

差动角位移传感器输出电压与结构关系的研究

穆日敏 李 鹏 秦晓楠

(南京航空航天大学自动化学院 南京 211106)

摘要: 旋转可变差动变压器式角位移传感器(RVDT)具有高灵敏度、高重复性、高可靠性等特点,在航空电控领域中,RVDT 应用的范围越来越广泛,且功能越来越强大。基于 RVDT 的工作原理,分析了影响 RVDT 差动输出电压的各种结构因素,并利用有限元分析软件 MAXWELL 进行了仿真验证。分析及仿真结果表明,初级线圈的宽度、定子槽口宽度、转子外径和转子轭外径等结构参数对传感器的输出特性具有重要影响。为了研究输出电压对上述结构参数变化的敏感程度,采用正交试验的影响权重分析方法得到定子槽口宽度、转子外径和转子轭外径的影响权重比较大,从而为容差分析奠定基础。

关键词: 差动角位移传感器;Ansoft;输出电压;结构参数

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4025

Research on relationship between output voltage and structure of RVDT

Mu Rimin Li Peng Qin Xiaonan

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211016, China)

Abstract: With the characteristics of high sensitivity, high repeatability, high reliability, rotary variable differential transformer(RVDT)is also extensively used in the field of aviation electrical control, and the function is more and more powerful. In this paper. According to the working principle of RVDT and the finite element analysis software Maxwell, various structural factors affecting the differential output voltage of RVDT are analyzed and the simulation verification is completed. The analysis and simulation results show that the structure parameters such as the width of the primary coil, the width of the stator slot, the outer diameter of the rotor and the outer diameter of the rotor yoke have important influence on the output characteristics of the sensor. In order to study the changes of sensitivity of output voltage on the structure parameters, the weight analysis method of orthogonal experiment is adopted and the influence of stator slot width, rotor outer diameter and rotor yoke outer diameter is relatively large.

Keywords: differential angle displacement sensor; Ansoft; output voltage; structural factor

0 引 言

能够测量角位移的传感器有感应同步器、光栅、磁栅、激光传感器以及旋转可变差动变压器式角位移传感器(rotary variable differential transformer,RVDT)^[1-3]等。其中,RVDT 是在工业中应用最多的一种。差动变压器式角位移传感器主要是有定子和转子两部分组成,在以软磁材料为基体的定子铁芯内,装有激磁绕组和输出绕组。利用了绕组线圈之间的互感作用将转子的旋转角度转换为与其成比例的电压信号。主要用在旋转运动的系统中,作为位置反馈或角度测量及监控部件。

由于制造工艺、加工能力及环境等因素的影响,产品零部件的几何尺寸、材料性能参数往往会偏离设计值,从而导

致产品实际性能与设计值之间存在差别,它直接影响到产品的质量和生产成本。对 RVDT 差动角位移传感器来说,其性能依赖于零部件尺寸和材料性能参数的变化。如果参数能够容许的误差变大,则产品的生产成本将增大,或者无法达到设计标准;参数容差偏小,废品率将增大,且提高加工精度会增加生产成本,甚至根本无法达到。

RVDT 性能指标主要有线性度、灵敏度、输出精度、输出电压等,本文主要研究的是 RVDT 的差动输出电压。在进行角位移传感器的设计时,设计人员总是希望知道 RVDT 的几何参数在某一范围内变化时,传感器的差动输出电压如何变化。RVDT 设计值偏差必然会引起传感器差动输出电压特性发生偏移,本文定量分析传感器差动输出电压对结构参数的敏感程度。

1 RVDT 的结构和工作原理

RVDT 属于变磁阻式电感传感器^[4-10],改变初次级线圈间的耦合情况(取决于空气隙的变化),通过互感作用引起次级线圈感应电势的变化。RVDT 主要是由定子和转子两部分组成,如图 1 所示,在以软磁材料为基体的定子铁芯内开有 4 个腰型槽,4 个槽中分别装有激磁绕组和输出绕组。RVDT 激磁绕组中通过交流电流以后,在定子铁芯和转子之间产生交变磁场。激磁绕组和输出绕组之间存在互感,输出绕组中感应出的电信号是与转子铁芯旋转角度成比例的。

