

动力电池螺栓紧固防错系统设计与实现

李 占, 李 阳, 李 林, 徐 伟

(江苏自动化研究所, 江苏 连云港 222061)

摘要:动力电池一般通过螺栓固定在电池箱中, 由于安装空间小, 部分螺栓仍需人工参与装配, 人工安装不可避免发生螺栓漏装、过拧紧、未按工艺装配顺序等引发质量问题。针对上述问题, 提出一种螺栓防错紧固方法。采用超声波定位系统与电动拧紧系统结合的方式, 对螺栓安装过程的扭矩和位置实时监测, 通过软件控制螺栓安装位置的先后顺序, 并通过声光等方式对安装过程的正确与否进行提醒。对防错系统的原理、方法、研制、误差分析与修正进行说明。试验结果表明, 防错一次合格率达 100%, 满足人工辅助装配作业需要。

关键词:新能源汽车; 动力电池; 螺栓; 超声波; 防错

中图分类号: TP278

文章编号: 1000-0682(2024)03-0022-05

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.03.004

Design and implementation of error proofing system for tightening power battery bolts

LI Zhan, LI Yang, LI Lin, XU Wei

(Jiangsu Automation Research Institute, Jiangsu Lianyungang 222061, China)

Abstract: Power batteries are usually fixed in the battery box by bolts. Due to the small installation space, some bolts still need to be manually assembled, which inevitably leads to quality problems such as bolt omission, over tightening, and failure to follow the assembly process sequence. Therefore, a bolt error proofing tightening method to address the above issues was proposed. By combining ultrasonic positioning system with electric tightening system, the torque and position of bolt installation process are monitored in real-time. The sequence of bolt installation positions is controlled through software, and the correctness of the installation process is reminded through sound and light methods. Explain the principles, methods, development, error analysis, and correction of error proofing systems. The experimental results show that the first pass rate of error proofing reaches 100%, which meets the needs of manual assembly operations.

Keywords: new energy vehicles; power battery; bolt; ultrasonic; error proofing

0 引言

动力电池一般用于为新能源汽车提供电能, 动力电池加上电池电子部件、高压电路、过流保护装置、电池箱以及与其他外部系统(如冷却、高压、辅助低压和通讯等), 形成动力电池箱, 其中动力电池

通过螺栓紧固在电池箱内, 电源铜排通过螺栓与动力电池正负极相连用于为外部供电。

动力电池箱为汽车提供电能, 与车辆一起经历高低温、震动等复杂的工况。在使用过程中, 一旦螺栓出现松动、掉落、断裂的情况发生, 动力电池箱将可能出现短路、断路等情况, 影响汽车的使用安全问题。

为了降低螺栓的紧固风险, 出厂前螺栓的紧固扭矩和安装顺序须满足工艺要求。其中针对螺栓的扭矩一般通过人工复检方式解决, 但对于螺栓的安

收稿日期: 2024-01-15

第一作者: 李占(1986—), 男, 江苏连云港人, 本科, 工程师, 研究方向为工厂自动化及应用工程研究。

装工艺顺序,靠人工复检很难保证其正确性。国内学者对螺栓紧固先后顺序研究表明,不同的装配工艺顺序对螺栓的预紧力分布产生重要影响^[1-2],而预紧力是螺栓连接刚度和可靠性的关键^[3]。因此各车厂采取多种措施,确保在人工作业条件下螺栓装配工艺的正确性。

目前市场上主要通过机械臂定位方式实现^[4-5],这种方式是在机械臂的 X, Y, Z 轴关节处安装位移或角度传感器,电动拧紧工具安装在机械臂末端,人工移动机械手臂,定位机构的坐标也将随着传感器值变化而发生改变,辅以软件控制实现防错。缺点是人工操作范围受机械行程限制,特别是针对螺栓数量多、安装位置范围广的产品操作性差。

近些年,室内无线定位技术得到快速发展,主要有红外、超声波、RFID、蓝牙、WIFI等^[6],其中超声波定位产品因其价格便宜,定位精度高,得到越来越广泛的使用。该文采用超声波定位技术,结合电动拧紧工具、AGV等,实现动力电池螺栓紧固防错的批量自动化生产,并在A公司的动力电池生产车间开展应用。

1 防错原理及方法

1.1 防错原理

防错技术是基于超声波定位的原理实现。超声波是一种频率高于20 kHz的声波信号,它的主要特点为频率高、波长较短、速度慢、束性强和易于集中能量的特点。图1给出了超声波定位系统原理框图。

