

一种轴径双向分离式电磁线圈驱动装置 的结构响应特性*

丛源涛¹⁾²⁾ 王秋良^{1)2)†} 程军胜^{1)2)‡} 熊玲¹⁾²⁾ 孙建¹⁾²⁾

1) (中国科学院电工研究所, 北京 100190)

2) (中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100049)

(2024年2月3日收到; 2024年4月16日收到修改稿)

为了避免传统一体化驱动结构在运行过程中容易出现骨架断裂失效等不稳定现象. 本文根据典型一体化驱动结构在运行过程中的应力应变, 结合加速实验后出现内壁裂痕的一体化驱动结构的耐压放电测试, 分析确定一体化驱动结构存在的不稳定因素, 初步设计了一种轴径双向分离式模块化的新型驱动结构, 对新结构在运行过程中的电磁及结构响应等展开有限元仿真分析. 在相同激励条件下, 新型驱动结构内壁上的应力应变远小于一体化结构, 同时一体化驱动结构的内壁上的最大形变约为 10^{-2} m 量级, 而新型驱动结构在运行过程中内壁上的最大形变降低至 10^{-5} — 10^{-6} m 量级. 结果表明新结构能够在保证推进性能的前提下, 降低内壁和相间隔板的应力应变及变形程度, 提高了结构的可靠性, 能够为电磁线圈驱动结构的设计优化提供一定参考和借鉴.

关键词: 电磁推进, 线圈推进, 结构响应, 有限元分析

PACS: 02.10.Yn, 85.80.Jm, 02.70.-c

DOI: 10.7498/aps.73.20240239

1 引言

近年来, 电磁线圈推进技术已成为国内外研究的焦点. 电磁能推进方式相对于化学能推进方式具有更多的优势, 能够以更高速度推进更大质量的抛体^[1-3]. 作为一种新型的推进方式, 电磁线圈推进技术广泛应用于大质量抛体推进、武器弹射起飞^[4,5]以及高应变率下的材料动态力学性能测量等领域, 具有能量利用率高、安全可靠、机动灵活等优势^[6-8].

电磁线圈推进系统的驱动结构主要包括导线绕组和绝缘支撑两部分, 其中绝缘支撑部分使用增

强纤维和树脂基体固化. 当为驱动线圈施加强大的脉冲电流时, 将产生时空变化的磁场, 同时会使线圈绕组本身受到巨大的电磁力^[9,10]. 在实际实验中发现随着脉冲电源储能量的增大或电枢出口动能的提升, 驱动结构内壁和相间隔板容易出现断裂、炸膛或裂缝等结构不稳定现象.

但是, 由于电-磁-热-力等多物理场耦合作用的瞬态极端环境限制以及目前测量手段不足的制约, 难以对推进过程中的驱动结构稳定性和结构状态进行实时监测. 因此数值模拟技术是解决上述问题的一种有效手段, 众多研究人员通过数值建模和仿真模拟建立了各种电磁线圈推进装置仿真模型, 并取得大量研究成果. 20世纪90年代, 美国 Sandia 实验室进行了实验验证, 该试验采用嵌套螺旋线圈,

* 中国科学院科研仪器设备研制项目 (批准号: YJKYYQ20200011)、中国科学院“西部之光”项目 (批准号: bzg-zdsys-202317) 和中国科学院联合基金项目 (批准号: 8091A02) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: qiuliang@mail.iee.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: jscheng@mail.iee.ac.cn

使用多层钢丝来减小电流密度和欧姆热, 每一层由圆柱状的加固壳支撑以支持轴向径向载荷 [11]. 21 世纪初, 美国 Sandia 实验室又对其他可能由载荷导致的失效机制开展了相关研究, 包括由于机械疲劳或由于磨损造成的电气绝缘破裂或高强度工作导致的绕组导线断裂等 [12,13]. 2012 年, 关晓存等 [14] 基于电磁理论和弹塑性理论建立了电磁-应力耦合有限元模型, 分析了同步型感应线圈推进装置的应力分布规律. 2015 年, 张宇娇等 [15,16] 和秦威南 [17] 分析了防护壳与初级线圈的应力分布并与极限抗拉强度做对比, 分析了线圈的疲劳特性. 2021 年, 贺亚男等 [18] 根据线圈绕组的不同形态, 建立了两种极端情况模型, 通过分析电枢在堵转工况下简化模型线圈内部应力变形, 得出通过限制内层位移可减小整体变形的结论.

本文针对典型的一体化电磁线圈驱动结构在运行过程中所面临的结构不稳定问题, 为了提高驱动结构的可靠性, 减小运行过程中的结构应力应变等响应特征, 提出了一种轴径双向分离式的电磁线圈驱动结构, 并根据二维柱坐标系下一体化驱动结构的数值模型计算结果, 对驱动结构骨架内壁以及相间隔板进行针对性优化设计, 建立了轴径双向分离式模块化的新型驱动结构模型. 采用有限元仿真计算了典型结构的电磁场分布与结构响应, 并针对性比较了两种驱动结构的骨架内壁和相间隔板处的应力应变和形变程度.

