

DOI:10.16356/j.1005-2615.2021.04.014

角位移传感器定转子间隙设计与验证

徐 华¹, 郑嘉铭², 韩 超¹

(1. 南京机电液压工程研究中心, 南京 211106; 2. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)

摘要: 角位移传感器(Rotary variable differential transformer, RVDT)采用非接触设计,具有灵敏度高、线性好、结构紧凑等优点,在航空领域自动控制系统中应用广泛。在其结构参数中,定转子间隙是提高性能和可靠性的重要设计因素。本文针对定转子间隙进行研究,并以一款典型产品开展了优化设计。通过理论仿真分析和物理实验测试两个角度研究了间隙对角位移传感器的线性度和梯度这两个重要静态指标的影响规律,从而获得了在一定的结构尺寸下,传感器输出梯度和线性度随间隙大小的变化规律以及间隙的合理选取范围等重要结论。本文研究不仅可为产品结构参数的选取提供有力的支撑,而且在工程实现中,还可对实际产品结构尺寸进行修正,提高产品的合格率。此外,相关研究方法和获得的结论还可以推广应用到多余度角位移传感器的研制中,为此类产品的快速研发提供借鉴。

关键词: 角位移传感器; 定子铁芯; 转子铁芯; 间隙设计; 线性度; 梯度

中图分类号: V241.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2021)04-0598-07

Design and Verification of Air Gap Between Stator and Rotor of RVDT

XU Hua¹, ZHENG Jiaming², HAN Chao¹

(1. Nanjing Electromechanical Hydraulic Engineering Research Center, Nanjing 211106, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Rotary variable differential transformer (RVDT) adopts non-contact design, has the advantages of high sensitivity, good linearity and compact structure, and is widely used in automatic control system in the aviation field. The air gap between stator and rotor is one of the important structural parameters to improve its performance and reliability. This paper studies the air gap between stator and rotor and develops an optimized design with a typical product. Through theoretical simulation analysis and physical experimental tests, the influence of the air gap on the linearity and gradient of RVDT, the two important static indicators, is studied. In this way, under a certain structure size, the influence of the air gap size on the RVDT output gradient and linearity and the reasonable selection range of the air gap are obtained. The proposed study can not only provide strong support for the selection of product structure design parameters, but also revise the actual product structure size during engineering realization to improve the product qualification rate. In addition, the relevant research methods and conclusions obtained can also be promoted and applied to the development of redundant RVDT, providing a reference for the rapid development of such products.

Key words: rotary variable differential transformer (RVDT); stator core; rotor core; air gap design; linearity; gradient

收稿日期: 2021-05-29; **修订日期:** 2021-06-19

通信作者: 徐华, 女, 高级工程师, E-mail: lshscyad@foxmail.com。

引用格式: 徐华, 郑嘉铭, 韩超. 角位移传感器定转子间隙设计与验证[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(4): 598-604. XU Hua, ZHENG Jiaming, HAN Chao. Design and verification of air gap between stator and rotor of RVDT [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(4): 598-604.

目前在工程技术应用中对角位移物理量测量的最常用方法是差动变压器式角位移传感器(Rotary variable differential transformer, RVDT),它采用与差动变压器相同的原理,把机械部件的旋转运动传递到角位移传感器的转轴上,带动与之相连的铁芯,改变其定子线圈中的感应电压,输出与旋转角度成比例的电压/电流信号^[1-2]。RVDT通常由定子铁芯、转子铁芯、初/次级线圈及壳体等部件组成。RVDT采用非接触设计,具有灵敏度高、线性好、结构紧凑等优点^[3]。它在航空领域被广泛应用于飞机前轮操纵系统、舵面操纵系统、进气道调节系统等自动控制系统中^[4-5]。

在RVDT中,定子铁芯与转子铁芯(以下简称定子、转子)之间的间隙是为了保证转子在定子腔内能够自由转动,间隙的大小对RVDT的性能和可靠性影响较大,是RVDT设计的关键之一。间隙过大,将使磁阻增大,相应地激磁消耗电流也随之增大,进而导致损耗和发热增大,性能变差,甚至线圈损坏;间隙过小,会使间隙谐波磁场增大,造成杂散损耗和噪声增加,易使转子运动时与定子碰撞,甚至发生扫膛,影响产品可靠性。此外,过小的间隙还会增加装配难度。所以,选择合适的定子、转子间隙是RVDT性能提升和可靠运行的关键,也是RVDT设计的重点和难点之一^[6-7]。

