

安全控制系统冗余度信号投票表决算法研究^{*}

张 严 兰 杰 杨锦辉 王剑宇 苗 强

(四川大学电气工程学院 成都 610065)

摘 要: 控制系统作为核能装备中的安全关键系统,在实际工程中往往需要长时间无人值守运行,其对自动化程度和运行可靠性的要求极高。高鲁棒性的信号表决算法可以确保控制系统在遇到故障或异常情况时能够自动应对并恢复正常运行。目前,核能控制系统中常用的信号表决算法为阈值检测方法。该类方法结构简单、易于理解,但其控制精度、可靠性、自动化程度等方面都表现欠佳。因此,基于长周期无人运行条件下的核能控制系统设计,以系统高可靠性和自动化需求为导向,提出一种基于投票机制的核能控制系统冗余度信号多级表决算法。一级监控算法判断信号故障点位,在此基础上,二级监控表决算法输出最终表决值。截取模拟运行过程中的信号序列,验证所提算法的输出表决值、故障计数、故障点剔除和恢复以及输出安全值等功能。同时,模拟多种测试信号,进行对比验证。结果表明,所提算法在阶跃信号、斜坡信号和正弦信号上都能有效降低表决的错误概率,其表决值结果普遍优于平均数、中位数等传统表决算法,阈值操作结果优于传统阈值检测方法。最后,通过讨论算法时间复杂度和算法运行的平均用时,验证该方法满足核能控制系统的实时性需求。

关键词: 长周期无人运行;投票机制;安全控制系统;冗余度信号表决算法

中图分类号: TM623; TN919.5 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8060

Research on the redundancy signal voting algorithm of safety control system

Zhang Yan Lan Jie Yang Jinhui Wang Jianyu Miao Qiang

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The control system, as a safety-critical system in nuclear energy equipment, often needs to operate without human intervention for a long time in actual engineering. It demands extremely high levels of automation and operational reliability. The highly robust signal voting algorithm can ensure that the control system can automatically respond and return to normal operation when it encounters a fault or abnormal situation. At present, the signal voting algorithm commonly used in nuclear energy control system is threshold detection method. This kind of method is simple in structure and easy to understand, but its control accuracy, reliability and automation are not good. Therefore, based on the design of the nuclear energy control system under the condition of long period unmanned operation, this paper proposes a multi-level voting algorithm for the redundant signal of the nuclear energy control system based on voting mechanism to meet the high reliability and automation requirements of the system. The first-level monitoring algorithm determines the signal fault point, and on this basis, the second-level monitoring voting algorithm outputs the final voting value. In this paper, the signal sequence in the simulation process is intercepted, and the functions of the proposed algorithm such as output voting value, fault count, fault point elimination and recovery and output safety value are verified. At the same time, a variety of test signals are simulated for comparative verification. The results show that the proposed algorithm can effectively reduce the error probability of voting on step signals, ramp signals and sine signals. Its voting result is generally superior to that of traditional voting algorithms such as average and median, and the threshold operation result is better than that of traditional threshold detection methods. Finally, by discussing the time complexity of the algorithm and the average running time of the algorithm, the method is verified to meet the real-time requirements of the nuclear energy control system.

Keywords: run unattended for a long time; voting mechanism; safety control system; redundant signal voting algorithm

0 引 言

随着能源需求的不断增长,核能设施反应堆控制系统

也面临更大的挑战^[1]。对于核电站而言,要求反应堆控制系统具备亲近性、灵活性、智能性等技术特征,具有高可靠性、高安全性、低成本等特点,以保障核电站的稳定运行和

收稿日期:2025-04-11

^{*} 基金项目:四川省国际科技创新合作/港澳台科技创新合作项目(2025YFHZ0157)、国家自然科学基金(62403337)、四川省青年基金(2025ZNSFSC1510)项目资助

经济效益^[2]。对于长周期无人运行条件下的核能设施,反应堆控制系统的软件算法设计必须具有高度的自主性和自我保护机制,以确保系统的稳定性和可靠性^[3]。在工程实际中,表决算法常用以确保系统在遇到故障或异常情况时能够获取正确的信号,实现系统的自动化决策和操作,降低人为干预,提高系统安全性和可靠性。

目前,表决算法在航空航天^[4]、云计算^[5]、传感器系统^[6]等多个领域有着广泛的应用。根据实施策略主要可分为冗余策略、阈值策略、智能算法策略和复合策略。

冗余策略是指系统增加主动或被动冗余组件提高系统可靠性^[7]。通常对各组件数据采用均值或中值处理等统计方法获取表决值,确保部分组件失效时,系统仍能有效运行。在经济性前提下,常采用三冗余架构策略。如尹智勇等^[8]设计三取二冗余的数字逻辑单元实现了对车辆关键控制电路的安全服役功能。甘志强等^[9]利用多传感器冗余观测技术,提高区域自动气象站探测数据的可用率和准确率。李克敏等^[10]提出了仪表气源三冗余的逻辑控制思路及气源压力三取低的实现方法。此外,在可靠性需求更高的情况下,也会应用冗余度更高的架构。王颖等^[11]研究四冗余计算机冗余管理,实现了高可靠性容错控制系统设计。陈茜等^[12]提出了一种可变冗余架构四冗余计算机技术,并成功应用于某天地往返飞行器。

