

超声波传感器在摊铺机自动调平控制系统中的应用*

梁 杰[†]

(山东交通学院工程机械系 济南 250023)

摘要 针对摊铺机自动调平控制系统对测距精度的较高要求,设计了一种具有较高精度的基于超声波传感器的测距系统。实验结果表明,在常用的测距范围内,静态测距精度可达1mm。介绍了测距系统的原理以及系统的软、硬件实现方法。

关键词 超声波测距, 摊铺机, 自动调平, 数据处理

Application of ultrasonic sensor in paver automatic leveling control system

LIANG Jie

(Department of Engineering Machinery, Shandong Jiaotong University, Jinan 250023)

Abstract In view of the high requirement of paver automatic leveling control for the distance measuring precision, a high precision distance measuring system based on ultrasonic sensor is designed. The test results show that in the usual distance measurement range, the static distance measurement precision can be as high as one millimeter. The system principle and the realization method of the system hardware and software are presented

Key words Ultrasonic distance measurement, Asphalt paver, Automatic leveling, Data processing

1 引言

沥青混凝土摊铺机是现代公路机械化施工中的关键设备之一,用来将拌制好的沥青混合料,按照路面的形状和厚度均匀地摊铺在已经整好的路基或路面基层上,形成满足一定宽度、厚度、平整度和密实度要求的路面基层或面层。路面平整度是评测沥青路面使用性能的一项重

要指标,为了保证路面的施工质量,现代沥青混凝土摊铺机都配备有自动调平控制系统。传统的自动调平控制系统采用的是浮动梁、人工架设的弦线等接触式调平基准,存在着使用不方便、控制精度低、体积庞大、拆装及运输不方便、使用寿命低等缺点。作为山东省教育厅科技发展计划的资助项目,我们设计了一种基于超声波测距技术和计算机智能控制技术的控制系

2007-07-09 收稿; 2007-11-05 定稿

* 山东省教育厅科技发展计划资助项目(J04D07)

作者简介:梁杰(1960-),男,山东省龙口市人,教授,工学硕士,主要从事机电一体化技术及计算机测量与控制方面的教学和研究工作。

[†] 通信联系人 E-mail:liangj_01@126.com

统,克服了传统控制系统所存在的不足,大大地提高了摊铺机调平系统的综合性能。

超声波测距系统是整个控制系统的核心部分,要求测距精度达到 mm 级。由于超声波传感器工作时其周围环境的许多参数,如温度、气压、风力、湿度等的变化都会对声速产生影响,因此传统的仅仅进行温度补偿的方法不能满足精度的要求。本控制系统采用了在超声波探头下方安装一参考杆的方法,对超声波声速进行实时校正,精度可以达到 1mm,现已成功应用于摊铺机自动调平控制系统中。本文介绍了超声波测距系统的工作原理以及计算机软、硬件的实现方法,给出了测距系统的实验结果。

2 调平控制系统的原理

整个控制系统的组成如图 1 所示,系统主要由数字式控制器、超声波传感器及控制电路、电磁换向阀和调平油缸组成。

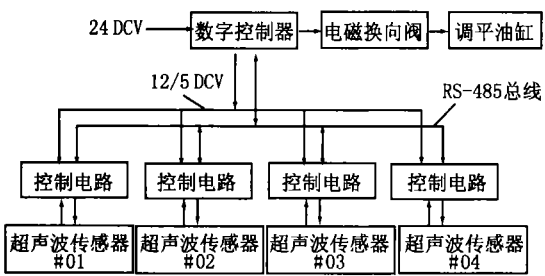


图 1 自动调平控制系统的组成

每台摊铺机配备有完全相同的两套控制系统,分别安装在摊铺机的两侧,用于控制相应一侧调平油缸的动作。数字控制器和超声波传感器均采用单片机控制,每一侧的 4 个超声波传感器纵向等间隔固定在一根称为平衡梁的由铝合金制成的直梁上,平衡梁则通过支架安装在摊铺机一侧的调平大臂上。长度约 2.5m 的调平大臂的前端与调平油缸的活塞杆铰接,后端固定有箱子状的用来将所摊铺的沥青混合料熨平的熨平板。由于熨平板直接放

