DOI:10.20033/j.1003-7241.(2025)06-0126-06

面向新能源场站的移动运维检修系统设计

王 婧[1]，李 旭[1]，曹俊磊[1]，王 斌[1]，胡晓虎[1]，刘洪顺[2]

（1.国网冀北张家口风光储输新能源有限公司，河北 张家口 075000；
2.山东信诚同舟电力科技有限公司，山东 济南 250101）

摘 要：为了保证设备正常运转，电力系统稳定供电工作，提出一种面向新能源场站的移动运维检修系统设计方案。构建虚拟专用网络，智能推送缺陷记录文档，方便运维人员对数据采集和检验的数据实时维护，利用数据层、服务层、逻辑层和展示层实现新能源场站的虚拟专网数据交换，传递运维检修业务数据，缓解服务端和用户端的工作压力。按照检修程度分类，计算计划检修设备的有效工龄，根据其历史数据调整设备参数，完成场站运维检修工作。通过实验证明所设计系统检测准确度高、误差小，能及时修复设备问题，可确保电力安全运行。

关键词：新能源场站；移动运维检修；主站端系统；数据交换

中图分类号：TP277 文献标识码：A 文章编号：1003-7241(2025)06-0126-06

Design of Mobile Operation and Maintenance System for New Energy Stations

WANG Jing[1], LI Xu[1], CAO Jun-lei[1], WANG Bin[1], HU Xiao-hu[1], LIU Hong-shun[2]

(1. State Grid Jibei Zhangjiakou Wind and Solar Energy Storage and Transportation New Energy Co., Ltd., Zhangjiakou 075000, China;
2. Shandong Xincheng Tongzhou Electric Power Technology Co., Ltd., Jinan 250101, China)

Abstract: In order to ensure the normal operation of the equipment and the stable power supply of the power system, a design scheme of mobile operation and maintenance maintenance system for new energy stations is proposed. It builds a virtual private network, intelligently pushes the defect record file, facilitates the real-time maintenance of data collection and inspection by the operation and maintenance personnel, uses the data layer, service layer, logic layer and display layer to realize the virtual private network data exchange of the new energy station, transfers the operation and maintenance service data, and relieves the working pressure of the service end and the user end. According to the classification of maintenance degree, calculates the effective service life of the planned maintenance equipment, adjusts the equipment parameters according to its historical data, and completes the station operation and maintenance work. The experiment proves that the designed system has high detection accuracy and small error, and can repair equipment problems in time to ensure the safe operation of power.

Keywords: new energy station; mobile operation and maintenance; main station end system; data exchange

0 引言

随着基于新能源的电网技术被大规模推广，其智能化水平也有了很大的提高。新能源场站具有点多、面广、线长、变化大等特性[1]，许多电力终端都位于极端恶劣的自然环境中，需要对这些地区进行大规模的资金投入和运维保护。因此，在新能源研究领域，如何对这些地区的新能源设备进行高效检测与维修，成为新能源电力行业的一项重要工作。在我国电网发展过程中，人们把重点放在发电环节，而在用电环节上投资较少。随着人民生活水平的提高，电力产品的品质要求也日益提高。由于受各种实际不利因素的限制，在自然条件较差的地方，新能源场站的自动化建设相对落后[2]。由于电力供应不足，对区域的经济发展、人民生活水平、社会发展产生了很大的影响。为保证电力系统的正常运转，必须对新能源场站设备和线路进行定期的维修保养。目前，主要是人工进行周期性的巡视，要求有专门的维修人员、维修工具、配件；常规的巡线巡视，不仅耗费人力物力，而且难以达到预期的效果[3]。所以，仅靠人工难以对配电网络进行全面的管理，开发新能源场站移动运维检修系统是十分必要的。

国外研究学者尝试将移动终端与手机应用程序服务器相连接的，通过信号放大运算电路来完成传感器与集中托管式数据应用中心之间的信号传送，保证工作人员接收到场内设备信息，从而实现电网检修。张春晓[4]等研制了一套以人工智能分析技术为基础的联合巡检系统，

