

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2024.07.023

邵明玺, 张秀梅, 李伟. 先导式节流阀比例电磁铁参数设计及优化[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(7): 152-159, 171

Shao Mingxi, Zhang Xiumei, Li Wei. Design and optimization of proportional electromagnet parameters of hydraulic pilot throttle valve [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(7): 152-159, 171

先导式节流阀比例电磁铁参数设计及优化*

邵明玺¹, 张秀梅¹, 李伟²

(1. 潍坊科技学院, 山东寿光, 262700; 2. 国家开放大学, 北京市, 100039)

摘要: 保证丘陵山地拖拉机在起伏山地或土质较硬地块作业时的牵引力和耕深之间的最佳匹配状态是丘陵山地拖拉机悬挂系统设计的重要指标。比例电磁铁作为节流阀电—机转换的主要元件, 其性能优劣对控制节流口开度、实现流量的比例调节具有重要意义。针对丘陵山地拖拉机悬挂系统作业需求和电液比例阀设计要求, 设计一种用于悬挂液压系统姿态调整的先导式节流阀比例电磁铁, 对其关键结构参数进行设计, 建立比例电磁铁数学模型, 通过 Maxwell 对阀组流量特性的影响进行仿真分析。同时利用遗传算法对隔磁导向套厚度、隔磁环角度、隔磁环宽度和定子铁心深度等参数进行匹配优化, 通过 Maxwell 对优化前后的比例电磁铁进行有限元分析。仿真结果表明: 优化后的比例电磁铁在 1~3 mm 时电磁力几乎与 X 轴平行, 具有更好的位移—力特性。建立先导式节流阀数学模型, 通过 Simulink 对其进行动态特性和静态特性仿真, 验证所设计的比例电磁铁参数的合理性。

关键词: 丘陵山地; 拖拉机; 电液悬挂系统; 先导式节流阀; 比例电磁铁; 结构参数

中图分类号: S224.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-5553 (2024) 07-0152-09

Design and optimization of proportional electromagnet parameters of hydraulic pilot throttle valve

Shao Mingxi¹, Zhang Xiumei¹, Li Wei²

(1. Weifang University of Science and Technology, Shouguang, 262700, China;

2. The Open University of China, Beijing, 100039, China)

Abstract: It is an important indicator for the design of the suspension system of tractors in hilly and mountainous areas to ensure the optimal matching state between traction and plowing depth when the tractor is working on hilly terrain or hard soil. Proportional electromagnets is the main component of throttle valve electromechanical conversion, its performance is of great significance in controlling throttle opening and achieving proportional adjustment of flow rate. This article focuses on the operational requirements of the suspension system of tractors in hilly and mountainous areas and the design requirements of the hydraulic proportional valve, a pilot throttle valve proportional solenoid for adjusting the attitude of the suspension hydraulic system is designed, and the key structural parameters of proportional solenoid are calculated. A mathematical model of the solenoid is established, and the impact of Maxwell on the flow characteristics of the valve group is simulated and analyzed. At the same time, genetic algorithm was used to optimize parameters such as the thickness of the magnetic isolation guide sleeve, the angle of the magnetic isolation ring, the width of the magnetic isolation ring, and the depth of the stator core. Finally, Maxwell was used to conduct finite element analysis of the optimized proportional electromagnet before and after optimization. The simulation results revealed that the electromagnetic force of the optimized proportional electromagnet was almost parallel to the X-axis between 1-3 mm, and had better displacement force characteristics. The mathematical model of the pilot throttle valve was established, and its dynamic and static characteristics were simulated by Simulink so as to verify the rationality of the designed proportional solenoid parameters.

收稿日期: 2023 年 10 月 16 日 修回日期: 2023 年 11 月 30 日

* 基金项目: 青海省蔬菜遗传与生理重点实验室开放课题项目 (Sczdsys-2024-02)

第一作者: 邵明玺, 男, 1980 年生, 山东潍坊人, 博士, 副教授, 硕导; 研究方向为智能农机装备。E-mail: 390606109@qq.com

通讯作者: 李伟, 男, 1992 年生, 山东潍坊人, 博士, 讲师; 研究方向为车辆电子控制及智能化技术。E-mail: liwei1428@163.com

Keywords: hilly and mountainous areas; tractors; electro hydraulic suspension system; hydraulic pilot throttle valve; proportional electromagnet; structure parameters

0 引言

丘陵山区的可耕种面积占我国可耕地面积的近四分之一,其农业的发展对我国粮食作物的产量增长有着不可估量的影响。我国丘陵山区土地多为形状不规整、坡度起伏大的地块,限制了传统拖拉机的使用,研制适用于我国丘陵地形的丘陵山地拖拉机需求越来越迫切^[1]。丘陵山地拖拉机在作业过程中,由于工作环境地形起伏较大,引起耕深变化较大,导致车辆牵引力变化波动较大,需通过电液比例阀根据坡道地形状况进行农具姿态的主动调整,对电液悬挂控制系统的电液比例阀性能提出了更高的要求^[2],因此,在主动悬挂液压系统设计过程中对电液比例阀关键参数进行设计与优化是十分有必要的。

