
隧道磁阻传感器（TMR）在自动直读式流量计中的应用

江苏多维科技有限公司

James G.Deak, 郭海平

自动读表的需求简介

自动读表技术，是一种将水表、能量表（气表和电表）等流量计中数据自动地传输到控制中心的技术，其中数据包括用户的流量（水、气、电）使用量数据、系统运行健康情况数据，以及流量计的状态数据。利用这些数据，供应商可以进行用户费用的计算，系统的排查检修，流量使用情况的分析。自动读表技术的主要贡献在于：避免流量供应商到每个用户所在地去记录流量计中的用户消费数据。另外，采用自动读表技术后，供应商可以根据用户的实时使用情况，实时地计算出用户的费用，而用传统的方法，供应商只能获取用户在过去的一段时间内的使用量。通过分析这种“实时”的信息，供应商可以根据用户需求控制水、电、气的生产量和存储量。同时，用户可以分析并控制自己的使用量。

目前使用的大多数流量计是多年前安装在用户端的，当时还未出现自动读表技术。在将自动读表技术应用到实际中时，需要解决一个问题：需要将流量计中的计数单元进行修改，甚至完全被替换。本方案提出了一种不用改变原有的计数单元的自动读表流量计，在不改变原有的流量计机械结构的基础上，添加若干元件即可。本方案提出的自动读表流量计，保留了肉眼观察字轮上数字的功能，增加了智能化自动读表的功能。江苏多维科技采用 TMR 技术生产的传感器体积小，精度高，工作状态稳定，可以胜任该方案中的传感元件。

TMR 传感器概述

磁传感器广泛用于现代工业和电子产品中以感应磁场强度来测量电流、位置、方向等物理参数。在现有技术中，有许多不同类型的传感器用于测量磁场和其他参数，例如采用霍尔（Hall）元件，各向异性磁电阻（Anisotropic Magnetoresistance, AMR）元件或巨磁电阻（Giant Magnetoresistance, GMR）元件为敏感元件的磁传感器。

TMR (Tunnel MagnetoResistance) 元件是近年来开始工业应用的新型磁电阻效应传感器，其利用的是磁性多层膜材料的隧道磁电阻效应对磁场进行感应，比之前所发现并实际应用的 AMR 元件和 GMR 元件具有更大的电阻变化率。我们通常也用磁隧道结（Magnetic Tunnel Junction, MTJ）来代指 TMR 元件，MTJ 元件相对于霍尔元件具有更好的温度稳定性，更高的灵敏度，更低的功耗，更好的线性度，不需要额外的聚磁环结构；相对于 AMR 元件具有更好的温度稳定性，更高的灵敏度，更宽的线性范围，不需要额外的 set/reset 线圈结构；相对于 GMR 元件具有更好的温度稳定性，更高的灵敏度，更低的功耗，更宽的线性范围。

TMR 传感器在自动直读式流量计中的应用演示板说明

1. 演示板特点

- 两颗 Z 轴传感器测量每一个字轮的磁场；
- 不改变水表的传动结构；
- 传感器只须微安级电流就能正常工作，功耗低；
- 当磁攻击时，发出报警信号。

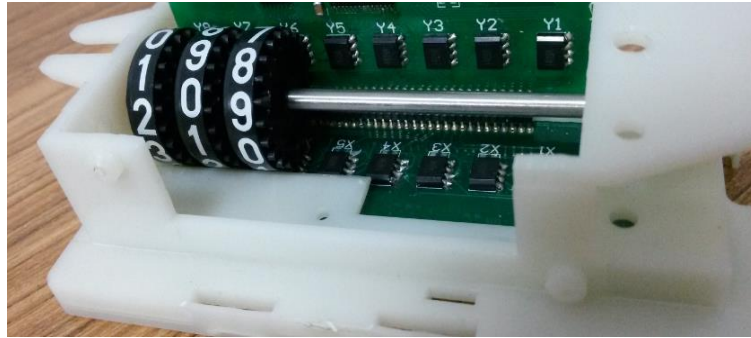


图 1 燃气表中的应用

图 1 是 TMR 传感器在燃气表中的应用，燃气表有 8 个字轮，每个字轮上有 0~9，均匀分布的九个数字，图中为方便，只画出了三个字轮。每个字轮中镶嵌有径向磁化的永磁铁，其中位置“0”对应一个磁极，该磁极产生的磁场垂直于字轮表面，并且方向向外。

