

基于虚拟现实的维修时间预计方法

张力匀¹⁾, 刘毅^{1)*}, 刘佳²⁾

¹⁾ (同济大学航空航天与力学学院 上海 200092)

²⁾ (南京航空航天大学信息化处 南京 211106)
(liuyi.chine@126.com)

摘 要: 为了实现基础层次维修动作时间的预计, 提出一种基于虚拟现实技术的基础维修时间预计方法. 该方法考虑维修仿真和宏观层次维修时间预计, 确立了基于虚拟现实的维修时间预计整体流程; 为了维修仿真和动作时间预计, 提出一种维修动作分类方法; 根据不同类型维修动作的特点, 利用其维修仿真结果, 结合动作实验、预定动作时间标准法确立了不同的方式预计理想状态下的维修动作时间; 最后将实际维修环境下的可达性、可视性、劳动强度等维修定性指标定量转化, 修正维修动作的理想时间, 最终得到更加真实的实际维修动作时间. 将文中方法应用于民用飞机维修拆卸任务的时间预计, 为产品结构设计和系统布置方案提供了权衡依据, 同时验证了该方法的可行性.

关键词: 维修时间预计; 虚拟现实; 维修仿真; 动作分类; 预定动作时间标准法
中图法分类号: TP391; TB114; F402

Maintenance Time Prediction Using Virtual Reality

Zhang Liyun¹⁾, Liu Yi^{1)*}, and Liu Jia²⁾

¹⁾ (School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092)

²⁾ (Information Department, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106)

Abstract: A maintenance time prediction method based on virtual reality technology is presented to improve the accuracy of underlying maintenance motion time prediction. First, the maintenance time prediction process based on virtual reality is established considering maintenance simulation and macroscopical maintenance time prediction. Then, a maintenance motion classification is proposed for maintenance simulation and motion time prediction, and according to the characteristics of each classification, the procedure is set up for predicting ideal maintenance motion time based on simulation results, motion experiments and predetermined time system theories. Finally, the qualitative indicators such as accessibility, visibility, and labor intensity of the actual maintenance are transformed to quantitative values to fix the ideal maintenance motion time and compute the realistic motion time of the actual maintenance. The method was applied to the time prediction of civil aircraft maintenance task for supporting decision making of the product structure design and system layout. The feasibility of this method is verified.

Key words: maintenance time prediction; virtual reality; maintenance simulation; motion classification; predetermined time system

收稿日期: 2015-09-06; 修回日期: 2016-02-02. 张力匀(1991—), 男, 硕士, 主要研究方向为数字化环境下的维修性设计分析; 刘毅(1965—), 男, 硕士, 教授, 博士生导师, 论文通讯作者, 主要研究方向为飞行器设计与系统工程、飞行器结构设计、飞行器可靠性维修保障性工程; 刘佳(1979—), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为维修性保障性工程、虚拟维修.

维修时间预计是大型复杂工业产品在概念设计阶段权衡结构设计和系统布置的重要依据,对产品的维修性及其全生命周期费用起着至关重要的作用。现有的维修时间预计方法包括时间累计法、抽样评分法等传统数学逻辑方法^[1],以及基于 MFD^[2]、GRASP^[3]、Monte Carlo^[4]等图解模型和模拟实验的仿真方法;类似地,虚拟装配领域则应用连接图、复杂性度量以及人工神经网络等方式预计时间^[5]。这些方法主要应用于基本维修作业以上层次的宏观维修时间预计,其应用基础是基本维修作业及更低层次的维修动作等基础层次的时间数据,即基础维修时间。基础维修时间主要是来源于基于物理样机的维修性实验,基于经验数据的标准时间以及相似产品的同类时间。然而,维修性实验滞后于产品设计,不能满足当前产品研发阶段系统工程的理念;标准时间和相似产品时间没有考虑当前产品的结构设计和系统布置,无法为设计权衡提供准确依据。因此,维修时间预计需要一种能够在产品设计初期如实反映结构设计和系统布置的基础维修时间预计方法。

随着数字化技术的发展,维修性工程师可以应用 VR 技术与产品设计同步开展包含人机交互的维修仿真,利用获得的仿真动画分析维修性定性指标,同时运用预定动作时间标准法(predetermined time standards, PTS)针对具体的结构设计和系统布置预计维修动作时间。孙有朝等^[6]、谢凯^[7]均利用非沉浸式的 VR 技术分析了维修性定性指标,同时采用模特法预计了维修动作时间,但其 VR 技术和模特法的使用相对独立,灵活性和集成度不高。Zhou 等^[8]结合沉浸和非沉浸式的 VR 技术分析了可视性、可达性、可拆卸性和作业姿态 4 个因素对维修动作时间的影响,并修正了方法时间衡量(methods time measure, MTM)预计的动作时间。Gironimo 等^[9]与菲亚特公司合作结合非沉浸式 VR 技术和动作实验,通过姿态评估修正了 MTM-UAS 方法预计的维修动作时间。文献[8-9]的研究修正了维修动作时间预计的精度,但预计本身仍然单纯依靠 MTM 方法。Geng 等^[10]测定了维修仿真与动作实验间的时间关系,通过时间补偿的方式预计了维修时间,具有一定的实用价值。在虚拟装配领域,Garbaya 等^[11]通过虚拟环境与真实环境下装配时间的对比分析,肯定了 VR 技术对不同装配序列时间预计的参考价值。宋丽萍等^[12]利用 VR 技术确定了船舶的手工装配时间,具有一定的实践意义。

