

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211134

基于 PSO 的多层开孔电磁屏蔽结构优化设计^{*}

韩泽琳^{1,2} 丁永红^{1,2} 尤文斌²

(1. 中北大学信息与通信工程学院 太原 030051; 2. 中北大学电子测试技术重点实验室 太原 030051)

摘要: 金属屏蔽腔体能够保证车载记录仪在强电磁环境中正常工作,但散热和线缆等开孔会降低腔体屏蔽效果,需要对结构优化以提高屏蔽效能。分析不同开孔方案和结构参数对屏蔽效能的影响,推导电磁屏蔽效能的计算公式,针对纯数值优化方法计算成本高、计算效率偏低的问题,结合解析法计算简单和数值法计算精确的优点,采用自适应权重 PSO 优化算法对解析式进行快速寻找优化值,采用数值法对寻优结果进行数值仿真计算适应度值,从而得到最优的结构参数。结果表明,与纯数值法优化相比,计算成本大约降低 88.54%,在取得同样屏蔽效能的情况下,屏蔽结构的厚度由 3.4 cm 减少至 2.99 cm,体积减小 9.03%;在屏蔽结构体积大约相同时,屏蔽效能由 98.79 dB 提升至 102.65 dB。可见提出的优化方法在提升优化效果的同时大幅提高设计效率。

关键词: 电磁屏蔽; PSO; 结构参数优化; 多层开孔屏蔽结构

中图分类号: TP301.6; TM15 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10; 140.35

Optimization design of electromagnetic shielding structure with multilayer openings based on PSO algorithm

Han Zelin^{1,2} Ding Yonghong^{1,2} You Wenbin²

(1. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Science and Technology on Electric Test and Measurement Key Laboratory, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: The metal shielding cavity can ensure the normal operation of the on-board recorder in the strong electromagnetic environment, but the heat dissipation and cable openings will reduce the electromagnetic shielding efficiency, so the structure needs to be optimized to improve the shielding efficiency. The influence of different opening schemes and structural parameters on shielding effectiveness is analyzed, and the calculation formula of electromagnetic shielding effectiveness is derived. Combined with the advantages of simple calculation by analytical method and accurate calculation by numerical method, the adaptive weighted PSO optimization algorithm is used to quickly find the optimization value of the analytical formula, and the numerical method is used to simulate the optimization result to calculate the fitness value, so as to obtain the final optimization result. The results show that compared with the pure numerical method, the calculation cost is reduced by 88.54%. Under the same shielding efficiency, the thickness of the shielding structure is reduced from 3.4 cm to 2.99 cm, and the volume is reduced by 9.03%; When the volume of the shielding structure is about the same, the shielding efficiency is increased from 98.79 dB to 102.65 dB. It can be seen that the proposed optimization method can greatly improve the design efficiency while improving the optimization effect.

Keywords: electromagnetic shielding; particle swarm optimization; structural parameter optimization; multilayer perforated shielding structure

0 引言

超高速低真空管道磁浮交通系统是一个复杂的系统工程,需要设计屏蔽结构将强电磁场屏蔽至地磁强度以保证车载记录仪正常工作。在实际应用中,车载记录仪往往需

要考虑散热、外部电源供电、数据传输等因素,导致屏蔽结构存在开孔缝隙,成为外部电磁干扰的耦合通道,大大降低了屏蔽腔体电磁干扰防护能力^[1]。以往研究分析了双层屏蔽腔体的屏蔽效能以及腔体结构、孔缝排列形式等因素对屏蔽效能的影响,结果表明双层或多层屏蔽的措施能够提

收稿日期:2022-08-21

^{*} 基金项目:山西省基础研究计划项目面上基金(20210302124200)项目资助

升开孔腔体的屏蔽效能^[2-4],但是多层屏蔽的措施一定程度上增加了屏蔽腔体的物理体积,导致屏蔽腔体的生产成本增加。可见,电磁屏蔽结构的参数优化是必须要考虑的问题。郭敬滨等^[5],李攀等^[6]在综合考虑影响屏蔽腔体屏蔽效果的各种因素的基础上,对其结构尺寸进行了优化设计,提高了屏蔽效能,取得了很好的屏蔽效果,同时降低了重量和成本,然而以上优化方法都是从解析式入手,寻找出解析式的最优解作为其最优结构参数,解析法虽然物理意义清晰,计算速度快,占用资源少,但是其精度较差^[7-8],数值法是采用成熟的商用电磁仿真软件进行分析计算,计算精度较高,但是耗时较长、效率不高^[9-11]。鉴于此,本文结合解析法精度偏低但计算速度快的特点与数值法计算耗时但精度高的特点,利用自适应权重粒子群优化算法 (particle swarm optimization, PSO) 强大的多变量函数优化能力,对屏蔽腔体的结构参数进行寻优,在解析最优解的附近进行小范围、小步长的数值扫描计算,得到屏蔽腔体最终的结构参数,与纯数值法进行对比,提升了结构参数优化效果,降低了计算成本和结构体积。

