

外骨骼机构舱外航天服手套阻尼的 测量与 Preisach 建模

方红根¹, 史士财¹, 刘宏^{1,2}, 李潭秋³

(1. 哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室, 150001, 哈尔滨; 2. 德国宇航中心机器人及机电一体化研究所, 82230, 慕尼黑; 3. 北京航天医学工程研究所, 100094, 北京)

摘要: 以宇航员出舱活动为背景, 针对内置式测量的缺点, 利用平行四边形连杆和齿轮的组合设计了一种外骨骼机构。该机构能在舱外航天服(EVA)手套的背部驱动下产生模拟人手弯曲和伸展运动, 同时位于指尖的力传感器输出运动过程中的阻尼力, 该阻尼力可达 10 N, 滞后可达 31%。为便于对阻尼力进行数值预测及舱外活动功效仿真, 应用 Preisach(简称 P 模型)获得一阶转换曲线的方法, 对 EVA 手套的滞后特性进行数学建模, 由于 P 模型在数值计算时需考虑 2 种情况, 因此通过记录记忆曲线上顶点数的方法导出统一计算公式, 并采用基于距离权重的插值算法来计算离散 P 模型平面非节点区域的 Everett 函数值。最后, 通过实验验证了该建模的有效性。

关键词: 外骨骼机构; 舱外航天服手套; 平行四边形连杆; Preisach 模型

中图分类号: R852.81 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)07-0891-04

Damping Parameters Measurement and Preisach Modeling of Extra Vehicular Activity Glove Based on Exoskeleton Mechanism

FANG Honggen¹, SHI Shicai¹, LIU Hong^{1,2}, LI Tanqiu³

(1. State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Institute of Robotics and Mechatronics, German Aerospace Center, Munich 82230, German;

3. Institute of Space Medicine and Medical Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: By combination of parallelogram link and gear, a new type of exoskeleton mechanism is developed. As placed on the back of extra vehicular activity (EVA) glove in an external way, this mechanism is able to drive the EVA glove finger to extent or flex like human finger grasp motion. The force sensor located at the tip of exoskeleton mechanism measures the EVA glove damping force during flexion or extension. The force reaches even to 10 N and the hysteresis of the force approaches to 31%. To predict the force which corresponds to an angular displacement of EVA glove and simulate the human factors performance metrics of extra vehicular activity, an unified Preisach numerical calculating strategy is presented by recording the number of vertices of the interface line in discrete Preisach plane and getting a series of first order reversal curves. A distance-weighted interpolation is chosen to evaluate at the points belonging to the Preisach plane except the discrete grid points. The proposed method is validated by the experiments.

Keywords: exoskeleton mechanism; extra vehicular activity glove; parallelogram link; Preisach model

由于舱外航天服(EVA)手套可直接影响宇航员手部的灵敏性、准确性、感知能力、力量和耐力,从而降低了舱外作业的功效^[1-2],因此 EVA 手套阻尼特性的获得对于评价其功效具有非常重要的意义.国外只有美国马里兰大学可以对 EVA 手套阻尼进行测量,2001年,马里兰大学研制了一套基于内置式的测量装置,每个手指都采用腱传动^[3].该系统主要有以下2个缺点:①由于 EVA 手套内部为丝织物,因此刚性、不光滑物体的放入和取出极易损坏昂贵的 EVA 手套;②测量结果不完全符合 EVA 手套的力学特性.由于该系统只能单向驱动,因而只能用腱上的拉力来代表 EVA 手套的阻尼,不能真实反映 EVA 手套阻尼的滞后特性.针对这些缺点,本文采用具有双向驱动功能的外骨骼机构对 EVA 手套的阻尼进行外置式测量.

