Journal of Industry Parts Manufacturers
https://ghs.science-journals.ir
E ISSN: 2717-2767

مجله قطعه سازان صنعت
http://science-journals.ir
شاپا الکترونیکی: 2717-2767

شبیه‌سازی مدل تحلیل توزیع میدان مغناطیسی در شتاب‌سنج کوارتز با MATLAB

علیرضا محمودی‌فرد[1*]، مهدیه رضازاده[2]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت صنعتی دانشگاه شاهد (و مدرس دانشگاه‌ها در رشته‌های مختلف)، تهران، ایران، alireza10.m10@gmail.com

2- دانشجوی کارشناسی مهندسی برق دانشگاه ابرار، تهران، ایران، m.mahdiehrezazadeh@gmail.com

*نویسنده مسئول: alireza10.m10@gmail.com

سال 3، شماره 3 (پیاپی: 11)، پاییز 1401، ص 10-15

چکیده

اصل کار QFA مبتنی بر تعلیق منعطف از چوب‌آویز با روکش طلا است که با یک جفت سیم‌پیچ گشتاور متصل شده است؛ بایاس خوب، ضریب مقیاس و پایداری خوب و دقت عملکرد سیستم‌ها به‌طور مستقیم بر دقت و اندازه‌گیری تاثیر می‌گذارد. در این مقاله، یک رویکرد تحلیل برای محاسبه توزیع میدان مغناطیسی شکاف هوا در شتاب‌سنج‌های انعطاف‌پذیر کوارتز توسعه داده شده است؛ مدل ارائه شده در این کار، با روش اجزای محدود و آزمایش اولیه تایید شده است؛ برای درک بهتر، نتایج در نرم‌افزار MATLAB نشان داده است.

کلمات کلیدی: شبیه‌سازی، توزیع میدان مغناطیسی، روش اجزای محدود، سیم‌پیچ، شتاب‌سنج کوارتز، MATLAB

Simulation of magnetic field distribution analysis model in quartz accelerometer with MATLAB

Alireza Mahmoodi Fard [1*], Mahdieh Rezazadeh [2]

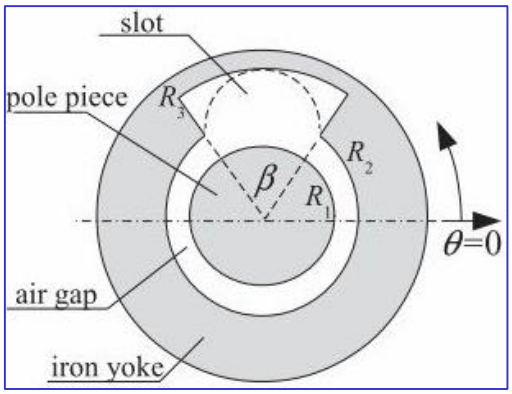
مقدمه

در مدل‌سازی تحلیلی ماشین‌های الکتریکی، یکی از سخت‌ترین کارها، در نظر گرفتن اثر شکاف در پیش‌بینی میدان مغناطیسی شکاف هوا است؛ چون گشتاور الکترومغناطیسی از تعامل بین روتور و استاتور از طریق میدان مغناطیسی در فضای شکاف هوا حاصل می‌شود، دانش دقیقی از توزیع میدان مغناطیسی شکاف هوا ضروری است؛ وجود شکاف‌های استاتور و یا روتور، تاثیر زیادی بر توزیع میدان مغناطیسی دارد؛ از پیامدهای آن می‌توان به نوسانات لرزش، نویز و سرعت اشاره کرد؛ میدان مغناطیسی فشار هوا با اثرات شکاف را می‌توان با تکنیک‌های مختلفی از جمله روش‌های تحلیلی یا نیمه‌تحلیل و همچنین تکنیک‌های عددی مانند انتگرال مرزی، ارزیابی کرد. عناصر محدود با در نظر گرفتن جزئیات هندسی و غیرخطی بودن مواد مغناطیسی، نتایج دقیقی را ارائه می‌دهد؛ با این حال، این روش برای اولین مرحله از مراحل طراحی ماشین‌های الکتریکی زمان‌بر بوده و انعطاف‌پذیری کمتری دارد؛ روش‌های تحلیلی، ابزارهای مفیدی برای ارزیابی اولیه عملکرد موتورهای الکتریکی و بهینه‌سازی طراحی هستند؛ زیرا مشتقات پیوسته صادر شده از راه‌حل تحلیلی در اکثر روش‌های بهینه‌سازی، از اهمیت بالایی برخوردار هستند؛ فرض بر این است که عرض شکاف بسیار کوچک‌تر از ارتفاع آن است [1].