基于 VR 技术的维修仿真结果除了定性的仿真动画,还包括大量定量的数字人运动信息,如参考坐标的移动距离、转动角度、数字人节段的自由度变化等,这些信息对维修动作时间的预计具有很大的价值,应该被充分利用。

基于 VR 的基础维修时间预计正是充分利用准确、形象、自然、逼真的维修仿真动画和数字人运动信息,结合动作实验和 PTS 预计理想情况下的维修动作时间;在此基础上,将维修性定性指标转化为对时间预计的影响系数,进一步修正初步预计的结果,从而提高基础维修时间预计的精确度和规范性,为实现高效的维修时间预计自动化奠定基础。

1 基于 VR 的维修时间预计

预计维修时间需要明确不同时间指标的层次关系。产品或系统级的维修时间指标主要有平均修复时间、平均预防性维修时间、维修事件的平均维修工时等,这些指标需要通过设备级可拆卸单元在不同故障模式下的维修事件时间值加权累计获得。维修事件一般包括准备、故障隔离、分解、更换、重装、调准、检验和启动 8 项维修活动,维修仿真主要用于其中耗时最多、最能反映结构设计和系统布置的分解、更换和重装 3 项维修活动,统称为维修拆装。维修拆装主要由基本维修作业单元构成,也包含可能的维修人员接近维修作业地点的过程。基本维修作业单元由维修动作构成,维修动作时间是最基本的维修时间单位,属于基础维修时间,也正是本文讨论的对象。本文运用 VR 技术预计基础维修时间,再逐次计算更高层次的维修时间指标,最终给设计人员提供权衡结构设计和系统布置的产品系统层次的维修时间指标。

基于 VR 的维修时间预计流程主要包括 3 个部分,如图 1 所示。

2 维修动作分类

自然人的动作是由脑和脊髓通过周围神经系统控制肌肉和骨骼完成的,动作的逻辑源于人的本能、条件反射、习惯以及经验。现有的数字人系统智能水平不高,动作需要通过手工、模型或数据的方式构建。在这样的条件下,分类维修动作可以有效地理清动作的内在逻辑,同时规则化、特征化

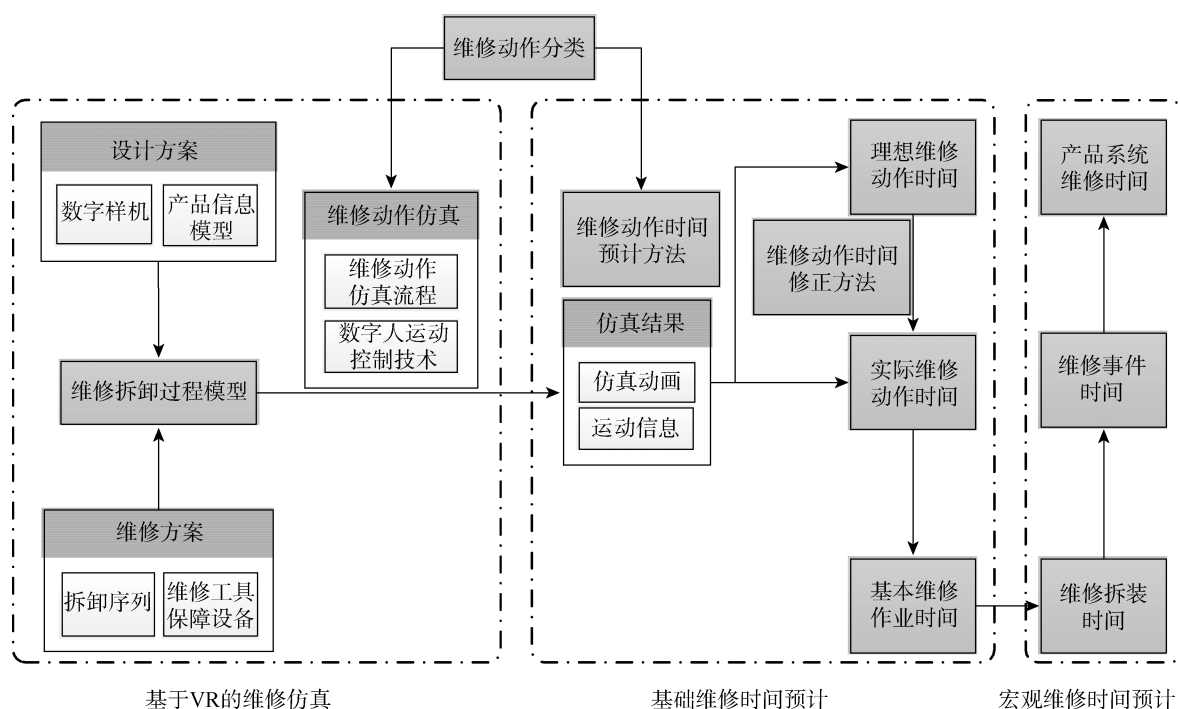


图 1 基于 VR 的维修时间预计流程

维修动作, 有助于维修仿真和动作时间预计。

动作分类的研究主要集中在 2 个方面。1) 在工业工程的动作分析中, 吉尔布雷斯夫妇将动作分为 18 种动素; 在时间测定的 PTS 中, 模特法、MTM 方法、工作因素法都有一套用于时间预计的动作分类方法^[13]。2) 维修仿真中, Vujosevic^[14]将维修动作分为基本人体运动、移动、人体姿态、对象操作和维修基元 5 类; 美国空军阿姆斯特朗实验室主导的 DEPTH 项目将维修中的数字人动作分为人体运动、对象操作、维修活动三大类数十种^[15]; Bauer 等^[16]将拆卸操作分为抓取、移动、徒手拆卸、工具拆卸 4 类。

