

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2412883

多参数协同作用的时栅传感器模型构建方法*

王宇¹, 王阳阳^{1,2}, 陈锡侯¹, 张天恒¹

(1. 重庆理工大学机械检测技术与装备教育部工程研究中心 重庆 400054; 2. 重庆理工大学两江国际学院 重庆 401135)

摘要:时栅传感器在产品化过程中暴露出设计局限于传感器结构本身,而缺乏系统化的设计与优化方法;设计和实验过程分散,无法充分利用统计学知识建立模型;产品设计高度依赖于设计人员的经验等严重制约产品化进程的问题。以磁场式时栅为研究载体,采用均匀设计方法进行了试验设计,利用逐步回归分析对实验结果进行分析,构建了考虑多参数协同作用的传感器模型设计方法。开展了仿真试验和样机试验,结果表明:基于该方法建立的传感器模型具有良好的可预测性能,建立的精度模型与仿真数据拟合度达89%,置信度大于92%,能够有效地反映时栅传感器的精度,对于时栅传感器的设计和优化具有重要的借鉴意义。

关键词:时栅;多参数协同;均匀设计;逐步回归

中图分类号: TH712 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

A model formulation method for time-grating displacement sensors considering multi-parameter synergies

Wang Yu¹, Wang Yangyang^{1,2}, Chen Xihou¹, Zhang Tianheng¹

(1. Engineering Research Center of Mechanical Testing Technology and Equipment Ministry of Education, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China; 2. Liang jiang International College, Chongqing University of Technology, Chongqing 401135, China)

Abstract: The productization process of time-grating displacement sensors has revealed that the design of these sensors is primarily focused on the sensor structure itself, lacking a systematic design and optimization method. The design and experimental process are fragmented, making it impossible to fully utilize statistical knowledge to establish a model. The product design heavily relies on the experience of designers, which has significantly constrained the productization process of the sensors. To address the aforementioned issues, this article uses the magnetic field time-grating displacement sensor as the research subject. The experimental design is implemented using the uniform design method, and the experimental results are analyzed using stepwise regression analysis to construct the sensor model design method. Simulation tests and prototype tests are performed, and the results show that the sensor model, built based on this method, exhibits good prediction performance. The established accuracy model fits the simulation data by 89% with a confidence level of over 92%. It can effectively respond to the accuracy of the time-grating sensor, which is of great significance for the optimal design of the time-grating displacement sensor.

Keywords: time-grating; multi-parameter synergy; uniform design; stepwise regression

0 引言

角位移传感器作为指示和反馈转角位置信息的装置,广泛应用于工业制造、航空航天和车辆工程等领域。

根据工作原理的不同,角位移传感器主要分为光电式、电容式和电感式传感器3类。以光栅编码器为典型的光电式编码器其高精度测量的实现主要依赖于高精度光刻工艺、精密光学结构设计和高精度光源,但易受到振动、灰尘和油污等环境因素影响^[1-2]。电容式传感器

收稿日期:2024-05-25 Received Date: 2024-05-25

* 基金项目:重庆市自然科学基金项目(CSTB2024NSCQ-MSX0244)、重庆市教委科学技术研究计划项目(KJQN202301116)、重庆理工大学科研启动基金项目(2022ZDZ048)、国家重大科研仪器研制项目(51827805)资助

通过测量电容器极板间距离、面积或者介电常数的变化来实现位置检测,虽然其结构简单、分辨力较高,但输出信号的负载能力较差且易受到寄生电容影响^[3]。电感式传感器利用通电线圈的电磁感应特性或电涡流效应实现对位移的测量,但精度和分辨力相比前两者略差。瑕不掩瑜,得益于其耐油污粉尘、抗振动、抗干扰和低成本等优点^[4-6],电感式传感器在装备制造、武器制导及航空航天等工业领域备受青睐。常用的电感式传感器提高精度的方法主要集中在增加极对数、改善机械等分精度和引入补偿算法等方面。如何在增加制造成本和工艺复杂性的情况下实现可以媲美光栅和电容式传感器精度指标的低成本测量是电感式传感器亟待解决的一个重要问题。

1996 年彭东林及其研究团队^[7-8]提出利用高频时钟作为测量基准,通过在传感器内部构建一个匀速的运动,实现将空间位移信息的求解转换为对时钟脉冲的计数的测量方法,并在其后几年成功研制出了时栅位移传感器。时栅位移传感器将机械分度问题转换为电信号拾取的问题,成功回避了机械精密刻线工艺精度不足的问题,实现了高精度、高分辨率和低成本的测量。为了解决客户端对更高的精度、更优的分辨率和更好的环境适应力高性能需求,减少来自安装、结构及外界干扰带来的误差,相关人员开展了大量研究工作。孙世政等^[9]建立了不同安装模态对传感器测量精度的影响模型,并给出了安装的建议;Yu 等^[10]采用多测头平均法,用于消除光栅盘倾斜引起的误差;Liu 等^[11]采用四点测量与误差分离方法,纠正由于偏心安装引入的测量误差。为增强激励磁场的均匀性,Zhao 等^[12-13]利用铁磁基体对磁场的约束作用,配合绕组线圈实现磁场的精确约束;杨继森等^[14-15]提出了双层互补式绕组布线方法,减少端部效应达到提高磁场均匀性,从而提高传感器测量精度的目的。对于外部干扰,闫飞等^[16]设计了一种新型 LVDT 结构,减少外界稳恒磁场的影响;Wang 等^[17]提出一种多极距优化的紧凑型自屏蔽均匀磁场线圈设计,用于促进外部磁场的衰减,以达到提升测试性能的目的。在上述研究中往往多只针对整体设计中的一个或几个参数,并未考虑多个参数间相互作用的情况,且没有形成一个统一性的理论模型或方法体系指导传感器的设计。

