

电动汽车充电口的超声位姿测量系统设计

刘晓民¹, 杜岩平¹, 张晓勇¹, 王晓安²

(1. 北京华商三优新能源科技有限公司, 北京 101106;

2. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 针对电动汽车充电口视觉定位系统存在的配置成本高、图像处理算法复杂、环境适应性差等问题, 提出了一种基于超声波测距的充电口位姿测量系统; 首先对基于超声波的充电口位姿的测量技术进行了研究, 然后对充电口的超声位姿重构进行了分析, 采用了多点位超声融合的关键技术, 最终实现了电动汽车充电口位姿的测量; 实验结果表明测距模块在 300~1 200 mm 范围内测距精度可达 ± 0.2959 mm, 位姿测量系统定位精度可达 ± 1.5 mm、 $\pm 2.4^\circ$; 经实际应用发现该系统具有较强的鲁棒性, 达到了传统视觉定位装置的效果, 满足了电动汽车充电口位姿测量的工程需求。

关键词: 电动汽车; 充电口定位; 多点位超声融合测量; 位姿测量

Design of Ultrasonic Pose and Orientation Measurement System for Charging Port of Electric Vehicles

Liu Xiaomin¹, Du Yanping¹, Zhang Xiaoyong¹, Wang Xiaohan²

(1. Beijing Huashang Sanyou New Energy Technology Co., Ltd., Beijing 101106, China;

2. School of Mechanical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Aiming at the existing problems of high configuration cost, complex image processing algorithm and poor environmental adaptability of the electric vehicle charging port visual positioning system, a charging port position and orientation measurement system based on ultrasonic ranging is proposed. Firstly, the measurement technology of the charging port pose and orientation based on ultrasound is studied, and then the reconstruction of the ultrasonic port pose and orientation of the charging port is analyzed. The key technology of multi-point ultrasonic fusion is adopted to finally realize the Measurement of charging port pose and orientation of the electric vehicle. The results show that the ranging module can measure ± 0.2959 mm in the range of 300~1 200 mm, the positioning accuracy of the attitude measuring system can reach ± 1.5 mm, $\pm 2.4^\circ$. In practice, the system performs strong robustness, achieving the level of traditional visual positioning system and meeting the engineering needs of pose and orientation detection of the charging port of electric vehicles.

Keywords: electric vehicle; charging port positioning; multi-point ultrasound fusion measurement; pose and orientation measurement

0 引言

近年来, 电动汽车行业发展迅速, 对减少资源消耗, 提高环境质量做出了巨大贡献^[1]。截止到 2017 年底, 中国电动汽车保有量已占全球电动乘用车保有量的 40%^[2]。然而目前的电动汽车充电系统需要人工拔插充电枪, 针对未来大功率直流快充, 该充电方式存在诸如劳动强度大、作业效率低、恶劣环境时不便于室外操作以及供电线路可能出现漏电而带来安全隐患等弊端^[3], 尤其随着自动驾驶技术和低速自动泊车技术日益成熟, 迫切需要一种安全可靠的自动充电系统。

电动汽车自动充电分为充电口定位过程和充电枪的插拔过程, 其中充电口定位工作过去主要以机器视觉为主, 但视觉定位装置高成本, 高延时, 且图像对于天气环境的

鲁棒性差^[4], 针对上述问题亟需开发一种成本低且抗干扰能力强的定位系统。

超声测距技术因具有结构简单、成本低廉以及测量精度高等优点而常被应用于定位系统中。Cricket 定位系统^[5-6]和 Active Bat 定位系统^[7-8]为目前主流超声定位系统。前者基于 TDOA 算法, 通过信标节点结合被测物体接收器实现三维定位, 精度可达到厘米级。后者基于 TOF 算法, 通过超声波发射装置和固定在天花板上的接收机来实现对发射装置三维坐标的定位。而 D 等人融合了 Cricket 系统和 Active Bat 系统, 将一个超声发射器布置在天花板上, 将四个超声接收器安装在地板上, 通过多个发射节点与接收节点的组合计算, 实现了地板上被测物体的位姿测量^[9], 但该系统位置计算方法复杂, 且只适用于固定高度的环境中。

