

# 空气辅助燃油喷嘴机-电-磁耦合特性仿真

回越<sup>1</sup>, 章振宇\*<sup>1</sup>

(1. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081)

## Simulation of Mechanical-Electrical-Magnetic Coupling Characteristics of Air-Assisted Fuel Injector Nozzle

HUI Yue<sup>1</sup>, ZHANG Zhenyu<sup>1</sup>

(1. School of mechanical engineering, Beijing Institute of Technology, 100081, China)

**Abstract:** In order to solve the problems and challenges brought by the high coupling of mechanical, electromagnetic, electronic control, fluid and other disciplines during the working process of air-assisted fuel nozzle, the paper adopts the numerical simulation method and explores the coupling characteristics of machine-electricity-magnetic coupling during the working process of air-assisted fuel nozzle by using the steady-state electromagnetic simulation and transient co-simulation, and deeply explored the influence of excitation strength, peak current, spring preload and spool inertia mass on the spool force and kinematic characteristics. The study found that during the process of increasing the excitation strength of the excitation coil, the force on the spool continued to increase, but the rate of increase gradually decreased. When the excitation intensity is constant, increasing the peak driving current has no obvious effect on improving the nozzle responsiveness. Since the magnetic field build-up and electromagnetic force rise are not instantaneous, increasing the spring preload will lengthen the nozzle opening hysteresis but reduce the nozzle closing delay. Reducing the inertial mass of the spool helps to reduce the movement time during the opening and closing of the nozzle and improve the responsiveness of the nozzle.

**摘要:** 为解决空气辅助燃油喷嘴工作过程中机械、电磁、电控、流体等学科高度耦合, 给喷嘴设计、选型及应用带来的诸多问题与挑战, 本文采用数值仿真方法, 利用稳态电磁特性仿真和瞬态联合仿真探索了空气辅助燃油喷嘴工作过程中的机-电-磁耦合特性, 深入探索了激励强度、峰值电流、弹簧预紧力及阀芯惯性质量对阀芯受力、运动特性影响规律。研究发现, 励磁线圈激励强度增大过程中, 阀芯受力持续上升, 但上升速率逐渐减小。激励强度不变情况下提高峰值驱动电流对提升喷嘴响应性无明显作用。由于磁场建立和电磁力上升并非瞬间完成, 弹簧预紧力增加将延长喷嘴开启迟滞, 但会降低喷嘴关闭延迟。降低阀芯惯性质量有助于减小喷嘴开启、关闭过程中的运动时间, 提升喷嘴响应性。

**关键词:** 空气辅助; 燃油喷嘴; 机-电-磁耦合

**Key words:** air-assisted; fuel nozzle; mechanical-electrical-magnetic coupling

中图分类号: TK402

文献标识码: A

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51806013), 工业和信息化部资助项目(JCKY2019602D018), 北京理工大学“青年教师学术启动计划”(2020CX04047). 科工局稳定支撑项目: WDZC-2019-JGKK-02

收稿日期: 2023-07-29

基金项目: 国防基础预研计划(JCKY2022602C004)

作者简介: 回越(1997-), 男, 博士生, 主要研究方向为空气辅助燃油喷射系统喷雾特性及雾化机理, E-mail:591689801@qq.com;

章振宇(联系人), E-mail: zhenyu.zhang@bit.edu.cn.

## 0 概述

液体燃料的雾化燃烧是火箭发动机、冲压发动机、直喷式内燃机等发动机的工作基础，喷雾雾化与燃烧性能直接决定了发动机的动力性能和经济性能<sup>[1,2]</sup>。优化液态燃油工质的喷射过程和雾化质量，是实现发动机高效燃烧和功率提升的关键环节和重要手段之一。当前内燃机燃油雾化技术主要以柴油机高压共轨技术和汽油机缸内直喷（GDI）技术为主，这两种燃油雾化方式均通过增大燃油喷射压力提升燃油雾化效果。但有研究指出<sup>[3]</sup>，当 GDI 系统燃油供给压力超过某一阈值时，继续提高喷射压力不会使燃油雾化质量获得明显提升。为了满足高功率发动机对燃油高质量雾化的需要，近年来空气辅助燃油喷射技术逐渐应用至发动机燃油喷射系统。空气辅助燃油喷射系统引入高压空气辅助雾化，喷射过程中喷油器将定量燃油喷入预混腔内部与高压空气混合，随后空气辅助喷嘴打开，预混腔内高压油气混合物在压差的作用下以高速射流形式喷出，在气液界面间的强相互作用下燃油液滴进一步发生破碎和雾化，这使得空气辅助燃油喷射系统可以在较低的喷射压力下实现与高压共轨喷射系统相当的雾化效果。并且，由于双流体雾化过程对燃油粘度表现出显著的不敏感性<sup>[4]</sup>，空气辅助雾化技术可适用于煤油、柴油、重油等高粘燃油的喷射雾化。

空气辅助燃油喷射系统包含喷油器和空气辅助燃油喷嘴两个执行机构，前者负责实现燃油定时定量喷射，后者负责生成高速气液射流<sup>[5]</sup>，提升燃油雾化质量。空气辅助燃油喷嘴本质上是一个低阻电磁驱动喷嘴，利用喷嘴内部的励磁线圈和衔铁，将激励源输入的电能转化为机械能，产生电磁力以控制喷嘴开启和关闭。针对电磁驱动喷嘴的仿真计算，前人已经进行了一系列研究。2008 年，澳大利亚皇家墨尔本理工大学的研究人员<sup>[6]</sup>采用数学建模和有限元仿真的方法，建立了喷油器电磁阀的数学模型和有限元仿真模型，研究发现，喷嘴的结构参数如几何形状、材料特性、气隙约束、边界条件、运动部件质量、阻尼系数，以及控制参数如激励源等参数均会影响喷嘴工作过程；2019 年，韩国蔚山大学研究人员<sup>[7-9]</sup>设计开发了一种高压天然气喷嘴，并分别建立了电气模型和力学模型描述其驱动和运动状

态，在此基础上利用 Maxwell 和 Simplorer 对电磁喷嘴进行了建模和仿真。深入研究了驱动电流、电磁力和柱塞位移对喷嘴工作特性的影响，并建立了相关实验系统，得到了不同线圈参数和柱塞尺寸等机械结构对喷嘴工作特性的影响规律；上海交通大学研究人员<sup>[10,11]</sup>针对电磁驱动喷嘴采用瞬时电磁仿真模拟方法，计算了超高速电磁喷油器的功率损耗、温度分布和动态响应，仿真结果表明，在不同驱动策略下，电磁喷油器的功率损失存在显著差异，从而导致了喷油器性能的差异；北京理工大学的研究人员<sup>[12-14]</sup>利用 Ansoft Maxwell 对音圈电机的静电磁特性进行仿真研究，得到了包括激励强度和结构参数对电磁力的影响，并详细说明了产生影响的原因。

