

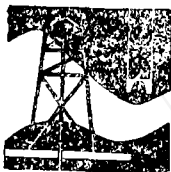
扭矩测量技术与TK型钻探扭矩仪

李国林 阮利民

(冶金部第一冶金地质勘探公司探矿技术研究所)

常用的电阻应变片式、扭转角式及磁弹性式扭矩仪,由于精度低、体积大、造价高等缺点,不适用于在钻机上使用。建立在非晶态合金材料基础上的TK型扭矩仪,有结构简单、测量精度高、体积小、工作可靠、无接触测量等优点,是钻机和其他机械行业的新型仪表。

关键词: TK型钻探扭矩仪; 非晶态合金; 磁致伸缩; 静态扭矩测量; 无接触式; 数字显示; 扭矩传感器分类



钻探技术

在工业生产和科学实验过程中,利用扭矩传感器监视或控制机械动力传递系统的扭矩,能使设备处于最佳运行状态,对于保证工作的高效性和可靠性,具有重要意义。因而,人们普遍重视扭矩测量技术的研究与仪器的使用。传统的扭矩仪有电阻应变片式、感应扭转角式、磁弹性式等,它们均存在着测试精度和可靠性较低、体积大、造价高等缺点,因而限制了其使用。目前,在各种力学量传感器的行列中,扭矩传感器是一个薄弱环节,它比拉(压)力和转速的测量要复杂得多。另外,当前岩心地质钻探中广泛采用的金刚石钻进技术,具有几百转甚至上千转的高转速,如果仍然依靠人的宏观感觉与经验来判断钻进工艺的状态,显然已不能满足金刚石钻进的要求。众所周知,钻杆所承受的扭矩是一个重要的钻进参数,它直接反映着钻孔内钻具的运行状态和钻头碎岩阻力变化。监视扭矩能保证孔内安全,减少或避免烧钻、埋钻、断钻等孔内事故,保证钻机的正常运行,提高纯钻率和台月效率。另外,利用传感器

与计算机配合,对钻探过程实行闭环控制,能实现最优化钻进和全自动钻进。为此,我们自1985年开始研制新型钻探扭矩仪,现已在非晶态合金材料的基础上,研制成TK型磁弹性扭矩传感器。它克服了现有各种传感器的缺点,具有测试精度高、使用方便、价格低廉等特点,具有很好的发展前景,给整个扭矩传感技术的发展带来了新的生机。

现有扭矩传感器概述

一、现有扭矩传感器简介

根据扭矩传感器的工作原理,可将其分为以下三种测量方法:

- | | | | |
|-----|---|-----------------------------|---------------------------|
| 传递法 | { | 变形型—— | 感应扭转角式扭矩传感器、光电式扭矩传感器等。 |
| | | 应力型—— | 磁弹性式扭矩传感器、磁饱和式扭矩传感器等。 |
| | | 应变型—— | 电阻应变片式扭矩传感器、磁性应变片式扭矩传感器等。 |
| 平衡法 | { | 电力测功机;
水力测功机;
电涡流测功机。 | |
| 能量法 | | | |

传递法是工程上最常见的测量方法,而

平衡法和能量法则由于测量精度低、体积大、很少被采用。所以,本文只介绍传递法的各种扭矩传感器。

1. 变形型扭矩传感器

这类传感器是通过测量转轴在承扭时的变形来测量扭矩。当一个等截面圆柱轴受扭后,受力和变形如图1所示。其扭转角 φ 可用公式(1)表示:

$$\varphi = \frac{M \cdot L}{G \cdot J_p} \quad (1)$$

式中: φ ——转轴的扭转角(弧度); M ——扭矩(千克力·厘米); J_p ——截面的抗扭惯性矩(厘米⁴); G ——转轴的抗扭杨式模量(千克/厘米²)。

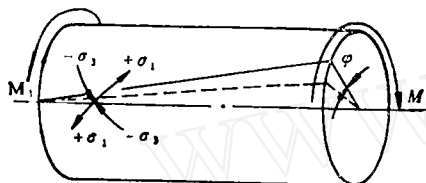


图1 扭转轴应力分布与变形

扭转轴的变形可以引起机械、电阻、电容、电感、光学、磁阻等参数的变化,从而形成各种应变型扭矩传感器,如常见的感应扭转角式和光电式扭矩传感器。

感应扭转角式扭矩传感器就属于变形型产品之一。其工作原理如图2所示。在转轴上安装两个齿轮,齿轮槽内安有数块永久磁钢,齿轮的外侧装有非接触式磁性开关。当磁钢通过开关时,开关便输出一个方波脉冲。当转轴所受扭矩为零时,两组脉冲的相位差亦为零;当转轴受扭时,转轴发生扭转

