

基于双舵轮驱动的全向搬运装备设计

杨波 胡攀辉 冯立杰 颜士肖 曹红星

(上海航天精密机械研究所, 上海 201600)



摘要: 顺应构建现代化军事物流体系趋势, 围绕一线部队导弹仓储搬运保障能力提升, 旨在解决因人员编制缩减、任务量增加带来的劳动强度大、作业效率低问题, 设计了一种基于双舵轮驱动的全向搬运装备, 提出了关键部件的快速设计、选型的工程方法, 并初步分析了双舵轮驱动情况下运动模式及其运动参数, 通过爬坡试验、速度及转向试验、续航试验等典型工况试验, 对全向搬运装备的设计性能进行了实际考核, 验证了全向搬运装备的应用工况适应性, 对部队库房开展基于舵轮结构的全向搬运装备的普及应用, 具有较好的示范意义, 对未来进一步智能化仓储物流装备普及应用具有一定的基础探索价值。

关键词: 双舵轮; 全向搬运装备; 仓储保障; 军事物流

中图分类号: TP249 **文献标识码:** B

Design of Omni-directional Moving Equipment Based on Double Steering Wheel Drive

Yang Bo Hu Panhui Feng Lijie Yan Shixiao Cao Hongxing

(Shanghai Aerospace Precision Machinery Research Institute, Shanghai 201600)

Abstract: Following the trend of building a modern military logistics system, and focusing on the improvement of missile storage and handling support capacity of the troops, solving the problems of high labor intensity and low operation efficiency caused by the reduction of staffing and the increase of tasks, an omni-directional moving equipment based on double steering wheel drive is designed. The engineering method of rapid design and selection of key components is put forward. The motion mode and motion parameters under the condition of double steering wheel drive are preliminarily analyzed. Through typical working condition tests such as climbing test, speed and steering test and endurance test. The design performance of omni-directional moving equipment is actually evaluated, and the application adaptability is verified. It has a good demonstration significance for the popularization and application in military warehouse. It has certain basic exploration value for further popularization and application of intelligent warehousing and logistics equipment in the future.

Key words: double steering wheel; omni-directional handling equipment; storage guarantee; military logistics

1 引言

构建现代化军事物流体系既是适应新时期部队深化改革需要, 也是打赢联合化、体系化、智能化

战争的必然要求。导弹装备的仓储供应保障能力是军事物流建设的重要环节。当前导弹装备仓储供应保障水平正处在人力密集型向技术密集型转变的阶段, 纯手工搬运、架车拖运等手段仍然是仓储作业

作者简介: 杨波 (1988), 高级工程师, 电气工程专业; 研究方向: 导弹装备综合保障体系、军用智能仓储技术、自动化保障装备开发。

收稿日期: 2022-07-11

的主要方式^[1]。随着后勤保障人员的缩编、大量高新技术导弹武器批量列装，传统的机械化作业方式已不能满足现实需要。

随着我国物流技术的发展，AGV已经普遍应用，极大地提高了物流搬运效率^[2]。如何将成熟可靠的AGV技术转化应用到军事仓储保障领域是当前部队保障单位思考的热点。对比麦克纳姆轮驱动、舵轮驱动、差速轮驱动等轮系结构，从路面适应性、可靠性、维修性等方面综合考虑，本文提出了一种基于双舵轮驱动的全向搬运装备设计方案，制定了关键部件的设计选型方法，研制样机并进行验证。

