

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2017.07.012

Ka-32 直升机发动机排故虚拟训练技术研究

陈磊*, 史永胜

中国民航大学 航空工程学院, 天津 300300

摘 要: 直升机发动机维护及排故训练是机务工作者一项重要的受训环节, 为解决训练中发动机拆装难度高、资源有限等问题, 本文在直升机虚拟维修训练系统 (Virtual Maintenance Training System, VMTS) 原有拆装模式的基础上, 依据直升机发动机排故实际过程及发动机排故手册, 设计发动机排故中的交互式拆装训练流程, 结合构建的 Ka-32 发动机地面专用虚拟试车台及专用工具, 在虚拟环境中实现对 Ka-32 发动机从机身拆除至地面试车的完整训练过程。

关键词: 故障诊断; 发动机排故; 虚拟维修; 训练系统

中图分类号: V231 文献标识码: A 文章编号: 1007-5453 (2017) 07-0012-07

随着直升机数量的增加, 机务需求量剧增, 对新机务工作者的培养与训练便成为当务之急, 但传统训练模式存在训练成本高、效率低下等问题。面对直升机发动机这种动力核心部件, 更是存在着拆装过程繁琐、诊断排故难度较高、参与大修机会较少等问题。

虚拟现实 (VR) 技术最早由 Jardon Lanier 提出, 凭借其沉浸性、交互性的强大优势, 已广泛应用于军事、医学、教育等领域^[1], 基于计算机技术发展而来的虚拟训练系统能够很好地解决传统训练模式中的不足, 使受训人员能在虚拟环境下进行训练与学习。国外贾佩鲁大学构建的虚拟化学实验室可使学生在进行危险试验前预先在虚拟环境中进行训练^[2], 苏赛克斯大学的机械虚拟实训系统可使受训人员操作机械部件对仪器进行虚拟维修^[3]。国内吉林大学的孔庆东以 VR 技术为依托, 结合二维、三维、虚拟演示技术开发了一套完整的轿车发动机故障诊断培训系统^[4]。本文基于自主开发的非沉浸式系统 (Virtual Maintenance Training System, VMTS) 实现对直升机发动机的交互式仿真排故过程, 使受训者能够针对系统中的典型故障案例进行完整的排故仿真。受训者在虚拟样机上进行交互式的拆装排故过程中, 可熟悉发动机结构及相关排故流程中的注意事项及工具使用事项。

同时, 系统中还可对发动机进行交互式的大修拆装以及地面试车等操作, 使受训者能够在虚拟环境中参与现实中较少遇到的大修过程, 本文以 Ka-32 直升机的 TB3-117 发动机大修排故为例, 验证了该方法的可用性。

1 直升机发动机排故基本流程

直升机发动机运行监视、故障诊断与排故是日常机务维护过程中的重中之重, 该过程是一个集合了数据采集、信息处理分析以及故障定位与排故的综合工作^[5]。

发动机故障诊断就是在动态情况下通过分析发动机运行过程中产生振动、噪声、压力、温度、流量、润滑状态等相关信息, 对发动机的工作状态进行分析, 从而进行故障诊断与定位工作^[6], 其流程如图 1 所示, 具体包括:

(1) 敏感参数选择: 当发动机发生故障时, 如连接件老化泄漏、叶片烧损或其他组合损伤等, 会导致相关部件的性能参数产生变化, 相关参数的变化直接反映在发动机可测参数的变化上, 如转速、供油量、燃气温度、压力等数值变化。

(2) 信号、数据采集: 在发动机上安装相关测量仪器, 对无法通过座舱仪表读取的数据进行测量, 如在压气机上安装便携式振动计进行振动频率的测量。

收稿日期: 2017-04-27; 录用日期: 2017-06-05

* 通讯作者. Tel.: 022-24092424 E-mail: 1027549418@qq.com

引用格式: CHEN Lei, SHI Yongsheng. Research on virtual engine troubleshooting training technology of the Ka-32 helicopter[J]. Aeronautical Science & Technology, 2017, 28 (07): 12-18. 陈磊, 史永胜. Ka-32 直升机发动机排故虚拟训练技术研究[J]. 航空科学技术, 2017, 28 (07): 12-18.