阈值策略是指信号需要达到特定的阈值才能引起动作。该策略简化了信号的复杂度,在简单的信号与系统中应用广泛。当前核能控制系统针对输入的模拟信号,主要采用传统的阈值检测方法实现信号表决,中国核动力研究院严浩等^[13]提出了基于 A/D 采样和基于硬件比较的两种阈值判断设计方案,提供了核电站反应堆保护系统的多样化设计思路。

智能算法策略是指系统通过机器学习、自适应算法等软件方法,增加表决可靠性、安全性和自适应能力。其中,高振斌等^[14]提出了基于深度学习异常检测的表决算法,实现了拟态裁决器多数一致性表决算法的优化。饶龙龙等^[15]提出了基于神经网络与二元分类器融合的多层安卓恶意软件检测方法,相较于多数投票表决方法实现了分类性能与鲁棒性的提升。

复合策略是指采用上述多种策略复合而成。梁聚伟等^[16]结合长短期记忆网络和阈值策略,提出了故障蒸汽动力辅助系统的故障预警方法,实现了汽轮给水泵转速故障的有效预警。余旭涛等^[17]针对磁浮列车双冗余加速度传感器,提出了基于自适应多点广义似然比检验的传感器故障检测方法。

当下,核能控制系统采用三冗余阈值判断的复合策略^[13],通过三通道冗余增加系统可靠性,阈值判断提供动作指令。如果存在两个以上信号输出大于阈值且处于有效值区间内,则输出动作指令。当前策略结构简单、运行直观,但其可靠性和自动化程度都难以满足应用需求。例如,

在异常状态下,会出现三通道数据相差过大、数据未处于有效值区间等情况,导致输出错误的动作指令,需要工作人员人为识别、人为纠错。同时,智能算法策略软件开发难度大、运行成本高、算力需求高,难以满足复杂系统的经济性需求^[18]。

因此,提出一种基于投票机制的核能控制系统多余度信号多级表决算法,针对三通道冗余模拟信号之间的差异性,设计适应于不同信号的高鲁棒性两级监控表决算法,实现故障计数、故障恢复、安全值输出、故障点剔除等功能,有效输出表决值和阈值操作后的动作值。

1 多余度表决算法

针对三通道冗余信号输入的核能控制系统,设计多余度表决算法,通过一级监控算法,得到测点信号和测点故障标志位信号,再通过二级监控表决算法输出信号表决值。表 1 展示多余度表决算法中所设置的标志位及其含义。

表 1 算法中的标志位及含义
Table 1 Flags and their meaning in algorithm

算法中的标志位	含义
FSVALUE_mA	系统安全状态下的默认值
max_time	故障自动回复计数
max_error	最大故障计数值
LIMIT	容限

1.1 一级监控算法

一级监控算法如图 1 所示,主要分为两个步骤:

1) 获取信号位数:核能控制系统中信号具有 4~20 mA 的有效值区间,剔除有效区间外的输入信号,并统计输入到一级监控算法的信号有效位数。

2) 输出测点信号和故障标志位:基于不同的有效信号位数,进入不同的监控算法,完成一轮测点信号和故障标志位输出。当输入测点信号有效位数为 3 时,进行数据排序和相邻求差,并比较所设容限 *LIMIT*,将超过 *LIMIT* 的故障标志位置位,并输出剩余的有效测点信号;当输入信号有效位数为 2 时,对有效数据求差,比较所设 *LIMIT*,若未超过 *LIMIT* 仅将输入的无效信号测点故障标志位置位并输出两位有效测点信号,若超过 *LIMIT* 则将所有测点故障标志位置位;当输入信号有效位数≤1 时,将所有测点故障标志位置位。

1.2 二级监控表决算法

二级监控表决算法如图 2 所示,主要分为 4 个步骤:

1) 标记测点故障信号位与故障计数:当测点故障标志位等于 1 时,测点故障计数器加 1;当测点故障标志位等于 0 时,测点故障计数器置 0。

2) 测点信号剔除:当 3 个测点故障计数都等于 0 时,不进行一轮测点信号剔除工作,保留一轮测点信号。当存在

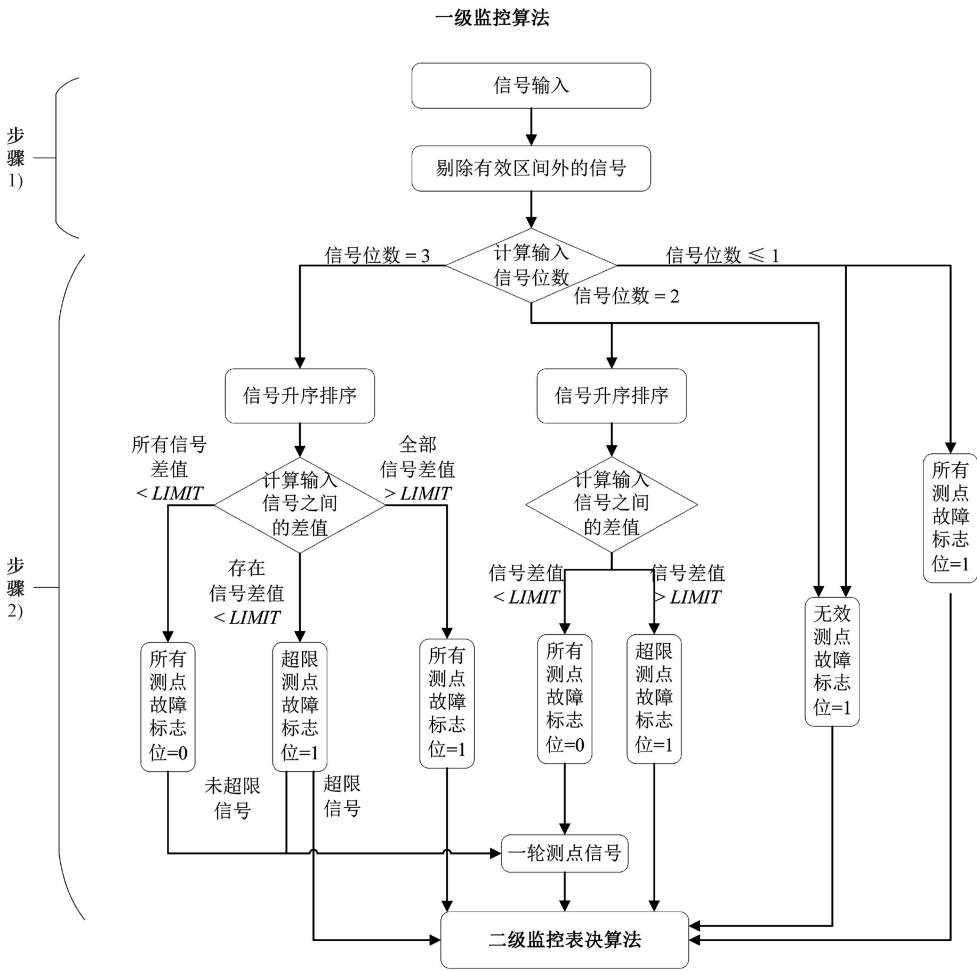


图 1 一级监控算法流程

Fig. 1 First-level monitoring algorithm flow

测点故障计数小于最大故障计数值 max_error , 并且大于 0 时, 不使用该测点当前拍对应一轮测点信号, 保留该测点上一拍对应一轮测点信号。当存在某一个测点故障计数等于 max_error 时, 将一轮测点信号中的该测点信号剔除。

3)故障测点时间计数恢复: 当测点故障计数器等于 max_error 时, 故障持续时间计数加 1。当前一拍测点故障时间计数值等于最大故障计数值 max_time 时, 观察当前拍对应测点故障标志位。若测点故障标志位为 0, 则表明该测点可进行自动复位操作, 置测点故障计数等于 0。若测点故障标志位为 1, 则表明该测点不可进行自动复位操作, 置测点故障计数等于 -1, 发出故障信息, 提醒操作人员及时排除故障。

4)表决值输出: 当测点信号位数等于 3 时, 取 3 个测点信号中间值作为表决值; 当测点信号位数等于 2 时, 取 2 个测点信号均值作为表决值; 当测点信号位数小于等于 1 时, 输出模拟信号故障安全值 $FSVALUE_mA$ 作为表决值。最后, 将表决值与任务设定的阈值进行对比, 输出核能控制系统的动作指令。

2 实验验证

实验基于 MATLAB/Simulink-R2020b 在 64 位 Windows11 操作系统和 Intel-i5-12400 处理器的计算机上完成。截取长期模拟运行中的某段信号序列进行功能验证, 展示算法的故障计数与恢复、测点剔除与恢复和故障安全值输出功能; 同时模拟多种的测试信号, 并与工程应用中的主流方法进行对比验证, 证明所设计表决算法的可靠性。

2.1 信号功能验证

该算法增加故障计数与恢复、测点剔除与恢复和故障安全值输出等功能, 提升算法在长期运行下的可靠性与稳定性。输入 4~20 mA 模拟信号, 根据系统安全状态下的默认值或阈值设置 $FSVALUE_mA = 13\text{ mA}$, 根据系统的允许输出误差, 设置 $LIMIT = 3\text{ mA}$, 同时, 根据实际信号具有连续非跳变的特性, 工程中 6 拍内信号具有良好的一致性, 设置 $max_error = 6, max_time = 5$ 。