2 系统模型

本文以三相异步线圈驱动结构进行电磁-结构场耦合计算, 其剖面结构示意图如图 1 所示. 以线圈 A1 为初始端, 排列次序分别是 A1-B1-C1-A2-B2-C2, 电枢从 A1 端向 C2 端加速前进. 在一体化驱动结构中, 导线、匝间绝缘、骨架以及加强外壳通过树脂胶固化成一体.

三相异步激励线圈驱动装置的电路方程可由 (1) 式表示, (2) 式为抛体电枢在受到电磁推力作用时的运动方程. 结合 (1) 式和 (2) 式进行计算, 可得电磁线圈驱动装置的推进性能:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\sum_{l=0}^{N_d/3-1} \sum_{i=1}^{N_d} M_{(3l+k),i}^{d,d} I_i^d \right) + \sum_{l=0}^{N_d/3-1} R_{(3l+k)}^d I_k \\ + \frac{d}{dt} \left(\sum_{l=0}^{N_d/3-1} \sum_{i=1}^{N_p} M_{(3l+k),i}^{d,p} I_i^p \right) = U_k, \end{aligned} \quad (1)$$

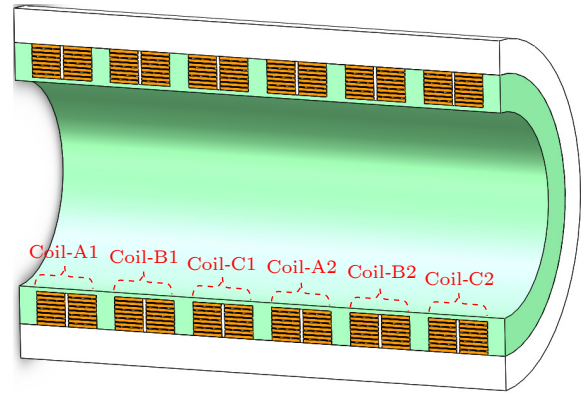


图 1 三相异步电磁线圈推进装置剖面结构示意图
 上述部件通过树脂胶与玻璃纤维布整体固化

图 1 三相异步电磁线圈推进装置剖面结构示意图

Fig. 1. Schematic diagram of sectional structure of three-phase asynchronous electromagnetic coil launcher.

$$F = \sum_{p=1}^{N_p} \sum_{d=1}^{N_d} I_p I_d \frac{dM_{pd}}{dz} = ma = m \frac{dv}{dt}, \quad (2)$$

其中, N_d 为线圈数量, N_p 为电枢切片数量, d 表示驱动线圈, p 表示抛体电枢, I 是电流, R 是电阻, M 是电感, U_k 是电压, F 是电磁推进力, m 是电枢质量, a 是电枢加速度, v 是电枢速度, z 是轴向位置.

三相线圈连接脉冲电容器, 通过控制晶闸管的导通和关断实现充放电, 线圈绕组在脉冲激励电流作用下产生时空变化的磁场, 从而在抛体电枢中感生涡流, 利用电磁力推进电枢加速前进 [19,20]. 电枢受到电磁力推进的同时, 驱动线圈也会由于磁场的作用而受到电磁力作用, 承受较大的形变或应力应变, 从而可能出现结构不稳定现象.

对于一体化驱动结构, 由于电磁线圈受到电磁力而产生的应力应变对绝缘结构会产生较大影响, 如图 2 所示, 绝缘骨架受到径向拉应力和轴向拉应变, 导致在运行过程中容易出现内壁断裂和相间隔板裂缝等情况, 非常不利于结构运行的稳定性.

使用有限元方法计算驱动结构在运行过程中的结构响应, 有限单元的刚度矩阵可由 (3) 式计算得到. (4) 式和 (5) 式可分别计算单元位移矩阵和应力应变值:

$$k_e = \int_{z_1}^{z_3} \int_{r_1}^{r_3} B^T D B r dr dz, \quad (3)$$

$$U = K / F_s, \quad (4)$$

$$\sigma^e = D \varepsilon^e = D B U^e, \quad (5)$$

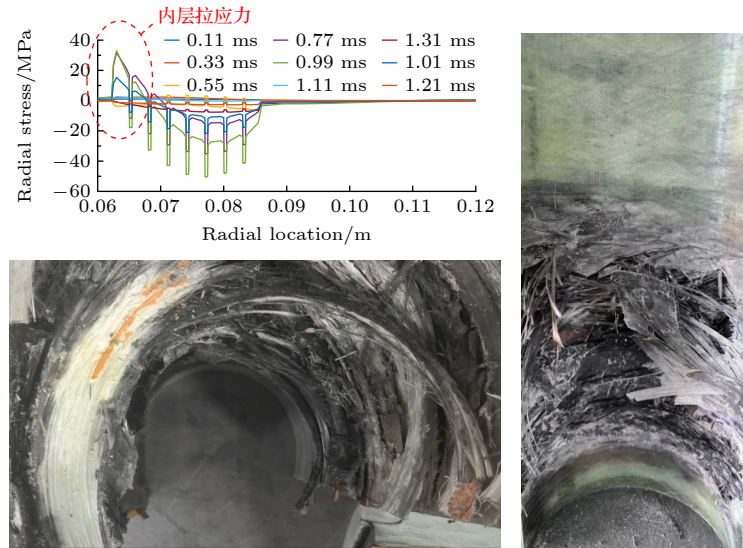


图 2 一体化驱动结构响应特征与失效实物照片

Fig. 2. Structural response characteristics and physical photos of integrated drive structures.