2 方案设计

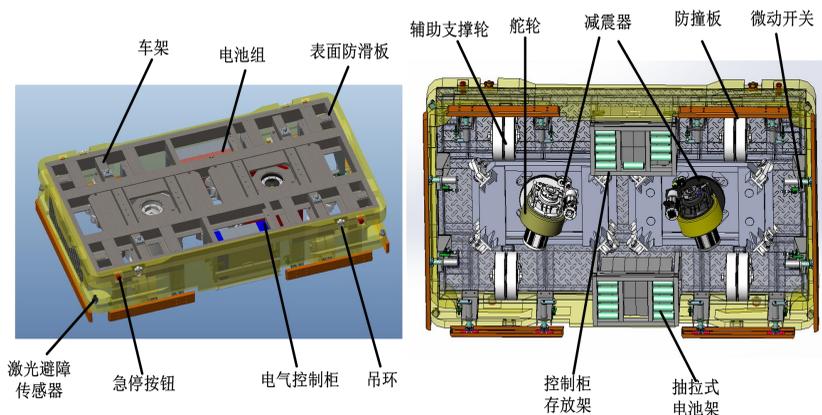


图1 装备结构示意图

2.2 全向搬运装备的构成

全向搬运装备主要由承载车架、减震系统、电池模块、电气控制系统、舵轮系统、安全防护与指示系统、遥控系统构成。

2.2.1 承载车架

承载车架是搬运装备的关键组成部分，一方面通过安装接口与搬运的产品对象直接接触，另一方面与舵轮、万向轮等配合形成满足适应路况行驶要求的基础平台。其既要承受搬运产品的静载荷，又要承受路面行驶带来的冲击载荷，结构和强度要求十分苛刻。重载搬运设备的车架一般采用工字钢拼焊而成，局部强度加强，同时整体进行喷涂防护，适应盐雾霉菌环境要求。

2.2.2 减震系统

减震系统与舵轮成套应用，是搬运装备平稳运动不可或缺的组成部分，主要由减震底座、导向机构、轴套、模具弹簧等组成，其设计选型与搬运装备的自

2.1 总体方案确定

当前国内外物流搬运领域常用的舵轮驱动转载装置的主要形式有单舵轮、双舵轮中线布局、双舵轮对角布局、四舵轮等^[3]。单舵轮形式适合运动精度低、载重量小、路面平整的场合，四舵轮形式适合运动精度要求高、承载量大、坡度或坑洼路况、小转弯半径的场合，双舵轮形式适合运动精度要求低、载重量大、坡度或坑洼路况、小转弯半径的场合。

考虑到军用仓储库房的路况随机性大、作业空间小以及费效比等因素，本项目全向搬运装备选择双舵轮中线布局结构形式（如图1所示）。装备四角为万向轮、中间为两个舵轮，舵轮上设置减震装置，可保证任意时刻舵轮与地面接触并提供驱动力。

重、满载重量、爬坡度等因素密切相关。装备运行过程中，减震机构通过弹簧伸缩自适应坑洼路面工况，始终保证行进驱动力的存在，同时可吸收颠簸路况带来的部分冲击力，减少对车架的冲击。

2.2.3 电池模块

电池模块是搬运装备的电气系统的唯一能量来源，其设计选型需综合考虑日作业频次、续航时间、环境温度、电气接口、空间尺寸、重量等因素。锂电池因具有能量管理数字化、功率密度大、重量轻、低温性能优异等特点成为电动搬运设备的首选。本项目电池模块采用磷酸铁锂电池组，具有模块过压、过流、过充、过放、短路、过温、单体电压均衡保护等安全保护功能。电池贮存柜采用减震、散热、快速拆装设计，确保搬运装备长距离安全运输、异常情况快速换电维修。

2.2.4 电气控制系统

电气控制系统是全向搬运装备运动功能实现的

“控制”中枢，主要包含控制单元（S1200PLC 控制器、CANOPEN 模块、数字量输入/输出模块及电磁继电器、驱动器等）、供配电单元（空气开关、断路器、接触器、开关电源等）。控制单元用于将遥控器输入指令、安全防护指令等通过设定的控制逻辑转化为舵轮电机的动作指令。供配电单元用于将电池模块的电能按照负载电压电流需求进行均衡分配，设置隔离保护、过流保护、短路保护等功能。

2.2.5 舵轮系统

舵轮系统是全向搬运装备运动功能实现的“执行”中枢，决定了全向搬运装备对仓储库房区域间负载爬坡行驶、坡道停车、库房内产品转运等任务剖面的实现能力。本项目包含两套舵轮系统，每套包含舵轮结构、行进电机、转向电机及限位机构等。行进电机是舵轮系统的最主要部件，决定全向搬运装备的行驶速度、驱动力。

2.2.6 安全防护与指示系统

安全防护与指示系统是全向搬运装备的安全性、测试性设计的集中体现。安全防护功能涉及激光雷达传感器、防撞气囊、急停开关等部件，激光雷达传感器对障碍物探测距离 5m 内可调、270°范围可测。指示系统涉及运行状态指示灯、故障状态指示灯、扬声器、闪爆灯，对应设置了 PLC 控制器、驱动器、安全气囊、机关雷达传感器、舵轮转向角、电池电量、遥控器等主要元器件的状态，异常情况下通过指示灯的颜色变化、扬声器鸣叫予以警示，并主动控制停车，帮助使用人员快速定位故障信息以便做出精准维护维修判断。

