زمان با اعمال ورودی بدون محدودیت ۶۸

شکل ۵-۳- منحنی نمایش مختصات مودال سوم بدست آمده از الگوریتم LQR بر حسب زمان با اعمال ورودی بدون محدودیت ۶۹

شکل ۵-۴- منحنی نمایش ورودی بهینه اول بدست آمده از الگوریتم LQR بدون اعمال محدودیت بر حسب زمان..... ۶۹
شکل ۵-۵- منحنی نمایش ورودی بهینه دوم بدست آمده از الگوریتم LQR بدون اعمال محدودیت بر حسب زمان..... ۷۰
شکل ۵-۶- منحنی نمایش ورودی بهینه سوم بدست آمده از الگوریتم LQR بدون اعمال محدودیت بر حسب زمان..... ۷۰
شکل۵-۷- منحنی نمایش بدست آمده برای مختصات مودال اول بر حسب زمان درالگوریتم تصویر گرادیان..... ۷۸
شکل۵-۸- منحنی نمایش بدست آمده برای مختصات مودال دوم بر حسب زمان درالگوریتم تصویر گرادیان..... ۷۹
شکل ۵-۹- منحنی نمایش بدست آمده برای مختصات مودال سوم بر حسب زمان درالگوریتم تصویر گرادیان..... ۷۹
شکل۵-۱۰- منحنی نمایش بدست آمده برای مختصات مودال چهارم بر حسب زمان درالگوریتم تصویر گرادیان ۸۰
شکل۵-۱۱- منحنی نمایش بدست آمده برای مختصات مودال پنجم بر حسب زمان درالگوریتم تصویر گرادیان ۸۰
شکل۴-۱۲- منحنی نمایش بدست آمده برای مختصات مودال ششم بر حسب زمان درالگوریتم تصویر گرادیان ۸۱
شکل۵-۱۳- منحنی نمایش ورودی اول بهینه با اعمال محدودیت بر حسب زمان با استفاده از تصویر گرادیان..... ۸۲

شکل۵-۱۴- منحنی نمایش ورودی دوم بهینه با اعمال محدودیت بر حسب زمان با استفاده از تصویر گرادیان..... ۸۳
شکل۵-۱۵- منحنی نمایش ورودی سوم بهینه با اعمال محدودیت بر حسب زمان با استفاده از تصویر گرادیان..... ۸۴

فهرست جداول

جدول ۲-۱- مشخصات ورق نازک آلومینیومیCCCF ۱۵
جدول ۲-۲- فرکانسهای طبیعی ورق نازک با شرایط مرزیCCCF بر حسب (Hz) ۱۵
جدول ۲-۳- مقایسه فرکانسهای بدست آمدهی تئوری و نرم افزار Ansys ۱۶
جدول ۲-۴- مشخصات المان پیزوالکتریک نصب شده برروی ورق ۲۵
جدول ۲-۵- مقایسه فرکانسهای طبیعی ورق همراه با دو پیزوالکتریک و بدون آن ۲۶
جدول ۴-۱- مشخصات چسب بین پیزوالکتریک و ورق ۵۷
جدول ۴-۲- مقایسه فرکانسهای طبیعی ورق در حالت بدون پیزوالکتریک و حالتِ همراه با شش پیزوالکتریک و چسب ۵۷

فهرست اعلام

انرژی پتانسیل ورق	U_{plate}
بردار تنش	$\{\sigma\}$
بردار جابجایی الکتریکی	$\{D\}$
بردار کرنش	$\{\varepsilon\}$
بردار میدان الکتریکی	$\{E\}$
پیچشی	M_{xy}
توابع ویژه‌ی	$\Phi_i(x,y)$
جابجایی	w,v,u
جابجایی عرضی تیر	$W(x,t)$
جرم واحد طول	m
چگالی	ρ
خیز سطح میانی	w
سختی خمشی	EI
سختی خمشی پیزوالکتریک	$D_{E,pie}$
سفتی خمشی ورق	D_E
ضخامت ورق	H
طول ورق	a
عرض ورق	b
فرکانسهای طبیعی	ω^{ij}
کرنش	γ_{xz} , γ_{yz}
ماتریس جرم ورق	M_p

ماتریس سختی ورق	K_p
ماتریس ضرایب الاستیک	$[C^E]$
ماتریس ضرایب پیزوالکتریک	$[d]$
ماتریس ضرایب دی الکتریک	$[\zeta]$
مساحت سطح هر یک از پیزوالکتریکها	$A_{pie} = (x_2 - x_1)(y_2 - y_1)$
ممانهای خمشی	M_{yy}
ممانهای خمشی	M_{xx}
نیروی گسترده	$f(x,t)$

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

ارتعاشات در اکثر موارد به عنوان یک عامل تخریب کننده در صنعت به شمار می‌رود. این اثر تخریبی از طرق مختلف اتفاق می‌افتد. به عنوان مثال در صنعت و در مسیر تولید یک محصول در صورت وجود ارتعاشات، به ناچار می‌بایست سرعت تولید را کاهش داد.

از طرفی سازه‌های پیوسته تعداد نامحدودی فرکانس طبیعی دارند و در صورتی که با نیروهای برانگیزش نوسانی مواجه شوند و فرکانسهای طبیعی این سازه‌ها برابر با فرکانسهای توابع برانگیزش یکسان شود، پدیده تشدید رخ خواهد داد. در این میان خرابی سازه‌هایی مانند پلها در اثر وزش باد، نمونه‌ای از این اثر تخریبی است. بنابراین کنترل و میرا کردن ارتعاشات سازه‌ها موضوع مورد تحقیق

بسیاری از محققین می‌باشد. در این رساله نیز سعی شده است که با استفاده از روشهای کنترل بهینه و بوسیله وصله‌های پیزوالکتریک به کنترل ارتعاشات یک ورق نازک پرداخته شود.

