

一种带温度补偿的数字倾斜角测量系统

胡晓东¹ 邱仁峰^{1,2} 谷 林^{1,2} 柳建春^{1,2}

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要 提出了一种带温度补偿的数字倾斜角测量系统, 阐述了系统组成、温度补偿原理和软件设计, 采用电子倾角器、A/D 转换器、单片机、温度传感器实现了在宽工作温度范围内的倾斜角测量, 消除了环境温度变化引起的偏差。系统通过实验验证, 达到了较高的测量准确度, 并在某项目的水平倾斜角测量系统中得到应用。

关键词 温度补偿; 倾斜角测量; 单片机; A/D 转换器

中图分类号 O435 **文献标识码** A

0 引言

在某些高准确度的测量系统中, 要求对系统进行快速调平或对某些装置与水平面的倾斜角进行快速高准确度测量。以往国内外系统的调平采用气泡水平仪, 通过人眼目测调平, 既费时准确度又不高, 而且受环境因素和人工因素的影响较大; 而采用伺服加速计、差压变送器、测力传感器等进行倾斜角测量的系统, 其测量准确度最高在 $1'$ 左右, 只能满足那些对准确度要求不高的场合^[1,2]。

以往使用电子倾角器为传感器设计的数字水平仪和电子倾角测量系统没有考虑环境温度对测量准确度的影响, 故无法满足某些高准确度调平和倾斜角测量的需求。为了适应宽工作温度范围里的高准确度测量, 必须对电子倾角器进行温度补偿。国外有人介绍的线性传感器的温度补偿方法是^[3]: 对传感器进行零点补偿和灵敏度补偿, 这种方法在一定温度范围里补偿的效果很好, 但是现在很多的光学测量系统工作的温度范围很宽, 在不同的温度范围里, 电子倾角器的温度系数不同, 为适应其在宽工作温度范围的需要, 必须采取灵活的补偿方法^[4]。本文介绍的系统是采用电子倾角器、单片机、模数转换器、温度传感器等构成的带温度补偿的高准确度数字倾斜角测量系统, 根据 A/D 转换器和温度传感器输出的数据在单片机中以软件的方法对电子倾角器进行温度补偿, 结果以串口中断的方式通过 RS-422 输出。系统消除了环境温度变化所产生的偏差, 实现了在宽工作温度范围中对倾斜角的快速高准确度测量。实验证明, 本系统的测量准确度在 $-10^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ 的范围内能达到 $3''$, 已经在某光学系统的水平倾斜角测量系统中得到了应用, 实践表明, 本系统还

可应用于高准确度的光电经纬仪、垂直偏差测量系统、导弹的斜瞄系统、一些需要高准确度调平的光学系统以及其他一些高准确度测量系统^[5,6]。

1 系统组成

带温度补偿的数字倾斜角测量系统由电子倾角器、二阶滤波器、A/D 转换器、单片机、温度传感器、输出电路和电源模块组成。系统结构如图 1。

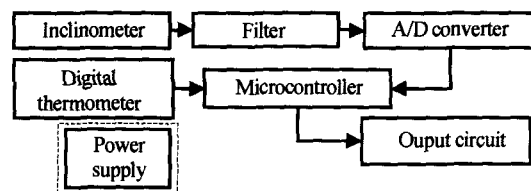


图 1 系统结构

Fig. 1 The structure of the system

根据系统设计要求, 选用 Jewell instruments 公司生产的 LCF-100 型电子倾角器, 它属于力平衡式伺服系统电子倾角器, 测量范围 $\pm 1^{\circ}$, 其输出为模拟电压, 与倾斜角度的正弦成正比。该倾角器具有分辨率高、响应速度快、线性度好等特点。由于电子倾角器输出的模拟电压含有高次谐波, 因此通过二阶低通滤波器滤除输出信号的高频分量。

