

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2016.06.014

## 基于FPGA的V/F转换电路温度补偿技术研究

杨良军<sup>1</sup>,董建树<sup>2</sup>,王蒙<sup>2</sup>,王惠<sup>3</sup>,严宗睿<sup>4</sup>,任军学<sup>5</sup>

(1. 海军驻昆明地区军事代表处,昆明 650000; 2. 北京自动化控制设备研究所,北京 100074;  
3. 北京振兴计量测试研究所,北京 100074; 4. 海军指挥学院,南京 210016; 5. 北京航空航天大学,北京 100191)

**摘要:**针对温度对V/F转换电路工作性能的影响,分析了主要电子元器件的温度影响因子,阐述了转换电路的温度补偿原理。在电路中采用基于FPGA的数字式温度补偿方案进行温度补偿的标定、设计与试验,结果表明采用数字式温度补偿方式改善了温度因素对V/F转换电路的影响,使得电路满足温度稳定性要求。

**关键词:**温度补偿;V/F转换;标定;FPGA

**中图分类号:** TJ765.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2095-8110(2016)06-0070-06

### Research on Temperature Compensation Technology for V/F Conversion Circuit Based on FPGA

YANG liang-jun<sup>1</sup>, DONG Jian-shu<sup>2</sup>, WANG Meng<sup>2</sup>, WANG Hui<sup>3</sup>, YAN Zong-ru<sup>4</sup>, REN Jun-xue<sup>5</sup>

(1. Military Representative Office of Navy in Kunming Area, Kunming 650000, China;  
2. Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China;  
3. Beijing Revitalization Institute of Measurement and Test, Beijing 100074, China;  
4. Nanjing Naval Command Academy, Nanjing 210016, China; 5. Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** According to the temperature impact on the performance of V/F conversion circuit, the temperature impact factors of main electronic component are analyzed. The temperature compensation principle of conversion circuit is described and the digital temperature compensation scheme based on FPGA is applied on the temperature compensation calibration, design and test. The result shows that the digital temperature compensation method decreases the temperature impact on V/F conversion circuit, which meets the temperature stability demand of circuit.

**Key words:** Temperature compensation; V/F conversion; Calibration; FPGA

## 0 引言

随着计算机技术与大规模集成电路技术的飞速发展,模数转换电路技术也在不断的进步与发展,并在惯性导航系统的工程应用中起到非常重要的作用。模数转换的分类方法很多,一般分为积分型、比较型和电荷平衡型三类,其中电压/频率转换电路就属于电荷平衡型。通常,惯性传感器输出的模拟信号的变化率比较慢,而惯性导航系统对模数转换的精度要求高,使得电压/频率转换电路成为惯性导航系统中模数转换部件的优先选择。

电压/频率转换电路,又称压频转换电路(简称V/F转换电路),是一种将模拟电压信号转变为频率信号,通过数字电路测量其频率,从而运算出输

入的模拟电压信号大小的电路。它的作用与A/D器件相似,输入阻抗高,与计算机连接方便,具有双极性双路转换输出特性。在惯性导航系统中,V/F转换电路与加速度计、陀螺一起工作,将加速度计、陀螺输出的模拟信号转换成与其成比例的数字脉冲信号,以适应导航计算机的高精度计数需要。V/F转换电路的输出频率与输入电压的比例系数称为标度因数。在电路工作温度范围内标度因数的最大相对变化量称为转换标度因数的温度漂移(简称温漂)。平均每1℃的温度漂移量称为标度因数的温度系数。

按照电子设备可靠性设计要求,转换电路应能满足在环境温度范围内正常工作,要求转换电路适应高低温工作的各种试验条件,试验过程中和恢复

收稿日期:2015-03-25;修订日期:2016-04-19。

作者简介:杨良军(1966-),男,高级工程师,主要从事水中兵器相关技术的研究。

常温后应能满足技术条件要求。电子元器件的工作性能随着环境温度的变化而改变,因此,温度因素是影响V/F转换电路工作性能的重要因素,温度漂移也是衡量转换电路性能的一项重要指标<sup>[1-2]</sup>。