上述研究表明，电磁驱动喷嘴的材质、结构、驱动方式等均会对喷嘴工作特性产生相应影响，采用数值模拟的方法对喷嘴进行结构优化和特性分析是可行且十分必要的。另外，由于空气辅助燃油喷嘴工作过程包含燃油喷射雾化、气液混合、高速气液射流、机械元件受力运动以及电路响应、电磁感应等，是机械、电路、电磁等学科的复杂耦合，单独对其中某一个学科的分析难以获得喷嘴完整的工作过程参数。因此，本文首先从电磁场基本理论出发，建立了空气辅助燃油喷嘴三维电磁仿真模型，并通过与试验测试电磁力对比，验证了模型的准确性。然后在喷嘴稳态电磁仿真基础上，借助 Maxwell 和 Simplorer，分别搭建喷嘴外部驱动电路和阀芯惯性运动模块并实现与电磁仿真模块的耦合，从而实现对喷嘴电路、电磁和机械运动全工作过程的瞬态仿真，并对喷嘴工作过程中的不同控制参数开展对比分析，探究喷嘴工作特性随驱动强度、最大驱动电流、弹簧预紧力及运动惯性质量的变化规律。

## 1 空气辅助燃油喷嘴结构及工作原理

空气辅助燃油喷嘴结构如图 1 所示，主要包括阀体、阀芯、阀身、阀尾、衔铁、弹簧以及励磁线圈和磁轭<sup>[15]</sup>，其中阀体、阀身和阀尾组成喷嘴主体的外部支撑结构，阀芯和衔铁则构成喷嘴内部的运动部件，两部分间设置有弹簧，用于为运动部件提供轴向力，在喷嘴关闭时将阀芯压紧在阀体上，实

收稿日期：2023-07-29

基金项目：国防基础预研计划（JCKY2022602C004）

作者简介：回越（1997-），男，博士生，主要研究方向为空气辅助燃油喷射系统喷雾特性及雾化机理，E-mail:591689801@qq.com;

章振宇（联系人），E-mail: zhenyu.zhang@bit.edu.cn。

现喷嘴密封，在喷嘴开启后控制机构断电时，使阀芯重新落座。

瞬态特性，开展相关探索工作。

## 2 机电磁联合仿真模型搭建

空气辅助燃油喷嘴工作过程涉及驱动电路、电磁转换、机械运动以及双流体雾化过程，因此其动态特性会受到各环节关键参数的综合影响，不考虑气液混合和破碎雾化过程，空气辅助喷嘴工作过程

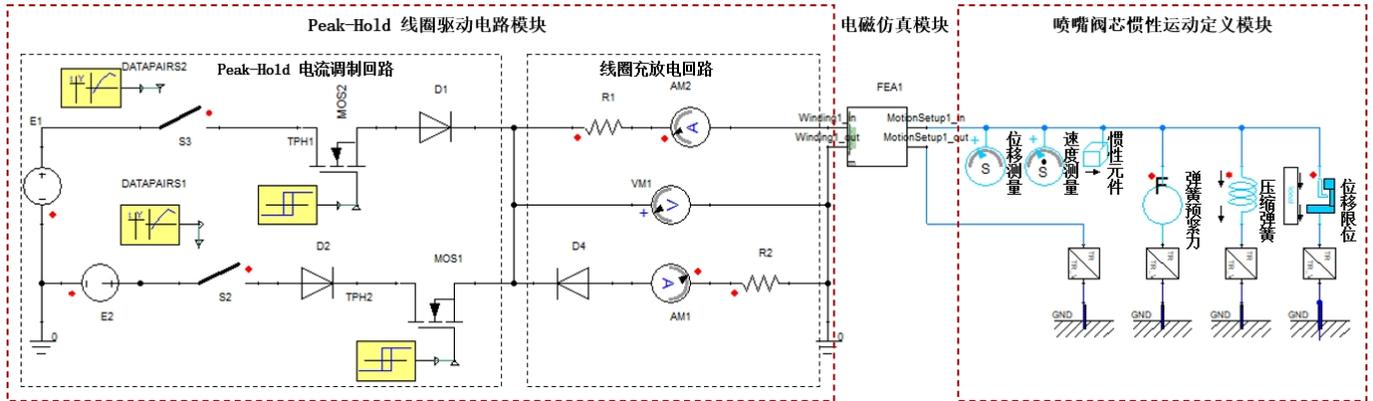


图 2 喷嘴机-电-磁联合仿真模型图

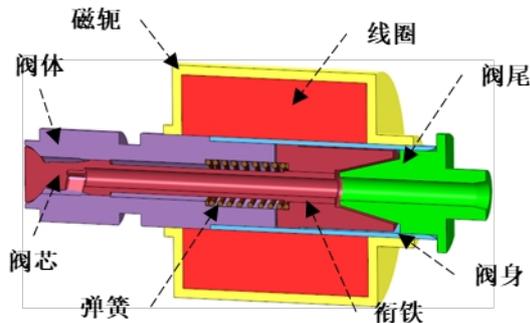


图 1 空气辅助燃油喷嘴结构

与高压共轨喷嘴由内部固定的微型平面电磁铁吸引衔铁打开低压油路阀从而使喷嘴打开的控制原理不同，空气辅助燃油喷嘴采用外置励磁线圈驱动设计，励磁线圈及磁轭固定在喷嘴主体上，与喷嘴内部衔铁和阀体配合产生电磁力。这种设计保证了励磁线圈工作过程中不接触喷嘴内部的高压油气混合物，磁轭也不需要额外的密封承压设计，但由于励磁线圈与衔铁间阀身薄壁管的存在，励磁线圈产生的感应磁力线必须穿过阀身，才能够与阀体、衔铁、磁轭形成完整的磁路闭环，所以阀身的材质选取十分关键，阀身材料的电磁特性将影响整个喷嘴感应磁场的产生和维持。前期研究中发现，阀身材质选取为铜时，喷嘴整体具有良好的电磁特性，磁轭的厚度及位置同样对喷嘴电磁特性有着显著影响。本文在此前研究的基础上，针对喷嘴机-电-磁耦合