1 电磁屏蔽

1.1 电磁屏蔽原理及单层开孔屏蔽腔体的屏蔽效能

电磁屏蔽即利用屏蔽体的反射、衰减等特性使电磁辐射所产生的电磁能流不进入被屏蔽区域。屏蔽效能(SE)指未加屏蔽时某一观测点的场强与加屏蔽后同一观测点的场强之比,即为:

$$SE = 20\lg \frac{E_0}{E_s}(\text{dB}) = 20\lg \frac{H_0}{H_s}(\text{dB}) \quad (1)$$

式中: E_0 、 H_0 表示没有屏蔽材料或结构时的电场和磁场, E_s 、 H_s 表示有屏蔽材料或结构时的电场和磁场。

电磁屏蔽原理如图 1 所示,电磁波入射到金属表面产生以下几个物理过程:1)由于金属与自由空间的波阻抗不同,电磁波在金属表面产生反射,大部分能量反射回自由空间;2)由于金属不是绝对的理想导体,电磁波仍会有一部分进入金属内部,在金属体内转化成热能,或者说被金属体吸收;3)另一部分电磁波能量将在界面与界面之间来回反射,逐渐衰减^[12]。

电磁屏蔽的作用就是体现在表面反射损耗、吸收损耗和内反射损耗上,所以将这三者分别称为电磁屏蔽效能的第一机理、第二机理和第三机理。综上所述,电磁屏蔽效能可表示如下^[13-14]:

$$SE_2 = A_a + R_a + B_a + K_1 \quad (2)$$

式中: R 为反射损耗; A 为吸收损耗; B 为多次反射损耗。

近区磁场点源反射损耗可表示为:

$$R = 14.56 + 10\lg(fr^2\sigma_r/\mu_r) \quad (3)$$

式中:距离 r 的单位为 m,频率 f 的单位为 Hz, μ_r 是相对磁导率, σ_r 是相对电导率。

吸收损耗可表示为:

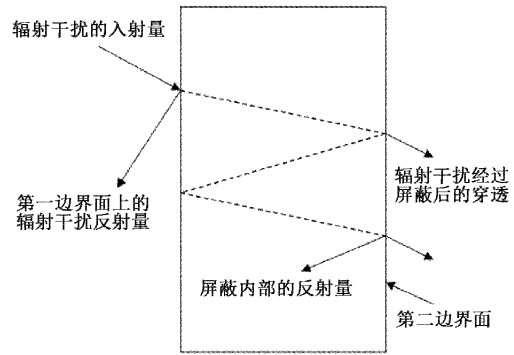


图 1 电磁屏蔽原理示意图

$$A = 1.31d \sqrt{f\mu_r\sigma_r} \quad (4)$$

式中: d 为屏蔽体厚度,单位为 cm。

内部多次反射损耗可表示为:

$$B = 20\lg \left[1 - \left(\frac{1-K}{1+K} \right)^2 \cdot 10^{0.1A} (\cos 0.23A - j\sin 0.23A) \right] \quad (5)$$

式中: $K = Z_w/Z_m$ 为空气波阻抗与金属波阻抗的比值; Z_w 是空气波阻抗; Z_m 是金属波阻抗; A 是前面计算的吸收损耗,当 $A > 10$ dB 时, B 可以忽略不计。

为了满足通风散热、线缆进出等要求,有时必须在屏蔽结构上开设孔洞,孔洞的能量泄露是造成屏蔽效能下降的重要原因,开设孔洞的结构电磁屏蔽效能可用下式表示:

$$SE_2 = A_a + R_a + B_a + K_1 \quad (6)$$

式中: A_a 是孔眼中的传输衰减、 R_a 是孔眼的单次反射损耗、 B_a 是多次反射修正项、 K_1 是与开孔个数有关的修正项。

$$A_a = 16t/R \quad (7)$$

式中: t 是孔深,单位为 cm; R 是孔的半径,单位为 cm。

$$R_a = 20\lg \frac{|(1+K)^2|}{4|K|} \quad (8)$$

式中: $K = R/1.841r$, 适用于低阻抗场下的圆孔。

$$B_a = 20\lg \left| 1 - \left(\frac{1-K}{1+K} \right)^2 \cdot 10^{-0.1A_a} \right| \quad (9)$$