线性度和梯度是RVDT的两个重要指标。其中线性度(也叫非线性误差)反映RVDT性能良好程度,由于传感器受误差影响会导致输出与理论值之间存在区别,各输出点连线不可能为直线,故为了便于数据处理,通过处理将实际输出曲线拟合为直线,线性度即为实际输出曲线与近似为直线的拟合输出曲线的最大偏差和满量程输出电压比值;梯度为输出电压变化量与引起输出电压变化的位移量之比,也是判断各参数设计是否合理的重要指标^[8]。

在RVDT设计中,系统对消耗电流、梯度都有明确的范围要求,因此,为了达到系统指标要求,除了控制线圈的匝数之外,控制定子与转子之间的间隙同样关键。目前国内外大部分研究通过分析间隙对于输出电压线性度一个方面的影响对间隙进行设计,而忽略了梯度这一重要指标。而本文综合考虑了线性度和梯度两个重要指标,对于定转子间隙进行了设计。

本文以通用性较强的RVDT产品作为研究对象,通过仿真研究和试验验证,研究了定、转子间隙,查明了定、转子间隙变化对线性度和梯度的影响规律,进而获得了该款RVDT产品定、转子最优的配合间隙,从而提高RVDT的性能和可靠性。同时也为此类RVDT产品定、转子间隙优化设计

提供了案例参考。

1 工作原理

RVDT的定子由铁芯和线圈两部分组成,其中线圈又包括初级绕组和次级绕组,其转子由两端呈扇形的对称磁钢片组成,定、转子之间有一定间隙。图1、2分别给出了RVDT的结构示意图和电气原理图。

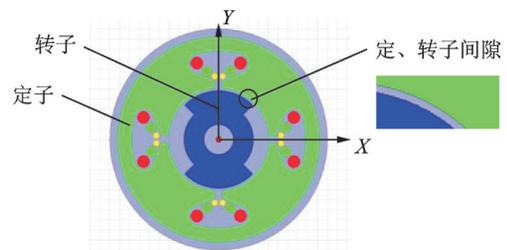


图1 RVDT定子与转子结构图

Fig.1 Structure of RVDT stator and rotor

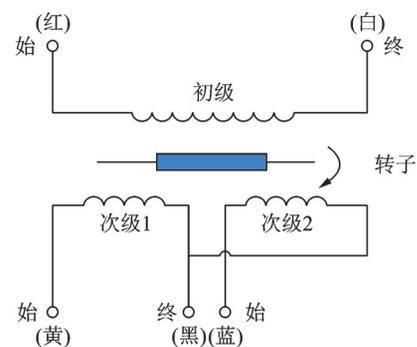


图2 RVDT电气原理图

Fig.2 RVDT electrical schematic diagram

图2中RVDT的初级和两组次级绕组按一定的匝数布置在图1的定子中,其中图1的红色部分为初级绕组,绿色和黄色部分分别为两次级绕组。当初级绕组中施加一定频率的交流激励时,在两次级绕组上产生互感。当图2中的转子转动到不同角度时,将会在两个次级绕组上产生频率一致、幅值不同的感生电压,零位以及转动 40° 时的磁力线分布见图3、4。将两个次级绕组的差值电压进行解调输出即可获得与转子转角成线性关系的电压信号^[9]。