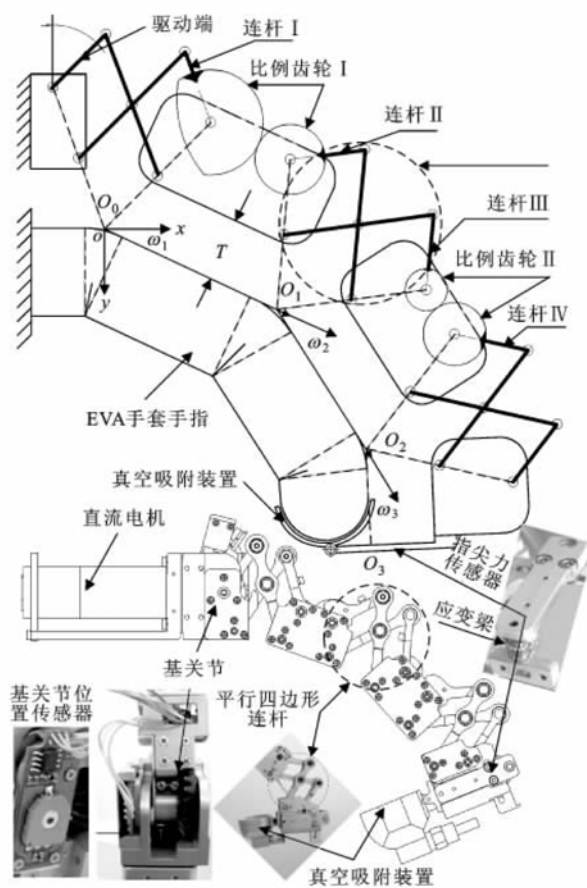
为便于对 EVA 手套阻尼进行预测以及对手部舱外作业功效进行仿真,本文引入 Mayergoyz 提出的 P 模型^[4]对 EVA 手套的滞后特性进行数学建模.该模型最初用于描述铁磁体磁场强度的滞后现象,近年来多用于对具有滞后行为的元件(如压电陶瓷、形状记忆合金、智能材料等)进行补偿控制^[5-6].为了避免求解 P 模型的双重积分,Mayergoyz 提出用实验获得一阶转换曲线(FORC)的方法来求解 Everett 函数^[7]的值,进而用该函数的值重构 P 模型的输出.该方法需分2种情况对输出进行计算,本文对这2种情况进行了统一,并用距离权重的插值算法来计算离散 P 模型平面非节点区域的 Everett 函数值.

1 外置式测量方案

1.1 外骨骼机构的测量方案

外骨骼机构在力反馈数据手套的设计中得到充分的应用^[8],但这些机构都没有双向驱动功能.为获得 EVA 手套的指尖力在弯曲和伸展中的不同特性,本文设计的外骨骼机构可以在这2个方向施加主动力,运动时通过真空吸附与 EVA 手套指尖固连(见图1).该机构由位于每个关节处的平行四边形连杆和位于机构指节处的比例传动齿轮组成,每一个平行四边形都有一个连杆和比例传动齿轮固连,其与指节连接点的延长线分别汇聚于 O_0 、 O_1 、 O_2 点,并有:① OO_j 长度始终保持不变;② T 始终保持不变. ω_1 由驱动端决定; ω_2 由比例传动齿轮 I 的传动比决定; ω_3 由比例传动齿轮 II 的传动比决定.设计时使 $\omega_2 = k_1 \omega_1$, $\omega_3 = k_2 \omega_1$, k_1 、 k_2 分别为 I、II 比

例齿轮的传动比,可以看出, O_0O_1 、 O_1O_2 、 O_2O_3 的相对转动关系是成比例的,而人手在抓握时各个指节的相对转角也是近似成比例^[9]的.因此,选择合适的 k_1 、 k_2 值(即选择合适的传动比)便可实现模拟人手的抓握运动.



ω_1 :第1指节相对基关节转角; ω_2 :第2指节相对第1指节转角;
 ω_3 :第3指节相对第2指节转角; O_0 、 O_1 、 O_2 :虚拟
旋转中心; T :EVA手套与机构的偏距

图1 基于外骨骼的测量方案

1.2 测量平台

测量平台如图2所示,它包括外骨骼手指(分别

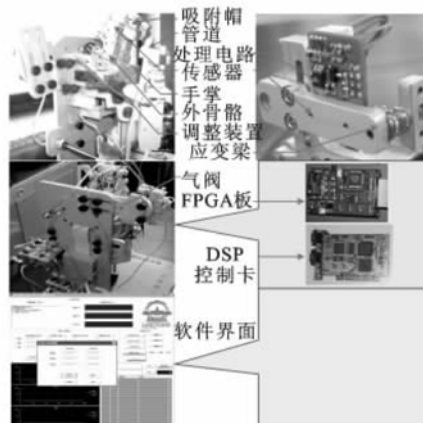


图2 EVA阻尼测量平台

用来测量 EVA 手套的母指、食指、中指)、真空吸附装置、处理电路、人机接口软件等,其中 DSP 板负责控制,FPGA 板实现数据的传输和协同处理,人机界面负责轨迹规划、数据后处理等。

