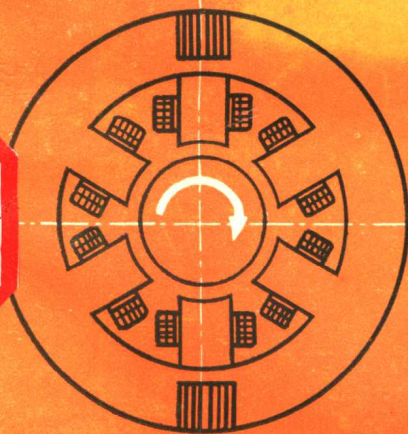


扭矩传感器

磁弹性

计量出版社

(苏) Ю. И. 雷巴利琴科 吴凤贞译 常健生校



磁弹性扭矩传感器

〔苏〕Ю.И.雷巴利琴科 著

吴凤贞 译 常健生 校

计量出版社

1985·北京

内 容 提 要

本书分析了不同类型磁弹性扭矩传感器的工作原理和装置及其敏感元件。叙述了这些传感器的理论及其实验研究结果。给出了在静态和动态工作情况下传感器参数的计算方法。指出了测量误差及减少误差的方法。提供了传感器产品参数和它们在不同工业装备中的使用说明。同时，还分析了与磁弹性扭矩传感器的工作原理和装置相类似的无触点磁弹性轴向力传感器。

本书可供各种工业装备自动控制系统的专业设计和工程技术人员使用。

МАГНИТОУПРУГИЕ ДАТЧИКИ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА

Ю.И. РЕБАЛТОВИЧЕВ

《МАШИНОСТРОЕНИЕ》1985

磁 弹 性 扭 矩 传 感 器

〔苏〕Ю.И. 雷巴利奇科 著

吴凤贞 译 常健强 校

责任编辑 杨康佳

—

计量出版社出版

(北京和平里11区7号)

北京计量印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

—

开本 787×1092 1/32 印张 4 7/8

字数 195 千字

印数 1—8 000

1985年10月第一版

1985年10月第一次印刷

统一书号 15210·446

定价 1.30 元

序 言

各种有效而可靠的工业自动控制装置和工艺过程，均以有效而可靠的自动化工具为基础。在诸多自动化工具中，居于首位的是工艺过程中的各种参数传感器。由机器和机构转轴输出的扭矩，属于表征各种生产过程的参数，按照其值可以推测它们的利用率及判断事故状态的发生。

轴上的扭矩在大多数情况下可简单地用磁弹性扭矩传感器 (МДМ)* 进行测量，而轴上的轴向力则须用无触点磁弹性轴向力传感器进行测量。这种传感器的一些类型与被测轴间没有机械和电的接触，其输出信号有较大的功率且输出特性为直线性。这些传感器的结构非常简单并能在繁重的工作条件下可靠地工作，所以在船舶动力装置、轧钢机、钻孔机、数字程序控制金属切削机床、燃汽轮机以及造纸工业等等之中都获得了广泛的应用。

1865年威利 (Виллари) 首次叙述了磁弹性现象⁽⁵⁾。反磁致伸缩现象于1842年由焦耳 (Джоули) 所发现。在磁弹性效应基础上研制了磁弹性扭矩传感器。

苏联的科研机构 and 外国商行对磁弹性扭矩传感器都进行过深入地研究。对磁弹性扭矩传感器进行过研究的苏联和外国学者有：Б.Б.季莫费耶夫、Я.Я.汤姆森、Н.Е.雅托宾、В.Б.津兹布鲁格、С.Д.列维托夫、А.М.鲍里索夫、В.И.斯塔夏克、О.达列 (О. Dahle)、Г.迈尔斯 (H. Myers)，E.

