

直升机交互式桨叶振动调整仿真研究

宋云雪, 李森, 陈磊

(中国民航大学 航空工程学院, 天津 300300)

摘要: 为解决目前机务维修培训中存在的物理样机难以满足需求的问题, 以实际机务维修工作中旋翼振动调整方法为参考, 提出在虚拟维修训练系统的基础上实现受训人员对虚拟样机旋翼桨叶进行振动调整仿真操作, 以期达到训练目的; 根据非沉浸式虚拟维修训练系统的特点设计交互仿真操作逻辑, 确定仿真操作步骤, 分析座舱振动可视化表示方法, 专用虚拟样机的构建方法以及虚拟仪器的实现方式和数据组织结构形式, 并将该仿真实验以模块化形式添加到虚拟维修训练系统中, 满足拆装条件下对虚拟样机的交互操作需求; 最后以欧直松鼠直升机虚拟样机旋翼振动调整方法为例验证该操作仿真逻辑的可用性。

关键词: 旋翼桨叶; 振动调整; 虚拟维修; 仿真操作

Research of Interactive Blades Vibration Adjustment Simulation

Song Yunxue, Li Sen, Chen Lei

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

Abstract: In order to solve the problems that physical prototype can't satisfy the current engineering maintenance training. Based on the method of blades vibration adjustment for the practical work reference. Put forward that trainees do the operation of blades vibration adjustment with virtual prototype in Virtual Maintenance Training System. Design the interactive simulation logic, determine the steps, Analysis the visual representation method of cockpit vibration and the method of virtual prototype build based on the system's feature. It also proposed the method of the virtual instrument's implementation and the data organization form. Then add the experiment to VMTS in a modular form in order to satisfy the demands of interactive. Finally, make the AS350 helicopter virtual prototype's blades vibration adjustment as an example to verify the availability of the simulation logic.

Keywords: rotor blade; vibration adjustment; virtual maintenance; simulation operation

0 引言

直升机在国防民用领域均已大量应用, 随着直升机数量的增加, 对专业维修人员的需求越来越大, 因此对机务维修人员的培训变得十分重要。基于计算机技术发展的虚拟维修训练系统能很好的解决传统维修训练中培训成本高, 效率低下等问题, 使受训人员能在虚拟现实(virtual reality, VR)环境下对虚拟样机进行操作学习^[1-2]。本文研究在非沉浸式虚拟维修训练系统(virtual maintenance training system, VMTS)中实现对直升机旋翼桨叶振动的检查调整的交互仿真方法, 并以欧直 AS350 小松鼠直升机为实例验证方法的可用性。

旋翼在高速工作旋转时若存在系统力不平衡现象, 则会产生强烈的周期振动。这些振动会引发旋翼组件的高周振动疲劳而降低其寿命甚至使其损坏, 同时还会影响电子仪表设备的工作, 降低成员的舒适水平, 干扰飞行员操作而影响飞行安全^[3]。

旋翼振动的主要原因是桨叶的轨迹出现偏差及传动部件不

平衡。直升机在出厂时厂家都会对旋翼组件进行动平衡配平并以不同颜色区分对应的桨叶及其连接组件以保证其振动范围可接受。当直升机大修, 旋转组件零件被更换或者振动水平明显增大时, 就需要机务人员进行旋翼振动检查与调整^[4]。因此直升机旋翼桨叶振动检查与调整是直升机维修工作中一项十分重要的工作。

1 旋翼振动的检查与调整

旋翼振动检查调整包括在直升机日常维护中对旋翼组件振动范围的检查方法和步骤及根据维修手册对存在不平衡现象的桨叶的配平等。

1.1 旋翼振动检查

旋翼振动检查指利用如频闪仪、磁性传感器、加速计、光学探头及测量主机等专用测量设备安装在直升机特定部位, 在直升机特定工作状态下获得相应动平衡振动幅值与相位数据, 经过一定数据处理后得出旋翼振动范围的过程^[5]。参照某型直升机维修手册得出旋翼振动检查一般步骤如图 1 所示。

旋翼振动检查包括测量设备的安装和数据测量两个方面。测量设备的安装包括在水平 Y 坐标轴方向的加速计和速度计两种传感器与竖直方向 Z 轴的两种传感器, 同时还要在旋翼叶片翼尖安装靶标以便于频闪探测仪捕捉测量翼尖轨迹。在相关传感器安装和电缆连接过程中要注意避开旋转部件和高温区域, 避免干扰测量。

