

凸轮轴的自动化涡流检测方法与系统

杨 航,汪圣涵,唐 健,康宜华

(华中科技大学 制造装备数字化国家工程研究中心,武汉 430074)

摘 要: 针对目前普遍使用的组合式凸轮轴凸轮表面微裂纹特征,采用跑道形线圈设计制作差动激励涡流探头,运用 COMSOL 软件仿真分析线圈间距、提离、圆弧凸面曲率半径等对裂纹检测信号的影响,获得了最优的差动激励涡流检测探头参数;然后根据凸轮轮廓特点,设计了三自由度探头跟踪机构,并搭建了基于该机构的无损检测实验平台进行检测性能的评价;最终根据实际大批量、高速、高精检测的需求,完整设计了凸轮轴自动化涡流检测系统,制定出高速、高精自动化的检测工艺,检测效率为 30 s/件,最小检测深度为 0.1 mm。

关键词: 凸轮轴;微裂纹;涡流;探头;跟踪机构

中图分类号: TG115.28 文献标志码: A 文章编号: 1000-6656(2020)11-0061-06

Automatic eddy current testing method and system for camshaft

YANG Hang, WANG Shenghan, TANG Jian, KANG Yihua

(National Engineering Research Center for Digital Manufacturing Equipment,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Aiming at detecting microcrack of the cam surface, the differential eddy current sensor was designed and made up by race track coils. And the COMSOL software was used to simulate and analyze the influence of coil spacing, lift-off, and curvature radius of the convex surface on crack signals. Then the optimal differential eddy current sensor parameters were obtained. According to the characteristics of the cam profile, the three-degree-of-freedom self-following structure was designed, and a flaw detection platform based on this structure to evaluate the detection performance was established. Finally, in order to meet the large-volume, high-speed and high-precision testing requirements in real industry, the whole camshaft automatic eddy current detection system was designed, and meanwhile a high-speed and high-precision automatic detection process was developed, in which the detection speed is 30 s/piece and the minimum detection depth is 0.1 mm.

Key words: camshaft; microcrack; eddy current; sensor; following structure

凸轮轴作为汽车发动机配气机构核心的机械基础件,其质量对发动机的功率、凸轮挺杆摩擦副的寿命、配气机构的工作状态都有直接影响,决定着发动机乃至整车系统的性能。无损检测作为凸轮轴生产中的必要环节,其主要目的是对凸轮表面裂纹进行高速高精检测,剔除不合格产品,保证凸轮轴满足其质量体系要求。

目前,用于检测凸轮轴的无损检测方法主要为半自动磁粉检测。近年来,国内外学者针对凸轮轴凸轮表面微裂纹的自动化无损检测方法与系统展开了许多研究。彭沛欣^[1]采用进口 CCD(电荷耦合元件)获取磁粉图像,通过图像处理技术中的自动识别顺序目标标记和描述算法,实现了凸轮轴荧光磁粉探伤系统检测结果的自动识别。朱正德^[2]成功开发了基于巴克豪森原理的凸轮轴磨削烧伤自动化检测设备。国内涡流检测厂商一般引进国外涡流检测主机,自研涡流检测探头,针对检测对象开发涡流检测设备,设备的可靠性及稳定性有限。

凸轮轴为精加工工件,经由磨削加工后进入无

收稿日期:2020-04-14

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB0106000)

作者简介:杨 航(1994—),男,硕士研究生,主要从事无损检测技术及仪器研究工作

通信作者:康宜华, yhkang@263.net

损检测工序, 表面加工质量高, 缺陷多为表面微裂纹, 裂纹深度一般为 0.1 mm 左右, 通过对比几种检测方法, 发现涡流检测更适用于凸轮表面微裂纹的检测, 其中又以差动涡流法检测灵敏度最高, 因此开发完全自主的凸轮轴自动化涡流检测设备具有重要的工程意义^[3-5]。