当干扰源到屏蔽体的距离比孔间间距大很多时,开孔个数的修正项可表示为:

$$K_1 = -10\lg(an) \quad (10)$$

式中: a 是每一孔眼的表面积; n 是每平方厘米内的开孔个数。

电磁场从屏蔽体外面进入到内部的途径有两种,一是从屏蔽体材料中穿透;二是从屏蔽体的电气不连续处泄露。在不考虑电磁场的投入途径和在传输中的相位差异的情况下,可按下式计算实际屏蔽体的屏蔽效能:

$$SE = -20\lg \sum_{p=1}^n 10^{SE_p/20} \quad (11)$$

1.2 多层屏蔽腔体电磁屏蔽效能

多层屏蔽腔体可以大大提高屏蔽效能,为了满足屏蔽

要求,对多层屏蔽腔体的电磁屏蔽效能进行分析^[15]。出于内部设备安装方便和空间利用率等因素的考虑,需要采用矩形屏蔽腔体,而以往研究偏重圆柱形腔体,张红^[16]等提出圆柱形腔体的多层电磁屏蔽效能计算公式,本文利用矩形腔体截面与圆柱形腔体轴向截面的相似性,类比推导矩形腔体的多层电磁屏蔽效能。圆柱形屏蔽结构轴向截面如图 2 所示。

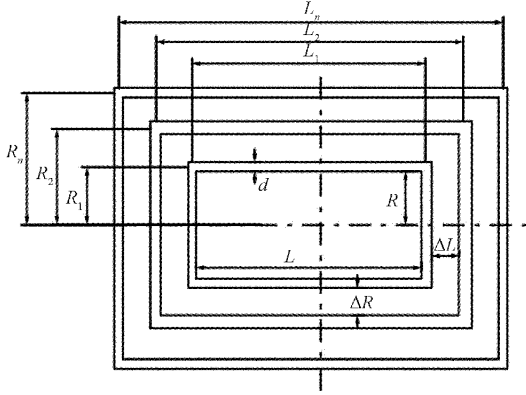


图 2 圆柱形屏蔽结构轴向截面

n 层电磁屏蔽筒的轴向磁屏蔽效能可表示为:

$$S_{A_{tot}} = S_{an} \prod_{i=1}^n S_{ai} \left(1 - \frac{R_i^2 \cdot L_i}{R_{i+1}^2 \cdot L_{i+1}}\right) \quad (12)$$

式中: S_{ai} 代表屏蔽结构第 i 层轴向电磁屏蔽效能。

类比推导矩形腔体的多层电磁屏蔽效能:

$$S_{A_{tot}} = S_{an} \prod_{i=1}^n S_{ai} \left(1 - \frac{a_i \cdot b_i \cdot c_i}{a_{i+1} \cdot b_{i+1} \cdot c_{i+1}}\right) \quad (13)$$

本文采用三层矩形电磁屏蔽腔体结构,其电磁屏蔽效能为:

$$SE = S_{a1} S_{a2} S_{a3} \left(1 - \frac{a_1 b_1 c_1}{a_2 b_2 c_2}\right) \left(1 - \frac{a_2 b_2 c_2}{a_3 b_3 c_3}\right) \quad (14)$$

式中: a_i, b_i, c_i 分别代表由内到外第 i 层屏蔽腔体的长、宽、高。 S_{ai} 代表由内到外第 i 层的电磁屏蔽效能,可由 1.1 节中单层开孔屏蔽效能公式式(2)(6)(11)计算得到:

$$S_{ai} = -20 \lg \left(10^{-SE_{1i}/20} + 10^{-SE_{2i}/20}\right) \quad (15)$$

式中: SE_{1i} 和 SE_{2i} 分别表示第 i 层结构在不开孔和开孔情况下的屏蔽效能。

$$\begin{cases} SE_{1i} = R_i + A_i + B_i \\ R_i = 14.56 + 10 \lg(fr^2 \sigma_{ri} / \mu_{ri}) \\ A_i = 1.31 d_i \sqrt{f \mu_{ri} \sigma_{ri}} \\ B_i = 20 \lg \left[1 - \left(\frac{1 - Z_w / Z_{mi}}{1 + Z_w / Z_{mi}}\right)^2\right] \cdot 10^{-0.1A_i} \cdot e^{-j0.23A_i} \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} SE_{2i} = R_{ai} + A_{ai} + B_{ai} + K_{1i} \\ R_{ai} = 20 \lg \frac{|(1 + R/1.841r)^2|}{4 |R/1.841r|} \\ A_{ai} = 16 d_i / R \\ B_{ai} = 20 \lg \left|1 - \left(\frac{1 - R/1.841r}{1 + R/1.841r}\right)^2\right| \cdot A^{-0.1A_{ai}} \\ K_{1i} = -10 \lg(\pi R^2 n) \end{cases} \quad (17)$$