收稿日期: 2015-09-19; 修回日期: 2015-10-14。

基金项目: 天津市支撑计划项目(11ZCKFGX04100); 中央高校项目(ZXH2012D003)。

作者简介: 宋云雪(1968-), 女, 辽宁鞍山人, 硕士, 副研究员, 主要从事结构智能化设计、故障诊断与结构修理、专家系统、知识表示图方向的研究。

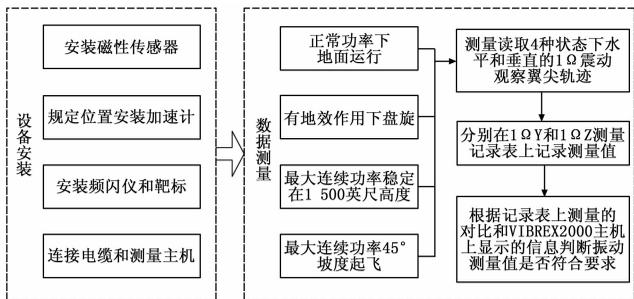


图 1 直升机旋翼振动检查一般步骤

数据测量分别在 4 个典型的工作状态下进行：正常功率地面运行，有地效作用下的盘旋，最大连续功率下稳定于 1 500 英尺状态和最大连续功率在 45° 坡度起飞。每个工作状态下都要分别观察记录旋翼的翼尖轨迹，垂直方向的 1ΩZ 和水平方向的 1ΩY 的振动值。测量完成后可通过频闪仪观察旋翼锥体的情况，通过 Vibrex2000 测量主机得出的振动 IPS 和相位角数据可以得出在平衡图中的点的位置以便于进行锥体和动平衡的调整工作^[6]。

1.2 旋翼振动的调整

直升机旋翼的振动调整方式根据检查得到的数据而定。因测量传感器分别安装在水平 Y 坐标轴和竖直 Z 坐标轴上，故在两个方向上的振动调整分别对应不同的方式。

若水平方向的 1 Ω Y 振动异常，则通过平衡图中点的位置以增加或减少桨叶根部配重片数量的方式进行修正。若竖直方向的 1 Ω Z 振动值异常，则通过改变变距拉杆的长度或调整桨叶后缘片的角度来修正。

2 桨叶振动调整在 VMTS 中的交互仿真

VMTS 是在虚拟现实环境下对虚拟样机进行拆装为基础的虚拟维修训练系统，是以计算机图形技术为依托真实还原实际维修过程为目的的虚拟软件平台^[7]。振动调整操作在平台中以模块化组件形式存在。下面就振动调整工作如何在 VMTS 中合理实现并与用户进行友好交互进行具体分析。

2.1 在 VMTS 中的交互逻辑设计

调整操作在 VMTS 中的过程应让用户在计算机上操作使用时有真实之感^[8]。结合直升机旋翼桨叶振动调整方法与虚拟维修训练系统操作要求，设计其在 VMTS 中的交互逻辑如图 2 所示。

由图 2 可知，VMTS 中已经实现了对直升机虚拟样机的可视化拆装，用户在该平台虚拟拆装的基础上对旋翼桨叶进行振动检查调整。用户将虚拟维修训练系统中的排故模块打开之后，通过虚拟驾驶舱窗口的状态或对旋翼组件的操作情况判断是否需要进行旋翼桨叶的振动调整，然后用户在可视化 3D 拆装主窗口中将进行该工作需要的工作平台布置就位，从工具库中取出测量设备并按照工作要求安装在对应检测位置，之后用户需在虚拟仪器测量界面将测量设备添加到测量窗口，同时选择对应的虚拟仪器，将二者端口正确连接。返回驾驶舱后开车运行，虚拟仪器界面有对应读数，通过虚拟仪器读数确定对桨叶振动的调整方案，然后用户在虚拟拆装界面选择对应零部件进行调整操作，最后对调整之后的旋翼振动情况进行测试

