

串列式叶栅扩压器叶片间隙的激光飞点检测*

Laser Measurement for Gap Between Diffuser Vanes of Tandem Cascades

北京航空制造工程研究所 梁岱春 张为民 张书生



梁岱春

北京航空制造工程研究所工程师,主要从事基于嵌入式系统的程序开发,集成制造技术等研究工作。

串列式叶栅扩压器叶片间隙检测的现有技术

串列式叶栅扩压器是一种新的大流量、高压比、高效率的叶栅型扩压器,主要用于航空发动机、巡航导弹燃烧室机匣及装甲车辆发动机的风冷装置等。因其为众多叶片排列成栅状,于是叶片的连接是否合乎精度要求、叶栅间隙是否合乎设计指标等问题,将直接影响扩压器乃至发动

* 航空科学基金项目(2006ZD25)

激光飞点测量的引入,可视为对串列式叶栅扩压器叶片间隙的检测提出了一种全新的方法。该方法是以光电响应的方式,通过对激光飞点检测数据的采集、分析和处理,来实现对扩压器叶栅宽度和叶片缝隙间距的无接触精密测量。

机本身的品质和效率。因而对于保证扩压器系统的生产质量而言,此类技术指标的检测显得极为重要。作为一种航空发动机的重要辅件,扩压器往往是以批量生产的方式进行制造的;故有必要为大量的扩压器叶片间隙检测寻求一种高效、快速、精准与相对低成本的技术手段,以保障航空发动机的量产需求。

现有的扩压器叶片间隙非接触检测方法,主要为 CCD 光学检测法和超声测量法。以 CCD 光学检测法而论,国外的有关公司如挪威的 Reslink,已研制出了 CCD 光学检测缝间距装置,其测量精度可达 $5\mu\text{m}$ 。

CCD 光学检测法的优点在于可实时地进行视觉测量。它不受被测工件外径大小的限制,检测方便,能得到清晰的检测图象。但其缺点在于,其测量精度极大地受限于 CCD 的像素密度(一般为 $1024\times 1024/\text{CCD}$),精度提高很难,极易受环境条件的影响。当光照较差和对比度

不足时,其测量结果便不甚理想。此外,这一专用的 CCD 光学检测装置也十分昂贵,如 Reslink 公司的 CCD 光学检测缝间距装置,售价高达 500 多万人民币,并且对于扩压器叶片间隙的检测还需附加相应的工装设施,因而不利于在国内的扩压器量产环境下大规模推广应用。

对于超声测量法,因利用超声波测量对环境条件要求较低,故与 CCD 光学检测法相比具有较强的抗干扰能力。但它的测量效率较低,测量精度有限,成本虽较 CCD 光学检测装置稍廉,但也很不便宜。

激光飞点测量法

1 激光飞点测量方法的引入

与上述 2 种方法相比,激光飞点检测对环境的特殊要求少,抗干扰能力强,是一种较为理想的叶片间距检测方法。利用激光的高速度、能高聚、高直线性进行扩压器叶片间隙的测量,可以很好地实现高效率、高精度

(μm 级)的缝间距检测。

激光飞点测量的引入,可视对串列式叶栅扩压器叶片间隙的检测提出了一种全新的方法。该方法是以光电响应的方式,通过对激光飞点检测数据的采集、分析和处理,来实现对扩压器叶栅宽度和叶片缝间隙的无接触精密测量。但该方法的

性透射和遮挡,获取与扩压器叶栅宽度和叶片缝间隙相关的检测触发信号,以用于对叶片缝间隙尺寸的测量。由于电气传动和机械传动都会产生误差,因而有必要安装高精度的直线光栅尺,以全闭环检测方式保证工作台的轴向位移精度和最终的激光检测精度。

的中断触发,通过具有高精度直线光栅尺的轴向位移全闭环测量反馈系统,读取各检测信号发生瞬间的一系列轴向绝对位置信息。这些与扩压器叶栅宽度和叶片缝间隙相关的位置信息将通过网络传给计算机控制服务器系统,以进行分析、处理,从而获得扩压器叶栅宽度和叶片缝间隙的测量数据;并对之进行储存、输出和图文显示。通过扩压器的旋转、定位和分度测量,该系统装置可以实现对扩压器叶栅宽度和叶片缝间隙的全方位检测,使系统的测量数据更为真实、全面。

