

Design of Eddy Current Displacement Sensors for Maglev System of Ventricular Assist Device *

YIN Chengke^{1,2}, TAN Xuedan², QU Wenbo², MA Yunshan², CHEN Chen^{1,2*}

(1. Artificial Heart Lab, Soochow University, Suzhou Jiangsu 215021, China; 2. China Heart Biomedical Inc, Suzhou Jiangsu 215123, China)

Abstract: Noncontact eddy current displacement sensor was designed for the Maglev system of the ventricle assist device (VAD). With regard to the special structure in which there was a titanium alloy frame between the displacement sensor and VAD's rotor, this paper analyzed the sensor magnetic field by using finite element method to obtain structural parameters of sensor, built a device to monitor coil winding for improving the impedance consistency. Performance test of sensor coils shows that the standard deviation of sensor coils is 3.8%, the sensitivity is higher than 10%, and the good properties are feasible for the Maglev system of VAD.

Key words: ventricular assist device; eddy current sensor; maglev; Titanium alloy frame

EEACC:7540

doi:10.3969/j.issn.1004-1699.2012.04.002

人工心脏磁悬浮系统涡电流位移传感器的设计 *

尹成科^{1,2}, 谈雪丹², 渠文波², 马云善², 陈琛^{1,2*}

(1. 苏州大学人工心脏研究所, 江苏苏州 215021; 2. 苏州同心医疗器械有限公司, 江苏苏州 215123)

摘要: 设计一种用于人工心脏的非接触式涡电流位移传感器。针对人工心脏磁悬浮系统特有的钛合金隔层结构, 采用有限元分析涡电流位移传感器磁场, 得到其结构参数; 同时研制能实时监控传感器线圈绕制的装置, 以提高线圈阻抗的一致性。经对传感器性能测试, 结果显示所设计的涡电流位移传感器标准偏差为 3.8%, 灵敏度高于 10%, 能满足人工心脏磁悬浮系统的要求。

关键词: 人工心脏; 涡电流传感器; 磁悬浮; 钛合金隔层

中图分类号: 7310J

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2012)04-0428-04

人工心脏作为一种植入式医疗器械, 通过辅助或者替代衰弱的心脏实现泵血功能, 是目前一种无法替代的最终治疗手段^[1-2]。第三代人工心脏采用磁悬浮轴承技术^[3], 无机械轴承, 具有使用耐久性强、溶血少、血栓发生率较低^[4]等优点, 近年来得到了快速发展。

位移传感器是人工心脏磁悬浮系统的核心部件之一。相对于其他非接触式位移传感器, 涡电流位移传感器具有结构简单、灵敏度高、抗干扰强、可靠性高等优点, 广泛用于人工心脏领域。目前, 国内外对涡电流传感器的性能、结构设计等方面已经展开了一系列的研究^[5-9], 并针对不同应用要求优化设计涡电流传感器结构^[10-12]。

为了满足生物相容性要求, 人工心脏转子与定子表面均有一层血液相容性好的钛^[13]合金隔层, 传感器需穿透钛合金隔层检测转子位置。钛合金隔层的加入使得传感器的特性更加复杂。同时, 植入式人工心脏对传感器尺寸有严格的限制。目前, 仅 PAI Chi-nan 等人^[14]采用了实物凑试法得到类似结构下的传感器参数, 如果被测结构参数变化, 只能重新试验。因此, 针对人工心脏中带有钛合金隔层的结构, 从涡电流检测的基本原理出发, 进行了以下 3 方面的工作: 采用有限元法分析涡电流传感器在检测带有钛合金隔层靶板时的磁场分布特性, 得出制作线圈的结构参数; 设计一个线圈绕制与监测装置, 在绕制线圈的同时, 监测线圈的形状、绕线的张力

项目来源: 863 计划先进制造技术领域重点项目(2009AA045400); 国家自然科学基金面上项目(31070892); 国际科技合作与交流专项项目(2009DFB30090); 江苏省自然科学基金项目(BK2009602)

收稿日期: 2011-09-09 **修改日期:** 2011-01-04

等,以保证线圈阻抗的一致性;对绕制的线圈进行性能测试与分析。

1 非接触式涡电流位移传感器原理

如图1所示,当一个线圈中通入高频电流时,空间将产生高频电磁场 φ_1 。如果一个导体靠近这个线圈,在该导体中会产生涡电流。涡电流产生的涡电流磁场 φ_2 会反作用于线圈,影响线圈的电压和电流。从线圈两端来看,就是线圈的等效阻抗发生了改变。线圈阻抗的变化与金属导体的磁导率、电导率、几何形状、线圈的几何参数、激励电流频率以及线圈到金属导体的距离等参数有关^[15]。若保持其余参数恒定,线圈与导体间的距离变化量仅与线圈阻抗的变化量有关,即通过测量线圈阻抗的变化,可探测导体与线圈之间的距离。

