

行人腿型冲击器肌肉材料参数反求

崔世海¹, 杨宇¹, 闫晓晓², 李海岩¹, 贺丽娟¹, 吕文乐¹

(1. 天津科技大学, 天津 300222; 2. 中国汽车技术研究中心有限公司, 天津 300300)

摘要: aPLI先行人腿型冲击器在碰撞测试中的生物仿真度, 在很大程度上取决于其几何结构及其模拟腿部肌肉的合成橡胶的超弹性力学特性。根据橡胶准静态单轴压缩试验数据, 分别对用于表述橡胶超弹性的Ogden和Mooney-Rivlin本构模型进行材料参数拟合, 得到相应的材料参数并将拟合曲线与试验曲线进行比较, 对比不同本构模型的拟合精度。结果表明, 2阶Ogden材料模型更符合试验结果。为提高有限元模型中肌肉橡胶材料参数的准确性, 重构压缩试验有限元模型, 以拟合得到的2阶Ogden本构模型材料参数为初始值, 通过将有限元与优化策略相结合, 基于自适应响应面法对2阶Ogden模型中 μ_1 、 α_1 、 μ_2 、 α_2 这4个材料参数进行优化, 获得该材料在准静态压缩状态下的一组最佳材料参数。

关键词: 行人保护; 行人腿型冲击器肌肉; 本构模型; 自适应响应面法; 参数反求

中图分类号: U467.1+4 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2024.03.13

Inverse Calculation of Muscle Material Parameters for the Pedestrian Legform Impactor

CUI Shihai¹, YANG Yu¹, YAN Xiaoxiao², LI Haiyan¹, HE Lijuan¹, LYU Wenle¹

(1. Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China;

2. China Automotive Technology and Research Center Co., Ltd., Tianjin 300300, China)

Abstract: The biological fidelity of the advanced Pedestrian Legform Impactor(aPLI) in crash testing largely depends on its geometric structure and the hyperelastic mechanical properties of synthetic rubber used to simulate leg muscle. Based on the quasi-static uniaxial compression test data of rubber, both Ogden and Mooney Rivlin constitutive models are fitted to characterize the hyperelastic behavior of rubber. Following this, the material parameters are obtained and fitting curves are compared with the experimental curves to assess the accuracy of different constitutive models. The results show that the outcomes of the second-order Ogden model better match the experimental data. To increase the accuracy of muscle rubber material parameters in the finite element model, a compression test finite element model is reconstructed. Taking the material parameters of the fitted second-order Ogden constitutive model as the initial values, an optimization of the material parameters, μ_1 , α_1 , μ_2 and α_2 in the model is performed using the adaptive response surface method combined with finite element analysis and optimization strategies. This yields a set of optimal material parameters for the material under quasi-static compression.

Keywords: pedestrian protection; muscle of pedestrian legform impactor; constitutive models; adaptive response surface method; parameter inversion

收稿日期: 2023-02-17 改稿日期: 2023-04-05 网络首发日期: 2024-03-28

参考文献引用格式:

崔世海, 杨宇, 闫晓晓, 等. 行人腿型冲击器肌肉材料参数反求[J]. 汽车工程学报, 2024, 14(3): 463-469.

CUI Shihai, YANG Yu, YAN Xiaoxiao, et al. Inverse Calculation of Muscle Material Parameters for the Pedestrian Legform Impactor

[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2024, 14(3): 463-469. (in Chinese)



aPLI腿型冲击器是最新的行人保护碰撞测试工具,用于评估汽车前端部与行人碰撞时对行人膝盖、小腿和大腿造成的损伤。aPLI腿型改进了Flex-PLI腿型的局限性,以增强运动学响应和生物仿真度^[1-5]。2021版C-NCAP修改了行人保护试验及评价方法并用于2022年正式实施的行人保护测试,采用aPLI先进行人腿型替代传统Flex-PLI腿型和TRL上腿型进行行人腿部碰撞保护评价^[6]。从2023年起,Euro NCAP将正式使用aPLI腿型用于行人保护测试^[7]。韩国K-NCAP和日本J-NCAP也分别在2023年和2024年正式使用aPLI腿型进行行人保护腿部测试。