2 运动控制与光电检测信息的采集

图1中的激光检测器(包括激光发射、接收及光电信号整形调理电路等),在一组网络化运动控制与电机伺服系统的驱动下,沿着被测扩压器的轴线方向作数控定速、定位移动。在A-B、C-D、E-F和G-H各段上,被调整的测量激光聚焦在被测叶栅的叶片体上;因其光束被遮挡而不能被光电传感器接收,并因此产生低电平信号。而在B-C和D-E和F-G各段上,激光束恰好由被测扩压器叶片的叶栅间隙中透射而过,激光检测器中的光电传感器将直接获取穿射而来的激光光束,由此导致其光电整形调理电路的输出信号从低

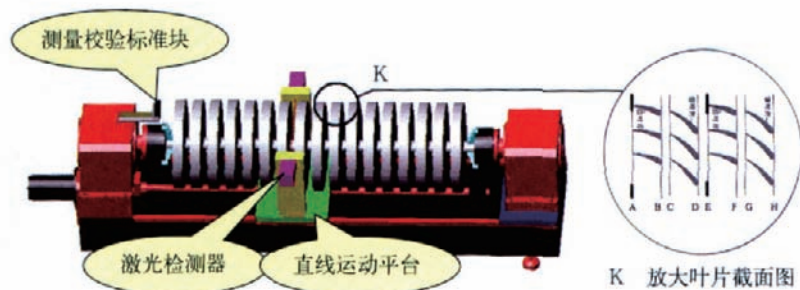


图1 扩压器叶片间隙的激光飞点检测示意图

实现并不仅是单纯孤立地依赖于激光飞点测量技术,还必须借助于一套完整的光、机、电一体化的技术平台,并结合基于网络化的信息采集与分析处理技术来完成,其结构如图1所示。图中展示的,是以上述方法开发的一种用于串列叶栅扩压器叶片间隙激光飞点检测的系统装置。该装置主要包括激光收发装置,光电检测运动工作台(沿扩压器轴线方向运动)运动控制及伺服驱动系统,扩压器的定位、夹紧、回转和分度系统,轴向位移全闭环测量反馈系统,网络化计算机控制系统,激光光斑量化信息分析与误差校验装置以及数据采集、统计、处理、储存、输出和图像显示系统等。

图1中的测量校验标准块为激光光斑量化信息分析与误差校验装置的关键部件,用以即时地校正和补偿由于激光光斑的形状和尺寸变化所造成的测量误差。激光检测器即为激光收发装置与被测扩压器叶栅组合形成的光电检测系统。当直线运动平台受伺服电机驱动沿扩压器轴线方向运动时,激光检测器即可由被测扩压器叶栅对激光光线的间歇

此外,为对被测扩压器进行把持和旋转控制,在该系统机械结构的一端采用闭环控制的伺服电机驱动,并结合蜗杆蜗轮减速器和三爪卡盘形成主动控制端;而在另一端则仅以辅助支撑的方式随动,如此即实现了在旋转方向上对被测扩压器的定位、夹紧、回转和分度。