上述分类都是结合特定的应用情景提出的, 具有较大的参考价值, 但不能完全满足在维修仿真和基础维修时间预计上的要求。本文借鉴其成果, 并考虑自身的应用情景, 提出将维修动作分为躯体移动类、姿态变换类、上肢移动类、抓取放置类、徒手操作类和工具操作类六大类动作。躯体移动类包含 21 种移动动作, 姿态变换类包括 10 种姿态间的任意变换动作, 上肢移动类由手工或模型驱动实现复杂不规则的手掌节段空间位姿变化, 抓取放置类根据特定手形完成物体和数字人间关系状态的改变, 徒手操作和工具操作类分别使用数字人手和维修工具实现对设备、连接件、紧固件的各种操作动作。由于六大类动作特点不同, 维修

仿真和动作时间预计的方法也不尽相同。

3 维修动作时间预计

基于维修动作分类, 运用 VR 技术仿真包含数字人动作和人机交互的维修拆装过程。当仿真的结果足够准确时, 则可以利用仿真动画和运动信息预计动作时间。本文在 DELMIA 人机工效学模块下仿真维修拆装过程, 使用 Automation 技术获取仿真的运动信息, 再结合作业实验、PTS、直观判断等预计不同类型动作的时间。

3.1 躯体移动类动作时间预计

躯体移动类动作近似由左右对称的动作单元交叉往复构成, 通过动作单元和单元重复频数即可表征躯体移动类动作。在躯体移动类动作时间预计前, 需要通过动作实验测定动作单元时间值 T_{BMU} 。测定项目为通用移动动作, 每个项目测量 3 组, 每组包含 10~30 个动作单元。实验对象为 25 岁、175 cm、70 kg 的中国成年男性, 处于徒手、无负重状态。表 1~2 分别为动作实验得到的部分原始数据和整理后确立的动作单元信息。

仿真躯体移动类动作时, 首先确定数字人动作单元的距离或角度, 然后通过下列代码获取始末姿态的位置信息:

```
Set iBody=iManikin.Body //获得数字人 Body
```


表 3 姿态变换类动作实验原始数据

第 N 组	顺序	姿态	直立	跪姿	俯跪	俯卧	侧卧	仰卧	坐卧	蹲姿	屈体	直立
		时刻/s	0.00	2.06	3.75	6.41	9.12	10.85	12.87	15.37	16.78	18.32
	逆序	时间/s	2.06	1.69	2.66	2.71	1.73	2.02	2.50	1.41	1.54	
		姿态	直立	屈体	蹲姿	坐卧	仰卧	侧卧	俯卧	俯跪	跪姿	直立
	平均	时刻/s	0.00	1.38	2.74	5.52	7.53	9.60	11.87	14.75	16.85	18.77
		时间/s	1.38	1.36	2.78	2.01	2.07	2.27	2.88	2.10	1.92	
平均值	顺序	姿态	直立	跪姿	俯跪	俯卧	侧卧	仰卧	坐卧	蹲姿	屈体	直立
		时间/s	2.032	1.744	2.714	2.632	1.854	2.022	2.238	1.426	1.408	
	逆序	变异系数	0.049	0.059	0.024	0.054	0.055	0.074	0.085	0.048	0.154	
		姿态	直立	屈体	蹲姿	坐卧	仰卧	侧卧	俯卧	俯跪	跪姿	直立
	平均	时间/s	1.398	1.350	2.742	1.822	1.878	2.164	2.966	1.918	2.082	
		变异系数	0.163	0.034	0.028	0.089	0.063	0.089	0.041	0.075	0.055	

表 4 姿态变换类动作时间数值

变换单元		时间/s	
姿态 1	姿态 2	正向	逆向
直立	坐姿	1.46	1.44
直立	跪姿	2.03	2.08
跪姿	俯跪	1.74	1.92
俯跪	俯卧	2.71	2.97
俯卧	侧卧	2.63	2.16
侧卧	仰卧	1.85	1.89
仰卧	坐卧	2.02	1.82
坐卧	蹲姿	2.24	2.74
蹲姿	屈体	1.43	1.35
屈体	直立	1.41	1.40

根据位置信息计算手掌移动距离, 然后判断手中是否持有物体:

Set $iRHObjectNum = myRH.AttachSize$

//获取数字人右手持有物体数量, 若 $iRHObjectNum=0$, 右手不持有物体; 若 $iRHObjectNum>0$, 则右手持有物体.

当判断结果为持有物体时, 进一步获取物体的产品节点, 并提取质量属性 W_i

Set $iAttachObject = iRH.GetAttachObject(i)$ ($i = 0$ To $myRHObjectNum - 1$).

完成上述仿真信息获取之后, 对于不持有物体的上肢移动类动作, 参照 MTM 方法伸手动作形态 I 型 A 类标准^[13]如表 5 所示, 由手掌移动距离预计动作时间 $T_{ULM} = t(b | D \in (a, b])$.

对于持有物体的上肢移动类动作, 参照 MTM 方法搬运动作 C 类标准和质量修正^[13], 如表 6~7 所示, 由手掌移动距离以及持有物体的总质量预计动作时间

$$T_{ULM} = t^*(b | D \in (a, b]) \times \alpha(d | \sum W_i \in (c, d]) + C(d | \sum W_i \in (c, d]).$$

其中, W_i 为质量系数; C 为质量常数. 若物体为双手持有, 则将 W_i 替换为 $W_i/2$.

