

doi: 10.7690/bgzdh.2023.01.006

基于响应面法的软回收系统排气装置优化设计

冯建闯, 潘孝斌, 谈乐斌, 薛 滨

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 针对智能弹药中的软回收系统排气装置, 采用稀疏网格响应面模型与多目标遗传算法 (multi-objective genetic algorithm, MOGA) 联合对其进行优化设计。将初步参数模型作为流场边界条件, 结合内弹道条件分析真实流场壁面上的压力分布; 通过流固耦合分析得到排气管的应力变形分布, 以此修正最终模型, 得到排气管尺寸参数的最优解。结果表明, 该设计可为回收系统精细化分析、试验奠定理论基础。

关键词: 软回收; 结构优化; 响应面法

中图分类号: TJ410.5 **文献标志码:** A

Optimal Design of Exhaust Device of Soft Recovery System Based on Response Surface Method

Feng Jianchuang, Pan Xiaobin, Tan Lebin, Xue Bin

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

Abstract: For the exhaust device of the soft recovery system in intelligent ammunition, the sparse grid response surface model and multi-objective genetic algorithm (MOGA) are combined to optimize its design. The initial parameter model is used as the boundary condition of the flow field, and the pressure distribution on the wall of the real flow field is analyzed in combination with the interior ballistic condition. Through the fluid-solid coupling analysis, the stress and deformation distribution of the exhaust pipe is obtained, and the final model is modified to obtain the optimal solution of the size parameters of the exhaust pipe. The results show that the design can lay a theoretical foundation for the fine analysis and test of the recovery system.

Keywords: soft recovery; structure optimization; response surface method

0 引言

智能弹药中的末端敏感元件在初步设计完成后需要进行抗高过载试验。若被试件与载体弹丸在高过载之后可以软回收, 便可以更好地观察试验结果, 为后续设计提供理论依据。现阶段, 对于试验弹体软回收的介质有泡沫铝、沙箱、水、气体阻尼等^[1], 其中采用气体阻尼回收方式的优点是反向过载较小, 防止回收过程中的二次伤害, 更加适合于敏感器件、精密仪器的软回收, 可以最大程度地保留高过载试验后的工作状态。

杨秀英^[2]研制了 85 mm 气体炮软回收装置, 采用膜片隔离回收腔的方法进行回收。Yoo 等^[3]采用分段破膜法, 利用弹体压缩气体产生弹性阻尼对软回收系统进行数值分析, 实现了 20 mm 弹丸、初速为 500 m/s 的软回收。潘孝斌、倪梯闵等^[4-5]采用单级破膜的方法, 建立软回收过程数学模型, 分析弹丸初速、气室初压和破膜压力之间的匹配关系, 实现了 155 mm 弹丸、最大初速为 548 m/s 的软回收,

但是未分析后效期及进入回收管之后剩余火药燃气对于弹丸的加速影响。

笔者基于空气阻尼单级破膜方法实现试验弹丸的软回收。试验弹经过火炮高过载发射后, 进入同口径排气管、回收管, 膛内火药燃气通过排气装置排出。试验弹进入回收管后不断压缩管内预充气体产生反向过载, 逐渐减速。当回收管末端气体达到破膜压力时, 压力膜片破裂, 压缩气体从泄压管排出, 试验弹在回收管末端停止或低速进入注水管内 2 次缓冲。

在回收系统中, 排气装置是排气阶段的关键部件, 为更加真实反映系统回收过程参数变化, 笔者针对排气装置展开深入分析、优化设计。试验弹在炮膛内经过发射达到过载要求。为保证试验弹能够顺利进入同口径回收管, 需要排气装置具有足够的刚度以保证其导向性。另一方面, 试验弹出炮口后开始进入排气阶段, 在后效期内仍有大量的火药燃气持续推动弹丸, 使其继续加速^[6]。进入回收管的

收稿日期: 2022-09-26; 修回日期: 2022-10-21

作者简介: 冯建闯(1998—), 男, 山东人, 硕士, 从事机械设计及理论、机械结构优化设计、流场分析研究。E-mail: 1063277891@qq.com。