在路面上,其可以随路面的高程变化上下移动,所以这种连接结构的熨平板称为浮动式熨平板。摊铺机行走时,摊铺机通过调平油缸牵引调平大臂以及熨平板随摊铺机一起移动。摊铺作业过程中,超声波传感器实时测量平衡梁与基准路面之间的距离,并通过 RS-485 总线将检测数据传送给控制器。控制器根据超声波传感器的测量数据以及一定的算法,向调平油缸的电磁换向阀输出 PWM 脉冲驱动信号,自动调节调平油缸活塞杆的垂直位置,改变摊铺机后部熨平板的仰角,使铺层表面的平整度不随路基的不平而变化,从而保证施工路面的平整度符合要求(对于高速公路,平整度要求为:用 3m 直尺测量时,间隙不能超过 3mm)。

3 超声波传感器的测距原理^[1,2]

超声波传感器测距采用渡越时间法,其原理是由超声发送探头发射超声,通过传播介质传播至被测目标的表面,经反射返回到超声发送探头,这个发送探头这时已可接收。测出超声脉冲从发射到接收的时间 t ,在已知超声声速 c 的前提下,便可计算出从发送-接收探头到被测表面的距离 L ,测距公式如下:

$$L = \frac{1}{2}ct \tag{1}$$

式中, c —超声波在传播介质中的传播速度, m/s。

超声波在空气中的声速随温度变化,其关系为:

$$c = c_0 \sqrt{1 + T/273} \text{ m/s} \tag{2}$$

式中: T —摄氏温度, $c_0 = 331.45 \text{ m/s}$ 。为了修正温度对声速的影响,提高测距精度,在考虑温度补偿的条件下,通常的做法是利用测温元件测出环境温度 T ,然后将 T 代入(2)式中,算得实际声速 c ,并由(1)式计算出探头距目标的距离。

4 测距精度的影响因素分析

4.1 声速 c 的影响

为了保证所铺设路面的平整度,摊铺机对测距精度提出了较高的要求(mm级),这时仅仅考虑温度补偿的方法加以校正,不能满足这一要求,还需要考虑风力等环境因素的影响。为此,本系统参考采用了如图2所示的补偿方法,即在探头与被测表面之间设置一U型的参考杆,其固定在探头的下方,参考杆水平面与探头工作面保持一固定的距离 $L1$,我们称之为校正段段长。由式(1)得到

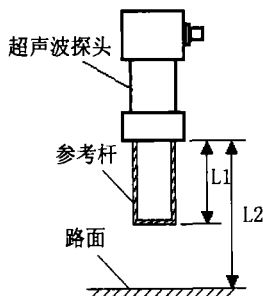


图2 声速的实时补偿

$$L1 = \frac{1}{2} c_1 t_1 \quad (3)$$

式中: c_1 — 超声波在校正段的传播速度, m/s;

t_1 — 超声波在校正段的传播声时, s。

如果超声波在校正段 $L1$ 和目标段 $L2$ 的传播速度相等,则由式 $L2 = \frac{1}{2} c_2 t_2$ 、(3)得

$$L2 = L1 \frac{t_2}{t_1} \quad (4)$$

式中: t_2 — 超声波在目标段的传播声时, s。

在式(4)中, $L1$ 是一个已知的固定量,现在只需测出声时 t_1 和 t_2 ,即可计算出探头到基准面的距离 $L2$ 。该补偿方法既实时补偿了温度对声速的影响,也补偿了湿度、风力等环境因素对声速的影响,因此可获得较高的测距精度。

在本系统中, $L1$ 为 230mm。系统安装时

应尽量使超声探头距地面近一些,以获得较好的补偿效果,通常 $L2$ 为两倍的 $L1$,即 460mm 左右。

4.2 声时 t 对测量精度的影响

超声波的传播时间 t 可表示为:

$$t = N / f_r = N \tau$$

式中: f_r — 时基信号的频率;

τ — 时基信号周期;