因此,以磁场式时栅为研究载体,提出利用统计学知识和均匀试验设计方法,建立一种多参数协同的模型建立方法。通过该精度模型建立方法,构建协同传感作用下各参数与传感器测量精度之间的关系,借助模型仿真输出结果指导传感器方案设计,减少传感器设计周期,提升产品效率。

1 时栅传感器测量原理

1.1 测量原理

磁场式时栅的典型结构如图 1 所示,包括定子、转子和绕组等主要部分。当在激励绕组通入时间正交的两路信号时,随着转子与定子之间的相对运动,由感应绕组拾取可由式(1)所表示的含有气隙磁场信息的电信号,再经过解算系统处理实现测量^[1]。

$$e(t, \theta) = A \cos(\theta \pm \omega t) \quad (1)$$

式中: A 为常数系数; θ 为角位移量; $\omega = 2\pi f$ 为角频率; t 为时间量。

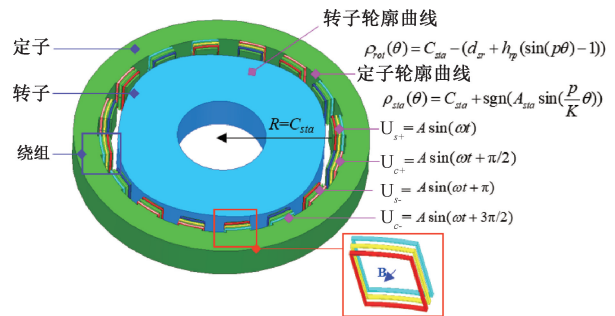


图 1 磁场式时栅的结构

Fig. 1 Typical structure of magnetic field time grating

1.2 传感器信号与多传感参数

根据电磁感应定律,单个感应绕组感应电动势变化规律可由式(2)表示。

$$e(t) = -N_0 \frac{d\phi}{dt} = -N_0 D \frac{dB}{dt} \quad (2)$$

式中:感应电动势的幅值随时间 t 变化; ϕ 为通过 N_0 匝有效面积为 D 感应绕组的磁通量。

任意点的磁场强度 dB 可以由毕奥-萨伐尔定律描述,即:若将通入电流的激励绕组视为无数个电流单元 dI ,电流路径为 L , dI 磁路视为闭环磁路 L_a ,若此时定子与转子间的气隙宽度仍在磁场有效作用范围内,则感应绕组所形成的封闭平面内,任意点的磁场强度 dB 可表示为:

$$dB = \frac{\mu_0 L_{vac} + \mu_1 L_{met}}{4\pi L_a} \frac{Idl \times e_r}{r^2} \quad (3)$$

式中: e_r 是 dI 指向待求场点的单位向量; r 为 dI 指向所求点的矢量; μ_0 与 μ_1 分别是真空磁导率和铁磁材料磁导率。电流单元 dI 形成的磁场,在真空环境与铁磁材料中的磁路长度分别为 L_{vac} 、 L_{met} ,与总磁路长度 L_a 满足关系:

$$L_{met}(\theta) = L_a - L_{vac} \quad (4)$$

对式(3)求积分可得穿过定子齿的感应绕组的磁通

量 ϕ :

$$\phi = \iint_D B dx dy = \iint_D \int_L d\mathbf{B} dx dy = \frac{A_{\sin} \cos(\omega t)}{4\pi R} \iint_D \int_L (\mu_0 L_{vac} + \mu_1 L_{met}) \frac{d\mathbf{l} \times \mathbf{e}_r}{L_a r^2} dx dy \quad (5)$$

进一步地将式(5)代入式(2),单个感应绕组的感应电动势可表示为:

$$e = -N_0 \frac{d\phi}{dt} = -N_0 \frac{d\left(\iint_D \int_L d\mathbf{B} dx dy\right)}{dt} \quad (6)$$

根据式(6)可知:传感器的输出信号受对极数、齿数比例、定转子间气隙长度、转子齿高度等参数的共同作用影响。一般情况下,已知激励绕组、感应绕组导线的坐标和铁磁基体的位置信息,可利用有限元仿真软件模拟获得到如式(6)示意的结果,但需要较多的计算资源。因此,假设在理想状态下,不考虑绕组线圈之间的互感,并将气隙磁导 Λ 视为常数,在转子为从零点起第 n_p+1 个对极的角度值 θ_p 时,感应电动势可表示为:

$$e = -\frac{A_a N_0 N_1 \omega \cos(\omega t)}{4\pi R} \Lambda (C_a + A_{sr} \sin(\theta_p)) \quad (7)$$

根据作者前期研究可知,当定子与转子的齿数之比为 4:5 时,感应信号的质量较好^[18],即令 $K=1.25$,常数项等于 Z ,感应电动势为:

$$e = \sum_{i=1}^{p/K} \frac{A_a N_0 N_1 \omega \cos(\omega t + 0.5(i-1)\pi)}{4\pi R} \times \Lambda (C_a + A_{sr} \sin(\theta_p + 2\pi i K)) = \sum_{i=1}^{p/K} Z \cos(\omega t + 0.5(i-1)\pi) (C + \sin(\theta_p + 2\pi i K)) = Z \frac{p}{2K} \sin(\omega t - \theta_p) \quad (8)$$

综上,对传感器输出电势信号具有影响的参数主要包括了定子和转子的齿形齿廓参数、气隙、安装状态、绕组的布置方式及材料等。往往这些传感参数难以直接作为传感器精度的判别标准,因而需要进一步建立参数评价模型。

1.3 传感器精度与模型参数

假设存在实数域连续且 n 阶函数可导,能够计算参数 x_1 对时栅传感器的测量精度 y 的影响,该模型表达式为:

$$y = f_1(x_1) + \varepsilon_1 \quad (9)$$

式中: ε_1 为测量精度的观测误差。建立的精度预测模型 $\hat{y}$ 可展开为:

$$\hat{y} = \sum_{i=0}^n \frac{1}{i!} f^{(i)}(x_{1_0}) (x_1 - x_{1_0})^i + o(n+1) \quad (10)$$

