

文章编号:1000-582X(2001)06-0056-04

# 复杂流程工业人机系统可靠性分析

马笑潇,黄席樾,黄敏,倪霖

(重庆大学自动化学院,重庆 400044)

**摘要:**随着研究对象由小系统到大系统乃至复杂巨系统的演变,传统的系统可靠性理论已经很难适应复杂大系统对可靠性的要求。笔者在分析了流程工业的特殊性之后,阐述了针对复杂流程工业进行系统可靠性研究的必要性。并给出了流程工业人机系统可靠性分析的框架模型,认为复杂流程工业应该从人、网络传输、软件和设备硬件4个方面综合研究,并对每一部分的可靠性研究进行了论述。

**关键词:**现代集成制造系统;流程工业;可靠性;人机一体化

**中图分类号:**TP 11

**文献标识码:**A

始于50年代末的可靠性问题的研究,经历了从零部件的可靠性测试到系统可靠性分析的历程,至今已形成了一套以概率论、数理统计及随机过程为基础的较为完备的理论体系,对系统可靠性的描述、分析、评测和控制已经形成了专门学科——可靠性工程学<sup>[1]</sup>。但随着研究对象由小系统到大系统乃至复杂巨系统的演变,原有的系统可靠性理论已经很难适应复杂大系统对可靠性的要求。必须在传统的可靠性分析方法的基础之上,运用系统工程的观点和大系统的理论来研究复杂系统的可靠性问题。流程工业的现代集成制造系统是一类复杂的人机系统,由于CIPS的实施和维护需要巨大的人力、物力和资金的投入,因此,研究复杂流程工业的可靠性建模、预测、分配、优化和决策具有重大的理论价值和实际效益。笔者在充分分析了复杂流程工业对可靠性的特殊需求之后,给出了对这类系统进行可靠性分析的框架体系,指出了体系中每一部分进行可靠性分析的研究内容。

## 1 复杂流程工业的特点及可靠性要求

流程工业强调生产过程的整体性和连续性,具有批量生产、物流和能流连续、物料传输密闭以及运行环境恶劣的特点<sup>[2]</sup>。流程工业的生产过程是一个多约束、多目标、复杂递阶结构的大系统,集成了信息流、物质流和能量流,而且伴随着复杂的物理化学反应,存在

较强的突变性和不确定性,因此对复杂连续工业系统的集成具有更高的可靠性要求。与离散工业比较,流程工业CIPS还具有如下特点:

1) 流程工业的CIPS是在一定环境和组织结构中组成的复杂分布式人机(计算机、生产及控制设备)系统。因此必须运用人-机一体化的思想<sup>[3]</sup>,从人-机工程学的角度,研究系统集成和优化过程中人机协同的可靠性。

2) 流程工业的生产是连续的,因而强调生产过程的整体性,要求把不同装置和生产过程连接在一起成为一个整体。各个设备的优化不等于全厂处于最优,因而既要求局部生产单位的可靠性又要求实现全局最优可靠性。

3) 生产装置间通过密闭的管道连接,物流连续,产品状态难以直接观测,生产线中无缓冲单元,或者只有复杂而有限的中间存贮措施。这为进行可靠性分析的知识发现和实时故障诊断和解除带来了一定的困难。

4) 流程工业生产追求均衡、平稳、低耗、安全,为实现最优控制,须及时调整工艺参数,设定控制点等,因此生产要求具有很大的灵活性,这在客观上增加了系统可靠性研究的难度。

5) 流程工业中,离散决策变量与连续决策变量共存,系统内既包括连续过程变量,如生产过程;也包括离散过程变量,如生产方案的切换、调度指令的下达、

收稿日期:2001-05-14

基金项目:国家教育部博士点基金资助项目(99061116)

作者简介:马笑潇(1975-),男,山东临沂人,重庆大学博士研究生,从事人工智能与模式识别、现代集成制造系统等方面的研究。

随机事件的引入、生产装置的切换等,所以生产过程是一个混杂系统。对这种混杂系统的研究必须运用大系统的理论进行。

6) 流程工业常常处于十分恶劣的生产环境,生产的可靠性和安全性被放在最重要的位置,对一些关键设备和关键生产过程必须有故障预报、紧急避险措施以及非正常情况下的顺序自启停和连锁保护系统,以保证人身和设备的安全。这对复杂流程工业可靠性研究提出了特殊要求。

