

中文引用格式:郭庆,朱江海,付宇,等. 基于安全能耗的民航维修工时预测方法[J]. 中国安全科学学报,2025,35(10):67-74.

英文引用格式:GUO Qing, ZHU Jianghai, FU Yu, et al. Civil aviation maintenance man-hour prediction method based on safe energy consumption[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(10): 67-74.

基于安全能耗的民航维修工时预测方法^{*}

郭庆¹教授, 朱江海¹, 付宇^{**1}副教授, 左洪福²教授

(1 中国民航大学 航空工程学院, 天津 300300; 2 南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 211106)

中图分类号:X949

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.10.1346

基金项目:国家自然科学基金资助(U2133202);中国民航大学中央高校基本科研项目资助(3122022046)。

【摘要】 为了准确预测不导致疲劳积累的航空器维修标准工时,提出一种基于安全能耗的机务维修标准工时预测方法。首先,根据人体骨骼参数和欧拉四元数的运算规则构建可驱动的虚拟人,再使用动作捕捉设备采集维修过程中的运动数据;然后,采用 Roberson-Wittenburg 与逆动力学方法计算虚拟人在复现维修任务过程中关节承受的力矩,结合关节角度与时间数据,依次计算角速度、功率,并采用辛普森法则积分以确定能量消耗;最后,根据允许的能量消耗推算出符合安全能耗的标准维修工时。结果表明:基于安全能耗的预测结果与厂商推荐时间接近,均方根误差小于模特法(MOD)法,说明该方法能够更好地反映实际维修工时,从而有效控制工作强度、预防因长时间劳动而导致的疲劳积累、保障工作人员的健康与安全。

【关键词】 安全能耗; 维修工时; 工时预测; 标准工时; 疲劳; 虚拟人

Civil aviation maintenance man-hour prediction method based on safe energy consumption

GUO Qing¹, ZHU Jianghai¹, FU Yu¹, ZUO Hongfu²

(1 College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2 College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing Jiangsu 211106, China)

Abstract: To accurately predict the standard man-hours of aircraft maintenance tasks, a predictive method based on safe energy consumption for aircraft maintenance standard man-hours was proposed. Firstly, a drivable virtual human was constructed based on the skeletal parameters of the human body and the computational rules of Euler quaternions. Subsequently, motion data during maintenance processes were captured using motion capture devices. The Roberson-Wittenburg and inverse dynamics methods were then employed to calculate the joint torques borne by the virtual human during the maintenance tasks, thereby estimating the energy consumption during the maintenance process. Based on the fatigue assessment of human energy consumption, preliminary standard maintenance man-hours conforming to safety energy consumption were calculated. The study demonstrates that prediction results based on safe energy consumption are closer to the manufacturer's recommended times, with a smaller root mean square error than modular arrangement of predetermined time standards (MOD) method, indicating that this

* 文章编号:1003-3033(2025)10-0067-18; 收稿日期:2025-04-26; 修稿日期:2025-07-16

** 通信作者:付宇(1984—),男,山西长治人,博士,副教授,主要从事航空发动机运行监控与故障诊断、微型航空发动机设计与制造方面的研究。E-mail:fuyu00_@163.com。

approach better reflects the actual maintenance man-hours.

Keywords: safe energy consumption; maintenance hours; forecast of working hours; standard man-hours; fatigue; virtual human

0 引言

安全是民航发展的基石。维修工时在确保飞行安全、指导飞机设计和影响航空公司经济运营方面至关重要。国产民用飞机由于缺少研制经验和设计资料,无法使用成熟方法确定维修标准工时等维修性参数^[1]。传统的维修性预测方法如方法时间测定法(Methods Time Measurement, MTM)通常适用于流水线式作业且依赖理想环境条件下维修作业的统计数据,这可能导致实际维修时间与预测值之间存在显著差异,特别是在航空器新型号的设计阶段,基于这些数据进行维修工时的预测,其准确性和可行性往往不尽如人意^[2]。传统方法仅关注劳动时间的基本参数,对疲劳本身无法评估,而大部分维修差错都与维修工作时间不足和维修人员疲劳作业有关^[3]。

目前,现有研究普遍采用3类思路进行工时预测:一是以模 特 法 (Modular Arrangement of Predetermined Time Standards, MOD)为代表的传统预定时间标准,通过动作单元分解与经验系数估算工时^[4];二是基于任务相似度或神经网络的机器学习方法,利用历史数据映射任务特征与工时^[5-7];三是借助代谢当量等生理指标估计能量消耗,再反推工时^[8]。然而,这些方法均未考虑人体生理承受能力,导致预测结果难以兼顾安全性与准确性。传统方法侧重动作效率而忽视疲劳累积,机器学习模型依赖数据相似性,而代谢当量法尚未形成面向民航维修场景的应用框架。因此,工时预测领域仍缺少一种以安全能耗为约束、可直接关联作业动作与生理耐受度的标准化方法。

鉴于此,笔者拟考虑人体生理承受能力^[9],结合维修任务动作与人体能耗分析,提出基于安全能耗的工时预测方法,预测符合人体生理特性的维修工时,以为民航维修工时预测提供新的有效途径。