2 EVA 手套阻尼的数学建模

2.1 经典 P 模型与 FORC 曲线

Mayergoyz 提出的滞后模型为

$$f(t) = \hat{I}u(t) = \iint_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha, \beta) \hat{\gamma}_{\alpha\beta} u(t) d\alpha d\beta \quad (1)$$

式中: $\mu(\alpha, \beta)$ 为权重函数; $\hat{\gamma}_{\alpha\beta} u(t)$ 是依赖于输入为 $u(t)$ 的单元迟滞算子,其值只取 1 或者 -1。积分区域 $(\alpha \geq \beta)$ 所在的平面为 Preisach 平面,在任一时刻,Preisach 平面可以分为 2 个集合

$S^+(t): \{\hat{\gamma}_{\alpha\beta} u(t) = +1\}$; $S^-(t): \{\hat{\gamma}_{\alpha\beta} u(t) = -1\}$
 $S^+(t)$ 和 $S^-(t)$ 之间的分界线 $L(t)$ 称为记忆曲线。此时系统的输出可表示为

$$f(t) = f_{\max} - 2 \iint_{S^-(t)} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta \quad (2)$$

式中: $f_{\max}$ 为最大正输出。对于 FORC 曲线上的某一个点 (u_1, u_2) , 其在 Preisach 平面上与 $\alpha = \beta$ 构成的三角形正输出为

$$F(u_1, u_2) = \iint_{S(u_1, u_2)} \mu(u_1, u_2) du_1 du_2 \quad (3)$$

式(3)即为 Everett 函数。

2.2 P 模型的数值统一计算方法

在 Mayergoyz 提出的数值求解方法中,把给定的输入系列中最后的输入分为增加或减少来处理,例如文献[5-6]在对具有滞后特性的执行元件进行滞后补偿时都采用了该方法,为了避免这种情况,本文提出了 P 模型数值的统一计算方法:定义输入系列 $U = [\alpha_1, \beta_1, \alpha_n, \beta_n]$ 且满足条件 $\alpha_i \in \alpha$, 其中 $\alpha_1 > \alpha_2 > \dots > \alpha_n$; $\beta_i \in \beta$ 且 $\beta_1 \leq \beta_2 \leq \dots \leq \beta_n$, $[\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n]$ 为正输入系列, $[\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n]$ 为负输入系列。由 P 模型的擦除特性可知,取等号时,输入系列 U 使输出 $f(t)$ 生成一系列完整的 FORC 曲线,当不取等号时, U 使输出生成部分 FORC 曲线和部分高阶转换曲线。该输入系列在 Preisach 平面生成的顶点坐标为 $(\alpha_1, \beta_1), (\alpha_2, \beta_2), \dots, (\alpha_n, \beta_n)$ 。将这些顶点系列依次编号为 1、2、 $\dots$ 、 n , 从 $L(t)$ 上任取 3 个相邻的顶点 $m, m+1, m+2$ (见图 3a), 则以这 3 个相邻的顶点与 $\alpha = \beta$ 构成的区域(图 3b)可分解为图 3c~图 3e 的三角形,此时的正输出为

$$f(t) = f(t)_m - f(t)_{m+1} + f(t)_{m+2} \quad (4)$$

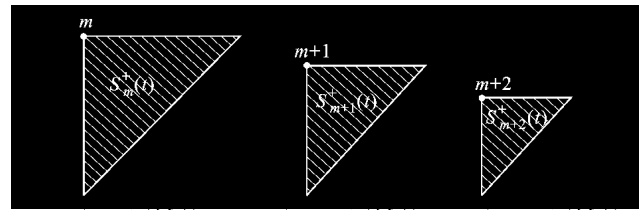
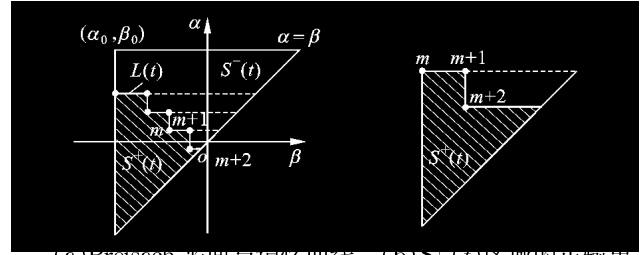
对于输入系列生成的整个记忆曲线,其 $\alpha = \beta$,

并生成了 n 个三角形,计算公式为

$$f(t) = \sum_{i=1}^n (-1)^{i+1} F(\alpha_i, \beta_i) \quad i = (1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