基于传统超声定位系统的缺点, 设计了一种新型超声位姿测量系统, 该系统能够实现对电动汽车充电口位姿的高精度测量, 并具有较高的稳定性。

1 充电口位姿测量原理

常见的超声传感器布置形式有反射式和对射式。对射

收稿日期:2020-03-20; 修回日期:2020-05-12。

作者简介: 刘晓民(1964-), 男, 河北丰润人, 本科, 高级经济师, 主要从事电动汽车充电基础设施规划领域方向的研究。

式测距原理根据发出超声波与收到超声波的时间差来计算距离^[10]。设 L 是被测距离, t 为发射与接收超声波之间的时间差, v 为超声波在空气中的传播速度, 则被测物体的距离为:

$$L = v \times t \quad (1)$$

将3个超声测距发射模块以等腰直角三角形形式安装在充电口周围, 充电口中心在其斜边中点上。将3个接收模块以等边三角形形式固定在机械臂旁边的充电桩上。设三个发射模块的三维坐标分别为 $T_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 $T_2(x_2, y_2, z_2)$ 、 $T_3(x_3, y_3, z_3)$ 。三个接收模块的三维坐标分别为 $R_1(0, 0, 0)$ 、 $R_2(d, 0, 0)$ 、 $R_3(\frac{d}{2}, \frac{\sqrt{3}d}{2}, 0)$, 其中 d 为接收模块的布置间距。按图1所示建立充电口坐标系 O' 和接收端坐标系 O 。

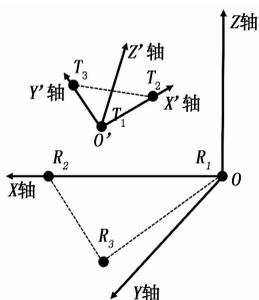


图1 超声传感器对应的空间坐标系

充电口三维坐标求解算法: 由超声测距模块可以测出 T_i ($i=1, 2, 3$) 分别到 R_1 、 R_2 、 R_3 的距离为 d_{i1} 、 d_{i2} 、 d_{i3} , 建立以下方程组来求的三维坐标:

$$\begin{cases} \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2} = d_{i1} \\ \sqrt{(x_i - d)^2 + y_i^2 + z_i^2} = d_{i2} \\ \sqrt{(x_i - \frac{1}{2}d)^2 + (y_i - \frac{\sqrt{3}}{2}d)^2 + z_i^2} = d_{i3} \\ x_i, y_i, z_i > 0, i = 1, 2, 3 \end{cases} \quad (2)$$

求解方程组 (2) 可得到 T_i 的三维坐标, 由此可得充电口中心的三维坐标为:

$$T = \frac{T_2 + T_3}{2} \quad (3)$$

充电口姿态求解算法: 设充电口坐标系 O' 和接收端坐标系 O 的单位矢量分别为 $(\vec{u}, \vec{v}, \vec{w})$ 和 $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$, 根据坐标变换可得二者的关系为^[11]:

$$(\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_1 \\ 0 & 1 & 0 & y_1 \\ 0 & 0 & 1 & z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot (\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$$

$$\begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot (\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}) \quad (4)$$

式中, α 、 β 、 γ 分别为俯仰角、偏航角和翻滚角, 按实际应用场景, 限定 α 、 β 、 $\gamma \in [-\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4}]$ 。

根据已知的 T_i ($i=1, 2, 3$) 的三维坐标, 可得充电口坐标系的单位矢量 $(\vec{u}, \vec{v}, \vec{w})$ 为:

$$\begin{aligned} (\vec{u} = \frac{T_1 T_2}{|T_1 T_2|}, \vec{v} = \frac{T_1 T_3}{|T_1 T_3|}, \vec{w} = \vec{u} \times \vec{v}) = \\ \begin{bmatrix} u_x & v_x & w_x & 0 \\ u_y & v_y & w_y & 0 \\ u_z & v_z & w_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

联立式 (4) 和式 (5) 可求出 α 、 β 、 γ 的值为:

$$\begin{cases} \alpha = \arcsin\left(\frac{v_z}{\sqrt{1-u_z^2}}\right) \\ \beta = -\arcsin(u_z) \\ \gamma = \arcsin\left(\frac{u_y}{\sqrt{1-u_z^2}}\right) \end{cases} \quad (6)$$

