

# 光电编码器温度特性分析与补偿方法

龙科慧<sup>1</sup> 杨守旺<sup>1,2</sup> 何金琪<sup>1</sup> 周磊<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; <sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要** 温度变化所造成的电路参数改变是影响光电轴角编码器测量精度的重要因素之一。当环境温度变化时编码器机械形变、光源电路和接收管温度特性变化,引起光电信号幅值变化,综合反映在编码器前置放大器输出信号幅值的改变,对幅值细分的高精度编码器引入测量误差。介绍了一种温度补偿方法,可在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,修正温度变化带来的影响并稳定输出信号幅值。实验结果表明,某 21 位编码器在 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,幅值信号变化为 20%,加入温度补偿后幅值信号变化约 3%,补偿效果明显。

**关键词** 光学器件; 温度补偿; 温度特性; 编码器

中图分类号 TP212 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS200929s1.0320

## Temperature Characteristics and Compensation of Photoelectrical Encoder

Long Kehui<sup>1</sup> Yang Shouwang<sup>1,2</sup> He Jinqi<sup>1</sup> Zhou Lei<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China  
<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

**Abstract** The change of circuit parameter caused by variable temperature is an important element that affects the accuracy of photoelectrical encoder. The mechanical deformation of encoder the characteristics of infrared-LED and temperature characteristics of receiving detector will vary with the change of ambient temperature. This variation will change the amplitude of the encoder's output signal and bring measurement errors, especially for amplitude breakdown high-precision encoder. A method of temperature compensation is proposed, which can automatically compensate the variation caused by the variable temperature and stabilize the amplitude of output signal in a wide temperature range about  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Experimental results show that the amplitude signal change of a 21-bit encoder at  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$  is 20%, and the amplitude signal change is 3% after adding temperature compensation.

**Key words** optical devices; temperature compensation; temperature characteristics; encoder

## 1 引言

在实际应用中,影响光电轴角编码器测量精度、线性度等性能指标的因素很多,如码盘的偏心、轴的晃动等,而温度变化所造成的机械形变与电路参数的改变也是影响这些技术指标的主要因素<sup>[1~3]</sup>。当温度变化时编码器光源与探测元件特性的变化,是引入编码器误差的主要原因,通常表现在使编码器输出信号幅值产生变化,对采用幅值细分的高精度编码器引入误差<sup>[4~7]</sup>。生产的光电轴角编码器大多工作在较恶劣的温度环境中,为了减少环境温度对编码器的影响,有必要对它的温度漂移进行补偿研究。目前国内外对编码器温度补偿的常采用的方法

有使用配对的发光管和接收管及在发光电路中串联热敏电阻等<sup>[8~11]</sup>,这些方法经工程实践,温度补偿效果都不理想。本文分析了编码器的温度特性,并根据实验及相应的实验结果,设计出了一种可行的光电轴角编码器温度补偿方法,可在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内进行温度修正补偿,且硬件体积小、补偿范围宽和智能化。

## 2 编码器温度特性分析

### 2.1 光源电路

编码器光源多选用红外发光二极管(LED)。红外发光二极管也具有普通二极管的特性<sup>[1]</sup>,它的发

光强度也会随温度的改变而产生变化。

编码器光源电路通常采用并行连接和串并混合连接等方式<sup>[2]</sup>。对于高精度、高分辨率的编码器,由于所用的发光器件数量较多,为了减少功耗,一般采用串并混合的连接方式(图 1)。其中,某一串联支路的电流

$$I_{Fm} = \frac{V_s - nV}{R_m}, \quad (1)$$

式中  $V_s$  为供电电压,  $V$  为 LED 结电压,  $R_1 \sim R_m$  为各支路的限流电阻,  $n$  为串联 LED 的个数。由(1)式可见,编码器光源电流不仅与结电压  $V$  有关,还与串联 LED 的数量  $n$  有关。当温度变化时,设一个 LED 的结电压变化  $\Delta V$ , 串联支路中  $n$  个 LED 的结电压变化为

$$V' = n(V + \Delta V) = nV + Kn\Delta T, \quad (2)$$

式中  $K$  为结电压温度变化系数( $-2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$  左右), 此时 LED 的电流为

