

大规模电能计量器具智能检定的优化调度策略探讨

苏慧玲^{1,2}, 刘建^{1,2}, 龚丹^{1,2}, 李纬^{1,2}, 王忠东^{1,2}, 黄奇峰^{1,2}

(1. 国网江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211100;

2. 国家电网公司电能计量重点实验室, 江苏 南京 211100)

摘要: 探讨了大规模电能计量器具智能检定的优化调度策略。为实现检定台体效率的最大化, 提高自动化检定的检定能力, 同时保证 AGV 小车输送轨道的畅通, 提出了一种分区分线体分单元分散调度的优化调度策略。根据 AGV 机器人、检定台体的工作状态及其检定工作进度, 建立待检转接台没表情况下 AGV 输送的优先级策略。结合电能计量器具实际配送的特点, 采取批次尾表优先回库的原则。最后, 实证验证了所提优化调度策略是可行的和有效的。

关键词: 优化调度策略; 智能检定; 电能计量; 大规模

Optimal operation on large-scale automation verification of electrical power measuring instruments

SU Huiling^{1,2}, LIU Jian^{1,2}, GONG Dan^{1,2}, LI Wei^{1,2}, WANG Zhongdong^{1,2}, HUANG Qifeng^{1,2}

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 211100, China;

2. Energy Measurement Key Laboratory of State Grid Corporation of China, Nanjing 211100, China)

Abstract: This paper discusses an optimal operation method of large-scale automation verification of electrical power measuring instruments. According to the spatial distribution of verification benches, an optimal strategy is proposed using dispersion operation. Combined with the operating state of AGV and verification bench, a priority method is set up considering no smart meters for verification on temporary storing platform. A small quantity of meters with the same batch is prior to transit to smart storage to satisfy requirements of the actual distribution of electrical power measuring instruments. An empirical study is used to testify the proposed optimal operation is available and effective.

Key words: optimal operation strategy; automation verification; electrical power measuring; large-scale

中图分类号: TM76

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2015)11-0075-05

0 引言

2013 年我国全社会用电量突破了 53 223 亿 kWh。细微的计量误差对电力客户或企业都会造成巨大的不公, 并严重影响政府的公信力。随着阶梯电价节能惠民战略的实施和用电信息采集系统的全面建设, 各类电能计量器具需求量急剧上升, 仅 2012~2013 年江苏每年的需求量就在 1 000 万只以上, 规模巨大。传统的电能计量器具检定采用人工接线检定, 技术手段落后, 与现代电能计量器具检定集约化、标准化、自动化的发展趋势形成了尖锐的矛盾^[1-2]。性能可靠稳定的电能计量器具是支撑智能配电网高级计量体系的关键一环^[3-7]。因此, 实现千万规模计量器具高效率、高质量、集约化的检定,

是现代计量检定领域迫切发展的要求。

目前, 随着国家电网公司电能计量集约化管理的深入, 各网省、地市级计量中心制定了集中检测、统一配送的管理模式。以江苏自动化计量检定^[8]为例, 计量器具到货后经由智能仓储实现入库, 然后传输至自动化检定线完成计量器具的质量检定, 最后通过智能仓储将计量器具配送至各地市供电公司, 流程框架如图 1 所示。

在计量性能检定流程中, 自动化成套检定装备的研制为电能计量器具的大规模检定提供了硬件支撑, 电能计量器具的检定涉及自动化检定台体系统、机器人(RGV)系统、自动导引车(AGV)系统等多个环节系统。综合考虑各环节的特点, 实现不同环节之间的优化协调是进一步提高自动化检定效率及设

