

مدلسازی و تحلیل سیستم‌های الکترومغناطیسی فرکانس پایین
به روش اجزای محدود

ترجمه و تالیف

دکتر حامد گرگین‌پور



سازمان اسناد و کتابخانه ملی
جمهوری اسلامی ایران

سرشناسه	گرگین پور، حامد، ۱۳۴۳ -
عنوان و نام پدیدآور	مدلسازی و تحلیل سیستم‌های الکترومغناطیسی فرکانس پایین به روش اجزای محدود/ ترجمه و تألیف حامد گرگین پور.
مشخصات نشر	شیراز: مرجع علم، ۱۳۹۷.
مشخصات ظاهری	۱۲، ۴۵۷ ص: مصور (بخشی رنگی)، جدول، نمودار: ۲۹×۲۲ سم.
شابک	978-600-8265-45-0
وضعیت فهرست نویسی	فینا
موضوع	الکترومغناطیس -- الگوهای ریاضی
موضوع	Electromagnetism -- Mathematical models
موضوع	روش المان‌های محدود
موضوع	Finite element method
رده بندی کنگر	QC۷۶۰/گ۴م۴ ۱۳۹۷
رده بندی دیویی	۶۲۱/۲
شماره کتابشناسی ملی	۵۲۲۱۱

عنوان : مدلسازی و تحلیل سیستم های الکترومغناطیسی فرکانس پایین با روش اجزای محدود

ترجمه و تألیف : حامد گرگین پور

ناشر : انتشارات مرجع علم

چاپ و صحافی : دیجیتال مهر

نوبت چاپ : چاپ اول ۱۳۹۷

شمارگان : ۵۰۰ نسخه

قیمت : ۳۵۰۰۰ تومان

شابک : ۹۷۸-۶۰۰-۸۲۶۵-۴۵-۰

www.marjaeelm.ir

marjaeelm@gmail.com

۰۹۱۷۳۳۲۳۱۸۴

فصل اول: مقدمات و مفاهیم ریاضی

۱-۱- مقدمه

۱-۲-۱- علانم برداری

۱-۳-۱- مشتق برداری

۱-۳-۱- عملگر ∇

۱-۳-۲- تعریف، گرادیان، دیورژانس و چرخش

۱-۴-۱- گرادیان

۱-۴-۱- مثالی از گرادیان

۱-۵-۱- دیورژانس

۱-۵-۱- تعریف شار

۱-۵-۲- تئوری دیورژانس

۱-۵-۳- شار پایستار

۱-۵-۴- مثالی از دیورژانس

۱-۶-۱- چرخش

۱-۶-۱- دوران یک بردار

۱-۶-۲- قضیه استوکس

۱-۶-۳- مثالی از دوران

۱-۷-۱- عملگرهای مرتبه دوم

۱-۸-۱- کاربرد عملگرها بر بیش از یک تابع

۱-۹-۱- بیان روابط در مختصات استوانه ای و کروی

۱۷	۲-۱-مقدمه
۱۷	
۱۸	۲-۲-کمیت های الکترومغناطیسی
۱۹	۲-۲-۱-شدت میدان الکتریکی E
۱۹	۲-۲-۲-شدت میدان مغناطیسی H
۲۰	۲-۲-۳-چگالی شار مغناطیسی B و قابلیت نفوذ مغناطیسی μ
۲۱	۲-۲-۴-چگالی بار الکتریکی D و نفوذ پذیری الکتریکی ϵ
۲۱	۲-۲-۵-چگالی جریان سطحی J
۲۲	۲-۲-۶-چگالی بار حجمی
۲۲	۲-۲-۷-رسانایی الکتریکی
۲۳	۲-۳-شکل نقطه ای معادلات ماکسول
۲۶	۲-۴-ناهمسانی
۲۸	۲-۵-تقریب معادلات ماکسول
۳۱	۲-۶-صورت انتگرالی معادلات ماکسول
۳۳	۲-۷-میدان های الکترواستاتیک
۳۴	۲-۷-۱-بار الکتریکی
۳۷	۲-۷-۲-میدان های ناپایستار: نیرو محرکه الکتریکی
۴۰	۲-۷-۳-شکست میدان الکتریکی
۴۳	۲-۷-۴-استقامت دی الکتریک
۴۵	۲-۷-۵-معادلات لاپلاس و پواسن میدان الکتریکی برای محیط دی الکتریک
۴۷	۲-۷-۶-معادله لاپلاس میدان الکتریکی برای محیط هادی
۴۷	۲-۸-میدان های مغناطیسی

