

军车发动机低压涡轮叶片裂纹失效检测系统设计

李琳

(郑州航空工业管理学院 计算机科学与技术系, 郑州 450015)

摘要: 针对传统的军车发动机检测系统对于低压涡轮叶片裂纹失效检测的实时性和准确性较低的问题, 设计了一款新的军车发动机低压涡轮叶片裂纹失效检测系统; 该系统主要由叶片频率检测部分和叶片裂纹实验部分构成; 硬件部分主要包括 NI USB-9233、PCB 加速度传感器、MA-600 功放器、PYD-1 型电涡流急疲劳试验器、以及 PCB 力锤等构成; 软件部分主要针对叶片裂纹检测界面进行了设计, 主要设计了检测系统的主界面、检测通道、检测信号模块和信号波形显示模块; 最后进行实验, 实验中对叶片上的 20 个测试点进行锤击, 在进行通道参数设置的过程中, 需要设置通道 1 作为力通道, 通道 2 作为叶片裂纹信号响应通道; 实验结果表明文中算法对叶片裂纹深度 0.2 mm~2 mm 的发动机低压涡轮叶片检测准确率达到 98%, 比传统算法提高 32%, 取得了令人满意的效果。

关键词: 军车发动机; 低压涡轮叶片; 裂纹; 失效检测

Military Vehicles Engine Low Pressure Turbine Blade Crack Failure Detection System Design

Li Lin

(Department of Computer Science and Application, Zhengzhou Institute of Aeronautics Industry Management, Zhengzhou 450015, China)

Abstract: the low pressure turbine blade is the key to the military car engine parts. In view of the traditional military vehicles engine test system for low pressure turbine blade crack failure detection of real-time and accuracy problem of low, design of military vehicles engine low pressure turbine blade crack failure detection system. The system is mainly composed of blade frequency measuring experiment part and blade crack parts. Hardware part mainly include NI USB-9233, PCB acceleration sensors, amplifiers, PYD MA-600-1 type eddy current emergency force hammer fatigue tester, and PCB, etc; Software part mainly aimed at the blade crack detecting interface design, the main design of the detection system of the main interface, channel, detecting signal module and waveform display module. The last experiment, experiment of 20 test point on the blade hammer, on channel in the process of parameter Settings, you need to set up the channel 1 as a force, the channel 2 as blade crack signal response. The experimental results show that the algorithm of engine blade crack depth of 0.2 mm to 2 mm low pressure turbine blade detection accuracy reached 98%, 32% higher than that of traditional algorithm, satisfactory results have been achieved.

Keywords: military vehicles engine; low pressure turbine blade; crack; failure detection

0 引言

低压涡轮叶片是军车发动机的核心部件之一^[1-2]。低压涡轮叶片数量较多, 使用环境恶劣, 极易因应力过大造成叶片出现裂纹导致叶片失效^[3]。叶片时效会造成发动机故障最终导致军车无法行驶^[4-5]。如何设计军车发动机低压涡轮叶片裂纹失效检测系统已经成为军事领域需要研究的热门问题, 受到很多专家的普遍关注^[6]。

当前阶段, 主流的军车发动机检测系统无法针对军车发动机低压涡轮叶片裂纹失效进行检测, 对军车的安全行驶带来严重的安全隐患^[7]。为此设计了一种针对军车发动机低压涡轮叶片裂纹失效的检测系统。实验结果表明能及时准确的检测出发动机低压涡轮叶片中的裂纹情况, 从而为军车的安全行驶提供了保障。

1 发动机低压涡轮叶片检测系统设计

1.1 低压涡轮叶片检测系统构成

当前的军车发动机检测系统无法针对军车发动机低压涡轮叶片裂纹失效进行准确检测, 导致军车的行驶中安全隐患较大。需要对传统系统进行改进, 改进的军车发动机低压涡轮叶片裂纹失效检测系统主要由叶片频率检测模块和叶片裂纹实验模块构成。实验需要的设备主要有 NI USB-9233、PCB 加速度传感器、MA-600 功放器、PYD-1 型电涡流叶片裂纹试验器、以及 PCB 力锤等。其中关键的设备是 NI USB-9233。NI USB-9233 主要由 24 位动态信号采集卡、4 路输入 USB 动态信号采集模块和 4 路同步采集模拟输入模块构成^[8,9], 具备 ±5 V 的信号输入范围, 信号采样频率最高可达 50 ks/s。4 路输入通道同时进行信号输入时采样速率最高能够达到 50 ks/s 将输入信号转化为数字化信号。交流耦合与 IEPE 能够长时间共同使用。USB2.0 具备 24 位高速分辨率, 其动态范围为 102 db; NI USB-9233 的动态范围为 102 db, 能够与加速度计共同实现集成电路电压式的信号调理功能。低压涡轮叶片裂纹检测系统构成用图 1 能够进行描述。