*基金项目：山东省自然科学基金面上项目（ZR2020ME196）

收稿日期：2024-03-04

该系统集成了整个站点的多源资料，采用传感器、采集装置，对设备全方位地监测，并以激光导引车、轨道机器人、固定点摄像机等为核心，建立全站的监控体系，完成检查工作。尹子会等[5]提出一种基于快速区域卷积神经网络(faster-region based convolutional neural network，FasteR-RCNN)变电所的典型视觉缺陷检测系统，将其与边缘运算相结合，利用FasterR-CNN模型中的非极大值抑制(non-maximum suppression，NMS)和锚点框产生机制，将其存入边缘设备，由边缘装置对所获取的视频图像检测，将其检测到的故障信息传送到云端服务器，完成检修工作。

但上述文献存在检修时间长，故障定位不精准，为此，提出了一种面向新能源场站的移动运维检修系统设计方案。构建电力虚拟专用网络，保证模块之间的信息交流通畅，利用主站端系统技术满足移动终端业务需求，通过威布尔模型提高系统检修可靠性，准确反映设备问题。

1 面向新能源场站的移动运维检修系统总体架构

新能源运维检修的移动管理系统集成了3大关键组件：主控管理中心[6]、智能移动终端设备以及电力专用的无线虚拟网络架构。主控管理中心模块利用先进的Web服务技术来管理和处理各类服务数据；而数据交互接口模块，则灵活运用SFTP协议及多种网络服务手段，确保数据的顺畅共享与高效传输。智能移动终端作为系统的前端，能够智能化地捕获并处理现场的业务信息，随后通过电力专用的无线虚拟网络，实现这些关键数据的即时传输。整个系统的结构化布局见图1。



图1 系统整体结构图

在国家电网SG-UAP核心平台内，采纳了浏览器-服务器(browser/server，B/S)架构来构建Cim3.0这一共享数据模型框架，该框架核心由两大组件构成：主控管理模块与业务交互界面。主控管理模块集数据智能抓取、存储、深度分析、用户权限检索、设备档案管理、专业巡检流程以及校验作业于一体；而业务交互界面则专注于统计分析、运营调控、状态维护策略制定、辅助设备远程监控与解析、系统配置描述(substation configuration description，SCD)动态管理[7]等功能，这些功能间实现了数据的无缝流通，不仅支持运维数据的即时采集，还能智能推送缺陷报告文档，便于即时查阅。此外，SCD的即时视图与可视化特性，极大地促进了新能源站点在定值智能核查方面的能力。

在移动运维场景中，智能终端扮演着至关重要的角色，它负责新能源站点保护设备记录的维护、智能化监测数据的集成、校验流程的自动化控制、故障波形的深度剖析、SCD的可视化展示以及故障信息的快速检索等多维度维护信息的查询。为此，智能终端装备了专为运维设计的应用程序，其用户界面设计遵循人性化原则，力求界面直观、操作简便。

新能源站点依托电力无线虚拟专网，构建了一条高效的数据传输高速公路，为二次运维团队提供了实时数据访问与维护的便捷途径，显著增强了新能源场站在移动运维与检修作业上的效率与能力。

