

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205272

边云协同程控恒流源动态连续域模型辨识方法^{*}

吕建勋 孙玉成 赵鹏辉 袁海文

(北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院 北京 100191)

摘 要:远程程控恒流源作为智能工厂伺服控制环节的重要部件,定量的求解其远程控制全过程的动态模型对于伺服控制策略生成和优化控制等具有重要意义。本文针对程控恒流源的动态性能分析以及远程高效控制,提出了一种基于边云协同的恒流源动态模型建模方法。该方法考虑了远程控制过程中的通信延迟、数据丢包等相关情况,同时辨识了从云端控制到边端输出的整个模型的结构和参数,并通过离散域和连续域传递函数的转换,获得远程程控恒流源连续域动态模型,克服了传统边端控制对于不同控制时间间隔需要重新建立离散化模型的不便,支持了恒流源所在伺服系统的远程高效控制。仿真验证和应用模拟验证表明,该方法可以精确辨识恒流源连续域动态性能模型并应用于实际边云协同程控系统。

关键词:边云协同;程控恒流源;动态性能;模型辨识

中图分类号: TP29 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.15

Dynamic continuous domain model identification method of edge-cloud cooperative programmable constant current source

Lyu Jianxun Sun Yucheng Zhao Penghui Yuan Haiwen

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The remote programmable constant current source is an important part of the servo control, and its dynamic model of whole control process is of great significance for the strategy generation and control optimization of the servo control. Aiming at the dynamic performance analysis and remote control of programmable constant current source, this paper proposes a dynamic modeling method based on edge-cloud collaboration. The proposed method takes into account the communication delay, data packet loss and other related situations in the cloud control process. It can simultaneously identify the structure and parameters of the model. Through the transformation of transfer functions of discrete domain and continuous domain, the continuous dynamic model of the constant current source is obtained to support the efficient control of the servo system, it overcomes the inconvenience of re-establishing the discrete model for different control time intervals in traditional side-end control. Finally, simulation verification and application simulation verification show that the method can accurately identify the dynamic model of the constant current source in the continuous domain and can apply to the actual edge-cloud cooperative program control system.

Keywords: edge-cloud collaboration; programmable constant current source; dynamic performance; model identification

0 引 言

目前,我国已经进入深度的工业化时代,生产过程升级换代全面展开,国家对于大飞机生产制造、对于电子工业中集成电路芯片等的生产制造技术发展需求极为迫切。这些生产线在建设过程中,需要大量的伺服环节,通

过多种运动的有机配合来完成生产过程中各个环节的生产任务^[1-2]。

程控恒流源是实现伺服控制的重要部件,在现代化工厂中用量大,作用独特而且位置关键^[3-5]。传统的恒流源模块大多采用本地控制,控制模型需要提前确定并在本地端设定好,而且针对不同的控制时间间隔,需要重新建立相应的离散模型,适应性较差。另外,随着网络控

制、远程控制技术的发展,对恒流源的远程控制需求也逐渐增加,传统的边端恒流源模型无法将远程控制的延迟、丢包等相关因素考虑其中,难以满足现代化的远程功能可调的自动化生产过程^[6-7]。在这种背景下,本文基于边云协同理念,开发了一款可通过边云协同实现电流变化过程智能可控的恒流源装置,并提出了通过动态试验,依据试验结果建模,采用数学工具描述恒流源动态性能的方法。这种方法通过云端给予边端恒流源简便的数字阶跃信号激励,采集恒流源的输出并发送回云端,在同时考虑传输延迟和数据传输丢包等情况下,利用云端计算资源,计算获得从云端发送命令到边端恒流源输出的整个过程的连续域动态模型。而基于所获连续域动态模型,可以很方便的得到相应的脉冲模型,用于支持边端节点实现任意控制时间间隔的离散控制。这个思路克服了系统对于不同控制时间间隔需要重新识别建立离散化模型的不便,并且这种应用模式的激励易于在线实现,能确保产品在线应用中的一致性,该方法适宜于工业化大规模推广应用。