7) 实现流程工业的 CIPS,要求实时在线采集生产数据、工艺质量数据、设备状态数据等,并且要处理大量的动态数据,因此对计算机网络和数据库的实时性和可靠性提出了更高的要求。

综上所述,系统可靠性已经成为在流程工业中实施现代集成制造系统成败的关键,在研究清楚了 CIPS 的体系结构和实施方法之后,应该把研究的重点转向实施过程和正常运行时的可靠性分析上来,力求做到 CIPS 工程实施一个就确保成功一个。

## 2 流程工业系统可靠性的定义

国家标准中对可靠性的定义是一个面向产品的测试性指标:“产品在规定条件下,规定时间内,完成规定功能的概率”<sup>[1]</sup>。这个定义包含了5个方面的内容:对象、条件、时间、功能和能力。该定义隐含了如下假定:

对象即系统的结构,是确定不变的;

规定环境条件和系统使用时间是明确的;

规定的功能是通过性能指标反映的,必须可量化计算和可实际测量;

完成规定功能的能力评判是二值的,即要么正常,要么失效。

可靠性考核的前提是:研制的系统必须有批量,并进行抽检。流程工业的上述特点对以上5个假定难以全部满足,对批量检验的前提要求更难以实现。例如,CIMS 强调系统的可扩展性,也就决定了系统的结构是不能一成不变的;流程工业,特别是复杂流程工业如核电厂、炼油厂等生产环境比较恶劣,工况复杂多变,对于一个复杂系统已经不能用简单的正常和失效来判断其可靠性,对可靠性的描述具有一定的模糊性和分布性。因此复杂系统的可靠性需要用系统的观点和工程大系统的理论进行研究。

关于可靠性及失效、故障等相关主题,Rees<sup>[4]</sup>和 Parhami<sup>[5]</sup>等人在其论文中都有过精辟的论述。Yellman<sup>[6]</sup>对其概念的内涵和外延做了进一步的扩展。总结这些人的见解,系统可靠性可以做以下定义:系统

可靠性是指系统在初始规定的条件下,在其寿命周期内实现预期功能的状态和准确度。这样定义的可靠性顺应了流程工业 CIPS 等大系统的特点,有利于运用大系统的理论研究这类系统的可靠性问题。

## 3 复杂流程工业可靠性分析框架

流程工业集成生产系统的功能结构模型通常具有3个层次(有时进一步划分为5个层次<sup>[7]</sup>):即经营决策层、生产调度层和过程监控层。实现上述3层功能的两个支撑系统是实时数据库管理系统和计算机网络系统。与之相一致,笔者认为:复杂流程工业的可靠性研究也需要进行递阶分解,采用从上到下正向分解和自下而上逆向求解的方法,充分考虑系统的内外环境因素,在整个大系统范围内分层研究。可靠性研究可以分成系统级、单元级和零部件级。上述三级在结构上构成了如图1所示的可靠性分析框架体系。

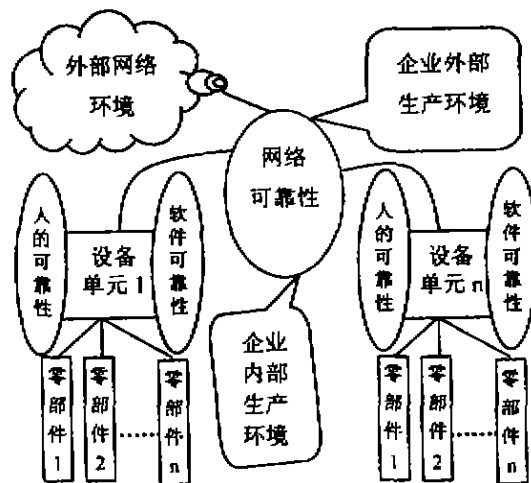


图1 流程工业可靠性分析框架

该体系由以下4个方面有机构成:人(操作员)的可靠性、网络传输的可靠性、软件可靠性、及零部件产品的可靠性。上述4个部分相互关联、相互影响,成为研究复杂流程工业可靠性的核心问题。

