

DOI: 10.3969/j.issn.2095-9869.20251117001

http://www.yykxjz.cn/

江涛, 朱烨, 洪扬, 杨猛, 唐震杰. 海带绳网连续输送铺晒设备设计与中试试验. 渔业科学进展, 2026, 47(2): 102–115
JIANG T, ZHU Y, HONG Y, YANG M, TANG Z J. Design and testing of a continuous conveying and spreading system for drying kelp. Progress in Fishery Sciences, 2026, 47(2): 102–115

海带绳网连续输送铺晒设备设计与中试试验*

江涛^{1,2①} 朱烨^{1,2} 洪扬^{1,2} 杨猛^{1,2} 唐震杰³

(1. 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所 上海 200092; 2. 农业农村部渔业装备与工程技术重点试验室 上海 200092; 3. 江阴市腾龙机械制造有限公司 江苏 无锡 214400)

摘要 本研究设计了一种具有盖网的海带网铺设备,旨在减轻海带铺晒过程中的劳动强度、提升海带干燥品质。设备整体结构包括钢丝绳同步防滑装置、绳网结构组件、尾部卷筒组件、双滚轮支架组件和盖网组件。在结构设计中,对钢丝绳的受力及同步防滑性进行了分析。中试试验结果显示,50 m 长的海带绳网连续输送铺晒设备,在 20~100 kg 载荷下,钢丝绳拖拽张力的范围为 836.428~1 068.3 N。钢丝绳相对位移在±4 mm 以内,盖网最大可抵抗 13.8 m/s 风速。为不同长度的铺晒设备提供了拖拽力及功率配置的依据。同时,通过钢丝绳网带同步输送与盖网协同恒张力收放技术,实现了海带的连续、高效与平整铺晒,可有效避免大风对网铺海带的影响,防止海带吹落地面,保证了清洁度并提升了干燥品质,铺晒干海带的平整度及干燥速度均优于垂挂晾晒。

关键词 海带铺晒; 钢丝绳; 盖网装置; 连续输送

中图分类号 S985.4 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2026)02-0102-14

大型海藻在我国水产养殖中占有重要地位,2024 年全国海藻养殖总产量为 302.94 万 t,其中海带(*Saccharina japonica*)占比 61.4% (农业农村部渔业渔政管理局等, 2025)。海带收获期通常只有 2~3 个月,大量收获的新鲜海带含水率高(湿基含水率 90%左右)(郭赛飞等, 2022; 国家藻类产业技术体系, 2021)。为了防止海带腐败变质,需要尽快进行初级加工处理(前处理),以便贮藏及后续加工。海带的前处理方式主要是晒制与盐渍(陈婷茹等, 2025; 李颖等, 2023),盐渍是通过食盐腌制抑制微生物生长,不受天气限制,可快速处理高水分海带,常用于规模化加工场景(崔瑞阳等, 2025; 赵茹月等, 2024);晒制是依靠自然光与风进行干燥,虽受气候条件制约,但因其几乎无能耗成本(Sparvath *et al.*, 2025; Perry *et al.*, 2019),在光照充足的地区仍是重要的加工方式(陆东和等, 2020)。

晒制又可分为垂挂晾晒与摊晒两种方式,前者占地面积小、海带干品不含沙粒,但存在干燥周期较长、海带体卷曲及胶体流失等问题(福建总站, 2025; 日本水产研究与教育机构, 2018);后者干燥效率较高,海带干品平整,但传统沙滩摊晒易导致海带附着沙粒,严重影响品质,多限于化工原料与饵料使用。为了提升摊晒海带品质,部分地区采用卵石(刘文权等, 2018)、网架或在沙滩上铺垫聚乙烯网,将海带摊晒其上,海带干品可达到优质海带标准(王联珠等, 2013)。

传统海带晒制主要以人工为主,存在着劳动强度大、作业效率低的问题,制约了产业的发展(Demissie *et al.*, 2024; Asim *et al.*, 2022)。随着从事渔业劳动力日益短缺,实现海带晒制环节机械化已成为产业发展的迫切需求。对此,国内外研究人员开始对海带晒制的机械化设施、设备进行研究(朱烨等, 2024; 严涵伟等,