另外,近年来工业互联网、5G 等无线通信、云计算和边缘智能终端等技术的飞速发展,以及进而发展起来的以现代人工智能技术中边缘智能、分布式智能和混合增强智能为支撑的边云协同技术,为现代先进制造业开发新的支持边云协同功能结构的产品实现体系提供了借鉴^[8-12]。参观我国商飞现代化的生产工厂就会发现:工厂已经建立了强大的设计研发中心和生产技术及生产过程管理中心,它们形成了工厂内部一个强大的“云端”,其计算和信息处理、存储能力非常强大。工厂每个车间和每个车间的生产单元,以及生产单元的不同工艺部位,都有性能各异的边缘计算机进行测控。同时,工厂专门建立了工业 5 G 网络。这样的体系,为具有边云协同功能技术配件的应用奠定了极好的基础。

1 边云协同程控恒流源总体结构设计

1.1 恒流源结构组成

边云协同程控恒流源结构如图 1 所示,它主要由 TCP/IP 转 CAN 单元、CAN 总线单元、单片机单元、两路 D/A 单元、两路恒流产生单元和供电单元 6 部分组成。单片机采用 89C51 单片机,成本低,稳定性好,适合工厂场景中大规模应用。

1.2 程控恒流源总体设计

这款边云协同程控恒流源可以并行提供两路恒流电流,电流范围为 ± 65 mA,分辨率小于 0.5 mA。可以适用于市场绝大部分液压伺服阀的单路、双路、差分等各种运动控制。该恒流源实际工作过程中的恒流电流大小由单

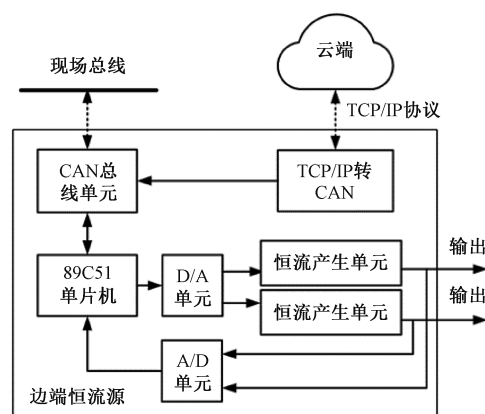


图 1 程控恒流源结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of program-controlled constant-current source

片机在线确定,而且给定的具体参数,如电流大小、死区大小、上升率、下降率,以及双路的同步机制等策略可以由云端通过以太网或现场总线网下载到边端当地单片机中,然后单片机可以根据动态模型按照给定策略执行。云端也可以通过网络,采用边云协同的模式直接指导边端节点单片机,按照实时策略给定双路电流大小与方向,来完成有效的运动控制。云端还可以在在工作中积累的经验利用现代人工智能技术学习处理,进行策略优化,再将优化后的策略重新下载到边端,完成控制策略的更新。恒流源控制策略的优化以及离散传递函数模型向连续域传递函数模型的转换需要很强的计算能力,以边端单片机的算力难以完成。而采用边云协同模式可以很好地克服边端单片机算力不足的问题。边端节点负责完成动作执行和数据采集反馈,云端则充分利用其强大的计算能力实现恒流源动态模型辨识,控制策略生成、优化及下发等。通过边云协同的方式实现边端恒流源节点的高质效远程在线实时控制。

在运动控制过程中,恒流源的动态性能非常关键和重要,尤其是包含通信链路的情形下,获得恒流源动态性能的定量指标,对于生产现场的多环节运动控制协调与优化,意义重大^[13]。下面介绍恒流源动态性能获取的技术思路、实现原理和具体方法。

2 动态连续域模型辨识方法

2.1 总体思路

对于恒流源这类边端节点的动态性能,研究的总体思路是建立一个数学模型,用数学方法来定量描述其动态性能,这样可以得到分析其动态误差的解析公式,从而可以确定对应误差下恒流源动态变化的上限阈值,来支

持结合生产现场实际要求、负载特性、误差,特别是动态误差约束来确定运动过程动态频率特性匹配范围。

在获得解析公式的过程中,按照动态试验、基于实验数据建模、模型检验和基于模型的分析4个环节来完成恒流源动态性能的测试与分析,这里实质上是遵循了从实践到理论、再用理论结果指导实践的思路与过程。

对于恒流源动态性能的测试,拟在时间域完成。具体过程是,采用一台上位机模拟云端,把云端和边端的恒流源看作一个整体,从云端发一个命令,让恒流源输出为零,等稳定后,再发出一个命令,让恒流源正向(反向)输出最大值,这类似于通过数字端口给恒流源一个正(负)阶跃激励信号,通过板载A/D及示波器记录恒流源在该阶跃激励信号作用下负载侧的响应过程。这样就将问题转换为在阶跃作用下,来确定由云端-通信链路-边端组成的这个系统的总体模型的辨识问题。

