بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه صنعتی امیر کبیر

عیب یابی در ماشین آلات دوار با استفاده از روش تحلیل دو بعدی سیگنال دینامیکی

ارائه شده برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

توسط:

فرزاد امین روان

استاد راهنما:

دکتر فیروز بختیاری نژاد

استاد مشاور:

دکتر حمیدرضا امین داور

دانشکده مهندسی مکانیک

۱۳۸٦

شماره :
تاریخ :

فرم اطلاعات پایان‌نامه
کارشناسی ارشد

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

مشخصات دانشجو

نام و نام خانوادگی : فرزاد امین روان **دانشجونوبت دوم**

شماره دانشجویی : ٨٤١٢٦٠٦٦ دانشکده : مهندسی مکانیک **رشته تحصیلی : طراحی کاربردی**

نام و نام خانوادگی استاد راهنما / استادان راهنما: دکتر فیروز بختیاری نژاد

عنوان به فارسی : عیب یابی در ماشین آلات دوار با استفاده از روش تحلیل دو بعدی سیگنال دینامیکی

عنوان به انگلیسی : Fault Detection in Rotating Machinery Using a Two-Dimensional Dynamic Signal Analysis

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

تاریخ شروع : ٨٥/٧/١ **تاریخ خاتمه : ٨٦/١٢/١٤** **تعداد واحد :** ٦

سازمان تأمین کننده اعتبار : معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی امیرکبیر

واژه های کلیدی به فارسی : تحلیل مرتبه، تحلیل زمان-فرکانس، ماشین دوار

واژه های کلیدی به انگلیسی : Order Analysis, Joint Time-Frequency Analysis, Rotating Machinery

---

نظرها و پیشنهادها به منظور بهبود فعالیت‌های پژوهشی دانشگاه :

استاد راهنما / استادان راهنما : دکتر فیروز بختیاری نژاد

دانشجو : فرزاد امین روان امضا استاد راهنما : **تاریخ :**

نسخه ١) معاونت پژوهشی

نسخه ٢) کتابخانه و به انضمام دو جلد پایان نامه به منظور تصفیه حساب با کتابخانه و مرکز اسناد و مدارک علمی

قدردانی

بدینوسیله از زحمات اساتید ارجمندم، جناب آقایان دکتر فیروز بختیاری نژاد و دکتر حمیدرضا امین داور که همواره از راهنمایی هایشان برخوردار بوده ام قدردانی می نمایم.

همچنین از آقای دکتر صادقی، دکتر جعفری زاده، آقای مهندس قره خانی و آقای مهندس حسن نژاد در بخش تحقیق و توسعه شرکت چرخشگر به خاطر در اختیار قرار دادن داده های آزمایشگاهی، تشکر می نمایم.

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

که در تمام مراحل زندگی همواره یار و یاورم بوده اند...

اعلان منحصر به فرد بودن پایان نامه

بدینوسیله اعلان می گردد که مطالب مندرج در این پایان نامه تا کنـون بـرای دریافـت هـیچ نـوع مدرکی توسط اینجانب و فرد دیگری ارئه نشده است.

