

电子检测技术

卢文科 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

电子检测技术/卢文科著. —北京:国防工业出版社,
2002.1

ISBN 7-118-02639-5

I.电... II.卢... III.电气测量 IV.TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 060082 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

三河腾飞胶印厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 6 $\frac{3}{4}$ 171 千字

2002 年 1 月第 1 版 2002 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1—4000 册 定价:10.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

前 言

随着科学技术的不断发展,计算机技术已被广泛地应用于测量领域,尤其是各行各业都需要对电量、非电量进行测量及控制,因而,社会上急需一种实用性强的,介绍电量、非电量转换器电路方面的书籍,以便与计算机书籍配合使用。目前国内外已出版的同类书籍,绝大多数只介绍一般的基本原理,没有介绍电路元器件选择、提高转换精度措施及调试步骤等方面的内容。鉴此,笔者编写了本书。相比之下,它具有如下几个特点:

1. 对每种转换器电路分析较透彻。
2. 对每种转换器电路的元器件选择作了较详细介绍,并且论述了选择的理由。
3. 对每种转换器电路,为了提高其转换精度,较详细地论述了采取的措施。
4. 为了读者使用方便,给出每种转换器电路的详细调试步骤及注意事项。
5. 详细论述了电子测量系统中数学模型的建立,并给出了一些典型实例,使读者开阔设计思路。
6. 详细论述了电子测量系统中的信号加工(如非线性校正、零点消除、灵敏度变化的消除等),并给出一些典型实例,可以直接应用于实际工作。
7. 从实际出发,详细论述了电子测量电路的抗干扰措施,解决了电子测量电路的干扰问题。

本书的绝大部分内容来源于笔者最近几年发表的论文,并且绝大部分是经笔者实验验证过的,相当一部分已应用于实践,发挥作用。因而本书内容新颖、实用、可靠,可供读者实际工作参考。

IV

感谢朱长纯、刘君华两位博士生导师对我的培养。

由于笔者水平有限,书中缺点和错误在所难免,肯切希望读者予以指正。

作 者

目 录

第一章 电量转换器	1
第一节 电流-电压转换器和电压-电流转换器	1
一、电流-电压转换器	1
(一) 直接式电流-电压转换器	1
(二) 霍耳效应式电流-电压转换器	2
(三) 三相无功电流-电压转换器	11
二、电压-电流转换器	21
(一) 负载不接地式电压-电流转换器	21
(二) 负载接地式电压-电流转换器	22
第二节 电压-频率转换器和频率-电压转换器	23
一、LMX31 型电压-频率转换器	23
二、LMX31 型频率-电压转换器	25
(一) LMX31 型频率-电压转换器的简单电路	25
(二) LMX31 型频率-电压转换器的快速响应电路	26
第三节 功率-电压转换器	27
一、直流功率-电压转换器	27
(一) 直流小功率-电压转换器	27
(二) 直流大功率-电压转换器	32
二、有功功率-电压转换器	36
(一) 单相有功小功率-电压转换器	36
(二) 霍耳效应式单相有功大功率-电压转换器	38
(三) 互感器式有功大功率-电压转换器	42
(四) 三相三线制有功功率-电压转换器	45
(五) 三相四线制有功功率-电压转换器	47
三、无功功率-电压转换器	47

(一) 单相无功小功率-电压转换器	47
(二) 霍耳效应式单相无功大功率-电压转换器	50
(三) 互感器式单相无功大功率-电压转换器	50
(四) 三相三线制无功功率-电压转换器	50
(五) 三相四线制无功功率-电压转换器	51
第四节 电阻-电压转换器和电阻-频率转换器	52
一、电阻-电压转换器	52
二、电阻-频率转换器	53
第五节 电感-电压转换器和电感-频率转换器	56
一、电感-电压转换器	56
(一) 第一种电感-电压转换器	56
(二) 第二种电感-电压转换器	61
二、电感-频率转换器	66
第六节 电容-频率转换器和电容-电压转换器	69
一、电容-频率转换器	69
二、电容-电压转换器	70
第七节 磁感应强度-电压转换器	72
第二章 非电量转换器	77
第一节 温度-电压转换器和温度-频率转换器	77
一、温度-电压转换器	77
二、温度-频率转换器	80
(一) $+2 \sim +150^{\circ}\text{C}$ 范围内的温度-频率转换器	80
(二) $-55 \sim +150^{\circ}\text{C}$ 范围内的温度-频率转换器	82
第二节 湿度-频率转换器和湿度-电压转换器	85
一、湿度-频率转换器	85
二、湿度-电压转换器	87
第三节 压力-电压转换器和压力-频率转换器	91
一、压力-电压转换器	91
二、压力-频率转换器	96
第四节 转速-频率转换器和转速-电压转换器	96
一、转速-频率转换器	97