* 现代农业产业技术体系(CARS-50)和中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费(2023TD86)共同资助。

① 通信作者: 江涛, 研究员, Email: jiangtao@fmiri.ac.cn

收稿日期: 2025-11-17, 收修改稿日期: 2025-12-11

2025), 研发了海带绳自动悬挂提升、晾晒杆周转系统(何永艳等, 2025; 朱焯等, 2020), 多层载料盘晾晒系统(姜稀腴, 2019), 海带延绳晾晒系统(严国圣等, 2025; 王振华等, 2024), 上述研发的机械化晾晒系统提高了作业效率, 降低了劳动强度。与晾晒机械化研究相比, 适用于优质海带摊晒的机械化技术装备却鲜有研究。目前, 海带在网架上的摊晒与回收, 需人工频繁往返, 劳动强度高。

为了实现高效、连续的机械化海带摊晒作业, 现有的链网结构虽性能可靠, 但制造成本高, 仅限于短距离物料承载与输送, 限制了其在大规模场景下的应用, 亟待开放适用于海带摊晒的经济型承载与输送技术。本研究重点阐述钢丝绳网同步输送技术与盖网协同恒张力收放技术, 开发一套海带绳网连续输送铺晒设备, 并开展中试试验, 以期实现海带铺晒的自动输送与回收, 为产业应用与推广提供技术支撑。

1 结构与方法

1.1 结构与机理

绳网连续输送铺晒设备包括钢丝绳同步防滑装置、绳网结构组件、尾部卷筒组件、数个双滚轮支架组件和盖网组件构成(图 1); 绳网结构组件的钢丝绳绕过同步防滑装置的主动和被动槽轮, 经过数个双滚轮支架组件的下滚轮、尾部反向卷筒至数个双滚轮支架组件的上滚轮后钢丝绳首尾连接形成跑道形闭环。初始状态绳网结构组件载料网的端部位于跑道形闭环上沿的初始端, 其余绝大部分位于跑道形闭环的下沿。盖网首端与载料网端部的横杆连接在一起。放置铺晒时, 操作人员开始放置海带, 在动力驱动下, 主动槽轮带动钢丝绳与载料网前移, 后续的网片由跑道形闭环下沿经尾部卷筒移动至跑道形闭环上沿的初

始端, 用于继续放置铺晒物, 此时网片端部的横杆会带动盖网首部一起往前移动, 并覆盖在载料网海带上, 直至到达设备的最远端。物料晒干后, 动力驱动主动槽轮反向旋转, 钢丝绳由远及近移动, 操作人员取下近处海带干品时, 载料网经尾部卷筒后移动至跑道形闭环下沿。盖网盘将盖网自动收卷。最终盖网首端与载料网端部返回至初始端的位置。

铺晒绳网长度为 50~300 m, 仅需在设备的摆放端放置海带等需要铺晒的物料, 通过机械传动, 将载有物料的载料网逐渐向远处输送, 直到海带铺满整个网片。载料网会带动上方的盖网, 随网带输送, 将盖网从卷筒中拽出, 正好铺盖在海带上, 防止物料被大风刮跑。收物料时作业人员可在原地, 将载料网反向移动, 将就近的物料逐一收回。该设备可减轻作业人员在铺晒和回收物料时远距离走动的劳力。同时, 可在铺晒端搭建凉棚, 避免作业人员在烈日下酷暑。

1.2 钢丝绳的受力

钢丝绳是海带机械化输送摊晒设备的主要零件, 钢丝绳的张力来源于海带、载料网、盖网、钢丝绳等重力、张紧装置的张紧力以及设备启动时的动态力等, 钢丝绳工作时垂度及各种力的理论计算可参考带式输送机(李玉瑾, 2022)。

1.2.1 钢丝绳的垂度与张力 假设钢丝绳为不可伸长的, 且作用在托辊处的张力相等均为 T_0 , 载荷沿钢丝绳长均匀分布, 钢丝绳的形状为一悬链线, 悬链线的垂度为:

$$f_x = \frac{(q_B + q_G)g}{2S_0} x^2 \quad (1)$$

式中, f_x 为悬链线垂度(m); q_B 和 q_G 分别为钢丝绳、输送物料单位长度的质量(kg/m); g 为重力加速度 (m/s^2), S_0 为钢丝绳的初始张力(N)。