如表 2 所示, 截取 13 mA 理论信号运行过程中某段信号序列展示该算法故障计数和恢复功能。

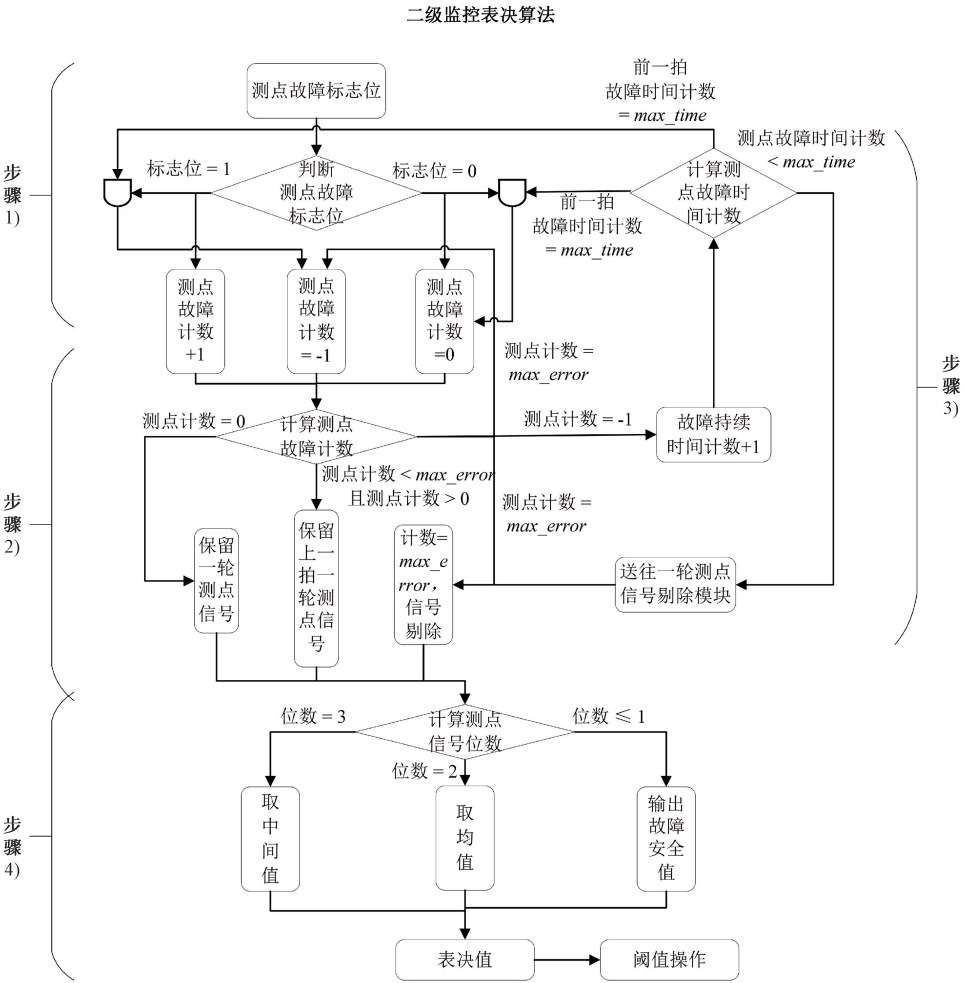


图 2 二级监控表决算法流程

Fig. 2 Second-level monitoring algorithm flow

表 2 故障计数与恢复
Table 2 Fault counting and recovery

信号 序列	三通道模拟 输入信号			三通道测点的 故障计数			表决值
1	13.00	13.00	13.00	0	0	0	13.00
2	13.96	13.21	14.88	0	0	0	13.96
3	13.17	6.09	13.22	0	1	0	13.21
4	12.92	11.88	13.77	0	0	0	12.92
5	7.18	13.27	12.99	1	0	0	12.99
6	5.35	13.02	14.09	2	0	0	13.02
7	6.74	12.88	13.57	3	0	0	12.92
8	13.25	12.47	12.88	2	0	0	12.88
9	12.55	13.11	4.78	1	0	1	12.92
10	11.78	12.21	12.56	0	0	0	12.21

信号序列在第 1、2 和 4 拍,3 个输入信号正常,最终表决值取中位数。第 3 拍时,测点 2 信号与其他测点信号差值超过 $LIMIT$,判断有误,测点 2 保存上一拍(第 2 拍)信号

数据,表决值取中位数。在信号序列为 5~7 拍时,测点 1 信号判断有误,进行故障计数;在信号序列为 8、9 拍时,测点 1 信号恢复正常,进行故障恢复。在这 5 拍中,测点 1 保存第 4 拍信号;在第 9 拍时,测点 3 有误,保存上一拍数据,再进行中位数操作获取表决值。在信号序列为第 10 拍时,故障恢复完成,正常表决,取中位数。

如表 3 所示,截取 13 mA 理论信号运行过程中某段信号序列展示该算法测点剔除和恢复功能。在信号序列为第 1 拍时,正常表决,取输入信号的中位数输出。在信号序列为第 2~6 拍时,测点 2 信号与其他测点信号差值超过 $LIMIT$,判断有误,测点 2 保存第 1 拍信号数据,表决值取中位数,并进行故障计数。在第 7 拍时,故障计数达到 max_error ,剔除测点 2 并持续 max_time 拍,如 8~12 拍,这 6 拍中输出表决值为测点 1 和 3 的平均数。在第 13 拍再次对测点 2 进行 $LIMIT$ 判断,未超过 $LIMIT$,测点 2 自动恢复,进行正常表决。若测点 2 仍然有误,则永久剔除该测点,并发送警报,直至运维人员进行手动复位。

表 3 测点剔除与恢复

Table 3 Measurement point exclusion and recovery

信号 序列	三通道模拟 输入信号			三通道测点的 故障计数			表决值
1	13.27	13.14	13.11	0	0	0	13.14
2	13.42	4.27	11.88	0	1	0	13.14
3	12.56	6.09	12.12	0	2	0	12.56
4	12.56	5.33	12.39	0	3	0	12.56
5	12.78	5.34	12.89	0	4	0	12.89
6	12.33	7.22	14.05	0	5	0	13.14
7	13.12	*	13.47	0	6	0	13.30
8	13.45	*	12.18	0	—1	0	12.82
9	13.41	*	12.78	0	—1	0	12.10
10	13.01	*	12.66	0	—1	0	12.84
11	13.07	*	15.77	0	—1	0	14.42
12	14.11	*	12.07	0	—1	0	13.09
13	13.27	12.78	13.23	0	0	0	12.78

