

隔振用音圈电机的结构与电磁仿真

李岸, 刘扬, 韩旭

(沈阳工业大学 机械工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘要:针对精密仪器在车载运输条件下易受多维度振动干扰的问题,提出一种用于斯图尔特隔振平台的新型音圈电机隔振器结构。首先结合隔振平台的动力学模型和车载振动情况,确定了隔振器的最大行程与最大出力。为了解决现有音圈电机承载静态负载和缺少导向机构的问题,采用了具有大径向刚度和小轴向刚度的三排板弹簧组作为承载和导向元件。通过理论计算确定了电机各部件尺寸,结合有限元仿真对电机性能进行分析,得出所设计的音圈电机隔振器在有效工作行程内,可达到高平均出力与低推力波动的结论,满足设计要求。最后搭建电机样机测试平台进行静态出力实验,实验测得的力-位移曲线与仿真曲线走势相同、极值点相近,验证了结构设计的正确性和电磁仿真的准确性。该结构为应用于车载隔振平台的隔振器提供了一种新颖的设计方案。

关键词:斯图尔特;音圈电机;隔振器;电磁仿真;静态出力;推力波动

DOI:10.15938/j.emc.2026.05.011

中图分类号:TM359.4

文献标志码:A

文章编号:1007-449X(2026)05-0126-12

Structural design and electromagnetic simulation of voice coil motor for vibration isolation

LI An, LIU Yang, HAN Xu

(School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: A novel voice coil motor (VCM) isolator structure for a Stewart vibration isolation platform was proposed to address the susceptibility of precision instruments to multi-dimensional vibration interference under vehicular transportation conditions. First, the maximum stroke and maximum output force of the isolator were determined based on the dynamic model of the isolation platform and the vehicular vibration environment. To overcome the limitations of existing voice coil motors in bearing static loads and lacking guiding mechanisms, a triple-plate spring assembly with high radial stiffness and low axial stiffness was employed as both the load-bearing and guiding element. The dimensions of each motor component were established through theoretical calculations, and the motor performance was analyzed using finite element simulations. The analysis indicates that the designed VCM isolator achieves high average output force and low thrust fluctuation within the effective working stroke, thereby satisfying the design requirements. Finally, a motor prototype test platform was constructed for static output force experiments. The force-displacement curves obtained from the experiments were observed to exhibit the same trend and were found to closely match the extreme points of the simulation curves, by which correctness of the structural design and the accuracy of the electromagnetic simulation were verified. This structure presents a novel design

收稿日期: 2025-12-10

基金项目: 国家自然科学基金(52005344)

作者简介: 李岸(1973—),男,博士,副教授,博士生导师,研究方向为混联机器人及智能隔振装备;

刘扬(2000—),男,硕士研究生,研究方向为直线电机设计及并联减振机构;

韩旭(1982—),男,博士,副教授,研究方向为机器人控制、非线性动力学控制、功率超声波技术。

通信作者: 韩旭

scheme for isolators applied to vehicular vibration isolation platforms.

Keywords: Stewart; voice coil motor; vibration isolator; electromagnetic simulation; static output force; thrust fluctuation

0 引 言

随着科学技术的飞速发展,精密仪器的应用范围越来越广泛^[1],精密仪器应具有在各种环境下的适用性,但是在动态环境下,精密仪器容易受到外界干扰,影响仪器的测量精度和使用寿命^[2]。

精密仪器在运输过程中会受到路况的影响产生多维度的振动,一些精密仪器诸如医疗级别的显微镜或者光学设备会因振动激励的影响使其测量精度下降。为解决多自由度激励对这些精密仪器的影响,采用六自由度并联 Stewart 结构作为隔振平台。

隔振器作为隔振平台的核心,对它的设计尤为重要,目前常见的隔振器有传统的被动隔振器,如弹簧阻尼器;半主动隔振器,如磁流变阻尼器;主动隔振器,如音圈电机。音圈电机凭借着结构简单、控制方便、运动精度高等优点越来越受到学者的广泛关注。但是使用单一音圈电机作为隔振器存在无法承受静态负载与缺少导向机构的问题,并且在电机结构上存在平均出力低、推力波动大的问题。

针对电机无法承受静态负载与缺少导向机构的问题,采用对音圈电机加装板弹簧来承受静态负载并且作为电机导向机构。

针对圆筒直线音圈电机内部径向充磁的环形永磁体放置在内侧由于同极相互排斥,在使用过程中容易出现磁铁崩开跳出现象,采用瓦片结构的永磁体放置在电机外壳内侧来避免这种现象的发生,提高电机使用安全性;为提高音圈电机的平均出力、降低推力波动,目前针对绕组结构以及磁路形式的优化研究相对较多,通过合理布置绕组的结构、设计磁路形式,来提高气隙磁通密度,增大电机的输出力密度,文献[3]通过引入 Halbach 永磁阵列,显著提升无铁直线电机的力能密度、控制精度和波形质量。文献[4]通过改进磁等效电路(magnetic equivalent circuit, MEC)模型和优化遗传算法显著提高了音圈电机的响应速度并大幅度降低发热。文献[5]提出新颖的 E 型铁心内置永磁体(intelligent power module, IPM)拓扑结构并进行参数优化,实现了一种结

构简单、漏磁小、出力平稳的线性振荡执行器,解决了 C 型 IPM 中的漏磁问题。音圈电机的研究多侧重于以较少的永磁体及导磁材料,设计具有高磁通密度的均匀气隙磁场。但是在音圈电机稳定状态下研究线圈绕组力位移特性曲线的文献较少,本文以动圈式音圈电机为起点,在不改变音圈电机基本结构和磁路形式的前提上,通过合理设计永磁体与绕组的径向尺寸,使绕组在隔振行程上的输出力尽可能保持稳定,使电机的力位移曲线平滑,从而提高音圈电机的推力密度,降低电机的推力波动。

1 隔振平台动力学模型

Stewart 隔振平台是一种并联机构由上、下平台和六根可伸缩支杆以及铰链组成,平台与支杆间多采用球铰或虎克铰链接,如图 1 所示。该机构具有 6 个自由度,分别为沿 x 、 y 、 z 轴的移动和绕 x 、 y 、 z 轴的转动^[6],将伸缩支腿中的运动副替换为隔振器就构成 Stewart 隔振平台。