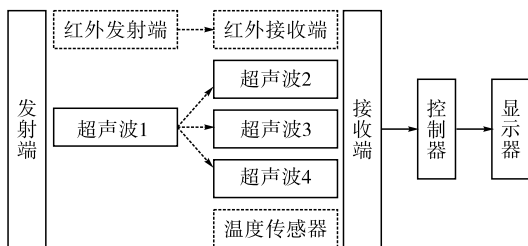


图1 超声波定位系统原理框图

超声波发射端安装在被定位机构上,接收端安装在固定位置,发射端配备1个超声波发射器和1个红外发射器,接收端配备3个超声波接收器、1个红外接收器、1个温度传感器。工作时发射端同步发射红外信号和超声波信号,利用红外光速传播速度(3.0×10^8 m/s)远大于超声波速度(340 m/s)的特性,当接收端收到红外信号开始计时,收到超声波信号停止计时。发射端与接收端的距离公式:

$$d = v \cdot t \quad (1)$$

式中: d 为超声波发射端与接收端的距离; v 为超声波在空气中的传播速度; t 为超声波发射端到接收端的传播时间。

由于超声波在空气中的传播速度受温度影响会产生变化^[7],因此公式(1)中的 v 还需满足以下的关系:

$$v = V_0 \sqrt{1 + \frac{T}{T_0}} \quad (2)$$

式中: $V_0 = 331.45$ m/s; $T_0 = 273.16$ °C; T 为环境温度。

设待测点超声波传感器坐标为 (x, y) ,接收端三个超声波传感器坐标为 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$,根据三边测量算法^[8-9],坐标之间存在以下关系:

$$\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} = d_i (i = 1, \dots, 3) \quad (3)$$

通过方程计算可得到目标节点的空间坐标。

1.2 防错实现方法

在超声波定位的基础上,结合电动拧紧系统对扭矩的精准控制,实现对螺栓紧固防错控制,两者之间的连接关系如图2所示。无线电动扳手通过WIFI与拧紧系统控制器进行通信,便于人工大范围进行操作;超声波系统控制器与拧紧系统控制器之间通过网线连接,采用OP(OPEN PROTOCOL)协议进行数据通信。

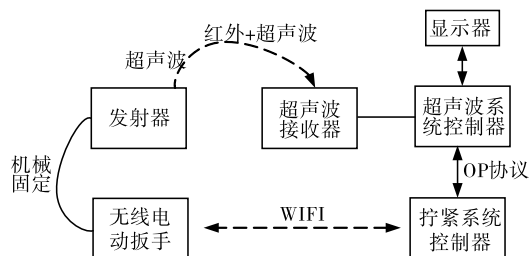


图2 超声波定位系统与电动拧紧系统的连接关系

防错工作流程如下:

- 第一步 防错系统示教所有待安装螺栓位置;
- 第二步 根据螺栓安装工艺顺序编排防错程序,实现每颗螺栓安装位置与顺序的一一对应;
- 第三步 启动防错系统,当待安装螺栓坐标等于系统设定坐标,人工触发无线电动扳手完成拧紧作业;若未处于待拧紧位置或已拧紧过,则超声波系统通过OP通信协议限制无线电动扳手的启动,并发出声光信息,提醒操作人员;
- 第四步 重复第三步,直至所有螺栓拧紧完成。

防错系统回到初始状态,等待新的启动命令。

2 系统研制

根据防错原理,螺栓的安装位置需提前示教,因此连续生产时需考虑不同动力电池箱螺栓相对位置应处于误差范围内。另外考虑到动力电池包长和宽均超 1 m,为了便于人工安装时能够对电池箱内的螺栓安装操作,系统研制时考虑电池箱四周均便于人工操作。

综合上述设计要求,系统的三维示意图如图 3 所示,主要由超声波定位系统、电动拧紧系统、AGV 搬运系统、助力悬挂装置、工位支架及工位托盘等组成。

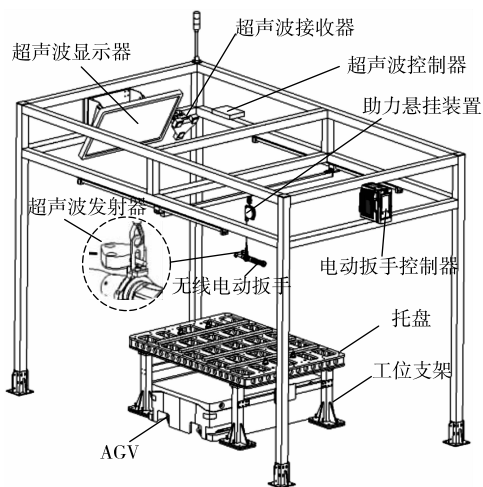


图 3 系统三维示意图

超声波定位系统用于螺栓位置的示数,工艺顺序编排,参与无线电动扳手的启停控制;电动拧紧系统用于螺栓的拧紧策略及拧紧扭矩的控制;AGV 搬运系统用于托盘在工位之间的搬运,实现流动力电池箱水装配作业;助力悬挂装置用于无线电动扳手的平衡助力;工位支架用于托盘的放置及定位;托盘用于动力电池箱的放置及定位。

