

某型飞机起落架虚拟航线维护仿真研究

Research of Virtual Line Maintenance Simulation for Aircraft Landing Gear

中国民航飞行学院航空工程学院 张中波 刘 峰 黄传勇



张中波

副教授, 硕士研究生导师, 主要研究方向为虚拟维修和数字化维修。近年来主持和参与多项国家自然科学基金、民航局和中国民航飞行学院科研项目。

虚拟维修仿真技术是以计算机技术与虚拟现实技术为依托, 在由计算机生成的、包含了产品数字样机与维修人员三维人体模型的虚拟场景中, 通过驱动人体模型来完成整个维修过程仿真的综合性应用技术^[1]。

民用航空器的维修主要包括航线维护和定检修理两个方面^[2]。传

针对航空器维修培训的局限性, 基于 Pro/E 和 Jack 软件, 提出了虚拟航线维护仿真的实现路径。对人体模型动态缩放实现了人体模型本土化, 对维护动作流程进行层次化分解, 从而实现了拆卸某型飞机起落架机轮的维护过程仿真。

统的航空器维修培训普遍采用书本或实物的训练方法, 在实践过程中表现出较大的局限性: 无重复性; 学员在操作实践培训过程中受到设备、工具、环境等因素制约, 很难达到理想的培训效果^[3]。

虚拟维修仿真技术的研究与应用已涉及从航空器设计、使用到维护的整个生命周期, 主要包括以下几个方面: 航空器设计的维修性分析核查、维修手册的快速自动生成、虚拟维修培训和维修中人的因素分析等^[4]。目前的研究主要集中于航空器的维修性分析, 而关于虚拟维修培训和对维修中的人因分析则相对较少。因此, 针对传统的航空器维修培训的局限性, 虚拟仿真航空器的维修过程对于提高航空维修人员的维修能力和保证航空安全具有重要的意义。

起落架虚拟航线维护仿真的内容

1 确定仿真对象

起落架的航线维护内容主要包括: 起落架下锁销的安装、主起落架刹车组件的拆卸/安装、轮胎勤务、起落架勤务和轮子组件的拆卸/安装。本文对某公司某机型机队的航线报告故障数据进行统计分析, 得到如图 1 所示的起落架航线报告故障统计分布图。从中可知, 由于机轮属于消耗件, 在实际维护过程中, 机轮的拆卸/安装工作在起落架航线维护工作中占很大的比重, 达到了 77%。

根据上述故障特点, 本文确定虚拟仿真机轮拆卸的航线维护过程, 并基于该仿真过程, 对拆卸过程中维修

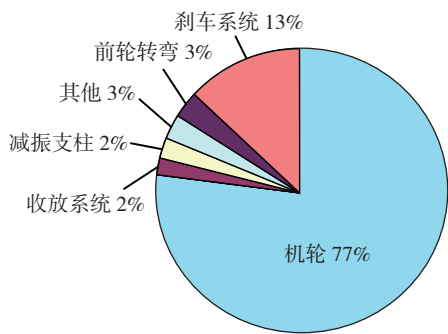


图1 某型飞机起落架航线报告故障统计图

人员的受力、疲劳等因素进行分析。

2 虚拟航线维护仿真的实现路径

依据上述确定的仿真任务,首先,在三维建模软件 Pro/E 的支持下,建立起落架虚拟维修样机和虚拟工具样机。然后,基于 Jack 软件建立虚拟维修人体模型和虚拟维修场景,并将虚拟样机模型和工具模型集成于虚拟维修环境中。再对仿真任务进行维修任务分解,建立各层次的动作流程,在维修场景中对维修过程实现仿真。最后,对维修过程中的虚拟人施加相应的载荷,利用 Jack 软件的肢体受力分析和疲劳与恢复分析等工具对虚拟人的人因进行分析,并输出分析结果。完整的起落架虚拟航线维护仿真实现路径如图 2 所示。