初速越高,越不利于后续回收过程,需要及时排气,减少火药燃气随弹丸进入回收管;因此,有必要对排气装置的开口尺寸和刚度进行平衡。笔者采用稀疏网格响应面模型与多目标遗传算法联合对其进行优化设计。

1 排气装置设计分析

1.1 排气装置模型分析

排气装置设计为等直径圆筒,圆筒侧边开有一定长度、宽度的槽。随着试验弹沿排气装置行程的增加,火药燃气的压力会迅速降低,排气装置内壁承受的压力也随之减小,故可将排气装置分为3段,每段排气管的开口面积逐段扩大,以提高排气效率,各段之间由法兰连接。

以第1段排气管作为研究对象,进行静力学分析。根据周向开口个数 n 取值不同,可分为2开口式、4开口式、6开口式、8开口式。以开口个数 $n=6$ 为例,开口长度为 a ,宽度为 b ,两端以 b 为直径圆弧过渡,内径 d 固定为 155 mm,外径为 D ,开口位置距端面长度 s 为固定值 100 mm。

$n=6$ 时排气管尺寸参数如图 1 所示。

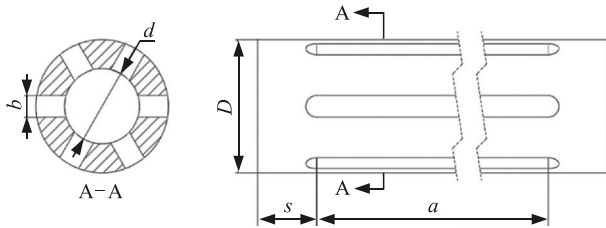


图 1 $n=6$ 时排气管尺寸参数

1.2 排气管受力情况

排气管仅受火药燃气提供的正压力,受力沿试验弹运动方向逐渐减小。排气管加工后的剩余部分可视为两端固定支撑的单跨超静定梁模型,承受梯形载荷,力学模型如图 2 所示。其中,最大载荷 q_2 为炮口最大压力,梁长度 a 为开口长度。

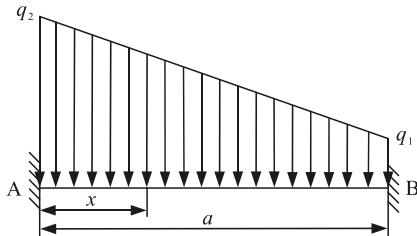


图 2 简化后的力学模型

当单跨超静定梁受到梯形载荷时,在端部距离为 x 的截面上,其所受弯矩 M_x 、剪力 V_x 和挠度 f_x 为^[7-8]:

$$\left. \begin{aligned} M_x &= \frac{q_2 a^2}{12} (6\omega_{R\xi} - 1) + \frac{q_2 a^2}{60} (9\xi - 10\xi^3 - 2) \\ V_x &= \frac{q_2 a^2}{12} (1 - 2\xi) + \frac{q_0 a}{20} (3 - 10\xi) \\ f_x &= \frac{q_2 a^4}{24EI} \omega^2_{R\xi} + \frac{q a^2 x^2}{120EI} (\xi^3 - 3\xi + 2) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: E 为材料的弹性模量; I 与截面形状相关; $\omega_{R\xi}, \xi, \zeta$ 为与截面位置 x 相关的位置函数; q_0 为两端载荷差,有:

$$\left. \begin{aligned} \xi &= x/a \\ \zeta &= (a-x)/a \\ \omega_{R\xi} &= \xi\zeta \\ q_0 &= q_2 - q_1 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

梁的截面形状为扇环,且为轴对称图形,形状及尺寸参数如图 3 所示。

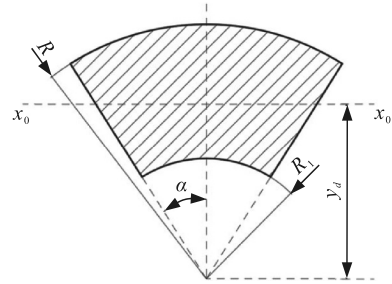


图 3 梁截面及尺寸参数

图中: R 为外轮廓半径; R_1 为内轮廓半径; α 为轮廓与对称线的圆心角; y_d 为形心轴 x_0 至边缘处的距离,其表达式为:

$$y_d = \frac{2}{3} \times \frac{R^3 - R_1^3}{R^2 - R_1^2} \times \frac{\sin \alpha}{\alpha} \quad (3)$$