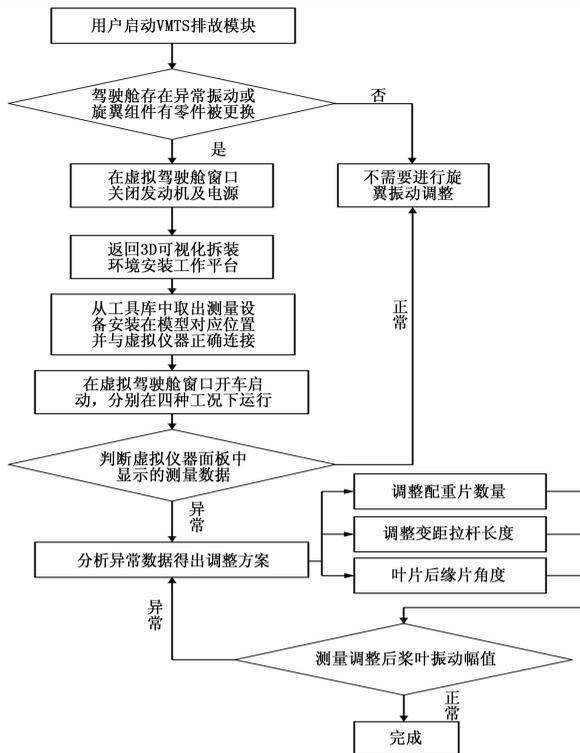


图 2 桨叶振动调整在 VMTS 中逻辑

判断。

2.2 需解决的关键问题

在 VMTS 中进行旋翼桨叶振动检查调整的仿真应尽可能在虚拟现实环境下模拟实际工作情况。从图 2 中对交互逻辑的说明看，要真实的实现仿真过程，需解决的关键问题有如下几个方面。

2.2.1 虚拟驾驶舱振动可视化表示方法

用户对驾驶舱异常情况的表示需要座舱的若干仪表相互之间联动显示^[9]。单一仪表的故障情况会伴随其他仪表显示器的读数异常。采用多线程技术可以解决不同仪表之间的联动显示问题，实现单一仪表的驱动则需要在线程中添加仪表响应函数；实现多个仪表的同时更新，则需要启动多个线程在每个线程中逐个添加每个仪表的响应。引入多线程步骤包括线程的创建，线程的启动，线程的销毁和休眠操作。其中线程的创建对应代码如下：

```

UNIT InsThreadProc (LPVOID pParam)
{
    CInsPanelObj * Ins _ Name= ( CInsPanelObj * ) pParam; //仪表对象
    Ins _ Name->DrawCircle (CDC * pdc); //仪表操作
    return true;
}
    
```

虚拟座舱仪表要结合真实座舱建立相应模型，从而达到身临其境之感，座舱仪表界面如图 3 所示。

2.2.2 仿真操作中专用虚拟样机构建

虚拟样机是 VMTS 中进行交互式操作的基础，目前 CAD



图 3 VMTS 中虚拟座舱显示

系统是虚拟样机数据的主要来源, 因此可以利用 CAD 输出的几何数据, 建立虚拟维修样机的几何模型, 从 CAD 系统到虚拟环境中虚拟样机的建模过程如图 4 所示。

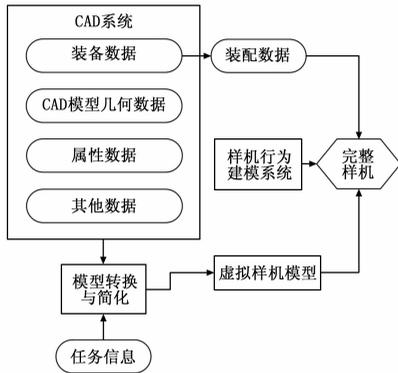


图 4 CAD 系统到虚拟样机建模过程

在处理过程中有以下几个关键步骤:

- 1) 从 CAD 系统输出产品的装配数据文件, 包括零部件之间的约束关系。
- 2) 将输出文件模型进行简化, 去掉冗余信息, 给模型赋予材质或表面纹理属性使其更加接近现实世界质感。
- 3) 在虚拟维修环境中将模型加载显示, 检查文件模型完整性, 反馈到 CAD 系统中进行修改完善。

2.2.3 虚拟仪器的设计与实现

虚拟仪器是基于单元要素的设计而尽可能模拟检测仪的工作原理。根据构成虚拟仪器的各仪表单元的性质及功能, 将其分成三类: $\Sigma = (I, C, W)$ 。I 代表仪器单元集 $I = I_1 + I_2 + \dots + I_n, I_i \in \{ \text{指针类, 数字显示类, 波形图示类, } \dots \}$, 仪器单元可表示为:

$$I_i = \mathbf{A}_i \times \mathbf{F}_i + \mathbf{V}_i$$

式中, \mathbf{A}_i 代表与仪器单元属性相关的系数矩阵,

$$\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \dots & \lambda_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_{m1} & \dots & \lambda_{mn} \end{bmatrix};$$