1 凸轮轴自动化无损检测难点

凸轮轴主要分为整体式凸轮轴和组合式凸轮轴两大类, 随着汽车发动机技术的不断更新发展, 组合式凸轮轴由于其自身优势将逐渐取代整体式凸轮轴^[6]。文章将组合式凸轮轴作为研究对象, 具体型号为吉利 GEP3, 相关研究方法可类推到其他型号凸轮轴。

1.1 凸轮轴结构及待检测位置

组合式凸轮轴一般由进排气凸轮、油泵凸轮、端头、信号轮和中心钢管组成(见图 1)。由于凸轮轴进排气凸轮与油泵凸轮工作环境恶劣, 转速极高, 进排气凸轮与摇臂滚轮之间存在摩擦, 承受极大的交变循环接触应力, 油泵凸轮亦承受极高的交变循环应力, 因此文章将组合式凸轮轴进排气凸轮及油泵凸轮作为检测对象展开研究。

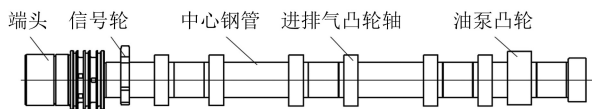


图 1 GEP3 组合式凸轮轴结构示意图

GEP3 型凸轮轴进排气凸轮轮廓及其分解如图 2 所示, 可将整体轮廓分解为 2 个过渡平面, 1 个小圆弧凸面以及 1 个大圆弧凸面 3 部分组成; 油泵凸轮轮廓及其分解如图 3 所示, 分解为由 3 个过渡平面和 3 个圆弧凸面组成。

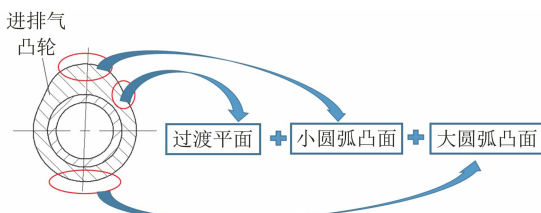


图 2 进排气凸轮轮廓及其分解示意图

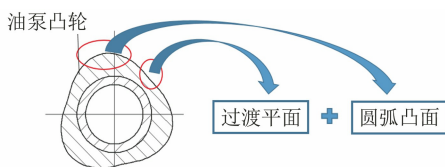


图 3 油泵凸轮轮廓及其分解示意图

1.2 凸轮轴缺陷类别及特征

凸轮轴缺陷主要分为两大类, 可目检缺陷和不可

目检缺陷。可目检缺陷一般在毛坯阶段可目视检出; 不可目检缺陷一般是在热处理以及磨削加工过程中产生, 表面的形态一般为微裂纹及磨削烧伤, 此类缺陷深度浅, 肉眼难以观察, 隐患大, 检测难度大^[7]。为此, 将凸轮轴进排气凸轮和油泵凸轮的表面微裂纹作为研究对象, 采用差动激励涡流探头配合三自由度探头跟踪机构实现对凸轮的全覆盖检测。

2 差动激励涡流探头制作与仿真

2.1 差动激励涡流探头设计制作

常见基础线圈一般有圆形线圈、跑道形线圈和矩形线圈, 由该 3 种线圈分别组成的差动激励涡流探头结构如图 4 所示。小尺寸圆形线圈类探头检测灵敏度最高, 检测效率最低; 矩形线圈类探头检测灵敏度最低但检测效率最高。考虑圆弧凸面检测时(检测意见见图 5), 小尺寸圆形线圈类探头和跑道型线圈类探