由式(16)、(17)可知,影响电磁屏蔽效能的因素有频率 f , 场源距离屏蔽体的距离 r , 厚度 d , 材料的相对磁导率、相对电导率和金属波阻抗,开孔半径 R , 开孔个数。本文假设 f, r 以及各层材料固定,其余影响因素中, d 与屏蔽效能成正比关系,开孔半径以及开孔个数与屏蔽效能成反比关系。

2 屏蔽体仿真设计

本文使用 Ansoft Maxwell 对电磁屏蔽装置进行建模仿真,采用电流源激励,选取坡莫合金、钢和纯铁 3 种材料进行屏蔽结构设计,屏蔽结构的屏蔽层截面图如图 3 所示。图中 Δd_i 表示由内到外第 i 层屏蔽层厚度, Δt_1 表示第 1 层和第 2 层之间的空气层厚度, Δt_2 表示第 2 层和第 3 层之间的空气层厚度。

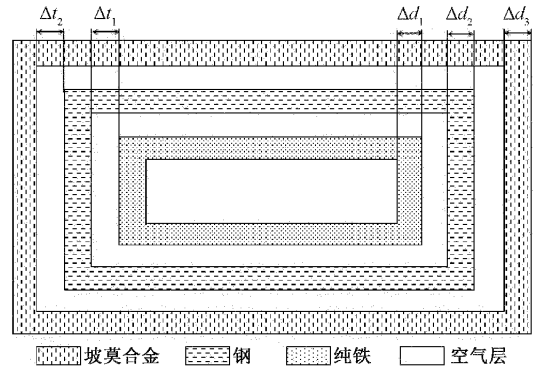


图 3 屏蔽层截面图

2.1 屏蔽体开孔对屏蔽效能的影响

车载记录仪通常需要线缆进出以及散热,需要在屏蔽体上开孔,这会使电磁波更加容易进入屏蔽体内部,从而降低屏蔽效能。除了采取调整屏蔽体尺寸和减小开孔面积等措施以外,也可以从开孔形状的角度来采取措施降低其对屏蔽效能的影响^[17-18]。因此选择圆孔、方孔、圆孔阵以及方孔阵进行对比分析,开孔总面积相等,对比方案具体尺寸如图 4 所示。

在屏蔽体的内部设置测试区域,通过观察内部测试区的剩磁量来分析不同开孔方案对屏蔽效能的影响。四种开孔方案的内部测试区域磁场变化如图 5 所示,内部测试区剩磁数值仿真结果如表 1 所示。

根据式(1)可求得,4 种开孔方案的屏蔽效能分别为 81.17、93.55、99.25、98.33 dB,孔阵的屏蔽效能明显高于

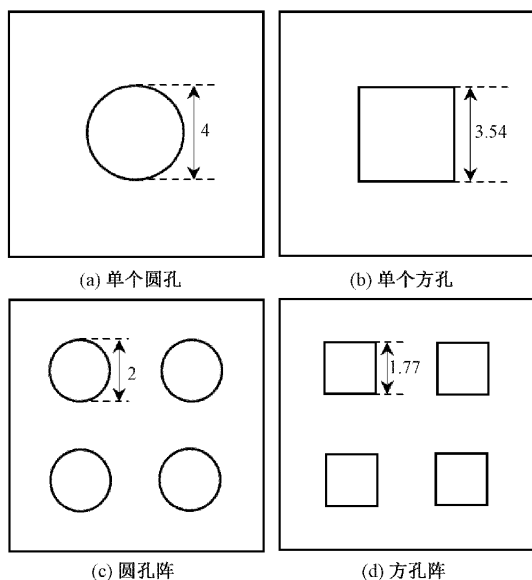


图 4 开孔方案

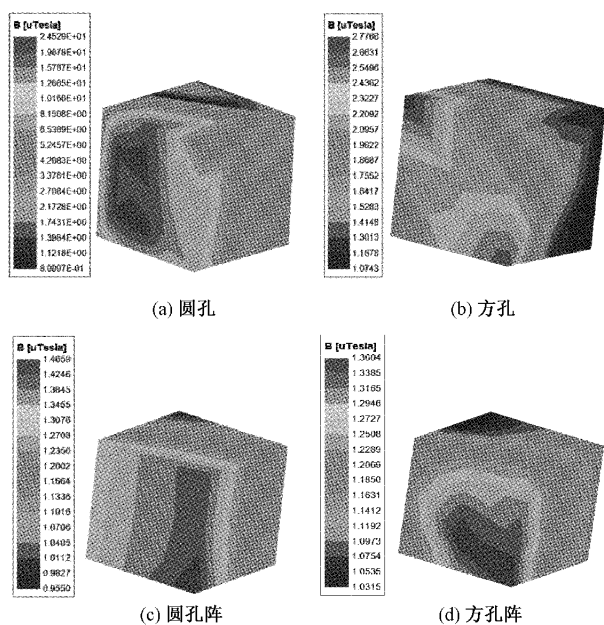


图 5 测试区域磁场变化图

表 1 测试区域剩磁数值仿真结果

开孔方案	测试区剩磁/ μT		
	最大值	最小值	测试点
圆孔	24.529	0.9	8.73
方孔	2.777	1.074	2.096
圆孔阵	1.466	0.955	1.21
方孔阵	1.36	1.032	1.222

