

doi: 10.7690/bgzdh.2018.04.008

基于 D 优化的遥测传感器系数校准方法

朱 珺

(中国人民解放军 92941 部队, 辽宁 葫芦岛 125000)

摘要: 为提高遥测参数精度, 针对传感器的校准曲线优化问题, 研究基于信息矩阵 D 最优设计准则的传感器校准点选取方法, 获得传感器最佳校准曲线。通过实验得到了 D 最优方法的传感器校准结果, 验证了该方法的可行性, 并与传统等距校准曲线的校准结果进行对比。结果证明, D 最优设计方法得到的遥测传感器校准系数结果具有更高精度。

关键词: 传感器; 遥测参数; D 优化; 测量精度

中图分类号: TP20 **文献标志码:** A

Calibration Method of Telemetry Sensor Parameter Based on D-optimal

Zhu Jun

(No. 92941 Unit of PLA, Huludao 125000, China)

Abstract: For improving telemetry parameter accuracy, aiming at the sensor calibration curve optimal problem, research on sensor calibration point selecting method based on information matrix D-optimal, acquire the sensor optimal calibration curve. Acquire the D-optimal method sensor calibration results by test, verify the feasibility of the method, can compare it with the calibration results of traditional equidistance calibration curve. The results show that the D-optimal calibration parameter is more accurate.

Keywords: sensor; telemetry parameter; D-optimal; measurement accuracy

0 引言

通过各类传感器测量的遥测参数结果具有测量不确定性, 为提高参数测量精度, 有必要采用低成本、高精度的校准方法, 以满足实际工程要求。

选用等距校准点来获取校准曲线是最常用的校准方法^[1]。该方法的校准结果常常存在较大的误差, 因此需要找到最优校准点位置, 以便于拟合出最佳校准曲线。文献[2]中提出了一种减少校准曲线测量不确定度的校准设计方法, 通过最小化校准曲线系数的标准偏差减少不确定度, 当传感器响应曲线为多项式, 且传感器输出的不确定度可忽略时, 校准点的最优数量和位置可理论识别, 但该方法不能直接应用于具有非线性和复杂的传感器。文献[3]提出使用遗传算法实现最优计算, 文献[4]提出使用神经网络和遗传算法相结合的方法。使用神经网络和遗传算法不具有物理依据, 对同一时间的不同的数据集, 会给出相异的解, 且该类方法需要使用新数据集不断对模型进行训练。文献[5]中提出了基于测量链的优化校准方案, 通过分析误差传播规律。该方法设计了不同于传统等距方法的校准方法, 减少较准点, 校准曲线适用于全量程, 使用线性回归

替代复杂的回归。文献[6]通过 A 优化准则求解传感器的校准设计问题。该方法使校准系数估计误差的方差和最小。但 A 优化强依赖于单位, 不是尺度不变的。文献[7]针对动态可调陀螺 (DTG) 的位置校准问题, 提出采用 D 优化实验设计, 推导得到 12 位置校准过程。实验结果表明, 12 点位置校准过程确定误差模型的补偿精度高于 24 点位置校准过程的模型。

综上所述, 基于校准系数的估计误差离差矩阵的测量可用作选取最优测量点的准则。笔者研究了采用 D 优化作为确定传感器校准最优测量点的方法。D 优化准则是估计误差椭球的体积测度, 该体积与估计误差离差矩阵的行列式成正比; 因此, 使用 D 优化方法获取的校准点具有最小化离差矩阵的行列式, 并且该最优值对系统具有尺度不变性。以某压力传感器的校准点选择为例, 对该方法进行了实验验证。

1 传感器校准

实际使用的传感器校准曲线公式为:

$$y_i = a_0 + a_1 p_i + a_2 p_i^2 + \cdots + a_m p_i^m \quad (1)$$

收稿日期: 2017-12-11; 修回日期: 2017-12-26

作者简介: 朱 珺(1969—), 男, 河南人, 硕士, 高级工程师, 从事试验指挥控制与数据处理研究。

其中： y_i 为传感器输出； p_i 为参考标准信号值，为校准曲线系数。设测量值包含高斯随机噪声，则有

$$z_i = y_i + \delta_i = a_0 + a_1 p_i + a_2 p_i^2 + \dots + a_m p_i^m + \delta_i \quad (2)$$