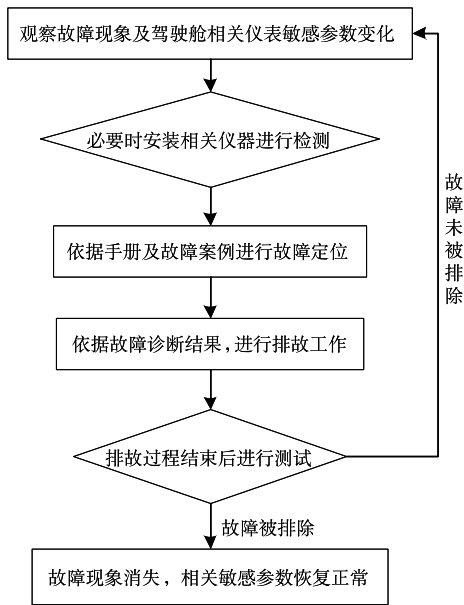


图1 直升机发动机故障诊断基本流程

Fig.1 The basic fault diagnosis of the helicopter engine

(3) 状态参数识别及故障定位: 将采集的相关数据与样板数据进行对比,对发动机的运行状态进行识别,同时,结合发动机排故手册 (Trouble Shooting Manual, TSM) 及故障案例进行故障诊断与定位。

依据故障诊断结果,结合发动机 TSM 手册,对于普通故障,直接在机身上进行排故并重新测试即可,如燃油调节器油滤不清洁、发动机供气导管连接不紧固等;对于较大的故障,则需将发动机拆下后进行排故处理,必要时还应在地面试车台进行地面试车,试车正常以后方可完成排故工作^[7],如发动机涡轮导向器产生裂纹等故障。

2 Ka-32 发动机故障诊断过程仿真

VMTS 是以在虚拟环境下对虚拟样机进行拆装为基础的虚拟维修训练系统,将 Ka-32 发动机排故以模块化组件的形式独立嵌入平台中。

2.1 Ka-32 发动机交互式故障诊断流程设计

模块设计过程中利用虚拟仪表及相关技术构建虚拟驾驶舱,真实地表现仪表异常以及振动、噪声等故障现象。结合直升机发动机实际故障诊断过程以及 VMTS 中虚拟训练的要求,设计其在 VMTS 中的交互诊断流程,如图 2 所示。

在 VMTS 已经实现的虚拟样机可视化拆装的基础上,受训用户在虚拟驾驶舱中注意到仪表异常或警示灯亮起及其他故障现象后,在故障诊断页面输入故障信息后系统便可进行故障的定位与诊断,故障信息不足时,用户可按诊断页面上的要求进行虚拟仪器的安装与调试,以进行相应的检

