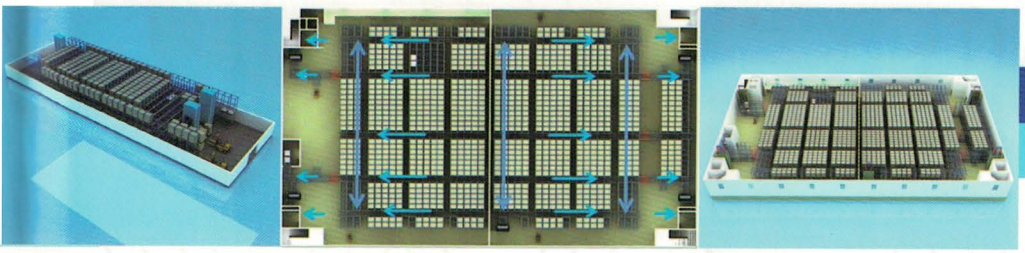
制·造·业·高·端·技·术·系·列

四向穿梭式自动化密集仓储系统的设计与控制



付晓锋 俞汉生 朱从民 编著

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

需要全本请访问 www.ertongbook.com

制造业高端技术系列

四向穿梭式自动化密集仓储系统的设计与控制

付晓锋　俞汉生　朱从民　编著

机 械 工 业 出 版 社

四向穿梭式自动化密集仓储系统是一种新型的仓储系统，具有存储空间利用率高、货架布局灵活、作业效率高等特点。本书系统地介绍了四向穿梭式自动化密集仓储系统的设计与控制，从逻辑层面、控制层面和信息管理层面对轨道定向、设备编配、任务分配、货位分配、路径规划和故障处理等内容进行了阐述，以帮助读者最大限度地挖掘仓储系统的潜力，提升仓储系统的作业能力。本书内容全面，结构合理，图文并茂，实例典型，系统性强，针对不同应用场景下货架系统的设计与控制给出了优化解决方案。

本书可供物流企业、科研院所的相关技术人员和管理人员参考，也可供仓储物流相关专业的在校师生参考。

图书在版编目（CIP）数据

四向穿梭式自动化密集仓储系统的设计与控制/付晓锋，俞汉生，朱从民编著. —北京：机械工业出版社，2018.1

（制造业高端技术系列）

ISBN 978-7-111-58625-8

Ⅰ.①四… Ⅱ.①付… ②俞… ③朱… Ⅲ.①自动化系统-仓储系统 Ⅳ.①F253

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 298217 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：陈保华 责任编辑：陈保华 王海霞

责任校对：王明欣 封面设计：马精明

责任印制：常天培

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2018 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm · 9.75 印张 · 2 插页 · 150 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-58625-8

定价：69.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务		网络服务	
服务咨询热线：	010-88361066	机 工 官 网：	www.cmpbook.com
读者购书热线：	010-68326294	机 工 官 博：	weibo.com/cmp1952
	010-88379203	金 书 网：	www.golden-book.com
策 划 编 辑：	010-88379734	教育服务网：	www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

前　言

在全球化和市场化的背景下，仓储物流行业已经成为经济活动中不可缺少的关键环节。随着我国经济的快速发展，仓储用地资源日益紧张，人力成本不断攀升，而社会对仓储的需求却越来越大，仓储行业的成本需求矛盾越来越突出。为解决这一问题，密集式存储和自动化仓储逐渐成为仓储行业的技术发展方向。随着仓储技术的发展，集装化存储、机械化搬运、自动化作业、信息化管理已经成为现代仓储的基本特点。

四向穿梭式自动化密集仓储系统是新近出现的一种自动化密集仓储形式，它具有存储空间利用率高、货架布局灵活、作业效率高等特点。该仓储系统由计算机管理控制信息系统、货架、运输轨道、垂直提升机、四向穿梭车等构成，可按照任务需求实现物资自动化存取作业。由于货架配置方式灵活、作业线柔性可控，系统内同时运行的四向穿梭车数量多、运输托盘物资可选路径多，需优化设计货架结构和轨道布局，规划控制四向穿梭车的运行路径，以缩短存取物资的路径，规避路径冲突，保证多台四向穿梭车在系统内同时高效顺畅运行。此外，该系统支持多条作业线并行作业，通过优化分配作业任务，可充分利用系统内的存取运输资源，提高作业效率。

