

面向离合器接合过程的比例电磁阀 动态特性模型与设计

李晓祥, 王安麟, 樊旭灿, 李晓田

(同济大学机械与能源工程学院, 201804, 上海)

摘要: 为提高离合器接合过程控制油压响应性能和精准度,提出了一种比例电磁阀动态特性模型与设计方法。首先,建立比例电磁阀二维有限元模型并通过试验验证了模型的准确性,借助试验设计和响应面方法建立电磁力的电磁铁结构参数模型,为电磁力与电流映射关系精准设计提供了参数化表达。其次,以比例电磁阀阀芯质量、弹簧刚度及其预紧力、黏性阻尼系数为设计变量,以压力上升时间及其超调量相结合的归一化综合函数最小值为优化目标,对其进行优化设计并分析其稳健性,试验结果表明输出油压动态响应时间减少18%、油压超调降低31%,能有效地满足其动态响应特性要求。最后,对比例电磁阀电流油压稳态输出特性进行试验验证,所建模型的仿真数据与试验结果相关性为0.9983。该方法有效地提高了离合器接合过程控制油压的综合性能,且所提出的比例电磁阀动态特性模型与设计方法对分析同类控制油压问题具有工程性借鉴价值。

关键词: 比例电磁阀;响应面方法;优化设计;动态特性

中图分类号: TH137.52 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202005007 **文章编号:** 0253-987X(2020)05-0046-07



OSID 码

Dynamic Characteristics Model and Design of Proportional Solenoid Valve for Clutch Engagement Process

LI Xiaoxiang, WANG Anlin, FAN Xucan, LI Xiaotian

(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In order to improve the oil pressure response control performance and accuracy during the clutch engagement process, a dynamic model and a design method of proportional solenoid valve (PSV) is proposed. First, a two-dimensional finite element model of PSV is established and the accuracy of the model is verified by experiments. The electromagnetic structure parameter model of the electromagnetic force established by the design of experiment (DOE) and the response surface method (RSM) provides a parametric representation for the precise design of the electromagnetic force and current mapping relationship. Then, taking the spool mass, spring stiffness, preload and damping coefficient of the PSV as the design variables and the minimum of the normalized comprehensive function combined with the pressure response time and overshoot as the optimization objective, the optimal design of the PSV is carried out and its robustness is analyzed. The test results show that the dynamic response time of the output oil pressure is reduced by 18% and the oil pressure overshoot is reduced by 31%, which meets the requirement of the dynamic response characteristics. Finally, the steady-state output characteristics of the

PSV current versus oil pressure are tested and verified. The correlation between the simulation data of the model and the test results is 0.998 3. This method effectively improves the comprehensive performance of the oil pressure control during the clutch engagement process. The proposed dynamic characteristic model and design method of the PSV provide an engineering reference for analyzing similar oil pressure control problem.

Keywords: proportional solenoid valve; response surface methodology; optimal design; dynamic characteristics

作为工程机械动力传递系统中重要组成部分的离合器,其良好的接合过程能有效地减少外载荷对传动零部件的冲击和提高车辆的使用寿命^[1-2]。随着工程机械产品智能化升级,电磁阀作为一种电机机械转换器,在离合器接合过程中得到了广泛的应用^[3-5]。比例电磁阀的电磁力与控制系统输入电流近似线性关系,且在有效工作行程内具有良好水平吸力特性,可实现离合器接合过程中油压的精准控制。

