

基于数字孪生的输变电路三维数字化仿真系统

张星炜, 王海楠, 孟悦, 黄祥, 吴媚, 朱洁

(江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要: 针对原有系统无法真实展示工程地理环境的问题, 研究基于数字孪生的输变电路三维数字化系统的设计方法。在硬件设计中, 布局输变电路网络架构, 嵌入OPC-UA服务器, 绑定传感器节点位置。在软件设计中, 建立输变电路空间数据库, 构建数字孪生三维虚拟模型, 完成三维数字化系统的设计。以复杂地区输变电路建设工程为对象进行实验, 实验结果表明: 选择多个场景中的位置线段进行距离测量时, 两组传统方法对实际距离测量存在误差, 生成的地形图像发生形变, 而本文系统可完全还原输变电路段距离, 具有实际应用效果。

关键词: 输变电路; 环境特征; 数字孪生; 三维数字化系统

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2025)02-0094-06

3D Digital Simulation System for Transmission and Distribution Lines Based on Digital Twins

ZHANG Xing-wei, WANG Hai-nan, MENG Yue, HUANG Xiang, WU Mei, ZHU Jie

(Jiangsu Frontier Electric Technology Co., Ltd., Nanjing 211102 China)

Abstract: Aiming at the problem that the original system can not truly display the engineering geographical environment, the design method of three-dimensional digital system of transmission and transformation lines based on digital twins is studied. In the hardware design, the power transmission and transformation line network architecture is laid out, the OPC-UA server is embedded, and the sensor node location is bound. In the software design, the spatial database of power transmission and transformation lines is established, the digital twin three-dimensional virtual model is constructed, and the design of three-dimensional digital system is completed. Taking the construction project of power transmission and transformation lines in complex areas as the object of the experiment, the experimental results show that when selecting the location line segments in multiple scenes for distance measurement, the two groups of traditional methods have errors in the actual distance measurement, and the generated terrain image is deformed. However, the system in this paper can completely restore the distance of power transmission and transformation line segments, which has practical application effect.

Keywords: transmission and transformation lines; environmental characteristics; digital twins; three-dimensional digital system

0 引言

我国经济社会发展较为迅速, 工农业和服务业迈进崭新的发展局面, 随着城市化进程的不断加深, 对电力的需求逐渐加大, 输变电路的布局建设, 比以往任何时期都更加重要。电力工程建设是经济建设的重要项目之一, 对国民经济发展起着十分重要的影响, 现阶段电力工程施工手段以及维修方式, 已经难以满足智能电网的发展要求, 需要对其进行现代化信息管理和技术设计, 以此提高输变电路的建设效率。现代信息已经完成了数字化和可视化的转型发展, 将物理世界和信息世界更好地交互和融合。输变电路运行过程中, 会存在大量的电子设备, 只有保证其在安全参数内运行, 才能够维护电网的输送电稳定, 以此需要对其进行整体状况的监测和管

理^[1]。数字孪生技术是物理世界中, 一种同步化的数字镜像, 能够通过对数据的分析进行衍生, 将优化后的数据结果反馈至物理世界中, 对需要监管或者控制的设备进行参数选择。数字孪生技术能够通过对整体环境的预设, 进行虚拟空间的数字化模拟, 还原设备与线路之间的整体联系, 建立与实际比例等同的虚拟模型, 赋予其在现实中的物理属性, 实现三维场景下的漫游功能。国内外均对该项技术进行研究, 如Eric J. Tuegel等人就曾基于数字孪生技术研究了飞行器结构寿命预测模型, 利用单个飞行器的精细化模型整合结构偏转和温度的计算, 获得较优的成果; 而我国学者陈思远等人也曾提出基于数字孪生的MPS智能控制系统^[2]。本文以此为研究前提, 以数字孪生技术为设计基础, 对输变电路建立三维数字化仿真系统, 为精准定位和可视化管理提供理论基础。

1 三维数字化系统硬件设计

1.1 布局输变电路网络架构

此次输变电路数字化系统,以局域网环境为基础,能够直接对信息进行访问,设置两种通信模式。将所有线路建设所需的部门,连接在同一组网络服务器中,并配置数据服务器接口^[3],具体架构如图1所示。

