

面向飞机总装的人机工程仿真技术*

张永建, 景世才, 唐健钧, 赵佩, 张鹏营, 郑博

(航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610091)

[摘要] 为了提高飞机总装的装配质量、缩短飞机总装的生产周期、降低飞机总装的生产成本, 根据飞机总装的装配工艺特点, 研究了飞机虚拟装配人机工程仿真的建模方法和人机工效仿真的分析方法, 并基于 3DExperience 软件系统平台对飞机总装人机工程仿真分析技术进行了应用。

关键词: 人机工程; 3DExperience; 飞机装配; 仿真; 虚拟现实

Ergonomic Simulation Technology for Aircraft Final Assembly

ZHANG Yongjian, JING Shicai, TANG Jianjun, ZHAO Pei, ZHANG Pengying, ZHENG Bo

(AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610091, China)

[ABSTRACT] In order to improve the quality of the aircraft final assembly, shorten the manufacturing cycle of aircraft assembly, reduce the manufacturing cost, the paper researched the modeling method of aircraft virtual assembly ergonomics simulation and the analysis method of ergonomics simulation, according to the characteristics of the final assembly process. And the ergonomic simulation technology of the aircraft final assembly is applied based on the 3DExperience software.

Keywords: Ergonomics; 3DExperience; Aircraft assembly; Simulation; Virtual reality

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2018.20.096

人机工程学是通过利用生理学、心理学、生物力学、测量学、环境工程学等学科的原理、理论、数据和方法, 对人体结构、特性、受力等方面进行研究的新兴学科。随着计算机图形学、虚拟现实、计算机辅助设计等计算机技术的迅猛发展, 人机工程学理论通过利用计算机技术得到了较为广泛的应用与发展, 计算机辅助人机工程早已是国内外科学者关注与研究的焦点。

南京航空航天大学杨明等^[1]研究了人机工程仿真中的人体运动分析的原理方法, 并利用 DELMIA 软件阐述了人机工程仿真分析的实例应用, 从而验证了人机工程虚拟装配仿真在装配设计阶段的重要性。北京航空航天大学王占海等^[2]基于 DELMIA 研究了飞机维修性的虚拟仿真分析流程和方法, 对飞机维修性仿真分析过程中虚拟场景构建、维修仿真过程和维修性的人机工程分析与评价用到的关键技术进行了较为详细的研究。浙江大学罗仕鉴等^[3]就虚拟环境中人机工程评价的需求, 提出了综合人机工程咨询系统、仿真系统和评价系统于一体的计算机辅助人机工程仿真分析方法, 对人体测量、人体建模方法、虚拟人运动建模、人机工程评

价机制等关键技术进行了研究, 并利用 TCL 在 Jack2.0 的基础上二次开发出了计算机辅助人机工程设计系统——ZUCC 1.0。哈尔滨工业大学 Zhao 等^[4]研究了基于 DELMIA 虚拟装配环境构建的流程和方法, 以及虚拟装配仿真的人工操作工艺, 并以螺钉固定和零件搬运为例说明了虚拟环境中的人机工程仿真技术的重要性。吉利汽车研究院有限公司 Gao 等^[5]利用 DELMIA 软件创建了各种型号的工装工具等设备标准数据库、工序耗时标准数据库和工作空间的三维模型, 从而建立车体 3D 模型、PBOM 和 MBOM 的关联关系, 对汽车装配生产进行了零件可达性、装配空间合理性、操作人员可视性、操作便捷性和不同姿势的人体肢体疲劳进行了仿真分析, 并对装配零件干涉、操作盲区、肢体疲劳和装配操作复杂等装配工艺进行了优化。

飞机的电缆、环控系统、液压系统、大部件等零组件的装配工作是在飞机总装阶段完成的任务, 并且飞机具有装配质量要求高、生产数量较少的特点, 因此在飞机总装过程中绝大部分零组件的装配工作是由工人手工完成的。针对飞机总装装配工艺进行人机工程仿真, 可提前发现装配工艺方案或产品设计方案的不足之处, 大大提高产品设计方案的合理性及装配工艺方案的可行

