

基于网格重画和响应面法的橡胶分析

韦流权

(上汽通用五菱汽车股份有限公司 广西 柳州 545007)

摘要: 橡胶材料是一种常见的超弹性材料, 一般通过有限元仿真和试验相结合的方法去获取其材料参数。在实际应用中, 试验的方法价格昂贵且费时; 在对大变形、高度非线性的橡胶材料进行有限元仿真时, 往往存在网格极度扭曲使计算模拟无法进行的情况。为此, 本文通过网格重画技术和响应面理论, 以实测位移响应为基准, 通过不断优化仿真计算模型中的材料参数直至两种响应在某种意义上相等来得出工程上可用的橡胶材料参数。

关键词: 网格重画; 橡胶材料; 参数反求; 响应面

0 背景及方法介绍

橡胶材料具有良好的弹性和刚度可塑性^[1], 被广泛地应用于制作刚度性能各异的汽车底盘减震衬套、缓冲块零件等^[2], 但是由于它力学上的极度不可压缩和非线性大变形的性质, 很难确定其力学特性常数 C_{01} 和 C_{10} 。在实际工程应用中, 试验的方法价格昂贵且费时; 在对大变形、高度非线性的橡胶材料进行有限元仿真时, 往往存在网格极度扭曲使计算模拟无法进行的情况。为此本文采用大型商用非线性有限元软件 ABAQUS 进行网格重画的方法和优化软件 hyperstudy 集成的响应面理论通过试验和仿真相结合的方法对确定橡胶材料的力学特性常数 C_{01} 、 C_{10} 的方法进行了探讨。

1 基础理论

1.1 橡胶的力学本构模型

橡胶材料在恒定的环境温度下通常被处理为各向同性的不可压缩材料, 其应变能密度函数 W 是应力张量不变量 I_1 、 I_2 、 I_3 的函数。

$$W=W(I_1, I_2, I_3)$$

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2, I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2, I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2$$

式中, λ_1 、 λ_2 、 λ_3 是三个主伸长比。根据橡胶的不可压缩性, 又有:

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 = 1$$

Mooney 在橡胶材料是不可压缩、各向同性的, 在这种假设的基础上, 又假设简单剪切服从虎克定律, 叠加剪切也服从虎克定律, 其公式可简化为^[4]:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3)$$

该方程是 Mooney 在 1940 年首次提出, 也是 Rivlin 模型简化的结果。其中, C_{01} 和 C_{10} 可以认为是材料常数, 也视为试验数据的回归系数。Mooney-Rivlin 公式相对简单, 应用上方便, 可以较好拟合不可压缩橡胶材料 150% 变形范围内的材料特性^[3]。

1.2 网格重画技术

网格重画技术是专为解决由于网格畸变导致计算不能收敛问题而发展起来的, 它的主要思想在于首先对模型进行小载荷加载, 算出网格在畸变之前的力学状态; 然后对已变形的网格进行重新划分, 划分后的网格以相同的边界条件继续分析下去, 上一步的分析结果也根据网格节点的坐标插值映射到重新划分的网格中继续迭代; 最后经过多次网格重新划分和结果映射完成整个分析。

1.3 响应面理论

响应面法 (RSM) 是数学方法和统计方法结合的产物, 用于处理变量与响应的转换关系问题。它以试验测量、经验公式和数值分析为基础, 采用设计空间内有限的已知量, 实现待测量量的全局逼近。假设响应 y 输入变量 x_1, x_2, \dots, x_n 的关系式为:

$$y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

由于很多工程问题存在高度非线性, 一般不能确定响应 y 与变量 x_1, x_2, \dots, x_n 的函数关系, 很难对解析函数 $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 进行优化设计, 所以比较简单的函数来近似构造精确的函数关系一般会被应用于优化设计或者参数反求^[4]。

