



国防科技大学学报

Journal of National University of Defense Technology

ISSN 1001-2486, CN 43-1067/T

《国防科技大学学报》网络首发论文

题目：航天服软关节单历程阻力矩的数学模型
作者：董长林，周仕明，李道奎
收稿日期：2024-05-19
网络首发日期：2024-12-27
引用格式：董长林，周仕明，李道奎. 航天服软关节单历程阻力矩的数学模型[J/OL]. 国防科技大学学报. <https://link.cnki.net/urlid/43.1067.t.20241226.0841.002>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

航天服软关节单历程阻力矩的数学模型

董长林^{1,2}, 周仕明^{1,2}, 李道奎^{1,2*}

(1. 国防科技大学 空天科学学院, 湖南 长沙 410073;

2. 国防科技大学 空天任务智能规划与仿真湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073)

摘要: 针对航天服软关节单历程阻力矩的现有模型精度低、形状误差大等问题, 建立了一种改进的 B-W(Bouc-Wen)数学模型。通过分析航天服软关节单历程阻力矩迟滞曲线特性, 引入了 B-W 迟滞模型, 并改进以消除模型的冗余度和对称性, 用于对软关节单历程阻力矩的数学表征; 借鉴模拟退火算法中概率思想对多岛遗传算法中个体遗传进行操作, 实现对改进 B-W 模型的参数进行高精度、高效率地辨识。经过航天服不同软关节仿真和实验的验证, 改进后的 B-W 模型较现有 J-A(Jiles-Atherton)模型更适用于航天服软关节单历程阻力矩的数学表征, 其阻力矩方差较 J-A 模型降低 2 个数量级。结果表明, 该数学模型应用于航天服软关节单历程阻力矩具有较高的精度, 且对航天服不同软关节均具有较强的适用性。

关键词: 航天服; 单历程阻力矩; Bouc-Wen; 迟滞模型; 参数辨识

中图分类号: V45 文献标志码: A

Mathematical model for single-course resistance torque of spacesuit soft joints

DONG Changlin^{1,2}, ZHOU Shiming^{1,2}, LI Daokui^{1,2*}

(1. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Hunan Key Laboratory of Intelligent Planning and Simulation for Aerospace Missions, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Aiming at the problems of low accuracy and large shape error of existing models for single-course resistance torque of spacesuit soft joints, an improved B-W(Bouc-Wen) mathematical model was established. By analyzing the hysteresis curves characteristics of single-course resistance torque of spacesuit soft joints, the B-W hysteresis model was introduced and improved to eliminate the redundancy and symmetry of the model, which was used to characterize single-course resistance torque of soft joints mathematically. The individual genetic process of multi-island genetic algorithm was operated by using the probability thought of simulated annealing algorithm to identify the parameters of improved B-W model with high accuracy and efficiency. Based on the verification of experiments and simulations of different soft joints of spacesuit, the improved B-W model compared with the J-A(Jiles-Atherton) model is more suitable for the mathematical characterization of single-course resistance torque of spacesuit soft joints. The variance of resistance torque of improved B-W model is two orders of magnitude lower than that of J-A model. It shows that the mathematical model has high accuracy when applied to single-course resistance torque of spacesuit soft joints, and has strong applicability to different soft joints of spacesuit.

Keywords: spacesuit; single-course resistance torque; Bouc-Wen; hysteresis model; parameter identification

舱外航天服是为航天员在舱外作业时提供个人防护的作业装备^[1]。为保障航天员生存所需气体环境, 航天服内部需要充气, 而航天服充气后运动会产生变形效应、压力效应和体积效应等现象^[2], 在人体运动过程中产生阻碍作用, 使关节产

生阻力矩, 从而对航天员的运动能力产生直接影响^[3]。航天服软关节为保障关节运动的灵活性^[4], 其阻力矩水平作为舱外运动能力的重要评估因素^[5-6], 且单历程阻力矩作为复杂运动历程阻力矩的研究基础^[7], 因此, 航天服软关节单历程阻力矩数

收稿日期: 2024-05-19

基金项目: 湖南省研究生教育创新工程和专业能力提升工程资助项目 (CX20200083)

第一作者: 董长林 (1998—), 男, 吉林吉林人, 博士研究生, E-mail: dcl15651075186nudt@163.com

* 通信作者: 李道奎 (1971—), 男, 湖北随州人, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: lidaokui@nudt.edu.cn

学模型的建立对分析阻力矩特性具有重要意义。

航天服软关节阻力矩随单历程运动（关节从初始状态弯曲至指定角度后，伸展至初始状态）关节转角变化呈现迟滞特性^[7]；而航天服作业过程中关节阻力矩大小不仅与当前关节运动状态相关，且与关节运动历程相关^[8]，即呈现历程相关性。所以，实现对航天服各关节阻力矩的准确计算十分困难。Schmidt^[7]率先将唯象学模型引入航天服领域，基于Preisach模型特性，将单历程阻力矩分解用于其离散化表征，进行了复杂历程下的软关节阻力矩预测。此后，为了提高Preisach模型的预测精度，学者们不断进行改进和优化。王晓东等^[8]通过RFB径向基网络优化Preisach模型，提出了一种NNOPM模型用于阻力矩预测，虽然预测结果较好，但所需样本数量较大且额外增加了网络的训练时长。刘文樵等^[9]将一种唯象学模型的内插方法^[10]应用于Preisach模型，开展了航天服关节阻力矩的预测工作，由于采用线性插值方法，仍需要大量样本对模型平面进行表征。Li等^[11]利用Preisach模型开展关节阻力矩的计算，并结合RFB神经网络实现外骨骼机器人对关节阻力矩的补偿。虽然Preisach模型能够对关节复杂运动历程阻力矩进行高精度预测，但Preisach模型是一种唯象学模型，难以从模型中直接提取出物理模型，完全基于数学处理对迟滞曲线描述；且该模型需要大量数据和训练时间^[12]，模型才能具有较高的精度，否则模型积分平面表征不精确，导致模型预测精度受限。