۱-۲- هدف، فرضیات و روش حل مساله

در این رساله به کنترل بهینه ارتعاشات یک ورق نازک پرداخته خواهد شد. و در واقع هدف از سیستم کنترلی اتخاذ شده، میرا کردن این ارتعاشات است. برای کنترل ارتعاشات صفحه از پیزوالکتریک به عنوان یک عملگر استفاده می‌شود، بنابراین روش کنترل از نوع فعال است.

مدل کردن رفتار ارتعاشی ورق بر تئوری خیز کوچک یا کیرشهف استوار خواهد بود و شرایط مرزی ورق نازک بصورت سه طرف گیردار و یک طرف آزاد است. به دلیل عدم وجود جواب تحلیلی برای ورق با این شرایط مرزی، از روش مودهای فرضی به حل معادله ارتعاشی ورق پرداخته می‌شود و فرکانسهای طبیعی و شکل مودهای آن استخراج می‌گردد. برای صحه گذاری نتایج در این مرحله از یک نرم افزار المان محدود مانند **Ansys** استفاده خواهد شد. سپس در وسط ورق یک جفت المان پیزوالکتریک نصب کرده و به بررسی تاثیر غیرفعال این وصله‌ها بر فرکانسهای ورق پرداخته خواهد شد. در این مرحله از ضخامت چسب بین پیزوالکتریک و ورق صرفنظر می‌شود و فرض بر اینست که کرنشها در فصل مشترک ورق و المانهای پیزوالکتریک پیوسته‌اند.

با در نظر گرفتن توزیع پتانسیل خطی در پیزو، میدان الکتریکی در آن بدست آمده و سپس تنش ناشی از خاصیت الکترومکانیکی در المان پیزو تعیین خواهد شد. بنابراین با استفاده از این مؤلفه‌های تنش و مؤلفه‌های تنش که در اثر خمش ورق در پیزو بوجود می‌آید ممانهای خمشی و پیچشی محاسبه خواهند شد. با استفاده از این ممانها و ممانهای ایجاد شده در ورق معادله دینامیکی ورق همراه با اثر فعال پیزو بدست خواهد آمد. با بررسی این معادله معلوم می‌شود که اثر فعال پیزوالکتریک در معادله ارتعاشی ورق بصورت یک تابع برانگیزش ظاهر خواهد شد. ضریب ولتاژ در این تابع برانگیزش را برای مودهای مختلف ارتعاشات ورق محاسبه کرده، که بصورت لاپلاس هر مود

خواهد بود. با یافتن نقاط بیشینه این ضرایب برای هر مود، مکانی از ورق که در آن این ضرایب بیشینه است، تعیین خواهد شد. بنابراین معیاری برای نصب پیزوالکتریک بدست می‌آید. اکنون برای کنترل سه مود از صفحه و با استفاده از معیار انتخاب مکان پیزوالکتریکها شش عدد المان پیزو (سه عدد در بالای ورق و سه عدد در پایین آن) در مکانهای بهینه‌ی مشخص شده، همراه با چسب، نصب کرده و دوباره به محاسبه فرکانسهای طبیعی ورق می‌پردازیم.

در بخش کنترل، الگوریتم های کنترلی مورد استفاده بر پایه منطق کنترل بهینه استوار است. در الگوریتم اول با استفاده از مساله رگولاتورهای مربعی، کنترل بهینه (ولتاژ بهینه) وارد به سیستم و متغیرهای مودال بهینه سیستم ارتعاشی تعیین می‌شود. در این الگوریتم برای ولتاژ اعمالی به پیزوالکتریک محدودیتی در نظر گرفته نمی‌شود. الگوریتم مورد استفاده بعدی، الگوریتم تصویر گرادیان است. در این الگوریتم تابع هدف و معادلات برداری حالت را بصورت گسسته در آورده سپس با ترفندی تابع هدف نسبت به مقادیر حالت غیر وابسته خواهد شد. سپس با محاسبه گرادیان تابع هدف نسبت به متغیرهای گسسته شده ورودی کنترلی، به یافتن مقادیری از ورودیهای کنترلی پرداخته می‌شود که تابع هدف را مینیمم نماید. در پایان نیز نتایج هر دو روش با یکدیگر مقایسه خواهد شد.

۱-۳- ترتیب و رئوس مطالب

این رساله در شش فصل تنظیم گردیده است. در فصل دوم به بررسی روابط دینامیکی حاکم بر ورق نازک پرداخته می‌شود و برای یک ورق با شرایط مرزی سه طرف گیردار و یک طرف آزاد فرکانسهای طبیعی و شکل مودها محاسبه می‌گردند. تاثیر غیرفعال وصله‌های پیزوالکتریک که بر سختی و اینرسی ورق اعمال می‌گردد نیز از طریق محاسبه فرکانسهای طبیعی ورق همراه با یک جفت المان پیزو در وسط ورق، بررسی می‌گردد. در فصل سوم بررسی مواد پیزوالکتریک و روابط ساختاری و اساسی حاکم بر آن بیان می‌گردد. در فصل چهارم به بررسی رفتار ورق همراه با اثر فعال پیزوالکتریک