V/F转换电路的温度补偿方式一般分为硬件补偿和数字式补偿两种。硬件温度补偿电路由于其不使用数字芯片,因此所用器件质量等级较高,有着很高的可靠性,但是硬件补偿电路调试工作量相对复杂,对非线性的温度特性补偿较为困难<sup>[3]</sup>;相反,数字式温度补偿方案具有结构简单、补偿方式灵活方便、节省人工的特点,成为一种更合适的温度补偿方案。

## 1 转换电路温度因素的影响

V/F转换电路基于电荷平衡原理,产生与输入电压信号成正比的频率脉冲信号。V/F转换电路可以划分为电荷平衡电路、恒流源电路、同步逻辑控制电路、温度补偿电路等4个基本的功能模块,如图1所示。首先,输入电压量进入电荷平衡电路模块中进行电容积分,当积分值超过门限电压值后,会发出频率信号给同步逻辑控制电路模块;该模块控制恒流源反馈电路,向积分器中注入反向的电流,使得电容反向积分,最终实现积分器中的电荷平衡,同时电路对外输出相应比例的频率量;另外,温度补偿电路对恒流源模块进行温度补偿,确保反馈电流源在工作温度范围内保持良好的稳定性。

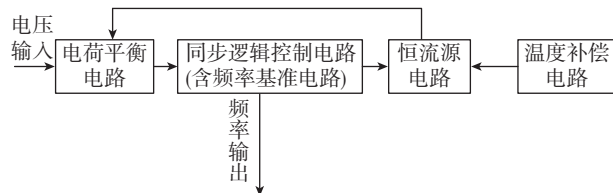


图1 转换电路组成框图

Fig.1 The functional block diagram of conversion circuit

转换电路的输出频率 $f$ 与输入电压 $V_{\lambda}$ 之间的函数关系满足式(1)

$$f = \eta \left( \frac{F}{I_{\text{反}}} \right) \cdot V_{\lambda} \quad (1)$$

式中, $V_{\lambda}$ 为被测输入电压; $I_{\text{反}}$ 为反馈基准电流; $F$ 为基准频率; $\eta$ 为由输入电阻及反馈电流分流系数决定的比例系数; $f$ 为代表输出频率,作为转换电路的结果。

由式(1)可知,影响转换电路输出频率的参数包括由输入电阻及反馈电流分流系数决定的系数

$\eta$ 、基准频率 $F$ 和反馈基准电流 $I_{\text{反}}$ 。系数 $\eta$ 主要由采样电阻、积分电阻决定;基准频率 $F$ 主要由晶体振荡器决定;反馈基准电流 $I_{\text{反}}$ 主要由电压基准器件和转换电阻决定。当这些器件的温度特性共同发生作用,就会影响电路输出频率的温度漂移。

惯性导航系统一般要求转换电路在 $-40^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ 的工作温度范围内,输出频率的温度漂移不大于 $2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 。影响输出频率的温度漂移不大于 $2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 。影响输出频率的温度漂移的因素主要来自转换电路的元器件温度特性,通常对转换电路进行适当的温度补偿以满足系统要求。V/F转换电路的主要元器件的温度特性统计表如表1所示。

表1 主要元器件的温度特性表

Tab.1 The table of temperature character of main components

序号	主要元器件	典型温度特性 ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )
1	高精度的采样电阻	$\pm 5$
2	高精度的积分电阻	$\pm 5$
3	温度补偿晶体振荡器	0.01
4	电压基准器件	$\leq 4$
5	高精度的转换电阻	$\pm 5$
6	其他元器件	$\pm 1$
	合计	$\pm 20$

其中,采样电阻和积分电阻都选用高精度电阻器,温度特性为 $\pm 5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ;晶体振荡器选用温度补偿晶体振荡器,在 $-40^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ 温度范围内频率稳定性为 $\pm 1 \times 10^{-6}$ ,即 $\pm 1 \times 10^{-8}/^{\circ}\text{C}$ ;电压基准器件的输出电压温度漂移低于 $4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ,转换电阻选用高精度电阻器,温度特性为 $\pm 5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。