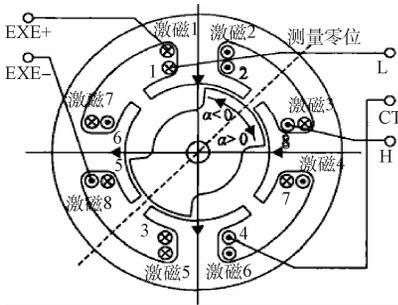


图 1 RVDT 结构简图

4 个腰形槽中按顺时针编号为 1、2、3、4,其中 1、3 和 2、4 分别按距角均为 90° 且在空间正交。4 个腰形槽中分别嵌绕 4 组激磁线圈,匝数分别用 N_{11} 、 N_{12} 、 N_{13} 、 N_{14} 表示,将它们串联后构成激磁绕组;在 4 个槽中同样嵌绕着 4 组输出绕组,匝数分别用 N_{21} 、 N_{22} 、 N_{23} 、 N_{24} 表示;当给激磁绕组提供交流电压 U 时,定子每个凸极上产生的磁通分别为 Φ_1 、 Φ_2 、 Φ_3 、 Φ_4 ,RVDT 等效电路如图 2 所示。

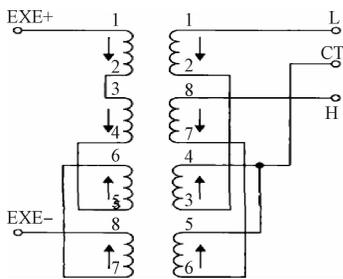


图 2 RVDT 等效电路

定子铁芯和转子之间构成了存在交变的磁场的闭合回路,4 组输出线圈将产生感应电动势,输出线圈的接法应保证正交方向线圈产生的感应电动势 e_{21} 和 e_{23} 同相,并与 e_{22} 和 e_{24} 反相,差动输出电压为:

$$U_o = U_A - U_B \quad (1)$$

设 δ 为定子极掌与转子极端面之间的气隙厚度; S_a 、 S_b 为定子极掌与转子极端面覆盖表面积; r 为转子半径; α 为转子转角,单位为 rad; h 为定子铁芯的有效宽度; 2θ 为定子磁极的角度,单位为 rad; μ_0 为空气导磁系数。差动角位

移传感器的定子铁芯和转子铁芯几何结构绝对对称、线圈匝数绝对对称,定子及转子铁芯状态在铁芯材料磁化曲线的线性段,材料的初始导磁率很高。

由法拉第定律以及安培环路定律:

$$\begin{cases} e = N \frac{d\phi}{dt} \\ \oint H_m dl_m + \oint H_\delta dl_\delta = F \end{cases} \quad (2)$$

式中: H_m 为铁芯磁场强度, H_δ 为气隙中的磁场强度。这里忽略铁芯的磁阻,则磁路的磁阻完全为气隙磁阻,为:

$$R_{\delta 1} = R_{\delta 3} = \delta / \mu_0 S_a = \delta / [\mu_0 r(\theta - \alpha)h] \quad (3)$$

$$R_{\delta 2} = R_{\delta 4} = \delta / \mu_0 S_b = \delta / [\mu_0 r(\theta + \alpha)h] \quad (4)$$

由于 4 只极上一次线圈的匝数均相等,即 $N_{11} = N_{12} = N_{13} = N_{14}$,流过的电流相等,均为 I_1 ,所以磁动势也相等,即:

$$F_{M1} = F_{M2} = F_{M3} = F_{M4} = N_1 I_1 \quad (5)$$

可以求出磁通为:

$$\Phi_1 = \Phi_3 = kF_{M1} / R_{\delta 1} = I_1 N_1 \mu_0 r h (\theta - \alpha) / \delta \quad (6)$$

$$\Phi_2 = \Phi_4 = kF_{M2} / R_{\delta 2} = I_1 N_1 \mu_0 r h (\theta + \alpha) / \delta \quad (7)$$

在外部电路断开情况下,各个次级线圈的感应电动势为:

$$\begin{cases} e_{21} = 2\pi f N_{21} \Phi_1 \\ e_{22} = 2\pi f N_{22} \Phi_2 \\ e_{23} = 2\pi f N_{23} \Phi_3 \\ e_{24} = 2\pi f N_{24} \Phi_4 \end{cases} \quad (8)$$