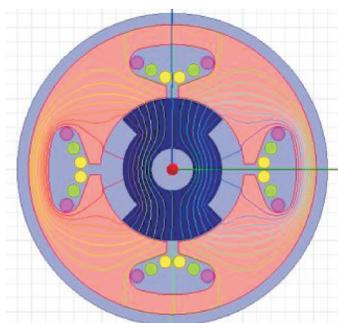


图3 零位时的磁力线分布图

Fig.3 Distribution of magnetic lines of force at zero position

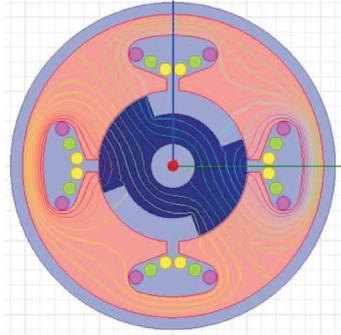


图4 转动40°时的磁力线分布图

Fig.4 Distribution of magnetic lines of force at 40°

2 设计计算

根据变面积式差动变压器原理,可计算得到电压和转子转动角度之间的关系。在忽略线圈寄生电容和铁芯损耗的情况下,差动变压器的等效电路如图5所示^[10-11]。

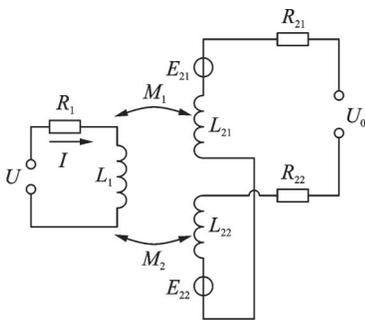


图5 差动变压器的等效电路

Fig.5 Equivalent circuit of differential transformer

图中: U 、 I 分别为初级线圈励磁电压与电流(频率为 ω); L_1 、 R_1 分别为初级线圈电感与电阻; M_1 、 M_2 分别为初级线圈与次级线圈1、2间互感; L_{21} 、 L_{22} 和 R_{21} 、 R_{22} 分别为两个次级线圈的电感和电阻。

根据变压器原理,传感器开路输出电压为两次级线圈感应电势之差^[12-13]

$$U_0 = E_{21} - E_{22} = -j\omega(M_1 - M_2)I \quad (1)$$

当衔铁在中间位置时,若两次级线圈参数与磁路尺寸相等,则 $M_1 = M_2 = M$, $U_0 = 0$ 。当衔铁偏离中间位置时, $M_1 \neq M_2$,由于差动工作有 $M_1 = M + \Delta M_1$, $M_2 = M - \Delta M_2$,在一定范围内, $\Delta M_1 = \Delta M_2 = \Delta M$,差值($M_1 - M_2$)与衔铁位移成比例。于是,在负载开路的情况下,输出电压有效值为^[14]

$$U_0 = \frac{2\omega\Delta M U}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}} = 2E_{s0} \frac{\Delta M}{M} \quad (2)$$

式中 E_{s0} 为衔铁在中间位置时单个次级线圈感应电势,表达式为

$$E_{s0} = \omega M U / \sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2} \quad (3)$$

输出阻抗为

$$Z = R_{21} + R_{22} + j\omega L_{21} + j\omega L_{22} \quad (4)$$

将差动式变压器做成改变导磁面积的变面积式类型,即可设计成可用来测量角位移的线性旋转变压器。

线性旋转变压器主要由定子、转子、一次侧线圈和二次侧线圈构成。定子为四极形式,每一极上都绕有一次侧线圈(分别用 W_{11} 、 W_{12} 、 W_{13} 、 W_{14} 表示)和二次侧线圈(分别用 W_{21} 、 W_{22} 、 W_{23} 、 W_{24} 表示)。

当一次侧线圈接入交流激励电源时,根据电磁感应原理,二次侧线圈通过磁通耦合可以输出相应电压。当转子转动一定角度时,一次侧线圈与二次侧线圈的耦合磁通发生变化,其变化的磁通量与转子的位置(即角度)有关,而磁通量的变化将改变二次侧线圈的输出电压。因此,当激励电源的电压和频率确定后,二次侧线圈的电压输出与转子的转角有关。

线性旋转变压器的电路原理即为一种四段式差动变压器,其电气原理如图6所示。

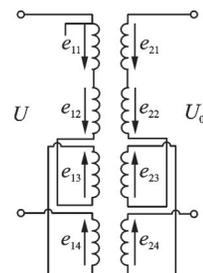


图6 线性旋转变压器电气原理图

Fig.6 Electrical schematic diagram of linear resolver

一次侧线圈 W_{11} 、 W_{12} 、 W_{13} 、 W_{14} 的线圈匝数完全相同,并形成串联;二次侧线圈 W_{21} 、 W_{22} 、 W_{23} 、 W_{24} 的匝数也完全相同,并且也形成串联。连接方式如图6所示,其输出电压为^[15]

$$U_0 = (e_{22} + e_{24}) - (e_{21} + e_{23}) \quad (5)$$

为研究其输出特征,本文设置如下参数: δ 为定子极掌与转子板端面间气隙的厚度; S_a 、 S_b 为定子极掌与转子板端面覆盖表面积; r 为转子半径; a 为转子转角,单位为rad; h 为定子转子铁芯的有效宽度; 2θ 为定子磁极角度,单位为rad。