本书分为 11 章。第 1、2 章介绍了常见仓储系统和作业模式，并分析四向穿梭式自动化密集仓储系统相对其他仓储系统的优势。第 3~8 章从逻辑层面和控制层面讨论了系统的设计与控制，以图的定向理论为基础，分析货架货位设置和轨道结构对物资存取作业的影响，给出确保轨道交通网络活性的轨道设计规则和方法；将物资出入库作业过程建模为多个服务中心组成的排队网络，采用模糊控制策略实现任务分配和管理调度，提高对系统设备设施的使用效率；对每一次具体的出入库存取作业，以出库效率最高为优化目标分配入库存储货位，通过对四向穿梭车进行路径规划，结合满足货架结构

要求的交通控制策略，降低单次物资存取作业的路径和时间代价，提高系统作业效率。第 9 章分析了故障模式下四向穿梭式自动化密集仓储系统内四向穿梭车的路径规划和应急解决方案，以避免局部故障导致系统全局瘫痪，提高系统的鲁棒性。第 10 章介绍了四向穿梭式自动化密集仓储系统的管理控制信息系统，以实现系统设备监控和物资信息管理。第 11 章列举了四向穿梭式自动化密集仓储系统在不同环境需求下的几个应用案例。最后，在本书的附录中，简要介绍了目前应用较广的穿梭车货架系统的管理控制，它与四向穿梭式自动化密集仓储系统的管理控制有较多相似之处，也存在诸多应用差异，供有兴趣的读者参考。

目前，四向穿梭式自动化密集仓储系统还是一个新出现的仓储系统，国内外已经出现了一些相关探索和应用，但在其设计和控制方面尚缺乏系统的理论研究。本书在这些方面做了一些探讨，可供科研机构、设计院所和物流企业的相关技术人员参考。

本书第 1、2 章由俞汉生编写，第 3~9 章和附录由付晓锋编写，第 10、11 章由朱从民编写，张波为本书提供了宝贵资料。

在本书编写过程中得到了相关单位的帮助，并参考了相关文献，在此一并表示感谢。本书的出版得到了陆军建筑工程研究所的资助。

由于时间仓促，加之编者水平有限，书中不妥之处在所难免，恳请同行专家和读者给予批评指正。

编　者

需要全本请访问 www.ertongbook.com

目　录

前　言
第 1 章　仓储系统简介 …… 1
1.1　仓储物流的重要性 …… 1
1.2　仓库内部的物流过程 …… 2
1.3　常见库内仓储设施设备介绍 …… 3
1.3.1　常见货架形式 …… 4
1.3.2　常见库内装卸搬运机械 …… 9
1.3.3　常见库内集装化设备 …… 10
1.3.4　常见库内信息化设备 …… 11
1.4　主要仓储作业模式介绍 …… 16
1.4.1　物资装卸搬运方式 …… 16
1.4.2　物资存储收发方式 …… 17
第 2 章　四向穿梭式自动化密集仓储系统简介 …… 20
2.1　四向穿梭式自动化密集仓储系统的主体结构 …… 20
2.1.1　系统组成 …… 21
2.1.2　四向穿梭车 …… 21
2.1.3　垂直提升机 …… 22
2.1.4　射频识读设备 …… 24
2.1.5　货架 …… 24
2.1.6　信息管理 …… 25
2.1.7　系统特点 …… 26
2.2　四向穿梭式自动化密集仓储系统的作业框架 …… 27
2.3　四向穿梭式自动化密集仓储系统的应用前景 …… 29
第 3 章　图的定向理论 …… 32
3.1　网络活性与图的可定向性 …… 32

