



压磁式测力传感器

石延平 著

Yacishi

Celi Chuanganqi

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

总策划
剑
枫

责任编辑 关湘雯

执行编辑 吉美丽

封面设计 肖新生

压磁式测力传感器

淮海工学院出版基金资助

ISBN 7-81107-260-2



9 787811 072600 >

ISBN 7-81107-260-2 / TH·5 定价: 28.00 元

压磁式测力传感器

石延平 著

中国矿业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

压磁式测力传感器/石延平著. —徐州:中国矿业大学出版社, 2005. 12

ISBN 7-81107-260-2

I. 压… I. 石… I. ①力传感器—研究②力传感器—设计 N. TH823

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 015735 号

书 名 压磁式测力传感器

著 者 石延平

责任编辑 关湘雯

执行编辑 吉美丽

责任校对 张海平

出版发行 中国矿业大学出版社

(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

排 版 中国矿业大学出版社排版中心

印 刷 赣中印刷有限公司

经 销 新华书店

开 本 850×1168 1/32 印张 6.5 字数 170 千字

版次印次 2005 年 12 月第 1 版 2005 年 12 月第 1 次印刷

定 价 28.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

在机械工程中,应力(应变)、拉(压)力和扭矩是很重要的物理量,这些物理量的准确测量对保证设备安全运行、实现自动控制以及为设计者提供合理的设计计算依据都有着重要意义。能够用于测力的传感器有很多类型,如按照工作原理分,测力传感器可分为电阻式、电感式、电容式、磁电式、压电式和压磁式等。这些测力传感器都因其不同特点而在实际测力过程中获得不同程度的应用。

压磁式测力传感器是利用铁磁材料在外力作用下在其内部产生的应力使材料的磁导率发生变化的压磁效应,把作用力变换成电信号输出。利用压磁效应实现测力的思想早在 20 世纪 50 年代就被提出来了。苏联在将压磁效应应用于扭矩测量方面开展了大量的研究工作,而日本将这种磁测法作为无损检测方法应用于焊接件的残余应力测定。近年来,这种传感器因为具有输出功率大、抗干扰能力强、过载性能好、结构与测量电路简单、操作方便快捷、能在恶劣环境下工作以及可实现非接触在线测量等特点而受到广泛关注。

本书基于实用的目的,首先论述了压磁式测力传感器的基本磁学理论,其次,分压磁式应力传感器、压磁式压(拉)力传感器、压磁式扭矩传感器三种类型,比较详细地介绍了它们的基本结构、工作原理、主要性能参数以及模拟和实测试验过程,最后还对应用非晶态合金实现辅助测力,以便提高压磁式测力的精度和灵敏度进行了理论和试验探讨。

本书的撰写,参考了大量的有关铁磁学理论、测试技术、压磁效应研究等有关方面的文献,谨向文献作者表示谢意!

在本书撰写过程中,得到了作者的导师、同事和朋友们的热情帮助和大力支持;本书的出版得到淮海工学院学科建设基金的资金;写作和出版过程中得到中国矿业大学出版社、淮海工学院学术期刊社的大力支持,在此一并表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,书中难免有不少缺点、错误,敬请读者批评、指正。

作 者
2005年3月8日

目 录

前言	1
第一章 绪论	1
第一节 机械工程中检测力的意义及常规方法	1
第二节 磁测应力法简介	2
第三节 压磁测力法的基本形式	3
第二章 铁磁材料的基本磁特性	8
第一节 物质磁性的起源	8
第二节 物质磁性分类	9
第三节 物质的自发磁化与磁畴结构	11
第四节 铁磁材料的技术磁化	14
第五节 本章小结	23
第三章 应力(应变)对铁磁材料磁化过程中磁特性的 影响机理	25
第一节 磁致伸缩效应	25
第二节 压磁效应——应变(应力)对磁化的影响	29
第三节 本章小结	49
第四章 磁测试验装置及基本验证实验	52
第一节 磁测传感器设计	52

第二节	磁测系统设计	66
第三节	验证性实验	67
第四节	传感器的输出特性及其变化规律	86
第五节	本章小结	91
第五章 弹性状态时磁测信号与应力关系数学模型的确定 ...		93
第一节	引言	93
第二节	单向应力状态下磁测输出信号与应力的关系 ...	97
第三节	平面应力状态下磁测输出信号与 应变的关系	101
第四节	纯剪切状态下磁测输出信号与应变的关系	112
第五节	本章小结	114
第六章 压磁式压(拉)力传感器		116
第一节	压磁式压(拉)力传感器的工作原理 及基本形式	116
第二节	压磁式压(拉)力传感器的基本构造 及其制造工艺	120
第三节	压磁式压(拉)力传感器的励磁参数 确定及误差分析	124
第四节	本章小结	127
第七章 压磁式扭矩传感器		128
第一节	引言	128
第二节	压磁式扭矩传感器的基本类型和工作原理	130
第三节	交叉铁心压磁式扭矩传感器的工作分析	134
第四节	本章小结	142