近年来,国内外对比例电磁阀进行了大量的研究,多采用仿真与试验的方法。Bayat 等通过对所研究电磁阀建立有限元模型进行仿真的方法,对电磁力影响因素进行了分析与验证,但未考虑电磁力与流体存在的耦合关系对阀输出油压特性产生的影响^[6-8];Angadi 等通过有限元与试验相结合的方法对电磁阀线圈失效机理进行了分析,偏重于线圈周边温度分布和热变形对电磁阀性能的影响^[9-10];Taghizadeh 等采用经验公式等理论计算方法,建立了数学模型对电磁阀进行研究,但模型精度较低,与试验数据相差较大^[11-12];Lee 等对比例电磁阀进行了性能分析与模型验证,但对电磁力吸力特性的优化分析过于简单^[13-14];刘艳芳等通过建立多物理场耦合热力学模型对电磁阀热失效进行了分析与验证,但未对输出油压的特性进行分析^[15];孟飞等对某大功率液力机械变速器用比例电磁阀进行了多场耦合下的性能分析与研究,但对电磁力水平吸力特性的分析过于简单^[16-17];刘潜峰等通过采用有限元仿真软件的方法仅对比例电磁阀中电磁铁部分结构参数对电磁力的影响进行了分析^[18-22]。由于比例电磁阀的设计涉及多个物理场耦合,非线性较强,建立工作温度下的数学模型并对其结构参数进行优化,对提升其性能具有一定的意义。

本文以某离合器接合过程用比例电磁阀为研究对象,采用近似模型技术和遗传算法对电磁铁部分和阀芯部分的结构进行了参数化表达和优化改进。动稳态试验结果表明,所建模型的仿真数据与试验

结果具有较高的相关性,同时阀的动态性能也得到了提升。

1 离合器接合过程中比例电磁阀

1.1 离合器接合过程系统描述

离合器接合过程系统结构原理简图如图 1 所示,系统主要由动力输入、离合器机构、外载荷和比例电磁阀组成。离合器接合一般是通过控制输入油压来实现,比例电磁阀作为离合器执行机构的压力控制模块,其性能将影响离合器接合过程的品质。考虑外载荷的非平稳随机性、摩擦片摩擦系数的非线性等因素,除采用具有鲁棒性能的控制器的外,比例电磁阀自身的动态性能和输入输出映射关系精准性对离合器接合过程也有重要的影响。

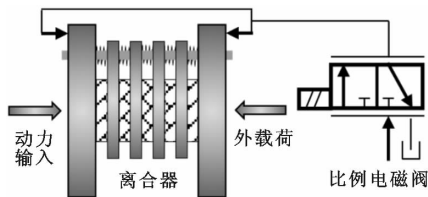


图 1 离合器接合过程系统结构原理简图

1.2 比例电磁阀基本结构和工作原理

比例电磁阀结构简图如图 2 所示,比例电磁阀主要由比例电磁铁、运动阀芯和液压流体 3 部分组成,其中比例电磁铁部分采用盆型止座结构,可对运动阀芯提供与输入控制电流近似比例关系的电磁力。图中电磁铁部分的虚线为磁路示意;在液桥部分,阀芯进油与排油节流口为对称 U 型结构,复位弹簧侧泄油通过内部油道连接至排油口,图中带箭

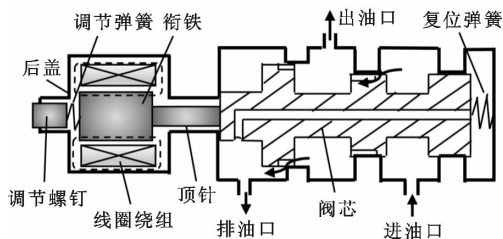


图 2 比例电磁阀结构简图

头的实线为液压流体流动示意;调节弹簧和调节螺钉组成的调零机构用于调整电磁铁的特性曲线。文中比例电磁阀为常闭直动式两位三通阀,结构简单,抗污能力较强。

根据离合器接合过程压力控制用比例电磁阀工作使用要求,该阀在电磁铁不通电时,阀芯在复位弹簧作用下位于最左端,进油口为关闭状态,出油口与排油口相通,以保证离合器接合过程开始阶段的安全性。

对比例电磁铁线圈绕组通电后,控制电流的增加使磁路中磁势逐渐增大,产生的电磁力不断增加。当电磁力开始超过电磁阀复位弹簧力和阀芯静摩擦力总和时,电磁铁通过顶针推动阀芯向右运动,排油口开口量不断减小至关闭;随着阀芯位移增加,油液通过进油口进入出油口,出油口开始为流量输出,进而转化为输出压力,出油口油压不断增大。根据油液流体流量与压力之间的关系,可知进油与出油之间油口开度的变化可调节进油口的流量,从而实现对外出油口油压的控制。