2.2.7 遥控系统

遥控系统用于全向搬运装备指令输入，包含运动模式切换面板、运动模式操控面板、速度切换面板等。运动模式切换面板包含前进、后退、左移、右移、左对角、右对角、旋转等，对应的运动模式操控面板有速度控制摇杆、方向控制摇杆，在前进、后退模式下，具备行进间转向调整功能。

2.3 关键部件的选型与计算

全向搬运装备的舵轮、减震系统、电池模块等三部分决定其功能、性能指标是否满足的关键组成。以爬坡度、行驶速度、装备自重、满载装量等指标为输入、以爬坡驱动力、摩擦力、抱闸力的相互关系为边界约束条件开展设计，通过正向计算、逆向校核，明确各部件的关键设计指标，结合标准化、型谱化的产品最终确定关键部件的型号。

2.3.1 输入指标

根据搬运装备实际应用工况，形成装备的设计输入指标要求如表 1 所示。

表 1 设计输入

名称	数值
爬坡度 $\theta(^{\circ})$	5
自重 G_1/N	30000
满载重量 G_2/N	90000
行驶速度 $V_1/m\cdot s^{-1}$	0.5
续航时间 T_1/h	2

2.3.2 边界约束条件

a. 爬坡行驶约束

爬坡状态下，一方面要满足舵轮产生的驱动力大于满载情况下的坡道下滑力，保证足够的爬坡力。另一方面要满足舵轮驱动力小于舵轮与地面的最大静摩擦力，确保舵轮爬坡时不打滑。具体约束关系如下：

$$G_2 \sin \theta \leq T_{\text{电机最大}} \times \alpha \times \eta \div R \times 2$$

$$T_{\text{电机}} \times \alpha \times \eta \div R \leq F_{\text{舵轮正向压力}} \times \mu$$

其中： α 是舵轮的减速比， η 是舵轮减速器的传动效率， $T_{\text{电机}}$ 是电机最大输出扭矩， R 是舵轮半径， μ 是舵轮与地面的滑动摩擦系数。

b. 坡道驻车约束

坡道驻车状态下，一方面要满足装备满载下滑力小于最大摩擦力，保证抱闸状态下不滑坡。另一方面要满足舵轮抱闸力于最大摩擦力，确保抱闸力充足。具体约束关系如下：

$$G_2 \sin \theta \leq F_{\text{舵轮正向压力}} \times \mu \times 2 + F_{\text{舵轮正向压力}} \times \mu_{\text{滚动摩擦}} \times 4$$

$$G_2 \sin \theta \times R \div \alpha \div \eta \leq T_{\text{抱闸}}$$

c. 行驶速度约束

电机额定转速条件下，应满足装备实际行驶速度大于速度要求值。约束关系如下：

$$V_1 \leq N \times \pi \times R \times 2 / (60 \times \alpha)$$

其中： N 为行进电机额定转速。

2.3.3 关键部件选型与计算

通过上述约束条件的计算，利用现有舵轮的轮径和减速比的标准匹配序列，能得到行进电机的最小扭矩、减震机构的最小正向压力、行进电机最小额定转速值，进而进一步开展电机功率、减震机构压缩量、

电池容量的计算。

a. 舵轮及行进电机选型

行进电机的功率计算按照如下约束进行：

$$P_{\text{电机最大}} \geq T_{\text{电机最大}} \times N / 9550$$

$$G_2 \sin \theta \leq F_{\text{舵轮正向压力}} \times \mu \times 2 + F_{\text{舵轮正向压力}}$$

$$\times \mu_{\text{滚动摩擦}} \times 4 \times V_1 \leq P_{\text{电机额定}} \div 2$$

综合电机的额定功率、最大功率、最大扭矩、最大转速、抱闸力矩等参数即可确定舵轮用行进电机。再根据舵轮的直径、减速比等参数，选择直径 420mm、减速比 29 的舵轮，行进电机功率为 3kW。