2 参数反求策略

在橡胶材料参数已知的条件下, 为了解决大变形、高度非线性的橡胶材料进行有限元仿真时, 往往存在网格极度扭曲的问题, 分析策略如图 1 所示。而在橡

胶材料参数未知的条件下就必须加入参数反求思想对分析进行修改，分析策略如图2所示。主要策略可以阐述如下：

(1) 首先获知需分析橡胶零件应满足的性能曲线。对于汽车设计厂商来说，一般是所设计的橡胶零件的力-位移曲线，作为此化学配比的橡胶材料参数反求的约束和目标。

(2) 获取零件的3D模型划分网格，定义初始材料参数（一般根据经验设定）进行初步分析，获得此参数下的力-位移结果。

(3) 通过响应面优化技术，获取符合零件力-位移性能的橡胶材料参数。

(4) 通过网格重画技术校核实际产品零件具备的刚度、强度性能。

3 参数反求实例

麦弗逊前悬缓冲块主要作用是当汽车垂向工况十分恶劣的条件下（如过深坑），对前悬垂向进行限位，所以其垂向刚度的设计尤为重要。

3.1 某缓冲块的设计输入和建模

在国内某主机厂某车型的设计过程中，前悬麦弗逊悬架缓冲块刚度曲线设计如图3所示。

获取3D数模并划分有限元模型如图4所示，模型中包含实体杂交单元（ABAQUS软件中用于模拟不

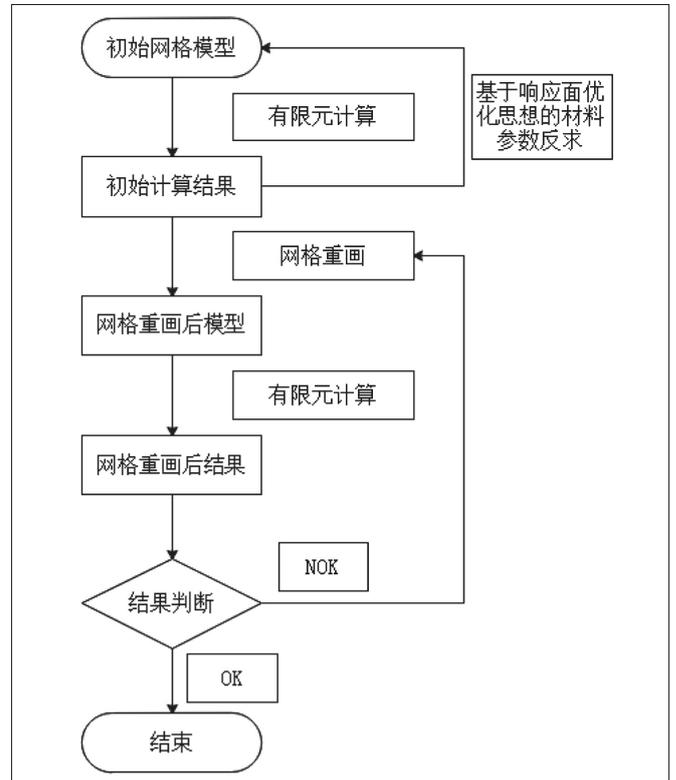