1 基于安全能耗的维修工时预测方案

1.1 维修工时预测流程

文中提出标准工时预测方法,该方法聚焦于以

物理操作和体力劳动为主的非认知类任务,针对民航工作特点,在正确使用工具和按照既定流程与标准执行维修任务时,维修动作具有可重复性。基于标准人模型完成这些动作所耗费的能量,可推导出标准工时。该方法的流程如图1所示。

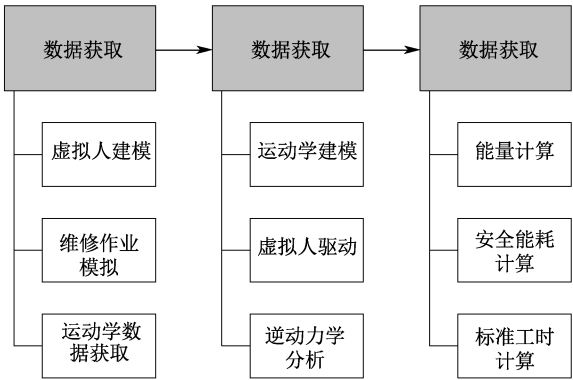


图1 标准工时预测流程

Fig.1 Standard working hour prediction flowchart

标准工时预测流程步骤如下:

- 1) 数据获取。根据《中国成年人人体尺寸》^[10]中26~60岁成年男性的50%分位数尺寸,构建虚拟人体模型。让被试穿戴动作捕捉设备进行维修,并采集维修过程中的运动数据。
- 2) 运动分析。对虚拟人进行运动学建模。利用采集到的运动学数据,驱动虚拟人复现运动过程,并作逆动力学分析,计算关节的力学数据。
- 3) 工时计算。结合动作捕捉数据和运动分析结果,计算维修过程中的能量消耗。在此基础上,参照推算出的安全能耗标准,计算标准工时。

1.2 虚拟人建模

基于多刚体人体节段加铰链关节的球棍结构,构建虚拟人模型。根据人体结构特点,人体各节段可以组成树型拓扑结构^[11],文中采用的人体骨架级联如图2所示。

由于在全球航空器维修工程师和技术人员中,女性占比仅为3%^[12],且该行业对维修人员身高并没有明确要求。同时,市场上主流人体模型软件采用的数据不支持我国的人体测量学数据^[13],故按照文献[10]中26~60岁成年男性50%位数的尺寸构建虚拟人体模型,以此作为计算标准工时的标准人模型。虚拟人模型人体节段参数见表1^[14]。

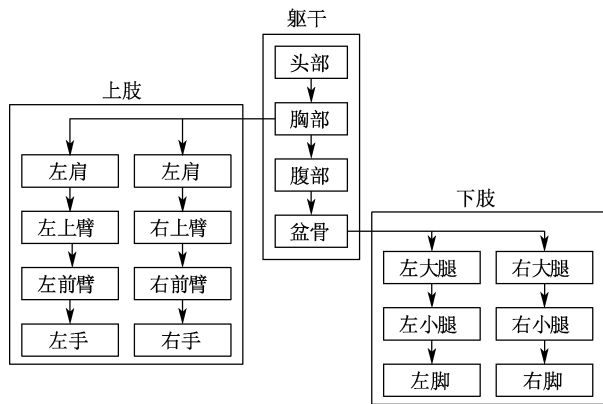


图 2 人体骨架级联

Fig. 2 Diagram of human skeleton cascade

表 1 人体各节段参数

Table 1 Body segment parameters

节段	驱动关节	相对长度/%	相对质量/%
骨盆	根关节	3.0	8.62
腹部	腰椎关节	10.3	26.00
胸部	胸椎关节	24.4	11.96
头颈	颈关节	15.6	8.20
上臂	肩关节	12.2	2.43
前臂	肘关节	15.7	1.25
手部	腕关节	11.0	0.60
大腿	髋关节	20.0	14.00
小腿	膝关节	26.0	3.67
脚部	踝关节	15.8	1.24

1.3 运动数据采集和映射

采用 Xsens 动作捕捉系统采集维修过程中的运动数据,数据文件格式为 MVNX,内容分为 2 部分,前半部分内容详细标注 Xsens 系统中定义的各个节段和关节的名称,以及它们在初始姿态下关节点和传感器的精确位置。后半部分内容着重提供人体在实际运动过程中,各个主要关节点在当前时刻的详尽运动学信息,文中主要用到位置、方向以及关节角度。

为消除测试人员与虚拟人的体型差异,保证计算的精准度,在采用动作捕捉数据驱动虚拟人复现运动时,先将动作捕捉的标记点与虚拟人的驱动点进行匹配。动捕数据点提供每一节段的位置信息和方向信息,其中, $\mathbf{r}_i = [x_i, y_i, z_i]^T$ 为身体节段局部坐标系的位置; $\mathbf{q}_i = [q_{i0}, q_{i1}, q_{i2}, q_{i3}]^T$ 为一组欧拉四元数,表示节段在全局坐标系下的方向。该方法通过运用欧拉四元数的计算规则,能够对虚拟人体模型中任意身体部分 s_i 进行数学表达,同时计算该部分

