

化工设备在线监测系统的信息冗余与有效感知边界探讨

张婷婷 赵国平 蒋培丰

伊泰伊犁能源有限公司 新疆 伊犁 835300

摘要: 随着工业4.0与智能制造的深入推进,化工设备在线监测系统作为保障生产安全、提升运行效率的核心基础设施,其数据规模与复杂度呈指数级增长。然而,海量数据背后潜藏着显著的信息冗余问题,不仅挤占宝贵的存储与计算资源,更可能掩盖关键的有效信息,从而对系统的决策能力构成潜在威胁。与此同时,一个长期被忽视但至关重要的概念——“有效感知边界”——决定了监测系统能够从物理世界中可靠提取并转化为有用知识的极限。本文旨在从信息论的基本原理出发,深入探讨化工设备在线监测系统中的信息冗余成因、量化方法及其消除策略,并首次将香农信道容量理论与率失真理论引入该领域,构建“有效感知边界”的理论框架。通过剖析感知过程中的噪声、信道带宽及可容忍失真度对感知效能的根本性制约,本文试图揭示监测系统性能的终极天花板,并为未来高能效、高可靠性的智能监测系统设计提供理论指引。

关键词: 化工设备;在线监测;信息冗余;有效感知边界;信息熵

引言

现代化工生产是高风险连续过程,设备稳定是生命线。传统检修模式已难满足本质安全要求,基于物联网、大数据与AI的在线监测系统通过多参数实时采集,实现了从“被动响应”到“主动预测”的转变。然而,实践中面临两大挑战:一是大量异构传感器产生巨量时空相关的冗余数据,消耗资源并掩盖关键信号,导致“信息过载”与“信号淹没”;二是对监测系统能力边界认识不清。为此,本文提出“有效感知边界”概念——指在特定噪声、带宽和失真容忍度下,系统能可靠提取并传递的有效信息最大速率或总量。要解决信息冗余并科学规划感知能力,需回归信息论。香农的信息熵、信道容量和率失真函数为定量分析提供了数学工具。本文将系统探讨如何运用信息论框架解构化工在线监测系统中的信息流,重点回答:如何定义和量化信息冗余?如何构建“有效感知边界”模型并明确其影响因素?如何据此指导系统设计与优化,逼近感知效能的理论极限?

1 信息冗余的理论溯源与内涵界定

信息冗余的概念根植于香农信息论。香农在其奠基性论文《通信的数学理论》中指出,信息的本质是“不确定性的减少”。他用“信息熵” $H(X)$ 来度量一个随机变量 X 所蕴含的平均不确定性,其数学表达式为:

$$H(X) = -\sum p(x) \log_2 p(x)$$

其中, $p(x)$ 是 x 取值为 x 的概率。信息熵越高,表示该信源的不确定性越大,其所能提供的信息量也越大。在这一框架下,信息冗余可以被理解为超出描述信源所需

最小信息量之外的多余部分。具体到化工设备在线监测系统,信息冗余主要体现在以下几个层面:

1.1 时空冗余

这是最直观的冗余形式。在空间上,邻近位置的传感器(如沿管道密集排布的温度传感器)由于物理场的连续性,其读数具有高度相关性。在时间上,对于变化缓慢的过程变量(如大型储罐的液位),高频采样会产生大量数值相近的数据点^[1]。这些高度相关的数据并未带来新的信息增量,却极大地增加了数据体积。

1.2 结构冗余

监测系统通常采用多传感器融合策略,即利用不同类型的传感器(如振动、声发射、温度)从不同物理维度对同一设备状态进行观测。虽然这种设计旨在提高诊断的鲁棒性,但如果各传感器所反映的设备状态信息存在重叠或强耦合,就会产生结构性的冗余。例如,在轴承早期故障阶段,振动信号的微弱变化可能已在声发射信号中得到充分体现,此时单独处理两路信号就构成了冗余。

1.3 知识冗余

这是更高层次的冗余,指数据中包含了大量对当前决策任务无用甚至有害的背景信息。例如,在一个用于检测反应釜泄漏的监测系统中,正常的工艺波动、环境温度湿度变化等数据虽然真实,但对于“是否泄漏”这一特定判断而言,就是干扰性的冗余信息。这类冗余无法通过简单的数据压缩去除,需要依赖领域知识或高级智能算法进行甄别与过滤。