由式(3)可知 $f_{\max} = F(\alpha_0, \beta_0)$, 把 $f_{\max}$ 与式(5)代入式(2)可得 P 模型的数值统一计算方法

$$f(t) = -F(\alpha_0, \beta_0) + 2 \sum_{i=1}^n (-1)^{i+1} F(\alpha_i, \beta_i) \quad (6)$$



(c) $S_m^+(t)$ 区域的正输出 (d) $S_{m+1}^+(t)$ 区域的正输出 (e) $S_{m+2}^+(t)$ 区域的正输出

(α_0, β_0) : 最大积分区域顶点

图 3 P 模型的数值统一计算方法

2.3 非节点区域 Everett 函数的插值

由于 $F(\alpha_i, \beta_j)$ 的值是由实验来确定的,因此需要生成一系列完整的 FORC 曲线。为处理方便,通常使输入从负向饱和状态 α_1 开始以等差数列方式单调递增至 $\alpha_i = \alpha_1 + i\alpha_0/N$ (N 为间隔数, α_0 为正输入的最大值),然后再单调递减到 α_1 (见图 4a),记录该过程中 $f_{\alpha_i}, f_{\alpha_i\beta_j}$ ($j=1, 2, \dots, i$) 的值,并利用式(3)求得 $F(\alpha_i, \beta_j)$ 。由于 (α_i, β_j) 节点构成的网络是离散的,因此当一个输入点不属于网格节点(图 4 中的 A、B 点)时,就需要通过插值来求取这些点的 $F(\alpha_i, \beta_j)$ 的值。本文采用的距离权重的插值方法如图 4c 和图 4d 所示,输入点 (x_i, y_j) 与最近的 4 个或 3 个节点的距离公式为

$$d_1 = ((x_i - \alpha_{i+1})^2 + (y_j - \beta_j)^2)^{1/2} \quad (7)$$

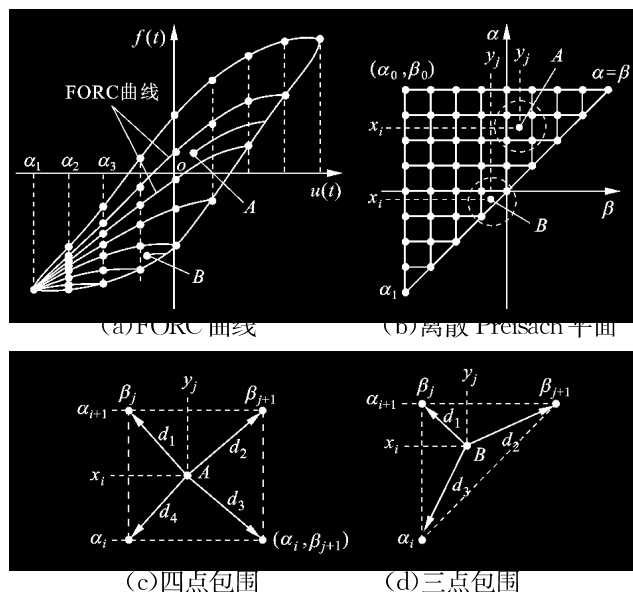
$d_2 \sim d_4$ 依此类推,则插值算法如下

$$F(x_i, y_j) = \frac{d_2 d_3 d_4 F(\alpha_{i+1}, \beta_j) + d_1 d_3 d_4 F(\alpha_{i+1}, \beta_{j+1})}{d_1 d_2 d_3 + d_2 d_3 d_4 + d_3 d_4 d_1 + d_1 d_2 d_4} + \frac{d_1 d_2 d_4 F(\alpha_i, \beta_{j+1}) + d_1 d_2 d_3 F(\alpha_i, \beta_j)}{d_1 d_2 d_3 + d_2 d_3 d_4 + d_3 d_4 d_1 + d_1 d_2 d_4} \quad (8)$$

$$F(x_i, y_j) = \frac{d_2 d_3 F(\alpha_{i+1}, \beta_j) + d_1 d_3 F(\alpha_{i+1}, \beta_{j+1})}{d_1 d_2 + d_2 d_3 + d_3 d_1} +$$