* 基金项目: 中国制造 2025 四川行动资金项目“飞机移动式总装智能生产线”。

行性,降低实际生产中零组件的装配操作难度。人机工程仿真对缩短飞机总装阶段的生产周期、降低总装的生产制造成本具有重大意义。

本文根据飞机总装过程中手工操作生产的特点,对基于 3DExperience 的飞机虚拟装配人机工程仿真分析评价的方法进行了研究,详述了人机工程仿真分析模型的构建方式,提出了人机工效分析中可视性、可达性与劳动强度的分析方法。

1 人机工程模型构建

在虚拟环境中进行飞机装配工艺的人机工程仿真分析与验证,必须首先创建一个与实际生产相近似的虚拟装配空间,主要包括数字样机模型、工装工具模型、虚拟人体模型和虚拟生产场景等。数字样机的设计任务由飞机设计研究所完成,在进行飞机装配仿真时将研究所提供的数字样机的工艺模型直接导入到虚拟装配生产空间中即可。本文主要对飞机装配仿真环境中的工装工具模型、人体模型和生产场景的创建方法进行阐述。

1.1 工装工具建模

在飞机装配过程中运用的工装工具根据其应用对象或应用工序范围可分为专用型和通用型两种。飞机装配的通用工装有工作梯、千斤顶定位器等;专用工装有环形散热器的装配工装、发动机安装平台、大部件对接平台等。工人进行工序操作时用的通用工具有螺丝刀、扳手、剪刀、钳子等;专用工具有保险钳、电动螺钉旋器和塞规等。

3DExperience 软件提供符合欧洲、美国、中国标准的部分通用和专用工具模型,仿真分析人员可直接从服务器端的数据库中直接调用所需类别和参数的通用工具。飞机装配过程中的装配型架、工作梯、环形散热器装配工装等是由技术装备公司根据飞机装配生产需求设计完成的,此类工装模型由技术装备公司提供,仿真分析人员根据仿真分析需求导入相应的装配工装即可。而针对电动螺钉旋器、保险钳等采购的专用工具,则需联系供应商提供工具的外形数模或者利用 3DExperience 软件的零组件设计模块创建工具的大致模型。

1.2 人体模型建立

在虚拟环境中创建“虚拟人”和创建产品的三维模型存在很多不同之处,“虚拟人”是通过综合人体结构模型、人体运动模型、人体动力模型以及人机评价标准等信息模型创建的,是计算机辅助人机工程设计(Computer Aided Ergonomics Design, CAED)的关键技术^[3,6]。三维虚拟环境中的人体模型根据其精确度、逼真度和应用范围的不同,可分为:棒模型、表面结构模型

和层次模型^[7]。基于 3DExperience 软件创建的虚拟人体模型是根据人体的基本骨架结构、外形结构、骨骼关节关系以及关节运动约束关系简化后构建的层次型人体结构模型,如图 1 所示。

3DExperience 软件秉承了交互式企业数字化精益生产应用程序(Digital Enterprise Lean Manufacturing Interactive Application, DELMIA) Human Task Simulation 模块中人体模型创建的方式方法。创建人体模型的方法有:(1)以软件本身现有的人体知识库和数据库为基础,通过设置性别、身高、体重等参数,从数据库中调用虚拟人体模型;(2)连接我国现有的人体测量数据库 GB/T 和 JB/T,或者参考国家标准 GB/T 15759—1995 和中国成年人人体尺寸统计数据 GB 10000—88 创建较为精准的中国人体虚拟模型^[4],然后存储于系统平台服务器端的数据库中,以便仿真分析人员根据人体特征参数检索调用所需的人体模型;(3)利用非接触式单位数字测量器对飞机总装阶段现场的操作人员进行三维人体模型数据采集,然后结合人体运动模型、人际评价标准模型,创建、存储人体模型于人机工程系统服务器端的数据库中,以便仿真分析人员进行检索、调用和建立人体模型^[1]。