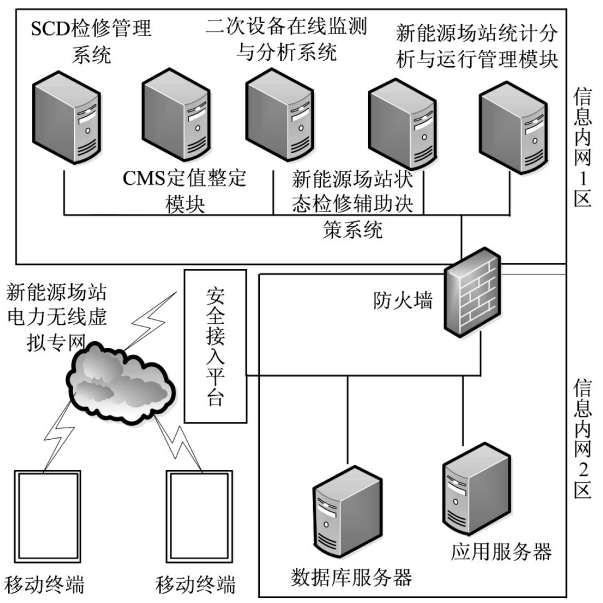


图2 系统物理部署方案

聚焦于多维业务数据的深度整合，着重探索了新能源电力无线虚拟专网与安全访问控制两大领域，并据此提出了详尽的部署蓝图，如图2所示。实施策略围绕对现有业务系统的革新展开，旨在促进它们与统计分析、运营管理等其他关键业务系统的数据交互，从而确保新能源站点移

动运维检修系统能够在物理层面实现高效部署与集成。

2 移动运维检修系统主站端技术体系

新能源场站运维移动系统的核心架构，由多层技术体系构成，具体如图3所示。

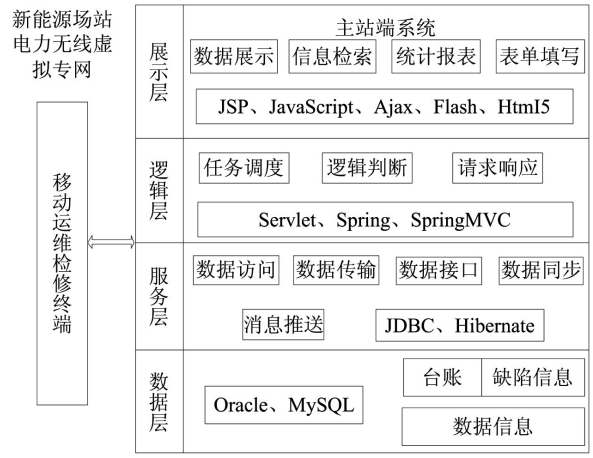


图3 主站端系统技术体系结构图

(1) 在数据层，采用了关系型数据库来安全地存储各类设备记录与商业缺陷数据。同时，为了高效地管理文件信息，引入了文件数据库。这一层的关键技术包括数据库管理工具和档案信息管理平台。

(2) 服务层主要负责系统间的数据流通以及与外部系统的数据对接，同时提供地理信息相关服务。其核心的技术支撑包括ApacheCamel用于数据路由与集成、ActiveMQ作为消息中间件、Java数据库连接(java database connectivity，JDBC)与Ibatis用于数据库访问、以及GIS技术用于地理信息展示。

(3) 逻辑层的主要任务是为展示层提供所需的数据，并确保满足其所有业务要求。为实现这一目标，采用了Servlet和Spring等先进技术。

(4) 展示层则要求具备出色的页面设计和图表呈现能力，以确保人机交互接口的流畅与高效。在这一层，采用了JSP、Ajax、Flash、Html5以及DWZ等前沿技术。

此外，图4展示了新能源场站移动检修系统中智能终端的技术架构。该终端以安卓平台为基础，深度整合了新能源场站的虚拟网络资源、存储设备、摄像机以及蓝牙等硬件资源，并通过与新能源场站的虚拟专网进行数据交换，从而充分满足移动终端的业务需求和技术标准。

智能移动APP和主站端系统的业务端之间信息交流主要是由两种途径进行的。

途径1：APP在没有建立长连接的情况下，采用向服务器发送HTTP请求信息的方法来完成与服务器的通讯，例如：用户登陆、日志查询等。采用不设长连接通信的方法，完成新能源场站移动运维检修业务数据的传递。