式中, f 为励磁电源频率, k 为漏磁系数。

假设 RVDT 4 只极上二次线圈匝数满足下面的关系 $N_{21} = N_{23} = N_2$, $N_{22} = N_{24} = N_3$,利用上面的公式计算可以得到:

$$U_o = 4\pi f (N_2 + N_3) k I_1 \mu_0 r h \frac{\alpha}{\delta} \quad (9)$$

2 RVDT 结构参数对传感器输出电压影响

RVDT 差动角位移传感器的性能指标主要有线性度、灵敏度、输出精度、输出电压等,本文主要研究的是 RVDT 的差动输出电压。在对角位移传感器进行设计时,应该知道传感器结构几何参数在一定变化范围,传感器的性能指标^[11](本文主要研究差值电压输出)如何变化,是否满足性能指标要求,从而评估方案的合理性。

2.1 RVDT 性能参数仿真

因为 RVDT 的各个参数对输出结果影响的具体关系很难得出具体的解析表达式,因此本文利用基于有限元思想的电磁仿真软件进行仿真分析。通过 MAXWELL 2D 建模得到的 RVDT 二维模型如图 3 所示,经过软件分析后得到的差值电压和和值电压分别如图 4 所示。

本文的 RVDT 在设计过程中有如下要求:

1) 具有两个独立的输出绕组,绕组输出特性为一次函数曲线;

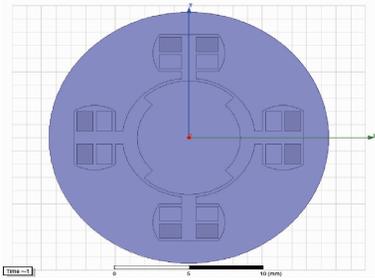


图 3 RVDT 二维模型

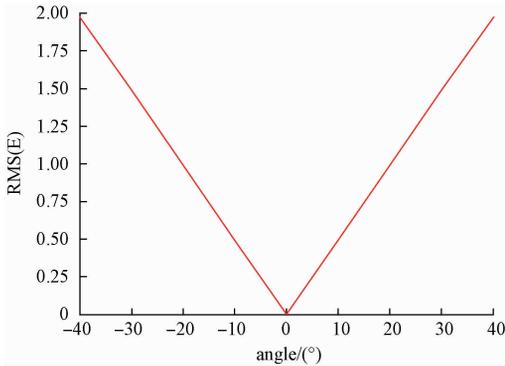


图 4 RVDT 差值电压曲线

2) 两个次级绕组反相连接得到差动输出电压, 其输出特性为正比例函数曲线;

3) 两个次级绕组串接后的和值输出电压为恒定值, 值幅值不随转子角度变化而变化。

RVDT 的理论线性范围为 $\pm 45^\circ$, 在实际应用中线性范围一般只达到 $\pm 40^\circ$ 左右。通过仿真得到的该差动角位移传感器的线性度为 0.1%, 验证了差值电压在某一角度范围内的一次线性度。图 5 验证了差动角位移传感器和值电压幅值基本不随转子铁芯转动角度变化而变化。从图 6 可以看出差动角位移传感器磁场强度的分布情况。

2.2 RVDT 结构参数对输出电压的影响

研究差动角位移传感器在多个结构参数的综合作用的情况下, 即传感器的多个结构参数设置引起的差动角位移传感器差值电压输出值的变化, 这是一个多参数问题。本文选用简单的单参数变化来得出差动角位移传感器的差值电压的变化, 并依据结构参数影响权重分析方法选出在这些容差下面影响传感器性能的主要参数和次要参数。

在进行设计分析时, 由于受到试验条件和时间等因素的限制, 固定了差动角位移传感器的一些结构参数, 如转子扇形角度为 90° , 转子内径为 3.5 mm, 定子槽宽为 4 mm, 定子槽高度为 2.5 mm 等。本文对表 1 中的结构参数进行仿真分析, 由于在 $\pm 40^\circ$ 内传感器差值电压完全对称, 所以下面的仿真分析设置在 $0^\circ \sim 40^\circ$ 。

当差动角位移传感器线圈宽度改变而其他参数不变时, 磁场分布发生变化, 表 2 所示为初级线圈宽度增加后

RVDT 转子铁芯在转过不同角度后传感器的差动输出电压, L_1 在 3 个特征值时 RVDT 磁力线分布如图 5 所示。当线圈宽度变大时, 磁路中磁场强度变大所以差动输出电压也增大。由表 2 可以看出, 当初级线圈宽度变小, 传感器差动输出电压变小; 相反, 当初级线圈宽度变大时, 传感器差