1.3 比例电磁阀耦合关系分析

比例电磁阀在使用过程中涉及机械、流体、电磁、热和控制等多个学科领域,其性能取决于多个物理场的耦合作用,相互之间非线性较强^[14]。本文以比例电磁阀工作时温度为前提条件,对其相关的电场、磁场、机械和液压流场等4部分相互影响下的性能进行研究与分析,各部分耦合关系如图3所示。当输入控制信号后,电场与磁场部分通过电流 i 和磁场磁链 Ψ 相互影响;磁场与机械部分通过作用于阀芯的电磁力 F_{mag} 和阀芯位移 x 、速度 $\dot{x}$ 相互影响;阀芯位移 x 、速度 $\dot{x}$ 的变化使流场输出的压力、流量发生变化,同时流场部分的输出力 F_p 又反作用于阀芯;流场部分输出的液压力 p_c 作用于离合器实现其接合过程,同时离合器所受外载荷 F_{load} 反作用于流场。

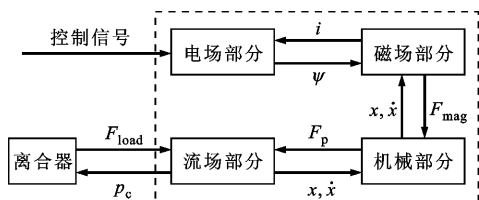


图3 比例电磁阀多场耦合关系图

在输入和输出的相互作用下,为更好地了解比例电磁铁的特性,多场之间以阀芯为作用对象进行电磁铁性能的研究与分析。

2 电磁力的电磁铁结构参数模型

比例电磁铁位移-电磁力吸力特性研究常用磁路和磁场分析的方法。磁路分析法适用于简单、形状规则的磁路,对形状复杂磁路的分析精度低,若采用磁场离散化的数值计算方法,则精度较高,但数据计算工作量大且边界条件难以确定。

文中采用的盆型止座结构的比例电磁铁,结构紧凑,对油质污染不敏感且成本低廉,动静态特性良好,但由于其磁路结构复杂和不规则,以及其磁导体磁化曲线非线性特性,电磁阀吸力特性很难通过磁路分析法计算得到,因此借助有限元软件 Ansoft-Maxwell 从磁场角度对比例电磁铁进行参数化模型设计。

2.1 电磁力计算原理

忽略电磁铁磁滞效应、线圈绕组内涡流、位移电流和温度的影响,将麦克斯韦方程组中电场变量和磁场变量分离来实现独立的电场或磁场偏微方程,以便于数值计算。考虑电磁阀为轴对称结构,磁场分布简化为^[23]

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}_z}{\partial y} \right) &= -J_z \\ \Gamma_2: \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}_z}{\partial \mathbf{n}} &= -H_t \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: μ 为磁导率; $\mathbf{A}_z$ 为矢量磁势; J_z 为电流密度; Γ_2 为第二类边界条件; $\mathbf{n}$ 为边界的外法线矢量; H_t 为磁场强度的切向分量。

在求得磁场分布后,电磁力的计算模型为

$$F_{\text{mag}} = \frac{\partial W(x, i)}{\partial x} \quad (2)$$

式中: W 为磁场总能量; x 为衔铁位移; i 为线圈绕组输入的控制电流。

在式(2)基础上可知,确定比例电磁铁结构后,产生的电磁力只与线圈绕组输入的控制电流和衔铁运动位移形成的气隙隔磁环形状相关。为更好地表征工作行程内比例电磁铁位移-电磁力水平吸力特性,使用以下两个参数作为评价指标。

电磁力变化幅度采用偏离度 δ 表示

$$\delta = \frac{|F_{\text{ms}} - F_{\text{me}}|}{F_{\text{me}}} \quad (3)$$

式中: F_{ms} 为测试电磁力; F_{me} 为期望电磁力。

电磁力水平平稳程度在工作位置附近的离散程度,采用归一化变异系数 C_v 表示

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} / \bar{x} \quad (4)$$

式中: x_i 为工作位置附近观测电磁力; $\bar{x}$ 为平均观测电磁力; n 为观测次数。

2.2 电磁力的电磁铁结构有限元建模及验证

为更好地进行结构参数设计,先对电磁铁部分进行建模及标定,在仿真模型有效的基础上,建立电磁铁部分的电磁力与结构参数的响应面模型,通过检验与校正,为后续再设计提供参数化表达,设计流程如图4所示。

