

设计

1 基础

1 磁路 磁通(Magnetic Flux)流动闭合路径(控制磁场)。

2 磁通密度B

1 定义 描述贯穿标准面积磁通。

2 计算

$$B(T) = \frac{F(N)}{I(A) \times l(m)}$$

$$\text{(磁通密度)} B = \frac{\Phi}{S}$$

1 磁场施加载流导体力量÷(导体尺寸×导体电流)。

2 磁场施加单位尺寸导体通过单位电流力量。

3 磁通Φ

1 定义 磁感强度B×垂直磁场方向面积S = 穿越给定面积磁通Φ

2 计算(垂直磁场方向单位面积穿越磁通)

$$\Phi(Wb) = B \times S$$

4 磁场强度H

1 定义 线圈电流×N÷磁路尺寸

2 计算(线圈电流×N÷磁路尺寸)

$$H(A/m) = \frac{I \times N}{l}$$

5 磁导μ

1 定义 材料响应磁场能力。

2 计算(磁通密度÷磁场强度)

$$\mu(H/m) = \frac{B}{H}$$

6 磁铁材料

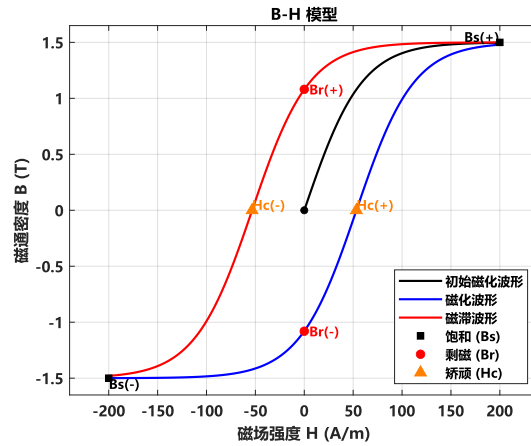
1 定义 响应磁场&保持磁性(移除磁场) 材料。

2 示例 Fe&Ni&Co&合金。

3 特征

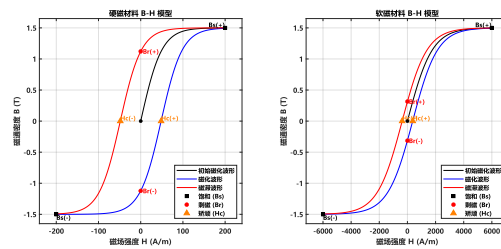
1 $\mu > 1$ 。

2 饱和&磁滞 效应。



4 类型

项目	软磁材料	硬磁材料
μ	软磁材料 > 硬磁材料	
H_c		软磁材料 < 硬磁材料
B_r		
磁化&退磁	容易	困难
场景	传递磁场	保持磁场
材料	坡莫合金	NdFeB
应用	铁芯	永磁电机



2 国家标准软磁材料交流磁性能测试规范(GB/T 3658-2022)

1 链接 [网站](#)