فرزاد امین روان

امضاء

چکیده

در این تحقیق، عیب یابی سیستم های جعبه دنده در شرایط راه اندازی و سرعت دوران غیر پایا مورد مطالعه و بررسی قرار می گیرد. تنها روش های تحلیل ارتعاشی ویژه ای در چنین شرایطی می توانند برای یافتن مولفه های عیوب استفاده گردند. از آنجائیکه در این حالت سیگنال ارتعاش جعبه دنده رفتاری شدیدا غیرخطی و دینامیک دارد، روش های معمول طیفی برای تحلیل مناسب نمی باشند. تحلیل موجک نیز تنها برای بررسی سیگنال هایی مفید است که دارای پایه سینوسی میرا شونده هستند حال آنکه سیگنال ارتعاش جعبه دنده در سرعت متغیر دارای شرایط ناپایایی شدید در حوزه فرکانس است. با توجه به روش های محدودی که برای عیب یابی در چنین شرایطی وجود دارد، در این تحقیق روش تحلیل دو بعدی سیگنال دینامیک معرفی می گردد. در این روش از دو حوزه تحلیل مرتبه گابور و تخمین وفقی چیرپلت گوسی برای استخراج ویژگی های موثر و تمایز دهنده عیوب موضعی اولیه و عیوب سطحی دنده استفاده می نماییم. در این راستا روش تحلیل مرتبه گابور با استفاده از اسپکتروگرام گابور اصلاح می گردد و در روش نهایی تحلیل دوبعدی سیگنال دینامیک مورد استفاده قرار می گیرد. نتایج بدست آمده از اعمال روش پیشنهادی در حوزه تحلیل دو بعدی سیگنال دینامیک بر روی داده های عملی برای تشخیص و طبقه بندی عیوب با استفاده از روش های تحلیل جداساز و روش هوشمند استنتاج بر مبنای منطق فازی، موید عملکرد مناسب روش پیشنهادی است.

فهرست مطالب

قدردانی أ

صفحه تقدیم ب

اعلان منحصر به فرد بودن پایان نامه ج

چکیده د

فهرست مطالب ه

فهرست اشکال ط

فهرست جداول ل

فهرست علائم م

فهرست اختصارات ف

۱ مقدمه و اهداف تحقیق ۱

۱-۱ اهمیت پایش وضعیت در جعبه دنده ٤

۱-۲ اهداف تحقیق ٥

۱-۳ یکتایی و ابعاد جدید پژوهش ۷

۱-٤ بحث و جمع بندی **Error! Bookmark not defined.**۹

۱-٥ مرور پایان نامه ۹

۲ مروری بر عیب یابی در حوزه زمان-فرکانس و تحلیل مرتبه ۱۲

۲-۱ منابع نویز در چرخدنده ١٤

۲-۲ روش های عیب یابی بر اساس سیگنال ارتعاشی ١٤

۲-۲-۱ توزیع های زمان- فرکانس مرسوم در عیب یابی ۱۷

۲-۲-۱-۱ روش های خطی ۱۷

۲-۲-۱-۲ روش های مرتبه دوم ۲۰

۲-۲-۱-۳ توزیع های دیگر ۲۲

۲-۲-۲ روش تحلیل مرتبه ۲٥

۲-۲-۲-۱ روش های تحلیل مرتبه دوران غیر بازسازی کننده ۲۷
۲-۲-۲-۲ تحلیل مرتبه بر پایه فیلتر کالمن ۳۰
۲-۳ استخراج ویژگی و طبقه بندی ۳۱
۲-۳-۱ روش کاهش ابعاد داده ها بر مبنای PCA و تحلیل DA ۳۳
۲-٤ بحث و جمع بندی ۳۵
۳ رویکرد تحلیل دو بعدی سیگنال دینامیک **۳۷**
۳-۱ سیستم نمونه گیری ۳۸
۳-۲ پردازش سیگنال ارتعاشی ٤۱
۳-۳ معرفی تحلیل مرتبه دوران در روش 2D-DSA ٤۵
۳-۳-۱ تحلیل مرتبه بر اساس بسط گابور ٤۵
۳-۳-۲ فیلترسازی متغیر با زمان در صفحه گابور برای تخمین مرتبه دوران ۵۰
۳-۳-۳ روش سریهای توزیع زمان-فرکانس (TFDS، اسپکتروگرام گابور) ۵٦
۳-۳-۳-۱ الگوریتم سریع پیاده سازی TFDS ٦۱
۳-۳-٤ انتخاب ماسک از اسپکتروگرام گابور برای بهبود تحلیل مرتبه ٦۲
۳-۳-۵ حذف مولفه های فرکانس طبیعی سازه ای ٦۹
۳-٤ مشکلات استفاده از روش دنبالگر مرتبه گابور برای جداسازی عیوب ۷۳
۳-۵ بازنمایی تنک ارتعاش جعبه دنده با تخمین وفقی چیرپلت گوسی (AGC) ۷٤
۳-۵-۱ تخمین ML برای یک چیرپلت ۷۷
۳-۵-۱-۱ حد پایین کرامر- رائو ۷۸
۳-۵-۲ روش تقریبی MLE برای یک چیرپلت ۸۰
۳-۵-۲-۱ تخمین کلی نرخ چیرپ و طول چیرپ ۸۱
۳-۵-۲-۲ تخمین موقعیت در زمان و فرکانس ۸۲
۳-۵-۲-۳ تخمین موضعی نرخ چیرپ و طول زمانی چیرپ ۸۳
۳-۵-۲-٤ روش بیشینه سازی شبه نیوتون ۸۳
۳-۵-۳ تخمین چیرپلت های چندگانه ۸٤
۳-٦ مشکلات استفاده از روش تبدیل چیرپلت برای عیب یابی جعبه دنده ۸٦
۳-۷ استفاده از روش تحلیل دو بعدی سیگنال دینامیک و بهبودهای حاصله ۸۷
۳-۷-۱ مراحل اصلی برای اعمال روش 2D-DSA برای عیب یابی ماشین آلات دوار.۸۸
۳-۷-۱-۱ انتخاب طول کافی از سیگنال ارتعاشی در هر پنجره ۸۸