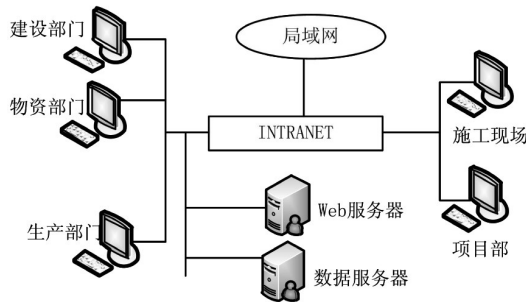


图1 输变电路网络架构

根据图1所示,为实现用电需求,对输变电路进行智能化网络管理,通过电力数据信息的储存,实时分析传入数据,且用电数据发布在网络中时,可以随时进行查询。

1.2 嵌入 OPC-UA 服务器

数字孪生三维系统拟建,需要将输变电路的常态运行状态进行还原,以 OPC-UA 协议模式嵌入监测服务器,对电力设备进行统一监测。

不同类型的运行设备,可以将电力数据对应到服务器中的地址空间中,将客户端与服务器相连接,直接进行数据通信,如图2所示^[4]。

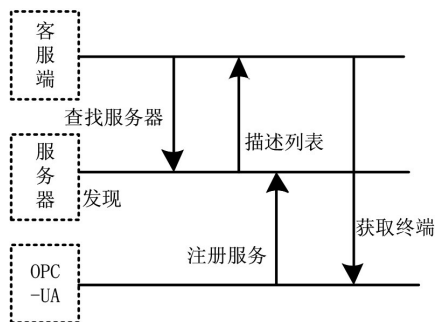


图2 嵌入服务器步骤

根据图2所示,客户端要与发现服务器进行连接,通过服务器获取数据列表,从而实现电力的数据流通。

OPC-UA 服务器通过 REGISTER-SERNER 方法注册,当发现两者建立联系后,客户端能够通过服务器完成电力数据查询,从而获取相关输变电路的描述信息。

1.3 绑定传感器节点位置

输变电路中的传感器产生的电力数据,会以节点的形式进行展示,将其绑定在对应的服务器中,可以对每个节点对象代表的的数据属性进行分类,获取不同线路位

置的运行情况^[5]。

以 OPC-UA 服务器中的多种信息为集合,对地址空间和服务模型以及安全模型进行统一设定,提供统一化的数据接口,以实现输变电路的数据信息访问,为电力数据的运行速率提供通信保障。基本节点类型和属性,如图3所示。

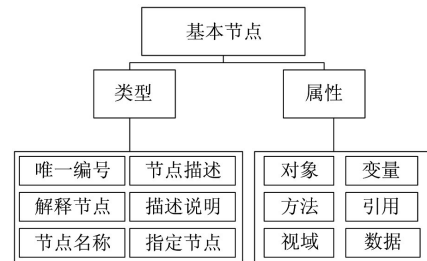


图3 节点类别与对应属性

根据图3所示,地址空间主要由服务器节点组成,其也被称为基本单元。不同节点拥有特定属性,以及决定性属性,分别对对象节点和变量节点以及方法节点进行绑定^[6]。

客户端可以通过订阅和读取形式,对服务器中的数据变量进行获取,并在变量节点中进行电力线路的数据储存,且该节点的数据变化可直接表示电力运行转状态,将二者转入服务器中进行配置,可对传感器参数进行统一配置。

2 输变电路三维系统软件设计

2.1 建立输变电路空间数据库

输变电路的地理实物所处的空间结构能够通过空间数据进行表示,以坐标数据为几何定位特征,将输电路的导线位置进行布置,可对电力系统的线路电压进行标记。

对数据库定点位置进行计算,其折叠误差要控制在最小区间,以保证模型应用过程中的模拟顺序。设定三维欧氏空间中对边坐标为 (q_i, q_j) ,折叠后关联的三角形集合为 $planse(i, j)$ 。