2.1 超声波定位系统

图 4 给出了超声波定位系统组成,主要包括超声波发射器、超声波接收器、控制器、显示器等。超声波发射器与超声波接收器无线通信,超声波发射器用于无线电动扳手的定位,控制器用于位置信息计算及螺栓装配顺序示教编程,并与电动拧紧系统进行通信,显示器用于显示和输入相关数据信息。

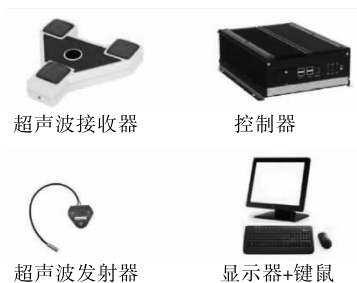


图 4 超声波定位系统组成实物图

图 5 给出了超声波定位流程示意图,超声波移动到目标位置时,显示器显示定位状态,蜂鸣器发出提示音。定位过程中若定位丢失,则将返回重新定位,当定位完成后,电动扳手才允许启动运行。

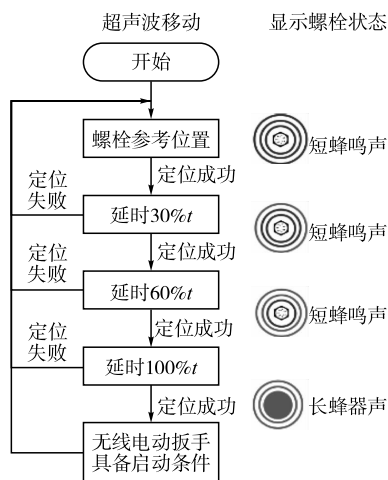


图 5 超声波定位流程示意图

2.2 电动拧紧系统

电动拧紧系统主要由无线电动扳手和电动扳手控制器等组成,如图 6 所示。无线电动扳手用于对螺栓的装配作业,并反馈扭矩至电动扳手控制器;电动扳手控制器用于设定螺栓的拧紧扭矩、控制策略等,与超声波定位系统共同控制无线电动扳手的启动与停止。



图 6 拧紧系统组成实物图

2.3 工位支架及托盘

图 7 给出了电池箱、托盘及工位支架之间的位置关系。电池箱放在托盘上,通过电池箱定位销、孔配合约束电池箱与托盘间的位置关系。托盘放在工

位支架上,通过托盘定位销、孔配合约束托盘与工位支架间的位置关系。电池箱、托盘及工位支架的销、孔位置为机加工产品,且定位销、孔均采用对角放置,彼此间实现较高的定位精度,保证了不同电池箱螺栓的安装位置始终处于公差带范围内。

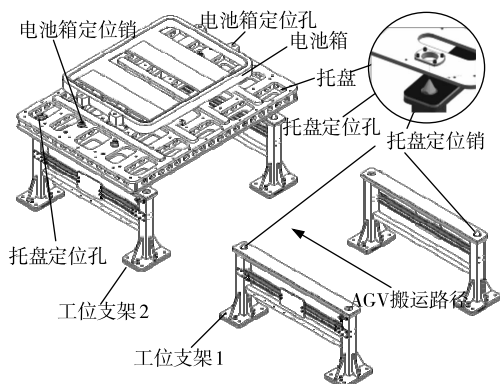


图7 位置关系示意图

3 误差分析与修正

3.1 误差分析

超声波定位误差以及电池箱、托盘、工位支架间配合误差均为已知量。防错系统示教时已设定余量,忽略此部分误差。

由于流水装配作业需要,电池箱需通过AGV在工位支架间来回搬运,因此AGV的定位精度决定了托盘能否成功落至工位支架,即需解决“动态定位”的问题。其中AGV的重复定位精度选型时已确定,关键是根据AGV重复定位精度设计托盘销孔配合余量。