至此, 充电口的三维坐标和姿态角均已求出, 即实现了位姿测量。

2 超声位姿测量系统设计

2.1 系统硬件设计

系统硬件由三部分组成: 发射端、接收端和上位机, 图2为硬件组成框图。

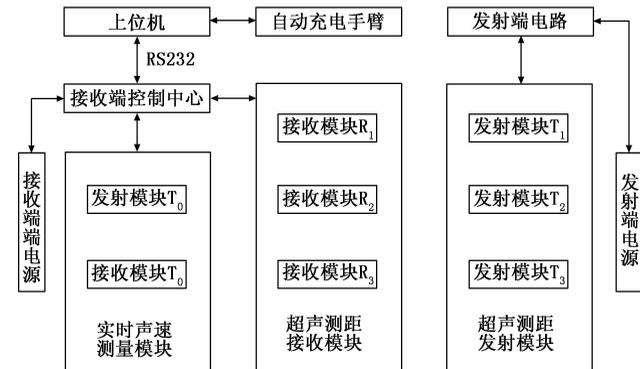


图2 超声位姿测量系统整体结构

测量过程中以红外线作为基准信号, 以确保超声测距收发模块可以进行严格的时钟匹配, 进而提升对超声波飞行时间测量的可靠性。发射模块同时发射红外信号和超声信号, 接收模块接收到红外信号的同时开始计时, 接收到超声信号的同时停止计时。因为红外信号属于光信号, 其传播速度 $v_{\text{infrared}} = 3 \times 10^8$ m/s, 假设最大测量距离 $L_{\text{max}} = 10$ m, 那么红外信号通过此距离所耗费的时间 $t_{\text{infrared}} = \frac{L_{\text{max}}}{v_{\text{infrared}}} = 3.33 \times 10^{-8}$ s, 在此段时间内超声波的传输距离 $L_{\text{ultrasonic}} = v_{\text{ultrasonic}} \times t_{\text{infrared}} = 0.0113$ mm, 可以看出使用红外信号作为基准信号时所造成的误差极小, 可以忽略不计。

环境温度与湿度会影响超声波传播速度, 而使用传感器测量温湿度时也会存在误差。为了准确地测量声速, 引

入了实时声速测量模块, 固定距离为 $L_{\text{reference}} = 200 \text{ mm}$, 假设超声波通过该段距离的时间为 $t_{\text{reference}}$, 那么可得实时声速

$$v_{\text{real}} = \frac{L_{\text{reference}}}{t_{\text{reference}}}$$

2.1.1 超声测距发射模块

发射模块功能分别为: 调制信号的产生、调制信号的放大、同时实现超声波信号的发射以及红外信号的发射, 发射功能原理图如图 3 所示。调制信号产生时, 需要单片机产生占空比为 50%, 频率为 40 kHz 的 8 个脉冲方波来启动超声波信号和红外信号的发射, 要求单片机具有高精度时钟来满足高质量调制信号的产生, STC15F104W 单片机内部集成了可靠的复位电路以及高精度 R/C 时钟, 具有性价比高的特点, 可以用于发射模块的设计; 由于超声波的作用距离与调制脉冲峰值正相关, 所以应放大调制信号以实现远距离测距; 要求放大电路稳定可靠, 并且具有较小的体积来满足测距模块的轻量化要求, MC34063 集成电路具有可靠性高、体积小等优点, 适用于调制信号的放大; 基于超声波信号发射需求, 发射器应具有发射的超声波范围广、作用距离适中、体积小成本低等特点, 综合这些因素, 选用 NU40C16T/R 型超声波发射器, 其体积小质量轻、灵敏度高、声压高、耐久性好并且性价比高, 可以满足设计要求; 红外信号发射阶段, 需要发射器具有灵敏度高、低功耗以及高精度等特点, 而 5 mm 红外发射二极管发射时稳定均匀、发射距离远且功耗很低, 因此选用该红外发射器。