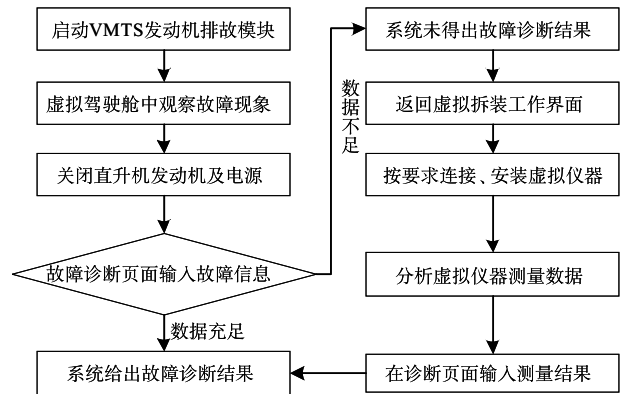


图2 VMTS 中的交互诊断流程

Fig.2 The interactive diagnosis flow in the VMTS

测、测量,从而进一步完成故障诊断。

虚拟驾驶舱的构建以及驾驶舱中仪表的异常和振动、噪声等故障现象的表现,均依托于 VC++ 代码加以实现,所构建的虚拟驾驶舱窗口如图 3 所示。

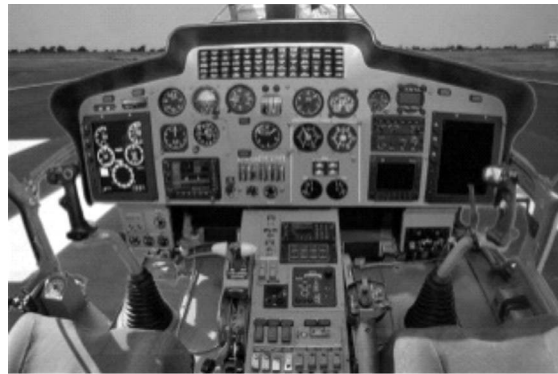


图3 虚拟驾驶舱

Fig.3 The virtual cockpit

同时,对于发动机排故过程中所需使用的工具均需要进行单独设计及建模,并在需要的时候调用到虚拟环境中,如流量计、压力计以及专用的地面试车台等。所构建的专用地面试车台及工具如图 4 所示。



图4 虚拟样机

Fig.4 The virtual model

区别于传统虚拟仪器基于硬件系统的数据采集方式, VMTS 下使用虚拟仪器的测试过程是通过数据库的读取分析实现虚拟仪器的功能。在数据库中建立典型故障发生时对应参数的波动范围,当某典型故障发生后,使用虚拟仪器进行相关检测时,便可在虚拟仪器上产生相应的异常数据。这些也均依托 VC++ 代码及 Access 数据库得以实现。

2.2 故障诊断的实现及其界面的交互设计

模块中的故障诊断采用基于案例推理 (Case Based Reasoning, CBR) 的故障诊断模式,将典型故障案例结合 TSM 手册相关内容进行故障树的构建,依托于 VMTS 平台上原有推理机进行故障推理。

数据库中将典型故障案例分别构建故障树并与故障特征信息相关联,利用纵向深度算法将故障树模块化,在故障诊断页面进行不同故障特征信息的输入后,依据故障特征信息便可在对应故障树间进行模块复合,故障诊断结果中将相同模块予以合并,以准确诊断与定位故障点所在。结合 2.1 节内容,诊断页面输入的故障特征信息涉及仪表参数异常及其他故障现象,设计诊断页面如图 5 所示,用户可在诊断页面输入一项故障特征信息进行故障诊断,也可输入多项故障特征信息进行复合诊断。对于故障特征信息不足的情况,诊断页面会相应的输出虚拟仪器使用信息,用户依据该信息进行虚拟仪器的使用与检测、测量过程。

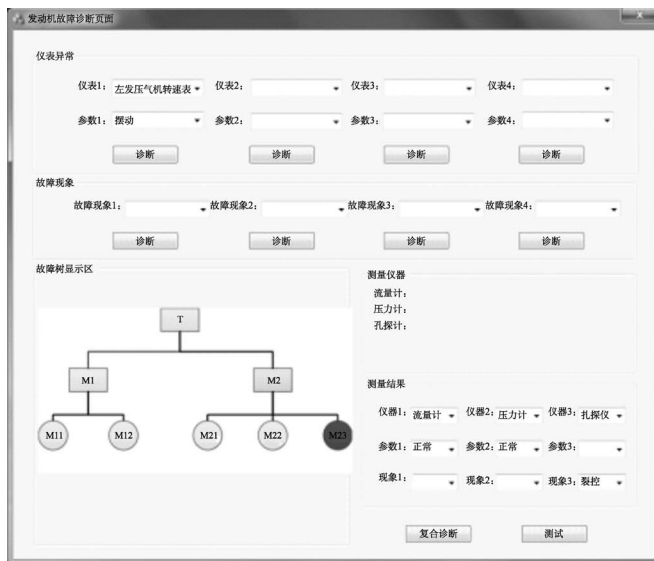


图 5 故障诊断页面

Fig.5 Fault diagnosis page

3 基于交互式的 Ka-32 发动机排故仿真过程设计

设计 Ka-32 发动机虚拟排故流程,如图 6 所示,排故过程中,使用虚拟拆装方式移除发动机整流罩后,依据故障诊断结果的不同,选择相对应的排故流程并进行相应处理。