۳-۷-۱-۲ الگوریتم تخمین چیرپلت-حذف مرتبه دوران ۸۸
۳-۸ روش کاهش ابعاد داده بر مبنای PCA ۹۳
۳-۹ روش های تحلیل جداساز (DA) برای تشخیص و طبقه بندی عیوب ۹۵
۳-۹-۱ روش تحلیل جداساز خطی (LDA) ۹۵
۳-۹-۲ روش مرتبه دوم (QDA) ۹۶
۳-۹-۳ روش فیشر (FDA) ۹۷
۳-۹-٤ روش استنتاج حضور عیوب بر مبنای منطق فازی (FLI) ۹۸
۳-۱۰ بحث و جمع بندی ۱۰۱
٤ نتایج تحقیق ۱۰۳
٤-۱ تحلیل مرتبه دوران گابور ۱۰۳
٤-۱-۱ استخراج ویژگی بروش تحلیل مرتبه دوران گابور ۱۰٤
٤-۱-۲ نتایج روش MGOA بهمراه تحلیل جداساز ۱۰۵
٤-۱-۳ روش MGOA بهمراه استنتاج فازی ۱۰٦
٤-۲ نتایج روش تخمین چیرپلت گوسی ۱۰۸
٤-۲-۱ ملاحظات تشکیل بانک داده ۱۰۸
٤-۲-۲ بررسی ویژگی های استخراجی از روش تخمین چیرپلت ۱۱۱
٤-۲-۲-۱ عیب سایش ۱۱۱
٤-۲-۲-۲ عیوب ضربه ای (ترک، لب پریدگی دنده، شکستگی کامل دنده) ۱۱٤
٤-۲-۲-۳ تشخیص دنده با شکستگی کامل و ترک دندانه ۱۱۵
٤-۲-۲-٤ تشخیص لب پریدگی دنده ۱۱۷
٤-۳ روش تخمین چیرپلت- حذف مرتبه (2D-DSA) ۱۲۰
٤-۳-۱ تشخیص عیب در روش 2D-DSA ۱۲۱
٤-۳-۲ طبقه بندی عیب در روش 2D-DSA ۱۲۳
٤-۳-۲-۱ طبقه بندی عیوب به روش DA ۱۲۳
٤-۳-۲-۲ طبقه بندی عیوب بر مبنای استنتاج فازی (FLI) ۱۲۵
٤-٤ روش توالی واریانس های تبدیل موجک ۱۲۹
٤-٤-۱ توالی واریانس های تبدیل موجک پیوسته بهمراه DA ۱۳۰
٤-٤-۲ واریانس های تبدیل موجک پیوسته بهمراه FLI ۱۳۱
٤-۵ بحث و جمع بندی ۱۳۱

۵ نتیجه گیری **۱۳۲**
۵-۱ دستاوردهای تحقیق ۱۳۲
۵-۲ پیشنهادات و ایده های ادامه تحقیق ۱۳۵
۵-۳ بحث و جمع بندی ۱۳۶
٦ مراجع **۱۳۸**

