

基于自适应模拟退火算法的航空电磁阀优化研究^{*}

李 杰, 牛惠萌, 赵世明, 闫柯朴, 李 越

(长安大学 电子与控制工程学院, 陕西 西安 710061)

摘 要: 电磁阀是组成航空发动机数字电子控制系统的重要部件, 其响应的快速性是制约航空发动机数字电子控制系统性能的重要因素。根据某型航空电磁阀的设计原理构建了一种电磁阀数学模型, 并使用设计参数及实际的试验、试车数据对所建成的航空电磁阀数学模型进行了验证。验证结果显示, 所设计的电磁阀数学模型具有较高的动静态的精度, 在此基础上, 设计了一种基于自适应模拟退火算法的航空电磁阀优化方法, 并对电磁阀的线圈匝数、阀芯质量、工作气隙的宽度和模型管直径等4个重要参数进行了优化。研究结果证实, 相比于原设计方案, 参数优化后的电磁阀开启响应时间缩短了50%, 关闭响应时间缩短了45.4%。

关键词: 航空发动机; 电磁阀; 数学模型; 自适应模拟退火算法; 参数优化

中图分类号: V233.7 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2022) 06-200960-08

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 200960

Aviation Solenoid Valve Optimization Based on Adaptive Simulated Annealing Algorithm

LI Jie, NIU Hui-meng, ZHAO Shi-ming, YAN Ke-pu, LI Yue

(School of Electronics and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: Solenoid valve is an important component of aeroengine digital electronic control system, and its rapid response is an important factor which restricts the performance of aeroengine digital electronic control system. A mathematical model of a solenoid valve is built based on the design principle of a certain type of aviation solenoid valve, and the design parameters and actual test and test data are used to verify the mathematical model of the built aviation solenoid valve. The verification results show that the designed mathematical model of solenoid valve has high dynamic and static accuracy. On this basis, an optimization method of aviation solenoid valve based on adaptive simulated annealing algorithm is designed, and the four important parameters of solenoid valve including coil turns, spool quality, initial working air gap width and model tube diameter were optimized. The research results confirmed that, compared with the original design, the solenoid valve opening response time after parameter optimization was shortened by 50%, and the closing response time after parameter optimization was shortened by 45.4%.

Key words: Aeroengine; Solenoid valve; Mathematical model; Adaptive simulated annealing algorithm; Parameter optimization

^{*} 收稿日期: 2020-12-02; 修订日期: 2021-04-09。

基金项目: 国家自然科学基金 (61704010); 中央高校基本科研业务费 (300102320110)。

通讯作者: 李 杰, 博士, 副教授, 研究领域为航空发动机控制、人工智能与最优控制。

引用格式: 李 杰, 牛惠萌, 赵世明, 等. 基于自适应模拟退火算法的航空电磁阀优化研究[J]. 推进技术, 2022, 43(6): 200960. (LI Jie, NIU Hui-meng, ZHAO Shi-ming, et al. Aviation Solenoid Valve Optimization Based on Adaptive Simulated Annealing Algorithm[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(6):200960.)

1 引言

电磁阀是组成航空发动机数字电子控制系统的重要部件,电磁阀作为航空发动机数字电子控制系统的执行机构,其性能与控制系统的响应快速性、稳定性和精确性等指标直接相关。因此,研究如何提升航空电磁阀工作的快速性对于提升航空发动机控制系统性能具有重要意义^[1]。

随着我国航空工业的不断发展,航空发动机控制系统对于电磁阀响应快速性和精确性要求不断提高。近些年来,国内外学者在航空电磁阀的研究中取得了大量的研究成果,欧美发达国家已可生产、制造大流量、响应速度快的航空电磁阀,如美国的ASCO公司、日本的SMC公司、德国的FESTO公司和英国的Norgren公司等相继开发出了响应速度快的高速电磁阀^[2],而相比之下,国内对于电磁阀的研究较晚,目前尚落后于发达国家。国内研究成果主要集中在电磁阀的铁芯材质、驱动电路设计等方面,如Hung等^[3]改进了静电磁力并通过优化线圈的横截面形状以及线圈和电枢的相对位置,缩短了电磁阀的打开和关闭响应时间。张奇等^[4]进行了Ansys建模,以模拟电磁阀的关闭动态响应过程,并优化了驱动电路的设计以缩短电磁阀的关闭响应时间。张廷羽等^[5]通过研究电磁阀的电磁部分建立出仿真模型,提出了一种适合电磁阀铁芯材料和线圈优化设计的改进方案。李铁栓等^[6]对高压共轨电控喷油器高速电磁阀的响应特性和电磁力特性进行了优化设计,以缩短电磁阀的打开和关闭延迟响应时间。官长斌等^[7]基于能量回收原理实现了电磁阀开启速度与关闭速度的同时提高。上述研究工作对于航空电磁阀的性能优化作出了很多有益的工作,但一些关键技术问题仍然没有解决,如对影响航空电磁阀响应速度和输出流量的因素尚未十分明确,特别是快速响应和大流量的问题,限制了高速电磁阀的实际应用及性能的进一步提升。