$$I'_{Fm} = (V_s - nV - Kn\Delta T)/R_m, \quad (3)$$

LED 中的电流相对变化为

$$\Delta I = Kn\Delta T/R_m. \quad (4)$$

可见,在  $n$  个 LED 串联电路中温度变化引起电流的变化是单个 LED 变化量的  $n$  倍。因此,LED 串联个数越多,信号幅值随之变化也大。

对 4 个 LED 串联和 6 个 LED 串联电路进行温度实验,温度范围  $-40 \text{ }^\circ\text{C} \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$ 。设  $V_s = 12 \text{ V}$ , 常温下,正向电流  $I_F$  设定在  $24 \text{ mA}$  左右,4、6 个串联发光二极管电路中的限流电阻分别为  $300 \text{ } \Omega$ ,  $200 \text{ } \Omega$ , 得到如表 1 所示的实验数据,  $I_{F4}$ ,  $I_{F6}$  均为电路中的正向电流。

表 1 实验数据

Table 1 Experimental data

Temperature / $^\circ\text{C}$	$I_{F4}/\text{mA}$	$I_{F6}$
-40	23.27	20.82
-20	23.84	21.91
0	24.43	23.16
20	24.78	24.24
40	25.28	25.19
60	25.65	26.31
80	26.23	27.49

在 4 个 LED 串联电路中,在  $+80 \text{ }^\circ\text{C}$  时 LED 正向电流与  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  相比变化了  $5.85\%$ ; 在  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$  时正向电流与  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  时相比变化了  $6.09\%$ 。实验结果与(4)式计算结果基本一致。可见温度变化是造成编码器信号幅值变化的重要因素之一,在实际测量中应进行温度补偿。

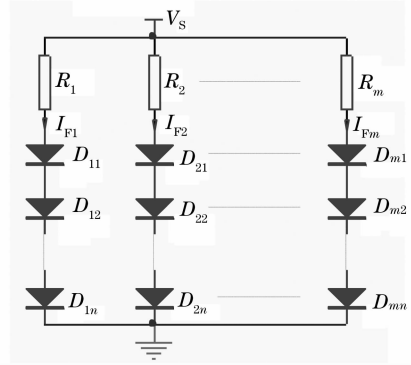


图 1 串并混合连接的光源电路

Fig. 1 Series-parallel mixed circuit of optical source

### 2.2 信号接收

光电接收采用与 LED 峰值波长对应的光电三极管,可等效于一个反向偏置的光电二极管与一个三极管的连接,呈正温度特性。因此,光电接收元件对光源的温度变化有一定的补偿作用,只是相对于多 LED 串联的光源,它的补偿作用很小。

当温度改变时,光电接收元件实际接收到的光能为

$$L = (L_0 - \Delta L)(A + B\sin \theta), \quad (5)$$

设  $E$  为光电接收元件的光电转换系数,  $\Delta I_1$  为光电接收元件自身因温度影响产生的电流变化量,则实际输出电压为

$$V = (EL + \Delta I_1)R = EL_0(A + B\sin \theta)R - E\Delta L(A + B\sin \theta)R + \Delta I_1R, \quad (6)$$

(6)式中第一项是与温度无关的理想叠栅条纹信号,而后两项则是无用的由温度变化引入的附加量<sup>[3]</sup>。

### 3 温度补偿方法

编码器温度补偿系统由温度传感器、模/数(AD)转换器、单片机、电压调整器、光源电路等组成。补偿原理如图 2 所示。

当环境温度变化时,如温度升高  $\rightarrow \Delta I \uparrow \rightarrow I_{Fm} \uparrow \rightarrow L \uparrow$ , 单片机通过 A/D 转换器将温度传感器值读

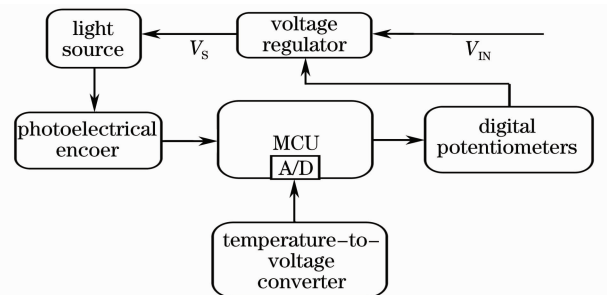


图 2 温度补偿原理

Fig. 2 Principle of temperature compensation

入,并根据温度值实时调整数字电位计,改变编码器 LED 光源电压  $V_s$ ,使  $V_s \downarrow \rightarrow I_{Fm} \downarrow \rightarrow L \downarrow$ ;从而保持 LED 中的电流近似恒定。