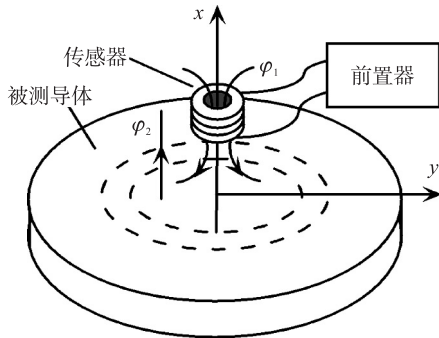


图1 涡电流传感器原理

2 人工心脏的磁悬浮传感结构

图2是人工心脏磁悬浮系统的传感结构,4个涡电流传感器固定在不导电的非磁性材料骨架上,构成传感器探头并固定于定子上。在盘状转子的径向上建立正交坐标系,转子内环中心点为坐标原点,4个传感器线圈则分别位于X、Y两轴正负4个方向上,且同轴的两个传感器串联。

人工心脏采用磁悬浮技术,无需机械轴承,故转子采用了中空环形结构。为增强传感效果,在转子内环侧面放置了高电导率、不导磁的金属环,传感器通过检测该金属环来得到转子位移信息。人工心脏工作时,定子与转子与血液直接接触,故在其表面添加钛合金隔层,以提高血液相容性。

传感器探头位于转子内环中心处,当转子相对于定子发生位移变化时,传感器线圈与转子的相对间隙也随之发生变化,从而引起传感器线圈阻抗的变化。经由检测电路,即可将线圈阻抗的变化转换为转子的径向位移电信号,从而完成转子位移的测量。

人工心脏在转子轴向及扭转方向均采用被动悬

浮,而在转子径向上采用两个自由度的位移主动控制,因此只需考虑径向的位移传感器。由于径向两个方向是相似的,故仅分析其中一个方向。

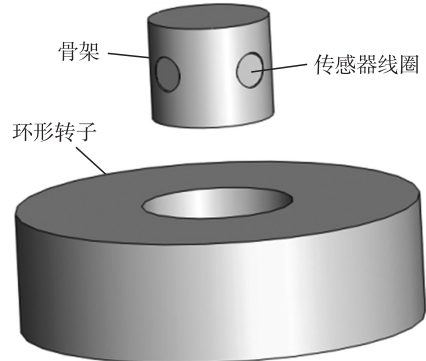


图2 人工心脏磁悬浮传感结构

3 涡电流传感器的有限元分析

针对有钛合金隔层、被测对象为圆柱面的涡电流传感器,采用有限元软件对其进行分析,获得特定钛合金隔层厚度下传感器所需的最佳激励频率等参数,实现传感器的优化设计。有限元分析的主要目的是分析钛合金隔层对传感器灵敏度的影响。为了方便,在有限元分析中采用了简化的二维模型。

传感器有限元计算分析的结果如图3(b)所示。图3中A是被测转子中的高电导率金属环,采用的是铝。B是转子上的钛合金隔层,C是定子上的钛合金隔层,D是涡电流传感器线圈。线圈磁场可穿

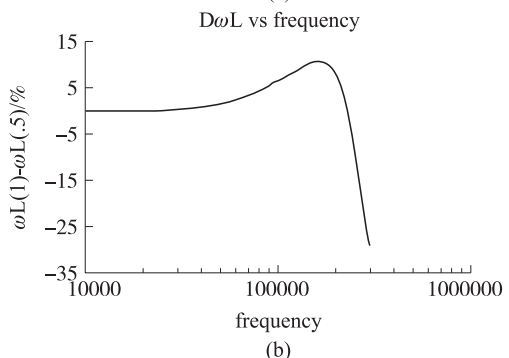
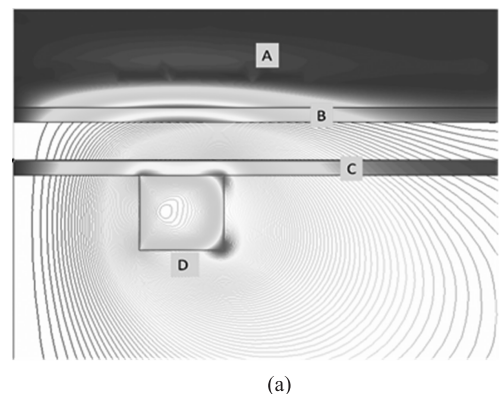