途径2：建立一个长的连接，APP可以通过网络套件和服务器进行通信。该方法被应用于服务器向应用程序中的消息，例如新的任务信息等。该系统采用了基于Web Socket的长连接技术，克服超文本传输协议(hypertext transfer protocol，HTTP)轮询模式的缺点，并在一定程度上缓解服务端和用户端的工作压力。

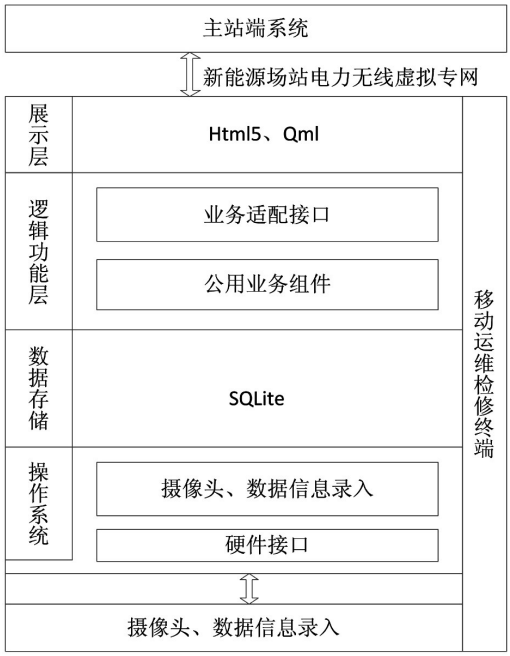


图4 移动运维检修终端技术架构图

3 移动运维检修算法设计

新能源场站保护系统使用了保护设备、合并单元、智能终端、交换机等电子设备，由于大气的对流和静电的影响，容易使电子设备的中央处理器(central processing unit，CPU)、存储器等积尘，从而使设备的散热不均匀；粉尘容易使电路板上的离子被污染[8]。随着使用年限的延长，积尘与空气中的湿气混合在一起，会使电路板的绝缘特性发生变化，从而造成电流消失、断路、漏电等问题，加快设备的老化。因此，每一种防护装置的失效率均表现为浴盆特性曲线[9]。

利用威布尔模型描述不包括计划维修设备的失效率，表达式为：

$$\lambda(t)=\frac{f(t)}{1-F(t)}=\frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} \tag{1}$$

式中，α和β分别描述的是威布尔分布标度和形状参数，在$\beta>1$时，表示失效率随时间增加程度，可以反映出各部件的老化状况；t描述的是真实使用年限；$f(t)$描述的是一项设备的寿命密度；$F(t)$描述的是整体设备的寿命密度。

为确保新能源场站能够安全且稳定地运行，定期的维护工作不可或缺，这些维护工作依据其深度被细致划分为A、B、C、D四个等级。A级维护，也被视作全面大

修，涵盖了所有设备的深入检查与全面修复；B级维护则聚焦于设备故障的针对性修复，并依据故障情况对相应部件进行拆装与修理；C级维护遵循设备老化规律，实施必要的维护措施[10]；而D级维护，作为日常保养的一部分，在设备整体运行状况良好的情况下进行，旨在通过常规排查来预防潜在问题。

值得注意的是，基于不完全维修的原则，设备在经历维护后往往难以恢复至其原始状态。这一现象可归因于恢复程度有限以及有效使用寿命的缩减，且随着维护次数的累积，维护效率亦呈现递减趋势[11]。为了量化不完全维修对设备性能提升的影响，引入了有效使用寿命与改善因子这两个概念。

在制定维护计划时，将设备经历维护后的有效使用寿命τ纳入考量范围，以便更精准地评估维护策略的长期效益，计算公式如下：

$$\begin{cases}\tau_0 = t, \quad 0<T \\ \tau_1 = t - q_i T, \quad T \le t < 2T \\ \tau_k = t - \sum_{i=1}^{k} q_i T, \quad kT \le t < (k+1)T\end{cases} \tag{2}$$