A/D 转换器将电子倾角器输出的模拟量转换为数字量, 其分辨率的高低将直接影响系统的测量准确度。本系统根据设计要求, 采用 Burr-Brown 公司 ADS1210 作为电子倾角器的 A/D 转换器, 它是一种 24 位分辨率、宽动态范围、单 5V 供电、带自校正功能的 $\Sigma-\Delta$ 高精度 A/D 转换器, 其内部由可编程增益放大器、二阶 $\Sigma-\Delta$ 调制器、调制器控制单元、三阶数字滤波器、微控制器、寄存器组、基准参考源和时钟电路等组成。ADS1210 将转换的数字量通过 I²C 总线传送到单片机。ADS1210 的模拟电源和数字电源最好分开供电, 避免数字电路对模拟电路

产生干扰,而且数字电源要在模拟电源之后接入,否则可能造成 ADS1210 的永久损坏^[7].

温度传感器选用 Dallas Semiconductor 公司的 DS1624 数字温度测量计,它具有测量准确度高,测量温度范围宽,易与单片机接口等特点,其内部还带有 256 字节的 E²ROM,用于存贮测量系统的修正参数. 温度传感器实时采集系统的环境温度,将采集的温度值通过 I²C 总线送入单片机.

单片机选用 Atmel 公司的 AT89C52,它是一种带 8K 字节闪存的高性能微处理器,与 Intel 公司的 80C52 完全兼容^[8]. AT89C52 单片机是数字倾斜角测量系统的核心,利用其灵活的 P₁ 口与 ADS1210 模数转换器、DS1624 数字温度测量计构成 I²C 总线对电子倾角器的倾斜角和环境温度进行实时采集,并根据温度补偿公式对采集的数据进行计算处理,把计算结果以串口中断方式通过 RS-422 接口传送到上位机.

2 温度补偿原理

电子倾角器输出的模拟电压 V 与倾斜角度 θ 的正弦近似成线性关系,在不同环境温度下它们之间的理想曲线如图 2.

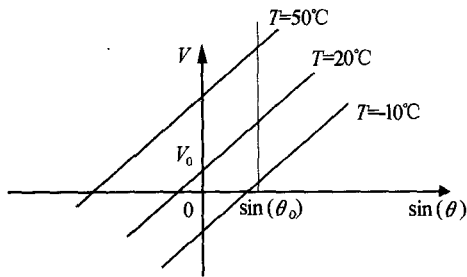


图 2 不同环境温度下倾斜角-输出电压的理想曲线
Fig. 2 Ideal curves of inclination angle vs output voltage in diverse condition of temperature

从图 2 可以看出,在环境温度为 20°C、倾斜角为 0°时,电子倾角器的输出有零点偏差 V_0 ;随着温度的变化,倾斜角-输出电压曲线将上下平移,其平移量为

$$\Delta V = K \times t \tag{1}$$

式中 K 为零点偏差系数,单位:V/°C; t 为环境温度,单位:°C; ΔV 为零点偏差值,单位:V. 因此电子倾角器输出的模拟电压随温度变化的理想方程为

$$V = V_0 + \Delta V + K_0 \times \sin(\theta) = V_0 + K \times t + K_0 \times \sin(\theta) \tag{2}$$

式中 K_0 是电子倾角器的转换比例因子.

由于倾角器的测量范围为 $\pm 1^\circ$,可以用弧度值替代角度的正弦值,其计算误差为

$$\Delta = \left| \sin\left(\frac{1 \times \pi}{180}\right) - \frac{1 \times \pi}{180} \right| =$$

$$8.86 \times 10^{-7} (\text{弧度}) \approx 0.183''$$

可以忽略不计. 则式(2)简化为

$$V = V_0 + K \times t + K_0 \times \theta \tag{3}$$

从式(3)可以看出,倾斜角度 θ 是随环境温度线性变化的函数,因此为了使数字倾斜角测量系统满足在宽工作温度范围内的测角准确度,必须对倾角器输出的电压进行温度补偿,其原理就是利用式(3)消除 $K \times t$ 项. 具体补偿方法是:单片机 AT89C52 通过 P₁ 口实时采集环境温度和倾角器输出电压,根据已知的零点温度系数计算出 ΔV ,消除由于温度变化引起的偏差,计算出修正后的倾斜角度值.