图3 涡电流传感器线圈的有限元仿真

透钛合金隔层,在被测转子上产生涡电流,涡电流磁场在经过钛合金隔层衰减后影响传感器线圈的阻抗,完成检测功能。磁场在遇到定子钛合金隔层时,其磁场能量衰减。根据趋肤效应可知,如果钛合金隔层厚度值及传感器线圈激励频率合理,则可以得到最好的传感灵敏度。

在有限元优化过程中,首先估算了一个线圈与被测对象的初始结构。通过移动转子来考察线圈的阻抗变化,得出线圈灵敏度。然后调整钛合金隔层的厚度,得到线圈灵敏度与钛合金隔层厚度的对应关系。分析结果显示,对于外径为 5 mm,内径为 3 mm,线径为 0.08 mm,线圈总有效横截面积为 1 mm×1 mm 的线圈,钛合金隔层厚度为 0.2 mm~0.3 mm。

涡电流线圈的灵敏度与线圈的工作频率有关,因此确定合理的工作频率是有限元计算的重要优化目的。由有限元计算的结果可以看出,当工作频率为 100 kHz~200 kHz 时,涡电流传感器线圈灵敏度较高。在更高频率,看起来有更高的灵敏度,但是相位反转,本文认为这是线圈的自谐振特性带来的假象,在这个频率范围内线圈实际上工作不稳定。再考虑到电路设计因素,最终工作频率选为 125 kHz。

4 涡电流传感器线圈的制作

线圈制作是涡电流位移传感器性能好坏的核心和关键,尺寸、形状等因素对线圈阻抗一致性有着重要的影响。为了绕制阻抗一致性良好的线圈,构建如图 4 所示的线圈绕制系统,主要由一个手动绕线机、精密张力控制器及微距 CCD 成像系统组成。



图 4 线圈绕制与监测装置

在线圈绕制过程中,用绕线机绕制线圈并记录绕线参数;用张力控制器控制绕线过程中的张力;用微距 CCD 实时监控线圈绕制过程。通过以上措施,使得绕制的线圈在形状上保持一致,以保证阻抗一致。

绕制完毕后,在取下线圈以前,使用热风枪加热线圈,促使其自黏线硬化。等到线圈冷却后,取下线圈,即得到绕制好的涡电流传感器线圈。

5 涡电流传感器线圈性能测试与分析

对于工程应用而言,只有传感器线圈的阻抗分散度小于其灵敏度,线圈才具有实际使用价值。从制作的涡电流传感器线圈中随机抽取 149 个进行阻抗分散程度、阻抗灵敏度两个方面的性能测试与分析。

线圈的归一化阻抗数据如图 5 所示,其标准偏差为 3.8%,表明该批线圈阻抗分布的分散程度小,一致性好。

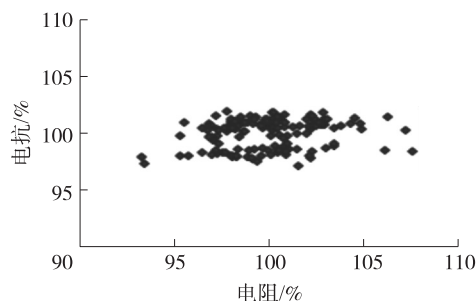


图 5 线圈阻抗分布图

涡电流线圈的阻抗灵敏度决定了涡电流传感器的位移灵敏度。线圈灵敏度测量方法是将涡电流线圈固定在一个精密位移台上,调整涡电流传感器线圈与被测金属的距离,得到位移与线圈阻抗变化量的输入-输出特性,由此计算线圈的阻抗灵敏度。图 6 是归一化的灵敏度测量结果。结果显示,阻抗灵敏度最高可大于 10%,大于阻抗的标准偏差,且在工作范围±0.5 mm 内有较好的线性度,所设计的传感器线圈满足人工心脏的位移检测要求。