本文重点研究了针对特定的维修过程如何构建相应的虚拟维修样机、虚拟人模型的本土化、如何集成虚拟样机和虚拟人构建虚拟维修场景、维护动作流程层次化分解等关键技术。

关键技术研究

1 构建起落架和维修工具虚拟维修样机

虚拟维修样机是专用于虚拟维修仿真的,它是能够支持维修性分析、维修工程设计的产品的计算机仿真,要求能在一定程度

上具有与物理样机相似的几何与功能真实度,具有支持维修活动过程的空间、时间、自由度约束的运动特性和物理特性^[5]。结合虚拟现实技术,可以实现维修有关活动或过程的模拟,进行维修训练、维修性分析与评估等。

针对特定的维修过程建立虚拟样机,这样能够通过任务建立各类数据的关系,便于管理,控制样机的复杂程度。依据前面确定的维修仿真任务,本文利用三维设计软件完成了起落架和维修工具的虚拟样机三维建模。在建模的过程中,根据需要仿真的维修过程特点,强化了刹车组件、起落架轮毂盖、机轮与轮轴连接关系等各部分内容的表达,而对起落架内部结构进行了弱化。需要说明的是,一些属于维修场景范畴的三维模型,如工作台等,这类设备、设施虽然自身是一个统一的整体,没有拆卸或装配的操作,但它在虚拟场景中的空间位置可以发生改变,属于部分可操作模型,本文将之视为维修工具来处理。

2 虚拟人模型本土化

Jack 软件是由美国宾夕法尼亚大学人体模型和仿真中心开发的实时可视化仿真软件。在 Jack 中,人体模型由若干段组成,每个段是由多边形面片构成的刚体模型,它用来描述人体特定部位的几何形状。段主要包括三种属性:段的三维尺寸、段的造型以及段的特征点。

实际上,人体各段的尺寸 $X = [x_1, x_2, \dots, x_m]$ 与人体测量学数据 $Y = [y_1, y_2, \dots, y_n]$ 之间可建立关系:

$$Y = A \cdot X, \quad (1)$$

式中, A 为系数矩阵,

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nm} \end{bmatrix}。$$

为了使分析仿真结果更符合我国民航的实际情况,需建立适合中国国情的人体模型。由于在 Jack 数据库中,没有现成的中国人体模型可用,因此,本文利用国标中给出的我国人体模型的身高、体重、前臂长、大腿长、小腿长等 6 项人体主要尺寸,根据式(1)中所示关系,拟合出各人体测量学数据相对于其百分位的插值函数,通过插值函数就能计算出任意百分位的人体测量学数据,从而实现人体模型的动态缩放^[6]。本文选择的是 95% 百分位的虚拟人体模型,95% 百分位表示其仿真和分析结果具有一般性。

3 建立虚拟维修场景

虚拟场景是虚拟维修作业所处的环境,虚拟样机模型、工具模型、人体模型等都要集成于这个场景之中。本文利用 Jack 软件来构建虚拟维修场景。

为了能够有效地定义各种复杂的对象,Jack 中引入了模型分级的机制,这种层次关系构成了一个倒转的树型结构。Jack 软件的建模机制与常用的三维设计建模软件之间存在差异,因此,本文采用以下 3 个步