表 5 MTM 方法伸手动作形态 I 型 A 类时间标准

距离/mm	时间/s	距离/mm	时间/s	距离/mm	时间/s
20	0.07	200	0.28	500	0.49
40	0.12	220	0.29	550	0.50
50	0.16	240	0.31	600	0.53
80	0.20	260	0.32	650	0.56
100	0.22	280	0.33	700	0.59
120	0.23	300	0.34	750	0.62
140	0.25	350	0.37	800	0.66
160	0.26	400	0.41		
180	0.27	450	0.44		

表 6 MTM 方法搬运动作 C 类时间标准

距离/mm	时间/s	距离/mm	时间/s
20	0.07	280	0.52
40	0.16	300	0.54
60	0.21	350	0.61
80	0.25	400	0.67
100	0.28	450	0.72
120	0.32	500	0.79
140	0.35	550	0.85
160	0.38	600	0.91
180	0.40	650	0.97
200	0.42	700	1.03
220	0.45	750	1.09
240	0.47	800	1.17
260	0.49		

表 7 MTM 方法搬运动作质量修正

质量/kg	系数	补偿时间/s
1	1.00	0
2	1.04	0.06
4	1.07	0.10
6	1.12	0.16
8	1.17	0.21
10	1.22	0.26
12	1.27	0.32
14	1.32	0.37
16	1.36	0.43
18	1.41	0.48
20	1.46	0.54
22	1.51	0.59

3.4 抓取放置类动作时间预计

抓取放置单纯的动作时间仅为手形变化时间, 手形变化由灵活度最高的手指节段完成, 耗时间极短, 几乎可以忽略不计. 与实际情况不同, 本文预计的抓取放置类动作时间主要是手形变化之外维修人员抓取放置时判断、选择、调校的时间, 其反映了产品结构设计和设备布置的信息. 综合考虑模特法和 MTM 方法中与本文抓取放置含义相关的动作时间标准^[13], 得到的抓取放置类动作时间如表 8 所示. 根据抓取放置类动作的仿真动画判断抓取和放置的类型, 可预计其动作时间 T_{GR} .

3.5 徒手和工具操作类动作时间预计

徒手操作和工具操作在维修仿真中涉及到工

表 8 抓取放置类动作时间

类型	时间/s	说明
抓取 I	0	手与非工具类物体关系由“操作”转为“持有”, 即徒手操作动作后紧随的抓取动作, 操作完成时物体随即处于“持有”状态
抓取	0.13	一般抓取动作, 无需特别注意, 动作轻松自然
抓取	0.39	物体体积较小 物体周围有障碍物 物体与其他物体混杂 物体易碎、易变形 物体有特殊的抓取部位要求
放置	0	一般放置动作, 无需特别注意, 放置于大概位置, 放置后状态无要求
放置	0.26	放置需要注意, 放置位置有一定要求, 放置后状态有一定要求
放置	0.65	放置动作全程高度注意, 放置位置和放置状态有精确要求, 需要调校 手和非工具类物体关系由“持有”转为“操作”, 即紧随有徒手操作动作的放置动作, 包含徒手操作动作中的定位

具持有方式、运动坐标系偏移等问题, 仿真方法有所区别. 但本文对这 2 类动作时间的预计则只与节段自由度的变化有关, 因此一同论述.

不同于上肢移动类动作, 操作类动作的运动随机性大、动作数量多、上肢关节变动复杂且运动轨迹往往不是直线, 不能简单通过手掌的移动距离预计动作时间. 根据模特法中移动距离等价参与运动节段的概念^[13], 分析运动中节段自由度变化情况也可以间接预计动作的时间, 过程如下:

Step1. 需要考虑的节段自由度包括: 上臂屈曲/伸展 θ_{AFE} 、外展/内收 θ_{AAA} 、旋内/旋外 θ_{AML} ; 前臂屈曲/伸展 θ_{FFE} 、旋前/旋后 θ_{FPS} ; 手掌屈曲/伸展 θ_{HFE} 、手桡侧倾/手尺侧倾 θ_{HRU} . 通过代码

Set $iDOF=iRH.GetItem("DOF1")$

可以获得任意姿态下节段自由度(以右手屈曲/伸展自由度为例)的数值.

Step2. 由于一般操作动作节段自由度变化复杂, 因此需要将其分解为更易于分析的单调操作运动. 单调操作运动指由一个或多个节段自由度参与, 单调且不停顿变化的上肢运动.

Step3. 参考模特法判定单调操作运动的级别并确定其运动时间 T_{MOM} . 手指、手掌、前臂、上臂的灵活度依次递减, 相应的节段自由度在变化程度相同时耗费的时间依次递增, 可以根据耗费的时间, 结合参与的节段将单调操作运动分为超上臂级、上臂级、前臂级、手掌级和手指级 5 个级别.

Step4. 将通过判定确定的所有单调操作运动的时间 T_{MOM} 累加, 即可得到操作动作的时间 $T_O = \sum T_{MOMi}$. 其中, Step3 中运动级别判定是最重要和最核心的部分.

以超上臂级运动的判定为例, 其推导过程如下:

Step1. 超上臂级运动的判定涉及的节段自由度如图 3 所示. 模特法中超上臂级运动对应的运动时间为 0.645 s, 等价运动距离为 450 mm^[13]. GB-10000 中 50 百分位数的成年男性上臂、前臂、手掌的长度分别为 313 mm, 237 mm 和 182 mm^[17].