国内外在丘陵山地拖拉机悬挂液压控制阀的研究方面开展了较多工作,主要集中于电液比例阀本身的仿真研究和控制阀块管道压力损失计算等方面。Taylor^[3]采用试验的方法对流道的压力损失进行研究,通过激光多普勒测速仪对直角转弯流道进行测试,获得了层流与湍流状态下的速度分布规律和直角转弯处的壁面压力特性。Margolis等^[4]采用模态耦合图对流道动态特性进行分析,从而极大地简化了流体网络与非线性系统耦合的仿真过程,经过CFD仿真比较,表明液压系统采用新的换向阀形式能够有效降低压力损失,依据其结果找出最佳的流道结构参数。Barbara等^[5]使用CFD分析、文献中的经验和半经验公式以及试验测量等多种方法研究了液压控制阀块中的压力损失。通过对比表明,CFD分析能够反映不同物理模型压力损失曲线的正确趋势。杜经民等^[6]使用Fluent软件对液压控制阀块流道结构进行CFD仿真分析,研究了油液流动与流道结构之间的关系。研究表明:在直角转弯流道处,油液的流动特性发生改变,导致其流动速度出现较大波动,使控制阀块产生较大的压力损失。赵宏林等^[7]对液压控制阀块内部不同流道结构进行了CFD仿真,比较了直角转弯、工艺孔尺寸和出油流道直径对油液压力损失的影响,并通过对比得出最优流道结构和尺寸参数。苏乃权等^[8]对液压集成块的两不同孔道进行仿真对比分析,一是增大插装阀阀口的开度,二是减小插装阀阀口到集成块交叉孔道的距离,得出两者均可减小集成块流体的压力损失,这可作为集成块的一种的设计原则。左岗永等^[9]提出集成块设计重点(布局设计、油路概念设计、液压集成块设

计)的设计内容与方式,并给出优化思路。马超等^[10]通过建立某自卸车举升液压系统集成块内部管路模型,并通过Fluent软件对其流场进行仿真分析,得出减小工艺孔容腔容积以及取消直角转向结构可实现管路压力损失的减小。邵明玺等^[11]基于先导式溢流阀的原理,设计一款先导阀芯与主阀芯同轴配合的液压阀,提出了基于CFD仿真的液压阀流量性能控制设计方法。伦冠德^[12]分析了拖拉机液压悬挂装置的组成及工作原理,建立了系统的数学模型;并应用MATLAB软件对系统进行稳定性分析和仿真。赵鹏等^[13]为减小多路换向阀阀内油液回流时的速度,建立了阀内部流场三维模型,采用通用CFD软件Fluent对阀流道部分进行分析,并进行三维数值模拟。

综上,当前对于电液比例阀驱动部件研究较少,对于电磁铁高频特性的研究中大多将其等效为比例环节进行仿真研究。为获得更好的阀芯位移—力特性,需对阀芯电磁铁关键参数进行匹配性研究,以保证其良好的控制特性。本文以丘陵山地拖拉机悬挂液压系统先导式节流阀为研究对象,综合考虑丘陵山地拖拉机作业环境、结构特点和悬挂系统设计的要求,对适用于丘陵山地拖拉机悬挂系统的先导式节流阀比例电磁铁结构关键参数进行设计计算;利用Maxwell仿真软件,建立电磁铁二维模型,进行磁感应强度及磁力线仿真分析,初步确定电磁铁关键参数;并利用神经网络遗传算法对其进行优化匹配,确定磁力特性关键参数最优值。最后,建立先导式节流阀数学模型,通过Simulink对其稳态特性和动态特性进行仿真分析。

1 系统设计及优化

1.1 设计要求分析

山地丘陵拖拉机的作业环境多为起伏不定的山地,在工作过程中,地形的高低起伏变化引起拖拉机的耕深不一致,进而导致牵引力的不均匀变化。为了达到耕深可控以及牵引力恒定均匀的要求,需要拖拉机后悬挂配备电液比例阀进行调控。在液压系统中,流量阀通过改变节流口开度来调节通过的流量,以此实现对系统负载流量的控制,将节流阀安装到油路上,调节执行元件的速度^[14]。拖拉机后悬挂上升下降机构中的液压缸为柱塞缸,山地丘陵拖拉机多采用单缸结构,在液压缸上升或下降过程中,依靠上升或下降节流阀控制其速度或位置。当丘陵山地拖拉机在起伏山地或者硬度不均匀地块作业时,一般需要进行力一位综

合控制,以保证拖拉机牵引力与耕深之间的最佳匹配,因此需要采用上升或下降电液比例阀来不断调整农具姿态。这就需要压力的快速平稳卸荷,防止由于频繁供油卸荷导致的内部损伤、管路和液压元件冲击损伤。因此,需要采用一种保压阶段小流量,升压泄压大流量的液压阀。因而,在电液比例阀结构设计与仿真中,需对先导供油压力,进出口压差,主阀口流量和阶跃响应时间等关键参数基于其主要工况进行匹配性设计。

电液比例阀控制的基础在于电—机转化元件,在电液比例阀中,比例电磁铁是其电—机转化机构^[15]。比例电磁铁将电信号成比例的转化为阀芯的位移,控制节流口开度,实现流量的比例调节,因此比例电磁铁需要具有较好的位移—力特性,以保证电液比例阀的控制稳定性和快速响应性。

1.2 离散元仿真模型的建立

比例电磁铁形式多样,但其基本原理都相同,本文采用直线运动比例电磁铁,主要由衔铁、定子、隔磁环、隔磁垫、导向套、线圈、外壳等构成,如图1所示。

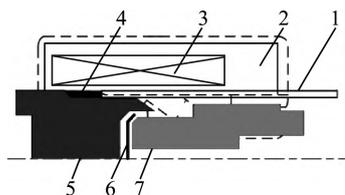


图1 比例电磁铁结构原理图

Fig. 1 Schematic diagram of proportional electromagnetic iron

1. 导向套 2. 外壳 3. 电磁线圈 4. 隔磁环 5. 定子铁芯
6. 隔磁垫 7. 衔铁(动铁芯)

1) 力—位移特性。如图1所示,比例电磁铁的电磁铁通电后,在电流或者电压不变的情况下,产生的电磁力在其有效位移范围内保持不变,这是比例电磁铁的位移力特性与普通电磁铁的最大区别。其主要原因是隔磁环以及隔磁垫的产生磁阻是磁力线(如图1中虚线所示)按照较小磁阻方向传递,衔铁移动过程中,作用在衔铁上的磁通量不变,这种特殊磁路导致的力—位移特性如图2所示。