上任意点 $\mathbf{P}_{ij}$ 在全局坐标系下的位置向量^[11],其位置向量 $\mathbf{r}_{ij}$ 计算如下:

$$\mathbf{r}_{ij} = \mathbf{r}_{i0} + \mathbf{R}_i \cdot \mathbf{r}_{ijl}, i = 1, 2, \dots \quad (1)$$

其中

$$\mathbf{R}_i = \begin{bmatrix} 1 - 2q_{i2}^2 - 2q_{i3}^2 & 2q_{i1}q_{i2} - 2q_{i3}q_{i0} & 2q_{i1}q_{i3} + 2q_{i2}q_{i0} \\ 2q_{i1}q_{i2} + 2q_{i3}q_{i0} & 1 - 2q_{i1}^2 - 2q_{i3}^2 & 2q_{i0}q_{i1} - 2q_{i2}q_{i3} \\ 2q_{i1}q_{i3} - 2q_{i2}q_{i0} & 2q_{i0}q_{i1} + 2q_{i2}q_{i3} & 1 - 2q_{i1}^2 - 2q_{i2}^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{r}_{i0}$ 为根节点的位置向量; $\mathbf{R}_i$ 为该身体节段由欧拉四元数推导出的由身体节段的局部坐标系变换到全局坐标系下的坐标变换矩阵; $\mathbf{r}_{ijl}$ 为该点在对应身体节段下的局部坐标系下的位置向量。

根据人体球棍模型特点,当给定人体各身体节段的初始位置后,即可求出人体每一时刻下各身体节段坐标原点以及身体节段的质心在全局坐标下的位置:

$$\begin{cases} \mathbf{P}_i = \mathbf{P}_{if} + \mathbf{R}_i(\mathbf{P}_{i0} - \mathbf{P}_{i0}) \\ \mathbf{P}_{im} = \mathbf{P}_{if} + \varphi_i \mathbf{R}_i(\mathbf{P}_{i0} - \mathbf{P}_{i0}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{P}_i$ 为第 i 个节段在全局坐标下的位置; $\mathbf{P}_{if}$ 为第 i 个节段父节段全局坐标下的位置; $\mathbf{P}_{i0}$ 和 $\mathbf{P}_{i0}$ 为第 i 个节段以及其父节段在第 1 帧时的位置; φ_i 为第 i 个节段的质心相对位置。

1.4 人体关节力矩计算模型

Roberson-Wittenburg 动力学方法是一种用于解决多刚体系统动力学问题的方法,其特点在于通过引入一系列刚体和约束条件,形成一套完整的方程系统来描述多刚体系统的运动^[11,15-16]。

按照达朗贝尔原理,作用于人体某关节的力和力矩可以划分为 2 大类:①源自人体自身重量、外部负载以及地面反作用力引起的主动力和扭矩;②由于运动引发的惯性力和惯性扭矩。计算如下:

$$\begin{cases} \mathbf{F}_i = \mathbf{F}_{ig} + \mathbf{F}_{im} \\ \mathbf{Y}_i = \mathbf{Y}_{ig} + \mathbf{Y}_{im} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{F}_i$ 和 $\mathbf{Y}_i$ 分别为附加于人体某一个身体节段的驱动关节的关节力与力矩; $\mathbf{F}_{ig}$ 、 $\mathbf{F}_{im}$ 、 $\mathbf{Y}_{ig}$ 和 $\mathbf{Y}_{im}$ 分别为附加于人体第某个身体节段的驱动关节的主动力、惯性力、主动力矩以及惯性力矩。

用 μ 表示纯转动铰链多刚体系统的广义坐标,则纯转动铰链多刚体系统将具有统一形式的运动学关系表达式为:

$$\begin{cases} \delta \mathbf{r} = \alpha \delta \mu \\ \ddot{\mathbf{r}} = \alpha \ddot{\mu} + \mathbf{u} \\ \delta \pi = \mathbf{b} \delta \mu \\ \dot{\boldsymbol{\omega}} = \beta \ddot{\mu} + \mathbf{v} \end{cases} \quad (5)$$

其中各系数矩阵:

$$\begin{cases} \alpha = (k\mathbf{D} \times \mathbf{CD})^T \\ \mathbf{u} = (\mathbf{CD}) \times \mathbf{v} - \mathbf{D}^T \mathbf{g} + \ddot{\mathbf{r}}_0 \mathbf{1}_n \\ \beta = - (k\mathbf{D})^T \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\delta \mathbf{r}$ 为某一节段质心速度向量; $\ddot{\mathbf{r}}$ 为某节段的质心加速度向量; $\delta \pi$ 为某节段的无限小转动; $\mathbf{b}$ 为旋转雅可比矩阵; $\dot{\boldsymbol{\omega}}$ 为某节段绝对加速度; $\mathbf{C}$ 为加权铰矢量; $\mathbf{D}$ 为通路矩阵; k 为运动副; $\mathbf{v}$ 为节段广义速度导出的角速度分量。