设 μ_0 为空气磁导率,忽略铁芯磁阻,则磁路的磁阻由气隙磁阻组成,它们为

$$R_{\delta 1} = R_{\delta 3} = \delta / (\mu_0 S_a) = \delta / (\mu_0 r(\theta - a)h) \quad (6)$$

$$R_{\delta 2} = R_{\delta 4} = \delta / (\mu_0 S_b) = \delta / (\mu_0 r(\theta + a)h) \quad (7)$$

因为四极上一次侧线圈的匝数相等,流过的电

流相等,所以磁动势也相等,即

$$F_{M1} = F_{M2} = F_{M3} = F_{M4} = I_1 N_1 \quad (8)$$

根据等值磁路,可以求出磁通为

$$\Phi_1 = \Phi_3 = F_{M1} / R_{\delta 1} = I_1 N_1 \mu_0 r h (\theta - a) / \delta \quad (9)$$

$$\Phi_2 = \Phi_4 = F_{M2} / R_{\delta 2} = I_1 N_1 \mu_0 r h (\theta + a) / \delta \quad (10)$$

在线性旋转变压器空载时,可以求得二次侧线圈的感应电动势为

$$e_{21} = 2\pi f N_{21} \Phi_1 \quad (11)$$

$$e_{22} = 2\pi f N_{22} \Phi_2 \quad (12)$$

$$e_{23} = 2\pi f N_{23} \Phi_3 \quad (13)$$

$$e_{24} = 2\pi f N_{24} \Phi_4 \quad (14)$$

将各二次侧线圈的感应电动势代入式(5),考虑到 $N_{21} = N_{22} = N_{23} = N_{24} = N_2$,则

$$U_0 = 8\pi f I_1 N_1 N_2 \mu_0 r h a / \delta = k a \quad (15)$$

式中 k 为旋转变压器的灵敏度,即角位移传感器的电压梯度,其为(单位: V/rad)

$$k = 8\pi f I_1 N_1 N_2 \mu_0 r h / \delta \quad (16)$$

3 方案设计

3.1 定、转子间隙影响

定子与转子之间的间隙对RVDT性能影响主要有3个方面:

(1)对输出梯度的影响。一般间隙越大,输出梯度越小,故输出电压随着间隙的增大而减小。

(2)对消耗电流的影响。间隙越大,消耗电流也越大。

(3)对线性度的影响。对线性度而言,间隙既不能太大也不能太小,需要找到合适的间隙来满足线性度的性能要求。

因此,定转子间隙的优化设计对于RVDT来说十分重要。

3.2 设计方案

角位移传感器的线性度是描述传感器静态特性的一个重要指标,大多数的生产厂家和用户都希望传感器的线性度指标最好,即传感器的线性度误差最小。但在实际的工程应用中,经过理论设计的结构参数往往会由于传感器材料、制造工艺、结构设计等因素,传感器的理论值与实际测量值之间总存在一定偏差。因此,研究一定结构参数下定、转子间隙变化对传感器线性度的变化规律就有着重要的意义,不仅可以为优化设计提供指导,而且可以在工程实现时,对实际结构参数进行修正,以提高产品的合格率。

由于定、转子间隙对线性度的影响较为复杂,间隙的大小对磁场的影响较大,磁路设计和定子、转子结构尺寸等诸多因素也会由于影响间隙而对

传感器的线性度产生影响。本文以通用性较强的某RVDT产品作为研究对象,首先按照产品的使用要求,通过计算确定转子和定子的结构参数,获得理论间隙值,再以间隙为自变量、线性度为因变量,通过仿真分析理论间隙值变化时,线性度的相应变化规律。之后再通过制造样机进行物理试验验证。方案设计的流程图见图7。