1.3 虚拟场景创建

虚拟场景的构建是在导入飞机数字样机模型、工装工具模型、人体模型以及生产环境模型的基础之上,利用 3DExperience 软件中人体基本动作设计功能模块,完成人体装配工艺操作的定义,同时建立起飞机机体模型、零组件、装配工装工具模型、虚拟人体模型以及生产环境模型的关联关系,从而完成飞机人机工程仿真的虚拟场景的构建。

在 3DExperience 中的人体运动仿真分析模块提供了人体基本动作,如走路、上下楼梯、抓取、搬运物体等

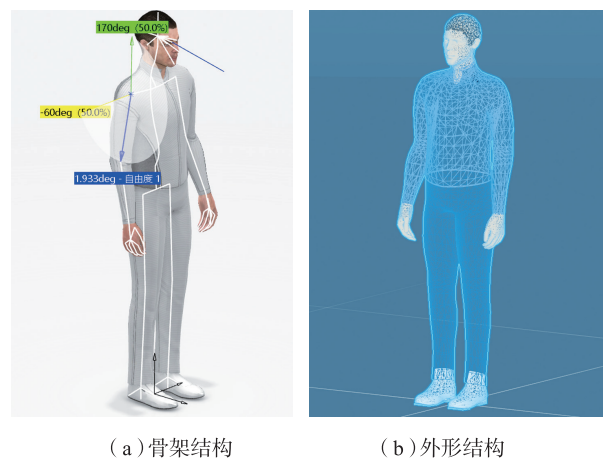


图1 层次型人体结构模型

Fig.1 Structural model of layered model

动作,通过人体基本动作的有机组合,完成虚拟人体模型装配操作动作的设置。(1)仿真分析人员可通过直接调整人体模型的头部、颈部、手臂、脊椎、腿等肢体部位的自由度,创建人体模型的各种装配操作姿态,然后利用关键帧技术将人体模型的装配操作姿态有机地连接起来,从而能完成装配操作动作的定义工作。(2)通过定义装配零组件的装配运动轨迹,完成装配动作的设置。在3DExperience软件中提供人体肢体部位随物体运动而运动的设计功能模块,以零件的运动来驱动人体肢体部位的运动。(3)通过定义零组件之间的装配运动关系,完成装配动作的设置,即通过设置零组件间或工装工具间的装配约束关系和装配运动机构的自由度后,通过机构运动来驱动人体肢体部位的运动。

2 飞机装配人机工效分析

根据现场实际生产情况,在虚拟装配仿真分析的人机工效仿真分析主要包括:操作人员的可视度分析(Analysis visibility of the operator)、操作人员的可达性分析(Analysis reachability of the operator)、操作人员肢体疲劳度分析(Analysis fatigue of the operator's body)、舒适度分析(Analysis of comfort)、体能消耗与恢复分析(Analysis of energy consumption and recovery)、工艺实施难度分析等仿真分析^[8-11]。人机工效仿真分析是利用生物学、生理学、心理学、力学、环境工程学等学科对产品设计方案和工艺设计方案进行的综合评价,并且每一种仿真评价体系都有自身评价机制与标准。本文提出了飞机虚拟装配过程中可视性、可达性和疲劳强度分析的方法。

2.1 可视性分析

在实际生产中,往往因为产品设计方案、工艺时序设计方案不合理等原因,造成操作人员在完成装配工艺时,无法或者很难观察到操作零件。在3DExperience的虚拟环境中,可通过虚拟人体视觉窗口,直观反映出人不同姿态和不同位置的视觉范围,通过人体视觉窗口中飞机装配对象的有效面积,初步评价出此装配工序的可视性。但若为达到装配操作对象在人体视觉窗口的有效面积最大化,而致使人体脊椎弯曲度大、颈椎弯曲度大、颈部扭转角度大等人体部位器官接近极限活动位置,此装配工艺或者产品设计方案的可视觉化程度不能称之为高,如图2所示。