本质上是由励磁线圈控制的高速电磁阀，负责将来

自激励源的电能转换为机械能，而其能量转换过程与喷嘴瞬态响应特性密切相关。因此，探究空气辅助燃油喷嘴瞬态工作特性十分必要。

### 2.1 机电磁联合仿真模型简介

空气辅助燃油喷嘴实际工作过程涉及电路、磁场、机械运动以及流场多个物理场，且场间存在密切耦合，在控制系统的作用下，电路中的激励源提供磁动势，并建立磁场，机械元件在磁场中产生感应电磁力并产生机械运动，使喷嘴流通截面发生改变，喷嘴内部高压两相流体形成流场并向外部环境喷出，进一步破碎雾化，根据实际流动和雾化特性，控制系统进一步优化控制信号，重复上述过程。但与此同时，磁场的快速变化会激发感应电动势，另外衔铁运动会导致磁路中磁链发生改变，进而影响激励源<sup>[16]</sup>；而喷嘴流场建立过程中，喷嘴内部压力作用在阀芯-衔铁连接体上的轴向分量也会随之改变，进而影响部件运动特性。

为探明喷嘴工作过程中上述多物理场耦合关系，本文利用 ANSYS Maxwell 和 Simplorer 平台建立喷嘴机-电-磁多学科仿真模型，在仿真平台中分别搭建空气辅助燃油喷嘴机械部分、电磁仿真部分以及驱动电路部分，在静态电磁仿真的基础上，深入探究喷嘴工作全过程驱动特性（驱动电压、驱动电流、电感、反向电动势）以及阀芯运动规律（受力、加

速度、速度、位移)。

根据功能分别完成上述机、电、磁三个子模块的搭建后,整合至同一个模型如图 2 所示,电磁仿真模块作为中间媒介,分别与驱动电路模块以及惯性运动模块相连,其中驱动电路模块作为外部激励源,为电磁仿真模块中励磁线圈提供电流激励,惯性运动模块则引入电磁仿真模块中的电磁力计算结果,并返回阀芯-衔铁连接体的位移、速度、加速度等运动特性。后文将详细介绍机电磁三个子模块的搭建过程,并基于整合后的联合仿真模型开展喷嘴工作特性的仿真计算。

## 2.2 电磁仿真模型建立过程

根据空气辅助燃油喷嘴基本结构,喷嘴三维仿真模型由负责密封和雾化的喷嘴出口、负责产生感应磁场的励磁线圈结构以及在电磁场中产生轴向力推动喷嘴开启的衔铁等部分组成,由于喷嘴出口部分距离感应磁场距离较远,且对喷嘴磁场建立过程影响较小,所以在电磁仿真过程中对喷嘴结构适当简化,只保留喷嘴电磁特性影响较大的相关结构。用于电磁仿真的经过简化的喷嘴模型省去了内部的弹簧,并为了提高建模速度将出口球面改为锥面,最终建立相应喷嘴电磁仿真模型如图 3(a)所示。

当励磁线圈通入励磁电流时,由于电磁感应作用励磁线圈周围产生感应磁场,磁轭本身不产生磁场,其作用是传导线圈感应磁场所产生的磁感线,并将磁感线限制在磁轭体内部,尽量减少磁感线向外部扩散,减轻漏磁现象。衔铁在感应磁场的作用下受力运动,与阀体间的气隙逐渐减小,由于空气的磁导率远小于磁介质,在喷嘴部件组成的磁回路中,气隙的磁阻远大于其他部件,对喷嘴感应磁场的建立过程的影响远大于其他部件。

为同时对比多个仿真工况,Maxwell 支持自定义模型参数并随仿真进程自适应更新,利用并行运算方式,可大幅提高仿真效率。为实现喷嘴尺寸参数更新,在 Maxwell 中重新搭建仿真模型,并采用非结构四面体网格结构进行网格剖分,如图 3(b)、(c)、(d)、(e)所示。为提高仿真效率,采用软件自带的 TAU 网格划分方法,通过平衡网格的可靠性、生成速度、网格质量、网格尺寸和结构特征,生成高质量网格。另外,软件提供的多种网格细化方式,如限制表面网格最大尺寸、内部网格最大尺寸、表层网格深度、网格划分分辨率等,可进一步提升网格质量,提高模型计算的收敛速度,节省计算时间。喷嘴各元件模型的物理属性、边界设置以及求解器

设置等详细信息如表 1 所示。

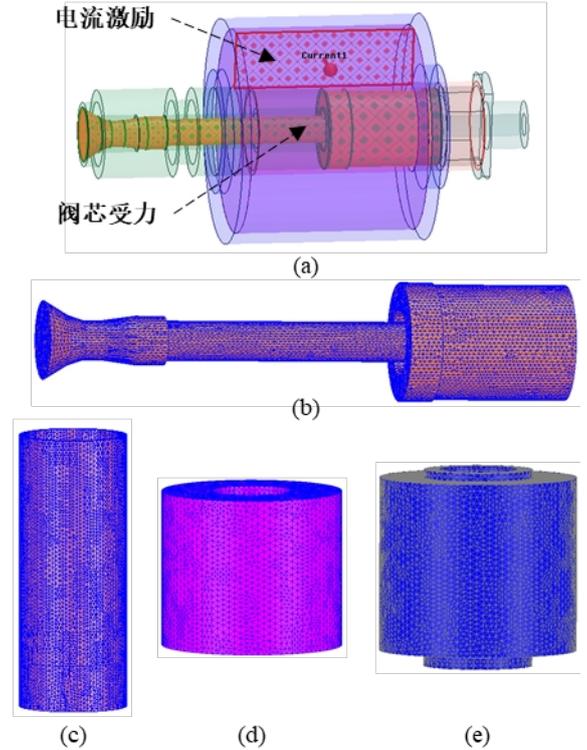


图 3 (a)喷嘴电磁仿真模型及网格划分: (b) 阀芯; (c) 阀身; (d) 线圈; (e) 磁轭

表 1 电磁仿真模型详细参数

项目	名称	分类/单位	设置/数值
物理属性	励磁线圈	材料属性	铜
		相对磁导率	0.999991
		线圈匝数	400
	磁轭	材料属性	08#钢
		相对磁导率	$\geq 5.17$
	阀身	材料属性	变量
		相对磁导率	$\geq 5.17$
	衔铁	材料属性	08#钢
		相对磁导率	$\geq 5.17$
	阀体、尾部	材料属性	08#钢
相对磁导率		$\geq 5.17$	
求解域	材料属性	空气	
初始边界	励磁条件	直流电流 (A)	变量
		静态求解器设置	收敛设置
瞬态求解器设置	起止时间	开始时间 (ms)	0
		结束时间 (ms)	7

