

用新元件的磁敏固态传感器

北京航空学院 黄俊钦 李行善 王 展 马明芳

摘 要

本文在文献〔1〕的基础上采用国产新型磁敏元件——磁敏二极管互补对和磁敏三极管,做成四种新的磁敏固态传感器:(1)单磁敏三极管传感器;(2)磁敏二极管互补对传感器;(3)磁敏二极管与磁敏三极管组合传感器;(4)双磁敏二极管对的桥式传感器。文中示出四种传感器的实用电路图。同时,对四种性能的传感器都进行了性能测试和分析比较。这四种传感器在多用途、通用性和低速性能几方面都优于文献〔4~7〕中介绍的传感器。

一、前 言

文献〔1〕中我们提出一种磁敏多功能固态传感器,当时国产磁敏元件只有磁敏二极管,故在文献〔1〕中只研究了用磁敏二极管做的传感器。随着国内试制成功磁敏二极管互补对和磁敏三极管,我们便改用这些新型磁敏元件来制作固态传感器。做成磁敏二极管互补对传感器,磁敏二、三极管组合的传感器、双磁敏二极管互补对的桥式线路传感器和单磁敏三极管的传感器共四种。对四种传感器都给出了具体线路和实验结果。同时求出了描述这些传感器输出特性的经验公式。用国产新型磁敏元件做成四种线路的磁敏固态传感器,测出各种传感器的特性曲线,并求出它们的经验公式,这些就是本文的主要工作。

文献〔4〕介绍一种电磁感应式转速传感器。与本传感器相比,其缺点是低速性能差,在低转速时无信号输出^{〔1〕}。文献〔5〕介绍一种感应式转速表,其构造较复杂。文献〔6〕采用磁敏二极管的不平衡电桥测量转速,它将永久磁铁装在旋转体上与磁敏二极管分开,其缺点是通用性及测量准确度差。而本传感器将磁敏二、三极管和永久磁铁装在一起,做成通用的固态传感器,性能较为优越。1982年文献〔7〕中介绍两种转速传感器:一种是用马蹄形永久磁铁和霍尔元件来测量齿轮转速的方法,其缺点是通用性差,对于某种厚度的齿轮设计的传感器,不能用于厚度不同的齿轮,当然更不能用于其它带槽或孔的转轴的转速测量,而本传感器则通用性好;另一种是用两个磁敏电阻贴在一块方形永久磁铁上做成的转速传感器,两个磁敏电阻分开的距离正好等于齿轮的齿距,使得齿顶对着一个磁敏电阻时,另一个磁敏电阻正好对着齿隙,前者电阻增大,后者电阻减小,两电阻接成分压器形式,齿轮旋转时,两个磁敏电阻交替地作周期性变化,使输出电压的频率与转速成正比,这种传感器的缺点是适应性差,一种传感器只能用来测量齿距一

1983年12月29日收到。

定的齿轮转速，而本传感器则可以用来测量各种尺寸的齿轮（模数小于 1 的除外）转速。此外，上述各种传感器^[4-7]都不是多功能传感器。

文献[1]中已说明本传感器的特性可用测量齿轮转速为代表，故本文也只给出四种传感器测量齿轮转速时的主要特性，这些传感器的其余功能与文献[1]中所述相同，在此不再讨论。

二、磁敏二极管互补对传感器

这种磁敏多功能固态传感器采用哈尔滨通用晶体管厂生产的磁敏二极管互补对，它将两个磁敏二极管做成一个整体，封装在一个管壳内，引出三根线。将它装在永久磁铁端面上，接成如图 1 所示的线路。

将这传感器装在离齿轮的齿顶 2.5mm 处，改变工作电流 I ，测出输出电压 V_{sc} ，实验结果如图 2 所示。由曲线可以看出：在电流 $I < 1.2\text{mA}$ 时，传感器输出电压 V_{sc} 近似地与 I 呈线性关系；当 $I > 1.2\text{mA}$ 时，输出电压不再随电流呈线性关系增加。

保持工作电流 $I = 2\text{mA}$ ，测出传感器输出电压 V_{sc} 与距离 x （传感器离被测齿轮的齿顶的距离）的特性曲线如图 3 所示。图中小圆点表示实验测试值。

