

信息产业核心关键技术

自主创新出版工程

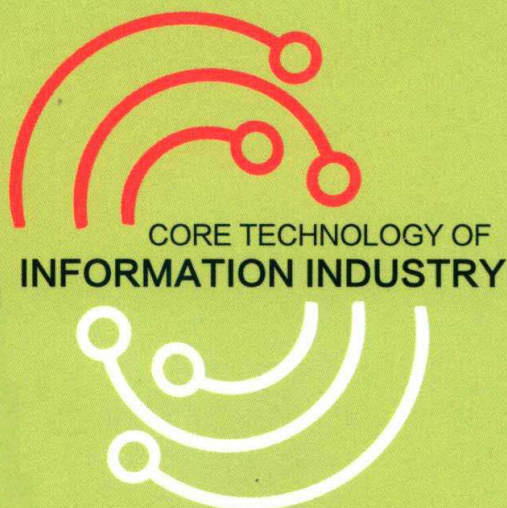
智能仓储 环境监控

刘军 申悦 王程安 / 著

提出智能监控装置的设计思路 and 实现技术

提供个性化仓储环境监控解决方案

国内资深物流团队十多年自主研发



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

协同创新中心项目 (PXM2018_014214_000009) 资助

智能仓储环境监控

刘 军 申 悦 王程安 著



机械工业出版社

本书主要介绍智能仓储环境监控的技术与方法，是作者研究团队十多年研究成果的总结。书中分析了仓储系统的特性和仓储环境监控的个性化需求，重点介绍了基于核心模块构建智能监控装置的设计思路和实现技术；简要介绍了对大型复杂仓储系统实施分布式环境监控和环境健康评估。

本书适合作为相关领域科研工作者或工程实践者的参考书，也可作为在校研究生和高年级本科生的教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

智能仓储环境监控/刘军, 申悦, 王程安著. —北京: 机械工业出版社, 2021. 1

ISBN 978-7-111-67320-0

I. ①智… II. ①刘… ②申… ③王… III. ①仓库管理-智能控制 IV. ①F253

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2021) 第 015472 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 汤 枫 责任编辑: 汤 枫

责任校对: 张艳霞 责任印制: 张 博

三河市骏杰印刷有限公司印刷

2021 年 2 月第 1 版 · 第 1 次印刷

169mm×239mm · 11.25 印张 · 271 千字

0001-1500 册

标准书号: ISBN 978-7-111-67320-0

定价: 79.00 元

电话服务

客服电话: 010-88361066

010-88379833

010-68326294

封底无防伪标均为盗版

网络服务

机 工 官 网: www.cmpbook.com

机 工 官 博: weibo.com/cmp1952

金 书 网: www.golden-book.com

机工教育服务网: www.cmpedu.com

前 言

仓储环境监控管理是仓储作业管理的重要组成部分，是实现仓储管控一体化的基础。仓储系统是复杂的人造系统，构成仓储系统的要素复杂多变，要素之间关系错综复杂，并且存在大量的信息交换。要想使仓储系统获得最大的经济效益，同时避免产生风险，必须从整体上考虑系统的管理和运作，实现仓储管控一体化。

仓储环境的变化对仓库中存储货物的品质和寿命有很大的影响，同时也影响到仓库中作业设备和作业人员的安全。仓储系统具有明显的个性化特征。仓库的大小、封闭程度、存放货物的种类以及货物的物理、化学特性都会影响仓储环境监控的方式、方法和使用的技术与手段。为了适应种类繁多的仓储系统的个性化需求，智能监控装置应该是硬件和软件都能够快速灵活配置的系统。硬件的模块化设计，有利于快速搭建特殊要求的硬件系统，同时最大限度地实现软件复用。

在复杂的仓储环境监控应用中，单纯的数据采集与报警功能已经不能满足实际需求，监控装置要进行一些必要的计算或基于模型的判断，例如传感器信息融合、基于采集数据的边缘计算等，这就要求监控装置具有计算功能；单个监控装置的监控能力和监控物理范围有限，不能满足大型仓储系统环境监控的要求，必须由多个监控装置组成分布式网络监控系统，这就要求监控装置具有联网功能。

基于网络通信技术和无线传感器网络技术等各种先进技术实现的智能仓储监控系统，是未来仓储环境监控应用的重点。智能传感器技术、计算机网络系统、数据分析技术将在仓储环境监控系统中发挥重要作用。大量使用集成一体化传感器和电化学传感器，基于硬件复用的设计思想开发核心模块，使用技术成熟的联网和通信技术，构建灵活配置的仓储环境监控装置和系统，是解决仓储环境监控个性化需求的一种优化方案。