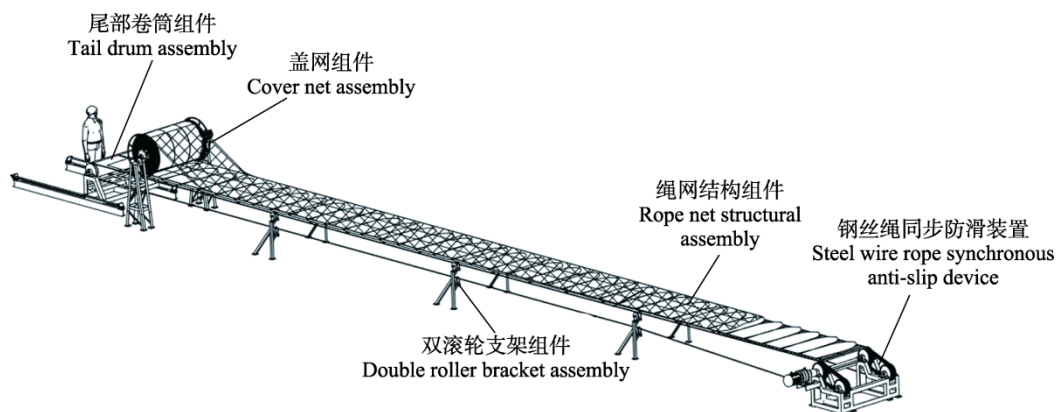


图 1 海带机械化输送摊晒设备作业示意图

Fig.1 Schematic diagram of mechanized kelp conveying and drying equipment operations

两支撑托辊间钢丝绳的长度为:

$$l = 2 \int_0^{\frac{l_p}{2}} \left[1 + \frac{(q_B + q_G)^2 g^2}{2S_0} x^2 \right] dx = l_p + \frac{(q_B + q_G)^2 g^2}{24S_0^2} l_p^3 \quad (2)$$

式中, l_p 为两支撑托辊的间距(m)。

当钢丝绳的张力由 $S_0(x, t)$ 增加到 $S(x, t)$ 时, 两支撑托辊间钢丝绳的几何变形为:

$$v(x, t) = \frac{(q_B + q_G)^2 g^2}{24S_0^2} l_p^3 \left(\frac{1}{S_0^2} - \frac{1}{S^2} \right) \quad (3)$$

从张力公式(2)、(3)可知, 在 q_B 和 q_G 不变的情况下, 钢丝绳的垂度与张力存在一定的关系, 垂度越小, 张力越大。对绳网铺晒设备来说, 虽然钢丝绳较大的垂度所需张力较小, 但绳网上铺晒的物料容易向最大垂度处移动, 从而造成物料堆积; 若钢丝绳垂度过小, 绳网上铺晒物料更平整, 但绳上张力将会无限增大,

钢丝绳及支撑件结构强度无法满足, 因此, 钢丝绳的垂度需要保持在合理范围内。

1.2.2 钢丝绳的静态力及状态 输送钢丝绳在稳定运行状态下所承受的静张力由张紧装置的张力、输送钢丝绳、网片组件、物料的重力及钢丝绳与托辊间的摩擦阻力组成(图2)。

在换向轮张紧时, 钢丝绳的弹性静张力 S_j :

$$\begin{cases} \text{承载分支: } S_j = F_1 + F_2 + S_2 - \frac{F_1}{L_1} x & (0 < x < L_1) \\ \text{回程分支: } S_j = F_2 + S_2 - \frac{F_2}{L_1} (x - L_1) & (L_1 < x < L) \end{cases} \quad (4)$$

