

基于 FPGA 与 DSP 的活塞环漏光度自动测量系统^{*}兰太吉¹ 宁 飞¹ 贺庚贤¹ 付鲁华²

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033;

2. 天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室 天津 300072)

摘 要: 为提高活塞环漏光度自动测量的准确性、实时性及解决相机旋转绕线问题,设计了一种基于 FPGA 与 DSP 的嵌入式处理系统。阐述了系统总体方案、硬件架构和软件设计等方面内容。结合角编码器提供外触发信号,利用无线收发装置与上位机进行指令和数据传输,并通过旋转连接器为系统供电,有效保证了系统测量的准确性和实时性,并从根本上解决了相机旋转绕线问题。实验证明,系统测量结果准确,重复误差不大于 2°,满足相关标准及工程应用要求。

关键词: FPGA; DSP; 活塞环; 漏光度; 自动测量

中图分类号: TP216 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.3040

Automatic measuring system of piston ring light leak degree based on FPGA and DSP

Lan Taiji¹ Ning Fei¹ He Gengxian¹ Fu Luhua²

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Light leak degree is one of the most important parameters of piston ring. To make the automatic measuring instrument of piston ring light leak degree more precise and real-time, and solve the problem of rotation winding of camera wire, an embedded system based on FPGA and DSP is designed. The paper introduces the overall design scheme, and hardware & software architecture of the system. Combined with an angle encoder to provide external trigger signal, a wireless transceiver to transmit instructions and datas with computer, and a rotation connector to supply the system with power, the accuracy and processing speed of the system are effectively guaranteed. Meanwhile, these methods solve the problem of camera wire winding fundamentally. Experiments show that the system measures light leak degree accurately and has a good repeatability, and meets the requirements of relevant standards and engineering application.

Keywords: FPGA; DSP; piston ring; light leak degree; automatic measurement

1 引 言

活塞环是内燃机、蒸汽机等动力机械中的重要部件,被装卡在活塞的环槽里,和活塞、缸体等组成密封腔室来压缩空气做功^[1]。漏光度是指将活塞环压入气缸基本内径的标准环规后,对两者结合圆周上能使特定强度光线通过的缝隙的统计,漏光度实际代表着活塞环在工作时与气缸壁间的气密性,对发动机的能耗和尾气排放质量有着重要影响^[2]。相关标准规定,活塞环在出厂前必须逐片检测,确保漏光度符合要求^[3-4]。

受技术条件限制,漏光度检测曾长期依靠人工在暗

室中用目视法完成^[5]。20 世纪 80 年代起,有多家单位开展过相关自动检测方法的研究,典型的如陈廷全等设计的“内燃机活塞环漏光度检测仪”^[6],该仪器测量角分辨率仅为 5°,无法满足当前通用标准即 2°的要求;四川省海陵内燃机配件厂设计的“内燃机活塞环质量自动检测及其自动分选装置”^[7],首次提出将 CCD 相机应用于漏光度检测,但根据该仪器中反射镜和中央支柱的位置,要实现其所提到的对活塞环的一次成像以获取全圆周漏光信息是难以实现的。

实验证明,要想有效地摄取漏光缝隙,必须将相机

收稿日期:2014-11

^{*} 基金项目:中国科学院长春光机所创新(Y40732S140)项目

设置在局部光缝的正上方。提出一种沿圆周正上方旋转扫描、等间隔垂直拍摄局部漏光情况的测量方法。此方案中有2个技术难点:1)是保证采集和处理的准确性与实时性;2)相机在旋转过程中供电线和数据线的扭曲缠绕问题。为此,开发了一套基于FPGA与DSP的嵌入式图像处理系统,由旋转连接器供电,通过无线收发装置接收上位机指令及上传测量数据。在机实验证明,这种方法测量结果准确,实时性好,避免了旋转绕线问题,满足工程应用要求,并对其他环形缝隙测量需求有着广泛的适用性。

2 系统总体方案设计

测量装置结构如图1所示。相机与处理系统集成后固定在矩形转盘上,转盘与传动机构一起在电机驱动下旋转。角编码器为系统提供脉冲即旋转角度信息,经系统转换为触发信号,触发相机在圆周正上方等间隔采集图像。