上述考虑历程的阻力矩预测方法，需要单历程阻力矩对模型积分平面进行精确表征，才能进行高精度预测，因此，学者尝试开展应用于单历程阻力矩方法或模型的研究：王昊等^[13-14]、赵京东等^[15-16]分别开展了航天服软关节实验，并采用spline曲线对加载卸载过程阻力矩进行拟合，但未提出新的数学模型。张新军等^[17]、李照阳等^[18-19]则尝试采用J-A模型对航天服单历程阻力矩进行拟合，但该模型属于电磁学领域模型，受限于模型本身的对称性，与实验曲线存在误差。电、磁学等领域模型虽能够体现阻力矩的迟滞特性，但往往具有对称性。而航天服软关节阻力矩在加卸载过程中往往具有非对称性，需要消除模型对称性才能得到应用，因此在工程应用方面存在局限性。目前，针对航天服软关节单历程阻力矩高精度数学模型的开发存在空缺。

为此，本文基于对单历程阻力矩特性的分析，引入B-W(Bouc-Wen)迟滞模型，结合模型特性及在软关节阻力矩方面应用的限制，对模型进行了改进；并采用改进的多岛遗传算法对模型参数进行辨识；最终，建立一套应用于航天服软关节单历程阻力矩的高精度数学模型。

1 航天服软关节单历程阻力矩特性

在开展航天服软关节单历程阻力矩数学模型的研究前，需要先对单历程阻力矩特性展开分析，提出数学模型需满足的性质。某型航天服软关节单历程阻力矩-转角特征曲线如图1所示。

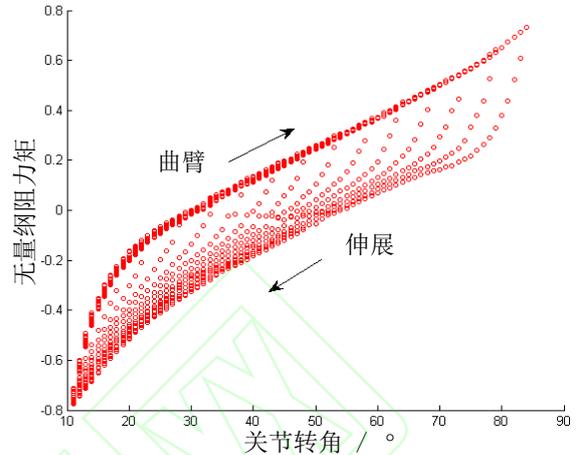


图1 航天服软关节单历程阻力矩-转角特征曲线图
Fig.1 Single-course resistance torque-angle characteristic curve figure of spacesuit shoulder soft joint

由图1可知，随关节弯曲，转角增大，阻力矩增大；反之，阻力矩减小。结合图1对航天服软关节单历程阻力矩-转角特征曲线的分析，得到性质如下：

- 1) 迟滞特性：在关节弯曲和伸展过程中，相同关节转角下，弯曲过程阻力矩大于伸展过程阻力矩，弯曲和伸展过程阻力矩不重合，呈现迟滞特性。
- 2) 闭合性：软关节单历程阻力矩随关节转角增加，弯曲段与伸展段阻力矩差值呈现先增加后减小的趋势；在人体与航天服初始接触时和关节单历程运动中转动至最大转角时，弯曲段和伸展段阻力矩基本相同。即单历程阻力矩-转角曲线闭合。
- 3) 非对称性：软关节单历程阻力矩弯曲段曲线形状与伸展段曲线形状不一致，呈现一定的非对称性。

基于上述分析，单历程阻力矩的数学模型应能够充分表征单历程阻力矩迟滞曲线特性，且模型能够高精度描述弯曲伸展过程阻力矩曲线，整体误差较小。而压电陶瓷领域的B-W模型针对迟滞特性曲线拟合精度高，模型简单。因此，引入B-W模型用于建立航天服软关节单历程阻力矩的数学模型。

2 单历程阻力矩的数学模型

2.1 B-W模型

传统B-W模型^[20]应用于研究堆叠压电陶瓷

片在电压驱动下的动力学特性，其动力学方程为

$$M \ddot{x}(t) + C \dot{x}(t) + Kx(t) = F(t) \quad (1)$$

式中， M 、 C 和 K 分别为单向驱动堆叠压电陶瓷片的质量系数、阻尼系数和刚度系数， $x(t)$ 为堆叠压电陶瓷片在压电效应下产生的位移， $F(t)$ 为单向驱动状态，堆叠压电陶瓷片产生的输出力，其具体形式为

$$F(t) = \alpha k_p u(t) + (1 - \alpha) k_p h(t) \quad (2)$$

式中， α 和 k_p 为压电陶瓷系数， $u(t)$ 为压电陶瓷片的驱动电压， $h(t)$ 为压电陶瓷在电压驱动下引起的非线性迟滞项，其微分方程形式为

$$\dot{h}(t) = A \dot{u}(t) - \beta \left| \dot{u}(t) \right| |h(t)|^{n-1} - \gamma \dot{u}(t) |h(t)|^n \quad (3)$$