其中, \mathbf{k} 是矩形截面四节点环单元刚度矩阵, \mathbf{e} 代表网格单元, \mathbf{U} 是结构位移量, \mathbf{K} 是整体刚度矩阵, F_s 是等效载荷, \mathbf{D} 表示弹性矩阵, \mathbf{B} 表示应变矩阵, σ^e 是单元应力值, ε^e 是单元应变值.

3 一体化结构计算结果与讨论

3.1 一体化驱动结构的推进性能计算

设计了一套采用传统一体固化结构的电磁线圈推进装置, 其中电枢质量为 2 kg, 骨架内壁厚度为 2.5 mm, 线圈匝间绝缘径向厚度为 0.5 mm. 具体驱动结构尺寸和材料性能等具体参数见表 1.

一体化驱动结构在运行过程中的速度和位移曲线如图 3 所示, 在 2.2 ms 的加速时间内, 电枢轴向位移为 297 mm, 出口速度达到 203 m/s.

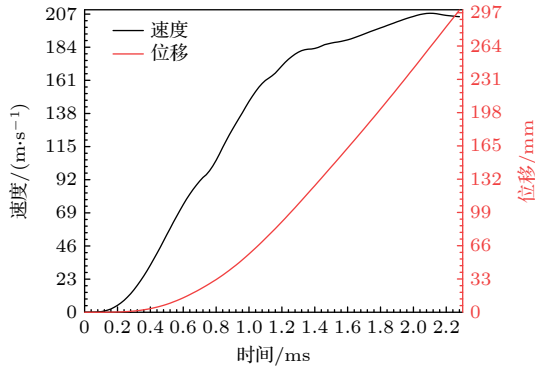


图 3 一体化驱动结构的推进性能

Fig. 3. Propulsion performance of integrated drive structure.

表 1 驱动结构尺寸和材料性能参数

Table 1. Drive structure dimensions and material performance parameters.

| 参数 | 值 |
|---------------------|------|
| 电枢质量/kg | 2 |
| 骨架内半径/mm | 60 |
| 导线径向厚度/mm | 2.5 |
| 线圈轴向宽度/mm | 40 |
| 匝间绝缘厚度/mm | 0.5 |
| 相间隔板轴向宽度/mm | 5 |
| 绕组径向匝数 | 8 |
| 骨架内壁厚度/mm | 2.5 |
| 绝缘材料杨氏模量 E_f /GPa | 100 |
| 绝缘材料泊松比 ν_f | 0.22 |
| 铜导体杨氏模量 E_c /GPa | 110 |
| 铜导体泊松比 ν_c | 0.34 |

3.2 一体化驱动结构的结构响应计算分析

利用有限元软件 ANSYS-Workbench 对一体化驱动结构的响应特征进行模拟, 通过 Maxwell 与 Transient Structure 模块间的耦合实现运动状态下的电磁载荷实时传递, 完成驱动结构动态力学响应的含时瞬态分析, 驱动结构绝缘骨架在运行过程中的最大应力应变分布如图 4 所示. 在整个运行过程中, 绝缘骨架的最大 Von-mises 应力值约为 26.9 MPa, 等效弹性应变的最大值约为 0.3%. 应力应变的最大值出现在 C1 和 A2 两线圈之间的隔板处, 同时其他相间隔板底部与骨架内壁也存在多个应力峰值区域.

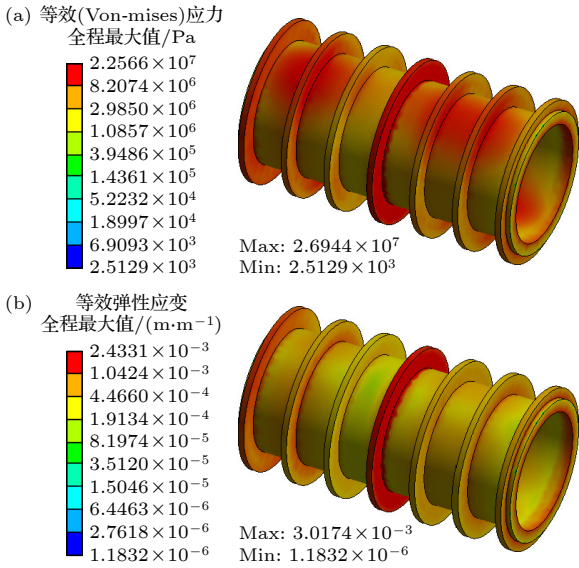


图4 一体化驱动结构应力应变仿真结果 (a) 等效应力; (b) 等效应变

Fig. 4. Simulation results of stress and strain of integrated drive structure: (a) Equivalent (Von-mises) stress; (b) equivalent elastic strain.