如表 4 所示,截取 13 mA 理论信号运行过程中某段信号序列展示该算法安全值输出功能。当输入信号长期都处于超过 *LIMIT* 的阶段时,系统会发出警报,自动输出安全值。

表 4 安全值输出

Table 4 Safe value output function

信号 序列	三通道模拟 输入信号			三通道测点的 故障计数			表决值
1	*	*	*	—1	—1	—1	13.00
2	*	*	*	—1	—1	—1	13.00
3	*	*	*	—1	—1	—1	13.00
4	*	*	*	—1	—1	—1	13.00
5	*	*	*	—1	—1	—1	13.00

2.2 信号对比验证

通过对比平均数、中位数和所提表决策算法的错误率,验证所提算法输出的表决值更加可靠;对比阈值策略错误率(三冗余阈值判断方法错误率)和所提算法增加阈值操作的错误率,讨论提出的算法在核能控制系统中输出动作指令的安全性。

其中,平均值错误率和中位数错误率分别指对三通道测点数据求得平均数和中位数,该平均数或中位数作为输出信号值,与理想输入信号具有一定差值的概率。所提表决策算法的错误率是指通过多余度表决策算法表决值计算出来的输出信号值,与理想输入信号具有一定差值的概率。该差值设置为略小于 *LIMIT* 的 2 mA,符合工程应用的同时更能显示算法的可靠性。阈值策略错误率是指三冗余和阈

值策略下的动作输出错误率;而所提算法加阈值操作的错误率指将多余度表决策算法表决值增加阈值操作判断后得到的动作输出的错误率。根据不同的动作运行条件,工程中会设置不同的阈值,测试中的阈值设定为工程中常用的 8 mA,同时,设置 *FSVALUE_mA* = 8 mA。

1)测试信号介绍

根据实际工程中的数据形式,模拟实际的信号特征,将输入信号分为信号设定值、信号偏差值、信号故障值 3 个部分组成。

信号设定值指所测信号的理想值与噪声之和,设定 3 种常见工况,并取 1 000 次连续测点进行验证。信号 1 为恒定值为 10 的阶跃信号;信号 2 为起始点为 6,终止点为 10 的斜坡信号;信号 3 为幅值为 1,均值为 8,频率为 10 的正弦信号。同时,引入标准高斯分布模拟噪声。信号偏差值模拟信号采集偏差,指信号与设定值之间出现的小偏差,随机分布在指定区间内。信号故障值模拟设备故障,出现大偏差,以小概率随机分布在指定区间内。对 3 种信号设定值加上不同概率和范围的偏差值、故障值,构成仿真测试模拟信号,如表 5 所示。

表 5 输入信号概述

Table 5 Input signal overview

输入信号	偏差与故障值区间	偏差与故障概率
阶跃信号	偏差:±(4—7) 故障:±(10—20)	1. 偏差:5% 故障:0%
		2. 偏差:20% 故障:1%
		3. 偏差:25% 故障:5%
		4. 偏差:40% 故障:10%
斜坡信号	偏差:±(2—5) 故障:±(5—10)	1. 偏差:5% 故障:0%
		2. 偏差:20% 故障:1%
		3. 偏差:25% 故障:5%
		4. 偏差:40% 故障:10%
正弦信号	偏差:±(2—5) 故障:±(5—10)	1. 偏差:5% 故障:0%
		2. 偏差:20% 故障:1%
		3. 偏差:25% 故障:5%
		4. 偏差:40% 故障:10%

2)阶跃信号验证分析

对表 5 中的 4 种阶跃信号计算中位数错误率、平均数错误率、所提表决策算法错误率、阈值策略错误率和所提算法增加阈值操作的错误率。每类方法重复 10 次,并获取错误率的平均值呈现至表 6,其中序号 1~4 分别代表 4 种偏差与故障概率从小到大的情况。

表 6 中粗体为中位数错误率、平均数错误率、所提表决策算法错误率三者对比的最优值。可以看出,在低故障率的阶跃信号中,各方法的效果不相上下,而当故障率升高时,所提表决策算法能有效降低表决错误率,明显更优于其他算法;粗斜体为阈值策略错误率和所提算法增加阈值操作的错误率

对比的最优值,所提算法增加阈值操作的结果也更加优秀。

表 6 阶跃信号测试结果表

Table 6 Step signal test result table	%			
方法错误率	1	2	3	4
平均值错误率	0.12	5.08	14.4	26.5
中位数错误率	0.26	5.62	9.96	25.04
所提表决算法错误率	0.22	3.52	4.06	8.8
阈值策略错误率	0.1	3	5.92	14.02
所提算法+阈值操作错误率	0.06	0.9	1.36	3

同时,图 3 展示各方法间的错误率与误差棒结果对比,可以直观看出所提表决算法相较于其他传统方法具有更低的错误率。

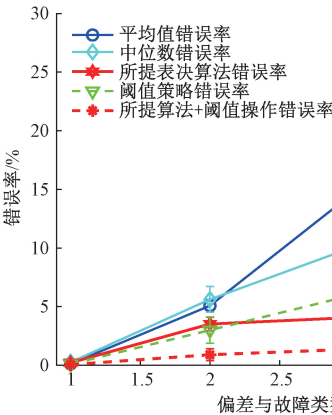


图 3 阶跃信号下不同算法错误率统计

Fig. 3 Error rate of different algorithms with step signal

3)斜坡信号验证分析

针对 4 种斜坡信号,重复阶跃信号验证流程,并将结果呈现至表 7。在斜坡信号中,所提表决算法错误率普遍低于平均数和中位数算法,所提算法增加阈值操作也比阈值策略效果更好。随着信号故障率的增加,所提算法的可靠性更加明显。

