

doi: 10.7690/bgzd.2018.09.014

弹药协调器等效模型主要参数辨识方法

武乾康, 王浩博

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 为在弹药协调器故障诊断研究中建立精确的动力学模型, 对其等效模型主要参数辨识方法进行研究。建立弹药协调器等效模型的数学模型, 给出时间序列相似度计算方法, 使用粒子群算法对模型中的主要参数进行辨识。结果显示: 粒子群算法在弹药协调器等效模型的主要参数辨识中精度达到 1.1% 和 1.4%, 可为弹药协调器的动力学建模提供关键参数。

关键词: 弹药协调器等效模型; 参数辨识; 粒子群算法; 时间序列相似度

中图分类号: TJ410.6 **文献标志码:** A

Main Parameter Identification Method of Shell Transfer Arm's Equivalent Model

Wu Qiankang, Wang Haobo

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Aiming at establish accurate dynamic modeling in the research of fault diagnosis of shell transfer arm, research on main parameter identification method of shell transfer arm's equivalent model. The mathematical model is established on the equivalent model of shell transfer arm, and the time series similarity evaluation method is established. The PSO algorithm is used to identify the main parameters in model. The results show that the accuracy of PSO in the main parameter identification of the shell transfer arm's equivalent model can achieve 1.1% and 1.4%. It can provide key parameter in the dynamic modeling of shell transfer arm.

Keywords: shell transfer arm's equivalent model; parameter identification; PSO; time series similarity

0 引言

弹药协调器是自行火炮供输弹系统的重要子结构, 用于接收弹仓内被推弹器推送出的弹丸, 再将该弹丸传送到输弹线上, 由输弹机输弹入膛后返回原位^[1]。由于其结构复杂, 工作环境恶劣, 存在故障频发问题^[2]。为了解其运动过程中系统特性的变化情况, 进而实现故障诊断和预测, 需要对其进行精确的动力学建模^[3]。建立弹药协调器等效模型, 并对等效模型进行参数辨识, 从而建立其精确的动力学模型, 将有助于弹药协调器的精确动力学建模。

参数辨识是按照一定的准则在参数空间中选择一组参数使得模型表现最好^[4]。笔者给出系统的模型结构 $y=F(x,u)$, 其中待辨识参数 x 为未知且具有较大影响的系统参数, u 为已知参数, 辨识是利用数学方法选择最佳的 x , 使系统输出数据 y 与目标数据最接近。目标数据是仿真数据, 用来验证算法可行性。当目标数据是测试数据时, 就是辨识系统实际的参数。对于输出数据与目标数据的接近程度, 使用误差准则函数评价, 如果系统输出的是时间序列而不是数值, 就需要定义误差准则函数来量化系统输出和目标数据的接近程度, 即时间序列相似度^[5]。

1. 协调器等效模型建模

1.1 协调器等效模型数学建模

协调器由电机驱动, 经过两级齿轮减速带动支臂和托弹盘中的弹丸。支臂由小平衡机支撑, 一端可绕火炮耳轴转动, 小平衡机和支臂可相对转动^[1]。

对协调器进行分析并建立等效模型。等效模型的结构如图 1 所示, 部件为直流电机、减速器、机械臂、气弹簧和负载。其中: 电机是直流电机; 减速器由两级行星齿轮减速器构成, 传动比 690; 机械臂由减速器输出的力矩驱动; 气弹簧一端和机架为转动副连接, 另一端与机械臂为转动副连接, 用于平衡机械臂和负载的重力矩; 负载模拟协调器中的弹丸, 在这里用加长杆表示; 采用 PID 控制电机输出以控制机械臂动作到位。

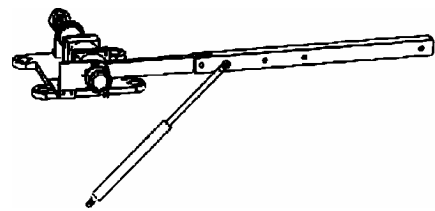


图 1 协调器等效模型结构

收稿日期: 2018-06-15; 修回日期: 2018-07-17

基金项目: 国家安全重大基础研究计划项目(6132490102)