式中， A 、 β 、 γ 为模型迟滞参数，控制迟滞曲线的形状与迟滞特性，一般通过实验确定。

上述构建了传统B-W模型，但其直接用于航天服软关节单历程阻力矩的数学表征存在限制。现取10组模型参数，得到B-W模型曲线形状如图2所示。

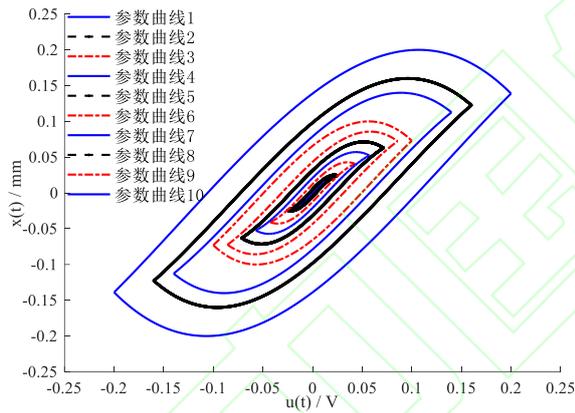


图2 传统B-W模型曲线图

Fig.2 Figure of traditional B-W model curve

由图2可知，模型呈现明显的迟滞特性，基本满足上述性质1)、2)，但现模型无法满足性质3)，影响模型的拟合精度。因此有必要对B-W模型作进一步的改进。

2.2 单历程阻力矩的改进B-W模型

现将，航天服软关节单历程运动对应于压电陶瓷片低频电压驱动工况，关节运动频率远低于驱动电压频率。因此，采用低频电压驱动时，可以忽略式(1)中位移的一阶和二阶微分项，进一步将式(2)代入式(1)可得

$$x(t) = \alpha k u(t) + (1 - \alpha) k h(t) \quad (4)$$

式中， $k = k_p / K$ 用于后续简化。

在解决模型的对称性问题之前，需要消除模

型中存在的冗余度。取 C 为任意固定正常数，则有参数 $k = k_i$ 、 $\alpha = \alpha_i$ 、 $n = n_i$ 、 $A = A_i$ 、 $\beta = C^n \beta_i$ 、 $\gamma = C^n \gamma_i$ 、 $h(t) = h_i(t)$ 与参数 $k = k_i$ 、 $\alpha = \alpha_i$ 、 $n = n_i$ 、 $A = CA_i$ 、 $\beta = C \beta_i$ 、 $\gamma = C \gamma_i$ 、 $h(t) = Ch_i(t)$ 使得式(3)-(4)在两参数条件下等价，即原模型中式(3)存在参数冗余度。

同上述方法，记 h_0 为正常数，使得 $w(t) = h_0 h(t)$ ，代入式(3)中有

$$\begin{aligned} \dot{w}(t) &= Ah_0 \dot{u}(t) - \beta \left| \dot{u}(t) \right| |w(t)|^{n-1} w(t) \frac{1}{h_0^{n-1}} \\ &\quad - \gamma \dot{u}(t) |w(t)|^n \frac{1}{h_0^n} \end{aligned} \quad (5)$$

考虑式(5)中 h_0 与微分方程阶数不同，提取参数 (Ah_0) 可得到

$$\begin{aligned} \dot{w}(t) &= Ah_0 \left(\dot{u}(t) - \beta \left| \dot{u}(t) \right| |w(t)|^{n-1} w(t) \frac{1}{Ah_0^n} \right) \\ &\quad + Ah_0 \left(-\gamma \dot{u}(t) |w(t)|^n \frac{1}{Ah_0^n} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

为了消除模型冗余度，考虑 β 和 γ 项具有相同阶数，同时消除参数 A 和阶数 n 对括号内各项的影响，记 $h_0 = \sqrt[n]{(\beta + \gamma)/A}$ ，代入式(6)中得到消除冗余度的非线性迟滞项如下

$$\begin{aligned} \dot{w}(t) &= \rho \left(\dot{u}(t) - \sigma \left| \dot{u}(t) \right| |w(t)|^{n-1} w(t) \right) \\ &\quad + \rho \left((\sigma - 1) \dot{u}(t) |w(t)|^n \right) \end{aligned} \quad (7)$$

式中 $\rho = Ah_0 > 0$ ， $\sigma = \beta / (\beta + \gamma) \geq 0$ 。

此时记 $k_u = \alpha k > 0$ 、 $k_w = (1 - \alpha)k / h_0 < 0$ ，代入式(4)中有

$$x(t) = k_u u(t) + k_w w(t) \quad (8)$$

考虑式(8)分别由第一项电压项及第二项迟滞项共同构建，迟滞项仅通过微分形式与驱动电压相关，使得模型呈现对称性，如图2所示。

而航天服软关节单历程阻力矩-转角迟滞特性曲线并非完全对称的迟滞曲线，需要消除B-W模型的对称性。在迟滞项系数 k_w 中引入电压对迟滞项的影响，以消除对称性，使模型满足性质3)。