在新位置的定点位置用 $w[x, y, z]e$ 表示,二次误差测度下定义顶点,到各面积之和,如下^[7]:

$$\Delta(\bar{q}) = \sum_{r \in \text{planes}} (r^e \bar{q})^2 \quad (1)$$

式中: $planse(i, j)$ 的三角平方面积,为 $r=(a, s, d, f)$ 的 e 次方。方程为:

$$\begin{cases} ax + sy + dz + f = 0 \\ a*a + s*s + d*d = 1 \end{cases} \quad (2)$$

将其进行转换,表示为:

$$\Delta(\bar{q}) \begin{cases} = \Delta([x, y, z]^e) \\ = \sum_{r \in \text{planes}} q^{-e} (rr^e) \bar{q} \\ = r^{-e} \left(\sum_{r \in \text{planes}} T_q \right) \bar{q} \\ = q^{-e} Y \bar{q} \end{cases} \quad (3)$$

式中： T_q 表示为4*4的对称矩阵，为三角形误差矩阵，如下^[8]：

$$T_q = qq^e = \begin{bmatrix} a^2 & as & ad & af \\ as & s^2 & sd & sf \\ ad & sd & d^2 & df \\ af & sf & df & f^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

折叠后三维模型的误差矩阵，表示为Y，如下：

$$Y = \sum_{r \in \text{planes}} T_q = \begin{bmatrix} a^2 & as & ad & af \\ as & s^2 & sd & sf \\ ad & sd & d^2 & df \\ af & sf & df & f^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$= \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} & y_{14} \\ y_{12} & y_{22} & y_{23} & y_{24} \\ y_{13} & y_{23} & y_{34} & y_{34} \\ y_{14} & y_{24} & y_{34} & y_{44} \end{bmatrix}$$

式中：将 $plane(i, j)$ 中所有三角形误差矩阵进行求和，得到矩阵Y。按照矩阵的特殊形式，求取折叠误差，并对输变电线路中存在的空间数据进行排序，得到空间数据库。

在实时映射的实现基础上，利用虚实交换技术实现对电力数据的转换，以此对电力设备的状态和利用效率进行统计，为硬件设备提供可视化数据。

2.2 构建数字孪生三维虚拟模型

空间数据的量级越大，其对位置描述的数据量需求就越高，为将输变电线路工程的信息数据进行准确性描述，采用数字孪生的方式建立三维虚拟模型。

依据数字孪生理论对模型的运行原理定义，在输变电线路运行时，模型能够根据运行计划控制输电线路供电，以此提供真实的电力服务^[9]。具体操作环节如图4所示。

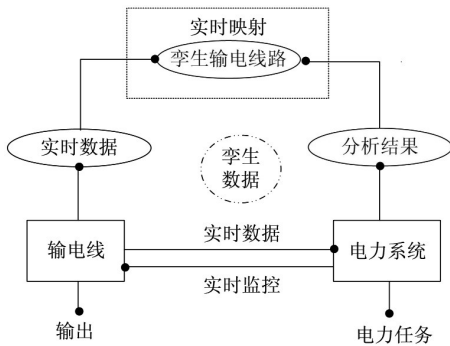


图4 数字孪生模型运行原理

根据图4所示，数字孪生模型的构建是孪生技术应用

的核心，能够对现场环境和设备进行数字化建设，在数字空间内映射出实体设备的生产活动。

输变电线路运行中设备为串联状态，以此按照串联型机器人虚拟模拟进行结构连接，通过雅各比矩阵方式，实现虚拟机器人的运动学逆向解^[10]。

分别设置 x_0 坐标轴、 y_0 坐标轴、 z_0 坐标轴，将其进行运动学结构矢量表示，如下：

$$U = [U_{x_0} \ U_{y_0} \ U_{z_0}] \quad (6)$$

式中：位矢量表示为U。转换为姿态矢量，表示为I，如下：

$$I = [I_{x_0} \ I_{y_0} \ I_{z_0}] \quad (7)$$

将模型中的平移关节和末端连接，参考 x_0 、 y_0 和 z_0 坐标，对三个方向的自由度进行执行，末端关节以 x_0 轴为中心旋转^[11-12]。

取任意基点坐标，使关节处于零位状态，基本偏移量BASE-OFFSET为定值，空间坐标关系如下：

$$\begin{cases} U_{x_0} = JOINT[0] \\ U_{y_0} = JOINT[1] \\ U_{z_0} = JOINT[2] \end{cases} \quad (8)$$