对于普通故障,在发动机故障对应位置,选定工具及工具尺寸,依据正确拆卸顺序对故障可疑零部件逐个拆卸,选择相应虚拟仪器对可疑故障零部件进行检测,找出故障源所在点后完成相应的排故工作。对于大修故障,需在拆卸过程中将发动机与直升机全部连接管路及固定件拆除,并将发动机吊装到地面试车台进行安装及固定后再进行相应的拆卸排故工作。

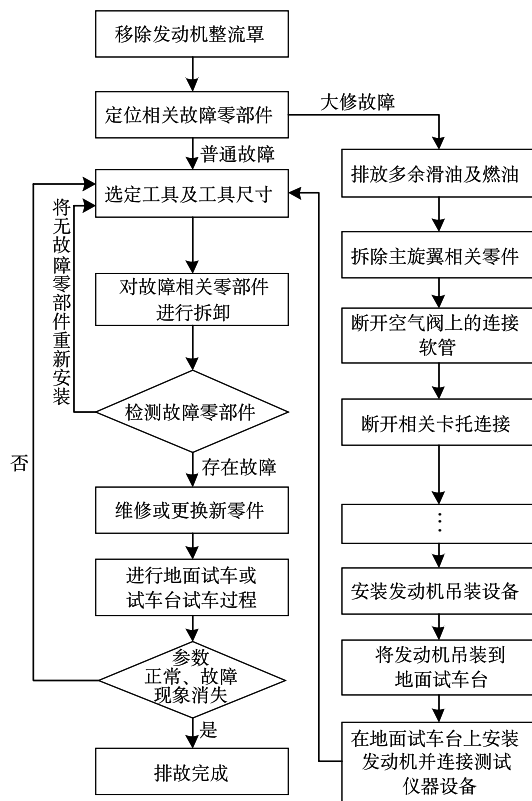


图 6 Ka-32 发动机排故仿真流程

Fig.6 The simulation flow of the Ka-32 helicopter engine

3.1 排故仿真过程中的拆装序列规划

目前,多数方法是按照零件检的装配约束关系及几何关系、内部层次关系等进行拆装序列的规划,但通用航空机务工作者进行维护过程中,必须严格依照手册上的拆装顺序进行,但直升机上又存在同等并列结构,如 Ka-32 直升机主

旋翼是共轴反桨双旋翼结构,在拆卸发动机前进行桨叶移除的过程中,上层旋翼中的三桨叶是并列结构,先拆除其中任一桨叶均可,构建拆装模型如图7所示。

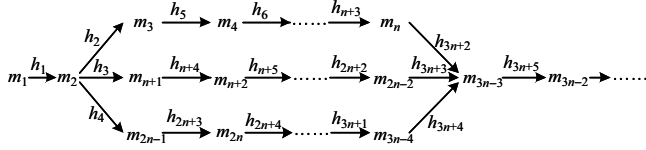


图7 拆装模型有向图

Fig.7 The oriented graph of the dismounting model

将拆装模型用有向图 $G=(H, M)$ 来进行表示,其中, $M=(m_1, m_2, \dots, m_{3n-2})$ 为节点集,表示拆卸任务集合; $H=(h_1, h_2, \dots, h_{3n+5})$ 表示拆卸任务间的优先关系,其中 $h_k=(m_x, m_y)$ 是有向的,可表示任务 m_x 要优先于任务 m_y 。

$$\begin{cases} M_1 = (m_3, m_4, \dots, m_n) \\ M_2 = (m_{n+1}, m_{n+2}, \dots, m_{2n-2}) \\ M_3 = (m_{2n-1}, m_{2n}, \dots, m_{3n-4}) \end{cases}$$