aPLI腿型较Flex-PLI腿型生物仿真度有较大提高,更接近人体有限元模型^[8]。在行人保护碰撞测试中aPLI腿型各项损伤指标较Flex-PLI有较大提高,在NCAP评价测试得分难度较大,为了更好地开发车辆前端行人保护结构,侯松等^[9]、陈琳等^[10]、侯延军等^[11]将aPLI腿型和Flex-PLI腿型进行参数对比,分析aPLI的特征和损伤机理。其中,陈琳等^[10]、侯延军等^[11]将aPLI腿型和Flex-PLI腿型碰撞结果进行对比研究,为新车型行人保护开发提供应对策略。袁堂军等^[12]、谭冰花等^[13]、徐福慧等^[14]基于aPLI腿型对车辆前端结构设计进行优化,为后续其他车型的设计及优化提供参考。

aPLI腿型由皮肤、肌肉、大腿、小腿、膝部、上体模块组成。其中,上体模块、大腿、小腿和膝部外部由合成橡胶材质的肌肉包裹,肌肉材料由肖氏硬度为45的合成橡胶制成。在碰撞测试过程中,aPLI腿型冲击器肌肉起到缓冲的作用,其材料特性是影响aPLI运动学响应和生物仿真度的重要因素。SUZUKI等^[15]通过准静态单轴拉伸和压缩试验测得用于Flex-PLI-GTR肖氏硬度为45的合成橡胶肌肉的应力-应变曲线,并在LS-DYNA软件中使用77-MAT_OGDEN_RUBBER材料模型进行模拟。

目前,国内对于aPLI腿型的研究多是关于生物仿真度及基于aPLI腿型汽车前端结构设计优化方面。针对aPLI腿型冲击器有限元模型开发、材料生物仿真度等研究较少。由于未公开腿型冲击器肌肉合成橡胶材料的具体材料参数,仿真模型中肌肉材料参数难以确定。对aPLI腿型冲击器肌肉材料参数

进行研究有助于提高仿真结果的准确性,以预测汽车与行人碰撞事故中行人下肢的潜在损伤。本文对肖氏硬度为45的aPLI肌肉合成橡胶材料进行准静态单轴压缩试验,通过将有限元与优化策略相结合的方法反求aPLI肌肉材料在准静态压缩状态下的最优材料参数。

1 本构模型及材料参数拟合

aPLI腿型冲击器肌肉由橡胶材料制成,橡胶在弹性行为上是各向同性,几乎不可被压缩。橡胶的弹性性质可以用基于应变不变量 I_1, I_2, I_3 的应变能函数来解释,这些不变量是伸长比 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 的函数,在式(1)~(3)中具有以下关系。

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2。 \quad (1)$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2。 \quad (2)$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2。 \quad (3)$$

式中: $\lambda_i = \frac{l_i}{L_i} = 1 + \varepsilon_i, i \in [1, 2, 3]$; λ_i 为伸长比, l_i 为变形后长度; L_i 为未变形状态下的长度; ε_i 为应变。

当材料不可压缩时,第3个不变量为1,因此,式(1)~(3)可以进一步简化为式(4)~(6)。当荷载仅在一个方向上施加时,在单轴荷载的情况下,第2拉伸比 λ_2 等于第3拉伸比 λ_3 。因此,不变量可以表示为仅两个伸长比的函数,式(7)为 λ_1 和 λ_2 的关系。

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + 1/\lambda_1^2 \lambda_2^2。 \quad (4)$$

$$I_2 = 1/\lambda_1^2 + 1/\lambda_2^2 + \lambda_1^2 \lambda_2^2。 \quad (5)$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 = 1。 \quad (6)$$

$$\lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_1^{1/2}。 \quad (7)$$

在LS-DYNA软件中,常用于描述橡胶超弹性的本构模型有Ogden模型和Mooney-Rivling模型等。

1.1 Mooney-Rivlin模型

Mooney-Rivlin材料模型,应变能密度函数为^[16-17]:

$$W = \sum_{i,j=0}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (I_{e1} - 1)^{2i}。 \quad (8)$$