本文建立了某型航空发动机控制系统中的电磁阀数学模型,并采用以该型电磁阀为执行机构的航空发动机控制系统的实际试车数据对电磁阀模型进行了验证。在此基础上,采用自适应模拟退火算法(Adaptive simulated annealing, ASA)对影响电磁阀响应快速性的4个重要因素进行了参数优化,仿真结果证实所提出的优化设计方案可以大幅提升航空电磁阀响应快速性。

2 方法

2.1 航空电磁阀数学模型

航空电磁阀是快速响应式开关电磁阀,其具有全开或全关两种基本的工作状态,通过改变一个时间周期内阀口全部开启的时间与阀口全部关闭的时间之间的比例,即可控制该段时间内阀口通过的介质流量。其工作原理可简要描述为:电磁阀在获得驱动信号后,由于电磁感应原理,线圈所产生的电磁力会逐渐增加,从而吸引衔铁克服弹簧的弹力带动推杆进行运动,推杆又进一步带动挡板移动,使阀门打开;当电磁阀的驱动信号消失后,电磁力将逐渐减小,在弹簧的拉力作用下,挡板复位盖住阀口,使阀门关闭,从而切断燃油流量。在控制信号的作用下,随着阀门持续进行开、关动作,其出口的燃油流量也会出现随之对应的脉动^[8],因此电磁阀的流量一般为该段周期内的平均流量,占空比越大,阀门开启的时间越长,其流量也就越大。高速电磁阀的结构图如图1所示,其中1是阀门,2是挡板,3是线圈骨架,4是衔铁,5是弹簧2,6是线圈,7是推杆,8是弹簧1。

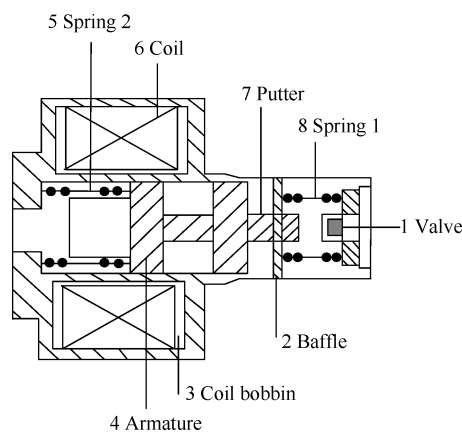


Fig. 1 Structure diagram of high-speed solenoid valve

忽略控制信号与电磁阀动作之间的延迟,即设电磁阀能够在控制系统给出开通或关闭信息的瞬间立即产生动作,则电磁阀的平均输出流量 $\bar{Q}$ 的表达式为

$$\bar{Q} = sQ_m \quad (1)$$

式中 s 表示脉冲信号的占空比, Q_m 表示在一个周期内的最大输出流量。

$$Q_m = C_d A_v \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (2)$$

式中 C_d 为流量系数, A_v 为阀口流通面积, Δp 为阀口压差, ρ 为流体的密度。

电磁阀的磁势方程反映了电磁阀线圈正常工作时所需要的磁电动势,其表达式为

$$IN = \frac{B_0 \lambda_2 l_s}{\mu_0 \lambda_1} \quad (3)$$

式中 IN 为线圈安匝数; B_0 为等效气隙处的磁感应强度; λ_2 为气隙系数,一般取为 0.25~0.5; λ_1 为铁磁材料系数,一般取为 0.65~0.85; l_s 为衔铁间径向间隙,一般取为 0.008~0.002; μ_0 为空气的磁导率。

电磁阀的电压方程的主要作用是为了能够较为精确地确定电磁阀的匝数,线圈直径以及线圈允许通过的电流,其表达式为

$$U = IR_c = IN \frac{\rho_c \pi D_c}{g_c} \quad (4)$$

式中 g_c 为导线的截面积, R_c 为电磁阀线圈总电阻, ρ_c 为导线在工作温度下的电阻率, I 为线圈中流过的电流, N 为线圈匝数, D_c 为线圈的内外径之和。

电磁阀中的气隙是一个重要的参数,气隙模型的形状不同其参数设置也会不同,常见的气隙模型主要分为圆柱形与圆锥形。本模型采用圆柱形气隙,气隙模型的表达式为

$$R = \frac{1}{\mu_0 \cdot d \left(\frac{\pi \cdot d}{4\delta} + \beta \right)} \quad (5)$$