表 1 RVDT 的结构参数 (mm)

符号	含义	初始值	设置范围
L_1	初级线圈的宽度	1.5	1.1~1.9
L_2	定子槽口宽度	1	0.4~1.6
R_1	转子外径	4.3	4.2~4.4
R_2	转子轭外径	3.5	2.8~4.2

表 2 不同初级线圈宽度下 RVDT 的差动输出电压

初级线圈宽度 L_1 /mm	转子铁芯不同角度下的差动输出电压/V				
	0°	10°	20°	30°	40°
1.1	0	0.50	1.00	1.51	1.99
1.5	0	0.50	1.01	1.52	2.01
1.9	0	0.51	1.02	1.53	2.03

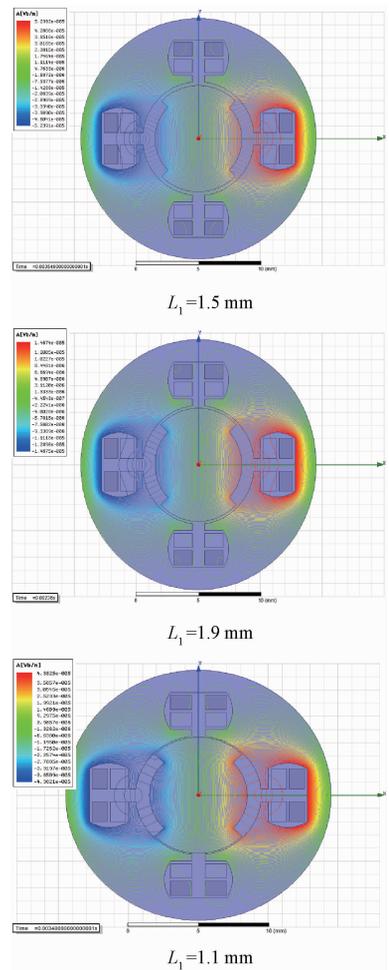


图 5 L_1 在 3 个特征值时 RVDT 磁力线分布

动输出电压变大。

当差动角位移传感器定子槽口宽度改变而其他参数不变时,槽口宽度变化而使漏磁通变化,进而引起磁场分布发生变化,表3表示槽口宽度增加后RVDT转子铁芯在转过不同角度后传感器的差动输出电压, L_2 在3个特征值时RVDT磁力线分布如图6所示。当槽口宽度变小时,凸极绕组极间漏磁通减少,则此路的主磁通将增大。由表3可以看出,当槽口宽度变大,传感器差动输出电压变大,但是当槽口宽度变大时,差动输出电压的线性度将会变差。

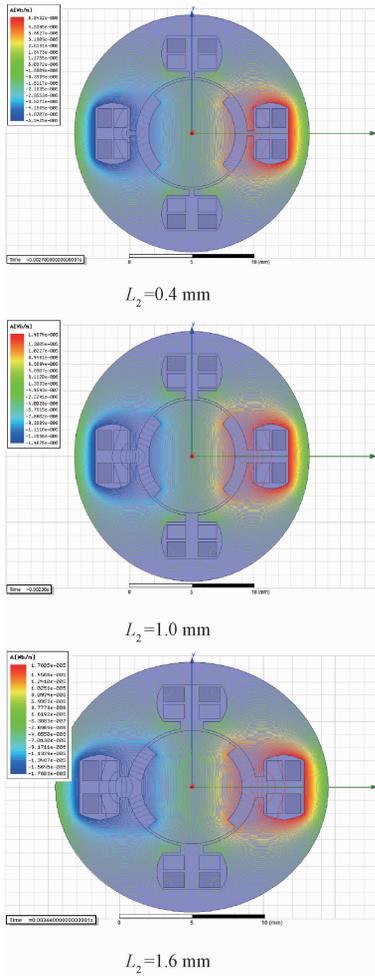


图6 L_2 在3个特征值时RVDT磁力线分布

表3 不同定子槽口宽度下RVDT的差动输出电压

定子槽口 宽度 L_2 /mm	转子铁芯不同角度下的差动输出电压/V				
	0°	10°	20°	30°	40°
0.4	0	0.43	0.86	1.29	1.71
1.0	0	0.50	1.01	1.52	2.01
1.6	0	0.56	1.13	1.71	2.15