第八章 基于非晶态合金的辅助磁测应力法研究	144
第一节 引言	144
第二节 非晶态合金的类型及基本特性	147
第三节 利用非晶态合金薄带辅助磁测应力的基本原理	155
第四节 基于非晶态合金薄带进行辅助应力测试的试验	160
第五节 本章小结	170
第九章 工程应用研究——轨道车辆测重	173
第一节 国内外轨道车辆测重的现状	173
第二节 基于压磁效应动态测重的原理	179
第三节 轨道模拟测重试验	182
第四节 实测试验	187
第五节 本章小结	190
参考文献	192

第一章 绪 论

第一节 机械工程中检测力的意义及常规方法

在机械工程中,对力(包括应力和扭矩)的测量非常重要。通过对设备和构件所受力的测量,可以分析和研究零件、机构或结构的受力状况和工作状态,确保动力的合理传递和使用;也可以验证设计计算结果的正确性,确定整机工作过程中的负载谱和研究某些物理现象的机理;另外,在一些自动控制或测量系统中,需要把力作为自动控制信号。

在现代化的生产中,设备的可靠性对生产力及经济效益有着举足轻重的影响。许多设备尤其是一些大型设备如大型轧钢机、发电机、采煤机、风机等都要求连续工作,其停机造成的经济损失是难以估计的。这些设备的关键部位往往承受着大载荷的作用,因此需要对这些关键部位进行实时载荷测量,以了解它们的实际工作情况,进行故障的预测,以便采取相应的措施和方法,避免事故的发生。所以近代新型测力传感器,特别是适用于在线动态力测量的力传感器,已成为生产过程自动化不可缺少的装置。

另外,在进行机械和结构强度设计时,尽管可以借助于计算机,应用有限元及其他数值方法进行强度计算,但往往由于结构形状和实际荷载条件的复杂性,并且假设的简化条件与实际情况也有出入,所以采用力学理论进行分析计算必然会存在一定误差。如果根据在线实时检测获得的载荷信息进行分析,显然会得到更准确的结果,同时也可以验证理论分析的正确性。

综上所述,力的测量对发展设计理论、保证安全运行以及实现自动检测、自动控制等都具有重要的意义。

常用的测力方法大致有下列几种:

(1) 用已知重力或电磁力去平衡被测力,从而直接测得被测力。

(2) 通过测量一个在被测力作用下的已知质量的物体的加速度来间接测量被测力。

(3) 通过测量由被测力产生的液体压力来测得被测力。

(4) 当被测力张紧一震动弦,该弦的固有频率将随被测力的大小而改变。通过测量该频率的变化来测得被测力。

(5) 通过测量在被测力作用下某弹性元件的变形或应变来测得被测力。

上述测力方法,大部分用于静态力或缓慢变化力的测量。但最后一种方法可适用于静态力或频率数千赫以下的动态力的测量,因而是一种应用极广泛的测力方法。根据所使用测力传感器的工作原理,这种测力法可分为电阻式(应变式、压阻式和电位器式)、电感式(压磁式)、电容式、磁电式(霍尔式)、压电式、表面声波、光纤、薄膜(连续膜)等。在各种工程静态测试中,这些测力法都有应用,且已经非常成熟,能够获得足够的精度。但对于要求快速、简捷的在线非接触的动态测试,上述方法仍显不足。因此,有必要研究新型的测试手段及仪器设备。

第二节 磁测应力法简介^{[1~23][66~67]}

大量的实验和理论研究表明,铁磁材料在一定条件下能产生各种效应,如磁—力、磁—光、磁—热、磁—电、磁—声等效应。利用这些效应,对某些物理量(如磁场、电流、压力、温度、位移等)进行测量,已经构成一门学科,称为传感器磁学(Sensormagnetics)。近

年来对传感器磁学的研究方兴未艾,磁测应力法就是其中的一个分支。当构件受应力作用时其内部磁性就会发生变化,感应磁性变化从而检测应力变化,这就是磁测应力法的基础。它包括磁巴克豪生效应法(Magnetic Barkhausen Effect)、磁声发射法(Magnetic Acoustic Emission)、磁滞回线法(Magnetic Hysteresis)、剩磁法(Remanent Magnetization)、磁感声速变化法(Magnetic Induced Velocity Change)、磁粉探伤(Magnetic Particle Inspection)、涡流检测法(Eddy Current Method),以及基于逆磁致伸缩效应(或称特拉维夫效应)的磁各向异性法(Magnetic Anisotropy Sensor Method)。