式中: W 为应变能密度函数; I_1 和 I_2 为材料变形的度量; C_{ij} 描述了材料的剪切行为; D_i 介绍了材料的

不可压缩性； I_{e1} 为弹性体积应变，由于橡胶材料的不可压缩性， $I_{e1} = 1$ 。

式 (8) 中 $N=1$ 时得到 Mooney-Rivlin 材料模型，应变能密度函数为：

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3)。 \quad (9)$$

式中： C_{10} 和 C_{01} 为材料参数； I_1 和 I_2 为柯西-格林形变张量第 1 和第 2 不变量。

$N=1$ 时 Mooney-Rivlin 模型压缩时工程应力与伸长比之间的关系为：

$$\sigma = \frac{\partial w}{\partial \lambda_1} = \frac{\partial w}{\partial I_1} \frac{\partial I_1}{\partial \lambda_1} + \frac{\partial w}{\partial I_2} \frac{\partial I_2}{\partial \lambda_1}。 \quad (10)$$

$$\sigma = 2C_{10}(\lambda_1 - \lambda_1^{-2}) + 2C_{01}(1 - \lambda_1^{-3})。 \quad (11)$$

1.2 Ogden 材料模型

Ogden 材料模型结合了超弹性材料模型^[18-19]，该模型认为材料是完全不可压缩的，应变能函数表示为：

$$W = \sum_p^N \frac{\mu_p}{a_p} (\lambda_1^{a_p} + \lambda_2^{a_p} + \lambda_3^{a_p} - 3) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (I_{e1} - 1)^{2i}。 \quad (12)$$

式中： λ_1 、 λ_2 、 λ_3 为伸长比； N 为 Ogden 模型的阶数； μ_p 和 a_p 分别为 p 级剪切模量和指数； I_{e1} 为弹性体积应变，由于橡胶材料的不可压缩性， $I_{e1} = 1$ 。

其中， $\lambda_i = \frac{l_i}{L_i} = 1 + \varepsilon_i$ ， $i \in [1, 2, 3]$ ； λ_i 为伸长比； l_i 为变形后长度； L_i 为未变形状态下的长度。

单轴压缩试验中，设 λ_1 为压缩方向上的伸长比。考虑到不可压缩性的约束，其他两个主应变为 $\lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_1^{1/2}$ ； $\lambda_1 = \lambda$ 。 N 阶 Ogden 模型应变能函数为：

$$W(\lambda) = \sum_p^N \frac{\mu_p}{a_p} (\lambda_1^{a_p} + 2 \cdot \lambda_1^{\frac{1}{2}a_p} - 3)。 \quad (13)$$

N 阶 Ogden 模型压缩时工程应力与拉伸比之间的关系为：

$$\sigma = \frac{\partial w}{\partial \lambda_1} = \sum_p^N \mu_p (\lambda_1^{a_p-1} - \lambda_1^{-\frac{1}{2}a_p+1})。 \quad (14)$$

1.3 材料参数拟合

根据肖氏硬度为 45 的合成橡胶准静态单轴压缩试验数据，选取 Mooney-Rivlin、1 阶 Ogden 和 2 阶 Ogden 本构模型表征肖氏硬度为 45 的 aPLI 腿型冲击器合成橡胶肌肉材料的力学性能。表 1 给出了单轴压缩中每个超弹性模型的函数形式。使用 Matlab 软件对这两种橡胶超弹性本构模型进行了参数拟合。使用平均绝对误差 (MAE) 来评估超弹性模型拟合的精度，MAE 的表达式为：

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_i^N |\sigma_{fit, i} - \sigma_{test, i}|。 \quad (15)$$

式中：在应力-应变曲线上使用插值函数选择 30 个测试点数作为评估两条曲线平均绝对误差的数据， $N=30$ ； $\sigma_{fit, i}$ 为拟合曲线第 i 个测试点应力； $\sigma_{test, i}$ 为试验曲线第 i 个测试点应力。

表 2 为 Mooney-Rivlin、1 阶和 2 阶 Ogden 超弹性本构模型的拟合参数，以及拟合曲线与试验曲线的平均绝对误差。不同超弹性模型的拟合曲线应力-应变关系如图 1 所示。