فهرست اشکال

شکل ۲-۱: مقایسه بین STFT و WT الف) STFT با طول پنجره کوچک، ب)STFT با طول پنجره بزرگ، ج) نمایش WT ۱۸

شکل ۲-۲: الف) سیگنال شبیه سازی ارتعاشات درگیری چرخدنده، ب) نمایش تبدیل STFT سیگنال شبیه سازی با استفاده از پنجره همینگ، ج)نمایش اسکیلوگرام موجک مورلت پیوسته سیگنال شبیه سازی ۲۳

شکل ۲-۳: الف) تبدیل ویگنر ویل مجازی(PWD) سیگنال، ب)تبدیل ویگنر ویل مجازی هموار شده(SPWD) ۲٤

شکل ۲-٤: الف) نمایش تبدیل RID برای سیگنال شبیه سازی (پنجره بسل)، ب)نمایش تبدیل ZAM برای سیگنال شبیه سازی ۲۵

شکل ۲-۵: الف) سیگنال ارتعاشی با فرکانس ثابت و نمونه برداری شده با Δt ثابت $\leftarrow \Delta\theta$ ثابت

ب) سیگنال ارتعاشی با فرکانس متغیر (چیرپ) و نمونه برداری شده با Δt ثابت $\leftarrow \Delta\theta$ غیر ثابت [۲٦] ۲۸

شکل ۲-٦: تابع سینوسی با فرکانس متغیر نمونه برداری شده در حوزه زاویه

(Δt متغیر $\leftarrow \Delta\theta$ ثابت!) [۲٦] ۲۹

شکل ۲-۷: الف)اولین محور اصلی در حالت تصویر با جدا پذیری بالا ب) اولین محور اصلی با جدا پذیری نامناسب،[۳۰]. ۳٤

شکل ۳-۱: شکل شماتیک درگیری دنده ٤ در موتور یاماها[۳۷] ٤۰

شکل ۳-۲ : نمایش سیستم تست گیری جعبه دنده موتور یاماها [۳۷] ٤۰

شکل ۳-۳: سیگنال های ارتعاشی خام در موتور یاماها با سرعت دوران ثابت ۲٤هرتز؛ برای حالات الف) سالم، ب) عیب ترک دندانه و ج) عیب شکستگی دندانه ٤۲

شکل ۳-٤: سیگنال های ارتعاشی خام در موتور یاماها با سرعت دوران متغیر برای حالات الف) سالم، ب) عیب ترک دندانه و ج) عیب شکستگی دندانه ٤۳

شکل ۳-۵: ارتعاش جعبه دنده در سرعت ثابت الف) نمایش ضرایب گابور، ب) نمایش تبدیل فوریه ٤٦

شکل ۳-٦: ارتعاش جعبه دنده در سرعت متغیر الف) نمایش ضرایب گابور ب) نمایش تبدیل فوریه ٤۷

شکل ۳-۷: نمایش روند مرسوم برای تعریف ماسک برای فیلترهای خطی زمان-فرکانس با توجه به ناحیه ساپورت هر تک مولفه [۳۸] ۵۱

شکل۳-۸ : الف) ضرایب گابور بازیابی شده با اعمال روش تکراری فیلتر سازی متغیر با زمان ب) ضرایب گابور اولین مرحله تکرار (جواب LSE) ۵٤

شکل ۳-۹: خطای بازسازی بر حسب نرخ نمونه برداری اضافی ۵۵

شکل ۳-۱۰: الف) مرتبه ۸ اصلی ب) بازسازی مرتبه ۸ در سیگنال شبیه سازی با SNR برابر۵ از ماسک گابور ۵٦

شکل ۳-۱۱: الف) نمایش گابور سیگنال شبیه سازی، ب) نمایش تبدیل TFDS با دقت جداسازی بالاتر مرتبه و پس زنی نویز بدون وجود ترم های متداخل ٦٦

شکل ۳-۱۲: بازسازی مرتبه ۸ در سیگنال شبیه سازی با SNR برابر ۵ از ماسک تبدیل TFDS ٦٦