截面面积 A 为:

$$A = \alpha(R^2 - R_1^2) \quad (4)$$

根据截面形状可以得到截面对形心轴的惯性矩 I 为:

$$I = (\alpha + \sin \alpha \cos \alpha - 16 \sin^2 \alpha / 9\alpha) / 4 \times (R^4 - R_1^4) - 4 \sin^2 \alpha R^2 R_1^2 (R - R_1) / 9\alpha (R + R_1) \quad (5)$$

可计算截面系数 W 为:

$$W = I / y_d \quad (6)$$

因为梁不受扭矩作用,即转角 $\theta=0$,可得任意截面上的刚度强度条件为:

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= M_x / W \leq [\sigma] \\ \tau &= k(V_x / A) \leq [\tau] \\ f_{\max} / a &\leq [f/a] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

基于上述数学模型,可对受梯形载荷的单跨超

静定梁进行刚度强度分析。

2 优化分析流程

笔者采用响应面模型和多目标遗传算法进行优化设计求解，将多种开口方案均考虑在内，在保证刚度强度的前提下，选取排气效率最佳的解，进行后续流固耦合分析与修正。分析优化流程如图 4 所示。

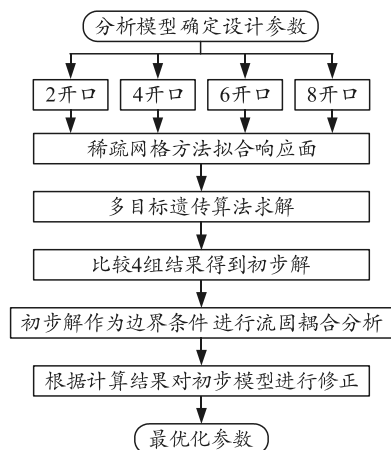


图 4 优化设计流程

3 模型建立与求解

3.1 确定计算域

结合实际情况，排气管的各参数取值范围如表 1 所示。

表 1 各参数取值范围 mm

设计项目	参数	取值范围
内径	d	$d=155$
外径	D	$D \in [235, 315]$
开口个数	n	$n \in \{2, 4, 6, 8\}$
开口长度	a	$a \in [300, 800]$
		$n=2, b \in [20, 130]$
		$n=4, b \in [20, 105]$
开口宽度	b	$n=6, b \in [20, 75]$
		$n=8, b \in [20, 60]$

3.2 DOE 试验点与响应面模型

响应面法是基于数学与统计规律求解多个输入参数和多个目标函数最优解的快捷方法，采用多元二次回归方程来拟合输入变量与输出之间的函数关系，生成高精度非线性的响应面模型，可很好地解决多变量问题，求解全局最优设计参数^[9]。在响应面模型中，输出变量 y 与输入变量 x 之间的函数关系如下^[10]：

$$y=f(x_n)+\varepsilon。 \quad (8)$$

一阶模型为：

$$y=\beta_0+\beta_1x_1+\beta_2x_2+\dots+\beta_nx_n+\varepsilon。 \quad (9)$$

二阶模型为：

$$y=\beta_0+\sum_{i=1}^n\beta_ix_i+\sum_{i=1}^n\beta_{ii}x_i^2+\sum_{i<j}^k\beta_{ij}x_ix_j+\varepsilon。 \quad (10)$$

式中： β_0 、 β_i 、 β_{ii} 、 β_{ij} 为待定系数，由最小二乘法得到； x_i 为设计变量； n 为多项式系数。

在设计空间的整个区域，无论什么地方，只需通过生成的响应面模型，就可以快速得到输出函数值，极大地节约了时间和计算资源。

笔者采用稀疏网格方法来拟合响应面。稀疏网格是一种由预定义的精度来驱动的自适应模型，它通过在输出参数相对误差较高的位置自动细化设计点矩阵来提高响应面的精度。稀疏网格响应面模型仅在必要的方向上进行细化，对于相同质量的响应面模型，需要的设计点更少，计算效率更高。在此之前，必须先在试验设计 (design of experiment, DOE) 阶段使用稀疏网格初始化的方法得到一组试验点，用以后续生成响应面模型。