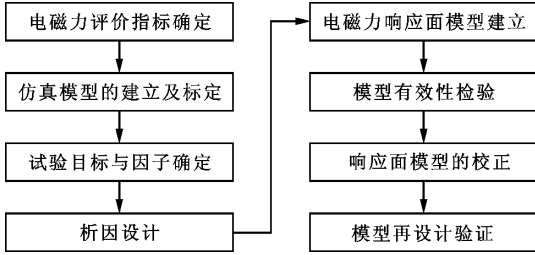


图4 比例电磁铁参数化设计流程图

通过对所用比例电磁阀的测试,选取输入电流为350~750 mA、阀输出压力时阀芯运动行程范围在0.7~1.5 mm内的数据代入式(3)和(4),详细计算过程不再赘述,得 $\delta < 0.86\%$, $C_V < 1.5\%$,电磁力和水平平稳程度较高。图5为建立的电磁铁部分的有限元模型及磁力线分布图。在此基础上,不同电流作用下电磁力仿真数据与实测数据的相对误差如图6所示,最大相对误差小于1%,同时仿真和实测两组数据在满足评价指标前提下的相关系数为0.999 7,具有较高的相关性,可认为仿真模型能有

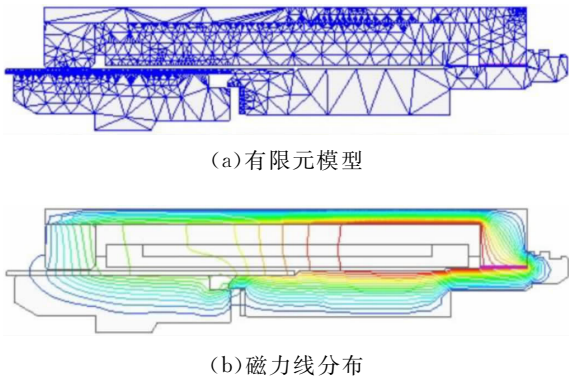


图5 电磁铁有限元模型及磁力线分布图

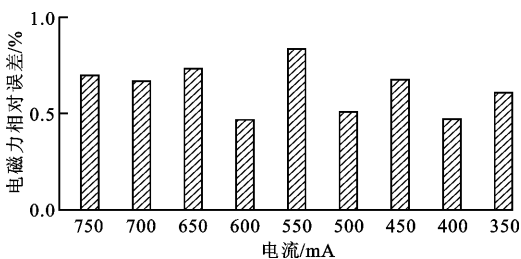


图6 电磁力仿真数据与实测数据的相对误差

效地作为试验模型。

2.3 电磁力的参数化响应面模型

响应面模型和判定系数 R^2 计算公式如下

$$F_{\text{mag}} = m_0 + \sum_{i=1}^z m_i X_i + \sum_{i=1}^z \sum_{j=1}^z n_{ij} X_i X_j \quad (5)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N [y_{\text{rsm}}(i) - y(i)]^2}{\sum_{i=1}^N [y(i) - \bar{y}]^2} \quad (6)$$

式中: m_0 、 m_i 、 n_{ij} 为待定项系数; X 为设计变量; z 为设计变量个数; $y_{\text{rsm}}(i)$ 和 $y(i)$ 为各点响应面函数和仿真模型; $\bar{y}$ 为 $y(i)$ 的数学期望; N 为样本点总数; R^2 表示响应面模型与仿真模型数值差异程度,其值越接近1,模型效果越好,近似表征精度越高^[24]。

为使电磁力与电流成比例关系,而与电磁阀阀芯位移无关,常采用盆型极靴结构^[16]。文中所使用的盆型极靴结构简图如图7a所示,电磁铁水平吸力平稳程度是由于盆底面磁通 Φ_1 和锥面磁通 Φ_2 的分配不同形成的^[25],与图7a结构尺寸参数 a 、 b 、 c 和 d 相关。同时,根据图5磁力线分布图和磁阻特性可知,图7b中结构参数 A 、 B 、 C 和 D 与磁阻有关,影响电磁力大小。在以上分析基础上,结合电磁力评价指标与图7a和图7b中的结构参数,分别建立表征电磁力及其平稳程度的响应面模型。