式中 d 为圆柱半径, δ 为气隙宽度, β 为修正系数。

根据麦克斯韦电磁吸力公式,忽略漏磁以及涡流的影响,电磁阀气隙产生的吸力为

$$F_c = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 S_c} \quad (6)$$

式中 Φ 为气隙处的磁通, S_c 为气隙截面积。

在实际电磁阀建模过程中,采用了 AMESim 软件平台中的基本模块如线圈、漏磁、气缝、弹簧、阀门等,同时也进行了部分模型的自主开发,电磁阀部分非线性环节如电磁力与负载位置之间的关系,不易用解析方法描述时,采用部件实验数据和动态环节补偿等方法描述其输入输出关系。所建立的数学模

型的基本计算过程与公式(1)~(6)一致。

2.2 模型验证

建成高置信度电磁阀数学模型是进行优化的基础,根据 2.1 节所示过程建成电磁阀数学模型后,还需对该模型的精度及工作可靠性进行验证。设置航空电磁阀的驱动脉宽调制信号(PWM)频率保持为 50Hz,当输入驱动信号的占空比不同时,监测电磁阀模型中阀芯在多控制周期内的位移响应,可获得如图 2、图 3 所示的电磁阀阀芯位置响应曲线以及输出流量的变化曲线。其中,图 2(a)~(c)和图 3(a)~(c)分别表示当脉冲信号的占空比改变为 20%,50% 以及 80% 时,阀芯的位置变化及输出流量的变化情况。由图可知,当占空比为 20% 时,阀芯打开的时间占该周期总量的 1/5;当占空比为 50% 时,阀芯打开的时间占该周期总量的 1/2;当占空比为 80% 时,阀芯打开的时间占该周期总量的 4/5。由此可见阀芯的位移响应可以跟随不同的脉冲占空比变化,脉冲占空比增大,阀口打开的时间增长,通过阀门的流量也随之增大。

为检验电磁阀模型的静态精度,将该型电磁阀的设计参数与模型参数进行对比,可获得如图 4 所示的电磁阀的占空比-流量特性图。图 4 将该型电磁阀的设计要求占空比-流量特性与所建立的数学模型的占空比-流量特性进行了对比,从图 4 可知,占空比较低时(小于 60%),数学模型与设计要求的流量几乎重合,占空比较高时(大于 60%),数学模型与设计要求的流量出现了一些偏差,但偏差较小,平均约为 5%,在该电磁阀设计允许的误差范围内^[9]。综上所述,所建立的该型电磁阀数学模型符合电磁阀设计原理,其静态精度较高,满足研究需求。

为验证该高速电磁阀模型的动态性能,在某型航空发动机控制系统半物理仿真平台中^[10],用所建成的航空电磁阀数学模型替换原有实际电磁阀,进行半物理仿真,并与实际试车结果进行对比,可获得如图 5 所示的结果。图 5 展示了实际某型航空发动