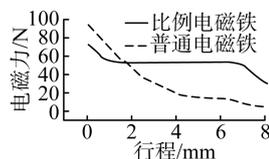


图2 比例电磁铁与普通电磁铁的位移—力示意图

Fig. 2 Displacement-force diagram of proportional electromagnetic iron and conventional electromagnetic iron

由图2可知,比例电磁铁在2~5 mm行程内,只要控制电压不变化,其电磁力保持不变。普通电磁铁由于衔铁或铁芯位置变化,导致通过其中的磁力线减少,电磁力随着行程增大,呈现非线性减小趋势。

2) 电压—力特性。电压—力特性即比例电磁铁的电磁力随着电力的变化而变化的特性。由于比例电磁铁的内部衔铁承受摩擦力以及阻尼力,使得电压—力的变化如图3所示,会产生一个滞环,滞环对于比例电磁铁以及液压阀有重要影响,是其控制特性优劣的重要体现。一般可以通过提高加工精度,消除摩擦力来减小滞环,在控制领域可以采用叠加高频信号来消除滞环。

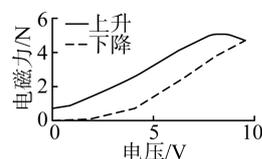


图3 比例电磁铁滞环

Fig. 3 Hysteresis loop of proportional electromagnetic iron

比例电磁铁的电磁力要求呈现出只与电流或者电压有关特性,因为铁芯移动过程导致磁通量的变化,会导致电磁力变化,这样对于控制性能是消极的,电磁铁只能作为开关元件,不能实现连续流量控制。比例电磁铁的电磁力主要用于克服复位弹簧的阻力,因此,理想状态下的比例电磁铁电磁力与弹簧力应该呈现如图4所示关系。

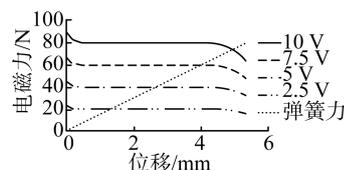


图4 电磁力与弹簧力变化曲线

Fig. 4 Curve of electromagnetic force and spring force

1.3 比例电磁铁电磁力计算

为了描述线圈内任意假想截面上的磁场力分布,采用应力的概念,假设假面某一点 Q 出,取极限面积 ΔS ,设该面积上的磁场力为 ΔF ,求其极限得

$$P_m = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta S} \quad (1)$$

式中: P_m ——截面上的点 Q 处的磁场应力或者磁场压力, N/m^2 。

在此处研究磁场的应力,考虑磁场区域为 V ,其外表面 S 是由光滑曲面构成,在其内部任意点 Q 处,体积力密度可表示为

$$F_r = J \times B = \mu(\nabla \times H) \times H \quad (2)$$

在笛卡尔坐标系中,式(2)可表示为

$$F_r = F_{rx}i + F_{ry}j + F_{rz}k$$

$$= \mu \begin{vmatrix} i & j & k \\ \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} & \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} & \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \\ H_x & H_y & H_z \end{vmatrix} \quad (3)$$

分量 F_{rx} 如式(4)所示。

$$F_{rx} = \mu \left(H_x \frac{\partial H_x}{\partial x} + H_y \frac{\partial H_x}{\partial y} + H_z \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{1}{2} \frac{\partial H^2}{\partial x} \right) \quad (4)$$

此处, $H^2 = H_x^2 + H_y^2 + H_z^2$ 。同理,可以求得 F_{ry} 和 F_{rz} 。

可以看出,Maxwell 方程具有普遍适用性,可用来求解比例电磁铁电磁力。作用于衔铁的磁力线,一部分垂直于端面,一部分垂直于圆柱面,在圆柱面上,应力和法向矢量相反,在断面上,应力与法向矢量同向,因此,磁感应线圈内部磁场在 x 轴承受侧压力,在 y 轴承受纵张力,即推动衔铁运动的力,其应力如式(5)所示。

$$P_m = \frac{1}{\mu} (n \cdot B) B - \frac{1}{2} B^2 n \quad (5)$$

式中: B ——磁感应强度, T;

n ——衔铁周围的法向量。

作用于衔铁的电磁力可以用某一面积上的应力积分表示,如式(6)所示。

$$F = \int_s P_m ds = \frac{1}{\mu} \int_s \left[(n \cdot B) B - \frac{1}{2} B^2 n \right] ds \quad (6)$$

式中: s ——磁力线通过的面积, m^2 。

用有限元法计算出 B 的离散值,然后分别计算出积分路径中每个三角形元素中的作用力,最后进行叠加。

其中 B 和 n 可表示为

$$\begin{cases} B = B_x i + B_y j \\ n = n_x i + n_y j \end{cases} \quad (7)$$

将式(6)和式(7)整理,可得

$$\begin{aligned} F &= \frac{1}{\mu} \int_s \left[(n \cdot B) B - \frac{1}{2} B^2 n \right] ds \\ &= \frac{1}{\mu} \int_s \left[(B_x i + B_y j) \cdot (n_x i + n_y j) (B_x i + B_y j) B - \frac{1}{2} B_x^2 n \right] ds \\ &= \frac{1}{\mu} \int_s \left[(B_x^2 i + B_y B_{xj}) - \frac{1}{2} B_x^2 n \right] ds \\ &= \frac{1}{\mu} \int_s \frac{1}{2} B_x^2 i ds + \frac{1}{\mu} \int_s B_x B_y j ds \\ &= F_x i + F_y j \end{aligned} \quad (8)$$

其中, F_x 为水平分析,即径向力,由于衔铁为对称圆柱体,此处, $F_x = 0$; F_y 为轴向磁场力,是推动衔铁运动的力。

$$\begin{aligned} F_y &= \frac{1}{\mu} \int_s |B| \cos\beta |B| \sin\beta j ds \\ &= \frac{1}{2\mu} \int_s |B|^2 \sin(2\beta) j ds \end{aligned} \quad (9)$$