b. 减震机构压缩量计算

理论压缩量计算：

$$F_{\text{舵轮正向压力}} = k \times L$$

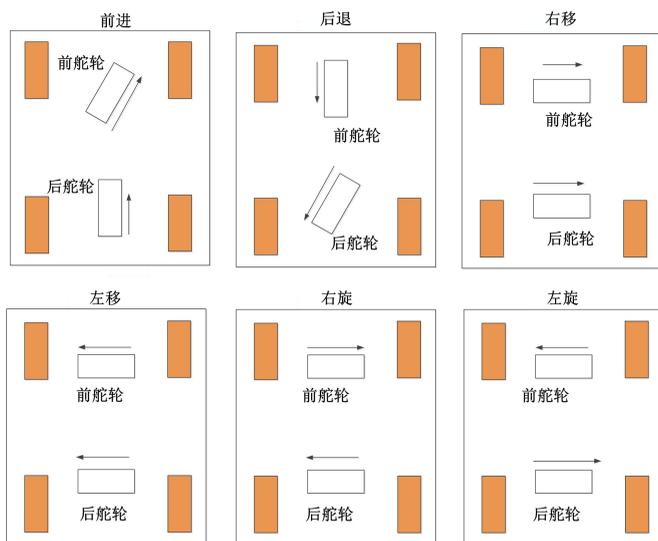


图 2 运动模式示意

左移、右移、原地旋转模式下的装备的控制速度、转弯半径、自旋角速度等相对简单，前进后退模式下需要一定的约束关系和控制保证精度。在前进运动模式中，后舵轮是驱动轮，前舵轮既是驱动轮也是转向轮，理论上两者之间在速度、转向角度上存在固定关系。这种关系是全向搬运装备手动运动控制过程中的必需保证条件，否则会因前后轮不同步导致舵轮磨损加剧和直行电机的老化，甚至因反电势的产生影响电气控制系统的可靠性。有必要对前进/后退模式下的双舵轮速度约束关系、装备转弯半径、自旋半径等进行分析。

假设前进状态下前舵轮速度为 V_2 ，后舵轮速度为

由于减震机构长时间处于受压状态，弹簧会产生时效、疲劳效应，导致正向压紧力减少。因此减震机构初始正向压力需取范围内的上限值，压缩量取 15mm。

c. 电池容量估算

理论计算容量：

$$Q \times U = G_2 \times \mu_{\text{滚动摩擦}} \times V_1 \times T_1$$

工程设计上，电池容量的计算还应考虑低温环境、充电深度、放电深度衰减等因素影响，实际电池容量约为理论容量的 1.6 倍，电池规格为 200AH/48V。

2.4 运动模式及运动参数分析

全向搬运装备运动模式有前进、后退、左移、右移、原地旋转等，每种模式下舵轮方向如图 2 所示。

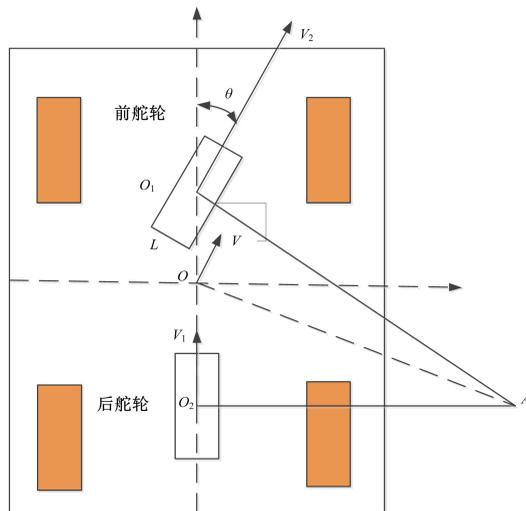


图 3 行进转向分析图

V_1 ，前舵轮相对后舵轮的速度夹角为 θ （顺时针为正，逆时针为负）。 O_1 、 O_2 、 A 、 O 分别为后舵轮中心点、前舵轮中心点、装备位移中心点、装备整体转弯圆心^[4]，如图 3 所示。则存在以下关系：

