

文章编号:1000-582x(2000)03-0125-06

·研究综述·

30

125-130

容错技术及其在过程控制中的应用

蒙建波, 罗辞勇, 张学通

(重庆大学工业自动化仪表研究所, 重庆 400044)

TP302.8
TP273

摘要:对过程控制中的容错技术进行了研究。从化工、电力、冶金等工业生产安全经济运行与控制需要出发,结合过程控制技术的发展现状,介绍了容错过程控制的基本思想。在对近年来容错技术在过程控制系统中的应用研究情况进行回顾与评价的基础上,综述性地提出了今后的若干研究发展方向。

关键词:容错;过程控制;人工智能;变结构系统;安全经济运行;现场总线

中图分类号:TP 272; TP 302.8

文献标识码:A

随着化工、电力、冶金等工业生产装置规模的日趋大型化和复杂化,生产的安全经济运行已日渐重要,对实施这一目的的过程控制系统也提出了更高的要求^[1,2]。一方面,在工艺系统出现某些异常情况时,如何实现许可极限条件下的继续运行,一俟异常工况消除后,迅速恢复到正常工作状态?另一方面,如何保证控制系统本身在一个或多个关键环节出现故障的情况下,避免生产装置的停车事故,确保生产装置继续安全、可靠地运行?已成为现代控制系统所面临和急需解决的重要问题。

容错,是指在系统中,当一个或多个关键部件出现故障时,系统采取相应措施,维持其规定功能,或在可接受的性能指标变化下,继续、稳定可靠运行的能力。对容错技术的研究,最早源于对生物体中天然存在的容错特性的模仿。由于国防、军工等特殊需要,容错技术首先在大型计算机等一类数字系统中得到了成功的应用^[3-7]。近年来,随着工业生产规模的日益扩大,对生产的安全、经济运行等问题日趋重视,对确保这一目的的自动控制系统的可靠性和有效性等也提出了更高的要求,由此,推动了对在过程控制领域中引入容错技术、实现容错控制的理论与方法的研究工作。

1986年,在以美国学者 A. H. Levis 等为首的 50 多位知名专家提出的一份题为“Challenges to Control”的

集体研究报告中,容错控制被列为当今和未来的 7 个挑战性课题之一,并被预言其将很快在飞行控制中得到应用^[8]。

近年来,伴随着微电子技术的进步,工业系统中的容错控制也逐渐成为热点。国内外学者纷纷在机械、汽车、交通网络,以及核电站、化工等相关领域开展了研究工作^[9-38,40,43-48]。如美国学者 E. Eryurek 等在控制器中采用并行处理结构对压水堆核电站蒸汽发生器给水调节系统的研究^[13];国内学者刘伟基于专家系统的故障诊断策略对醋酸乙烯合成反应过程的研究^[21];以及国内学者沈毅等利用多传感器间的冗余对造纸过程定量环节的研究^[22]等。但是,囿于传统控制思想和控制装置的客观限制,迄今为止,对生产过程容错控制的研究还局限在单个具体的对象或环节的实现上,缺乏从故障模式、诊断模型、容错控制机理、模型等方面系统全面的研究。正如文献[8]在当年所指出的那样,目前仍然尚缺乏一套可用于设计容错控制系统的理论上成型的方法,包括定性定量算法的结合,因此,这也正好是控制理论与人工智能的结合部。

现场总线仪表概念的出现和技术上的日臻成熟,客观上为实现过程控制系统的容错,提供了必要的条件。按照现场总线的概念,整个控制系统由以多个智能点构成的网络组成,整个网络可划分为以设备为中