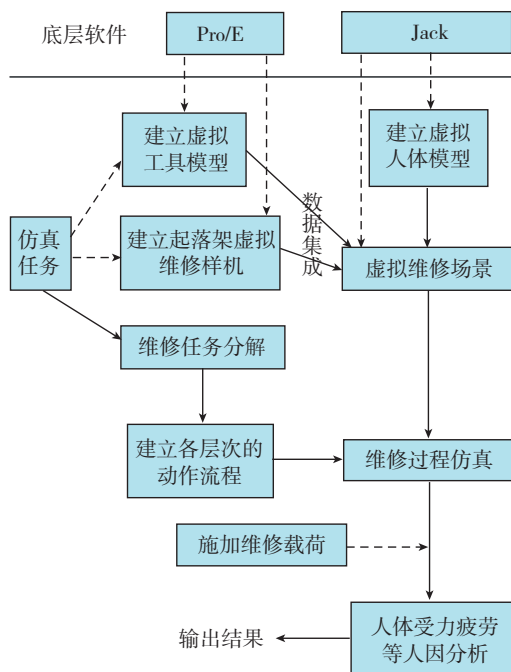


图2 起落架虚拟航线维护仿真的实现路径

骤将虚拟样机模型集成到 Jack 软件创建的虚拟场景中。第 1 步,对虚拟样机模型的零部件进行轻量化预处理。为了提高计算机仿真的运行速度,去掉零部件上槽、孔、圆角等形状细节,如螺栓上的螺纹。第 2 步,将起落架的零部件以 IGES 格式输出,然后再由 Jack 软件读入。第 3 步,依据要仿真的维修过程,对导入到虚拟维修场景中的虚拟样机进行层次结构重构,目的建立与虚拟场景对应的结构关系,将 CAD 系统中零部件相互间的装配关系转变为 Jack 软件中实体间的关节关系。并对产品部件和子装配体进行结构简化,合并某些部件,使它成为一个实体段或实体。如机轮组件在 CAD 系统是由内外轮毂、轮胎、连接螺栓等零件组成,而在虚拟场景中变成了一个实体。

4 维护动作流程层次化分解

在进行维修过程仿真之前,需要对维修任务进行分解。传统维修工程只是将维修任务分解至基本维修作业层,但由于基本维修作业仍然是一个相对完整的过程,实现一个完整基本维修作业的维修动作往往比较复杂,需要人体的一系列动作来实现,直接利用 Jack 软件进行仿真,操作过程将非常繁琐。因此,要将这些动作很好地表现出来,就必须再将基本维修作业继续向下分解为虚拟人的各个基本动作(动素)。图 3 所示的是拆卸轮毂盖安装螺钉的动素分解层次。

维修层次分解后,通常发现伸手、握取、移物、放手等虚拟人动素的使用频率最高。因此,可将拆卸机轮基本维修作业的动素流程设计为一个 Petri 网,通过一个仿真循环实现对行

走、握取、移物等动素单元的多次调度^[7]。

除了 Jack 软件提供已封装好的动素外,根据维修仿真的具体任务需要,直接使用 Jack 软件提供的基本动作函数形成动素单元。如图 3 所示的维修姿势调整就需要膝关节运动、肩关节运动等多个基本动作函数共同实现。将维修动作层次分解至虚拟人动素层后,就可以进行虚拟维修仿真。

落架虚拟航线维护仿真的实现

1 维修过程仿真

与单个物体的运动仿真不同,维修过程仿真的难点在于人的每一个动作必须和工具以及要维修的设备的运动相协调。在虚拟维修样机的支持下,本文通过调用 Jack 的 Figure.Attach To 函数来实现人机的

协调运动。利用 Jack 软件的动画模块,自动记录维修过程并输出标准格式的仿真视频,同时还允许跳转到仿真过程中的任意一帧,并对维修人员的受力、可视性、疲劳等维修性因素进行分析。图 4 所示的是拆卸轮毂盖整流罩的仿真视频截图。与传统的书本资料培训相比,该仿真视频更为生动直观,便于学员理解接受。同时不受起落架实物等环境限制,具有培训的重复性。

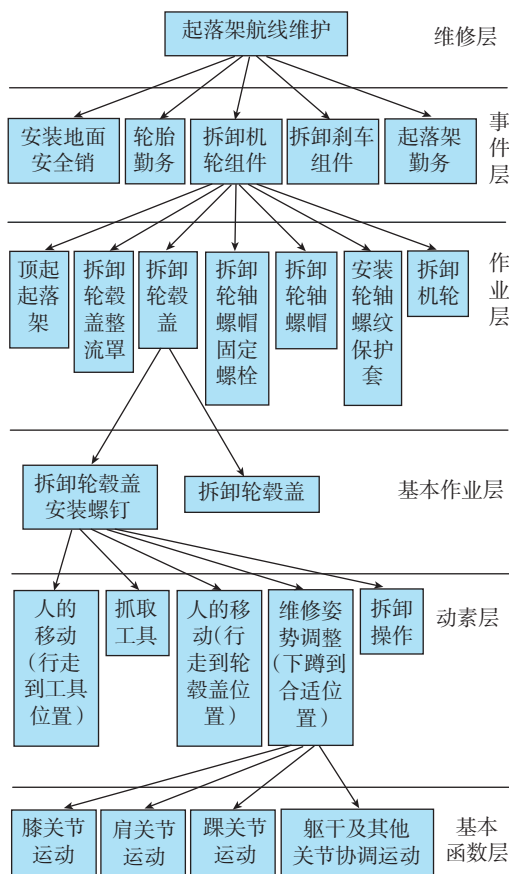
2 维护过程中人因分析

维修人员的肢体受力分析主要是判断维修操作中的举起、推拉、提起及转动等作业能否控制在人的体力限度以内。根据 AMM(Aircraft Maintenance Manual)手册规定,在拆卸轮轴螺帽时,需要施加最大 600 磅·英尺的力矩(约 813N·m)。通过折算,在图 5 所示的拆卸轮轴螺帽的姿态下,分别在虚拟人的左手和右手施加了 400N 的载荷。