N — 对时基信号的计数值。

由上式可看出,提高时基信号频率 f_r ,可以减少计时时间 t 的量化误差,提高测距精度,同时也可提高测距的分辨力。

4.3 超声波探头固有频率的影响

超声换能器当收到超声回波信号后会立即输出电信号,但通常需滞后几个周期后才能达到超声接收电路比较器的阈值电平,从而产生计时误差。增大超声波探头的固有频率,可以减小这个计时误差,提高传感器的测量精度,所以目前的摊铺机自动调平系统通常选用频率较高的超声波传感器,一般为 200 kHz 左右。

4.4 超声探头对地面垂直度的影响

超声探头安装时要求尽量与地面垂直,但工作时由于调平大臂前端牵引点的上下移动,会造成调平大臂绕着熨平板后端的着地点摆动,使平衡梁以及超声波传感器倾斜一定角度,从而产生测距误差。但由于传感器安装的高度相对较低以及平衡梁倾斜的角度不大,因此对传感器的测距精度通常影响很小,可以忽略不计。

5 超声波传感器探头参数的确定

传感器的工作频率是测距系统的一个主要技术参数,工作频率的确定主要基于以下几点考虑:

(1) 由于超声波回波触发误差的存在,超声波频率越高,周期就越小,从而可提高传感器的测量精度。但频率也不能过高,否则超声波传播过程中衰减就会增大,从而影响超声

波的传播距离。

(2) 工作频率越高,对相同尺寸的换能器来说,发射的超声波扩散角越小,波束越细,指向性越好,测量表面复杂的目标越准。

(3) 从传感器设计角度看,工作频率越低,传感器尺寸就越大,制造和安装就越困难,使用就不方便。

综上所述,为提高传感器的测距精度和使用性能,传感器的工作频率通常选的大一些。

为了简化和缩短系统的研制开发过程,本系统选用了德国产的一种集发收功能于一体的超声波传感器。传感器的主要参数如下:

声束发散角: -3dB 时约为 5° ;

换能器频率: 约 175kHz ;

工作电压: $10\text{VDC} \sim 30\text{VDC}$ 。

由于传感器换能器的工作频率较高,除了具有以上所分析的各种优点外,也大大避开了摊铺机工作时发动机、液压系统以及振捣器、振动器等装置的噪声源频率,从而提高了信噪比。

6 测距系统的硬件设计^[3]

测距系统的硬件由单片机、超声波传感器、超声波传感器发射驱动电路、传感器回波信号电平转换电路、看门狗电路以及 RS-232/RS-485 转换电路等部分组成。

6.1 单片机的选择

测距控制电路单片机选用 ATMEL 公司的 AT89S52。AT89S52 是一个低功耗,高性能 CMOS 8 位单片机,片内含 8k Flash 只读程序存储器, 256 bytes 的随机存取数据存储器, 32 个外部双向 I/O 口, 3 个 16 位可编程定时计数器, 1 个全双工串行通信口以及看门狗 (WDT) 电路等,兼容标准 MCS-51 指令系统及 $80\text{C}51$ 引脚结构,时钟频率为 $0 \sim 33\text{MHz}$,本系统的单片机晶振选用 11.0592MHz 。

6.2 超声波发射与接收电路设计

超声波的发射由单片机的 P1.0 来控制,并通过一 NPN 型三极管实现驱动。三极管接

成集电极开路形式,输出高电平时便可激发超声波传感器发射超声波。超声波传感器平时输出低电平,当收到超声波回波信号时其输出一幅值约为 10V 的脉冲电压信号,此信号与单片机的 TTL 电平不兼容,经电平转换电路转换成 5V 的脉冲信号。该输出脉冲信号经反相后与 AT89S52 的引脚 T2EX (P1.1) 相连,在信号有负跳变时可立即触发 T2 的外部捕捉中断功能,以便减小计数误差,提高计时和测量精度。

6.3 看门狗 (WDT) 接口电路设计

控制电路利用看门狗 (WDT) 电路来提高工作可靠性,单片机程序一旦跑飞或进入死循环,看门狗电路可以使系统自动复位,程序重新开始执行。本系统选用看门狗芯片 X5045 来实现程序的监控, X5045 集上电复位控制、看门狗定时器、电源电压监控以及具有块保护功能的串行 EEPROM 四种功能于一体,体积小,采用 SPI 串行外设接口方式,与单片机之间的连接信号线只有四根,接口简单。