保存时间 间隔	时间间隔 (ms)	0.01
求解器	非线性残差	0.05

### 2.3 驱动控制电路模型

发动机复杂多变的工作环境对空气辅助燃油喷嘴这一喷油系统核心部件提出了高精度、快响应、灵活多变的特性需要，这需要喷嘴在极短时间内开启并维持喷射状态直至结束，然后迅速关闭并准备好进入下一个工作循环。目前，空气辅助燃油喷嘴的驱动方式主要为电流激励，在驱动电路的作用下，直流电源通过驱动芯片产生可编程 Peak&Hold 驱动电流<sup>[17]</sup>，其波形图如图 4 所示，图中  $I_{peak}$ 、 $I_{hold}$  分别代表峰值电流和保持电流， $t_p$ 、 $t_e$ 、 $t_{f0}$  分别代表峰值电流持续期、循环总时间以及固定电流检测时间间隔，上述参数均可通过编程实现自定义。

喷嘴机-电-磁联合仿真模型搭建过程中，其驱动电路部分需要实现 Peak&Hold 电流的可编程调制和输出以及励磁线圈快速充放电，电路模型图如图 2 左侧所示，其中电流调制回路可实现峰值和保持电流的驱动脉宽控制、电流检测和电流输出，线圈充放电回路可实现喷嘴电阻、电感值匹配以及加速感应电流衰减以实现喷嘴快速关闭。

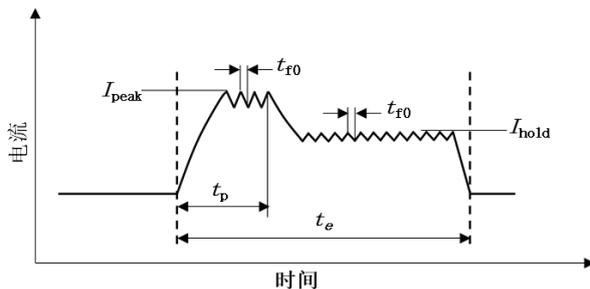


图 4 Peak&Hold 电流波形

喷嘴初始开启阶段，励磁线圈需要大电流，以在短时间内实现磁场快速建立<sup>[18]</sup>，使电磁力迅速产生进而使衔铁克服阻力开始运动，喷嘴逐渐开启；然后保持高电流，维持电磁力，保证衔铁快速作动至喷嘴完全开启；衔铁到达最大升程后，气隙减小至最低，此时磁路中磁阻降至最小，无需大电流即可保证喷嘴维持开启状态，可切换为保持电流，既能够保证喷嘴继续开启，又可降低励磁线圈发热量，减小能量损耗，延长喷嘴使用寿命。喷射过程完成后，激励源消失，由于励磁线圈的自感特性，线圈内的电流不会突然消失，而是缓慢耗散，造成喷嘴关闭迟缓。为了提高线圈中剩余电流耗散速度，在充放电回路中设置放电电阻，利用高阻值加速电

流耗散，搭配二极管，保证充电过程正常进行。

### 2.4 阀芯惯性运动模型

空气辅助燃油喷嘴内部运动部件为阀芯-衔铁连接体，初始状态下，阀芯在弹簧预紧力的作用下，压紧阀体实现气液密封；励磁线圈通电后，衔铁产生的电磁力克服弹簧预紧力，推动阀芯运动进而使喷嘴开启。在此过程中，运动部件的控制方程如下：

$$m\ddot{x} = F_{mag} - F_0 - kx \quad (1)$$

其中， $m$  为运动部件质量， $x$ 、 $\dot{x}$  分别为运动部件位移和加速度， $F_{mag}$  为电磁力， $F_0$  为弹簧预紧力， $k$  为弹簧刚度。由于阀芯-衔铁连接体移动过程中受喷嘴内部结构限制，最大位移需通过限位指定。

空气辅助燃油喷嘴机-电-磁联合仿真过程中，喷嘴机械运动模块的原理图如图 2 右侧所示，为对应喷嘴实际工作过程，模型主要包括用于定义运动部件惯性质量的惯性元件、用于施加初始弹簧预紧力及变弹簧力的恒定力模块和模拟弹簧模块以及用于控制运动部件最大位移的限位模块。

此外，空气辅助燃油喷嘴瞬态电磁特性仿真基于静态电磁特性模拟，在静态模型基础上更改仿真类型为瞬态仿真，并重新定义激励源为外部激励，以及更新运动部件定义后，即可实现瞬态电磁特性仿真。

上述机电磁三个子模块搭建完成后，整合至同一模型中，各模块瞬态仿真参数如表 2 所示。

表 2 机电磁联合仿真模型参数设置

所属模块	名称	数值	单位
驱动电路	激励电压	变量	V
	峰值电流	变量	A
	维持电流	1.2	A
	电流测量间隔	0.01	ms
	励磁线圈电阻	6	$\Omega$
	放电回路电阻	260	$\Omega$
惯性运动	惯性质量	20	g
	弹簧预紧力	变量	N
	弹簧刚度	1000	kN/m
	最大运动位移	0.2	mm
电磁特性	线圈匝数	400	
	阀身材质	铜	
	磁轭厚度	1.2	mm
	磁轭相对位置	0	mm

### 3 仿真结果验证

基于上述机电磁联合仿真模型,开展空气辅助燃油喷嘴工作特性仿真工作,喷嘴感应磁场分布如图 5 所示,由图可知,感应磁场集中分布在励磁线圈附近,在磁轭的限制作用下,励磁线圈内部阀身、衔铁处的感应磁场强度远大于其他位置,且感应磁场方向与励磁线圈轴线方向平行。

由于空气辅助燃油喷嘴工作过程中涉及机械、电子电路、液力流动等多学科的复杂耦合,一般的测量手段难以精确记录和测量喷嘴的动态过程,因此可以通过数值仿真研究弥补试验测试的局限性,获取各种特性参数对喷嘴工作过程中能量转化的影响因素,降低设计成本,缩短研发时间,提高设计效率。但是,实验测试依旧是验证仿真模型准确性的必要措施,对于喷嘴电磁仿真的验证过程,往往是采用直接测量电磁力和力矩的方式验证模型的准确性。

电磁结果仿真验证过程基于喷嘴阀芯所受电磁力的精确测量,由于喷嘴在工作过程中轴向位置的高度动态特性,精确测量移动过程中喷嘴所受电磁力大小十分困难,但对于喷嘴即将开启和完全开启,及阀芯零位移和最大位移两个工况点的电磁力测量相对简单,且喷嘴电磁特性复杂多变,每个循环中首尾两工况点数值吻合,也可在一定程度上验证仿真模型的精确性。因此,本章中电磁力测量采用弹簧式测力计型号为艾德堡 NK-500,最大量程为 500 N,精度为 $\pm 1\%$ ,可分别测量推力和拉力,并可实现实时测量和峰值记录功能。测量过程中,利用弹簧测力计测量喷嘴全开时阀芯所受电磁力,结果及相对误差如图 6 和表 3 所示,从实测结果和仿真结果可以看出,仿真结果与实测结果能够很好地吻合,最大误差小于 5%,证明了喷嘴电磁仿真模型的准确性。