\mathbf{F}_i 代表函数矩阵,

$$\mathbf{F}_i = [f_1, \dots, f_n]^T$$

\mathbf{V}_i 代表参量矩阵,

$$\mathbf{V}_i = \begin{bmatrix} v_{11} & \dots & v_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{m1} & \dots & v_{mn} \end{bmatrix}$$

C 代表控制单元集, $C = C_1 + C_2 + \dots + C_n, C_i \in \{ \text{按钮式开关, 旋转式开关, } \dots \}$;

控制单元可表示为:

$$C_i = \mathbf{A}_i \times R$$

式中, \mathbf{A}_i 代表与控制单元属性相关的系数矩阵,

$$\mathbf{A}_i = [\lambda_1, \dots, \lambda_n];$$

R 代表资源矩阵,

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & \dots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix}。$$

设 $f(x)$ 为集合 C 的一个函数, 对于 $\forall x \in C$ 存在 $f(x) = \sum_{i=1}^n T(x_i)$, 其中 $T(x)$ 表示导入控制单元元集上资源的函数^[11]。

以上表示出了虚拟仪器单元集之间的函数关系, 在 VMTS 中建立虚拟仪器时通过函数库、元件库、以及需要的辅助资源库的组合构成不同的功能模块, 每一个功能模块都是一个独立的组件, 是已经编译、链接好并可以使用的二进制代码, 其具有语言无关性, 用户可根据需要自行设计取用对应的虚拟仪器, 最终完成虚拟检查功能。

2.2.4 数据组织结构的设计与实现

在 VMTS 中实现用户对虚拟样机桨叶振动调整仿真需要零件仪器对应关系表 T_RelatePanel, 虚拟仪器状态参数表 T_AllState, 知识是数据表 RulesTree, 值与面板关系表 VaulePheno 以及数据源 PanelStateFail, PanelStateNormal, CtrlStateNormal, CtrlStateFail 等数据库的支持, 需要对以上数据库关联逻辑进行设计, 从而合理的实现操作与工具及被操作对象之间的对应关系。数据库之间的关联关系如图 5 所示。

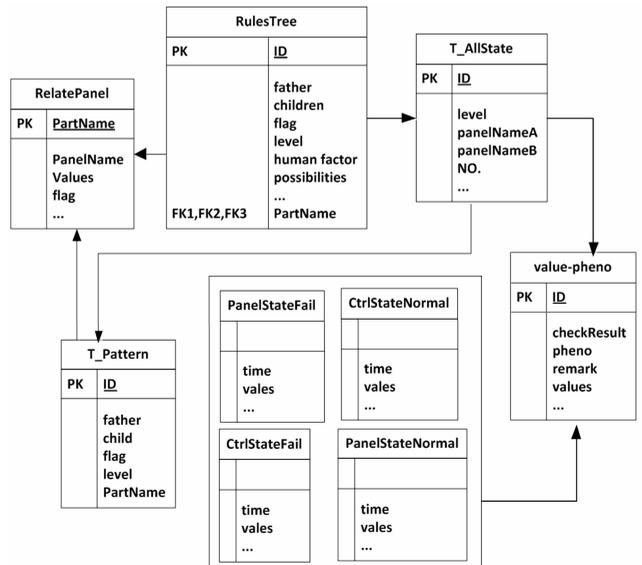


图 5 数据表关联逻辑

2.3 模块交互界面设计

作为实际维修过程在虚拟环境下的再现, 维修过程实质是人、产品、工具设备三者之间发生交互的过程。在 VMTS 中进行直升机桨叶振动调整根据图 2 中的逻辑设计共包括工

具选择与安装, 仪器选择与测量和零件调整与维修 3 个交互窗口。

工具选择与安装包括选择专用工具设备并在可视化的虚拟环境下将其正确安装。专用工具有工作平台, 拆装工具, 测量用传感器, 靶标等需要安装在直升机特定部位的设备及安装过程中要用的工具。通用拆装工具可通过拆装界面右侧的工具栏选择, 其他专用工具在零件仓库分类下选择取出, 之后再在可视化环境下安装就位。