3.2 可定向图的一种定向方法 …… 35
第 4 章 货架设计 …… 37
4.1 货架结构 …… 37
4.2 货架结构的抽象化表示 …… 39
4.2.1 货架系统内的物资存取作业 …… 39
4.2.2 四向穿梭车在货架中的运行方式 …… 39
4.2.3 货架设备的图建模 …… 40
4.3 货架布局设计 …… 41
4.4 货架结构与交通规则设计 …… 43
4.5 算例分析 …… 47
4.6 本章小结 …… 49
第 5 章 系统设备编配 …… 50
5.1 系统出入库作业流程 …… 50
5.2 Jackson 排队网络模型 …… 51
5.2.1 入库作业流程建模 …… 52
5.2.2 出库作业流程建模 …… 54
5.3 算例分析 …… 55
5.4 本章小结 …… 57
第 6 章 系统任务分配 …… 58
6.1 系统管理架构 …… 58
6.2 系统设备架构 …… 59
6.3 托盘物资上下架任务分配 …… 60
6.3.1 托盘物资上架任务分配 …… 60
6.3.2 托盘物资下架任务分配 …… 64
6.4 算例分析 …… 64
6.5 本章小结 …… 67
第 7 章 存储货位分配 …… 68
7.1 出入库作业的信息管理 …… 68
7.2 货格分配 …… 71
7.2.1 评价指标 …… 71
7.2.2 货格分配策略 …… 71
7.3 算例分析 …… 72
7.4 本章小结 …… 74
第 8 章 四向穿梭车路径规划 …… 75

8.1 离线路径规划 …… 75
8.2 在线交通控制 …… 77
8.3 算例分析 …… 78
8.4 本章小结 …… 80
第 9 章 故障模式下的系统管理 …… 82
9.1 故障网络结构 …… 82
9.2 故障模式下的作业框架 …… 84
9.3 算例分析 …… 87
9.4 本章小结 …… 89
第 10 章 管理控制信息系统 …… 90
10.1 设备监控信息子系统 …… 91
10.2 物资管理信息子系统 …… 96
10.2.1 作业流程管理 …… 96
10.2.2 物资存储管理 …… 97
10.2.3 组拆盘作业 …… 97
10.2.4 系统框架 …… 99
10.2.5 效率分析 …… 101
10.3 本章小结 …… 102
第 11 章 典型应用案例 …… 103
11.1 四向穿梭式自动化密集仓储系统应用一 …… 104
11.2 四向穿梭式自动化密集仓储系统应用二 …… 109
11.3 四向穿梭式自动化密集仓储系统应用三 …… 113
11.4 本章小结 …… 115
附录 …… 116
附录 A 穿梭车货架库的作业管理 …… 116
附录 B 穿梭车货架库的货位分配 …… 126
附录 C 穿梭车货架库的管理控制信息系统 …… 133
附录 D 穿梭车货架库库内信息化设备的安装 …… 138
参考文献 …… 144

第1章

仓储系统简介

1.1 仓储物流的重要性

《中国物流发展报告（2013—2014）》显示，2013年我国社会物流总额197.8万亿元，按可比价格计算，同比增长9.5%；社会物流总费用10.2万亿元（其中运输费用5.4万亿元，保管费用3.6万亿元，管理费用1.3万亿元），同比增长9.3%，社会物流总费用与GDP的比率为18%。

《中国物流发展报告（2015—2016）》指出，“十二五”时期，在经济下行压力不断加大的情况下，我国物流行业保持了中高速增长。该报告数据显示，2015年，社会物流需求呈稳中趋缓态势，全国社会物流总额219.2万亿元，比上年增长5.8%，增速回落2.1个百分点；“十二五”时期年均增长8.7%，社会物流总费用与GDP的比率为16%，比2010年的17.8%有较大幅度的下降。这其中有公路货运量、货物周转量、GDP数据调整的因素，同时也显示出物流运行效率有所提升。2015年，物流行业总收入达到7.6万亿元，比上年增长4.5%。

中国物流与采购联合会发布的《2016年全国物流运行情况通报》指出，2016年全国社会物流总额229.7万亿元，按可比价格计算，同比增长6.1%，增速同比提高0.3个百分点；社会物流总费用11.1万亿元，同比增长2.9%，增速同比提高0.1个百分点。社会物流总费用与GDP的比率为14.9%，同比下降1.1个百分点；物流业总收入7.9万亿元，同比上年增长4.6%。

由于统计口径的不同，不同单位发布的数据存在差别。但是总体而言，我国物流行业占GDP的总量较大（远超美国的8.5%和日本的9%，也超过印度的13%和巴西的11.6%），这反映出我国物流行业的效率亟待提高。仓