相同面积单个开孔,而圆孔阵和方孔阵对屏蔽效能的影响差别不大,根据实际应用要求本文计划采用圆孔阵的开孔方式,三维仿真模型如图 6 所示。

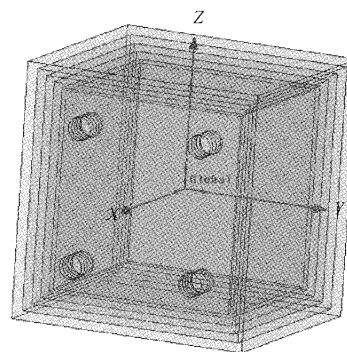


图 6 仿真模型

2.2 屏蔽体结构参数对屏蔽效能的影响

为分析屏蔽体各结构参数对屏蔽效能的影响,利用图 6 所示的模型进行仿真。利用 Ansoft Maxwell 仿真软件中的参数化建模功能,对图 3 中的五个参数分别进行参数扫描,分析参数变化对屏蔽效能的影响,扫描结果如图 7 所示。

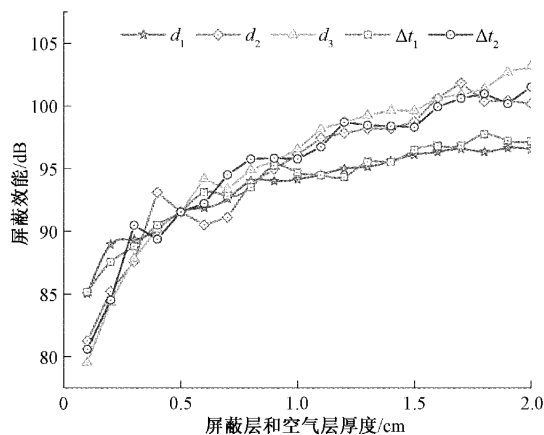


图 7 结构参数扫描计算结果

由图 7 可以看出,结构参数与屏蔽效能成正比关系,增加厚度即可增加屏蔽效能,其中 d_2 、 Δt_2 、 d_3 三个参数在扫描范围内屏蔽效能变化相对较大,即影响权重更大, d_1 和 Δt_1 影响权重相对较小。所以,在之后的优化过程中,将对影响权重较大的参数选择小步长扫描,对影响权重较小的参数选择大步长扫描。

2.3 电磁屏蔽结构的数值仿真优化

电磁屏蔽腔体的结构参数对其屏蔽性能的影响是相互制约的,通过多变量优化可以使各参数达到平衡,利用 Ansoft Maxwell 数值仿真软件中的参数化建模功能对屏蔽装置的结构参数进行联合扫描计算^[19]。本文计划设计屏蔽效能满足 100 dB 的屏蔽结构,根据设备的尺寸,设定屏蔽体最内层尺寸为 18 cm×19 cm×20 cm,限制屏蔽结构厚度不超过 3 cm,针对这些设计要求,利用数值仿真法进行参数优化。想要得到最优方案,需要对 5 个参数同时进行大范围的扫描计算,屏蔽层厚度 d_1 、 d_2 和 d_3 选取的搜索范

围为 0.1~1 cm,空气层厚度 Δt_1 和 Δt_2 选取的搜索范围为 0.3~0.7 cm,基于图 7 得到的结论,对影响权重较小的 d_1 和 Δt_1 的扫描步长设定为 0.2 cm,对影响权重较大的 d_2 、 Δt_2 和 d_3 的扫描步长设定为 0.1 cm,即 5 个参数对应的计算有 $5 \times 3 \times 10 \times 5 \times 10 = 7\,500$ 个计算结果,计算量大且耗时较多。优化得到结果为: $d_1 = 0.3\text{ cm}, d_2 = 0.6\text{ cm}, d_3 = 1\text{ cm}, \Delta t_1 = 0.7\text{ cm}, \Delta t_2 = 0.7\text{ cm}$ 时,屏蔽结构总体厚度为 3.4 cm,对应的屏蔽效能为 100.09 dB; $d_1 = 0.5\text{ cm}, d_2 = 0.6\text{ cm}, d_3 = 0.8\text{ cm}, \Delta t_1 = 0.5\text{ cm}, \Delta t_2 = 0.6\text{ cm}$ 时,屏蔽结构总体厚度为 3 cm,对应的屏蔽效能为 98.79 dB。