由以上分析可知,除晶体振荡器的温度漂移较小可以忽略外,由采样电阻、积分电阻、电压基准器件和转换电阻产生的最大温度漂移为 $1.9 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 。如果加上转换电路中其他元器件温度漂移的影响,转换电路输出频率的温度漂移将更大。因此,在元器件已经优选并确定的情况下,转换电路进行温度补偿,以降低温度因素的影响<sup>[4-5]</sup>。

## 2 温度补偿原理

一般地,改变V/F转换电路的输出频率 $f$ ,实现对转换电路温度补偿的目的,可以通过改变V/F转换电路的比例系数 $\eta$ 、基准频率 $F$ 或反馈基准电流 $I_{\text{反}}$ 来实现。

其中,比例系数 $\eta$ 主要由采样电阻、积分电阻决定,当转换电路的量程确定后,采样电阻、积分电

阻的阻值也就随之固定。因此,不能通过改变比例系数  $\eta$  来对转换电路进行温度补偿。

基准频率  $F$  由晶体振荡器输出频率通过分频器产生,其值取决于惯导系统要求的转换电路满量程输出频率值,是固定量。因此,不能通过改变基准频率  $F$  来对转换电路进行温度补偿。

反馈基准电流  $I_{反}$  由基准电压和转换电阻决定。由于 V/F 转换电路输入电压有正负之分,当输入电压为正时,需引入负的反馈基准电压;当输入电压为负时,需引入正的反馈基准电压。反馈基准电压输出到桥式电流反馈开关电路单元中,那么,通过直接并联引入一个电压量(串联电阻),等效为引入一个  $I_{\Delta}$ ,即可改变反馈基准电流值,进而改变转换电路输出频率  $f$ ,达到对输出频率进行补偿的目的。

### 3 数字式温度补偿方案

数字式温度补偿方案的原理是根据温度传感器测试得到的环境温度值,输出相应的数字信号,经过 D/A 转换后调整反馈基准电流,实时改变转换电路输出频率,减小温度变化对输出频率产生的影响。温度补偿电路主要包括测温电路、中央处理电路和 D/A 转换电路 3 个单元。数字式温度补偿流程如图 2 所示。

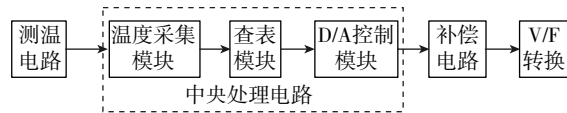


图 2 数字式温度补偿流程图

Fig. 2 The flow chart of digital temperature compensation

测温电路单元的功能是采集电路板温度信息,提供给中央处理电路。中央处理电路单元中的温度采集模块获取温度信息后,提供给查表模块进行

判温处理、补偿数据的查表运算,然后控制 D/A 控制模块输出相应的补偿数字量到补偿电路单元<sup>[6-7]</sup>。补偿电路单元的作用是根据输出补偿数据产生输出电压,对反馈基准电压进行补偿。

数字式温度补偿的措施是,首先在全温范围内对 V/F 转换电路进行标定,在一定间隔的温度点上分别测试并计算得到每一转换通道的标度因数平均值(或者等效值)。一般以常温时的标度因数平均值(或者等效值)作为基准点,计算出其他温度点的标度因数平均值与基准点的偏差,以此作为补偿依据,得到每个温度点所需的补偿值,预先写入中央处理电路。这样,温度传感器实时测量环境温度并传给中央处理电路,中央处理电路根据温度值进行查表或插值计算,确定在此环境温度下所需的补偿值,最后通过 D/A 转换器对反馈基准电压进行补偿,也即对转换电路输出频率进行温度补偿。

### 4 温度补偿方案的应用

某产品要求 V/F 转换模块的工作温度范围为  $-40^{\circ}\text{C} \sim +70^{\circ}\text{C}$ ,标度因数温度系数不大于  $1 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 。由于该产品具备负责信息处理功能的 FPGA 芯片,能够兼容数字式温度补偿的逻辑模块,所以采用基于 FPGA 的数字式温度补偿方式对转换电路进行补偿,改善电路的温漂特性。