备利用率的关键所在。基于此，结合自动化计量检定的物理框架布置以及工作流程，在充分分析自动

化检定线的特点及其约束限制的基础上，本文探讨了电能计量器具智能检定的优化调度策略。

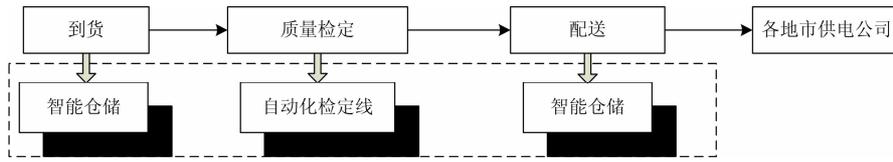


图 1 计量器具从到货环节至配送环节的流程框架

Fig. 1 Framework of measuring instrument from the arrival to the distribution

1 自动化检定线的空间布置特点分析及工作流程

综合运用机器人、计算机控制、传感器检测、气动和电动控制、图像识别及计算机网络通信等领域的技术，实现电能表传输、耐压试验、外观检查、挂表、误差检定、拆表、铅封、检定合格证粘贴等各个环节的自动作业；运用先进的物流输送线，通过计算机控制，将自动化库房与计量器具各检测区域进行有机集成，仓储系统、各类检定/检测系统间既相互独立，又相互兼容。自动化检定线能够实现计量器具从新购入库、待检出库、上料检定、下料装箱、箱表入库以及配送出库等全过程生产作业的智能化、自动化。

1.1 空间物理布置特点分析

采用图 2 所示自动化检定线的空间物理布置，其中白色长方框部分为自动化检定台体，分别分布在 A、B、C、D 四个区；虚线框所示为自动化检定区与智能仓储之间的接驳区域，AGV 小车通过该接驳区实现待检/已检计量器具的接送；A、B、C、D 区及接驳区相互之间的实线连接为 AGV 小车的传输行驶路径。检定台体呈分区分散分布特点，在各分区呈线体集中排列。分单元划分每一线体的检定台体，各单元分别对应一个 RGV 机器人，实现

计量器具的装卸功能。

自动化检定区在物理设备布置上，具有三个层次：检定台体、RGV 机器人、AGV 小车。RGV 机器人负责单元内检定台体的装卸计量器具，与单元检定台体对应，并且 RGV 机器人一次仅能执行一个台体的装卸表任务；AGV 小车负责检定区所有台体待检/已检表计的接送，与检定台体对应。检定台体与 RGV 机器人、AGV 小车之间进行配合，RGV 机器人与 AGV 小车之间则不存在任何交互。此外，考虑到 RGV 机器人采用手臂执行装卸表的方法，因此，相邻单元之间的 RGV 机器人必须协调动作，不能同时执行单元间邻近台体的装卸表动作，避免 RGV 机器人手臂的碰撞。

1.2 工作流程

根据计量器具类别，分别设置单相表计检定系统、三相表计检定系统、低压电流互感器检定系统、采集终端检测系统，各系统采用模块化单元组合。RGV 机器人系统实现计量器具的上下料以及周转箱的组盘、拆盘操作。低压电流互感器检定系统采用流水线输送系统与智能仓储系统接驳，其余各系统采用 AGV 输送系统与智能仓储系统接驳。

以单相表计检定系统为例，自动化检定线的工作流程详见图 3。

AGV 输送系统接收到接送表任务后，自动分配 AGV 小车将待检表/已检表送至响应目的地。值得注意的是，AGV 输送系统仅仅能够在已知始点和终点的情况下，选择最优路径完成输送，但是无法自动判断需要接送的起始点。检定台体的检表过程是全自动过程，无需人工干预。由于检定台体在空间物理上按区域布置，AGV 小车需要遍历所有检定台体，才能实现所有台体的有效利用。为了充分利用检定台体，达到最大检定量的目标，关键问题是 AGV 小车接送表计起止点的最优控制。因此，结合台体的空间物理分布以及实际检表进度，合理构建 AGV 小车接送目的地的运作机制，以提升检定台体