对于一般刚体系统,基于 Roberson-Wittenbur 方法的基本动力学方程^[17]可表示为:

$$\mathbf{A} \ddot{\boldsymbol{\mu}} = \mathbf{B} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{A}$ 为系统的质量矩阵; $\ddot{\boldsymbol{\mu}}$ 为广义加速度; $\mathbf{B}$ 为力矩阵。

对于人体骨架多刚体系统,式(5)是方程数目与广义坐标数目相同的 1 组二阶微分方程。可以引入增广体的概念简化动力学方程并赋予方程系数以明确的物理意义。将 $\mathbf{D}$ 中节段 j 所在的行和列的元素全部消去后的通路矩阵记为 $\mathbf{D}_\mu$,则邻接矩阵 $\mathbf{S}_\mu$ 与 $\mathbf{D}_\mu$ 为:

$$\begin{cases} \mathbf{S}_\mu = \mathbf{E}_{jn}^\mu \mathbf{S} [\mathbf{E}_{jn}^\mu]^T \\ \mathbf{D}_\mu = \mathbf{E}_{jn}^\mu \mathbf{D} [\mathbf{E}_{jn}^\mu]^T \end{cases} \quad (8)$$

$\mathbf{S}_\mu$ 矩阵的第 i 行第 j 列元素 $S_{\mu ij}$ 可取 1、-1 和 0,即

$$S_{\mu ij} = \begin{cases} 1 & \text{当弧 } u_i \text{ 与 } s_i \text{ 关联且以 } s_i \text{ 为起点} \\ -1 & \text{当弧 } u_i \text{ 与 } s_i \text{ 关联且以 } s_j \text{ 为起点} \\ 0 & \text{当弧 } u_i \text{ 与 } s_i \text{ 无关联} \end{cases}$$

式中: $\mathbf{D}_\mu$ 为描述人体各节段通路矩阵,矩阵的第 i 行第 j 列元素 $D_{\mu ij}$ 可取 1、-1 和 0,即

$$D_{\mu ij} = \begin{cases} 1 & \text{当弧 } u_i \text{ 位于 } s_i \text{ 至 } s_j \text{ 的通路,指向 } s_i \\ -1 & \text{当弧 } u_i \text{ 位于 } s_i \text{ 至 } s_j \text{ 的通路,指向 } s_j \\ 0 & \text{当弧 } u_i \text{ 不位于 } s_i \text{ 至 } s_j \text{ 的通路} \end{cases}$$

$$\mathbf{E}_{jn}^\mu = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0_{j,j} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix}_{n \times n}$$

用于将节段 j 所在的行和列的元素全部消去,可求出此时的加权铰向量 $\mathbf{C}_\mu$:

$$\mathbf{C}_\mu = \mathbf{S}_\mu \mathbf{c}_{ij} = \mathbf{E}_{jn}^\mu \mathbf{C} [\mathbf{E}_{jn}^\mu]^T \quad (9)$$

此时

$$\alpha_\mu = (k\mathbf{D}_\mu \times \mathbf{C}_\mu \mathbf{D}_\mu)^T \beta_\mu = - (k\mathbf{D}_\mu)^T \quad (10)$$

$$\mathbf{A}_\mu = (\mathbf{K}_\mu [\mathbf{D}_\mu]) \times [\bar{\mathbf{H}}] \times (\mathbf{K}_\mu [\mathbf{D}_\mu])^T \quad (11)$$

$$\mathbf{B}_\mu = \alpha_\mu^T \cdot (\mathbf{F}_0 - m\mathbf{u}) + \beta_\mu^T \cdot (\mathbf{L} - \mathbf{J}\mathbf{v}) \quad (12)$$

式中: $[\bar{\mathbf{H}}]$ 为某身体节段的增广体对关节的惯量矩阵; $\mathbf{F}_0$ 为作用在某节段上的外力; $\mathbf{L}$ 为系统的动量矩阵; $\mathbf{J} = [J_1, J_2, \cdots, J_{16}]^T$ 为人体各节段的转动惯量向量。

于是得出人体骨架结构形态具有根节点刚体系统的动力学方程为:

$$\mathbf{A}_\mu \ddot{\boldsymbol{\mu}} = \mathbf{B}_\mu \quad (13)$$

再采用 Roberson-Wittenburg 方法将所有关节受力方程联立,可得:

$$\begin{cases} \mathbf{F} = \mathbf{S}_\mu^{-1} (\mathbf{F}_g + \mathbf{F}_m) \\ \mathbf{Y} = \mathbf{S}_\mu^{-1} (\mathbf{Y}_g + \mathbf{Y}_m) \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\mathbf{F}$ 和 $\mathbf{Y}$ 分别为人体各关节反力和反力矩组成的列向量, $\mathbf{F} = [\mathbf{F}_0, \mathbf{F}_2, \cdots, \mathbf{F}_{16}]^T$, $\mathbf{Y} = [\mathbf{Y}_0, \mathbf{Y}_1, \cdots, \mathbf{Y}_{16}]^T$, 其中, $\mathbf{F}_g$ 、 $\mathbf{F}_m$ 、 $\mathbf{Y}_g$ 、 $\mathbf{Y}_m$ 分别为各个节段驱动关节所承受的主动动力、惯性力、主动动力矩以及惯性力矩所组成的列向量。对于人体的主动动力与惯性力则有:

$$\begin{cases} \mathbf{F}_g = \mathbf{M}_g + \mathbf{F}_e \\ \mathbf{F}_m = \mathbf{M}_a \\ \mathbf{Y}_g = \mathbf{A}_m \mathbf{F}_g + \mathbf{M}_e \\ \mathbf{Y}_m = \mathbf{J}_a \end{cases} \quad (15)$$