2.1.2 超声测距接收模块

接收模块功能分为: 超声信号接收、红外光信号接收以及信号处理功能, 其原理如图 4 所示。超声信号接收: 由于超声信号的传输距离与强度呈负相关, 而超声信号转换为电信号后具有幅值较低的特点, 为保证系统测量精度需要对接收到的超声信号所转换的电信号进行放大、滤波、整形等。CX20106A 集成电路是一种超声波检测与接收的专用电路, 集信号放大、限幅、带通滤波、峰值检波和波形整形电路于一体, 并且该电路结构稳定、体积小且价格低廉, 故选用该集成电路来接收超声波信号。红外信号接收阶段, 红外接收器应在环境光条件下具有较强的鲁棒性, 并且低功耗特点, HS0038B 是一种一体化红外接收器, 其光电检测和前置放大器集成在同一封装上、抗干扰能力强、抗电场干扰能力强且功耗很低, 所以选用该款红外接收器进行红外信号的接收。信号处理阶段, 要求单片机处理速度快, 时钟精度高, 所以选用和发射模块相同的 STC15F104W 单片机。

2.2 系统软件设计

系统软件设计的主要内容是超声测距模块的控制程序设计和位姿测量主程序的设计, 并通过相应的串口通信实现下位机和上位机之间的数据传输, 然后通过上位机显示软件将最终的位姿测量结果显示出来。

发射模块的功能为频率为 40 kHz 的连续脉冲信号, 单次发射数量为 8 个, 脉冲信号间时间间隔为 20 ms, 占空比

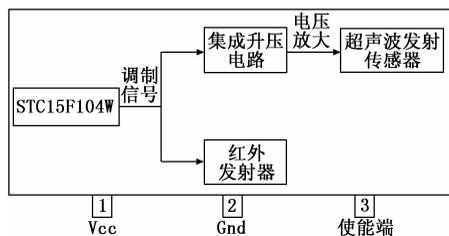


图 3 超声测距发射模块电路原理框图

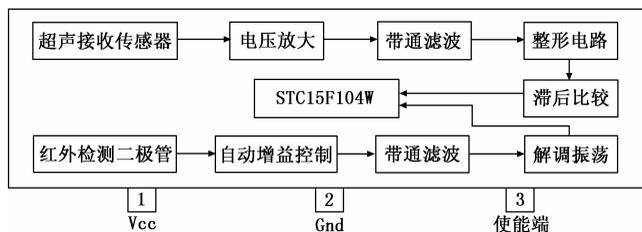


图 4 超声测距接收模块电路原理框图

为 50%。程序流程为对发射器及系统初始化时, 设定方波计数标志 $i=0.20 \text{ ms}$ 后进入定时器 0 的中断, 首先重装定时器 0 的初值以保证方波频率为 40 kHz, 然后对电平进行取反操作; 定时器 0 每中断一次方波计数标志加 1, 当方波计数标志大于 16, 方波传输完成。循环上述流程, 以实现超声持续发射。上述流程如图 5 所示。

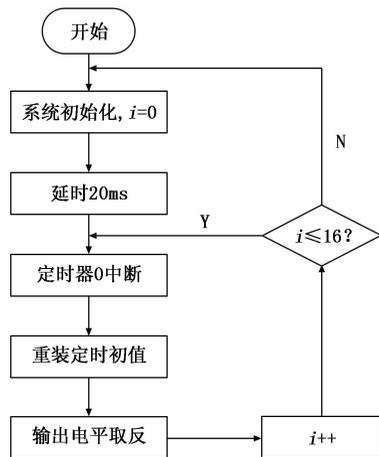


图 5 发射模块程序流程

接收模块的功能为将超声波传播时间映射为芯片输出的高电平持续时间。具体流程为对接收器及系统进行初始化, 系统进入红外光信号接收准备状态。由于光速与声速的量级差, 系统假定接收到红外光信号时, 判定为超声信号发射, 此时芯片引脚的输出电平由低电平状态转换为高电平状态, 进入超声信号接收准备状态。接收到超声信号后, 芯片引脚输出由高电平状态转换为低电平状态, 至此单次测量结束。上述过程将在系统启动后进行循环检测。上述流程如图 6 所示。

3 超声位姿测量系统优化与实验

基于电动汽车自动充电的需求, 系统预期性能指标为:

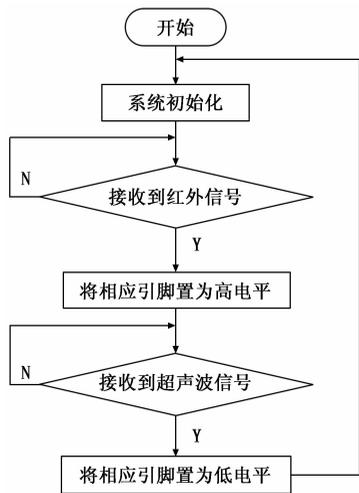


图 6 接收模块程序流程

三维坐标误差±2 mm; 姿态角测量误差±3°。为探究本系统是否能达到预期指标, 首先对传感器分布进行优化, 然后进行测距模块性能实验以确定测距精度, 最终进行了位姿测量实验。实验环境为温度 25 ℃, 湿度 65%RH; 平面距离测量工具为直尺和网格纸, 最小刻度均为 1 mm; 高度测量工具为高度游标卡尺, 测量精度为 0.02 mm; 角度测量工具为数显角度尺, 测量精度为 3'。

3.1 传感器布置形式优化

由式 (2) 和式 (5) 可以看出, 位姿测量的结果不只与超声测距结果有关, 还与超声测距接收模块的布置间距有关。根据超声测距模块的性能试验可知, 直线测距的最大误差为±0.295 9 mm, 假设 T_1 的真实位置在 $R_1R_2R_3$ 所成三角形的中心延 Z 轴正方向 1 000 mm 处, 即真实坐标为 $(\frac{d}{2}, \frac{\sqrt{3}d}{2}, 1000)$ 。取三角形 $R_1R_2R_3$ 边长即传感器布置间距分别为 1 000 mm、750 mm、500 mm 和 250 mm, 使用 MATLAB 的 unifrnd () 函数, 将 $[-0.295 9 \text{ mm}, +0.295 9 \text{ mm}]$ 范围内的随机误差引入系统, 最终根据公式 (2) 得到 2 000 个系统逆解。结果如图 7 所示, 随着三角形 $R_1R_2R_3$ 边长的增加, 逆解三维坐标向真实坐标收敛的趋势明显, 说明增大三角形 $R_1R_2R_3$ 边长即增加布置间距对于降低误差放大效应作用显著。

图 8 是不同布置间距 d 下的最大三维坐标误差, 可以看出当间距为 250 mm 时, 最终造成的三维坐标误差最大为 2.361 0 mm, 随着间距的增大, 误差明显减小, 当间距达到 750 mm 时, 最大误差为 0.844 4 mm, 在可以接受范围内, 并且此后再增大间距对误差的减小效果不再明显。此外, 考虑到超声换能器的波束角, 太大的布置间距会影响超声波的传播, 综合考虑并经过实验验证, 选取布置间距 $d = 700 \text{ mm}$ 。