#### 4.1 温度标定

V/F 转换电路必须在常温线性度已经补偿合格的情况下进行温度补偿,使得同一路在全温范围内、同一输入电流情况下始终输出基本相同的频率值,并且满足标度因数的温度系数指标。

首先由各温度点标定值计算出温漂不合格的电路,表 2 所示为在不同温度点测量并计算出的 3 路输入共 6 通道的标度因数数值。

表 2 在不同温度点的 3 路输入共 6 通道的标度因数测量表

Tab. 2 The scale factor measurement for 3 inputs & 6 outputs at different temperatures

通道 温度/ $^{\circ}\text{C}$	AX+	AX-	AY+	AY-	AZ+	AZ-
-40	6397.43	6385.83	6396.17	6397.75	6400.37	6393.23
-20	6398.84	6387.62	6397.81	6399.32	6402.48	6394.92
-10	6399.70	6388.77	6398.82	6400.40	6403.63	6396.00
10	6401.64	6391.38	6400.96	6402.65	6406.01	6397.48
30	6403.76	6394.36	6403.23	6405.33	6408.67	6401.47
50	6405.69	6397.80	6405.36	6408.26	6411.29	6404.92
70	6408.74	6401.37	6408.59	6411.38	6415.01	6408.74

正向标度因数温度系数  $K^+$ 、负向标度因数温度系数  $K^-$  计算方法如下:

$$K_w^+ = \frac{|(K_{AVE高}^+ - K_{AVE低}^+) \times 10^6|}{(110 \times K_{AVE}^+)} \quad (2)$$

$$K_w^- = \frac{|(K_{AVE高}^- - K_{AVE低}^-) \times 10^6|}{(110 \times K_{AVE}^-)} \quad (3)$$

式中:

$K_{AVE低}^+$ 、 $K_{AVE低}^-$  为低温 ( $-40 \pm 2^\circ\text{C}$ ) 的标度因数平均值,  $K_{AVE高}^+$ 、 $K_{AVE高}^-$  为高温 ( $70 \pm 2^\circ\text{C}$ ) 的标度因数平均值,  $K_{AVE}^+$ 、 $K_{AVE}^-$  为常温 ( $25 \pm 5^\circ\text{C}$ ) 的标度因数平均值。110 为  $70^\circ\text{C}$  与  $-40^\circ\text{C}$  的温度差值, 温度系数的单位为  $1 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。

经过计算, 各路标度因数的温度漂移值在  $1.6 \times 10^{-5}/^\circ\text{C} \sim 2.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$  之间, 不满足指标要求, 因此需要进行温度补偿。

#### 4.2 温度补偿值的参数设计

以  $30^\circ\text{C}$  时的标度因数平均值作为基准点, 计算出其他温度点的标度因数平均值与基准点的偏差, 以此作为补偿依据, 得到每个温度点的补偿值。

由表 3 数据获得 AX+、AX- 通道的温度曲线如图 3、图 4 所示, 其中横坐标代表温度, 纵坐标代表标度因数补偿值。Y、Z 路正向的温度曲线与 X 类似。补偿曲线应当使所有温度的数据都向常温的数据靠拢, 理想结果是一条水平直线。

表 3 在不同温度点的 3 路输入共 6 通道的标度因数补偿表

Tab. 3 The scale factor compensation for 3 inputs & 6 outputs at different temperatures

通道 温度/ $^\circ\text{C}$	AX+	AX-	AY+	AY-	AZ+	AZ-
-40	50	-68	56	-60	66	-66
-20	39	-54	43	-48	49	-52
-10	32	-45	35	-39	40	-44
10	17	-24	18	-21	21	-32
30	0	0	0	0	0	0
50	-15	27	-17	23	-21	27
70	-40	56	-43	48	-50	58