因此,装配工艺可视性的好坏不能只单纯地考虑人体视觉窗口装配对象的有效面积,应通过人体部位器官活动位置系数进行修正。当观察某一事物时,人体会本能地通过调整肢体将观察对象锁定在最佳视野区域内,以便获取最佳信息,如图3所示。在此时,以可视锥的射线关系,可将可视锥范围内的物体投影到可视锥的横

截平面中,装配对象可视投影面积与总投影面积的比值为可视性的初步评估值。人体在自然站立状态下,颈部是不弯曲的,而为将装配对象定位到最佳视觉区域,颈部的弯曲度、脊椎的弯曲度和眼睛的旋转程度都会给操作人员带来附加劳动强度。这些都是影响可视性好坏的重要因素。

根据上述因素对可视性的影响,本文提出的可视化定量评估算法为:

$$K_s = \frac{A_s}{A} \cdot K_e \cdot K_n \cdot K_v \cdot K \quad (1)$$

式中, K_s 表示装配可视系数,值越大可视性越好; A_s 表示装配对象投影在横截投影平面中的可视面积,如图2中螺丝钉的可视面积; A 为在测量 A_s 时所有参数不变的前提下,隐藏所有非安装操作对象后,装配对象投影在横截投影平面中面积; K_e 表示颈部仰俯或摆角的影响系数($0 \leq K_e \leq 1$),等于1减去颈部弯曲的角度与最大弯曲角度(60°)的比值; K_n 表示脊椎弯曲或旋转幅度的影响系数($0 \leq K_n \leq 1$),等于1减去脊椎的弯曲角度与脊椎最大的弯曲角度(90°)的比值; K_v 表示视觉角度的影响系数($0 \leq K_v \leq 1$),当肢体移动不能满足需求时,人体的眼球会旋转一定角度来满足最佳视野区域捕捉

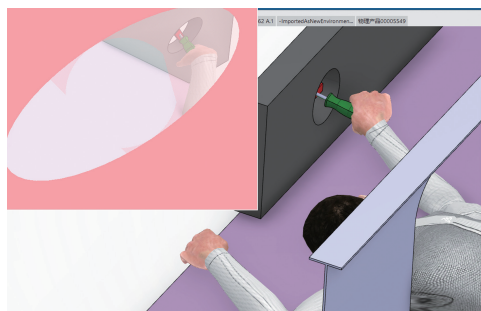


图2 人体视觉窗口
Fig.2 Human visual window

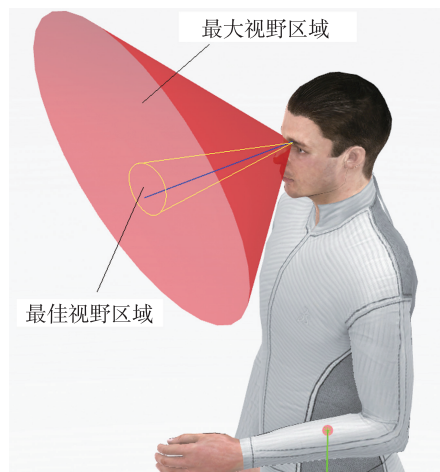


图3 可视锥
Fig.3 Visual cone

装配对象的需求,等于1减去眼球的旋转角度与最大旋转角度(60°)的比值。 K 表示因其他因素引起的影响系数($0 \leq K \leq 1$)。

2.2 可达性分析

可达性是指进行飞机装配时,接近零组件安装部位的难易程度,可分为操作可达(操作人员能接触到装配部位的同时具备一定的操作空间)、接触可达(装配操作人员自身或借助工具能够接触到安装部位)、盲操可达(在可视性差或不可视的情况下,可接触并具备操作空间)和不可达4种类型。在评价装配工艺可达性时,不能只考虑肢体通道长短与肢体长度的对比,如图4所示。