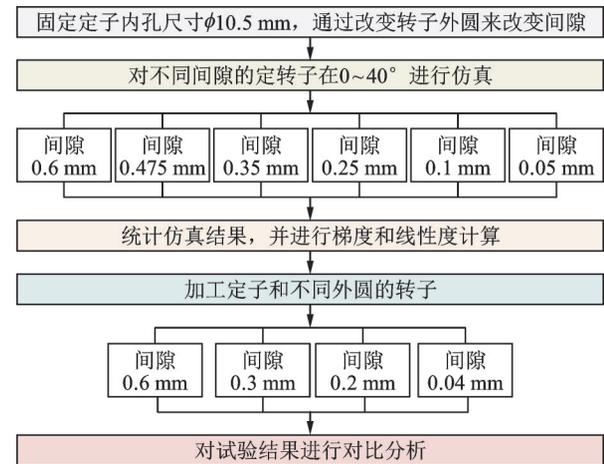


图7 方案设计流程图

Fig.7 Schematic design flow chart

由此,首先通过仿真计算分析采用相同的定子线圈,定子线圈内孔尺寸是 $\phi 10.5$ mm,采用不同的转子外圆,转子外圆尺寸分别为 $\phi 9.3$ mm、 $\phi 9.55$ mm、 $\phi 9.8$ mm、 $\phi 10$ mm、 $\phi 10.3$ mm、 $\phi 10.4$ mm、 $\phi 10.42$ mm,从而产生不同的间隙,分析传感器线性度的变化情况;再制造出其中4种外圆尺寸的转子,外圆尺寸分别为 $\phi 9.3$ mm、 $\phi 9.9$ mm、 $\phi 10.1$ mm、 $\phi 10.42$ mm,采用相同的定子线圈,内孔尺寸为 $\phi 10.5$ mm,进行装配后开展试验验证,验证对产品线性度的仿真结果,从而得到间隙的优化设计方案。

4 仿真分析

4.1 不同转子的仿真情况

本文以某角位移传感器性能为参考,对不同间隙下传感器的输出梯度与线性度进行仿真。图8是转子铁芯转动 $0\sim 40^\circ$ 时电压输出波形,图9~11是不同转子对应不同间隙对线性度和输出梯度的变化规律曲线。

由图8可以看出,输出电压随时间呈现正弦变化规律,横坐标为时间,纵坐标为输出电压,各条曲线随幅值增大,依次对应传感器转角分别为 0° 、 5° 、 10° 、 15° 、 20° 、 25° 、 30° 、 35° 、 40° 下的输出电压随时间的变化规律,并且在同一时刻下,输出电压随角度的增大而增大。而产生该现象的原因则是,在不同的测量角

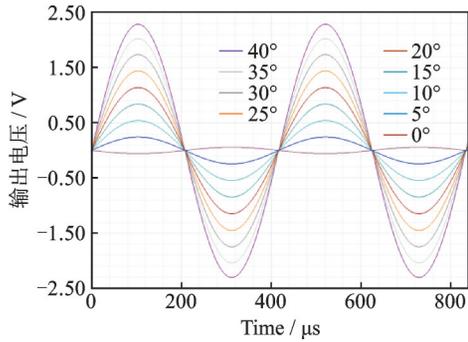


图8 0~40°电压输出波形

Fig.8 0—40° voltage output waveforms

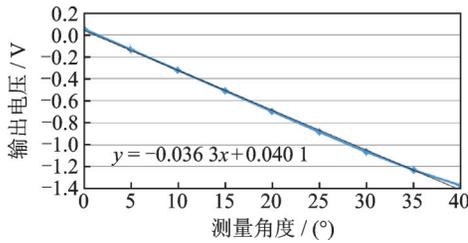


图9 间隙0.6 mm

Fig.9 0.6 mm air gap

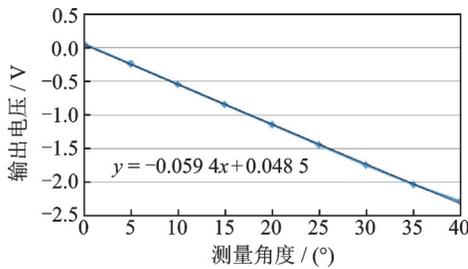


图10 间隙0.35 mm

Fig.10 0.35 mm air gap

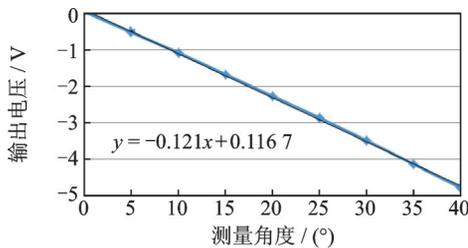


图11 间隙0.05 mm

Fig.11 0.05 mm air gap

度下,互感的变化会导致测量角度的变化。因此可以根据输出电压的变化来测量角度的变化。

由图9~11可以看出,在定、转子间隙分别为0.6、0.35、和0.05 mm时,测量角度在0~40°内变化的情况下各角度对应的输出电压,通过散点图输出的曲线,可以据此计算出各曲线的输出梯度以及线性度。