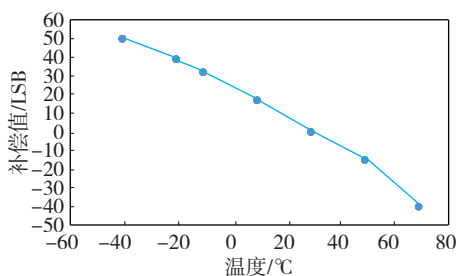


图 3 AX+通道的补偿曲线与公式

Fig. 3 Compensation curve and formula for AX+ channel

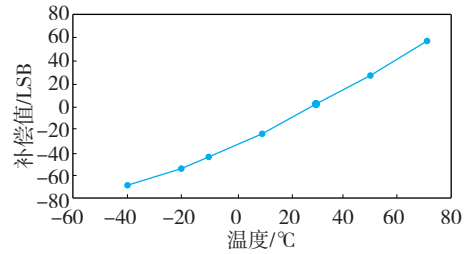


图 4 AX-通道的补偿曲线与公式

Fig. 4 Compensation curve and formula for AX- channel

然后, 对图 3、图 4 中的数据分别进行二次曲线拟合, 获得二次曲线公式分别为:

$$y = -0.0026x^2 - 0.7316x + 5.235 \quad (4)$$

$$y = 0.004x^2 + 1.0176x - 34.36 \quad (5)$$

式中,  $x$  表示温度 ( $^\circ\text{C}$ ),  $y$  表示补偿值 (范围在  $-128 \sim +127$ )。

最后, 根据拟合公式, 以每  $2^\circ\text{C}$  为一个温度点, 进行插值运算。由于电路在温度标定前已经预先给定补偿电路单元的基础电压值, 由于 D/A 器件在未补偿时输出固定的基础电压值为一个中间值 ( $2.5\text{V}$  为  $0\text{V} \sim 5\text{V}$  的中间值), 对应的数字量为 128 (范围在  $0 \sim 255$ ), 所以计算的温度补偿值应当叠加一个数字基础值 128, 使得补偿值的范围在  $0 \sim 255$ 。

#### 4.3 测温电路的设计

测温电路采用单线数据传输式器件 DS1820 作为温度传感器, 它可以通过 1 根连线与 FPGA 连接, 只占用 1 个 I/O 口资源, 测温范围为  $-55^\circ\text{C} \sim +125^\circ\text{C}$ , 可编程的分辨率为  $9 \sim 12$  位, 对应的可分辨温度分别为  $0.5^\circ\text{C}$ 、 $0.25^\circ\text{C}$ 、 $0.125^\circ\text{C}$  和  $0.0625^\circ\text{C}$ , 实现高精度测温。该传感器的温度数据由低 8 位和高 8 位共 2 个字节 (第  $0 \sim 15$  位) 构成。以 12 位转换精度为例, 前面 5 位是符号位, 考虑到 FPGA 逻辑中进行数学浮点运算较为复杂, 所有温度值的精度设定为  $1^\circ\text{C}$ , 将上述数据右移 4 位后即可得到分辨率为  $1^\circ\text{C}$  的温度数据。

#### 4.4 中央处理电路的设计

中央处理电路设计的硬件采用 Actel 公司的 SmartFusion 系列 FPGA 作为核心控制芯片, 融合了 ARM 处理器的内核 (硬核)、FPGA 内核以及模拟的部件, 具有低成本、低功耗、高安全性和可靠性的特点<sup>[8]</sup>。其中, ARM 处理器的内核提供给系统总体使用, 而 FPGA 逻辑资源用于实现温度补偿方案, 不依赖 ARM 处理器工作<sup>[9-10]</sup>。