作者简介: 武乾康(1992—), 男, 安徽人, 硕士, 从事参数辨识、机器学习、深度学习研究。

对等效模型进行动力学分析，得到其动力学方程为：

$$J\ddot{\theta} = Q \tag{1}$$

其中：

$$J = I_1 i_1^2 \eta_1 \eta_2 + I_2 i_2^2 \eta_2 + I_3 \tag{2}$$

$$Q = T_d i_1 \eta_1 \eta_2 + T_g - T_r \tag{3}$$

$$T_g = L_1 m_1 g \cos \theta + L_2 m g \cos \theta \tag{4}$$

$$T_r = lpS \left[\frac{V_0}{V_0 - \Delta LS} \right]^n \tag{5}$$

式(1)中： J 是系统的等效转动惯量； θ 是机械臂转角； Q 是作用在机械臂上的等效力矩。式(2)中： I_1

是电机和减速器 1 的等效转动惯量； I_2 是减速器 2 的等效转动惯量； I_3 是机械臂和负载转动惯量； i_1 是减速器总传动比； i_2 是减速器 2 的传动比； η_1 是减速器 1 的传动效率； η_2 是减速器 2 的传动效率。式(3)中： T_d 是电机力矩； T_g 是机械臂和负载重力矩； T_r 是气弹簧支反力矩。式(4)中： L_1 、 L_2 是机械臂质心和负载质心到旋转中心距离； m_1 、 m 是机械臂质量和负载质量。式(5)中： l 是气弹簧到旋转中心距离； p 是气弹簧初压； S 是活塞面积； V_0 是初始容积； ΔL 为气缸变化长度； n 为气体多变指数。