若人体可接触到装配操作部位,但肢体通道空间小、工具活动空间小、无法施加装配操作力或者可视性极差,同样不能称此装配可达性好。如图4所示,可达性是指操作人员的肢体是否能触摸到装配对象,因此操作人员的肢体是否比操作通道长为初步判断可达性的指标。肢体完成装配操作所需通过的装配通道的宽窄、操作人员以预定姿势施加装配力的难易程度、操作方案的可视性、装配操作端允许装配工具的活动空间的大小,都会影响人体手部到达操作区域。因此可达性的定量评估算法可总结为:

$$K_d = f\left(\frac{L_b}{L}\right) \cdot K_r \cdot K_f \cdot K_{sv} \cdot K_s \cdot K \quad (2)$$

式中, K_d 表示装配可达系数,数值越大可达性越强; L_b 表示可进入装配通道的肢体长度; L 表示最小二乘几何中心直线或者折点为1的折线长度; $f\left(\frac{L_b}{L}\right)$ 表示装配可接触函数,当 $L_b < L$ 时, $f = 0$,当 $L_b \geq L$ 时, $0 < f \leq 1$; K_r 表示装配通道的干涉程度系数,等于装配通道横截面最大内接圆面积与完成装配操作时此处人体肢体的横截面积的比值,但当比值小于80%时, $K_r = 0$,当比值大于等于1时, $K_r = 1$; K_f 表示可施加装配操作力难易程

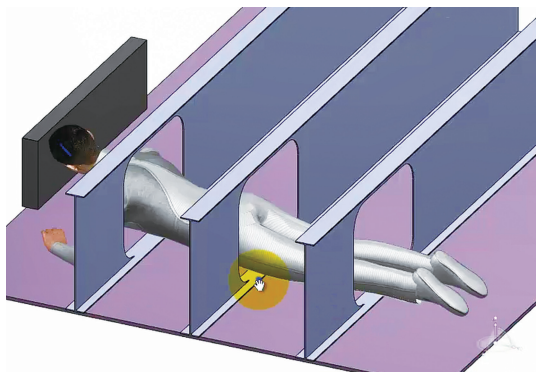


图4 人体肢体的可达性

Fig.4 Accessibility of human body

度系数,等于1减去手腕的弯曲角度与最大弯曲角度(60°)的比值; K_{sv} 表示装配操作时可视性的影响系数,等于可视性值; K_s 表示装配工具活动空间的影响系数,等于操作区域的最大内接球与装配工具的最小外接球的体积比,当比值小于95%时, $K_s = 0$; K 表示其他因素的影响系数。

2.3 劳动强度分析

劳动强度是指操作人员进行零组件装配时,各肢体部位的受力情况。进行劳动强度分析是为了避免因装配强度过大对人体或零组件造成不必要的伤害与损坏。人体的劳动强度通过各肢体部位的受力情况反映出来,在3DExperience中将人体骨骼模型简化为如图1(a)所示的骨架结构,通过力学平衡公式可计算出肢体和关节所承受的扭矩和力,3DExperience软件中,以肢体的颜色表示操作工人正在进行装配时肢体所承受的劳动强度,如图5所示。其人体肢体各部位的受力情况通过肢体受力平衡方程求得:

$$\begin{cases} F_t(x, y, z) + \sum F_i = 0 \\ M_t(x, y, z) + \sum M_i = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, $F_t(x, y, z)$ 为 t 时刻在坐标 (x, y, z) 处人体的受力情况; $\sum F_i$ 表示在 t 时刻人体其他肢体部位的承受的装配力之和; $M_t(x, y, z)$ 表示 t 时刻在坐标 (x, y, z) 处人体所受力矩情况; $\sum M_i$ 表示在 t 时刻人体其他肢体部位承受的因装配力所引起的力矩之和。

3 基于3DExperience的飞机装配工艺人机工程仿真分析实例

本文基于3DExperience软件系统,以××飞机蒙皮装配的人机工程仿真分析为例,对本文所阐述的人机工程建模与仿真的关键技术进行应用验证。在此过程中,飞机工艺模型与装配型架模型是直接导入到三维虚拟生产环境中;人体模型是通过调用软件提供的中国籍