式中：JOINT[1]为第一组关节的关节值。按照运动学理论对其进行正解和逆解，如下^[13]：

$$TRAGET[x_0, y_0, z_0] \quad (9)$$

$$= [U_{x_0}, U_{y_0}, U_{z_0}] + BASE-OFFSET[x_0, y_0, z_0]$$

$$JOINT[0, 1, 2]$$

$$= TRAGET[x_0, y_0, z_0] - BASE-OFFSET[x_0, y_0, z_0] \quad (10)$$

将构建好的数字孪生模型，与运动学机器人的正解脚本进行对比，以此获取输变电线路的运行数据。至此，完成基于数字孪生的三维数字化系统设计。

3 实验测试与分析

以数字孪生技术为基础，对输变电线路进行三维数字化仿真系统初步实现，并采用对比测试论证系统的有效性。

3.1 实验环境

本文系统具体测试环境如下表所示。

表1 系统测试环境

类型	配置参数
操作系统	Window 10
CPU	Inter(R)Core(TM)i7-8050H CPU @2.20 GHz
内存	16 GB
显卡	NVIDIA GeForce GTX 1050 Ti
服务器	Tomcat 7.0
数据库	MySQL 5.5

基于上述测试环境，采用C语言完成软件开发工作，由此建立输变电线路的三维仿真模型如图5所示。



图5 输变电线路三维可视化模型

3.2 系统功能测试

一般该类系统主要具有三维可视化和三维分析等功能。

表2 三维可视化功能测试结果

功能	测试实例	前置条件	操作	预期结果	测试结果
地图显示	在1:10万、1:5万的比例切换	登录系统	-	在任意比例尺下均可正常显示	同预测结果一致
放大或缩小	局部放大或缩小	登录系统	鼠标圈定范围	鼠标圈选范围以红色边框显示,并自动放大、缩小	同预测结果一致
	全部方法或缩小	登录系统	鼠标双击、滑轮滚动	鼠标双击后整体放大,鼠标滑轮上划整体方法,鼠标下划整体缩小	同预测结果一致
属性查询	-	登录系统	鼠标点击图层任意板块	鼠标单击后弹出属性框,并显示地理空间属性	同预测结果一致

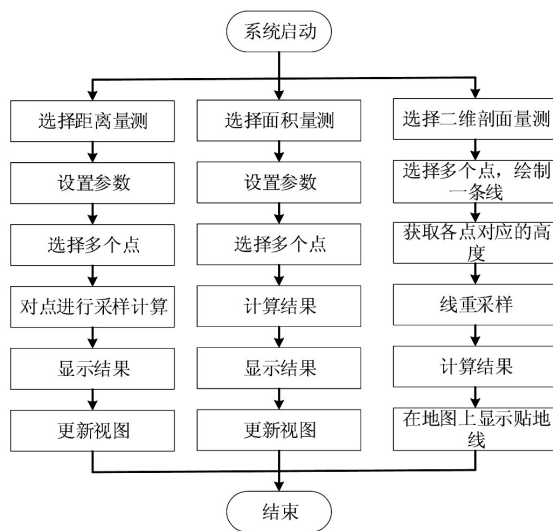


图6 三维分析流程图

依据上述步骤进行测试,获得的测试结果如表3所示。

表3 系统三维分析功能测试结果

功能	简要说明	预测结果	测试结果
距离量测	鼠标连续点击场景中的多个位置,测量出多点联接所成线段的直线距离、贴地距离	显示正确长度数据值	同预测结果一致
面积量测	测量出多点联接所成面的面积	显示正确面积数据值	同预测结果一致
二维剖面	可截取某段的DEM地形的起伏,生成相关图像	可合理生成塔基处的二维剖面图	同预测结果一致

由此,可证明本文具有一定实用性,具有三维可视化和三维分析的能力。

3.3 系统对比测试

能。本文先对其三维可视化功能进行验证基于图5可了解其已经实现三维可视化功能,故本文在进行系统功能测试过程中主要对其进行三维分析的功能测试。先登录系统中,针对系统进行地图基础功能测试和主要空间分析模块测试,即主要对其地图显示、缩放、属性查询等基础功能进行测试,其结果如表2所示。