图2 未知橡胶材料参数的分析策略

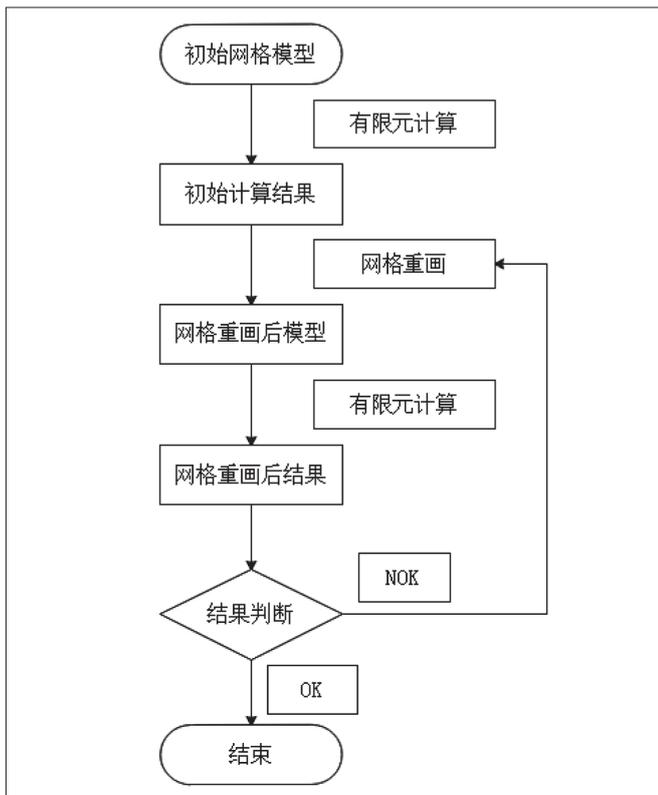


图1 已知橡胶材料参数的分析策略

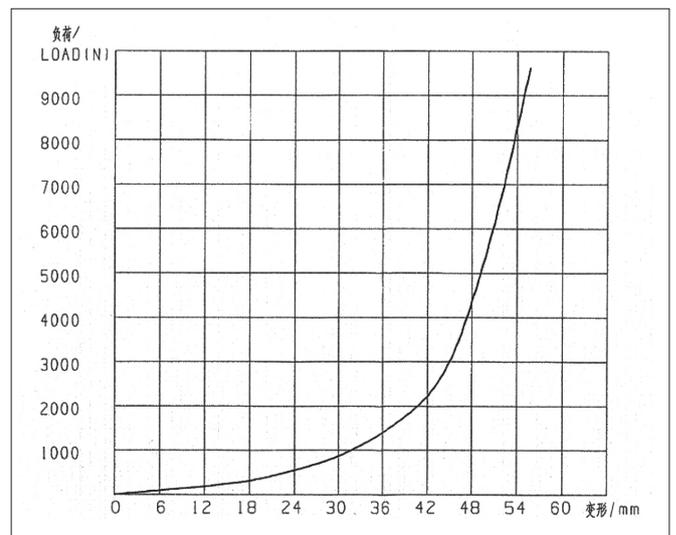


图3 某车型前悬麦弗逊悬架缓冲块刚度曲线

可压缩材料专用单元) 23850个^[5]，其中C3D8H单元20960个、C3D6H单元2890个，五面体单元C3D6H在所有实体单元中约占12%。模型中包含壳体单元11347个，均以刚体单元R3D3和R3D4模拟。初始设定橡胶材料参数 C_{01} 为0.22、 C_{10} 为0.75。

分析工况介绍：完全按照实际零件刚度试验定义分析工况，建立刚体部件1同橡胶缓冲块之间的接触、橡胶缓冲块同其本身之间的接触、橡胶缓冲块部件同刚体部件2之间的接触。设定刚体部件1强制位移为42mm，并约束刚体部件2。

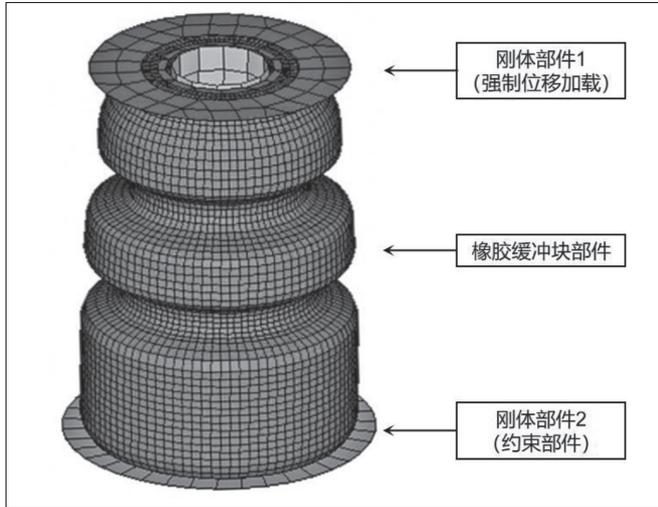


图4 某车型前悬麦弗逊悬架缓冲块有限元模型

使用橡胶材料参数 C_{01} 为 0.22 和 C_{10} 为 0.75 时, 分析结果获得的力和位移曲线如表 1 所示。由结果可知, 使用初始的材料参数所获得的力和位移曲线不能满足设计曲线要求。