以开口个数 $n=6$ 为例，使用稀疏网格方法拟合的响应面如图 5 所示。

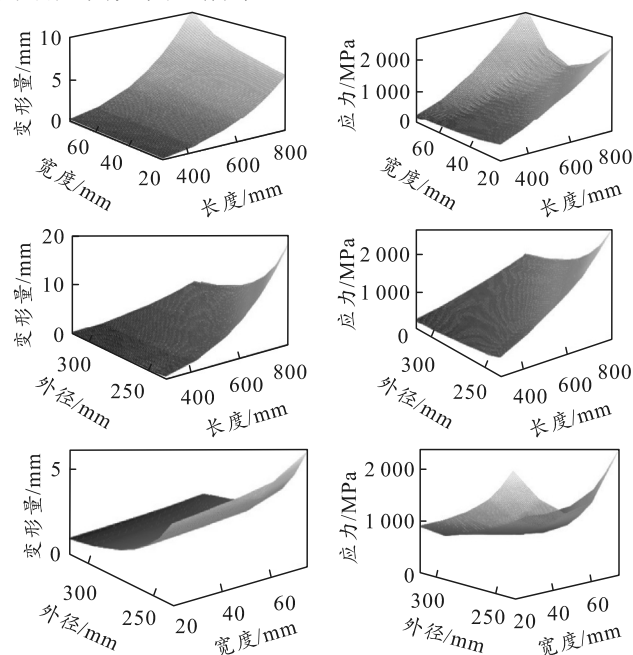


图 5 开口长度、宽度与最大变形量的响应面

适应度散点图可形象地表示响应面模型地拟合精度，拟合时点的分布越接近对角线，表示模型拟合的准确度越高^[11]。从图 6 中可以看出，稀疏网格响应面模型的精度较高。

3.3 MOGA 方法求最优解

多目标遗传算法 (MOGA) 具有求解精度高、适用于高度非线性、可求解全局最优解等优点，可在

较大的设计区域内，快速求得最优解^[12]。得到响应面模型后，即可使用以目标精度为驱动的多目标遗传算法优化方法进行求解。本次优化设计的目标函数及约束条件为：

$$\left. \begin{aligned} \max(\eta(X)) \\ \delta(X) \leq 1 \text{ mm} \\ \sigma(X) \leq 530 \text{ MPa} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中： $\eta(X)$ 为开口面积； $\delta(X)$ 为最大变形量； $\sigma(X)$ 为最大应力；解向量 $X=[n, D, a, b]$ 。

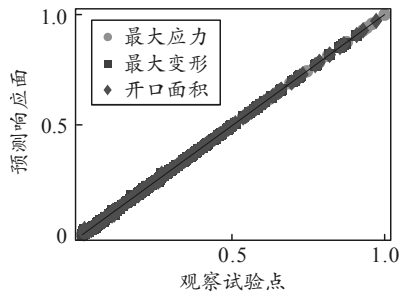


图 6 拟合相应面模型的适应优度散点

将排气管的最大应力与最大变形量设置为约束条件，使求得的最大值不高于给定值，以有效排气面积 $\eta(X)$ 最大化作为优化目标，采用多目标遗传算法进行求解计算后，获取一系列 Pareto 最优解，如图 7 所示。

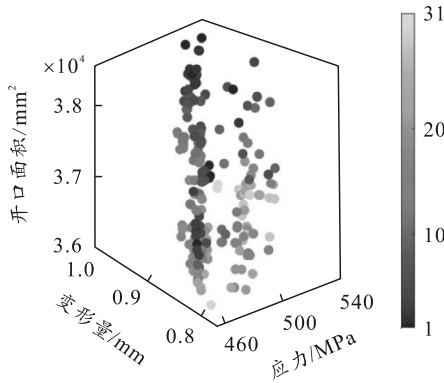


图 7 Pareto 最优解

通过多目标遗传优化算法对生成的响应面计算可得， n 取不同值下的最优方案如表 2 所示。

选择有效开口面积最大的解作为本次设计的最优解，圆整后的最优解为 $X=[6, 315, 479, 74]$ 。

表 2 各参数最优解

项目参数	n 取不同值下的最优方案			
	$n=2$	$n=4$	$n=6$	$n=8$
外径/mm	311.8	312.4	315.2	311.1
开口长度/mm	485.4	414.1	479.3	385.7
开口宽度/mm	128.1	103.2	74.0	59.4
最大应力/MPa	415.8	347.0	504.0	530.0
最大变形量/mm	0.929	0.900	0.911	0.632
开口面积/cm ²	1 241	1 706	2 127	1 817