### 3.1 人的可靠性分析

流程工业的 CIPS 本质上是一个在一定环境和组织结构中的复杂人机系统,对其可靠性的研究也必须运用人机一体化的思想。所谓人机一体化是指以人-机一体为技术路线,人与机械共同组成一个系统,各自执行自己最擅长的工作<sup>[3]</sup>。这样构成的人机一体化系统在感知、思维、执行等层面上实现整体综合(Metasythesis)一体化。其核心是强调人在系统回路

(Man in loop) 中的重要性。目标是寻求人机最佳协同合作<sup>[1]</sup>。既然人在系统中处于如此重要的地位, 研究系统中人的可靠性就显的尤为必要了。

据不完全统计<sup>[6]</sup>, 人的失误成为造成系统失效的原因的份额占满功率运行的核电厂事故的 50% 以上, 占低功率运行或停堆期间事件的 70%; 近海石油钻探中人误导致的事故占 70%; 由于飞行员判断失误造成商业航班空难的至少占 50%—80%。随着硬件及设备本身的可靠性日益加强, 人的失误对于系统失效的作用相对来说就更加重要了。这种贡献不仅仅与有限的系统失效有关, 而且也与重大的灾难事故有关。例如, 印度 BHOPAL 化工厂毒剂泄漏、美国三哩岛堆芯熔化事故、切尔诺贝利核放射性物质大量释放灾难性事故、挑战者号航天飞机失事等。

人的可靠性分析(Human Reliability Analysis, HRA)是以分析、预测、减少与预防人的失误为研究核心, 以行为科学、认知科学、信息处理和系统分析、概率统计等理论为基础, 对人的可靠性进行分析和评价的新兴学科<sup>[3]</sup>。HRA 可以作为一种预测性工具, 从定性和定量两个角度对人—机系统中人的可能性失误对系统正常功能的影响作出评价。HRA 还可以作为一种设计、改进或再改进系统的工具, 以便将重要的人的失误概率减少到系统可接受的最小限度。

笔者认为, 研究人的可靠性仅仅通过对人的可靠性数据的收集和整理, 来探究人自身的失误机理并预测人的失误概率是不够的, 还应该将人视为系统的一个部分, 从系统其他部分的设计如何有利于减少或避免人可能造成的失误的角度来构建复杂流程工业的可靠的人机智能系统。

### 3.2 网络传输的可靠性

一个复杂的流程工业系统要实现信息流、物质流和资金流的综合集成, 必须依托于一个实时、稳定、畅通、健壮的网络系统。因此网络可靠性成为衡量现代集成制造系统的一个重要的整体指标。网络的可靠性不仅与通讯设备、链路有关, 而且与网络的拓扑结构紧密相关。由于流程工业涉及比较复杂的底层过程控制系统, 相对于离散工业, 其底层的网络控制系统的可靠性显得尤为重要。流程工业 CIPS 的网络结构一般具有如下图所示的 3 层结构: 企业信息网、车间级现场总线、现场仪表级网络。

流程工业的 CIPS, 需要在线采集、传输、加工和存储大量的实时生产数据、工艺质量数据和设备状态数据, 因此计算机网络和网络数据库的实时性和可靠性是至关重要的。由于复杂流程工业的控制级设备和仪

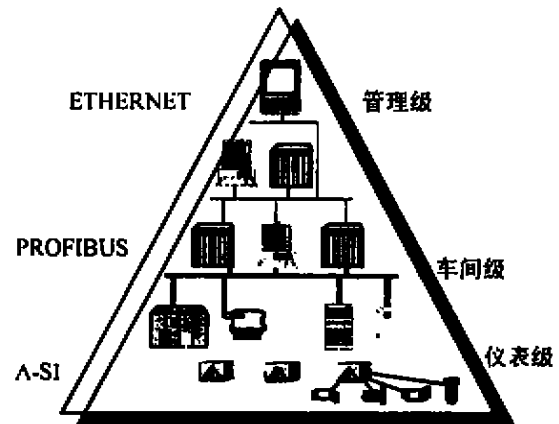


图 2 流程工业的一般网络体系

表通常分布在现场, 周围环境比较恶劣。甚至有些远离厂区的设备必须通过无线传输, 这对网络的可靠性提出了更高的要求。

### 3.3 软件的可靠性

随着流程工业 CIPS 的发展, 企业的信息的采集、存储、知识的加工和集成越来越依赖于庞大的软件系统。软件可靠性不同于一般产品的可靠性, 其失效率随使用修改次数的增加呈极线式衰减, 直至降低到失效率为零。由于软件的技术含量很高, 其测试手段又相当复杂, 全方位的测试运行有一定的困难, 因此对软件可靠性研究至今仍未引起高度的重视。对于复杂流程工业的软件系统的可靠性设计应该从以下几个方面着手:

1) 在数据通信或采集过程中, 为防止干扰信号的窜入, 除了在硬件上采取隔离与滤波措施之外, 可以考虑加上一定的软件滤波算法及防止信息丢失的信息冗余算法。

2) 从处理数据的可靠性、保密性、安全性和抗病毒能力的角度选择适用的计算机操作系统。

3) 流程工业涉及大量的分布式实时数据, 要求数据库管理系统适应动态数据的实时存取和分布式管理的客观要求。

4) 软件结构应严格使用模块化设计, 接口定义要简单明确, 注释要清楚, 调试记录要完备。程序代码要避免使用运行有二义性的语句。

5) 建立专用的数据结构类型。

### 3.4 设备硬件的可靠性

设备硬件的可靠性是系统整体可靠性的物质基础, 无论是电子模件还是机械零件都应该经过严格的可靠性测试, 要确保符合相应的国家标准。另外一个可能影响硬件可靠性的地方在于零部件的组装和系统

装配过程。这中间要充分注意电磁屏蔽、光电隔离、安全接地等问题,采用关键设备的冗余设计是提高系统硬件可靠性的一种普遍采用的方法。

随着机械加工水平的日益提高,集成电路设计技术的进步,只要企业严格把关,购进的设备的可靠性已经不再是流程工业 CIPS 整体可靠性的关键,制约其系统可靠性因素转向大系统集成后带来的网络、人、软件的可靠性问题上。

#### 4 结 论

流程工业强调生产过程的整体性和连续性,具有批量生产、物流和能流连续、物料传输密闭以及运行环境恶劣的特点。CIPS 的实施和维护需要巨大的人力、物力和资金的投入,这决定了深入研究这类系统的可靠性具有重大的意义。由于复杂流程工业不能完全满足传统可靠性定义的隐含假设,因此对这类系统必须开辟新的研究方法。笔者运用系统工程的观点从大系统的角度提出了复杂流程工业可靠性研究的一般结构模型,从这类系统中人、网络、软件及硬件设备 4 个方

面的可靠性进行了全面阐述。

#### 参考文献:

- [1] 李德毅,于全,江光杰. C3I 系统可靠性、抗毁性和抗干扰的统一评测[J]. 系统工程理论与实践,1997(4): 23 - 27.
- [2] 赵欣宇,柴天佑,赵新力. CIMS 与 CIPS 体系结构对比分析的研究[J]. 信息与控制,1998, 27(4):304 - 308.
- [3] 路甬祥、陈鹰. 人机一体化系统与技术——21 世纪机械科学的重要发展方向[J]. 机械工程学报,1994, 30(5):1 - 6.
- [4] REES. R. What is a failure. IEEE Transaction on Reliability [J]. 1997,46(2):163.
- [5] PARHAMI. B. Defect, fault, error, ..., or failure?. IEEE Transaction on Reliability[J]. 1997,46(4):450 - 451.
- [6] TED W. YELLMAN. Failures and related topics. IEEE Transaction on Reliability[J], 1999,48(1):6 - 8.
- [7] 宋国宁,蒋新松. 连续生产过程 CIMS 的研究[J]. 计算机集成制造系统,1995,(1):12 - 15.
- [8] 高佳,黄祥瑞,沈祖培. 人的可靠性分析:需要、状况和进展[J]. 中南工学院学报,1999,13(2):11 - 25.

## Reliability Analysis of Human - Machine System in Continuous Industry

MA Xiao-xiao , HUANG Xi-yue , HUANG Min , NI Lin

(College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** As the research objective changing from a small simple system to a large complex one, traditional reliability theory can not adapt to the requirement of the great transformation. Based on the specialty of continuous process industry, the necessity and urgency to study the reliability of this kind of system is stated out. The research structural model of the reliability of complex continuous industries is presented also which involved in the reliability of human, network, software and devices.

**Key words:** CIMS; continuous industry; reliability; human - machine system

(责任编辑 吕赛英)