(一) 光电式转速-频率转换器	97
(二) 电磁式转速-频率转换器	98
二、转速-电压转换器	99
(一) 光电式转速-电压转换器	99
(二) 电磁式转速-电压转换器	101
第五节 线圈匝数-电压转换器和线圈匝数-频率 转换器	103
一、线圈匝数-电压转换器	103
二、线圈匝数-频率转换器	109
第六节 新型的霍耳检零式机械零件硬度-电压 转换器	109
第七节 可燃气体浓度-电压、电流、频率转换器	114
一、可燃性气体浓度-电压转换器	115
二、可燃性气体浓度-电流转换器	121
三、可燃性气体浓度-频率转换器	123
四、几种常用可燃气体传感器(即气敏元件)	125
(一) QM-N7 II 型一氧化碳气敏元件	125
(二) QM-L1 型半导体气敏元件	127
(三) CJQ-1 型常温甲烷气敏元件	129
(四) QM-N5 型(可燃性气体)气敏元件	131
(五) QM-N8 型(LPG、LNG)气敏元件	133
(六) QM-J3 型(乙醇)气敏元件	135
(七) QM-H1 型氢敏元件	137
第八节 位移-电压转换器及带型(或线型)物长 度的测量	140
一、霍耳效应式微位移-电压转换器	140
二、电阻式位移-电压转换器	144
三、带型(或线型)物长度的测量	147
第九节 液位及液体体积-电压转换器	155
第十节 干簧管安匝数-电压转换器	157
第十一节 霍耳零磁通式矫顽力-电压转换器	160

第十二节 超声波测量距离	166
第十三节 金属材料的膨胀尺寸-电压转换器	170
第三章 建立电子测量系统的数学模型	175
第一节 概述	175
第二节 根据测量原理来建立数学模型	175
一、建立物质含水率测量的数学模型	176
(一) 含水率测量传感器	176
(二) 数学模型的建立	176
二、建立镀(涂)层测量的数学模型	179
第三节 用实验方法来建立数学模型	182
第四章 电子测量系统中的信号加工	185
第一节 电子测量系统中非线性校正	185
一、闭环式非线性校正	185
(一) 闭环式非线性校正原理	185
(二) 应用举例	186
二、开环式非线性校正	188
(一) 开环式非线性校正原理	188
(二) 应用举例	188
三、线性插值法非线性校正	191
(一) 线性插值法非线性校正原理	191
(二) 实现方法	192
第二节 电子测量系统中零点消除	193
一、固定零点消除法	193
二、计算机消除零点	194
第三节 电子测量系统中灵敏度变化的消除	195
第五章 电子测量电路的抗干扰措施	197
第一节 器件本身产生的噪声对运算放大器电路 的干扰及其解决的方法	197
一、电阻的选择	197
二、运算放大器的选择	198
第二节 来自外界的干扰及其解决的方法	198

一、高频信号对运算放大器电路的干扰及其 解决的方法	198
二、变压器及其它设备的漏磁通对运算放大 器电路的影响及其解决的方法	200
三、通过放大器输入线或电源进入的干扰对 放大器的影响及其解决的方法	200
四、公共阻抗耦合对运算放大器电路的影响 及其解决的方法	201
五、共模噪声对放大器的干扰及其解决的方法	202
参考文献	203