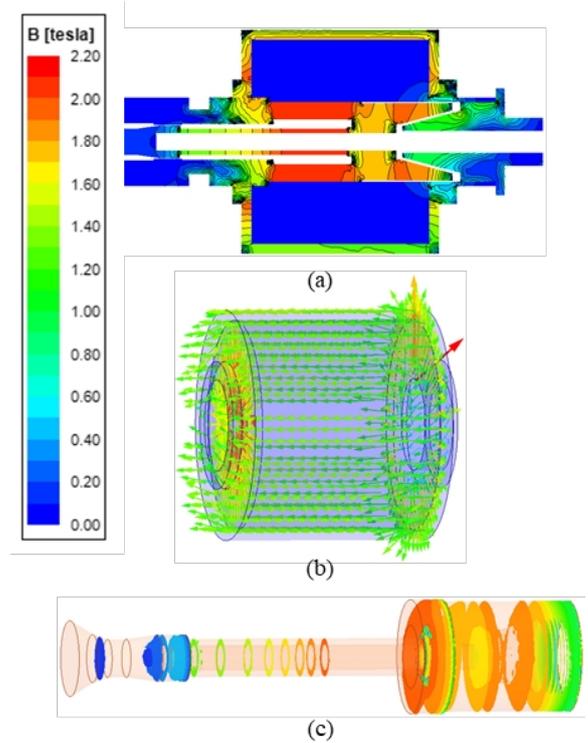


图 5 喷嘴感应磁场分布仿真结果:  
(a)喷嘴整体;(b)磁轭;(c)阀芯

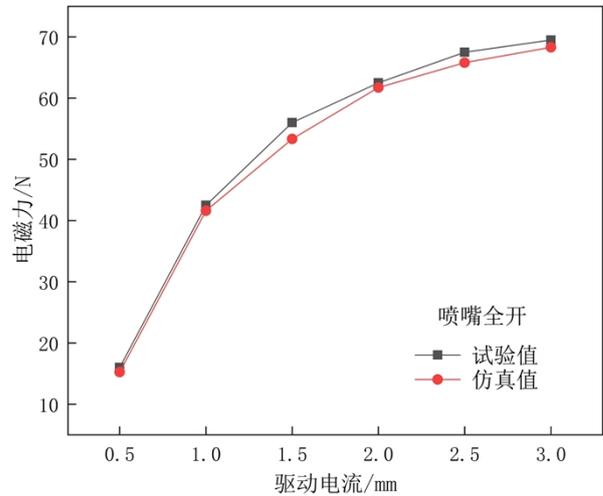


图 6 阀芯所受电磁力仿真与试验值对比

表 3 不同工况仿真值与试验值相对误差

工况	励磁电流/A	相对误差
全开状态	0.5	4.69%
	1	2.12%
	1.5	4.76%
	2	1.23%
	2.5	2.52%
	3	1.71%

## 4 结果与讨论

空气辅助燃油喷嘴对喷射脉宽、喷油量的精确

控制,很大程度上受到喷嘴瞬态特性,即动态响应特性的影响。空气辅助燃油喷嘴的动态响应一般包括励磁线圈内部驱动电流、衔铁所受电磁力以及喷嘴阀芯升程等随时间的变化规律。在实际工作过程中,上述动态特性易受多个控制因素的综合影响,例如激励强度、峰值电流、初始预紧力、阀芯惯性质量等,因此,本文针对上述关键参数,基于空气辅助燃油喷嘴机-电-磁联合仿真模型开展深入研究,探索各参数对喷嘴动态特性的影响规律。

#### 4.1 激励强度

本文中空气辅助燃油喷嘴机-电-磁联合仿真过程中,喷嘴励磁线圈的激励源选用直流电压,贴合实际喷嘴工作情况,借助 Peak&Hold 驱动电路,可按要求定义峰值电流和保持电流,在保证喷嘴正常工作的情下降低能量损耗并延长喷嘴使用寿命。

作为驱动电路的唯一能量输入,激励强度的大小直接影响了后续磁场建立和电磁力产生过程。改变激励强度,即改变驱动电路的直流电压源幅值,可探究不同激励强度下驱动电流、电磁力的建立速度,以及在此基础上喷嘴阀芯的升程变化情况。

仿真中,直流激励电压的大小分别为 24 V、36 V、48 V 和 60 V,峰值电流和维持电流分别为 4 A 和 1.2 A,弹簧预紧力为 50 N。峰值电流、维持电流持续时间为 2 ms 和 3 ms,仿真结果如图 7 所示。由图可知,随着激励电压的升高,励磁线圈内部驱动电流的上升速度明显增加,到达峰值电流的时间逐渐减小,这说明虽然励磁线圈电感的存在会阻碍驱动电流的升高,但激励电压的增加依然会提高驱动电流的增长速度。电磁力和驱动电流的变化趋势相似,激励电压的升高加快了衔铁所受电磁力的增长速度,使得喷嘴更早克服弹簧预紧力,即开启时间更短,提高了喷嘴响应性。阀芯位移方面,虽然喷嘴开启时间随激励电压升高而有所减小,但阀芯位移变化趋势并未发生明显变化。