对于存在 m 个传感参数的时栅精度评价模型,可表示为:

$$\begin{cases} \hat{y} = f(x_1, x_2, \dots, x_z) = \mathbf{B}\mathbf{X}^T \\ \mathbf{B} = [b_0 \quad b_1 \quad \dots \quad b_z] \\ \mathbf{X} = [x_0 \quad x_1 \quad \dots \quad x_z] \\ x_{\text{num}} = x_1^i x_2^j \dots x_m^k, [i, j, \dots, k] \in N, i+j+\dots+k \leq n \end{cases} \quad (11)$$

精度 y 的观测值由传感参数值、交互作用项和各传感参数的随机误差构成。在确定传感参数值后,观测值的随机误差呈正态分布,即 $\varepsilon \sim N(\mu, \sigma^2)$ 。

因此,传感器精度可以表示为多个传感参数的线性组合,通过求解各个传感参数的系数,便能够得到理想的时栅精度模型,用于指导传感器的设计。

2 精度模型的建立方法

理想状态下,假定传感器精度模型中的自变量与精度呈高度线性关系,且自变量间相互独立,则仅需 m 组数据即可求得唯一解。但是,实际上各传感参数与传感器精度并非线性关系,且存在多传感参数协同作用,故而考虑综合回归分析方法、试验设计方法和逐步回归方法,来实现对时栅精度模型的建立和对模型的置信度分析。精度模型建立方法架构如图 2 所示。

2.1 多元回归方法

精度与各传感参数之间呈非线性关系,故拟通过最小化残差平方和(最小二乘法)或其他拟合准则,寻求最优的参数估计。 $\hat{y} = f(x_1, x_2, \dots, x_z)$ 是精度 y 关于自变量传感参数 x 的理论模型,若方程有解,则要求试验次数 n 要大于传感参数的个数 z 。在能够获取足够的试验数据的条件下,将自变量代入 $\hat{y}$, 得到残差平方和 SSe :

$$\begin{cases} SSe = \sum_{i=0}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \\ \frac{\partial(SSe)}{\partial b_i} = 0, i = 0, 1, 2, \dots, z \end{cases} \quad (12)$$

根据最小二乘法原理,使 SSe 达到最小以得到正规方程组;求解方程组,得到 $\hat{y} = f(x_1, x_2, \dots, x_z)$ 中各传感参数项系数,并进行显著性检验。使用 F 检验法或相关系数检验法,反应精度 y 与传感参数之间的线性相关程度。

2.2 逐步回归方法

通过建立均匀试验表,有效减少精度模型构建所需的试验次数。每个均匀设计表中皆包含相应的试验安排表和使用表,在使用表 1 和 2 安排试验时,可同时考察 4 个传感参数的 8 个水平变化情况。

前向逐步回归从一个空模型开始,逐步引入对响应变量有显著影响的预测变量,直到满足某个停止准则。每一步中,通过比较添加预测变量前后的模型拟合效

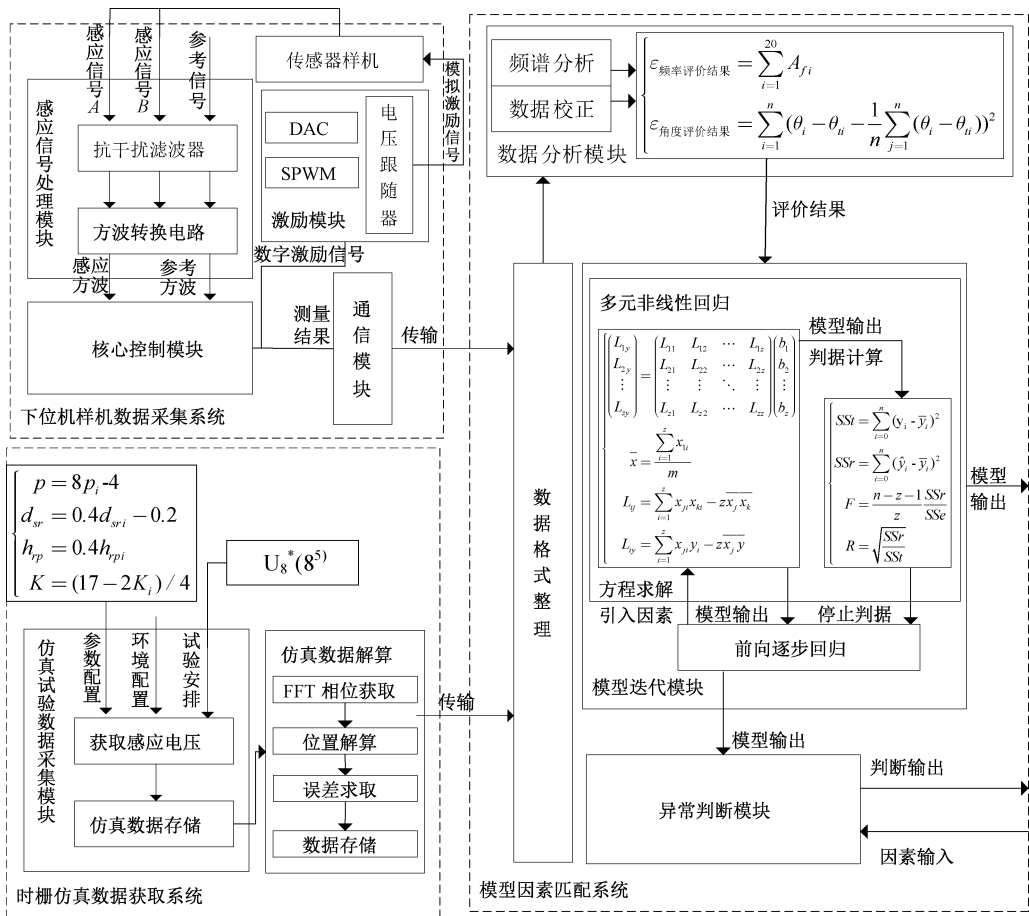


图 2 精度模型建立框架

Fig. 2 The Framework for precision model development

表 1 均匀试验表 $U_8^*(8^5)$

Table 1 Uniform test table $U_8^*(8^5)$

试验号	1 列	2 列	3 列	4 列	5 列
1	1	2	4	7	8
2	2	4	8	5	7
3	3	6	3	3	6
4	4	8	7	1	5
5	5	1	2	8	4
6	6	3	6	6	3
7	7	5	1	4	2
8	8	7	5	2	1