当差动角位移传感器转子外径改变而其他参数不变时,引起磁场分布发生变化,表4所示为转子外径增加后

RVDT转子铁芯在转过不同角度后传感器的差动输出电压, R_1 在3个特征值时RVDT磁力线分布如图7所示。当转子外径增大时,磁路中磁场强度变大则差动输出电压也增大。由表4可以看出,当转子外径变大,传感器差动输出电压变大,但是当转子外径变大时,差动输出电压的线性度将会变差。

表4 不同转子外径下RVDT的差动输出电压

转子外径 R_1 /mm	转子铁芯不同角度下的差动输出电压/V				
	0°	10°	20°	30°	40°
4.2	0	0.40	0.80	1.19	1.55
4.3	0	0.50	1.01	1.52	2.01
4.4	0	0.61	1.24	1.91	2.65

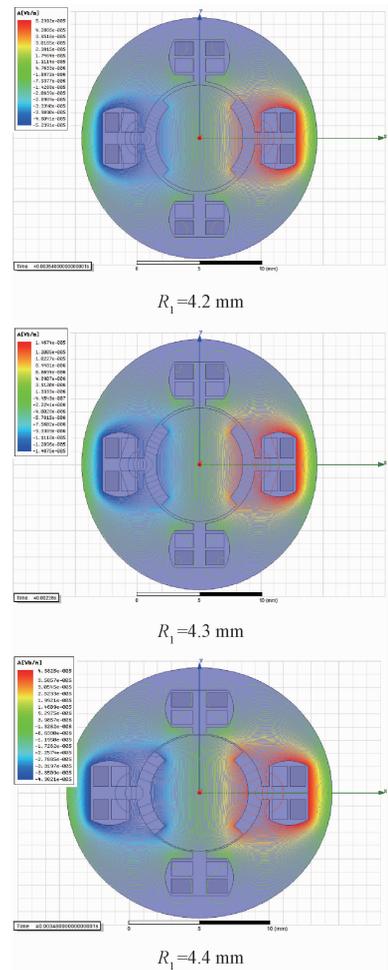


图7 R_1 在3个特征值时RVDT磁力线分布

当差动角位移传感器转子外径改变而其他参数不变时,引起磁场分布发生变化,表5所示为转子外径增加后RVDT转子铁芯在转过不同角度后传感器的差动输出电压, R_2 在3个特征值时RVDT磁力线分布如图8所示。当转子外径增大时,磁路中漏磁通变大则差动输出电压变小。由表5可以看出,当转子外径变大,传感器差动输出电压

变小,当转子轭外径变小,传感器差动输出电压变大。

表 5 不同转子轭外径下 RVDT 的差动输出电压

转子轭外径 R_2/mm	转子铁芯不同角度下的差动输出电压/V				
	0°	10°	20°	30°	40°
2.8	0	0.58	1.16	1.76	2.35
3.5	0	0.50	1.01	1.52	2.01
4.2	0	0.15	0.30	0.44	0.58

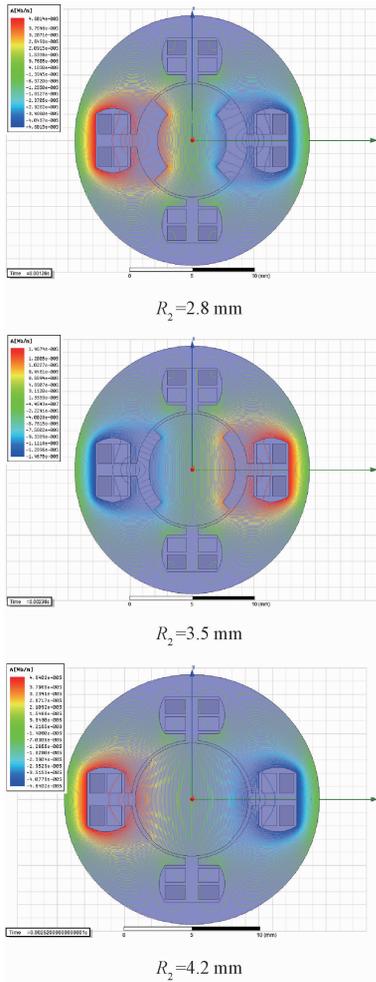


图 8 R_2 在 3 个特征值时 RVDT 磁力线分布

3 基于正交试验的结构参数影响权重分析

根据第 2 节的分析,RVDT 差动角位移传感器的设计值偏差必然会引起传感器输出电压特性发生偏移,为了量化这种偏移的程度,在这里采用结构参数影响权重概念^[12-15]。影响权重表示传感器的差动输出电压对传感器结构参数变化的敏感程度,从而得到影响传感器差动电压的主要因素和次要因素,以此来指导传感器容差设计。