传统上,冗余被视为一种资源浪费,需要通过数据

压缩、特征选择或降维等手段予以消除。然而,我们必须认识到,适度的冗余在工程实践中具有不可替代的价值,尤其是在容错与可靠性方面。例如,通过表决机制(Voting Mechanism)对多个冗余传感器的数据进行比对,可以有效识别并剔除故障传感器的异常读数,从而保证系统输出的可靠性。因此,对冗余的处理不应是简单地“一刀切”式删除,而应是在深刻理解其来源与作用的基础上,进行“有效冗余”与“无效冗余”的区分,并针对后者实施精准治理。

2 “有效感知边界”的概念构建与理论基础

如果说信息冗余关注的是数据内部的“质”与“量”的关系,那么“有效感知边界”则关注的是整个感知-通信-处理链条的“能力”上限。我们将“有效感知边界”定义为:在一个给定的化工设备在线监测系统中,在考虑物理世界固有的随机性(噪声)、感知与通信信道的物理限制(带宽、信噪比)以及上层应用对信息保真度的要求(失真度)的前提下,单位时间内能够被系统可靠地感知、传输并最终用于有效决策的最大信息量。这一概念的提出,是对香农经典通信模型在感知领域的创造性延伸^[2]。在香农模型中,信息从信源发出,经由有噪信道传输,最终在信宿处被接收。而在监测系统中,物理世界(设备状态)扮演了“信源”的角色,传感器及其后续的通信链路构成了“信道”,而监控中心或决策算法则是“信宿”。

2.1 感知信道模型

我们可以将整个感知过程建模为一个广义的“感知信道”。该信道的输入是设备的真实状态向量 S ,输出是经过传感器转换、信号调理、模数转换、无线/有线传输后到达数据中心的观测数据向量 Y 。在这个过程中,信息会受到多种噪声的污染,包括:(1)物理噪声:传感器本身的热噪声、散粒噪声等。(2)环境噪声:电磁干扰、机械振动等外部干扰。(3)量化噪声:模数转换过程中的精度损失。(4)传输噪声:数据在网络传输中可能发生的误码。这些噪声共同决定了感知信道的信噪比(SNR)。

2.2 信道容量与感知上限

香农第二定理(有噪信道编码定理)给出了信道容量 C 的著名公式:

$$C = B \cdot \log_2(1 + \text{SNR})$$

其中, B 是信道带宽, SNR 是信噪比。该定理指出,只要信息传输速率 R 低于信道容量 C ,就存在一种编码方式,可以使错误概率任意小;反之,若 $R > C$,则不可能实现可靠通信。将此定理应用于感知信道,我们可以得

出一个深刻的结论:化工设备在线监测系统的有效感知速率存在一个由感知信道带宽和信噪比共同决定的理论上限,即感知信道容量。这意味着,无论我们如何增加传感器数量或提高采样频率,一旦总的感知信息速率超过了这个容量,新增加的数据要么是冗余的,要么会因为信道过载而引入无法纠正的错误,反而降低了整体信息的质量。因此,盲目追求“全量、全时、全要素”的感知策略是违背信息论基本规律的。

2.3 率失真理论与感知保真度

在许多实际应用场景中,我们并不需要完全无失真的信息。例如,在进行设备健康状态的粗略评估时,允许一定程度的测量误差是可以接受的。这就引出了香农的第三大定理——率失真理论。率失真理论研究的是在允许一定平均失真度 D 的前提下,信源可以被压缩到的最低码率 $R(D)$,这个函数 $R(D)$ 被称为率失真函数。在感知的语境下,我们可以将其重新诠释为:为了达到应用所要求的感知保真度(即最大可容忍失真 D),所需的最小感知信息速率 $R(D)$ 是多少。这个视角的转换至关重要。它告诉我们,有效感知边界的确定并非一个孤立的通信问题,而是一个与具体应用需求紧密耦合的联合优化问题^[3]。对于不同的监测任务(如早期预警 vs. 精确诊断),其对失真度 D 的要求不同,对应的最优感知速率 $R(D)$ 也不同。因此,一个高效的监测系统应当根据任务的优先级和对信息质量的要求,动态地调整其感知策略(如传感器激活数量、采样频率),使其工作在率失真曲线上最经济的点,从而在满足性能要求的同时,最大限度地节约资源。