本书共7章，各章主要内容如下：

第1章主要讲述仓储环境监控管理的重要作用、仓储管控一体化的思想以及实现的思路。针对仓储系统管理与作业个性化需求的特点，给出了一种仓储环境监控系统架构，设计了一种能够满足大多数仓储系统环境监控需求的智能监控装置组合模型。

第2章主要总结了仓储环境监控研究与应用进展，分析了仓储环境监控的目的和意义，总结了仓储环境特性与表征参数以及仓储环境监控方法与手段的发展历程，展望了基于网络通信技术和无线传感器网络技术构建仓储监控系统的发展趋势。

第3章介绍了几种用于仓储环境参数检测的集成一体化传感器和电化学传感器，阐述了智能传感器的构成、特点以及环境信息融合技术，为后续章节的介绍打下基础。

第4章给出了一种多参数多用途智能监控装置的设计思想和方法。为了满足仓储环境监控个性化需求，基于硬件复用的设计思想开发核心模块，使用技术成熟的联网和通信技术，构建灵活配置的硬件系统。并列举了几种基于核心模块的智能监控装置。

第5章介绍了分布式仓储环境监控系统的架构与功能，重点介绍了监控前端和网络通信系统的设计。

第6章介绍了基于环境监控和数据分析的仓储系统安全预警与健康评估。

第7章给出了三个仓储环境监控装置的设计与开发案例。这三种装置是拥有自主知识产权的产品，对仓储环境监控具有普遍的适用性，可以满足大部分仓储环境与设备监控的需求。

在本书的撰写过程中，将系统架构设计与功能实现作为重点，为仓储环境监控的个性化需求提供了解决方案。全书重点突出、层次分明，对相关领域的工程实践具有一定参考价值。

本书由刘军、申悦、王程安共同撰写，刘军教授负责全书的统稿与审定，参加相关研究和资料整理的人员还有杨化云、宋国平、刘欢、范红岩、张帅、

张可薇、丁庆行、孟龙、张宸等。

本书在写作过程中，参阅了大量文献，一并列在书末，在此对这些文献的作者表示衷心感谢。

由于相关技术仍在不断更新发展，限于水平，书中肯定有不妥之处，敬请读者批评指正。

作者

目 录

前言

第 1 章 概论	1
1.1 仓储系统的特性	1
1.1.1 空间的封闭性	1
1.1.2 要素的复杂性	2
1.1.3 结构的多样性	2
1.1.4 交换的非连续性	3
1.1.5 环境的时变性	3
1.2 仓储管控一体化	4
1.2.1 仓储管控一体化的核心思想	5
1.2.2 实现仓储管控一体化的技术要求	5
1.2.3 仓储管控一体化的应用现状	6
1.2.4 仓储管控一体化系统的体系架构	7
1.2.5 实施多条件约束的作业调度策略	7
1.3 仓储环境监控的体系架构	10
1.3.1 分层体系架构	10
1.3.2 采集层与监控层	11
1.3.3 管理层	11
1.4 智能监控装置的组合模型	12
1.4.1 智能监控装置的需求分析	12
1.4.2 组合模型	12
1.5 总结	13
第 2 章 仓储环境监控研究与应用进展	14
2.1 仓储监控的目的与意义	14
2.1.1 仓储监控的意义	14

2.1.2	仓储监控的作用	15
2.2	仓储环境特性与表征参数	16
2.2.1	温度与湿度	16
2.2.2	空气流速	18
2.2.3	气体浓度	18
2.2.4	光照度	19
2.2.5	粉尘与烟尘	19
2.2.6	风压	20
2.2.7	空气 pH 值	21
2.3	仓储环境监控的方法与手段	21
2.3.1	目前的技术与方法	21
2.3.2	智能化仪表与装置	23
2.3.3	无线传感器网络	24
2.3.4	无线传输技术	25
2.4	环境监控的发展与展望	28
2.4.1	环境监控的发展	28
2.4.2	环境监控的展望	29
2.5	总结	30
第 3 章	传感器与信息融合	32
3.1	集成一体化传感器	32
3.1.1	集成一体化传感器概述	32
3.1.2	常用集成一体化传感器	33
3.2	电化学传感器	33
3.2.1	电化学传感器概述	33
3.2.2	英国 CITY 电化学传感器	34
3.3	智能传感器	35
3.3.1	智能传感器概述	35
3.3.2	智能传感器的结构	36
3.3.3	智能传感器的主要功能	37