3.2 基于响应面的材料参数反求

由上述分析可知, 在初始设定的材料参数下, 零件仿真真实的刚度曲线与设计刚度曲线有较大差距, 需要对材料参数进行调整。利用响应面的方法设定 C_{01} 、 C_{10} 为变量, C_{01} 变化范围 0 ~ 0.35、 C_{10} 变化范围为 0.6 ~ 1.3; 设定强制位移 6mm、12mm、18mm、24mm、30mm、36mm、42mm 为约束; 设定各约束位移时的力值为优化目标。

迭代后 C_{01} 变化收敛于 0.1998, C_{10} 变化收敛于 0.6470, 如表 2 所示, 优化目标响应的力值迭代结果如表 3 所示。

以上数据分析得出的 C_{10} 变化收敛于 0.6470, C_{01} 变化收敛于 0.1998 将被用于下文的基于网格重画的橡胶零件性能分析。

3.3 基于网格重画的零件性能分析

延续参数反求的分析内容, 在对仿真模型进行加载到 42mm 时, 鉴于橡胶材料的大变形特性^[6], 在分析过程中很容易遇到网格极度扭曲而导致分析不收敛的情况, 如图 7 所示; 变形位移结果如图 9 所示。为了解决因网格极度扭曲而导致的收敛性问题, abaqus 软件提供了对已变形网格进行重新划分的方法, 重画以后的网格如图 8 所示; 对重新划分网格后的模型进行继续的位移加载, 最后变形结果如图 10 所示。加载 42mm 和加载 54mm 的变形截面如图 11 和图 12 所示。

经过网格重画后的两段位移-力曲线如图 13 所示。在网格重画后继续加载时, 初始区段刚度曲线吻合较好, 但在加载至 46mm 时, 同样由于网格产生畸变会使刚度“减弱”, 一般需要对模型进行多次网格重画才

表 1 力和位移曲线 (C_{10} 为 0.22、 C_{01} 为 0.75)

位移 /mm	设计曲线对应载荷 /N	仿真曲线对应载荷 /N
0.0	0.0	0.0
6.0	84.0	28.5
12.0	190.7	117.3
18.0	295.2	150.8
24.0	541.7	342.3
30.0	888.6	510.7
36.0	1400.7	812.7
42.0	2253.5	1532.4

表 2 材料常数 C_{01} 及 C_{10} 迭代历程

迭代历程	C_{01}	C_{10}
1	0.2200	0.7500
2	0.2200	0.8737
3	0.2563	0.7500
4	0.1968	0.6375
5	0.1998	0.6471
6	0.1984	0.6503
7	0.1998	0.6470

表 3 优化目标力值的迭代历程

迭代历程	位移 6mm 力值	位移 12mm 力值	位移 18mm 力值	位移 24mm 力值	位移 30mm 力值	位移 36mm 力值	位移 42mm 力值
1	28.5	117.3	150.8	342.3	510.7	812.7	1532.4
2	17.2	80.4	105.2	230.4	489.5	785.4	1246.4
3	47.1	126.6	185.3	350.2	620.4	1029.0	1645.9
4	77.1	172.7	268.2	491.8	807.2	1272.7	2045.5
5	77.8	174.3	270.6	496.3	814.7	1284.4	2064.2
6	78.5	175.9	273.1	500.8	822.2	1296.2	2083.2
7	85.6	191.7	297.7	545.9	896.1	1412.8	2270.6
目标	84.0	190.7	295.7	541.7	888.6	1400.7	2253.5