每个字轮需要两个 TMR 传感器与之对应，两个传感器呈 90° 安装。例如，对于第一个字轮，有传感器 X1 和 Y1 与之对应。在该结构中，不需要改变流量计本身的机械结构，特别是传动结构，只需要在字轮中镶嵌永磁铁，并另外安装两块 PCB。

2. 演示板使用说明

图 2 是演示板的实物图和原理框图，供电电压为 5V。传感器的模拟输出电压通过选通器，输入到 MCU 中进行模数转换和相应计算，MCU 再将计算后的数字信号输入到显示器的芯片中，使得字轮上的数字实时显示在显示器上。程序通过烧写接口写入到 MCU 中。演示板可以使用开源的 Arduino 进行编程。

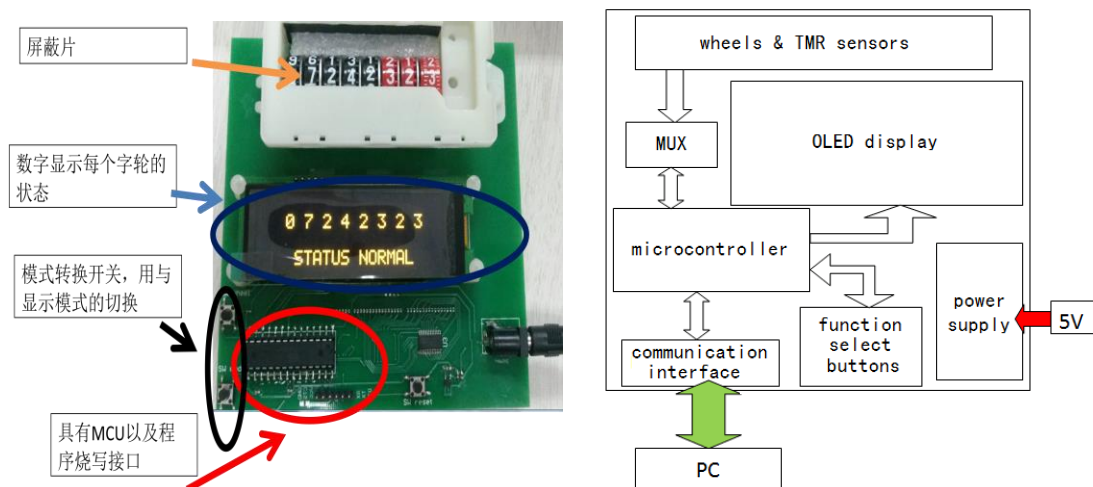


图 2 演示板实物图（左）和原理框图（右）

通过长按“SW mode”按钮，可以改变显示器的显示模式，图 3 详细显示了第一个字轮的详细信息。图中 Ang 为校正后的字轮的角度。在该模式下，长按“SW wheel”可以切换不同的字轮，以查看不同字轮的详细信息。

显示模式：
能显示每一个字轮的状态



V_x 和 V_y 分别是传感器X1和传感器Y1的输出电压；
Mag是 V_x 和 V_y 的矢量和；

图3 详细信息显示模式

通过内部算法，可以实现流量计的报警功能，即显示“Tamper detected”，如图4所示。当有一个磁铁靠近字轮或者传感器时，传感器模拟输出电压会超出正常范围。通过设定阈值，可以实现“正常运行”还是“收到攻击”的判断。当外加磁场消失后，系统会自动恢复到正常运行的状态，即显示“Status normal”。