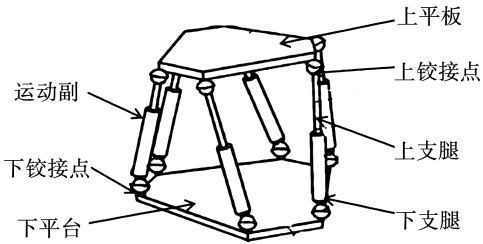


图 1 斯图尔特平台示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the Stewart platform

隔振平台在运动过程中杆长伸缩量为

$$d_i = \| \mathbf{p} + \mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i \| - l_0. \quad (1)$$

其中: d_i 表示第 i 根支腿的伸缩量; $\mathbf{p}$ 表示基台中心到动平台中心的矢量; $\mathbf{b}_i$ 表示上铰点到动平台中心的矢量; $\mathbf{a}_i$ 表示下铰点到基台中心的矢量; l_0 表示支腿初始长度,如图 2 所示。结合仪器在车辆行驶中受到的振动情况可计算出音圈电机的行程需求。根据文献[7],Stewart 隔振平台的动力学模型为

$$\mathbf{J}_p^T \boldsymbol{\tau} + \mathbf{F}_p + \sum_{i=1}^6 (\mathbf{J}_{1i}^T \mathbf{F}_{1i} + \mathbf{J}_{2i}^T \mathbf{F}_{2i}) = \mathbf{0}. \quad (2)$$

式中: F_p 表示施加在平台上的外部扰动; J_{1i} 表示第 i 个支腿上部分的雅可比矩阵; J_{2i} 表示第 i 个支腿下部分的雅可比矩阵; F_{1i} 表示施加在表示第 i 个支腿上部分质心处的作用力和力矩; F_{2i} 表示施加在表示第 i 个支腿下部分质心处的作用力和力矩; J_p 表示平台的雅可比矩阵,其表达式为

$$J_p = \begin{bmatrix} {}^1J_{b1,z} \\ {}^2J_{b2,z} \\ \vdots \\ {}^6J_{b6,z} \end{bmatrix} \circ \quad (3)$$

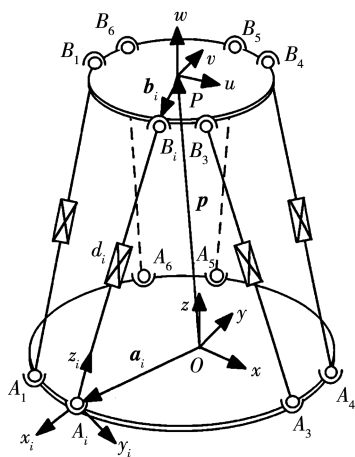


图2 斯图尔特平台结构图

Fig.2 Structural diagram of the Stewart platform

τ 表示施加在 6 个支腿上的输出力,表达式为

$$\tau = F_a + k \cdot \Delta L + c \cdot L_v. \quad (3)$$

式中: F_a 表示音圈电机输出力; k 、 c 分别表示弹簧的刚度和阻尼; ΔL 和 L_v 分别表示支杆的伸缩量和伸缩速度。结合精密仪器在车辆行驶中受到的振动情况可计算出隔振器的输出力要求。

研究发现,车辆行驶在高速公路或城市道路时,其中由于地面不平度带来的低频振动主要集中于 $1 \sim 3 \text{ Hz}$ ^[8],振动经过车辆减振系统传到车厢内部的振幅不超过 5 mm ,取负载重量为 10 kg ,对隔振平台施加振幅 5 mm ,频率 3 Hz 的六维正弦干扰,通过运动学与动力学模型可得出杆长随时间的变化曲线,如图3所示,支腿输出力随时间的变化曲线如图4所示。从图中可以得出变化量最大的杆长伸缩量为 8.6 mm ,单只腿静态力为 29.96 N ,支腿输出力最大值为 52.28 N 。

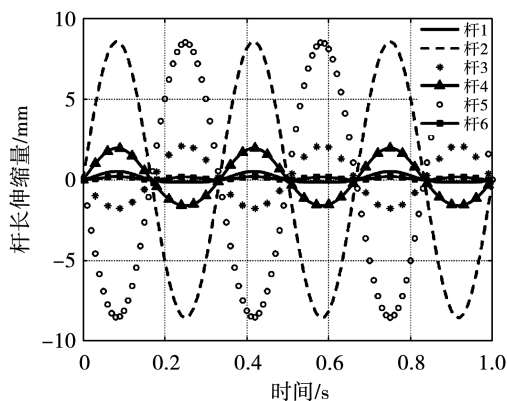


图3 杆长伸缩量曲线

Fig.3 Rod length extension curve

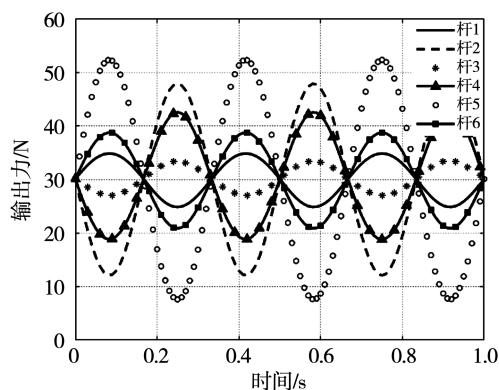


图4 支腿输出力曲线

Fig.4 Outrigger output force curve

2 音圈电机隔振器的结构设计

本节主要介绍音圈电机隔振器的总体结构设计,包括相关部件尺寸参数的计算及材料选型等方面。

2.1 板弹簧设计

考虑到音圈电机在隔振过程中要有导向机构,板弹簧较大的径向刚度,用于支撑电机定子,保证电机定子与转子之间的狭小间隙,而板弹簧较小的轴向刚度保证了电机定子在一定位移下实现自由往复运动,故选取板弹簧作为电机承载与导向元件。

已知单只腿静态负载 29.96 N ,支腿伸缩量为 $\pm 8.6 \text{ mm}$,静态负载由板弹簧承担,板弹簧轴向刚度不宜过小,过小的轴向刚度会使板弹簧的初始变形量过大,从而在有效行程中引来板弹簧轴向刚度的非线性,故初选弹簧轴向刚度为 7 N/mm ,考虑板弹簧要具备良好的韧性与抗磁能力,选取铍青铜

作为板弹簧材料,其在回火状态下的疲劳极限为 353 MPa,板簧在有效行程上的最大应力应该不超过材料疲劳极限的 60% 才能满足板簧使用寿命要求。表 1 总结出了板弹簧的设计指标。