· 收稿日期:1999-08-23

基金项目:教育部留学回国人员基金;重庆大学留学回国人员基金

作者简介:蒙建波(1964-),男,重庆市人,工学博士,主要从事控制科学与工程领域研究、开发工作。

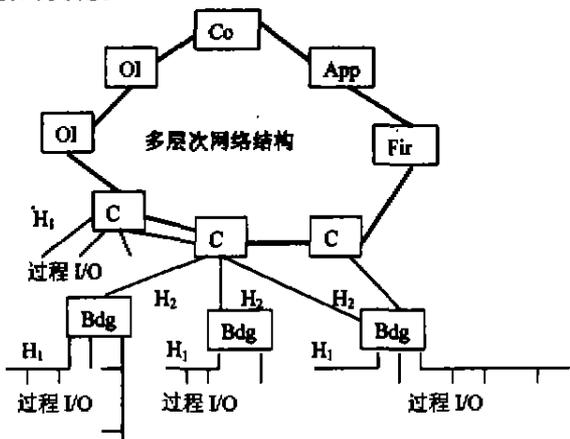
心的智能点构成的子网络,每个子网络又可划分为以实现相关参数控制的若干智能点所构成的下一层子网络。网络中各智能点为具备通讯、自诊断和参数检测或调节功能的总线智能仪表,各点间、各子网络间通过数据通讯相联系^[33,39,40,43,47,48]。

因此,容错过程控制问题就可描述为,在上述网络中,当一个或若干个智能点出现故障时,如何确保整个网络的稳定、可靠运行;或者,在子网络中或智能点中出现故障时(这时,将智能点再划分为更小的子点,相应于仪表控制装置的功能模块划分),如何及时进行替换处理,使之不致影响整个网络的运行。与实际系统相对应,上述划分分别相应于过程控制系统的全系统容错,有关控制回路的容错,以及仪表控制装置的容错三个层次。

1 过程控制的现状

伴随着科学的发展与技术的进步,过程控制走过了以基地仪表为主的分散就地控制(20世纪40年代前后)、以单元组合仪表为主的集中控制(20世纪50~70年代)、和以计算机为核心的集中-分散控制(DCS)的三个阶段^[1,2]。

近年来,随着人工智能和计算机技术的飞速发展,过程控制正经历着从DCS向以网络通讯为基础、以智能分散为特征的现场总线仪表控制(FCS)的方向发展的新阶段。过程控制的这种从“分散”到“集中”、再走向“分散”的发展模式,正好顺应了人的认识规律从“简单”到“复杂”、再从“复杂”到“简单”的螺旋上升形式。相应于这一新的控制框架模式,过程控制正面临着一场新的变化。



Co:协调管理器; H₁:现场低速总线; App:应用平台;
H₂:现场高速总线; Fir:防火墙(网络安全关口); OI:
操作员界面; Bdg.:网桥; C:子网控制器

图1 FCS的网络层次结构

现场总线仪表概念,是借鉴计算机网络通讯形式发展起来的一种数字化仪表构成规范。它强调仪表作为过程控制系统中一个智能点的自主管理能力、除要求具备常规的变换处理功能外,还要求其具备通讯、自诊断和自调整等功能,各智能点通过双向数据通讯相联系,相应于各工艺点对控制功能的要求,构成以设备为中心的若干子网络,再由这些子网络构成整个生产过程自动控制系统网络,在系统层,实现各分散智能点、各子网络间的相互协调,就恰如一个组织有效、反应迅速的人类群体对生产过程的有效组织和管理的形势一样^[42]。FCS的网络层次可由图1示意^[33,39]。

2 容错过程控制的基本思想

过程控制系统的容错,指的是当构成系统的某一个或若干个仪表控制装置,如温度、压力、流量、成份等检测仪表,以及控制器、电动或气动调节阀等执行机构出现故障时,系统采用其他正常仪表、或利用相关算法,确保被控过程系统继续保持规定性能指标或在可接受的性能降级指标下,继续稳定运行的能力。相应于对故障处理所采用的方法,容错可划分为硬件容错(硬件冗余)和软件容错(软件冗余,又称解析冗余)两种基本类型。

实现容错过程控制的前提是对所出现的故障进行检测、并诊断出故障的部位及类型,然后采取对故障的相应处理策略。正在兴起的现场总线仪表,可望在现场级具有这样的功能,但在回路和网络系统级,尚需有一套专门的协调处理硬件和软件,用于实现系统的容错。

故障检测与诊断的目的,是发现故障、给出故障信息、并确定出故障的发生部位、类型、大小、同时自动地隔离故障等。从故障的类型看,偶然性故障,应是故障检测与诊断的重要问题,也是容错控制研究所针对的主要对象。