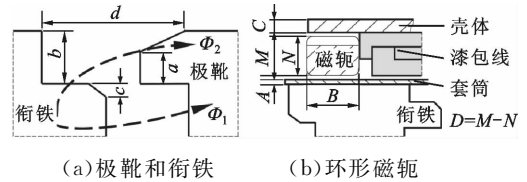


图7 电磁铁结构局部放大图

通过试验设计和响应面方法相结合得到的响应面模型为

$$F_{\text{mag}\delta} = 13.6 - 1.93A - 3.19B + 12.88C - 24.7D + 0.111A^2 - 1.2C^2 + 0.545AB + 3.62AD - 0.582AC - 7.8CD \quad (7)$$

$$F_{\text{mag}C_V} = -346.5 + 242.5a - 32.6b - 238.1c + 223.5d - 302.9a^2 + 6.24b^2 + 260.6c^2 - 34.88d^2 + 8.2ab - 3ac + 14.7ad + 152.9bc - 6.58bd - 38.7cd \quad (8)$$

通过式(6)得到两响应面模型的判定系数分别为0.971 4和0.942,表示响应面模型与仿真模型一致性程度较高。

以结构参数范围内 $A = 8 \text{ mm}$ 、 $B = 7.2 \text{ mm}$ 、 $C = 2.7 \text{ mm}$ 、 $D = 0.25 \text{ mm}$ 为例进行验证,得仿真与

建立的响应面模型的电磁力分别为 22.382 N 和 22.945 N,误差为 2.5%,所建立的响应面模型在一定程度上可作为后续电磁力精准再设计的参数表达。

3 比例电磁阀动态特性的优化设计

3.1 数学模型

比例阀阀芯运动平衡方程为

$$m_v \ddot{x}_v + c_d \dot{x}_v + k_v (x_v + x_0) = F_{\text{mag}} - F_{\text{flow}} \quad (9)$$

式中: m_v 为阀芯质量; x_v 为阀芯位移; c_d 为阀芯黏性阻尼系数; k_v 为阀芯弹簧刚度; x_0 为阀芯初始位置时弹簧压缩长度; $k_v x_0$ 为弹簧预紧力 F_{load} ; F_{flow} 为油液作用于阀芯及其运动部件的合力。

通过阀芯的流量

$$Q_c = C_f A_{\text{in}}(x_v) \sqrt{\frac{2(p_s - p_c)}{\rho}} \quad (10)$$
$$A_{\text{in}}(x_v) = \pi d(x_v - s)$$

式中: C_f 为阀流量系数; $A_{\text{in}}(x_v)$ 为阀进油口面积; πd 为进油口面积梯度; s 为阀芯初始位置至进油口开启位置的位移; p_s 为系统供油压力; p_c 为输出油压力。

通过式(9)和(10)可知,比例电磁阀输出油压力与阀芯位移相关,阀芯动态响应特性受阀芯结构参数、弹簧刚度及其预压缩量、黏性阻尼系数、电磁力和油液压力等影响。假设阀的供油压力稳定、液压系统无泄漏等,在前文电磁力水平吸力特性设计满足使用要求的前提下,下文将进行以阀芯质量、弹簧刚度及其预紧力、黏性阻尼系数为设计变量的动态特性优化设计,以及以黏性阻尼系数为噪声变量对其目标函数影响的稳健性分析。

3.2 优化设计

阶跃信号下的比例电磁阀压力上升时间和压力超调量能在一定程度上反映其快速性、动态特性和油液压力的相对平稳性。考虑实际控制系统中阻尼振荡特性和离合器接合过程中压力精度要求,将输出油液压力上升时间和压力超调量相结合,以归一化综合函数的最小值作为优化目标函数

$$H = \eta \frac{\sigma_p}{\sigma_{pi}} + (1 - \eta) \frac{t_r}{t_{ri}} \quad (11)$$