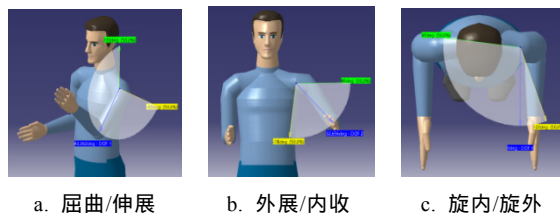


图 3 上臂节段自由度

Step2. 运动中屈曲/伸展、外展/内收自由度的变化可以合成为绕肩关节的旋转运动, 自由度和旋转角度间的关系为

$$\theta_A = \arcsin\{\sin^2(\theta_{AFE1} + \theta_{AFE2}) + \cos^2 \theta_{AFE1} \cos^2 \theta_{AFE2} \sin^2(\theta_{AAA1} - \theta_{AAA2}) - \frac{1}{2} \sin 2\theta_{AFE1} \sin 2\theta_{AFE2} [\cos(\theta_{AAA1} - \theta_{AAA2}) + 1]\}^{\frac{1}{2}}.$$

运动中指尖可能的最大旋转半径为上臂、前臂、手掌的总长 732 mm. 当指尖以最大旋转半径移动 450 mm 的距离时, 旋转角度为 35.8°.

Step3. 运动中旋内/旋外自由度的变化对应为上臂绕节段轴线的自传运动, 运动中指尖可能的最大转动半径为前臂、手掌的总长 419 mm. 当指尖以最大旋转半径移动 450 mm 的距离时, 自转角度为 65.0°.

Step4. 将上述求得的角度作为判定超上臂级运动的临界值, 则超上臂级运动的判定标准为

$$\theta_A \geq 35.8^\circ \text{ 或 } |\theta_{AML2} - \theta_{AML1}| \geq 65.0^\circ,$$

运动时间 $T_{MOM}=0.645$ s. 同理, 上臂级运动 $T_{MOM}=0.516$ s, 判定标准为

$$\begin{cases} \theta_A < 35.8^\circ \text{ 且 } |\theta_{AML2} - \theta_{AML1}| < 65.0^\circ \\ \theta_A \leq 11.8^\circ \text{ 或 } |\theta_{AML2} - \theta_{AML1}| \geq 42.0^\circ \end{cases}$$

前臂级运动 $T_{MOM}=0.387$ s, 判定标准为

$$\begin{cases} \theta_A < 11.8^\circ \text{ 且 } |\theta_{AML2} - \theta_{AML1}| < 42.0^\circ \\ |\theta_{FFE2} - \theta_{FFE1}| \geq 20.6^\circ \text{ 或 } |\theta_{FPS2} - \theta_{FPS1}| \geq 48.7^\circ \end{cases}$$

手掌级运动 $T_{MOM}=0.258$ s, 判定标准为

$$\begin{cases} \theta_A < 11.8^\circ \text{ 且 } |\theta_{AML2} - \theta_{AML1}| < 42.0^\circ \\ |\theta_{FFE2} - \theta_{FFE1}| < 20.6^\circ \text{ 且 } |\theta_{FPS2} - \theta_{FPS1}| < 48.7^\circ, \\ \theta_H \geq 15.8^\circ \end{cases}$$

其中 θ_H 与 θ_A 计算方式相同. 手指级运动 $T_{MOM}=0.129$ s, 判定标准为

$$\begin{cases} \theta_A < 11.8^\circ \text{ 且 } |\theta_{AML2} - \theta_{AML1}| < 42.0^\circ \\ |\theta_{FFE2} - \theta_{FFE1}| < 20.6^\circ \text{ 且 } |\theta_{FPS2} - \theta_{FPS1}| < 48.7^\circ, \\ \theta_H < 15.8^\circ \end{cases}$$

4 维修动作时间修正

第3节中躯体移动类、姿态变换类、抓取放置类动作时间的预计已经反映了数字人与维修环境的交互关系. 而上肢移动类、徒手和工具操作类动作时间的预计则是基于空间足够开敞、视野足够清晰、作业姿态足够舒适的生产流水线熟练工人的操作动作, 其真实维修动作的时间需要考虑维修任务中人机交互关系来补偿和修正预计的时间值. 由于本文主要针对大型设备的维修任务, 其维修人员上岗前需要经过严格的培训考核, 维修任务也有标准规范的维修流程, 因此忽略操作熟练度和学习曲线等相关的影响.

维修性定性指标中的可达性、可视性、劳动强

度能够充分反映维修人员与维修环境间的交互关系, 可用于补偿和修正理想状态下预计的动作时间. 而当前的 VR 技术可以用来评估维修过程中的可达性和可视性, 但由于现有数字人生物力学模型的不完善, 劳动强度指标只能够通过作业姿态评估部分表征.

下面基于维修仿真分析评估维修拆卸过程中的可达性、可视性和作业姿态, 将分析结果用于补偿和修正预计的理想动作时间.

可达性对动作时间的影响主要体现在维修空间和操作间隙上, 若数字人在最合理运动的行程中与维修环境发生干涉, 则数字人只能回避干涉, 采用效率更低的动作, 对应的维修时间必然增加. 本文将可达性影响等级分为 4 级, 影响等级根据仿真结果直观判断, 如表 9 所示. 判断标准中, 理想最佳行程是指数字人和维修工具与虚拟维修环境不存在干涉时, 维修动作效率最高的行程; 理想基本行程是指数字人和维修工具与虚拟维修环境不存在干涉时, 维修动作极限以内, 完成拆装任务所必须保证的行程(如使用扳手拧动六角螺母最小需要 60°的行程); 常规手形是指数字人和维修工具与虚拟维修环境不存在干涉时, 特定操作最合理、最舒适的手形或特定工具最合理、最舒适的持有手形. 修正率 R_A 的数值来源于 MTM 方法伸手 C 或 D 类、搬运 C 类与均值的比值分析结果以及拆卸操作困难和容易的比值分析结果^[13].

