

## 补偿ADE71xx/ADE75xx系列RTC以实现精确计时

作者: Meghan Baker和Aileen Ritchie

### 简介

本应用笔记描述如何校准ADE71xx/ADE75xx RTC并使其在25°C及以上温度条件下精确计时。本文将详细说明实时时钟(RTC)外设中提供的硬件补偿功能, 并就随温度调节补偿提出了一种算法。

ADE75xx/ADE71xx集成了ADI公司电能(ADE)计量IC的模拟前端和固定功能DSP以及一个增强型8052 MCU内核。集成的RTC、LCD驱动器和外设构成一种全面集成的计量解决方案。

### 设计目标

许多电表都采用使用分时计费模式, 分高峰时段和非高峰时段以不同费率对客户收费。由于这些电表安装后需要持续10至20年时间, 因此, 必须有一个精确的时钟来确定使用时间范围。

校准后, RTC在恒定温度下的精度处于0.5秒/天之内, 温度变化时, 精度则在0.15秒/天°C以内。结果, 在-40°C至+85°C的温度范围内, RTC每个月的增减时间不得超过30秒。

### 原理

与如电阻和电容等其他常见的电气元件一样, 晶体本身存在某些容差。25°C下额定频率为32.768kHz的晶体的实际频率可能与额定值相差±20 ppm。晶体频率还会随温度而变化。由于这些原因, 必须对晶体频率变化进行补偿, 以保证时间的精确性。ADE71xx/ADE75xx集成RTC自动周期性硬件补偿功能和一个片上温度ADC, 可以轻松实现这一目标。

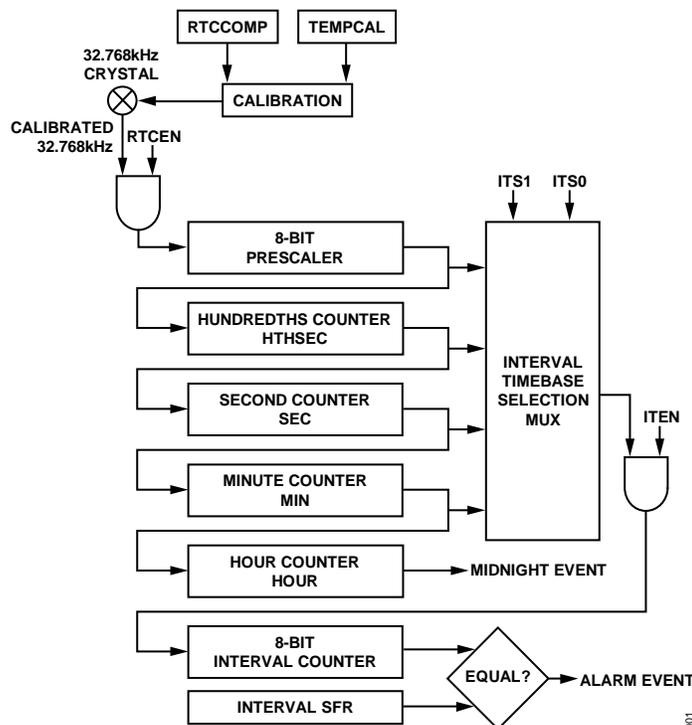


图1. RTC的实现

## 目录

简介.....	1	实现.....	3
设计目标.....	1	结果.....	6
原理.....	1		

## 实现

ADE71xx/ADE75xx RTC含有计时寄存器，计时范围从百分之一秒到几小时(见图1)。每天产生一次中断，供用户更新软件日历。

ADE71xx/ADE75xx基于自动周期性硬件补偿方案对32.768 kHz输入信号进行校准。校准通过从100万个时钟脉冲流中添加或移除脉冲来实现。在正常模式下，结果会实现30.5秒的窗口。同时提供一种校准模式，其校准窗口较短，为0.244秒。在正常模式和校准模式下，与补偿过的RTC成比例的脉冲输出在P0.2上提供，频率选项见表1。

INTPR寄存器用于选择校准输出频率(见表1)。RTCCAL位(同样位于INTPR寄存器中)用于实现校准输出。请注意，不建议在一般用途下使用RTC校准输出模式。更多信息请参阅ADE71xx/ADE75xx数据手册。