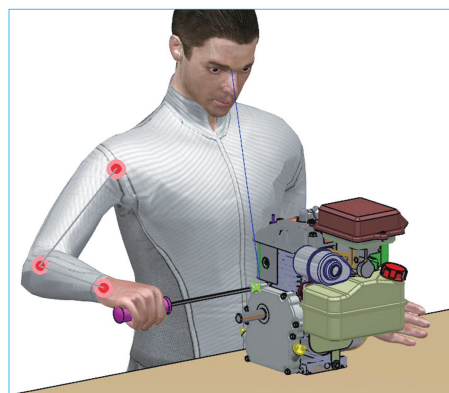


图5 人体肢体承受力

Fig.5 Stress of human body

人体模型创建；人体的装配动作采用以固定蒙皮的六角螺钉的运动轨迹为驱动而设置。此次仿真分析还涉及多人协作,但在此过程中,装配对象投影在横截投影面中的可视面积 A_s 等于非遮挡时的投影面积 A ；颈部弯曲角度为 2° , $K_c=1-2/60=0.97$ ；脊椎弯曲角度为 0° , $K_b=1-0/90=1$ ；眼球旋转角度为 3° , $K_v=1-3/60=0.95$ ；未受其他因素影响,所以 $K=1$ ；因此,根据公式(1)可得装配操作的可视性 $K_s=1 \times 0.97 \times 1 \times 0.95 \times 1=0.92$, 所以其可视性良好。 $L_b > L$, $f\left(\frac{L_b}{L}\right)=1$ ；装配操作通道完全开敞,装配通道的干涉程度系数 $K_r=1$,装配工具活动空间系数 $K_s=1$ ；手腕弯曲角度为 2° ,施加装配力难易程度系数 $K_f=1-2/60=0.97$ ；可视性影响系数 $K_{sv}=0.92$ ；未受其他因素影响,所以 $K=1$ ；因此,根据公式(2)可得可达性 $K_d=1 \times 1 \times 0.97 \times 0.92 \times 1 \times 1=0.90$,其可达性良好。根据公式(3)计算出的人体肢体受力(见图6右下角),在4h 铆接 500 个干铆钉(不涂胶密封)的工作量下,人体模型的肘关节和肩关节所承受的劳动强度均超出了人体所能承受的劳动强度,不符合实际装配劳动强度。根据人机工程的仿真结果不难得出,人体模型的可视性与可达性均良好,只有人体所承受的劳动强度超出允许值,因此只将人体模型 500 个铆接/4h 的工作量参数改为 200 个铆接/4h 后,人体所需承受的工作劳动强度降低到了人体所能承受的范围内,与工人实际 8h 铆接 500~600 个铆接的工作量相符。

4 结论

本文阐述了面向飞机总装的人机工程仿真分析与

评价的关键技术与方法。在导入飞机工艺数模和工装工具数模的基础上,进行三维虚拟人体建模,并通过装配工艺将产品模型、工装工具模型和人体模型建立关联关系,进行人机工效仿真。在仿真分析过程中,对装配可视性、可达性和劳动强度进行了人机动态分析与评估评价。由于 3DExperience 系统本身分析评价机制的缺陷,不能根据人机工效各方面的仿真分析结果综合评判装配工艺的优劣,综合评判依旧是仿真分析人员根据经验自行评判；在利用 3DExperience 进行人机工效仿真分析时,未考虑操作工人技能的高低；另外 3DExperience 数据库中的虚拟人体模型与实际生产中的人体参数不同,因此为了提高人机工效仿真分析结果的质量,可深入上述内容的研究工作。

参考文献

- [1] 杨明,尹明德. 基于 DELMIA 的虚拟装配中人机工程仿真与应用[J]. 农业开发与装备, 2009(7): 12-15.
 - [2] 王占海,翟庆刚. DELMIA 人机工程在飞机虚拟维修中的应用[J]. 机电技术, 2009(S3): 36-44, 53.
 - [3] 罗仕鉴,孙守迁,唐明晰,等. 计算机辅助人机工程设计研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, 39(6): 805-809.
- LUO Shijian, SUN Shouqian, TANG Mingxi, et al. The study of computer aided ergonomic design[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2005, 39(6): 805-809.