表 1 板弹簧设计指标

Table 1 Design parameters of leaf springs	
指标	要求
轴向刚度/(N/mm)	≥7
最大应力/MPa	≤211.8
外径/mm	≤80

综合上述设计指标,选择偏心型渐开线作为板弹簧螺旋线,板弹簧具体参数大小见表 2。

表 2 板弹簧尺寸

Table 2 Dimensions of leaf spring	
参数	数值
外径/mm	80
槽数	3
槽宽/mm	1.7
厚度/mm	0.9
偏心量/mm	0.4

在 Solidworks 中建立板弹簧三维模型,如图 5 所示,将模型导入 ANSYS 静态结构模块分析其径向与轴向刚度,图 6、图 7 分别表示板簧在受到 1 N 轴向力与径向力时的轴向与径向变形量,由此可计算出板弹簧的轴向刚度为 2.411 N/mm,径向刚度为 92.79 N/mm。

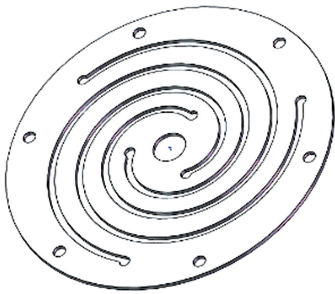


图 5 板弹簧三维模型

Fig. 5 3D model of the leaf spring

对板弹簧施加有效行程上的最大位移,查看板簧的应力分布情况如图 8 所示,在最大位移下的最大应力为 185.24 MPa 满足设计指标的使用寿命要求。

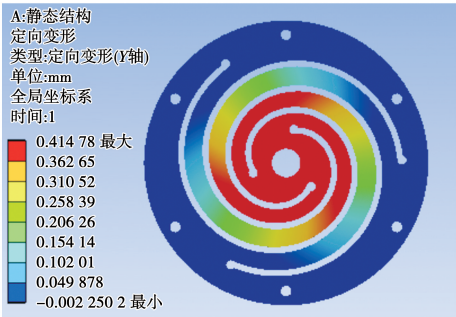


图 6 板弹簧轴向变形

Fig. 6 Axial deformation of leaf spring

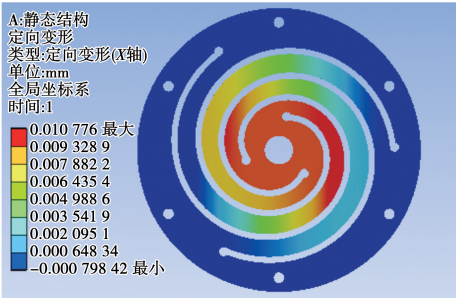


图 7 板弹簧径向变形

Fig. 7 Radial deformation of leaf spring

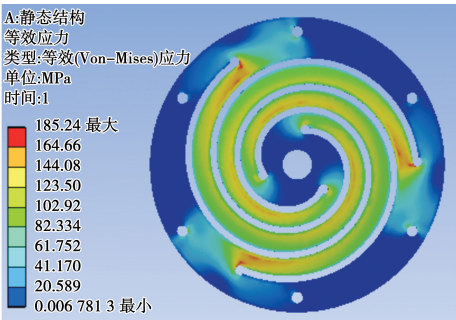


图 8 板弹簧应力分布

Fig. 8 Stress distribution of leaf springs

为了达到设计指标轴向刚度的要求,选取 3 排板弹簧作为最终的结构形式与电机部分连接,轴向刚度为 7.245 N/mm,满足设计指标要求,径向刚度为 224.957 N/mm。图 9 为板弹簧组三维建模图,固定连接件与电机定子相连起到固定板弹簧作用,移动连接件与电机动子相连实现往复运动。

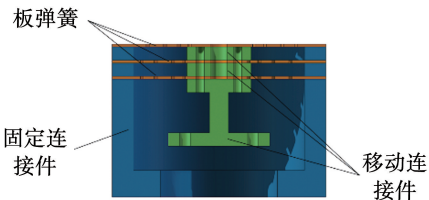


图 9 板弹簧组总装图

Fig. 9 Overall assembly drawing of leaf spring assembly

2.2 音圈电机的工作原理与设计指标

动圈式音圈电机由定子和动子组成,而定子又由磁轭、永磁体和铁心组成,动子由线圈及绕组骨架构成^[9],如图 10 所示。

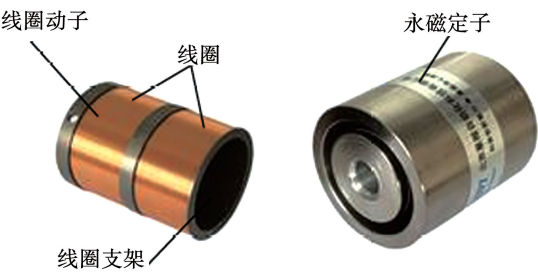


图 10 音圈电机组成图

Fig. 10 Voice coil motor assembly diagram

音圈电机的工作原理为安培力原理,当给音圈电机通驱动电流时,线圈在永磁体产生的磁场中会受到安培力的作用^[10],通过改变线圈中电流的大小和方向来改变音圈电机输出力的大小和方向,从而实现隔振功能。

根据电机使用场合为车载,一般车辆提供的电压为 12 V^[9],因此音圈电机的驱动电压定为 12 V。板弹簧组轴向刚度 7.245 N/mm,静态负载由弹簧承担,通过式(4)可计算出音圈电机最大出力应满足 45.32 N。参考精密直线传动行业标准及车载隔振工况要求,为了满足控制精度,推力波动率通常要求控制在 5% 以内。外形尺寸上音圈电机的外径不能过大,过大的外径在平台运动过程中可能会发生干涉,取外径最大值不大于 60 mm。由平台支腿长度以及板弹簧组的高度可以确定电机高度不得超过 150 mm。由以上分析可得出音圈电机设计指标见表 3。

表 3 音圈电机设计指标

Table 3 Motor design specifications

参数	数值
行程/mm	±10
最大出力/N	≥50
推力波动率	≤5%
额定电压/V	12
外径/mm	≤60
高度/mm	≤150

2.3 永磁材料的选择

在音圈电机设计中,传统上永磁体大多数采用

的是轴向充磁结构,这是由于轴向充磁工艺比较简单,而径向充磁的工艺比较复杂,但是随着充磁技术的迅速发展,径向充磁已经可以满足实际的需求。径向充磁有很大的优势,可以提高永磁体的利用率,故采用径向充磁方式。图 11 为轴向充磁与径向充磁示意图。