شکل ۳-۱۳: نمایش میانگین SNR بهبود بازسازی مرتبه با استفاده از ماسک TFDS در SNR های پایین ٦۷

شکل ۳-۱٤: تاثیر افزایش پهنای باند ماسک در بازسازی مرتبه در SNR برابر ۵(مقدار بیشینه در پهنای باند ۰,۳۳Hz) ٦۷

شکل ۳-۱۵: نمایش ضرایب میانیابی شده در ناحیه ماسک تعریف شده توسط اسپکتروگرام گابور در حوالی ثانیه ۰,۷ در سیگنال برای مرتبه ۱۲,٤ ..... ۷۱

شکل۳-۱٦: مقایسه بازسازی پوش مرتبه دوران ۱۲,٤ بدون انجام میانیابی در ناحیه تلاقی مرتبه با رزونانس (GOA)، با حالت میانیابی دامنه و فاز در ضرایب گابور (MGOA) برای بازسازی مرتبه دوران ۷۱

شکل ۳-۱۷: نمایش مرتبه ۷۷ در گیری دنده ۱ پراید(سالم و معیوب) پیش از حذف ناحیه رزونانس الف) مرتبه زمانی ب) نمایش طیفی ج) PDF در ناحیه رزونانس ۷۲

شکل۳-۱۸: نمایش مرتبه ۷۷ در گیری دنده ۱ پراید(سالم و معیوب) پس از میانیابی دامنه و فاز در ناحیه رزونانس الف) مرتبه زمانی ب) نمایش طیفی ج) PDF در ناحیه رزونانس ۷۳
شکل ۳-۱۹: الف) مقایسه توزیع سیگنال ارتعاش دنده و توزیع نرمال، ب) نمایش پارامتر Skewness یک مرتبه دوران در سیگنال ارتعاش دنده..... ۷٦
شکل ۳-۲۰: نمایش ویگنر شش چیرپلت. ردیف اول همگی نرخ چیرپ صفر دارند و تنها طول زمانی متفاوت دارند. ردیف دوم همگی نرخ چیرپ مشابه ۱/٦٤ و طول زمانی متفاوت دارند..... ۷۹
شکل ۳-۲۱: اعمال مستقیم تخمین چیرپلت در حالت درگیری سالم دنده یک برای جعبه دنده پراید..... ۸٦
شکل ۳-۲۲: نمایش روند تخمین چیرپلت–حذف مرتبه به عنوان هسته روش 2D-DSA..... ۹۰
شکل ۳-۲۳: الف) حذف مرتبه ۷۷ پس از مرتبه های محور، ب) برروی سیگنال باقیمانده و ج) اعمال تخمین چیرپلت و انتخاب تعداد ۱۰ چیرپ در هر پنجره از مرتبه ۳۳ مربوط به فرکانس درگیری دنده معیوب..... ۹۱
شکل ۳-۲٤: الف) حذف کل هارمونیک های مرتبه ۱۱ پس از مرتبه های محور، ب) سیگنال باقیمانده و ج) اعمال یک مرحله از روش تخمین مرتبه بر روی سیگنال باقیمانده و انتخاب تعداد ۱۰ چیرپ در مرتبه ۱۹,۸٤..... ۹۲
شکل ۳-۲۵: الگوریتم استنتاج فازی برای عیب یابی ماشین ۹۹
شکل ۳-۲٦: توابع عضویت S و پی و مثلثی . تابع عضویت پی از ترکیب دو تابع عضویت S ایجاد می گردد..... ۹۹
شکل ۳-۲۷: توابع عضویت با مشخص کردن محدوده قلمرو تابع عضویت براساس آزمایش : الف) تابع عضویت مثلثی و ب) تابع عضویت پی [١٤]..... ۱۰۰
شکل ٤-۱: مقایسه RMS پوش مرتبه دوران برای مرتبه های مهم سیستم بین حالت سالم و لب پریدگی دندانه در مقیاس لگاریتمی (خط ممتد حالت سالم، خط شکسته حالت لب پریدگی دندانه)..... ۱۰٤