图 6 显示了虚拟人在受载情况下,右肩关节、右手臂和身体其他部位承受的力和力矩情况。从中可知,受载荷最大的是编号为 1514 号的脊椎,承受约 248N·m 的力矩。

基于 Rohmer 和 Laurig 关于强度和抗疲劳的研究,本文利用 Jack 提供的疲劳与恢复分析工具,分析了在一个维修过程中人体各部分的实时疲劳情况。图 7 所示的是虚拟人在将 3 个轮毂盖固定偏心夹转动 90° 的过程(见图 4)中,右手施加了 40 牛的 Y 向局部载荷的情况下,在整个过程中虚拟人的疲劳变化。

从图中可以看出,0~2s、4~6s 和 8~10s 三个时间段内,人体的累积疲劳强度是逐渐增加的,而在 2~4s、6~8s 和 10~11s 三个时间段内,人体的累积疲劳强度是逐渐降低或保持为零,这与仿真过程是相符合的。仿真过程中,虚拟人在 0~2s、4~6s 和 8~10s 内进行转动操作,而其余时间是过渡休息时间。由于载荷是施加



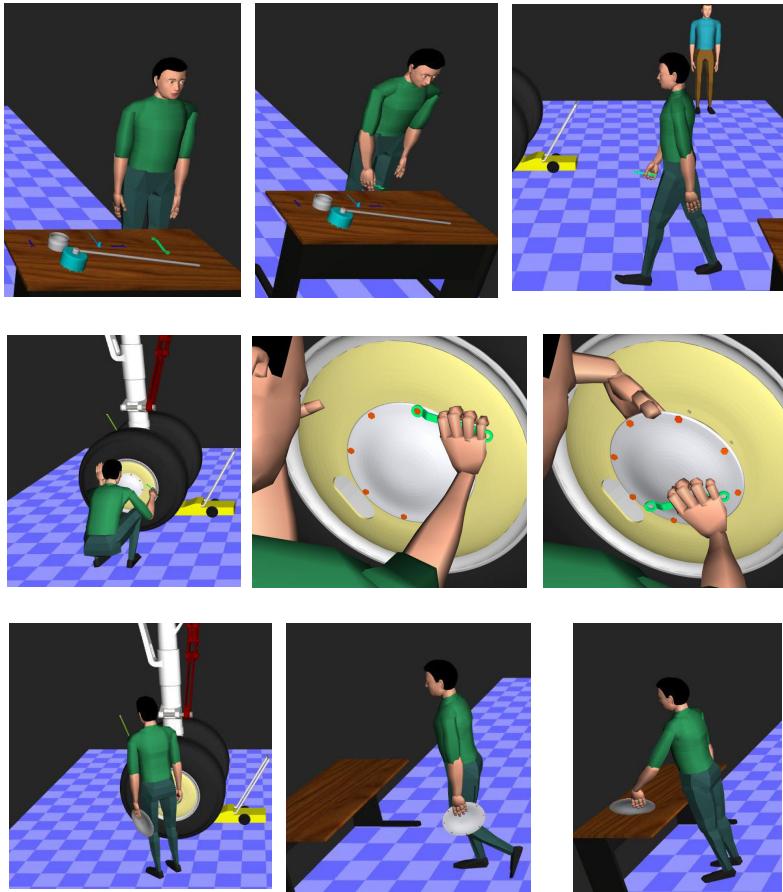


图4 拆卸轮毂盖整流罩的仿真视频截图

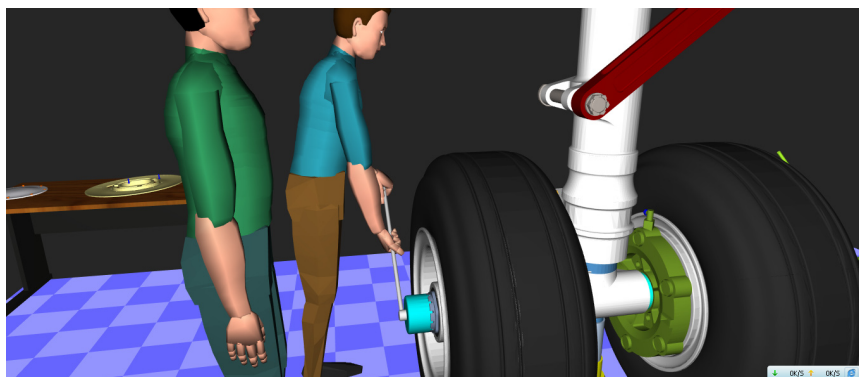


图5 拆卸轮轴螺帽

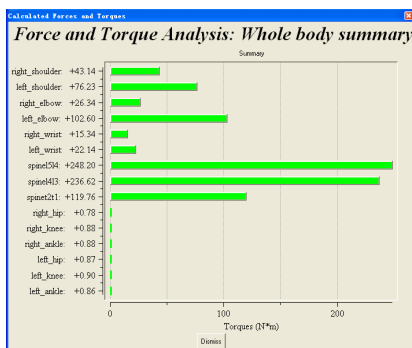


图6 整个身体的受力情况

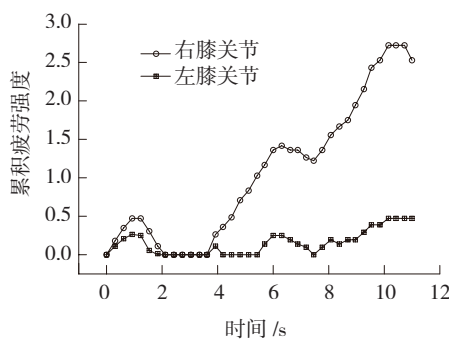


图7 虚拟人的累积疲劳变化趋势图

在虚拟人的右手,并且虚拟人操作时是处于下蹲姿势,所以疲劳首先出现在膝关节,并且右膝关节的累积疲劳一直高于左膝关节。0~2s 是转动第 1 个偏心夹,所以操作完成后人体的累积疲劳很小,但转动第 2 个和第 3 个偏心夹后,虽然中途有一个休息过程,疲劳有所下降,但人体的累积疲劳还是逐渐增加。

结 论

