

DOI:10.12374/j.issn.1001-4357.2023.02.005

高精度多通道K型热电偶温度测量

曹毅¹, 宗情², 付继峰¹, 万盛¹, 施健¹(1. 上海齐耀动力技术有限公司, 上海 201203;
2. 上海船用柴油机研究所, 上海 201203)

摘要: 根据热气机运行特点、控制参数要求和成本控制要求, 设计一种基于PIC18F6722单片机的K型热电偶温度测量方法。单片机在0~600℃时采用查表法计算热电偶温度, 在600~750℃时采用拟合线性化方法计算热电偶信号温度。在3 000 h的热气机可靠性试验中, 在630℃、670℃和700℃等3个热气机额定工况运行点上, 该方法能将热气机管壁温度控制在±2℃内, 且成本较低, 满足设计要求。

关键词: K型热电偶; 温度; 测量; 高精度

中图分类号: U664.124; TP212.1+1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-4357(2023)02-0022-04

Temperature Measurement of the High Precision Multi-Channel K-Type Thermocouple

CAO Yi¹, ZONG Qing², FU Jifeng¹, WAN Sheng¹, SHI Jian¹(1. Shanghai MicroPowers Co., Ltd., Shanghai 201203, China;
2. Shanghai Marine Diesel Research Institute, Shanghai 201203, China)

Abstract: Based on the operating characteristics, control parameter requirements, and cost control requirements of Stirling engines, a K-type thermocouple temperature measurement method based on PIC18F6722 single-chip microcomputer was designed. The single-chip microcomputer used a table lookup method to calculate the thermocouple temperature at 0–600 °C, and a fitting linearization method to calculate the thermocouple signal temperature at 600–750 °C. In the 3 000 h reliability test of the Stirling engine, this method could control the wall temperature of the Stirling engine within ±2 °C at three rated operating points of 630 °C, 670 °C, and 700 °C, the cost was low, and could meet the design requirements.

Key words: K-type thermocouple; temperature; measurement; high-precision

0 引言

热气机^[1]是一种外燃机, 性能优越, 在运行时要求温度控制在±2℃范围内, 因此在实时性、精度等方面对其加热器的测温要求较高。K型热电偶输出信号具有不受其管径、补偿导线长度和形

状影响的优点, 因此在热气机管壁温度测量方面获得应用。K型热电偶在实际应用中须采取相应措施才能获得较高的测量精度。徐朝胜等^[2]对K型热电偶信号进行毫伏冷端补偿, 通过查表计算热电偶测量温度, 辅以折线修正以达到较高测量结果。查表计算和折线修正需要一定时间, 再叠加

热气机燃烧产生的温度具有一定的时滞性，因此采用该方法不能满足热气机管壁温度测量实时性高的要求。王晓丹等^[3]基于分段拟合线性化处理法开发一种热电偶高精度测量方法，该方法计算速度快、实时性好，在0~500℃区间内测量精度优于1℃；然而，分段多造成计算量大，需要较高的硬件成本支撑。

如果采用文献[3]的方法计算热气机管壁额定温度就会存在两个问题：一是硬件成本高；二是热气机管壁额定温度正常运行在630~700℃，热气机运行环境温度高（超出文献[3]要求的-50℃的标定温度），在计算时测量误差较大，不能满足本文项目中热气机管壁温度控制精度为±2℃的要求。因此，有必要设计一种满足热气机管壁温度测量需要的K型热电偶信号测量电路，其测量精度、实时性、成本等均应满足热气机工程实际需求。

1 测量工作原理

热气机共有4个工作缸，须设置8根K型热电偶进行温度监测，点火成功并达到设定拖动温度后开始拖动热气机启动，然后逐步调整至热气机管壁额定温度700℃，最终以此温度在控制精度误差范围内稳定运行。热气机拖动温度允许在560~600℃的宽广范围内，即无须精确、实时地控制温度，符合这个温度范围即可。在稳定运行的温度上则要求比较高的实时性和精度控制，否则对热气机的对振动和效率指标影响较大。据此分析，提出一种适合热气机工作特点的管壁温度测量设计：使用K型热电偶测量热气机管壁温度，点火成功后，使用查表方法计算当前热气机管壁温度，当热气机管壁温度达到580℃时拖动热气机开始运行，运行到600℃时采用拟合线性化方法。该设计可保证热电偶高精度的信号测量及较高的测量实时性，以满足在热气机运行时管壁温度测量的需要且能保证控制成本。