前舵轮与后舵轮速度关系：

$$V_1 = V_2 \times \cos \theta$$

整体瞬时速度：

$$V = \sqrt{(2 \times V_1)^2 + (V_2 \times \sin \theta)^2}$$

装备转弯半径：

$$AO = \sqrt{V_2^2 \times \frac{OO_2^2}{\tan^2 \theta} + OO_2^2}$$

装备自旋角速度:

$$\omega = V_2 \times \sin \theta / O_1 O_2$$

各种运动模式下运动参数如表 2 所示。

表 2 各种运动模式下运动参数

运动模式	前后舵轮速度	转弯半径	自旋角速度
前进	$V_1 = V_2 \times \cos \theta$	$\sqrt{V_2^2 \times \frac{O_1 O_2^2}{\tan \theta} + O O_2^2}$	$V_2 \times \sin \theta / O_1 O_2$
后退	$V_2 = V_1 \times \cos \theta$	$\sqrt{V_2^2 \times \frac{O_1 O_2^2}{\tan \theta} + O O_2^2}$	$V_2 \times \sin \theta / O_1 O_2$
左移	$V_2 = V_1$, 方向相同	0	0
右移	$V_2 = V_1$, 方向相同	0	0
左原地旋转	$V_2 = V_1$, 方向相反	0	$V_1 / O_1 O_2$
右原地旋转	$V_2 = V_1$, 方向相反	0	$V_1 / O_1 O_2$

3 使用安全性设计

在全向搬运设备使用操作的安全性设计方面采取了如下多种措施:

a. 限速设计。针对空载运行、满载运行两种使用条件, 设置了空载速度、满载速度两档速度, 并在每当速度中增加了速度调节功能, 仅能在设定档位速度以内控制运行。同时按照运动模式的不同, 进行差异化的速度限制, 使模式操控下更加安全。

b. 避障设计。为适应狭小空间搬运作业的需求, 既保证产品安全又保障作业现场人的安全, 设计了激光避障传感器、防撞气囊双重避障防护。激光避障传感器可根据搬运产品对象的外形尺寸定制扫描探测区域, 实现非接触避障急停。防撞气囊作为障碍物接触式检测手段, 起到末端止损的作用。

c. 急停设计。在失速、避障失灵等极端异常情况下, 装备失控会造成不可预测的后果, 急停开关的设置是一种较为常规的避险措施。全向搬运装备在侧面四角分别设置常闭式急停开关, 保证在任意方向随时进行人工干预, 直接断开控制回路, 使装备紧急停止。

d. 复位设计。运动模式状态的随机操作, 比如旋转模式下断电停止后随机切换到其他模式、模式切换过渡阶段突然断电等情况, 特别容易造成二次开机下

运动模式对应不可知、编码器数值紊乱等, 极易造成装备损坏并对搬运的产品带来安全隐患。复位功能的设置一方面具备开机运动状态模式复位功能, 保证开机时必定是前后运动模式, 另一方面在编码器数值紊乱时, 可手动归位赋值, 辅助现场驱动异常的处理。

e. 互锁设计。全向搬运装备的运动模式与速度、方向的操作是一一对应的, 要求各模式相互之间不能进行操作干预, 这就需要进行运动模式的互锁设计。互锁启动以检测模式切换开关信号的上升沿为新的开始, 将新模式提高为操作的最高优先级, 并屏蔽其他模式。

4 试验验证

本项目以设计指标为输入条件, 进行了关键部件的选型与计算, 并分析了运动模式的运动参数, 研制了相应的试验样机。为验证爬坡能力、行驶速度、续航能力等主要技术指标, 策划开展了爬坡试验、速度试验、续航试验等试验验证。

a. 爬坡试验

全向搬运装备负载 6000kg 的搬运产品, 以最大行驶速度进行爬坡运动, 并在坡道上驻车 20min, 然后坡道起步完成爬坡任务。试验工况和实验数据如表 3 所示。

表 3 爬坡试验记录

坡度/(°)	5.17
坡道长度/m	4
驻停时间/min	20
滑坡情况	驻停期间无滑坡
坡道起步情况	顺畅起步, 通过坡道

从试验结果看, 负载情况下的全向搬运装备爬坡顺畅, 驻停期间无滑坡, 实现了坡道起步, 表明舵轮的抱闸装置、行进电机扭矩、减震机构等指标参数象牙白则方法正确、合理可行, 满足了爬坡能力要求。

b. 速度与转弯试验

表 4 速度试验记录

路面	厂区水泥地面
舵轮轴距/m	2.3
测速长度/m	20
测速时间/s	30
90°转弯时间/s	16
180°转弯时间/s	33
转弯情况	装备无异常、不卡顿