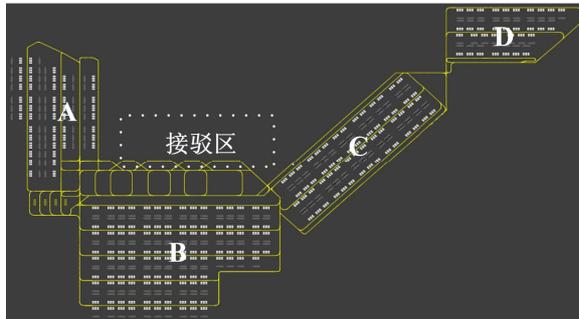


图 2 自动化检定线的空间物理布置

Fig. 2 Physical arrangement of automation verification bench

以及 AGV 小车的利用效率, 是本文优化调度策略探讨的关键所在。

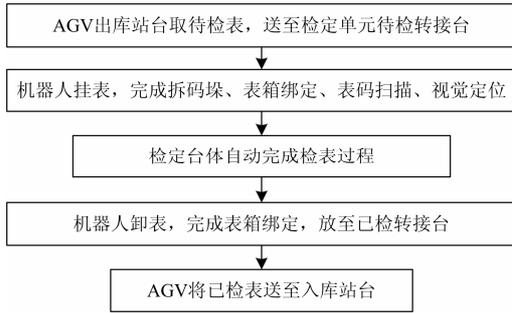


图3 自动化检定线的工作流程

Fig. 3 Workflow of automation verification bench

2 优化调度策略

计量器具计量性能的自动化检定环节是由检定台体系统、机器人系统以及 AGV 小车系统组成, 各系统之间是紧密相连但又相互制约。优化调度策略的目的就是提高自动化检定台体的利用率, 增加电能计量器具的检定量。由第 1 节分析可知, 自动化检定环节受到检定台体、机器人以及 AGV 小车的空间物理分布特点以及其资源本身的特点和数量的约束限制。因此, 在充分分析现有设备资源特点的基础上, 通过协调检定台体与机器人之间、不同单元间机器人与机器人之间、检定台体与 AGV 小车之间以及单元内检定台体与检定台体之间的相互关系, 来探讨检定设备资源价值最大化的优化调度策略。

2.1 基础模型

计量器具自动化检定设备的协调优化模型与优化算法的通用数学模型^[9-13]一样, 也需要从优化的目标、约束限制条件入手, 如式(1)~式(3)所示, 其特点是应反映检定设备相关资源因素的影响。

$$\max \alpha^T X \quad (1)$$

$$\text{s.t. } G(X)=0 \quad (2)$$

$$C(X) < 0 \quad (3)$$

式中: α 为影响因子列向量; X 为协调优化的决策变量。

式(1)为设备资源利用的最大化目标; 式(2)、式(3)为协调优化调度的约束限制条件, 如 AGV 小车运力的约束, 检定台体检定能力的约束, 以及接驳区出入库量的平衡等相关约束。

由上可知, 构建协调优化调度的基础模型, 必须解决的重点是, 影响因子以及约束限制条件。其

中, 影响因子是检定设备资源影响检定量量化因子, 如 RGV 对单元检定台体检定量量化影响, 检定量受 AGV 运力制约时的关联影响。确定了影响因子, 也就确定了协调优化的目标。约束限制除了要考虑各资源因素的物理限制的影响之外, 还应纳入各资源设备之间协调约束的影响, 如 RGV 机器人只负责执行对应单元内检定台体的挂卸表任务, 单元内各检定台体的检定进度就必须协调, 以防止 RGV 机器人待执行任务的拥堵。

2.2 调度策略探讨

自动化检定能力最大化是优化调度策略探讨的目的。然而, 自动化检定台体、RGV 机器人、AGV 小车等硬件设备本身故障是无法通过优化协调消除的, 如, 由于货叉夹爪卡滞、气路异常或传感器损坏导致机器人货叉夹爪故障, 由于检定台体与表位的电机测温板通信异常导致压接异常故障, 均属于不可控因素, 通过人为日常巡检维护来处理。因此, 忽略不可控因素导致的故障, 假定所有设备能够正常可靠运行, 即台体、机器人、AGV 均处于正常可用状态。

自动化检定涉及检定台体、RGV 机器人、AGV 小车等大量硬件设备以及相应的软件系统, 任一部分的效率降低或者故障, 都将导致设备可用程度的降低, 重则影响整个检定生产的进度, 直接影响地市公司用表需求。