3.1 结构参数影响权重分析原理

在已知 RVDT 传感器各参数变化范围 $[x'_i, x''_i], i \in$

$\{1, n\}$ 的情况下,所要确定的是传感器性能函数 $y = f(X)$ 的相应变化范围 $[y', y'']$ 。为了分析方便,这里引入了输出电压大小的影响权重的概念。影响权重是当某一结构参数变化时,其对传感器性能函数影响程度的一个系数。设参数值为 X , 相对变化为 $\frac{\Delta X}{X}$, 因参数 X 变化引起的传感器性能相对变化 $\frac{\Delta y}{y}$ 。则函数 $y = f(X)$ 对参数 X 的影响权重为:

$$S_X^y = \frac{\partial y}{y} / \frac{\partial X}{X} \quad (10)$$

因为本文研究的是 RVDT 转子铁芯转角在 $\pm 40^\circ$ 的差动电压输出,在每个角度下都会对应有一个差动输出电压灵敏度,为了研究在所有角度下输出敏感程度,本文将每一角度下差动输出电压影响权重取平均,所以灵敏度的定义公式如下:

$$S_X^y = S_X^y / 5 \quad (11)$$

式中: S_X^y 代表差动角位移传感器动子铁芯转过及角度为 θ 的影响权重, S_X^y 代表设计参数 X 对差动输出电压的影响权重。

当传感器结构参数参数较多时,影响权重分析的工作量将会非常大,而且要分析多个结构参数对 RVDT 差动输出电压的共同影响,所以本文采用正交试验设计的方法。正交试验设计方法适用于多参数共同作用的情况,在各参数变化范围内选出有代表性的参数值进行试验,这些参数值具有“均匀”和“整体”的特点。在进行正交试验设计后,本文利用极差分析法来进行结构参数影响权重分析。极差 R_q 的定义公式如下:

$$R_q = \max[m_1, m_2, m_3, \dots] - \min[m_1, m_2, m_3, \dots] \quad (12)$$

其中: m_i 为因素 q 在 t_i 水平下目标函数的平均值。

3.2 结构参数影响权重分析

基于 RVDT 差动角位移传感器设计参数对差动输出电压的影响结果分析,本文主要研究对差动电压的输出影响很小,所以将其设定为初始值。下面对其他 4 个因素做影响权重分析。正交试验的因素水平表如表 6 所示。

表 6 因素水平表 (mm)

水平	因素			
	初级线圈的宽度 L_1	定子槽口宽度 L_2	转子外径 R_1	转子轭外径 R_2
1	1.1	0.4	4.2	2.8
2	1.5	1.0	4.3	3.6
3	1.9	1.6	4.4	4.2

表 7 所示为输出电压试验结果。表 7 中的 $y_{0^\circ}, y_{10^\circ}, y_{20^\circ}, y_{30^\circ}, y_{40^\circ}$ 分别代表 RVDT 转角在 $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ 下的输出电压,单位为 V。经过极差计算,RVDT 传感器差动输出电压对上面 4 个结构参数的影响权重如表 8 所示。

表7 RVDT 差动输出电压试验结果分析表

因素	L_1	L_2	R_1	R_2	y_{0°/V	y_{10°/V	y_{20°/V	y_{30°/V	y_{40°/V
1	1(1.1)	1(0.4)	1(4.2)	1(2.8)	0	0.32	0.75	1.01	1.32
2	1	2(1.0)	2(4.3)	2(3.6)	0	0.50	1.00	1.51	1.99
3	1	3(1.6)	3(4.4)	3(4.2)	0	0.19	0.38	0.54	0.67
4	2(1.5)	1	2	3	0	0.14	0.27	0.43	0.57
5	2	2	3	1	0	0.72	1.36	2.21	2.91
6	2	3	1	2	0	0.50	1.01	1.61	2.02
7	3(1.9)	1	3	2	0	0.60	1.21	1.89	2.63
8	3	2	1	3	0	0.14	0.29	0.43	0.56
9	3	3	2	1	0	0.58	1.17	1.74	2.31