式中，k描述的是计划检修的数量，T描述的是计划检修的时间，q_i描述的是改善因子。

$$q_k = q_i \frac{l_1 k + l_2}{l_3 k + l_4}, 0 < q_k < 1 \tag{3}$$

式中，l_1、l_2、l_3、l_4描述的是有关设备的参数，专家依据设备的特点和历史统计来调整其参数[12−13]；检修后的设备改善因子q_k会随着计划检修的数量k增大而减小。

大修期间的维护费用投入高，其改善因子大于常规检修，则增加系数Δq为

$$\Delta q \le 1 - q_i \tag{4}$$

大修时的改善因子q_k：

$$q_k = q_i \frac{l_1 k + l_2}{l_3 k + l_4} + \Delta q \tag{5}$$

B级故障检修是使设备由失效到正常工作，不会对设备的改进效果进行评估。也就是说：

$$q_k = \begin{cases} q_i \dfrac{l_1 k + l_2}{l_3 k + l_4}, \text{C,D类} \\ q_i \dfrac{l_1 k + l_2}{l_3 k + l_4} + \Delta q, \text{A类} \end{cases} \tag{6}$$

将式(2)、(6)代入式(1)，能够得到计划检修的设备故障率$\lambda(t)$。

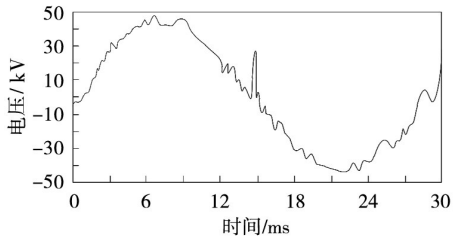
$$\lambda(t) = \begin{cases} \dfrac{\beta}{\alpha^\beta} t^{\beta-1}, \ t < T \\ \dfrac{\beta}{\alpha^\beta}\left(t - \sum_{i=1}^{k}(q_i T)\right)^{\beta-1}, kT \le t < (k+1)T, k \ge 1 \end{cases} \tag{7}$$

根据装置可靠操作概率$P(t)$和故障率$\lambda(t)$的数学关系，可以得出该装置的可靠操作概率$P(t)$：

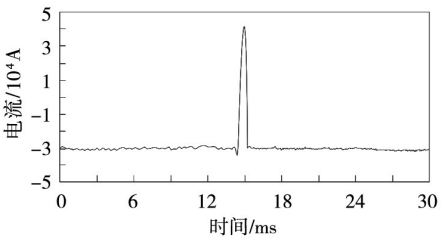
$$P(t) = \begin{cases} \exp\left[\dfrac{-t^\beta}{\alpha^\beta}\right], t < T \\ \exp\left[-\sum_{i=1}^{k} \dfrac{\left(kT - \sum_{i=1}^{k-1}(q_i T)\right)^\beta}{\alpha^\beta}\right], \\ kT \le t < (k+1)T, k \ge 1 \end{cases} \tag{8}$$

4 面向新能源场站移动运维检修实验

为了验证所设计系统的有效性，进行实验。利用MATLAB软件模拟孤岛效应(表示一段时间内没有电流出现)验证设计的移动运维检修系统，其中，风机容量2 MW，电阻−电感−电容(resistor−inductor−capacitor，RLC)负载能力2 MW，系统侧供电是理想的电压源，传输线电压等级110 kV，配电网电压等级30 kV，系统侧变压器50 MVA，风机变压器2.5 MVA。