可见优化结果不能同时满足厚度和屏蔽效能两个限制条件,而提高扫描精度造成的巨大计算量难以实现,而利用 PSO 寻优算法可快速找到满足限制条件的结构参数,然后基于算法得到的优化结果在 Ansoft Maxwell 软件中进行数值建模,利用软件的参数化建模功能,以小范围、小步长在解析优化结果附近进行数值扫描计算得到最终的结构参数,既能减小参数优化过程中的计算量,又能提高计算精度。

3 自适应权重 PSO 优化算法寻优

PSO 优化算法是一种基于群体的随机优化技术,它具有群体智能、迭代格式简单、内在并行性及可快速收敛到最优解等优点^[19]。多层开孔电磁屏蔽装置的结构优化是一个多变量优化过程,传统的 PSO 优化算法在优化多变量等复杂函数过程中很容易陷入局部最优,从而出现早熟收敛,自适应惯性权重 PSO 优化算法可以有效解决传统 PSO 算法早熟收敛的问题^[20-21],为此,本文选用自适应权重 PSO 优化算法进行屏蔽结构的参数优化,惯性权重 ω 随粒子的目标函数值自动改变。

在 PSO 优化算法中,惯性权重 ω 控制前一速度对当前速度的影响; ω 较大时,前一速度影响较大,全局搜索能力较强; ω 较小时,前一速度影响较小,局部搜索能力较强。为了平衡 PSO 算法的全局搜索能力和局部改良能力,采用非线性的动态惯性权重系数公式,其表达式为:

$$\omega = \begin{cases} \omega_{\min} - \frac{(\omega_{\max} - \omega_{\min}) \times (f - f_{\min})}{(f_{\text{avg}} - f_{\min})}, & f \leq f_{\text{avg}} \\ \omega_{\max}, & f > f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (18)$$

式中: ω_{\max} 、 ω_{\min} 分别表示 ω 的最大值和最小值; f 表示粒子当前的目标函数值, f_{avg} 和 f_{\min} 分别表示当前所有粒子的平均目标值和最小目标值。由于惯性权重 ω 随粒子的目标函数值而自动改变,故称为自适应权重。

3.1 结构参数初始化及待优化参数的确定

在实际应用中,屏蔽体内部应留有足够大的空间保证设备的安装,根据设备的尺寸,设定屏蔽体最内层尺寸为 $18\text{ cm} \times 19\text{ cm} \times 20\text{ cm}$,为避免整个装置体积过大,限定屏

蔽层厚度不超过 3 cm,即最外层尺寸不大于 $24\text{ cm} \times 25\text{ cm} \times 26\text{ cm}$,最外层体积 $V < 15\,600\text{ cm}^3$,根据实际需求以及前面对于开孔方案的分析,选择开孔半径为 1.2 cm 的圆孔阵。在寻优过程中,将式(14)作为适应度函数,SE 达到 100 dB 时所对应的参数即为最优结构参数。对于三层矩形电磁屏蔽腔体,待优化的结构参数为 d_1 、 d_2 、 d_3 、 Δt_1 和 Δt_2 , d_i 表示由内到外第 i 层屏蔽层厚度, Δt_1 表示第 1 层和第 2 层之间的空气层厚度, Δt_2 表示第 2 层和第 3 层之间的空气层厚度,将这些参数代入式(14)可得:

$$\begin{cases} SE = S_{a_1} S_{a_2} S_{a_3} \left(1 - \frac{a_1 b_1 c_1}{a_2 b_2 c_2}\right) \left(1 - \frac{a_2 b_2 c_2}{a_3 b_3 c_3}\right) \\ a_2 = a_1 + 2d_1 + 2\Delta t_1 \\ b_2 = b_1 + 2d_1 + 2\Delta t_1 \\ c_2 = c_1 + 2d_1 + 2\Delta t_1 \\ a_3 = a_1 + 2d_1 + 2\Delta t_1 + 2d_2 + 2\Delta t_2 \\ b_3 = b_1 + 2d_1 + 2\Delta t_1 + 2d_2 + 2\Delta t_2 \\ c_3 = c_1 + 2d_1 + 2\Delta t_1 + 2d_2 + 2\Delta t_2 \end{cases} \quad (19)$$

$$s. t. = \begin{cases} a_3 \cdot b_3 \cdot c_3 \leq 15\,600 \\ d_i \in [0.1, 1], \quad i = 1, 2, 3 \\ \Delta t_j \in [0.3, 0.7], \quad j = 1, 2 \end{cases} \quad (20)$$

3.2 优化结果分析

以 3.1 节中的条件作为初始条件,设计满足 100 dB 的屏蔽结构,按照优化算法流程对电磁屏蔽装置结构参数进行优化,经求解得到的参数优化结果如表 2 所示,适应度收敛过程如图 8 所示。