库是物流链条上的核心环节，仓储费用约占整个物流成本的三分之一，如何提高仓储效率、降低仓储成本是我国经济发展中亟须解决的问题。

从地区发展来看，相对于农村和郊区，城市仓储的成本需求矛盾较为突出。随着城市的发展，城市用地成本越来越高，城市内仓储用地资源日益紧缺。与此同时，电子商务的井喷式发展带来了巨大的仓储需求。经济越发达的地区，土地资源越紧缺，而对仓储用地的需求却越大。通过改进仓储模式，提高现有仓库的存储空间利用率，降低仓储成本，可有效缓解仓储用地资源紧缺与巨量仓储需求之间的矛盾，具有巨大的社会经济效益。

1.2 仓库内部的物流过程

仓库是物流链条上的核心环节，负责物资验收、存储、保管、分发等业务。在入库过程中，物资从上一个物流环节（火车站、机场、工厂等）运送到仓库后，需经过“入库需求→进入仓库→分配库房→物资托盘集装→进入库房→分配货位→物资上架”的物流过程实现入库，如图 1-1 所示；在

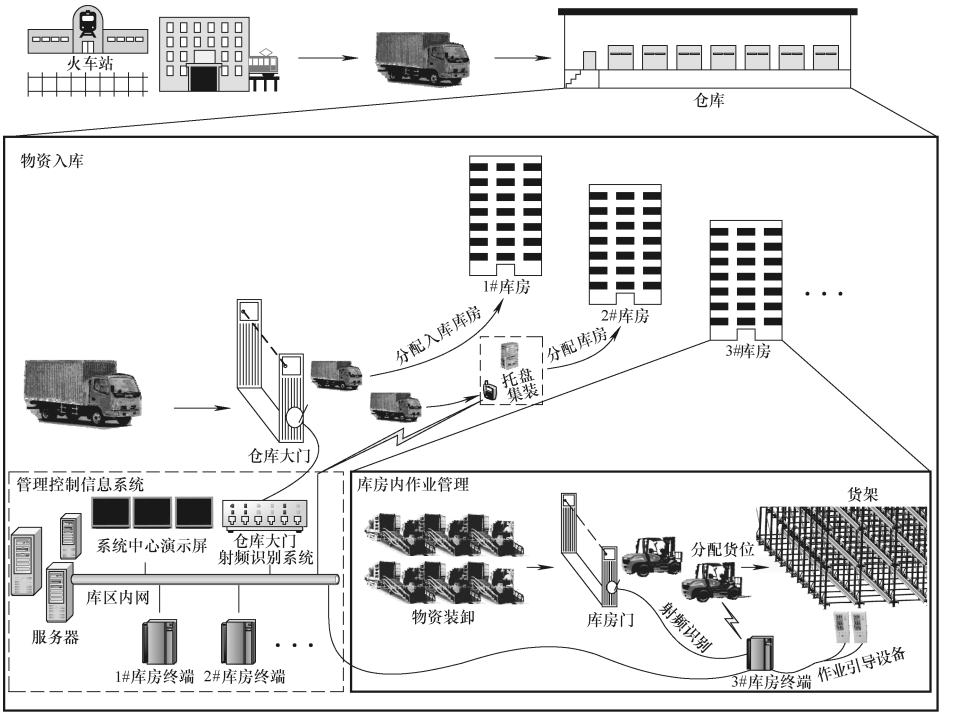


图 1-1　仓库的入库物流过程

需要全本请访问 www.ertongbook.com

出库过程中，物资经过“出库需求→分配货位→物资下架→运出库房→物资拆盘作业→运出仓库”的过程实现物资出库，然后送到下一个物流环节，如图 1-2 所示。

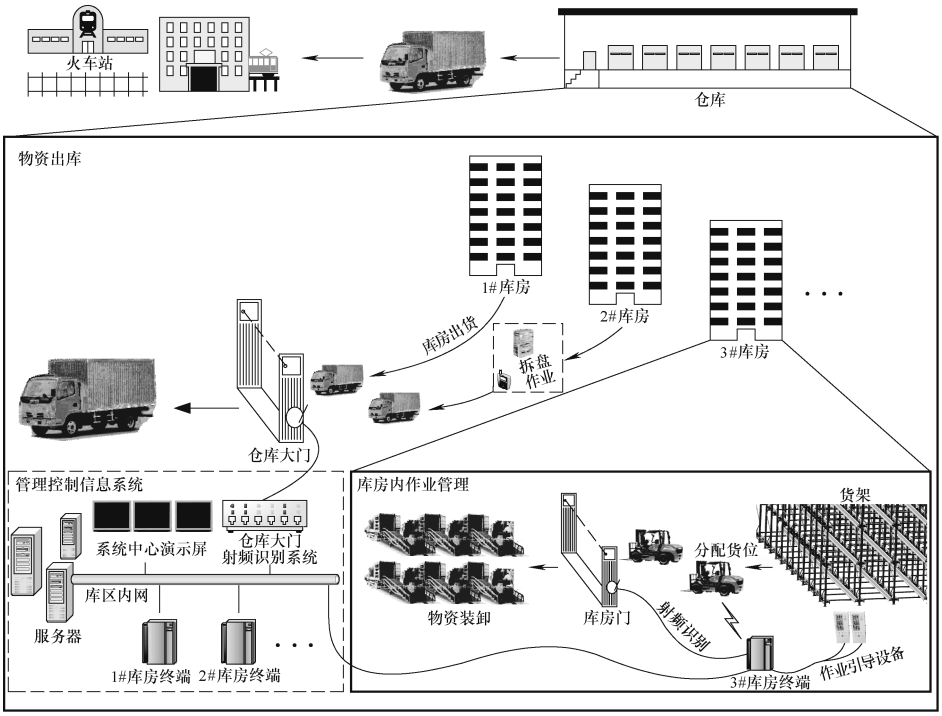


图 1-2　仓库的出库物流过程

为确保上述物流过程高效顺畅完成，货架、装卸搬运机械、集装化设备、信息化设备和管理控制信息系统需协同配合。通过提高每个环节的效率，做好各个环节之间的衔接，实现整个仓库的物资高效出入库。

1.3　常见库内仓储设施设备介绍