实验记录数据列于表 1 的第一、二行。将传感器输出特性 $V_{sc} = f(x)$ 用文献[1]中的下述经验公式来描述

$$V_{sc} = V_m a^x$$

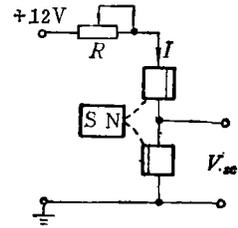


图 1 用二极管对的传感器线路图

Fig.1 Electrical circuit diagram of diode couple transducer

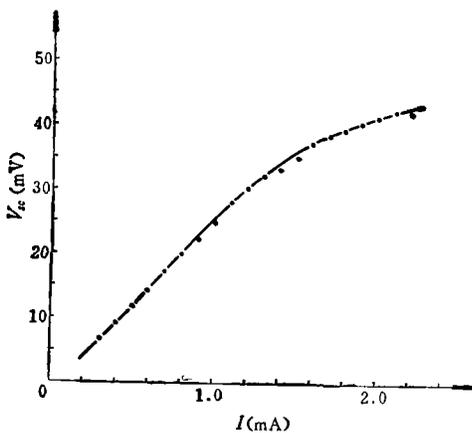


图 2 二极管对的 $V_{sc} = f(I)$ 实验曲线
Fig.2 $V_{sc} = f(I)$ experimental curves of diode couple transducer

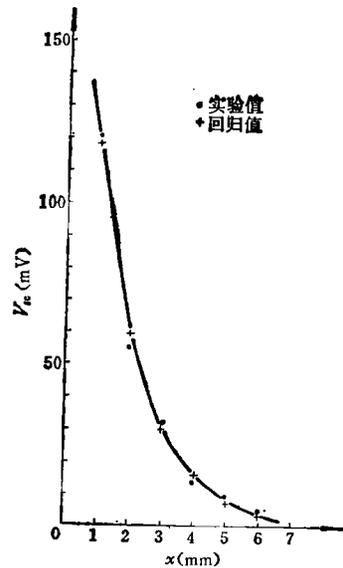


图 3 二极管对传感器的 $V_{sc} = f(x)$ 曲线
Fig.3 $V_{sc} = f(x)$ curve of diode couple transducer

用平均选点法求经验公式的常数 V_m 与 a 。

将上述公式两端取对数得

$$\log V_{sc} = \log V_m + x \log a$$

令 $y = \log V_{sc}$, $\log V_m = b$, $\log a = m$, 则上式变为直线方程

$$y = b + mx$$

对应于各个 x 的 y 值列于表 1 的第五行。将 6 个实验值分两组, $x = 1, 2, 3$ 为第一组, 其平均点的坐标为

$$\bar{y}_1 = \frac{1}{3}(2.08 + 1.74 + 1.51) = 1.777$$

$$\bar{x}_1 = \frac{1}{3}(1 + 2 + 3) = 2$$

$x = 4, 5, 6$ 为第二组, 其平均点的坐标为

$$\bar{y}_2 = \frac{1}{3}(1.13 + 0.924 + 0.602) = 0.885$$

$$\bar{x}_2 = \frac{1}{3}(4 + 5 + 6) = 5$$

回归直线的斜率为

$$m = \frac{\bar{y}_2 - \bar{y}_1}{\bar{x}_2 - \bar{x}_1} = \frac{0.885 - 1.777}{5 - 2} = -0.297$$

回归直线在 y 轴上的截距为

$$b = \bar{y}_2 - m\bar{x}_2 = 0.885 + 0.297 \times 5 = 2.37$$

因为 $\log V_m = b$, 故

$$V_m = 10^b = 10^{2.37} = 234.4$$

因为 $\log a = m$, 故

$$a = 10^m = 10^{-0.297} = 0.505$$

所以经验公式为

$$V_{sc} = 234.4 \times 0.505^x (\text{mV})$$

表 1 回归值与误差的计算表

Table 1 Computational table of regressive values and errors

x (mm)	1	2	3	4	5	6
V_{sc} (mV)	120	55	32	13.5	8.4	4.0
\hat{V}_{sc} (mV)	118.4	59.8	30.2	15.2	7.7	3.9
ΔV_{sc} (mV)	1.6	-4.8	1.8	-1.7	0.7	0.1
$y = \log V_{sc}$	2.08	1.74	1.51	1.13	0.924	0.602