3 信息冗余与有效感知边界的辩证关系

信息冗余与有效感知边界并非孤立存在的两个概念,而是相互关联、相互影响的统一体。首先,过度的信息冗余会侵蚀有效感知边界。当系统产生远超其感知信道容量的数据时,信道必然处于过载状态。根据香农定理,这将导致信息传输的不可靠性急剧上升,表现为数据丢包、误码率增高。这些错误数据本身就是一种破坏性的“负信息”,它们会严重污染数据集,使得从中提取的有效信息量远低于理论预期,实质上缩小了系统的有效感知边界。其次,有效感知边界的认知有助于指导冗余的合理利用。明确了系统的感知上限后,我们可以更有针对性地设计冗余策略。例如,在信道容量允许的范围内,可以战略性地引入冗余(如部署少量关键点的备份传感器),用于提升系统的容错能力和鲁棒性,而不是无差别地全面铺开。这种“有目的的冗余”是在有效感知边界内对资源的一种优化配置。最后,消除无

效冗余是逼近有效感知边界的关键路径。通过数据压缩、特征提取、智能过滤等手段,剔除掉那些不携带新信息或与任务无关的冗余数据,可以显著降低实际的信息传输速率 R 。当 R 被有效控制在感知信道容量 C 之下,并且与任务所需的率失真函数 $R(D)$ 相匹配时,系统就能以最高的效率和可靠性运行,从而最大化其有效感知效能。

4 面向有效感知边界的系统优化策略

基于以上理论分析,我们可以为化工设备在线监测系统的设计与优化提出以下策略:

4.1 感知-通信协同设计

打破传统上感知层与通信层分离设计的壁垒,从系统全局的角度进行联合优化。在设计之初,就应根据预期的监测任务和物理环境,估算出感知信道的带宽 B 和信噪比 SNR ,从而确定系统的理论感知上限 C 。所有的传感器选型、部署密度和采样策略都应以此上限为约束条件,避免先天性的资源浪费。

4.2 自适应感知与动态资源分配

借鉴率失真理论的思想,构建自适应的感知机制。系统应根据当前的任务需求(如正常巡检、疑似故障跟踪、紧急报警)动态调整其感知保真度 D ,并相应地调整资源分配。例如,在正常状态下,可以采用低采样率和稀疏传感策略以节省能耗;一旦检测到异常迹象,则立即切换到高保真度模式,激活更多传感器并提高采样频率,以获取更精细的状态信息。

4.3 基于信息论的智能数据预处理

在数据进入核心分析引擎之前,部署基于信息熵、互信息等指标的智能预处理模块。这些模块可以自动识别并压缩时空冗余数据,通过计算不同传感器数据间的互信息来评估其信息重叠度,从而为特征选择和传感器融合提供量化依据,确保输入到上层模型的数据是高信息密度、低冗余度的“精华”数据。

4.4 边缘智能与分层信息处理

将部分计算任务下沉至网络边缘(如网关或智能传

感器节点)。在边缘侧完成初步的数据清洗、特征提取和冗余消除,只将高价值的、浓缩后的信息上传至云端或中心服务器^[4]。这种分层处理架构不仅能有效缓解中心节点的计算压力,更能从源头上控制进入核心通信信道的数据流量,使其始终运行在高效可靠的区间内。

5 结语

本文从信息论的视角,对化工设备在线监测系统中的信息冗余与有效感知边界问题进行了深入探讨。我们指出,信息冗余是系统复杂化进程中不可避免的伴生物,其治理需建立在对其成因和作用的深刻理解之上。更为重要的是,我们引入了“有效感知边界”这一创新性概念,并借助香农的信道容量理论和率失真理论,为其构建了坚实的数学基础。研究表明,任何监测系统的感知能力都存在一个由物理信道特性和应用需求共同决定的理论上限。盲目追求数据的“大而全”不仅不经济,而且在信息论层面是无效甚至有害的。未来的智能监测系统设计,必须从“以数据为中心”转向“以信息为中心”,将系统视为一个端到端的信息获取与处理通道。通过感知-通信协同设计、自适应资源分配和基于信息论的智能预处理等策略,我们可以有效地管理信息冗余,并引导系统的工作点不断逼近其有效感知边界,从而在有限的资源下,实现安全、高效、可靠的智能化监测目标。这不仅是技术优化的方向,更是对信息本质规律的尊重与回归。

参考文献

- [1]许杰.物联网技术在化工设备监测与维护中运用分析[J].价值工程,2026,45(7):152-154.
- [2]任小倩.石油化工设备硫腐蚀的监测与防护研究[J].石油工程建设,2025,47(12):109-111+159.
- [3]刘堂伟.工业互联网赋能的石油化工设备状态监测技术研究[J].中国高新科技,2026,(2):132-134.
- [4]刘刚.化工设备安全监测与智能预警技术在事故预防中的应用[J].当代化工研究,2025,(3):161-163.