表 2 试验使用表 $U_8^*(8^5)$

Table 2 Test usage table $U_8^*(8^5)$

传感参数	列号				偏差值
2	1	3			0.145
3	1	3	4		0.2
4	1	2	3	5	0.27

3 基于仿真数据的精度模型建立

3.1 仿真试验设计

果,确定是否继续添加预测变量,前向逐步的流程如图 3 所示。向前逐步回归一定程度上能够避免因均匀试验试验次数较少,导致的传感参数变量有限的缺点,能够把参数的交互作用项较好的引入到模型,对时栅的精度提升产生积极影响。

使用均匀试验表 1 和安排表 2 安排试验,将第 4 列作为误差列,考察的传感参数为转子对极数 p 、固有气隙长度 d_{sr} 、转子齿高度 h_{rp} 和定转子齿比例系数 K ,表头设计如表 3 所示。以参数 p 为例,其实际值可通过图 2 中的公式计算得到表 1 的 1 列 i 行数值 P_i ,其他传感参数求解同理。

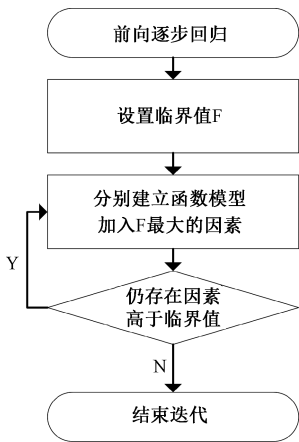


图 3 前向逐步递归流程

Fig. 3 Forward stepwise recursive flowchart

表 3 $U_8^*(8^5)$ 的表头设计

Table 3 Header design of $U_8^*(8^5)$

传感参数	名称	列号
p	对极数	1
d_{sr}	固有气隙长度/mm	2
h_{rp}	转子齿高度/mm	3
nop		4
K	定转子齿比例系数	5

在仿真试验中,各试验绕组的绕制规则遵循如图 1 所示参数,部分不参与考虑评估的传感参数及其取值可参见表 4。

表 4 均匀试验中的固定传感参数表

Table 4 Fixed parameters in uniform tests

传感参数名	参数值	传感参数名	参数值
定子内径/mm	60	激励线圈匝数/匝	20
定子齿深度/mm	3.5	感应线圈匝数/匝	20
定子齿数	16	绕组材料	铜
定子外径/mm	80	激励电压/V	5
定子厚度/mm	10	激励信号频率/Hz	2 000
转子内径/mm	24	激励信号相位差/ $^{\circ}$	90
转子厚度/mm	10	激励仿真时长/ms	0.5
定转子材料	08 钢	激励仿真步距/ μs	12.5
绕组与齿间距/mm	0.2	转子仿真步长/ $^{\circ}$	$360/p$
绕组间间距/mm	0.5	转子仿真步距/ $^{\circ}$	$9/p$

通过电磁场有限元仿真软件获得的一个对极内设置转子仿真步距为 $1/40$ 对极的传感器感应电势波形,如图 4 所示。其中,不同的线条曲线示意转子在不同转角下的感应电动势。通过对图 4 中的感应电势进行傅里叶变换,再