记 $f_1 = \sum_{i=0}^N k_{u_i} u^i$ 、 $f_2 = \sum_{j=0}^M k_{w_j} u^j$ ，并基于式(8)中 k_u 、 k_w 的正负特性，得到消除对称性的迟滞模型如下

$$x(t) = f_1 - f_2 w(t) \quad (9)$$

将压电陶瓷驱动电压 $u(t)$ 对应航天服关节转角、压电陶瓷片位移 $x(t)$ 对应航天服关节阻力矩，将改进后的B-W模型用于航天服软关节阻力矩的数学表征。

2.3 单历程阻力矩数学模型的参数辨识

由于B-W模型中含有非线性微分项,且模型微分项阶数 n 和系数阶数 N 的不确定性。难以直接获得解析解,因此利用优化算法对模型参数进行辨识以获得数值解进行拟合。参数辨识以拟合结果与目标曲线方差最小作为优化目标,其形式如下

$$\text{Min}D(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{\text{model}}(i) - x_{\text{data}}(i))^2 \quad (10)$$

k_{u_j}, k_{w_j}
 ρ, σ, n, w_0

参数辨识过程采用多岛遗传算法(multi-island genetic algorithm, MIGA),同时引入模拟退火算法中概率的思想,对MIGA中复制、变异、交叉的个体和概率进行调控,提高迭代过程的迭代效率、收敛速度和全局搜索能力,并避免陷入局部最优。改进后的多岛遗传算法流程如图3所示,具体步骤如下:

- 1) 初始化优化算法参数值、判别标准阈值及种群。
 - 2) 计算各种群适应度。
 - 3) 按照概率和适应度进行各种群之间移民。
 - 4) 提取出父代,按照复制、交叉和变异的概率进行遗传操作,并生成新子代。
 - 5) 计算各种群中新生成子代的适应度。
 - 6) 按照适应度并基于模拟退火算法思想,引入概率,判断新个体是否保留。
 - 7) 判断新种群最优个体是否满足进化条件,满足则转至8),不满足则转至4)。
 - 8) 判断种群迭代数是否达到最大迭代步数或满足精度要求,满足则输出参数辨识结果并结束,不满足则转至2)。
- 以此方法开展模型无初值的参数辨识。

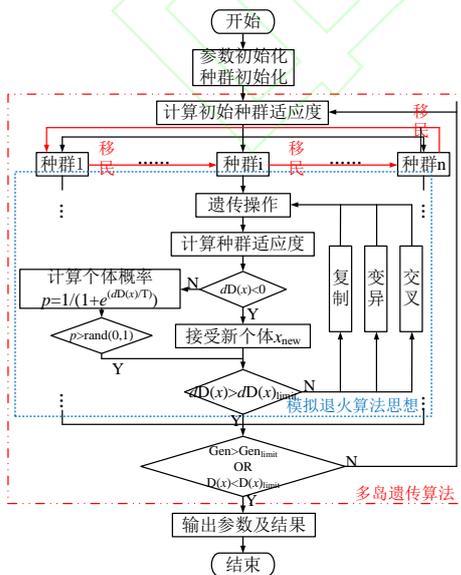


图3 改进后多岛遗传算法流程图

Fig.3 Flow figure of improved multi-island genetic algorithm

3 航天服软关节单历程阻力矩模型验证

3.1 肘软关节单历程阻力矩模型的仿真验证

肘关节的灵活性在上肢运动中起到重要作用,为降低阻力矩对关节运动的影响,常采用波纹式结构。因此,首先以航天服波纹式肘关节仿真分析结果为算例进行验证。本文采用内置法驱动^[21-23],即人体在航天服内部,人体驱动航天服运动,得到软关节单历程阻力矩-转角迟滞特性曲线如图4所示。

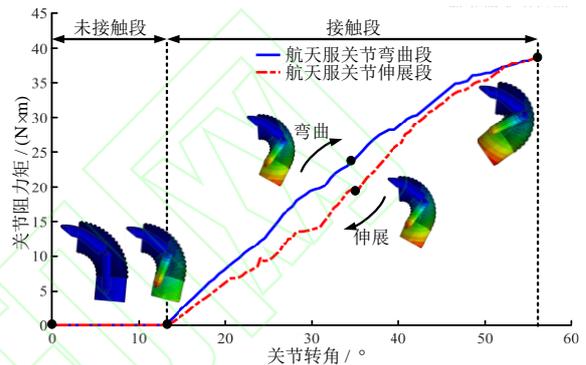


图4 航天服肘软关节阻力矩-转角迟滞特性曲线图

Fig.4 Resistance torque-angle hysteresis characteristic curve figure of spacesuit elbow soft joint

随关节运动,人体关节与航天服接触,关节弯曲,转角增加,阻力矩增加,反之阻力矩减小;弯曲伸展段阻力矩不重合,满足航天服软关节单历程阻力矩性质,验证了该仿真方法对航天服软关节阻力矩分析的正确性,能够应用于B-W模型验证。但是,内置法驱动过程中可能出现航天服褶皱的产生与释放等非线性过程^[7],导致航天服软关节内部体积变化,引起关节阻力矩的波动。

利用改进后的多岛遗传算法对关节最大转角为40°的单历程阻力矩迟滞特性曲线进行参数辨识,所得到的阻力矩模型参数结果及较传统算法对比结果如下

$$\left\{ \begin{array}{l} N_1 = 5, N_2 = 5 \\ k_{u_0} = -9.9285E - 2, k_{w_0} = 3.0286E - 2 \\ k_{u_1} = 0.9686, k_{w_1} = 2.4465E - 1 \\ k_{u_2} = -8.4372E - 3, k_{w_2} = -8.7324E - 3 \\ k_{u_3} = 4.5346E - 4, k_{w_3} = 8.2244E - 4 \\ k_{u_4} = 1.0632, k_{w_4} = -5.0116 \\ k_{u_5} = -4.6082, k_{w_5} = 8.0032 \\ \rho = 75.7984, \sigma = 711.5197 \\ n = 27, w_0 = 1 \end{array} \right. \quad (11)$$