以下所述磁测应力法就是特指这种磁各向异性法,或称压磁测力法。所谓磁致伸缩效应是指,磁性材料在恒定磁场作用下,产生机械应变和应力的现象;反过来,磁性材料在机械应力的作用下,其磁特性也会发生变化,称之为逆磁致伸缩效应,或压磁效应。当铁磁材料受到载荷作用时,通过特制的传感器感知材料的磁性变化,就能检测其内部应力及外部载荷的变化。这种压磁测力法具有简便、快捷、低成本及可应用于传动轴扭矩、大型工件和压力容器的残余应力的无接触或无损检测以及预测材料或构件的疲劳破坏等特点,而受到国内外有关研究机构的重视。

第三节 压磁测力法的基本形式

目前,压磁测力法主要用于测试压力、扭矩和残余应力。

图 1-1 所示为压磁式压力传感器的工作原理^[24]。

这种传感器的主要部分是压磁元件,它由具有正磁致伸缩效应的铁磁材料制成,一般为硅钢片、坡莫合金等。图中在压磁元件上开有 4 个对称的通孔,1,2 和 3,4 孔。在 4 个孔中分别绕着互相垂直的两线圈,其中 1~2 线圈为励磁绕组,通过交流电;3~4 绕

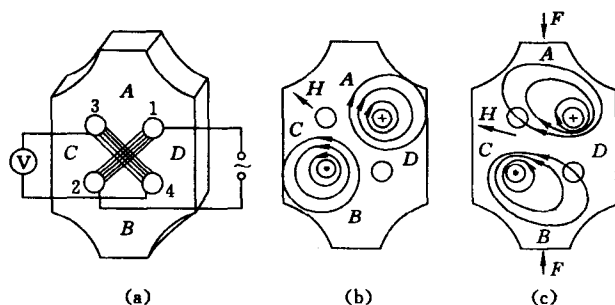


图 1-1 压磁式压力传感器的工作原理

1~2——励磁绕组;3~4——测量绕组

组作为测量绕组。在无外力作用时,励磁绕组所产生的磁场在测量绕组两侧对称分布,合成磁场强度与测量磁场绕组平面平行,磁力线不和测量绕组交链,从而不使测量绕组产生感应电势,如图 1-1(b)所示。一旦传感器受到外力作用时,磁场分布就会变化。

当压磁元件上受到压力 F 作用时,沿应力方向其导磁率将会下降,而与应力垂直的方向则增加。这样铁心中的磁导率不再是均匀的,合成磁场强度 H 不再与测量绕组平面平行并产生交链而感应出电势 e ,如图 1-1(c)所示。 F 值越大,交链的磁通越多, e 值也越大。感应电势 e 经过变换处理后,就可以用电流或电压来表示被测力 F 的大小。

当材料受拉时,导磁率变化则相反。

显然这种压磁测力传感器只能检测沿压磁元件纵向轴线的作用力,也就是说传感器必须置于被测构件的底部。另外,只有当应力穿过压磁元件之后,才能有感应电势产生。因此,这种传感器响应比较慢。

图 1-2 所示为典型的交叉铁心式压磁式扭矩传感器^[26~27]。

这种传感器最早是由瑞典 ASEA 公司研制的。它由具有交流励磁绕组 2 的型铁心 1 和具有测量绕组 4 的型铁心 3 组成,其中励磁绕组铁心顺着转轴中心线安装,测量铁心与励磁铁心成 90° 角并相互对称,以保证各相邻磁极的连线与被测轴的中心线互成 45° 和 135° 角。励磁铁心的磁通为零。当转轴受

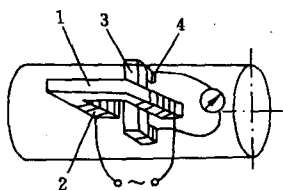


图 1-2 交叉铁心式扭矩传感器

- 1——励磁铁心, 2——励磁绕组;
3——测量铁心, 4——测量绕组

扭矩作用时,由于励磁极和测量磁极在转轴上投影区段中的磁导率变化而引起轴磁场畸变。这样当测量铁心处于不同磁势下时在测量线圈中就会感应出与扭矩成正比例的交流电动势。

压磁式扭矩传感器利用了传动轴表面 45° 和 135° 方向作用等值的压应力和拉应力时,两个方向磁导率变化相等这一特点而制成的。这种特殊性使检测方法和仪器设备都变得简单。

利用压磁效应能够对构件残余应力及裂缝缺陷进行无损检测,在这方面国内外都做了大量工作,也研究设计出了多种形式的传感器并推导出了传感器的输出数学模型。比较典型的如图 1-3 所示。