一体化驱动结构绝缘骨架在运行过程中的径向变形、轴向变形和总变形最大值分布如图5所示。从形变程度上来看,绝缘骨架的径向形变峰值出现在A2和B2两线圈之间的骨架内壁上,径向变形最大值约为 4.1591×10^{-5} m。而轴向变形则表现为明显的C1负向形变,A2正向形变,轴向变形的最大值和最小值分别是 1.4915×10^{-5} m和 -1.9246×10^{-6} m,从而在A2与C1之间的相间隔板处形成轴向拉伸分裂的趋势,最终总变形的最大值约为 4.2944×10^{-5} m。

3.3 一体化驱动结构耐压放电测试

为了确定实际运行前后驱动结构内壁的绝缘性能变化,随机选取实际推进试验后出现内壁裂痕的一体化驱动结构,开展了一体化驱动结构耐压放电测试,搭建测试系统如图6和图7所示。

对各线圈进行高压放电测试,尤其关注出现裂痕处对应的内壁绝缘情况。正常状态(即线圈绝缘完全健康的状态)下,使用耐压测试仪提供50 kV高压,没有出现放电或击穿现象。而对裂痕处的线圈进行测试时,30 kV时就出现了不规则放电现象,电流波形如图8所示。

内壁裂痕的出现说明一体化驱动结构在实际运行电枢加速过程中,瞬态极高电磁力使其形变严

重,耐压放电测试结果说明结构内壁绝缘性能下降。如果考虑实际加速过程中由于力的作用裂痕缝隙变大,实际放电电压要远小于30 kV。如果在绝缘内壁损伤的情况下继续实验,存在高能线圈短路甚至整体结构爆炸失效的危险。因此,本文根据一体化驱动结构应力应变分布和内壁形变原因,提出了一种轴径双向分离式模块化的新型驱动结构,以实现减小形变,避免线圈对内壁拉应力和拉应变的目的。

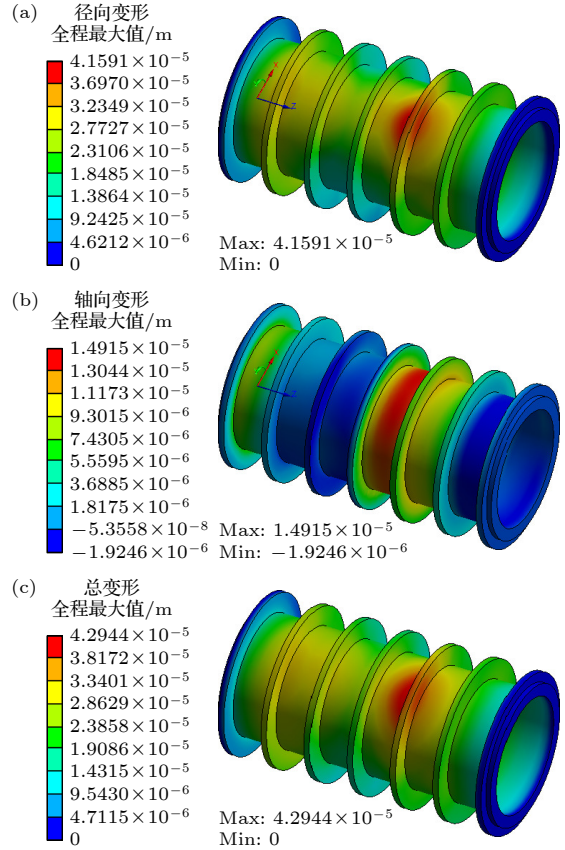


图5 一体化驱动结构形变程度 (a) 径向变形; (b) 轴向变形; (c) 总变形

Fig. 5. Deformation of integrated drive structure: (a) Radial deformation; (b) axial deformation; (c) total deformation.

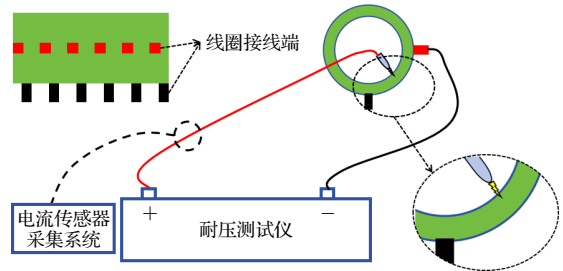


图6 耐压放电测试系统示意图

Fig. 6. Schematic diagram of withstand voltage discharge testing system.

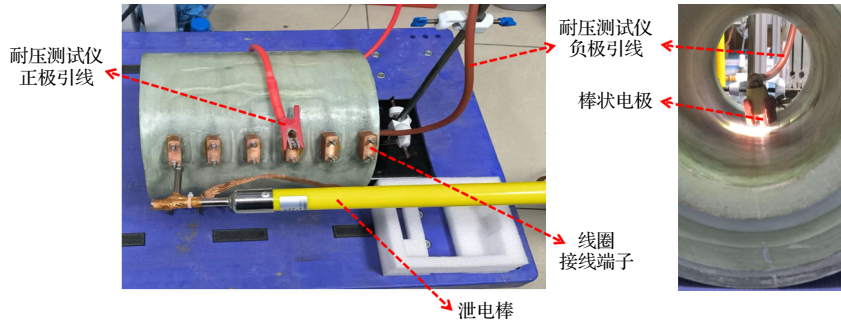


图 7 耐压放电测试系统实物图

Fig. 7. Physical diagram of withstand voltage discharge testing system.