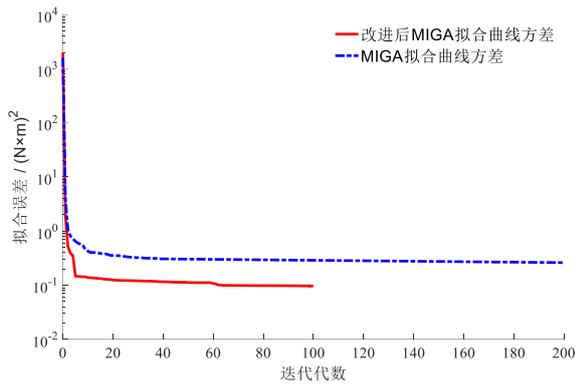
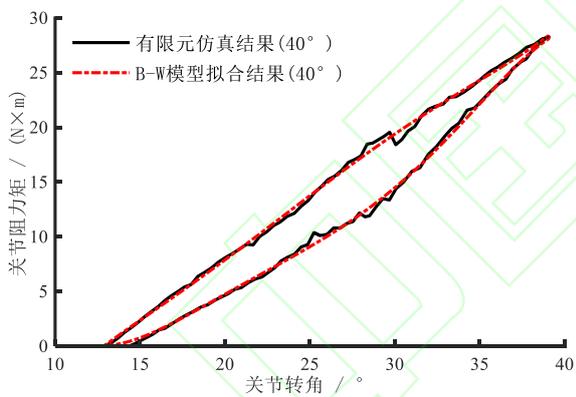


图5 改进后多岛遗传算法与传统多岛遗传算法
参数辨识误差对比图

Fig.5 Comparison figure of parameter identification errors
between improved multi-island genetic algorithm and
traditional multi-island genetic algorithm

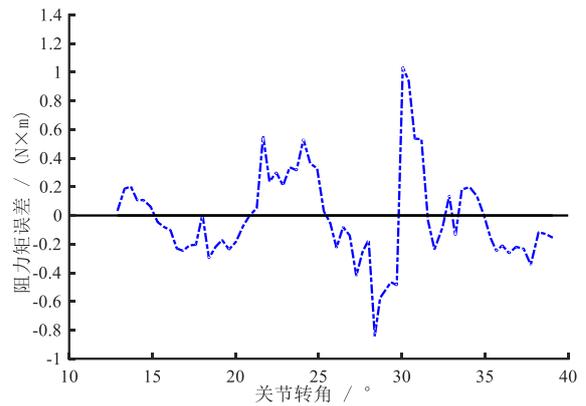
由图5可知,分别用改进后算法与多岛遗传算法对同一组数据进行参数辨识,改进后算法能够在循环次数达到65次即达到较高拟合精度,但多岛遗传算法即使循环到200次仍陷于局部最优,精度较改进后算法低1个数量级。改进后的多岛遗传算法使得迭代效率和全局采样能力得到了提升。改进后算法拟合曲线及误差如图6所示。



(a) 最大关节转角为 40°

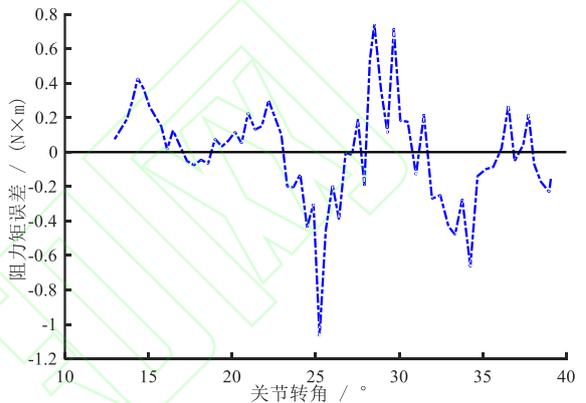
单历程阻力矩仿真结果与 B-W 模型拟合曲线图

(a) Figure of B-W model fitting curve and simulation
results for single-course resistance torque with maximum
joint rotation angle of 40°



(b) 弯曲段误差图

(b) Figure of loading section error



(c) 伸展段误差图

(c) Figure of unloading section error

图6 最大关节转角为 40°

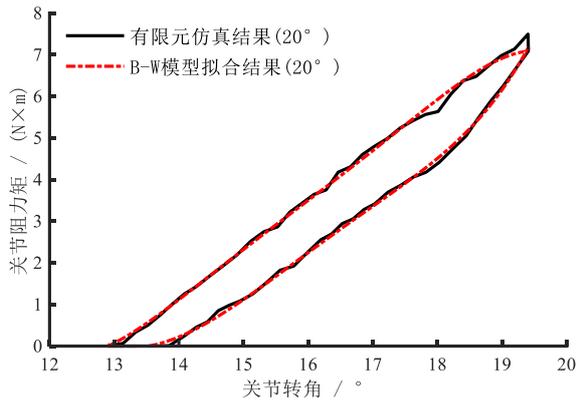
单历程阻力矩 B-W 模型拟合曲线及误差图

Fig.6 Fitting curve and error figures of B-W model for
single-course resistance torque with maximum joint rotation
angle of 40°

由图6(a)可知, B-W模型结果呈现迟滞特性,弯曲段伸展段曲线闭合,且迟滞曲线具有非对称性,满足航天服软关节单历程阻力矩特性要求。由图6(b)、(c)可知, B-W模型整体误差较小,误差较大处集中出现在阻力矩波动位置。