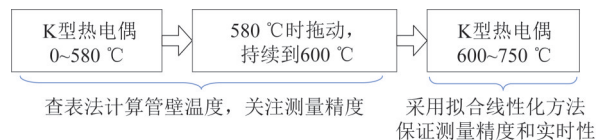


图1 热气机管壁温度测量方法示意图

采用查表法按照下面的公式^[4]计算K型热电偶热电动势对应的温度：

$$E = E_i + E_0 \quad (1)$$

式中： E 为被测物体在参考温度时的毫伏热电动势； E_i 为当前采集获得的毫伏热电动势， E_0 为0℃时热电偶毫伏热电动势。根据获得的毫伏热电动势 E ，在国际K型热电偶分度表（ITS-90）中查找当前毫伏信号所对应的温度。

在600~750℃区间采用拟合线性化方法^[5]计算K型热电偶热电动势对应的温度：

$$T = \frac{E_0 - E_i}{K_i} + T_i \quad (2)$$

式中： T 为采用拟合线性化方法处理后的温度； E_0 为当前温度对应的热电动势； E_i 为拟合线性化温度区间的开始热电动势； K_i 为拟合线性化温度区间的斜率； T_i 为拟合线性化温度区间的开始温度。

在600~750℃区间内，拟合线性化温度区间的斜率 $K_i = 42$ ，拟合线性化温度区间的开始温度 $T_i = 602$ ，拟合线性化温度区间的开始热电动势 $E_i = 24\,990$ ，将参数代入公式（2）得：

$$T = \frac{E_0 - 24\,990}{42} + 602 \quad (3)$$

根据公式（3）可以计算600~750℃区间内的当前温度，根据ITS-90表，当K型热电偶在700℃时（在0℃参考温度条件下），其热电动势为29 129 μV，代入公式（3）得 $T = 700.55$ ℃，可见误差在1℃以内，满足热气机管壁温度控制精度为±2℃的要求，若温度超过750℃则报警。

2 测量电路硬件设计

2.1 硬件架构

依据上述测量方法，根据热气机实际需要，提出如图2所示的多通道K型热电偶测量电路架构。

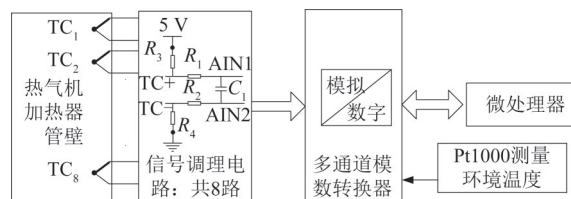


图2 热气机管壁温度测量电路架构图

K型热电偶信号为毫伏电压信号，极易受到外界干扰而产生测量结果波动，测量电路的精度和稳定性差。因此，采用图2中的信号调理电路去除干扰毛刺，其中，电阻为金属精密1/8 W电阻， R_1 、 R_2 均为1 000 Ω电阻， R_3 、 R_4 均为2 MΩ电阻，电容 C_1 为多层陶瓷电容，电容量为0.1 μF。该调理电路共有8路，与热气机管壁热电偶一一对应。

对于多通道热电偶测量，一般采用模拟开关器件如 CD4052 等进行片选后进入模拟/数字 (analog/digital, A/D) 处理，在模拟开关进行开关通道选择时存在一定的开关延时，对热气管壁温度的实时性造成一定的不利影响。另外，模拟开关具有一定的内部阻抗，当热电偶信号经过时具有信号分压效应，必将影响热气管壁温度的测量精度。因此，直接选用 8 通道 AD 转换器，防止电路信号在采样时出现信号延时、分压等不利现象，有利于提高采样精度和实时性。

2.2 关键硬件器件选型

单片机选用通过半导体工艺制造的PIC18F6722^[6]，该单片机自带闪存、带电可擦可编程存储器，具有闪存编程和写入控制参数信息功能。在实际应用中，可将不同的热电偶相关参数写入单片机的闪存中以便测试不同的拟合参数对热电偶信号测量结果的影响程度，以满足热气管壁温度实际测量需要。