شکل ٤-۲: مقایسه RMS پوش مرتبه دوران برای مرتبه های مهم سیستم بین حالت سالم و شکستگی دندانه در مقیاس لگاریتمی (خط ممتد حالت سالم، خط شکسته حالت شکستگی دندانه)..... ۱۰۵
شکل ٤-۳: فرم زمانی مرتبه ۳٦ در سیگنال بازسازی شده با ۵ چیرپ و مقایسه با مرتبه ۳٦ در سیگنال واقعی ارتعاش..... ۱۰۹
شکل ٤-٤: نمایش اسپکتروگرام سیگنال ارتعاش جعبه دنده پراید در حالت درگیری دنده عقب الف) سیگنال اصلی ب) سیگنال بازسازی شده با ۵ چیرپلت در هر پنجره..... ۱۰۹
شکل ٤-۵: مقایسه برش جانبی اسپکتروگرام برای سیگنال اصلی و سیگنال باز سازی شده با ٦ چیرپلت در الف) مرتبه دوران ۳٦، ب) مرتبه دوران ٤۸ و ج) مرتبه دوران ۷۲..... ۱۱۰
شکل ٤-٦: نمایش ویژگی دامنه اولین چیرپ تخمین زده شده در هر پنجره تحلیل در داده سالم و حالت عیوب سایش ۱۱۲
شکل ٤-۷: نمایش ویژگی فاکتور طول زمانی چیرپ در مرتبه ۱۱٦(مرتبه پایدار) از جعبه دنده یاماها..... ۱۱۳
شکل ٤-۸: نمایش ویژگی فاکتور فاز چیرپ در مرتبه ۱۱٦(مرتبه پایدار) از جعبه دنده یاماها..... ۱۱۳
شکل ٤-۹ : فرم زمانی مرتبه ۷۲ در در گیری دنده عقب در جعبه دنده سالم پراید..... ۱۱۵
شکل ٤-۱۰: فرم زمانی مرتبه ۷۲ در در گیری دنده عقب در گیر بکس پراید با عیب شکستگی کامل دندانه ۱۱٦
شکل٤-۱۱: نمایش ویژگی فاکتور دامنه چیرپ در اولین و دومین چیرپ تخمین زده شده در هر پنجره در جعبه دنده یاماها ۱۱٦
شکل ٤-۱۲: نمایش ویژگی فاکتور فاز طیفی در اولین و دومین چیرپ تخمین زده شده در هر پنجره در جعبه دنده یاماها. ۱۱٦
شکل ٤-۱۳: فرم زمانی مرتبه ۷۷ در در گیری دنده ۱ در جعبه دنده پراید با لب پریدگی دنده..... ۱۱۸
شکل ٤-۱٤: نمایش ویژگی دامنه چیرپ در اولین و دومین چیرپ های تخمین زده شده در هر پنجره در جعبه دنده پراید. ۱۱۸
شکل ٤-۱۵: نمایش ویژگی فاز چیرپ در اولین و دومین چیرپ های تخمین زده شده در هر پنجره درجعبه دنده پراید..... ۱۱۹
شکل ٤-۱٦: نمایش ویژگی طول زمانی چیرپ در مرتبه ۷۷ از حالت درگیری دنده ۱ جعبه دنده پراید..... ۱۱۹
شکل٤-۱۷: نمودار پراکندگی بدست آمده از مجموع ویژگی های استخراج شده توسط تخمین چیرپلت برای طبقه بندی... ۱۲۰
شکل ٤-۱۸: نمودار جمع شونده مقادیر ویژه مولفه های اصلی..... ۱۲۰
شکل ٤-۱۹: نمودار پراکندگی بدست آمده از مجموع ویژگی های استخراج شده توسط روش 2D-DSA..... ۱۲۱
شکل ٤-۲۰: میانگین خطای کل احتمال استنتاج برای تابع عضویت پی در مقابل n..... ۱۲٦