۴۸	۲-۸-۱- معادلات ماکسول در حالت مغناطیسی ایستا
۵۱	۲-۸-۲- قانون بیو-ساووار
۵۳	۲-۸-۳- شکست میدان مغناطیسی
۵۵	۲-۸-۴- انرژی در میدان مغناطیسی
۵۷	۲-۸-۵- مواد مغناطیسی
۷۴	۲-۸-۶- اندوکتانس و اندوکتانس متقابل
۷۶	۲-۹- میدان‌های مغناطیسی دینامیکی
۷۷	۲-۹-۱- معادلات ماکسول برای میدان مغناطیسی دینامیکی
۸۰	۲-۹-۲- نفوذ میدان‌های وابسته به زمان در مواد هادی
۸۷	فصل سوم: معرفی روش اجزای محدود
۸۷	۳-۱- مقدمه
۸۸	۳-۲- روش گالرکین- مفاهیم اولیه
۸۸	۳-۲-۱- تشکیل معادلات فیزیکی
۸۸	۳-۲-۲- مثلث مرتبه اول
۹۰	۳-۲-۳- کاربرد روش باقیمانده وزندار
۹۳	۳-۲-۴- کاربرد روش المان محدود و حل آن
۹۴	۳-۲-۵- شرایط مرزی
۹۶	۳-۳- تعمیم روش المان محدود
۹۷	۳-۳-۱- اجزای محدود مرتبه بالا (حالت کلی)
۹۷	۳-۳-۲- المان‌های محدود مرتبه بالا
۱۰۰	۳-۳-۳- المان محدود مرتبه بالا: پیاده‌سازی
۱۰۲	۳-۳-۴- پیوستگی المان‌های محدود

- ۱۰۳ ۵-۳-۳- چند جمله‌ای پایه
- ۱۰۴ ۶-۳-۳- تبدیل کمیات-ماتریس ژاکوبین
- ۱۰۶ ۷-۳-۳- محاسبه انتگرال ها
- ۱۰۹ ۴-۳- انتگرال گیری عددی
- ۱۱۲ ۵-۳- تعدادی از المان های محدود دوبعدی
- ۱۱۲ ۱-۵-۳- المان مثلثی مرتبه اول
- ۱۱۳ ۲-۵-۳- المان مثلثی مرتبه دوم
- ۱۱۴ ۳-۵-۳- المان چهارگوش دارای دو ضلع مستقیم
- ۱۱۵ ۴-۵-۳- المان چهارگوش درجه دوم
- ۱۱۶ ۶-۳- ترکیب المان های محدود متناوب
- ۱۱۶ ۱-۶-۳- ترکیب انواع متفاوت المان های محدود
- ۱۱۷ ۷-۳- محاسبه برخی عبارات در معادله میدان
- ۱۱۸ ۱-۷-۳- ماتریس سختی
- ۱۱۹ ۲-۷-۳- محاسبه قسمت دوم معادله (۷۲-۳)
- ۱۲۰ ۳-۷-۳- محاسبه قسمت سوم معادله (۷۲-۳)
- ۱۲۰ ۴-۷-۳- محاسبه عبارت منبع
- ۱۲۱ فصل چهارم: کاربرد روش اجزای محدود در مسائل دویعدی الکترومغناطیس
- ۱۲۱ ۱-۴- معرفی
- ۱۲۱ ۲-۴- تعدادی از مسائل استاتیکی
- ۱۲۱ ۱-۲-۴- میدان های الکترواستاتیکی: مواد دی الکتریک
- ۱۲۳ ۲-۲-۴- جریان های ثابت : مواد هادی
- ۱۲۴ ۳-۲-۴- میدان های مغناطیسی : پتانسیل اسکالر