AD转换器选用ADS1263^[7],其内部自带可编程增益放大器(programmable gain amplifier, PGA)、2.5 V电压基准和内部故障监视器的32位AD转换器,线性度优于 3×10^{-6} ,温漂小于 $1 \text{ nV}/^\circ\text{C}$,处理速

度最大达 38.4 kHz, 同时还辅助一个 24 位 AD 转换器, 可以在后台用于软件补偿算法, 所以非常适合用于热电偶信号采集。ADS1263 共有 10 个输入通道, 每根 K 型热电偶有 2 极信号, 须要同时输入。因此, 需要 2 片 ADS1263 协同工作, 完成 8 根热电偶的信号采集工作。

3 软件设计

软件设计基于 PIC18F6722 单片机和 ADS1263 转换器硬件资源,使用 Keil uVision5^[8] 编译工具进行代码设计。上电后,单片机 PIC18F6722 首先完成端口、工作模式、AD 设置、定时器、滤波参数、通信接口配置等的初始化^[9];随后,单片机启动 ADS1263,开始使用查表法按公式(1)计算当前热气机管壁温度,点火后继续使用查表法测量,当热气机管壁温度达到拖动温度时单片机控制拖动热气机,当温度达到 600℃时采用拟合线性化方法按公式(3)计算热气机管壁温度,使用热气机温度算法将温度维持在 700℃左右,若超出 750℃则报警。ADS1263 多通道热电偶信号采集硬件图如图 3 所示。

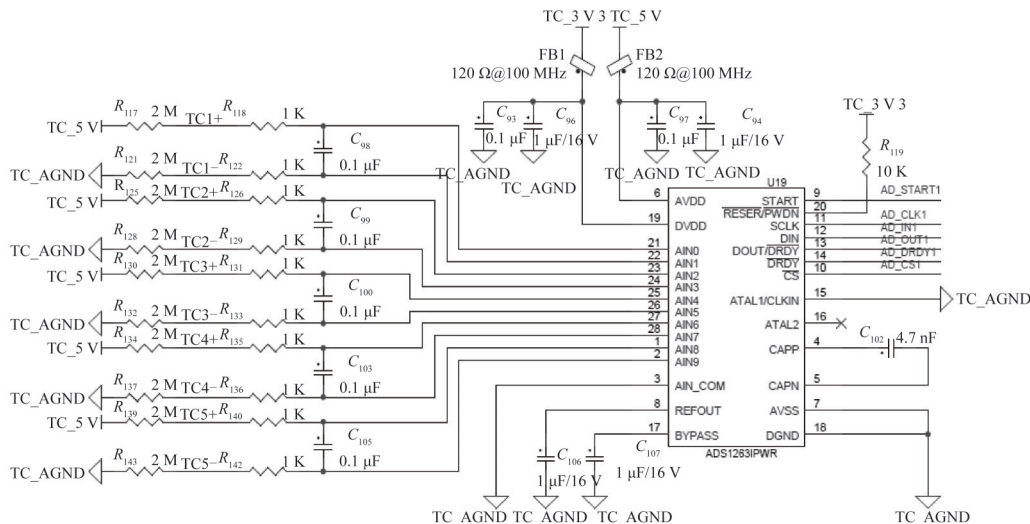


图3 ADS1263多通道热电偶信号采集硬件图

查表法测温范围为 $-270\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，对应在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 参考条件下，其热电动势范围为 $-6\ 458\sim 24\ 905\ \mu\text{V}$ 。首先要获得热电偶环境补偿温度，将该温度转换为环境热电动势，再获得热电偶当前的热电动势，环境热电动势与热电偶当前热电势之和记为热电偶实际热电动势，根据该值查表，获得热气机管壁当前实际温度。具体过程代码如下：

```
if (hotNum >= 8)
{
```

```

}

hotNum = 0;

codeValue = getCJC_Value_1 ();
/*将环境温度转换为热电动势 */
codeVolatge = (CHOOSE_T > 0);
/*设置 ADS1263 采样通道 */
ADS1263_SetChannel    (ADS1263_CH_AIN1
IN1M);

ADS1263_SetGain    (ADS1263_GAIN_32,