式中: $\mathbf{M}$ 为人体各节段的质量矩阵; g 为重力加速度; $\mathbf{F}_e$ 为人体各节段上的负载向量; $\mathbf{a}$ 为人体各节段的质心加速度向量; $\mathbf{M}_e$ 为人体各节段负载力矩向量; $\mathbf{A}_m$ 为人体关节位置到节段质心位置向量的反对称矩阵的对角矩阵,其反对称矩阵^[18]为:

$$\text{ad}(\mathbf{K}) = \text{ad}([x, y, z]) = \begin{bmatrix} 0 & -z & y \\ z & 0 & -x \\ -y & x & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

1.5 人体关节功率计算模型

在工作过程中,人体的能量消耗主要集中在驱动关节活动上。为此,采用一种结合关节角度和力矩数据的方法,估算在动态运动条件下的总能量消耗。文中使用的人体模型包括 16 个关节,这些关节

的运动数据通过惯性传感器采集而得。对于关节角速度,根据关节的角度变化,采用中心差分法计算得出:

$$\omega(t)=\frac{\theta(t+1)-\theta(t-1)}{2\Delta t}\tag{17}$$

式中 Δt 为采样间隔,s。接下来,计算每个关节在任一时间点的瞬时功率。关节功率 $P(t)$ 由相应的力矩 τ 与角速度 ω 的乘积给出:

$$P(t)=\tau(t)\cdot\omega(t)\tag{18}$$

1.6 关节做功计算模型

文中基于时间步长固定的功率数据,以肘关节为例构建做功的计算模型,肘关节活动如图 3 所示。数字 0、1 和 2 分别代表人体的肩关节、肘关节和腕关节, $a_0(0)$ 、 $a_e(0)$ 、 $a_0(t)$ 、 $a_e(t)$ 分别为初始时刻下的肩关节到腕关节的位置向量和肘关节的旋转轴,以及在 t 时刻下的肩关节到腕关节的位置向量和肘关节的旋转轴。采用辛普森积分规则来提高数值积分的精度,具体计算过程如下:

$$e_i=\left(\frac{\Delta t}{3}\right)\cdot\left[\frac{P_0+4\cdot(P_1+P_3+\cdots)+2\cdot(P_2+P_4+\cdots)+P_n}{2}\right]\tag{19}$$

式中: e_i 为肘关节所做的功,J; P_n 为肘关节在时刻 n 的功率,W。

由于在工作过程中使用的工具重量都很小,为方便计算,略去工具重量对关节做功的影响。单个关节做功用 e_i 表示,全身关节做功能量 G 即为:

$$G=\sum e_i\tag{20}$$

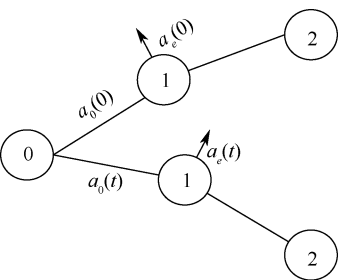


图 3 肘关节活动

Fig. 3 Representation of elbow motion

1.7 标准时间计算模型

基于能量评估方法获得标准时间,文中的能量特指作业人员在执行工作任务时,关节驱动身体运动所消耗的能量。人体的最大承受能量消耗值由下式估算^[19],该值代表人体在不同工作时长下能够安全承受的能量消耗上限。若超出允许的能量消耗限

度,将会损害作业人员的健康,导致职业病或者事故的发生^[20]。然而,该上限值包含维持基础代谢的能量消耗。为获得工作状态下能够承受的能量消耗允许值,需要从最大承受能量消耗值中减去基础代谢率。人体能量消耗允许值计算公式如下:

$$F=\frac{\ln 5\,700-\ln t}{3.1}\times a\tag{21}$$

式中: F 为人体能量消耗允许值,kJ/min; t 为工作周期时间数值; a 为有氧代谢能力,kJ/min,依据经验公式计算得到不同工作时长所允许的能量消耗上限值如图 4 所示。

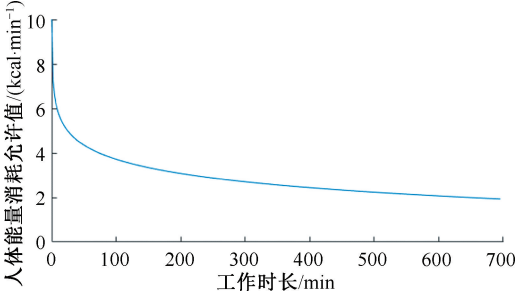


图 4 允许的能量消耗

Fig. 4 Allowable energy expenditure

调整后的标准时间的计算过程为:

$$T_m=G/\bar{F}\tag{22}$$

式中: T_m 为标准时间,min; G 为全身关节做功能量,kJ; $\bar{F}$ 为修正后的人体能量消耗允许值,kJ/min。

2 维修工时预测方法的试验与验证

为验证所提出的基于安全能耗的工时预测方法在民航维修任务中的适用性与准确性,通过计算维修过程的能量消耗,推算维修工时,并与厂商推荐工时、实测工时及传统 MOD 法进行对比,进而体现民航维修工时预测的效果。