3.3.4	智能传感器的特点	37
3.3.5	智能传感器的应用	38
3.3.6	智能传感器的技术发展趋势	39
3.4	传感器的信息融合	42
3.4.1	信息融合技术的概念及原理	42
3.4.2	信息融合分类	43
3.4.3	信息融合方法	45
3.4.4	多传感器的信息融合方式	47
3.4.5	信息融合的应用	49
3.4.6	传感器信息融合的优势	50
3.5	总结	51
第4章	智能监控装置设计	52
4.1	需求分析与设计思路	52
4.1.1	仓储环境特性	52
4.1.2	环境监控装置功能需求	53
4.1.3	设计总体思路	54
4.2	微环境数据采集记录装置	55
4.2.1	硬件组成架构	55
4.2.2	设备功能	56
4.2.3	板载传感器	57
4.2.4	设备 PCB 布局	58
4.3	智能电化学传感器	59
4.3.1	硬件组成架构	59
4.3.2	设备功能	60
4.3.3	板载传感器	61
4.3.4	设备 PCB 布局	61
4.3.5	工作模式	62
4.4	低功耗核心模块设计	63
4.4.1	硬件组成架构	64

4.4.2	设备功能	65
4.4.3	板载传感器	65
4.4.4	设备 PCB 布局	66
4.4.5	扩展插针	66
4.5	增强型核心模块设计	67
4.5.1	硬件组成架构	68
4.5.2	设备功能	69
4.5.3	板载传感器	69
4.5.4	设备 PCB 布局	69
4.5.5	扩展插针	70
4.5.6	软件架构	70
4.6	基于核心模块的仓储环境监控装置	76
4.6.1	基于 IoT-MLE 的便携式仓储环境监测装置	77
4.6.2	基于 IoT-MLE 的仓储环境监控装置	79
4.6.3	基于 IoT-M4E 的无线仓储环境监控装置	80
4.7	总结	82
第 5 章	分布式仓储环境 CPS 系统	83
5.1	WE-CPS 架构与功能	83
5.1.1	综合监控中心	84
5.1.2	网络层	85
5.1.3	设备/边缘层	86
5.1.4	WE-CPS 的功能与性能	86
5.2	子系统功能及互联	87
5.2.1	集成系统	87
5.2.2	互联系统	89
5.2.3	子系统互联	89
5.3	CPS 边缘节点结构	91
5.3.1	边缘计算与 CPS 边缘节点	91
5.3.2	CPS 边缘节点的结构	93

5.3.3	CPS 边缘节点主控制器	94
5.3.4	CPS 边缘节点传感器的选择	95
5.3.5	传感器接口	97
5.3.6	通信接口	99
5.3.7	扩展接口	100
5.4	CPS 边缘节点信息融合	101
5.4.1	实时信息的采集和存储	101
5.4.2	CPS 边缘节点实时信息处理方法	105
5.4.3	CPS 边缘节点多传感器信息融合	107
5.5	上位数据可视化	114
5.5.1	上位机软件的设计	114
5.5.2	上位机软件的测试	115
5.6	总结	118
第 6 章	安全预警与健康评估	120
6.1	仓储安全的含义	120
6.1.1	仓储安全的基本概念	120
6.1.2	仓储安全管理	121
6.2	健康评估与预警、报警	123
6.2.1	健康评估基本概念	123
6.2.2	预警	124
6.2.3	报警	124
6.3	健康评估方法	125
6.3.1	仓储健康评估的含义	125
6.3.2	仓储健康评估的方法	126
6.4	实时在线评估	127
6.4.1	仓储环境监控系统层次结构	128
6.4.2	仓储环境实时在线评估模型	129
6.5	离线综合评估	131
6.5.1	Hadoop 安装部署	132

6.5.2 离线综合评估架构	137
6.6 健康评估模型	139
6.6.1 模糊理论	139
6.6.2 仓储环境健康评估模型	139
6.7 总结	145
第7章 仓储环境监控装置开发	146
7.1 仓储环境多参数监控装置	146
7.1.1 装置概述	146
7.1.2 硬件组成	147
7.1.3 电路板的功能与布局	150
7.2 设备健康状况显示贴片	152
7.2.1 装置概述	152
7.2.2 硬件组成	152
7.2.3 电路板的功能与布局	156
7.3 智能环境监控装置	157
7.3.1 装置概述	157
7.3.2 硬件组成	157
7.3.3 电路板的功能与布局	159
7.4 总结	160
参考文献	161