结果表明,采用改进后多岛遗传算法进行参数辨识的B-W模型较仿真结果拟合度高,最大误差不超过1.05(N·m),拟合结果能够适用于非对称关节阻力矩特性。

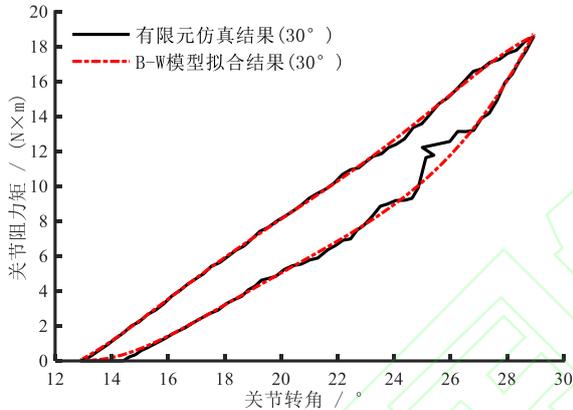
同样采用上述方法对不同最大关节转角的单历程阻力矩迟滞特性曲线进行参数辨识, B-W模型结果如图7所示。拟合曲线与仿真曲线的误差及方差见表1。



(a) 最大关节转角为 20°

单历程阻力矩仿真结果与 B-W 模型拟合曲线图

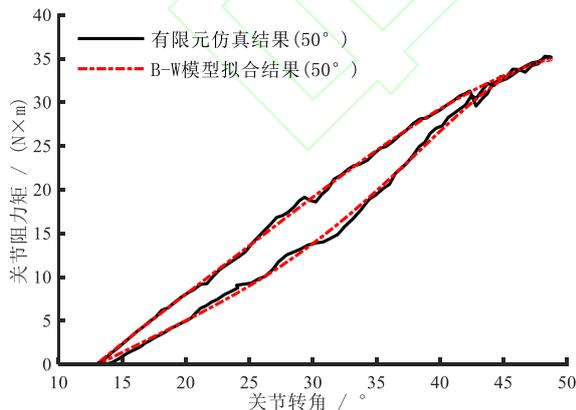
(a) Figure of B-W model fitting curve and simulation results for single-course resistance torque with maximum joint rotation angle of 20°



(b) 最大关节转角为 30°

单历程阻力矩仿真结果与 B-W 模型拟合曲线图

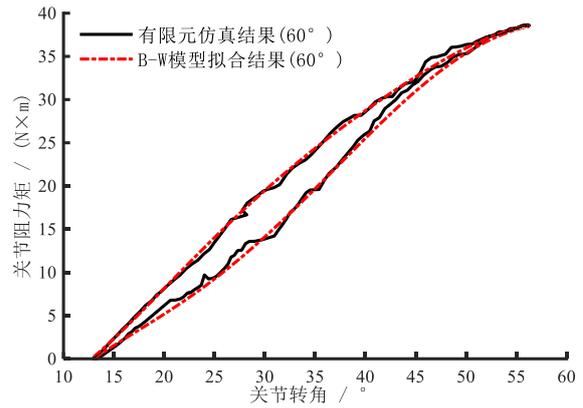
(b) Figure of B-W model fitting curve and simulation results for single-course resistance torque with maximum joint rotation angle of 30°



(c) 最大关节转角为 50°

单历程阻力矩仿真结果与 B-W 模型拟合曲线图

(c) Figure of B-W model fitting curve and simulation results for single-course resistance torque with maximum joint rotation angle of 50°



(d) 最大关节转角为 60°

单历程阻力矩仿真结果与 B-W 模型拟合曲线图

(d) Figure of B-W model fitting curve and simulation results for single-course resistance torque with maximum joint rotation angle of 60°

图 7 航天服肘软关节单历程运动仿真结果与 B-W 模型拟合曲线图

Fig.7 Figures of B-W model fitting curve and simulation results for spacesuit elbow soft joint single-course motion

表 1 肘软关节拟合误差表

Tab.1 Table of fitting error of elbow soft joint

最大转角/ (°)	平均误差/(N·m)		方差/(N·m) ²
	弯曲段	伸展段	
20	-4.4043E-3	1.1711E-2	2.3173E-2
30	4.2209E-2	-4.3041E-2	9.6489E-2
40	-1.4160E-2	1.0074E-3	9.6773E-2
50	6.9024E-2	-6.8038E-2	3.0979E-3
60	-2.3563E-2	-3.7569E-1	2.1495E-1

由图6、图7可知，B-W模型能够特征对应航天服软关节单历程阻力矩曲线，模型曲线与阻力矩曲线基本一致。B-W模型误差较大处出现在由褶皱等引起的阻力矩波动位置，这是由于模型以方差作为优化目标且模型阶数较低共同作用导致的。由表1可知，B-W模型用于航天服软关节单历程阻力矩数学表征整体误差较小。

结果表明，针对不同最大关节转角阻力矩迟滞特性曲线，B-W模型能够进行高精度的拟合，模型对相同软关节不同最大关节转角均具有较好的适用性；其平均误差及方差较小，能够达到精度要求。模型的有效性得到了验证。