能获得比较理想的结果。最后经过一次重画后的位移-力曲线精度可满足工程设计要求。

4 结语

(1) 通过优化思想的参数反求策略可以在橡胶零件设计初期对橡胶零件的特性参数进行初步确定, 以便于产品工程师对橡胶材料进行成分配比优化。

(2) 通过网格重画技术可以较为圆满解决在大变形网格畸变严重条件下橡胶零件分析不收敛的问题。

(3) 两种方法结合起来, 在工程中应用实属首次, 效果也比较理想, 可以在设计初期对产品进行性能评价和优化。

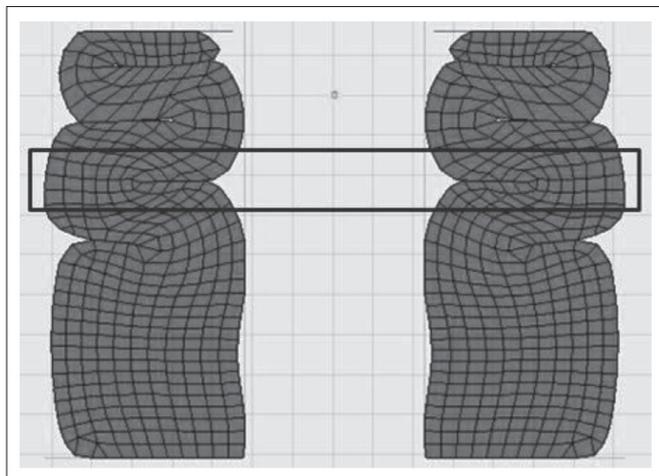


图7 橡胶大变形造成网格极度扭曲

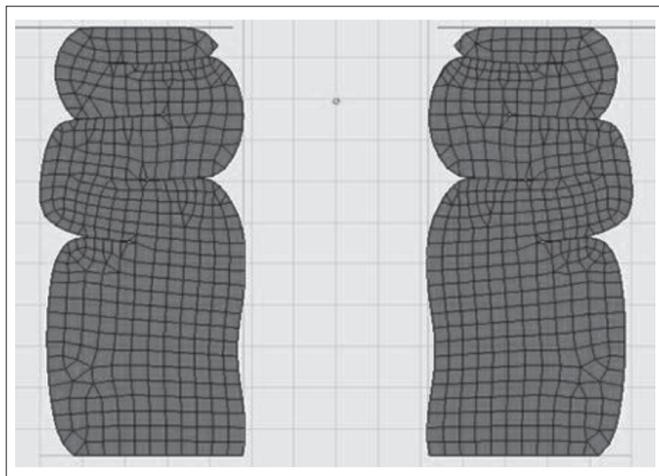


图8 变形橡胶网格重新划分

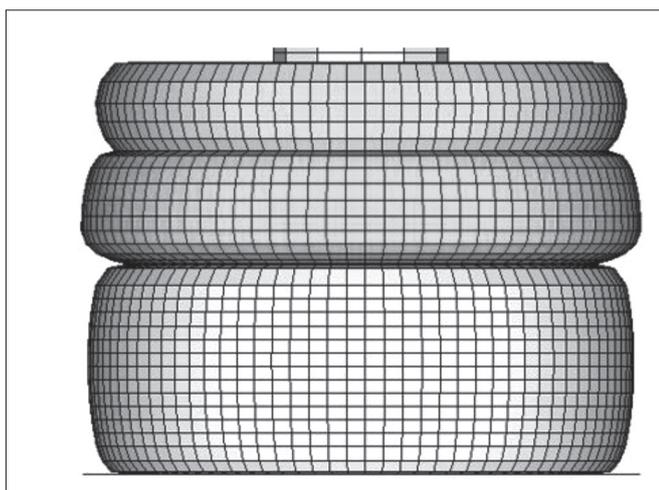


图9 过程位移变形结果