式中: H 为优化目标函数; η 为权重系数, $0 < \eta < 1$; σ_p 为电磁阀动态响应的压力超调量; σ_{pi} 为优化前超调量, $\sigma_{pi} = 0.9 \text{ MPa}$; t_r 为输出压力上升时间; t_{ri} 为优化前的上升时间, $t_{ri} = 0.01 \text{ s}$ 。

结合 3.1 节所述,选取阀芯质量 m_v 、弹簧刚度 k_v 、弹簧预紧力 F_{load} 和黏性阻尼系数 c_d 为优化设计

变量,取值范围如表 1 所示。

采用遗传算法对目标函数进行优化,参数的设置分别为群体规模 100、复制率 80%、最大进化代数 20、变异概率 10%、变异幅值 0.2。综合考虑压力上升时间、压力超调量和实际应用,通过分析多组不同权重系数下的数据,选择 $\eta = 0.2$,优化后的参数结果分别为 $m_v = 0.012 \text{ kg}$, $k_v = 0.903 \text{ N/mm}$, $F_{\text{load}} = 0.704 \text{ N}$, $c_d = 18.12 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ 。

表 1 优化设计变量取值范围

参数	m_v/kg	$k_v/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$	F_{load}/N	$c_d/(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$
最小值	0.012	0.9	0.7	18
最大值	0.014	1.0	0.9	20

比例电磁阀输出压力的动态响应特性由其自身结构决定,同时还受到外界因素等的影响,如影响黏性阻尼系数的温度等因素较难控制。运用蒙特卡罗随机分析法,以黏性阻尼系数为噪声变量对其目标函数进行稳健性分析,黏性阻尼系数在均值 18.12 N·s/m、标准差 1.5 的正态分布范围内随机取值。目标函数响应分布如图 8 所示,均值集中在 0.185 5 左右,与优化目标函数的误差为 0.345%,方差为 1.43×10^{-7} 左右,基本服从正态分布,降低了对噪声变量的敏感性,具有一定的稳健性。

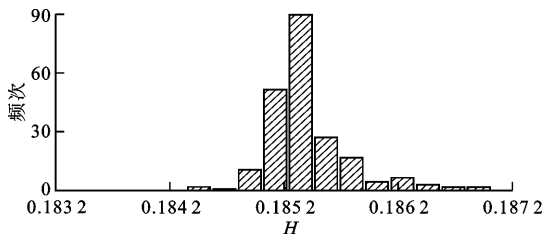


图 8 目标函数响应分布图

4 试验与分析

4.1 试验

为更好地分析比例电磁阀的动态特性和对以上仿真模型进行验证,采用图 9 所示定制的试验台对优化后的模型进行测试。试验台提供的供油流量为 10 L/min,油温控制在 80℃ 左右,压力传感器采用



图 9 试验设备及局部放大图

HUBA 油压传感器,通过计算机设置的控制电流 $0 \sim 830$ mA 信号加载至线圈。

4.2 稳态特性分析

控制电流信号下的电磁阀稳态输出油压曲线如图 10 所示。由图可以看出:试验与仿真曲线基本一致,相关系数为 0.998 3;油压与电流近似线性关系,开始有输出油压时的电流大约为 230 mA,与阀芯运动至开启时的弹簧力相对应;电流约为 760 mA 时油压达到最大值 3.3 MPa,满足离合器控制油压的要求;仿真误差最大值约为 4.67%,出现在阀芯开启时,说明设计的仿真模型较为准确地表达了油压的动态特性,可作为后续进行半物理仿真的模型。