式中: β ——磁力线与积分面的向量夹角, rad。

1.4 磁路关键参数设计及优化

1) 磁路关键参数设计。本文主要对磁路上的关键因素进行设计分析,主要包括定子铁芯深度 h_0 、隔磁导向套厚度 d 、隔磁环宽度 h 、隔磁环角度 α 。根据图 1 所示的比例电磁铁结构,在 Maxwell 软件中建立比例电磁铁二维模型,如图 5 所示,通过软件仿真得到磁感应强度及磁力线分布如图 6 所示。

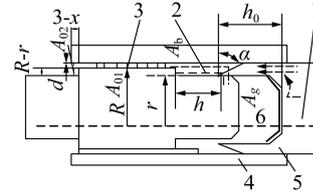


图 5 比例电磁铁关键结构因素图

Fig. 5 Key structural factors of proportional electromagnetic iron
1. 定子铁芯 2. 隔磁环间隙 3. 隔磁导套 4. 漆包线圈 5. 隔磁垫
注: R 表示大端半径, r 表示衔铁小端半径。

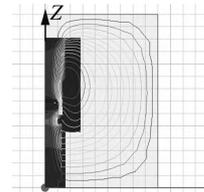


图 6 仿真模型磁感应强度及磁力线分布

Fig. 6 Magnetic induction strength and magnetic force line distribution of simulation model

定子铁芯深度对位移—力特性影响尺寸对于比例电磁铁行程—力特性的影响如图 7 所示。在衔铁位移一定时,随着 h_0 尺寸增大,电磁力在变小。在通过拐点(2.4 mm)之后,随着 h_0 尺寸变大电磁力变大。从整个衔铁位移看,只有 $h_0 = 10$ mm 时候,比例电磁铁有一段力符合设计要求,平稳电磁力为 150 N。隔磁导套的厚度 d 对于位移—力特性的影响如图 8 所示。

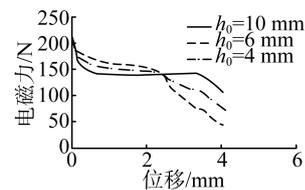


图 7 定子铁芯深度对位移力特性影响

Fig. 7 Influence of stator core depth on displacement force characteristics

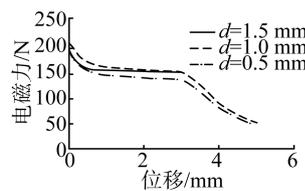


图 8 隔磁导套厚度对位移力特性影响

Fig. 8 Influence of magnetic permeability guide sleeve thickness on displacement force characteristics

隔磁套厚度增加,其电磁力增大,在采用导磁材料时,电磁力完全消失。在厚度从 0.5~1.5 mm 中,在 $d=1.5$ mm 位移力特性最好,符合设计要求。

隔磁环底部宽度 h 的变化对电磁力变化的影响如图 9 所示。

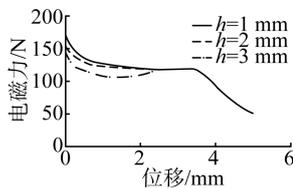


图 9 隔磁环宽度对位移力特性影响

Fig. 9 Influence of magnetic permeability ring width on displacement force characteristics

由图 9 可知,随着隔磁环宽度增加,电磁力减小。在 2 mm 处,电磁力在衔铁 1~3 mm 的位移上保持不变,满足比例电磁铁的设计要求。

隔磁环角度 α 对于位移力特性的影响如图 10 所示。可以看出,隔磁环角度 α 对于位移力特性的影响。在后半部分三条曲线基本平行,但关键的力不变阶段,电磁力的变化明显。随着隔磁角度变大,其拐点位置曲线上翘,在有效位移内其电磁力增大。因此,此处确定隔磁角度 $\alpha=60^\circ$ 。

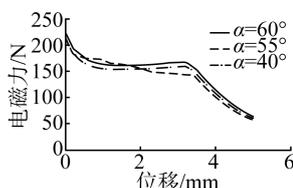


图 10 隔磁环角度对位移力特性影响

Fig. 10 Influence of magnetic permeability ring angle on displacement force characteristics

2) 磁路关键参数优化算法。通过上述仿真可确定有比例电磁力位特性相关的四个设计参数,即:隔磁导向套厚度 d 、隔磁环角度 α 、隔磁环宽度 h 、定子铁芯深度 h_0 。由于设计参数与力位特性之间存在高度的非线性关系,且不能用数学关系的显式表达,因此难以建立最优化数学模型。由于人工神经网络十分擅长表达输入输出关系不明确的高度非线性关系,因此采用 ANN(人工神经网络)是解决优化参数的有效途径。

建立结构数 d, α, h, h_0 与位移力之间的数据,建立数学模型如式(10)所示。

$$X = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T = [d, \alpha, h, h_0]^T \quad (10)$$

由于参数与输出位移力之间呈现高度非线性,无法用准确数学模型加以描述,采用人工神经网络建立他们之间的映射关系,如图 11 所示。

通过仿真已经获取样本的输入集与输出集,并将数据导入 Matlab。网络第 n 层的第 k 个神经元的输

入输出函数关系^[16]如式(11)所示。

$$O_k^n = f_k \left[\sum_{i=1}^{N_{n-1}} \omega_{ki}^{(n-1)} O_i^{(n-1)} - \theta_k^n \right];$$

$$k = 1, 2, \dots, N_n; n = 1, 2, 3; \quad (11)$$

式中: O_k^n —— n 层第 k 个神经元的输出;

ω_{ki}^{n-1} —— 第 $n-1$ 层第 i 个神经元到第 n 层的第 k 个神经元权值;

θ_k^n —— 输出阈值;

f_k —— 神经元转移函数(Sigmoid);