6.4 RS-232/RS-485 转换接口电路设计

超声波传感器控制电路通过串行总线上传检测数据,上、下位机单片机之间通过 RS-485 总线相连,并采用半双工方式通讯。AT89S52 的串口通过 MAX3082 芯片实现 RS-232 与 RS-485 的转换,芯片的发送控制端和接收控制端短接,由单片机的 P1.2 控制,高电平时为发送状态,低电平时则为接收状态。

7 系统的软件设计

本控制系统的单片机软件选用 C 语言编写,并在目前流行的 KEIL $\mu\text{VERSION} 2$ 环境下设计完成。

测距功能单片机软件采用模块化设计,软件由主程序、超声波循环发射子程序、超声波接收子程序、数字滤波子程序等模块组成。

主程序主要完成串行通信初始化、定时计数器初始化以及中断功能设定等工作。

超声波循环发射子程序模块用来以 25ms 的时间间隔,循环发送超声波并完成数字滤波以及数据存储等工作。超声波的循环发射通过 T0 的定时中断来实现,每次约产生 8 个超声波脉冲。循环发射的子程序流程图如图 3 所示。

超声波接收子程序模块通过 T2 的中断来读取定时计数器 T2 的两次计数值,并据此计算出 t_1 和 t_2 以及探头距路面的距离。为了减小计时误差,本测距系统利用 T2 的外部捕捉功能来进行计数。由 T2 的结构和工作原理可

知,当 T2 的捕捉/重装功能选择位 $CP/\overline{RL2} = 1$ 、T2 外部允许位 $EXEN2 = 1$ 时,一旦超声波传感器接收到回波并输出回波脉冲信号,即单片机的 T2EX/P1.1 引脚的信号有负跳变,便会触发 T2 的捕捉操作,将计数器 TH2 和 TL2 的数据自动读入捕捉寄存器 RCAP2H、RCAP2L 中。同时外部触发标志 EXF2 置 1,申请中断,在中断服务子程序中便可读取产生触发瞬间的计数值。超声波接收子程序流程图如图 4 所示。