* МДМ为Магнитоупругие Датчики Крутящего Моментa的缩写

——译者注

安盖特 (E. Angeid)、Ф.Е.斯科普 (F. E. Scoppe) 和其它学者等。

在国外第一台磁弹性扭矩传感器是1954年由 R. A. 贝思 (R. A. Beth) 研制成功的^[54], 而在苏联则是在 1957 年由 M. A. 科鲁格利科夫研制成功的 (苏联发明证书第112899号)。近年来, 无论是在苏联还是在其它国家, 都曾提出了许多新颖的磁弹性传感器结构, 但是由于它们存在这样或那样的缺点并没全部得到推广。最成功又最为普及的结构是显极十字型的磁弹性扭矩传感器 (美国发明专利2895331号) 以及随之代替它的显极环型磁弹性扭矩传感器 (美国发明专利第3011340号)。这种结构的传感器在苏联文献中称为环形器 (Тордуктор)。带有Π型磁路的磁弹性扭矩传感器是环形器的变相结构 (苏联发明证书第148932号)。

对环形器结构一些缺点的进一步改进发展成为有双测量极的显极磁弹性扭矩传感器, 这种传感器下面将称为差动环形器 (Дифференци-альный тордуктор) (苏联发明证书第214141号)。它和显极环型变压器式磁弹性扭矩传感器 (美国发明专利第3340729号, 苏联发明证书第614343号) 一样得到了广泛的应用, 这种传感器在书中称为变压器式环型器 (Трансдуктор)。

显极环型无触点磁弹性轴向力传感器是 B. C. 米哈伊洛夫和 A. И. 索洛多夫尼科夫于1961年研制的 (苏联发明证书第142445号)。这种传感器的结构和工作原理与磁弹性扭矩传感器环型器相似, 它与转轴间没有电和机械的接触, 在船舶发动机装置中用来测量螺旋桨推进器的阻塞状态^[25]。

上面所提到的磁弹性扭矩传感器和轴向力传感器的类型在各种工业装备中都获得了实际应用。大多数研究人员在他们所从事的工作中对这些类型的仪器都进行着研究。同时,

出现了一系列理论问题、计算方法问题和对实际应用研究不充分而使一些传感器的结构不合理以致难于应用的问题。分散刊登在各种期刊和论文集中的有关不同类型的磁弹性扭矩传感器和轴向力传感器的原理和一些实际问题难于阅读和研究。

作者编写本书的目的是总结现有有关磁弹性扭矩传感器和轴向力传感器的资料，阐述它们的工作原理和计算方法，概括它们在各种工业装备中应用的实践。

本书应用的公式中所有数值，全是以基本的和辅助与派生的国际单位制 (SI) 表示。

符 号 说 明

- α ——磁弹性扭矩传感器 (МДМ) 转轴磁导 $G_{B..}$ 区段的平均长度与平均宽度之比;
- β ——磁弹性扭矩传感器转轴磁导 $G_{H..}$ 区段的平均长度与平均宽度之比;
- γ ——差动环型器转轴磁导 G_{H_0} 区段的平均长度与平均宽度之比;
- $\Delta\mu$ ——由磁弹性效应产生的磁导率的增值;
- $\Delta\mu_H$ ——由磁弹性效应作用在磁阻 $R_{H..}$ 区段转轴材料的磁导率的增值;
- δ_B ——激磁极下单侧气隙;
- δ_H ——测量极下单侧气隙;
- μ ——转轴材料磁导率;
- μ_0 ——磁常数;
- μ_B ——环型器在磁阻 $R_{B..}$ 区段转轴材料的磁导率;
- μ_H ——环型器在磁阻 $R_{H..}$ 区段转轴材料的磁导率;
- μ_H ——当 $\sigma = 0$ 时, 转轴材料磁导率的初始值;
- $\mu_{B..}$ ——差动环型器在磁阻 $R_{B..}$ 区段转轴材料的磁导率;
- $\mu_{H..}$ ——差动环型器在磁阻 $R_{H..}$ 区段转轴材料的磁导率;
- μ_{H_0} ——差动环型器在磁阻 R_{H_0} 区段转轴材料的磁导率;
- σ ——转轴材料中的法线机械应力;
- $\sigma_{\max}, \sigma_{\min}$ ——转轴材料中法线机械应力的最大值和最小值;
- τ ——转轴材料中的切向应力;