- ۱۲۵ ۴-۲-۴- میدان مغناطیسی: پتانسیل برداری
- ۱۳۱ ۴-۲-۵- بردار پتانسیل الکتریکی
- ۱۳۳ ۴-۳- کاربرد در مسائل جریان گردابی دویعدی
- ۱۳۳ ۴-۳-۱- امان مرتبه اول در مختصات محلی
- ۱۳۷ ۴-۳-۲- معادله پتانسیل برداری یا استفاده از گسسته سازی زمانی
- ۱۴۲ ۴-۳-۳- معادله پتانسیل برداری مختلط
- ۱۴۵ ۴-۳-۴- مدارهای با قسمت متحرک -
- ۱۴۷ ۴-۴- کاربردهای تقارن محوری
- ۱۴۹ ۴-۴-۱- فرمولاسیون پتانسیل برداری با تقارن محوری
- ۱۵۱ ۴-۵- مزایا و محدودیت‌های روش فضای دویعدی
- ۱۵۳ ۴-۶- کاربردهای غیرخطی
- ۱۵۳ ۴-۶-۱- روش تخمین مناسب
- ۱۵۴ ۴-۶-۲- روش نیوتن-رافسون
- ۱۵۸ ۴-۷- تکرار هندسی حوزه‌ها
- ۱۵۹ ۴-۷-۱- شرایط تناوبی
- ۱۶۰ ۴-۷-۲- شرایط عکس تناوبی
- ۱۶۰ ۴-۸- مسائل حرارتی
- ۱۶۰ ۴-۸-۱- انتقال گرما از طریق هدایت
- ۱۶۱ ۴-۸-۲- انتقال گرما از طریق همرفت
- ۱۶۱ ۴-۸-۳- انتقال گرما از طریق تشعشع
- ۱۶۲ ۴-۸-۴- پیاده‌سازی اجزای محدود
- ۱۶۳ ۴-۹- تجهیزات الکترومغناطیسی تغذیه شده با ولتاژ

فصل پنجم: تزویج معادلات مدار الکتریکی با معادلات میدان مغناطیسی

۱۶۷

۱-۵- مقدمه

۱۶۷

۲-۵- معادلات الکترومغناطیسی

۱۶۷

۱-۲-۵- استخراج روابط با استفاده از پتانسیل برداری مغناطیسی

۱۶۷

۲-۲-۵- فرمولاسیون در دو بعد

۱۶۸

۳-۲-۵- معادلات برای هادی‌ها

۱۶۹

۴-۲-۵- معادلات برای کل ناحیه مورد مطالعه

۱۷۱

۵-۲-۵- روش امان محدود

۱۷۲

۳-۵- معادلات برای آرایش‌های مختصات هادی‌ها

۱۷۳

۱-۳-۵- اتصال هادی‌های ضخیم

۱۷۳

۲-۳-۵- اتصال هادی‌های نازک

۱۷۹

۴-۵- اتصال بین تجهیزات الکترومغناطیسی و مدارهای تغذیه خارجی

۱۸۱

۱-۴-۵- معادلات کاهش مرتبه یافته تجهیزات الکترومغناطیسی

۱۸۱

۲-۴-۵- معادلات تغذیه مدار و ارتباط آنها با معادلات میدان

۱۸۲

۳-۴-۵- محاسبه ماتریسهای G_1 تا G_6

۱۸۳

۴-۴-۵- گسسته‌سازی مشتق زمان

۲۰۱

فصل ششم: مدل کردن چرخش در ماشین‌های الکتریکی

۲۰۵

۱-۶- مقدمه

۲۰۵

۱-۱-۶- روش‌های با فاصله هوایی گسسته نشده

۲۰۵

۲-۱-۶- روش‌های با فاصله هوایی گسسته شده

۲۰۵

۲-۶- جزء بزرگ (*macro-element*)