通过集中监控管理软硬件设备的实时运行, 实现对运行状况的统一展现与告警, 可以更快速、更准确地发现异常或故障运行情况, 从而为异常情况的及时处理或者故障修复争取了宝贵的时间, 有效保证了自动化检定的稳定、可靠运行。然而, 高效的监控管理需要辅以设备的优化调度策略, 以达到对一些关键点的关键监控。

2.2.1 分散调度方法

由第 1 节可知, 检定台体的分布位置是固定的, RGV 机器人服务于单元线体内的检定台体, AGV 小车的输送路径也是固定的, 均属于已知量, 而 AGV 小车的接送目的地则是变量 X , 即

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N, y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_M] \quad (4)$$

其中: x_i 表示检定台体 i ; N 表示检定台体的数量; y_j 表示接驳区处智能仓储与检定区之间的接驳口; M 表示接驳口通道的数量。

结合检定台体的空间分布特点, 同时保证 AGV

小车输送轨道的畅通, 采取分区分线体分单元的分散调度方法, 实现检定台体 x_i 的优化控制, 即

- 1) 不同区域台体;
- 2) 同区域不同线台体;
- 3) 同线不同单元台体;
- 4) 同单元台体。

该方法充分考虑了自动化检定相关设备的空间物理分布特点, 以检定台体的最大化利用为核心目的, 同时 RGV 机器人和 AGV 小车协调配合, 实现自动化检定系统的协调运转, 达到提升自动化检定生产能力的最终目标。

对于接驳口 y_j , 则分为待检表出库口 y_1, y_2, \dots, y_j 和已检表入库口 y_{j+1}, \dots, y_M 。

2.2.2 优先级控制策略

优先级控制策略的目的是通过挖掘设备潜力, 提高设备利用率, 增加检定产量。

(1) 待检表输送策略

采用分区分线体分单元的分散调度方法, 在检定台体完全清线后的开机情况, 按照检定线序号由小到大原则进行待检表的输送; 在没有完全清线开机情况下, 如果待检转接台没有表, 则采取输送优

先级如下:

- 1) RGV 机器人空闲且台体空闲;
- 2) 台体空闲;
- 3) 台体检定完成或卸表中;
- 4) 台体工作中但检定进度最快。

(2) 检定完成入库策略

AGV 小车输送策略仍然采取分区域、分单元、分线体的优先级。但是在实际配送时, 电能表必须完成一个批次的检定任务, 如果某批次存在尾表尚未检定完成入库, 则该批次表计不能配送出库。因此, 在检定完成入库时, 优先考虑完成批次尾表的入库, 其次考虑优先检定完成的表计。

2.3 实证分析

为评估所提优化调度策略的有效性, 对比分析调度策略使用前后 AGV 小车实际输送计量器具的出入库总数, 以 A、B、C 三区为例, 暂不考虑 D 区, 如表 1 所示。其中, B1 分别表示 B 区第 1 个线体的台体, B2、...、B9 以及 C1、...、C4 分别也表示对应线体的台体。

表 1 AGV 小车日运力情况对比

Table 1 Transport capacity comparison in a working time of AGV

分区分线体	未使用优化调度/垛		使用优化调度/垛	
	待检出库总数	检定完成入库总数	待检出库总数	检定完成入库总数
A	20	20	29	26
B1	29	34	61	61
B2	27	32	57	62
B3	29	31	58	59
B4	25	32	62	63
B5	44	41	48	46
B6	29	27	29	31
B7	31	29	32	31
B8	25	23	26	27
B9	25	23	34	37
C1	46	55	62	65
C2	42	50	60	64
C3	42	49	60	60
C4	42	44	68	69
总数	456	490	686	701
AGV 总运力	946		1 387	

由表 1 可知, 采用所提优化调度策略后, AGV 运力大幅提升, 待检出库量由 456 垛提高至 686 垛, 较未使用优化调度策略时效率提升了 50.4%, 检定完成量由 490 垛提高至 701 垛, 较未使用优化调度策略时效率提升了 43.1%。因此, 本文所提优化调度策略是有效的。

3 结语

本文探讨了大规模电能计量器具智能检定的优化调度策略, 结合计量器具智能检定的实际特点, 提出了分区分线体分单元的分散调度的优化调度策略, 根据自动化检定的实际特点, 建立了检定设备的优先级控制策略, 并考虑实际配送对电能计量器