2.2 理论计算建模方法介绍

建立恒流源动态性能分析模型,实质上需要完成两件事情,一是确定模型的结构,二是确定对应该模型结构的参数^[14-15]。假定可以用线性模型来描述恒流源的动态过程,这时确定模型结构则是确定模型的阶次。本文通过把黄俊钦教授提出的一种在离散域同时确定模型结构和参数的方法,与脉冲离散域传递函数 $G(z)$ 转换为连续域传递函数 $G(s)$ 的逼近方法相结合,可以得到描述恒流源动态过程的连续域模型,从而用于分析恒流源的动态

性能。

1) 恒流源时间域描述模型差分方程的建立

采集恒流源对输入阶跃激励 $u(t)$ 的响应过程,可以得到一个采样时间间隔为 T 的响应序列 $y(t)$,把时刻依次记为 $1, 2, 3, \dots, M$,建模过程就是依据序列 $u(1), y(1), u(2), y(2), \dots, u(M), y(M)$ 来确立 n 阶差分方程(1)。

$$B(d^{-1})u(k) - A(d^{-1})y(k) = e(k) \quad (1)$$

$$B(d^{-1}) = b_0 + b_1 d^{-1} + b_2 d^{-2} + \dots + b_n d^{-n} \quad (2)$$

$$A(d^{-1}) = 1 + a_1 d^{-1} + a_2 d^{-2} + \dots + a_n d^{-n} \quad (3)$$

其中, d^{-1} 为差分方程后移运算符,表示后移一个时刻, $e(k)$ 是模型估计偏差。

同时标记参数和偏差向量如下:

$$\theta(n) = [b_n \quad a_n \quad b_{n-1} \quad a_{n-1} \quad \dots \quad b_1 \quad a_1 \quad b_0]^T$$

$$e = [e(n+1) \quad e(n+2) \quad \dots \quad e(n+N)]^T$$

该算法采用最小二乘估计,指标函数为(估计偏差的平方和):

$$J[\theta(n)] = \sum_{k=n+1}^{k=n+N} e^2(k) = e^T e \quad (4)$$

这实质上就是在阶次为 n 时,确定一组参数向量,使指标函数最小,这可以通过以下几步来完成:

步骤1:从 $u(k), y(k), k=1, 2, 3, \dots, M$ 出发,确定整数 $v \geq n$ 以及 $2v+2 < N < M$,根据式(1)构造信息矩阵 D :

$$D = \begin{bmatrix} u(1) & -y(1) & u(2) & -y(2) & \dots & u(v+1) & -y(v+1) \\ u(2) & -y(2) & u(3) & -y(3) & \dots & u(v+2) & -y(v+2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ u(N) & -y(N) & u(N+1) & -y(N+1) & \dots & u(v+N) & -y(v+N) \end{bmatrix}$$

步骤2: D 是 $N \times (2v+2)$ 维矩阵,把矩阵 D 进行镜像映射正交变换变为如式(5)的上三角阵,其中 $*$ 为任意元素,并且对角偶元素与指标函数满足式(6),这样可以选取偏差平方和最小的 n 值作为模型的阶次。

$$D^* = HD = \begin{bmatrix} d_1 & * & * & \dots & * \\ 0 & d_2 & * & \dots & * \\ 0 & 0 & d_3 & \dots & * \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & d_{2v+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$J_n = d_{2n+2}^2, n = 1, 2, \dots, v \quad (6)$$