متن اصلی

1- بررسی سیستم

شتاب‌سنج منعطف کوارتز یا QFA[1] به‌طور گسترده در سیستم‌های ناوبری داخلی و سیستم جهت‌یابی ناوبری استفاده می‌شود؛ زیرا بایاس خوب، ضریب مقیاس و پایداری خوب و دقت عملکرد سیستم‌ها، به‌طور مستقیم بر دقت و اندازه‌گیری تاثیر می‌گذارد. به‌عنوان یک شتاب‌سنج تعادل مجدد نیرو، بخش مهمی از QFA، گشتاور آهنربای دائمی یا PM[2] است که برای بازگرداندن جرم ثابت به موقعیت صفر در امتداد محور حساس استفاده می‌شود؛ بنابراین QFA یک مبدل بازخورد مغناطیسی-الکتریکی است که می‌تواند موقعیت تعادل خود را به‌صورت خودکار به‌دست آورد تا دقت بالاتر و محدوده اندازه‌گیری وسیع‌تر را شامل شود؛ به‌ویژه سیم‌پیچ‌ها به‌صورت متمرکز در شکاف هوا، در جایی‌که میدان مغناطیسی توسط مسیر برگشت مغناطیسی تامین می‌شود، قرار دارند [1]. اصل کار QFA، مبتنی بر تعلیق منعطف از چوب‌آویز با روکش طلا است که با یک جفت سیم‌پیچ گشتاور متصل شده است. کنترل سرویس با موقعیت نی‌آویز تغذیه می‌شود و جریان متناظری را در سیم‌پیچ‌ها ایجاد می‌کند که در میدان مغناطیسی تولید شده توسط PM قرار گرفته‌اند تا مجدد ناآویز را متعادل کند و یک سیستم حلقه‌بسته را تشکیل می‌دهد؛ شتاب ورودی را می‌توان با اندازه‌گیری جریانی که از سیم‌پیچ‌های گشتاور می‌گذرد، به‌دست آورد. ساختار مدار مغناطیسی این مدل برای تحلیل چگالی شار مغناطیسی شکاف هوای عملیاتی، در شکل 1 نشان داده شده است.

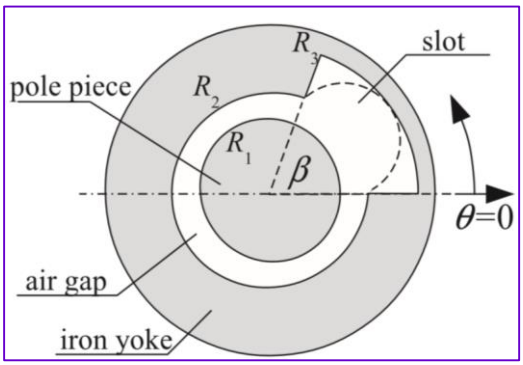


شکل 1- ساختار مدار مغناطیسی تحلیل چگالی شار مغناطیسی شکاف هوای عملیاتی [1]

[1] Quartz flexible accelerometer
[2] Permanent Magnet

فرضیات زیر برای ساده کردن تحلیل نظری انجام شده است:

قطعه آهنی به‌طور نامحدودی نفوذپذیر است؛ قطعه قطب مغناطیسی برای هدایت شار مغناطیسی PM به یک میدان پراکنده شعاعی استفاده می‌شود و به‌طور معادل یک PM با مغناطیسی شعاعی در نظر گرفته می‌شود؛ مرکز قوس شکاف با شکاف هوا یا قطعه قطب متفاوت است؛ در نتیجه شکل شکاف برای راحتی محاسبه، به منطقه حلقوی فن مانند که در شکل 2 نشان داده شده است، هم‌مرکز با سایرین است، اما کمی بزرگتر از شکل اصلی و ساده‌شده آن می‌باشد.