由此可见,在运动平台做轴向位移时,激光检测器即可获取与扩压器叶栅宽度和叶片缝间隙相关的检测信号,并以此作为运动控制处理器

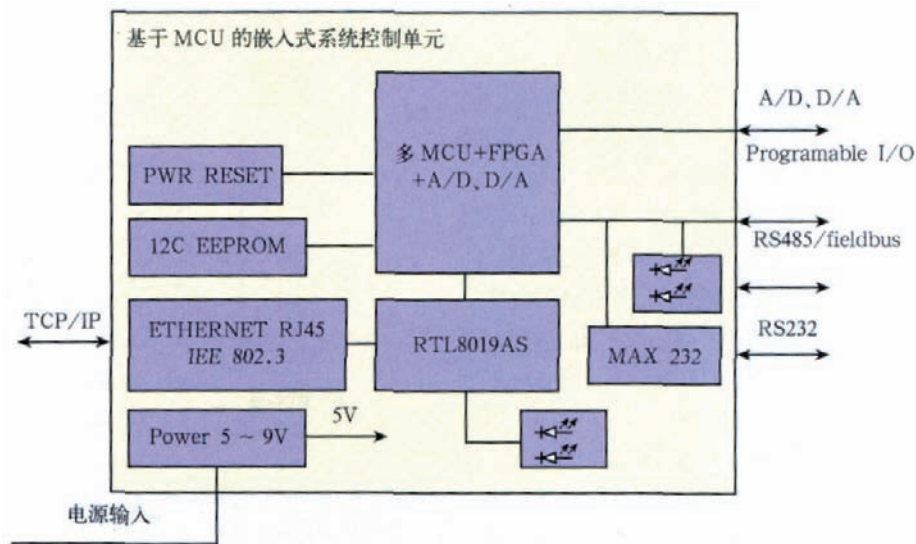


图2 基于网络化嵌入式运动控制系统的光电测量系统结构

电平跃升为高电平。利用这一数控移动平台的光栅测量反馈系统,上述过程中光电传感信号发生高、低电平变化时产生的瞬时沿变为中断信号,触发一组计算机系统的中断服务进程读取当时的位置测量信息,即可测得激光检测器沿扩压器轴线方向(X 向)的位移数据(X 值),亦即测得了与被测扩压器叶片间隙相关的尺寸数据。激光检测头匀速连续的移动,便可得到相应的一系列 X 值。

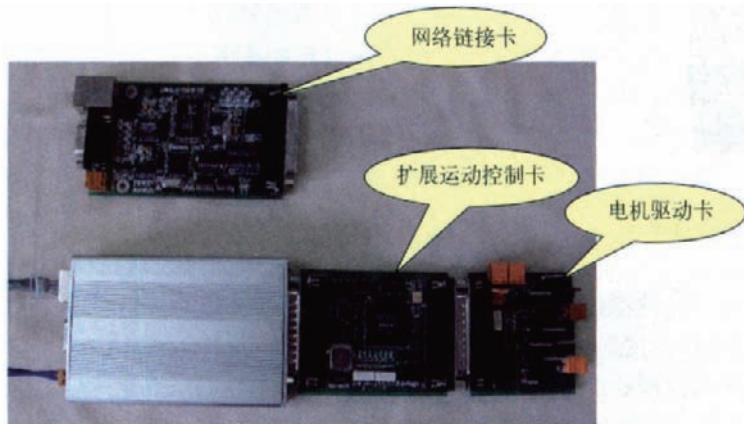


图3 基于网络化嵌入式运动控制系统的光电测量系统实物

自主开发的网络化运动控制与光电测量系统结构如图2所示。

图3为该系统实物。其包括了二维数控伺服运动控制(闭环的速度控制和位置控制)、光电信息响应及网络化的数据采集和信息连接系统等。

对于精度要求不高的零件测量,前述过程便可基本满足需要。但由于扩压器叶片间隙的检测精度要求较高(约 $5\mu\text{m}$),故除了需要直接地通过光电传感信号获取与被测扩压器叶栅间隙和叶片宽度相关的位置信息外,还必须考虑激光光束形成的光斑尺寸对测量所造成的误差影响。用于位移测量的激光光束其截面直径一般在 $100\mu\text{m}$ 左右,个别高品质的光束可达到 $30\mu\text{m}$ 左右,但其作用距离很短。相应的光电传感器,一般要求有50%左右(40%~70%)的光束截面光量的变化,方可随有对应电信号的变化。尽管在固定的距

离内,这一产生光电感应信号的光束截面百分比是相对稳定的;但作为系统研发人员,甚至对于激光检测器本身的制造方,都不可能确定其具体的精确数据,而只能估计一个大致的光束截面范围。这就使得在系统研发过程中,无法简单地以前置数据补偿的方法对激光光束尺寸所造成的测量误差进行矫正;亦即必须采用更加有效的方法对测量数据进行处理,以抵消这一对检测精度造成不利

影响的误差。

为解决这一问题,在系统的设计上加入了图1中显示的测量校验标准块,它是一种经过严格测量标定的、尺寸固定的标准计量金属块。用以在扩压器叶片间隙的每次轴向测

量过程中,即时地校正和补偿因激光光束的形状和尺寸变化所造成的测量误差。由于激光光束的形状和尺寸每变化1%~10%往往需要多年的时间;而一次轴向测量过程通常仅需要一分钟左右,故每一轴向测量时间段内,激光光束形状和尺寸的时变结果对测量误差的影响可视为忽略不计。图4所示为扩压器叶片间隙的激光飞点检测原理与方法。