根据式(6),运用适当的定阶规则,如偏差平方累加和绝对最小、相对变化最小等,确定模型的阶次 n 。

步骤3:对 D^* 矩阵中的上三角矩阵 R 进行分块,假

定这时描述差分方程的阶次取 n 。

$$R = \begin{bmatrix} R_n & \dots & -f_n & \dots & c_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & g_n & \dots & c_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: R 是 $2v+2$ 维方阵, R_n 为 $2n+1$ 维方阵, f_n 是 $2n+1$ 维列向量, g_n 是 $2v-2n+1$ 维列向量 $[d_{2n+2} \quad 0 \quad \dots \quad 0]^T$, c_1, c_2 是其余元素组成的子阵,再取 $2v+2$ 维列向量 θ^* :

$$\theta^* = [\theta^T(n) \quad \dots \quad 1 \quad \dots \quad 0]^T \quad (8)$$

由式(1)可得:

$$D\theta^* = e \quad (9)$$

式(9)左乘正交变换阵 H ,这是保模变换,则:

$$HD\theta^* = D^*\theta^* = He \quad (10)$$

并且:

$$J[\theta(n)] = e^T e = \|e\| = \|He\| = \|D^*\theta^*\| =$$

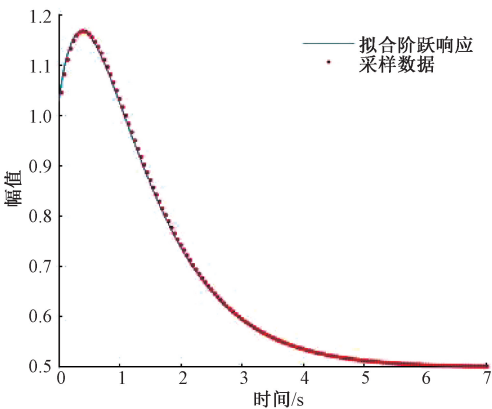


图 3 拟合传递函数阶跃响应

Fig. 3 Step response of fitting transfer function

性能识别要求,然后边端采集恒流源对数字阶跃激励的响应信号后上传给云端。云端利用所获得的响应数据信息对整个远程程控恒流源包含网络数据传输环节在内的整体动态模型进行辨识建模,建立其连续域动态模型。该模型不仅包含了传统的边端采样误差对系统建模的影响,而且考虑了云端与边端数据通信过程中通信延迟、数据包传输不确定等情况对系统建模的影响,相比传统本地控制模式,这种边云协同动态建模模式可以让远程控制更精准。

在获得程控恒流源连续域动态模型后,就可以用于支持根据伺服系统的控制周期要求生成相应控制策略所需的脉冲模型,并将参数发送给边端恒流源节点,更新控制策略,避免了每次调整控制时间间隔都需要重新采样数据进而计算系统脉冲传递函数的过程,大大降低了远程控制的复杂度,实现了高质效的远程控制,更适于工业化规模推广应用。

4.1 程控恒流源动态性能测试实验

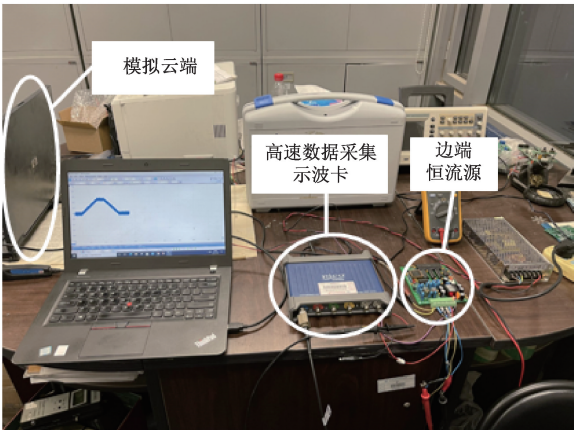
针对边云协同应用背景,在实验室搭建模拟试验平台,进行了实验验证。

图 4 为远程程控恒流源系统的动态性能测试实验示意图。用笔记本电脑模拟云端,如图 4(a) 所示。通过现场总线连接边端恒流源。云端通过总线给边端恒流源发清零命令使其输出为 0,稳定一段时间后,发出让恒流源输出最大电流的指令,再稳定一段时间后发出一个清零命令。针对负载端的响应,还同时采用高速数据采集示波卡记录负载端的波形,如图 4(b) 所示。

这个实验相当于通过云端给边端恒流源施加一个数字阶跃信号,通过高速采集卡直接记录了包括云端软件命令发出,经过通信链路,最后到恒流源响应整个过程中的动态响应结果,再根据该动态响应结果建立从云端命令发出到边端恒流源响应的整个过程的动态连续域模型。采集卡采集得到的系统阶跃、负阶跃响应如图 5