N_n —— 第 n 层神经元个数。

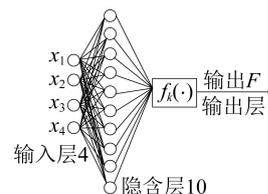


图 11 神经网络映射关系

Fig. 11 Neural network mapping relationship

以网络输出与输入样本的误差平方和 e_s 作为网络系统误差,权值的修正按 e_s 的负梯度方向(最小性能梯度取 10^{-6}),由输出层到输入层反向进行。修正值如式(12)所示。

$$\Delta \omega_{ki}^{n-1} = -\partial e_s / \partial \omega_{ki}^{n-1} = \eta \sum_{s=1}^{M_s} \delta_{sk}^n O_{si}^{n-1} \quad (12)$$

式中: N_c —— 满足 $e_s \leq 10^{-6}$ 时的迭代次数。

图 11 为 $4 \times 10 \times 1$ 单隐层 BP 网络,输入参数为 h_0, d, h, α , 输出为位移力特性,通过对不同参数之间的组合,获得一定数目的样本训练网络,训练好的网络可以用来求解固定安匝数下,任意参数组合对应的位移力特性,为遗传算法优化做准备。由于电磁铁关键结构参数与输出的位移和电磁力原始数据具有不同的量纲,为了便于训练,对其进行归一化处理,使样本数据转化为 $[0, 1]$ 之间的数值。数据的拟合度如图 12 所示。训练数据(Training)、验证数据(Validation)、测试数据(Test)以及全部数据(All)的拟合度 R 都约等于 1,拟合度良好,为遗传算法优化建立基础。

遗传算法优化 BP 神经网络的要素包括网络初始化、适应度函数、选择、交叉和变异操作。对于上述四个参数的优化流程如图 13 所示。

在优化过程中,种群数量为 200,最大迭代次数为 100 次,交叉概率为 0.7,变异概率为 0.2,最大变异位数为 10。依据上述设置进行遗传算法优化,可以到优化后的最佳适应度值以及最优个体数量,如图 14 所示,参数优化最终结果如表 1 所示。

将优化后参数进行圆整,隔磁导向套厚度 $d = 1.2$ mm、隔磁环角度 $\alpha = 60^\circ$ 、隔磁环宽度 $h = 4$ mm、

定子铁芯深度 $h_0 = 12 \text{ mm}$ 。

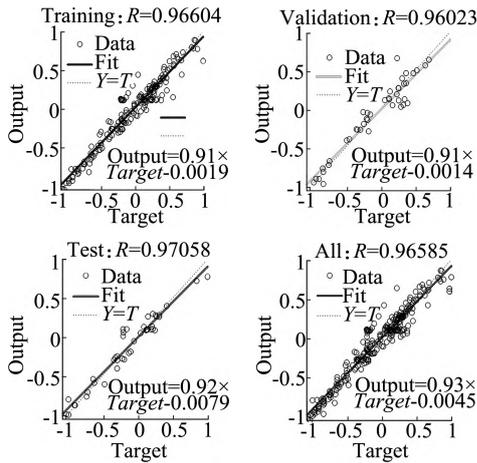


图 12 数据拟合图
Fig. 12 Data fitting

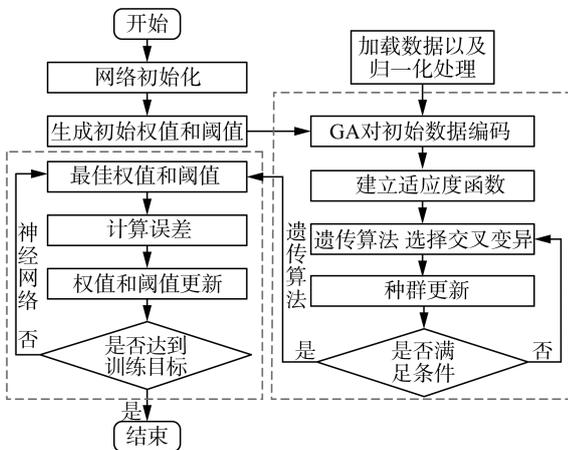


图 13 优化流程图
Fig. 13 Optimization process diagram

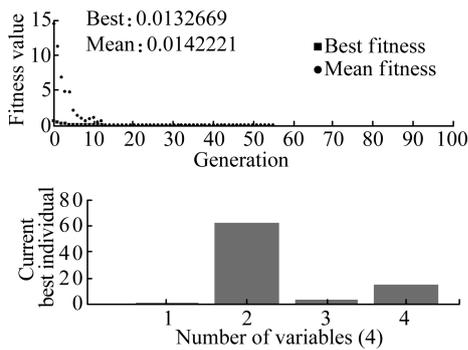


图 14 遗传种群适应度值以及最优个体数量
Fig. 14 Genetic population fitness value and optimal individual number

表 1 参数优化前后对比

Tab. 1 Comparison before and after parameter optimization

参数	优化前	优化后
d/mm	1.5	1.3
$\alpha/(\text{°})$	60.0	61.0
h/mm	2.0	4.0
h_0/mm	10.0	13.0

在此基础之上,重新对比例电磁铁进行电磁有限元仿真,其位移力特性曲线优化前后对比,如图 15 所示。可以看出,比例电磁铁经过优化之后,在 1~3 mm 之间,电磁力几乎与 x 轴平行,具有更好的位移—力特性,从而保证电液比例阀具有更好地控制稳定性和快速响应性。

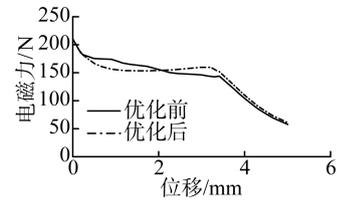


图 15 参数优化后位移力特性曲线
Fig. 15 Displacement force characteristic curve of parameter optimization