(a) 采集PCC处电压



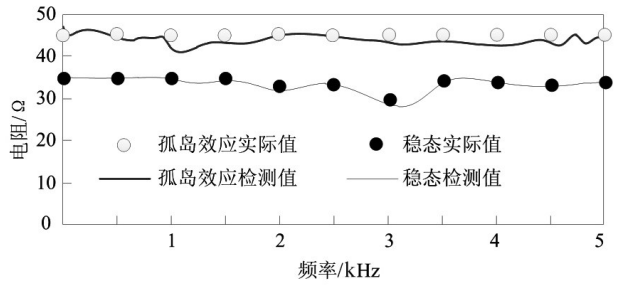
(b) 采集注入电流

图5 注入电流与对应的PCC处电压

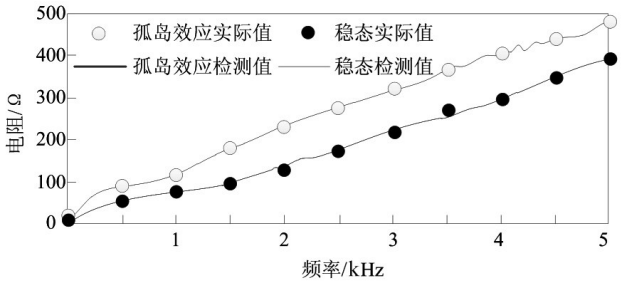
图5表示为使用间断过零点短时间注入PCC的电压及注入电流波形。通过运检系统能够看出：输入电流峰值为22.5 A，比实际工作时的输入电流要小得多，存在短时干扰，证明系统能够检测出异常。

采用滤波、稳态波形消除等方法，滤去电压中原有的分量，得到频率域抗阻的计算结果如图6所示。分析虚实部分电阻和高频电阻，能够观察到系统测量结果与实测数据误差很小，高频电阻相对虚实部分电阻测量结果更加准确，能够证明所设计的系统对高频部分的噪声去除效果更好，抗干扰能力强。

通过图6中孤岛效应引起的频域检测阻抗可以看出，即使在孤岛作用发生后，基本频率和电气产生动态变化，所设计系统仍然具有较高的检测精确性。



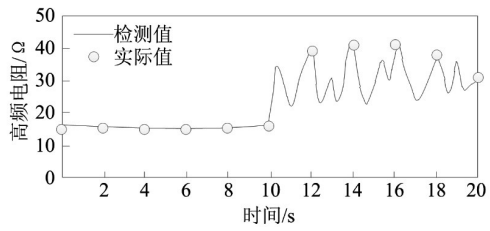
(a) 虚实部分电阻



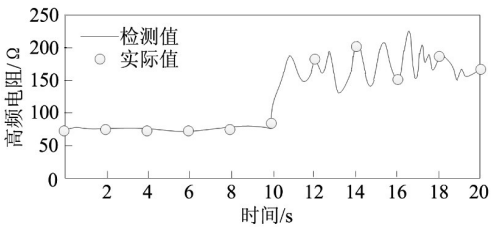
(b) 高频电阻

图6 稳态和孤岛效应下频域测量阻抗结果

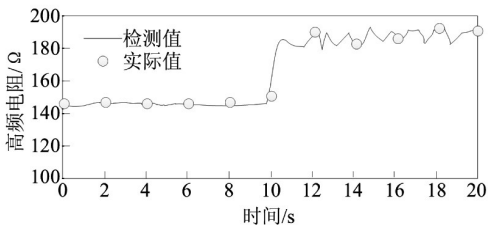
在此基础上,选取了更高波段的检测阻抗,并对比形成孤岛效应前后,时域检测阻抗特性曲线,如图7所示。



(a) 线性阻抗检测模式



(b) 固定时间注入模式

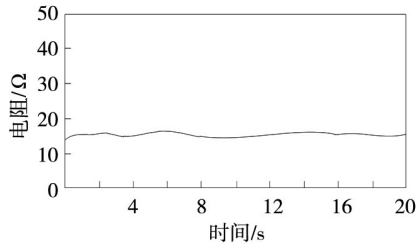


(c) 间断过零注入模式

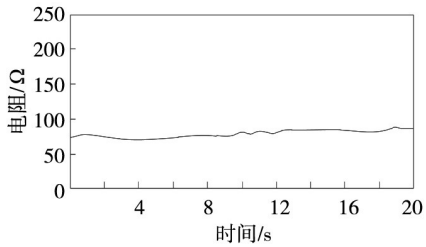
图7 时域在线检测阻抗特征曲线

通过图7能够观察到,在10 s时间内出现孤岛效应,图7(a)是通过线性阻抗检测得到的电阻特性曲线,图7(b)是利用固定时间注入模式下的高频电阻特性曲线,图7(c)是利用间断过零注入模式的高频电阻特性曲线。从图7可以看出系统检测值无论哪一种情况下都与实际值基本一致,能够反映出所设计系统检测存在精度高,误差小的特征。