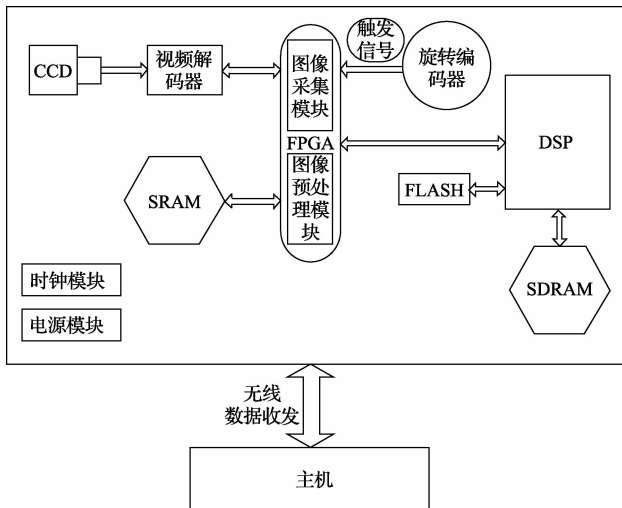


图1 测量装置结构

面向活塞环的漏光度测量任务实际,系统采用FPGA结合DSP架构。FPGA负责视频解码器控制和图像采集、读取角编码器脉冲并生成帧提取触发信号、图像预处理、与DSP的数据传输以及通过无线收发模块与上位机通信等工作。DSP则作为主处理器完成图像运算、数据拼接及最终测量结果的生成。系统结构如图2所示。

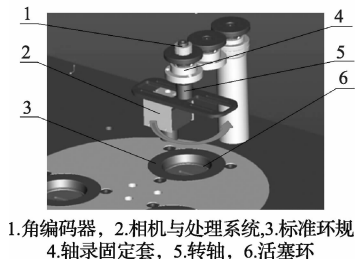


图2 系统结构框

3 系统硬件设计及工作过程

要保证测量的准确性,必须明确系统在空间上的等间隔图像采样点,即需要准确的角度触发信号;要保证实时性,则需提高系统处理速度,在采集下一帧图像前确保上一帧处理完毕。

3.1 等间隔图像采集

系统采用一台 1° 角分辨力的编码器进行角度测量。以将活塞环圆周等分6段为例(下同),需要相机每间隔 60° 采集一幅图像进行处理。上位机通过无线收发模块传来漏光度测量开始指令后,控制电机带动转盘绕轴旋转,同时角编码器输出脉冲到FPGA以记录转过角度。FPGA每采集60个脉冲对应相机绕轴转过 60° 圆周角,暂停向SRAM刷新数据,并将其控制权交予DSP,同时通过外部中断告知DSP从SRAM中提取一帧静态图像到SDRAM中进行处理。电机旋转一周后停止,系统将处理6幅图像得到的数据进行整合拼接。

3.2 芯片选型与系统架构

为保证图像采集和处理的实时性,采用典型的FPGA+DSP的系统架构,具有速度快、集成度高等优点^[8-9]。因特定应用要求,光电传感器选用某型高感光度PAL制式输出的CCD模块。系统采用TVP5150视频解码芯片,在FPGA提供的I²C总线控制信号和27 MHz的时钟作用下将模拟视频转换成BT. 656标准的数字视频信号并送入FPGA。结合实际需求,FPGA采用Altera公司CycloneII系列,依靠其强大的并行处理和逻辑控制能力,根据BT. 656标准的相应特征去除掉行、场控制信号并进行相关的预处理后,将有效图像按奇、偶场分别刷新到外设的2片SRAM中。

DSP不直接参与视频采集任务,仅以FPGA为桥梁从SRAM中读取静态图像数据。故DSP不必有专用的视频输入接口(VPort),从而无需采用价格较昂贵的专用图像处理芯片(如达芬奇系列)。综合考虑性能和成本因素,系统采用TI公司C6000系列的TMS320C6713型DSP,具有32位浮点型运算结构,最高工作频率200 MHz^[10-11]。截取的数字图像为YUV格式,其中Y代表亮度,可单独表达图像的灰度。系统中对活塞环漏光度图像的处理不涉及色彩信息,为减少运算量,只记录和处理图像中的Y分量数据。

3.3 数据存储与传输

硬件电路上2片SRAM的数据总线、地址总线和控制线同时与DSP的EMIF通过FPGA内部逻辑相连。DSP可以通过片选经由FPGA选中2片SRAM作为外部扩展空间,从中读取数据到与其通过EMIF无缝接口的2片SDRAM中,而后发挥其强大的寻址和通信优势,完成复杂的图像处理算法^[12-13]。SDRAM芯片采用