已知AGV的重复定位精度为 ± 10 mm,因此销孔配合至少有 ± 10 mm的余量。工程应用过程中,将销孔配合余量设计为理论值的2倍多。托盘定位孔的最大直径设计为49 mm,销的头部最小直径为5 mm,销孔的配合余量则为 ± 22 mm。但在实际应用过程中,AGV将托盘从一个工位搬至另一工位时经常发生托盘定位销无法落位到托盘定位孔的问题,失败率高达50%。

分析不能落位原因,发现除了受AGV的重复定位精度影响,还与托盘与工位支架间产生过大的旋转角度有关,图8给出了托盘产生旋转角不能落位俯视示意图。进一步分析托盘产生旋转的原因,由于AGV采用双轮驱动与四个承重轮的方案^[10],若两个驱动轮在停车时摩擦力、速度等不同,则会出现AGV姿态与行驶路径有夹角的情况。由于AGV与托盘之间摩擦力大,忽略AGV与托盘间的相对

滑动。

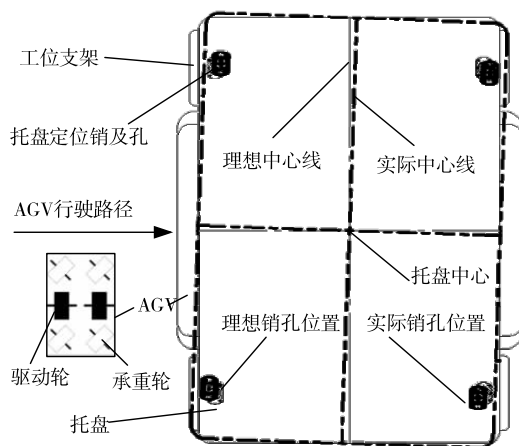


图8 托盘不能落位的示意图

结合上述分析,设计托盘销孔配合余量,不仅需考虑AGV重复定位精度,还应包含AGV旋转误差。

3.2 误差修正

图9给出了托盘在工位支架上的俯视图, $A_1 \sim A_4$ 为托盘定位销, $B_1 \sim B_4$ 为托盘定位孔。 O 为托盘的中心点,以 O 点为圆心到 A_3 圆心 D 的距离为半径作圆 C_1 。连接 O 点到 C_1 与 A_3 的交点 E ,连接 O, D, E 三点组成三角形 $\triangle ODE$, $\angle DOE$ 为 α 。 L_3 为1070 mm, L_4 为1300 mm。

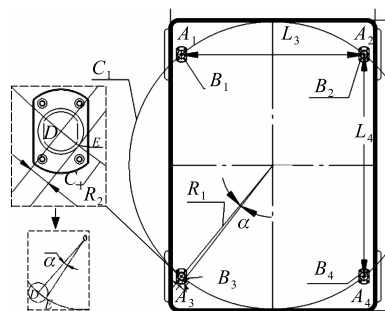


图9 销孔配合误差分析

等腰三角形 $\triangle ODE$ 满足以下公式:

$$|DE| = 2|OD| \sin \frac{\alpha}{2} \quad (4)$$

$$|OD| = \sqrt{(L_3/2)^2 + (L_4/2)^2} \quad (5)$$

经计算 $|OD| = 841.86$ mm,现场多次测得 $\alpha < 2^\circ$,以 $\alpha = 2^\circ$ 带入公式(5)计算得 $|DE| = 29.4$ mm,即单一旋转因素导致的旋转角度误差最大为29.4 mm。另外,根据公式(4)得出,托盘中心离销孔中心距离越远,同样旋转角度情况下,旋转误差越大。

上述计算解决了旋转误差的问题,实际托盘定位误差将由重复定位误差和旋转误差共同决定,如图10所示。

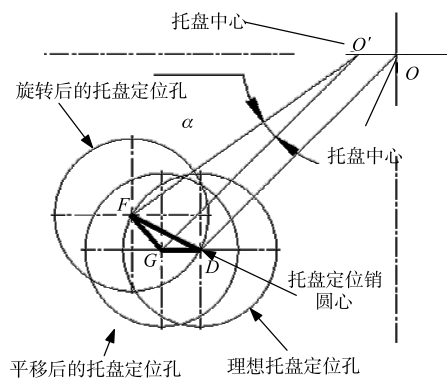


图 10 旋转误差和重复定位误差图

图 10 中托盘定位销安装在工位支架上,位置固定不变。假设托盘先平移后旋转,分别连接理想托盘定位销圆心 D 、平移后的托盘定位孔圆心 G 、旋转后的托盘定位孔圆心 F 组成三角形 $\triangle DGF$,其中 DF 的长度为最终销孔至少应达到的尺寸。根据三角形余弦定理, DF 长度的计算公式如下:

$$|DF|^2 = |DG|^2 + |GF|^2 - 2|DG||GF|\cos\angle DGF \quad (6)$$

$$\angle DGF = \angle FGO' + \angle DGO' \quad (7)$$

式中: $\angle FGO' = 180^\circ - \alpha/2$, $\angle DGO' = \tan^{-1} L_4/L_3$, $|GF| = 29.4 \text{ mm}$, $|DG| = 10 \text{ mm}$, $\alpha = 2^\circ$, $L_3 = 1070 \text{ mm}$, $L_4 = 1300 \text{ mm}$ 。

经计算 $|DF| = 37.566 \text{ mm}$ 。由于 DF 长度直接计算相对麻烦,可根据三角形两边之和大于第三边 $|DG| + |GF| > |DF|$ 间接获得,即销孔配合余量等于重复定位精度误差和旋转误差之和一定满足要求。因此销孔配合余量可设计为:

$$|DG| + |GF| = 10 + 29.4 \approx 40 \text{ mm}$$

根据计算结果,将托盘销孔配合余量由 $\pm 22 \text{ mm}$ 增加至 $\pm 40 \text{ mm}$,托盘落位成功率达 100%。

4 试验验证

图 11 给出了防错系统对电池箱螺栓安装顺序示教点位图及对应螺栓的拧紧扭矩。

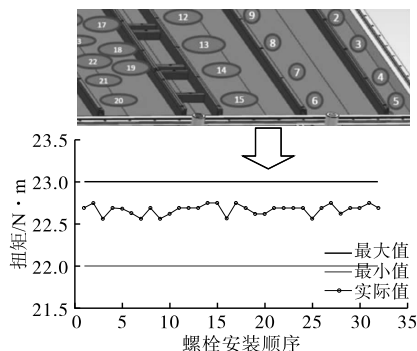


图 11 螺栓安装顺序及对应扭矩

图中每个螺栓设定的扭矩最大值为 $23 \text{ N} \cdot \text{m}$,最小值为 $22 \text{ N} \cdot \text{m}$,扭矩反馈值处于两者之间,满足螺栓拧紧扭矩控制要求。同时通过超声波定位,约束了螺栓的安装先后顺序,产品的装配质量得到大幅提升。表 1 中列出了三种装配方案使用情况的对比数据。

表 1 对比数据

装配方式	效率	防错
人工装配	100%	无
人工 + 机械臂	80%	100%
人工 + 超声波	100%	100%

从表中得出若仅靠人工安装,则无法保证安装工艺的正确性;人工 + 机械臂的方案,由于受到机械约束操作不方便,装配效率受到较大影响;人工 + 超声波定的方案综合了上述两种方案的优点,更具推广价值。

5 结论

该文对动力电池螺栓紧固防错方法进行研究和试验验证,提出了一种基于超声波定位的螺栓紧固防错方法,避免了螺栓少装、过拧紧、未按工艺装配顺序安装的问题。相较于人工装配,实现 100% 防错,相较于人工 + 机械臂方案效率提高 20%。

参考文献:

- [1] 李培林,王庆力,王威,等. 螺栓组拧紧顺序对结构体接触刚度的影响研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2014(11):39-42.
- [2] 王才义,李英杰. 螺钉组拧紧顺序对产品结构性能的影响[J]. 机械设计,2021,38(1):159-162.
- [3] 巩浩,刘检华,冯慧华. 螺纹连接松动机理和防松方法研究综述[J]. 机械工程学报,2022,58(10):326-346.
- [4] 肖云湖. 一种带位置记忆功能的智能螺丝紧固系统: ZL201820720716.2[P]. 2019-02-01.
- [5] 姚文武. 一种智能防呆螺丝拧紧装置: ZL201910835122.5[P]. 2019-12-20.
- [6] 张宁,付炜平,孟荣,等. 室内空间定位方法研究综述[J]. 科学技术与工程,2022,22(3):882-892.
- [7] 张华宇,谢凤芹,李强. 超声波在空气温度场重建中的应用[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2012,31(1):94-98.
- [8] 许佩佩. 基于 TOA 方案的超宽带室内定位技术研究[D]. 南京:东南大学,2016:13-14.
- [9] 张兴红,陈然,张志忠,等. 基于 TOA 算法的超声波定位节点布局研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2022,36(4):162-169.
- [10] 周驰东. 磁导航自动导向小车 (AGV) 关键技术与应用研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2012.