经过检修后,面向新能源场站的电网虚实部分电阻和高频电阻如图8所示。



(a) 虚实部分电阻



(b) 高频电阻

图8 修复后时域在线检测特征曲线

通过图8能够看出,经过修复后电网孤岛效应消失,不论是二者电阻逐渐呈现浮动稳定状态,可以保证新能源场站的供电安全及工作效率。

综上所述,所设计系统在新能源场站的移动运维检修中具有较高的准确性,从而能够确保新能源场站的电力系统安全稳定运行,满足区域用户需要。

5 结束语

随着新能源场站的不断进步与扩展,为了显著增强电网的运行效能及稳定性,开发并实施了一套创新的运维与检修体系。实验数据验证,本设计方案的检测精确度卓越,误差范围极小;且在预设的时间框架内,成功将高频电阻及复阻抗的实部与虚部维持在10~20 Ω之间。通过清晰界定各功能模块间的信息传递路径,主站系统技术已进化至能够无缝对接移动通信需求,并融合威布尔模型实现场内故障的精确定位,从而大幅提高了维修作业的信赖度。

参考文献:

[1] 曲凯,李湃,黄越辉,等.面向新能源消纳能力评估的年负荷序列建模及场景生成方法[J].电力系统自动化,2021,45(1):123-131.

[2] 刘杉,李修一.面向高比例新能源外送的送端混合级联型特高压直流输电方案[J].中国电机工程学报,2021,41(增刊1):108-120.

[3] 盛戈皞,钱勇,罗林根,等.面向新型电力系统的电力设备运行维护关键技术及其应用展望[J].高电压技术,2021,47(9):3072-3084.

[4] 张春晓,陆志浩,刘相财.智慧变电站联合巡检技术及其应用[J].电力系统保护与控制,2021,49(9):158-164.

[5] 尹子会,孟荣,范晓丹,等.融合边缘计算和改进Faster R-CNN的变电站设备典型视觉缺陷检测系统[J].中国科技论文,2021,16(3):343-348.

[6] 张伟,王宇强,武文丽,等.含新能源接入的多应急电源组网系统功率自适应控制策略[J].电力系统及其自动化学报,2021,33(5):121-127.

[7] 熊一,詹智红,柯方超,等.基于改进BP神经网络的变电站检修运维成本预测[J].电力科学与技术学报,2021,36(4):44-52.

[8] 郇政林,刘杰,徐沈智,等.面向高比例新能源接入的源-荷-储灵活性资源协调规划[J].电网与清洁能源,2022,38(7):107-117.

[9] 王振乾,朱珠,任江华.基于泛在电力物联网的电力运维平台设计与实现[J].自动化技术与应用,2022,41(8):76-79,139.

[10] 官国飞,宋庆武,刘恢,等.基于边缘计算的配网管理和运维体系研究[J].电网与清洁能源,2020,36(10):90-96.

[11] 许尧,马欢,许昆鹏,等.智能变电站继电保护智能运维系统自动配置技术研究[J].电力系统保护与控制,2022,50(11):160-168.

[12] 单杰.基于人工智能的继电保护系统故障追踪[J].自动化技术与应用,2023,42(3):15-19.

[13] 叶远波,刘宏君,黄太贵等.变电站继电保护设备状态检修可靠性分析方法研究[J].电力系统保护与控制,2021,49(10):170-177.