HY57V641620FTP 型,具有 64 Mbits 存储空间。DSP 通过 EMIF 访问 SDRAM 时,仅需提供对应 CE 空间的起始地址,按照其具体配置要求设定相应的控制寄存器,即可直接访问并实现快速存取操作,期间的控制信号完全由 EMIF 自动提供,无需编写控制程序。

系统与上位机间的指令、数据传输由无线收发模块完成。系统供电则采用旋转连接器(导电滑环),实现了输入线固定不动,系统端导线可随固定相机的转盘自由旋转,从而避免了相机旋转绕线问题。

4 程序与算法设计

系统上电后首先进行寄存器配置、各模块状态确认等初始化操作。在上位机指令指示下,系统开始采集视频数据,同时电机带动相机、编码器旋转一周,按预先设置等间隔采集 6 幅静态图像到 SDRAM 并处理。采集到的典型漏光缝隙图像经过预处理后如图 3 所示。



图 3 典型漏光缝隙图像

经标定和装调,特定物距下被测圆周上 60° 圆心角的弧长恰好对应图像中 400 列像素的宽度,并将图像截取窗口设定为 400×300 像素。随后对图像进行线化处理。实验发现,漏光度光缝的下边缘是活塞环的外侧轮廓,能够作为一条单像素曲线代表对应活塞环的被测表面信息。为减少运算量,排除了基于复杂运算的线化方法,直接扫描图中亮带区域的下边缘,作为表征漏光弧段的信息。得到的图像如图 4 所示。

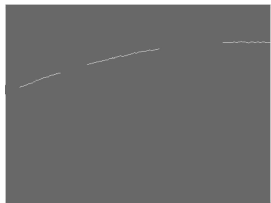


图 4 窗口截取并线化后的漏光图像

基于图像中每列最多只有一个白色像素点的前期处理结果,从左至右逐列扫描并计算图像中所包含的弧段数目,再进行后续的圆心角度计算和圆弧位置确定等过程。有了各弧段端点的坐标值,结合标定过程中得知的图像中每个像素对应的实际尺寸(像素当量),可以知道每段圆弧对应的弦长。再根据已知的活塞环外轮廓公称直径即图像中圆弧所在圆的直径,即可求出每段圆

弧对应圆心角的角度值。以第一幅图像左边缘为起始,可以求出每幅图像中各漏光圆弧起点对应于该特定起始点的圆心角度偏转,用来表征每段圆弧之间的相对位置关系。具体计算过程不再赘述。

然而,在实际测量过程中,有可能出现一段漏光圆弧跨越两幅图像的情况。这需要一种自动的识别和连接弧段的操作,否则一段圆弧可能会被认定为两段。为此设定了一个控制标记位,如果发现当前图像中最后一段圆弧的终点已到达图像窗口的右边缘,且下一张图像中圆弧左边缘横坐标为 0,则确实出现了一段圆弧跨越前后两幅图像的情况,予以拼接处理,即圆弧段数不增加,角偏距计算对象仍是前一幅图像中最后一段圆弧的起点,将圆弧角度记为两端圆弧对应圆心角度之和。

除此之外,还有一种特殊的情况,即一段圆弧跨越了一组图像中第一幅的左边缘和最后一幅的右边缘。程序中我们采用了类似上述方法的控制位监测和拼接手段予以解决,将最后一段圆弧的角度合并到第一段圆弧中,并将计算各圆弧起始点偏离角度的基准点设定为此跨越边缘圆弧的起始点。

经上述过程,记录下图像中所包含的弧段数、每段圆弧对应圆心角的度数及全圆周累计的漏光角度 3 种信息。再根据活塞环漏光度的评价标准,对圆周上的累计漏光圆弧对应圆心角、单段最大圆弧对应圆心角等参数进行判断,即完成对一片活塞环的漏光度评定。

5 实验数据及分析

为验证系统测量结果的准确性,制作了用于校准的标准圆盘,如图 5 所示。圆盘上切有 4 段对应特定圆周角度的圆弧缺口,缺口内边缘半径小于环规内径 0.2 mm 。利用定位机构将圆盘紧贴于环规下表面,圆弧缺口与环规内圆间缝隙恰好与活塞环的漏光情况相当。经计量部门检定,每段圆弧对应圆心角度分别为 15.2° 、 44.3° 、 21.0° 、 27.7° 。