- τ_p ——极节距；
- τ_1 ——变压器式环型器与差动环型器的前极距；
- τ_0 ——差动环型器的极距；
- $\Phi_{B..}$ ——在激磁极中的磁通；
- $\Phi_{B\delta}$ ——在激磁极下气隙中的磁通；
- $\Phi_{H..}$ ——在测量极中的磁通；
- $\Phi_{H..}$ ——磁弹性扭矩传感器测量磁路磁轭中的磁通；
- $\Phi_{H.}$ ——差动环型器测量磁路磁轭中的均衡磁通；
- $\Phi_{B.}$ ——泄漏磁通；
- $\Phi_{B..}$ ——激磁极下气隙磁通的瞬时值；
- $\Phi_{H..}$ ——测量磁极中磁通的瞬时值；
- $\Phi_{H.0}$ ——差动环型器的磁阻 $R_{H.0}$ 中的磁通瞬时值；
- $\Phi_{H.}$ ——测量绕组磁极线圈磁链的瞬时值；
- ω ——激磁电流的角频率；
- ω_R ——转轴旋转频率；
- a_B ——转轴表面上垂直于转轴轴线方向的激磁极投影尺寸；
- a_H ——转轴表面上垂直于转轴轴线方向的测量磁极的投影尺寸；
- b_B ——在转轴表面上沿着转轴轴线方向的激磁极投影尺寸；
- b_H ——转轴表面上沿着转轴轴线方向的测量磁极投影尺寸；
- $b_{B..}$ ——磁弹性扭矩传感器转轴磁导 $G_{B..}$ 区段平均宽度；
- $b_{H..}$ ——变压器式环型器转轴磁阻 $R_{H..}$ 区段平均宽度；
- $b_{H.}$ ——磁弹性扭矩传感器转轴磁导 $G_{H.}$ 区段平均宽度；
- $b_{H.0}$ ——差动环型器转轴磁导 $G_{H.0}$ 区段平均宽度；
- b_0 ——转轴表面上沿转轴轴线方向上的激磁极和测量极投影间的距离；
- C_d ——计算差动环型器时所用的常数；
- E_H ——测量绕组电动势的有效值；

- $e_{H..}$ ——测量绕组磁极线圈中电动势的瞬时值；
 $F_{B..}$ ——激磁极的磁动势；
 f ——激磁电流的频率；
 $f_{B..}$ ——激磁极对磁动势的瞬时值；
 $f_{H..}$ ——磁弹性扭矩传感器转轴磁阻 $R_{H..}$ 磁势降的瞬时值；
 G ——转轴材料的剪切模量；
 $G_{B..}$ ——磁弹性扭矩传感器激磁极投影间转轴区段的磁导；
 $G_{H..}$ ——磁弹性扭矩传感器测量极与激磁极投影间转轴区段的磁导；
 G_{H0} ——差动环型器测量极投影间转轴区段的磁导；
 H ——磁场强度；
 h ——转轴体内磁通穿透的平均深度；
 I_B ——激磁绕组磁极线圈中电流的有效值；
 I_H ——测量绕组电流的有效值；
 i_B ——激磁绕组磁极线圈中电流的瞬时值；
 J_p ——转轴横截面惯性极距；
 K_H ——转轴材料磁弹性灵敏度；
 $l_{B..}$ ——磁弹性扭矩传感器转轴磁导 $G_{B..}$ 区段的平均长度；
 $l_{H..}$ ——变压器式环型器转轴磁阻 $R_{H..}$ 区段的平均长度；
 $l_{H..}$ ——磁弹性扭矩传感器中转轴磁导 $G_{H..}$ 区段的平均长度；
 l_{H0} ——差动环型器中转轴磁导 G_{H0} 区段的平均长度；
 M ——扭矩；
 p_B ——激磁极对数；
 $R_{B..}$ ——磁弹性扭矩传感器中激磁极投影间转轴区段的磁阻；
 $R_{B..}$ ——磁弹性扭矩传感器中激磁磁路的磁阻；
 $R_{B..}$ ——激磁极的磁阻；