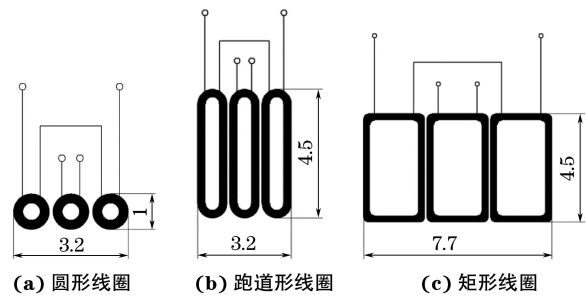


图 4 3 种基础线圈差动激励涡流探头结构示意图

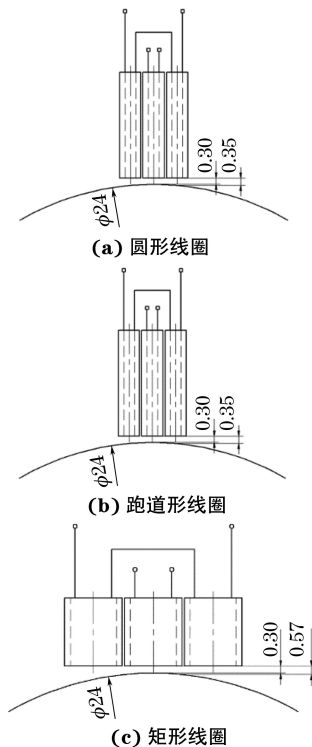


图 5 3 种基础线圈差动激励涡流探头圆弧凸面检测示意图

头两侧差动线圈提离能够得到有效抑制, 探头灵敏度衰减较少; 而矩形线圈类探头整体长度过长, 导致两侧差动线圈提离过大, 探头灵敏度大幅下降。

为保证差动激励涡流探头的检测灵敏度及检测效率, 笔者设计的探头(见图 6)采用 3 组匝数和形状完全一致的跑道形线圈作为基础线圈, 线径为 0.1 mm, 总匝数为 60 匝, 尺寸为 5 mm × 1 mm × 5 mm × 0.25 mm(长 × 宽 × 高 × 壁厚)。线圈中心均放置尺寸为 4 mm × 0.5 mm × 5 mm(长 × 宽 × 高)的硅钢片作为导磁铁芯。三线圈并列放置在 0.1 mm 厚的 POM(聚甲醛)片上便于安装, 同时为避免划伤线圈及线圈划伤凸轮表面, 采用 PEEK(聚醚醚酮)材料做封装外壳, 尺寸为 5 mm × 5 mm × 6 mm × 0.5 mm(长 × 宽 × 高 × 壁厚)。3 个线圈中, 两侧线圈互为反向连接, 引出两根线, 中间线圈为检测线圈。

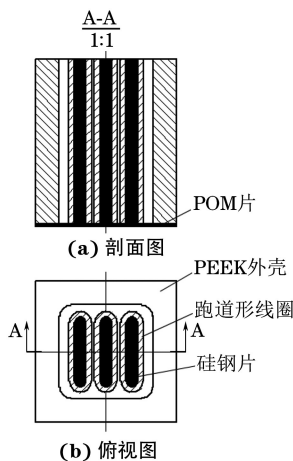


图 6 差动激励涡流探头结构示意图

2.2 差动激励涡流探头检测仿真模型

采用 COMSOL Multiphysics 仿真软件对差动激励涡流探头进行仿真分析。

凸轮表面轮廓主要由圆弧凸面和过渡平面组成, 为缩减计算时间, 将跑道形线圈简化为圆形线圈, 直接选用二维模型进行仿真分析。物理场添加磁场和电场进行耦合。平面及圆弧凸面涡流检测物理仿真模型如图 7, 8 所示。