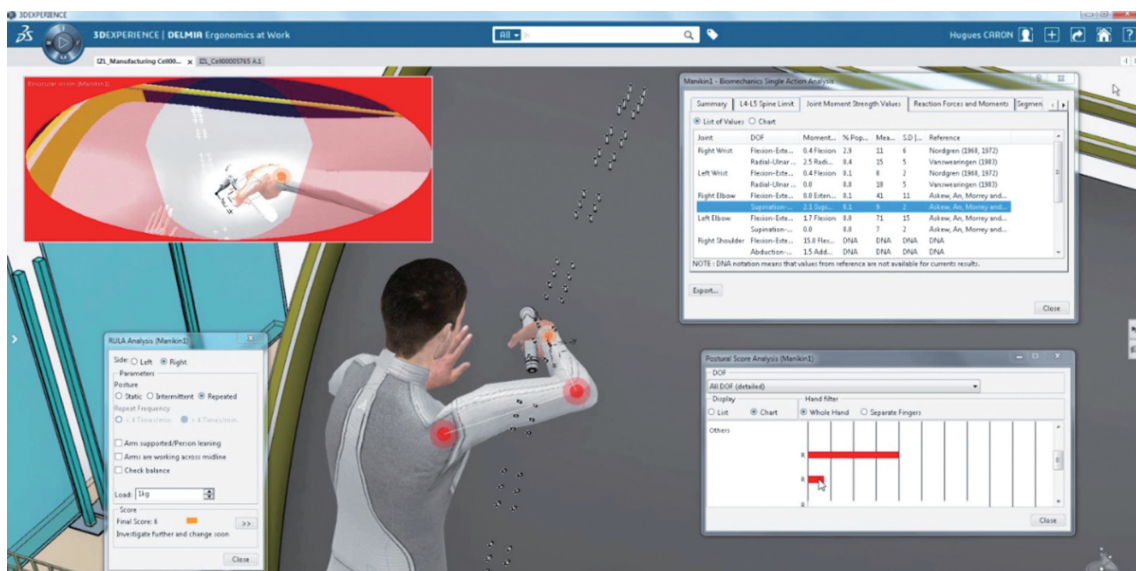


图6 基于3DExperience的飞机装配中的人机工程仿真

Fig.6 Ergonomic simulation of aircraft assembly based on 3DExperience

[4] ZHAO L Z, ZHANG Y H, WU X H, et al. Virtual assembly simulation and ergonomics analysis for the industrial manipulator based on DELMIA[C]//Proceedings of the 6th International Asia Conference on Industrial Engineering and Management Innovation. Paris: Atlantis Press, 2016.

[5] GAO Y J, WEI X B, MA B F, et al. Ergonomic simulation and optimization during the body assembly[C]//Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress. Berlin: Springer: 1419–1427.

[6] 柴春雷, 黄琦, 董占勋, 等. 面向家电产品的人机工程分析与评价系统 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, 18(4): 580–584.

CHAI Chunlei, HUANG Qi, DONG Zhanxun, et al. Ergonomic analysis and evaluation system for home appliance product[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2006, 18(4): 580–584.

[7] 洪涛, 王申康. 人体正面运动的尺度骨架模型初始化算法研究 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2004, 38(12): 1585–1588.

HONG Tao, WANG Shenkang. The study on the initial algorithm of the scale skeleton model of the human body positive movement[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2004, 38(12): 1585–1588.

[8] YANG M, YIN M D. Ergonomics simulation and application in virtual assembly based on DELMIA[J/OL]. Agricultural Development & Equipments, 2009. http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTotal-NJJY200907005.htm

[9] 王巍, 高雪松, 穆志国, 等. 人机工程仿真技术在飞机零组件装配中的应用 [J]. 航空制造技术, 2017, 60(9): 92–96.

WANG Wei, GAO Xuesong, MU Zhiguo, et al. Application of man-machine engineering simulation technology in aircraft component assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(9): 92–96.