同时用 M_1, M_2, M_3 分别表示上层3个桨叶拆卸任务的集合, M_1, M_2, M_3 处于并列地位,先拆除其中任一集合均可。

拆卸过程 $C(M)$ 相当于从一个入度 $d^-(v_i)=0$ 的任务节点开始遍历 G , 装配过程 $Z(M)$ 相当于从一个出度 $d^+(v_i)=0$ 的任务节点开始逆向遍历 G , 采用拓扑排序原理及方法^[8], 将模型 G 中的桨叶拆卸任务部分拓扑排序后,有:

$$\begin{aligned} & \{m_3, m_4, \dots, m_n, m_{n+1}, m_{n+2}, \dots, m_{2n-2}, m_{2n-1}, m_{2n}, \dots, m_{3n-4}\} \\ & \{m_{n+1}, m_{n+2}, \dots, m_{2n-2}, m_3, m_4, \dots, m_n, m_{2n-1}, m_{2n}, \dots, m_{3n-4}\} \\ & \{m_{2n-1}, m_{2n}, \dots, m_{3n-4}, m_3, m_4, \dots, m_n, m_{n+1}, m_{n+2}, \dots, m_{2n-2}\} \\ & \{m_3, m_4, \dots, m_n, m_{2n-1}, m_{2n}, \dots, m_{3n-4}, m_{n+1}, m_{n+2}, \dots, m_{2n-2}\} \\ & \{m_{n+1}, m_{n+2}, \dots, m_{2n-2}, m_{2n-1}, m_{2n}, \dots, m_{3n-4}, m_3, m_4, \dots, m_n\} \\ & \{m_{2n-1}, m_{2n}, \dots, m_{3n-4}, m_{n+1}, m_{n+2}, \dots, m_{2n-2}, m_3, m_4, \dots, m_n\} \end{aligned}$$

6个可行的拆卸顺序,即对于上层桨叶部分有6个可行的拆卸顺序,将维修手册(Aircraft Maintenance Manual, AMM)中的拆装要求按此方法规划拆装序列,结合VMTS中原有拆装机制,受训用户只有在正确选择、使用工具并符合拆装序列的前提下才能够将零件在虚拟样机上拆卸或安装操作。

3.2 排故中移动路径规划

排故仿真过程中的移动路径规划主要涉及两方面内容:一是排故过程中进行虚拟拆装时零件的移动路径即其位姿变换;二是零件移动过程中的碰撞检测问题。利用

VMTS中现有的碰撞检测机制,选择K-dop包围盒方法进行碰撞检测。VMTS中的vpPositional节点包含虚拟对象的6个自由度信息,即X、Y、Z空间平移坐标系及H、P、R 3个角坐标系的参数,数据库中的vpPositional信息既决定了虚拟对象在虚拟场景中被加载时的初始位置,也使虚拟对象在虚拟场景中的位置和方向相对于世界坐标系有明确的定义^[9]。VMTS中的vpPositional节点包含虚拟对象的6个自由度信息,即X、Y、Z空间平移坐标系及H、P、R 3个角坐标系的参数,数据库中的vpPositional信息既决定了虚拟对象在虚拟场景中被加载时的初始位置,也使虚拟对象在虚拟场景中的位置和方向相对于世界坐标系有明确的定义^[9]。VMTS中的vpCoordConverter和vpCoordSys两个类共同提供了一个用来描述VMTS中虚拟对象位置和方向的坐标系配置的结构,模块中选用该结构以实现坐标系配置之间的位置、方向转换。

在VMTS中的世界坐标系中,零部件在空间里的位姿可用矩阵 P 表示^[10]:

$$P = \begin{bmatrix} X_{v_1} & X_{v_2} & X_{v_3} & 0 \\ Y_{v_1} & Y_{v_2} & Y_{v_3} & 0 \\ Z_{v_1} & Z_{v_2} & Z_{v_3} & 0 \\ X_s & Y_s & Z_s & 0 \end{bmatrix}$$

式中: $X_v=[X_{v_1} \ X_{v_2} \ X_{v_3} \ 0]$, $Y_v=[Y_{v_1} \ Y_{v_2} \ Y_{v_3} \ 0]$, $Z_v=[Z_{v_1} \ Z_{v_2} \ Z_{v_3} \ 0]$ 分别为零部件局部坐标系内部3个坐标轴位于世界坐标系中的方向矢量; X_s, Y_s, Z_s 是零部件局部坐标系内的原点在世界坐标系中相对应的方向矢量。零部件位姿变换,是位姿矩阵 P 通过 T_m 矩阵转化为新的矩阵 P' , 即 $P'=P T_m$, 有:

$$T_m = \begin{bmatrix} X_1 & X_2 & X_3 & 0 \\ Y_1 & Y_2 & Y_3 & 0 \\ Z_1 & Z_2 & Z_3 & 0 \\ XM_{vx} & YM_{vy} & ZM_{vz} & 0 \end{bmatrix}$$