2.1 民航维修安全能耗试验及流程

在波音维修计划文件中选取若干维修任务,选取 5 项适用于能量计算的任务,选取结果见表 2。选择 5 名年龄范围在 25~50 岁,身高不定,身体质量指数(Body Mass Index, BMI)指数为 18.5~28,有航空公司航线维修经验的男性作为被试。样本年龄范围涵盖民航维修人员的主要工作年龄段,确保能够代表实际工作中的不同经验层次人员。身高范围不限,以涵盖不同身高个体在维修操作中的差异。由于过胖或过瘦个体可能在维修操作中表现出与正常体重个体不同的能耗和工时特征,因此,选择 BMI 处于正常范围的样本。选择有航空公司航线维修经

验的男性,是因为航线维修工作在民航维修中具有典型性,且男性在民航维修人员中占比较大,能够反映该群体的普遍情况。

表 2 任务描述

Table 2 Task description

编号	任务编号	任务描述
1	25-22-00-200	检查安全带磨损情况安全性
2	21-27-01-000	更换 E/E 冷却风扇过滤器
3	21-32-02-000	更换正压安全阀过滤器
4	23-71-21-960	更换机舱温度传感器过滤器
5	25-11-00-200	更换水下安全信标电池

试验环境为靠近机场的露天停机坪,试验场景如图 5 所示。随机分给被试维修任务,每个任务重复执行 5 次,将前 2 次任务视作培训,只取后 3 次试验数据进行分析,尽可能消除熟练度对试验结果的影响。为确保前 1 次试验产生的疲劳等影响得以充分消除,使每次试验的起始状态相对一致,每次试验之间间隔 2 天。所有任务均在同一露天停机坪进行,且采用标准化工具与设备。

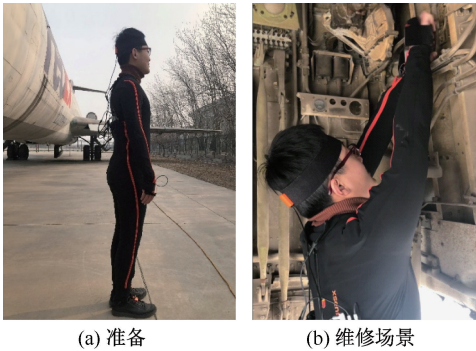


图 5 试验场景

Fig. 5 Schematic illustration of experimental scenario

2.2 虚拟人驱动及可视化生成

5 项维修任务片段可视化如图 6 所示,从图 6 中可以看出,在执行维修任务时的主要动作,第 1 个维修任务存在大量弯腰动作,第 2 和第 5 个维修任务主要为站立姿势,第 3 个任务存在部分弯腰动作,但还是以站姿为主,第 4 个维修任务以蹲姿为主。

2.3 民航维修安全能耗结果分析

人体关节总能量消耗结果见表 3。

依据所得能量消耗分别求得对应任务的标准工时。计算采用国内机务维修常用班制,一般是 1 个白班、1 个夜班然后休息 2 天。1 个工作周期为 10 h,按照允许的能量消耗所选取的推荐的最大能量消耗值为 8.62 kJ/min、人体基础代谢率