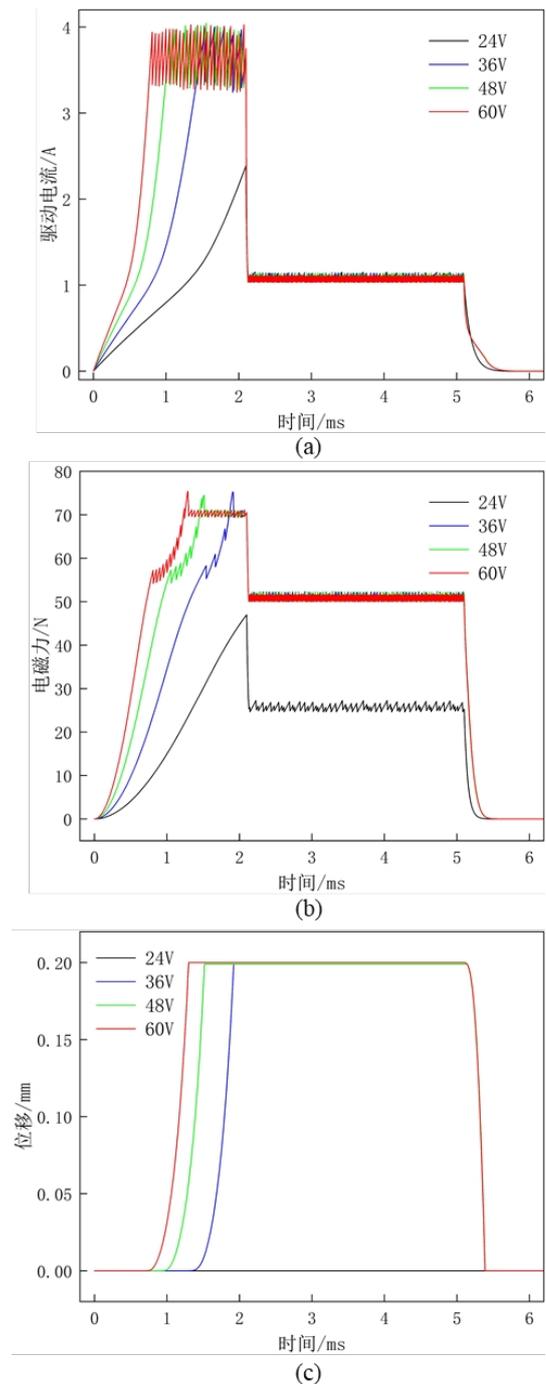


图 7 不同激励强度下喷嘴 (a) 驱动电流 (b) 阀芯所受电磁力 (c) 阀芯位移随时间的变化关系

值得注意的时,当激励电压过低时,如 24 V,驱动电流的增长速度过低,以至于无法在预定时间内到达峰值电流,衔铁所产生的电磁力无法克服弹簧预紧力使喷嘴开启,喷嘴无法正常工作。与此同时,激励电压从 36 V→48 V→60 V 变化过程中,虽然激励电压差值相同,但激励电压升高对驱动电流、电磁力和阀芯升程的影响效果在电压较低时(36 V 升高至 48 V)明显优于高电压水平(48 V 升高至 60 V),这可能是由于激励电压升高会加速各部件到达

磁饱和, 进而降低激励电压升高的影响效果。

另外, 激励电压变化过程中, 驱动电流的下降过程并未发生明显变化, 这是因为驱动电流的耗散与外部激励电压无关, 仅由放电回路中电阻决定。

## 4.2 峰值电流

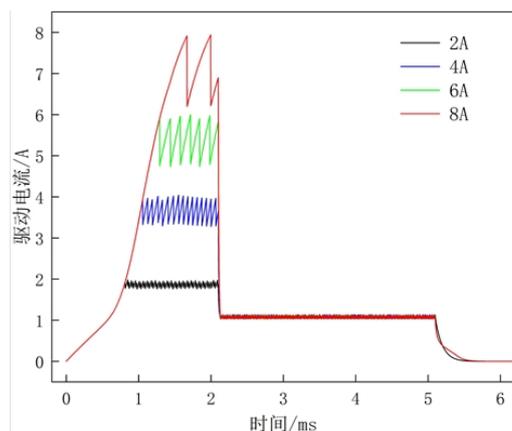
上文探究了激励电压对于喷嘴瞬态工作特性的影响, 发现激励电压的升高会提高喷嘴响应速度, 但当激励电压已处于较高水平时, 继续增加激励电压对于响应速度的提升效果有限。因此, 后续仿真过程中外部激励电压确定为 48 V, 在保证喷嘴响应速度的情况下, 贴近供电系统实际电压值。

上文中仿真过程已明确 4 A 的峰值电流已可使喷嘴正常工作, 但基于激励电压对喷嘴响应性的正向作用, 容易推测峰值电流的增加可能同样会为喷嘴响应性带来正向收益。因此, 本文利用可编程 Peak&Hold 驱动电路, 通过改变不同仿真过程中峰值电流的大小, 探究峰值电流对喷嘴瞬态特性的影响规律。在此过程中, 直流激励电压的大小为 48 V, 峰值电流分别为 2 A、4 A、6 A 和 8 A, 维持电流为 1.2 A, 弹簧预紧力为 50 N。峰值电流、维持电流持续时间为 2 ms 和 3 ms。仿真结果如图 8 所示。

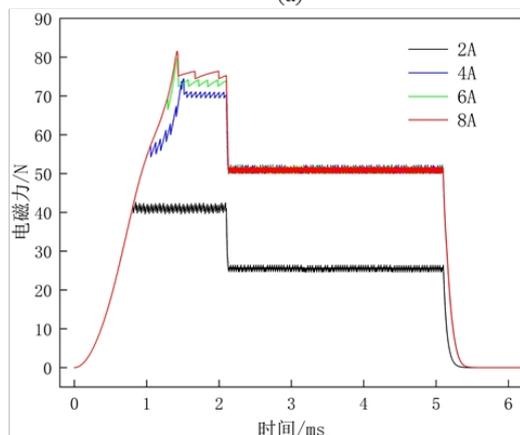
由仿真结果可知, 在 48 V 的外部激励电压下, 喷嘴确实可以实现所设置的最高为 8 A 的激励电流, 但随着电流峰值的不断增大, 峰值电流期间电流的控制精度逐渐降低, 表现为两电流峰值点之间时间间隔增加, 极大值点与极小值点间插值增大。电磁力方面, 峰值电流的增加会在一定程度上提高衔铁所受电磁力, 但由于部分喷嘴部件已经到达磁饱和, 继续增大励磁电流并不会使得电磁力明显增大, 体现在阀芯位移上, 则是峰值电流的改变并不会使喷嘴响应性得到明显提升, 峰值电流从 4 A 升高至 8 A 后, 阀芯开始运动的时间点并未改变, 达到最大位移点的时间仅提前了 0.08 ms。

另外, 峰值电流过小时, 如 2 A, 励磁线圈没有足够的磁动势产生强磁场, 衔铁也无法产生足以克服弹簧预紧力的电磁力使喷嘴开启, 此时喷嘴无法正常工作。

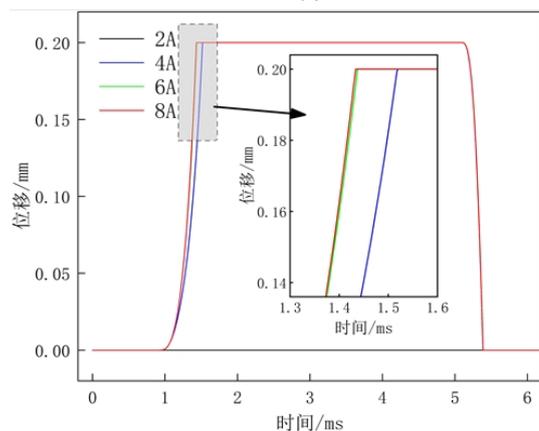
综上, 峰值电流的增加对于喷嘴响应性的提升效果不明显, 峰值电流的选取需要在保证喷嘴能够正常工作的情况下, 选择尽量小的电流值, 以降低励磁线圈的工作负荷, 提高能量利用率, 延长喷嘴使用寿命。