电子倾角器温度补偿的计算公式为

$$V_{\text{output}} = V_{\text{Bias}} + M_{\text{S.F.}} \times \sin(\theta_{\text{Tilt}} + \theta_{\text{Align}}) \tag{4}$$

式(4)中: V_{output} 、 V_{Bias} 分别表示倾角器的输出电压和零偏电压,单位:V; θ_{Tilt} 、 θ_{Align} 分别表示测量角度和修正角度,单位:弧度; $M_{\text{S.F.}}$ 表示转换比例因子.

考虑温度系数并统一单位,式(4)变为

$$\frac{V_{\text{AD}}}{K_{\text{AD}}} = B_0 + B_{\text{Temp}} \times \Delta T + M_{\text{S.F.}} [1 + M_{\text{S.F.}_\text{Temp}} \times \Delta T] \times \frac{\pi}{3600 \times 180} \times \theta_{\text{Tilt}} \tag{5}$$

式(5)中: V_{AD} 表示 A/D 转换器输出的数据; K_{AD} 表示 AD 转换器的输出斜率,单位:1/V; B_0 表示基准零偏电压,单位:V; B_{Temp} 表示零点偏差系数,单位:V/°C; ΔT 表示温度变化量,单位:°C; $M_{\text{S.F.}_\text{Temp}}$ 表示比例因子的温度变化系数;这里先假设式(4)中 $\theta_{\text{Align}} = 0^\circ$,则式(5)变为

$$V_{\text{AD}} = K_{\text{AD}} \times B_0 + K_{\text{AD}} \times B_{\text{Temp}} \times \Delta T + K_{\text{AD}} \times M_{\text{S.F.}} [1 + M_{\text{S.F.}_\text{Temp}} \times \Delta T] \times \frac{\pi}{3600 \times 180} \times \theta_{\text{Tilt}}$$

令

$$O_0 = K_{\text{AD}} \times B_0 \tag{6}$$

$$O_T = K_{\text{AD}} \times B_{\text{Temp}} \times \Delta T \tag{7}$$

$$K_T = K_{\text{AD}} \times [M_{\text{S.F.}} + M_{\text{S.F.}_\text{Temp}} \times \Delta T \times M_{\text{S.F.}}] \times \frac{\pi}{3600 \times 180} \tag{8}$$

则计算公式变为

$$V_{\text{AD}} = O_0 + O_T + K_T \times \theta_{\text{Tilt}} \tag{9}$$

综上所述,单片机分别计算出 O_0 、 O_T 和 K_T ,然后根据式(9)计算出修正后的倾斜角度值 θ_{Tilt} .

3 软件设计

系统软件采用汇编语言编程,由主程序、ADS1210 的读写子程序、DS1624 读写子程序、计算子程序和中断服务子程序等组成. 主程序完成初始化后,实时采集环境温度和电子倾角器数据,并进行补偿运算. 为了保证采集倾角器数据的稳定性,采

集一次环境温度数据后连续采集 10 次倾角器数据进行算术平均,再采集一次环境温度,循环往复. 倾角器温度补偿的相关参数存放在 DS1624 的 E2ROM 中,必要时上位机通过控制命令对其进行修正. 中断服务程序随时接收上位机的控制命令,进行系统自检、参数修正、数据输出等.

主程序的流程如图 3.