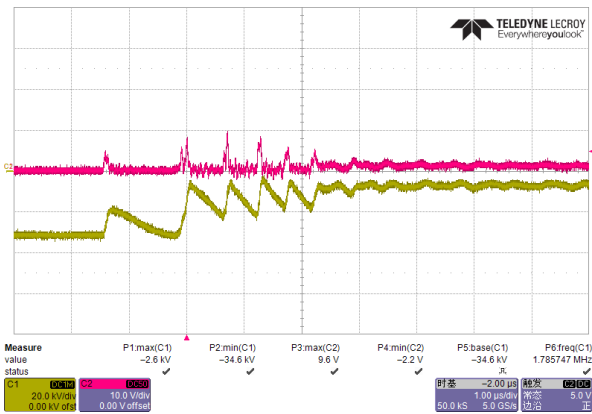


图 8 不规则放电电流波形

Fig. 8. Irregular discharge current waveform.

4 分离式结构计算结果与讨论

4.1 轴径双向分离式模块化驱动结构设计

所提出的新型驱动结构示意图如图 9 所示, 通过将线圈骨架一体化固化流程变为线圈单独加工固化, 同时将原来的多槽型骨架优化为相间隔板与内壁结构径向分离, 最后使用模块化组装的方式将

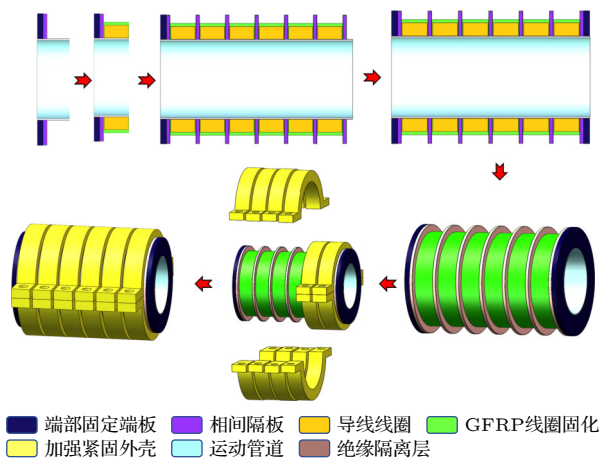


图 9 新型驱动结构示意图

Fig. 9. Schematic diagram of the new drive structure.

固化线圈模块、加强外壳模块、内壁结构以及相间隔板等逐一组装, 从而实现各模块在轴向上的分离.

采用与 3.1 节和 3.2 节相同的仿真激励条件, 计算了新型驱动结构下的电枢加速性能. 图 10 为新型驱动结构的推进性能与传统一体化驱动结构的推进性能比较. 可见在相同激励和载荷条件下, 两套装置的最终抛体出口速度分别约为 196 m/s 和 203 m/s, 因此新型驱动结构可以保证整体系统的推进性能.

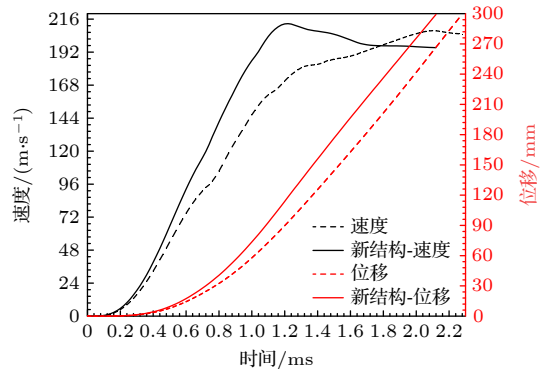


图 10 新型驱动结构的推进性能

Fig. 10. Propulsion performance of the new drive structure.

4.2 新型驱动结构仿真结果

针对最容易出现失效断裂风险的相间隔板和骨架内壁展开针对性分析, 两者的应力应变如图 11 所示. 可见相间隔板在整个过程中的等效应变最大值约为 1.46×10^{-7} , 应力最大值约为 13.427 kPa, 均出现在最外侧的隔板内径附近, 且最大值远小于一体化结构的峰值. 对于内壁结构, 在整个过程中的等效应变最大值约为 2.86×10^{-7} , 应力最大值约为 20.660 kPa, 且内壁上的应力应变峰值均出现在与相间隔板接触的区域, 表明该分离型驱动结构有效减弱了线圈骨架一体化导致的径向拉应力和轴

向分裂的趋势。

相间隔板和骨架内壁的形变最大值分布如图 12 所示。从形变程度上来看, 相间隔板的径向和轴向形变峰值均出现在最外侧隔板处, 径向最大形变量约为 2.35×10^{-6} mm, 轴向最大形变量约为 2.20×10^{-5} mm。内壁结构的径向形变表现为线圈冲击导致的峰值区域与相间隔板接触导致的弱形变区域间隔排列, 内壁结构的径向形变最大值为 3.75×10^{-6} mm; 而轴向形变则表现为两端峰值最高, 向