温度传感器实时测量环境温度并传给中央处理电路, 中央处理电路根据温度值进行查表或插值



计算,确定在此环境温度下所需的补偿值,最后通过 D/A 转换器对反馈基准电压进行补偿,如图 5 所示。

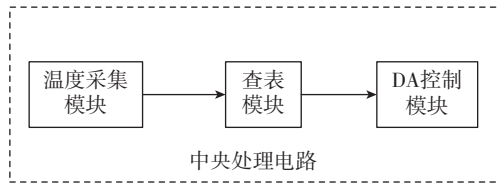


图 5 中央处理电路组成框图

Fig. 5 The functional block diagram of central processing circuit

温度采集模块工作过程中的协议如下:1)初始化;2)ROM 操作命令;3)存储器操作命令;4)处理数据。在单总线上的所有处理都是从初始化开始,初始化过程是主机总线发送一复位脉冲(最短为  $480\mu\text{s}$  的低电平信号),DS1820 在检测到总线的上升沿之后,等待  $15\sim 60\mu\text{s}$ ,接着发出存在脉冲( $60\sim 240\mu\text{s}$ );主机检测到 DS1820 的存在,便可发出 ROM 操作命令之一,这里跳过 ROM 操作命令(发送  $0x\text{CCH}$ );主机只有在发出 ROM 操作命令之后,才可以对存储器进行操作,相应命令如下: $0x44\text{H}$  启动温度转换, $0x\text{BEH}$  读寄存器中的温度数据。温度采集模块的测温程序流程图如图 6 所示。

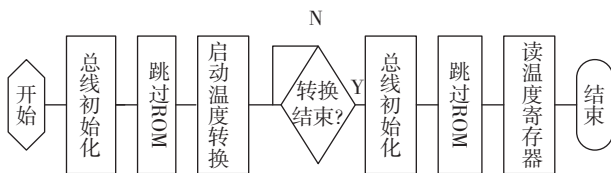


图 6 DS1820 测温程序流程图

Fig. 6 Program flow chart of temperature measurement for DS1820

温度补偿数据的获取方法通常有查表法和插值法,出于对 FPGA 逻辑资源消耗的考虑,对标度因数的温度补偿数据采用了查表法。查表法一般适用于参数计算复杂、采用算法编程较繁琐等情况。查表法根据温度标定的试验数据求得二次校正曲线,然后把曲线上各个校正点的数据以表格形式存入存储单元中。在实时测量中,通过查表来补偿测量结果。查表法的速度快,但为了进一步提高补偿精度,需要增加表中的校正数据,这样会占用内存空间和查表时间,因此需要综合考虑资源与精

度之间的平衡。这里以每  $2^\circ\text{C}$  为一个温度点进行查表运算。

D/A 控制模块实现 6 通道 8 位数模转换功能,采用三线 SPI 方式进行温度补偿数据的控制与传输<sup>[11-12]</sup>。

#### 4.5 补偿电路的设计

D/A 转换电路采用单片封装 12 通道 8 位 DAC 芯片 AD8802。它具有独立的可编程输出端口,具备三线 SPI 串口输入端,可预设半量程。AD8802 串行加载时序图如图 7 所示。

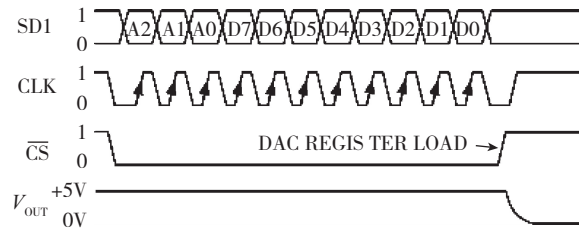


图 7 AD8802 串行加载时序图

Fig. 7 Sequence chart of serial loading for AD8802

输出模拟电压的公式可以简化为

$$V_{\text{out}} = D \cdot 5\text{V}/256 \quad (6)$$

其中,  $D$  表示温度补偿的数字量(范围在  $0\sim 255$ ),  $V_{\text{out}}$  表示输出模拟电压量(范围在  $0\text{V}\sim 5\text{V}$ )。

D/A 输出电压通过  $100\text{k}\Omega$  电阻连接到桥式电流反馈开关电路单元中,与通过  $1\text{k}\Omega$  电阻连接到反馈基准电压产生电路共同作用,进而对反馈基准电流产生影响。由此参数设置可知,当 D/A 输出电压由  $0\text{V}$  变为  $+5\text{V}$  时,反馈基准电流变化量为  $50\mu\text{A}$ ,反馈基准电流相对变化量  $I_{\Delta} = 50\mu\text{A}/10\text{mA} = 5\%$ 。因此,在  $-40^\circ\text{C}\sim 70^\circ\text{C}$  的全温范围内,数字式温度补偿对转换电路输出频率的补偿能力为  $4.5 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ <sup>[13-15]</sup>。