(a) 模拟云端
(a) Simulated cloud



(b) 边端恒流源及高速数据采集示波卡
(b) Edge constant-current source and high-speed DAC

图 4 恒流源的动态性能测试试验

Fig. 4 Dynamic performance test of constant-current source

所示。

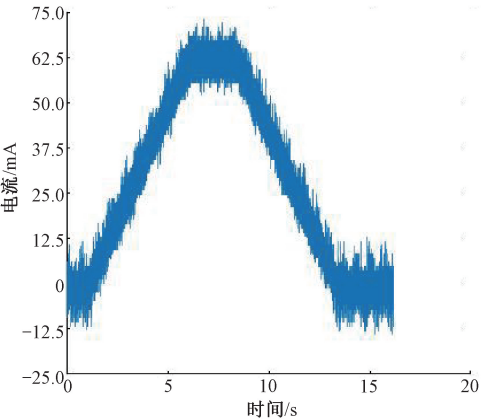


图 5 采集的系统阶跃响应

Fig. 5 Step response of system

实际中,为了减小惯性影响,提高伺服阀的动态性

能,恒流源上叠加一个 200 Hz 的 3 mA 小电流振荡信号,以保证恒流源收到控制指令后,能驱动伺服阀更迅速地做出动态响应。因此,采集的响应数据上有小毛刺。为提高建模的准确性,首先要对原始数据中的这个振荡信号及干扰进行滤波,滤波后得到的系统阶跃响应如图 6 所示。1~9 s 这段时间为云端发送正数字阶跃指令的时间,因此本文取 0~7.5 s 之间共 150 个数据点构造信息矩阵。

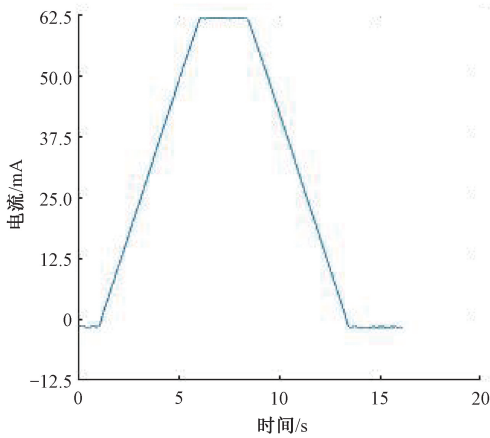


图6 滤波后系统阶跃响应

Fig. 6 System step response after filtering

4.2 实验结果分析

在云端用本文给出的方法处理数据,得到系统偏差平方和与模型阶次的关系如图 7 所示。从图 7 看,模型选择 5 阶较为合适。

作为对比,分别选取拟合模型阶次为 1~6 阶,计算得到对应的传递函数,求解这些传递函数的阶跃响应稳

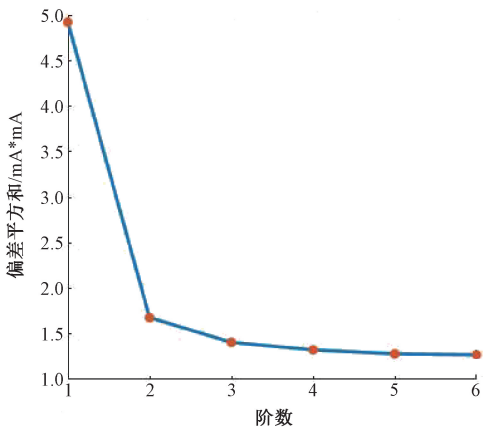


图7 偏差平方和与模型阶次关系

Fig. 7 Relationship between square sum of deviation and model order

态值和±5% 调节时间。系统的实际测量稳态值为 61.75 mA,±5%调节时间为 4.93 s,根据计算结果与实际测量结果计算其估计偏差,结果如表 1 所示。

表1 不同阶次传递函数阶跃响应的稳态值与调节时间

Table 1 Steady state value and regulation time of step response of transfer function

阶次	1	2	3	4	5	6
稳态值/mA	104.25	88.5	75.75	66	58.5	58.5
稳态偏差/%	68.8	43.3	22.7	6.9	5.3	5.3
T_s /s	19.7	15.3	11.8	7.85	5.21	5.21