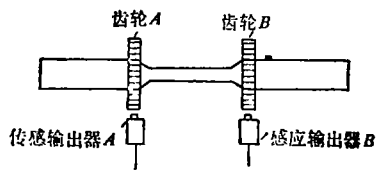


图2 感应扭转角式传感器

变形,两输出脉冲之间产生相位差(数量上正比于扭转角),由公式(1)可求出扭矩数值 M 。

扭转角式扭转传感器在国内外已商品化生产。如国内的ZJ型、JC型扭矩传感器,日本小野测器株式会社的DP型扭矩传感器,均属此类。这类传感器精度低,测量低速或静止转轴的扭矩比较困难;被测轴段需有缩颈状结构,致使轴的安全性下降;不能承受轴向压力;结构复杂,体积与重量大(20~80公斤);安装不便;造价也高。

2. 应力型扭矩传感器

这种传感器是通过测受扭轴的应力变化来表示扭矩。扭转轴表面的剪应力 τ 可用公式(2)来计算:

$$\tau = \frac{M}{W_k} \quad (2)$$

式中: W_k ——材料的截面抗扭模数(厘米³)。

扭转轴的应力变化可引起轴材料导磁率的变化,形成磁弹性扭矩传感器。这类传感器可称为应力型扭矩传感器。

磁弹性扭矩传感器的原理如图3所示。它将转轴本身作为敏感件,所以,测出其本身的导磁率变化,便可得知其所受扭矩。

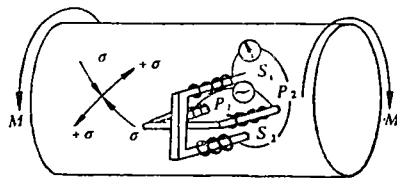


图3 磁弹性扭矩传感器原理图

磁弹性扭矩传感器的特点是实现了无接触测量,避免了复杂的引线装置;扭转轴无需改变外形结构。但是,由于转轴在制造中存在下述问题:①一般只注重机械性能,未考虑磁特性的均匀度问题,故直接影响到输出讯号的真实性。②轴体材料的导磁率低,输出讯号的灵敏度小,抗干扰性差。③轴体

属硬磁材料，磁化后不能完全去磁，造成输出讯号的回差大，重复性差。所以，该类传感器的精度仅为2~4%。为克服上述弊病，有人曾提出多极体传感器的结构方案，但结构复杂，体积大，造价高。

3. 应变型扭矩传感器

转轴受扭后，在与轴线成45°的方向上产生的主应变 ε_1 、 ε_3 分别为：

$$\varepsilon_1 = -\varepsilon_3 = \frac{\sigma_1}{E} = \frac{M}{E \cdot W_k} \quad (3)$$

式中： E ——扭转轴的杨氏模量（千克/厘米²）。由式(3)可得：

$$M = W_k \cdot E \cdot \varepsilon \quad (4)$$

转轴的应变可以引起贴在扭转轴表面的各种薄片的电阻、导磁率等参数的变化，形成应变型扭矩传感器。常见的电阻应变片式扭矩传感器即属这一类型(图4)。

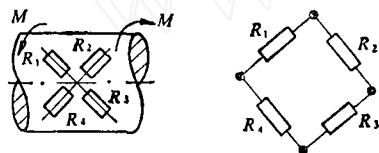


图4 电阻应变片式传感器

电阻应变片式扭矩传感器频率响应好，测量精度高。但在测回转速的扭矩时，存在应变片的引线问题，通常采用集流环引出信号。由于该方案是接触式结构，不适于高转速轴的扭矩测量，且结构也比较复杂。有人提出用无线电接收方式传递讯号，但势必要增设发射装置等。

二、钻探工作对扭矩传感器的要求

钻探工作属野外作业，环境温度变化大；井场有水或泥浆污染；工作机具处在剧烈的振动状态，钻具的扭矩值变化大且无规律性；钻机结构紧凑，难以找到安装扭矩传感器的适合空间；另外，井口钻杆(或立轴)是在受压(拉)、扭双重应力作用下工作的。因此，设计钻探扭矩仪必须考虑以下几个因素：①对钻探的工作环境有良好的适应能力

