

doi: 10.7690/bgzdh.2020.04.012

基于非线性力学的 RS232 串口外壳结构拓扑优化分析

陈宝¹, 石勇¹, 邹佳鑫²

(1. 海军装备部驻北京地区第七军事代表室, 北京 100176;

2. 中国兵器装备集团自动化研究所有限公司特种产品事业部, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为解决 RS232 外壳结构设计不合理的问题, 对基于非线性力学的 RS232 串口外壳结构拓扑进行优化分析。根据接口外壳本身结构的组合关系, 构建非均匀密度函数的六参数伊万模型, 采用拓扑优化数学模型对各向同性材料进行删除判断, 通过对非线性有限元分析, 得出一种渐进的结构优化方法。结果表明: 该方法实现了材料的合理分配, 达到材料性能最优化使用的目的。

关键词: RS232; 拓扑优化; 伊万模型

中图分类号: TP203 **文献标志码:** A

Nonlinear Mechanics Topology Optimization of RS232 Serial Port Shell Structure Design

Chen Bao¹, Shi Yong¹, Zou Jiabin²

(1. No. 7 Military Representative Office in Beijing District, Equipment Department of Navy, Beijing 100176, China;

2. Department of Special Products, Automation Research Institute Co., Ltd. of China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China)

Abstract: In order to solve the unreasonable RS232 shell structure design, the topology of RS232 serial port shell structure based on nonlinear mechanics is optimized and analyzed. According to the combination relation of the interface shell structure, the six-parameter Iwan model of the non-uniform density function is constructed. At the same time, the mathematical model of topological optimization is used to delete and judge isotropic materials and a progressive structural optimization method is obtained by nonlinear finite element analysis. The results show that the method can realize the reasonable distribution of materials and optimize the use of materials.

Keywords: RS232; topology optimization; Iwan model

0 引言

随着电子产业的蓬勃发展, 串口作为电子产品满足通信功能的基础组成部分, 在各种电子产品中的地位越发重要。用于固定串口的的外壳则是在使用各类串口时必不可少的部件, 但对此部分的制造却相对缺乏研究。传统串口的的外壳结构主要基于连接的牢固性因素设计而成, 忽略了材料合理分配的问题, 在满足外壳结构使用要求的情况下, 没有对有限的生产材料最优化分配问题作进一步研究。为了改善这种相对单一固定的设计, 笔者选取 9 引脚 RS232 接口, 按力学性能分析、结构优化设计到有限元分析的顺序对其外壳优化设计进行探究。其中在结构优化层次选择拓扑优化^[1], 可以在理论上找到综合的最佳构型^[2]。在电子产品使用量日趋增大的今天, 同时受到资源短缺和环境恶化等问题困扰, 该方法产生的经济效益将十分可观。

1 含螺丝连接的有限元模型

在对 RS232 外壳结构的螺丝连接部分进行有限元描述时, 选择 Li 等^[3-4]提出的一种六参数伊万模型。如图 1 所示, 基于该模型的计算方法为将分析对象拆分为 $n+2$ 个离散且并联的詹金斯单元。前 n 个詹金斯单元描述了连接结构刚度在微观滑移阶段的变化; 第 $n+1$ 个詹金斯单元描述了连接结构刚度在宏观滑移时刻的变化, 此时的刚度为 K_2 ; 第 $n+2$ 个詹金斯单元描述了接触界面在宏观滑移时刻后的残余刚度现象, 刚度可表示为 K_∞ 。

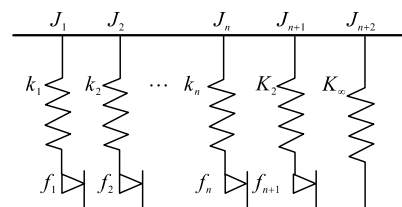


图 1 离散化的六参数伊万模型

收稿日期: 2019-12-02; 修回日期: 2020-01-07

作者简介: 陈宝(1982—), 男, 广东人, 学士, 工程师, 从事军事装备合同监管与质量监督。E-mail: 1099736879@qq.com。

笔者使用一种含截断幂律分布和双脉冲的非均匀密度函数的六参数伊万模型, 表达如式(1)所示。相比已有的伊万模型, 这种模型能够对连接结构的实验现象作出更好地描述。

$$\rho(\varphi) = \begin{cases} R\varphi^\alpha [H(\varphi - \varphi_1) - H(\varphi - \varphi_2)] + K_2 \\ \delta(\varphi - \varphi_2) + K_\infty \delta(\varphi - \varphi_\infty), \varphi < 0 \\ 0, \varphi = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中共有 R 、 α 、 φ_1 、 φ_2 、 K_2 、 K_∞ 6 个参数。其中: R 和 α 表征幂律分布的参数; φ_1 表征外壳结构在连接过程中微观滑移的起点; φ_2 表征外壳结构在连接过程中宏观滑移的起点; K_2 表征外壳结构在发生宏观滑移的临界时刻所导致结构件接触面切向刚度的变化量; K_∞ 表征结构件在已经发生宏观滑移后, 接触面的残余切向刚度。