3.2 位姿测量实验

按照上述位姿测量原理和接收模块布置间距, 搭建位姿测量实验平台如图 9 所示。

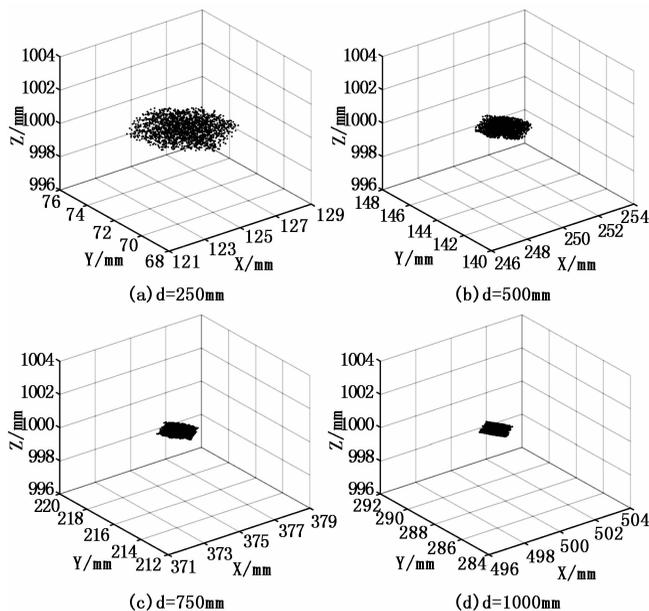


图 7 不同接收模块布置间距时的测量坐标逆解数据

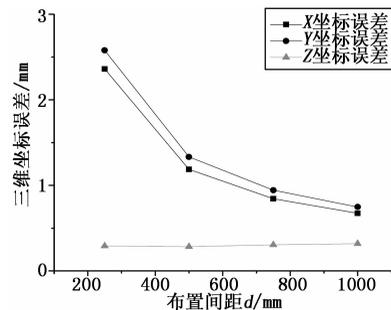


图 8 不同布置间距下的最大三位坐标误差

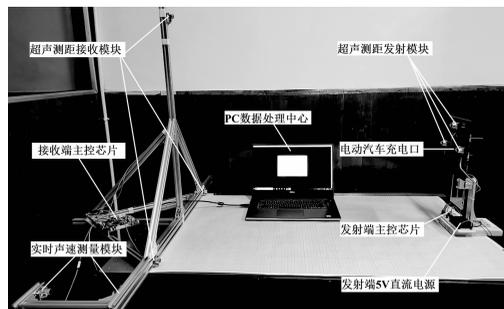


图 9 位姿测量实验平台

位姿测量实验分为充电口中心三维坐标测量实验和充电口平面角度测量实验。考虑到电动汽车的自动泊车精度, 确定充电口三维坐标变化范围为: 沿接收端坐标系 Z 轴 500~1 200 mm, 沿 X 轴 150~550 mm, 沿 Y 轴 400~600 mm。确定充电口的角度变化范围为: $\alpha, \beta, \gamma \in [-15^\circ, +15^\circ]$ 。

三维坐标测量实验流程如图 10 所示, 首先将充电口调节至与接收端坐标系的 XY 平面平行, 然后以 10 mm 为单位确定坐标范围, 并在其范围内随机组合 100 个测量点, 对这 100 个点进行三维坐标测量, 最终按上述流程进行实验, 得到每个测量点下的坐标偏差如图 11 所示, 可以看

出, X、Y、Z 三坐标的位置偏差均维持在 ±1.5 mm 范围之内, 可以满足应用要求。

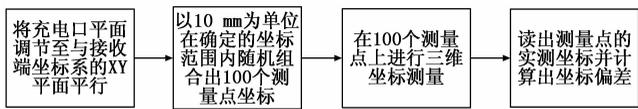


图 10 充电口中心三维坐标测量实验流程图

4 结束语

本文提出了一种采用多点位融合的超声重构测量技术实现对空间物体高精度位姿测量的方法, 该方法采用特定的“三发三收”传感器布置形式, 使用自主研发的高精度超声测距收发模块, 利用 STM32 等控制芯片, 实现了对电动汽车充电口的位姿测量。实验结果表明: 该系统对 X、Y 和 Z 方向的测量精度为 ±1.5mm, R_x 、 R_y 和 R_z 方向的测量精度为 ±2.4°, 并可以实现实时声速测量, 同时解决了不同环境下声速发生变化对定位带来的测量误差的问题, 提高了自动充电系统充电口定位的稳定性和测量系统的鲁棒性, 能够满足电动汽车充电口位姿测量的工程需求。

参考文献:

[1] 刘卓然, 陈 健. 国内外电动汽车发展现状与趋势 [J]. 电力建设, 2018, 36 (7): 25-32.

[2] 唐葆君, 王翔宇. 中国新能源汽车行业发展水平分析及展望 [J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2019, 21 (2): 6-11.

[3] 张 辉, 金侠挺. 基于机器视觉的新能源电动车充电孔检测与定位方法 [J]. 测控技术, 2017, 036 (2): 9-14, 19.

[4] 马立焱. 基于超声波的电动汽车充电口定位技术 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.

[5] Guo Qingfeng. Tracking Indoor Pedestrian using Cricket Indoor Location System [A]. IEEE International Conference on Communication Systems [C]. 2012: 453-457.