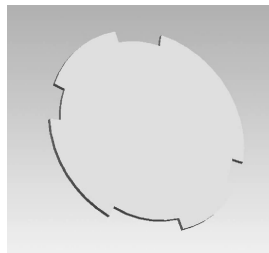


图 5 校准用标准圆盘

将相机转速设定为 $240^\circ/\text{s}$,即 1.5 s 完成一片活塞环测量。测量标准圆盘的漏光情况,通过上位机查看测量数据。重复测量 10 次(结果取 0.1°),所得数据如表 1 所示。

表 1 活塞环漏光度检测实验数据

测量次数	圆弧段数	单段最大漏光度数	圆周累计漏光度数
1	4	44.8	107.6
2	4	45.1	109.1
3	4	44.2	107.9
4	4	44.6	108.8
5	4	43.9	107.4
6	4	44.0	108.5
7	4	43.8	107.7
8	4	43.7	108.6
9	4	44.6	108.8
10	4	44.2	107.9
均值	4	44.29	108.23
最大偏差	0	1.4	1.7

由数据可知,系统测量结果与标准圆盘的检定数据一致性良好,重复误差不大于 2°,优于不确定度为 5°的技术指标。系统的角分辨力是以 CCD 的像素当量(0.1 mm 量级)为单位的,远优于国家标准规定的 2°圆周角的要求。测量速度设定为 1.5s/片,处理结果准确、稳定。实验证明,系统具有良好的测量准确性、重复性和实时性,满足应用要求。

6 结 论

以提高活塞环漏光度自动测量的准确性、实时性及解决机构中相机旋转绕线问题为目的,设计了一套基于 FPGA 与 DSP 的嵌入式处理系统。从总体方案、硬件架构和软件算法等方面阐述了设计思路。实验证明,系统测量结果准确且重复性、实时性良好,有效解决了相机旋转绕线问题,能够满足相关标准及工程应用要求。

所述的旋转扫描、分段成像设计方案同样可用于其他环形缝隙测量,对于相关工程技术有着广泛的适用性。

参考文献

[1] MILLER S L, SVRCEK M N, TEH K-Y, et al. Assessing the feasibility of increasing engine efficiency through extreme compression [J]. International Journal of Engine Research, 2011,

12(3): 293-307.
[2] ISHIKAWA Y, IWAMA H, NAITO Y, et al. Combination of cylinder liner and piston ring of internal combustion engine; U. S. Patent 6,553,957 [P]. 2003-4-29.
[3] 中华人民共和国铁道部. TB/T 1382—2006 机车、动车用柴油机零部件活塞环[S]. 北京:中国铁道出版社,2006.
[4] 全国汽车标准化技术委员会. QC/T554—1999 汽车、摩托车发动机活塞环技术条件[S]. 北京:中国标准出版社,1999.
[5] VENKATESH S. Analysis of piston ring lubrication [J]. Applied Scientific Research, 1975, 31(4): 309-319.
[6] 江苏省机械研究设计院. 内燃机活塞环漏光度检测仪:中国,88219395.3[P]. 1989-06-07.
[7] 张同玉,张同荣. 内燃机活塞环质量自动检测及其自动分选装置:中国,93238721.7[P]. 1994-05-25.
[8] 张廷华,樊桂花. 基于 DSP+FGGA 的视频格式转换[J]. 国外电子测量技术,2013,32(2):57-59.
[9] 石岩,侯其立,刘翠. 基于 DSP 的直管式科氏质量流量变送器研制[J]. 电子测量与仪器学报,2014, 28(10):1130-1139.
[10] 李易难,牛燕雄,杨露. 基于 DSP+FPGA 视频图像采集处理系统的设计[J]. 电子测量技术,2014,37(1): 58-61.
[11] 刘伟宁. 基于 DSP+FPGA 平台的复杂背景目标检测与跟踪[J]. 液晶与显示,2014,29(6),1151-1155.
[12] 王晓勇,吕俊,王俊. 基于 DSP+FPGA 的飞机轮速测量系统设计[J]. 电子测量技术,2014,37(6): 131-134.
[13] 石岩,侯其立,刘翠. 基于 DSP 的直管式科氏质量流量变送器研制[J]. 仪器仪表学报,2014,35(10): 1130-1139.

作者简介

兰太吉,1988 年出生,工学硕士,研究实习员。主要研究方向为精密仪器与检测技术。
E-mail:lantaiji@sina.com