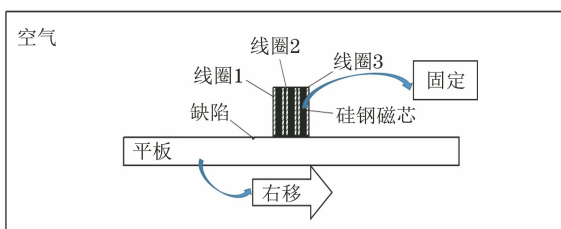


图 7 平面涡流检测物理仿真模型

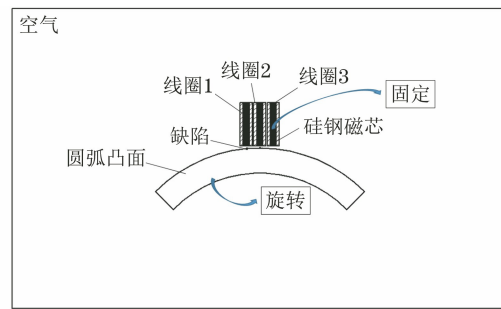


图 8 圆弧凸面涡流检测物理仿真模型

在平板上刻长为 10 mm, 宽为 0.1 mm, 深为 0.1 mm 的刻槽作为刻伤缺陷, 对其进行检测得到如图 9 所示的感应电磁场分布特征。

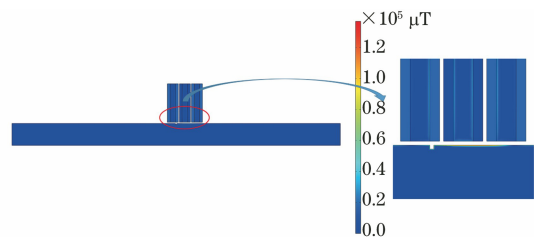


图 9 平板缺陷的磁场分布

在圆弧凸面上刻长为 10 mm, 宽为 0.1 mm, 深为 0.1 mm 的刻槽作为刻伤缺陷, 对其进行检测得到如图 10 所示的感应电磁场分布特征。

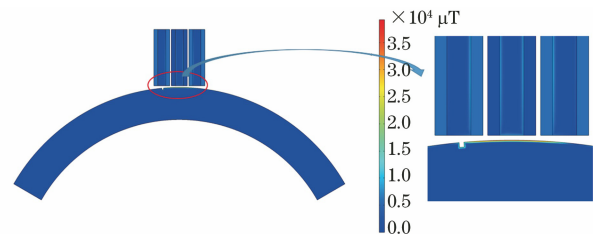


图 10 圆弧凸面缺陷的磁场分布

2.3 线圈间隔对检测信号的影响

根据试验结果, 选取频率为 100 kHz, 电压为 4 V 的激励。

线圈间距为相邻线圈的线圈外层间的间隔距离。线圈间距的增大一方面对检测灵敏度不利, 更主要的是, 对于圆弧凸面及平面检测, 会造成检测灵敏度的不一致。选用过渡平面以及最小曲率半径为 12 mm 的圆弧凸面为检测对象, 对线圈间距不同的差动激励涡流探头进行仿真分析。

不同线圈间距的仿真检测信号峰值变化曲线如图 11 所示, 由图 11 可知, 相比于过渡平面, 圆弧凸面由于附加提离效应的影响, 故探头的检测灵敏度衰减更快。线圈间距在 0.1 mm 以内时, 其大小对差动激励涡流探头检测灵敏度基本无影响, 当线圈间距达到 1.7 mm 以后, 探头检测灵敏度衰减 50%

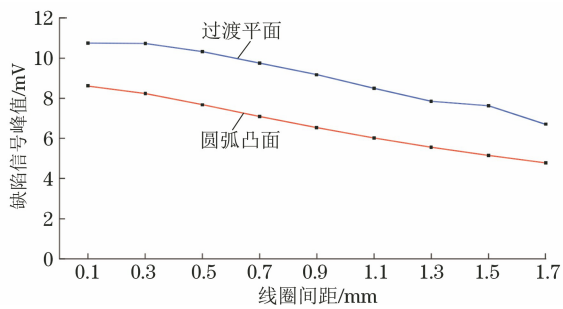


图 11 不同线圈间距的仿真检测信号峰值变化曲线

左右。为此,设计的差动激励涡流探头线圈间距控制在0.1 mm以内。

2.4 提离效应对差动激励涡流探头的影响

在对圆弧凸面的检测中,涡流探头对提离的变化尤其敏感。不同提离的仿真检测信号峰值变化曲线如图 12 所示。由图 12 可知,当提离大于 1.5 mm 时,信号几乎为零;提离在 0.10.4 mm 时,随着提离增大,信号急剧衰减。