第一章 电量转换器

本章主要介绍电量转换器的工作原理、提高转换精度的措施及其调试步骤。

第一节 电流-电压转换器和电压-电流转换器

一、电流-电压转换器

(一) 直接式电流-电压转换器

1. 工作原理

从图 1-1 可知,被转换的电流 I 通过分流器 R_1 后,在其两端产生的电压

$$U = IR_1 \quad (1-1)$$

电压 U 通过放大器 A_1 、 A_2 、 A_3 后,其输出电压

$$U_0 = \frac{R_3}{R_2} U \quad (1-2)$$

将式(1-1)代入式(1-2)得

$$U_0 = \frac{R_3 R_1}{R_2} I = KI \quad (1-3)$$

式中 $K = \frac{R_3 R_1}{R_2}$ ——常数。

从式(1-3)知道电压 U_0 与被转换的电流 I 成正比,因而达到了电流-电压转换的目的。

2. 提高转换精度的措施

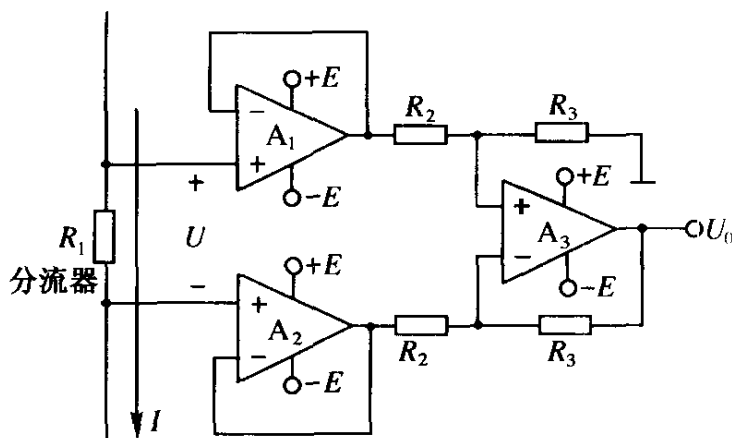


图 1-1 直接式电流-电压转换器

- (1) 分流器 R_1 选用温度系数小的电阻器,有时用铜线制作。
- (2) 放大器 A_1 、 A_2 、 A_3 选用高增益、低漂移、低噪声的放大器(如 OP07、F7650、F5027)。
- (3) 电阻 R_2 、 R_3 选用高稳定性的电阻(如 EE 系列的精密金属膜电阻)。

3. 调试步骤

接通放大器 A_1 、 A_2 、 A_3 的正负电源,用万用表的电压挡分别测量放大器反相端与同相端之间的电压是否接近于零,如果接近于零,则对放大器 A_1 、 A_2 、 A_3 进行调零(这里请注意:如果选用了自稳零的放大器,就不需要调零了)。