۲۰۶

۳-۶- لایه متحرک

۲۰۸

۲۱۱	۶-۴- اثر بیجش شیارها در ماشین الکتریکی با استفاده از شبیه سازی دوبعدی
۲۱۹	فصل هفتم: عکس العمل بین نیروهای الکترومغناطیسی و مکانیکی
۲۱۹	۷-۱- مقدمه
۲۲۰	۷-۲- روشهای بر پایه استخراج مستقیم روابط
۲۲۰	۷-۲-۱- روش تغییرات کو-انرژی مغناطیسی
۲۲۱	۷-۲-۲- روش تانسور تنش ماکسول
۲۲۹	۷-۲-۳- روش پیشنهاد شده توسط Arkkio
۲۳۰	۷-۲-۴- روش مشتق ماتریس ژاکوبین محلی
۲۳۲	۷-۳- روش های مبتنی بر چگال پرو
۲۳۲	۷-۳-۱- نکات اولیه
۲۳۴	۷-۳-۲- استخراج معادلات منابع معاد
۲۳۷	۷-۳-۳- استخراج روابط بر مبنای مشتق اند
۲۳۹	۷-۳-۴- مقایسه بین روش های مختلف
۲۴۲	۷-۴- لرزش ماشین های الکتریکی ناشی از نیروهای مغناطیسی
۲۴۳	۷-۴-۱- محاسبه نیروی مغناطیسی
۲۴۳	۷-۴-۲- محاسبه مکانیکی
۲۴۶	۷-۴-۳- مثالی از محاسبه لرزش
۲۵۳	فصل هشتم: تلفات آهن
۲۵۳	۸-۱- مقدمه
۲۵۳	۸-۲- تلفات جریان گردابی
۲۵۶	۸-۳- تلفات هیستریزیس
۲۶۲	۸-۴- تلفات اضافی

- ۲۶۳ ۸-۵- تلفات کلی آهن
- ۲۶۵ ۸-۵-۱ مثال
- ۲۶۷ ۸-۶- مدل Jiles-Atherton
- ۲۶۷ ۸-۶-۱- معادلات J_A
- ۲۶۹ ۸-۶-۲- روند پیاده سازی عددی برای روش J_A
- ۲۷۰ ۸-۶-۳- مثالی از حلقه‌های هیستریزیس بدست آمده از روش J_A
- ۲۷۴ ۸-۶-۴- مشخص کردن پارامترهای حلقه‌های هیستریزیس تجربی
- ۲۷۸ ۸-۷- مدل معکوس Jiles-Atherton
- ۲۷۸ ۸-۷-۱- روش معکوس J_A
- ۲۷۹ ۸-۷-۲- روند پیاده سازی عددی روش معکوس J_A
- ۲۸۰ ۸-۸- اعمال تلفات آهن در محاسبات اجرای محدود
- ۲۸۱ ۸-۸-۱- مدل سازی هیستریزیس توسط بردار مناطق شدت $\vec{M}$
- ۲۸۲ ۸-۸-۲- مدل سازی هیستریزیس توسط رلوکتانس دیفرانسیال ویژه
- ۲۸۵ ۸-۸-۳- وارد کردن تلفات جریان فوکو در مدل سازی اجزای محدود
- ۲۸۶ ۸-۸-۴- وارد کردن تلفات اضافی در مدل سازی اجزای محدود
- ۲۸۷ ۸-۸-۵- مثالی از اعمال تلفات آهن در محاسبات اجزای محدود
- ۲۹۱ پیوست ۱: آموزش نرم افزار محاسبات اجزای محدود Maxwell
- ۳۳۱ پیوست ۲: مثال ها و شبیه سازی ها