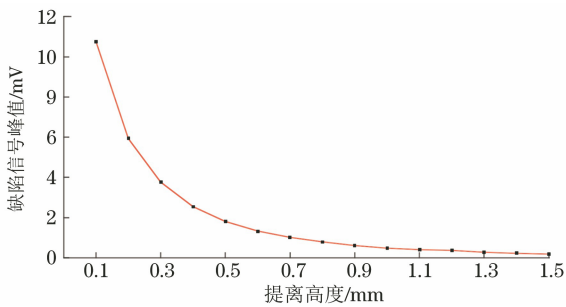


图 12 不同提离的仿真检测信号峰值变化曲线

3 凸轮曲面涡流检测方法

3.1 曲面产生的附加提离对检测信号的影响

圆弧凸面与涡流检测探头的位置关系如图 13 所示(图中 h_0 和 h 分别为中间线圈底部与两侧差分线圈底部到圆弧凸面的距离),可见圆弧凸面曲率半径的减小,会使两侧差动激励线圈提离距离 h 增加。根据凸轮参数,使圆弧凸面的曲率半径由 6 mm 增加至 24 mm,进行仿真分析。

不同曲率半径的圆弧凸面仿真检测信号峰值变

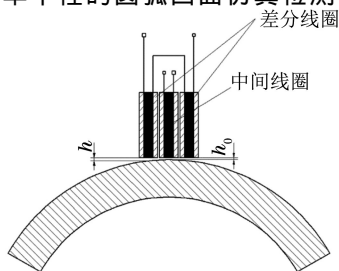


图 13 圆弧凸面与涡流检测探头位置关系示意

化曲线如图 14 所示,由图 14 可知,当圆弧凸面曲率半径在 20 mm 以上时,输出信号幅值基本无变化;圆弧凸面曲率半径为 12 mm 时,信号衰减 10% 左右;为 4 mm 时,衰减 27% 左右。GEP3 型凸轮轴圆弧凸面最小曲率半径为 12 mm,信号衰减仅为 10% 左右,在可接受范围内。

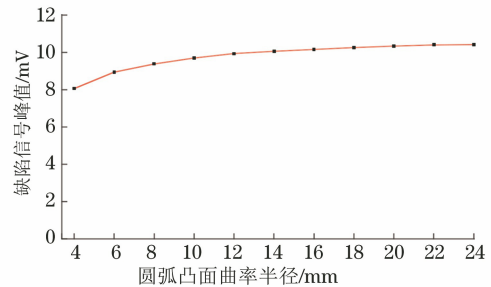


图 14 不同曲率半径的圆弧凸面仿真检测信号峰值变化曲线

3.2 检测探头姿态的影响

涡流探头紧贴凸轮表面的姿态不同,3 个线圈有可能处于近零、小提离和大提离 3 种状态。在检测中,只有当两侧的差动激励线圈提离距离相等时,中间的接收线圈才能正常工作。平面检测时很容易满足该要求,但圆弧凸面检测时,激励线圈的提离会产生差异,造成检测信号不稳定以及灵敏度降低。

对于凸轮非规则回转体的表面检测,已有的检测设备采用二自由度的探头跟踪机构,极易产生 2 个激励线圈提离的失衡,在此提出一种三自由度探头跟踪机构,保证检测探头始终在法向上紧贴凸轮轮廓表面,同时保证提离值的对称变化。检测凸轮的轴进排气凸轮大圆弧凸面、过渡平面、小圆弧凸面和油泵凸轮的圆弧凸面、过渡平面等位置的探头姿态如图 15 所示。由图 15 可知,在进排气凸轮大圆弧凸面、小圆弧凸面和油泵凸轮圆弧凸面处,两侧差