$$\frac{d_1 d_2 F(\alpha_i, \beta_j)}{d_1 d_2 + d_2 d_3 + d_3 d_1} \quad (9)$$

式(8)、式(9)分别为节点被四点和三点包围的计算方法。

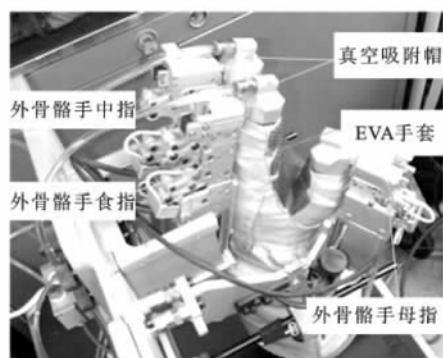


(c)四点包围 (d)三点包围
(x_i, y_j):插值点; d_i :输入点与最近3个或4个点的距离;
A、B:分别被四点和三点包围的节点

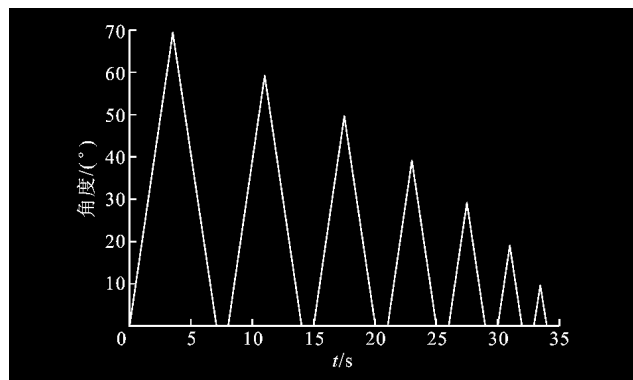
图4 基于距离权重的插值

3 实验与结果

实验如图5所示,把我国生产的某型号EVA



(a)EVA手套的固定



(b)直流电机的角度输入

图5 EVA手套阻尼的测量

手套固定在测量平台上,使 EVA 手套内部气压恒定为 0.04 MPa(该气压为宇航员太空作业气压),其指尖与外骨骼机构通过真空吸附固定(见图 5a),基关节角度输入系列如图 5b 所示,运动范围为 $[0^\circ, 70^\circ]$,则 Preisach 平面是由 $\alpha, \beta \in [0^\circ, 70^\circ]$ 构成的上三角平面,所获得的角度与指尖力的 FORC 曲线如图 6 所示.与文献[3]获得的拉力曲线不同的是这些曲线都具有很强的滞后非线性特性,与丝织物的特性相吻合.根据已获得的数据,利用式(3)以 10° 为间隔,可获得 Everett 函数值的分布(见图 7).

为了验证插值算法,在实验中还测量了 $\alpha=25^\circ, 45^\circ, 65^\circ$ 的 FORC 曲线,并对 $F(\alpha, \beta)$ 每隔 2.5° 做一个插值,然后利用式(6)计算指尖力,其结果见图 6.

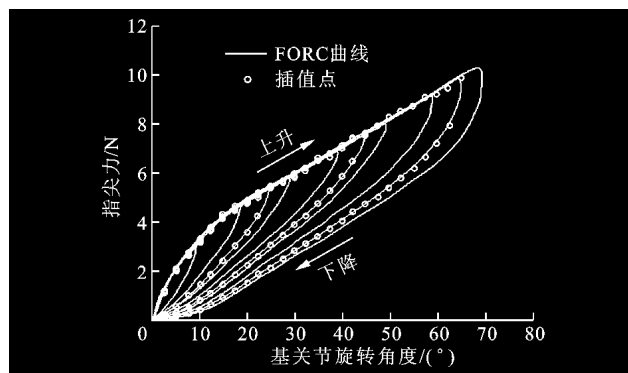


图6 EVA手套的FORC曲线

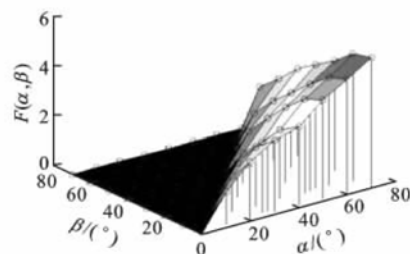


图7 Everett 函数 $F(\alpha, \beta)$ 的分布

4 结论

(1)本文采用平行四边形连杆和齿轮的组合设计了一种具有双向驱动功能的外骨骼机构,对 EVA 手套的阻尼进行了外置式测量,获得了其滞后特性曲线.指尖力可达 10 N,滞后可达 31%,说明 EVA 手套的阻尼具有强滞后非线性.

(2)从图 6 的曲线中,可以发现阻尼曲线还具有顺时针特性,这与磁性材料、压电陶瓷的滞后曲线所具有的逆时针特性是不同的.在对这类曲线进行建模时,无须颠倒滞后算子,因为权重函数是影响滞后特性的关键.

(3)Mayergoyz 方法在计算时,需要判断记忆曲