(二) 霍耳效应式电流-电压转换器

在该电流-电压转换器中,存在一些影响测量精度的因素,如大地磁场、铁心剩磁、位置误差、跳字现象和霍耳元件的温度漂移等。这里主要介绍怎样补偿霍耳元件的温度漂移问题。

1. 工作原理

从图 1-2 知道,由于根据霍耳检零原理,则

$$\Phi_1 = \Phi_2$$

$$n_1 I_1 = n_2 I_2$$

即

$$I_2 = \frac{n_1}{n_2} I_1$$

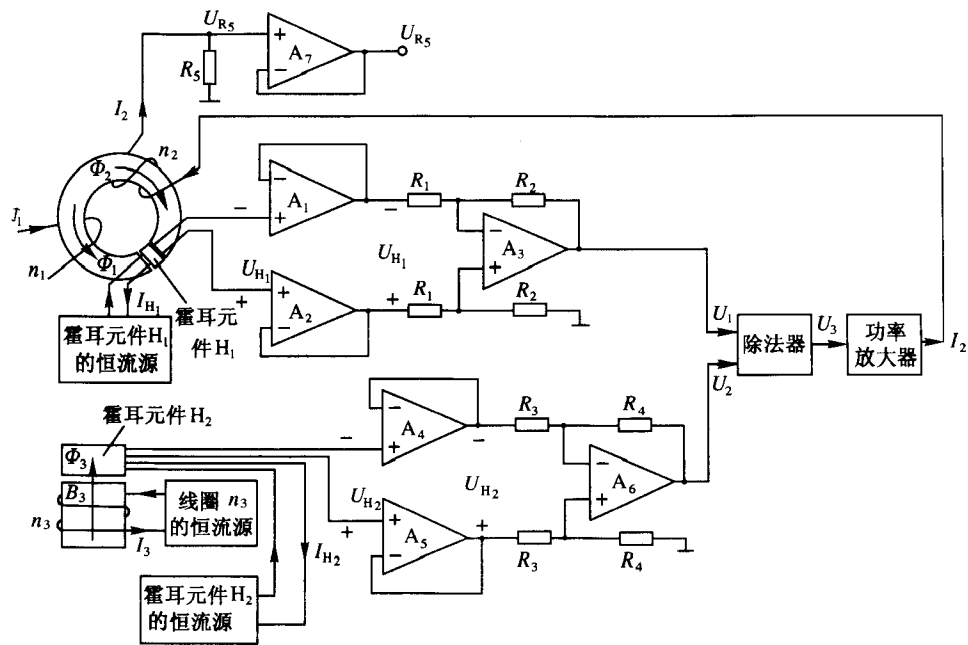


图 1-2 霍尔效应式电流-电压转换器

电流 I_2 通过电阻 R_5 时,产生的电压

$$U_{R_5} = I_2 R_5 = \frac{n_1 R_5}{n_2} I_1 \quad (1-4)$$

式中 $\frac{n_1 R_5}{n_2}$ ——常数。

从式(1-4)中可以看出:电压 U_{R_5} 与被测电流 I_1 成正比,达到了测量电流 I_1 便可知 U_{R_5} 的目的,即达到了电流-电压转换的目的。

2. 补偿霍耳元件的温度漂移

我们知道,霍耳元件的灵敏度、输入电阻、输出电阻均随温度的变化而变化。

(1) 补偿灵敏度随温度的变化

霍耳元件的输出电压

$$U_{H_1} = K_{H_1} I_{H_1} \Delta B = K_{H_1} I_{H_1} (B_1 - B_2) \quad (1-5)$$

$$U_{H_2} = K_{H_2} I_{H_2} B_3 \quad (1-6)$$

上述式中 K_{H_1} 、 K_{H_2} ——霍耳元件 H_1 、 H_2 的灵敏度;

I_{H_1} 、 I_{H_2} ——霍耳元件 H_1 、 H_2 的控制电流;

ΔB 、 B_3 ——穿过霍耳元件 H_1 、 H_2 的磁感应强度。

我们知道,霍耳元件的灵敏度随着温度的变化而变化。

设在初始温度 $T_0(^{\circ}\text{C})$ 下,霍耳元件 H_1 、 H_2 的灵敏度分别为 $K_{H_{10}}$ 、 $K_{H_{20}}$ 。

当温度升为 $T(^{\circ}\text{C})$ 时,霍耳元件 H_1 、 H_2 的灵敏度均发生了改变:

$$K_{H_{10}} \rightarrow K_{H_1}; K_{H_{20}} \rightarrow K_{H_2}$$

且有如下关系:

$$K_{H_1} = K_{H_{10}} (1 + \alpha \Delta T)$$

$$K_{H_2} = K_{H_{20}} (1 + \alpha \Delta T)$$

式中 $\Delta T = T - T_0$;

α ——霍耳元件 H_1 、 H_2 灵敏度的温度系数,这里的 H_1 、 H_2 选用两个温度系数完全相同的霍耳元件。

从而知道霍耳元件 H_1 、 H_2 在温度改变 ΔT 时,其输出电压为

$$U_{H_1} = K_{H_{10}}(1 + \alpha\Delta T)I_{H_1}\Delta B \quad (1-7)$$

$$U_{H_2} = K_{H_{20}}(1 + \alpha\Delta T)I_{H_2}B_3 \quad (1-8)$$

从图 1-2 又知道

$$B_3 \propto I_3$$

即 $B_3 = C_1 I_3$ (1-9)

式中 C_1 ——常数。

将式(1-9)代入式(1-8)得

$$U_{H_2} = C_1 K_{H_{20}}(1 + \alpha\Delta T)I_{H_2}I_3 \quad (1-10)$$

将电压 U_1 、 U_2 加入除法器中,其输出电压

$$U_3 = \frac{U_1}{U_2} = \frac{(-U_{H_1})\left(-\frac{R_2}{R_1}\right)}{(-U_{H_2})\left(-\frac{R_4}{R_1}\right)} = \frac{R_2 R_3}{R_1 R_4} \cdot \frac{U_{H_1}}{U_{H_2}} \quad (1-11)$$

将式(1-7)、式(1-10)代入式(1-11)得

$$\begin{aligned} U_3 &= \frac{R_2 R_3 K_{H_{10}}(1 + \alpha\Delta T)I_{H_1}\Delta B}{R_1 R_4 C_1 K_{H_{20}}(1 + \alpha\Delta T)I_{H_2}I_3} = \\ &= \frac{R_2 R_3 K_{H_{10}} I_{H_1}}{R_1 R_4 C_1 K_{H_{20}} I_{H_2} I_3} \Delta B = \\ &= C_2 \Delta B \end{aligned} \quad (1-12)$$