在传统的库房内，“码大垛+人工搬运”是常见的物资仓储模式。随着仓储物流行业技术的发展，“货架存储+装卸搬运机械”的机械化仓储作业模式得到越来越广泛的应用。相对于“码大垛”的存储方式，采用货架存储物资具有较多的优点：

1）可充分利用仓库空间，提高库容利用率，扩大仓库储存能力。

2）改善物资储存条件，减少损耗，无需频繁的倒库作业。

3）库存物资一目了然，便于清点、划分、计量等管理工作的进行，便于实现物资信息化管理。

4）满足大批量物资和品种繁多物资的存储与集中管理需要，使存储收发作业秩序井然。

5）物资存取方便，可全部或部分做到先进先出，具有批量出库或拣选出库能力，库存周转流畅。

6）便于物资进行标准化集装包装，提高了收发及运输作业效率。

7）减少了人员需求，降低了人员劳动强度。

在实际情况中，各个仓库的库房形式结构千差万别，存储物资的质量、体积、存储方式和收发频率各不相同，需要根据具体情况选择合适形式的货架进行存储，并结合配套的装卸搬运机械进行作业，才能达到较高的效率。

1.3.1 常见货架形式

货架是由支架、搁板或托架组成的立体存储物资的设施。市面上的货架形式较多，其中常见的货架形式主要有 10 种，包括巷道式自动化立体库货架、巷道式货架、窄巷道式货架、穿梭车货架、电动移动式货架、压入式货架、搁板式货架、流利式货架、阁楼式货架和悬臂式货架。这些货架组合应用，基本能满足大部分物资的仓储需求。

1. 巷道式自动化立体库货架

巷道式自动化立体库货架如图 1-3 所示。该货架系统的货架高度较高，

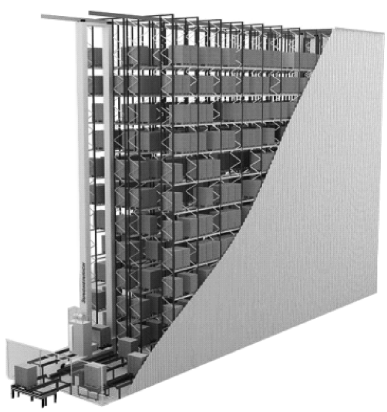


图 1-3　巷道式自动化立体库货架

库房面积较大，工作巷道和高层货架依次排列，由巷道堆垛机和输送机系统进行存取作业，具有物资自动识别分类、设备状态自主监控和物资信息计算机管理等功能，适合存储托盘集装物资。

