

电磁定位系统测量误差校正技术研究

李 然, 王 聪, 冯朝坤

(中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471009)

摘要: 在电磁定位系统中,若没有考虑环境磁场、制造工艺等误差因素的影响,会导致系统定位精度下降。介绍了一种提高电磁定位系统定位精度的方法,该方法为了克服经典磁偶极子模型过于理想化的缺点,提出了误差修正模型,介绍了天线参数标定原理,同时给出了修正因子的标定方法、标定流程以及装置。通过对比试验可以看出,经过模型修正的系统定位精度可达到未修正模型的5倍。

关键词: 电磁定位; 磁偶极子; 环境磁场; 天线标定

中图分类号: V271.4; TM936.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-637X(2014)04-0081-05

A Method for Correcting Measurement Error of Electromagnetic Positioning System

LI Ran, WANG Cong, FENG Chao-kun

(Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471009, China)

Abstract: Since the influences of ambient magnetic field and manufacturing process are not taken into consideration in an electromagnetic positioning system, the positioning precision of the system may decrease. This paper presents a method to improve the positioning precision of the electromagnetic positioning system. To overcome the shortcoming that the classical magnetic dipole model is too ideal, an error correction model was proposed. The antenna calibration theory was presented, the calibration method, correction factor, calibration process and device were given. Comparative experiments show that the precision of the improved system positioning model is 5 times of the uncorrected one.

Key words: electromagnetic positioning; magnetic dipole; ambient magnetic field; antenna calibration

0 引言

定位系统是一种用于空间位置测量的装置,广泛应用于虚拟现实、人工智能等领域,目前,较为常见的定位方法有超声波定位、光电定位、惯性定位和电磁定位。电磁定位系统通过电磁感应原理实现被测物体在空间中移动轨迹和姿态的测量,其理论基础是磁偶极子模型,但在实际工程应用中,常常引入一些干扰,如何去除干扰成为提高定位精度的研究重点^[1-2]。本文从实际出发分析了造成误差的可能原因,并给出了理想磁偶极子模型的修正方法^[3-4]。

1 理想定位算法模型

工程应用中,在发射接收天线之间距离远远大于

接收天线尺寸的情况下(通常在1.5倍以上)^[5],就可以应用磁偶极子定位算法模型。理想磁偶极子定位模型为^[6-7]

$$Y = -\frac{K}{R^3} H M X \quad (1)$$

式中: Y 为接收矩阵,代表接收天线输出电压; K 为系统增益,由线圈面积 S 、匝数 N 、激励电流幅值和频率、接收电路放大增益决定; H 为姿态变换矩阵; M 为位置变换矩阵; X 为发射矩阵,代表发射天线馈电电压。 Y 、 X 、 H 、 M 均为三阶方阵。

2 误差来源

以往的研究大都基于理想条件,没有考虑环境磁场和制造工艺的影响,本文从这两方面着手,修正了经典的磁偶极子定位算法模型。

2.1 环境因素

在电磁定位系统中,主要考虑两种磁场:1)地磁

场,平均强度为 $3 \times 10^{-5} \sim 7 \times 10^{-5} \text{ T}$; 2) 工频磁场,平均强度为 $0.01 \sim 0.15 \mu\text{T}$ (感应距离为 1 m)。电磁定位系统主要用于微弱的低频交变磁场或者稳恒磁场的测量,这两种磁场与被测磁场强度相当、特征相似,如果不考虑外界因素干扰,会对定位精度产生较大影响。

2.2 制造工艺

制造工艺的影响主要体现在无法保证天线参数的一致性上,具体体现在以下两个方面。

1) 环路面积不一致。无论是磁场的发射或是接收都与天线的环路面积有着直接的关系,环路面积不一致会导致发射天线强度差异和接收信号强度差异。

2) 磁场中心不一致。 X 、 Y 、 Z 线圈以两两正交的方式同时缠绕在磁芯骨架上,中心磁力线相交点为磁场中心,由于制造工艺的影响,这三条线往往不能重合。

3 模型修正

3.1 环境因素去除

环境磁场与待测磁场特征相似,强度相当。通过差异对其进行区分难度较大。由于定位系统本身是一个测量系统,可以通过定量的测量加以滤除。

具体方法如下:将每个测量周期分为 4 等份,前 3 份用于待测磁场的测量,每 1 组线圈分时发射 1 组磁场,第 4 份用于环境磁场的测量,此时,发射天线的 3 组线圈均不发射,接收天线采到的就是环境磁场分量,解算的时候将其减去即可,如图 1 所示。此法优点是算法简便,但缺点是加大了采集周期。