经过运算处理得到的感应电势的初相角误差曲线及傅里叶分解获得的单对极内的频谱分布情况,如图 5 所示。

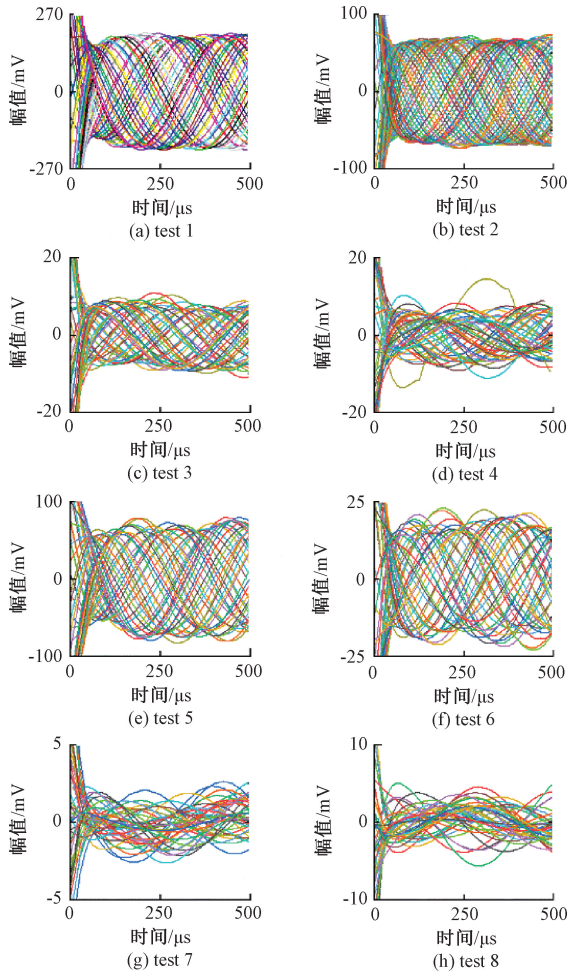


图 4 均匀试验感应电压

Fig. 4 Electromotive force of uniform test

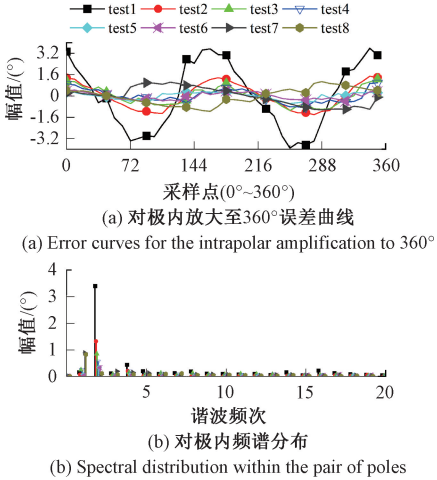


图 5 均匀试验的初相角误差与谐波误差

Fig. 5 Initial phase angle error and harmonic error of uniform test

均匀试验的评价结果如表 5 所示,相位误差评价结果如图 5(a)中各误差曲线的残差平方和。综合分析图 5 和表 5 可知: test1~8 整体相角误差为从大到小、再从小变大的二次函数曲线趋势,在 test6 取到整体相角误差最小值;谐波频次误差主要是 1、2 和 4 次谐波,整体变化趋势与相角误差趋势大致相同,在 test5 取到极小值。从试验结果可以看出存在函数关系式,能够表达时栅传感器精度与传感参数值间的关系,评估函数对于不同的传感参数取值结果差异明显,可以迅速找出传感参数取值的大致范围。

表 5 均匀试验评价结果

Table 5 Evaluation results of uniform test

试验号	相位误差	谐波误差	试验号	相位误差	谐波误差
test1	241. 7	5. 99	test5	2. 8	0. 89
test2	36. 21	1. 99	test6	2. 663	0. 91
test3	17. 61	2. 29	test7	17. 68	2
test4	9. 62	1. 88	test8	14. 89	1. 69

表 6 逐步回归的输出结果 I

Table 6 Outputs of stepwise regression I

步骤	常数项	p	$P>F$	K^2	$P>F$	$R-sq$
1	3. 88	-0. 012	0. 089			0. 4
2	6. 08	-0. 256	0. 014 2	0. 816	0. 029 4	0. 79

根据表 6 信息可知二次多项式回归的效果明显好于线性回归的效果,此时获得的决定系数值为 0. 79。统计试验中,试验传感参数有 4 个,试验次数为 8 次,仍然可以加入新的自变量传感参数。改变进入迭代的显著性水平,重新运行程序,得到输出结果如表 7 所示,此时决定

3.2 精度模型求解

文中使用决定系数 R-sq 来衡量统计模型预测能力的好坏,取值范围为 0~1,较高的数值表明模型能更好的解释数据变异。由图 3 得到的仿真数据,以谐波评价结果作为评价指标,线性回归方程为:

$$y = 4. 83 - 0. 06p + 0. 19d_{sr} - 0. 52h_{rp} \tag{13}$$

回归模型的置信概率 0. 4,决定系数 0. 48,此时参与测试的几个传感参数与传感器精度间并非线性关系。假设 4 个传感参数分别为 $x_1、x_2、x_3、x_4$,采用二阶多元非线性回归时,回归方程为:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_1^2 + b_6x_2^2 + b_7x_3^2 + b_8x_4^2 + b_9x_1x_2 + b_{10}x_1x_3 + b_{11}x_1x_4 + b_{12}x_2x_3 + b_{13}x_2x_4 + b_{14}x_3x_4 \tag{14}$$

向前逐步回归的输出结果如在表 6 所示,从输出结果可得,逐步回归共进行了 2 步,依次选入了 p 和 K^2 ,即第 2 个回归方程为:

$$y = 243 - 10. 26p + 32. 6K^2 \tag{15}$$

系数值为 0. 89,该系数大于 0. 81 时表明自变量与因变量相关性较强^[19]。至此,逐步回归共进行了 4 步,依次选入了 $p、h_{rp}^2、K^2$ 和 $d_{sr}h_{rp}$ 共 4 个变量,此时的回归方程为:

$$y = 6. 86 - 0. 266p + 0. 808K^2 - 0. 212h_{rp}^2 + 0. 135d_{sr}h_{rp} \tag{16}$$

表 7 逐步回归的输出结果 II

Table 7 Outputs of stepwise regression II

步骤	常数项	p	$P>F$	K^2	$P>F$	h_{rp}^2	$P>F$	$d_{sr}h_{rp}$	$P>F$	$R-sq$
1	3. 88	-0. 012	0. 089							0. 4
2	6. 08	-0. 256	0. 014 2	0. 816	0. 029 4					0. 79
3	6. 76	-0. 257	0. 014	0. 79	0. 03	-0. 15	0. 19	0. 87		
4	6. 86	-0. 266	0. 027	0. 808	0. 049 5	-0. 212	0. 21	0. 135	0. 4	0. 89

同理,若以相位评价结果作为迭代条件,二阶回归方程式可表示为:

$$y = 307 - 13. 3p - 44. 8d_{sr} + 32. 33K^2 - 8. 49h_{rp}^2 + 5. 4d_{sr}h_{rp} \tag{17}$$

当将均匀试验参数代入式(17)时,部分试验评价结果为负数,传感参数值的选取已经超出了相位模型的有效使用范围。若评价函数时,选择以式(18)示意的相位评价结果的倒数为评价指标(此时数值越大越好),可有效避免回归模型预测值为负数的情况。

$$\frac{1}{y} = -0. 015 + 0. 008p - 0. 004pd_{sr} + 0. 002ph_{rp} \tag{18}$$

上式是以相位评价结果为迭代条件得到的二阶回归方程,决定系数为 0. 9,置信度为 99%。根据所求得的函数,若使传感器在相位或谐波评价指标取得最优,需使各传感参数配合合理。利用式(14)将各非线性化参数线性化处理,并将式(18)代入式(12)中,对各传感参数求偏导数并令其为 0,联立求解方程即得到理论上的最优预测值。