表 1 单轴压缩超弹性模型的函数形式

模型	工程应力 (engineering stress) - 伸长比 (stretch)
Mooney-Rivlin	$\sigma = 2C_{10}(\lambda_1 - \lambda_1^{-2}) + 2C_{01}(1 - \lambda_1^{-3})$
1 阶 Ogden	$\sigma = \mu_1 \left(\lambda_1^{a_1-1} - \lambda_1^{\frac{1}{2}a_1+1} \right)$
2 阶 Ogden	$\sigma = \mu_1 \left(\lambda_1^{a_1-1} - \lambda_1^{\frac{1}{2}a_1+1} \right) + \mu_2 \left(\lambda_1^{a_2-1} - \lambda_1^{\frac{1}{2}a_2+1} \right)$

表 2 超弹性模型参数与拟合优度

模型	材料参数						拟合优度
	C_{10}	C_{01}	μ_1	a_1	μ_2	a_2	
Mooney-Rivlin	1.507 0	-0.275 0					0.182 5
1 阶 Ogden			3.182 0	1.267 0			0.223 7
2 阶 Ogden			53.465 0	0.077 9	0.010 8	-6.703 5	0.157 1

为评价不同超弹性模型在仿真肌肉力学性能的准确度，通过计算模型预测和试验应力响应之间的

MAE 来评估不同弹性模型的拟合优度，结果表明，2 阶 Ogden 模型提供了数据的最佳拟合，具有最低

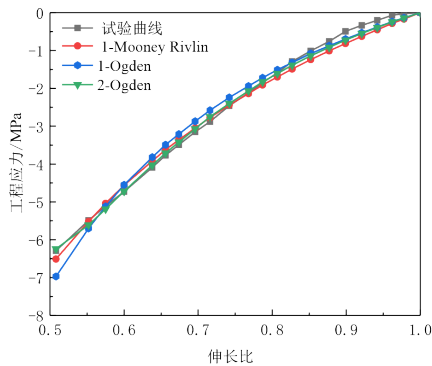


图1 拟合曲线应力-应变图

的 MAE 值。因此，选择 2 阶 Ogden 超弹性材料本构模型模拟 aPLI 肌肉仿生材料。

2 材料参数优化

通过曲线拟合得到的初始材料参数只是代表在数值层面上与试验曲线拟合最佳，并不能说明其在力学特性上具有相同的表现。为获得 aPLI 腿型橡胶材料在准静态压缩条件下较精确的材料参数，参考肖氏硬度为 45 的合成橡胶压缩试验，建立了橡胶准静态单轴压缩仿真有限元模型，通过 Hyperstudy 优化软件和 LS-DYNA 仿真软件相结合，基于自适应响应面法对 2 阶 Ogden 材料模型的 4 个参数 ($\mu_1, \alpha_1, \mu_2, \alpha_2$) 进行优化，优化目标为试验曲线和仿真曲线的差异最小。

2.1 有限元模型构建

依据国际标准 ISO 7743: 2017(E) [20] 中橡胶单轴压缩试验的相关规定重构了准静态单轴压缩仿真有限元模型。在 Hypermesh 软件中建立有限元模型，压缩试样直径为 29 mm，高度为 12.5 mm，采用最小单元长度为 0.8 mm 的六面体单元对试样进行划分，共计 2 760 个单元，2 405 个节点，材料采用 77 号材料 (*MAT_OGDEN_RUBBER)，为了避免沙漏选用全积分单元。上压板和底板采用刚性墙，底板固定，上压板以 10 mm/min 的速度对橡胶进行压缩。上压板和底板与橡胶的接触摩擦因数设置为 0.1。为了方便后续对材料参数的优化研究，将输出的接触力与时间历程换算为工程应力与工程应变。

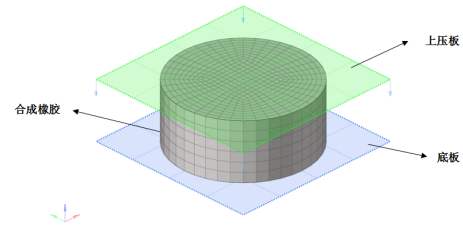


图2 橡胶压缩试验有限元模型

2.2 优化方法

材料参数的反求实际上可归结为优化问题，即仿真结果与试验数据之间的误差函数值最小 [21]。工程中的优化问题通常表示为：

$$\begin{aligned} \min f(x) &= f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n), \\ \text{s.t. } g_j(x) &\leq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, m), \\ x_i^l &\leq x_i \leq x_i^u \quad (i = 1, 2, \dots, m). \end{aligned} \quad (16)$$