将 $x = 1, 2, \dots, 6$ mm 代入上式计算出输出电压的回归值 \hat{V}_{sc} , 和 $\Delta V_{sc} = V_{sc} - \hat{V}_{sc}$ 分别列于表的第三行和第四行。 \hat{V}_{sc} 在图 3 中用小十字表示。由图 3 可以看出所求出的经验公式能较好地描述实验结果。

三、磁敏二、三极管组合的传感器

磁敏三极管（磁敏晶体管）的灵敏度是磁敏二极管的几倍至十几倍，其噪音亦小于磁敏二极管。为了减小温度误差，用相同材料的磁敏二极管作为磁敏三极管的负载，由于两者温度特性相近，可以使温度漂移降低。因而，我们采用 2ACM 型磁敏二极管作为 3BCM 型磁敏三极管的负载，两个管子一齐装在磁铁端面上，联成如图 4 所示的线路^[3]。

我们先测试了单个磁敏三极管装在永久磁铁端面上（磁敏三极管的正磁场方向贴在磁铁的 N 极上）的特性，用于选择线路参数，实验线路如图 5 所示。

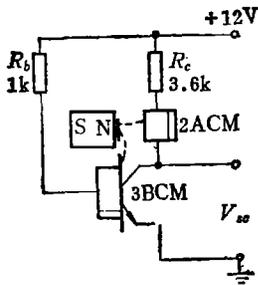


图 4 二、三极管组合的传感器线路图
Fig.4 Electrical circuit diagram of diode and transistor combined transducer

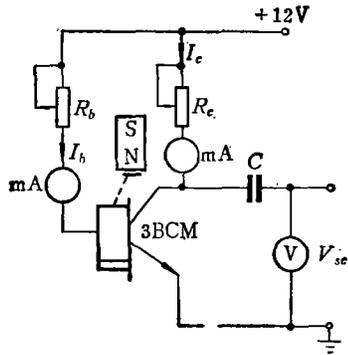


图 5 传感器上的磁敏三极管的特性测试线路图
Fig.5 Electrical circuit diagram of measuring characteristics of transistor in transducer

下面给出采用两种永久磁铁的实验结果：1号磁铁的直径为 8 mm，长 10mm，N 极端面上的 $B = 0.32$ 高；2号磁铁直径为 12mm，长 25mm，N 极端面上的 $B = 0.15$ 高。永久磁铁装在离齿轮齿顶 3mm 处。先固定 $R_c = 5.1k\Omega$ ，测出 V_{se} 随 I_b 改变的实验曲线 $V_{se} = f(I_b)$ 如图 6 所示。由图可以看出：在所测试的范围内，输出电压 V_{se} 与基极电流 I_b 近似地呈线性关系。当 $R_b = 0$ 时， $I_b = 1.3mA$ ，输出电压 V_{se} 为最大，即 $V_{se} = 13mV$ 。当 $R_b = 1k\Omega$ 时， $I_b = 1.04mA$ ， $V_{se} = 8.9mV$ 。为防止温度升高时 I_b 太大，取 $R_b = 1k\Omega$ 。

固定 $R_b = 1k\Omega$ ，测试输出电压随 I_c 而变化的结果， $V_{se} = f(I_c)$ 实验曲线如图 7 所示。由曲线可看出： I_c 较小时， V_{se} 随 I_c 的增加而增大，到某一 I_c 值之后， V_{se} 随 I_c 的增加而减小。所以， R_c 太大或太小都不利。用 1号磁铁时， $R_c = 12.5 \sim 15k\Omega$ 时传感器输出最大。取 $R_c = 12.5k\Omega$ 时，用 1号磁铁重做 $V_{se} = f(I_b)$ 实验，结果如图 8 所示。由图 6 与图 7 都可以看出：永久磁铁的性能对传感器的输出特性影响很大，这方面我们进行了较详细的实验，实验结果将另行介绍。