2. 巷道式货架

巷道式货架如图 1-4 所示。该货架为托盘横梁式结构，由立柱片、横梁及其他标准配件构成，巷道宽度一般大于 2.8m。该货架可存储所有能用托盘（货箱）集装的物资，作业方式灵活，既可采用前移式叉车或插腿式叉车进行整托盘物资存取作业，也可用高货位拣选车进行物资拣选作业，适合存储收发频次较高、单次收发量较大的物资。

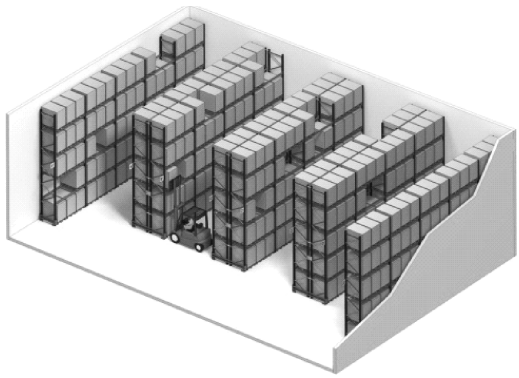


图 1-4　巷道式货架

3. 窄巷道式货架

窄巷道式货架如图 1-5 所示。该货架为托盘横梁式结构，由立柱片、横

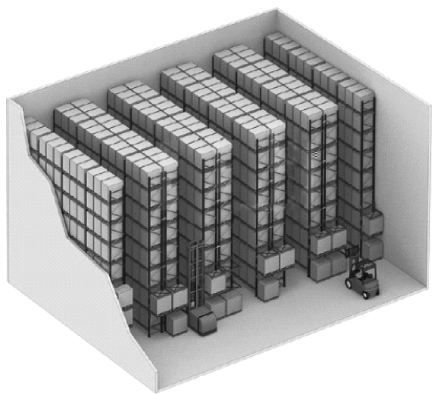


图 1-5　窄巷道式货架

梁、导轨（或磁性导轨）及其他标准配件构成，巷道宽度小于 2m。它既可采用三向叉车进行整托盘物资存取作业，也可用高货位拣选车进行物资拣选作业，适合存储收发频次较低、单次收发量较小的物资。

4. 穿梭车货架

穿梭车货架如图 1-6 所示。该货架为轨道贯通式结构，由立柱片、横梁、导轨及其他标准配件构成。货格内所有托盘物资密集排列，可根据实际需要布置成先进先出或先进后出模式，库房空间利用率较高。货格内托盘物资的搬运由双向穿梭车完成，托盘物资上下货架及双向穿梭车的转移由前移式叉车或巷道堆垛机完成，作业方式灵活，作业安全性较高。穿梭车货架适合存储品种规格少、批量大、单次同品种物资收发量较大的托盘集装物资。

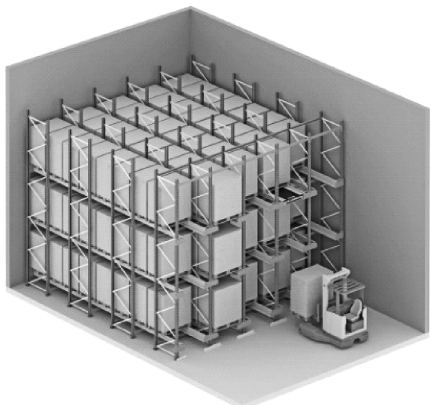


图 1-6　穿梭车货架

5. 电动移动式货架

电动移动式货架如图 1-7 所示。该货架为重型移动式结构，由立柱片、横梁、底座轨道、滚轮、驱动系统及其他标准配件构成，每列货架均由一个电机驱动，由安装在货架下的滚轮沿铺设于地面上的轨道移动，物资存储密度较高。由于作业时各列货架需频繁移动，故作业效率较低，且每列货架的层数不宜过高，长度不宜过长。该货架由叉车存取托盘物资，采用整托盘作业，适合存储收发频次低、单次收发量小、储存时间较长、可用托盘集装的物资。