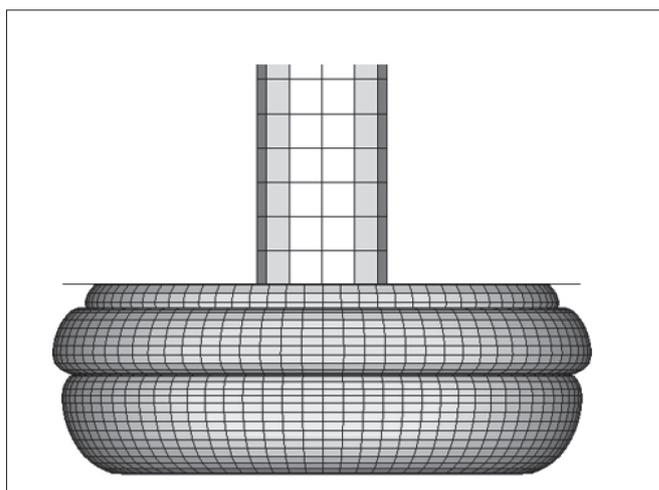


图10 最终位移变形结果

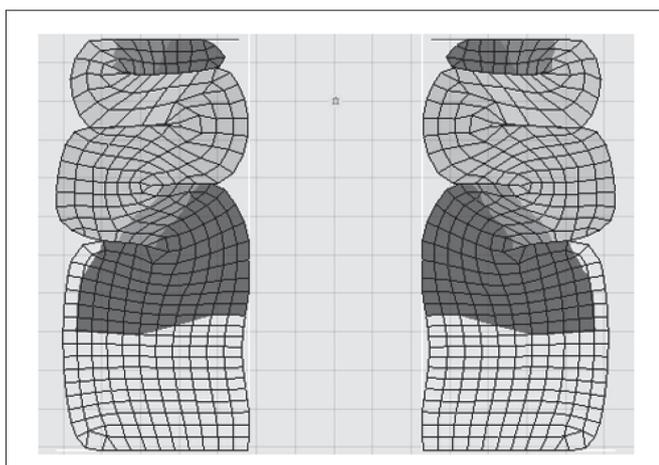


图11 加载42mm变形截面图

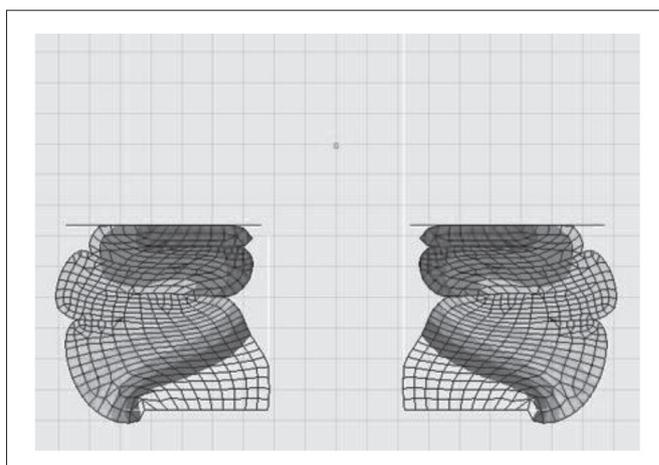


图12 加载54mm变形截面图

参考文献:

- [1] 王进文, 田玉坤, 王象民. 国内外汽车用橡胶制品技术进展[J]. 橡胶科技市场, 2007(14):1-5.
 [2] 户原春彦. 防振橡胶及其应用[M]. 北京: 中国铁道工业出版社, 1982.

- [3] 魏泳涛, 于建华. 橡胶有限元分析之研究[J]. 四川联合大学学报(工程科学版), 1997(5):78-84.
 [4] 郑明军, 王文静, 陈政南, 等. 橡胶 Mooney-Rivlin 模型力学性能常数的确定[J]. 橡胶工业, 2003(08):462-465.