[10] 郝天峰, 贾晓亮. 面向 PLM 的飞机虚拟协同维修性分析及评价 [J]. 航空制造技术, 2015, 58(18): 80–85.

HAO Tianfeng, JIA Xiaoliang. Analysis and evaluation of virtual co-maintenance of aircraft for PLM[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(18): 80–85.

[11] 曾毅, 尚建忠, 曹玉君, 等. 维修性设计中的可视性评价方法研究 [J]. 工程图学学报, 2009, 30(1): 70–74.

ZENG Yi, SHANG Jianzhong, CAO Yujun, et al. Study on the method of visibility evaluation in maintainability design[J]. Journal of Engineering Graphics, 2009, 30(1): 70–74.

通讯作者: 张永建, 硕士、助理工程师, 研究方向为飞机数字装配技术, E-mail: zyj_harry@163.com。

(责编 逸飞)

(上接第91页)

[6] 邵忠喜, 富宏亚, 韩振宇. S形进气道纤维铺放轨迹规划和优化方法 [J]. 宇航学报, 2010, 31(3): 855–861.

SHAO Zhongxi, FU Hongya, HAN Zhenyu. Path planning and optimization algorithm for fiber placement of S-shaped inlet[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(3): 855–861.

[7] 王显峰, 富宏亚, 韩振宇. 复杂形体面片缠绕成型方法的分析与实现 [J]. 宇航材料工艺, 2006, 36(6): 39–41.

WANG Xianfeng, FU Hongya, HAN Zhenyu. Analysis and realization of patch winding method for complex form[J]. Aerospace Material & Technology, 2006, 36(6): 39–41.

[8] 党旭丹, 肖军, 还大军. 自动铺丝平行等距轨迹规划算法实现 [J]. 武汉大学学报 (理学版), 2007, 53(5): 613–616.

DANG Xudan, XIAO Jun, HUAN Dajun. Implementation on fiber placement parallel equidistant path generation algorithm[J]. Journal of Wuhan University (Natural Science Edition), 2007, 53(5): 613–616.

[9] 林福建. 自动铺丝束成型的关键技术 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2005(3): 25–26.

LIN Fujian. The key technology about automatic fiber placement[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2005(3): 25–26.

[10] 邵忠喜, 富宏亚, 韩振宇. 纤维铺放轨迹规划的两种方法及其比较研究 [J]. 材料工程, 2009(S2): 349–353.

SHAO Zhongxi, FU Hongya, HAN Zhenyu. Comparative study on two methods of fiber placement path planning[J]. Material Engineering, 2009(S2): 349–353.

通讯作者: 马志涛, 高级工程师, 研究方向为数控机床、复合材料构件成型、航空专用装备等, E-mail: 808s@sina.com。

(责编 逸飞)

(上接第95页)

[7] 杨胜群. VERICUT 数控加工仿真技术 [M]. 第2版. 北京: 清华大学出版社, 2013: 1–18.

YANG Shengqun. VERICUT numerical control machining simulation technology [M]. 2nd edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 1–18.

[8] 史琦. TC21 钛合金高性能铣削工艺基础研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.

SHI Qi. Research on high performance milling of titanium alloy TC21[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.

[9] 何宁. 高速切削技术 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2012: 38–50.

HE Ning. High speed cutting technology[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2012: 38–50.

[10] 汤爱君, 刘战强. 铣削加工系统三维稳定性理论研究与发展 [J]. 工具技术, 2008, 42(5): 3–5.

TANG Aijun, LIU Zhanqiang. Perspectives and progress in three-dimensional stability lobes in milling chatter system[J]. Tool Engineering, 2008, 42(5): 3–5.

[11] ZHOU L R, LI J F, LI F Y, et al. Energy consumption model and energy efficiency of machine tools: a comprehensive literature review[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112: 3721–3734.

通讯作者: 李亮, 博士、教授、博士生导师, 研究方向为高速、高效切削加工, E-mail: liliang@nuaa.edu.cn。

(责编 大漠)