接下来,对系统进行三维分析性能测试,所谓三维分析就是系统需向用户提供距离量测、面积量测、三维剖面等功能,其测试步骤分别如图6所示。

为进一步验证本文系统性能,选取GIS系统、全景系统作为对比系统,选取距离量测、面积量测及二维剖面为性能指标,开展性能对比测试。

(1) 线路距离量测

以N346和N347两组输电线路为测试对象,在其两侧分别布置多个数据点,使其与输电线的实际距离各不相同,具体如下表4所示。

表4 测量点距离数据/m

点位	N346	N347
A1	-	198.23
A2	152.23	-
A3	-	204.27
A4	124.45	-
A5	-	245.32
A6	-	256.12
A7	146.77	-
A8	-	274.21

根据表4内容所示,在选择的两组输电线路中,两侧的观测点距离存在差异,能够看出多数点处于N347线路侧方,少数点位于N346侧方。通过三组系统进行模拟,对测试点直线距离和折线距离进行计算,结果如图7所示。

根据图7内容所示,本文系统不仅可对两侧点距离进行布控,还可利用折线方式,对线路两侧的点位进行计算,而传统系统仅完成了单一方向的点位距离测量,和两点之间距离的测量,由此可证明本文系统具有更优的距离量测性能。

(2) 线路占用面积量测

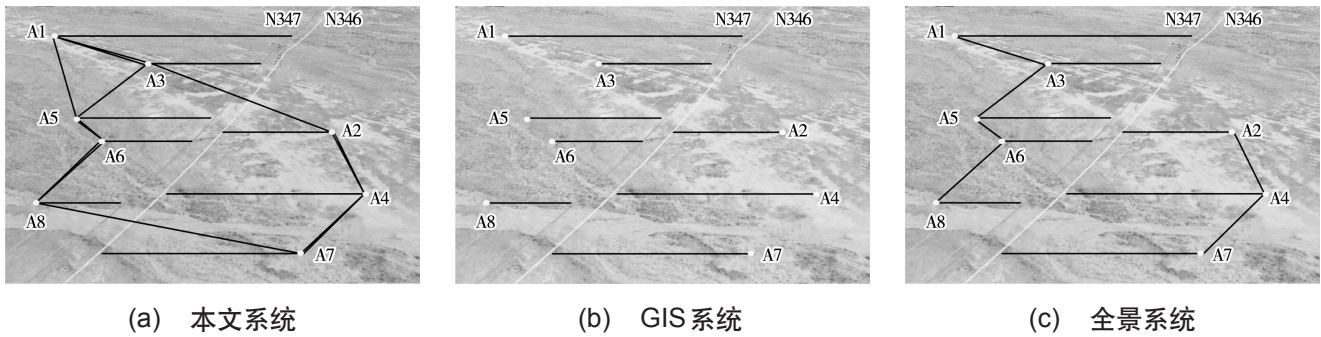


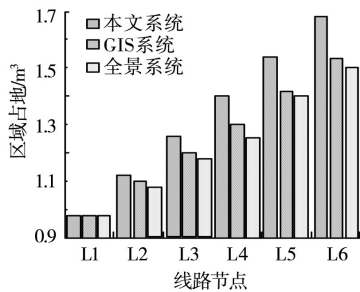
图7 量算距离结果对比

在两组输电线路中,同时布置6组节点,以不同节点为中心,划定占用空间,每组节点相隔距离依次增加50 m。N346初始节点在线路布局350 m处,占用区域为0.98 m³,N347初始节点在线路布局750 m处,占用区域为2.10 m³。对不同节点进行统计,如表5所示。

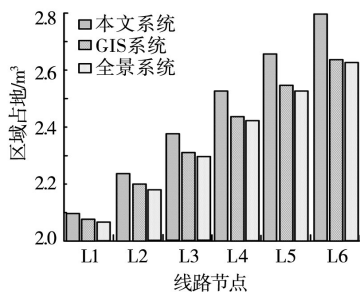
表5 输电线测量节点区域/m³

节点	L1	L2	L3	L4	L5	L6
N346	0.98	1.12	1.26	1.40	1.54	1.68
N347	2.10	2.24	2.38	2.52	2.66	2.80