仪器选择与测量是在虚拟测量界面选用正确的虚拟仪器并将仪器面板显示在窗口中, 将仪器端口线缆正确连接并返回虚拟驾驶舱开车运行后, 便可在显示面板上读取运行状态数据, 用户根据测得数据和平衡图判断振动幅值是否在容限范围内。测量界面如图 6 所示。

零件调整与维修界面目的是让用户测量后根据结果对桨叶配重, 后缘片或变距拉杆进行调整。包括测量所得数据, 建议操作步骤及注意事项等。用户操作后系统将原有零件状态数据更新, 再次返回测量便可得出调整操作是否正确。该界面如图 7 所示。

装在模型桨叶上完成振动调整。最后再次开车测量检查调整是否正确。



图 8 桨叶振动选择界面



图 6 仪器选择与测量

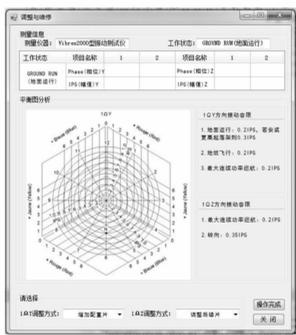


图 7 桨叶调整与维修

3 应用实例

现以欧直 AS350B3 直升机地面运行状态旋翼桨叶振动检查调整为例, 在 VMTS 下进行虚拟仿真操作。用户打开虚拟驾驶舱开车发现异常振动或者旋翼组件有更换操作之后, 在故障诊断任务下选择桨叶振动调整命令, 分别将其下的零件工具库, 仪器选择与测量, 调整与维修 3 个窗口打开。如图 8 所示。在零件工具库中选择该工作必需的两个加速计, 磁性传感器和工作平台取出并安装就位, 然后在仪器选择与测量窗口中选择 Vibrex2000 型振动测试仪, 工作状态选择 GROUND RUN, 同时在窗口右侧的接口选择里将接口与传感器相连, 操作虚拟仪器界面按钮, 进入待测状态, 最后返回虚拟驾驶舱开车运行, 显示器显示测量读数 1QY 为 0.6IPS@6:00。将测量读数填入下方记录表之后完成写入系统, 然后在调整与维修界面显示对应平衡图, 根据右侧振动容限用户选择水平方向和竖直方向振动调整方案, 1QY 方向调整方式是增加配重片, 蓝色红色各增加 4 片。从零件工具库中取出 8 片配重片分别安

4 结论

本文以虚拟维修训练系统为基础, 提出直升机旋翼桨叶振动调整在非沉浸环境下的实现方法。并结合对实际工作流程的分析设计了在虚拟环境下的交互逻辑, 将可视化拆装与虚拟仪器的有机结合逼真的实现了桨叶振动检查调整过程。同时该方法对以 VMTS 基础的其他领域的工作仿真提供很好的借鉴意义。

参考文献:

[1] Julia C, Jaime R, De Antonio Angelica. Applying a student modeling with non-monotonic diagnosis to Intelligent Virtual Environment for Training/Instruction [J]. ICCE, 2014, 41 (2): 508-520.

[2] 佟德飞, 米双山, 刘鹏远, 等. 虚拟维修训练系统过程建模研究 [J]. 信息技术, 2011 (1): 106-107.

[3] 陈康, 刘建新. 直升机结构与系统 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 2007.

[4] AS350 Aircraft Maintenance Manual [Z]. Eurocopter. 2014: 109-112.

[5] 李思昂. 直升机桨叶振动的检查与调整 [J]. 航天与航空, 2014 (06): 6-8.

[6] 钟恢芳. EC-225 直升机主桨叶振动维护 [J]. 航空维修与工程, 2013 (03): 72-74.

[7] 周栋, 霍琳, 王美慧, 等. 虚拟维修技术研究与应用 [J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37 (2): 231-236.

[8] 于畅. 虚拟维修训练中人机交互的认知负荷研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2012.

[9] 周芳. 直升机控制方法研究及三维可视化系统开发 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.

[10] 国志刚, 刘振祥, 李宏. 基于 Delmia 的飞机虚拟维修仿真与评价技术研究 [J]. 飞机设计, 2012 (06): 62-66.

[11] 赵江滨, 刘世元, 胡友民, 等. 组件化虚拟仪器软件系统性能研究 [J]. 仪器仪表学报, 2009, 30 (10): 2131-2138.