实现故障检测与诊断的基本方法可划分为参数法和非参数法(也称基于模型的方法)等两大类。其中,参数法已在现有的DCS系统中广泛应用^[24,25],后者的研究,可参见有关文献^[19,27]。

对故障的控制或处理策略,是实施容错控制的核心。它的目的是,针对故障的部位、类型和程度,决策

• ①Elsag-Bailey, INFI-90 DCS, 1994; ② Foxboro, I/A series open industrial systems, 1992; ③ SIC, Technical documents, Sichuan Instrument Corp., Chongqing, 1997; ④ Rockwell Automation, ProcessLogix Process Systems, 1998.

出处理故障的方案,并付诸实现。这包括以下两种形式:

1) 在故障存在的情况下,隔离出现故障部分,并重新组织系统结构(称为系统重构),使系统性能指标无变化;

2) 在可接受的的性能降级指标范围内,继续稳定运行的处理。很明显,两种形式均要求系统具有一定的冗余性。

需要指出的是,尽管容错控制的目标是使在系统出现故障时,重构后的系统应尽量接近原有系统的性能,但有时,为避免生产停车等事故带来的巨大经济损失,以牺牲部分性能指标来换取系统的继续稳定运行,为适时抢修、恢复原系统创造条件,也是值得的。

与正常控制系统一样,容错控制系统也存在稳定性问题,有些文献也将其称之为鲁棒性^[18, 21]。

过程控制系统的冗余配置包括硬件冗余和软件冗余(也称功能冗余)两种基本类型。从结构上讲,两者都是由并行结构的多个信息处理系统构成,其中,每一个信息处理系统具有相同的功能目标,这一目标可以是产生一个控制信号(相应于控制器或调节阀的情形),或预测一个过程参数(相应于检测仪表情形),如图 2 所示。

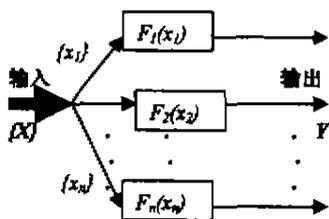


图 2 冗余配置的并行结构

图中, $\{X_n\}$ 为第 n 个输入参数子集, $F_n(X_n)$ 是第 n 个处理器的算法, Y 为输出。

硬件冗余,可以看作是如下最简单的并行结构方式,即:

$$|X_1| = |X_2| = \dots = |X_n| \quad (1)$$

$$F_1(X_1) = F_2(X_2) = \dots = F_n(X_n) = Y \quad (2)$$

它采用相同的输入参数子集和处理算法。这种并行方式意味着容错能力仅仅是通过物理地隔离故障、对故障部件进行切换来改进。目前,工业应用中的各种 DCS、PLC 系统,在控制模块、输入输出模块、通讯模块、电源模块等部件中均普遍采用了这种硬件冗余方法。习惯上,也称其为热备用方法^[24, 25](可参见前 * 注)。

软件冗余,是借助于使用不同的过程参数测量集,

配合不同的处理算法来实现,即:

$$|X_1| \neq |X_2| \neq \dots \neq |X_n| \quad (3)$$

$$F_1(X_1) \neq F_2(X_2) \neq \dots \neq F_n(X_n) \neq Y \quad (4)$$

不难看出,这种并行处理结构,将提供 n 个可能的用于产生输出 Y 的解决方法,由此而产生的输出 Y 的潜在可靠性大于上述的硬件冗余方式。另外,采用过程测量参数的不同组合 $|X_i|$ 及不同处理算法 $F_i|X_i|$,将使得整个系统的容错能力大大增强。这是因为,一个或多个输入参数故障及算法中的差错的出现,并不会影响那些未采用这些故障信号的正确处理算法得出正确的输出结果。

由于相应于每一算法的各个输入参数子集中可能包含某些相同的信号,因此,无法实现对每一个信号的可能故障的容错。此外,这种结构的容错是以增加输入环节的冗余配置为前提的。

由于这种结构通过处理方案的多样性来增强系统的容错能力,它无需对硬件的物理隔离,因而可方便地引入过程参数检测和过程控制装置及系统中,实现可变结构的检测与控制(V-I&C)。