4 样机设计与验证实验

4.1 样机试验平台搭建

样机试验平台包括时栅传感器样机、系统精度为±1”的光栅编码器、花岗石基体、伺服电机、上位机测试系统和采集电路等,如图6所示。其中,时栅传感器样机的设计参数如表8所示。

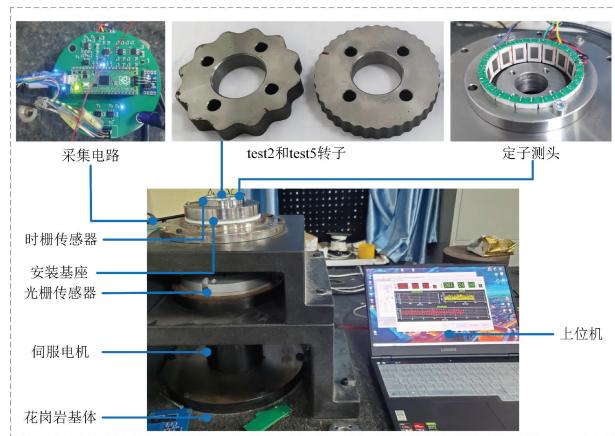


图6 样机试验平台

Fig. 6 Test platform of prototype

表8 样机制作和装配过程中传感参数

Table 8 Sensing parameters during prototyping and assembly

传感参数名	参数值	传感参数名	参数值
转子、定子材料	45 钢	绕组与齿间距/mm	0.6
转子偏心度/mm	≤0.05	绕组间间距/mm	0.6
定子偏心度/mm	≤0.05	激励线圈匝数/匝	80
表面粗糙度	7 级	感应线圈匝数/匝	80
绕组截面宽度/mm	1	铜线直径/mm	0.1

4.2 精度对比实验

1) 均匀试验参数的样机验证

样机精度试验 test2 和 5 的原始误差曲线,分别如图7和8所示。整周测量范围内的原始误差在±0.8°左右,而在统计试验的仿真结果中,test2 和 5 的对极内误差峰峰值分别为 2.6°和 0.8°。因部分传感参数的影响,造成了仿真结果与样机试验的偏差。

在样机的设计参数已知的情况下,转子齿廓的周长 s 可用式(19)计算:

$$s = \int_0^{2\pi} \sqrt{(\rho(\theta))^2 + (\rho'(\theta))^2} d\theta \tag{19}$$

正弦曲线的长度是由椭圆积分来表达,原函数无法直接求解,一般使用数值积分方法获取结果。试验样机

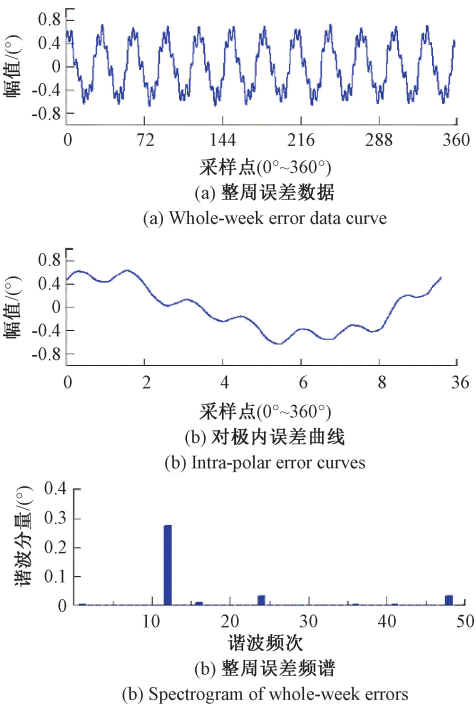


图7 test2 原始数据分析

Fig. 7 Analysis of original data of test2

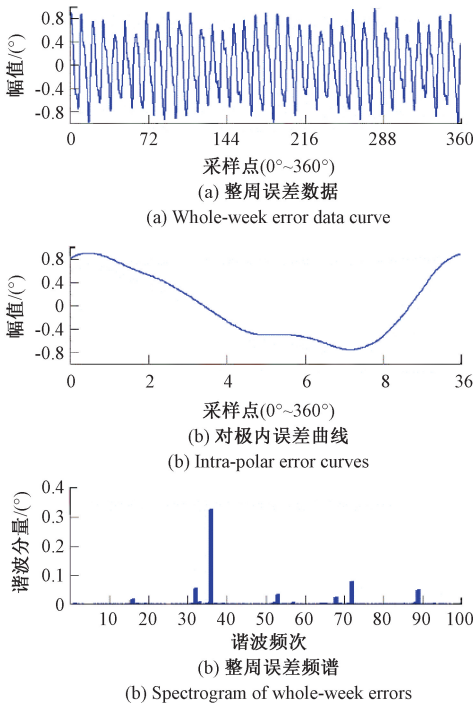


图8 test5 原始数据分析

Fig. 8 Analysis of original data of test5

的转子,采用慢走丝线切割工艺,若加工时设备运行的最小步距为 x ,根据机械加工中圆或者圆弧的加工技术可知单个转子齿轮廓是由 N_r 条线段逼近形成,则有:

$$Nr = \frac{s}{px}$$

(20)

当 test2 转子齿高为 1.6 mm 时,轮廓周长为 182.2 mm; test5 转子齿高为 0.4 mm,轮廓周长为 188.7 mm;使用式(20)计算样机齿的细分程度,可知在单对极内, test2 齿细分度是 test5 齿细分度的 3 倍。因此,才出现了仿真试验中的结论是 test5 设计优于 test2,而样机试验两者相位误差相差无几的情况。图 8(a)所示结果也验证了这一点。