表1. RTC频率选项

INTPR寄存器FSEL [1:0]	校准窗口(秒)	f <sub>CAL</sub> (Hz)
正常模式0	30.5	1
正常模式1	30.5	512
校准模式0	0.244	500
校准模式1	0.244	16,384

额定频率校准通过RTCCOMP特殊功能寄存器(SFR)执行，TEMPCAL SFR则用于随温度的变化调整补偿。补偿的分辨率为2ppm/LSB，或0.17秒/天。通过写入RTCCOMP和TEMPCAL SFR，最多可以调节248 ppm的补偿。

### 校准额定32 kHz频率

用一个RTC基准电表或频率计数器来确定频率输出中的误差。图2所示为一RTC基准电表的示例，即Infotec Electronics Co., Ltd.生产的ITP02。该基准电表可以确定f<sub>CAL</sub>与预期频率之间的秒/天误差，选通时间可配置为1秒、5秒或10秒。



图2. 来自Infotec的ITP02 RTC基准电表

所需补偿可以通过计算单脉冲频率输出中的百分比误差来计算。一旦得知来自晶体的误差，即将一个校准值载入内部RTCCOMP寄存器之中。ADE71xx/ADE75xx自动用载入RTCCOMP寄存器的值补偿RTC频率。该补偿发生的时间窗口由RTC模式定义(见表1)。正常模式下，该窗口为30.5秒。

所需RTC调整则由固件中产生的输出脉冲确定。RTC校准脉冲在P0.2上输出。根据输出脉冲，可以确定频率中的百分比误差并算出补偿系数。RTCCOMP寄存器代表2 ppm的校正值，其中，1秒/天等于11.57 ppm。

$$RTCCOMP = \frac{1}{2 \times 11.57} \times (\text{sec/day error})$$

$$RTCCOMP = 5000 \times (\% \text{ error})$$

假设校准在正常模式下执行，同时，实际RTC校准脉冲为1.000063 Hz，RTCCOMP值则可按以下方式计算：

$$RTCCOMP = \frac{1 \text{ Hz}_{\text{actual}} - 1 \text{ Hz}}{1 \text{ Hz}} \times 5000$$

$$RTCCOMP = \frac{1.000063 \text{ Hz} - 1 \text{ Hz}}{1 \text{ Hz}} \times 5000 = -31$$

为了在RTCCOMP或TEMPCAL寄存器被调整为非零值之后检验校准情况，必须依据校准窗口来检查校准。就是说，在RTC基准电表或频率计数器下，选通时间应设为30秒或者0.244秒的倍数，具体取决于频率输出模式。或者，如果无法使用30秒的选通时间，则可求出三次10秒选通测量误差的平均值，从而得到最终误差。

### 确定晶体随温度的变化

晶体随温度的变化取决于机械晶体的物理特性，结果产生如图3所示的抛物线。如果未应用温度补偿来补偿这种行为，则在室外环境下，RTC的精度可能快速下降。

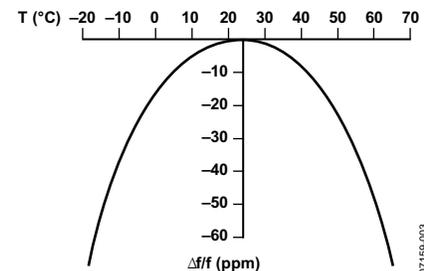


图3. 晶体的抛物线温度曲线

该曲线一般由晶体制造商用拐点( $T_0$ )和曲率(k)表示。在此基础上,可将频率变化描述为数学公式,即作为这些参数的一个函数,如等式1所示。

$$f - f_0 = -k \times (T - T_0)^2$$

曲率k是晶体机械属性的一部分,可能因制造商而异。由于在生产过程中执行温度校准是不现实的,所以,曲率应在设计中固定下来。晶体数据手册给出了曲率的典型额定值。如果误差处于可接受的范围,则可使用该值。或者,可以测试频率输出在多个电表中的变化,根据经验确定该参数。