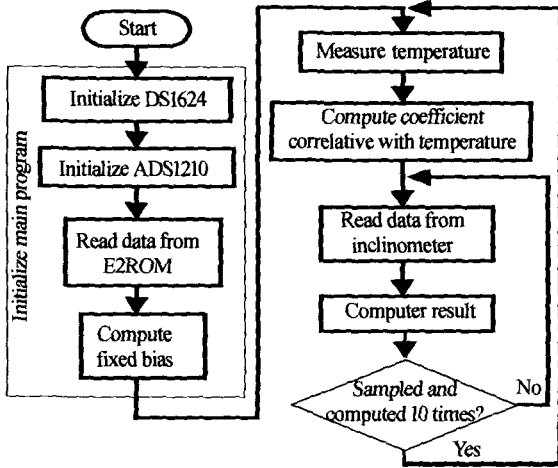


图 3 主程序流程图
Fig. 3 The flow chart of the main program

4 实验结果

采用 T3A 准直经纬仪验证本系统的测量准确度. T3A 准直经纬仪的底座调平准确度为 2", 测角准确度优于 0.5". 把电子倾角器放置在水平轴上,当测量方向与水平轴存在小夹角 $\alpha \leq 1^\circ$ 时,可以忽略它带来的影响.

在水平 $\pm 1^\circ$ 范围内等间隔微调 T3A 准直经纬仪的俯仰角,读取 ADS1210 的原始数据和温度数据,部分实验数据如表 1. 从表 1 可以看出系统有较好的线性度和稳定性,在环境温度 $-10^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$ 变化的范围内,倾斜角测量的最大误差不超过 3".

表 1 实验数据

T3 经纬仪 读数	温度	A/D 读数 (正向)	A/D 读数 (反向)	角度	差值
90°18'19.2"	-10.21875°C	-31113	-31131	-3360"	--
90°16'19.2"	-8.03125°C	-28887	-28921	-3122"	238"
90°14'19.2"	-6.12500°C	-26631	-26663	-2879"	243"
90°12'19.2"	-3.96875°C	-24421	-24461	-2642"	237"
90°10'19.2"	0.84375°C	-22120	-22146	-2400"	242"
90°8'19.2"	2.87500°C	-19901	-19941	-2162"	238"
90°6'19.2"	4.25000°C	-17688	-17724	-1922"	240"
90°4'19.2"	6.90625°C	-15444	-15484	-1682"	240"
90°2'19.2"	8.75000°C	-13198	-13226	-1439"	243"
90°0'19.2"	10.78125°C	-10984	-11022	-1201"	238"
89°58'19.2"	13.87500°C	-8736	-8772	-961"	240"
89°56'19.2"	15.96875°C	-6521	-6551	-722"	239"

T3 经纬仪 读数	温度	A/D 读数 (正向)	A/D 读数 (反向)	角度	差值
89°54'19.2"	18.06250°C	-4272	-4310	-480"	242"
89°52'19.2"	19.78125°C	-2070	-2110	-242"	238"
89°50'19.2"	21.34375°C	121	131	-2"	240"
89°48'19.2"	23.46875°C	2311	2339	235"	237"
89°46'19.2"	26.06250°C	4541	4581	475"	240"
89°44'19.2"	29.46875°C	6804	6842	716"	241"
89°42'19.2"	30.34375°C	9017	9035	956"	240"
89°40'19.2"	32.06250°C	11231	11243	1195"	239"
89°38'19.2"	34.87500°C	13499	13515	1438"	243"
89°36'19.2"	36.06250°C	15691	15707	1676"	238"
89°34'19.2"	39.84375°C	17970	17990	1918"	242"
89°32'19.2"	40.18750°C	20180	20202	2160"	242"
89°30'19.2"	42.81250°C	22411	22433	2399"	239"
89°28'19.2"	46.84375°C	24701	24719	2641"	242"
89°26'19.2"	49.87500°C	26944	26956	2880"	239"

注: T3A 准直经纬仪所测的相对角度是上表差值的 2 倍,即测量间隔为 4", A/D 读数(正向)和 A/D 读数(反向)是由 ADS1210 输出的数据左移 2 位得到的. 角度为温度补偿后系统所测量的角度,差值为前后两个角度之差.