式中： $f(x)$ 为目标函数； $g_j(x)$ 为自变量 x_i (设计变量) 的函数。

本研究采用自适应响应面法 (ARSM) 进行优化，目标函数和约束函数采用如式 (17) 所示的二阶多项式表示。

$$g_i(x) \approx \hat{g}_i(x) = a_{j_0} + \sum_l^n a_{n_l} X_l + \sum_l^n \sum_l^n a_{m_l} X_l X_k \quad (j = 1, \dots, m + 1). \quad (17)$$

式中： m 为约束的个数； n 为设计变量的个数； $a_{j_0}, a_{n_l}, a_{m_l}$ 为二次多项式的系数。

ARSM 通过分析初始设计点以及由扰动设计变量生成的 n 个新的设计点 (共计 $n+1$)，使用最小二乘法确定目标函数和各个约束函数的多项式系数，如果已求解的设计点数为 $n+1$ ，确定常数项和一次项系数 a_{j_0}, a_{j_l} 建立线性响应面 RS1，每产生 n 个设计点，可增加二次项系数 $a_{j_{kl}}$ ，如果已求解的设计点个数 $1+n+(n+1) \times n/2$ ，则对设计点进行加权来确定系数 $a_{j_{kl}}$ 以给出二阶响应面 RS2, RS3, RS4...；用数学规划法 (SQP) 对基于响应面的问题进行优化求解，自动选取最优方法；对模型近似最优点进行分析；如果优化迭代已收敛，则停止求解。反求流程如图 3 所示。

将橡胶压缩试验仿真有限元模型输出的应力-应变曲线校准到试验数据。使用方程式中所示的均方根误差 (RMSE) 作为目标函数，如式 (18) 所示，将 4 个材料参数 ($\mu_1, \alpha_1, \mu_2, \alpha_2$) 作为输入变

量，每个材料参数的初始值由 1.3 节中描述的简单曲线拟合确定，优化区间上下值为各个参数的 ±20%，见表 3。

$$f(x)_{\text{erro}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\sigma_{\text{sim}, i} - \sigma_{\text{test}, i})^2} \quad (18)$$

式中：在应力-应变曲线上选择 30 个测试点数作为评估两条曲线均方根误差的数据， $N=30$ ； $\sigma_{\text{sim}, i}$ 为仿真曲线第 i 个测试点应力； $\sigma_{\text{test}, i}$ 为试验曲线第 i 个测试点应力。

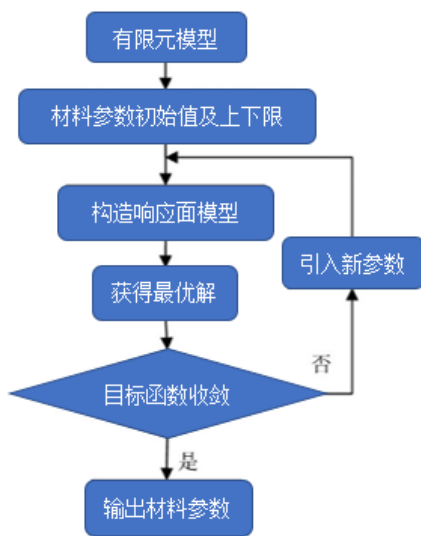


图 3 材料参数反求流程

表 3 参数取值范围

参数	初始值 (曲线拟合)	取值范围
μ_1/MPa	53.465 0	42.772 0~64.158 0
α_1	0.077 9	0.062 3~0.093 5
μ_2/MPa	0.010 8	0.008 6~0.013 0
α_2	-6.703 5	-8.044 2~-5.362 8

3 优化结果

使用 HyperStudy 优化软件，LS-DYNA 仿真软件，通过有限元结合优化的方法，基于自适应响应面法，得到优化后的材料参数见表 4。目标函数迭代历程如图 4 所示，目标函数经过 21 次迭代后收敛。由于通过曲线拟合得到的 2 阶 Ogden 超弹性材料本构模型初始材料参数能较好地代表肌肉橡胶材料的力学性能，且 $\mu_1, \alpha_1, \mu_2, \alpha_2$ 取值范围变化较