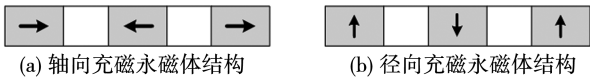


图 11 音圈电机充磁方式

Fig. 11 Voice coil motor magnetization method

用于音圈电机的永磁材料包括铝镍钴永磁材料、铁氧体永磁材料、稀土永磁材料^[11],如图 12 所示,从图中可以看出,稀土永磁材料(曲线 A)的磁感应强度(B)增长趋势更优,相较于铝镍钴永磁材料(曲线 B)和铁氧体永磁材料(曲线 C),能够在一定的磁场强度(H)变化下,获得更高的磁感应强度,这表明稀土永磁材料具有更强的磁性能,更能满足对永磁体高磁性能的需求,且相较于其他 2 种材料,其价格属于中下水平,力学性能较好,故选择稀土材料 NdFe35 作为音圈电机的永磁材料。剩磁 B_r 为 1.17 ~ 1.21 T,矫顽力 H_c 为 860 ~ 915 kA/m。

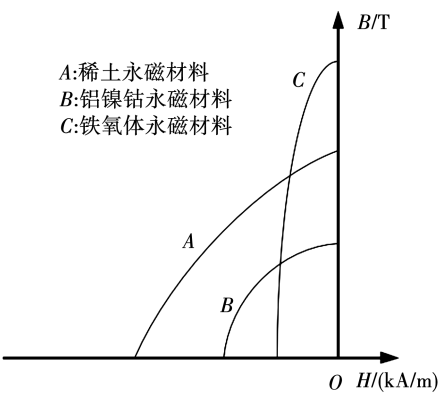


图 12 3 种磁性材料对比图

Fig. 12 Comparison chart of three magnetic materials

2.4 永磁体尺寸计算

设计永磁体的首要步骤是要确定永磁体工作点。为了便于设计,永磁体工作点常使用作图法确定,如图 13 所示,为永磁体的退磁曲线,在退磁曲线上过 H_c 、 B_r 两点,分别作平行于 H 轴和 B 轴的直线相交于一点 C ,连接 OC 交永磁材料退磁曲线于点 D ,则点 D 就是所求得的最佳工作点。

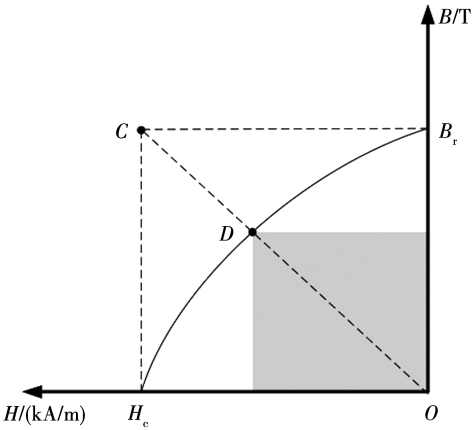


图 13 永磁体退磁曲线

Fig. 13 Demagnetization curve of permanent magnet

假设软磁材料磁阻为 0,在最佳工作点 D 时,磁感应强度为 B_D 。由磁学基本定律可得永磁体的最佳径向厚度 L_m 为

$$L_m = \frac{B_D L_g}{H_D \mu_0} \tag{5}$$

式中: H_D 为永磁体工作点的磁场强度; B_D 为永磁体工作点的磁通密度; μ_0 为空气中的磁导率; L_g 为工作气隙的长度。

结合理论分析和工程实际经验,音圈电机实际工作时的气隙磁密为 0.4 T,设计气隙长度为 5 mm。在径向充磁磁路中有

$$B_g = B_r \frac{R_0}{R_g + R_0} = B_r \frac{L_m}{L_m + L_g} \tag{6}$$

式中: R_0 为磁路磁阻; R_g 为气隙磁阻。对式(6)变形并代入数据得

$$L_m = \frac{\frac{B_g L_g}{B_r}}{1 - \frac{B_g}{B_r}} = \frac{\frac{0.4}{1.21} \times 5}{1 - \frac{0.4}{1.21}} = 2.47 \text{ mm} \tag{7}$$

在实际设计时,考虑到电感、漏磁等因素的影响,要留有一定的裕量。并且高性能稀土永磁体成本高昂,约占电机总成本的 45%^[12],在性能满足要求的前提下,应该尽量降低永磁体用量,因此取永磁体的厚度 L_m 为 3 mm。目前音圈电机多采用的为环形永磁体,如图 14 所示,环绕于内部磁轭周围,但这种结构存在一定的安全隐患,由于环形永磁体为径向充磁,内环极性相同产生排斥力,使永磁体在使用过程发生崩裂等现象,影响音圈电机的可靠性,故将环形永磁体改为瓦片状结构,如图 15 所示,放置于

外部磁轭内侧。



图 14 环形永磁体

Fig. 14 Annular permanent magnet



图 15 瓦片状环形永磁体

Fig. 15 Permanent magnet arc segment

电机行程为 ± 10 mm,线圈绕组取 20 mm,为保证绕组在隔振行程上的有效长度尽可能维持最大值,所以初步确定永磁体长度为 40 mm。设计电机的外径为 60 mm,外壳壁厚 1 mm,根据电机外径、外壳壁厚和外磁轭厚度可确定出永磁体的内缘半径为 21 mm,外缘半径 24 mm,采用 8 个单向充磁的瓦型永磁体拼接成环形磁体。每一个瓦型磁体的圆心角为 45 度,尺寸图与三维模型如图 16、图 17 所示。

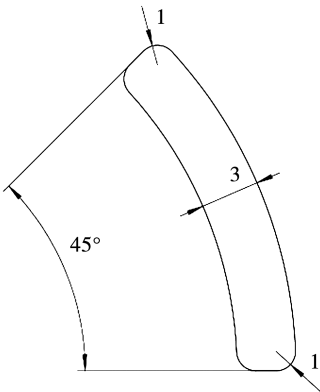


图 16 瓦片截面尺寸

Fig. 16 Tile section dimensions

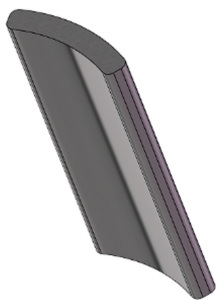


图 17 瓦片三维模型

Fig. 17 Roof tile 3D model

2.5 软磁材料的选择与设计

永磁体在电机中负责提供所需的磁能,还需要软磁材料来一起组成磁回路,软磁材料是能够快速响应外部磁场的变化,且能够低损耗的获得高磁感应强度的材料,常见的软磁材料包括硅钢片、电工纯铁、铁镍合金、铁铝合金、软磁铁氧体等,电工纯铁 DT4C 材料与其他软磁材料相比,具有高饱和磁化强度,对磁路的影响很小,同时具有成本较低,便于加工等优点,本文选择电工纯铁作为软磁材料,电工纯铁的 $B-H$ 曲线如图 18 所示。