图 9 和 10 是传感器误差补偿后的测试曲线,不仅将由于转子、定子测头加工不均匀导致的 12、16 和 36 次谐波有效抑制,还使 test2、5 转子齿的细分度保持一致。经补偿后的 test2、5 的误差峰峰值约为 32″、8″,计算评价指标结果为 40、3.77,两试验的仿真数据与实际样机误差评价指标比例趋于一致。

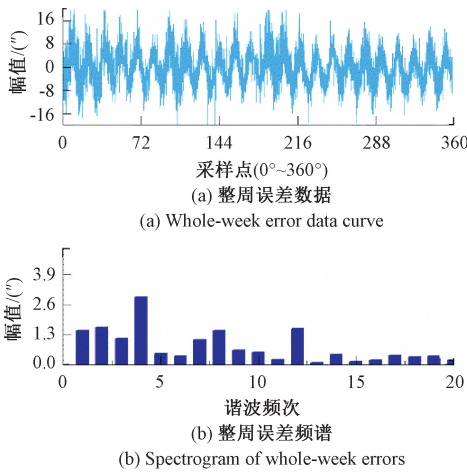


图 9 test2 补偿后数据分析
Fig. 9 Data analysis of test2 after compensation

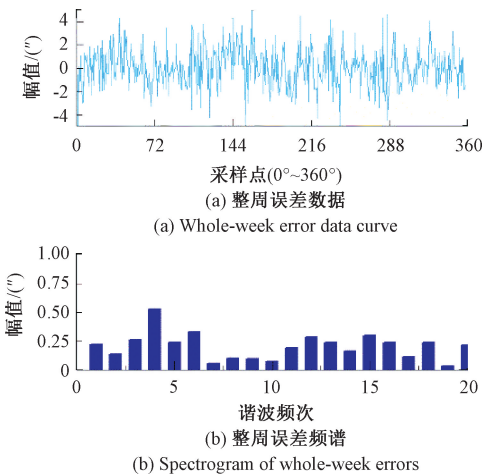


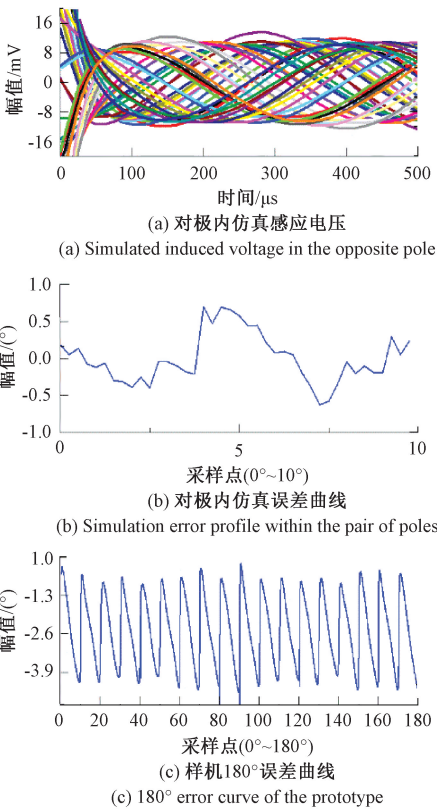
图 10 test5 补偿后数据分析
Fig. 10 Data analysis of test5 after compensation

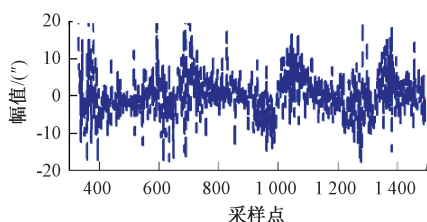
2) 非均匀试验参数的样机验证
非均匀试验参数的样机验证中,基本设置与表 4 一致,样机试验基础设置见表 8,其余传感参数如表 9 所示,仿真试验与样机试验结果如图 11 所示。

表 9 非均匀试验参数的样机传感参数
Table 9 Prototype sensing parameters for non-uniform test parameters

传感参数名	参数值
转子对极数	36
定子、转子固有气隙/mm	1
转子齿高度/mm	1.6
定子、转子比例系数	2.25

若使用式(18)预测模型精度,预测的精度评价指标为 4.1,精度介于 test2 与 test5 之间,图 11(d)的数据也证明了这一点。但从图 11(a)、(b)的仿真结果来看,对极内的感应电动势无论是相位的均匀性还是幅值稳定性都不够好。试验过程中,在某个角度时会出现跳对极现象,导致无法完成整周的数据采样。从图 11(c)、(d)的样机试验结果看来,原始误差峰峰值较大,但仍可以将误差校正到 20″内,评价指标为 33.1,介于 test2 与 test5 之间,与预测结论符合。





(d) 补偿后的误差曲线
(d) Compensated error curves

图 11 非均匀试验参数模型仿真与样机试验结果

Fig. 11 Non-uniform test parameter model simulation and prototype test results

综上所述,式(18)能够有效预测模型最终精度。以传感器精度的倒数作为评价指标,虽然能够有效避免回归模型预测值为负数的情况,但是生产的传感器可能存在未知问题。因此,回归方程的效果需要实际运用才能得到结果,试验人员应根据实际情况选择合理的评价方式。

5 结 论

本文以磁场式时栅位移传感器为研究载体,利用均匀试验设计和逐步回归分析方法,实现了多参数协同作用下的时栅传感器模型构建。仿真试验和样机试验结果表明:建立的模型能够有效预测时栅传感器的最终精度,模型拟合度可达 89%,置信率达 92%。该模型构建方法不仅适用于时栅传感器的设计,而且可以利用该方法提高设计线圈形状、容抗匹配和激励频率等参数的效率。该方法,可以用于同类传感器的设计和研发具有一定的借鉴意义。