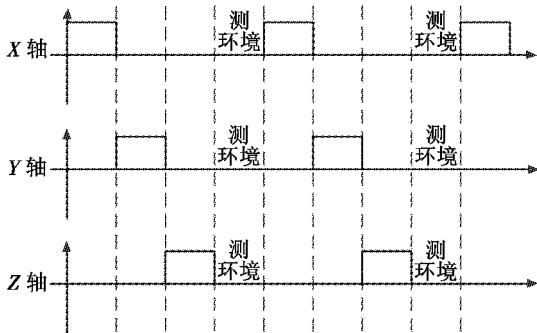


图1 发射天线控制波形

Fig.1 Control wave of transmit antennas

在接收线圈上产生的磁感应见式(1)。设当发射天线不工作的第 4 阶段,接收天线三轴感应环境磁场分别为 A_1 、 A_2 、 A_3 。去除环境磁场的感应磁场为

$$Y_1 = -\frac{K}{R^3}HM X_1 + A_1 \quad (2)$$

$$Y_2 = -\frac{K}{R^3}HM X_2 + A_2 \quad (3)$$

$$Y_3 = -\frac{K}{R^3}HM X_3 + A_3 \quad (4)$$

整理得

$$Y = -\frac{K}{R^3}HM X + A \quad (5)$$

设发射天线矩阵为

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & X_{13} \\ X_{21} & X_{22} & X_{23} \\ X_{31} & X_{32} & X_{33} \end{bmatrix} \quad (6)$$

设接收天线矩阵为

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} \quad (7)$$

设环境磁场矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \quad (8)$$

3.2 制造工艺因素去除

磁场中心不重合,发射天线、接收天线各轴向间线圈环路面积不一致、磁场法向方向与结构安装坐标系不一致都是天线制造过程引入的误差,天线制作完毕,这些误差就成了天线的固有属性,可以通过标定的方法得到这些误差,第 4 节详细讨论了标定的具体方法。

设 Q 为发射天线旋转修正矩阵, C 为发射天线位移修正矩阵, T 为接收旋转修正矩阵, B 为接收天线位移修正矩阵, A 为环境磁场。

$$(Y - B)T = -\frac{K}{R^3}HM(X - C)Q + A \quad (9)$$

整理得到误差修正后的磁偶极子天线模型为

$$Y = \left[-\frac{K}{R^3}HM(X - C)Q + A \right] T^{-1} + B \quad (10)$$

下面将详细讨论通过标定的方法确定 T 、 B 、 Q 、 C 矩阵的过程。

3.3 欧拉角计算

电磁定位系统坐标系如图 2 所示。

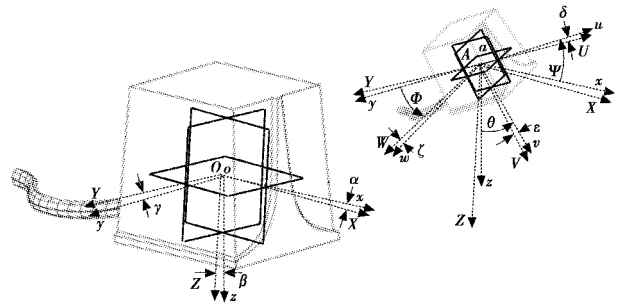


图2 电磁定位系统坐标系

Fig.2 Coordinate system of electromagnetic positioning system

根据式(11)可求得姿态变换矩阵为

$$H = \left[-\frac{R^3}{K}(Y-B)T-A \right] Q^{-1}(X-C)^{-1}M^{-1} \quad (11)$$

最终得到欧拉角^[8]为

$$\psi = \arctan\left(\frac{H_{12}}{H_{11}}\right), \quad (12)$$

$$\theta = \arcsin(-H_{13}), \quad (13)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{H_{23}}{H_{33}}\right). \quad (14)$$

4 发射天线、接收天线参数标定

4.1 标定原理

天线参数标定的思想与以往其他物理量的标定相同,即通过一个标准设备对待测设备进行测量,测量值与理论值的偏差就是待测天线的标定参数。

发射天线标定参数的测量是通过一个标准单轴磁强仪实现,采用单轴磁强仪是为了去除各线圈间环路面积不一致、磁芯不一致、磁场法向不一致造成的影响。

转动发射天线,分别使得发射天线的每个线圈与磁强计平面平行。

当发射天线 X 轴与单轴磁强计平行时,将磁强仪移动到距离发射天线结构尺寸中心 O 距离相等的 4 个点 a_1, a_2, a_3, a_4 , 此时能够测到 4 个磁场强度值 $a_{1x}, a_{2x}, a_{3x}, a_{4x}$, 通过拟合,可以拟合出 4 点磁场中心 O_x , 计算 O 到 O_x 的偏移量 $\Delta Y_x, \Delta Z_x$, 见图 3a。