和较好的抗振性；②测量线性范围广；③仪器体积小，安装方便，最好能将扭矩传感器装在立轴下端，以真实地反映井内的扭矩变化；④能测量带有轴向压(拉)应力的轴的扭矩值。

根据上述四项要求来衡量现有的扭矩传感器，可以发现它们均有不相适应之处。例如：都不能适应野外的恶劣环境，都不能在承受轴向压力的轴件上测取扭矩等。所以，上述三大类扭矩仪迄今都未能满足钻探的要求，使得钻探工作中的扭矩测量问题，没得到很好解决。各岩心钻机的操作者只能凭经验来控制钻进扭矩的变化，因而难以防止各种事故的发生。

TK型磁弹性新式扭矩传感器

1. TK型扭矩传感器的结构原理

近十年来，非晶态合金材料在国外得到了快速发展。这种合金具有优良的力学与磁学性能。如强度高、频率响应好、导磁率高、磁致伸缩系数大等。所以，成为制做测量力学参数传感器的独特材料之一。

TK型扭矩传感器就是利用非晶态合金的磁致伸缩效应来完成应力——电讯号转换的。即当改变磁合金周围的磁场强度，则该合金发生形变；反之，施加外力使合金发生形变，则其导磁率也相应地发生变化。

图5是该传感器的结构原理图。在传动轴1上对称地装有两组环状非晶态合金薄带2，在轴的外侧设置一个线圈骨架3，与两组薄带相对应。骨架上绕有三组线圈4，绕在内层的为激磁线圈 N_0 ，它经激磁电源作用，在合金带周围将建立一个稳定的磁场。骨架外层侧绕制的测量线圈 N_1 、 N_2 ，成差动联接(图6)，所以能输出一个正比于扭矩的电压讯号。

在转轴不受扭矩时，1、2号薄带所处条件完全一致，其导磁率 μ_1 、 μ_2 相等，即

$$\mu_1 = \mu_2 = \mu_0 \quad (5)$$

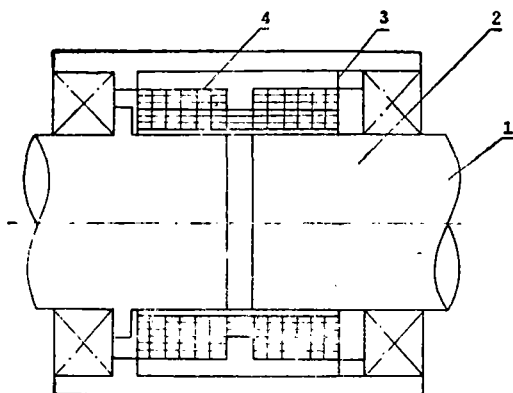


图 5 TK型传感器结构原理图

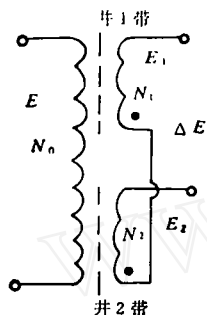


图 6 线圈接线示意图

其感应电动势 E_1 、 E_2 为:

$$E_1 = E_2 = A_0^* \cdot \mu_0 \quad (6)$$

所以, 差动联接后, 输出电压 $\Delta E (= E_1 - E_2) = 0$ 。

当扭转轴受扭矩作用时, 在与轴线成 $\pm 45^\circ$ 方向上(轴表面)将产生 ϵ_1 和 ϵ_3 的主应变。该应变必然使轴上的薄带也产生相应的应变。由于合金的正磁致效应, 即承受拉应力时, 导磁率增加; 承受压应力时, 导磁率减小, 且 $|\Delta\mu_1| = |\Delta\mu_2| = \Delta\mu$ 。于是, 两组检测线圈的感应电动势分别为:

$$\begin{aligned} E_1 &= A_0(\mu_0 + \Delta\mu) \\ E_2 &= A_0(\mu_0 - \Delta\mu) \end{aligned} \quad (7)$$

其差动输出值 ΔE 为:

$$\Delta E = E_1 - E_2 = 2A_0\Delta\mu \quad (8)$$

ΔE 与扭转轴所承受扭矩 M 的关系为:

$$M = K_0 \cdot \Delta E \quad (9)$$

式中: K_0 ——标定系数。

这就完成了一个测量过程, 该过程可用下面的关系式表示: 扭矩—应力—应变—导磁率—磁通量—输出电压。

2. TK扭矩传感器的技术特点

(1) 可测量静动态扭矩。该传感器是利用非晶态合金的磁致伸缩效应制成的, 只要转轴上有扭矩, 传感器就会有讯号输出, 所以能测量静、动态的扭矩。

(2) 扭矩的测量与转速无关, 二次仪表不需转速的补偿装置。

(3) 实现了无接触测量。该传感器不需要导电环装置, 无磨损件, 能测高速旋转轴上的扭矩, 可靠性高。

(4) 精度高(可达0.5%级), 线性范围宽(在满程的5~90%之内非线性度少于0.3%), 且稳定性好。

(5) 输出信号高, 抗干扰能力强, 满量程输出达千毫伏级, 无需放大就能直接显示或送计算机处理。

(6) 零位输出小, 无需调整就能进行正、反双向的扭矩测量。

(7) 在测量扭矩的同时, 能测量转速。

(8) 过载能力强, 安全性能好。传感器扭转轴采用恒弹性无滞后的高级精密合金材料, 用动载设计方式进行强度校核, 过载能力强, 耐冲击性好。

(9) 结构简单, 体积小, 重量轻。如测量范围为100千克·米的传感器, 只有5.5千克重(相当同规格扭转角式扭矩传感器重量的1/10), 成本低, 销售价仅相当其他扭矩传感器的1/5~1/4)。

(10) 安装方便, 可根据需要在任何角度安装。

(11) 能测量带有轴向压力的轴件上的扭矩值(如TKC型)。

TK型扭矩传感器的上述特点, 可使它

• A_0 为经数学推导的常数。

三种扭矩传感器的性能比较表*

项 目	型 号		
	TK—100	ZJ—100	DP—102
量程 (千克力·米)	100	100	100
精度 (%)	0.5	1	0.5
最佳测量范围 (千克力·米)	0~100	60~100	—
外形尺寸 (长×宽×高) (毫米)	190×87×119	370×210×324	530×260×210
重量 (千克)	5.5	60	40
比价	100	300~500	300~500

* 上海第二电表厂:《ZJ型转扭传感器使用说明书》; 日本小野测器株式会社:《1986年产品指南》。

适用于多种机械上的扭矩测量。例如,冶金、矿山、交通、轻纺、军工等部门的动力机和其他机械上的扭矩测量。该传感器更适用于现用钻机的扭矩测量。

3. 与国内外同类产品的比较

TK型扭矩传感器在国内是一个创新类型,该项技术在国外也正处在研究探索阶段。它的成功是扭矩测量技术上的一个重要突破。它所具有的诸多优点是其他传统型传感器所无法比拟的。它被利用于其他扭矩传感器不能使用的许多场合,特别是制作成本低,更增强了它的商品竞争性。表中列出了TK型传感器和其他两种传感器的6项指标对比内容。

4. TK型扭矩传感器的发展前景

扭矩传感器的发展,先后经历了电阻应变片式、扭转角式、力平衡式、磁弹性式等几种形式的应用与改进。这些装置大都是非电量电测技术的一部分。而非电量电测技术的关键就是将被测的非电量转化为电量的传感技术。随着现代科学技术的发展和设备仪器自动化程度的提高,扭矩传感器也日趋精密化、小型化、多功能化与智能化。

70年代末,新材料、新工艺的涌现,为扭矩传感器的进一步发展创造了条件。TK型扭矩传感器就是利用了这些新技术而研制成功的。它已成为80年代扭矩传感器发展的一个重要方向。

实践还将证明,随着新材料、新技术的不断发展,TK型扭矩传感器必然会得到进一步的提高与完善。例如:随着弹性扭转轴以及非晶态合金的力学和磁学性能改进,扭矩传感器的性能指标还会继续提高。另外,超导技术的发展及超导材料在传感器上的应用,会促使扭矩传感器的精度、灵敏度、稳定性等进一步提高。可以预料,新型扭矩传感器在钻探和其他技术领域内,将会得到广泛的应用。

参 考 文 献

- [1] K. Harada et. al.: M. Inoue: IEEE Trans, On Mang., MAG—18 1982, №6, p. 1967.
- [2] K. Mohri: IEEE Trans, On Mang, MAG—20, 1984, №5, p. 942.
- [3] 原田耕介: 电子技术, 日本九州大学, 1982, №4.
- [4] 张有颐:《转矩测量技术》, 计量出版社, 1986年.

Torque Measuring Technique and a New Type (Mark TK) Drill Torsion Meter

Li Guolin Ruan Limin

Owing to their low precision, large size and high cost, conventional torison meters of resistance strain, torsion angle or magnetoelastic types are not adoptable for drilling use. The Mark TK torsion meter, developed on the basis of amorphous alloy, simple in structure, small in size and of a high precision and reliable performance, is a non-contact torque measuring instrument for using in drilling and other mechanical engineering.