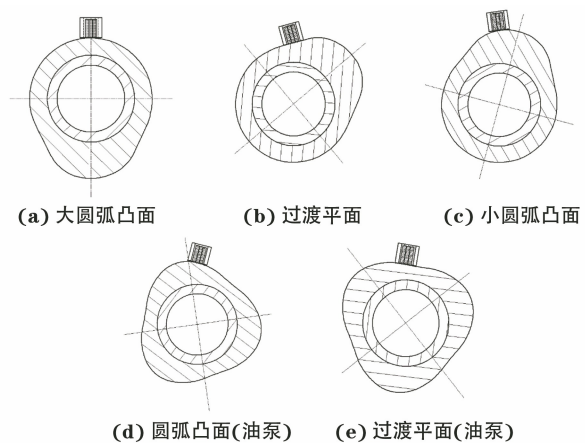


图 15 三自由度探头检测不同检测面时的探头姿态示意

动激励线圈为小提离姿态, 中间接收线圈为近零提离姿态; 在进排气凸轮过渡平面和油泵凸轮过渡平面处, 两侧差动激励线圈和中间接收线圈都为近零提离姿态。

3.3 三自由度探头跟踪机构

凸轮轴三自由度探头跟踪机构如图 16 所示, 其主要由差动激励涡流探头、探头安装座、弹簧、摆动座、盖板、摇臂、导向轮、薄型气缸、机架等组成。整个机构具备 3 个转轴, 分别为探头安装座转轴、摆动座转轴以及摇臂转轴, 其保证差动激励涡流探头在沿检测平面切向运动时, 始终保持法向姿态。

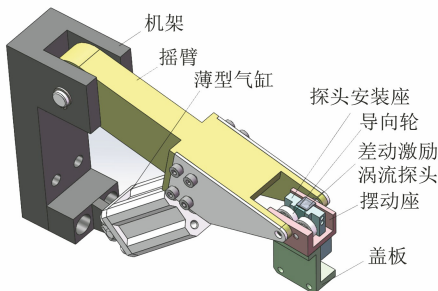


图 16 三自由度探头跟踪机构结构示意图

3.4 自动化涡流检测试验及结果

为了验证三自由度探头跟踪机构的可靠性, 采用凸轮轴人工刻伤试件进行试验。凸轮轴标准刻伤试件的刻伤位置分别在进排气大圆弧凸面、过渡平面、小圆弧凸面和油泵圆弧凸面、过渡平面等 5 个位置, 人工刻槽宽度为 0.1 mm, 深度为 0.1 mm, 长度覆盖整个凸轮宽度, 人工刻伤如图 17, 18 所示。