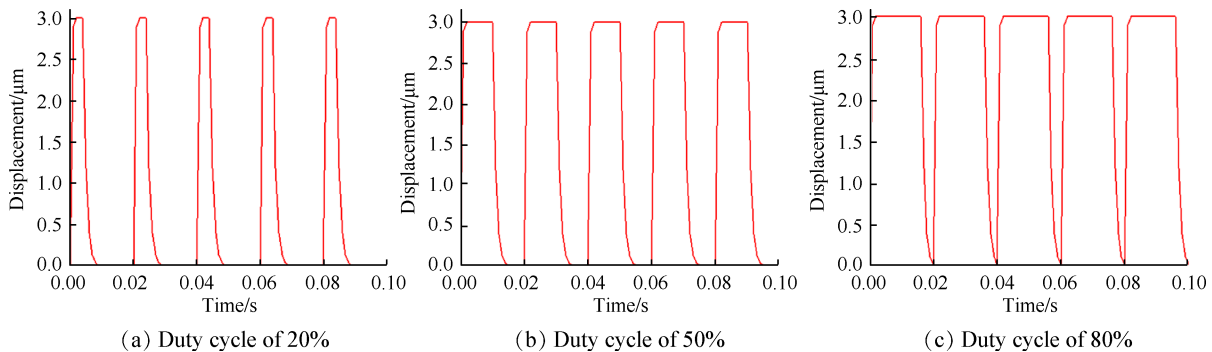


Fig. 2 Displacement response curve of the solenoid valve core

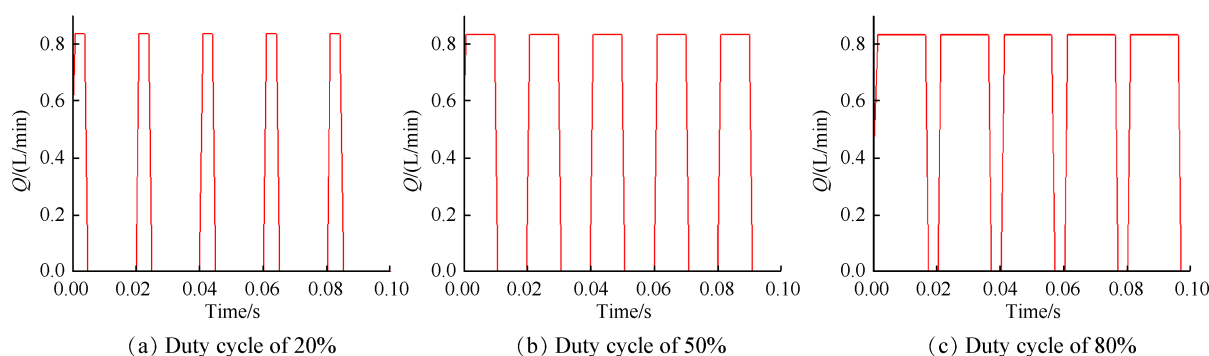


Fig. 3 Output flow rate of the solenoid valve

机高压压气机进口导流叶片角度(α_2)控制系统的实际试车数据与半物理仿真平台的实验数据。其中实际试车数据采用的是实际电磁阀,相应半物理仿真平台中的电磁阀采用所建立的电磁阀数学模型。由图5可见,两次实验曲线相近,拟合程度较高,表明所建立的电磁阀模型与实际电磁阀动静态特征基本一致。为了进一步分析该结果,对半物理试验台获得的 α_2 和实际试车数据进行线性回归分析,可获得如图6所示的线性回归曲线和图7所示的误差分布图。分析图6可知,拟合度为0.99827,这表明两次实验曲线非常相近(理想情况时,拟合度=1),由图7可知,两次实验曲线之间的误差始终保持在 ± 0.035 (经归一化处理)以内。综合上述分析可知,所建立的某型航空电磁阀具有较高的动静态精度,其置信度较高。

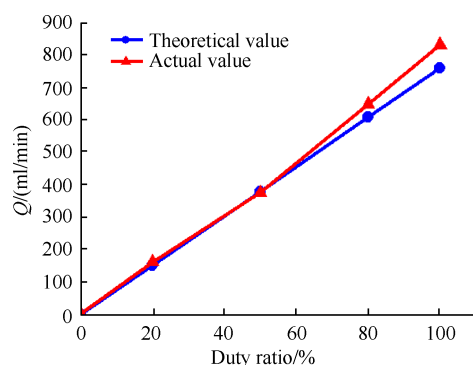


Fig. 4 Duty ratio-volume flow characteristic

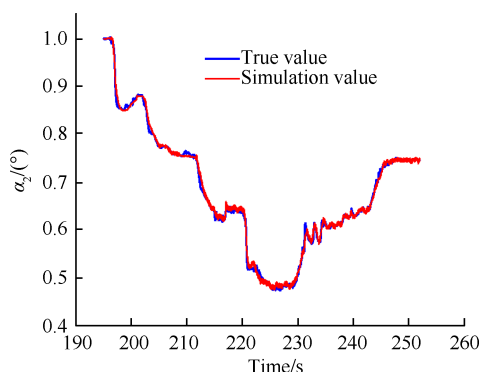


Fig. 5 Verification of the solenoid valve

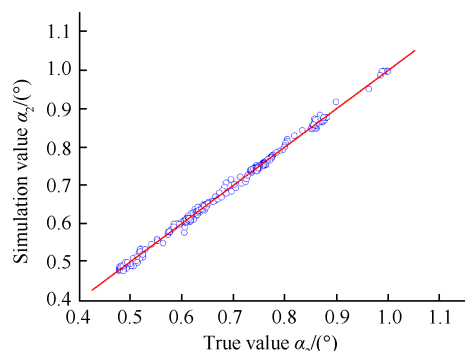


Fig. 6 Linear regression curve

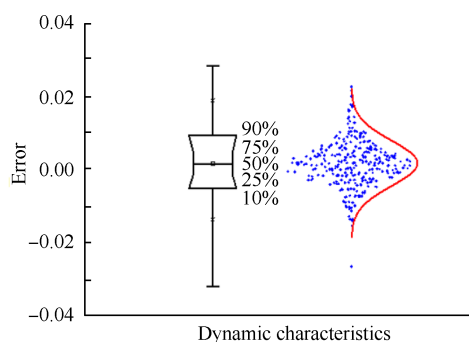


Fig. 7 Error distribution

2.3 优化参数分析

航空电磁阀的动态响应特性指航空发动机控制系统在一定时间内向电磁阀发送电磁驱动信号,电磁阀的电磁体产生电磁力,从而驱动阀门来进行打开和关闭动作,以此实现对液压及流量的精确控制。电磁阀的电磁驱动单元接收到具有不同频率或工作周期的脉冲信号后,阀门不会立即打开或关闭,通常会存在一定的时间延迟,该延迟时间被称为电磁阀的动态响应时间。动态响应时间不是由一个因素决定的,系统中许多因素的综合作用都会影响该响应时间^[11-12]。为了满足控制系统快速响应的技术要求,电磁阀(决定输出功率的关键部件)的延迟时间必须尽可能短。