基于式(1)的六参数伊万模型, 对预紧力为 7 117 N 时的应用场景进行如表 1 所示的参数辨识。

表 1 预紧力为 7 117 N 时的六参数伊万模型辨识结果

参数	φ_1/m	φ_2/m	$K_2/(N \cdot m^{-1})$	$K_\infty/(N \cdot m^{-1})$	$R/(N \cdot m^{-2\alpha})$	α
数值	0	1.020×10^{-5}	3.480×10^8	2.065×10^7	4.670×10^{11}	-0.276

2 含螺丝连接 RS232 端口的拓扑优化算例

2.1 数学模型^[5-7]

一个理想的分析结构, 每一部分的应力水平应大致相同。笔者将各个拆分单元的等效应力逐一进行对比分析, 并基于一定判据的前提下将低应力材料逐渐删除, 以达到逐次逼近最优化结构分布的目的, 使优化后的整体结构的各部分应力水平能够均匀分布。笔者采用冯·米塞斯应力模型对于各向同性材料作出低应力材料的删除判据, 3 维实体单元 e 的冯·米塞斯应力 σ_e^{VM} 为:

$$\sigma_e^{VM} = \sqrt{[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]/2} \quad (2)$$

其中: σ_x 、 σ_y 和 σ_z 表示 x 、 y 、 z 方向的正应力; τ_{xy}^2 、 τ_{yz}^2 和 τ_{zx}^2 为各方向剪应力^[8]。

σ_{max}^{VM} 定义在冯·米塞斯应力模型框架内具有最大应力水平的拆分单元。RR 为初始删除率, 如果计算所得单元的冯·米塞斯应力 σ_e^{VM} 满足

$$\sigma_e^{VM} < RR \cdot \sigma_{max}^{VM} \quad (3)$$

表明该拆分单元的应力水平相对较低, 处于可忽略

的状态, 可以将其从理论模型中删除。

初始删除率保持不变, 将整体结构的各个拆分单元一一代入式(3)进行对比分析, 并将所有满足式(3)的拆分单元全部删除。

此时引入参数进化率 ER, 将初始删除率重新修正为

$$RR = RR + ER \quad (4)$$

将修正后的删除率重新代入式(3), 重复上述计算对比过程, 将满足式(3)的应力单元全部删除, 直到满足给定的约束条件为止。

给定 2 个约束条件, 令结构在强度和连接刚度上均满足要求, 以结构的质量最小为目标函数, 整体结构模型的最大冯·米塞斯应力不超过许用应力、连接处不产生宏观滑移为约束条件, 以设计区域材料单元的应力水平为变量, 建立如下式的数学模型:

$$\left. \begin{aligned} \text{find } X &= [x_1, x_2, \dots, x_n], x_i \in \{0, 1\} \\ \text{min } M(X) &= \sum_{i=1}^n m_i x_i (i=1, 2, \dots, n) \\ \text{s.t. } \left\{ \begin{aligned} \sigma_{max}^{VM} &< \sigma^* \\ S_{max} &< \varphi_2/[n] \end{aligned} \right. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: x_i 为设计变量, $x_i=1$ 代表实体单元, $x_i=0$ 代表空洞单元; M 为整体结构的总质量; m_i 为第 i 个拆分单元的质量; n 为整体结构包含的拆分单元的数目; σ_{max}^{VM} 为整体结构的最大冯·米塞斯应力单元; σ^* 为优化部分的许用应力; S_{max} 为螺栓连接处的最大相对位移; φ_2 为结构件间的接触面开始宏观滑移时的位移量; $[n]$ 为不产生宏观滑移的安全系数。

2.2 有限元模型

如图 2 所示, 取一块长 5 cm、宽 3 cm、高 0.8 cm 的长板放置于 2 个相同的基座上, 每个基座长 1 cm、宽 1 cm、高 0.4 cm。长板表面的中心放置有一个质量为 300 kg 的重物, 重物放置于所占区域为边长 0.8 cm×0.8 cm 的正四边形方柱之上(重物未画出)。长板两端与基座接触部分各有 2 对单螺丝连接, 每对螺丝的摩擦面积为 8 mm×8 mm, 螺栓预紧力均为 7 117 N, 预紧力加载方式为夹具预紧, 具体预紧形式根据所选用夹具的不同而不同, 图中未画出螺栓部件。