شکل 2- ساختار ساده برای محاسبه [1]

ساختار کلی به سه ناحیه slot region با شعاع R_3، Air gap با شعاع بیرونی R_2 و شعاع داخلی R_1 و ناحیه PM با شعاع بیرونی R_1 تقسیم می‌شود؛ بنابراین معادلات به‌دست آمده برای میدان مغناطیسی به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\varphi 1(r,\theta)=\sum_{k=1}^{\infty}\left[E_k\left(r^{\frac{-k\pi}{\beta}}-R_3^{\frac{-2k\pi}{\beta}}r^{\frac{k\pi}{\beta}}\right)\sin\left(\frac{k\pi}{\beta}\theta\right)\right] \quad (1)$$

$$\varphi_2(r,\theta)=A_0-\frac{M_r}{2\mu_r}R_1\ln r+\sum_{n=1}^{\infty}\left[\left(A_n r^{-n}+B_n r^{n}\right)\cos(n\theta)+\left(C_n r^{-n}+D_n r^{n}\right)\sin(n\theta)\right] \quad (2)$$

$$\varphi_3(r,\theta)=\frac{M_r}{2\mu_r}(1+\cos\theta)+M_0+\sum_{n=1}^{\infty}\left[r^{n}\left(M_n\cos(n\theta)+N_n\sin(n\theta)\right)\right] \quad (3)$$

برای محاسبه شار مغناطیسی در ناحیه air-gap از روابط زیر استفاده می‌شود:

$$B_r=-\mu_0\frac{\partial\varphi_2(r,\theta)}{\partial r} \quad (4)$$

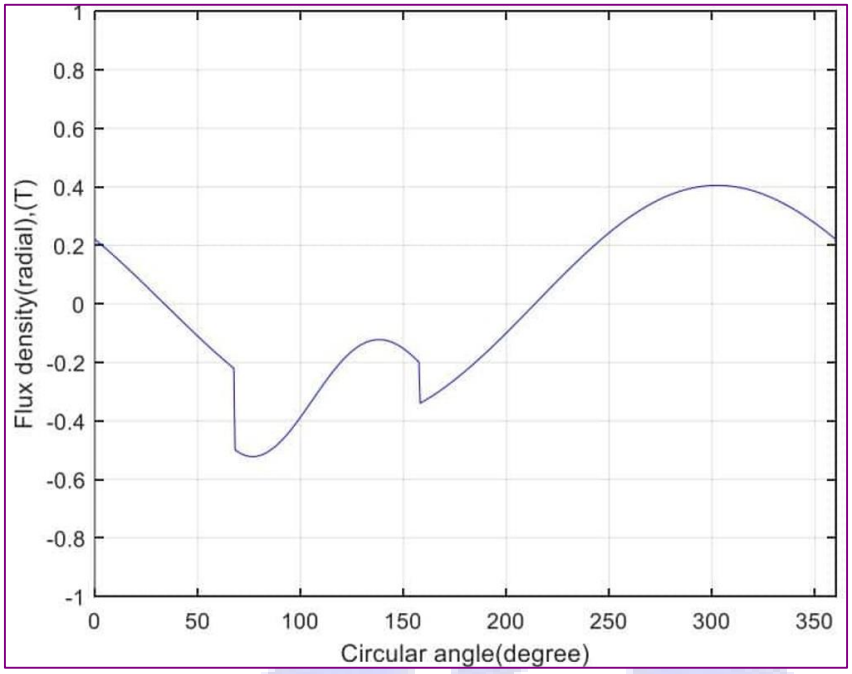
$$B_\theta=-\frac{\mu_0}{r}\frac{\partial\varphi_2(r,\theta)}{\partial\theta} \quad (5)$$

مقادیر پارامترها طبق جدول 1 تعریف می‌شود:

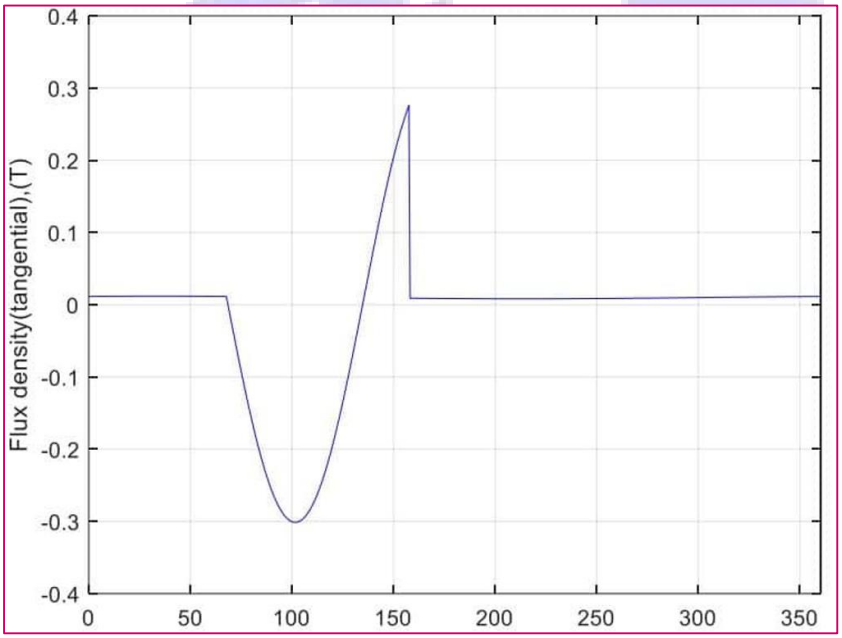
جدول 1- مقادیر پارامترها

پارامترها	مقادیر
R_1	6.4 mm
R_2	5.65 mm
R_3	8.75 mm
β	1.1819 rad
B_r	1.05 T
μ_r	1.1
N	20
K	20

با درنظرگرفتن r=5.2mm نتایج به‌دست آمده برای شار مغناطیسی در راستای شعاع و مماس در شکل‌های 3 و 4 نشان داده شده است.

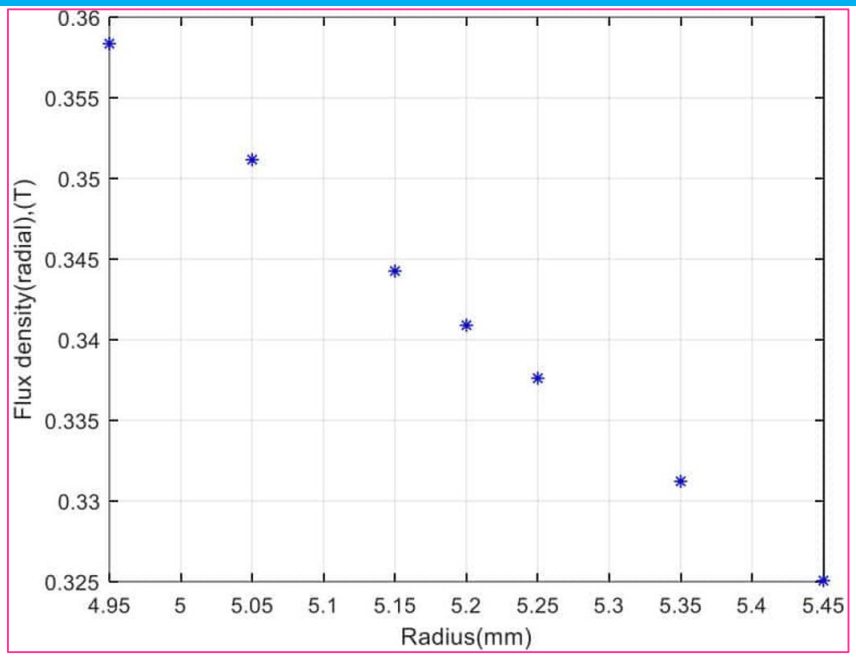


شکل 3- چگالی شار شعاعی در شعاع 5.2mm



شکل 4- چگالی شار مماسی در شعاع 5.21mm

با توجه به شکل‌های 3 و 4 تاثیر شکاف‌ها مشخص است و می‌توان اعوجاج ناشی از تاثیر شکاف‌ها در ناحیه slot-region را مشاهده کرد؛ این در حالی است که در جاهای دیگر، عملا سینوسی است. توزیع چگالی شار شعاعی برای شعاع‌های مختلف در شکل 5 نشان داده شده است؛ زاویه در نظر گرفته شده 270 درجه است.