3 应用实例

3.1 A-B PLC 中的硬件容错技术

罗克韦尔自动化公司(Rockwell Automation)新近推出的一种名为 ProcessLogix 的全新 PLC 系统,在硬件模块、通讯网络、服务器和控制器上,广泛采用了硬件冗余技术。该产品宣称可以使控制工程师在实现以传统的 DCS 模式为核心的基于服务器的控制系统的同时,还能享有基于 PLC 的控制方案所具有的灵活性和经济性。

ProcessLogix 系统的典型冗余配置如图 3 所示。

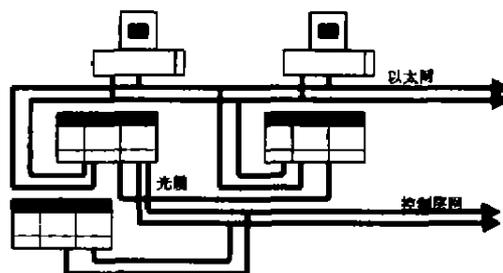


图 3 A-B ProcessLogix 系统的典型冗余配置

图中,在模块级,可进行任意模块的带电插拔、标准模块和专用模块的故障检测(自诊断);在网络级,系统设计者可以有选择地对通讯网络、服务器和控制器进行冗余配置,冗余配置的模块间通过光缆进行通讯

协调。

3.2 合成醋酸乙烯反应过程中的容错控制

文献[23]提出了一种基于专家系统的容错控制方案,并将其具体于醋酸和乙炔在流化床中合成醋酸乙烯反应过程。如图4所示。

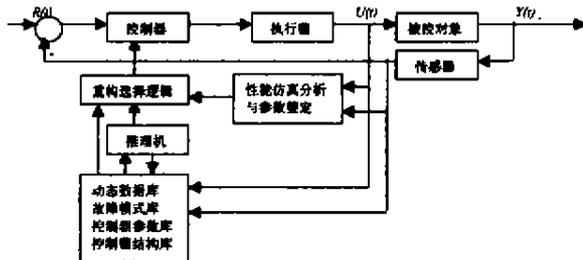


图4 基于专家系统的容错控制系统

图中,容错控制系统主要由动态数据库、基本控制器库、过程故障模式库、推理机以及控制性能仿真分析程序等部分组成。其所完成的基本任务是:根据所诊断的工艺系统的故障情况,完成对控制系统的变结构重组运行。据该文介绍,此系统对两种工艺故障的试验情况运行良好。

3.3 造纸过程定量环节的容错控制

文献[22]针对造纸过程控制中所使用的定量传感器精度较低和可靠性较差等问题,提出了利用多传感器间的冗余关系,首先对传感器的运行状态及故障进行监测与诊断,并进而实现造纸过程定量环节的容错控制。在该系统中,设计者使系统利用两组状态观测器交替地完成打浆度估计和传感器故障诊断的任务。在传感器正常时,可不断估计打浆度的值,从而提高系统的控制性能;一旦诊断出传感器故障,仍可用已估计的打浆度值,继续利用检测的负压值,对纸张绝干量进行间接控制,只不过此时的控制性能可能要稍差一些,但定量环节的容错控制得以实现。

其他的应用研究例子还很多,可参看文献[9~38,40],此处不再一一列举。

4 容错技术在过程控制中的研究方向

随着现场总线技术的发展和逐步成型、完善,容错正在成为过程控制装置与系统的一个重要功能之一。从信息本质看,各类自动化仪表控制装置实质上都是一个信息变换系统^[41]。检测仪表将生产过程的状态信息变换为便于控制器采用的形式;控制器将预期的控制效果,依据一定的规则,变换为便于执行器采用的形式,并最终通过其调节生产状态。因此,任何满足上述信息变换要求的变换方案均可采用。这就为采用并

行处理结构的容错仪表控制装置,客观上提供了基本条件。

预计未来容错技术在过程控制中的研究和发展将包括以下6个方面的内容:

1) 继续深入研究化工、电力、冶金等一类连续工业生产的安全经济运行对过程控制系统的要求,应用智能模拟原理和方法,结合现场总线仪表的思路和不断涌现的新技术,探讨形成新一代完整的仪表过程控制装置的设计与构想;

2) 对单参数检测仪表,探讨在一次元件发生故障或出现异常时的信号诊断形式,引入预测技术,对故障状态时的参数进行替换处理;

3) 对多参数组合检测仪表(或称软性检测仪表),探讨基于软件并行处理的功能冗余的处理方式,运用检测理论和方法^[41],结合预测技术,实现容错;

4) 对控制仪表和装置,研究除采用成熟的硬件冗余技术外,一方面,采用检测理论的原理和方法,实现在部分检测仪表故障情况下的替代处理;另一方面,引入模糊控制、神经网络控制等新型控制算法,结合常规及自适应控制理论和方法,实现功能冗余的并行可变结构控制,最终实现容错控制;

5) 对执行器而言,随着现场总线技术的发展,其最终将与控制器合为一体,但对执行部分(即调节阀)的容错,从结构上仍需探求,着重点应放在硬件功能的冗余和满足某些特殊要求的数字执行器上;

6) 针对大型化工、电力、冶金等工业生产的安全经济性运行需求,研究总结由具备容错功能的网络化、模块化仪表控制装置,构建容错控制系统的系统集成理论和方法。一方面,从中探索出新一代容错总线控制系统(FT-FCS)装置本身的系统结构和实现形式;另一方面,结合特定的工艺要求,总结出相应各类连续生产过程实现容错控制的理论和方法,并从应用中获得更新研究的推动力,进一步促进容错仪表控制理论的形成与完善。

5 结束语

过程控制中的容错技术,是一项涉及人工智能、计算机科学、自动化科学及相关生产领域等多个学科领域综合的技术集成。它的应用,不仅将有效地提高相关工业生产领域的自动化水平,促进工业仪表与自动化装置的技术进步,同时,也将为控制理论与人工智能等学科的结合,提供新的生长点。