中间逐渐变弱的趋势, 轴向形变最大值约为 1.93×10^{-6} mm。因此新型驱动结构的形变程度也远小于传统的线圈骨架一体化驱动结构。

通过针对性的仿真分析, 本文提出的轴径双向分离式模块化驱动结构在保证推进性能的前提下, 能够避免线圈骨架一体化导致的拉应力, 提高了骨架内壁在运行过程中的稳定性。同时, 通过各个线圈独立固化并同轴组装的方式避免了中部拉伸趋势造成的分裂现象, 并且提高了驱动结构灵活性。

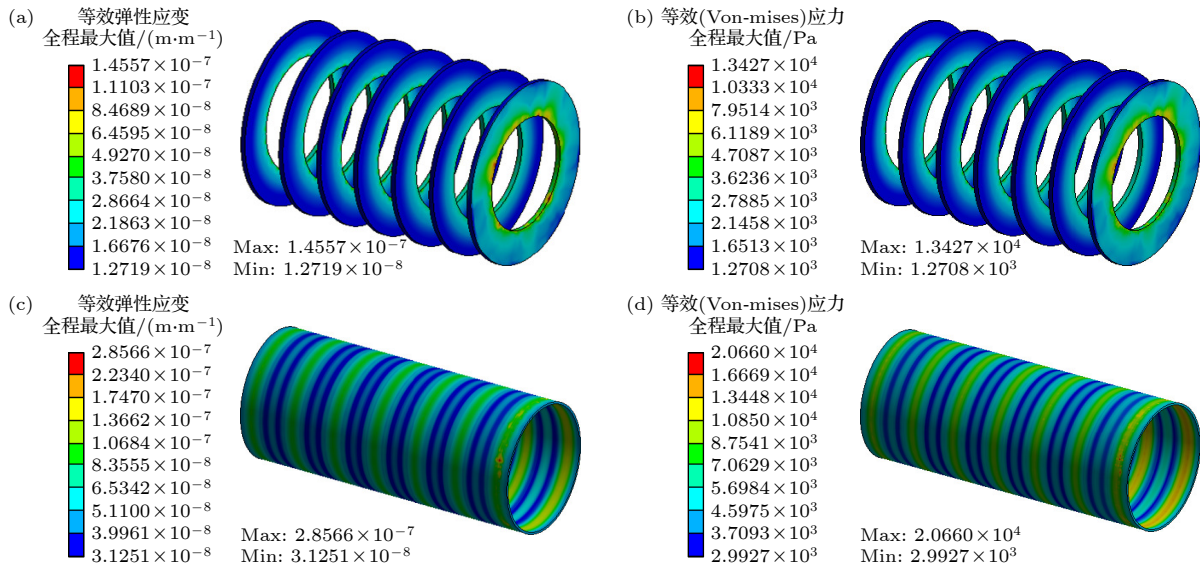


图 11 新型驱动结构应力应变仿真结果 (a) 相间隔板等效应变; (b) 相间隔板等效应力; (c) 内壁等效应变; (d) 内壁等效应力
Fig. 11. Stress and strain results of the new drive structure: (a) Equivalent strain of partition; (b) equivalent stress of partition; (c) equivalent strain of inner wall; (d) equivalent stress of inner wall.