当脉冲信号的频率不变时,电磁阀的阀芯位移

响应会跟随脉冲占空比的变化而发生改变。阀芯的位移动态响应大致可以分为开启阶段 t_{on} 、完全开启阶段 t_{co} 以及关闭阶段 t_{off} , 见图 8。由于受到电磁感应、电磁阀阀芯自身所具有的惯性以及流体阻力、摩擦力等因素的影响, t_{on} 又可划分为 t_1 (开启滞后阶段) 和 t_2 (开启动作阶段), t_{off} 也可划分为 t_3 (关闭滞后阶段) 和 t_4 (关闭动作阶段), 其中 t_1 及 t_3 两个滞后阶段是由线圈流通电流的过程中所产生的感抗作用导致的^[13]。电磁阀的开启响应时间与关闭响应时间是衡量高速电磁阀动态响应特性的重要指标, 要实现精确控制必须对这两个时间阶段着重进行研究。

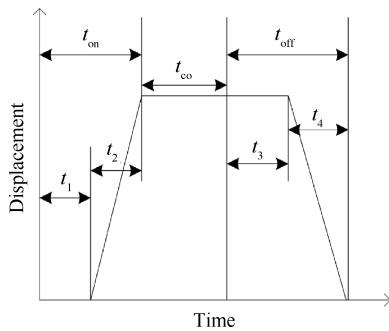


Fig. 8 Response time of the solenoid valve

该优化问题的数学描述如下。首先, 确定优化变量及其取值范围, 选取线圈匝数、电磁阀的阀芯质量、电磁阀的工作气隙以及模型管直径作为优化变量, 则 ASA 算法的优化变量为

$$X = \{N, M_v, \delta, D_m\} \quad (7)$$

式中 N 为线圈匝数, M_v 为阀芯的质量大小, D_m 为模型管直径的厚度。详细的各项约束参数为

$$\begin{cases} 2100 \leq N \leq 5000 \\ 2.0g \leq M_v \leq 5.0g \\ 0.1mm \leq \delta \leq 0.55mm \\ 1mm \leq D_m \leq 3mm \end{cases} \quad (8)$$

其次, 确定优化目标。在航空控制系统的高速电磁阀中, 优化目标是加快电磁阀的响应速度, 因此选取电磁阀响应时间最小化作为优化目标, 具体优化目标数为

$$\text{Min}(f(t)) = \text{Min}(t_{op} + t_{cl}) \quad (9)$$

式中 t_{op} 为开启响应时间, 单位为 ms; t_{cl} 为关闭响应时间, 单位为 ms。

2.4 ASA 设计

模拟退火算法 (Simulated annealing, SA) 是由热力学中对退火过程的模拟得出的。在给定的初始温度下, 该算法可以通过温度下降函数得到一个近似

的最优解, 它是由 Metropolis 于 1953 年首次提出的一种基于蒙特卡洛求解策略的随机优化算法^[14]。主要思想是模拟固体的物理退火原理, 将固体加热到足够高的温度, 然后缓慢冷却, 加温时, 固体材料内的颗粒会相对无序并以无规则状态排列, 当温度逐渐冷却后, 分子逐渐转化为低能状态排列, 直到固体最终趋向于某种稳定的状态。类似地, 模拟退火算法从一定的较高初始温度开始, 然后逐渐改变温度参数, 在此过程中继续在求解空间中进行随机搜索, 并伴有一定的概率接收新的解, 最终使算法寻找出全局的最优解。

在求解实际优化问题的过程中, 模拟退火算法所需要的计算时间较长, 这点对模拟退火算法的普及是不利的。相比之下自适应模拟退火算法可提升温度 T 的下降速度, 用指数下降方式代替了线性下降方式, 同时引入了淬火过程, 不仅在很大程度上提升了收敛速度, 而且还具备了更为优越的全局求解能力和更高的计算效率^[15]。SA 中新模型的产生是通过在原计算模型进行扰动获得的, 常规采用的是高斯分布, 接受概率采用 Metropolis 准则, 而 ASA 的随机扰动采用柯西分布产生, 其新的接受概率计算公式为

$$P = [1 - (1 - h) \Delta E / T_i]^{1/(1-h)} \quad (10)$$

式中 h 为实数, ΔE 为新解与原先最优解之间的目标函数变化量, T_i 为当前迭代时的温度值。

该算法的降温方式采用 Ingber 于 1989 年提出的降温方式, 即

$$T = T_0 \exp\left(-CK^{\frac{1}{D}}\right) \quad (11)$$

式中 C 为给定常数, T_0 为设置的初始温度, K 为温度迭代次数, D 为参数的个数。

自适应模拟退火的操作步骤如下:

(1) 系统随机产生初始解 i , 设置初始温度 T_0 , 设置概率函数以接受新解, 设置退火次数。

(2) 系统按照某种方式产生扰动以生成新解 i_{new} , 计算新解的目标函数值 $E(i_{new})$, 同时计算新解与原解之间的目标函数变化量 ΔE 。

(3) 若 $\Delta E < 0$, 则接受新解 i_{new} 和新的目标函数值 $E(i_{new})$, 若 $\Delta E > 0$, 则以概率 P 接受新解及新目标函数值。

(4) 根据设定的降温方式更新温度 T_i 。

(5) 重复步骤 (2)~(4), 直到搜索出全局最优解或达到了所设置的最大迭代次数。

3 结果与讨论

利用 ASA 对该电磁阀进行优化,将 ASA 的初始参数温度设为 1,参数退火和淬火的相对速率都设为 1,最大设计代数设置为 1000,收敛检验的设计数设为 5,ASA 优化后的多目标参数结果如图 9 所示。图 9 (a)~(d)分别表示工作气隙、线圈匝数、模型管直径和阀芯质量的退火寻优过程,由图 9 可知,自适应模拟退火算法在经过约 500 次的迭代计算后收敛到了最优解,其找到的最优解如表 1 所示。表 1 展示了电磁阀相关参数在优化前后的对比。

由表 1 可知,相比较优化前,优化后工作气隙值有所增加,原因在于:衔铁的工作气隙减小会导致阀芯的运动行程变小,电磁阀在关闭过程中控制阀内气体排出的速度将会变慢,从而导致电磁阀的关闭响应时间变长,所以适当增加工作气隙的大小可提升电磁阀的响应速度。线圈匝数有所减少,可能的原因在于:线圈匝数越多会导致线圈的电感量越大,当输入的电压一定时,电流变化率减小,从而减慢电流的上升速度,电磁力的增长也随之变慢,导致开启响应时间变长,阀芯动作变慢。在阀芯关闭延迟阶段,线圈电感产生的反向电流会阻止线圈电流的下降,使阀芯的关闭响应时间延长,因此要加快电磁阀

的响应特性应适当减少线圈的匝数,但是匝数过少又会使感应产生的电磁力变弱,导致阀门无法克服阀芯弹簧的弹力而打开,在对线圈匝数进行优化后,既可以使得电磁阀的响应加快,又能够提供足够的电磁吸力。模型管直径有所增加,可能的原因在于:电磁阀的模型管直径越大,阀门打开时的响应速度越慢,但是在关阀过程中,模型管的直径越大阀芯动作过程的末速度越快,关阀的速度也越快,所以直径的选取应综合考虑电磁阀开启与关闭的响应能力^[16-19]。

Table 1 Comparison of parameters before and after optimization

Parameter	Air gap/mm	Coil turns	Mass of valve core/g	Diameter/mm
Before optimization	0.40	4200	2.6	2.00
After optimization	0.54	2102	4.8	2.94

在保持通过电磁阀的线圈电流不变的情况下,用所获得的最优参数替换原有参数,运行电磁阀模型后,可获得如图 10 (a)所示的响应曲线,图 10 (b)中的曲线 1 和曲线 2 分别展示了经局部放大的优化前和优化后的阀芯位移曲线。由图 10 (b)可知,优化后的电磁阀响应速度明显加快,详细参数如表 2 所