- $R_{B.s}$ ——激磁磁路磁轭的磁阻；
 R_{B0} ——激磁极下空气隙磁阻；
 $R_{H.s}$ ——磁弹性扭矩传感器中激磁极与测量极投影间转轴区段的磁阻；
 $R_{H.m}$ ——测量磁路材料的磁阻；
 $R_{H..}$ ——测量磁极的磁阻；
 $R_{H.s}$ ——测量磁路中磁轭的磁阻；
 $R_{H\delta}$ ——测量磁极下空气隙磁阻；
 R_{H0} ——差动环型器测量磁极投影间转轴区段的磁阻；
 r ——差动环型器和变压器式环型器测量线路的电阻；
 r_H ——测量绕组的有效电阻；
 r_H ——负载的有效电阻；
 S_H ——差动环型器的灵敏度；
 S_T ——环型器的灵敏度；
 $S_{T,}$ ——变压器式环型器的灵敏度；
 S_B, S_H ——转轴表面上对应于激磁极与测量极的投影面积；
 t ——时间；
 U_A ——负载电阻上的整流输出电压；
 U_H ——测量绕组电压；
 U_0 ——测量线路负载电阻 r 上的差动环型器和变压器式环型器的整流电压；
 W_p ——转轴横截面阻力矩；
 w_B ——激磁绕组磁极线圈匝数；
 w_H ——测量绕组磁极线圈匝数；
 x_H ——测量绕组感抗；
 y_H ——差动环型器磁极投影和极距投影尺寸间的函数；
 y_T ——环型器磁极投影和极距投影尺寸间的函数；
 z_H ——测量绕组全阻抗。

目 录

序言	(1)
符号说明	(1)
第一章 磁弹性扭矩传感器的工作原理及其装置	(1)
一、磁弹性扭矩测量法的物理基础	(1)
二、磁弹性扭矩传感器的类型	(7)
三、磁弹性扭矩传感器在机器和机构中的安装	(14)
四、磁弹性扭矩传感器敏感元件的计算	(17)
第二章 环型器工作分析	(23)
五、磁路的替换电路	(23)
六、基本方程	(27)
七、无偏心旋转时磁各向同性轴的灵敏度	(33)
八、有偏心旋转时磁各向异性轴的灵敏度	(41)
九、具有圆截面磁极的环型器	(43)
十、具有 Π 型测量磁路的环型器	(46)
第三章 差动环型器工作的分析	(48)
十一、磁路的替换电路	(48)
十二、测量绕组的电动势	(52)
十三、无偏心旋转时磁各向同性轴的基本方 程和灵敏度	(54)
十四、有偏心旋转时磁各向异性轴的基本方 程和灵敏度	(61)
十五、带有圆截面磁极的差动环型器	(63)
十六、变压器式磁弹性扭矩传感器	(66)
十七、磁弹性扭矩传感器的差动测量线路	(71)
第四章 磁弹性扭矩传感器的动特性及误差	(74)
十八、结构图和传递函数	(74)

十九、磁弹性扭矩传感器的误差	(85)
第五章 磁弹性扭矩传感器的实验研究和基本计算	(89)
二十、试验台	(89)
二十一、磁弹性扭矩传感器参数间的实验关系	(95)
二十二、差动环型器的计算	(97)
第六章 磁弹性扭矩传感器在工业设备中的应用	(108)
二十三、磁弹性扭矩传感器的工业模型	(108)
二十四、船舶发动机工作效率的检测	(116)
二十五、轧钢机转轴扭矩的测量	(118)
二十六、金属切削机床动力切削参数的测量	(123)
二十七、磁弹性扭矩传感器在其它工业装备 中的应用	(128)
第七章 无触点磁弹性轴向力传感器	(130)
附录	(138)
参考文献	(141)

第一章 磁弹性扭矩传感器的 工作原理及其装置

一、磁弹性扭矩测量法的物理基础

磁弹性的物理现象是当铁磁材料在受到力作用时在其内部产生机械应力所引起的磁场强度的变化。逆磁弹性效应是磁致伸缩，它是一种当铁磁材料的磁场强度发生变化时，在其上产生机械变形和应力变化的现象。这些现象存在于大部分铁磁材料之中。

物质的铁磁特性表现在其原子的构成有自然产生磁化强度区域（磁畴）的能力。这可用来说明现代铁磁理论和一系列铁磁材料的特殊性质，如磁弹性现象^[2,5]。在物质中原子的电子是基本载磁子（磁子）。在物质的原子中可能有不充满的外壳层和亚外壳层，带有不完整的原子壳的物质有顺磁性和强磁性。铁磁性存在的条件之一是具有在不充满的原子壳间发生欠补偿的转矩，在原子的转矩间作用着帮助它们趋向于一个方向的与热运动方向相反的力。相互作用力的存在可用物质的相邻原子间电子的交换来解释，电子的这个电能叫做交换能，而电的相互作用力称为交换力。