4.2 仿真结果及分析

在0.04 mm至0.6 mm之间,设定若干个定、转子间隙值进行仿真分析,得到在定子线圈内孔是 $\phi 10.5$ mm时,不同的定、转子间隙对应的梯度和线性度的仿真结果如表1所示。

表1 定、转子不同间隙的仿真结果

Table 1 Simulation results of stator and rotor with different air gap

转子外圆/ mm	定、转子 间隙/mm	梯度/ (V·(°) ⁻¹)	线性度/ %
$\phi 9.3$	0.600	0.036 3	1.360 0
$\phi 9.55$	0.475	0.046 3	1.005 4
$\phi 9.8$	0.350	0.059 1	0.591 0
$\phi 10$	0.250	0.073 4	0.279 0
$\phi 10.3$	0.100	0.105 0	0.355 0
$\phi 10.4$	0.05	0.121 0	0.803 0
$\phi 10.42$	0.04	0.124 8	0.976 8

由仿真结果可以看出,传感器的输出梯度随定、转子间隙的增大而减小,即间隙越大,输出电压越小;与通过式(16)得出的间隙 δ 与输出梯度成反比的结论一致。这是由于间隙增加后,定子内部的磁阻增大,定子与转子之间的磁场强度减小,所以梯度减小,输出电压减小。此外,仿真结果还表明,间隙在0.25~0.1 mm时,线性度最小,随着间隙增大或者减小,线性度都在逐渐增大。所以,定子与转子之间的间隙应控制在一定范围内,才能更好地满足传感器线性指标的要求。

5 试验验证

5.1 试验过程

为验证仿真分析结果,需要进行试验。首先加工一组内孔均为 $\phi 10.5$ mm的定子铁芯,通过绕制一定匝数的线圈,成为定子。然后分别加工外圆为 $\phi 9.3$ mm、 $\phi 9.9$ mm、 $\phi 10.1$ mm、 $\phi 10.42$ mm的各种转子,用专用工装组合装配后安装在传感器测试台上,提供与仿真相同的激磁信号,通过专用角位移的试验台的分度头夹住转子转动,测量出转子转动0~40°的输出电压,从而计算得出梯度和线性度。图12为定、转子试验件的图片。