شکل ٤-٢١: میانگین خطای کل احتمال استنتاج برای تابع عضویت مثلثی در مقابل n.....١٢٧
شکل ٤-٢٢: نمایش تغییرات واریانس های تبدیل موجک مورلت پیوسته بر روی مقیاس های مختلف در پنجره های حضور عیوب موضعی.....١٢٩
شکل ٤-٢٣: نمایش تغییرات واریانس های تبدیل موجک مورلت پیوسته بر روی مقیاس های مختلف در حالت حضور حالت عیوب سایش ١٣٠
شکل ٥-١: شکل بالا سمت چپ نمایش ویگنر ویل بدون نویز ؛ شکل بالا سمت راست توزیع ویگنر با نویز
شکل پایین سمت چپ تصویر اسپکتروگرام با پنجره همینگ ؛ شکل پایین سمت راست نمایش ویگنر ١٣٤

فهرست جداول

جدول ۲-۱: منابع نویز در جعبه دنده [۱۶] ۱۵
جدول ۳-۱: مشخصات درگیری دنده ها در جعبه دنده پراید در حالات درگیری دنده عقب و دنده یک [۳۶] ۳۹
جدول ۳-۲: فرکانس درگیری دنده ها در جعبه دنده پراید در دنده عقب و دنده یک [۳۶] ۳۹
جدول ۳-۳: نمایش مشخصات درگیری زوج دنده ساده در حالت درگیری دنده چهار جعبه دنده موتور یاماها [۳۷] ۴۱
جدول ۳-۴: مقایسه زمان لازم برای استخراج مرتبه دوران در دو روش ۶۸
جدول ۳-۵: پیچیدگی محاسباتی تخمین یک چیرپلت ۸۴
جدول ۴-۱: قوانین استنتاج فازی بر اساس متغیرهای زبانی عیب یابی ۱۰۷
جدول ۴-۲: تشخیص عیب با تحلیل LDA ۱۲۲
جدول ۴-۳: تشخیص عیب با تحلیل QDA ۱۲۲
جدول ۴-۴: تشخیص عیب با تحلیل FDA ۱۲۳
جدول ۴-۵: نتایج طبقه بندی عیوب با تحلیل LDA ۱۲۴
جدول ۴-۶: نتایج طبقه بندی عیوب با تحلیل QDA ۱۲۵
جدول ۴-۷: نتایج طبقه بندی عیوب با تحلیل FDA ۱۲۶
جدول ۴-۸: نتایج میانگین طبقه بندی عیوب با استنتاج فازی (تابع پی، n=۱۱) ۱۲۷
جدول ۴-۹: نتایج میانگین طبقه بندی عیوب با استنتاج فازی (تابع مثلثی، n=۲۳) ۱۲۸
جدول ۵-۱: خلاصه خطای نهایی طبقه بندی عیوب با ترکیب روش های مختلف ۱۳۵

فهرست علائم

علائم یونانی

ضرایب سیگنال قیمانده	β_i
ترم غیر همگن معادله ساختاری	ε
تابع دلتای دیراک	δ
هسته تبدیل زمان–فرکانس	ϕ
فاز مرتبه kام	φ_k
فاز چیرپلت iام	φ_i
ماتریس وزن دهی قطری	Φ
ماتریس ضرایب وزنی در اسپکتروگرام گابور	Γ
اغتشاش مزاحم در معادله اندازه گیری	η
مقادیر ویژه	λ_i
ماتریس قطری مقادیر ویژه	Λ
میانگین بردار ویژگی	μ
بردار پارامتر های چیرپلت	θ
تابع هموارساز دو بعدی	Θ
فواصل زاویه ای نمونه های گسسته	$\Delta\theta$
انحراف معیار توزیع نرمال	σ
واریانس نویز گوسی	σ^2
ماتریس پراکندگی بین کلاس	Σ_ω
ماتریس پراکندگی داخل کلاس	Σ_b
ماتریس کواریانس کلاس iام	Σ_i
فاکتور تاخیر زمانی	τ

فرکانس	ω
تابع ماسک دوبعدی	$\omega_{m,n}$
دقت فرکانسی	$\Delta\omega$
فاکتور انتقال فرکانسی	ξ
تابع موجک مادر	ψ