尽管本文初步实现了建立多个因素与传感器精度之间的复合函数模型的建立,但实验中仍存在不足。目前对影响传感器精度的参数的选取主要依赖于课题组前期的研究经验,在后续的研究中可以逐步加入更多的参数进行研究以更全面的揭示多传感参数对精度的影响机制。在模型迭代计算的过程中,随着选入因素的增加,因素水平与传感器精度之间的关系变得更加复杂,但模型的置信度也随之降低。为了保证结果的准确性,在未来的研究中应尽可能加入足够多的因素和水平,开展更系统、全面的实验研究,以获取数据支撑,逐步形成以数据驱动和智能算法共同构建的数模联动的传感器数字孪生系统,助力智能传感器和高端装备制造。

参考文献

[1] 秦毅,王阳阳,彭东林,等. 电感式角位移传感器技术综述[J]. 仪器仪表学报,2022,43(11):1-14.
QIN Y, WANG Y Y, PENG D L, et al. Inductive

angular displacement sensors technologies: A review[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(11): 1-14.

- [2] 张白,刘杰,韩鑫洋,等. 棱锥式角度传感器原理研究与设计[J]. 电子测量技术,2022,45(24):36-42.
ZHANG B, LIU J, HAN X Y, et al. Principle research and design of pyramid angle sensor [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(24): 36-42.
- [3] 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.
ZHANG Y P. Research on high precision measurement of the photoelectric stabilized platform angular displacement[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015, 34(10): 54-57.
- [4] HOU B, ZHOU B, YI L Y, et al. High-precision incremental capacitive angle encoder developed by micro fabrication technology[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(7): 6318-6327.
- [5] RIPKA P, BLAZEK J, MIRZAEI M, et al. Inductive position and speed sensors[J]. Sensors, 2020, 20(1): 65-80.
- [6] NADERI P, GHANDEHARI R, HEIDARY M. A comprehensive analysis on the healthy and faulty two types VR-resolvers with eccentricity and inter-turn faults[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(4): 3502-3511.
- [7] 彭东林. 时栅传感器的技术现状、发展趋势和思想延伸[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(3): 128-134.
PENG D L. Technological status, sevelopment trend, and thought extension of time grating sensors[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(3): 128-134.
- [8] 彭东林,张兴红,刘小康,等. 场式时栅位移传感器研究[J]. 仪器仪表学报,2003(3):321-323.
PENG D L, ZHANG X H, LIU X K, et al. Study on the time grating displacement sensor of the field type[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2003(3): 321-323.
- [9] 孙世政,周清松,韩宇,等. 不同安装模态对嵌入式时栅测量误差的影响[J]. 光学精密工程,2020,28(10):2290-2300.
SUN SH ZH, ZHOU Q S, HAN Y, et al. Effect of different mounting modes on embedded time grating measuring errors[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(10): 2290-2300.
- [10] YU H, WAN Q H, LIANG L H, et al. Analysis and elimination of grating disk inclination error in photoelectric displacement measurement[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(6):

6438-6445.

[11] LIU F, LIANG L, XU G, et al. Four-point method in the measurement and separation of spindle rotation error[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2021,26(1): 113-123.

[12] ZHAO J, LI M, PENG S, et al. An inductive linear displacement sensor with complementary resonant coupling units[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(22): 25659-25667.

[13] GU X Y, TANG Q F, PENG D L, et al. An inductive linear displacement sensor with bilateral sensing units[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(1): 296-305.

[14] 杨继森,卢渝,吴灼,等. 可抑制端部效应的平面磁场式直线时栅位移传感器[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(4):89-97.
YANG J S, LU Y, WU ZH, et al. Planar magnetic field linear time-grating displacement sensor with end-effect suppression[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022,43(4):89-97.

[15] 杨继森,熊浩,庾万章,等. 时栅位移传感器在构造场中的耦合特性研究[J]. 仪器仪表学报,2023,44(5): 249-259.
YANG J S, XIONG H, TUO W ZH, et al. Study on the coupling characteristics of time-grating displacement sensors in the structural field[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2023,44(5):249-259.

[16] 闫飞,尹明富,孙会来,等. 外部干扰磁场下线性差动变压器式位移传感器测量精度分析及补偿方法研究[J]. 中国重型装备, 2020(2):46-49.
YAN F, YIN M F, SUN H L, et al. Measure precision analysis and compensation method research on linear variable differential transformer displacement sensor disturbed by external magnetic field[J]. China Heavy Equipment, 2020(2):46-49.

[17] WANG SH Y, LU J X, LU F, et al. Design of compact

self-shielded uniform magnetic field coils based on multipole moment optimization[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023,72: 1-9.

[18] 王阳阳. 转台轴承精密位置检测方法 & 传感器研究[D]. 重庆:重庆大学,2022.
WANG Y Y. Research on precise position detection method and sensor of turntable bearing[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.

[19] 徐若南,唐烁,王旭辉. 改进的强相关数据的变量选择方法[J]. 大学数学,2017,33(1):10-16.
XU R N, TANG SH, WANG X H. An improved variable selection method with strong correlated data[J]. College Mathematics,2017,33(1):10-16.

作者简介



王宇,2020 年于重庆邮电大学获得学士学位,现为重庆理工大学硕士研究生。主要研究方向为精密机电系统与仪器集成。
E-mail:1343637633@qq.com

Wang Yu received his B. Sc. degree from Chongqing University of Posts and Telecommunications in 2020. He is currently a master student at Chongqing University of Technology. His main research interests include precision electromechanical system and instrument integration.



王阳阳(通信作者),2022 于重庆大学获工学博士学位,现为重庆理工大学讲师。主要研究方向为精密测量技术与智能装备制造。
E-mail:why_go@163.com

Wang Yangyang (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Chongqing University in 2022. Now he is an assistant professor in the Liangjiang International College at Chongqing University of Technology. His main research interests include precision measurement technologies and Intelligent manufacturing.