式中: M_{vx}, M_{vy}, M_{vz} 表示3个坐标轴方向的平移分量; X, Y, Z 表示旋转变换。依托于VC++代码实现对 T_m 矩阵中的参数控制,以实现交互过程中受训用户对零部件的移动。当移动的是较大部件时,如大修时将发动机吊装移除,发动机上附带了较多零件,但由于并未拆除,VMTS中的约束机制并未解除,发动机上的零件会随发动机一同移动,故只需进行发动机的移动路径控制即可。

同时,在零部件移动过程中,用户每输入移动变量,

VMTS 即进行碰撞检测,若不发生碰撞,则移动成功,若发生碰撞则会弹出相应提示。其移动路径规划流程如图 8 所示。而安装过程则是先进行移动过程,将零部件移动到待装位置,再使用工具完成交互式安装过程。

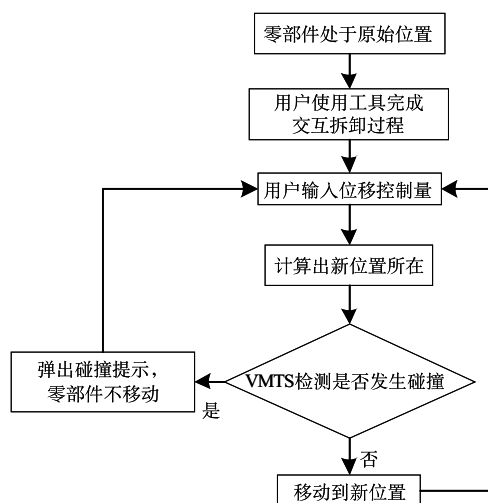


图 8 移动路径规划流程
Fig.8 The process of the moving path plan

同时,部分零部件在移动过程中,只有精确地移动到相应位姿,才能进行后续工作,如发动机在吊装移除过程中,只有精确地与试车台对正,方可进行固定安装。 P^* 为校正矩阵,每完成一次移动过程 P^* 即被计算一次,并将校正矩阵 P^* 中的矩阵变量与数据库中存储的相应零部件完成移动时 vpPositional 节点范围变量进行对比,直至校正矩阵 P^* 中的矩阵变量均符合相应范围时,移动过程完成,可进行下一零部件的交互拆装工作。即:

$$P^* = P' - P = \begin{bmatrix} X_{v_1}' & X_{v_2}' & X_{v_3}' & 0 \\ Y_{v_1}' & Y_{v_2}' & Y_{v_3}' & 0 \\ Z_{v_1}' & Z_{v_2}' & Z_{v_3}' & 0 \\ X_s' & Y_s' & Z_s' & 0 \end{bmatrix}$$

4 应用实例

以 Ka-32 直升机发动机级涡轮叶片损坏变形而导致的试车过程中产生双发转速差和压气机转速摆动并伴有喘振噪声为例,受训用户在 VMTS 平台上进入发动机故障诊断模块后,打开虚拟驾驶舱进行试车过程中,发现双发转速差超出了 AMM 手册中的规定范围,同时一发压气机转速出现摆动并伴有喘振噪声的产生。

受训用户点击工具栏上的发动机排故模块按钮进入发动机故障诊断界面,在异常仪表区中“仪表 1”一栏内选择左发

压气机转速表,“参数 1”中选择摆动一项;“故障现象 1”中选择双发转速差;“故障现象 2”中选择噪声,单击复合诊断按钮,故障诊断结果如图 5 所示,按诊断结果中所提供的故障树,在工具库中取出压力计和流量计对气路及油路连接紧固性进行检查,再对其余故障节点逐一进行检查,当使用孔探仪对发动机涡轮叶片进行检查时,在孔探仪的虚拟界面(如图 9 所示)上发现涡轮叶片存在比较严重的裂纹,为排除故障必须将直升机从发动机移除后在地面进行涡轮叶片的修理及更换。