从表中可以看出,当模型阶次最低为 5 阶,计算得到的模型阶跃响应的稳态值和±5%调节时间与实际采样得到的稳态值、调节时间最为接近,因此,选取模型阶次为 5 阶,其对应的脉冲传递函数如式(24)所示。

$$G(z) = \frac{0.6137 - 0.2186z^{-1} - 0.0478z^{-2} - 0.1946z^{-3} - 0.1631z^{-4} + 0.0728z^{-5}}{1 - 1.3837z^{-1} + 0.1317z^{-2} + 0.1108z^{-3} - 0.0112z^{-4} + 0.1535z^{-5}}$$

(24)

再通过矩阵变换得到系统的连续域传递函数如式 (25) 所示。该传递函数对数字阶跃的响应如图 8 所示。

$$G(s) = \frac{0.3314 + 77.398s^{-1} + 3.735 \times 10^3s^{-2} + 1.882 \times 10^5s^{-3} + 3.068 \times 10^6s^{-4} + 2.810 \times 10^6s^{-5}}{1 + 182.062s^{-1} + 7.977 \times 10^3s^{-2} + 2.360 \times 10^5s^{-3} + 1.552 \times 10^5s^{-4} + 4.793 \times 10^4s^{-5}}$$

(25)

图(8)中,粗的点划线对应实际系统阶跃响应观测值,细实线为所求得系统传递函数的阶跃响应计算值曲线。从图中可以看出,实际采样值基本都分布在所求得的传递函数阶跃响应曲线附近,计算得到的传递函数阶跃响应稳态值与实际测量阶跃响应稳态值的估计偏差为 5.3%,±5% 调节时间的估计偏差为 6.8%。

5 结 论

本文提出了一种基于边云协同的程控恒流源系统动态性能分析建模方法,并对该方法进行了仿真验证和应

用试验。本文的主要研究工作如下:

- 1) 提出了一种适用于边云协同场景下,把通信链路和执行元件综合考虑,同时确定包含网络通信等因素影响的整体模型的结构和参数,并实现离散域和连续域传递函数转换的边云协同动态模型建模方法;
- 2) 对该方法进行了仿真验证,仿真结果表明该方法可以很好地完成对动态模型的辨识。实际的二阶系统中的仿真计算表明,该方法建立的传递函数的参数误差很小;
- 3) 搭建了模拟恒流源边云协同系统,对该动态模型建模方法进行了应用试验。结果表明该动态模型建模方法可以识别包含网络传输在内的远程程控恒流源系统的

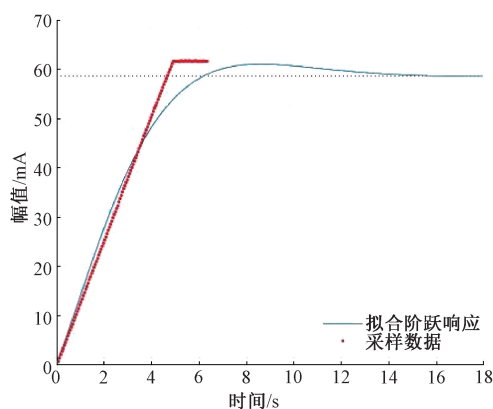


图8 拟合传递函数阶跃响应曲线

Fig. 8 Step response curve of fitting transfer function

动态模型,并且所拟合传递函数的稳态误差 5.3%,传递函数 $\pm 5\%$ 调节时间误差为 6.8%,实验验证了该方法实践应用的可行性。

4) 整个实验过程也说明,本文所提出的方法及实现过程,对于未来不同控制时间间隔的应用,本方法不需要再重新进行模型辨识,可以更简便的生成离散控制模型,更适用于工业化推广应用。也为工程中采用数学工具描述软硬件一体化测控单元的动态性能提供了一种有效的实现思路。

参考文献

- [1] 支强,康晓妮,马建峰,等. 基于压力偏差的射流管航空刹车伺服阀研究[J]. 测控技术, 2020, 39(9): 43-48.
ZHI Q, KANG X N, MA J F, et al. Jet pipe servovalves for aero-brake based on pressure deviation [J]. Measurement & Control Technology, 2020, 39(9): 43-48.
- [2] 王素粉. 冲压生产线上、下料摆臂式伺服机械手的设计[J]. 煤矿机械, 2019, 40(1): 7-9.
WANG S F. Design of swing arm type servo-manipulator of up-down material for stamping production line [J]. Coal Mine Machinery, 2019, 40(1): 7-9.
- [3] 黄桂梅,刘永立,王亚青,等. 可控恒流源设计与制作[J]. 电气自动化, 2017, 39(2): 45-48.
HUANG G M, LIU Y L, WANG Y Q, et al. Design and manufacture of a controlled constant current source [J]. Electrical Automation, 2017, 39(2): 45-48.
- [4] 王智宏,孙澎勇,王豫哲,等. 基于过程控制的机载高光谱定标光源的快速稳定恒流源研制[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(11): 40-47.
WANG ZH H, SUN P Y, WANG Y ZH, et al. Development of fast and stable constant current source of onboard hyperspectral calibration light source based on