4 参数影响与分析讨论

开口数量 n 给定时，排气管的刚度与强度主要与开口长度 a 、开口宽度 b 和排气管外径 D 有关，不同结构参数在不同开口数量 n 下的最大应力、最大变形量变化曲线如图 8—13 所示。

4.1 开口长度 a 的参数影响

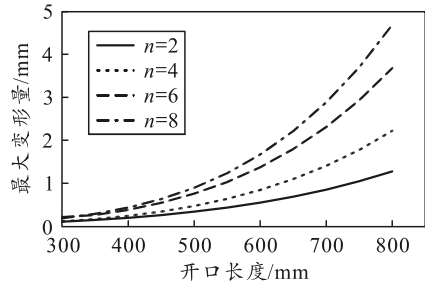


图 8 开口长度与最大变形量关系

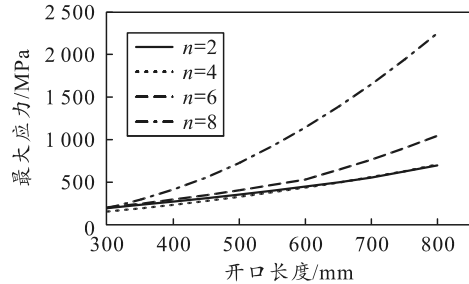


图 9 开口长度与最大应力关系

开口长度 a 从 300 mm 增加到 800 mm 的过程中，梁的跨度变大，刚性变差，而且开口长度 a 值越大，受力面积也越大，所以最大变形量与最大应力均快速增加。

开口长度 a 与最大应力的关系曲线在 $n=2、4、6$ 时差距不大，这是因为在其他参数均相同的情况下，开口个数 n 越多，整个排气管的开口总面积越大，排气效率越高，承受的压力减小。在 $n=8$ 时，增长速率却远远超过其他情况。这是因为开口宽度 b 是固定的，当 n 增加时，梁的截面积明显降低，截面积越小，其刚度和强度性能都有显著下降。

4.2 开口宽度 b 的参数影响

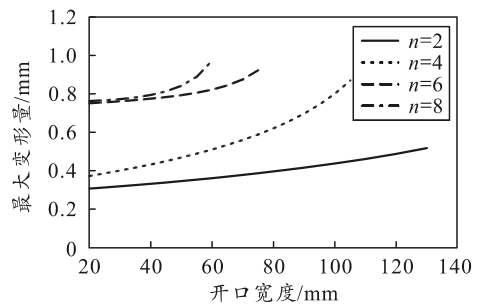


图 10 开口宽度与最大变形量关系

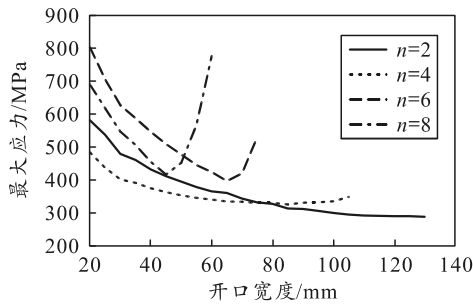


图 11 开口宽度与最大应力关系

排气管内径 d 为定值，开口数目越多，开口宽度 b 可取到的最大值就越小。开口宽度 b 逐渐增加时，最大变形量呈现增加的趋势。 $n=2$ 、 4 与 $n=6$ 、 8 时的最大变形量差距非常明显，这是因为在宽度 b 固定的情况下，随着开口数量 n 的增加，梁的横截面积成倍减小，其刚度下降明显。而 $n=6$ 与 $n=8$ 的差距没有很大，因为截面积减小的同时，排气管内壁承受高压火药燃气面积也大大减小，受力面积减小，故变形量并没有呈现跳跃式增长。