发射天线 Y 轴的测量方法与 X 轴一样,保持磁强仪不动,转动转台将发射天线 Y 轴与磁强计平面平行,记下 4 个测量点的磁场值,拟合出磁场中心 O_y , 计算偏移量 $\Delta X_y, \Delta Z_y$, 见图 3b。Z 轴同理可以得到偏移量 $\Delta X_z, \Delta Y_z$, 见图 3c。

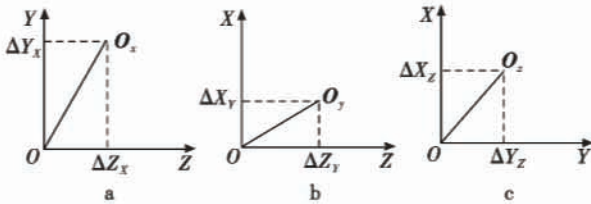


图3 磁场中心偏移
Fig. 3 Magnetic center offset

由于上述 3 组偏移量分别是基于单个发射天线测量,为了重现它在三维空间的位置关系,将矢量 O_x, O_y, O_z 在 X、Y、Z 三轴的分量线性相加,见图 4。

$$\Delta X = \Delta X_x + \Delta X_z \quad (15)$$

$$\Delta Y = \Delta Y_x + \Delta Y_z \quad (16)$$

$$\Delta Z = \Delta Z_x + \Delta Z_y \quad (17)$$

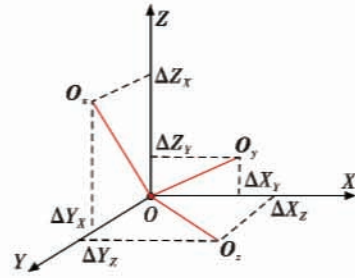


图4 偏移量分解

Fig. 4 Offset decomposition

以 $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$ 为原点的新的坐标,即是发射天线实际产生的磁场坐标系,见图 5。

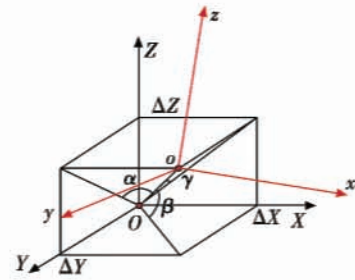


图5 发射天线实际坐标系

Fig. 5 Actual coordinate system of transmitting antenna

4.2 标定算法

通过上文分析可以看出,发射天线参数标定的目的就是测出实际磁场坐标系与理想坐标系之间的关系。这样的空间转换可以用赫尔默特(Helmert)转换实现。比较常用的公式是布尔莎-沃尔夫(Bursa-Wolf),如式(18)所示,将转换公式用参数矩阵表示,即得到

$$\begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} 1 & -R_z & +R_y \\ +R_z & 1 & -R_x \\ -R_y & +R_x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中: M 为比例因子,由于发射天线没有变化,因此比例因子 M 取 1; (R_x, R_y, R_z) 为旋转参数; $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$ 为平移矢量; (X_o, Y_o, Z_o) 为实际磁场坐标系中的点坐标; (X_o, Y_o, Z_o) 为理想坐标系中的点坐标。

$$\begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -R_z & +R_y \\ +R_z & 1 & -R_x \\ -R_y & +R_x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad (19)$$

整理得

$$\begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -R_z & +R_y \\ +R_z & 1 & -R_x \\ -R_y & +R_x & 1 \end{bmatrix}^{-1} \left(\begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \right) \quad (20)$$

从式(20)可看出 $\begin{bmatrix} 1 & -R_z & +R_y \\ +R_z & 1 & -R_x \\ -R_y & +R_x & 1 \end{bmatrix}^{-1}$ 为发射天

线旋转修正矩阵 Q , $\begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}$ 为发射天线位移修正矩阵 C 。

接收天线标定参数的确定与发射天线相同,可将发射天线馈入适当的电流,此时接收天线被看作一个小型的发射天线。可确定接收旋转修正矩阵 T ,接收天线位移修正矩阵 B 。