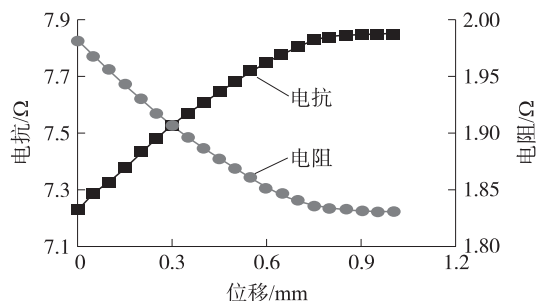


图 6 涡电流传感器线圈阻抗-位移曲线

上述测试过程是在空气中进行的,实际上,涡电流传感器工作在血液环境中。本文认为血液对涡电流传感器的影响可以忽略。首先,血液的电导率远远小于金属的电导率,电磁场在血液中的穿透深度要比金属大,与金属相当厚度的血液对传感性能几乎没有什么影响。其次,在人工心脏中传感器关键

是要工作可靠,准确度是较为次要的。因此,本文忽略了血液对传感器的影响。实际传感器工作中隔了一层钛合金,这一点需要进一步的实验研究。

6 结束语

以带有钛合金隔层的定子与转子结构为应用对象,设计了一种非接触式涡电流位移传感器,采用自行构建的绕制装置,进行涡流传感器线圈的制作。结果表明,该方法制作的传感器阻抗偏差为3.8%,灵敏度高于10%,满足了人工心脏磁悬浮系统对位移传感器的要求。同时,该方法为检测对象带有金属隔层的涡流传感器的分析、设计与优化提供有效指导,对于制作高性能的传感器有着重要的意义。对于涡电流在血液中的工作特性以及钛合金隔层的实际影响,还有待于进一步的研究和实验。

参考文献:

- [1] 郑理,严中亚. 人工心脏的临床应用进展[J]. *Clinical Medicine*, 2005,21(10):957-959.
- [2] Timms D. A Review of Clinical Ventricular Assist Devices[J]. *Medical Engineering & Physics*, 2011,33(9):1041-1047.
- [3] Hoshi H, Shinshi T, Takatani S. Third-Generation Blood Pumps with Mechanical Noncontact Magnetic Bearings [J]. *Artificial Organs*, 2006,30(5):324-338.
- [4] Nishida M, Yamane T, Maruyama O, et al. Computational Fluid Dynamic Analysis of the Flow Around the Pivot Bearing of the Centrifugal Ventricular Assist Device [J]. *JSME International Journal Series C*, 2006,49(3):837-851.
- [5] 蔡财华. 磁悬浮转子系统中涡流传感器工作特性研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2006.
- [6] 陈虎勋,田新启. 电涡流传感器对被测材料敏感性的实验研究[J]. *仪表技术与传感器*, 2009(10):13-15.
- [7] Yin W, Binns R, Dickinson S, et al. Analysis of the Lift-Off Effect of Phase Spectra for Eddy Current Sensors [C]//IEEE, 2005. 1779-1784.
- [8] 孟得东,刘凯,梁树甜,等. 空芯电涡流传感器探头线圈特性的研究[J]. *船电技术*, 2011,31(1):17-20.
- [9] 于亚婷,杜平安,廖雅琴. 线圈形状及几何参数对电涡流传感器性能的影响[J]. *仪器仪表学报*, 2007,28(6):1045-1050.
- [10] Chady T, Sikora R. Optimization of Eddy-Current Sensor for Multi-frequency Systems [J]. *Magnetics, IEEE Transactions on*, 2003,39(3):1313-1316.
- [11] 贾永平,丁天怀,王鹏. 曲面体间隙电涡流检测的有限元分析[J]. *传感技术学报*, 2005,18(2):221-224.
- [12] 孙凯. 环形结构涡流传感器的研制[D]. 合肥工业大学,2010.
- [13] 王明,宋西平. 医用钛合金腐蚀,力学相容性和生物相容性研究现状[J]. *钛工业进展*, 2008,25(2):13-18.
- [14] Pai C N, Shinshi T, Asama J, et al. Development of a Compact Maglev Centrifugal Blood Pump Enclosed in a Titanium Housing [J]. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 2008,2(3):343-355.
- [15] 李贵娥,麻红昭,沈家旗,等. 电涡流检测技术及影响因素分析[J]. *传感技术学报*, 2009,22(11):1665-1669.



尹成科(1980-),男,博士,苏州大学讲师,研究方向为以磁悬浮人工心脏为代表的机电一体化与自动化控制,以及新一代人工心脏血泵研究, yinck@suda.edu.cn;



陈琛(1963-),男,博士生导师,苏州大学特聘教授,苏州大学机电工程学院生物制造中心人工心脏研究所所长,研究方向为先进制造、生物医学工程、机电一体化, chenchen@suda.edu.cn。