(a)



(b)



(c)

图 8 不同峰值电流下喷嘴 (a) 驱动电流 (b) 阀芯所受电磁力 (c) 阀芯位移随时间的变化关系

## 4.3 弹簧预紧力

空气辅助燃油喷嘴初始状态下, 由安装在喷嘴内部阀体和衔铁间的回位弹簧施加弹簧力, 保证阀体于阀芯之间压紧, 实现密封, 而喷嘴开启过程中, 衔铁所受电磁力必须克服弹簧预紧力, 以及后续弹簧压缩过程中的弹簧力, 才能使阀芯移动, 喷嘴开启; 喷嘴工作循环结束后, 电磁力消失, 弹簧弹力则负责将阀芯重新压紧到阀体上, 实现喷嘴密封。因此, 弹簧力深度参与喷嘴实际工作过程, 而弹簧

力的大小也显著影响喷嘴的瞬态工作特性。

本文利用喷嘴机-电-磁联合仿真模型, 对不同弹簧预紧力下的喷嘴工作特性进行模拟, 仿真过程中, 直流激励电压的大小为 48 V, 峰值电流分别为 4 A, 维持电流为 1.2 A, 弹簧预紧力分别为 30 N、40 N、50 N 和 60 N。峰值电流、维持电流持续时间为 2 ms 和 3 ms。仿真结果如图 9 所示。仿真结果表明, 弹簧预紧力由 30 N 升高至 50 N 过程中, 通电初期电磁力上升速率相同, 但由于弹簧预紧力不同, 电磁力克服弹簧预紧力使喷嘴阀芯开始运动的时刻也发生变化, 弹簧预紧力越大, 阀芯运动时刻越迟, 即响应性有所降低。在阀芯移动过程中, 随弹簧预紧力上升, 电磁力上升速度有所下降, 由 2.4 节中公式(1)可知, 作用在阀芯上并使其产生运动的力为电磁力与弹簧力的差, 弹簧预紧力升高会导致相同电磁力情况下, 阀芯加速度减小, 进而使得阀芯运动速度降低, 而与此同时, 阀芯运动速度减小则导致气隙的减小速度降低, 最终导致电磁力增长速度随弹簧预紧力增加而减小。

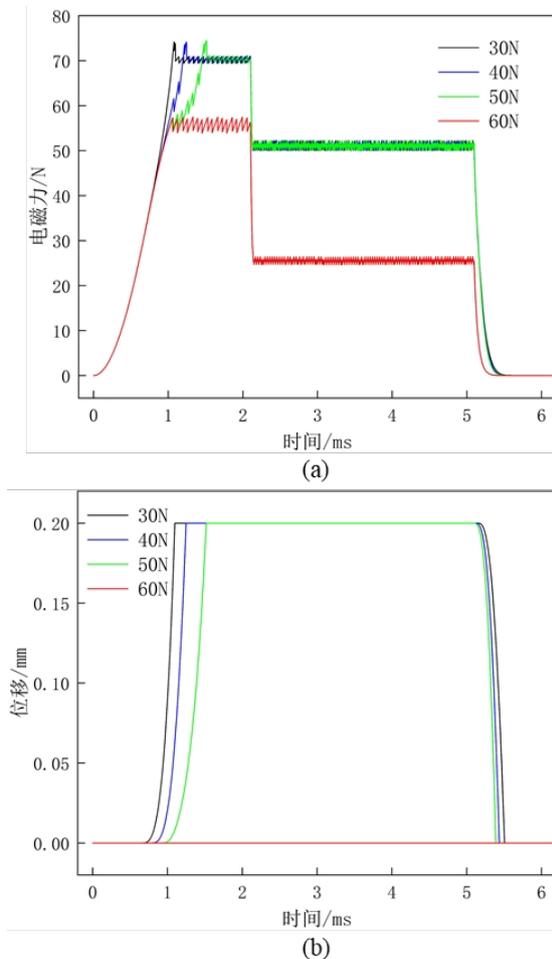


图 9 不同弹簧预紧力下喷嘴 (a) 阀芯所受电磁力 (b) 阀芯位移随时间的变化关系

#### 4.4 阀芯惯性质量

空气辅助燃油喷嘴通电开启过程中, 阀芯在感应磁场作用下受力运动, 使喷嘴开启, 喷嘴断电后在弹簧力的作用下使喷嘴关闭, 在此过程中, 阀芯运动过程将显著影响喷嘴瞬态工作特性。

本文利用空气辅助燃油喷嘴机-电-磁联合仿真模型, 对不同阀芯惯性质量下的喷嘴运动特性开展仿真研究。仿真过程中, 直流激励电压的大小为 48 V, 峰值电流分别为 4 A, 维持电流为 1.2 A, 弹簧预紧力为 50 N。峰值电流、维持电流持续时间为 2 ms 和 3 ms。由于, 仿真结果如图 10 所示。仿真结果表明, 阀芯惯性质量由 2 g 增大至 6 g 过程中, 阀芯所受电磁力增长趋势有所变化, 阀芯运动开始后, 电磁力增长速度明显减慢; 阀芯位移方面, 阀芯惯性质量由 2 g 升高至 4 g 和 6 g 后, 阀芯开始运动的时刻不变, 但到达最大位移处的时间由 1.28 ms 增加至 1.40 ms 和 1.50 ms, 阀芯落座时间也相应提前。