由图4可见,当检测运动平台自左向右移动,激光检测器的激光光束被第一组叶栅所阻时,其光电传感部件所接受到的光电传感信号将发生由高至低的电平变化。而随着检测运动平台的继续移动,激光光束不再为第一组叶栅所阻时,其光电传感部件所接受到的光电传感信号将发生由低至高的电平变化。

设第一个电平下降信号触发的计算机系统中断服务进程所采集到的检测运动平台所在的绝对位置为 L_1 ;下一个激光检测器的电平下降信号位置所触发的计算机中断,采集到的检测运动平台的绝对位置为 L_2 ;第一个电平跃升信号触发的计算机系统中断服务进程,采集到的检测运动平台的绝对位置为 R_1 ;下一个激光检测器的电平跃升信号位置所触

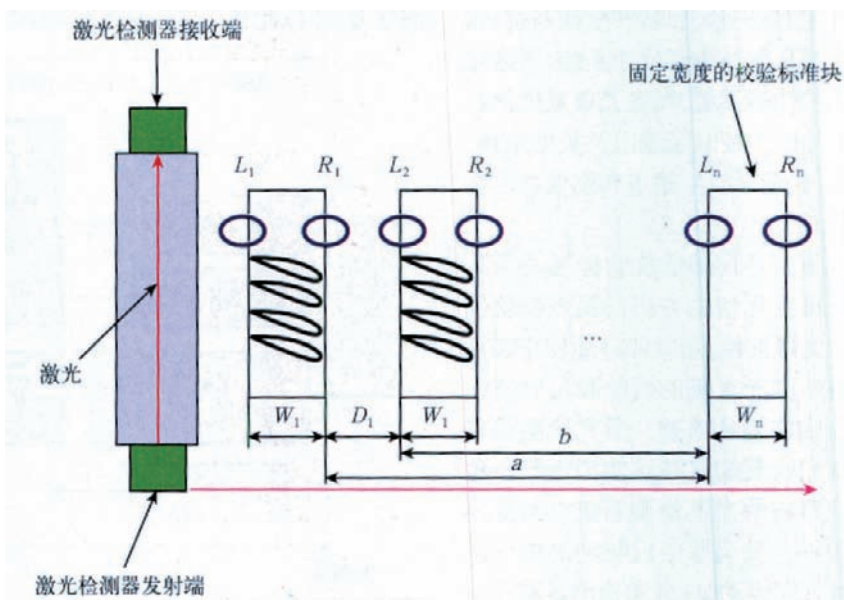


图4 扩压器叶片间隙的激光飞点检测的原理与方法

发的计算机中断,采集到的检测运动平台的绝对位置为 R_2 ;而最后的校验标准块电平下降信号触发的计算机系统中断服务进程,采集到的检测运动平台所在的绝对位置为 L_n ;电平跃升信号触发的中断服务进程,采集到的检测运动平台所在的绝对位置为 R_n ;

则可得到4个方程:

$$L_n - L_1 = W_1 + a \quad (1)$$

$$R_n - R_1 = a + W_n \quad (2)$$

$$R_n - R_1 = D_1 + b + W_n \quad (3)$$

$$L_n - L_2 = b \quad (4)$$

因 R_1 与 R_n 位置都是光电传感器的跃升电平信号发生处,根据等距条件下光电感应对同一激光源要求的授光量具有同一性的原则可知,激光光束在此两处位置所偏移出的截面比例是相同的。亦即 $R_n \sim R_1$ 可几乎完全抵消由激光光束形成的光斑尺寸对测量所造成的在跃升电平信号发生处的误差影响;同理, $L_n \sim L_2$ 也可完全抵消激光光束的光斑尺寸对测量所造成的在下降电平信号发生处误差影响。

方程(1)-方程(2)得到 $W_1 = R_1 - L_1 + L_n - R_n + W_n$, W_n 为校验标准块的固定宽度(已知),故可求出第一组叶栅自身宽度 W_1 。

方程(3)-方程(4)得到 $D_1 = L_2 - R_1 + R_n - L_n - W_n$,故可求出第一组叶栅和第二组叶栅的间距 D_1 。

类推得到第 m 组叶栅自身宽度 $W_m = R_m - L_m + L_n - R_n + W_n$,第 m 组叶栅和第 $m+1$ 组叶栅的间距 $D_m = L_{m+1} - R_m + R_n - L_n - W_n$ 。由此便得到所有对应的扩压器叶片间隙和叶栅的自身宽度数据(m, n 均为大于零的自然数,且 $n > m$)。