根据动力学模型和 PID 的控制原理，使用 Matlab/Simulink 建立模型进行求解，如图 2 所示。

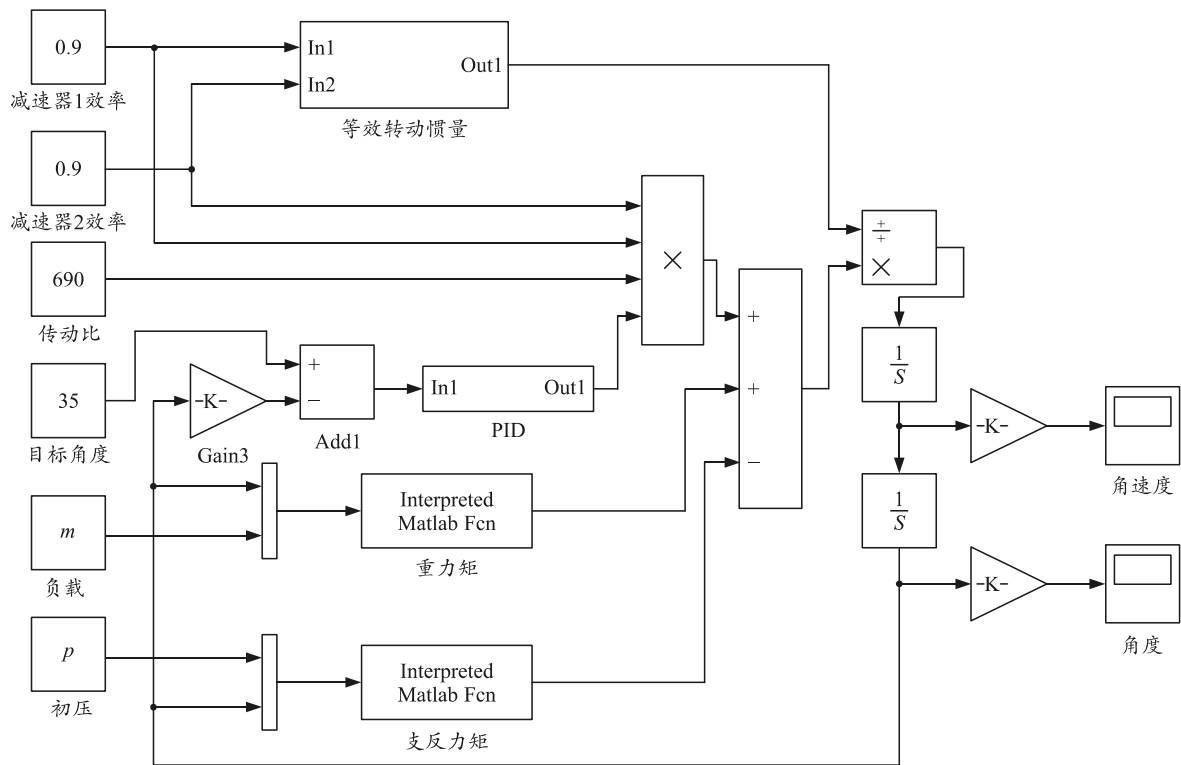


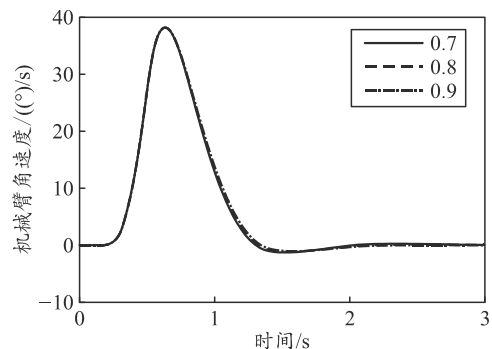
图 2 等效模型 Simulink 模型

1.2 待辨识参数确定

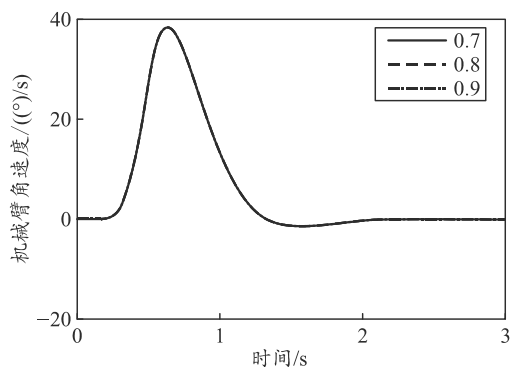
根据上述建模过程可知，机械臂由电机驱动，由气弹簧提供支撑。对系统参数中的减速器效率、气弹簧初压和负载质量进行仿真，验证其对系统运动状态的影响，确定模型的主要参数。

图 3(a)、(b)为减速器效率对机械臂角速度的影响，设置减速器 1, 2 的效率为[0.7,0.8,0.9]。从图中可以看出，减速器效率影响较小。图 3(c)、(d)为气弹簧初压和负载质量对机械臂角速度的影响，设置气弹簧初压 p 为[0.3,0.5,0.7] MPa，负载质量 m 为 [1,2,3] kg，从图中可以看出气弹簧初压和负载质量

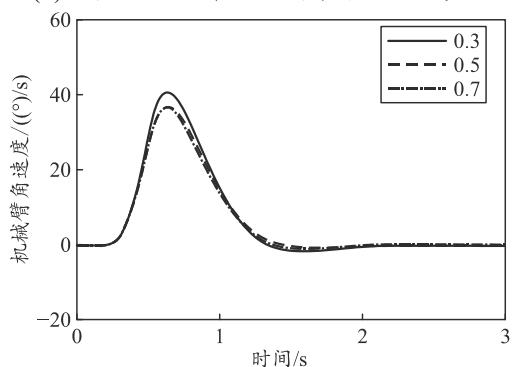
对机械臂角速度影响较大，故选择气弹簧初压和负载质量作为待辨识参数。



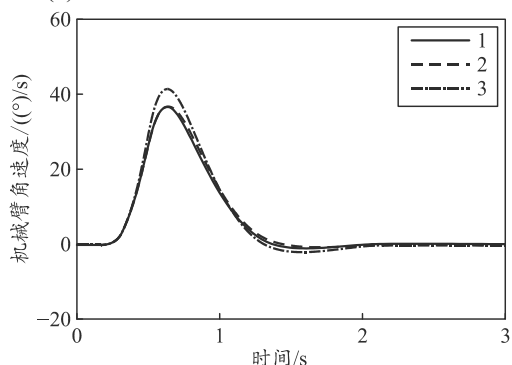
(a) 减速器 1 效率对机械臂角速度的影响



(b) 减速器 2 效率对机械臂角速度的影响



(c) 气弹簧初压对机械臂角速度的影响



(d) 负载质量对机械臂角速度的影响

图 3 系统参数对机械臂角速度的影响

2 参数辨识方法

2.1 粒子群算法

参数辨识是在参数空间中寻找使得模型输出与实际输出之间的误差最小的参数^[6]。本质是一个最优化问题，在这里的优化目标是模型输出角速度曲线和目标角速度曲线的时间序列相似度。粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 是一种基于群体的随机优化技术，通过迭代寻找最优解。PSO 算法的原则是通过各粒子之间的合作与信息共享，更新位置和速度信息来寻找最优解^[7]。