根据表5中内容所示,不同节点划分后,其占有区域同比例增长占用0.14 m³,分别连接三组系统,统计节点面积,具体如图8所示。



(a) N346 线路节点



(b) N347 线路节点

图8 占有区域对比

根据图8所示,应用本文系统测量与实际占有面积数据完全一致,而两组传统系统均存在误差,且在较远节点距离中,产生的误差更大,由此可证明本文系统具有更优的面积量测性能。

(3) 剖面图

节点距离会影响高程计算结果,最终导致地形截面图绘制出现形变,通过上述6组节点选择设计高程,对路径起伏情况进行模拟,具体情况如图9所示。

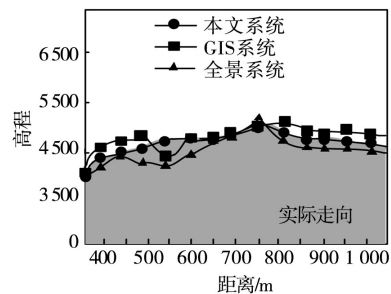


图9 高程变化剖面图走向对比

根据图9中内容所示,由于传统系统对节点数据还原存在误差,导致截面图绘制出现变形,绘制图形没有按照原有截面图走向变化。而本文系统可将每组节点进行连接,完整还原地形起伏状态,由此可证明本文生成的剖面图更真实,更具有应用价值。

4 结束语

输变电工程进入跨越式发展,新建输变电线路大多数要穿越复杂环境,需要对其进行精细化管理。此次以数字孪生为设计依据,对输变电线路进行三维数字化系统仿真构建,并获取一定效果。通过测试表明,本文系统能够通过对数据的真实还原,等比例复制地形线路条件,可为线路建设提供依据。但由于时间限制,设计环节硬件过少,存在一定不足,后续研究中会针对三维画面进一步加强设计,保证数字化系统的应用效果。

参考文献:

[1] 刘云鹏,刘一瑾,律方成,等.数字孪生技术在输变电设备中的应用前景与关键技术[J].高电压技术,2022,48(5):1621-1633.
 [2] 陈思远,张弛,吴晓光,等.基于数字孪生的MPS智能控制系统设计与应用[J].组合机床与自动化加工技术,2022(5):67-70.
 [3] 杨帆,朱力,刁冠勋,等.面向电力设备数字孪生的RFID传感器与数据传输协议设计[J].高电压技术,2022,48(5):1634-1643.
 [4] 沈沉,陈颖,黄少伟,等.新型电力系统仿真应用软件设计理念与发展路径[J].电力系统自动化,2022,46(10):75-86.

- [5] 陈卫营,薛国强,宋婉婷,等.交流高压输电线工频电磁场精确计算与特性分析[J].地球物理学报,2022,65(5):1813-1821.
- [6] 徐梁,卜京.基于无人机低空遥感的输变电路定时巡检系统[J].电子设计工程,2022,30(5):90-94.
- [7] 杨文英,高静.智能一体化生产控制平台在火电厂斗轮机无人作业系统中的应用[J].中国设备工程,2021(17):32-34.
- [8] 谭兴华,陈瑞斌,杨东,等.基于光谱分析法的输变电路铁塔金属缺陷检测研究[J].电子设计工程,2021,29(23):98-102.
- [9] 李志强,金国胜,杜王特.基于数字孪生技术的变电站机电设备状态检测系统[J].自动化技术与应用,2024,43(11):43-47.
- [10] 王峻峰,张玉帆,邵瑶琪,等.面向生产性能数字孪生的仿真数据映射研究[J].系统仿真学报,2021,33(10):2470-2477.
- [11] 吴珊丹,杨珍,辛春花.新型插秧机的三维虚拟仿真设计

- [J].农机化研究,2025,47(5):186-190.
- [12] 刘继男,孙艳鹤,方媛,等.大型输电线路的智能三维调度仿真分析[J].现代电子技术,2020,43(13):163-166.
- [13] 郑伟皓,周星宇,吴虹坪,等.基于三维GIS技术的公路交通数字孪生系统[J].计算机集成制造系统,2020,26(1):28-39.