4.3 天线标定方法

天线参数标定设备如图 6 所示,大理石平台保证发射天线和接收天线基准,发射天线能够沿水平方向转动,单轴磁强计能够三轴向移动,为了保证不受环境磁场的干扰,测试应安排在磁屏蔽的房间内进行。

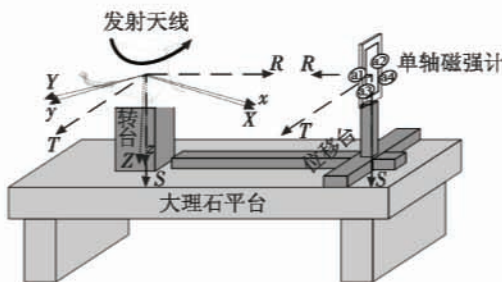


图 6 天线参数标定设备

Fig. 6 The equipment for antenna parameter calibration
标定步骤如图 7 所示。

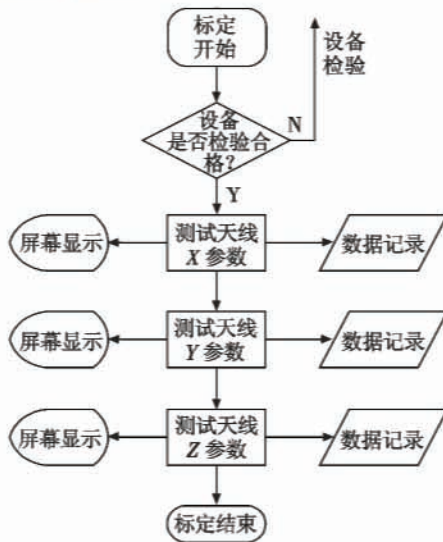


图 7 天线参数标定步骤

Fig. 7 Procedure of antenna parameter calibration

5 结果对比

对比试验选取几个便于重复试验的特殊位置,这些位置基本涵盖了电磁定位系统所有角度范围,试验结果表明,经过天线参数标定的系统定位精度是未经过标定系统的 5 倍左右,对比结果见表 1。

表 1 两种算法精度对比

Table 1 Precision contrast of two algorithms

序号	目标值/(°) (方位,俯仰,横滚)	测量值(天线未 标定)/(°) (方位,俯仰,横滚)	测量值(天线 标定)/(°) (方位,俯仰,横滚)
1	(0,0,0)	(0.21,0.23,0.33)	(0.02,0.05,0.06)
2	(0,30,0)	(0.21,30.42,0.33)	(0.02,30.06,0.06)
3	(0,60,0)	(0.22,61.13,0.32)	(0.03,60.23,0.05)
4	(0,90,0)	(0.22,91.71,0.32)	(0.03,90.36,0.05)
5	(30,0,0)	(30.41,0.31,0.23)	(30.06,0.03,0.03)
6	(60,0,0)	(60.63,0.31,0.23)	(60.10,0.04,0.02)
7	(90,0,0)	(91.92,0.31,0.23)	(90.25,0.06,0.03)
8	(0,0,30)	(0.21,0.23,29.24)	(0.21,0.23,30.01)
9	(0,0,60)	(0.22,0.24,59.43)	(0.21,0.23,60.03)
10	(0,0,90)	(0.25,0.27,89.89)	(0.21,0.23,90.04)
11	(10,20,30)	(10.26,20.34,29.54)	(10.06,20.04,30.03)
12	(20,40,60)	(20.34,40.44,59.61)	(20.09,40.08,60.06)
13	(30,60,90)	(30.44,61.05,89.86)	(30.13,60.18,90.07)

6 结束语

本文分析了电磁定位系统误差来源,在原有经典磁偶极子修正模型基础上进行修正,并提出了修正模型中修正因子的标定方法,提高了电磁定位系统的定位精度,在研究过程中深刻体会到,将经典理论运用到实践中往往需要考虑工程引入的误差,只有通过某种方法修正模型才能达到预期效果。

参考文献

[1] 殷勤,陈彬,汪莹,等. 电磁跟踪系统磁传感器三轴非理想正交的快速校正算法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(8): 1698-1699.
YIN Q, CHEN B, WANG Y, et al. Fast calibration arithmetic for incompletely orthogonal three-axis magnetic sensor of electromagnetic tracking system[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(8): 1698-1699.