一旦确定晶体系数,则开发出一种算法,以基于电表的温度增加适当的校正。在ADE71xx/ADE75xx中,用片上温度ADC即可轻松获得温度读数。

#### ADE71xx/ADE75xx温度ADC

ADE71xx/ADE75xx温度ADC的精度为0.78°C/LSB。ADE71xx/ADE75xx提供了获得温度测量值的两种方式。其中之一,先提出温度测量请求,然后从寄存器读取。在第二种方法中,温度测量在后台进行,温度一旦超过用户定义的阈值,则产生一个中断。例如,当温度ADC以0.78°C为增量单位改变一个或多个LSB时则可能产生一个中断。这为通过用户代码跟踪温度提供了一种非介入式方法。有关温度ADC测量的更多信息,请参阅ADE71xx/ADE75xx数据手册。

#### 温度补偿算法

执行温度补偿最简单的方式是在温度ADC的结果发生改变时,更新TEMPCOMP SFR。ADE71xx/ADE75xx参考设计中使用的晶体的曲率为-0.0306 ppm/°C<sup>2</sup>,拐点为25°C。在此基础上,可以推出TEMPADC代码与相应TEMPCOMP的关系,最终表示为等式2。

等式1和该晶体的内在属性使晶体频率变化成为温度的函数。

$$\Delta f = -0.0306 \text{ ppm} \times (\Delta T)^2$$

ADE71xx/ADE75xx中的TEMPADC的分辨率为0.78°C/LSB,因而有

$$\Delta T = 0.78^\circ\text{C}/\text{LSB} \times \text{TEMPADC}$$

代入上式,即可确定作为TEMPADC寄存器函数的晶体频率的变化。

$$\Delta f = -0.0306 \text{ ppm} \times (0.78)^2 (\Delta \text{TEMPADC})^2$$

由于基于TEMPCOMP寄存器的RTC补偿的权重为2 ppm/LSB

$$\Delta \text{TEMPCOMP} = \frac{-0.0306 \text{ ppm}}{-2} \times (0.78)^2 (\Delta \text{TEMPADC})^2$$

$$\Delta \text{TEMPCOMP} = 0.0093 \times (\Delta \text{TEMPADC})^2$$

等式2可以重新排列(如等式3所示),以简化8052内核处理器需要的数学知识。

$$\Delta \text{TEMPCOMP} = 38 \times 2^{-12} \times (\Delta \text{TEMPADC})^2$$

这要求两次8 × 8乘法和一些移位。但这不需要很多代码或时间,因为8052内核包括一条乘法指令。

或者,补偿可以用一个简单的查找表来实现。由于晶体频率的变化呈抛物线形态,在y轴两侧呈对称性,因此只需要存储一半的补偿。

结果形成的查找表如表2所示。指数和补偿值可以通过读取温度ADC并减去在25°C下的值139来确定。例如,在70°C时,TEMPADC值为207,结果得到指数207 - 139 = 68。因此,所需的TEMPCOMP在70°C时的值为37。由于晶体温度响应具有对称性,因此,指数可以定义为ADC在温度和25°C下的读数之差的绝对值。

$$\text{Table Index} = \left| \text{TEMPADC} - \text{TEMPADC}_{25^\circ\text{C}} \right|$$

表2. RTC温度补偿查找表

指数	温度(°C)	TEMPADC代码	TEMPCOMP值
0	25.12863	139	0
1	25.79268	140	0
2	26.45674	141	0
3	27.12079	142	0
4	27.78485	143	0
5	28.4489	144	0
6	29.11296	145	0
7	29.77701	146	0
8	30.44107	147	0
9	31.10512	148	1
10	31.76917	149	1
11	32.43323	150	1
12	33.09728	151	1
13	33.76134	152	1
14	34.42539	153	1
15	35.08945	154	2
16	35.7535	155	2
17	36.41756	156	2
18	37.08161	157	2
19	37.74567	158	3
20	38.40972	159	3
21	39.07378	160	3
22	39.73783	161	4
23	40.40189	162	4
24	41.06594	163	4
25	41.73	164	5
26	42.39405	165	5
27	43.0581	166	5
28	43.72216	167	6
29	44.38621	168	6
30	45.05027	169	7
31	45.71432	170	7
32	46.37838	171	8
33	47.04243	172	8
34	47.70649	173	9
35	48.37054	174	9
36	49.0346	175	10
37	49.69865	176	10
38	50.36271	177	11
39	51.02676	178	11
40	51.69082	179	12
41	52.35487	180	13
42	53.01893	181	13
43	53.68298	182	14
44	54.34703	183	15
45	55.01109	184	15