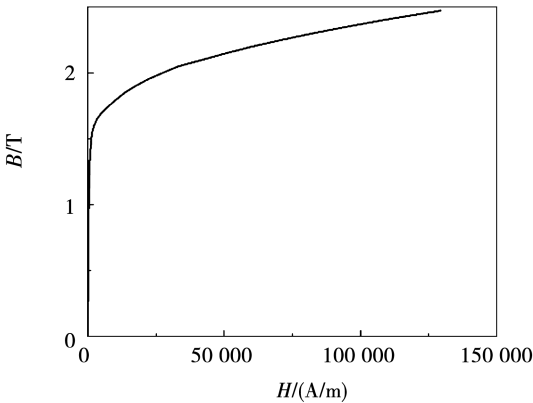


图 18 电工纯铁的 $B-H$ 曲线

Fig. 18 $B-H$ curve of armco iron

在本次设计中,音圈电机的外径是 60 mm,壁厚是 1 mm,所以软磁结构的直径是 58 mm,设计外磁轭厚度为 5 mm,内磁轭直径为 32 mm。结合前一小节确定的永磁体长度和预留空间,设计软磁材料的高度为 120 mm,如图 19、图 20 所示。

目前已经完成了永磁体和软磁材料的设计,具体参数如表 4 所示,参数标注见图 21。

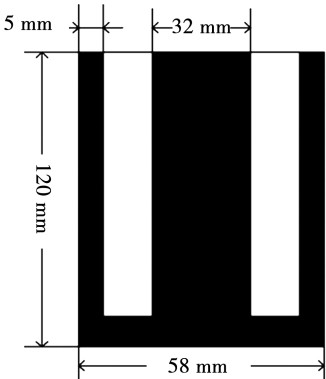


图 19 软磁结构截面尺寸

Fig. 19 Dimensions of soft magnetic structure section

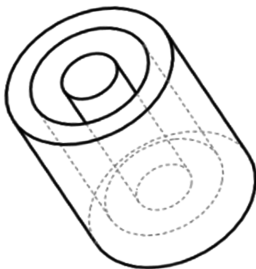


图 20 软磁结构三维示意图

Fig. 20 3D schematic diagram of soft magnetic structure

表 4 电机结构参数

Table 4 Motor structural parameters

参数	数值
电机半径 r_0/mm	30
内磁轭半径 r_1/mm	16
外磁轭和壳体总厚度 r_2/mm	6
气隙长度 l_g/mm	5
永磁体径向厚度 l_m/mm	3
永磁体轴向长度 L_1/mm	40
永磁体间轴向长度 L_2/mm	20
电机轴向高度 L_3/mm	120

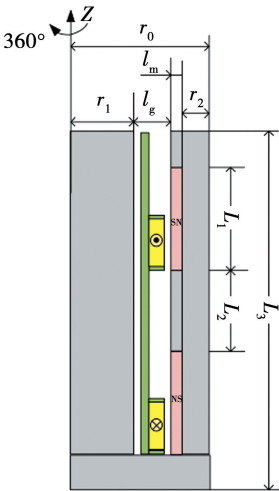


图 21 电机结构参数标注图

Fig. 21 Annotated drawing of motor structure

2.6 线圈绕组的设计

音圈电机初级结构参数标注如图 22 所示,已知气隙长度为 5 mm,考虑实际加工精度和装配难度,设计绕组骨架距永磁体和内磁轭的距离都为 0.4 mm,则骨架加绕组的厚度为 4.2 mm,绕组厚度一般可达 2.8 ~ 3 mm,则骨架厚度为 1.2 ~ 1.4 mm,绕组骨架部分结构尺寸参数如表 5 所示。考虑工况负载选取航空硬铝作为骨架的材料可以很好地满足机械强度的要求,且铝的导热系数大,有利于绕组散热。

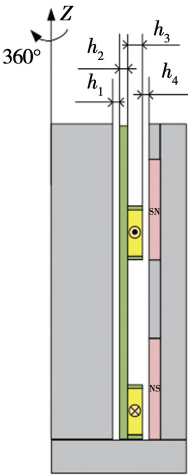


图 22 绕组骨架结构参数标注图

Fig. 22 Annotated drawing of winding frame structure

表 5 绕组骨架结构参数

Table 5 Winding frame structural parameters

参数	数值
绕组骨架距内磁轭距离 h_1/mm	0.4
绕组骨架厚度 h_2/mm	1.4
绕组厚度 h_3/mm	2.8
绕组骨架距永磁体距离 h_4/mm	0.4

绕组的设计包括匝数、线径、绕制排数等。骨架凹槽深度 2.8 mm,轴向长度 19 mm,导线采用并排密绕的方式,为了保证进线与出线同侧,所以只能采用偶数排绕制,如图 23 所示。当绕组采用 2 层、4 层或 6 层偶数层时,讨论对比绕组在凹槽中的槽满率 k_1 以及绕组的总电阻 R_l 。