2 要求

1 频率范围 20Hz~100KHz

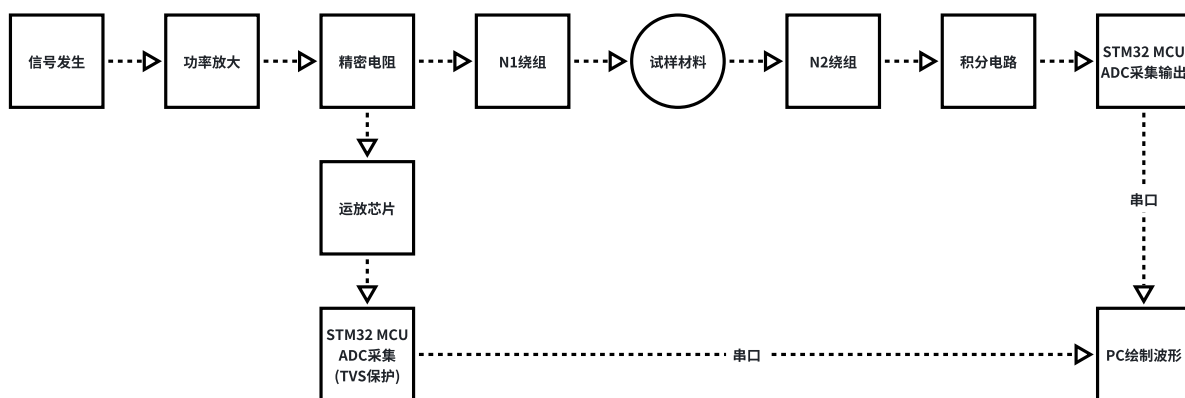
2 磁通密度B修正

1 原因 试样材料&N2绕组 存在空气间隙。

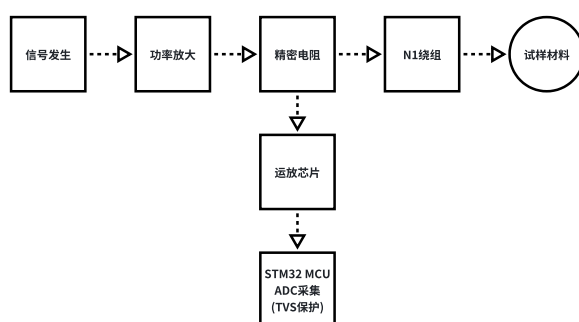
2 计算

$$\widehat{B} = \widehat{B}' - \mu_0 \widehat{H} \frac{(A' - A)}{A}$$

3 测量方案



1 磁场强度H持续采集



$$H(A/m) = \frac{I(A)N_1}{l_m(m)}$$

- 1 信号发生(激励) 输出频率稳定交流信号。
- 2 功率放大 放大信号发生输出激励驱动线圈N1绕组产生磁场。
- 3 精密电阻 方便测量磁场强度H。
- 4 N1绕组(励磁绕组) 通过交流电流线圈中心形成磁场H磁化软磁材料。
- 5 试样材料
- 6 运放芯片 设置合理增益调整电压范围。
- 7 STM32 MCU ADC 采集 采集电压信号计算磁场强度H。
- 8 注意事项

- 1 运放芯片可能需要耦合偏置满足 STM32 MCU ADC 采集电压范围要求(常规范围 0~3.3V)。
- 2 STM32 MCU ADC 采集引脚建议使用TVS(Transient Voltage Suppressor 瞬态电压抑制)保护引脚。

2 磁通密度B持续采集

1 流程



$$|\overline{U_2}| = 4fABN_2$$

$$\widehat{B} = \widehat{B}' - \mu_0 \widehat{H} \frac{(A' - A)}{A}$$

1 试样材料

2 N2绕组(次级绕组) 磁芯磁通变化导致次级绕组产生感应电压($e(t) \propto \Phi$)。

3 积分电路 等效国家标准要求使用V₁。

4 STM32 MCU ADC 采集输出 采集积分电路输出计算磁通密度B。

2 计算

1 平均感应电压

$$|\overline{U_2}| = 4fA\hat{B}N_2$$

$$\begin{aligned}\xi &= -N_2 \frac{d\Phi_B}{dt} (\Phi_B = B \times S) \\ &= -N_2 A \frac{dB(t)}{dt} (B(t) = B_{max} \sin(2\pi ft)) \\ &= -N_2 A \hat{B} 2\pi f \cos(2\pi ft)\end{aligned}$$

$$|\overline{U_2}|(\text{mean}(|\xi|)) = +N_2 A \hat{B} 2\pi f \frac{1}{T} \int_0^T |\cos(2\pi ft)| dt = +N_2 A \hat{B} 2\pi f \frac{2}{\pi} = 4fA\hat{B}N_2$$

2 修正磁通密度

$$\hat{B} = \hat{B}' - \mu_0 \hat{H} \frac{(A' - A)}{A}$$

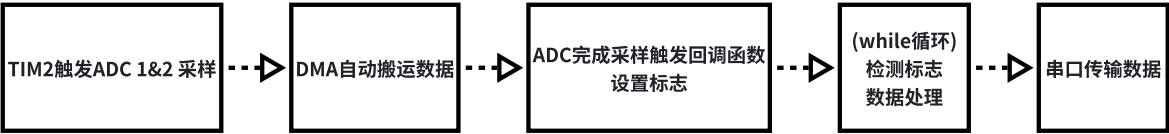
$$\begin{aligned}\hat{B} &= \frac{\Phi}{S} \\ &= \frac{\phi' - \Delta\phi}{A} (\Delta\phi = B_0 \Delta S = \mu_0 \hat{H} (A' - A)) \\ &= \frac{B' A' - \mu_0 \hat{H} (A' - A)}{A} \\ &= B' \frac{A'}{A} - \mu_0 \hat{H} \frac{(A' - A)}{A} \approx \hat{B}' - \mu_0 \hat{H} \frac{(A' - A)}{A}\end{aligned}$$

4 STM32工程实施

1 STM32CubeMX配置选项

外设	配置
ADC1	采集N ₂ 绕组电压
ADC2	采集励磁分流
DMA Channel 1&2	搬运ADC 1&2 采样数据
TIM2	TRGO定时触发ADC
USART1	传输 B&H 数据
GPIO	ADC1&2 采集引脚