指数	温度(°C)	TEMPADC代码	TEMPCOMP值
46	55.67514	185	16
47	56.3392	186	17
48	57.00325	187	17
49	57.66731	188	18
50	58.33136	189	19
51	58.99542	190	20
52	59.65947	191	20
53	60.32353	192	21
54	60.98758	193	22
55	61.65164	194	23
56	62.31569	195	24
57	62.97975	196	24
58	63.6438	197	25
59	64.30786	198	26
60	64.97191	199	27
61	65.63597	200	28
62	66.30002	201	29
63	66.96407	202	30
64	67.62813	203	31
65	68.29218	204	32
66	68.95624	205	33
67	69.62029	206	34
68	70.28435	207	35
69	70.9484	208	36
70	71.61246	209	37
71	72.27651	210	38
72	72.94057	211	39
73	73.60462	212	40
74	74.26868	213	41
75	74.93273	214	42
76	75.59679	215	44
77	76.26084	216	45
78	76.9249	217	46
79	77.58895	218	47
80	78.253	219	48
81	78.91706	220	49
82	79.58111	221	51
83	80.24517	222	52
84	80.90922	223	53
85	81.57328	224	54
86	82.23733	225	56
87	82.90139	226	57
88	83.56544	227	58
89	84.2295	228	60
90	84.89355	229	61
91	85.55761	230	62

## 结果

校准后的额定晶体频率在2 ppm之内，或者0.17秒/天，而设计目标为0.5秒/天。利用表2，可以获得0.085秒/天°C的最差温度误差。经校准的温度误差如图5所示。表2和直接计算法产生了相同的误差，都处于0.15秒/天的目标范围之内。请注意，在晶体温度变化中，有些器件-器件变化将导致图5所示补偿坐标图中误差略有增加。

在没有温度补偿的情况下，在85°C下的误差为10秒/天(见图4)。该值接近0.15秒/天°C的设计目标，因为， $10 \text{秒/天} / (85^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}) = 0.167 \text{秒/天}^\circ\text{C}$ 。然而，在室外环境下，如果不执行温度补偿，则电表很可能达不到30秒/月的额外整体规格要求。

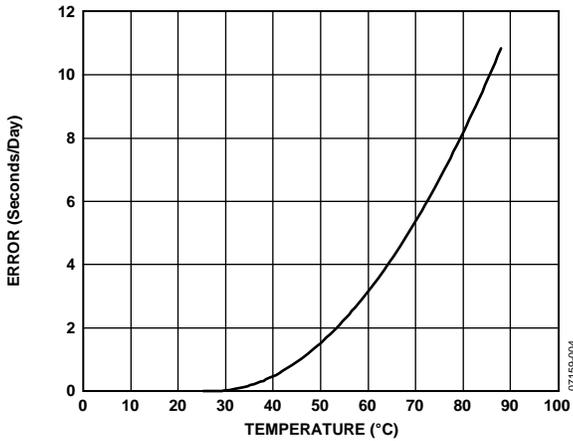


图4. 秒/天误差(无温度补偿)

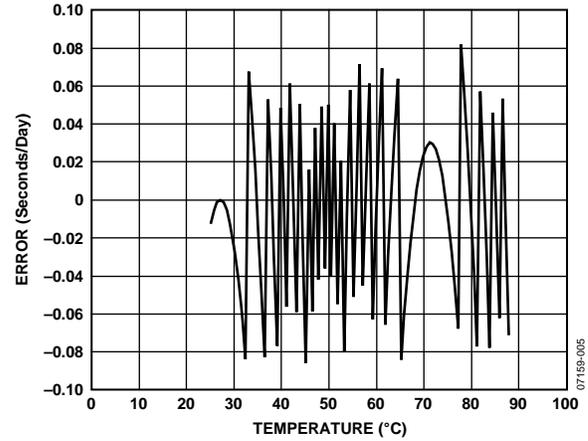


图5. 秒/天误差(有温度补偿)

注释

**注释**