收稿日期: 2014-04-11; 修回日期: 2014-05-08。

作者简介: 李琳 (1981-), 女, 河南洛阳, 本科, 讲师, 主要从事数据库方向的研究。

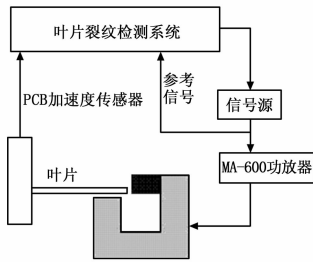


图 1 低压涡轮叶片检测系统构成

1.2 叶片裂纹信号采集系统设计

NI USB-9233 不能直接对叶片裂纹信号进行采集, 因此, 在设计信号采集系统时, 需要利用连续采集的方式进行信号采集。叶片裂纹信号检测时, 其原理如下: 在连续采集方式下, 对信号的电压值进行判断, 假设采集的信号电压值达到预设的触发电平时, 系统自动开始记录当前数据, 其中包括负延时的这段数据, 停止信号采集的条件是采集到预设的点数。根据上述方法能够完成 NI USB-9233 的信号采集过程。如果要实现对叶片裂纹失效信号的连续采集和定频采集, 则需要调用 NI 中的 VC 函数库进行叶片裂纹信号的采集。

利用叶片裂纹失效信号采集系统采集的叶片裂纹与信号相位的关系之间具体的技术参数能够用下表 1 和表 2 进行描述:

表 1 叶片裂纹深度与信号相位的关系

叶片裂纹深度/mm	信号相位/°
0.2	97.62
0.4	96.38
0.6	95.11
0.8	93.59
1.0	88.58

表 2 叶片裂纹位置与信号相位关系

叶片裂纹位置/mm	信号相位/°
4	67.39
8	71.54
12	79.64
16	82.41
20	92.33

表 1 是叶片裂纹位置 $LC = 12 \text{ mm}$ 时, 裂纹深度与信号相位的关系; 表 2 是叶片裂纹深度 $d = 0.4 \text{ mm}$ 时, 裂纹位置与信号相位的关系。从上表 1 和表 2 中的结果能够得知, 当发动机低压涡轮叶片的裂纹位置确定时, 裂纹深度越深, 信号的相位越大; 当裂纹深度确定时, 裂纹距离叶片根部越远, 信号的相位就越大。利用上述系统对采集的裂纹信号进行分析后能够得知, 当裂纹的位置位于叶片根部时, 采集信号的相位变化率越大。采集到的信号相位发生变化时, 系统会自动记录并发送频率。

2 低压涡轮叶片检测系统主界面设计

本文利用 VC++ 编写的军车发动机低压涡轮叶片裂纹失

效检测系统的主界面能够用图 2 进行描述。

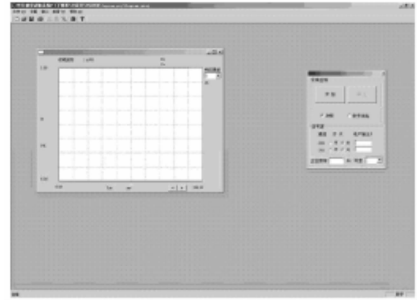


图 2 叶片裂纹失效检测系统主界面

主界面主要包括叶片裂纹信号的波形、控制面板和菜单选项。在该界面能够完成叶片裂纹的测频工作, 并且能够实现多通道同时进行信号的采集。面板中的功能按钮能够实现信号的采集和对信号源的控制。

2.1 低压涡轮叶片检测系统的通道设计

在进行军车发动机低压涡轮叶片裂纹失效检测的过程中, 需要针对检测系统的信号采集通道进行设计。

根据图 2 能够得知检测系统中全部可利用通道的设置情况, 并能够实现在该界面对信号采集通道进行设置。通道列表中各项功能的含义如下所述:

- 1) 通道激活: 点击后会出现下拉菜单, 可以选择激活或者关闭几条通道。
- 2) 标示: 用来描述当前检测信号的类型, 如速度、位移等, 单击后会出现下拉菜单进行选择。
- 3) R 类型: 确定在频响函数计算中, 当前对应的通道是作为参考通道还是作为响应通道。
- 4) 耦合: 单击相应的下拉菜单后, 能够选择 AC 和 DC 这两种耦合方式进行耦合。
- 5) 传感类型: 单击相应的下拉菜单后, 会出现 ICP ON 和 ICP OFF 这两个选项。如果当前对应的通道中使用了 ICP 传感器时, 必须选择 ICP ON。
- 6) 量程: 单击相应的下拉菜单后, 会出现自动、 $\pm 10 \text{ V}$ 、 $\pm 5 \text{ V}$ 、 $\pm 2.5 \text{ V}$ 、 $\pm 1.25 \text{ V}$ 、 $\pm 0.625 \text{ V}$ 这几种量程可供选择, 选择时必须满足实际需要以及信号采集卡的要求。
- 7) 单位模式: 用来描述工程单位 EU。
- 8) 标定值: 用来设定当前通道中的传感器的灵敏度。
- 9) 单位: N, g, mm/s, mm, EU, V 分别能够描述牛顿, 加速度, 速度, 位移, 工程单位和电压。
- 10) 测量点: 用来描述当前测量通道对应的发动机低压涡轮叶片上的测量点。
- 11) 方向余弦: 用来描述当前通道传感器测量的方向。

2.2 叶片检测系统的检测信号模块设计

检测信号模块中包括信号频带、检测次数、触发设置和窗函数等选项的设置。信号检测在程序启动时会自动加载上次到的信号数据, 如需更改则会做出相应的提示。各选项设置功能的含义如下所述:

- 1) 频带设置: 能够设置信号频率的分析频宽。信号频率的间隔根据分析频宽和 FFT 点数确定。分析频宽乘以 2.56 即为采样频率。采样频率除以采样点数即为频率间隔。

2) 触发设置: 利用该功能, 能够设置触发通道、触发延时、触发电平等功能。

3) 窗函数设置: 利用该功能, 能够设置力窗指数窗、平顶窗和 hanning 窗。

4) 检测次数设置: 能够设置检测系统对叶片的检测次数。

2.3 叶片检测系统的波形显示模块设计

利用图 3 能够描述叶片检测系统的检测的叶片裂纹信号波形显示模块。

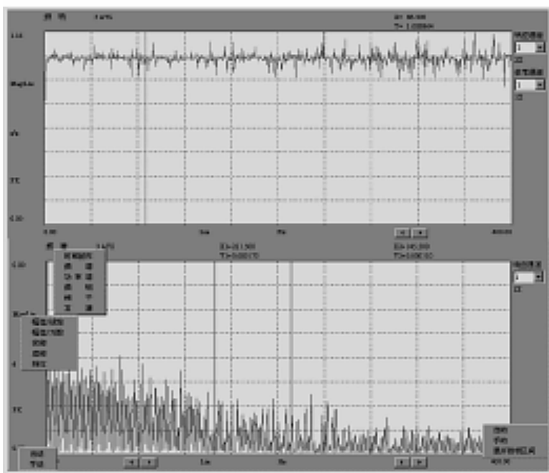


图 3 叶片裂纹信号波形显示模块

根据图 3 能够得知, 该模块中包括数据分析、坐标选项、响应通道等。各选项功能的含义如下所述。

1) 数据分析: 能够对叶片波形信号的时域、频谱、功率谱等进行分析。

2) 坐标选项: 能够对叶片波形信号的幅值、实部、虚部、相位进行分析。

3) 响应通道: 每个信号窗口都能显示当前检测的通道。

2.4 叶片裂纹失效检测系统检测流程

本文设计的军车发动机低压涡轮叶片裂纹失效检测系统的检测流程能够用图 4 进行描述。

本文设计的叶片裂纹失效检测系统主要有频率检测与裂纹实验这两部构成。进行叶片裂纹实验之前, 首先需要检测叶片的一阶固有频率, 然后再通过裂纹实验模块将获取的叶片频率信号发送出去。利用采集卡采集到的叶片信号响应数据能够判断叶片是否存在裂纹。假设存在裂纹, 即改变发送信号的频率, 从而能够得到最好的检测结果。