表 7 斜坡信号测试结果表

Table 7 Ramp signal test result table	%			
方法错误率	1	2	3	4
平均值错误率	0.78	6.08	16.48	26.5
中位数错误率	0.36	4.14	9.58	21.66
所提表决算法错误率	0.3	2.84	4.66	9.98
阈值策略错误率	7.44	11.1	13.26	19.06
所提算法+阈值操作错误率	7.08	9.28	9.22	11.58

同时,图 4 中展示各方法间的错误率与误差棒结果对比,所提表决算法具有更好的方法错误率。

4)正弦信号验证分析

针对 4 种正弦信号,重复阶跃信号验证流程,并将结果

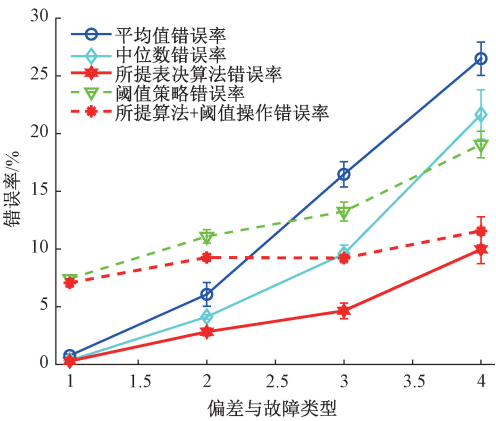


图 4 斜坡信号下不同算法错误率统计

Fig. 4 Error rate of different algorithms with ramp signal

呈现至表 8。在正弦信号中,所提表决算法错误率普遍低于平均数和中位数算法,所提算法增加阈值操作也比阈值策略效果更好。

表 8 正弦函数信号测试结果表

Table 8 Sine function signal test result table	%			
方法错误率	1	2	3	4
平均值错误率	0.72	6.98	15.54	26.58
中位数错误率	0.18	5.02	9.1	21.6
所提表决算法错误率	0.16	3.02	3.96	9.74
阈值策略错误率	8.98	12.74	14.8	22.26
所提算法+阈值操作错误率	8.24	10.62	10.24	13.86

此外,图 5 中展示各方法间的错误率与误差棒结果对比,所提表决算法错误率始终较低。

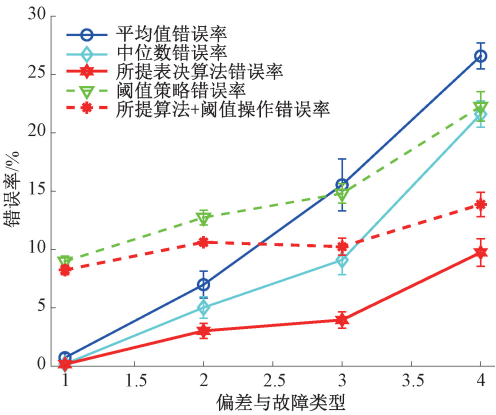


图 5 正弦函数信号下不同算法错误率统计

Fig. 5 Error rate of different algorithms with sine function signal

5)表决结果分析

在核能控制系统实际运行中,偏差和故障出现概率低,因此,图 6~ 11 分别展示阶跃、斜坡和正弦信号在偏差与故障类型 1(偏差:5% 故障:0%)与类型 2(偏差:20% 故

障:1%)的表决输出图。同时,与某测点信号输入进行对比,可以看出该表决算法能有效消除大跳变的故障值,并且大幅减少小跳变的概率,为后期核能系统动作控制、信号分析与故障处理提供更加简洁有效的输入数据。