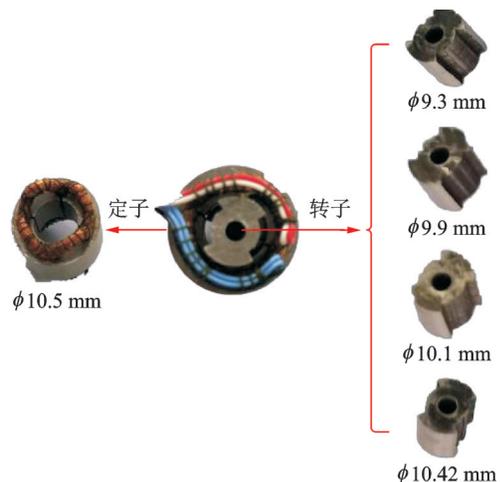


图12 定、转子试验件图片

Fig.12 Pictures of stator and rotor test pieces

5.2 试验结果

图 13~15 分别为满足定、转子间隙为 0.3、0.1、和 0.04 mm 的试验结果。

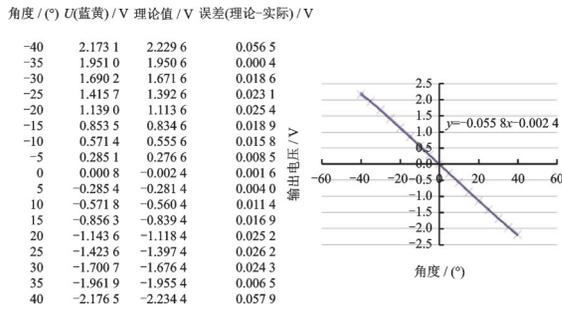


图 13 间隙 0.3 mm
Fig.13 0.3 mm air gap

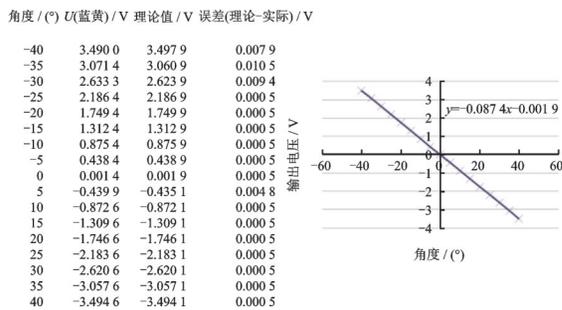


图 14 间隙 0.2 mm
Fig.14 0.2 mm air gap

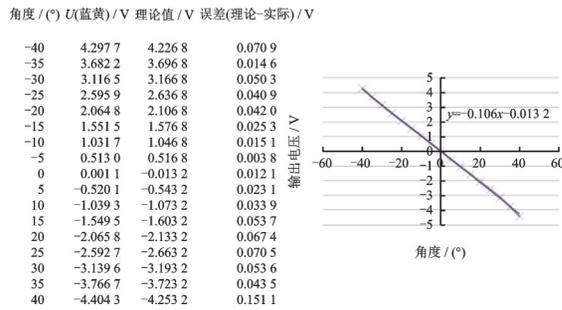


图 15 间隙 0.04 mm
Fig.15 0.04 mm air gap

5.3 结果分析

通过试验,总结定、转子各种间隙对 RVDT 输出梯度、线性度的影响,见表 2。

由试验结果可以看出,由于角位移传感器的壳体、定子、转子零件存在加工误差,定、转子装配后

表 2 定、转子不同间隙的试验结果

Table 2 Test results of stator and rotor with different air gap

转子外圆 / mm	定、转子间隙 / mm	梯度 / (V·(°) ⁻¹)	线性度 / %
φ9.3	0.60	0.028 8	1.992 0
φ9.9	0.30	0.055 8	1.297 0
φ10.1	0.20	0.087 4	0.150 0
φ10.42	0.04	0.106 0	1.781 8

会产生一定程度的不同轴现象,致使磁导不对称,进而导致实际输出与理想仿真输出存在略微差异,但输出规律保持相同,即传感器输出电压梯度随定、转子的间隙增大而减小,间隙越大,输出电压越小;定、转子间隙在 0.2 mm 左右,线性度最小,随着间隙的增大或减小,都会使线性度增加。

6 结 论

本文通过采取仿真计算分析和物理试验验证的方法,探索了定子和转子之间的转动间隙的变化对 RVDT 输出指标的影响,各项试验结果与仿真结果的吻合度很好,并从中得到了两项重要的规律:一是传感器的输出梯度随间隙的增大而减小;二是间隙控制在 0.1~0.25 mm,线性度最优,间隙过大或过小,线性度均会逐渐变差。由此可以得出结论:在一定的结构尺寸下,调整定子与转子之间的间隙可以优化 RVDT 的线性度。但是在实际的工程运用中还必须兼顾 RVDT 其他性能指标的要求,比如输出梯度、消耗电流等。定、转子间隙的合理选取是一个综合权衡的结果,局部最优并不能得到整体的最优。通过本文的研究,查明了梯度随间隙变化的规律,为产品结构参数选取提供了有力的支撑。

本文研究方法和获得的结论可以推广应用到多余度角位移传感器的研制中,为此类产品的快速研发提供借鉴。

参考文献:

[1] 刘佳昕,刘军. AD698 在 RVDT 传感器测量中的应用[J]. 电子设计工程, 2012, 20(8): 177-179.
LIU Jiaxin, LIU Jun. Application of AD698 in RVDT sensor measurement[J]. Electronic Design Engineering, 2012, 20(8): 177-179.

[2] 高峰,谷雨,周滨,等. 一种电容式角度传感器[J]. 仪表技术与传感器, 2009(8): 17-18, 90.
GAO Feng, GU Yu, ZHOU Bin, et al. A capacitive angle sensor[J]. Instrument Technology and Sensor, 2009(8): 17-18, 90.