图 2 RS232 外壳结构模型

笔者选用 SOLID185 单元对上述有限元模型进行网格划分。有限元模型如图 3 所示, 最终划分出的结构总单元数为 8 344 个, 优化时保留重物支撑方柱(0.8 cm×0.8 cm×0.4 cm)及板与基座连接处厚 0.4 cm 区域不被删除。

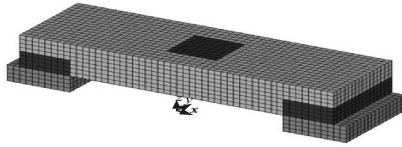


图 3 RS232 外壳有限元模型

2.3 拓扑优化

笔者基于六参数伊万和冯·米塞斯应力等基础分析模型, 得出一种渐进的结构优化方法, 其步骤如下:

1) 根据实际的 RS232 外壳的整体结构, 利用六参数伊万模型描述其紧固件螺丝的连接状态, 进而建立有限元模型、定义载荷及边界约束条件;

2) 确定应力优化准则式;

3) 定义初始删除率 RR 和进化率 ER , 明确 σ^* 和 $\varphi_2/[n]$;

4) 根据实际代入情况, 在指定当前删除率 RR 一定的情况下, 对拆分单元施加载荷进行求解, 并将求解出的处于低应力状态下的拆分单元删除;

5) 保持 RR 不变, 重复 4) 的操作, 直到没有应力单元再满足判定条件, 此时引入进化率 ER 对删除率进行重新修正;

6) 将修正后的删除率继续代入公式, 重复 4) 和 5) 的操作, 直到精简后的结构拆分单元均满足给定的约束条件为止, 至此便完成了优化设计。

假设结构材料为钢材, 弹性模量 $E=200$ GPa, 泊松比 $\nu=0.3$, 密度 $\rho=7\ 850$ kg/m³, 取许用应力 $\sigma^*=157$ MPa, $[n]=1.2$, 则 $S_{\max} \leq 0.85 \times 10^{-5}$ m。对结构进行逐步优化, 当最终的删除率为 77% 时, 整体结构单元的最大冯·米塞斯应力单元对应的应力水平为 $\sigma_{\max}^{\text{VM}}=157$ MPa= σ^* , 此时结构件连接部分的最大位移量 $S_{\max}=0.81 \times 10^{-5}$ m $\leq 0.85 \times 10^{-5}$ m。最终优化构型如图 4 所示。

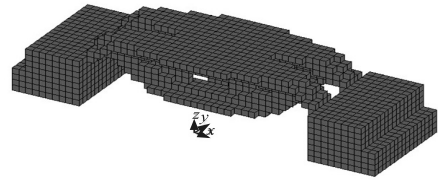


图 4 最终优化模型

在六参数伊万模型的基础上, 通过有限元分析和拓扑优化数学模型, 在结构件连接部分的最大位移量和应力水平均满足要求的情况下, 最终实现 RS232 外壳有效结构总单元数从 8 344 个降低为 3 224 个。

3 结论

笔者利用六参数伊万模型, 基于非线性有限元分析和拓扑优化数学模型, 形成完整的优化算法^[9]。实验结果表明: 经过结构优化后的 RS232 接口外壳结构使用材料大幅减少, 达到了合理分配材料、节省材料的目的。

参考文献:

- [1] 李芳, 凌道盛. 平面应力问题的结构拓扑优化[J]. 浙江工业大学学报, 2000, 28(3): 220-223.
- [2] 汪振华. 重型卡车驾驶室有限元分析及其拓扑优化[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
- [3] LI Y, HAO Z. A six-parameter Iwan model and its application[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 68-69: 354-365.
- [4] 李一莹, 郝志明, 章定国. 基于六参数非均匀密度函数的伊万模型研究[J]. 力学学报, 2015, 47(3): 513-520.
- [5] LI Y, HAO Z, FENG J, et al. Investigation into discretization methods of the six parameter Iwan model [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 85: 98-110.
- [6] 李一莹. 预紧连接结构非线性力学模型研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
- [7] 易伟建, 刘霞. 遗传演化结构优化算法[J]. 工程力学, 2004, 21(3): 66-71.
- [8] 荣见华, 郑健龙, 徐飞鸿. 结构动力修改及优化设计 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2002: 249-250.
- [9] 王金萍, 唐兵, 王洪燕, 等. 新型物流搬运机器人动力学仿真分析[J]. 兵工自动化, 2019, 38(6): 87-91.