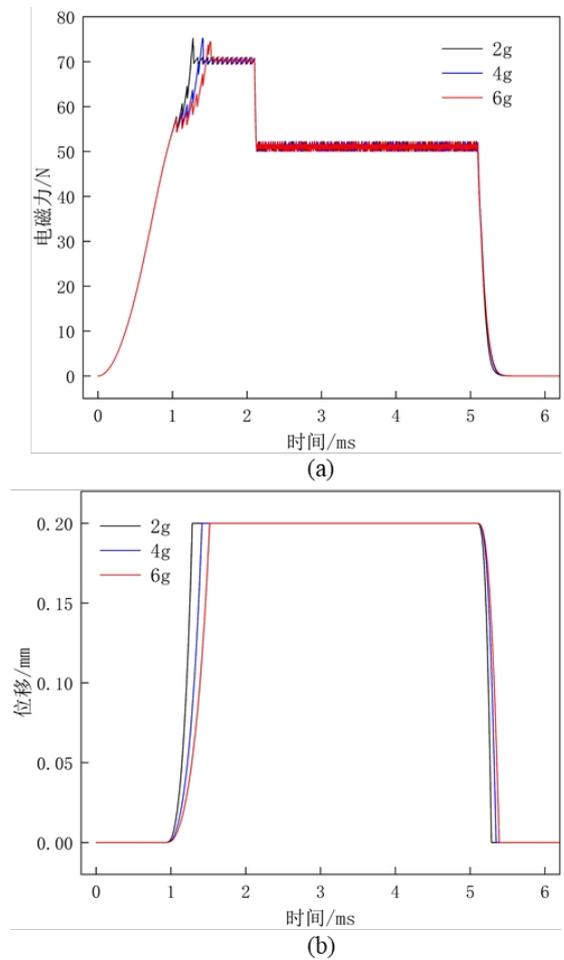


图 10 不同阀芯惯性质量下喷嘴 (a) 阀芯所受电磁力 (b) 阀芯位移随时间的变化关系

阀芯受力运动过程可由 2.4 节中公式(1)表征,

当外部激励条件及弹簧预紧力不变时, 由于电磁力随气隙大小改变, 阀芯运动特性主要受阀芯惯性质量及气隙大小影响。当阀芯惯性质量由 6 g 逐渐下降时, 阀芯所受电磁力在阀芯运动开始前不受惯性质量影响, 而当电磁力推动阀芯开始运动后, 惯性质量下降导致阀芯易于发生受迫运动, 在相同时间内达到更高的速度, 从而实现快速开启和快速落座。综上所述, 适当降低阀芯惯性质量, 有利于喷嘴在相同激励条件下, 提升系统响应速率。

## 5 结论

(1) 激励强度增加会提高喷嘴响应性, 体现在直流激励电压增加后, 励磁电流、喷嘴衔铁所受电磁力均同步增加, 喷嘴阀芯开始运动以及最大升程时刻均提前, 但由于磁饱和现象的存在, 激励电压由 48 V 升高至 60 V 对于喷嘴响应性的提高幅度, 小于激励电压由 36 V 升高至 48 V。

(2) 峰值电流的增加对于喷嘴响应性的提升效果不明显, 峰值电流由 4 A 增加至 8 A 过程中, 喷嘴局部达到磁饱和, 导致衔铁所受电磁力以及喷嘴开启时间提升极小, 而过大电流会给驱动系统和励磁线圈带来严重负担。

(3) 喷嘴弹簧预紧力影响喷嘴响应性, 弹簧预紧力由 30 N 升高至 50 N 过程中, 激励强度一定时, 衔铁所受电磁力上升速率有所下降, 喷嘴开启时刻以及全开时刻均发生推迟, 即喷嘴开启响应性降低。但提高弹簧预紧力可降低喷嘴关闭延迟。

(4) 阀芯惯性质量降低会提高喷嘴响应性, 外部激励条件不变, 喷嘴惯性质量由 6 g 减小至 2 g 过程中, 喷嘴开始运动时刻不变, 但全开时刻和全闭时刻均相应提前, 有利于实现高速喷射, 提升系统工作质量。

### 参考文献:

- [1] Lefebvre A H, McDonell V G. Atomization and sprays [M]. Boca Raton: CRC press, 2017.
- [2] Alajmi A E S E T, Adam N M, Hairuddin A A, et al. Fuel atomization in gas turbines: A review of novel technology [J]. International Journal of Energy Research, 2019, 43(8): 3166-81.
- [3] Hoffmann G, Befrui B, Berndorfer A, et al. Fuel system pressure increase for enhanced performance of GDi multi-hole injection systems [J]. SAE Technical Paper, 2014, 2014-01-1209.
- [4] Mlkvik M, Stähle P, Schuchmann H P, et al. Twin-fluid atomization of viscous liquids: The effect of atomizer construction on breakup process, spray stability and droplet size [J]. Int J Multiphase Flow, 2015, 77: 19-31.
- [5] Liu A B, Reitz R D. Mechanisms of air-assisted liquid atomization [J]. Atom Sprays, 1993, 3(1): 55-75.
- [6] Cvetkovic D, Cosic I, Subic A. Improved performance of the electromagnetic fuel injector solenoid actuator using a modelling approach [J]. INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED ELECTROMAGNETICS AND MECHANICS, 2008, 27(4): 251-73.
- [7] Nguyen Ba H, Lim O T. A simulation and experimental study on the operating characteristics of a solenoid gas injector [J]. ADVANCES IN MECHANICAL ENGINEERING, 2019, 11.
- [8] Hung N B, Lim O. Improvement of Electromagnetic Force and Dynamic Response of a Solenoid Injector Based on the Effects of Key Parameters [J]. INTERNATIONAL JOURNAL OF AUTOMOTIVE TECHNOLOGY, 2019, 20(5): 949-60.
- [9] Hung N B, Lim O, Yoon S. Effects of structural parameters on operating characteristics of a solenoid injector; proceedings of the 8TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED ENERGY (ICAE2016), F 2017, 2017 [C].
- [10] Cheng Q, Zhang Z, Xie N. Power losses and dynamic response analysis of ultra-high speed solenoid injector within different driven strategies [J]. Appl Therm Eng, 2015, 91: 611-21.
- [11] Cheng Q, Zhang Z, Xie N. Power losses analysis of the gasoline direct injector within different driven strategies [J]. INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED ELECTROMAGNETICS AND MECHANICS, 2016, 50(3): 379-94.
- [12] Wu H, Zhang F, Zhang Z, et al. A simulation study of static electromagnetic characteristics of voice coil motor injector [J]. IFAC-PapersOnLine, 2021, 54(10): 494-9.
- [13] Gao H, Zhang F, Wang S, et al. Effect of characteristic parameters on the magnetic properties of voice coil motor for direct fuel

---

injection in gasoline engine; proceedings of the Energy Procedia, F, 2019 [C].

- [14] 武浩, 章振宇, 张付军, et al. 音圈电机喷油器的喷雾特性试验 [Z]. 内燃机学报. 2022: 162-70. 10.16236/j.cnki.nrjxb.202202020
- [15] 高宏力, 张付军, 刘波澜, et al. 空气辅助喷射闪急沸腾喷雾特性试验 [Z]. 航空动力学报. 2019: 63-72. 10.13224/j.cnki.jasp.2019.01.008
- [16] 周顺荣主编. 电磁场与机电能量转换 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2006.
- [17] 黄都. GDI 汽油机喷油器驱动电路及喷雾特性研究 [D]; 华中科技大学, 2011.
- [18] 林庆华, 栗保明. 电磁轨道炮瞬态磁场测量与数值模拟 [J]. 兵工学报, 2016, (第 10 期): 1788-94.