3.2 腕软关节及肩软关节单历程阻力矩模型的实验验证

上述验证了模型能够适用于波纹式肘软关节仿真分析结果，本节以论文[17]中腕软关节及肩软关节归一化后实验数据进行验证，同时将B-W

模型与J-A^[17]模型对比,结果如图8、图9所示,方差见表2。

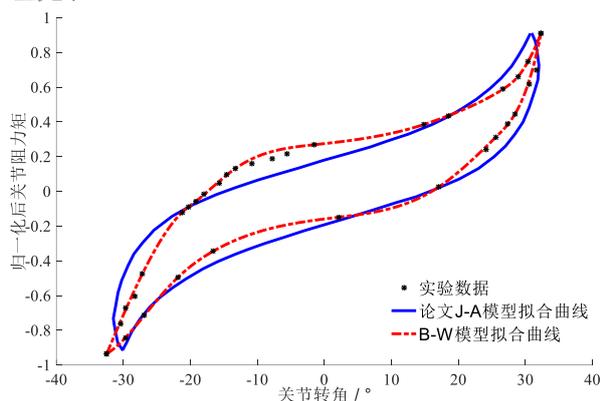


图8 腕软关节阻力矩曲线拟合对比图

Fig.8 Figure of wrist soft joint resistance torque fitting comparison

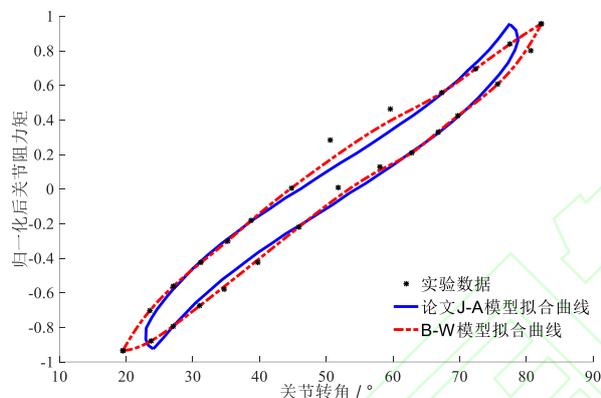


图9 肩软关节阻力矩曲线拟合对比图

Fig.9 Figure of shoulder soft joint resistance torque fitting comparison

表2 腕软关节、肩软关节拟合误差表

Tab.2 Table of fitting error of wrist and shoulder soft joints

模型	方差/(N·m) ²	
	腕关节	肩关节
J-A	0.0475	0.0244
B-W	0.000479	0.000860

如图8、图9, B-W模型曲线形状较J-A模型能够更准确描述航天服软关节单历程阻力矩曲线;由表2可知,改进后B-W模型较J-A模型方差降低2个数量级, B-W模型拟合精度较J-A模型显著提升。

结果表明,较J-A模型, B-W模型更能够符合非对称数据;针对腕软关节和肩软关节单历程阻力矩迟滞特性曲线,同样能够满足精度要求。表明该模型对航天服不同软关节均具有较好的适用性。

4 结论

本文针对航天服软关节单历程阻力矩数学模型精度低、形状误差大的问题,引入了B-W模型,并对B-W模型进行了改进;利用模拟退火算法思想改进了多岛遗传算法,以用于模型无初值的快速参数辨识;最终建立了应用于航天服软关节单历程阻力矩的高精度数学模型。具体结论如下:

1) 基于对航天服软关节单历程阻力矩特性的分析,压电陶瓷领域的B-W模型首次应用于航天服软关节阻力矩,并消除了模型的冗余度和对称性,使其能对航天服软关节单历程阻力矩进行精确表征。

2) 通过模拟退火算法的思想对多岛遗传算法进行改进,实现了对B-W模型无初值高效率和高精度的参数辨识,较传统多岛遗传算法参数辨识效率提高3倍以上,精度提高1个数量级。

3) 改进后的B-W模型较现有J-A模型的阻力矩方差降低了2个数量级,显著降低了数学模型的形状误差,且对航天服不同软关节和软关节单历程不同最大关节转角均具有较强的适用性。

参考文献(References)

- [1] 张立蕃, 陈信, 张康, 等. 中国医学百科全书: 航空航天医学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985.
ZHANG L F, CHEN X, ZHANG K, et al. China medical encyclopedia: aerospace medicine[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1985. (in Chinese)
- [2] MEYEN F E, HOLSCHUH B, KOBRICK R L, et al. Robotic joint torque testing: a critical tool in the development of pressure suit mobility elements[C]//Proceedings of the 41st International Conference on Environmental Systems, 2011: 5105.
- [3] 胡源渊, 吴庆勋, 刘瑞达, 等. 基于柔性阵列肌电信号的空间外骨骼运动意图辨识方法[J]. 载人航天, 2022, 28(3): 365-374.
- [4] HU Y Y, WU Q X, LIU R D, et al. Identification of space exoskeleton motion intention based on flexible array EMG signal[J]. Manned Spaceflight, 2022, 28(3): 365-374.(in Chinese)
- [4] 白瑞. 基于仿人灵巧手的舱外航天服手套关节力学测试系统[D]. 天津: 天津大学, 2022.
- [5] BAI R. Mechanics testing system for the joints of extravehicular spacesuit gloves based on a humanoid dexterous hand[D]. Tianjin: Tianjin University, 2022. (in Chinese)
- [5] 张万欣. 航天服系统设计与关键技术分析[J]. 载人航天, 2022, 28(2): 143-150.