6. 压入式货架

压入式货架（又称后推式货架）如图 1-8 所示。该货架由立柱片、横梁、轨道、托盘小车及其他标准配件组成。轨道外低内高，呈一定的坡度

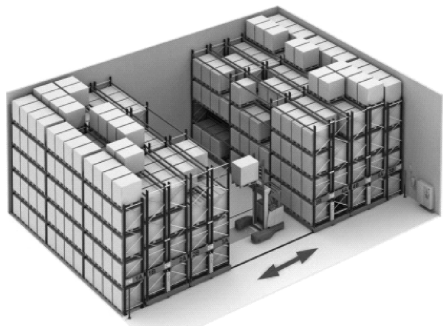


图 1-7　电动移动式货架

(约 3°)，货格内每个托盘小车具有不同的高度，空车时可逐个嵌套层叠于货格端口。每个货格内托盘物资先进后出，入库时叉车将物资及托盘小车逐个压入货格内，出库时各个托盘小车依靠重力依次滑向货格端口。该货架空间利用率较高，主要采用前移式叉车或平衡重式叉车进行物资收发作业，适合存储大批量、少品种的物资。

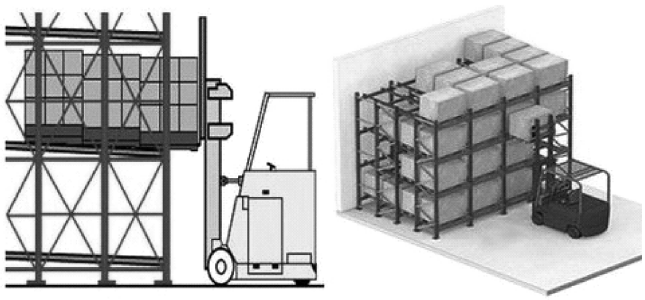


图 1-8　压入式货架

7. 搁板式货架

搁板式货架如图 1-9 所示。该货架为层板式结构，由立柱（或立柱片）、横梁、层板及其他标准配件构成。根据货架高度的不同，由拣选车或人工进行物资拣选和补货作业，适合存储体积、重量较小，品种、规格较多的小件零散物资。

8. 流利式货架

流利式货架如图 1-10 所示。该货架由立柱片、横梁、侧梁、流利条、分隔板（杆）等构件组成，可根据需要增设电子标签，与自动化分拣系统配套使用，实现物资信息化管理，物资存放于周转箱、零件盒或纸箱中，靠

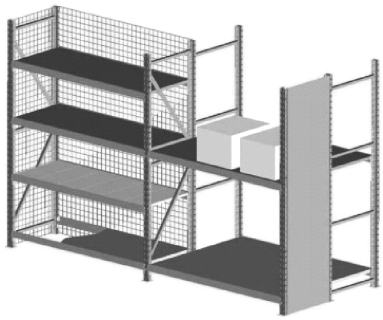


图 1-9　搁板式货架

自重沿流利条下滑。该货架主要采用人工拣选作业，由叉车、托盘搬运车或平板手推车进行补货，拣选和补货在货架两端分别进行，货架一端补货，另一端拣选出库。流利式货架适合存储体积、重量较小，品种规格较多的小件零散物资。

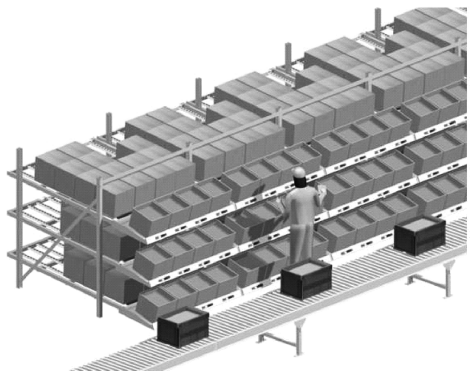


图 1-10　流利式货架

9. 阁楼式货架

阁楼式货架如图 1-11 所示。该货架在利用搁板式货架作为主体支承的基础上，增加了楼层板、护栏、楼梯等构件，根据场地条件可设计两层或三层。该货架主要采用人工拣选作业，由托盘搬运车或平板手推车进行补货作业，两层以上由叉车、液压升降台或货梯实现物资垂直输送，适用于库房较高、物资体积重量较小、品种规格较多、存储量较大的情况。

10. 悬臂式货架

悬臂式货架如图 1-12 所示。该货架由立柱（或立柱片）、悬臂、拉杆、底座等构件组成，用于存储长形物料（管材、棒材等），主要采用侧面叉车

需要全本请访问 www.ertongbook.com