表 2 优化算法寻优结果

d_1	Δt_1	d_2	Δt_2	d_3	仿真结果/dB
0.3	0.53	0.62	0.56	0.77	96.19
0.4	0.52	0.72	0.58	0.67	97.42
0.2	0.51	0.52	0.55	0.77	96.36
0.4	0.55	0.62	0.57	0.87	98.22
0.4	0.52	0.72	0.58	0.77	99.47

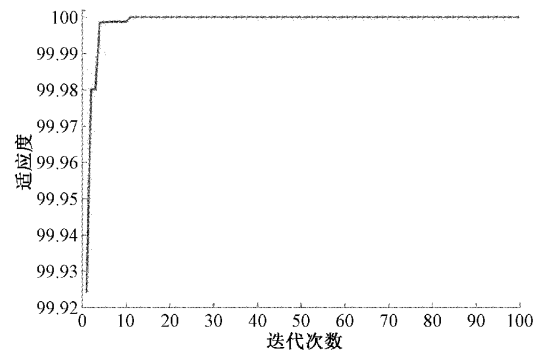


图 8 适应度收敛过程

通过寻优算法优化得到表 2 中所示的 5 组满足要求的

数据,将其带入仿真软件进行求解,选取仿真结果最接近 100 dB 的一组数据作为寻优算法得到的最优解,即解析最优解。由于经验公式计算得出的屏蔽效能是在理想环境下的,所以经验公式所得到的解析解与数值仿真结果存在误差是不可避免的,想要实现目标屏蔽效能,利用仿真在解析最优解附近进行小范围、小步长扫描计算,即以解析最优解为搜索中心,对其 ± 0.1 cm 的范围进行扫描计算,影响权重较小的结构参数 d_1 和 Δt_1 的扫描步长设定为 0.1 cm,影响权重较大的结构参数 d_2 、 Δt_2 和 d_3 的扫描步长设定为 0.05 cm,此时 5 个参数对应的计算有 $3 \times 3 \times 5 \times 5 \times 5 = 1\ 125$ 个计算结果。本文方法与纯数值法优化方法结果与计算量对比如表 3 所示。

表 3 本文方法与纯数值法对比

优化方法	参数/cm	搜索范围	步长	厚度/cm	屏蔽效能/dB	计算量
数值法	d_1	[0.1,1]	0.2	3.4	100.09	7 500
	Δt_1	[0.3,0.7]	0.2			
	d_2	[0.1,1]	0.1			
	Δt_2	[0.3,0.7]	0.1			
	d_3	[0.1,1]	0.1			
本文方法	d_1	[0.3,0.5]	0.1	2.99	100.16	1 125
	Δt_1	[0.52,0.72]	0.1			
	d_2	[0.62,0.82]	0.05			
	Δt_2	[0.48,0.68]	0.05			
	d_3	[0.67,0.87]	0.05			

对数值扫描计算得到的结果进行统计后得到最终的结构参数最优解为: $d_1 = 0.3$ cm, $d_2 = 0.67$ cm, $d_3 = 0.72$ cm, $\Delta t_1 = 0.62$ cm, $\Delta t_2 = 0.68$ cm,此时屏蔽结构总体厚度为 2.99 cm,屏蔽效能达到 100.16 dB,而当 $d_1 = 0.3$ cm, $d_2 = 0.57$ cm, $d_3 = 0.87$ cm, $\Delta t_1 = 0.62$ cm, $\Delta t_2 = 0.63$ cm 时,屏蔽效能可达到 102.65 dB,屏蔽结构总体厚度仍为 2.99 cm。

通过对比可以看出,在本文提出的方法中,先利用优化算法对解析式进行寻优得到解析最优解,然后在仿真软件中以小范围、小步长在解析最优解附近进行扫描计算即可得到最优的结构参数,相比于纯数值法优化,在达到相同屏蔽效能的前提下,缩短了参数的搜索范围,减小了扫描步长,由纯数值方法中 7 500 个计算结果下降到 1 125 个,屏蔽效能都达到约 100 dB 时,结构的总体厚度由 3.4 cm 减少到 2.99 cm,屏蔽结构总体厚度为 2.99 cm 时,屏蔽效能由 98.79 dB 提升至 102.65 dB。可见,本文提出的方法在降低计算量的同时得到的优化结果较纯数值法更优。