式中 $C_2 = \frac{R_2 R_3 K_{H_{10}} I_{H_1}}{R_1 R_4 C_1 K_{H_{20}} I_{H_2} I_3}$ ——常数。

从式(1-12)中可以看出:电压 U_3 与 ΔB 成正比,更重要的是说明了电压 U_3 与环境温度 $T(^{\circ}\text{C})$ 无关,从而消除了灵敏度随温度的变化对测量带来的误差。

另外还要注意霍耳元件 H_1 和 H_2 必须处在同一温度之中。

(2) 补偿输入电阻随温度的变化

设霍耳元件 H_1 、 H_2 的输入电阻为 r_{i_1} 、 r_{i_2} ,则

$$\left. \begin{aligned} r_{i_1} &= r_{i_{10}}(1 + \delta_1 \Delta T) \\ r_{i_2} &= r_{i_{20}}(1 + \delta_2 \Delta T) \end{aligned} \right\} \quad (1-13)$$

式中 $\Delta T = T - T_0$;

$r_{i_{10}}、r_{i_{20}}$ ——霍耳元件 $H_1、H_2$ 在初始温度 $T_0(^\circ\text{C})$ 下的输入电阻值;

$\delta_1、\delta_2$ ——霍耳元件 $H_1、H_2$ 输入电阻的温度系数。

从式(1-13)知道,其输入电阻随温度的变化而变化。

如果在两霍耳元件 $H_1、H_2$ 的输入端采用电压源供电,则输入控制电流 $I_{H_1}、I_{H_2}$ 受输入电阻随温度的变化而变化,所以我们对两霍耳元件均采用恒流源供电,这样可以消除其输入电阻随温度的变化对测量产生的误差。

(3) 补偿输出电阻随温度的变化

这里以霍耳元件 H_1 为例来说明。

霍耳元件从输出端看进去,可以等效为一个输出电阻 R_0 与电压源 U_{H_1} 相串联的电路,如图 1-3 所示。

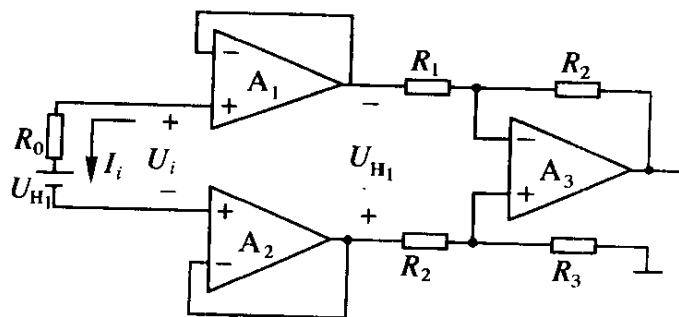


图 1-3 霍耳元件的输出电阻对测量的影响

霍耳元件的输出电阻 R_0 随温度 $T(^\circ\text{C})$ 的变化而变化,即

$$R_0 = (1 + \beta \Delta T)$$

式中 $\Delta T = T_0 - T$ 。

由图 1-3 可知,

$$U_i = I_i R_0 + U_{H_1} \quad (1-14)$$

式中 I_i ——前置放大器的输入电流。

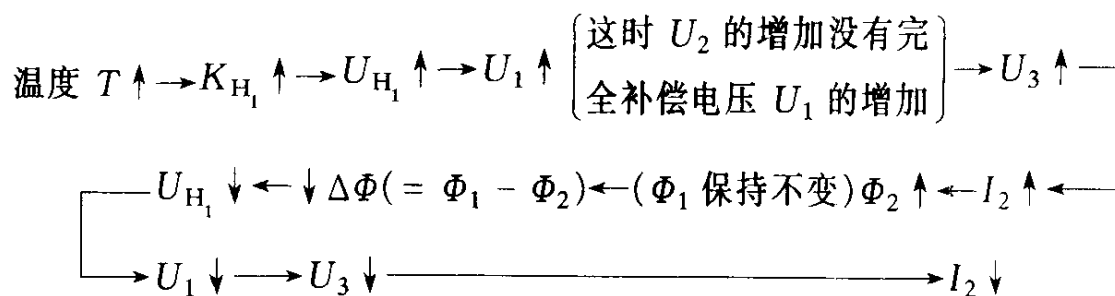
从式(1-14)知道前置放大器的输入电压 U_i 不仅与 U_{H_1} 有关,而且与 R_0 有关,而 R_0 是随温度的变化而变化的,所以 U_i 也随着温度的变化而变化。这里设计了一个如图 1-3 所示的高输入阻抗前置放大器,认为其输入电流 $I_i \approx 0$,所以式(1-14)变为