磁攻击报警：
当有磁铁攻击时，对应的传感器是发出报警信号。



图4 报警信号

3. 测量原理

角度-刻度换算

图5、6描述了TMR传感器测量字轮的原理。其中使用的传感器的灵敏方向指向永磁体的圆心。在图5中，字轮显示位置为“0”，此时永磁铁内外的磁场如图所示。由图中可见，X传感器位置处磁场向上，即在传感器的灵敏方向上磁场分量很大。而Y传感器处的磁场向下，由于Y传感器灵敏方向指向永磁铁圆心，则磁场在Y传感器灵敏方向分量为0。此时对应角度为0度。

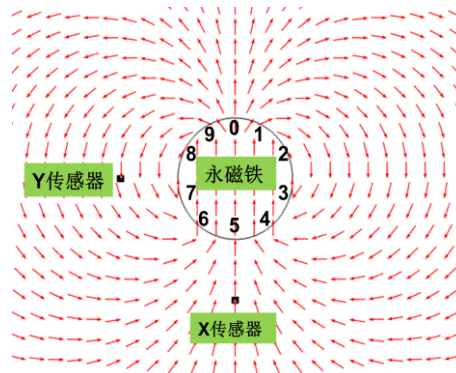


图5 位置“0”时，永磁铁周围的磁场以及传感器位置的磁场

上面是一个极端的例子，下面分析一般的情况，如图 6 所示。在图示的情况下，永磁铁在两个传感器位置产生的磁场与传感器灵敏方向具有角度，分别是 α 和 β ，磁场标量值分别为 A, B。利用下面式子，可以计算出永磁铁的角度，即字轮的角度：

$$\theta = \text{atan2} \frac{A \cos \alpha}{B \cos \beta}$$

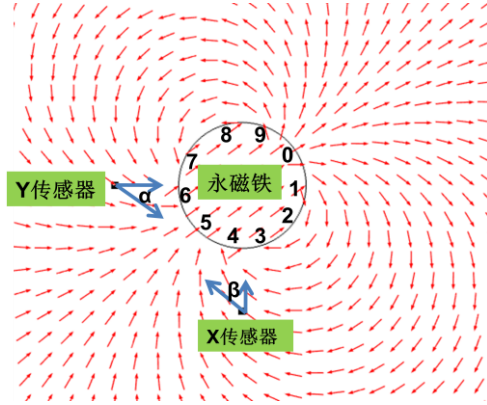


图 6 任意位置时，永磁铁周围的磁场以及传感器位置的磁场

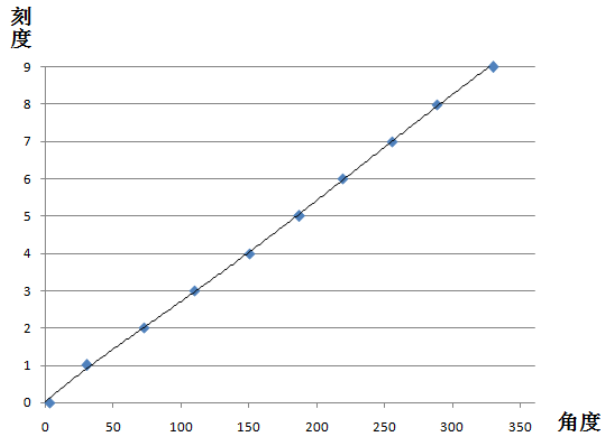


图 7 角度和刻度的拟合曲线

上图是角度到刻度的变换所使用的拟合曲线，每一个角度值对应一个刻度值。在校准时，只需将每个刻度值对应的角度值输入到表格中，即可得到拟合曲线，拟合曲线的表达式为：

$$\text{Num} = A_0 + A_1 * \theta + A_2 * \theta^2 + A_3 * \theta^3 + \dots + A_6 * \theta^6$$