全向搬运装备负载 6000kg 的搬运产品：一种情况，在水平地面上以最大满载行驶速度行驶，记录行驶时间、行驶距离；另一种情况，装备以最大拐弯角度 25° 进行行进间拐弯试验，记录装备自旋 90°、180° 所用的时间。试验数据如表 4 所示。

从试验结果看，负载情况下的全向搬运装备的直线行驶速度可达 0.67m/min，最大拐弯角度情况下的 90°、180° 拐弯时间为 18s、35s，直线行驶速度与理论分析结果基本一致，自旋转弯时间稍有差别，主要是由于转弯过程中不断受到 4 个万向轮的随机阻力，舵轮的实际速度会稍有降低。从转弯无卡顿看，前后舵轮的速度匹配正常。

c. 续航试验

全向搬运装备负载 6000kg 的搬运产品，分别在在常温常湿、低温-15℃ 的条件下以最大行驶速度往复行驶，进行续航测试。试验工况和实验数据如表 5 所示。

从试验结果看，低温-15℃ 状态下，电池续航时间在 1.5h 左右开始出现电量报警，常温 13℃ 情况下电池续航时间在 3.3h 左右开始出现电量报警，满足设计输入指标要求。同时说明低温情况下，电池放电能力衰减幅度较大，低温运行的锂电池选型时应在满足重量、尺寸约束的基础上保留足够的设计余量。

5 结束语



(上接第 37 页)

在后续实际应用过程中对标准不断进行完善、修订。

6 结束语

在轨制造标准体系的构建不能单单依靠某一机构或企业，而是要汇聚各方力量，建立一个共同认可的、具有前瞻性、科学性、可实施性的在轨制造标准体系。

构建在轨制造标准体系架构是在轨制造发展总体战略的重要内容，是指导在轨制造技术相关标准研究与制定的战略性、纲领性文件，对促进在轨制造相关规划设计、技术研发、装备制造、试验研究及保证在轨制造技术的可持续发展具有重要意义。

本文针对武器装备仓储库房的应用场景、使用工况、迫切需求，设计了一种基于双舵轮驱动的全向搬运装备，进行了关键部件选型和运动模式分析，装备通过了爬坡试验、速度及转向试验、续航试验等典型工况试验考核。试验表明：

- a. 全向搬运装备方案设计合理可行，关键部件参数的选型方法简单有效。
- b. 全向搬运装备通过电驱动设计、多运动模式设计，能够适应部队仓储库房工况条件应用需求。
- c. 全向搬运装备设计技术对部队库房开展基于舵轮结构的全向搬运装备的普及应用具有较好的借鉴意义，对未来进一步智能化仓储物流装备普及应用具有一定的基础探索价值。

参考文献

- 1 吴量. 智能化军事物流保障技术体系研究[J]. 军事运筹与系统工程, 2021, 35(2): 75~77
- 2 杨文华. 我国仓储物流机器人发展现状与未来趋势[J]. 物流技术应用, 2017(6): 9~10
- 3 王成龙, 吴卫国. 磁导式四舵轮重载 AGV 运动控制系统研究[J]. 工程应用, 2021(12): 24~25
- 4 钱伟, 任雪林. 基于智能仓储重载 AGV 运动控制系统研究与实现[J]. 自动化与仪器仪表, 2021(6): 62~64
- 5 任文强, 张秋菊. 基于改进的动态窗口法的双舵轮轨迹跟踪研究[J]. 制造业自动化, 2021, 43(11): 88~89

参考文献

- 1 NASA 标准系统. <https://standards.nasa.gov/all-standards>
- 2 NASA-STD-6030 Additive Manufacturing Requirements for Spaceflight Systems.
- 3 NASA-STD-6033 Additive Manufacturing Requirements for Equipment and Facility Control.
- 4 邱楠, 郭晋媛, 郭德华. 国外航天标准化现状对我国卫星领域标准走出去的启示[J]. 标准科学, 2020(12): 35~39
- 5 贾平. DARPA 制定全球首套无人人在轨服务标准[J]. 国际太空, 2019(8): 56~58
- 6 代健, 康登榜, 张嵩. 我国商业航天标准体系构建与标准化发展模式探索[J]. 航天政策与管理, 2021(5): 24~26