单根导线结构如图 24 所示, d_1 为铜芯直径, d_2 为漆包线直径。

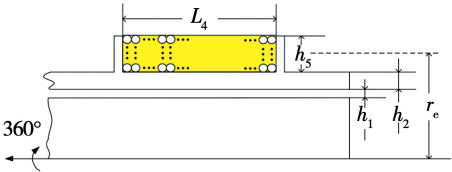


图 23 线圈绕制方式示意图

Fig. 23 Schematic diagram of coil winding method

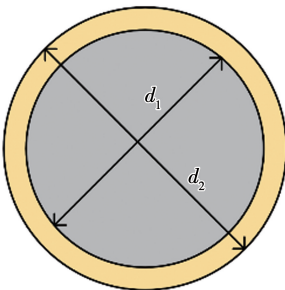


图 24 导线截面图

Fig. 24 Cross-sectional view of a conductor

已知骨架凹槽深 2.8 mm,则漆包线外径 d_2 为

$$d_2 = \frac{h_3}{n_1} \tag{8}$$

式中 n_1 表示线圈绕制排数。线圈的轴向匝数 n_2 为

$$n_2 = \frac{L_4}{d_2} \tag{9}$$

单个绕组总匝数 n_3 为

$$n_3 = n_1 \times n_2 \tag{10}$$

单个绕组总截面积 S_1 为

$$S_1 = n_3 \pi \left(\frac{d_2}{2} \right)^2 \tag{11}$$

绕组的槽满率 k_1 为

$$k_1 = \frac{S_1}{S_2} \tag{12}$$

式中 S_2 为绕组骨架凹槽的截面积。表 6 为不同偶数层下的槽满率。

表 6 各绕制层数的槽满率

Table 6 Slot fill factor for each winding layer

参数	2 层	4 层	6 层
漆包线直径 d_2/mm	1.4	0.7	0.46
轴向匝数 n_2	13	27	41
总匝数 n_3	26	108	246
漆包线截面积 S_1/mm^2	40.02	41.56	40.88
槽满率 k_1	0.752	0.781	0.768

由工程经验漆包线的漆膜厚度一般在 0.05 mm,所以铜芯的直径为

$$d_1 = d_2 - 0.05 \times 2。$$

(13)

得出铜芯的截面积 S_{Cu} 为

$$S_{Cu} = \frac{\pi d_1^2}{4}。$$

(14)

由图 23 得出线圈的等效半径 r_e 为

$$r_e = r_1 + h_1 + h_2 + \frac{h_5}{2}。$$

(15)

线圈绕制一圈的等效周长 C_e 为

$$C_e = 2\pi r_e。$$

(16)

单个绕组线圈总长 L_i 为

$$L_i = n_3 C_e。$$

(17)

所设计的音圈电机有 2 个绕组,所以电机绕组总长 L'_i 为

$$L'_i = 2L_i。$$

(18)

根据电阻定义公式,得出绕组线圈的总电阻 R_i 为

$$R_i = \rho_{Cu} \frac{L'_i}{S_{Cu}}。$$

(19)

式中 ρ_{Cu} 为线圈铜芯在常温下的电阻率, ρ_{Cu} 为 $1.75 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{mm}$ 。表 7 计算了不同层数下漆包线芯截面积、电机绕组总长等参数。

表 7 不同层数下的绕组参数

Table 7 Winding parameters under different layers

参数	2 层	4 层	6 层
铜芯直径 d_1/mm	1.3	0.6	0.36
铜芯截面积 S_{Cu}/mm^2	1.33	0.283	0.102
绕组总长 L'_i/mm	5 816	24 157	55 025
绕组总电阻 R_i/Ω	0.07	1.49	9.44
铜耗/ W	32.335	39.895	48.716

从表 7 中看出随着层数的增加,线圈线径会变小并且匝数会增大,这意味着电阻会变大,在相同电流值情况下,意味着铜耗会增加,发热量也会增加,为了提高电机的效率,应该尽可能减小铜耗,减小发热,则理论上应选择最小的排数,但是采用两排绕制在工程实际中会造成绕组绕制困难,所以采用 4 层绕制,漆包线最大外径为 0.6 mm 时,便于实际绕组

绕制。

3 音圈电机的电磁仿真研究

Ansoft Maxwell 是工程中常用的电磁场有限元仿真软件,非常适合用于分析电机、变压器等电磁或永磁设备的电磁场问题^[13]。因此,本文选用 Maxwell 作为音圈电机的仿真分析工具。

根据电机结构设计确定的材料和结构参数建立音圈电机的二维有限元仿真模型。因为电机结构关于中心轴对称,所以建立模型时建立电机的半剖面来代替整个电机^[14]。Maxwell 仿真建模如图 25 所示。

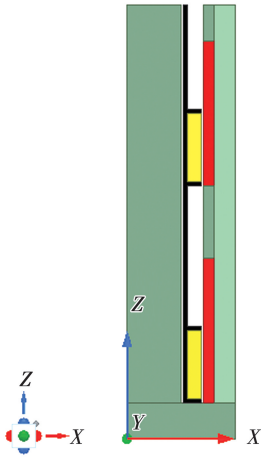


图 25 电机仿真模型

Fig. 25 Motor simulation model

建完模型后,首先,赋予各部件材料,图中绕组材料为铜,永磁体为钕铁硼 NdFeB - N35SH 径向充磁,剩下的软磁材料为电工纯铁 DT4C,其次给电机设置网格并生成空气域赋予边界条件,最后设置求解器参数,检查无误后运行仿真。电机的磁力线分布如图 26 所示,由电机的磁力线分布图可以看出,电机上端开口处存在一些漏磁,但是磁力线在气隙中大部分是垂直通过线圈绕组的。电机的磁密分布如图 27 所示。

图 28 为气隙的磁通密度曲线,可以看出采用 NdFeB - N35SH 永磁材料,有效工作气隙磁密上半段幅值为 0.42 T,下半段幅值为 0.38 T,基本满足设计时所要求的 0.4 T。

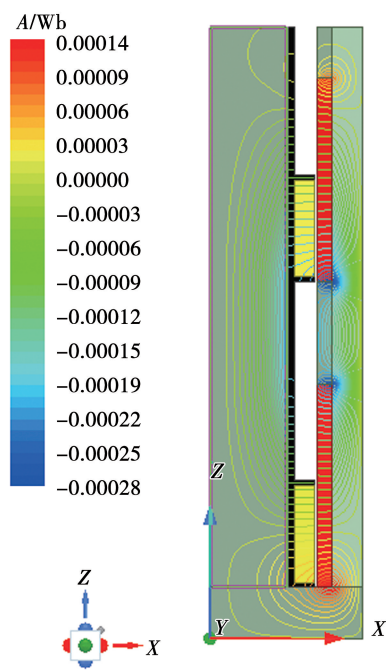


图 26 磁力线分布图

Fig. 26 Magnetic flux line distribution diagram

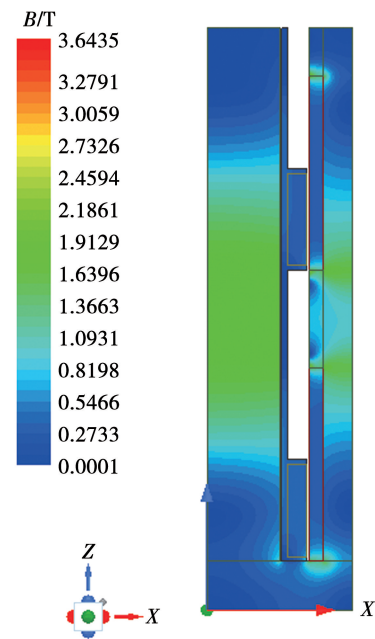


图 27 磁密分布云图

Fig. 27 Magnetic flux density distribution contour map

考虑动子移动至永磁体两端时会有一定漏磁造成受力大幅下降,故取电机有效工作行程为 $\pm 9\text{ mm}$,电机在 5 A 电流下对应的力-位移曲线如图 29 所示,可见在有效工作行程段,电机受力较为平滑,电机的推力波动一般采用推力波动率指标来