[3] 奚小网,陆荣,高波. 用于多电机同步控制的角位移传感器设计[J]. 制造业自动化, 2011, 33(15): 45-48.
XI Xiaowang, LU Rong, GAO Bo. Design of angular displacement sensor for synchronous control of multiple motors[J]. Manufacturing Automation, 2011, 33(15): 45-48.

[4] 刘昕彤,孙士尉,张铁壁,等. 基于霍尔效应的新型差动式角位移传感器[J]. 微特电机, 2017, 45(11): 78-80.

- LIU Xintong, SUN Shiwei, ZHANG Tiebi, et al. A novel differential angular displacement sensor based on Hall effect[J]. *Micro and Special Motor*, 2017, 45(11): 78-80.
- [5] 冯铭瑜,王蓬.飞机脚踏位移测试校准方法研究[J]. *国外电子测量技术*, 2018, 37(6): 151-154.
FENG Mingyu, WANG Peng. Research on calibration method of aircraft pedal displacement test[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2018, 37(6): 151-154.
- [6] 李稷.RVDT传感器仿真电路的设计与研究[J]. *民用飞机设计与研究*, 2011(2): 56-59.
LI Ji. Design and research of RVDT sensor simulation circuit[J]. *Civil Aircraft Design and Research*, 2011(2): 56-59.
- [7] 国家质量监督检验检疫总局.角位移传感器校准规范: JJF1352—2012[S].北京:中国质检出版社, 2012.
General Administration of Quality Supervision. Calibration specification for angular displacement sensor: JJF1352—2012[S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2012.
- [8] 王尊敬,彭春增,王天资.关于角位移传感器研制过程中关键技术的思考与分析[J]. *科技创新与应用*, 2020(9): 160-162.
WANG Zunjing, PENG Chunzeng, WANG Tianzi. Thinking and analysis on key technologies in the development of angular displacement sensor[J]. *Innovation and Application of Science and Technology*, 2020(9): 160-162.
- [9] 季汉川,杨文焕.一种新型霍尔角度传感器的设计与分析[J]. *仪表技术与传感器*, 2012(8): 7-8, 11.
JI Hanchuan, YANG Wenhuan. Design and analysis of a new Hall angle sensor[J]. *Instrument Technology and Sensor*, 2012(8): 7-8, 11.
- [10] 顾铭.差动变压器式位移传感器结构设计及性能研究[D].徐州:中国矿业大学, 2020.
GU Ming. Structure design and performance research of differential transformer displacement sensor[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [11] 尚洁,包艳,杨楠,等.差动变压器式角位移传感器线性测量范围与结构关系的研究[C]//中国航空科学技术大会论文集.北京:中国航空学会, 2015: 394-398.
SHANG Jie, BAO Yan, YANG Nan, et al. Research on the relationship between linear measurement range and structure of differential transformer angular displacement sensor[C]//Proceedings of China Aviation Science and Technology Conference. Beijing: Modern Electronic Technology, 2015: 394-398.
- [12] 常莹.RVDT角位移传感器校准技术研究[J]. *宇航计测技术*, 2019, 39(S1): 62-66.
CHANG Ying. Research on calibration technology of foreign electronic measurement technology RVDT angular displacement sensor[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2019, 39(S1): 62-66.
- [13] 孟武胜,苗溢文,董蓉.一种新型差动变压器式角位移传感器[J]. *微特电机*, 2010, 38(8): 32-34.
MENG Wusheng, MIAO Yiwen, DONG Rong. A new type of differential transformer angular displacement sensor[J]. *Micro and Special Motor*, 2010, 38(8): 32-34.
- [14] 郁明辉,李鹏,刘肖肖.双冗余LVDT位移传感器输出电压线性度研究[J]. *电子测量技术*, 2020, 43(2): 26-32.
YU Minghui, LI Peng, LIU Xiaoxiao. Research on output voltage linearity of dual redundancy LVDT displacement sensor[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2020, 43(2): 26-32.
- [15] 黄浩.一种耐恶劣环境的新型角位移传感器设计[D].西安:西安电子科技大学, 2019.
HUANG Hao. Design of a new type of angular displacement sensor resistant to harsh environment[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2019.

(编辑:胥橙庭)