小，因此，代表初始材料参数的优化前仿真曲线与试验曲线相差较小，初始目标函数 RMSE 值为 0.185，经过 21 次迭代后，最终目标函数收敛值为 0.120，收敛后的目标函数值与初始目标函数值尽管相差较小，但优化后的仿真曲线极大地逼近了试验曲线，表明了反求得到的材料参数具有更高的生物仿真度。

优化前后应力-应变曲线与试验应力-应变曲线的对比如图 5 所示。图中，试验曲线按照 ISO 发布的 ISO 7743: 2007 (E) 国际标准对肌肉橡胶进行准静态单轴压缩试验获取。优化前仿真曲线的材料参数通过曲线拟合得到；优化后的仿真曲线材料参数通过有限元与优化结合，基于自适应响应面法获得。 $\mu_1, \alpha_1, \mu_2, \alpha_2$ 经过 21 次迭代后收敛，均稳定于非上下边界处，优化后的材料参数准确可靠。优化前后的仿真曲线与试验曲线的 RMSE 由 0.185 减少到 0.120，优化后的仿真曲线相较于优化前的仿真曲线更接近试验曲线，与试验曲线基本吻合。结果表明，通过参数反求方法得到 aPLI 腿型肌肉橡胶材料参数，相较于通过曲线拟合得到的材料参数，可以更好地反映 aPLI 腿型肌肉橡胶材料在准静态压缩状态下的力学特性。

表 4 参数反求初始值、取值范围和优化结果

参数	初始值 (曲线拟合)	取值范围	优化结果
μ_1/MPa	53.465 0	42.772 0~64.158 0	51.748 0
α_1	0.077 9	0.062 3~0.093 5	0.081 7
μ_2/MPa	0.010 8	0.008 6~0.013 0	0.011 1
α_2	-6.703 5	-8.044 2~-5.362 8	-6.543 6

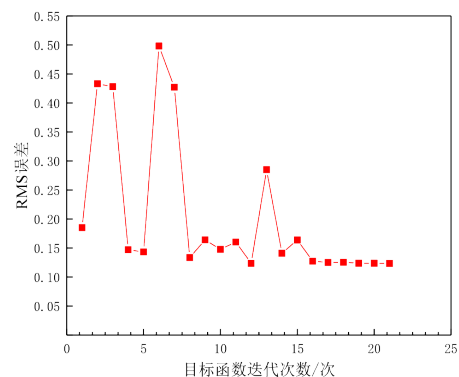


图 4 参数反求目标函数迭代历程

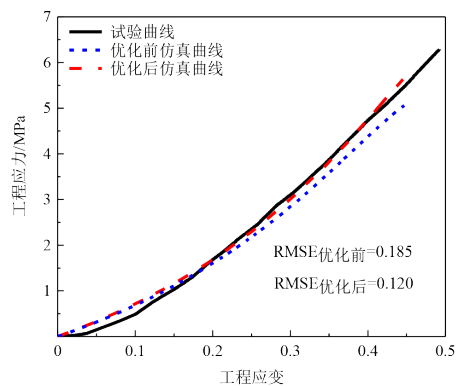


图5 优化前后仿真结果与试验结果对比

4 讨论

由于缺乏中高应变率试验数据,目前的研究尚停留在试件受准静态压缩变形的情况。而实际的情况通常是动态连续加载并伴有大变型,因此,通过曲线拟合和优化后得到的参数不足以全面描述 aPLI 肌肉仿生材料的真实力学性能。没有对这种材料进行剪切和拉伸试验,所以无法在这些类型的载荷下对模型进行评估。然而, aPLI 腿型冲击器碰撞期间, aPLI 肌肉仿生材料的一般加载模式为压缩,因此,对于许多冲击场景,可能不需要描述材料的剪切和拉伸行为。

参考文献 (References)