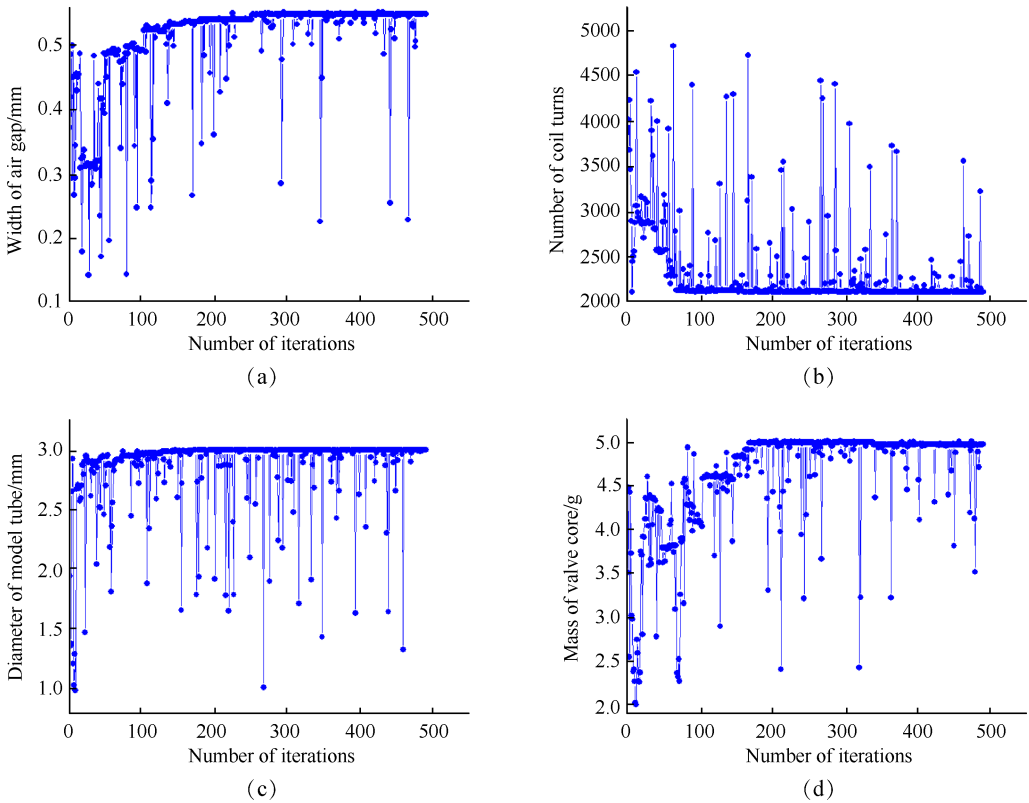


Fig. 9 Parameters change process of adaptive simulated annealing algorithm

示。由表 2 可知,参数优化后的电磁阀开启响应时间为 1ms,关闭响应时间为 4.7ms,相比于原设计方案,开启响应时间缩短了 50%,关闭响应时间缩短了 45.4%,这充分说明所提出的优化设计方案可以大幅度提升航空电磁阀响应的快速性。

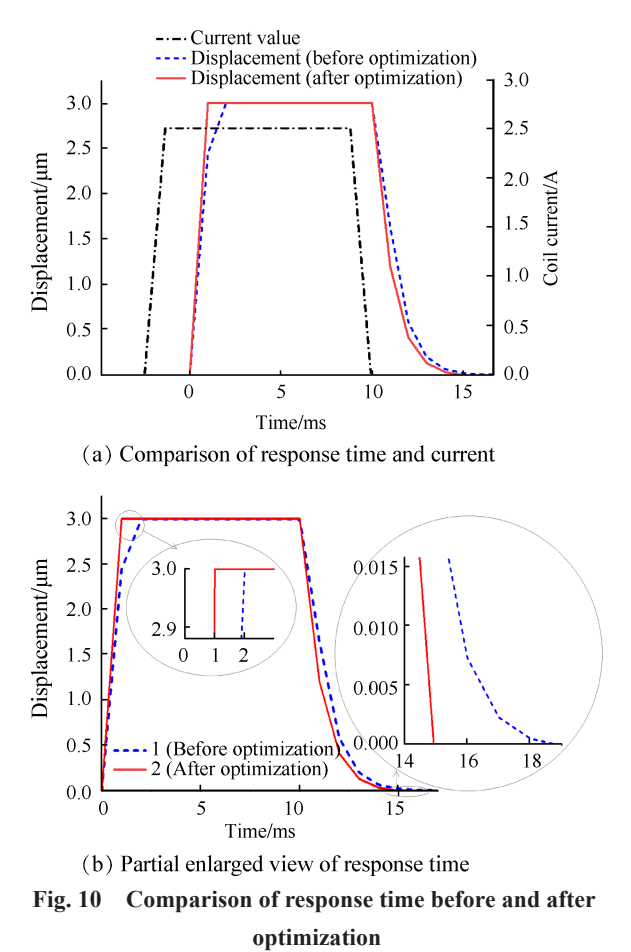


Fig. 10 Comparison of response time before and after optimization

Table 2 Comparison of open/close response time before and after optimization (ms)

Parameter	Open response time	Close response time
Before optimization	2	8.6
After optimization	1	4.7

将优化后的电磁阀模型用于该型航空发动机控制系统半物理仿真平台中,图 11 展示了优化前后的电磁阀模型作用于航空发动机时的高压压气机进口导流叶片角度(α_2)的变化及对比结果。由图 11 可知,优化后电磁阀的开启响应时间和关闭响应时间均缩短,优化后电磁阀的动作性能得到提升,开启与关闭的动作速度加快, α_2 的控制品质得到了提升。

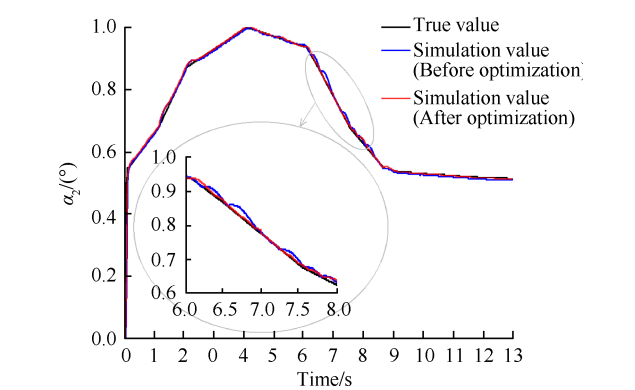


Fig. 11 Comparison of α_2 before and after optimization

4 结 论

本文建立了某型航空电磁阀数学模型,采用实际试验、试车数据对电磁阀模型进行了验证,并采用自适应模拟退火算法对该型电磁阀进行了参数优化,获得了如下结论:

(1)将该型电磁阀的设计参数与所建立模型参数进行了对比研究,结果显示两者的偏差较小,平均约为 5%。在此基础上,在某型航空发动机控制系统半物理仿真平台中,将所建成的航空电磁阀数学模型替换原有实际电磁阀,进行半物理仿真,并与实际试车结果进行对比,结果显示,仿真结果与试车曲线拟合度为 0.99827。因此,所建立的某型航空电磁阀具有较高的动静态精度,其置信度较高。

(2)对影响电磁阀响应快速性的 4 个重要参数(线圈匝数、阀芯质量、工作气隙的宽度和模型管直径的厚度)行了优化,仿真结果证实,参数优化后的电磁阀开启响应时间为 1ms,关闭响应时间为 4.7ms,相比于原设计方案,开启响应时间缩短了 50%,关闭响应时间缩短了 45.4%。

下一步,将进一步研究电磁力减少时(减少 20%~80%),该航空电磁阀在整体性能上的变化及其优化方案。

致 谢:感谢国家自然科学基金、中央高校基本科研业务费的资助。

参考文献

[1] 柴 博,刘 娇,李文华. 高速电磁阀的动态特性[J]. 测控技术, 2016, 35(11): 146-148.

[2] 尚昊亮. 基于高速开关阀的气缸控制策略研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2016.

[3] 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): 949–960.
- [4] 张奇, 张科勋, 李建秋, 等. 电控柴油机电磁阀驱动电路优化设计[J]. 内燃机工程, 2005, 26(2): 1–4.
- [5] 张廷羽, 张国贤. 高速开关电磁阀的性能分析及优化研究[J]. 机床与液压, 2006(9): 139–142.
- [6] 李铁栓, 张幽彤, 王定标, 等. 基于多目标模拟退火算法的高速电磁阀优化设计[J]. 车用发动机, 2010(4): 6–10.
- [7] 官长斌, 毛晓芳, 王平, 等. 基于能量回收原理的高速电磁阀仿真与试验研究[J]. 推进技术, 2020, 41(3): 668–674. (GUAN Chang-bin, MAO Xiao-fang, WANG Ping, et al. Simulation and Experiment on High-Speed Solenoid Valve Based on Energy Recovery Principle [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(3): 668–674.)
- [8] 王秋霞, 樊丁, 彭凯, 等. 航空发动机高速电磁阀控制模式分析研究[J]. 计算机仿真, 2013, 30(1): 145–149.
- [9] 王秋霞, 樊丁, 彭凯. AMESim 仿真技术在高速电磁阀中的应用[J]. 航空动力学报, 2011, 26(4): 702–707.
- [10] 李杰, 樊丁, 彭凯, 等. 压气机静子叶片转角主备控制器转换装置改进[J]. 航空动力学报, 2017, 38(4): 935–941.
- [11] 李文斌, 孙海鹏, 张占峰, 等. 高压电磁阀性能优化仿真分析[J]. 导弹与航天运载技术, 2017(3): 41–44.
- [12] Wu Shuai, Jiao Zongxia, Li Chunfang, et al. Multiobjective Optimization of a Hollow Plunger Type Solenoid for High Speed on/off Valve[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(4): 3115–3124.
- [13] 方洋, 肖峻, 蔡未末, 等. 基于AMESim的高速开关阀动态特性仿真研究[J]. 液压与气动, 2019(7): 81–87.
- [14] 李淑香. 基于模拟退火的粒子群算法在函数优化中的应用[J]. 沈阳工业大学学报, 2019, 41(6): 664–668.
- [15] 史贵连, 李凯扬, 叶福丽. 基于自适应模拟退火算法的生物体三维温度场重构研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(6): 166–173.
- [16] Zhang Jianyu, Liu Peng, Fan Liyun, et al. Analysis on Dynamic Response Characteristics of High-Speed Solenoid Valve for Electronic Control Fuel Injection System [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 2020: 1–9.
- [17] 赵建辉, 格列霍夫·雷奥尼德, 范立云, 等. 高速电磁阀静态电磁力数学模型[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(12): 1884–1889.
- [18] Zhao Limei, Wu Huaichao. Optimization of the High-Speed on-off Valve of an Automatic Transmission [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, 339(1).
- [19] 庞末红, 杨伦奎, 陈成峰. 基于AMESim的电磁阀动态响应特性仿真研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2015(5): 83–88.

(编辑:张贺)