第1章 概 论

仓储环境监控管理是仓储作业管理的重要组成部分，是实现仓储管控一体化的基础。针对仓储系统管理与作业个性化需求的特点，本章给出一种仓储环境监控系统架构，设计一种能够满足大多数仓储系统环境监控需求的智能监控装置组合模型。使用该组合模型，能够快速搭建特殊要求的硬件系统，同时最大化地实现硬件与软件复用。

1.1 仓储系统的特性

仓储系统是复杂的人造系统，构成系统的要素包括基础设施、设备、人、货物和信息等，其中有些要素是静止的，有些要素是移动的，而要素之间关系错综复杂，并且存在大量的信息交换。仓储系统作为既有货物储存功能又有货物周转功能的一个相对独立系统，自身有许多特性。对于仓储作业运行和管理，如下五个特性最为关键。

1.1.1 空间的封闭性

为了给货物提供安全的储存环境，便于货物管理，减少自然和人为对货物的损害，仓储系统一般建设成为一个有明确边界的封闭或半封闭性的物理空间，将货物存放在其中。为了移动和监控货物，在这个物理空间还安装有许多设施设备，例如空调系统、搬运设备、储存设备及控制设备等。

仓储系统内部物理空间与外部大气物理环境有明显的分隔界面，因此，仓储系统是一个相对独立，与外部环境有物质、能量和信息交换，有明确边

界的封闭或半封闭的系统，其功能主要是用于货物的储存和周转。仓储系统的封闭特性隐含着重要的意义，即只需要通过合理安排货物的输入和输出数量，优化输入/输出间隔，合理协调内部要素及其作用关系，就可以优化内部的作业。

1.1.2 要素的复杂性

构成仓储系统的要素有些是静止的，如仓储系统的基础建筑、内部水电暖系统、空调系统及固定货架等；有些是移动的，如仓储作业配备的叉车、人工运送车、托盘、自动导引运输车等；有些要素相对固定，如自动仓储作业系统配备的输送带、堆垛机和移动货架等。这些要素之间相互配合，共同协作完成仓储作业任务。在作业过程中，不同的作业流程决定了它们之间不同的关联方式。显然，要素之间的信息交换是要素间关联的主要方式。为了实现仓储信息化和自动化，计算机设备、网络设备、传感器、可视化设备、自动化系统及其附属设备成为仓储系统的核心构成要素，传统意义上的运输设备、货架、托盘等不断升级为信息化、智能化设备，使仓储系统构成要素种类增多，关联方式和相互作用方式灵活多变。

1.1.3 结构的多样性

仓储系统为了实现安全存储和高效周转货物的功能，其结构往往根据个性化需求进行设计。传统意义上的小型仓储系统一般设计成结构简单、功能单一的系统，中大型仓储系统通常有复杂的结构。随着信息化、自动化仓储系统的兴起和发展，信息化设备和自动化设备逐步取代人工进行自动作业，与之配套的作业管理软件、设备控制软件等物理不可见的组成要素不断增加，可移动、网络驱动的元素也越来越多。仓储系统作业流程不再是固定不变的，而是向着柔性化和动态化方向发展，要素间关系动态关联和隐形关联特征日益明显。单纯从可见的物理要素很难分析出仓储系统的运行结构。因为在运行结构中，存在大量软性不可见要素和隐形的关联关系，软性要素和隐形连

接容易修改，使得仓储系统的结构呈现出多样性，而且容易实现动态柔性变化。

1.1.4 交换的非连续性

仓储系统要实现货物的储存和周转功能，就必须与外部世界进行货物和信息的交换。仓储系统对于货物具有暂存作用，货物在输入、暂存和输出整个过程中，在时间上是断开的，仓储系统输入与输出货物的过程是非连续进行的。再者，由于货物输入或输出的单位时间流量不均等，以及多种货物输入或输出时混杂在一起同时进行，所以用结构化的数学模型来描述仓储系统的输入/输出关系是不可能的。依此推理，可以清楚地认识到，与货物和作业过程相关的信息也具有非连续性特征。

对于这类非连续过程的描述，建立一段时间内的非结构化统计模型是可行的。将建立的模型用于分析仓储系统作业历史规律是有价值的；但是，用这一模型来表征仓储系统的输入/输出规律，从而预测仓储系统未来作业的动态变化规律仍然是不正确的。这是因为大部分仓储系统在一年时间里，不同月份输入与输出的货物种类和数量不均等，并且仓储系统货物入库、储存和出库受市场因素、人为因素等随机因素影响很大。