- [1] ISSHIKI T, KONOSU A, TAKAHASHI Y. Development of an Appropriate Pedestrian Legform Impact Test Method Which Can be Used for All Types of Vehicles Including High Bumper Vehicles: Development of a Simplified Upper Body Part (SUBP) FE Model [C]//Proceedings of International Research Council on Biomechanics of Injury (IRCOBI) Conference, Sept. 10–12, 2014, Berlin, Germany. Zurich: IRCOBI, c2014: 759–784.
- [2] ISSHIKI T, KONOSU A, TAKAHASHI Y. Development and Evaluation of the Advanced Pedestrian Legform Impactor Prototype Which Can be Applicable to All Types of Vehicles Regardless of Bumper Height—Part 1: Finite Element Model [C]//Proceedings of International Research Council on Biomechanics of Injury (IRCOBI) Conference, Sept. 14–16, 2016, Malaga, Spain. Zurich: IRCOBI, c2016: 770–785.
- [3] ISSHIKI T, KONOSU A, TAKAHASHI Y. Development and Evaluation of the Advanced Pedestrian Legform Impactor Prototype Which Can be Applicable to All Types of Vehicles Regardless of Bumper Height—Part 2: Actual Test Tool [C]//Proceedings of International Research Council on Biomechanics of Injury (IRCOBI) Conference, Sept. 14–16, Malaga, Spain. Zurich: IRCOBI, c2016: 786–799.
- [4] ISSHIKI T, ANTONA-MAKOSHI J, KONOSU A, et al. Consolidated Technical Specifications for the Advanced Pedestrian Legform Impactor (aPLI) [C]//Proceedings of International Research Council on Biomechanics of Injury (IRCOBI) Conference, Sept. 12–14, Athens, Greece. Zurich: IRCOBI, c2018: 284–301.
- [5] KONOSU A, ISSHIKI T, ANTONA-MAKOSHI J, et al. Biofidelity Improvement of Advanced Pedestrian Legform Impactor in Rebound Phase [C]//Proceedings of International Research Council on Biomechanics of Injury (IRCOBI) Conference. Zurich: IRCOBI, c2020: 624–646.
- [6] C-NCAP管理中心. C-NCAP管理规则(2021版)[Z]. 天

5 结论

本文采用 1 阶 Ogden、2 阶 Ogden 和 Mooney-Rivlin 材料模型模拟 aPLI 腿型冲击器肌肉橡胶材料,根据压缩试验数据拟合得出橡胶材料参数初始值,对比拟合曲线与试验曲线,发现 2 阶 Ogden 模型能较好地模拟该橡胶在准静态压缩状态下的应力-应变响应。2 阶 Ogden 模型拟合参数: $\mu_1 = 53.465 0$, $\alpha_1 = 0.077 9$, $\mu_2 = 0.010 8$, $\alpha_2 = -6.703 5$ 。选择 2 阶 Ogden 材料模型模拟 aPLI 腿型冲击器肌肉合成橡胶材料,通过有限元结合优化策略的方法进一步优化其材料参数,得到一组优化后的材料参数: $\mu_1 = 51.748 0$, $\alpha_1 = 0.081 7$, $\mu_2 = 0.011 1$, $\alpha_2 = -6.543 6$,该反求参数可以较好地拟合试验曲线,并用于肖氏硬度为 45 的 aPLI 腿部冲击器肌肉的有限元模型中。

本文采用的 aPLI 腿型肌肉橡胶材料参数反求方法能有效提高计算效率,降低计算成本。在仿真中采用该方法得到的肌肉橡胶材料参数能较好地反映该材料在准静态单轴压缩条件下的力学特性。同时, aPLI 腿型其他关键零部件的材料参数也可以通过类似的方法进行反求获得,为获取其他部件的材料参数提供了新思路。