2 先导式节流阀数学模型

设计先导式节流阀结构如图 16 所示,液压原理图如图 17 所示。

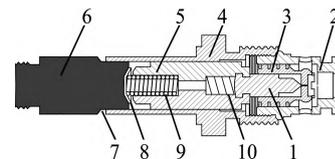


图 16 先导式节流阀结构图

Fig. 16 Structure diagram of pilot flow control valve

- 1. 先导阀芯 2. 阀套 3. 主阀芯 4. 阀座 5. 衔铁
- 6. 比例电磁铁铁芯 7. 隔磁环 8. 隔磁垫 9. 主阀弹簧 10. 先导阀弹簧

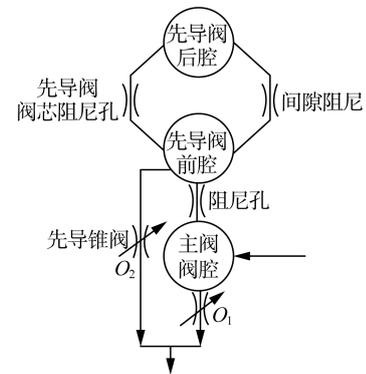


图 17 先导式节流阀液压原理图

Fig. 17 Principle diagram of pilot hydraulic valve hydraulic

根据液压原理图和先导式节流阀结构图,建立先导式节流阀数学模型。

1) 压力—流量特性方程。主阀节流口是薄壁小孔,依据伯努利方程可以推导出小孔节流如式(14)所示。

$$q_m = C_d A_z(x_m) \sqrt{\frac{2(P_s - P_T)}{\rho}} \quad (14)$$

式中: q_m ——经过主阀节流口流出的流量, m^3/s ;
 P_s ——供油压力(液压阀进油端压力), Pa;

P_T ——液压阀出油口压力, Pa;

A_z ——节流口节流面积, m^2 ;

x_m ——主阀阀芯位移, m;

ρ ——液压油密度, kg/m^3 。

电液比例阀主阀阀芯上阻尼孔属于细长孔, 其压力—流量方程为

$$q_{xt0} = \frac{\pi d_{xt0}^4}{128\mu l} (P_s - p_{xt}) \quad (15)$$

式中: q_{xt0} ——经过主阀阀芯阻尼孔进入先导阀阀腔的流量, m^3/s ;

d_{xt0} ——阻尼孔直径, m;

p_{xt} ——先导阀阀腔内部压力, Pa。

先导阀阀口属于薄壁孔, 其压力—流量方程为

$$q_{xt} = C_{dt} A_x(x_{xt}) \sqrt{\frac{2p_{xt} - P_T}{\rho}} \quad (16)$$

$$A_x x_{xt} \approx \pi d_{xt} (x_{xt} - x_m) \sin(\theta/2)。$$

式中: q_{xt} ——先导阀阀腔流出流量, m^3/s ;

C_{dt} ——先导阀阀口流量系数, 取 0.76;

A_x ——先导阀节流口节流面积, m^2 ;

d_{xt} ——先导阀节流口直径, m;

θ ——先导阀阀芯锥度角, rad;

x_{xt} ——比例先导阀阀芯位移量, m。

2) 流量连续性方程。先导阀未启动时, 主阀阀腔与先导阀阀腔通过阻尼孔连接, 两腔压力相等。比例电磁铁通电, 先导阀阀芯在衔铁带动下开始移动, 主阀腔内液压油经过阻尼孔流入先导阀阀腔, 同时, 先导阀节流口开启, 液压油经过节流口流出。经阻尼孔流入先导阀阀腔的液压油, 分成三部分, 一部分流出, 一部分被压缩, 一部分补偿先导阀体积的变化量, 流量连续性方程为

$$q_{xt0} - q_{xt} = \frac{V_{xt0} - \frac{\pi d_{xt}^2}{4} x_{xt} - \frac{\pi(d_m^2 - d_{xt}^2)}{4} x_m}{\beta_e} \times \left(\dot{p}_{xt} - \frac{\pi d_{xt}^2}{4} \dot{x}_{xt} - \frac{\pi(d_m^2 - d_{xt}^2)}{4} \dot{x}_m \right) \quad (17)$$

式中: β_e ——液压油的体积弹性模量, $\beta_e = 900 \times 10^6$;

d_m ——主阀阀芯直径, m;

V_{xt0} ——先导阀关闭时先导阀阀腔的油液容积, m^3 。

根据流量守恒, 流入流量分为主阀阀腔体积补偿、先导阀阀腔体积补偿, 体积压缩以及主阀节流口流出流量。

$$Q_s = q_m + q_{xt0} + \frac{\pi(d_m^2 - d_{m0}^2)}{4} x_m \quad (18)$$

式中: Q_s ——比例阀进油口流入阀内部总流量, m^3/s ;

d_{m0} ——主阀出油口直径, m。

3) 力平衡方程。依据牛顿第二定律, 建立阀芯力平衡方程。电液比例下降阀先导阀的受力分析: 阀芯受到的外力主要为液压油的压力、电磁铁产生的电磁力, 其合力促使阀芯产生位移, 这时阀芯受到阻尼力(与速度有关)、弹簧力、稳态液动力、瞬态液动力、干摩擦力等, 但由于瞬态液动力非常小, 可以忽略不计。由于先导阀阀芯开了两条均压槽, 因此, 没有液压卡紧力, 摩擦力也很小, 可以忽略不计。根据牛顿第二定律, 在垂直方向上建立先导阀阀芯受力方程为

$$F_m - (\pi d_{xt}^2/4) p_{xt} = m_{xt} \ddot{x}_{xt} + B_{xt} \dot{x}_{xt} + B_{xdt} (\dot{x}_{xt} - \dot{x}_m) + K_{xd} x_{xt} + F_s \quad (19)$$

式中: F_m ——先导阀阀芯受到的电磁力, N;

B_{xt} ——衔铁的阻尼系数;

B_{xdt} ——衔铁的相对阻尼系数;

F_s ——电液比例阀先导阀阀芯移动后, 阀芯所受的稳态液动力, N。

$$F_s = C_{dt} C_v \pi d_{xt} (x_{xt} - x_m) \sin(\theta) (p_{xt} - P_T) \quad (20)$$