单片机选用单周期频率 20MIPS 的 8052 为内核的美国模拟器件公司生产的 ADuC841,可在线编程,外形尺寸仅  $8\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ 。温度传感器采用 TC1407A 线性电压输出精密温度/电压转换器,其输出电压与测得的温度直接成比例,可精确地测量  $-40\text{ }^\circ\text{C} \sim +125\text{ }^\circ\text{C}$  间的温度,电源电压范围为  $2.5 \sim 5.5\text{ V}$ ,封装为尺寸很小的 3 引脚 SOT-23B,其输出值由单片机通过片上 A/D 转换器采入。温度传感器在电路板上的安放位置应远离功耗大的发热器件,以减少电路自身温度对测量值的影响。数字电位器选用美国模拟器件公司的 AD5253,它有 64 个抽头, $I^2C$  接口形式,非易失。电压调整器为美国国家半导体公司的 1 A 低压差( $0.5\text{ V}$ )LM2941,其输出电压可在  $5 \sim 20\text{ V}$  范围内调整。

单片机的主要任务是完成编码器的数据处理,本文只是用单片机少部分资源实现温度补偿控制,可见这种温度补偿方法用件少、尺寸小。

## 4 软件设计

采用 MCS51 汇编语言编程。单片机在一些实时控制及数据处理系统中具有得天独厚的优势,但对较为复杂的函数运算与计算机及某些数据处理器相比要逊色。因此要用它计算(6)式中的后两项会

力不从心。为此本文采用查表方式来完成补偿修正。在不同的温度下,由单片机控制改变数字电位器值,使编码器放大器输出信号接近室温时幅值,记录不同温度情况下数字电位器值,做成修正表存在单片机内部程序存贮器的固定存贮区内。当单片机读入温度传感器值时,将该值作为地址相对偏移量,程序寄存器 PC 中送入修正表的基址。通过程序存贮器传送操作指令(MOVC A,@A+PC)将修正值读入并送到数字电位器中,通过改变数字电位器阻值完成电压调整器输出电压的改变,达到调节光源电压的目的。

## 5 实验结果

图 3(a)为  $20\text{ }^\circ\text{C}$  时某 21 位编码器精码信号经前置放大器后输出的波形,可见信号幅值调整在  $\pm 2.5\text{ V}$  内(4 个 LED 串联, $V_s=10\text{ V}$ , $I_F=25\text{ mA}$ )。图 3(b)为其  $65\text{ }^\circ\text{C}$  时无温度补偿的输出波形,信号幅值变化近 20%。这里除了光源变化外,还包括了机械形变和接收电路等随温度变化所引入的信号幅值变化。将给引入编码器细分误差,对于采用算法细分的编码器,会使 A/D 转换器的分辨率下降,引入的误差为

$$\Delta\theta = |\sin^{-1}[\Delta A/(2A)]| \sin(2\theta). \quad (7)$$

在  $\theta=45^\circ$  时,(7)式出现最大值, $\theta=5.74^\circ$ 。而 21 位编码器的一个分辨率仅为  $0.7^\circ$ <sup>[4]</sup>(插补系数为 512)。

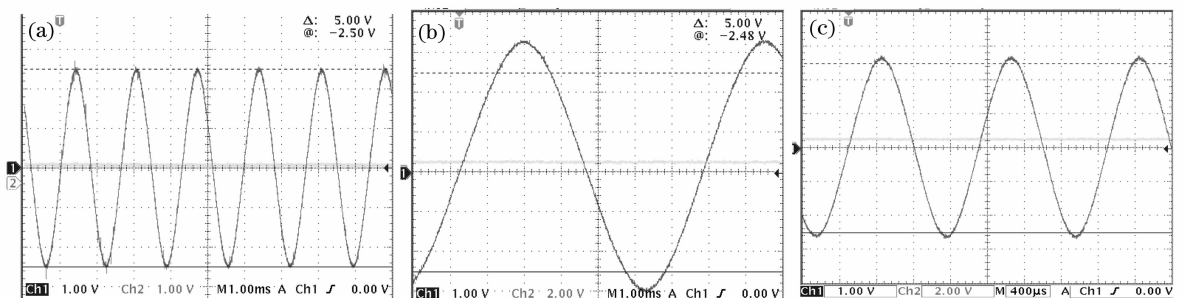


图 3 编码器的输出信号。(a)  $20\text{ }^\circ\text{C}$ ; (b)  $65\text{ }^\circ\text{C}$  无温度补偿; (c)  $65\text{ }^\circ\text{C}$  加入温度补偿