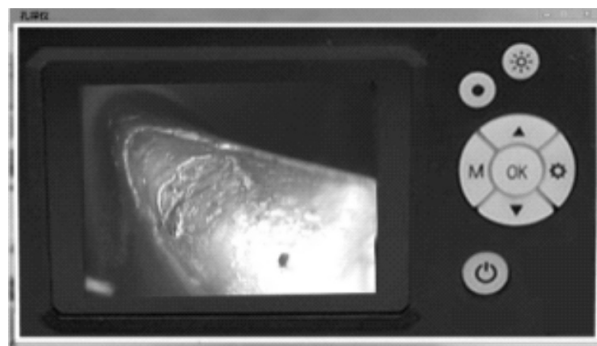


图 9 孔探仪虚拟界面
Fig.9 The interface of the virtual borescope

如图 10 所示,受训用户按照 TB3-117 发动机 TSM 手册中的要求,使用交互式拆装方式将发动机与直升机的相关连接断开并安装起吊设备后将发动机从虚拟样机上移除。用起吊设备将发动机移动到地面试车台后进行相关固定与连接,完成发动机在试车台上的安装,如图 11 所示。

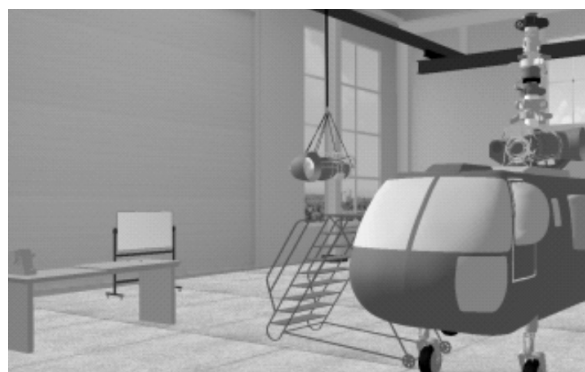


图 10 发动机起吊移除
Fig.10 The hang and removal of the engine

再次使用交互式拆装方式进行损坏涡轮桨叶的更换,更换完成后单击发动机排故模块中的地面试车按钮,进行地面试车过程,地面试车台仪表盘如图 12 所示。

待地面试车台仪表盘上发动机相关参数恢复正常后,再次用起吊设备将发动机交互式安装回飞机并进入虚拟

驾驶舱测试,发现各仪表参数恢复正常,故障现象消失,至此整个发动机排故流程完成。



图 11 发动机地面安装

Fig.11 The install of the engine on the ground

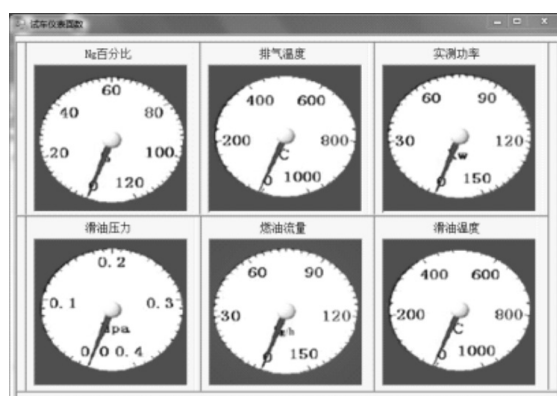


图 12 地面试车台仪表面板

Fig.12 The instrument face plate of the ground test bay

5 结论

本文以 VMTS 为基础,依据实际直升机发动机排故流程及特点,一方面规划并设计了基于 CBR 的多故障特征信息复合诊断功能,在 VMTS 中实现了针对于 Ka-32 发动机的虚拟故障诊断过程;另一方面结合 VMTS 中原有拆装机制,设计了 Ka-32 直升机发动机拆卸及排故流程,实现了具有高度真实性及可视操作性的发动机虚拟拆卸、排故、维修过程,对受训用户具有良好的训练及指导意义。