$$U_i = U_{H_1}$$

从上式可以看出: U_i 与 R_0 无关,这样就消除了霍耳元件的输出电阻 R_0 对测量的影响。

(4) 霍耳检零原理补偿霍耳元件的温度漂移

在采用了前边的方法以后,如果没有完全补偿霍耳元件的灵敏度、输入电阻、输出电阻随温度的变化,这时霍耳检零系统(即闭环系统)也可以对霍耳元件的温度漂移进行有效的补偿。下面以霍耳元件的灵敏度为例来说明霍耳检零系统进行温度补偿的原理,如图 1-4 所示。



显然,霍耳检零系统能够补偿霍耳元件温度的漂移,从而达到了准确测量电流 $I_1 (= n_2 I_2 / n_1)$ 的目的。

3. 霍耳检零系统的稳态误差分析

在图 1-2 中,由于电流 I_3 恒定不变,所以 Φ_3 是恒定的,于是电压 U_2 也是恒定值(这里指在某恒定的温度下),这样可得到

$$U_3 = \frac{U_1}{U_2} = K_4 U_1 \quad (1-15)$$

式中

$$K_4 = \frac{1}{U_2}$$

从式(1-15)知道除法器可以看成是一个放大倍数为 $1/U_2$ 的放大器。

下面介绍霍耳检零原理的稳态误差计算,如图 1-4 所示。

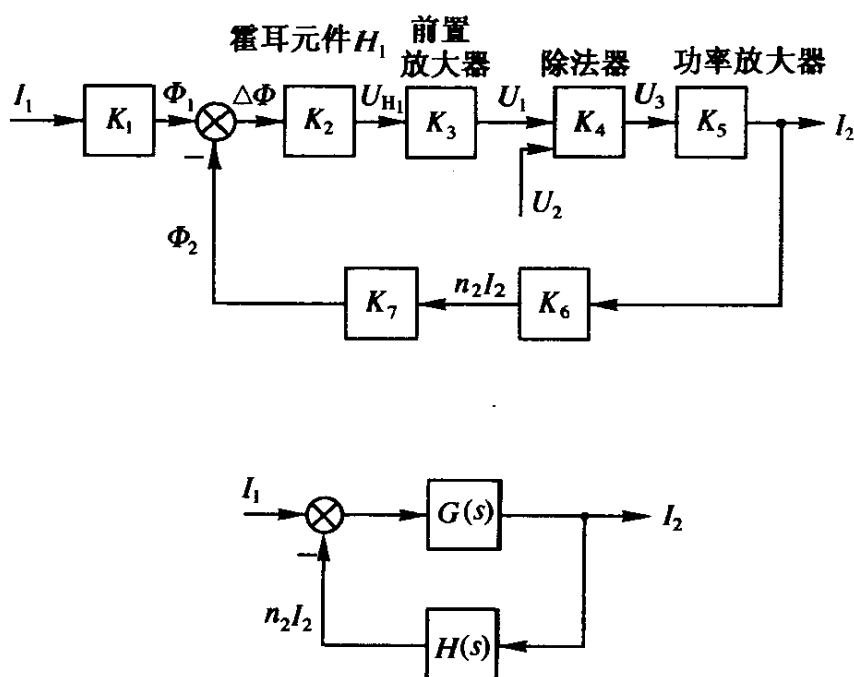


图 1-4 霍耳检零原理框图

令

$$K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 = G(s)$$

$$\frac{1}{K_1} K_6 K_7 = H(s)$$

所以误差

$$e(t) = I_1(t) - n_2 I_2(t)$$

或

$$E(s) = I_1(s) - n_2 I_2(s)$$

由于

$$I_1(t) = I_1$$

所以

$$I_1(s) = I_1/s$$

霍耳检零系统稳态误差(指系统对单位阶跃输入的稳态误差,即 $I_1(t) = I_1 = 1$):

$$\begin{aligned} e_{ss} &= \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s I_1(s)}{1 + G(s)H(s)} = \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s I_1/s}{1 + K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 K_7} = \\ &= \frac{1}{1 + K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 K_7} \end{aligned}$$