表 9 可达性影响等级评估

修正率	可达性
0	数字人的上肢和工具在理想最佳行程中不存在任何碰撞干涉
0.2	数字人的上肢或工具在理想最佳行程中存在碰撞干涉, 但在理想基本行程中不存在任何碰撞干涉
0.5	数字人以常规手形在理想基本行程中存在碰撞干涉, 调整为非常规手形则可以避免干涉; 同时, 工具始终不存在任何碰撞干涉
	数字人以非常规手形在理想基本行程中存在碰撞干涉或工具存在碰撞干涉, 此情况下, 设计人员必须更改设计方案或维修方案

可视性影响动作时间是由于视觉反馈可以提高动作的效率和精度, 缺乏视觉反馈时动作只能依靠触觉和经验, 相应的动作时间必然增加, 而增加的时间主要用于定位. 本文将可视性对动作时间的影响分为 4 个等级, 由维修仿真中的可视窗口(如图 4 所示)和相关的判定标准确定, 如表 10 所示, 其中修正率 R_V 的数值通过分析 MTM 方法中定位动作困难和容易情况下的时间比值获得^[13].

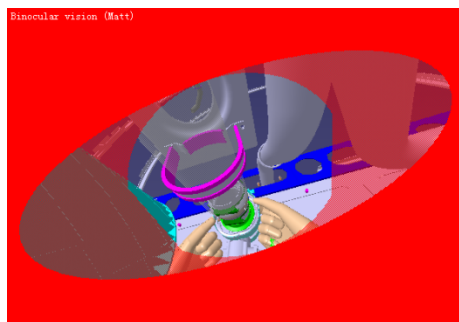


图 4 拆卸卡箍动作的可视窗口

表 10 可视性影响等级评估

修正率	可视性
0	工具、对象和数字人动作手完全处于视野范围内且未被遮挡
0.3	工具、对象或数字人动作手少部分处于视野范围外或被遮挡
0.5	工具、对象或数字人动作手大部分处于视野范围外或被遮挡
1.0	工具、对象或数字人动作手几乎完全处于视野范围外或被遮挡

作业姿态会影响动作灵活度和疲劳程度, 进而通过动作效率和疲劳宽放影响维修动作时间. 本文采用文献[9]中的方法确定作业姿态对动作时间的修正率. 首先基于维修仿真获得下腰压力分析(low back compression analysis, LBA), Ovako 劳动姿态分析(Ovako working posture analysis system, OWAS), 快速上肢评估(rapid upper limb assessment, RULA)等作业姿态评估指标; 然后综合这些指标确定动作的姿态评估指数(posture evaluation index, PEI)

$$PEI = \frac{LBA}{3400} + \frac{OWAS}{3} + \frac{RULA}{5};$$

最后根据 PEI 值确定作业姿态修正率

$$R_p = \begin{cases} 0.11 \times (PEI - 1), & 1 \leq PEI < 2 \\ 0.41 \times (PEI - 2) + 0.11, & 2 \leq PEI < 3 \\ 0.52, & PEI \geq 3 \end{cases}$$

基于上述可达性、可视性、作业姿态的分析, 即可补偿和修正理想状态下预计的上肢移动类、徒手和工具操作类动作时间

$$T^* = T \times (1 + R_A + R_V + R_p);$$

其中 $1 + R_A + R_V + R_p$ 称为修正系数.

5 实例

本文方法以 DELMIA 人机工效学设计与分析模块为基础, 应用 Automation 技术二次开发. 该

方法的前提是从维修仿真文件中获取数字人对象:

```
Set iProduct=DELMIA.ActiveDocument.PPR-Document.
Resources.Item("产品 1.1") //获取 ResourceList 中的数字人
所属 Product 节点
```

```
Set iManikinProduct=iProduct.Products.Item("Manikin1")
//获取数字人所属 Product 对象
```

```
Set iManikin=iManikinProduct.GetTechnologicalObject
("Manikin") //获取 Product 中 Manikin 对象
```

将文中方法实际应用于民用飞机货舱关断活门维修拆卸过程的时间预计. 首先进行维修拆卸过程建模, 将过程分解至基本维修作业单元; 然后根据过程模型按顺序依次仿真基本维修作业单元中的上肢接近类、抓取放置类、徒手和工具操作类动作, 以及单元间的躯体移动类、姿态变换类动作, 如图 5 所示; 再由维修仿真结果预计各类动作的理想时间, 并确定对应的可达性、可视性、作业姿态的修正系数, 计算得到真实的维修动作时间, 如表 11 所示; 最后累加真实的维修动作时间, 获得拆卸过程总的维修时间 178.12 s, 如表 12 所示.