式中, F_1 和 F_2 分别为钢丝绳承载分支、回程分支的等效阻力(N), S_2 为换向轮的张紧力(N), L_1 为绳网有效载料长度(m)。

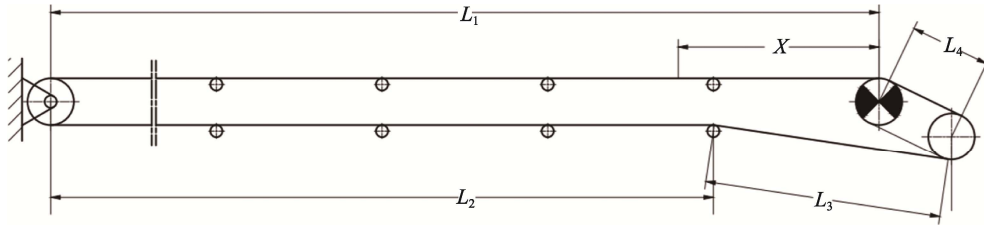


图2 系统简图及单元受力状态

Fig.2 System schematic diagram and unit stress state

1.2.3 钢丝绳的波动特性与动张力 载料网铺满海带后, 承载力作用在钢丝绳上, 铺晒设备在启停时, 钢丝绳的变形、应力、速度、加速度等分别以某种速度沿承载分支和回路分支传播, 形成冲击力。冲击力不能大于驱动力及钢丝绳同步防滑轮的摩擦力, 引起堵转或因防滑轮摩擦力不足, 造成两侧钢丝绳不同步。

本系统采用尾部换向轮张紧方式, 在整个系统运行过程中, 受张紧的换向轮位置固定不变。当驱动轮瞬间加速时, 对钢丝绳截面产生冲击会以一定的速度传播。钢丝绳所受的冲击力为 $S_q(x, t)$, 它与变形的关系如下:

$$S_q(x, t) = EA \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \quad (5)$$

利用行波法的波动特点来求解波动方程, 行波法的通解为:

$$u(x, t) = f_1(x + jt) + f_2(x) \quad (6)$$

式中, f_1 和 f_2 是任意形式的函数。在 $t = t_0$ 时刻, 函数 $f_1(x + jt_0)$ 以速度 j 逆着 x 方向在钢丝绳内传播, 移动了 $-jt_0$, 故 f_1 为逆波; 同样, 函数 $f_2(x - jt_0)$ 以速度 j 顺着 x 方向在钢丝绳内传播, 移动了 jt_0 , 故 f_2 为顺波。

钢丝绳的速度:

$$V(x, t) = \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial [f_1(x + jt) - f_2(x - jt)]}{\partial t} \quad (7)$$

钢丝绳冲击张力:

$$S(x, t) = EA \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} = EA f_1'(x + jt) + EA f_2'(x - jt) \quad (8)$$

承载分支的弹性波传播速度:

$$j_1 = \sqrt{\frac{EA}{q_B + q_G + q_{RO}}} \quad (9)$$

回程分支的弹性波传播速度:

$$j_2 = \sqrt{\frac{EA}{q_B + q_{RU}}} \quad (10)$$

式中, E 为钢丝绳的弹性模量(N/mm²), A 为钢丝绳的横截面积(mm²), q_{RO} 为承载分支托辊旋转部分单位长度的质量(kg/m), q_{RU} 为回程分支托辊旋转部分单位长度的质量(kg/m)。

当带负号的反射波从拉紧装置(反向卷筒)返回驱动滚筒时, 也就是经历的时间等于弹性波两次从机头到机尾的时间, 承载分支 $t_1 = 2L_1/j_1$, 回程分支 $t_2 = 2L_1/j_2$ 。

若采用矩形加速度, 钢丝绳驱入点和奔离点的动张力为(乐章丝, 2016):