2.4.1 叶片裂纹实验过程

在进行发动机低压涡轮叶片裂纹实验的过程中, 需要使用 JDF-1 型电涡流激振器, 能够检测叶片裂纹信号的相位变化、响应幅值。其中最重要的一项是对裂纹信号相位变化的检测。当叶片在实验的过程中出现裂纹时, 其信号的响应以及相位特征就会发生变化。叶片裂纹实验开始时, 信号源传输的频率就是涡轮叶片的一阶固有频率。假设叶片出现裂纹, 就会离开共振区, 此时叶片裂纹实验的效果会降低。检测系统会根据响应的叶片信号的相位调整发送频率。利用上述方法, 检测系统就能够检测到叶片波形的相位变化, 从而能够检测出叶片的裂纹情况。

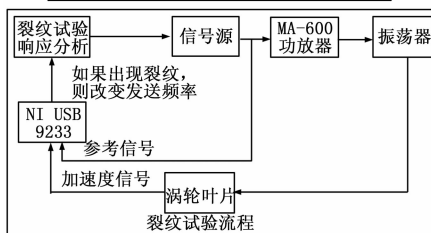
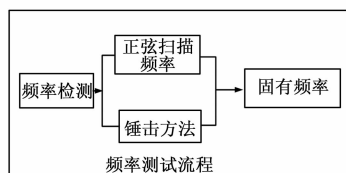


图 4 检测流程图

2.4.2 叶片频率检测过程

在对叶片裂纹频率检测的过程中, 获取的叶片裂纹频率波形能够用图 5 进行描述。

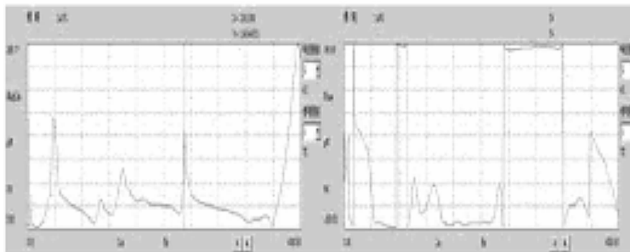


图 5 叶片裂纹频率波形

从图 5 能够得知叶片裂纹信号的响应的频响曲线和相位。在叶片上布置 10 个检测点, 将加速传感器放置在叶片上, 对检测过程中的数据进行记录, 并用 I-DEAS 软件建立模型, 能够获取叶片裂纹信号的二阶振模型, 利用图 6 能够描述。

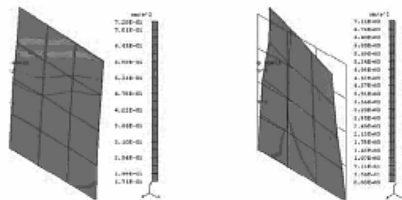


图 6 叶片裂纹信号的二阶振模型

根据上述识别结果与有限元结果进行对比能够得知, 两者结果极为相似, 对叶片进行正弦测频, 获取的结果与实际相同。在同一目录下, 能够保存多次叶片检测数据。这些数据包括频响函数数据、功率谱、频响和相位等数据。图 7 为历次叶片检测数据的汇总。

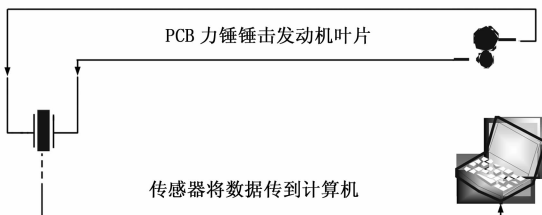
3 实验结果及分析

为了验证本文设计的系统的有效性, 需要进行一次实验。实验环境功能图如图 8 所示。

实验需要的设备主要有: CPU 为 Intel Core/酷睿 i7-4700MQ、内存为 4 GB 的笔记本、USB-9233、PCB 传感器、PCB 力锤、JDF-1 型电涡流激振器。