- process control [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(11): 40-47.
- [5] 黄潇,唐求,周朝霞,等. 用于生物电阻抗谱测量的程控宽频恒流源设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(4): 145-153.
HUANG X, TANG Q, ZHOU ZH X, et al. Design of programmable broadband constant current source applied to bioelectrical impedance measurement [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(4): 145-153.
- [6] 杜大军,费敏锐,宋杨,等. 网络控制系统的简要回顾及展望[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(3): 713-720.
DU D J, FEI M R, SONG Y, et al. Brief survey and prospect of networked control systems [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(3): 713-720.
- [7] 赵娟,曹宁翔,黄斌,等. 神龙-III直线感应加速器高稳定度恒流源控制系统[J]. 强激光与粒子束, 2019, 31(4): 85-89.
ZHAO J, CAO N X, HUANG B, et al. Control system of Dragon-III linear induction accelerator's high stability constant current source [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2019, 31(4): 85-89.
- [8] 杨越,余涛,过立松,等. 基于边云协同的数控机床高频数据采集应用[J]. 自动化仪表, 2021, 42(10): 6-10.
YANG Y, YU T, GUO L S, et al. Application of high-frequency data acquisition for nc machine tools based on edge-cloud collaboration [J]. Process Automation Instrumentation, 2021, 42(10): 6-10.
- [9] 江翼,刘正阳,王文瑞,等. 基于边云协同的变电设备多状态量监测系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(6): 138-144.
JIANG Y, LIU ZH Y, WANG W R, et al. Research on multi-state monitoring system of substation equipment based on edge-cloud collaboration [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(6): 138-144.
- [10] SKARIN P, TAERNEBERG W, AERZEN K, et al. Towards mission-critical control at the edge and over 5G[C]. IEEE International Conference on Edge Computing (EDGE), 2018: 50-57.
- [11] LIN W, TANG Y, YOU M, et al. Deployment method of power terminal edge control center based on cloud-edge cooperative mode [C]. 2020 IEEE 5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC), 2020: 65-69.
- [12] SKARIN P, EKER J, KIHLM, et al. Cloud-assisted

- model predictive control [C]. 2019 IEEE International Conference on Edge Computing (EDGE), 2019: 110-112.
- [13] 杨娟, 任仁良. 飞机备用恒频交流电源动态特性仿真研究[J]. 计算机仿真, 2016, 33(11): 82-86.
- YANG J, REN R L. The simulation study of airborne standby constant frequency ac power's dynamic characteristic [J]. Computer Simulation, 2016, 33(11): 82-86.
- [14] 李昱, 袁磊. 线性系统的系统辨识综述[J]. 探测与控制学报, 2021, 43(3): 22-29.
- LI Y, YUAN L. Overview on system identification for linear systems [J]. Journal of Detection & Control, 2021, 43(3): 22-29.
- [15] 徐波, 章林炜, 俞向栋, 等. 基于系统辨识的电力系统惯量在线评估改进方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(18): 62-69.

XU B, ZHANG L W, YU X D, et al. An improved method of power system inertia online estimation based on system identification [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(18): 62-69.

作者简介



吕建勋, 2006 年于北京航空航天大学获得学士学位, 2014 年于北京航空航天大学获得博士学位, 现为北京航空航天大学讲师, 主要研究方向为检测技术、先进传感技术、数字信号处理。

E-mail: lvjianxun@buaa.edu.cn

Lyu Jianxun received his B. Sc. degree from Beihang University in 2006 and Ph. D. degree from Beihang University in 2014, respectively. Now he is an assistant professor in Measurement and Automation Department of Beihang University. His main research interests include measurement technology, sensor technology and digital signal processing.