[6] Priyatha N, Chakraborty A, Balakrishnan H. The Cricket Location Support System [D]. MIT: Massachusetts, 2005.

[7] Ward A, Jones A, Hopper A. A New Location Technique for the Active Office [J]. IEEE Personal Communications, 1997, 4 (5): 42-47.

[8] Oliver J W, Robert K H. Concurrent scheduling in the active bat location system [A]. IEEE international conference on pervasive computing and communications workshops [C]. 2010.

[9] Diaz S E, Salas J G. Horizontal Angle Localization and Orientation System with 4 Receivers and Based on Ultrasounds [J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2016, 82 (3-4): 595-607.

[10] 赵 锐, 钟 榜, 朱祖礼, 等. 室内定位技术及应用综述 [J]. 电子科技, 2014, 27 (3): 154.

[11] 王殿君. 移动机器人自主定位技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.

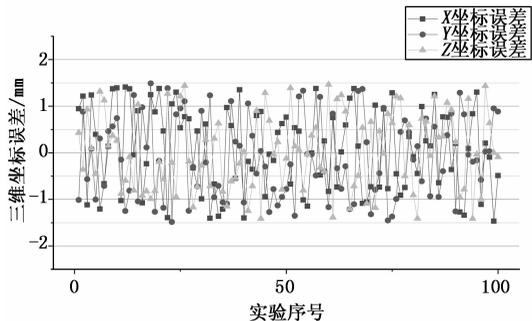


图 11 充电口中心三维坐标测量实验误差示意图

充电口平面角度测量的实验流程如图 12 所示, 首先将充电口中心固定于 (700 mm, 350 mm, 500 mm) 处, 然后以 1° 为单位, 在确定的角度范围内随机组合出 100 个测量点, 对这 100 个测量点进行充电口平面角度测量, 进而按上述流程进行实验, 可以得到每个测量点实测角度, 最终可计算出角度偏差如图 13 所示, 可以看出, 三个角的角度误差能够稳定在 ±2.4° 范围内, 可满足应用要求。

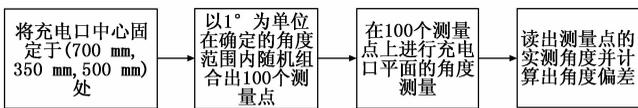


图 12 充电口平面角度测量实验流程图

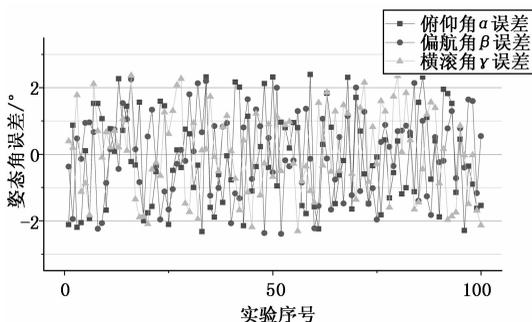


图 13 充电口平面角度测量实验误差示意图

(上接第 15 页)

[5] 徐 进, 王静玲, 王 礁. 1553B 总线全仿真平台的研究与实现 [J]. 电子科技, 2017, 30 (3): 157-159.

[6] 吴延军. 基于 UML 的 1553B 通讯仿真在 LabVIEW 中的实现 [J]. 舰船电子工程, 2018, 38 (12): 117-120.

[7] 祝 伟, 张金刚, 张佳宁, 等. 基于 1553B 总线的运载火箭供电测控系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (5): 21-24.

[8] 张笑虹. 基于 Higale 的导弹飞行控制软件测试环境仿真平台的

开发 [D]. 上海: 上海交通大学, 2018.

[9] 刘彦伟, 程 钊, 张青青, 等. 基于仿真卡的通用 1553B 总线测试软件设计 [J]. 测控技术, 2014, 33 (11): 104-106.

[10] 陈基昕, 王 忠, 赵锦宇. 导弹测发控系统 CAN 总线拓扑结构的分析及选择 [J]. 舰船电子工程, 2019, 39 (5): 129-134.

[11] 陈基昕, 王 忠, 赵锦宇. 导弹测发控系统 CAN 通信协议的设计与实现 [J]. 兵工自动化, 2018, 37 (10): 17-23.