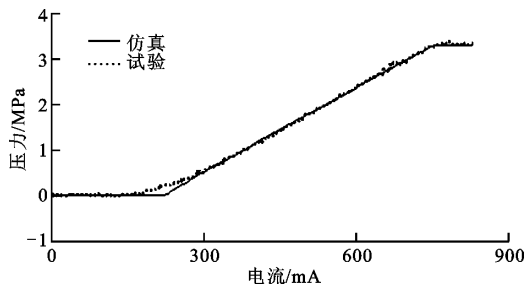


图 10 电磁阀稳态输出油压试验与仿真曲线对比

4.3 动态特性分析

图 11 为输入阶跃控制电流为 500 mA、系统压力为 3.5 MPa 时,比例电磁阀仿真与试验的油压动态响应曲线对比图。由图可知:两者曲线具有较高的一致性,相关系数为 0.977 7,仿真数据有一定的准确性;同时,油压动态特性与优化前相比有了较大改善,压力上升时间减少 18% 左右,超调量降低了 31% 左右。

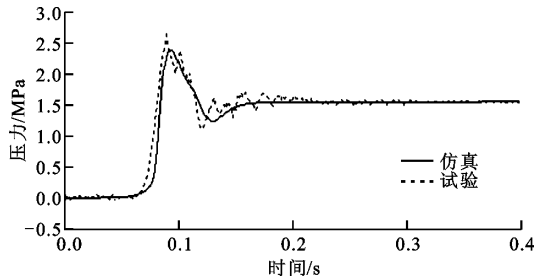


图 11 阶跃信号下油压仿真与试验动态响应对比图

5 结 论

(1)以偏差程度和平稳程度变异系数作为电磁铁吸力特性水平程度的评价指标,在工作行程内可有效地表征电磁力变化情况。

(2)借助于试验设计与响应面方法建立了电磁力和平稳程度与结构参数之间的映射关系模型,利

于比例电磁阀电磁力的精准再设计分析。

(3)采用遗传算法对电磁阀结构参数的优化设计,减少了压力上升时间和降低了压力超调量,提高了阀的动态响应特性。

(4)通过仿真与试验数据的对比,证明建立的比例电磁阀模型在一定程度上能有效地作为后续离合器接合过程半物理仿真中压力控制模块的参数化表达。

参考文献:

- [1] MENG F, ZHANG H, CAO D, et al. System modeling and pressure control of a clutch actuator for heavy-duty automatic transmission systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(7): 4865-4874.
- [2] WAN G Q, LI K Q, PEI L, et al. Optimal tracking control for automatic transmission shift process [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2015, 24(4): 458-465.
- [3] HAJ-FRAJ A, PFEIFFER F. Optimal control of gear shift operations in automatic transmissions [J]. Journal of the Franklin Institute, 2001, 338(2/3): 371-390.
- [4] CHEN Che-Pin, CHIANG Mao-Hsiung. Development of proportional pressure control valve for hydraulic braking actuator of automobile ABS [J]. Applied Sciences, 2018, 8(4): 639-656.
- [5] MENG F, TAO G, ZHANG T, et al. Optimal shifting control strategy in inertia phase of an automatic transmission for automotive applications [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, 60/61: 742-752.
- [6] BAYAT F, TEHRANI A F, DANESH M. Finite element analysis of proportional solenoid characteristics in hydraulic valves [J]. International Journal of Automotive Technology, 2012, 13(5): 809-816.
- [7] YUN S N, HAM Y B, PARK J H. New approach to design control cone for electro-magnetic proportional solenoid actuator [C] // IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: 982-987.
- [8] LEQUESNE B P. Finite-element analysis of a constant-force solenoid for fluid flow control [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1988, 24(4): 574-581.
- [9] ANGADI S V, JACKSON R L, CHOE S Y, et al. Reliability and life study of hydraulic solenoid valve;