شکل 5- چگالی شار شعاعی در شعاع‌های مختلف

نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک رویکرد تحلیل برای محاسبه توزیع میدان مغناطیسی شکاف هوا در شتاب‌سنج‌های انعطاف‌پذیر کوارتز، توسعه داده شده است؛ مدل ارائه شده در این کار، با روش اجزای محدود و آزمایش اولیه تایید شده است و می‌تواند به‌عنوان تخمین‌گر عملکرد تعادل مجدد و ضریب مقیاس استفاده شود؛ بنابراین، این روش مناسب است چون یک ابزار طراحی و بهینه‌سازی برای شتاب‌سنج‌های انعطاف‌پذیر کوارتز و سایز حسگرهای مغناطیسی مشابه می‌باشد.

منابع

[1] Cuo Wanga, Xingfei Lia, Ke Kou a, Tengfei Wua, Chunguo Longb, Analytical model of magnetic field distributionin the air-gap of quartz flexible accelerometer, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics 50, 2016.

[2] Chao Han, Yulong Zhao, Cun Li, A Novel Resonant Accelerometer Based on Quartz on Silicon (QoS), IEEE, 2019.

[3] Qiang Li, Wei Xu, Xuedong Chen, Investigation on Vibration Analysis of Quartz Flexible Accelerometer with Permutation Entropy, 11th World Congress on Intelligent Control and Automation Shenyang, China, 2014.

[4] K. Takao, M. Shiotani, T. Honda, I. Kitamura, T. Takahashi, K. Masugata, Effect of Magnetic Field Distribution in Cylindrical Hall Current Plasma Sources.

[5] Andres Calabia, Shuanggen Jin, Long-term Variations of Thermospheric Air Mass Density Derived from GRACE Accelerometers, Electromagnetic Research Symposium, 2016.

[6] Jinxing LIANG, Sujin CUI, Liyuan ZHANG, Ancheng SHAO, Realization of quartz MEMS accelerometer based on flip chip process, IEEE, 2013.

[7] Jie Yao, Chuan Huang, Decai Li, Research on a Novel Ferrofluid Inertial Sensor With Levitating Nonmagnetic Rod, IEEE SENSORS JOURNAL, 2016.

[8] J. Hong, S. Wang, Y. Sun, J. Li, H. Cao, Exciting Force and Vibration Analysis of Stator Permanent Magnet Synchronous Motor, IEEE.

[9] Zhou Guanwu , Zhang Qinghon, Prediction of Quartz Differential Resonant Accelerometer Zero-bias Based on Long Short Term Memory Neural Networks, IEEE 6th International Conference on Intelligent Computing and Signal Processing, 2021.

[10] Guangze Pan, Yaqiu Li, Xiaobing Li, Yuanhang Wang, Wenwei Liu, A PoF-based storage lifetime evaluation method for high precision quartz flexible accelerometers, 12th International Conference on Reliability, Maintainability, and Safety, 2018.

[11] Chihang Zhao, Jie He, Libin Huang, Bailing Zhou, Xin Zhong, A Novel Double-ended Tuning Fork Quartz Accelerometer, Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, 2011.

[12] Chunfeng Yue, Huadong Yu, Jinkai Xu, Design of Quartz Accelerometer Signal Acquisition System, IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2011.

[13] D.S. Gnusarev, Development of Combined Model of Quartz Pendulum Accelerometer with Closed Loop Control and Optimization of Parameters, IEEE.

[14] J. Beitia, P. Loisel, C. Fell, I. M. Okon, MINIATURE ACCELEROMETER FOR HIGH-DYNAMIC, PRECISION GUIDED SYSTEMS, IEEE.

[15] SPRYNSKI Nathalie, DAVID Dominique, LACOLLE Bernard, BIARD Luc, Curve Reconstruction via a Ribbon of Sensors, IEEE, 2007.

[16] JIANLONG GUO, QINGHUA WU, KE GU, SHAN XIONG, WEIXIA FENG, AND JIANG XUE, Study on the Construction and Application of Digital Twins on High Voltage Transmission Line Live Working Scenes, 2021.

[17] Ya Tian, Jindong Tan, A Fast Adaptive-Gain Orientation Filter of Inertial/Magnetic Data for Human Motion Tracking in Free-living Environments, 34th Annual International Conference of the IEEE EMBS San Diego, 2012.

[18] Anagnostopoulos G., P. Marhavilas, A. Anastasiadis, I. Karanikola, MAGNETOHYDRODYNAMIC SHOCKS.