参 考 文 献

- [1] SHINSKEY F G. Controlling Multivariable Processes[M]. North Carolian: ISA, 1981. 151 ~ 161.
- [2] WILLIAMS T J. The Use of Digital Computers in Process Control [M]. North Carolina: ISA, 1984. 155 ~ 169.
- [3] 陈廷槐. 数字系统的诊断与容错[M]. 北京:国防工业出版社, 1981.
- [4] 疏松桂. 控制系统可靠性分析与综合[M]. 北京:科学出版社, 1992.
- [5] 高为炳. 变结构控制基础[M]. 北京:科学出版社, 1989.
- [6] SPITZER CARY R. 数字式航空电子系统[M]. 陆润生译. 北京:航空工业出版社, 1992.
- [7] 王珍熙. 可靠性、冗余及容错技术[M]. 北京:航空工业出版社, 1991.
- [8] LEVIS A H. Challenges to Control: A Collective View[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1987, 32(4): 274 ~ 285.
- [9] 程一. 提高闭环控制系统的可靠性[J]. 控制与决策, 1989, 3(5): 57 ~ 64.
- [10] MAKANSI J. Special Report: Information Technology for Powerplant Management[J]. Power, 1995, 139(6): 41 ~ 72.
- [11] HAEGGLUND T. Modern Controllers Supervise Valves Automatically[J]. InTech, 1996, 43(1): 44 ~ 46.
- [12] TODUNOGLU S. Fault-tolerant Control of Mechanical Systems [A]. Proc of 1995 IEEE 21st Int Conf on Industrial Electronics, Control and Instrumentation[C]. USA: Orlando, 1995. 127 ~ 132.
- [13] BORODANI P. Minimum Risk Evaluation Methodology for Fault Tolerant Automotive Control System [A]. Proc of the 1995 4th Int Conf on Applications of Advanced Technologies Transportation Eng[C]. Italy: Capri, 1995. 552 ~ 557.
- [14] CHANG T. Fault Tolerant Control of Traffic Networks[A]. Proc of the 1995 IEEE Conf on Control Applications[C]. USA: Albany, 1995. 119 ~ 124.
- [15] ERYUREK E. Fault-tolerant Control and Diagnostics for Large-scale Systems[J]. IEEE Trans on Control Systems, 1995, 15(5): 34 ~ 42.
- [16] BANERJEE S. AI in Chemical and Process Industries[J]. Chemical Eng World, 1995, 30(7): 105 ~ 108.
- [17] 袁立嵩. 多变量系统二次稳定性容错控制问题的研究[J]. 自动化学报, 1996, 22(6): 687 ~ 692.
- [18] 柴天佑. 随机多变量系统的自适应容错控制[J]. 自动化学报, 1995, 21(4): 476 ~ 479.
- [19] 周东华. 基于模型的控制系统的故障诊断技术的最新进展[J]. 自动化学报, 1995, 21(2): 244 ~ 247.
- [20] 黄献青. 离散时间系统容错控制[J]. 控制理论与应用, 1996, 13(1): 36 ~ 39.
- [21] 孙金生. 离散系统鲁棒容错线性调节器设计[J]. 控制与决策, 1996, 11(1): 68 ~ 72.
- [22] 沈毅. 造纸过程定量环节容错控制方法研究[J]. 控制理论与应用, 1996, 13(6): 333 ~ 340.
- [23] 刘伟. 基于专家系统的容错控制及在合成反应过程中的应用[J]. 化工自动化及仪表, 1996, 23(5): 13 ~ 16.
- [24] 鲁敏. 过程控制系统中的容错技术[J]. 华北电力学院学报, 1996, 23(1): 92 ~ 94.
- [25] 董春利. 三重冗余容错结构可编程控制器[J]. 自动化仪表, 1992, 13(4): 38 ~ 40.
- [26] BINDER E. Diagnosis and monitoring of electrical power plant components[J]. Elektrotech Int Tech, 1996, 113(2): 133 ~ 138.
- [27] BLANKE M. Fault-tolerant control systems- a holistic view[J]. Control Engineering Practice, 1997, 5(5): 693 ~ 702.
- [28] BORODANI P. Minimum risk evaluation methodology for fault tolerant automotive control system[A]. Proc of the 1995 4th Int Conf On Applications of Advanced technologies Transportation Eng[C]. Italy Capri, 1995.
- [29] CHANG T. Fault tolerant control of traffic networks[A]. Proc Of the 1995 IEEE Conf On Control Applications[C]. USA: Albany, 1995. 119 ~ 124.
- [30] GREBE E. Power station and network, a homogeneous system [J]. VGB Kraftwerktech, 1996, 76(1): 23 ~ 26.
- [31] GRUHN P. The evaluation of safety instrumented system[J]. ISA, 1996, 35(2): 127 ~ 136.
- [32] HARASHIMA S. Fault-tolerant subway passenger information control system[A]. Proc of the 2nd Int Symp On Autonomous Decentralized Systems[C]. USA: Phoenix, 1995. 80 ~ 85.
- [33] HODSON W R. How fieldbus will affect DCS architecture[J]. InTech, 1996, 43(11): 50 ~ 53.
- [34] HU S. On fault-tolerant functional observer[A]. Proc Of 1994 American Control Conf[C]. USA: Baltimore, 1994. 260 ~ 264.
- [35] JOHNSON. Automated fault insertion[J]. InTech, 41(1): 1994, 42 ~ 43.
- [36] KOPETZ H. Communication infrastructure for a fault-tolerant distributed real-time system[J]. Control Eng Practice, 1995, 3(8): 1139 ~ 1146.
- [37] ROCHET R. Efficient synthesis of fault-tolerant controllers[A]. Proc of the European design and Test Conf[C]. France: Paris, 1995.
- [38] SADEHI J. Integrated fault-tolerant control law[A]. Proc of IEEE 1995 National Aerospace and electronics Conf[C]. USA: Dayton, 1992.
- [39] FF. Foundation field-bus and its technology[M]. North Carolian: ISA, 1997.
- [40] 罗辞勇. 基于现场总线的容错控制[D]. 重庆:重庆大学工业自动化仪表研究所, 1998.
- [41] 朱麟章, 蒙建波. 检测理论及其应用[M]. 机械工业出版社, 1997.