这种传感器的输出电压 V_{se} 与它离齿顶的距离 x 的关系（实验结果）如图 9 中的小圆点所示。

由这些实验数据，用平均选点法求出的经验公式为（计算过程从略）

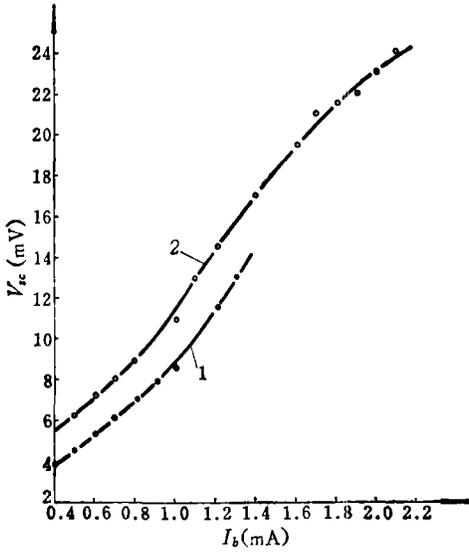


图 6 传感器上的磁敏三极管的 $V_{sc} = f(I_b)$ 实验曲线
1—1号磁钢; 2—2号磁钢。
Fig. 6 Experimental curves $V_{sc} = f(I_b)$ of transistor in transducer
1—No. 1 magnet; 2—No. 2 magnet.

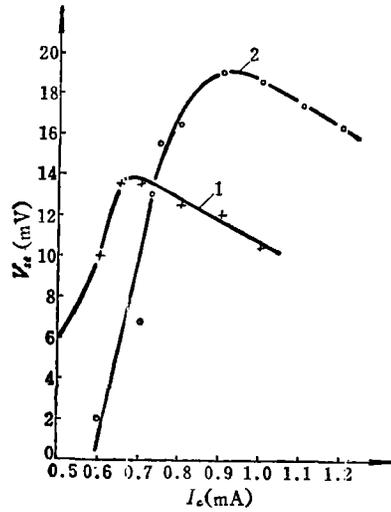


图 7 传感器上的磁敏三极管的 $V_{sc} = f(I_c)$ 实验曲线
1—1号磁钢; 2—2号磁钢。
Fig. 7 Experimental curve $V_{sc} = f(I_c)$ of transistor in transducer
1—No. 1 magnet. 2—No. 2 magnet.

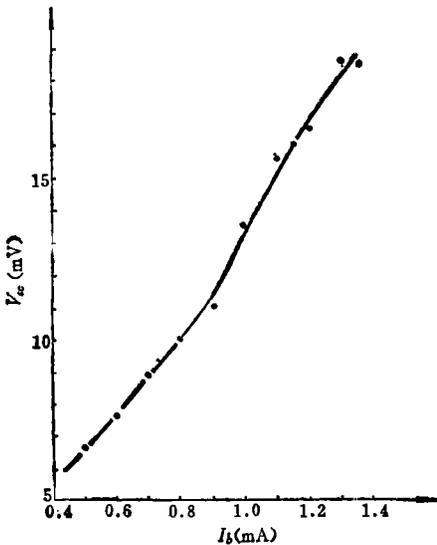


图 8 $R_c = 12.5k\Omega$ 时, 在传感器上的磁敏三极管的 $V_{sc} = f(I_b)$ 实验曲线
Fig. 8 Experimental curves $V_{sc} = f(I_b)$ of transistor in transducer as $R_c = 12.5k\Omega$