Fig. 3 Output signal of encoder. (a)  $20\text{ }^\circ\text{C}$ ; (b) with temperature compensation at  $65\text{ }^\circ\text{C}$ ; (c) without temperature compensation at  $65\text{ }^\circ\text{C}$

在  $65\text{ }^\circ\text{C}$  加入温度补偿时编码器的输出信号如图 3(c)所示,可见信号幅值变化有较大的改善,说明温度补偿方案可行。从图 3(c)可以看出信号的幅值仍略大于图 3(a)的幅值,所引入的最大误差约为  $1.15^\circ$ ,这是由于数字电位计 AD5253 的分辨率不够、电阻阻值不合适造成的,因此有待进一步改进。

## 6 结 论

通过实验发现,当工作环境温度变化时编码器机械形变,光源电路和接收管温度特性变化引起的光电信号幅值的变化,综合反映在编码器前置放大器的输出信号的改变。设计的温度补偿电路通过调节不同温度下的光源电压,不仅补偿了光源的变化,

也对机械形变、接收电路的变化进行了补偿,且补偿范围较大。

### 参 考 文 献

- 1 D. B. Leviton, Jeff Kirk, Luke Lobsinger. Ultra — high resolution Carresian absolute optical encoder[C]. *SPIE*, 2003, **5190**: 111~121
- 2 Zhang Xingyi. 电子显示技术[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1995. 70~71  
张兴义. 电子显示技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995. 70~71
- 3 Luo Changzhou, Chen Liangyi, Sun Yan. A new optical emcoder [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, **11**(1): 104~108  
罗长洲, 陈良益, 孙 岩. 一种新型光学编码器[J]. 光学精密工程, 2003, **11**(1): 104~108
- 4 Yu Honglin. Temperature drift and compensation of photoelectric encoder[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1996, **25**(1): 15~18  
喻洪麟. 光电编码器温度漂移与补偿方法[J]. 光子学报, 1996, **25**(1): 15~18
- 5 Xiong Jingwu, Wang Yongchen. The frequency multiplication of the moire fringe using analog multipliers [J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 1984, **5**(2): 179~188  
熊经武, 王勇臣. 莫尔条纹乘法倍频[J]. 仪器仪表学报, 1984, **5**(2): 179~188
- 6 Dong Lili, Xiong Jingwu. Evelopment of photoelectric rotary encoder[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, **8**(2): 198~202  
董丽丽, 熊经武. 光电轴角编码器的发展动态[J]. 光学精密工程, 2000, **8**(2): 198~202
- 7 Geng Lihong, Cao Xuedong. The verification of accuracy and resolution for high-resolution photoelectric rotary and angle encoder[J]. *Tool Engineering*, 1996, **30**(9): 36~38  
耿丽红, 曹学东. 高分辨率光电轴角编码器分辨力和精度的检测 [J]. 工具技术, 1996, **30**(9): 36~38
- 8 Mao Yingtai. Error Gorithm and Accuracy Analysis [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1982  
毛英泰. 误差理论与精度分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982
- 9 Hong Xi, Xu Zhijun, Yang Ning. Error compensation of optical encoder based on RBF network [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(4): 598~603  
洪 喜, 续志军, 杨 宁. 基于径向基函数网络的光电编码器误差补偿法[J]. 光学精密工程, 2008, **16**(4): 598~603
- 10 Mu Zhiguo, Xiong Wenzhuo. The research of the method of photoelectric signal compensation of high — precision shaft encoder[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2006  
慕志国, 熊文卓. 高精度光电轴角编码器光电信号补偿方法的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2006
- 11 Xiong Wenzhuo, Kong Zhiyong, Zhang Wei. Phase correction of quartering deviation of photoelectric rotary encoder[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(11): 1745~1748  
熊文卓, 孔智勇, 张 炜. 光电轴角编码器光电信号正交性偏差的向量校正方法[J]. 光学精密工程, 2007, **15**(11): 1745~1748