使用数学表达式来表示，在 M 维空间中，有 n 个粒子， $\mathbf{X} = (\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_n)$ ，第 i 个粒子在 M 维空间中的位置为 $\mathbf{X}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iM})$ ，速度为

$\mathbf{V}_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iM})$ ，个体适应度值的历史最大值位置为 \mathbf{P}_i ，种群为 \mathbf{P}_g 。在这里，适应度值是对目标速度曲线的时间序列相似度，粒子的维度为 2，分别是待辨识参数 p 、 m 。寻优迭代的过程中，粒子的位置和速度更新公式为：

$$\mathbf{v}_{im}^{k+1} = \omega \mathbf{v}_{im}^k + c_1 \varepsilon (\mathbf{p}_{im}^k - \mathbf{x}_{im}^k) + c_2 \eta (\mathbf{p}_{gm}^k - \mathbf{x}_{im}^k); \quad (6)$$

$$\mathbf{x}_{im}^{k+1} = \mathbf{x}_{im}^k + r \mathbf{v}_{im}^{k+1}, m=1, 2, \dots, M; i=1, 2, \dots, n. \quad (7)$$

式中： c_1 、 c_2 分别为粒子跟踪自己历史最优值的权重系数和跟踪群体历史最优值的权重系数； ε 、 η 是 0~1 之间的随机值； r 为约束因子，用来约束速度对位置的更新，通常取 1。

ω 为粒子保持原来速度的系数，叫做惯性因子，常采用递减策略加速收敛，笔者采用线性递减策略^[8]：

$$\omega = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_{\min})L / L_{\max}. \quad (8)$$

式中： ω_{\min} 、 ω_{\max} 为设定的最小和最大惯性因子； L 、 L_{\max} 为当前迭代次数和最大迭代次数。

2.2 时间序列相似度

利用 PSO 进行参数辨识时，应当选择合适的误差准则函数计算适应度值。这里，模型输出的是时间序列曲线，所以函数计算的应当是模型输出曲线和目标曲线的时间序列相似度。为了量化 2 条曲线的相似度，使用式(9)计算， s_i 计算 2 条曲线对应时刻的相对误差， δ_i 计算每个点的权重， S 计算 2 条曲线的相对误差加权和：

$$S = \sum s_i \delta_i. \quad (9)$$

其中：

$$s_i = \begin{cases} 1 - \frac{|x_i - y_i|}{\max(|x_i|, |y_i|)} & x_i y_i > 0 \\ 0 & x_i y_i \leq 0 \end{cases}; \quad (10)$$

$$\delta_i = \frac{|y_i|}{\sum |y_i|}. \quad (11)$$

此函数输出的是 0~1 之间的数值，反映 2 条时间序列曲线的相似度，越接近 1 代表越相似，所以可以作为粒子群算法的适应度计算方法。

3 等效模型的参数辨识

在 Matlab/Simulink 中建立了求解模型之后，确定待辨识参数为气弹簧初压 p 和负载质量 m 。要对上述等效模型进行参数辨识，还需要目标角速度曲线。根据实际情况，设置气弹簧初压为 0.5 MPa，负载质量为 1.8 kg，并进行仿真得到角速度曲线，

作为目标供 PSO 进行参数辨识^[9-10]。

程序框图如图 4 所示，设置 PSO 参数，将 p 和 m 的区间作为 PSO 的输入，调用 Simulink 模型求解并使用时间序列相似度公式计算适应度值，根据适应度值更新 PSO 中粒子的位置和速度，进行迭代，最后判断是否满足迭代结束条件，并输出最优解。

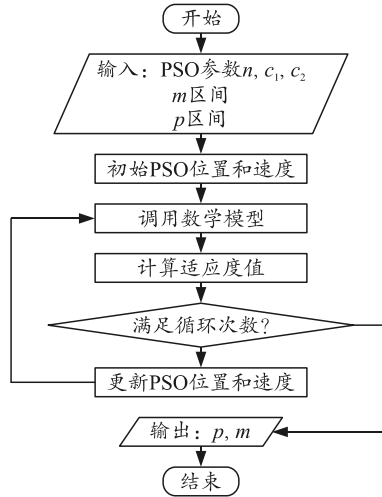


图 4 辨识程序

设置 PSO 参数：粒子个数 10，迭代次数为 50 次， $c_1=2$ ， $c_2=2$ ， $w_{max}=1$ ， $w_{min}=0.5$ ，设置搜索范围 $m \in [1,3]$ ， $p \in [0.3,0.7]$ 。试验得到时间序列相似度值的变化曲线，如图 5 所示。