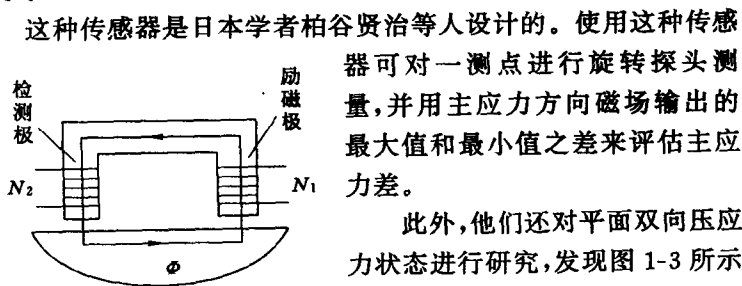


图 1-3 两磁极应力传感器

器可对一测点进行旋转探头测量,并用主应力方向磁场输出的最大值和最小值之差来评估主应力差。

此外,他们还对平面双向压应力状态进行研究,发现图 1-3 所示两磁极应力传感器,当主应力和 $(\sigma_1 + \sigma_2)$ 较大时,平行主应力方向

的磁测输出的平均值与主应力和绝对值成正比,在整个双向压应力区,当主应力相等时磁输出与应力有很好的线性关系。

H. Yamada^[8]等学者对如图 1-4 所示的四磁极应力传感器进行了磁路分析,提出了各个方向上的磁导率呈椭圆分布,且主磁导率与主应力成线性关系的结论,推导了磁输出与方向磁导率的关系表达式,并得出当励磁磁极间的连线与主应力方向成 45°时有

$$U_1 = K(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (1-1)$$

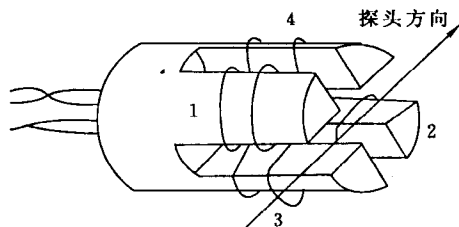


图 1-4 四磁极应力传感器

在国内,清华大学有关学者^[29~30]利用二极磁测传感器对多种材料的单向拉伸、单向压缩、双向拉伸、双向压缩以及焊接板焊缝残余应力、厚壁圆桶弯曲残余应力等的多种应力应变状态下的残余应力及工作应力进行了大量实验分析,提出磁测输出与平行于磁探头测量方向的纵向应变及垂直于磁探头测量方向的横向应变之间成线性关系的结论,并给出相应的数学模型。

西安交大有关学者^[31~32]推导了二极磁应力传感器的输出与主应力及测量角度之间的关系,提出了主应力差与沿两个方向的磁测信号电流之差近似地存在单值的线性关系,其表达式为

$$(I_1 - I_2) = \alpha(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (1-2)$$

以上所述为目前压磁式测力的几种常见形式,虽然这些测力方法具有设备结构简单,操作方便快捷,能在环境恶劣的情况下工

作以及能实现非接触在线测力等优点,但总的来看还存在许多缺点,主要是测量的精度和灵敏度比较低;对于不同材质的构件,测量前都要进行标定;磁测输出信号与应力或应变之间的数学关系难以准确建立。这主要是由于人们对材料的磁本质还没有一个完美的解释,无法从微观角度为压磁测力法提供充分的理论依据。相信随着科学技术的进步,这种测力法所存在的理论和技术问题将最终获得解决。

第二章 铁磁材料的基本磁特性

生产实际中,大多数机械设备都是由铁磁材料制成的,这为磁测应力法的应用提供了条件。铁磁材料的磁特性非常复杂,因此在研究磁测应力法的基本原理之前,有必要对铁磁材料的基本磁性特征进行分析。

第一节 物质磁性的起源^[37~38]

宏观物质的磁性是组成物质的基本质点磁性的集体反映。组成物质的最小单元是原子,原子又由电子和原子核组成。物质的磁性来源于原子磁性,称之为原子磁矩。由原子物理学知,电子因其轨道运动和自旋效应而具有轨道磁矩和自旋磁矩。原子核也具有核磁矩,但其值很小,几乎对原子磁矩无影响。因此,原子磁矩主要来自原子中的电子。也就是说,原子磁矩是由电子轨道磁矩和自旋磁矩两部分构成。

对于磁矩的分析与计算通常采用等效电流回路的方法。在原子中,电子轨道运动相当于一个恒定电流回路。依据磁矩定义,容易理解原子中电子绕原子核旋转必定有一个磁矩。应用量子力学,可以对电子轨道磁矩进行定量的分析与计算。对于自旋磁矩,依目前的了解还不能用电流回路来解释。许多基本粒子,包括中子都有自旋磁矩,故把自旋磁矩看做是这些基本粒子的固有磁矩为宜。自旋是微观物理学中最重要的概念之一,现代物理学对自旋还没有确切的描述。