علائم انگلیسی

فاکتور مقیاس موجک	a
تابع مجازی متناوب	$\tilde{a}$
دامنه چیرپلت i ام	a_i
ضرایب فوریه کسینوسی	a_m, a_n
دامنه مرتبه k ام	A
ضرایب تبدیل فوریه دو بعدی	$A_{mn,nd}$
تابع ابهام	A_x
ضرایب فوریه سینوسی	b_m, b_n
نرخ چیرپلت	c
ضرایب گابور	$c_{m,n}$
ضرایب دلخواه گابور	$\hat{c}_{m,n}$
کواریانس زمان-فرکانس	$\mathrm{cov}_{t\omega}$
طول زمانی چیرپلت	d
سیگنال باقیمانده	e
کلاس i ام	F_i
فرم ماتریسی فیلتر تحلیل	G
فیلتر گوسی دو بعدی	$G(x,y)$

عملگر جهت دار	G_n
توابع دوگان تحلیل و بازسازی	h, γ
تک مولفه گوسی	$h_{m,n}$
فرم ماتریسی فیلتر تحلیل	H
تصویر نمایش ضرایب اسپکتروگرام گابور	I
ماتریس اطلاعات فیشر	$I_{i,j}$
قسمت موهومی	$\Im$
تابع احتمال لگاریتمی	ℓ
طول دوره دنباله متناوب	L
طول سیگنال ارتعاشی	L_s
طول پنجره	L_w
فواصل نمونه برداری	Δm
اندیس نمونه زمانی	n
کل تقسیمات فرکانسی	N
مرتبه مورد تحلیل	o_n, o_m
فاصله بین دو مرتبه	Δo
حداکثر مرتبه قابل تحلیل	$O_{\max}$
مرتبه نایکوئیست	$O_{nyquist}$
نرخ نمونه برداری زاویه ای	O_{sample}
انرژی جذر میانگین مربعات دامنه مرتبه دوران	$OE_{r.m.s}$
دوره تناوب اصلی	p
مولفه های اصلی	PC_i
تابع خود ارتباطی y	r_y

فاصله Mahalanobis	r_{MD}
سرعت دورانی لحظه ای محور مرجع	$r.p.m.$
تعداد کل دوران ها	R
ضرایب تبدیل فوریه با تاخیر زمانی	R_s
قسمت حقیقی	$\Re$
سیگنال مورد تحلیل	s
مرتبه بازسازی شده	$\hat{s}$
اتم یک چیرپلت	$s_{t,\omega,c,d}$
ضرایب نمایش اسپکتروگرام	S
زمان	t
دقت زمانی	Δt
ضرایب مولفه اصلی i ام	w_i
نویز سفید گوسی مختلط	W
اتم انرژی گوسی	$WVD_{h,h'}$
نمونه فرآیند	x
تبدیل فوریه سیگنال چیرپ	X_c
بردار ویژگی	Z

اندیس

برای نمایش ضرایب تبدیل زمان–فرکانس	s
برای نمایش ضرایب زمان–فرکانس چیرپلت	x

فهرست اختصارات

2D-DSA	روش تحلیل دو بعدی سیگنال دینامیک
AGC	تخمین وفقی چیرپلت گوسی
BOP	پایه متعامد بهینه
CRLB	حد پایین کرامر–رائو
CWGN	نویز سفید گوسی مختلط
CWT	تبدیل موجک پیوسته
CWTV	توالی واریانس های تبدیل موجک
DA	روش تحلیل جداساز
DTFDS	سری های توزیع گسسته زمان–فرکانس
DWT	تبدیل موجک گسسته
FLI	استنتاج بر مبنای منطق فازی
GS	اسپکتروگرام گابور
HCF	ضریب اطمینان هارمونیک
LSE	تخمینگر حداقل مربعات
MGOA	تحلیل مرتبه دوران گابور اصلاح شده
MLE	تخمین بیشترین درستنمایی
MP	روش جستجوی تطابق
PC	مولفه اصلی
PCA	روش تحلیل مولفه های اصلی