序号	日期	第一处	第二处	第三处
1	2009-12-18	578.50	1712.00	3878.50
2	2009-12-18	578.50	1707.00	3873.50
3	2009-12-18	578.50	1712.00	3878.50
4	2009-12-18	578.50	1712.00	3878.50
5	2009-12-18	578.50	1707.00	3873.50
6	2009-12-18	578.50	1712.00	3878.50

图 7 叶片裂纹检测数据的汇总



实验设备功能图

图 8 实验环境

实验过程中, 首先将传感器放置在叶片上, 然后需要利用锤击法, 对叶片上的 20 个测试点进行锤击。在进行通道参数设置的过程中, 需要设置通道 1 作为力通道, 通道 2 作为叶片裂纹信号响应通道。

为了验证本文系统的有效性, 分别利用传统检测系统和本文设计系统进行叶片裂纹失效检测实验, 不同检测方法获取的叶片裂纹深度能够用表 3 和表 4 进行描述。

表 3 不同方法对裂纹深度检测结果

试验次数	叶片裂纹实际深度/mm	传统方法检测结果/mm	本文方法检测结果/mm
1	0.2	0.14	0.19
2	0.4	0.28	0.39
3	0.6	0.41	0.61
4	0.8	0.63	0.82
5	1.0	0.88	1.0
6	1.2	1.01	1.18
7	1.4	1.22	1.39
8	1.6	1.38	1.61
9	1.8	1.44	1.77
10	2.0	1.76	2.01

从表中实验结果能够得知, 传统的军车发动机检测系统在对发动机低压涡轮叶片进行检测时, 对于叶片上的裂纹深度和裂纹的位置都不能有效的进行检测, 无法保证军车发动机的安全性能; 利用本文设计的检测系统, 能够避免传统的发动机检

测系统的弊端, 能够对叶片上裂纹的深度和位置进行准确的检测, 充分表明了该系统的准确性和稳定性, 保证了军车的安全行驶。

表 4 不同方法对裂纹位置检测结果

试验次数	叶片裂纹实际深度/mm	传统方法检测结果/mm	本文方法检测结果/mm
1	2	1.2	2.1
2	4	2.8	3.9
3	6	3.6	6.2
4	8	5.5	7.8
5	10	7.9	9.7
6	12	10.1	11.8
7	14	11.5	14.2
8	16	13.9	16.1
9	18	16.4	17.8
10	20	17.9	20.3

4 结束语

针对传统的军车发动机检测系统无法针对发动机低压涡轮叶片进行裂纹失效检测的缺陷, 设计了一种军车发动机低压涡轮叶片裂纹失效检测系统。该系统主要包括硬件部分和软件部分, 硬件部分主要有 NI USB-9233、PCB 加速度传感器、MA-600 功放器、PYD-1 型电涡流急疲劳试验器、以及 PCB 力锤等构成; 软件部分利用 VC++ 编写了检测系统的主界面、检测通道、检测信号模块和信号波形显示模块等相关模块。实验结果表明, 利用本文系统能够准确的检测出叶片裂纹的位置和裂纹深度, 为军车的安全行驶提供了可靠的保障, 取得了令人满意的效果。

参考文献:

- [1] 庄金星, 曹佳宝, 李 磊. 高速公路超载货车动态检测方法应用研究 [J]. 公路与汽运, 2012, (2): 89-91.
- [2] 杨 训, 张 灿. 某型航空发动机涡轮后排气温度场测量 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (2): 333-335.
- [3] 魏 武, 龚树锋, 龚树超. 一种改进的基于视频的车辆检测与识别方法 [J]. 计算机测量与控制, 2010, (1): 20-22.
- [4] 明平顺, 杨万福. 现代汽车检测技术 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [5] 杨乐平, 李海涛, 杨 磊. LabVIEW 程序设计与应用设计 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2001.
- [6] 王 晓. 发动机性能虚拟仪器测试系统设计 [J]. 微计算机信息, 2008, (7): 62-64.
- [7] 胡小平. 发动机状态实时监测系统的研制 [J]. 制造业自动化, 2001, (9): 57-59.
- [8] 米西峰. 基于 Web 和 Labview 的虚拟仪器实验平台设计 [J]. 微计算机世界, 2008, (4): 55-157.
- [9] 王奎洋, 唐金花. 载重车辆超载检测与阻止装置研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2012, (4): 171-174.