- 津:中国汽车技术研究中心有限公司,2020.
C-NCAP Management Center. C-NCAP Management Regulation(2021 Edition)[Z].Tianjin:China Automotive Technology and Research Center Co., Ltd., 2020. (in Chinese)
- [7] Euro NCAP Commission.European New Car Assessment Program:Pedestrain Test Protocol v11.2[EB/OL].[2023-03-23].<https://cdn.euroncap.com/media/70316/euro-ncap-assessment-protocol-vru-v11.2.pdf>.
- [8] 龙永程,郝海舟,李凡,等.行人安全测试现行腿型冲击器的生物仿真度[J].汽车安全与节能学报,2021,12(4):475-482.
LONG Yongcheng, HAO Haizhou, LI Fan, et al. Biofidelity of Current Legform Impactor in Pedestrian Safety Test [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2021, 12(4):475-482. (in Chinese)
- [9] 侯松,罗昆,谢斌,等.某车型aPLI腿型碰撞性能提升的研究[J].汽车工程,2020,42(11):1558-1565.
HOU Song, LUO Kun, XIE Bin, et al. Study on the Enhancement of the Crash Performance of aPLI Legform in a Vehicle Model[J]. Automotive Engineering, 2020, 42(11):1558-1565. (in Chinese)
- [10] 陈琳,刘宏达,余承成,等.先进行人保护腿型aPLI应用与车辆开发应对[J].汽车科技,2021(3):8-13.
CHEN Lin, LIU Hongda, YU Chengcheng, et al. Application and Vehicle Development of Pedestrian Protection Advanced Pedestrian Legform Impactor(aPLI)[J]. Automobile Science & Technology, 2021(3):8-13. (in Chinese)
- [11] 侯延军,韩鹏鹏,卜家贺,等.基于行人保护开发的aPLI和柔性腿对比研究[J].时代汽车,2022(23):151-153.
HOU Yanjun, HAN Pengpeng, BU Jiahe, et al. Comparative Analysis of the aPLI and Flex-PLI Based on Pedestrian Protection[J]. Auto Time, 2022(23):151-153. (in Chinese)
- [12] 袁堂军,余小巧.基于aPLI行人腿型车辆前端结构设计及优化[J].汽车零部件,2022(6):34-39.
YUAN Tangjun, YU Xiaoqiao. Design and Optimization of Vehicle Front-End Structure Based on aPLI Pedestrian Leg[J]. Automobile Parts, 2022(6):34-39. (in Chinese)
- [13] 谭冰花,李博,王亚军,等.行人保护aPLI腿型吸能空间[J].计算机辅助工程,2022,31(2):39-43.
TAN Binghua, LI Bo, WANG Yajun, et al. aPLI Energy Absorption Spacebased on Pedestrian Protection[J]. Computer Aided Engineering, 2022, 31(2):39-43. (in Chinese)
- [14] 徐福慧,杨全凯,吴泽勋,等.基于某SUV车型行人保护aPLI腿型研究[J].环境技术,2021(S1):54-58.
XU Fuhui, YANG Quankai, WU Zexun, et al. Study on aPLI Legform of Pedestrian Protection Based on an SUV [J]. Environmental Technology, 2021(S1):54-58. (in Chinese)
- [15] SUZUKI S, ONO M, NATORI S, et al. Development of a Finite Element Model of the Flex-PLI-GTR [C]//SAE World Congress & Exhibition, April 6, 2012, Detroit, Michigan, USA. New York: SAE International, c2012:1-10.
- [16] MOONEY M. A Theory of Large Elastic Deformation[J]. Journal of Applied Physics, 1940, 11(9):582-592.
- [17] RIVLIN R S. Large Elastic Deformations of Isotropic Materials II. Some Uniqueness Theorems for Pure, Homogeneous Deformation [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1948, 240(822):491-508.
- [18] OGDEN R W. Non-Linear Elastic Deformations[M]. New York: Dover Publications, 1997.
- [19] OGDEN R W. Large Deformation Isotropic Elasticity: On the Correlation of Theory and Experiment for Incompressible Rubberlike Solids [J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1972, 326(1567):565-584.
- [20] ISO Technical Committees. Rubber, Vulcanized or Thermoplastic—Determination of Compression Stress-Strain Properties: ISO 7743: 2017 (E) [S]. Switzerland: International Organization for Standardization, 2017.
- [21] 洪清泉. OptiStruct & HyperStudy 理论基础与工程应用 [M]. 北京:机械工业出版社,2013.
HONG Qingquan. OptiStructure & HyperStudy Theoretical Basis and Engineering Application [M]. Beijing: China Machine Press, 2013. (in Chinese)

作者简介



崔世海(1977-),男,山东栖霞人,博士,教授,主要研究方向为汽车安全和损伤生物力学。

Tel: 022-60274034

E-mail: shihaicui@tust.edu.cn