利用系统的分度定位功能,逐次地改变被测扩压器在旋转方向上的位置,并重复以上的检测过程,即可得到被测扩压器的全方位检测值。标准物件加工数据与检测数据对比如表1所示。

由表1的数据比较可见,这一光、机、电一体化的激光检测方法,在对于具有类似扩压器叶片间距特征的测量中,基本上可获得 $5 \mu\text{m}$ 以内

的数量、被测分度转角等),以驱使测量设备进行受控运动。检测运动平台在移动过程中将不断地采集对应于光电响应的各位置信息,并发送回

表1 标准物件数据与检测数据

序列	实际宽度/ μm	原始检测的宽度/ μm (未校验处理)	检测的宽度/ μm (校验处理后)	实际缝隙/ μm	检测的缝隙/ μm (未校验处理)	检测的缝隙/ μm (校验处理后)
1	10001	10105	10002	10002	10102	10005
2	10002	10110	10004	10002	10109	10004
3	10001	10109	10002	10003	10114	10006
4	10003	10115	10005	10001	10105	10003
5	10001	10103	10003	10002	10112	10004
6	10001	10108	10002	10001	10115	10005
7	10002	10112	10005	10002	10106	10004
8	10001	10105	10002	10003	10108	10006
9	10003	10104	10005	10002	10111	10003
10	10001	10112	10004	10002	10112	10004
11	20002	20102	20004	20003	20113	20006
12	20001	20111	20005	20001	20116	20003
13	20003	20112	20004	20002	20109	20004
14	20001	20105	20004	20002	20105	20005
15	20002	20112	20005	20001	20113	20004
16	20001	20115	20003	20003	20117	20005
17	15002	15107	15004	30002	30108	30005
18	15003	15118	15006			

的精度;从而证明该方法不仅快捷、高效,而且精密、可靠。

3 网络化信息集成与数据处理

以图4模式进行的串列式叶栅扩压器叶片间隙的检测,其整个过程自始至终地处于自身系统的网络化信息集成软件的管理和控制之下;所采集到的检测数据,须经过系统集成软件的处理,方可得到正确的测量结果。系统软件检测过程的流程如图5所示。

在扩压器叶片间隙的检测过程中,上位的集成系统,需向底层现场的光电测量子系统发送对应于扩压器每个分度的相关信息(如:测量扫描行程、测量扫描速度、被测叶片组

上位系统。集成系统软件根据这些收到的信息,按图4所示算法,即可计算出当前分度下的所有叶栅间距与叶栅宽度。

在扩压器旋转方向的每个分度上,上位集成系统需向光电测量子系统发送的具体信息主要包括:分度(测量角度)、目标位置(检测运动平台运动到的最终位置)、X轴(扩压器轴向)速度、A轴(扩压器轴向旋转)速度和校验标准块的固定长度。