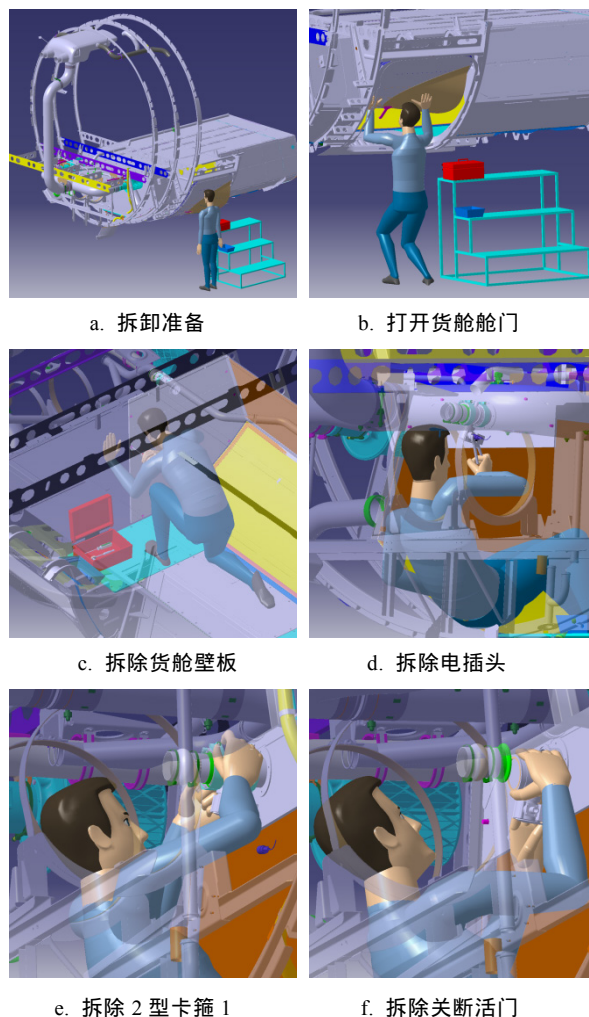


图 5 货舱关断活门拆卸的维修仿真

表 11 拆除 2 型卡箍 1 维修动作时间

维修动作名称	维修动作类型	理想动作 时间/s	修正系数	实际动作 时间/s
抓取棘轮扳手	上肢接近	0.20	1.74	0.35
	抓取放置	0.13		0.13
拧松螺母	上肢接近	0.66	1.00	0.66
	工具操作	9.29	1.52	14.12
放置棘轮扳手	上肢接近	0.66	1.74	1.15
	抓取放置	0		0
拧下螺母	上肢接近	0.72	1.64	1.18
	徒手操作	1.16	1.82	2.11
	抓取放置	0		0
放置螺母	上肢接近	0.78	1.74	1.36
	抓取放置	0		0
拆下卡箍	上肢接近	0.78	1.64	1.28
	徒手操作	0.90	2.02	1.82
	抓取放置	0		0
放置卡箍	上肢接近	0.72	1.74	1.25
	抓取放置	0.26		0.26
总计		16.26		24.67

表 12 货舱关断活门拆卸维修时间

项目名称	维修动作数量	维修动作时间/s
打开货舱舱门	9	6.17
基本 维 修 作 业 单 元	拆除货舱壁板	18
	拆除电插头	11
	拧松 1 型卡箍 1	4
	拧松 1 型卡箍 2	4
	拆除 2 型卡箍 1	16
	拆除 2 型卡箍 2	16
	拆除关断活门	8
小计	86	126.97
躯体移动类	22	37.06
姿态变换类	5	15.09
总计	113	178.12

6 结 语

本文基于 VR 技术, 利用维修仿真结果, 结合动作实验和 PTS 预计了基础维修时间中的维修动作时间。本文将维修动作分为六大类, 利用仿真动画和数字人运动信息, 根据各类动作特点, 采用不同方法预计理想的动作时间; 然后基于维修定性指标补偿和修正理想动作时间, 得到更加真实的动作时间。将文中方法应用于设计阶段中的某型号飞机货舱关断活门维修拆卸任务的分析, 验

证了该方法的可行性, 并从维修性的角度为设计人员权衡设计提供了依据。今后, 我们将对照分析本文方法预计的时间与该型号飞机交付后真实维修任务的时间, 并改进该方法, 进一步提高预计的精确度; 同时, 还将基于更深层次的 CAA 二次开发平台实现维修仿真到维修时间预计的自动化, 进一步提高预计的效率和规范性。

参考文献(References):

- [1] GJB Z57-94—1994 Maintainability allocation and prediction handbook[S](in Chinese)
(GJB Z57-94—1994 维修性分配与预计手册[S])
- [2] Nie Chenglong, Zhu Xiaodong, He Yingde. Maintenance-flow-diagram-based maintenance time simulation[J]. Computer Simulation, 2005, 22(3): 41-43+47(in Chinese)
(聂成龙, 朱小冬, 何应德. 基于维修流程框图的维修时间仿真研究[J]. 计算机仿真, 2005, 22(3): 41-43+47)
- [3] Zhang Liu, Yu Yongli. GRASP based maintenance time and man-hour model[J]. China Mechanical Engineering, 2002, 13(7): 577-579(in Chinese)
(张 柳, 于永利. 基于 GRASP 的系统维修时间和维修工时模型[J]. 中国机械工程, 2002, 13(7): 577-579)
- [4] Liu Duan, Hu Jianbo, Ge Xiaokai, et al. Monte carlo simulation of maintenance time based on system maintenance work procedure[J]. Fire Control & Command Control, 2014, 39(7): 119-123(in Chinese)
(刘 端, 胡剑波, 葛小凯, 等. 基于系统维修作业流程的维修时间 MC 仿真[J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(7): 119-123)
- [5] Owensby J E, Summers J D. Assembly time estimation: assembly mate based structural complexity metric predictive modeling[J]. Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2014, 14(1): Article No.011004
- [6] Sun Youchao, Huang Jinyong, Wang Wei. Quantitative evaluation method of product disassembly based on parts failure rate and disassembly time[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(13): 147-154(in Chinese)
(孙有朝, 黄进永, 王 伟. 基于零件故障率和拆卸时间的产品拆卸性定量评估方法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(13): 147-154)
- [7] Xie Kai. Research on maintainability analysis and evaluation methods of high-speed train cab's equipments[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University. School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, 2011(in Chinese)
(谢 凯. 高速列车司机室设备可维修性评估方法研究[D]. 北京: 北京交通大学机械与电子控制工程学院, 2011)
- [8] Zhou D, Kang L, Lv C. A virtual reality-based maintenance time measurement methodology for complex products[J]. Assembly Automation, 2013, 33(3): 211-230
- [9] Gironimo G D, Martino C D, Lanzotti A, et al. Improving MTM-UAS to predetermine automotive maintenance times[J]. International Journal on Interactive Design and Manufacturing, 2012, 6(4): 265-273
- [10] Geng J, Lv C, Zhou D, et al. Compensation-based methodology for maintenance time prediction in a virtual environment[J].