作者简介:王婧(1989—),女,本科,工程师,研究方向:电气工程及自动化。

通信作者:刘洪顺(1981-),男,博士,副教授,研究方向:电气工程。

(上接第17页)

控标准型方法设计的控制器矩阵应该是相同的,下面的例子证明了这一点。

3 例子

考虑如下三阶系统:

$$\dot{x}=\begin{pmatrix}0&1&0\\0&0&1\\-6&-11&-6\end{pmatrix}x+\begin{pmatrix}0\\0\\1\end{pmatrix}u \tag{16}$$

设计状态反馈控制器矩阵使得闭环系统的极点为$-10,-1\pm j$。

解:根据系统(21),可以得到系统的特征值为$\lambda_1=-1$,$\lambda_2=-2$,$\lambda_3=-3$。则相应的变换矩阵如下:

$$\begin{gathered}P=\begin{pmatrix}1&1&1\\-1&-2&-3\\1&4&9\end{pmatrix},\\ P^{-1}=\frac{1}{2}\begin{pmatrix}6&5&1\\-6&-8&-2\\2&3&1\end{pmatrix},P^{-1}b=\frac{1}{2}\begin{pmatrix}1\\-2\\1\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}\tilde{b}_1\\\tilde{b}_2\\\tilde{b}_3\end{pmatrix}\end{gathered} \tag{17}$$

期望的极点为$-10,-1\pm j$,也就是期望的特征值多项式和特征多项式系数分别为

$$\begin{gathered}(\lambda+10)(\lambda+1-j)(\lambda+1+j)=\\ \lambda^3+12\lambda^2+22\lambda+20\end{gathered} \tag{18}$$

$$\alpha_2^*=12,\alpha_1^*=22,\alpha_0^*=20 \tag{19}$$

按照现有的能观标准型方法设计的控制器为

$$\begin{gathered}k=\begin{pmatrix}6-20&11-22&6-12\end{pmatrix}=\\ \begin{pmatrix}-14&-11&-6\end{pmatrix}\end{gathered} \tag{20}$$

按照本文中约当标准型方法(20)设计的控制器为

$$k=\begin{pmatrix}k_1&k_2&k_3\end{pmatrix}P^{-1}=\begin{pmatrix}-14&-11&-6\end{pmatrix} \tag{21}$$

明显地,两种方法设计的控制器矩阵是相同的。

4 结束语

本文讨论《现代控制理论》这门课程中的极点配置问题。和已有的采用能控标准型方法研究状态反馈极点配置不同,本文着重考虑约当标准型在极点配置中的应用,利用统一的框架证明极点配置定理并给出新的控制器矩阵设计方法。利用本文中的方法可以将讨论的极点配置问题详细化,在教学过程中可以使学生更深入地理解和掌握极点配置的概念、思路、原理和方法。本文中新的极点配置问题分析方法在一定程度上拓宽了学生们知识面,提高了学生多角度分析和解决问题的能力,获得学生学习中较好的教学反馈。

参考文献:

[1] 刘豹,唐万生.现代控制理论[M].3版.北京:机械工业出版社,2006.

[2] 赵明旺,王杰,江卫华.现代控制理论[M].武汉:华中科技大学出版社,2020.

[3] 闫茂德,高昂,胡延苏.现代控制理论[M].北京:机械工业出版社,2016.

[4] 王孝武.现代控制理论基础[M].3版.北京:机械工业出版社,2013.

[5] 张嗣瀛,高立群.现代控制理论[M].北京:清华大学出版社,2006.

[6] 谢克明,李国勇.现代控制理论[M].北京:清华大学出版社,2007.

[7] 郑大钟.线性系统理论[M].2版.北京:清华大学出版社,2002.

[8] 姜志侠,孟品超,李延忠.矩阵分析[M].北京:清华大学出版社,2015.

作者简介:常晓恒(1977-),男,博士,教授,从事控制科学与工程专业的教学与科研工作。