本文统计分析了起落架航线的故障特点,并针对航空器维修培训的局限性,基于 Pro/E 和 Jack 软件,提出了虚拟航线维护仿真的实现路径。对人体模型动态缩放实现了人体模型本土化,对维护动作流程进行层次化分解,从而实现了拆卸某型飞机起落架机轮的维护过程仿真。在维护过程仿真的基础上,对维护过程中维护人员的肢体受力和实时疲劳等人因进行了分析。经实例验证,该仿真既能满足维修培训的需要,也可以实现对维修过程中人的因素进行分析,分析的结果可用于后续维修安全等方面的研究。

参 考 文 献

- [1] 马麟. 虚拟维修过程模型的研究[D]. 北京航空航天大学, 2003.6.
- [2] Kinnison H A. 航空维修管理. 北京: 航空工业出版社, 2006.10.
- [3] Jeenal V, Santosh N, Gramopadhye A K, et al. Using virtual reality technology for aircraft visual inspection training : presence and comparison studies . Ergonomics, 2002, 33: 559-570.
- [4] 张中波, 丰世林. 虚拟维修仿真技术在航空器维修中的应用. 西安航空技术高等专科学校学报, 2010, 28(5):3-6.
- [5] 何英健, 郝建平, 李星新. 虚拟维修样机中机构的运动行为仿真. 计算机仿真, 2006, 23(2):184-188.
- [6] 王维, 李焱, 贺汉根. 基于国标人体测量学数据的虚拟人缩放方法. 计算机仿真, 2006, 23(7):219-223.
- [7] 张中波. 基于 Petri 网的虚拟维修动作流程层次化建模研究. 制造业自动化, 2012, 34(3):57-59. (责编 日午)