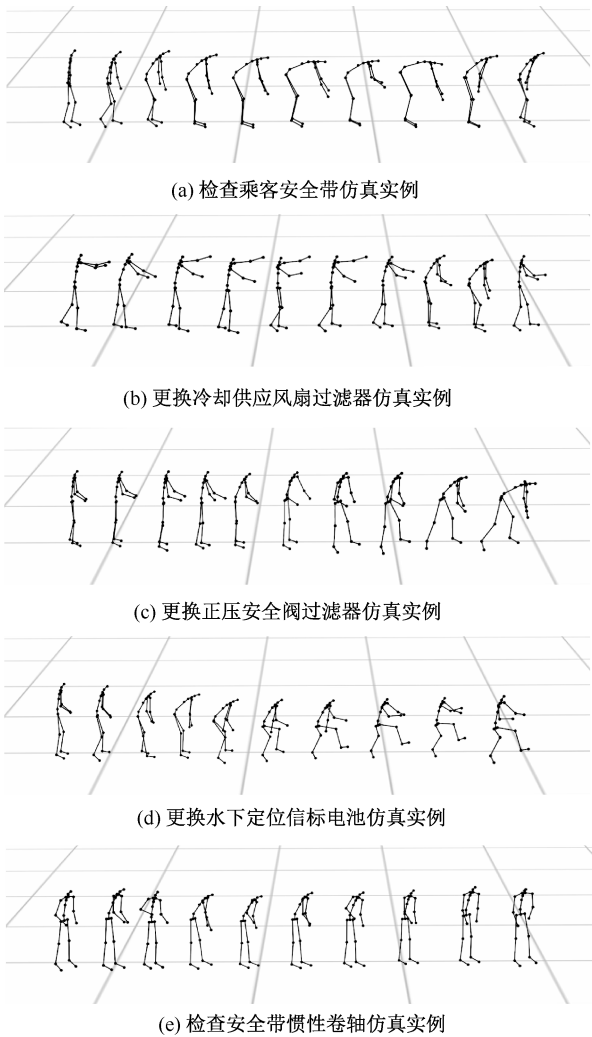


图 6 维修任务可视化结果

Fig. 6 Maintenance task visualization results

表 3 人体关节总能量消耗

Table 3 Total energy expenditure chart for human joints

关节	任务 1	任务 2	任务 3	任务 4	任务 5
腰五骶一	11.25	1.35	2.38	4.28	0.74
L1/T12 关节	5.15	0.39	0.64	1.23	0.19
T1/C7 关节	1.67	0.12	0.33	0.89	0.18
C1 头部关节	9.20	0.05	0.17	0.49	0.12
右肩	6.44	1.54	2.40	4.81	0.65
右肘	14.31	1.33	1.87	4.81	0.66
右腕	0.42	0.03	0.15	0.77	0.04
左肩	14.43	2.11	2.03	8.03	1.42
左肘	22.89	1.13	1.01	2.51	0.69
左腕	0.50	0.03	0.11	0.21	0.04
右侧髋关节	28.58	3.62	7.60	17.26	10.64
右侧膝关节	41.05	7.72	12.23	28.92	15.52
右侧踝关节	7.11	1.79	1.13	2.74	2.82
左侧髋关节	25.69	3.71	9.80	8.28	10.63

续表 3

关节	任务 1	任务 2	任务 3	任务 4	任务 5
左侧膝关节	39.96	7.04	13.15	25.81	14.54
左侧踝关节	6.02	1.05	1.59	2.84	4.43
总能量	234.64	33.01	58.03	113.89	63.30

4.52 kJ/min,采用安全能耗法计算维修任务实测产生的一系列动作耗能,得出标准工时,并与厂商推荐、试验测定、MOD 法预测结果对比,如图 7 所示。安全能耗法预测结果分别为 57.2、8.05、14.15、27.68 和 15.44 min。传统 MOD 法对标准时间的预测结果分别为 16.41、3.02、2.74、5.13 和 3.76 min。

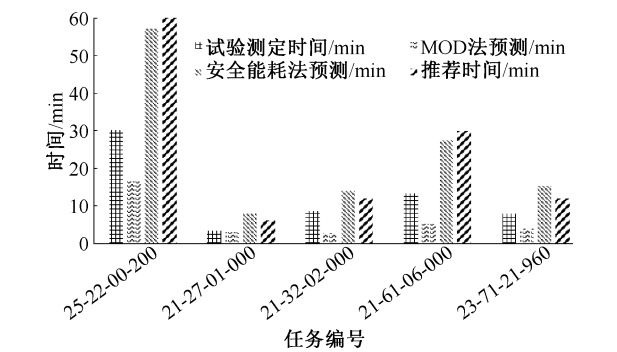


图 7 厂商推荐时间与预测时间

Fig. 7 Manufacturer recommendation time and prediction time

尽管试验中测得完成维修任务所需时间分别为 30.1、3.34、8.55、13.38 和 7.8 min,但由于测试人员在试验前后并未进行其他维修工作,其状态与实际工作中需要工作 10 h 的维修人员不同。因此,试验所得时间只能反映测试者的个人情况,不能推广为标准时间。由图 7 可看出,安全能耗法预测的工时在多数任务中与原始设备制造商 (Original Equipment Manufacturer, OEM) 推荐时间更为接近,且均大于 MOD 法预测时间和试验测定时间,表明安全能耗法在考虑人体生理承受能力的基础上,提供了更符合实际情况的工时预测。另外,安全能耗

法预测结果仅与维修任务的动作有关,与实际实测时间无关。经计算,对比 OEM 推荐的工时,安全能耗法预测结果的均方根误差为 2.582, Cohen's d 为 0.024, MOD 法预测结果的均方根误差为 23.156, Cohen's d 为 -1.104, 因此,可以得出以下结论:安全能耗法的预测精度和可靠性高于传统的 MOD 法。尽管原始设备制造商未透露具体测定方法,但文中安全能耗法预测结果与推荐时间更接近,也表明原始设备制造商所推荐时间更加注重安全性。然而,值得注意的是,在针对任务 23-71-21-960 的预测中,误差相对较大,尽管该任务主要集中于物理操作,但不可忽视的是,这些任务中仍涉及一定的认知过程。被试在参与维修试验后对任务熟练度评价较低,这可能导致在实际操作过程中出现多余的动作或工作遗漏,进而引发能量计算的波动,增加预测误差。此外,由于试验选取的任务样本数量较少,且受限于特定的试验条件,这些限制因素可能影响到结果的普适性。

3 结 论

- 1) 文中方法可预测基于安全能耗的民航维修工时,预估的工时更贴合人体的生理特性和耐受度,有助于减轻工作疲劳并降低安全风险。
- 2) 与传统的预定时间标准法相比,文中方法通过测量能量消耗来确定工时,预测结果的均方根误差与效应量远优于传统 MOD 法,其准确性与可靠性更高。
- 3) 传统工时预测模型仅关注时间参数,文中将人体能量消耗作为工时预测的核心指标,为维修性设计提供了人因工程学量化依据。
- 4) 为提升预测的准确性和可靠性,后续可从以下几个方面改进:选择更多不同类型的任务,涵盖更广泛的维修场景;模拟更接近实际工作环境的条件;量化认知过程以及宽放时间的精细化处理等。

参 考 文 献

[1] 王洁萱. 民用飞机维修性参数选取和指标确定方法研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2021(4):110-113.
WANG Jiexuan. Research on the selection of maintainability parameter and index determination method for civil aircraft[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2021(4):110-113.