```



```

ADS1263_CH_AIN1P_AIN1M);
}
hotNum++;
/* 获取热电偶热电势*/
hotVolatge = getHotVolatge_1 (channel);
/* 求取热电偶实际热电动势*/
actVolatge = codeVolatge + hotVolatge;
/* 根据热电电势表格获取温度，首先要判断
数据是否在表格范围内*/
if (actVolatge < ( (CHOOSE_T >= 0)?
(-6 458): (-6 458) ) )
{
    temperature = -270.0;
}
else if (actVolatge > (24 905) )
{
    temperature = 600;
}
else
{
    temperature = getTCValueFromTab (actVol-
atge);
}
}
}

```

当热气机管壁温度大于 600 °C 时，无须使用环境温度计算需要补偿的环境热电动势，这部分数据由拟合线性化温度区间的斜率 $K_i = 42$ 来替代，只须将当前获得的热电偶热电动势代入公式 (3) 即可计算热气机管壁当前温度。该方法相对于查表计算，执行代码少，因此运行速度快，具有较高的实时性，运行中若温度超过 750 °C 则报警。拟合线性化测温流程图如图 4 所示。

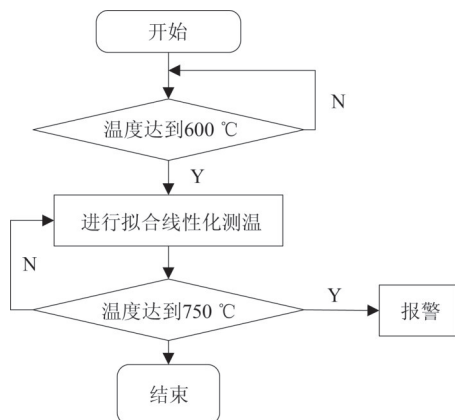


图4 拟合线性化测温流程图

4 应用结果与分析

热气机在额定工况运行时，要求管理温度精度控制在 ± 2 °C 内，这样才能获得较好的性能。相对于此时的管壁温度 700 °C，控制要求较高。为了满足该要求，使用查表法进行 K 型热电偶信号监测。在实际使用中发现，该方法能够满足热气机控制精度要求，但由于查表法软件处理步骤较多，再叠加热气机自身燃烧滞后因素，在热气机额定运行工况下很难将温度控制在 ± 2 °C 内，一般在 ± 5 °C 内，不能满足热气机特殊温度控制需要。解决办法是提高硬件质量，并使用高速微处理器，但此举会导致成本增加。另外，若使用拟合线性化测温，根据 K 型热电偶信号特点，将其温度区间分为若干段进行线性化拟合，如将其分为 17 段区间，其测量精度和实时性较高，能够满足热气机管壁温度监控的需要。然而，热气机在升降挡时，其温度升降也较为频繁，软件须在多个测温区间跳跃，在每个区间调用不同的拟参数，因此为了保证控制软件的运行速度，需要配置较高的 ARM 处理器，不满足成本控制的要求。

基于上述因素，综合考量后提出在热气机点火拖动期间采用查表法测量 K 型热电偶温度，在进入 600 °C 后使用拟合线性化测温，将热气机管壁温度控制在额定运行状态下。此举能够保证控制的精度和实时性，由于运算量较少，使用普通的单片机就能完成热气机控制任务，成本较低。

在实际使用中，热气机在点火拖动时对温度测量的实时性要求较低，因此，查表法能够胜任该任务；热气机运行稳定后，3 挡工况分别运行在 630 °C、670 °C 和 700 °C 等 3 个点上，恰好在热电偶一个线性化的 602~748 °C 的区间内，因此可以用一个线性化公式计算热电偶测量温度。在 3 000 h 热气机可靠性增长试验中，热气机点火拖动控制正常，在额定运行工况下热气机运行温度控制在 2 °C 内，热气机能够平稳发电，也没有发生热气机管壁被烧蚀现象，说明本热电偶测量方法正确、适用。

5 结论

采用查表法和拟合线性化相结合的方法设计的高精度 K 型热电偶多通道温度测量电路在 0~600 °C 区间采用查表法测温，在 600~750 °C 区间采用拟合线性化方法测温，在满足温度测量精度和

(下转第 56 页)