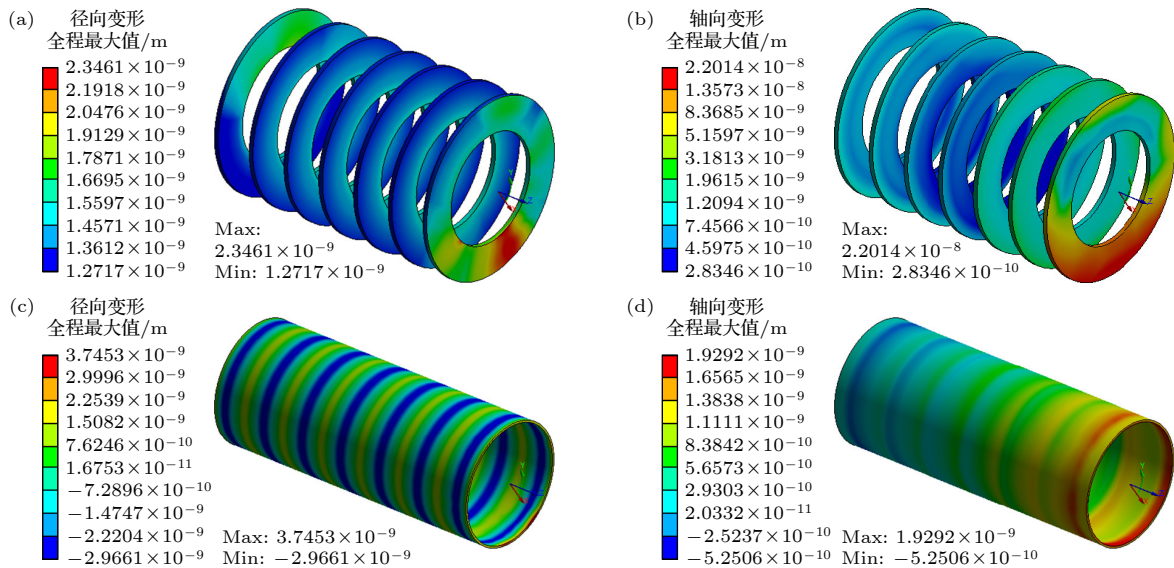


图 12 新型驱动结构形变程度 (a) 相间隔板径向形变; (b) 相间隔板轴向形变; (c) 内壁管道径向形变; (d) 内壁管道轴向形变
Fig. 12. Deformation of the new drive structure: (a) Radial deformation of partition; (b) axial deformation of partition; (c) radial deformation of innerwall; (d) axial deformation of innerwall.

5 结 论

本文根据典型的一体化驱动结构在运行过程中的应力应变计算结果, 以及实际实验中出现的绝缘退化和断裂失效现象, 提出了一种轴径双向分离式模块化的新型驱动结构, 并对新结构系统在运行过程中的瞬态运动及结构响应等展开有限元仿真分析. 通过数值计算和仿真分析, 对比了两种结构的应力应变、形变程度以及电枢加速性能, 可得出以下结论.

1) 一体化驱动结构由于受到线圈电磁力作用, 在内壁和相间隔板上存在较高的拉应力和拉应变, 同时伴随较大变形, 不利于整体结构稳定性.

2) 相同激励条件下, 新型驱动结构由于极大程度地减小了运行过程中线圈与内壁之间的相互作用, 因此新型驱动结构内壁上的应力应变远小于一体化结构.

3) 相同激励条件下, 一体化驱动结构的内壁上的最大形变约为 10^{-2} 量级, 而新型驱动结构在运行过程中内壁上的最大形变降低至 10^{-5} — 10^{-6} 量级.

结果表明, 新型驱动结构能够在保证推进性能的前提下, 能够极大地降低内壁和相间隔板的应力应变及变形程度, 提高了结构的可靠性. 针对这种新型结构, 后续计划开展高压推进实验, 以验证其可靠性. 本文的研究结果能够为电磁线圈驱动结构的设计优化提供一定参考和借鉴.

参考文献

- [1] Song M G, Park S W, Le D V, Go B S, Park M 2023 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **51** 3611

- [2] Tosun N, Polat H, Ceylan D, Karagoz M, Yıldırım B, Güngen İbrahim, Keysan O 2020 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **48** 3220
- [3] Ma W M, Lu J Y 2023 *Trans. China Electrotech. So.* **38** 3943 (in Chinese) [马伟明, 鲁军勇 2023 电工技术学报 **38** 3943]
- [4] Wang Q L, Wang H S, Li X, Chen S Z 2015 *High Volt. Eng.* **41** 2489 (in Chinese) [王秋良, 王厚生, 李献, 陈顺中 2015 高压技术 **41** 2489]
- [5] Lu J Y, Ma W M 2011 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **39** 116
- [6] Wang X 2020 *M. S. Thesis* (Hunan: National University of Defense Technology) (in Chinese) [王湘 2020 硕士学位论文 (湖南: 国防科技大学)]
- [7] Su Z Z, Zhang B, Guo W, Liu X C, Qu W B 2011 *J. Gun Launch Contr.* **121** 93 (in Chinese) [苏子舟, 张博, 国伟, 刘学超, 屈武斌 2011 火炮发射与控制学报 **121** 93]
- [8] Wang Y C, Liu X Y, Huang Y Y, Guan R, Jiang J F 2022 *High Power Laser Partic. Beams* **34** 81 (in Chinese) [王禹晨, 刘晓艳, 黄懿赟, 管锐, 江加福 2022 强激光与粒子束 **34** 81]
- [9] Cong Y T, Cheng J S, Xiong L, Wang Y C, Sun J 2021 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **49** 914
- [10] Cong Y T, Cheng J S, Wang Q L, Xiong L, Sun J, Wang Y C 2021 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **49** 4002
- [11] Kaye R J, Shokair I R, Wavrik R W, Dempsey J F, Honey W E, Shimp K J, Douglas G M 1995 *IEEE Trans. Magn.* **31** 478
- [12] Kaye R J, Mann G A 2003 *Sandia National Laboratories*
- [13] Lockner T, Kaye R, Turman B 2004 *Conference Record of the Twenty-Sixth International Power Modulator Symposium* San Francisco, California, USA, May 23–26, 2004 p119
- [14] Guan X C, Lei B, Li Z Y 2012 *Acta Mech. Solida Sin.* **33** 209 (in Chinese) [关晓存, 雷彬, 李治源 2012 固体力学学报 **33** 209]
- [15] Zhang Y J, Qin W N, Zhang Y D 2016 *Electrical Mach. Contr.* **20** 77 [张宇娇, 秦威南, 张亚东 2016 电机与控制学报 **20** 77]
- [16] Zhang Y J, Qin W N, Ruan J J 2015 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **43** 1288
- [17] Qin W N 2015 *M. S. Thesis* (Yichang: China Three Gorges University) (in Chinese) [秦威南 2015 硕士学位论文 (宜昌: 三峡大学)]
- [18] He Y N, Guan X C, Meng Q Y, Guan S H, Guo D H 2021 *J. Gun Launch Contr.* **42** 1 (in Chinese) [贺亚男, 关晓存, 孟庆云, 管少华, 郭灯华 2021 火炮发射与控制学报 **42** 1]
- [19] Li R J, Cheng J S, Xiong L, Chen G X, Deng Z Z, He X N 2023 *J. Ordn. Equip. Eng.* **44** 103 (in Chinese) [李睿杰, 程军胜, 熊玲, 陈功轩, 邓兆哲, 何湘宁 2023 兵器装备工程学报 **44** 103]
- [20] Li W, Li S D, Liu S L, Xiong L, Cheng J S 2023 *J. Ordn. Equip. Eng.* **44** 157 (in Chinese) [李伟, 李首德, 刘世亮, 熊玲, 程军胜 2023 兵器装备工程学报 **44** 157]