- ZHANG W X. System design and key technology analysis of spacesuit[J]. *Manned Spaceflight*, 2022, 28(2): 143-150. (in Chinese)
- [6] 李孟禹. 失重环境下航天员作业轨迹规划研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.
- LI M Y. Research on trajectory planning of astronaut in weightlessness environment[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021. (in Chinese)
- [7] SCHMIDT P B. An investigation of space suit mobility with application to EVA operations[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2001.
- [8] 王晓东, 王政, 李昊, 等. 舱外航天服关节阻力矩测量与建模方法研究[J]. *航天医学与医学工程*, 2015, 28(3): 195-202.
- WANG X D, WANG Z, LI H, et al. Research on method of extravehicular spacesuit joint torque measurement and modeling[J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 2015, 28(3): 195-202.(in Chinese)
- [9] 刘文樵, 施虎, 谭坤, 等. 航天服气压状态下的关节阻力矩特性研究[J]. *液压与气动*, 2021, 45(8): 17-25.
- LIU W Q, SHI H, TAN K, et al. Study on joint torque characteristics of spacesuit in inflated state[J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2021, 45(8): 17-25.(in Chinese)
- [10] 念龙生, 隆志力, 王哲琳, 等. 一种改进 Preisach 模型数值实现方法[J]. *压电与声光*, 2014, 36(2): 255-259.
- NIAN L S, LONG Z L, WANG Z L, et al. An improved numerical implementation of preisach model[J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2014, 36(2): 255-259.(in Chinese)
- [11] LI Z Y, WANG J Y, YAN S Y, et al. Research on joint-assisted exoskeleton control system of lower extremity in active spacesuit[C]//*Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, 2019: 1889-1894.
- [12] 陈旭亮, 张琛, 季宏丽, 等. SMA 鼓包迟滞建模与控制策略[J]. *航空学报*, 2021, 42(9): 224652.
- CHEN X L, ZHANG C, JI H L, et al. SMA bump hysteresis modeling and control strategy[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(9): 224652.(in Chinese)
- [13] 王昊, 金明河, 刘宏, 等. 航天服关节力学测试系统的测量原理与实验分析[J]. *航天医学与医学工程*, 2003, 16(5): 349-353.
- WANG H, JIN M H, LIU H, et al. Principles and experimental analysis of a measuring system for measuring spacesuit joint's damping parameters[J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 2003, 16(5): 349-353.(in Chinese)
- [14] 王昊, 金明河, 高晓辉, 等. 航天服手臂运动学建模及其关节力学特性的测试[J]. *机器人*, 2004, 26(3): 212-217.
- WANG H, JIN M H, GAO X H, et al. Modeling of spacesuit's arm based on kinematics and measurement of mechanical characteristics of its joint[J]. *Robot*, 2004, 26(3): 212-217.(in Chinese)
- [15] 赵京东, 金明河, 刘宏. 航天服柔性单关节测试系统的研究[J]. *机械制造*, 2008, 46(3): 56-58.
- ZHAO J D, JIN M H, LIU H. Measurement system research of space suit soft single joint[J]. *Machinery*, 2008, 46(3): 56-58.(in Chinese)
- [16] 赵京东, 刘伊威, 刘宏. 航天服手臂阻尼力矩测试方法[J]. *机械与电子*, 2008, 26(3): 53-56.
- ZHAO J D, LIU Y W, LIU H. A summary of spacesuit arm damping torque measuring methods[J]. *Machinery & Electronics*, 2008, 26(3): 53-56.(in Chinese)
- [17] 张新军, 李潭秋, 张万欣, 等. 航天服关节力矩的数学模型[J]. *航空学报*, 2015, 36(3): 865-871.
- ZHANG X J, LI T Q, ZHANG W X, et al. Mathematical model for spacesuit joint torque[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2015, 36(3): 865-871.(in Chinese)
- [18] LI Z Y, DAI Y H, WANG J Y, et al. Jiles-Atherton-based hysteresis identification of joint resistant torque in active spacesuit using SA-PSO algorithm[J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2022, 2022: 7535450.
- [19] 李照阳, 戴跃洪, 王君尧. 舱外航天服下肢关节阻力矩迟滞特性研究与建模分析[J]. *中国空间科学技术*, 2024, 44(1): 65-74.
- LI Z Y, DAI Y H, WANG J Y. Research and modeling analysis of joint resistant torque hysteresis characteristics of lower limbs in extravehicular spacesuit[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2024, 44(1): 65-74.(in Chinese)
- [20] GOMIS-BELLMUNT O, IKHOUANE F, MONTESINOS-MIRACLE D. Control of a piezoelectric actuator considering hysteresis[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2009, 326(3/4/5): 383-399.
- [21] 王鲁豫, 周仕明, 尚坤, 等. 波纹式航天服关节阻力矩特性研究[J]. *载人航天*, 2019, 25(6): 761-770.
- WANG L Y, ZHOU S M, SHANG K, et al. Study on characteristics of resisting torque in corrugated joint of spacesuit[J]. *Manned Spaceflight*, 2019, 25(6): 761-770.(in Chinese)
- [22] 董长林, 尚坤, 周仕明, 等. 基于 Abaqus 的航天服波纹式肘关节有限元仿真平台开发[J]. *载人航天*, 2022, 28(2): 168-176.
- DONG C L, SHANG K, ZHOU S M, et al. Development of finite element simulation platform for corrugated elbow joint of spacesuit based on Abaqus[J]. *Manned Spaceflight*, 2022, 28(2): 168-176.(in Chinese)
- [23] 董长林, 周仕明, 李道奎. 航天服软关节小样本阻力矩预测方法研究[J]. *载人航天*, 2022, 28(4): 499-509.
- DONG C L, ZHOU S M, LI D K. Research on prediction method of small sample resistance torque of spacesuit soft joint[J]. *Manned Spaceflight*, 2022, 28(4): 499-509.(in Chinese)