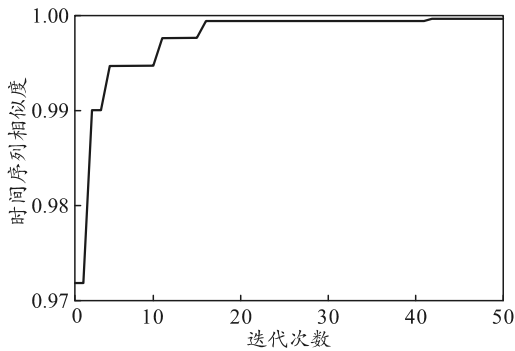
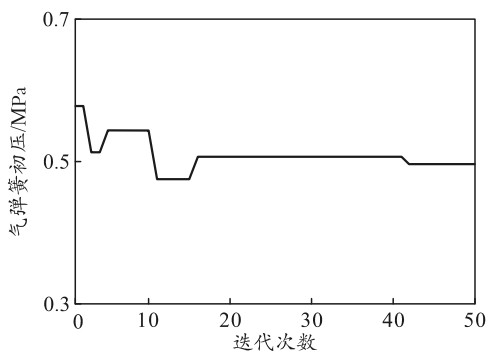
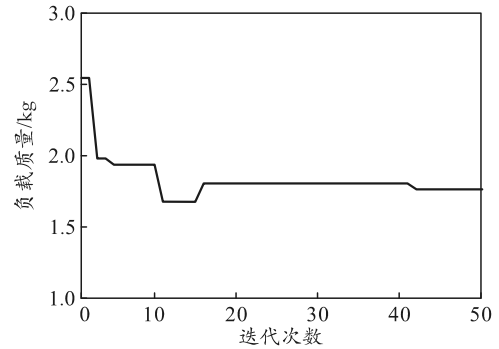


图 5 时间序列相似度值变化

迭代过程中 p 和 m 的辨识值的变化曲线，如图 6 所示。



(a) 气弹簧初压 p 辨识值



(b) 负载质量 m 辨识值

图 6 迭代过程

辨识结果如表 1 所示。

表 1 参数辨识结果

参数	仿真值	辨识值	误差/%
p/MPa	0.5	0.493	1.4
m/kg	1.8	1.78	1.1

其中仿真值指设置的模型中参数 p 和 m 值，为 0.5 MPa 和 1.8 kg。得到仿真数据后，使用上述方法进行辨识，辨识值是指辨识的结果，为 0.493 MPa 和 1.78 kg。

辨识结果显示：对气弹簧初压 p 的辨识误差为 1.4%，对负载质量 m 的辨识误差为 1.1%。

4 结论

笔者介绍了一种弹药协调器等效模型的参数辨识方法，使用粒子群算法和时间序列相似度计算方法对其主要参数进行辨识，进而进行精确动力学建模。笔者建立了弹药协调器等效模型的数学模型并进行仿真，确定了对模型运动影响较大的参数：气弹簧初压和负载质量。笔者建立时间序列相似度计算方法作为粒子群算法的适应度值，并使用粒子群算法和仿真数据对模型中的参数进行辨识。辨识结果显示：气弹簧初压的辨识误差为 1.4%，负载质量的辨识误差为 1.1%，验证了该方法的有效性。

参考文献：

- [1] 侯保林, 樵军谋, 刘琮敏. 火炮自动装填[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2010: 36-38.
- [2] 赵抢抢, 侯保林. 自动弹仓虚拟样机修正的故障定位与诊断[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017(3): 440-445.
- [3] 赵抢抢, 侯保林. 火炮弹药协调器区间不确定参数辨识[J]. 兵工学报, 2017, 38(1): 35-42.
- [4] 张成乾. 系统辨识与参数估计[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996: 1-2.
- [5] 何江. 基于混合动态仿真的发电机模型有效性评估及参数校正研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011: 32-34.