表8 RVDT 传感器差动输出电压对结构参数的影响权重

结构参数	影响权重 S_x
初级线圈的宽度 L_1	0.1
定子槽口宽度 L_2	0.73
转子外径 R_1	11
转子轭外径 R_2	1.26

由影响权重定义可知,参数影响权重越大,则结构参数变化时对差动输出电压的影响越显著,反之影响越小。表8中定子槽口宽度 L_2 、转子外径 R_1 、转子轭外径 R_2 的影响权重较大,说明参数 L_2 、 R_1 、 R_2 引起的差动输出电压变化较大。因此在实际加工过程中,为了控制差动输出电压的变化范围,应主要对参数 L_2 、 R_1 、 R_2 的容差进行控制。当要求差动输出电压 y_0 在较小的范围内变化时,就需要对上面参数采用较小的容差,对影响较小的参数采取比较宽松的容差,影响权重分析使得容差分配合理性。通过正交试验设计进行影响权重分析,可以大大提高分析的效率,迅速找到影响目标函数的结构参数,从而为容差分析、容差设计奠定基础。

4 结 论

通过对 RVDT 差动角位移传感器原理进行分析,差动输出电压是传感器的一个重要性能参数,并且会随着结构参数的变化而变化。利用 Ansoft 软件进行 RVDT 差动角位移传感器仿真,分析了初级线圈的宽度、定子槽口宽度、转子外径和转子轭外径 4 个差动角位移传感器设计参数变化引起的差动输出电压的变化;在 $0^\circ \sim 40^\circ$ 变化范围内,差动输出电压随着初级线圈的宽度、定子槽口宽度、转子外径的变大而变大,差动输出电压随着转子轭外径的增大而减小。采用正交试验设计方法量化 RVDT 差动输出电压对初级线圈的宽度、定子槽口宽度、转子外径和转子轭外径的输出影响程度,得到定子槽口宽度、转子外径和转子轭外径的影响权重比较大;通过正交试验设计进行影响权重分析,可以大大提高分析的效率,迅速找到影响目标函数的结构参数,从而为容差分析、容差设计奠定基础。

参考文献

[1] 周海婷. 基于有限元仿真电涡流传感器的结构优

化[J]. 电子测量技术,2016,39(7):15-19.

- [2] 张宇鹏. 光电稳定平台角位移高精度测量方法研究[J]. 国外电子测量技术,2015,34(10):54-57.
- [3] 李红梅,陈涛. 永磁同步电机参数辨识研究综述[J]. 电子测量与仪器学报,2015,29(5):638-647.
- [4] 徐英,张涛,李敏雪,等. 电容式角位移传感器电场有限元仿真研究[J]. 仪器仪表学报,2004,25(4):512-515.
- [5] 钱坤. 电磁式位移传感器结构性能集成设计系统[D]. 西安:西安电子科技大学,2009.
- [6] 尚洁. 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]. 中国航空学会:2015年第二届中国航空科学技术大会论文集,2015.
- [7] 张西涛. 某电传飞控系统角位移传感器设计优化[J]. 测控技术,2013,32(12):9-12.
- [8] 刘钊. 比例阀差动变压器式位移传感器参数化仿真与实验分析[D]. 武汉:武汉科技大学,2013.
- [9] 李娟. 非对称结构差动位移传感器参数化仿真与优化[D]. 西安:西安电子科技大学,2013.
- [10] 刘萍. 差动变压器式位移传感器参数化仿真及优化[D]. 西安:西安电子科技大学,2010.
- [11] 孔宪光,刘萍,殷磊,等. 差动变压器式位移传感器参数化仿真技术研究[J]. 仪器仪表学报,2009,30(12):2562-2567.
- [12] 吕晓威,罗玲,李丹,等. 基于正交试验法的盘式无铁心永磁同步发电机优化设计[J]. 微特电机,2013,41(3):11-14.
- [13] 曲开文. 电容传感器的三维静电场分析及其优化设计[D]. 沈阳:东北大学,2010.
- [14] 王晓星,吴锡令,王滨涛. 基于正交试验方法的流动成像测井传感器优化设计[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2010,34(2):52-55.
- [15] 龚裕,朱海业,李楠. 基于正交试验方法的相邻电容传感器优化设计[J]. 北京工业大学学报,2015(1):13-19.

作者简介

穆日敏,硕士研究生,主要研究方向为计算机辅助系统设计等。

E-mail:2535481782@qq.com