在常温下测量数模转换器件 AD8802 的输出电压值,从而判断温补电路是否正常工作,然后在全温范围内验证温补的测试数据。

#### 4.6 温度补偿结果

采用数字式温度补偿方案,对 V/F 转换电路进行了温度补偿,取得了良好的效果。测试数据如表 4 所示,采用数字式温度补偿的 V/F 转换电路温度特性得到了明显改善,至少提高了 1 个数量级,其标度因数温度漂移最大值小于  $2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ,满足技术指标要求。

表4 V/F转换电路温度补偿前后对比

Tab.4 Comparison before and after the temperature compensation of V/F conversion circuit

标度因数温度系数	AX+	AX-	AY+	AY-	AZ+	AZ-
温度补偿之前	16.05	22.09	17.63	19.34	20.76	22.02
温度补偿之后	0.59	0.32	0.27	1.23	1.34	1.61

 $(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$ 

## 5 结论

温度是影响V/F转换电路工作性能的重要因素,通过改变反馈基准电流值,进而改变转换电路输出频率,能够达到对输出频率进行补偿的目的。数字式温度补偿的原理是根据温度传感器测试得到的环境温度值,输出相应的数字信号,经过D/A转换后调整反馈基准电流,实时改变转换电路输出频率,减小温度变化对输出频率产生的影响。采用基于FPGA的数字式温度补偿方案,经过温度标定、电路参数设计等步骤进行实际验证。试验结果表明,基于FPGA的数字式温度补偿方式改善了转换电路的温度特性,标度因数温度漂移提高了1个数量级,使得V/F转换电路具有良好的温度稳定性。该方案节省人力成本,对惯性导航系统分部件的温度补偿具有重要的工程应用价值。

### 参考文献

- [1] Analog Devices, Inc. Monolithic Synchronous Voltage-to-Frequency Converter [EB/OL]. <http://www.analog.com>, 2000.
- [2] Bao J Y, Qin K Y, Tang B, et al. Digital implementation method of base-band signal of FSK quadrature modulation [C]// Information Technology and Computer Science — National Conference on Information Technology and Computer Science, 2012.
- [3] 董明杰,汪渤,石永生,等. 高精度V/F转换电路的温度补偿方法[J]. 兵工学报, 2011, 32(6):758-763.
- [4] 夏本源,孙立宁,夏瑜. 基于恒流源和V/F转换的多路测温系统的设计[J]. 自动化技术与应用, 2012, 31(11):84-87.
- [5] Pease R A. 模拟电路故障诊断[M]. 北京:人民邮电出版社, 2007:28-31.
- [6] Grace C R, Hurst P J, Lewis S H. A 12-b 80-MS/s pipelined ADC with bootstrapped digital calibration [J]. IEEE Journal of Solid State Circuits, 2005, 40(5):1038-1046.
- [7] Reddy M S, Rahaman S T. An effective 6-bit flash ADC using low power CMOS technology [C]// International Conference on Advanced Computing Technologies (ICACT), 2013:1-4.
- [8] 周立功. Smart Fusion—内嵌FPGA的CortexM3[J]. 电子产品世界, 2010, 17(4):82-83.
- [9] 黄智伟,王彦,陈琼. FPGA系统设计与实践[M]. 北京:电子工业出版社, 2005:15-19.
- [10] 罗苑棠. CPLD/FPGA常用模块与综合系统设计实例精讲[M]. 北京:电子工业出版社, 2007:37-42.
- [11] 李长安,李琦,曾锐利,等. 基于V/F变换器实现快速A/D转换的探讨[J]. 电子科技, 2008, 21(6):30-33.
- [12] Chen X P. Design of control module for ADC based on FPGA [C]// IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering, 2011:571-572.
- [13] 谢运涛,程玉宝,张恺,等. 一种基于V/F转换的大动态范围测温电路设计[J]. 中国电子科学研究院学报, 2013, 8(4):437-440.
- [14] 袁建挺,姜周曙,黄国辉. 多路高精度热电偶采集板研制[J]. 机电工程, 2011, 28(1):87-89.
- [15] Mindykowski J, Hallmann D, Masnicki R. Acquisition of data from ADC using FPGA [C]//XX IMEKO World Congress Metrology for Green Growth, 2012.