分析衡量^[15],其表达式为

$$\Delta_F = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{2F_{\text{av}}} \quad (20)$$

式中最大推力为 51.88 N ,最小推力为 49.69 N ,在有效工作行程内的平均推力为 51.26 N ,推力波动率为 2.136% ,满足音圈电机的设计要求。

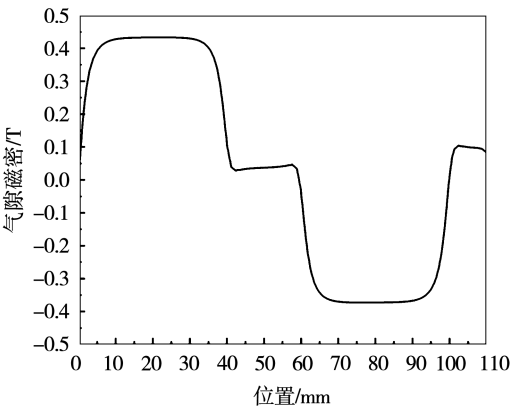


图 28 气隙磁密曲线

Fig. 28 Air gap magnetic flux density curve

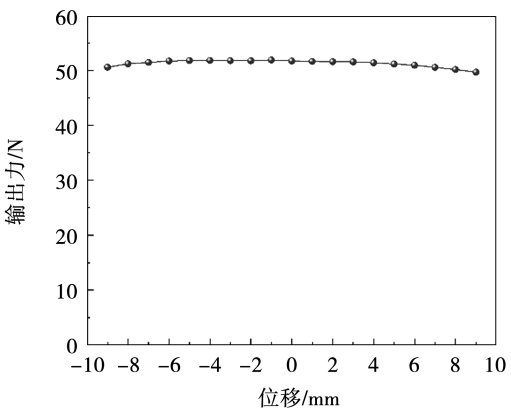


图 29 力位移曲线

Fig. 29 Force displacement curve

在完成电机的结构设计与电磁仿真分析后,使用 SolidWorks 建立了电机的物理模型,为后续的生产加工做好准备。如图 30(a)所示,为电机三维模型,图 30(b)为电机内部结构图,图 30(c)为电机横向截面图,图 30(d)为电机纵向截面图。

电机设计完成后,将板弹簧与音圈电机连接在一起组成音圈电机隔振器。图 31 为隔振器三维模型,图 32 为隔振器截面图。

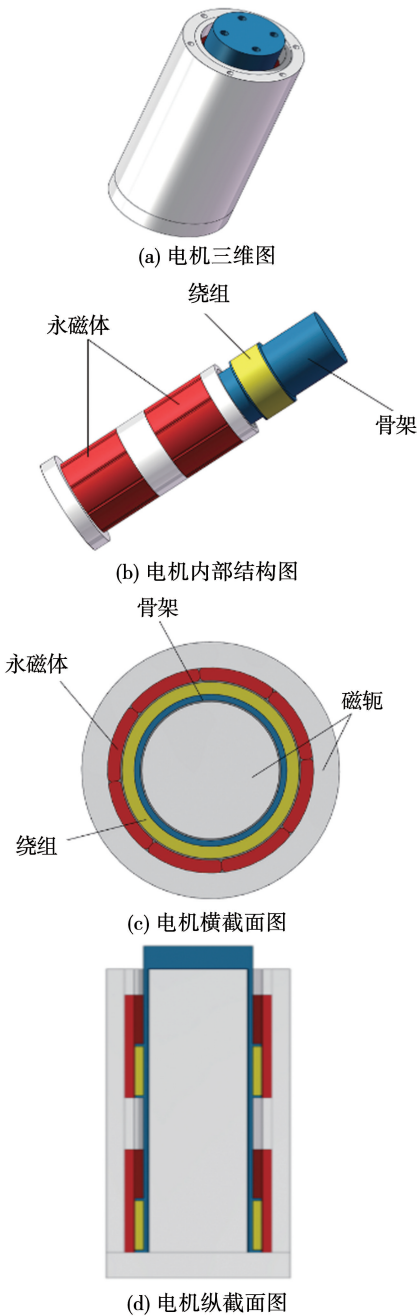


图 30 音圈电机结构组成

Fig. 30 Structure composition of voice coil motor



Fig. 31 3D model of vibration isolator

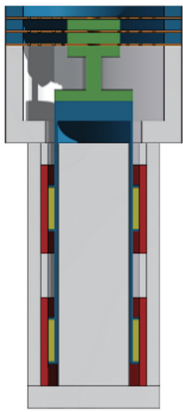


Fig. 32 Cross-sectional view of isolator

4 音圈电机静态出力实验

通过理论解析计算和有限元仿真设计了一款用于隔振的动圈式音圈电机,联系厂家制作了电机样机,并搭建了电机样机的静态出力实验测试台,对样机的静态推力进行了测试,图 33 为电机的测试平台。



Fig. 33 Motor testing rig

电机静态出力实验台包括音圈电机样机、电机导向支架、滑轨、力传感器、开关电源、功率放大器、实验室用电源等,如图 34 所示。实验流程为开关电源为功率放大器和力传感器提供基础电力,功率放大器接收实验室用电源信号源的小信号,将其放大为足够功率的驱动电流,输入到音圈电机中,音圈电机根据“通电线圈在磁场中受力”的原理,将电流转化为静态推力或拉力,音圈电机输出的力通过连接

杆传递到力传感器上,数值由显示屏读出。

图 35 为实验结果与仿真结果对比图,从图中可以看出,实验与仿真数据具有相同的走势,相近的极值点,验证了仿真结果的正确性。实验平均推力测量值与仿真值存在误差,首要原因在于样机的气隙磁密分布不均,从而使电机的电磁力偏于轴向位置,其次是电机实验平台设计精度问题可能会导致电机同心度的偏差,从而导致有些许的摩擦产生,上述因素都会导致实验结果略小于仿真结果。