1.1.5 环境的时变性

仓储系统内部环境不仅会受到外部自然环境变化的影响，也会受到内部储存货物发生化学变化从而产生各种气体或液体的影响，还会受到内部作业的影响。仓储系统的内部环境是随时变化的，表征内部环境的参数具有时变特性。当仓储系统内部环境发生变化，表征环境的参数偏离仓储系统运行要求较大时，环境对货物的储存品质和仓储作业设备就会产生不利影响。因此，保证仓储系统环境状态良好是仓储管理的一项重要工作。减少环境变化对自动化设备和系统的影响，可以提高自动化作业系统的安全性、可靠性和稳定性。所以，实时监测和调控仓储环境，在自动化作业的仓储系统中尤为重要。

1.2 仓储管控一体化

仓储作为现代物流的重要环节，不仅要实现储存货物的功能，还要承担与企业供应链上下游良好衔接的任务。因此，保障仓储安全，提高仓储作业效率和服务品质，是不断提升仓储管理水平和技术水平的根本动力。我国的仓库总量很大，但是目前管理水平和技术水平参差不齐，绝大部分仓库的资源利用率低，信息化、自动化程度不高，安全性差，先进的仓储管理模式应用很少。

仓储作业管理系统按照功能可以划分为仓储环境监控与管理、设备控制与管理、作业调度与管理三大部分。传统的仓库设计与运作管理普遍将这三个部分看作相对独立的三个子系统，因此实际投入使用的仓储系统的三个子系统之间普遍存在信息共享程度低、系统联动性差、设备调度不合理和设备维护不及时等问题，导致仓库运行效率低下，存在环境、设备和作业人员方面的安全隐患。

经过多年的工程设计与运行管理实践，人们逐渐认识到发展智能仓储是提高仓储作业能力和服务质量、降低仓储风险的有效方法，研究和探索将三个子系统进行整合具有重要的现实意义。特别值得一提的是，在仓储作业调度与仓储设备控制一体化工程应用实践中，已经取得了良好的经济效益。但是，局部的或仅实施某项技术的智能仓储系统（如基于无线射频识别技术的智能仓储系统）不能全面解决仓储效率、环境风险、作业风险和设备维护等问题。发展和建设智能仓储系统应该从整体出发，将仓储环境监控与管理、设备控制与管理、作业调度与管理有机地整合在一起，形成以实时信息采集与处理为核心的智能自动执行系统，即基于物联网技术构建仓储管控一体化系统，可以保障仓储系统高效、安全运行。

基于上面的分析发现，仓储系统是一个复杂的大系统，涉及人、物、设备、环境和信息，这些系统要素相互影响，关系错综复杂，仅依据其中几个要素和不全面的信息进行仓储系统的运作与管理是不科学的。要想获得仓储

系统最大的经济效益，同时避免产生风险，必须从整体上考虑系统的管理和运作。

仓储环境的变化对仓库中存储货物的品质和寿命有很大的影响，同时也影响仓库中作业设备和作业人员的安全；仓库中作业设备的健康状况决定了仓储作业能力，同时也影响仓库中作业设备和作业人员的安全。在不同的仓储环境状况和不同的作业设备健康状况下，采用恰当的作业调度策略，才能在保证安全的前提下，实现最优作业管理。

1.2.1 仓储管控一体化的核心思想

仓储管控一体化就是在充分的信息共享基础上，将仓储环境监控与管理、设备控制与管理、作业调度与管理整合在一起，形成以实时信息采集与处理为核心的智能自动执行系统，保障仓储作业的协调、安全、高效进行，进而提升仓储系统的整体运作效率和安全性。

仓储管控一体化要应用仓库实时状态信息，包括人、物、设备和环境的全局信息，是基于现实情境的动态管理。

1.2.2 实现仓储管控一体化的技术要求

仓储管控一体化系统从技术层面看，就是在信息共享的基础上实现多个子系统集成，把仓储系统看作一个完整的系统来进行控制和管理，既要保证各子系统能够正常独立运行、高度自治，又要求各子系统之间相互配合，在资源允许和保证作业人员、货物安全的前提下协同作业，以达到仓储作业负荷最大、整体最为经济的目的。

为了解决动态信息共享、系统联动的问题，仓储管控一体化系统应该设计成一个标准的工业自动化系统。在系统集成时，需要遵循广泛使用的工业标准。也就是说，仓储作业设备是配置有标准通信接口的智能化设备；网络与通信体系结构、设备选型、通信协议等方面都必须采用国际和国内通用的工业标准与规范，如在作业设备设计、制造和升级改造时，配备技术成熟的