[2] 杨杰,陈彬,李跃波,等. 非正交三维天线用于电磁敏感系统的误差校正[J]. 传感器与微系统, 2007, 26(10): 72-74.
YANG J, CHEN B, LI Y B, et al. Application of bevel three-dimensional antenna in error-aligned electromagnetic sensing system[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2007, 26(10): 72-74.

[3] 陈彬,高本庆. 用于头盔瞄准具的电磁敏感系统误差的校正[J]. 北京理工大学学报, 1990, 10(4): 37-43.
CHEN B, GAO B Q. Correction of system errors for the electromagnetic sensing system of helmet-mounted sighting units [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 1990, 10(4): 37-43.

- [4] 邓晶. 头盔瞄准系统中电磁发射接收误差的修正原理[J]. 火力与指挥控制, 1990, 15(2): 53-56.
DENG J. Correct error of electromagnetic transmitter and receiver[J]. Fire Control & Command Control, 1990, 15(2): 53-56.
- [5] 殷勤, 陈彬, 汪莹, 等. 六自由度电磁跟踪系统位置参数求解算法的改进[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2010, 6(11): 613-616.
YIN Q, CHEN B, WANG Y, et al. Improvement of position parameters calculation arithmetic in six-degree-of-freedom electromagnetic tracking system[J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2010, 6(11): 613-616.
- [6] 张朝阳, 肖昌汉, 高俊吉, 等. 磁性物体磁偶极子模型适用性的试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(10): 862-868.
ZHANG Z Y, XIAO C H, GAO J J, et al. Experiment research of magnetic dipole model applicability for a magnetic object[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2010, 18(10): 862-868.
- [7] 殷勤, 陈彬, 熊润, 等. 六自由度电磁跟踪系统定位模型与近场校正[J]. 北京邮电大学学报, 2011, 34(2): 64-68.
YIN Q, CHEN B, XIONG R, et al. Position model of six-DOF electromagnetic tracker and near-field calibration technique[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2011, 34(2): 64-68.
- [8] 王永年, 祝梁生, 孙隆和. 头盔显示/瞄准系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 1994.
WANG Y N, ZHU L S, SUN L H. Helmet-mounted display and sight system[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1994.
-
- (上接第28页)
- JIANG A G, XIA X Z, HU Y G. Discuss on rugged LCD technology[J]. Journal of Liquid Crystal and Display, 2002, 17(4): 292-296.
- [2] 曹允, 王勇, 范彬, 等. 加固液晶显示器关键技术[J]. 光电子技术, 2011, 31(2): 74-79.
CAO Y, WANG Y, FAN B, et al. Key techniques for rugged liquid crystal display[J]. Journal of Optoelectronic Technology, 2011, 31(2): 74-79.
- [3] 刘昌禄. 综合显示与加固平板显示器的技术发展[J]. 情报指挥控制系统与仿真技术, 2004, 26(2): 68-71.
LIU C L. Technological development of integrated display and reinforced flat indicator[J]. Journal of Information Command Control System & Simulation Technology, 2004, 26(2): 68-71.
- [4] 王连坡, 吕清海. 抗恶劣环境加固显示器设计技术[J]. 舰船电子工程, 2012, 32(9): 163-165.
WANG L P, LÜ Q H. Design on rugged display in the severe environment[J]. Journal of Ship Electronic Engineering, 2012, 32(9): 163-165.
- [5] GILLESPIE R S, BANDEL W. LCD ruggedization in displays with optically bonded AR glass lamination[C]//Proceedings of Americas Display Engineering and Applications Conference, 2006: 23-26.
- [6] LEE Y B, BAILEY C B, LU H, et al. Analysis of the thermal mechanical effects on packaging process of performance enhanced AMLCS's and the optical performance of the display[C]//Proceedings of Electronics System Integration Technology Conference, 2006: 5-7.
- [7] FENG Q B, HUA Y K, LÜ G Q, et al. Thermal stress analysis of laminated LCDs for aircraft cockpits[C]//Proceedings of Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies, 2012: 25-27.
- [8] ENGELSEN D D, 童林凤. 背光源的发展趋势[J]. 光电子技术, 2006, 26(2): 73-79.
ENGELSEN D D, TONG L S. Trends of backlights[J]. Journal of Optoelectronic Technology, 2006, 26(2): 73-79.
- [9] WU S T. Next generation LCD technology[J]. Journal of Information Display, 2010, 26(1): 3-4.
- [10] LIU T, LÜ G Q, FENG Q B, et al. Thermal design of LED backlight in high ambient temperature[J]. Journal of Solid State Phenomena, 2012(181/182): 208-211.