2 工程代码(HAL)



```

1  /* USER CODE BEGIN Includes */
2  #include "main.h"
3  #include <math.h>           //提供数学函数(sqrt/sin/.....)
4  #include <stdio.h>          //提供snprintf安全格式字符序列函数(避免内存越界)
5  #include <string.h>         //字符序列处理支持
6  /* USER CODE END Includes */
7
8
9  /* USER CODE BEGIN PV */
10 //系统使用参数定义
11 #define ADC_BUF_LEN 256     //DMA缓存数据尺寸(256)
12 #define ADC_RESOLUTION 4096.0f //ADC Resolution(12 bits)
13 #define VREF 3.3f           //ADC参考电压(V)
14 #define FREQ 1000.0f        //激励频率(Hz)
15 #define N2 100.0f           //N2绕组
16 #define AREA 3.14e-4f       //N2绕组磁芯面积(m²)
17 #define MU0 (4e-7f * 3.1415926f) //空气μ₀(4π×10⁻⁷)
18 #define N1 50.0f           //N1绕组
19 #define L_MAG 0.05f         //磁路尺寸(m)
20 #define R_SHUNT 0.1f        //励磁电流分流电阻(Ω)
21 #define A_PRIME 4.0e-4f     //试样材料修正面积(B)
22
23 //DMA 缓冲数据&状态标志
24 uint16_t adc1_buf[ADC_BUF_LEN]; //ADC1(采集N2绕组感应电压)
25 uint16_t adc2_buf[ADC_BUF_LEN]; //ADC2(采集N1绕组串联分流精密电阻电压)
26 volatile uint8_t dma1_done = 0; //ADC1 DMA 完成标志
27 volatile uint8_t dma2_done = 0; //ADC2 DMA 完成标志
28 /* USER CODE END PV */
29
30
31 /* USER CODE BEGIN 1 */
32 //系统初始代码
33 HAL_Init(); //初始HAL
34 SystemClock_Config(); //配置系统时钟
35 MX_GPIO_Init(); //初始GPIO
36 MX_DMA_Init(); //初始DMA
37 MX_ADC1_Init(); //初始ADC1
38 MX_ADC2_Init(); //初始ADC2
39 MX_TIM2_Init(); //初始TIM
40 MX_USART1_UART_Init(); //初始USART1
41 MX_USART2_UART_Init(); //初始USART2
42
43 //启动外设
44 HAL_TIM_Base_Start(&htim2); //启动TIM(定时触发ADC)
45 HAL_ADC_Start_DMA(&hadc1, (uint32_t*)adc1_buf, ADC_BUF_LEN); //启动 ADC1&DMA1
46 HAL_ADC_Start_DMA(&hadc2, (uint32_t*)adc2_buf, ADC_BUF_LEN); //启动 ADC2&DMA2
47 /* USER CODE END 1 */
48
49
50 /* USER CODE BEGIN WHILE */
51 char uart1_buf[128]; //USART1数据缓存
52 char uart2_buf[128]; //USART2数据缓存
53
54 while (1)
55 {
56     //判断 2 DMA 全部完成搬运
57     if (dma1_done && dma2_done)
58     {

```

```

59     dma1_done = 0;
60     dma2_done = 0;
61
62     float sum_U2 = 0, sum_I = 0; //Σ
63     for (int i = 0; i < ADC_BUF_LEN; i++) {
64         float u2 = ((float)adc1_buf[i]) * VREF / ADC_RESOLUTION; //ADC1转换电压(感应绕组)
65         float vi = ((float)adc2_buf[i]) * VREF / ADC_RESOLUTION; //ADC2转换电压(励磁电流)
66         sum_U2 += u2;
67         sum_I += vi;
68     }
69
70     float U2_avg = sum_U2 / ADC_BUF_LEN; //平均感应电压
71     float I_avg = sum_I / ADC_BUF_LEN; //平均励磁采样电压
72
73     float I = I_avg / R_SHUNT; //计算励磁电流(I = V/R)
74     float H = N1 * I / L_MAG; //计算磁场强度(H = N1*I/L)
75     float B_raw = U2_avg / (4.0f * FREQ * AREA * N2); //计算原始B(积分换算)
76     float B_corr = B_raw - MU0 * H * ((A_PRIME - AREA) / AREA); //修正B(考虑面积偏差)
77
78     //USART1打印B信息
79     int len1 = snprintf(uart1_buf, sizeof(uart1_buf),
80         "[B] raw=%.6f T, Bcorr=%.6f T\r\n",
81         B_raw, B_corr);
82     HAL_UART_Transmit(&huart1, (uint8_t*)uart1_buf, len1, HAL_MAX_DELAY);
83
84     //USART2打印H信息
85     int len2 = snprintf(uart2_buf, sizeof(uart2_buf),
86         "[H] = %.2f A/m\r\n", H);
87     HAL_UART_Transmit(&huart2, (uint8_t*)uart2_buf, len2, HAL_MAX_DELAY);
88 }
89 HAL_Delay(10); //循环延时(限制限速保证数据处理完成)
90 /* USER CODE END WHILE */
91
92
93 /* USER CODE BEGIN 4 */
94 //ADC&DMA 传输完成回调函数(ADC&DMA 完成缓冲采样自动使用回调函数)
95 void HAL_ADC_ConvCpltCallback(ADC_HandleTypeDef* hadc)
96 {
97     if (hadc->Instance == ADC1) dma1_done = 1; // ADC1 DMA 完成
98     if (hadc->Instance == ADC2) dma2_done = 1; // ADC2 DMA 完成
99 }
100 /* USER CODE END 4 */

```