开口两端为半圆形圆弧过渡，对根部进行加强。在开口宽度 b 逐渐增加的过程中，根部过渡圆弧半径同步增加，所以最大应力曲线呈下降趋势，根部应力集中得到明显改善。但是在开口个数 $n=6$ 且开口宽度 $b > 65$ 与 $b=8$ 且 $b > 45$ 这 2 种情况下，应力开始突增，这是因为变形量过大，单纯再增加根部的圆弧直径已经对于减小应力无明显效果。

4.3 排气管外径 D 的参数影响

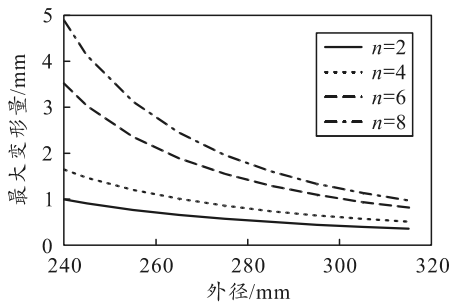


图 12 排气管外径与最大变形量关系

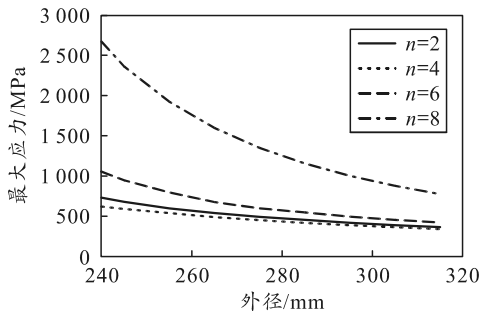


图 13 排气管外径与最大应力关系

外径直接影响了梁的截面积与截面上形心轴 x_0

至边缘处的距离 y_d ，外径 D 越大，刚度越好，变形量越小，所以根部产生的应力也越小。外径 D 从 235 mm 增加到 315 mm 的过程中，应力与变形量均出现明显下降。开口宽度 b 值相同时， n 越大，梁的宽度就越小，尤其对于 $n=8$ 时，其抵抗变形能力最差，所以其变化曲线趋势随着外径的增加就下降得更加明显。

5 流固耦合分析与优化完善

以上述求得的排气管初步模型作为边界条件，进行排气阶段流固耦合分析，验证刚度强度是否满足要求。

以第 1 段排气管及后效期流场作为分析对象，身管内膛压设置为 30 MPa，身管内高压气体速度呈线性分布，炮口处气体初速 500 m/s，排气管材料设置为 40Cr。考虑排气管与外流场具有对称性，对 1/4 的模型进行流固耦合分析计算，结果如图 14—15 所示。

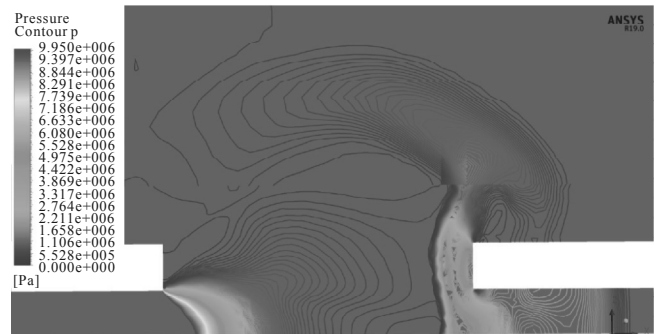
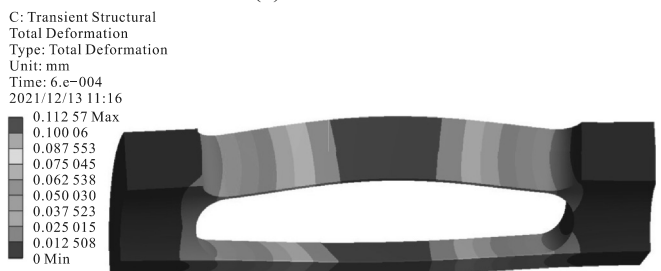