$$S_{d1}(t) = \frac{j_1 q_1}{j_1 q_1 + j_2 q_2} \times m_1 a \quad (11)$$

$$S_{d2}(t) = \frac{j_2 q_2}{j_1 q_1 + j_2 q_2} \times m_1 a \quad (12)$$

$$q_1 = q_b + q_G + q_{RO}; \quad q_{12} = q_b + q_{RO};$$

式中, m_1 为钢丝绳及载荷平动部分的质量(kg), a 为启动加速度(m/s^2)。

1.3 钢丝绳同步防滑装置设计

钢丝绳同步防滑装置由机架, 主动槽轮和被动槽轮组成。主、被动槽轮外表面设有数条轴向平行的同轴 U 形凹槽。凹槽宽度略大于钢丝绳直径, 轮槽间距大于钢丝绳的直径。被动槽轮的凹槽与主动槽轮相邻两凹槽的中心相对应。钢丝绳与主、被动槽轮连接时, 先与主动槽轮的一侧凹槽接触, 然后到达被动槽轮同侧凹槽, 绕半圈后返回与主动轮槽一侧相邻凹槽接触绕半圈后, 再缠绕至被动槽轮一侧相邻凹槽, 绕半圈后返回至主动槽轮, 如此循环, 直到主动、被动槽轮凹槽都被缠绕后返回, 经数个双滚轮支架组件、尾部卷筒组件形成钢丝绳的闭环连接, 如图 3 所示。

启动时, 输送钢丝绳在驱动滚轮上不打滑的条件

如下(杨勇, 2024):

$$S_1 + S_{d1} \leq (S_2 - S_{d2})e^{\mu\alpha_0} \quad (13)$$

式中, S_1 、 S_2 分别为输送钢丝绳在传动滚轮上绕入点、绕出点的静张紧力(N); S_{d1} 、 S_{d2} 分别为铺晒机启动时, 输送钢丝绳在传动滚轮上绕入点、绕出点的动张紧力(N); α_0 为输送钢丝绳在传动滚筒上的包角; μ 为传动滚筒与输送钢丝绳间的摩擦系数。

两侧钢丝绳及数根平行的横向撑杆形成钢丝绳网框架, 因此, 要求两侧钢丝绳必须同步移动, 防止载料网错位拉扯受损。根据式(14)可知, 增加钢丝绳对传动轮的包角, 可提高钢丝绳与传动滚筒的摩擦力, 降低钢丝绳打滑的可能性, 因此, 传动方式采用主、被动双轮传动。钢丝绳在绕入点进入主动轮槽后, 绕半圈后进入被动轮的轮槽内, 再绕半圈后进入主动轮的轮槽内, 如此往复后从被动轮的轮槽的绕出点引出至托辊。这种结构的优势在于, 通过增加钢丝绳缠绕主、被动轮的圈数, 增加钢丝绳对传动轮的包角, 实现总包角为:

$$\alpha_0 = 360^\circ \times (n-1) \quad (14)$$

式中, α_0 为钢丝绳总包角(度), n 为轮槽数。

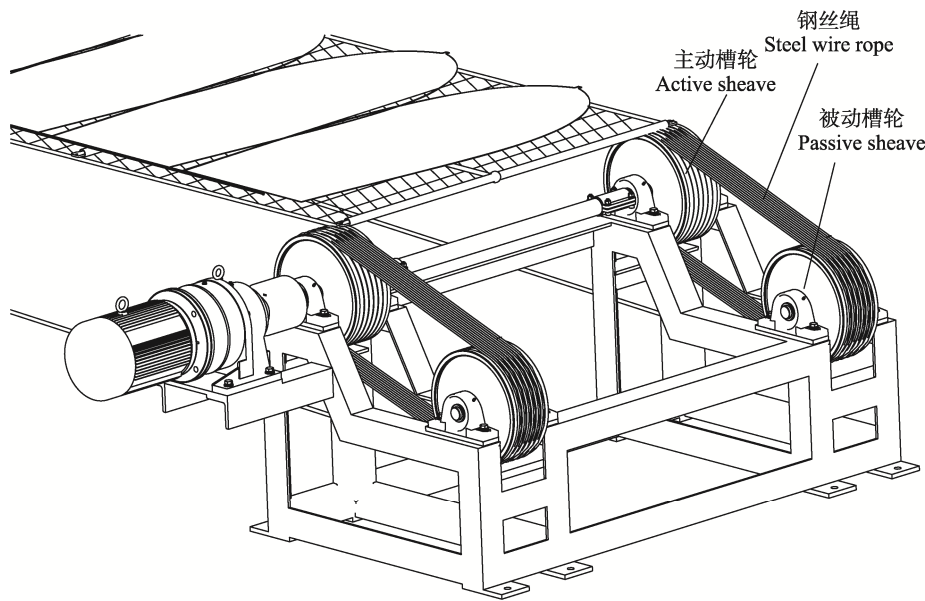


图 3 双传动轮钢丝绳同步防滑装置

Fig.3 Dual-drive wheel wire rope synchronous anti-slip device

1.4 卷筒张紧装置设计

为简化结构, 本装置采用反向卷筒与张紧装置相结合(图 4)。通过旋转丝杆, 使张紧装置螺母沿着丝杆水平移动, 并带动反向卷筒远离或靠近传动滚筒,

用于张紧钢丝绳, 或放松钢丝绳便于更换。

反向卷筒采用两侧带凸柱的长滚筒结构, 长滚筒表面呈光滑圆柱体, 便于钢丝绳及网片贴合滚筒表面由滚筒下方转向滚筒上方, 并逐渐向前移动, 供操作人员将海带铺设其上。滚筒两侧的圆周上按一定间距

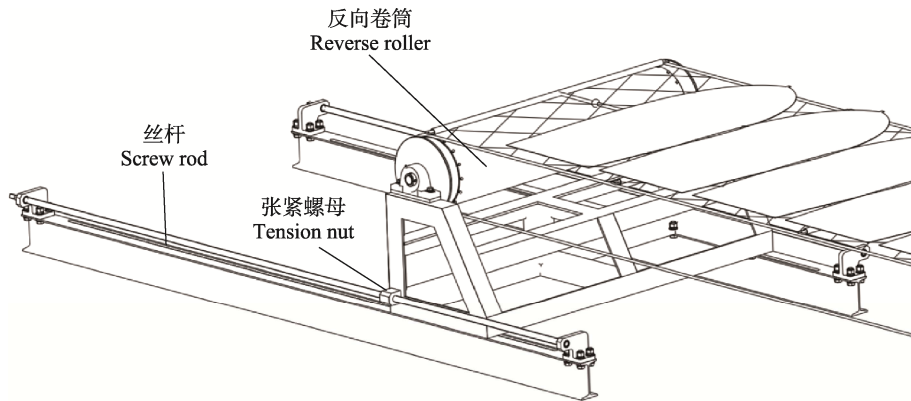


图4 反向卷筒及张紧装置
Fig.4 Reverse roller and tensioning device

分布短圆柱形凸柱，凸柱头部为半球面体。由于两侧钢丝绳受网片的作用力后，具有从两侧向中间弯曲的趋势，圆周上分布凸柱用于将钢丝绳的运动范围限制在滚筒端部的挡边与圆周凸柱之间，凸柱头部正好穿过网眼，不会使网片损伤(图5)。

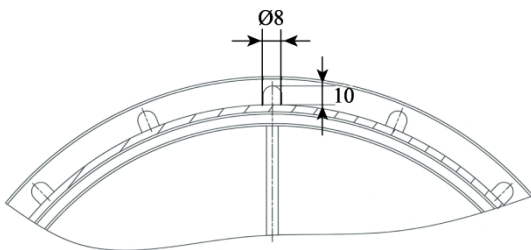


图5 反向卷筒短圆柱结构图
Fig.5 Structural diagram of short cylinder with reverse roller

1.5 绳网结构设计

钢丝绳网是海带铺晒、输送的重要承载部件，它由两侧纵向钢丝绳和横向撑杆形成隔栅，长网片铺设其上形成载料网，网片两侧纲绳与钢丝绳、网片中部与撑杆扎紧。撑杆呈圆棒形，采用竹制材料，外部涂敷食用级桐油。竹杆两端镶入带眼板金属套，两侧钢丝绳按1 m间距设置锁线器，利用金属丝穿过竹杆两端金属套的眼板孔与锁线器扎紧，使竹杆与钢丝绳紧固。竹杆直径 $\text{Ø}20$ ，铺网网目边长40 mm，网线线径0.45 mm，钢丝绳直径 $\text{Ø}10$ mm，材料为06Cr19Ni10(对应ASTM标准中的304和日标标准的SUS304)(图6)。