AST

参考文献

- [1] 刘科文. 虚拟现实技术及其应用 [J]. 数学技术与应用, 2012 (10): 123.
LIU Kewen. Virtual reality technology and its application[J]. Digital Technology and Application, 2012 (10): 123. (in Chinese)
- [2] Gervasi R A, Pacifict L. VSMLabG: A virtual laboratory prototype for molecular science on the Grid.Future[J]. Gene-ration Computer Systems, 2004, 20: 717-726.
- [3] Squelch A P. VR as an industrial training and marketing tool[C]// Conference Proceedings IFIP 2000, 2012.
- [4] 孔庆东. 发动机故障诊断虚拟培训系统的开发 [D]. 长春 吉林大学, 2015.
KONG Qingdong. The development of virtual training system for engine fault diagnosis[D].Changchun: Jilin University, 2015. (in Chinese)
- [5] 张立辉. 有关涡轴发动机故障诊断过程的探讨 [J]. 科技资讯, 2015 (11): 43.
ZHANG Lihui. Debates about the fault diagnosis of the turbo-shaft engine[J]. Science & Technology Information, 2015 (11): 43. (in Chinese)
- [6] 李洪伟, 范文正, 李建国. 某型涡轴发动机故障诊断专家系统研究 [J]. 航空维修与工程, 2007 (05): 47-49.
LI Hongwei, FAN Wenzheng, LI Jianguo. The research of fault diagnosis expert system for a given turbo-shaft engine[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2007 (05): 47-49. (in Chinese)
- [7] 张学军, 李能, 刘文慧. TB3-117 型发动机 II 级涡轮导向器的焊接修复 [J]. 航空维修与工程, 2014 (06): 49-50.
ZHANG Xuejun, LI Neng, LIU Wenhui. Welding repair of the 2nd turbine guide vanes in TB3-117 engine[J].Aviation Maintenance & Engineering, 2014 (06): 49-50. (in Chinese)
- [8] 张秀山, 钟何平, 曹水. 层次约束关系不变的虚拟拆装模型及其 VRML 实现 [J]. 系统仿真学报, 2009 (05): 1367-1371.
ZHANG Xiushan, ZHONG Heping, CAO Shui. Hierarchy-invariant interactive virtual maintenance modeland its VRML-based simulation[J]. Journal of System Simulation, 2009 (05): 1367-1371. (in Chinese)
- [9] 孙桂兰. 基于 MultigenCreator/VegaPrime 的轮轨运动虚拟仿真 [D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
SUN Guilun. The visualized virtual simulation of wheel-rall movement based on MultigenCreator/VegaPrime[D].Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014. (in Chinese)
- [10] 任天猛. 交互式虚拟装配平台关键技术的研究 [D]. 长春 长春工业大学, 2016.
REN Tianmeng. Research on key techniques of interactive virtual assembly platform[D].Changchun: Changchun University of Technology, 2016. (in Chinese)

作者简介

陈磊 (1991—) 男, 硕士。主要研究方向: 虚拟维修、故障诊断。
Tel: 022-24092424

E-mail: 1027549418@qq.com

史永胜 (1965—) 男, 博士, 教授。主要研究方向: 结构智能化设计、故障诊断与结构修理、专家系统、知识表示。

Research on Virtual Engine Troubleshooting Training Technology of the Ka-32 Helicopter

CHEN Lei*, SHI Yongsheng

School of Aviation Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

Abstract: The helicopter engine maintenance and troubleshooting training is an important content to the recruits during their maintenance learning and training process, in order to solve the issues that the engine disassembly is difficult and the training resources is limited. Based on the original disassembly mode of the helicopter Virtual Maintenance Training System (VMTS), according to the basis of the the helicopter engine maintenance work process and the TSM handbook, design the interactive disassembly training mode of the helicopter troubleshooting, and the training process from Ka-32 engine removal to Ka-32 engine ground test is realized in the virtual environment by combining this interactive disassembly training mode with using the engine ground test bench and other special tools.

Key Words: fault diagnosis; engine troubleshooting; virtual maintenance; training system

Received: 2017-04-27; **Accepted:** 2017-06-05

***Corresponding author. Tel. :** 022-24092424 **E-mail:** 1027549418@qq.com