2.5 模型重建及分析

利用 OptiStruct 的 OSSmooth 工具, 导出拓扑优化后左右两臂的 3 维模型文件, 在 Solidworks 软件中进行左右两臂的几何模型重建, 得到新的 3 维模型, 如图 11^[8]所示。



图 11 优化后左右两臂 3 维图

为了验证重建模型是否满足设计要求, 需要对新模型进行有限元强度分析^[9-10]。通过对新模型进行网格划分, 施加和原模型相同的载荷和边界条件提交分析, 得到优化后的应力云图和位移云图, 如图 12、13 所示。



图 12 优化后左右两臂应力云图

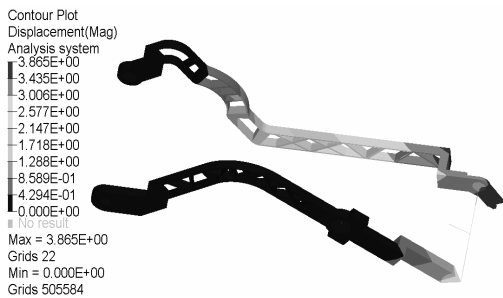


图 13 优化后左右两臂位移云图

从图 12、13 中可看出: 左右两臂的最大应力为 130 MPa, 远小于其许用应力 350 MPa, 左右两臂和输弹器连接中心处的位移最大值为 3.412 mm, 小于

4 mm, 满足设计要求; 新模型质量为 82.4 kg, 原模型质量为 130 kg, 优化后的左右两臂总质量较优化前减少了 36.6%。

3 结论

为了对弹药传输机械臂进行减重, 建立了 RecurDyn 和 Matlab 联合仿真模型, 仿真结果显示运动轨迹跟踪情况良好, 从而提取了关键处的受力作为极限工况, 并将此力作为拓扑优化的载荷施加条件, 利用 OptiStruct 在设计区域进行拓扑优化, 对优化后的模型进行重建和强度分析。经过校验, 实现弹药传输机械臂左右两臂总质量减重 36.6%, 其强度及刚度特性亦能得到很好的保障, 证明了该设计的合理性。

参考文献:

- [1] 高学星, 苏哲子, 孙华刚, 等. 具有参数不确定性的火炮弹药协调器定位精度优化[J]. 兵工学报, 2014, 35(6): 776-781.
- [2] 佟刚, 张显军, 赵林楠. 基于 RecurDyn 与 Matlab 的油电混合四旋翼飞行器虚拟样机仿真[J]. 航空精密制造技术, 2015, 51(6): 24-27.
- [3] 李海斌, 陈奎生, 罗洁. 机械手夹持机构运动与控制的联合仿真[J]. 武汉科技大学学报, 2015, 38(1): 46-49.
- [4] 吴卓, 刘哲. 大型随车起重机吊臂的轻量化研究[J]. 起重运输机械, 2016(6): 72-75.
- [5] 杨嘉伟, 潘玉田, 蒋华剑, 等. 某武装侦察机器人武器站大臂的拓扑优化设计[J]. 兵工自动化, 2016, 35(5): 76-79.
- [6] 时培成, 周永, 高立新. 基于制造工艺约束的悬架控制臂拓扑优化[J]. 机械设计, 2013, 30(10): 39-45.
- [7] 孙全兆, 杨国来, 葛建立. 某火炮上架结构改进设计[J]. 兵工学报, 2012, 33(11): 1281-1285.
- [8] 康元春, 李辉, 高赞. 悬架控制臂多目标拓扑优化[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2014, 15(6): 571-575.
- [9] 范林盛, 刘树华, 曹广群, 等. 多工况下某火炮摇架拓扑优化设计[J]. 兵工自动化, 2016, 35(8): 22-24.
- [10] 曲令晋, 李仁. 基于有限元法的电动汽车车身正面碰撞仿真及拓扑优化[J]. 新技术新工艺, 2013(4): 48-51.

- [6] 李言俊, 张科, 余瑞星. 系统辨识理论及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 4-5.
- [7] 杨维, 李歧强. 粒子群优化算法综述[J]. 中国工程科学, 2004, 6(5): 87-94.
- [8] 陈贵敏, 贾建援, 韩琪西. 粒子群优化算法的惯性权重递减策略研究[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(1): 53-56.
- [9] 刘金琨, 沈晓蓉, 赵龙. 系统辨识理论及 MATLAB 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013: 215-233.
- [10] 高学星. 弹药自动装填子系统动作可靠性与故障诊断[D]. 南京: 南京理工大学, 2016: 59-77.

(上接第 56 页)