1.6 盖网装置设计

1.6.1 盖网机理 盖网装置用于覆盖于物料上方，辅助压平海带防止风吹散。装置由有盖网、卷网盘、伺服电机和盖网架组成。盖网长度与载料网一致，宽度略窄。盖网四边设有网纲，宽度方向由数根等长的



图6 绳网结构图
Fig.6 Rope net structure diagram

盖网横杆按一定间距沿盖网长度方向将网撑开。盖网一端与卷网盘连接，另一端与载料网起始端横向撑杆连接，随着网片前行，带动盖网一并送出，伺服电机设置反向扭矩2~5 N·m，使盖网被带出时，卷网盘会被动跟转，但不会因惯性而过度旋转多圈后才停止。当远处的载料网回收时，伺服电机的扭矩使卷网盘旋转，将盖网收回，盖网回收线速度与载料网回收速度做到被动同步。

载料网、盖网输出状态如图7所示：操作者位于盖网后端，传动滚筒带动载料网向远端行进，操作者逐步将海带铺设在载料网上，与此同时，盖网在绳网的牵拉力下向前铺设，逐步覆盖在已铺设好的海带上。在此过程中，由于盖网拖拽力小于绳网的牵拉力，绳网的牵拉力持续克服盖网拖拽力的阻力。

载料网、盖网回收状态如图8所示：传动滚轮带动绳网向近端行走，收纳盖网的卷网盘在伺服电机的带动下逐步收卷，盖网在盖网拖拽力的作用下，与载料网同步向近端行进，操作者逐步将位于盖网和载料网之间的海带取出。

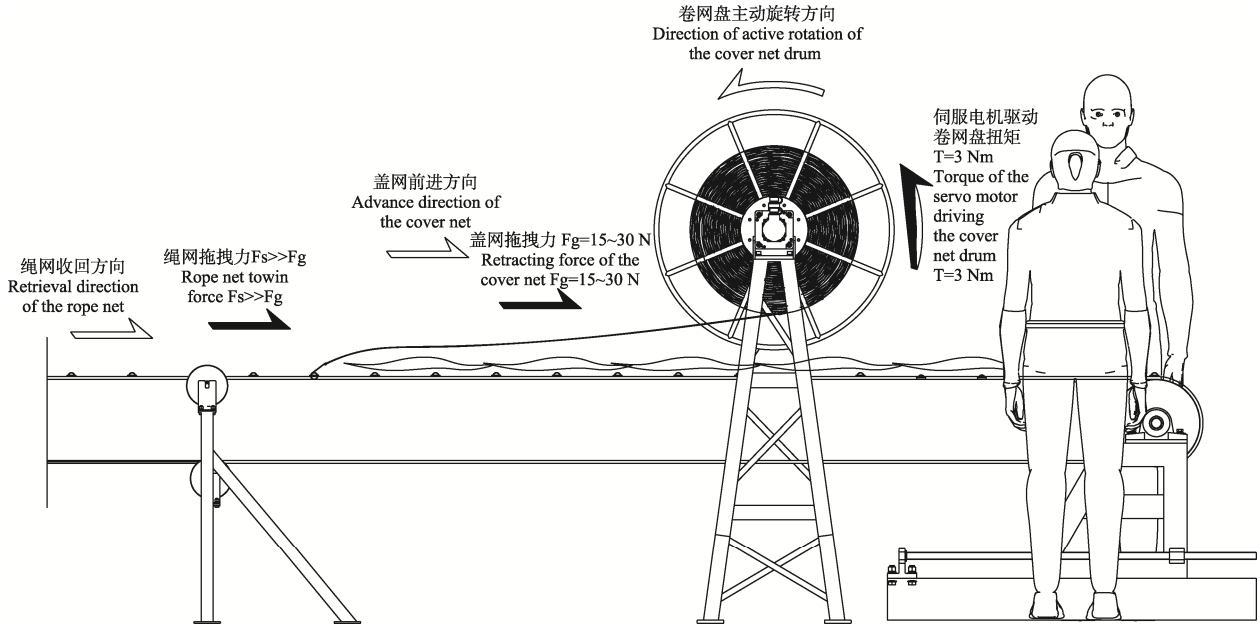


图 7 载料网、盖网送出状态示意图

Fig.7 Schematic diagram of the status of the material-carrying net and the cover net being sent out