作者简介:张星炜(1983-),男,硕士,工程师,研究方向:地理信息技术、三维应用、无人机巡检。

(上接第8页)

安时积分法、开路电压法以及两者合并的算法如图9所示。

将三种算法进行了对比,如图9可知两者合并对于锂电池组的SOC估算是有效的,并且估算的误差相较于其他两种可以达到最小,实现了最优化估计,且该方法具有很好的适应性和实用性。

4.4 均衡过程与分析

在均衡实验中,实验共持续5 h,均衡之前单体最大电压3.365 V,最小3.314 V,均衡之前最低单体电压差为51 mV。均衡之后最高单体电压3.376 V,最低3.374 V,压差为2 mV,可见均衡效果明显,在一定程度上提高了锂电池组的使用寿命。如图10所示为均衡结束时液晶显示。

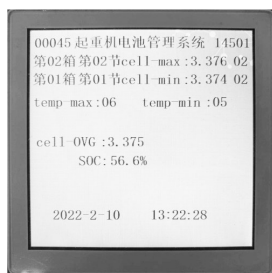


图10 均衡结束后的液晶显示

5 结束语

以港口起重机大功率锂电池组为研究对象,设计锂电池组管理系统BMS。软硬件结合实现了锂电池组的电压和电流以及单体电压和温度的实时监测,BMS的精度在静态时电压最大误差只有0.21%,符合精度标准,对锂电池组的SOC进行估算,并将数据通过以太网模块与上位机进行通信,通过CAN总线将数据信息发送到可编程控制器PLC中,实现停机保护,验证了BMS的可靠性;进行了均衡实验,180节电池最高电压与最低电压之间的压差从51 mV降到2 mV,验证了均衡的有效性。通过多次反复充放电试验验证了BMS有效地减缓了锂电池组

的衰老,延长了整体寿命。

参考文献:

- [1] 阮超鹏,敖银辉.电动汽车电池管理系统研究现状与分析[J].汽车文摘,2021(6):24-34.
- [2] 李志强,金国胜,杜王特.基于数字孪生技术的变电站机电设备状态检测系统[J].自动化技术与应用,2024,43(11):43-47.
- [3] Wang P,Zhu C. Summary of lead-acid battery management system[C]//IOP Conference Series:Earth and Environmental Science.IOP Publishing,2020,440(2):022014.
- [4] Zhang A,Song S,Wang C,et al. Research of battery management system for integrated power supply[C]//2017 Chinese Automation Congress(CAC).IEEE, Jinan, China; Chinese Society of Automation Jinan Municipal People's Government,2017:3178-3181.
- [5] Chen H C,Li S S,Wu S L,et al. Design of a Modular Battery Management System for Electric Motorcycle[J]. Energies,2021,14(12):3532.
- [6] 马宗正,王璞,孙志强.基于单片机控制的电池管理系统[J].河南工程学院学报(自然科学版),2022,34(1):45-48,54.
- [7] 陈琦龙,孙建国,陈凯,穆帅.纯电动汽车电池管理系统国内外研究现状和发展趋势[J].现代车用动力,2022(1):1-6,35.
- [8] 汪伟,黄河,龙宇舟,王全,崔兆蕾,张天.基于改进安时积分法的动力电池SOC估算[J].客车技术与研究,2021,43(3):12-14.
- [9] 杨依楠,高力,宋晋.电动汽车动力电池均衡控制研究[J].汽车实用技术,2021,46(13):4-6.
- [10] 徐顺刚,王金平,许建平.一种延长电动汽车蓄电池寿命的均衡充电控制策略[J].中国电机工程学报,2012,32(3):43-48,17.
- [11] 朱晓荣,韩啸.储能电池与常规机组配合参与一次调频的自适应控制策略[J].电测与仪表,2023,60(9):34-42.
- [12] 易鸿.一种基于SOC的主动均衡电池管理系统设计[J].电子设计工程,2019,27(6):100-103.

作者简介:黄青青(1997-),女,硕士研究生,研究方向:通信与信息系统。