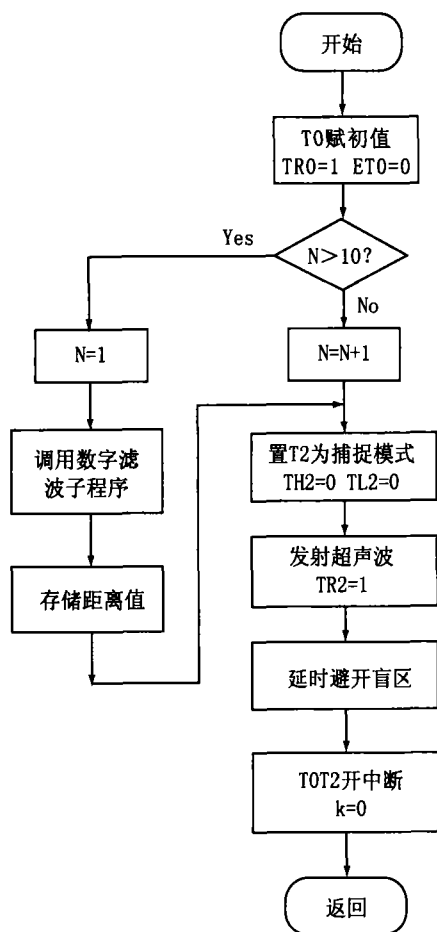


图3 超声波发射子程序流程图

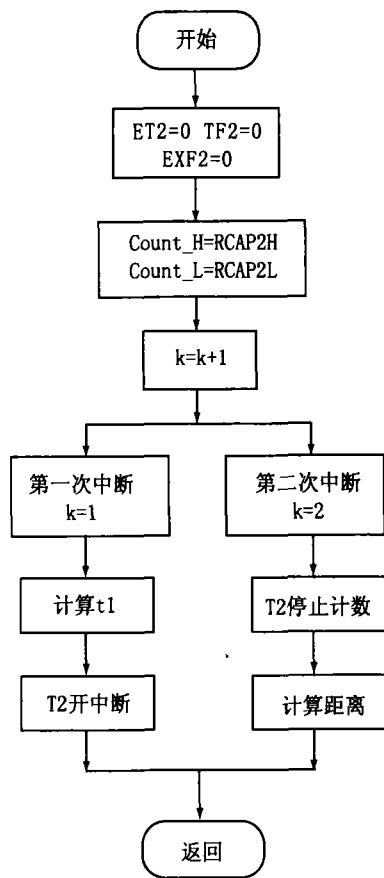


图4 超声波接收子程序流程图

8 实验数据处理^[4]

表 1 为实验室环境下的超声波传感器静态测量结果,由测量数据可知,在 0.4m ~ 1m

的常用测距范围内测量结果具有一定的误差,最大误差为 1.14%。产生误差的原因主要有 4 个:(1)超声波传感器接收电路的回波信号触发误差,即收到的回波信号在滞后若干个周

期、达到超声波接收电路比较器的阈值电平时传感器才有信号输出,从而产生计时误差。(2)固定在探头下方的参考杆采用直径约2.5 mm 的钢丝制成,由于钢丝较细,超声波的反射面较小,使初始反射的声波较弱,从而造成超声波接收电路输出信号滞后及 t_1 误差。(3)单片机中断过程以及相关指令的执行造成计时误差。(4)人为的测量误差。

将实测数据以关系曲线来表示时,可以看出实际距离与测量距离之间呈现较好的线性关系,因此若能确定二者之间的直线方程,然后将测量的距离值代入此方程中,便可获得精度较高的测距结果。MATLAB 计算机语言中的工具箱提供了实验数据的拟合直线求取工

具,即多项式拟合函数 $a = polyfit(xdata, ydata, n)$,其中 a 为待求系数矩阵, $xdata$ 是测量数据值构成的矩阵, $ydata$ 是实际距离值构成的矩阵, n 是拟合曲线的阶数,这里取 $n = 1$ 。将测量数据代入多项式拟合函数中,得到: $a_0 = 1.0151, a_1 = -2.287$,拟合函数为:

$$y = 1.0151x - 2.287$$

在实际应用中,上式中的 y 为经校正后的距离值, x 是由式(4)计算的距离值。

实测结果表明,测量数据经此拟合函数的修正后,在 0.4m ~ 1m 的常用测距范围内静态测量精度达到了 1mm,满足了系统对测量精度的要求。

表 1 实验数据

序号	实际距离(mm)	测量结果(mm)	误差(%)	序号	实际距离(mm)	测量结果(mm)	误差(%)
1	387	384	0.77	9	702	694	1.13
2	420	417	0.71	10	740	732	1.08
3	459	455	0.87	11	789	780	1.14
4	498	495	0.60	12	831	822	1.08
5	531	527	0.75	13	876	866	1.14
6	571	566	0.87	14	925	915	1.08
7	615	609	0.97	15	973	962	1.13
8	662	655	1.06				

9 结论

路面高程偏差的非接触式测量是摊铺机自动调平控制系统今后的发展趋势,基于超声波测距技术的非接触式平衡梁的应用克服了传统接触式调平基准所存在的不足,大大地提高了摊铺机调平系统的综合性能。本文介绍的超声波测距技术利用在超声波探头下方固定参考杆的方法,对声速进行实时校正,大大降低了温度、湿度、风力等使用环境因素对测量精度的影响,结合测量数据的进一步修正以

及系统硬件和软件的设计,使测距系统获得了较高的测量精度,达到了系统的设计要求。

参 考 文 献

[1] 时德钢,刘哗,王峰,等. 超声波测距仪的研究. 计算机测量与控制,2002, 10(7):480-482.
[2] 马大猷. 声学手册. 北京:科学出版社,1983.
[3] 王幸之,钟爱琴,王雷,等. AT89 系列单片机原理与接口技术. 北京:北京航空航天大学出版社,2004.
[4] 王沫然. MATLAB 与科学计算. 北京:电子工业出版社,2005.