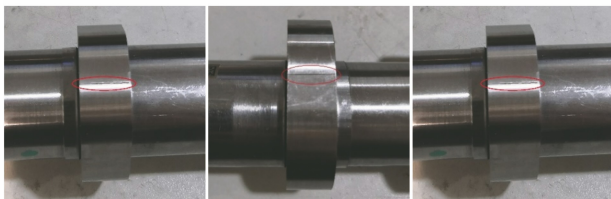


图 17 凸轮轴进排气凸轮人工刻伤

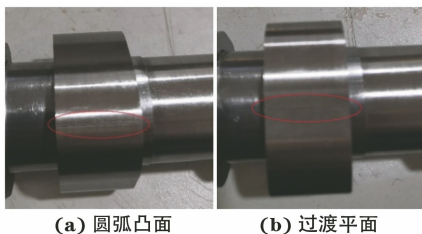


图 18 凸轮轴油泵凸轮人工刻伤

凸轮轴自动化检测结构如图 19 所示, 采用驱动装置驱动凸轮轴沿自身轴线主动旋转, 差动激励涡流探头在探头跟踪机构的作用下, 迫使探头始终垂

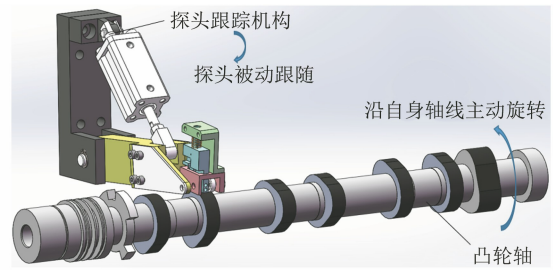


图 19 凸轮轴自动化检测结构示意图

直紧贴待检测表面实现被动跟随, 完成凸轮轴凸轮表面的无损检测。

检测试验平台如图 20 所示, 凸轮轴由凸轮轴驱动装置中的三爪卡盘定位夹紧并旋转; 薄型气缸通气后推动涡流探头紧压在凸轮表面, 实现三自由度探头跟踪机构的被动跟随。凸轮轴旋转一周后, 差动激励涡流探头完成对凸轮轴凸轮整个轮廓表面的全覆盖检测。

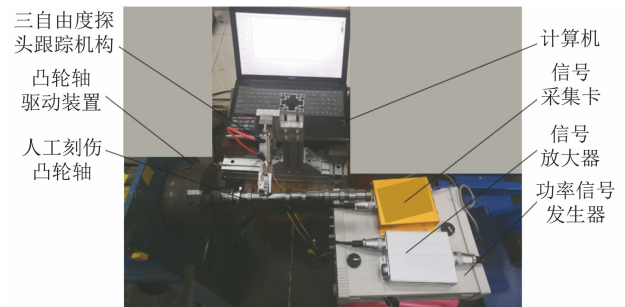


图 20 检测试验平台的组成

每个刻伤位置的检测信号截取 1 000 个采集点数, 得到各缺陷的检测信号如图 21 所示。

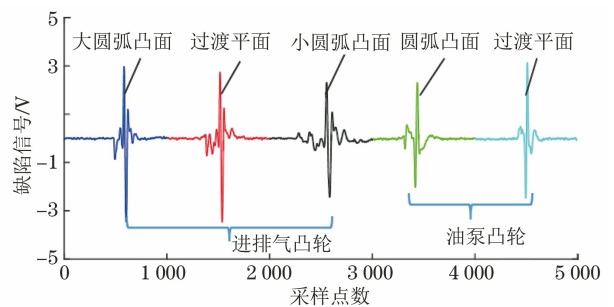


图 21 凸轮轴自动化涡流检测缺陷信号

4 自动化涡流检测系统

4.1 设计参数

根据凸轮轴的生产需求, 检测系统的主要技术指标如下所述。

- (1) 检测灵敏度要求: 人工裂纹深度为 0.1 mm, 宽度为 0.1 mm。
- (2) 工作可靠性要求: 误报率不大于 1%, 漏报

率为 0%。

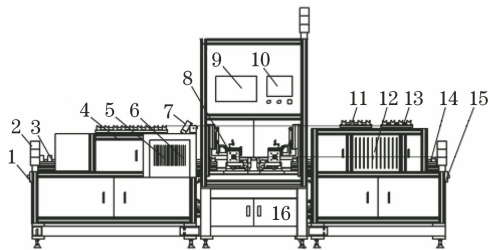
(3) 检测速度要求: 每个试件的检测时间小于 30 s。

(4) 产品质量要求: 凸轮表面无划痕, 产品剩磁量不大于 2 Gs。

(5) 防错需求: 凸轮轴型号识别。

4.2 总体方案设计

凸轮轴自动化涡流检测系统主要由上料辅机、检测主机以及下料辅机等 3 部分组成, 检测系统总体结构如图 22 所示(图中 NG 表示不合格件)。上料辅机的功能包括进气凸轮轴与排气凸轮轴的型号识别、凸轮轴自动搬料前进、凸轮轴二维码读取和自动剔料等。检测主机包括检测工位 1 和检测工位 2, 主要功能为完成凸轮轴进排气凸轮和油泵凸轮的全覆盖无损检测。下料辅机的功能包括凸轮轴自动