其中： z_i 为测量结果；测量误差 δ_i 的均值为 0；方差为 δ^2 。校准曲线系数表示为 $\theta = [a_0, a_1, \dots, a_m]^T$ ，根据最小二乘方法求取，则解为

$$\theta = (X^T X)^{-1} (X^T Z) \quad (3)$$

$$D(\theta) = (X^T X)^{-1} \delta^2$$

其中 $z^T = [z_1, z_2, \dots, z_m]$ 为测量值向量

$$X = \begin{bmatrix} 1 & p_1 & p_1^2 & \dots & p_1^m \\ 1 & p_2 & p_2^2 & \dots & p_2^m \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & p_n & p_n^2 & \dots & p_n^m \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中： X 为已知坐标矩阵； $D(\theta)$ 为校准系数估计误差的离差矩阵。

求解问题归纳为，寻找一组 p_1, p_2, \dots, p_n ，使校准系数值 a_0, a_1, \dots, a_m 为 D 优化准则下的最优解。当离差矩阵的各列相互独立，在约束条件下，矩阵的行列式具有最大值；如果存在参数相关，则行列式减小，当 2 个参数线性相关，则行列式为 0，因此采用 D 优化准则可实现参数冗余最小，更好进行参数识别。另外 D 准则优化对系统具有尺度不变性，性能上优于 A 优化准则。因此传感器优化校准点选取问题，可抽象为校准点在 D 优化准则式(5)下寻找方程解，并且方程的解应在 $0 \sim p_{\max}$ 范围内。

$$\min_{p_i} [\det(X^T X)^{-1} \delta^2] \quad (5)$$

2 D 优化传感器校准设计过程

设目标函数如下式所示：

$$f(p_1, p_2, \dots, p_n) = \det\{D(p_1, p_2, \dots, p_n)\} \quad (6)$$

该目标函数具有多变量、非线性、连续行和可导，为有约束的优化问题。

设 $f(p_1, p_2, \dots, p_n)$ 在 $[p_1^*, p_2^*, \dots, p_n^*]^T$ 处取得最小值，则下式成立：

$$\nabla f(p^*) = 0; \quad (7)$$

$$\nabla^2 f(p^*) \text{ 为半正定} \quad (8)$$

方程(7)可写为

$$\frac{\partial [\det\{D(p_1, p_2, \dots, p_n)\}]}{\partial p_i} = 0, i=1, \dots, n \quad (9)$$

得到 n 个代数方程

$$Q_i(p_1, p_2, \dots, p_n) = 0 \quad (10)$$

在校准曲线的阶数 $m=2$ 时，上式表示为

$$\tilde{D} = \frac{\delta^2}{\det \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{bmatrix}} \quad (11)$$

其中 $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{33}$ 为 $\tilde{X}^T \tilde{X}$ 矩阵最小值。

$\nabla^2 f(p^*)$ 用于确定被发现值是否对应局部极小或极大值。另外，这些值应在 $0 \sim p_{\max}$ 。满足上面条件的解用于计算校准曲线的系数。对应的多项式近似低成本传感器与参考标准之间的最佳校准曲线。

3 D 优化准则下校准点选取

设 $m=2$ ，校准点数 n 分别取 3、4、5，D 优化校准原则下传感器结果如表 1 所示。计算中，使用的数据和初始条件如下。

针对某压力传感器进行最优测量点计算，其量程为 $0 \sim 160$ MPa，恒压供电条件下传感器输出信号为 mV 电压信号，压力传感器不确定度 u 服从零均值正态分布^[8]。

传感器校准曲线为 2 阶多项式

$$y_i = a_0 + a_1 p_i + a_2 p_i^2 \quad (12)$$

测量方程为

$$z_i = a_0 + a_1 p_i + a_2 p_i^2 + \delta_i \quad (13)$$

传感器校准的最佳测量点根据式(10)计算获得，使用 D 优化准则获取最佳多项式系数，并分别计算 $n=3, n=4, n=5$ 的情况。方程(10)用来解方程(5)，获取 p_i 最优值，最优校准点和均匀等距校准点如表 1 所示。

表 1 D 优化和均匀等距校准点

Calibration points/MPa	$n=3$		$n=4$		$n=5$	
	D-optimal	Equal interval	D-optimal	Equal interval	D-optimal	Equal interval
p_1	0	0	0	0	0	0
p_2	80.0	80.0	22.9	53.3	25.6	40.0
p_3	160.0	160.0	84.8	106.6	80.0	80.0
p_4			160.0	160.0	134.4	120.0
p_5					160.0	160.0