当物质中原子间的相互距离远远大于晶体内部原子间的距离时，交换力非常小而不会有铁磁性。当原子靠近时这个力增强，迫使相邻原子的电子转矩相互平行排列，产生铁磁状态。当原子间达一定距离时交换力达某最大值，然后开始减小，以致到零。当继续接近时电子自旋呈现出非并列状态，

而且这种旋转定向于一些物质之中，从能量角度看是很有益的（铬、锰）。对于铁、钴和镍在晶格中原子间距离与不充满的原子壳半径的比在3—4之间。

在常温下，如果没有外磁场作用的时候，某区域交换力保持电子旋转的平行性时即称为自然发生的磁化强度区域（磁畴）。铁磁物质是很多这种磁畴的堆积体，每个磁畴在任一方向都可磁化到饱和。所有这些磁畴的磁化强度在没有外磁场的情况下其向量和为零，且铁磁材料表面上不磁化。在实际结晶里区分铁磁材料的是磁的各向异性和不同的结构以及化学多相性的磁畴。

原子相互作用的磁能按其结晶的方向的不同其大小也不一样，因此，磁畴磁距的排列在物质结晶的某一方向要比另一方向有利得多（这种现象被称为易于磁化或易于磁化的方向）。具有这种各向异性的是天然磁的各向异性结晶。若有机械变形时，晶格的原子在正常状态下移动会导致结晶中磁的相互作用的特性发生改变，从而在结晶的各向异性上又加入了弹性各向异性，它将引起由于机械变形，晶格畸变而产生附加磁的原子相互作用。

当晶体轴定向为随机性质时，磁各向异性不明显。在某种形式的机械加工（轧制）下，多晶体内的个别晶体轴就会沿某一方向优先排列，这样，不同方向磁的性质也就不同。

放在磁场中的铁磁体会发生磁畴磁距的重新排列，其结果将引起铁磁体的总磁化强度的增加。在弱磁场中，考虑到具有不利于磁矩方向的相邻区域，带有磁矩方向的磁畴的增长相对于外磁场是有利于磁矩动能的增长的。这种过程的机理基于自发磁化区域之间界限的移动，故这种过程称为界限移动过程。

在较强磁场中界限的位移即为产生磁畴磁矩跟随磁场方

向旋转的过程。当磁畴磁矩完全与磁场方向一致时便达到了技术饱和，这种情况下的技术饱和值等于自发磁化强度 I_s ，而带有磁场强度为 H_0 的磁场为饱和磁场。

最后阶段称为双过程。它是由处在内磁畴中单个电子转矩的定向促使磁化强度增加的，从而使这里的技术饱和趋向绝对饱和。

这样，在铁磁材料晶体中，有利于磁化强度的方向可确定为：a) 磁晶体各向异性能量 W_k ；b) 磁弹性能量 W_d ；c) 外磁场能量 W_H 。

如果磁晶体各向异性的能量很小或磁弹性应力达到那样高值即能量 W_k 与能量 W_d 相比可以忽略时，则磁弹性应力可用在旋转区域中的磁化强度曲线进程来确定。

铁磁性材料可分为正磁致伸缩和负磁致伸缩两组。在第一组铁磁材料中，其磁化强度随机械拉伸应力的增加而增加，而材料本身在这种情况下是增长的。在第二组铁磁材料中随拉应力增加而减少，而其本身在这种情况下则是缩短的。

铁是一种依赖于磁场强度和磁化过程而产生既具有正的磁致伸缩而又有负的磁致伸缩的材料，也就是说受内应力和磁的各向异性的影响，是由热、热力和热磁的加工方式所决定的[5, 8, 15, 18]。

弹性应力过程是使自发磁化强度变向的过程，因为在该种情况下磁畴自发磁化强度方向的改变是不可逆的，故产生磁滞现象。

在铁磁材料中由于弹性变形形式的不同磁化强度能够承受很多种变化的作用。例如，扭转时扭力变形与轴成 45° 角时，有利于磁畴磁化强度方向的产生。可以利用铁磁材料的磁弹性特性构成测量变形、压力和扭矩传感器。