具的要求, 采取批次尾表优先入库的原则, 最后实证验证了所提方法的有效性和可行性。

参考文献

- [1] 宗建华, 闫华光, 史树冬, 等. 智能电能表[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [2] 李月恒, 翟维枫, 孙德辉. 三相仿真电能表综合检定系统的设计[J]. 自动化与仪表, 2011, 26(4): 17-19.
LI Yueheng, ZHAI Weifeng, SUN Dehui. Design of synthesized verification system about simulated three-phase meter[J]. Automation & Instrumentation, 2011, 26(4): 17-19.
- [3] 于士斌, 徐兵, 张玉侠, 等. 智能配电网自愈控制技术综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(5): 65-70.
YU Shibin, XU Bing, ZHANG Yuxia, et al. Review on self-healing control technique in smart distribution grid[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2013, 25(5): 65-70.
- [4] 章欣, 杨湘江, 徐英辉, 等. 智能用电与现代量测技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [5] 薛晨, 黎灿兵, 曹一家, 等. 智能电网中的电网友好技术概述及展望[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(15): 102-105.
XUE Chen, LI Canbing, CAO Yijia, et al. An overview and prospects of grid friendly technology in smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(15): 102-105.
- [6] 牟龙华, 朱国锋, 朱吉然. 基于智能电网的智能用户端设计[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 53-56.
MU Longhua, ZHU Guofeng, ZHU Jiran. Design of intelligent terminal based on smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 53-56.
- [7] 闵翊, 殷迪清. 高级计量体系与需求响应机制的协调发展策略[J]. 供用电, 2011, 28(6): 35-38.
MIN Chong, YIN Diqing. Coordination & development policy of advanced metering infrastructure and demand response[J]. Distribution & Utilization, 2011, 28(6): 35-38.
- [8] 黄奇峰, 蔡奇新, 刘建. 一种大规模智能电能表全自动检定系统设计[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(2): 4-6.
HUANG Qifeng, CAI Qixin, LIU Jian. The design of super large-scale smart meter automatic verification[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2013, 32(2): 4-6.
- [9] 苏慧玲, 王淳, 秦茹静, 等. 基于 GA 改进算法的多目标机组优化检修计划[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(6): 27-30, 123.
SU Huiling, WANG Chun, QIN Rujing, et al. Multi-objective optimization of unit maintenance scheduling based on improved GA[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2008, 20(6): 27-30, 123.
- [10] 王金全, 黄丽, 杨毅. 基于多目标粒子群算法的微电网优化调度[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(1): 49-54.
WANG Jinqian, HUANG Li, YANG Yi. Optimal dispatch of microgrid based on multi-objective particle swarm optimization[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(1): 49-54.
- [11] 丁平, 田芳, 李亚楼, 等. 按类别扩展不等式约束的内点优化算法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2699-2705.
DING Ping, TIAN Fang, LI Yalou, et al. Interior point method optimization algorithm with slacking inequality constrains according the categories of them[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2699-2705.
- [12] 邵文权, 宋江喜, 程远, 等. 基于自适应遗传算法的风力发电系统网侧 LCL 滤波器的优化设计[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 116-121.
SHAO Wenquan, SONG Jiangxi, CHENG Yuan, et al. An optimized design for wind-power generation system grid-side LCL filter based on adaptive genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 116-121.
- [13] 谢胤喆, 于汀, 陈海良, 等. 机组组合的改进自学习粒子群算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(2): 14-20.
XIE Yinzhe, YU Ting, CHEN Hailiang, et al. Unit commitment model based on self-learning particles swarm algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2014, 26(2): 14-20.

收稿日期: 2014-09-04; 修回日期: 2014-10-29

作者简介:

苏慧玲(1983-), 女, 通信作者, 博士, 研究方向为电力系统电力计量、电力系统规划与可靠性分析; E-mail: suhuil@163.com

刘建(1981-), 男, 博士, 研究方向为电力系统电力计量。

(编辑 周金梅)