Analysis of structural response characteristics of a bidirectional separated electromagnetic coil drive device*

Cong Yuan-Tao¹⁾²⁾ Wang Qiu-Liang^{1)2)†} Cheng Jun-Sheng^{1)2)‡}
Xiong Ling¹⁾²⁾ Sun Jian¹⁾²⁾

1) (*Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

2) (*School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 3 February 2024; revised manuscript received 16 April 2024)

Abstract

In order to alleviate the common problems of skeleton fracture and failure in traditional propulsion systems, the insulation degradation and structural instability existing in integrated drive structures during operation are investigated in this work. By using stress-strain calculations of a typical integrated drive structure and voltage-withstanding discharge tests after acceleration experiments, key factors are identified, and it is believed that the tensile stress inside the driving structure is one of the reasons for structural instability. Owing to the electromagnetic force acting on the coil, the integrated driving structure exhibits high tensile stress and strain on the inner wall and interphase partition, accompanied by significant deformation, which is not conducive to the overall structural stability. Based on the above calculation results, a novel modular drive structure with bidirectional separation is proposed, which can realize the radial separation between the phase partition and the skeleton inner cylinder, as well as axial separation between different driving coils. Finite element simulation analysis is conducted to evaluate its acceleration performance and structural response during operation. The results indicate that under the same excitation conditions, the new driving structure greatly reduces the interaction between the coil and the inner wall during operation, so the stress-strain on the inner wall of the new driving structure is much smaller than that of the integrated structure. The maximum deformation decreases from approximately 10^{-2} m in the integrated structure to about 10^{-5} m to 10^{-6} m in the new design. These findings emphasize the potential of new structure to improve reliability while ensuring propulsion performance, providing valuable insights for optimizing electromagnetic coil drive structures. For this new structure, there will be plans to conduct high-pressure propulsion experiments in the future to verify its reliability.

Keywords: electromagnetic propulsion, coil propulsion, structural response, finite element analysis

PACS: 02.10.Yn, 85.80.Jm, 02.70.-c

DOI: 10.7498/aps.73.20240239

* Project supported by the Scientific Instrument Developing Project of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. YJKYYQ20200011), the “Light of West China” Program of Chinese Academy of Sciences, China (Grant No. bzg-zdsys-202317), and the Joint Fund of Chinese Academy of Sciences, China (Grant No. 8091A02).

† Corresponding author. E-mail: qiuliang@mail.iee.ac.cn

‡ Corresponding author. E-mail: jscheng@mail.iee.ac.cn

一种轴径双向分离式电磁线圈驱动装置的结构响应特性

丛源涛 王秋良 程军胜 熊玲 孙建

Analysis of structural response characteristics of a bidirectional separated electromagnetic coil drive device

Cong Yuan-Tao Wang Qiu-Liang Cheng Jun-Sheng Xiong Ling Sun Jian

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 130201 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240239

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240239>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

极化中子散射零磁场屏蔽体的有限元分析

Finite element analysis of zero magnetic field shielding for polarized neutron scattering

物理学报. 2023, 72(14): 142801 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230559>

高分子囊泡在微管流中惯性迁移现象的有限元分析

Finite element analysis of inertial migration of polymer vesicles in microtubule flow

物理学报. 2022, 71(18): 188701 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220606>

二维有限元方法研究石墨烯环中磁等离子激元

Study of magnetoplasmons in graphene rings with two-dimensional finite element method

物理学报. 2023, 72(8): 087301 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222467>

非规则形状介质内辐射-导热耦合传热的间断有限元求解

Discontinuous finite element solutions for coupled radiation-conduction heat transfer in irregular media

物理学报. 2020, 69(3): 034401 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191185>

低损耗材料微波介电性能测试中识别 $TE_{01\delta}$ 模式的新方法

A new method for identifying $TE_{01\delta}$ mode during microwave dielectric measurements of low-loss materials

物理学报. 2020, 69(12): 128401 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200275>

不同晶粒度高纯铜层裂损伤演化的有限元模拟

Numerical simulation on dynamic damage evolution of high pure copper with different grain sizes

物理学报. 2021, 70(20): 204601 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210726>