图 14 排气管外流场某截面分布情况



(a) 应力云图



(b) 位移云图

图 15 排气管应力及位移云图

由流固耦合分析结果可得，排气管最大变形量

发生在 0.6 ms，值为 0.112 6 mm，最大应力发生在 1.6 ms 时刻，值为 73.327 MPa，小于材料的屈服强度，安全系数过高。对排气管外径适当缩小，既不影响前期开口面积的计算，又可以明显降低整个装置的体积和重量。

取排气管外径为 275、255、235 mm，进行流固耦合分析可得其应力变形情况。结果分析如表 3 所示，修正后的排气管变形量及应力值均有增加，但都在安全范围以内，满足使用要求。考虑到实际试验中排气管还需要承受试验弹在内部运动时产生的冲击并保证良好的导向作用，排气管壁厚不易太薄，最终选取外径 D 为 255 mm。

表 3 修正前后性能参数对比

参数	原始组	修正 1 组	修正 2 组	修正 3 组
外径/mm	315	275	255	235
质量/kg	189.77	120.87	91.75	66.2
最大应力/MPa	74.54	93.75	94.36	106
最大变形/mm	0.11	0.14	0.15	0.16

炮口喷出的火药燃气经过第 1 段排气管时迅速膨胀扩散，压力下降迅速，剩余的火药燃气对 2、3 段排气管产生影响相对较小。为便于加工，令 3 段排气管的开口长度 a 逐渐增加，其余参数均相同，3 段排气管的尺寸如表 4 所示。

表 4 3 段排气管的尺寸

结构参数	第 1 段排气管	第 2 段排气管	第 3 段排气管
开口个数	6	6	6
内径/mm	155	155	155
外径/mm	255	255	255
开口长度/mm	479	726	1 126
开口宽度/mm	74	74	74
总长度/mm	713	1 000	1 400

6 结论

1) 以软回收试验为背景，针对排气装置明确了结构设计参数向量 $X=[n, D, a, b]$ ，建立了由精度驱动的稀疏网格响应面模型，使用多目标遗传算法得到了 n 取不同值时各方案下的局部最优解，并选出排气效率最高的作为初步解，对各设计参数对于结果的影响进行分析。

2) 将初步解作为流场边界条件进行流固耦合分析。根据计算结果，对初步解进行修正，得到最终解 $X=[6, 255, 479, 74]$ ，参考第 1 段排气管尺寸参数，选定了整体的排气装置尺寸模型。

3) 采用响应面与多目标遗传算法联合的优化设计流程，提高研制效率，为类似装置的快速优化设计提供参考。

参考文献:

- [1] 王俊晓, 向红军, 吕庆教, 等. 电磁轨道炮超高速弹丸软回收技术需求及研究现状分析[J]. 飞航导弹, 2018(11): 6-10.
- [2] 杨秀英. 85 mm 气体炮无损回收装置[J]. 现代引信, 1993(3): 43-45.
- [3] YOO I L, LEE S S, CHO C D. Design study of a small scale soft recovery system[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2006, 20(11): 1961-1971.
- [4] 倪梯闵. 高过载弹丸回收系统人机工程设计研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
- [5] 潘孝斌, 倪梯闵, 谈乐斌. 基于空气阻尼高速弹体软回收方法研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(17): 77-82.
- [6] 高树滋. 火炮反后坐装置设计[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1995: 79-135.
- [7] 建筑结构静力计算手册编写组. 建筑结构静力计算手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998: 111-117.
- [8] 国振喜, 张树义. 实用建筑结构静力计算手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 295-304.
- [9] 隋允康, 宇慧平. 响应面方法的改进及其对工程优化的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 40-65.
- [10] 赵旭东, 李卫民. 基于有限元的 140 kN 摩擦焊机主轴箱响应面优化分析[J]. 机床与液压, 2021, 49(1): 138-145.
- [11] 刘文帅, 姚小敏, 李超群, 等. 基于响应面和遗传算法的尾座式无人机结构参数优化[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 88-95.
- [12] 姜衡, 管贻生. 基于响应面法的立式加工中心动静态多目标优化[J]. 机械工程学报, 2011, 47(11): 125-133.