پیش‌گفتار

ماشین‌های الکتریکی بخش بسیار مهمی از هر فرآیند و پروسه صنعتی هستند که ایجاد چرخش و حرکت برای نیل به تولید محصول و رسیدن به اهداف آن سیستم را محقق می‌سازند. طراحی ماشین در هر یک از این کاربردها باید با توجه به نیازمندی‌های آن کاربرد صورت پذیرد تا عملکرد کل سیستم را ممکن و بهینه سازد. بنابراین قبل از ساخت ماشین لازم است تا طرح آن از لحاظ دارا بودن عملکرد مورد انتظار آزمایش شود. در این مرحله از طراحی معمولاً از شبیه‌سازی‌های کامپیوتری استفاده می‌شود. برای انجام این کار باید مدل ماشین از روی پارامترهای طراحی استخراج شود. روش‌های مختلفی برای دستیابی به مدل وجود دارد که از آن جمله می‌توان به روش‌های مدار معادل الکتریکی و مغناطیسی، روش تزویج مداری و روش اجزای محدود اشاره نمود. بدیهی است که هر چه دقت مدل استفاده شده بیشتر باشد، نتایج شبیه‌سازی تطابق بیشتری با واقعیت داشته و درک بهتری از ویژگی‌های ماشین در اختیار قرار می‌دهد. از میان روش‌های فوق، روش اجزای محدود که بر پایه حل عددی معادلات میدانی در ساختار گسسته شده ماشین استوار است، از دقت بالاتری برخوردار می‌باشد. استفاده وسیع از این روش در سایر شاخه‌های علوم مهندسی برای تحلیل و شبیه‌سازی دینامیک ساختارهای پیچیده نیز مؤید همین واقعیت است. اما در کنار مزایای بزرگ، عیب این روش تحلیل، حجم بالای محاسبات و سرعت پایین انجام شبیه‌سازی است که امروزه با ارائه بسته‌های قدرتمند نرم‌افزاری و وجود کامپیوترهای سریع در حال کم‌رنگ شدن است.

از این رو در این اثر، تحلیل ساختارهای الکترومغناطیسی فرکانس پایین که ماشین‌های الکتریکی نیز جزئی از آنها هستند، مورد نظر بوده است تا بتواند به عنوان یک مرجع کامل و مفید جهت دانشجویان، پژوهشگران و صنایع فعال در این زمینه مورد استفاده قرار گیرد.

در کتاب حاضر، ابتدا تمامی مقدمات ریاضی و الکترومغناطیسی مورد استفاده در تحلیل ساختارها به روش اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفته و با مثال‌های مناسب روشن شده است. سپس روش اجزای محدود و نحوه استفاده از آن برای تشکیل دستگاه معادلات جبری در انواع سیستم‌های الکتریکی و مغناطیسی این کتاب به عنوان مبانی دینامیکی با در نظر گرفتن ویژگی‌های غیرخطی آنها، بحث شده است. همچنین اتصال مدارات الکتریکی و میدل‌های الکتریکی قدرت به ساختارهای الکترومغناطیسی، در نظر گرفتن پیچش سیم‌ها در ماشین‌های الکتریکی، نحوه محاسبه نیروهای مکانیکی، فشار و الکترومکانیکی و لرزش ساختار ناشی از نیروهای مغناطیسی و محاسبه تلفات آهن و وارد نمودن آن در محاسبات اجزای محدود در فصول جداگانه‌ای با جزئیات کامل و مثال‌های مناسب ذکر شده است. مثال‌ها توسط یکی از قدرتمندترین بسته‌های نرم‌افزاری موجود به نام Maxwell انجام شده و آموزش نرم‌افزار نیز در پیوست همین کتاب آورده شده است.

در ترجمه کتاب و مطالب اضافه شده به آن، تلاش بسیاری صورت گرفته تا متن شیوا و روان و کاملی در اختیار مخاطبین قرار گیرد. اما واضح است که متن حاضر نمی‌تواند خالی از ایرادات و اشکالات باشد. لذا از تمامی خوانندگان این اثر درخواست می‌شود تا ما را از نظرات خود بهره‌مند نموده و زمینه هر چه غنی‌تر شدن اثر را در ویرایش‌های بعدی فراهم آورند.

دکتر حامد گرگین‌پور - عضو هیئت علمی دانشگاه خلیج فارس بوشهر