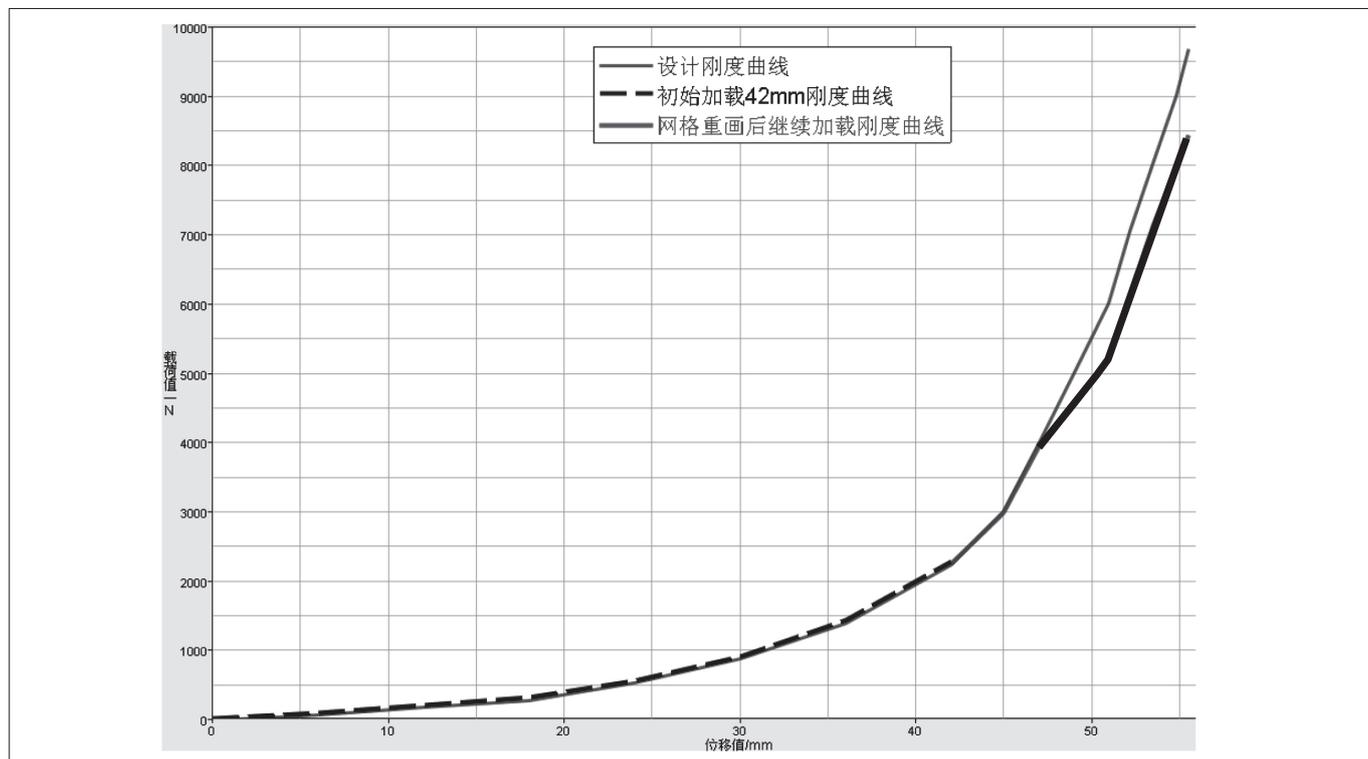


图 13 网格重画后的橡胶材料位移-力曲线

[5] 张军. 汽车用橡胶超弹性材料参数反求方法研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2011. 485.

[6] 王利荣, 吕振华. 橡胶隔振器有限元建模技术及静态弹性特性分析 [J]. 汽车工程, 2002(06): 480-485. **作者简介:** 韦流权 (1987.08-), 男, 壮族, 广西柳州人, 本科, 工程师, 研究方向: 产品定义集成。

广告征订



版位 Format	价格 Price (RMB)
特殊版位 Specified Ads. Position	
封面	25,000
封二	16,000
封三	12,000
封底	18,000
扉一	15,000
扉二	10,000
后扉一	12,000
后扉二	9,000

版位 Format	价格 Price (RMB)
正常版位 Editorial Page	
编辑页	10,000
编辑页跨页	15,000
1/2编辑页	5,000
1/3编辑页	3,500
1/4编辑页	2,500

注: 所有特殊版位广告均为4C广告, 正常版位广告均为黑白色; 所有广告需提供成熟设计稿, 如需编辑部制作需单独收费。

优惠说明:
 在原价格基础上, 连续预定3期, 优惠**8%**; 连续预定6期, 优惠**15%**; 连续预定12期, 优惠**20%**; 连续预定18期, 优惠**30%**; 连续预定36期, 优惠**40%**。另, 如提前一次性付款, 可在享受优惠的基础上享受**8%**的额外折扣。

广告预定热线: 010-6741 0664 / 1368 332 6370