在检测运动平台移动过程中,光电测量子系统向上位集成系统反馈的信息主要包括:当前X轴位置,当前A轴位置,激光检测器电平跃升信号位置所触发的、为计算机中断所

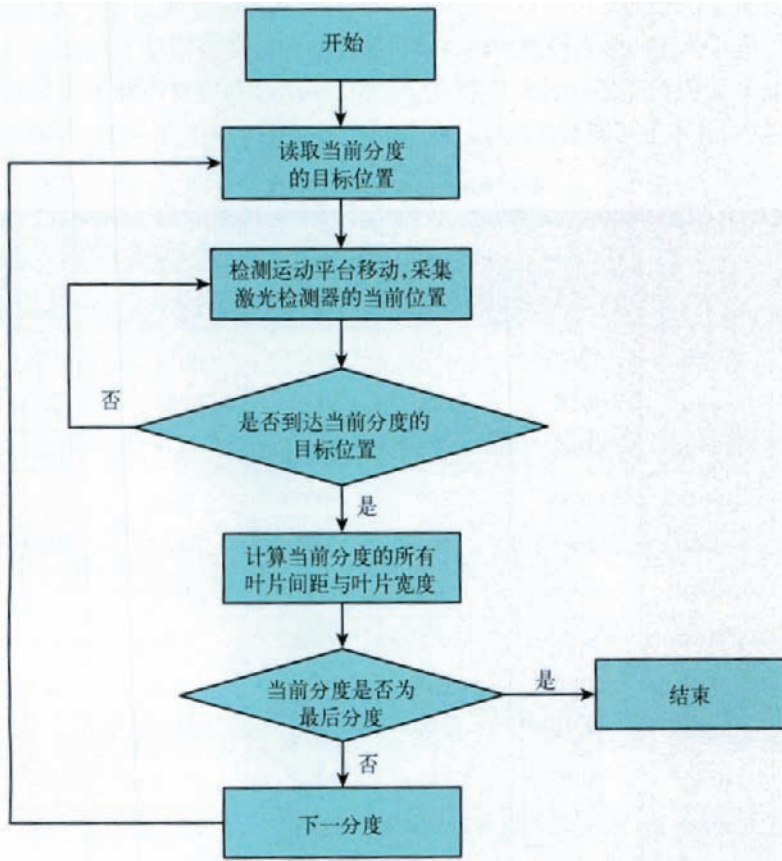


图5 检测过程流程图

采集到的、检测运动平台瞬间的绝对位置,电平下降信号位置所触发的、为计算机中断所采集到的、检测运动平台瞬间的绝对位置以及检测平台的状态、故障信息等。

当完成了一个指定分度下的检测过程后,系统将自动转入下一个指定分度的检测,当所有被指定分度下的检测完成后,则一个完整的扩压器叶片间隙检测过程结束。

检测系统的软件

这一扩压器叶片间距的系统集成软件,是基于上述原理与数据分析方法开发的。其通过图形界面与用户的交互,控制运动平台的运动与激光测量过程的光电检测;并实现数据的采集、分析、处理等,以获得最终的检测结果。它分为用户管理、扩压器记录、自动工艺参数设定、监控和数据结果报表五大模块。功能结构如图6所示。

1 功能模块描述

各模块的具体功能如下:

- 用户管理。

用户管理主要包括用户的添加,更改,删除;适用于网络化的大规模应用。

- 扩压器记录。

输入扩压器名称,扩压器批号,分度总数。

- 自动工艺参数设定。

建立自动工艺参数,如每一分度的测量角度,测量长度, X 轴速度, A 轴速度等。

- 监控。

连接光电检测子系统,进行 X 轴、 A 轴位置和速度的可控调整,建立 X 轴的零参考点和 A 轴零参考点;根据设定的自动工艺参数检测扩压器叶栅宽度和扩压器叶片间距宽度。实时显示检测工作台的 X 轴与 A 轴位置、 X 轴正向限位与负向限位的警告信息,

及系统的当前状态。

- 报表。

检测的扩压器叶栅宽度和扩压器叶片间距宽度可以进行显示、打印,另存和删除。

2 检测软件实现

扩压器叶片间距的激光飞点检测系统软件,是在WINDOWS操作系统平台下,用VC++6.0开发,通过TCP/IP网络,与基于网络化嵌入式运动控制的光电测量系统间的通讯,采用Windows下的网络编程接口Windows Sockets。

结束语

该项研究,以自主研发的方式,建立起了一套具有完全自主知识产权的、用于扩压器叶片间距激光检测的新型系统装置,并总结出了其相应的光电检测工艺规范,获得了有着创新意义的研发成果。实验证明,该研究成果不仅可直接用于涡轮发动机、巡航导弹燃烧室机匣、扩压器外壳和内壳的叶片等的焊接加工检测,也可用于与此外形形状类似的零部件的

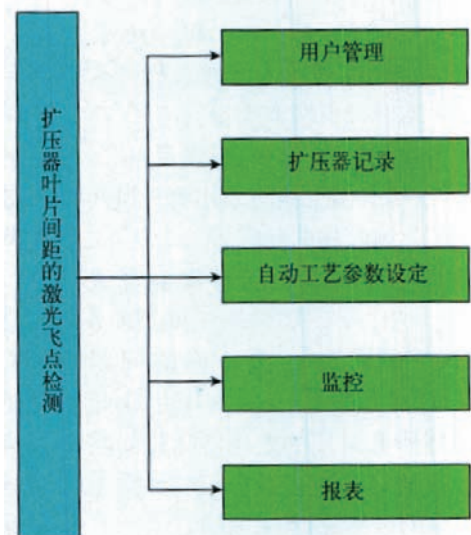


图6 扩压器叶片间距的激光飞点检测结构简图

加工检测。其研发成果的取得有利于推动激光无接触检测技术和检测理论的进展。

(责编 侧卫)