5 结论

采用电子倾角器输出的模拟电压,经二阶低通滤波器、A/D 转换器,将其转换成数字量,通过 I²C 总线传送到单片机,并用温度传感器实时采集环境温度,通过 I²C 总线传送到单片机. 单片机根据温度补偿公式对采集的数据进行处理,计算出补偿结果,并将结果用串口中断的方式通过 RS-422 传送到上位机. 通过实验验证,在 $-10^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$ 的范围内,其测量准确度能达到 3",从所选择器件的相关参数来看,本系统有可能达到更高的测量准确度,其在更宽温度范围内的测量准确度验证正在研究中.

系统的特点是:性能稳定,不受环境温度的影响;准确度高,线性度好;可通过串行接口将采集到的数据传到计算机. 该测量系统已经在某项目的水平倾斜角测量中得到应用,运行稳定、性能可靠.

参考文献

- 1 廖学兵,张德宝,李振静,等. 基于单片机控制的高准确度火炮数字水平仪的研制. 微计算机信息, 2003, 19(10): 68~69
Liao X B, Zhang D B, Li Z J, et al. Control & Automation, 2003, 19(10): 68~69
- 2 王有隆,陈福深. 伺服加速计用于高准确度测量的研究. 电子科技大学学报, 2001, 30(4): 391~395
Wang Y L, Chen F S. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2001, 30(4): 391~395
- 3 Yoshiaki T, Tsuneo A, Toshiyuki Y, et al. Temperature

- compensation method for piezoresistive sensors. *JSAE Rev*, 1997, **18**(3): 318~319
- 4 张晓光, 于丽, 郑远, 等. 光纤通信系统中偏振模色散自适应补偿实验研究. *光子学报*, 2003, **32**(12): 1473~1478
Zhang X G, Yu L, Zheng Y, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(12): 1473~1478
- 5 曾志雄, 胡晓东, 谷林, 等. 数字天顶摄影仪的图象处理. *光子学报*, 2004, **33**(2): 248~251
Zeng Z X, Hu X D, Gu L, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(2): 248~251
- 6 曾志雄. 数字星影像快速测量的研究与倾角器测量的实现(硕士论文). 中国科学院研究生院, 2003
- Zeng Z X. The research of rapidly measurement based on digital star image and the achievement of measurement of obliquity with inclinometer (Dissertation) the graduate school, CAS, 2003
- 7 何非, 修吉平, 魏华胜. 24 位模数转换器 ADS1210/11 原理及应用. *电子技术应用*, 1999, (1): 53~56
He F, Xiu J P, Wei H S, *et al.* *Application of Electronic Technique*, 1999, (1): 53~56
- 8 赵宝永, 付兴武, 高宏伟. 基于 AT89C52 的通风机监视仪设计与应用研究. *微计算机信息*, 2003, **19**(8): 53~54
Zhao B Y, Fu X W, Gao H W, *et al.* *Control & Automation*, 2003, **19**(18): 53~54

A Digital Inclination Angle Measurement System With Temperature Compensation

Hu Xiaodong¹, Qiu Renfeng^{1,2}, Gu Lin^{1,2}, Liu Jianchun^{1,2}

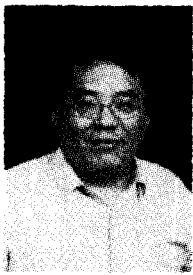
¹ Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068

² Graduate School of the Chinese Academy of Science, Beijing 100039

Received date: 2004-11-19

Abstract A digital inclination angle measurement system with temperature compensation is proposed, and the structure of the system, the principle of temperature compensation and the software design of the system are clarified in details. The system that includes inclinometer, single-chip, A/D converter and temperature sensor has achieved inclination angle measurement of high precision in a wide temperature range and has eliminated the warp brought by temperature. The precision of this system is verified by experimentation. This system has the merits of high stability, high precision and good linearity. In some measurement systems of high precision, this system will be widely used.

Keywords Temperature compensation; Inclination angle measurement; Single-chip; A/D converter



Hu Xiaodong was born in Xi'an, Shaanxi province. He received the Bachelor degree in the Department Information and Control Engineer in Xi'an Jiaotong University. Now he is a professor in the Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, and majoring in photoelectricity information and signals process, computer control.