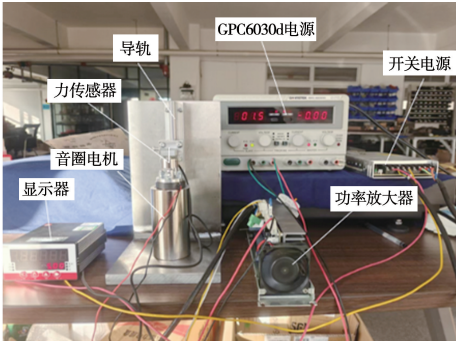


图 34 电机实验平台

Fig. 34 Motor experimental platform

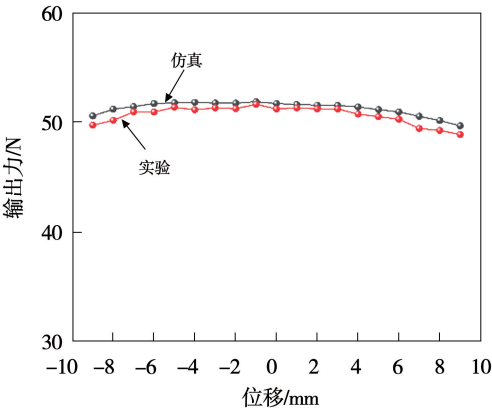


图 35 电机力位移曲线对比

Fig. 35 Comparison of motor force-displacement curves

5 结 论

本文设计了一款用于斯图尔特隔振平台的动圈式音圈电机隔振器。通过理论计算、仿真分析及实验对比,得出如下结论:

1)通过音圈电机并联三排板弹簧组,解决了现有音圈电机难以承担静态负载和缺乏导向机构的关键问题;

2)通过合理设计永磁体与绕组的径向尺寸,使绕组在隔振行程上的有效长度稳定,提高了有效行程上的电机平均出力并降低了推力波动。仿真及实验结果表明,在 5 A 电流下,该隔振器在有效行程内实现了高平均推力 51.26 N 和极低的推力波动率 2.136%,满足了音圈电机的设计指标。

该研究提出的音圈电机集成式设计方案,为大行程、高精度、低推力波动的直线电机设计提供了新的思路。在应用局限性方面,本文是基于车辆行驶在高速公路或城市道路的研究工况来设计的,对于乡村道路及路面不平度更加恶劣的道路来说存在一定的使用局限。

参 考 文 献:

[1] 张阳,周惠兴,曹荣敏,等. 基于有限元分析的弧形音圈电机综合优化设计[J]. 微电机, 2010, 43(11): 28.
ZHANG Yang, ZHOU Huixing, CAO Rongmin, et al. Comprehensive optimum design of a rotary VCM based on FEM[J]. Micromotors, 2010, 43(11): 28.

[2] 郭晓东. 柔性车载多维隔振平台的设计与分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.

[3] 黄学良,张前,周赣. 一种无铁 Halbach 型永磁直线电机[J]. 电工技术学报, 2010, 25(6): 1.
HUANG Xueliang, ZHANG Qian, ZHOU Gan. Halbach permanent magnet ironless linear motors [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(6): 1.

[4] LIU Yu, ZHANG Ming, ZHU Yu, et al. Optimization of voice coil motor to enhance dynamic response based on an improved magnetic equivalent circuit model[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(9): 2247.

[5] ZHU Z Q, CHEN X. Analysis of an E-core interior permanent magnet linear oscillating actuator[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(10): 4384.

[6] 王宇谦. 车载精密仪器 Stewart 减振平台的性能分析及参数优化[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.

[7] TSAI L W. Solving the inverse dynamics of a Stewart-Gough manipulator by the principle of virtual work[J]. Journal of Mechanical Design, 2000, 122(1): 3.

[8] 卢凡,陈思忠. 汽车路面激励的时域建模与仿真[J]. 汽车工程, 2015, 37(5): 549.
LU Fan, CHEN Sizhong. Modeling and simulation of road surface excitation on vehicle in time domain[J]. Automotive Engineering, 2015, 37(5): 549.

optimized predictive control for dual three-phase PMSM with quick current response[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(4): 4453.

[17] YANG Ming, LANG Xiaoyu, LONG Jiang, et al. Flux immunity robust predictive current control with incremental model and extended state observer for PMSM drive[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(12): 9267.

[18] LIU Senyi, LIU Chunhua. Virtual-vector-based robust predictive current control for dual three-phase PMSM [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(3): 2048.

[19] 周湛清, 刘立辉, 耿强. 基于虚拟矢量的双三相永磁同步电机预测电流控制策略[J]. 天津工业大学学报, 2023, 42(5): 67.

ZHOU Zhanqing, LIU Lihui, GENG Qiang. Predictive current control strategy of dual three-phase permanent magnet synchronous motor based on virtual vector[J]. Journal of Tiangong University, 2023, 42(5): 67.

[20] ZHANG Yongchang, JIN Jialin, HUANG Lanlan. Model-free predictive current control of PMSM drives based on extended state observer using ultralocal model [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(2): 993.

[21] AGORO S, HUSAIN I. Model-free predictive current and disturbance rejection control of dual three-phase PMSM drives using optimal virtual vector modulation[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2023, 11(2): 1432.

(编辑:朱美华)

(上接第 137 页)

[9] 夏瑞阳. 圆柱形音圈电机结构的设计及优化[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2012.

[10] 陈登硕. 基于电磁作动器的 Stewart 隔振平台振动主动控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.

[11] 曹水亮. 面向固晶机的音圈电机优化设计与控制仿真[D]. 广州: 广东工业大学, 2013.

[12] 刘栋良, 李阿强, 刘伟, 等. 电动汽车用永磁辅助同步磁阻电机转子优化[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(9): 119.

LIU Dongliang, LI Aqiang, LIU Wei, et al. Rotor optimization of permanent magnet-assisted synchronous reluctance motor for electric vehicles[J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(9): 119.

[13] 池维超. 基于电磁作动器的整星主被动一体化隔振技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.

[14] 王晓伟. 高推力密度圆筒型音圈电机的结构设计研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.

[15] AIGOUY G, ROWE S, PIETON A, et al. Development of the plain bearing & flexure bearing MICA300CM actuator[C]//ACTUATOR 2018; 16th International Conference on New Actuators, June 25 -27, 2018, Bremen, Germany. 2018: 1 -4.

(编辑:刘琳琳)