- Simulation Modelling Practice and Theory, 2014(47): 92-109
- [11] Garbaya S, Coiffet P, Blazevec P. Experiments of assembly planning in virtual environment[C] //Proceedings of the IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2003: 85-89
- [12] Song Liping, Fan Xiumin, Ma Dengzhe. Research on interactive ship assembly sequence planning in virtual reality environment[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2006, 12(6): 862-867(in Chinese)
(宋丽萍, 范秀敏, 马登哲. 虚拟现实环境下交互式船舶装配序列规划研究[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(6): 862-867)
- [13] Yi Shuping, Guo Fu. Fundament of industry engineering[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2014(in Chinese)
(易树平, 郭 伏. 基础工业工程[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2014)
- [14] Vujosevic R. Maintainability analysis in concurrent engineering of mechanical systems[J]. Concurrent Engineering: Research and Applications, 1995, 3(1): 61-73
- [15] Vujosevic R, Ianni J. A taxonomy of motion models for simulation and analysis of maintenance tasks[R]. Ohio: Wright-Patterson AFB. Armstrong Laboratory, 1996
- [16] Bauer M D, Siddique Z, Rosen D W. Virtual prototyping in simultaneous product/process design for disassembly[M] //Dong J. Rapid Response Manufacturing: Contemporary Methodologies, Tools and Technologies. New York: Springer Press, 1998: 141-175
- [17] GB/T 10000—1988 Human dimensions of Chinese adults[S] (in Chinese)
(GB/T 10000—1988 中国成年人人体尺寸[S])

~~~~~

(上接第 1382 页)

- [11] Iyer N, Jayanti S, Lou K, *et al.* Shape-based searching for product lifecycle applications[J]. Computer-Aided Design, 2005, 37(13): 1435-1446
- [12] Wang Yu, Ma Haojun, He Wei, *et al.* Clustering & retrieval of mechanical 3D CAD models[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2006, 12(6): 924-928+934(in Chinese)  
(王 玉, 马浩军, 何 玮, 等. 机械 3 维 CAD 模型的聚类 and 检索[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(6): 924-928+934)
- [13] Li Shan, Shi Yuan, Liu Hongjun. Three-dimensional model clustering analysis based on ART2 neural network[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(9): 1865-1872(in Chinese)  
(李 山, 石 源, 刘红军. 基于 ART2 网络的三维模型聚类分析方法[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(9): 1865-1872)
- [14] Tao S Q, Huang Z D, Ma L J, *et al.* Partial retrieval of CAD models based on local surface region decomposition[J]. Computer-Aided Design, 2013, 45(11): 1239-1252
- [15] Tao S Q, Wang S T, Chen A H. 3D CAD solid model retrieval based on region segmentation[J]. Multimedia Tools and Applications, 2015, First online: 1-19
- [16] Li Z, Zhou X H, Liu W. A geometric reasoning approach to hierarchical representation for B-rep model retrieval[J]. Computer-Aided Design, 2015, 62: 190-202
- [17] Liu Z B, Bu S H, Zhou K, *et al.* A survey on partial retrieval of 3D shapes[J]. Journal of Computer Science and Technology, 2013, 28(5): 836-851
- [18] Li Xiaolei, Shao Zhijiang, Qian Jixin. An optimizing method based on autonomous animates: fish swarm algorithm[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2002(11): 32-38(in Chinese)  
(李晓磊, 邵之江, 钱积新. 一种基于动物运动自治体的寻优模式: 鱼群算法[J]. 系统工程理论与实践, 2002(11): 32-38)
- [19] Mukherjee J, Mukhopadhyay J, Mitra P. A survey on image retrieval performance of different bag of visual words indexing techniques[C] //Proceedings of the 3rd IEEE Students' Technology Symposium. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2014: 99-104
- [20] Ma Lujie, Huang Zhengdong, Liang Liang, *et al.* An approach to surface region decomposition for CAD models[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2009, 21(2): 148-153(in Chinese)  
(马露杰, 黄正东, 梁 良, 等. CAD 模型表面区域分割方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2009, 21(2): 148-153)
- [21] West D B. Introduction to graph theory[M]. 2nd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001
- [22] McWherter D, Regli W C. An approach to indexing databases of solid models[R]. Philadelphia: Drexel University, 2001
- [23] Liu Y, Zha H B, Qin H. Shape topics: a compact representation and new algorithms for 3D partial shape retrieval[C] //Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2006: 2025-2032
- [24] Lian Z H, Godil A, Sun X F. Visual similarity based 3D shape retrieval using bag-of-features[C] //Proceedings of the Shape Modeling International Conference. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2010: 25-36
- [25] Tao Songqiao. Research on design oriented CAD model retrieval[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2012  
(陶松桥. 面向设计的三维 CAD 模型检索技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012)
- [26] Zhang Kaixing, Zhang Shusheng, Li Liang. A method of 3D CAD model retrieval based on ant colony algorithm[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2011, 23(4): 633-639(in Chinese)  
(张开兴, 张树生, 李 亮. 基于蚁群算法的三维 CAD 模型检索[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2011, 23(4): 633-639)