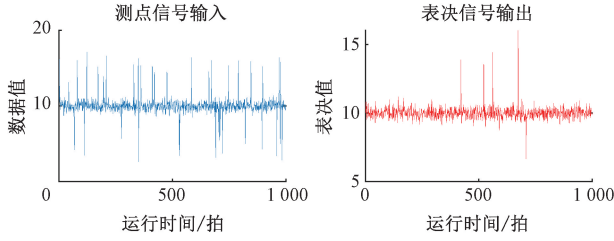


图 6 类型 1 阶跃信号某测点输入与表决输出图

Fig. 6 Figure of step signal input and voting output at type 1

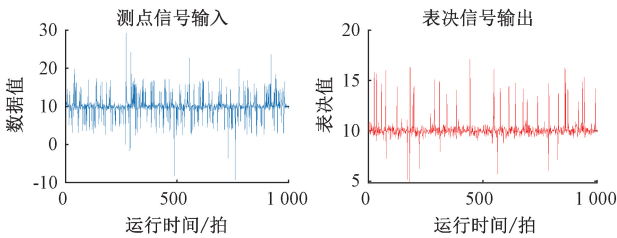


图 7 类型 2 阶跃信号某测点输入与表决输出图

Fig. 7 Figure of step signal input and voting output at type 2

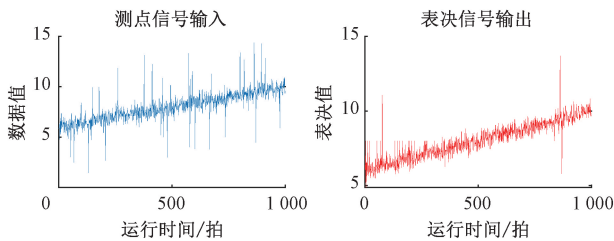


图 8 类型 1 斜坡信号某测点输入与表决输出图

Fig. 8 Figure of ramp signal input and voting output at type 1

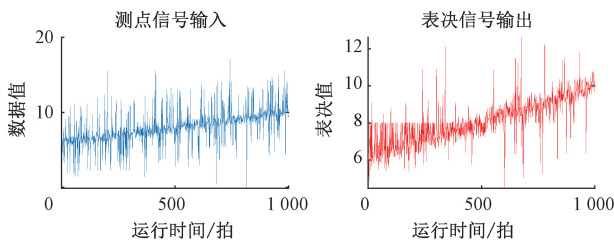


图 9 类型 2 斜坡信号某测点输入与表决输出图

Fig. 9 Figure of ramp signal input and voting output at type 2

2.3 算法效率讨论

算法的时间复杂度能够有效反映该算法的效率,而所提表决算法没有使用循环和递归,也不存在使得规模增加的变量,因此时间复杂度为 $O(1)$,即常数时间复杂度。

在实际应用中,系统的响应时间如式 (1) 所示。

$$T = t_1 + t_2 + t_3 \quad (1)$$

式中: t_1 指信号采集、测量或传输时间,理论值为 106 ms; t_2

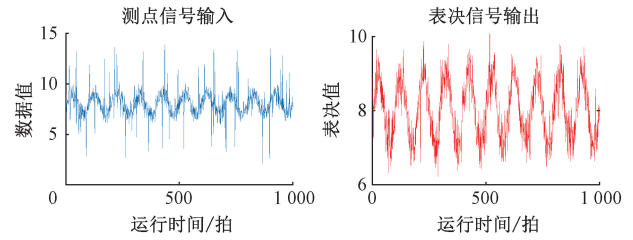


图 10 类型 1 正弦信号某测点输入与表决输出图

Fig. 10 Figure of sine signal input and voting output at type 1

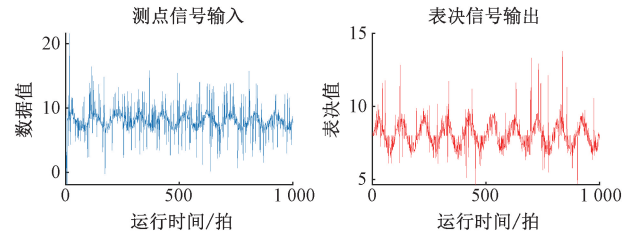


图 11 类型 2 正弦信号某测点输入与表决输出图

Fig. 11 Figure of sine signal input and voting output at type 2

指控制系统处理时间,即表决算法耗时; t_3 指执行机构动作时间,包括信号输出、执行机构响应等,理论值为 31.5 ms; T 指系统响应时间,需小于 500 ms^[19]。

通过测量信号对比验证中 120 次实验的算法运行时间,并计算平均的算法运行时间为 90.2 ms,可以获得 $T = 106 + 90.2 + 31.5 = 227.7$ ms,远小于 500 ms 的核能系统实时控制需求。

3 结 论

针对当前核能控制系统所采用的三冗余阈值判断方法在运行中表现出现的可靠性较差、自动化程度低下等问题,提出了一种基于投票机制的核能控制系统冗余度信号多级表决算法。该算法能有效降低各类信号的偏差和故障的影响,输出较为准确的表决值。同时,在阈值控制中,比当前使用的三冗余阈值判断方法更加有效可靠。除此之外,所提出的算法增加了故障点识别、计数、恢复和故障安全值设置等功能,增强算法整体的可靠性。通过模拟核能控制系统长期运行,有效验证了模拟信号冗余度表决算法的故障计数与恢复、测点剔除与恢复和故障安全值输出等功能。将所提表决算法与平均数、中位数和三冗余阈值判断方法等传统表决算法进行比较,验证提出的表决算法能有效降低错误率,证明了该算法有效提高核能控制系统在长期运行下的安全性和可靠性。同时,讨论算法时间复杂度和算法运行的平均用时,验证该算法满足核能控制系统的实时性需求,能应用于实际工程之中。

参考文献

- [1] WU ZH L, GAO ZH Q, LI D H, et al. On transitioning from PID to ADRC in thermal power plants[J]. Control Theory and Technology, 2021, 19:

- 3-18.
- [2] 吴宜灿,李亚洲,金鸣,等.第五代核能系统概念及其特征[J].核科学与工程,2021,41(2):201-210.
WU Y C, LI Y ZH, JIN M, et al. The concept and characteristics of the fifth generation nuclear energy system[J]. Nuclear Science and Engineering, 2021, 41 (2): 201-210.
- [3] 刘明星,马权,吴鹏,等.核能装备安全控制代码自动生成软件研发与应用的构想与成果展望[J].工程科学与技术,2024,56(2):1-16.
LIU M X, MA Q, WU P, et al. Automatic code-generation software for nuclear safety control systems: research framework and anticipated results [J]. Advanced Engineering Sciences, 2024, 56(2): 1-16.
- [4] 何瑶.四余度飞控系统信号表决算法研究[J].中国设备工程,2024(5):108-111.
HE Y. Research on signal voting algorithm of four-degree-of-freedom flight control system [J]. China Plant Engineering, 2024(5): 108-111.
- [5] 刘道清,扈红超,霍树民.容器云中面向持久化存储的拟态防御技术研究[J].计算机工程,2024,50(2):165-179.
LIU D Q, HU H CH, HUO SH M. Research on persistent storage-oriented mimic defense technology in container clouds[J]. Computer Engineering, 2024, 50 (2): 165-179.
- [6] 唐甜,张蕾,徐杰.某控制系统温度自适应表决算法[J].长江信息通信,2016(4):24-25.
TANG T, ZHANG L, XU J. An adaptive temperature vote arithmetic on control system [J]. Changjiang Information & Communications, 2016(4): 24-25.
- [7] PEIRAVI A, NOURELFATH M, ZANJANI M K. Universal redundancy strategy for system reliability optimization[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2022, 225: 108576.
- [8] 尹智勇,都业林,张哲,等.基于三取二冗余容错架构的数字逻辑单元设计[J].自动化仪表,2024,45(4):24-29.
YIN ZH Y, DU Y L, ZHANG ZH, et al. Digital logic unit design based on three-take-two redundant fault-tolerant architecture [J]. Process Automation Instrumentation, 2024, 45(4): 24-29.
- [9] 甘志强,高涛,匡昌武,等.区域自动气象站多传感器冗余观测技术设计与实现[J].电子测量技术,2022,45(5):33-38.
GAN ZH Q, GAO T, KUANG CH W, et al. Design and implementation of multi-sensor redundant observation technology in regional automatic weather station [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(5): 33-38.
- [10] 李克敏,常小凯.化工装置仪表气源三冗余设计思路[J].中氮肥,2022(2):62-65.
LI K M, CHANG X K. The design concept of three-redundancy for the instrument air supply of chemical process equipment[J]. M-Sized Nitrogenous Fertilizer Progress, 2022(2): 62-65.
- [11] 王颖,贾正强.基于高可靠性容错控制系统的余度管理设计[J].航空计算技术,2019,49(2):125-129.
WANG Y, JIA ZH Q. Redundancy management designing based on high reliability fault-tolerant control system[J]. Aeronautical Computing Technique, 2019, 49(2): 125-129.
- [12] 陈茜,高扬,曲翕,等.可变冗余架构四余度飞管计算机技术研究[J].微电子学与计算机,2021,38(9):67-73.
CHEN X, GAO Y, QU X, et al. Research on four redundancy flight control computer with variable redundancy architecture [J]. Microelectronics & Computer, 2021, 38(9): 67-73.
- [13] 严浩,田旭峰,李星瑶,等.模拟量信号阈值判断多样性设计[J].科技视界,2024,14(7):60-64.
YAN H, TIAN X F, LI X Y, et al. Design of diversity for threshold judgment of analog quantity signals[J]. Science & Technology Vision, 2024, 14 (7): 60-64.
- [14] 高振斌,贾广瑞,张文建,等.基于异常值的拟态裁决优化方法[J].计算机应用研究,2021,38(7):2066-2071.
GAO ZH B, JIA G R, ZHANG W J, et al. Mimic ruling optimization method based on executive outliers [J]. Application Research of Computers, 2021, 38 (7): 2066-2071.
- [15] 饶龙龙.基于神经网络与分类器融合的多层安卓恶意软件检测方法[D].天津:天津大学,2018.
RAO L L. Multi-layer android malware detection method based on neural network and classifiers fusion [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [16] 梁聚伟,李东亮,陈焰恺,等.基于LSTM阈值法的蒸汽动力辅助系统故障预警研究[J].舰船科学技术,2024,46(13):150-157.
LIANG J W, LI D L, CHEN Y K, et al. Research on fault prognostics and warning for steam power auxiliary systems based on LSTM and threshold method[J]. Ship Science and Technology, 2024, 46 (13): 150-157.
- [17] 余旭涛,吴威,牛刚.磁浮列车双冗余加速度传感器故障检测研究[J].仪器仪表学报,2023,44(10):138-144.

- YU X T, WU W, NIU G. Research on fault detection of double redundant acceleration sensor for maglev train[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(10): 138-144.
- [18] 赵砺行. 智能制造中的人工智能算法应用[J]. 电子技术, 2024, 53(12): 260-261.
- ZHAO L X. Application of artificial intelligence algorithms in intelligent manufacturing[J]. Electronic Technology, 2024, 53(12): 260-261.
- [19] 刘洋, 廖良记, 张向科. 数字化反应堆保护系统响应时间的评价方法研究[J]. 中国核电, 2020, 13(5): 606-610.
- LIU Y, LIAO L J, ZHANG X K. A response time evaluation method of reactor protection system implemented by DCS[J]. China Nuclear Power, 2020, 13(5): 606-610.

作者简介

张严, 硕士, 主要研究方向为装备故障诊断和优化算法。

E-mail: 2023223035104@stu.scu.edu.cn

苗强(通信作者), 教授, 主要研究方向为装备智能健康评估。

E-mail: mqiang@scu.edu.cn