4 结 论

本文基于电磁屏蔽原理推导出多层开孔屏蔽腔体的屏

蔽效能解析式,对开孔形状和结构参数对屏蔽效能的影响进行分析,确定了开孔方案和结构参数的影响权重。针对电磁屏蔽腔体结构参数优化问题,将解析法计算简单和数值仿真法计算精确的优点结合,提出基于自适应权重 PSO 优化算法的结构优化方法,通过与纯数值仿真优化方法进行对比,本文方法在利用优化算法找到最优解析解的基础上,扫描范围和扫描步长都有所减小,计算成本大约节省 88.54%,屏蔽效能都达到约 100 dB 时,屏蔽结构的体积减小 9.03%,屏蔽结构体积大约相同时,屏蔽效能由 98.79 dB 提升至 102.65 dB。所以提出的优化方法在提升优化效果的同时大幅提高设计效率。

参考文献

- [1] 胡溥宇. 开孔腔体屏蔽效能解析计算方法研究[D]. 长春:吉林大学,2020.
- [2] VAN HELVOORT M J A M, HARBERTS D W. Low-frequency electromagnetic shielding and scattering of multiple cylindrical shells [J]. IEEE Trans on Electromagnetic Compatibility, 2020, 63(1): 46-56.
- [3] 吴刚,邵小亮,孙靖虎,等. 有孔双层矩形金属机壳屏蔽效能[J]. 强激光与粒子束,2015,27(10):94-99.
- [4] 李荣基,尤文斌,丁永红,等. 爆炸场冲击波测试装置电磁屏蔽结构研究[J]. 兵器装备工程学报,2022,43(2):158-162,18.
- [5] 郭敬滨,孟佳旭,李醒飞,等. 光泵磁力仪磁屏蔽筒的尺寸设计[J]. 电子测量与仪器学报,2018,32(2):80-85.
- [6] 李攀,刘元正,王继良. 核磁共振陀螺多层磁屏蔽系统优化设计[J]. 中国惯性技术学报,2016,24(3):383-389.
- [7] 郑天宇,陈德智,王雪,等. 电流比较仪多层小气隙磁屏蔽磁场的解析解[J]. 电工技术学报,2017,32(21):153-160.
- [8] DEHKHODA P, TAVAKOLI A, MOINI R. Shielding effectiveness of a rectangular enclosure with finite wall thickness and rectangular apertures by the generalised modal method of moments [J]. IET Science, Measurement & Technology, 2009, 3(2):123-136.
- [9] 吕志峰,赵欣,张金生,等. 磁屏蔽装置结构参数的组合优化方法[J]. 兵工学报,2018,39(11):2211-2219.
- [10] 余亚东,宋凯,李光海,等. 多通道低频电磁传感器的仿真及优化[J]. 仪器仪表学报,2019,40(10):19-27.
- [11] SHIM J, KAM D G, KWON J H, et al. Circuitual modeling and measurement of shielding effectiveness against oblique incident plane wave on apertures in multiple sides of rectangular enclosure [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2010,

- 52(3): 566-577.
- [12] 涂志章. 复杂电磁环境下孔缝箱体电磁屏蔽特性研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
- [13] 龙奕, 胡皓全, 赵家升, 等. 电磁屏蔽效能分析与实例计算[C]. 第 17 届全国电磁兼容学术会议论文集. 广州: 电子工业出版社, 2007: 68-73.
- [14] 葛欣宏, 宁飞, 李晓林. 光电系统监测设备电磁屏蔽设计的系统法研究[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(9): 42-45, 58.
- [15] 刘宝衡, 付天晖, 侯文达. 一种低频低噪声前置放大器的设计[J]. 电子测量技术, 2021, 44(12): 1-5.
- [16] 张红, 陈熙源, 邹升. 原子自旋磁强计磁屏蔽筒参数优化设计[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2014, 44(6): 1177-1180.
- [17] 张岩, 田铮, 王川川, 等. 双层腔体屏蔽效能随孔缝位置与数量变化规律研究[J]. 电工技术学报, 2022, 37(13): 3350-3360.
- [18] GONG Y F, LI Y J, JIANG L H. Efficient analytical method for the shielding effectiveness of an apertured enclosure based on the BLT equation[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2020, 14(8): 897-904.
- [19] 吕志峰, 张金生, 王仕成, 等. 基于自适应权重 PSO 算法的磁屏蔽装置优化设计[J]. 中国惯性技术学报, 2017, 25(6): 799-803.
- [20] 马学森, 谈杰, 陈树友, 等. 云计算多目标任务调度的优化粒子群算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(8): 133-143.
- [21] 王晓辉, 邓威威, 齐旺. 基于超参数优化的短期电力负荷预测模型[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(6): 152-158.

作者简介

韩泽琳, 硕士研究生, 主要研究方向为通信与信息系统, 电磁兼容。

E-mail: 921864392@qq.com

丁永红(通信作者), 博士, 副教授, 主要研究方向为信号与信息处理, 动态测试与无线通信技术。

E-mail: dingyonghong@nuc.edu.cn

尤文斌, 博士, 教授, 主要研究方向为动态测试与智能控制。

E-mail: youwenbin@nuc.edu.cn