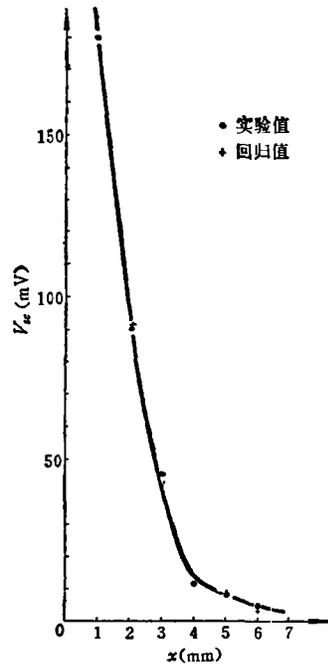


图 9 磁敏二、三极管组合的传感器的 $V_{sc} = f(x)$ 实验曲线
Fig. 9 Experimental curve $V_{sc} = f(x)$ of diode and transistor combined transducer

$$V_{sc} = 478.6 \times 0.44^x \text{ (mV)}$$

将 $x = 1, 2, \dots, 6\text{mm}$ 之值代入上式计算出来的传感器输出值 \hat{V}_{sc} (即回归值) 如图 9 中的小十字所示。由图可以看出回归值与实验值符合较好。

四、桥式线路的传感器

用两个二极管互补对装在同一个永久磁铁端面上, 做成一个桥式线路的传感器, 线路如图 10 所示。

这种传感器输出电压 V_{sc} 与它离齿轮齿顶的距离 x 的关系如图 11 的小圆点所示。由这些实验数据, 用平均选点法求出的经验公式为

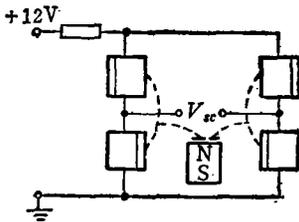


图 10 桥式线路传感器的线路图
Fig.10 Electrical circuit diagram of bridge circuit transducer

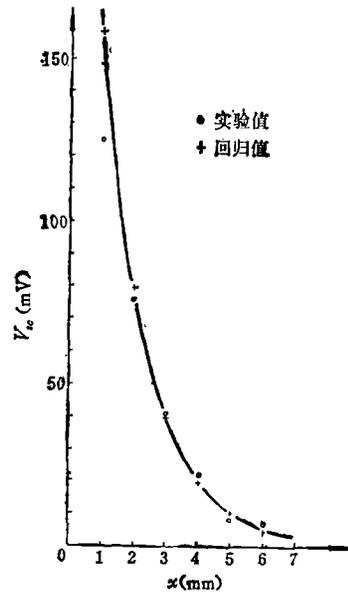


图 11 桥式线路传感器 $V_{sc} = f(x)$ 实验曲线
Fig.11 Experimental curve $V_{sc} = f(x)$ of bridge circuit transducer

$$V_{sc} = 316.2 \times 0.5^x \text{ (mV)}$$

由这式 (式中 x 用 mm 计) 计算而得的回归值如图 11 中的小十字所示。由图可以看出回归值与实验值也符合较好。

五、单磁敏三极管的传感器

单磁敏三极管传感器的线路如图 5 所示。实测 $V_{sc} = f(x)$ 曲线如图 12 中的小圆点所示。由这些实验数据求出的经验公式为

$$V_{sc} = 177 \times 0.514^x \text{ (mV)}$$

式中 x 以 mm 计。由这式计算而得的回归值如图 12 中的小十字所示。

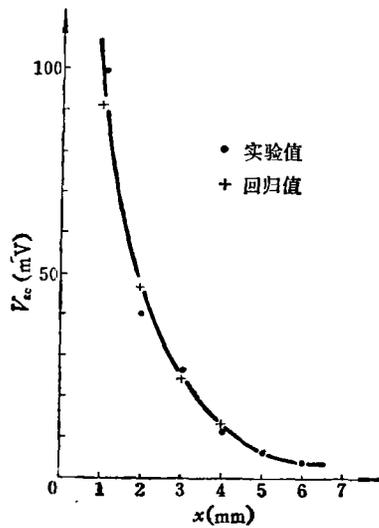


图12 单磁敏三极管传感器的 $V_{sc} = f(x)$ 实验曲线

Fig.12 Experimental curve $V_{sc} = f(x)$
of single transistor transducer

六、传感器测量转速时的特性方程式

文献〔1〕中讨论了这种传感器在作如下几种测量时的特性：（1）测量非导磁金属旋转体转速的特性；（2）测量小线位移的特性；（3）差动测量小线位移的特性；（4）作无接触开关时的特性。此处再补充说明测量齿轮（带孔或槽的盘或轴）转速时的特性。在测量齿轮转速时，传感器输出信号的频率为