- part 1 A multi-physics finite element model [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2009, 16(3): 874-887.
- [10] ANGADI S V, JACKSON R L, CHOE S Y, et al. Reliability and life study of hydraulic solenoid valve: part 2 Experimental study [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2009, 16(3): 944-963.
- [11] TAGHIZADEH M, GHAFARI A, NAJAFI F. Modeling and identification of a solenoid valve for PWM control applications [J]. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences Serie II b/Mecanique*, 2009, 337(3): 131-140.
- [12] DASGUPTA K, WATTON J. Dynamic analysis of proportional solenoid controlled piloted relief valve by bond graph [J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2005, 13(1): 21-38.
- [13] LEE G S. Design improvement of a linear control solenoid valve using multiphysics simulation [J]. *Mechanics*, 2018, 24(3): 352-359.
- [14] 魏巍, 杨印阳, 孔令兴, 等. 液力缓速器放液支路先导比例电磁阀瞬态特性优化 [J]. *北京理工大学学报*, 2019, 39(1): 14-21.
- WEI Wei, YANG Yinyang, KONG Lingxing, et al. Transient characteristics optimal design of proportional solenoid valve for hydrodynamic retarder discharge branch [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2019, 39(1): 14-21.
- [15] 刘艳芳, 毛鸣狮, 徐向阳, 等. 液压电磁阀多物理场耦合热力学分析 [J]. *机械工程学报*, 2014, 50(2): 139-145.
- LIU Yanfang, MAO Mingchong, XU Xiangyang, et al. Multi-discipline coupled thermo-mechanics analysis of hydraulic solenoid valves [J]. *Journal of Mechanic Engineering*, 2014, 50(2): 139-145.
- [16] 孟飞, 陶刚, 张美荣, 等. 自动变速器比例电磁阀优化设计与分析 [J]. *兵工学报*, 2014, 35(5): 590-596.
- MENG Fei, TAO Gang, ZHANG Meirong, et al. Optimization design and analysis of high speed wet proportional solenoid valve [J]. *Acta Armamentarii*, 2014, 35(5): 590-596.
- [17] 孟飞, 陶刚, 陈慧岩. 一种用于自动变速器的比例电磁阀研究 [J]. *机械工程学报*, 2014, 50(20): 100-106.
- MENG Fei, TAO Gang, CHEN Huiyan. Research on proportional solenoid valve used for automatic transmission [J]. *Journal of Mechanic Engineering*, 2014, 50(20): 100-106.
- [18] LIU Q, BO H, QIN B. Experimental study and numerical analysis on electromagnetic force of direct action solenoid valve [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2010, 240(12): 4031-4036.
- [19] 向洪岗, 陈德桂, 李兴文, 等. 基于三维磁场分析建立电磁铁等效磁路的研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2003, 37(8): 808-811.
- XIANG Honggang, CHEN Degui, LI Xingwen, et al. Construction of equivalent magnetic circuit for electro-magnet based on 3-D magnetic field [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2003, 37(8): 808-811.
- [20] MENG F, ZHANG H, CAO D, et al. System modeling, coupling analysis, and experimental validation of a proportional pressure valve with pulse width modulation control [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, 21(3): 1742-1753.
- [21] 王兆文, 白国军, 黄胜, 等. 基于正交设计的燃油蒸发系统电磁阀综合性能优化 [J]. *农业机械学报*, 2017(4): 332-339.
- WANG Zhaowen, BAI Guojun, HUANG Sheng, et al. Optimization on integrated performance of solenoid valve in fuel evaporation system based on orthogonal design [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2017(4): 332-339.
- [22] 潘运平, 吴仕凡, 余先谋. 汽车变速箱换挡比例电磁阀的磁场仿真研究 [J]. *机械设计与制造*, 2018(1): 184-187.
- PAN Yunping, WU Shifan, YU Xianmou. Simulation research of magnetic field on gear-shifting proportional solenoid valve of transmission [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2018(1): 184-187.
- [23] 刘潜峰, 薄涵亮, 秦本科, 等. 直动电磁阀设计参数敏感性分析 [J]. *核动力工程*, 2009, 30(5): 96-100.
- LIU Qianfeng, BO Hanliang, QIN Benke, et al. Analysis of design parameter sensitivity of direct action solenoid valve [J]. *Nuclear Power Engineering*, 2009, 30(5): 96-100.
- [24] 李晓祥, 王安麟, 樊旭灿. 高负压液压油缸系统流量再生液压阀再设计和能效分析 [J]. *西安交通大学学报*, 2019, 53(7): 52-59.
- LI Xiaoxiang, WANG Anlin, FAN Xucan. Energy efficiency analysis and redesign of flow regenerating hydraulic valve for high negative pressure hydraulic cylinder system [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2019, 53(7): 52-59.
- [25] 黎启柏. 电液比例控制与数字控制系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997: 35-38.

(编辑 荆树蓉)