1. 上料急停复位模块; 2. 报警灯; 3. 进料架; 4. 二维码扫码NG料架; 5. 二维码扫码NG剔料模块; 6. 风刀; 7. 二维码读取模块; 8. 涡流检测模块; 9. 计算机; 10. PLC(可编程逻辑控制器)触摸屏; 11. 检测NG剔料模块; 12. 退磁模块; 13. 传感模块; 14. 下料料架; 15. 下料急停复位模块; 16. 信号采集处理模块

图 22 检测系统总体结构示意图

(上接第 60 页)

的温度不必很高, 且有保温层保温, 故用电吹风等加热装置即可达到要求。对面进风, 保证了热风不会直吹零件且风力适中。内出风口有滤网滤尘, 上方留孔, 可插温度计, 方便随时读数和腔体透风, 从而在相对节约能耗的同时, 保证了在滴落时间内, 检测温度整体在合适的范围内。加热罩结构如图 1 所示。

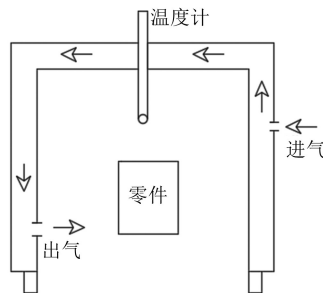


图 1 加热保温罩结构示意图

搬料、检测缺陷、自动剔料和凸轮轴自动退磁等。

5 结语

基于差动涡流探头的凸轮轴凸轮表面微裂纹的检测方法, 设计制作了差动激励涡流探头, 分析了提高效应、线圈间距、探头姿态和圆弧凸面对差动激励涡流探头的影响, 提出了一种三自由度探头跟踪机构, 开发出一套凸轮轴自动化涡流检测系统。现场应用显示, 检测系统检测速度为 27 s/件, 误报率为 0.83%, 漏报率为 0%, 检测完成后凸轮轴剩磁量均小于 2 Gs。

参考文献:

[1] 彭沛欣. 柴油机凸轮轴无损检测自动系统的研究[D]. 南京: 河海大学, 2013.
 [2] 朱正德. 磁弹法在磨削烧伤检测中的应用[J]. 轴承, 2008(4): 49-50.
 [3] 姜锐, 窦峰山. 基于差分结构的大间隙变面积电涡流式传感器[J]. 兵工自动化, 2011(4): 53-55.
 [4] 于霞, 张卫名, 邱忠超, 等. 飞机发动机叶片缺陷的差激励涡流传感器检测[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(9): 1582-1588.
 [5] 于霞. 飞机发动机叶片缺陷的电磁检测技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2014.
 [6] 张光辉, 王少辉. 组合式凸轮轴的技术研究[J]. 内燃机与配件, 2017(22): 56-57.
 [7] 朱正德. 汽车发动机制造过程中曲轴、凸轮轴探伤方法评述[J]. 汽车与配件, 2009(10): 40-43.

7 结语

文章分析了影响渗透检测效果的几种因素, 包括时间, 温度等, 重点指出低温环境对检测效果的影响, 并给出应对方案。笔者设计制作的局部保温罩, 解决了在不具备整体控温环境的条件下, 进行渗透检测的问题, 可供同行参考。

参考文献:

[1] 民航无损检测人员资格鉴定与认证委员会. 航空器渗透检测[M]. 北京: 中国民航出版社, 2009.
 [2] 胡学知. 渗透检测[M]. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2007.
 [3] 季龙华, 许遵言, 相海清. 低温下不同渗透材料渗透检测灵敏度对比[J]. 无损检测, 2014, 36(10): 19-21.