式中: C_v ——比例阀先导阀节流口的流速系数。

比例阀主阀阀芯受力包括: 油液压力、惯性力(假想力)、黏性阻尼力、弹簧力、稳态液动力、瞬态液动力(忽略不计)、摩擦力(忽略不计)等。根据牛顿第二定律, 主阀阀芯的受力方程为

$$\frac{\pi(d_3^2 - d_2^2)}{4} P_1 - \frac{\pi(d_3^2 - d_4^2)}{4} P_3 = m_z \ddot{X}_z + B_{zf} \dot{X}_z + B_{zfx} (\dot{X}_z - \dot{X}_x) + F_{zws}; \quad 0 \leq X_z \leq X_{zm} \quad X_x \geq X_z \quad (21)$$

式中: X_{zm} ——比例阀主阀芯最大开口度, m;

B_{zf} ——比例阀主阀芯运动粘度系数, $N \cdot s/m$;

F_{zws} ——比例阀主阀芯所受的稳态液动力, N。

3 仿真分析

根据所建立的数学模型建立 Simulink 仿真模型, 分别进行电液比例阀稳态特性和动态特性仿真分析, 验证所设计的前导式节流阀比例电磁铁参数的合理性。

3.1 稳态特性仿真

由于控制器采用 5 V 电压信号供电, 因此, 所有的电液比例阀均采用 0~5 V 的控制电压进行仿真。对下降阀进行准确的流量控制, 需要研究其在不同控制电压下的稳态流量曲线。设置仿真时间为 5 s, 控制电压在 5 s 内 0~5 V 线性增加, 下降阀进出口压差为 0.75 MPa。通过仿真得到下降阀静态流量与控制电压的关系曲线, 如图 18 所示。

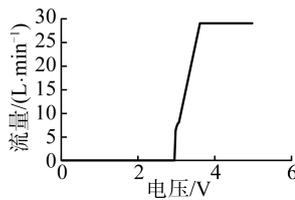


图18 稳态特性曲线

Fig. 18 Curve of steady-state characteristic

可以看出,先导式节流阀静态流量随控制电压的变化过程可分为三个阶段:第一阶段,由于主阀芯节流口存在重叠量(即不灵区),所以在此范围内,主阀节流口面积为零,流量也为零,此部分对应的控制电压称为死区电压;第二阶段,控制电压增大,主阀位移量超出重叠量后,进入矩形节流口区域,流量缓慢增加;第三阶段,随着控制电压继续增大,进入主阀芯全周开口区,系统流量迅速增加,直到达到最大流量。死区电压大约为3V。当阀口全开时,主阀节流口的流量达到峰值29 L/min,与丘陵山地拖拉机的作业工况相符。

3.2 动态特性仿真

控制电压保持不变,研究负载阶跃变化时流量动态响应特性曲线。设置先导式节流阀控制电压为4V,仿真时间为6s,负载压力在3s时由3~5 MPa阶跃变化,得到先导式节流阀流量响应特性曲线,如图19所示。可知,当负载压力由3 MPa阶跃变化到5 MPa时,系统压力响应时间约为0.2s,超调量约为3%;负载阶跃时,流量快速调整到14.5 L/min左右,调整时间约为0.01s。符合丘陵山地拖拉机悬挂系统节流阀工作要求。

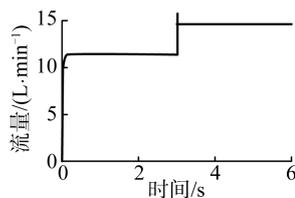


图19 动态特性曲线

Fig. 19 Curve of dynamic characteristic

通过先导式节流阀动态特性和静态特性仿真可知,所设计的比例电磁铁符合液压阀工作要求。

4 结论

1) 根据丘陵山地拖拉机作业环境和作业特点,设计一种适用于丘陵山地拖拉机的先导式节流阀比例电磁铁,对其关键结构参数进行设计计算,并通过Maxwell软件中建立比例电磁铁二维模型仿真初步设定比例电磁铁结构参数。

2) 通过神经网络遗传算法,对磁路上的影响磁通量的关键结构参数隔磁导向套厚度 d 、隔磁环角度 α 、隔

磁环宽度 h 、定子铁芯深度 h_0 进行优化匹配,优化后的隔磁导向套厚度为1.3 mm、隔磁环角度为61.0°、隔磁环宽度为4 mm、定子铁芯深度为13 mm,仿真结果表明优化后的比例电磁铁具有更好的力一位移特性。

3) 根据悬挂系统液压原理图,建立先导式节流阀数学模型,通过Simulink建立节流阀仿真模型,并对其稳态特性和动态特性进行仿真分析。仿真结果表明:节流阀在稳态下主阀节流口流量峰值为29 L/min;驱动电压为4V时,负载压力为3~5 MPa阶跃变化时系统压力响应时间为0.2s,超调量为3%,负载阶跃时流量调整至14.5 L/min的调整时间为0.01s,所设计的先导式节流阀比例具有较好的稳定性和动态响应性,符合丘陵山地拖拉机作业需求。