通过对 A_1, A_2, \dots, A_6 进行校准，可以得到角度和刻度(上式中的 Num)的正确的对应关系。系数主要取决于永磁铁磁极和数字的位置关系、传感器与永磁铁位置关系、传感器安装精度。而在量产过程中，这些因素可以得到很好的控制，不同字轮 A_1, A_2, \dots, A_6 的变化很小。通过拟合曲线算出来的刻度值并非整数，通过取整(可以是四舍五入)，可以得到整数的刻度值。

磁攻击的检测

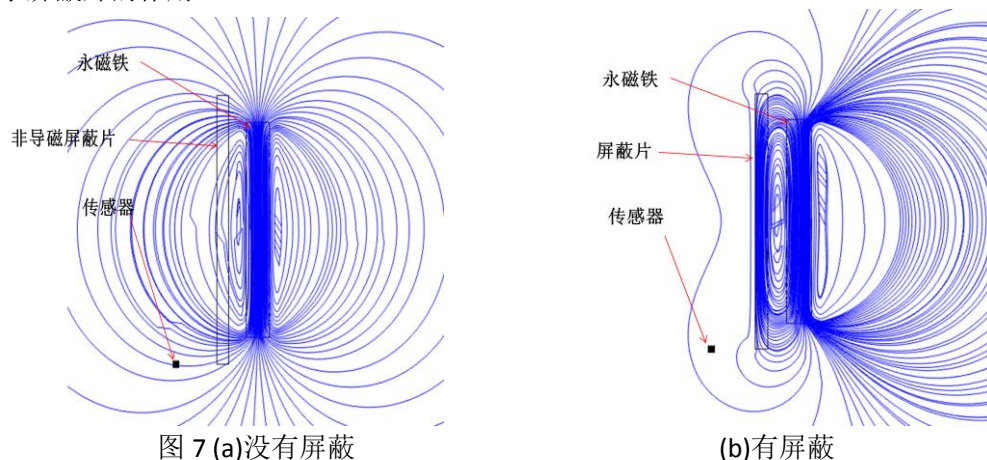
当有外部磁场攻击时，会改变传感器的模拟输出电压。通过利用两个互相垂直的传感器的输出电压矢量和，可以反映出外部攻击磁场的大小，计算公式如下：

$$M = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}$$

其中 M 是互相垂直的两个传感器的模拟输出电压矢量和， V_x 和 V_y 为所述两个互相垂直的传感器模拟输出电压。若模拟电压处于某一规定范围的量值时，表明流量计正常运行；否则，则表示有外部的磁场攻击。例如：在理想情况下测出 M 值，阈值可以设为 $1.2M$ 和 $0.8M$ ，即电压矢量和只有介于 $0.8M$ 和 $1.2M$ 时，流量计是正常工作的；否则，预示着流量计受到了磁场的攻击，显示器显示“Tamper detected”。

相邻字轮间的屏蔽

由于 8 个字轮并排排列，需要考虑字轮间的互相影响。在本演示板中，在相邻的字轮之间设置有屏蔽片，以减小字轮对左右两边传感器的影响，安装位置如图 2 所示。图 7 定性地描绘了屏蔽片的作用。



为了方便说明，图(a)中采用非导磁屏蔽片来代表没有磁屏蔽的情况。由图中可以看出，永磁铁周围的磁场分布基本左右对称，传感器处于该磁场中。图(b)代表有铁磁屏蔽片的情况，屏蔽片处于永磁铁和传感器之间，图中可以看出，由于受到屏蔽片的影响，永磁铁左边的磁场绝大多数集中在屏蔽片内，屏蔽片左边的磁力线很稀疏，说明该处磁场很弱。由于屏蔽片的存在，永磁铁在传感器位置处产生的磁场较没有屏蔽片时小。

相关专利

201410406142.8 一种双 Z 轴磁电阻角度传感器

201510058471.2 一种磁自动化流量记录器

发明人

James Deak: jim.deak@dowaytech.com

Guo Haiping: haiping.guo@dowaytech.com