磁弹性扭矩传感器属于变形测量的扭矩计[47]，它利用

的是在磁性材料转轴上施加扭矩的情况下，机械应力变化时磁化强度亦变化的现象；在磁场强度不变时磁化强度的改变就象在机械应力的作用下转轴材料磁导率的变化一样。因此可以得出，磁弹性扭矩传感器的结构及其工作原理是基于轴的应力特性。

在扭转时轴的断面处可获得切向应力，该应力的方向在每一点都与此点引向断面中心半径相垂直。每一点切向应力的值都与从中心到此点的距离成正比，因此，在轴的表面上这些应力会有最大值。切向应力可由下式求出：

$$\tau = \frac{M}{W_p} \quad (1)$$

式中：M——扭矩； W_p ——转轴横截面阻力极距。

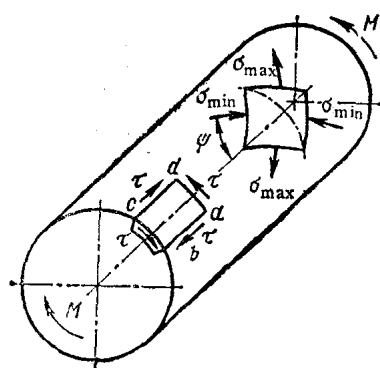


图 1 在转轴表面单元面积上应力状态

同样，切向应力（对应于切向应力成偶定解）的产生是通过纵向轴的径向平面，所以，单元平行六面体abcd(图1)在轴表面上是处于纯剪切平面应力状态。在这种情况下，转轴表面的任何单元平面的法向应力值都符合平面应力状态理论（图1和图2）：

$$\sigma = \sigma_x \cos^2 \psi + \sigma_y \sin^2 \psi + \tau_x \sin 2\psi$$

式中： σ_x 、 σ_y ——对应于界面处平行于x轴和y轴的法向应

力(x 轴与转轴平行);
 τ_x ——平行于 x 轴的切向应力; ψ ——应力 σ 方向与 x 轴的夹角。

由于在纯扭转情况时转轴材料处于纯剪切状态, 则应力 $\sigma_x = \sigma_y = 0$ 。如果算出与 x 轴之间的夹角 ψ (图2), 则 $\tau_x = \tau$ 且在我们感兴趣的转轴表面上单元平面边缘处的法向应力为:

$$\sigma = \tau \sin 2\psi \quad (2)$$

从公式 (2) 可得, 法向应力的最大值将出现在 $\psi = 45^\circ$ 时, 在此种情况下 (见图2),

$$\sigma_{\max} = |-\sigma_{\min}| = |\tau| = \frac{M}{W_p}$$

磁弹性扭矩传感器任何结构的产生都应考虑到最大和最小法向应力 (主要应力) 值的作用方向, 也就是说, 转轴材料磁导率相对的最大变化方向与转轴成 45° 角。对于具有正磁致伸缩的材料在转轴的任何区段, 当主要是以拉伸应力 ($\sigma_{\max}$) 作用时其磁导系数将增加, 而在转轴的任何区段, 当主要是以压缩应力 ($\sigma_{\min}$) 作用时其磁导系数将减小。而在负磁致伸缩的情况下, 磁导系数的变化恰与上述相反。

我们分析了在主应力 $\sigma_{\max}$ 和 $\sigma_{\min}$ (见图1) 作用下转轴磁导率变化的特性, 在参考文献[16]中由20号钢制成的平行六面体的试样中得到了这种依从关系 (图3)。在恒定磁场强度 H 的作用下, 此时对磁导率的测量即可在拉伸应力作用

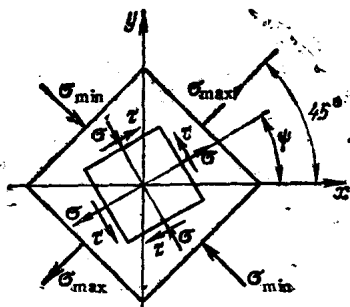


图2 实验材料的切向和法向应力在单元面积上平面应力状态