参 考 文 献

- [1] 邵明玺. 丘陵山地拖拉机电液悬挂液压控制阀块设计与研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2020.
- [2] 谢斌, 武仲斌, 毛恩荣. 农业拖拉机关键技术发展现状与展望[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 1-17. Xie Bin, Wu Zhongbin, Mao Enrong. Development and prospect of key technologies on agricultural tractor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 1-17.
- [3] Taylor A M, Whitelaw J, Yianneskis M. Curved ducts with strong secondary motion: Velocity measurements of developing laminar and turbulent flow [J]. Journal of Fluids Engineering-transactions of the ASME, 1982, 104: 350-359.
- [4] Margolis D L, Yang W C. Bond graph models for fluid networks using modal approximation [J]. Journal of Dynamic Systems Measurement & Control, 1985, 107(3): 169.
- [5] Barbara Z, Giovanni C, Carlo R, et al. Pressure losses in hydraulic manifolds [J]. Energies, 2017, 10(3): 310.
- [6] 杜经民, 蔡保全, 李宝仁. 某系统液压集成块流道液流特性分析[J]. 机床与液压, 2010, 38(13): 143-146.
- [7] 赵宏林, 代广文, 张开龙, 等. 基于湍流理论的液压集成块流道仿真分析[J]. 石油机械, 2015, 43(8): 78-82, 118. Zhao Honglin, Dai Guangwen, Zhang Kailong, et al. Simulation analysis on hydraulic manifold block flow channel based on turbulence theory [J]. China Petroleum Machinery, 2015(8): 78-82, 118.
- [8] 苏乃权, 李石栋, 蔡业彬, 等. 基于FLUENT的集成块流道的仿真分析[J]. 机床与液压, 2017, 45(4): 92-95, 109.
- [9] 左岗永, 徐双用. 液压集成块设计要点分析[J]. 煤矿机电, 2018(5): 10-11, 15.
- [10] 马超, 倪文波, 王雪梅. 某自卸车液压系统集成块内部管路仿真与优化[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2017, 30(1): 91-94, 110.

(下转第171页)

- [15] 李井祝,王鹏,耿长兴. 基于图像处理的黄瓜霜霉病情评估[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(6): 67-71.
Li Jingzhu, Wang Peng, Geng Changxing. Disease assessment of cucumber downy mildew based on image processing [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(6): 67-71.
- [16] 蒲秀夫,宁芊,雷印杰,等. 基于二值化卷积神经网络的农业病虫害识别[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(2): 177-182.
Pu Xiufu, Ning Qian, Lei Yinjie, et al. Identification of agricultural plant diseases based on binarized convolutional neural network [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(2): 177-182.
- [17] 任全会,杨保海. 图像处理技术在田间杂草识别中应用研究[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(6): 154-158.
Ren Quanhui, Yang Baohai. Application of image processing technology in weed recognition in field [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(6): 154-158.
- [18] 顾博,邓蕾蕾,李巍,等. 基于GrabCut算法的玉米病害图像识别方法研究[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(11): 143-149.
Gu Bo, Deng Leilei, Li Wei, et al. Research on maize disease image recognition method based on GrabCut algorithms [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(11): 143-149.
- [19] 王江晴,冀星,莫海芳,等. 基于轻量化VGG的植物病虫害识别[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(4): 25-31.
Wang Jiangqing, Ji Xing, Mo Haifang, et al. Plant disease detection based on lightweight VGG [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(4): 25-31.
- [20] 张领先,陈运强,李云霞,等. 基于卷积神经网络的冬小麦麦穗检测计数系统[J]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 144-150.
Zhang Lingxian, Chen Yunqiang, Li Yunxia, et al. Detection and counting system for winter wheat ears based on convolutional neural network [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 144-150.
- [21] 王海燕,张瑜慧. 基于机器视觉的颗粒识别技术[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2013, 14(4): 101-104.
Wang Haiyan, Zhang Yuhui. Particle identification count based on machine vision [J]. Journal of Changchun Institute of Technology (Natural Science Edition), 2013, 14(4): 101-104.
- [22] 邱荣洲,赵健,何玉仙,等. 基于性诱和深度学习的草地贪夜蛾成虫自动识别计数方法[J]. 昆虫学报, 2021, 64(12): 1444-1454.
Qiu Rongzhou, Zhao Jian, He Yuxian, et al. An automatic identification and counting method of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) adults based on sex pheromone trapping and deep learning [J]. Acta Entomologica Sinica, 2021, 64(12): 1444-1454.
- [23] 岑冠军,华俊达,潘怡颖,等. 基于深度学习芒果图像在线识别与计数方法研究[J]. 热带作物学报, 2020, 41(3): 425-432.
Cen Guanjun, Hua Junda, Pan Yiying, et al. Online recognition and counting with deep learning for mango images [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2020, 41(3): 425-432.
- [24] 邱白晶,程麒文,陈国平,等. 长翅灰飞虱图像边缘的多区域多结构检测方法[J]. 农业机械学报, 2008, 39(7): 119-123.
Qiu Baijing, Cheng Qiwen, Chen Guoping, et al. Multiple areas and multiple structures method of image edge detection for the long wing *Laodelphax striatellus* (Fallen) [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(7): 119-123.
- [25] 张洪刚,陈光,郭军. 图像处理与识别[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2006.

(上接第159页)

- [11] 邵明玺,张秀梅,黄宗经. 先导式电液比例阀的特性研究[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(7): 131-139.
Shao Mingxi, Zhang Xiumei, Huang Zongjing. Study on characteristics of pilot-operated electro-hydraulic proportional valve [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(7): 131-139.
- [12] 伦冠德. 拖拉机液压悬挂装置的建模及仿真分析[J]. 机床与液压, 2007, 35(6): 143-145.
- [13] 赵鹏,李瑞川,李玉善,等. 液压阀流道的改进设计与优化[J]. 机床与液压, 2018, 46(13): 134-137.
Zhao Peng, Li Ruichuan, Li Yushan, et al. Improved design and optimization of hydraulic valve flow channels [J]. Machine Tool and Hydraulic, 2018, 46(13): 134-137.
- [14] 黄雪峰. 直动式水压溢流阀压力特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- [15] 简鸿亮,张静,刘昱,等. 自适应丘陵山地拖拉机虚拟设计及仿真分析[J]. 山西农业科学, 2023, 51(8): 935-941.
Jian Hongliang, Zhang Jing, Liu Yu, et al. Virtual design and simulation analysis of adaptive hilly and mountainous tractors [J]. Shanxi Agricultural Science, 2023, 51(8): 935-941.
- [16] 罗蓬. 模具快走丝放电切割工艺的神经网络模拟与优化[J]. 贵州工业大学学报(自然科学版), 2000(5): 65-68.
Luo Peng. Neural network simulation and optimization of die fast wire discharge wire cutting process [J]. Journal of Guizhou University of Technology (Natural Science Edition), 2000(5): 65-68.