$$f = \frac{Z}{60} \cdot N \text{ (Hz)}$$

式中 Z 为被测齿轮的齿数，或被测圆盘或转轴上的孔或槽的数目；
 N 为被测齿轮的转速 (r/min)。

传感器输出频率的最大误差为 1Hz，故传感器的精度（线性度亦同）为

$$A = \frac{6000}{ZN_{\max}} \%$$

式中 N_{\max} 为被测齿轮的最大转速。例如当 $Z=60$ ， $N=10000$ r/min 时，精度 $A=0.01\%$ 。

七、结 论

前面分别介绍了四种线路的传感器的实验结果。为了便于比较，现将四种传感器的测试数据和经验公式列于表 2。由 4 组实验数据和 4 个经验公式 $V_{sc} = V_m a^x$ 可以看出：二、三极管组合的传感器输出电压最高，它的经验公式中的 V_m 最大，单磁敏三极管的输出电压最小，其 V_m 最小。四个经验公式中二、三极管组合的传感器的经验公式中的 a 最小。 a 愈小表示输出电压 V_{sc} 随距离 x 增大而衰减愈慢。单磁敏三极管传感器的 a 最大。

另两种传感器居中。

表 2 四种传感器 $V_{sc}=f(x)$ 的实验数据与经验公式
Table 2 Experimental data and empirical formulas $V_{sc}=f(x)$
of four kinds of transducer

传感器离齿顶距离 (mm)		1	2	3	4	5	6	$V_{sc}=f(x)$ 的经验公式
输出电 压 V_{sc} (mV)	单磁敏三极管传感器	100	40	26	11	6.2	3.8	$V_{sc}=177 \times 0.514^*$
	二极管互补对传感器	120	55	32	13.5	8.4	4.0	$V_{sc}=234.4 \times 0.505^*$
	桥式线路传感器	125	76	40	21.5	8.5	6.2	$V_{sc}=316.2 \times 0.5^*$
	二、三极管组合传感器	180	90	45	14.5	7.6	4.0	$V_{sc}=478.6 \times 0.44^*$

参 考 文 献

- [1] 黄俊钦, 磁敏多功能固态传感器研究报告, 北京航空学院学报, 1980年1期, P. 83~102。
 [2] 黄俊钦, 平均选点法—求线性经验公式中常数的简易方法, 计量工作, 1976年6期, 中国计量科学研究院编。
 [3] 黄德星, 关于磁敏二、三极管理论的一些问题, 黑龙江大学学报, 1979年2期。
 [4] Woolvet, G. A., Transducers in digital systems, IEEE Control Engineering Series 3, Peter Peregrinus LTD, (1977).
 [5] Кабков, Г. Я., Рыбальченко, Ю. И., Бочковская, Р. Е., Сбитнев, В. В., Индукционные Тахометры, Измерительная Техника, No. 6, (1978), СТР. 43.
 [6] Косорин, Д. (ЧССР), Неуравновешенные Мосты Уитсона с Магнитодиодами и их Применение в Измерительной Технике, Измерительная Техника, No. 6, (1978), СТР. 70~72.
 [7] 电子技术 (日), 第24卷, 第5号, 1982。

MAGNET-SENSITIVE SOLID-STATE TRANSDUCERS WITH NEW ELEMENTS

Huang Junqin, Li Xingshan, Wang Zhan, Ma Mingfang
(Beijing Institute of Aeronautics and Astronautics)

Abstract

According to Ref. [1], four kinds of new magnet-sensitive solid-state transducers have been made with new elements (magnetic diode couple and magnetic transistor). They are (1) single magnetic transistor transducer, (2) magnetic diode couple transducer, (3) magnetic diode and magnetic transistor combined transducer and (4) bridge circuit of double magnetic diode couple transducer. Their practical circuits are described in this paper. Their performances are determined experimentally and compared in the form of experimental curves and empirical formulas. These four transducers are superior to the transducers given in Ref. [4~7] in multifunction and universality, especially in the ability to measure very low speed.