[2] 杨拥民. 装备维修性设计与分析技术[M]. 北京:科学出版社, 2019:12-25.

[3] 王涛. 民航机务维修工时管理现状的思考及建议[J]. 航空维修与工程, 2022, 24(1):48-50.
WANG Tao. Suggestions and thinking on current situation of civil aviation maintenance man-hour management[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2022, 24(1):48-50.

- [4] 闵俊超. 基于 MODAPTS 的 Y 公司整椅总装业务标准工时体系改善[D]. 上海:华东理工大学, 2017.
MIN Junchao. Improvement of standard work time system of Y company based on MODAPTS[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2017.
- [5] PARK J W, KIM D Y. Standard time estimation of manual tasks via similarity measure of unequal scale time series[J]. IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 2018,48(3):241-251.
- [6] 沈玲, 张志英. 船舶铁舾件工时定额估算方法研究[J]. 工业工程与管理, 2011,16(4):96-102.
SHEN Ling, ZHANG Zhiying. Research on the work quota estimation method for ship iron outfitting pieces[J]. Industrial Engineering and Management, 2011, 16(4):96-102.
- [7] LAM S S W, ZARIBAFZADEH H, ANG B Y. Estimation of surgery durations using machine learning methods-a cross-country multi-site collaborative study [J]. Healthcare: Basel, Switzerland, 2022, 10 (7): DOI: 10. 3390/healthcare10071191.
- [8] 王骥, 郭海亮, 任肖丽. 基于蓝牙低功耗技术的智能健康监测手表系统[J]. 生物医学工程学杂志, 2017,34(4):557-564.
WANG Ji, GUO Hailiang, REN Xiaoli. Intelligent watch system for health monitoring based on Bluetooth low energy technology[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2017,34(4):557-564.
- [9] WICKENS C D, LI J D. Introduction to human factors[M]. Shanghai: East China Normal University Press, 2007: 102-117.
- [10] GB/T 10000—2023, 中国成年人人体尺寸[S].
GB/T 10000-2023, Human dimensions of Chinese adults [S].
- [11] 李诗锐, 郝优, 墨翰林, 等. 快速非刚体人运动三维重建[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2018,30(8):1 505-1 513.
LI Shirui, HAO You, MO Hanlin, et al. Fast non-rigid human motion 3D reconstruction[J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2018,30(8):1 505-1 513.
- [12] ICAO. ICAO releases new data on status of global aviation gender equality[R], 2023.
- [13] 刘钊钊, 田凌, 杨宇航. 航空虚拟维修系统关键技术[J]. 计算机集成制造系统, 2012,18(1):47-57.
LIU Beibei, TIAN Ling, YANG Yuhang. Key technologies for aviation virtual maintenance system [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012,18(1):47-57.
- [14] 王成焄. 人体骨肌系统生物力学[M]. 北京: 科学出版社, 2015:65-78.
- [15] BOLAND P, SAMIN J C, WILLEMS P Y. On the stability of interconnected rigid bodies[J]. Ingenieur-Archiv, 1973, 42(6):360-370.
- [16] BIAN Xueli, BAO Ansong, WALTER R. Optimization of steering linkage and double-wishbone suspension via R-W multi-body dynamic analysis[J]. Forschung im Ingenieurwesen, 2004,69(1):38-43.
- [17] 李端玲, 刘瑞雪. 基于 Roberson-Wittenburg 方法的变胞机构动力学研究[J]. 新型工业化, 2013,3(12):1-8.
LI Duanling, LIU Ruixue. Dynamic research of metamorphic mechanism based on Roberson-Wittenburg method[J]. The Journal of New Industrialization, 2013,3(12):1-8.
- [18] 戴建生. 旋量代数与李群、李代数[M]. 北京: 高等教育出版社, 2014:323.
- [19] BINK B. The physical working capacity in relation to working time and age[J]. Ergonomics, 1962,5(1):25-28.
- [20] 王向银, 刘坚, 蒲海蓉, 等. 基于能量分析的装配作业疲劳改善研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2010, 37(5):31-34.
WANG Xiangyin, LIU Jian, PU Hairong, et al. Research on operator fatigue improvement in assembly line based on metabolic energy expenditure[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2010,37(5):31-34.

作者简介: 郭庆 (1976—), 男, 湖南郴州人, 硕士, 教授, 主要从事航空装备综合保障等方面的研究。
E-mail: qguocauc@sina.com。