4 实验验证

为验证 D 优化下传感器校准设计结果，选择压力传感器为实验对象，由一等标准活塞式压力计产生标准压力，通过数表读取传感器输出，作为测量值^[9]。校准点数 n 取为 4，在对应的 D 最优校准点或等距校准点分别重复产生标准压力信号。

校准实验结果如表 2 所示。

表 2 D 优化和均匀等距校准点实验结果

Calibrated data	D-optimal p_i/MPa	Voltage z_i/mV	Equal interval p_i/MPa	Voltage z_i/mV
1	0	0.005 1	0	0.005 1
2	22.85	1 395.391 2	53.3	4 097.889 6
3	84.80	7 908.318 6	106.6	11 149.586 2
4	160.00	21 172.885 1	160.0	21 172.885 1

估计的多项式系数及误差方差如表 3 所示。

表 3 校准系数估计值及估计误差方差

Coefficient and Variance	\hat{a}_0	\hat{a}_1	\hat{a}_2	$D_{\hat{a}_0}$	$D_{\hat{a}_1}$	$D_{\hat{a}_2}$
D-optimal	-0.025 1	4.919 8	0.005 2	2.356 8	0.008 5	5.1176×10^{-6}
Equal interval	-0.182 6	4.920 3	0.005 2	2.631 5	0.007 9	4.7453×10^{-6}

绝对误差和相对误差计算公式为：

$$\Delta_{\text{abs}i} = \hat{p}_i - p_i ;$$

$$\delta_{\text{rel}i} = \frac{\Delta_{\text{abs}i}}{p_i} 100\% .$$

计算结果如图 1 所示。由图可知：D 优化校准对应的绝对误差与相对误差远小于选择等距校准点的校准结果，即验证了 D 优化校准方法的可行性。

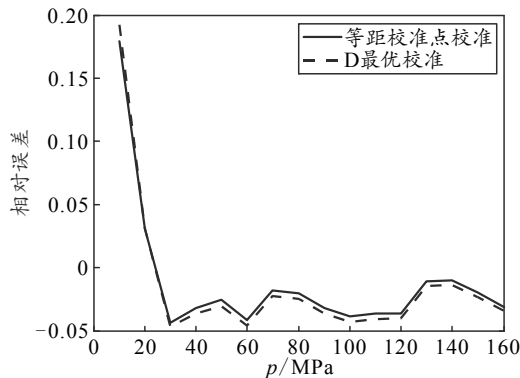


图 1 校准误差曲线

5 结论

遥测传感器校准精度决定于校准点的选择，传感器 D 最优的校准方法给出了校准过程中对应最佳

校准曲线采样点的 D 最优方法选择过程，D 最优准则依据是对误差椭球体积的总体量度正比于估计误差的离差矩阵的行列式。笔者针对压力传感器校准参数的校准点优化选择问题，通过不同校准方法所得结果的绝对误差和相对误差进行比较，验证了该方法的可行性，并证明了 D 优化方法的结果精度较优。

参考文献：

- [1] MORENO J G, VIGIL-ESCALERA J L M, ALVAREZ R S. Statistical measurement calibration based on state estimator results[C]// Transmission and Distribution Conference. IEEE, 1999: 184-189.
- [2] BETTA G, Dell'Isola M, Frattolillo A. Experimental design techniques for optimising measurement chain calibration[J]. Measurement, 2001, 30(2): 115-127.
- [3] SCHOEN M P. Dynamic Compensation of Intelligent Sensors[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2007, 56(5): 1992-2001.
- [4] YI, Y, W, H. (2007). An improved intelligent calibration method for vortex flowmeter[Z]. Proc. of the 2007 American Control Conference (ACC), 2927-2931.
- [5] SROKA R. Application of Sensitivity Analysis to the Correction of Static Characteristics of a Phase Angle Modulator[J]. Metrology & Measurement Systems, 2011, 18(2): 249-260.
- [6] HAJIYEV C. Determination of optimum measurement points via A-optimality criterion for the calibration of measurement apparatus[J]. Measurement, 2010, 43(4): 563-569.
- [7] FU L, YANG X, WANG L L. A novel calibration procedure for dynamically tuned gyroscope designed by D-optimal approach[J]. Measurement, 2013, 46(9): 3173-3180.
- [8] 刘兰强, 童仲志, 侯远龙, 等. 多通道药温传感器检测系统[J]. 兵工自动化, 2017, 36(4): 55-57.
- [9] 张斌, 颜钢锋. 基于高频脉冲法的 SRM 无位置传感器控制研究[J]. 机电工程, 2016, 33(9): 1115-1119.