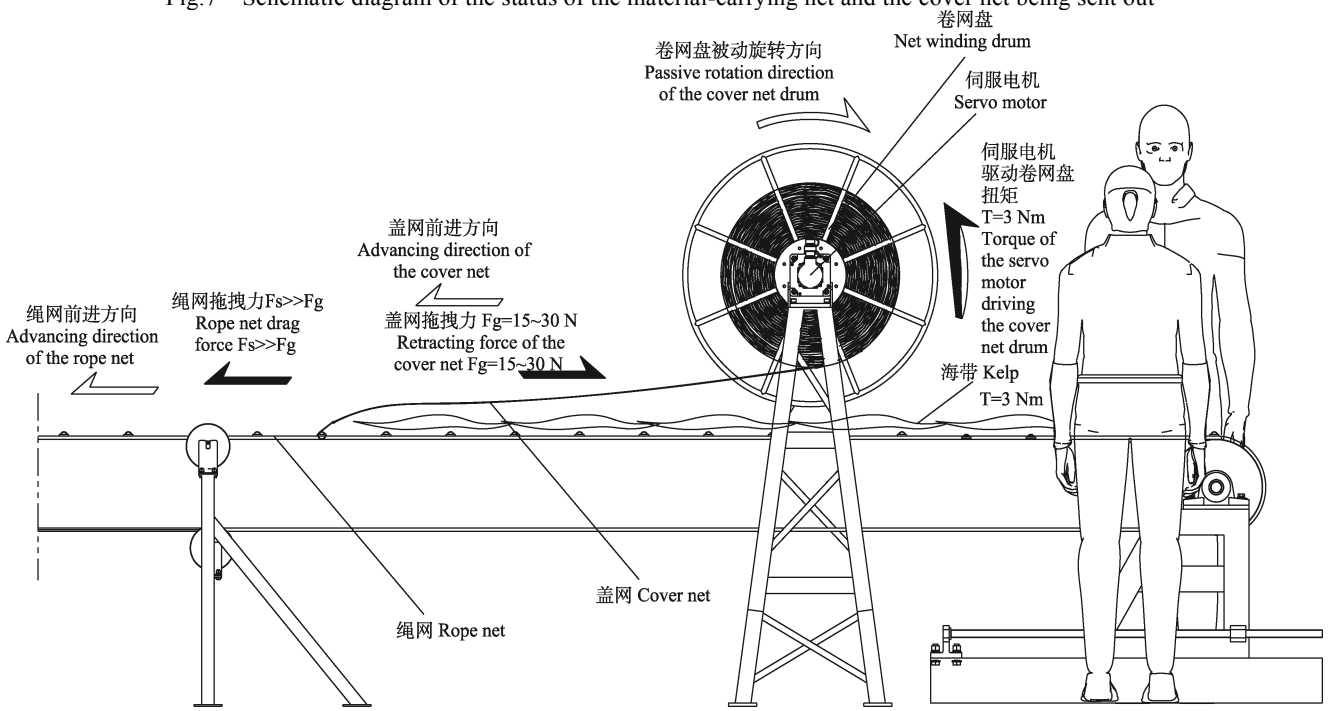


图 8 载料网、盖网收回状态示意图

Fig.8 Schematic diagram of the retracted state of the carrier net and cover net

1.6.2 盖网协同控制系统 载料网沿水平方向匀速输送,用于承载海带并实现晾晒工位转移;盖网缠绕在卷网盘上,卷网盘与绳网输送机构联动。作业时,需同步完成“盖网放出”(随载料网向前输送,将盖网平铺在载料网上)与“盖网回收”(载料网返程时,将盖网重新收回卷网盘),且盖网张力需保持相对恒定。

盖网装置选用伺服电机型号 LCMT-15MC17NB-130M10015B,功率 1.5 kW,扭矩 10 N·m,转速 1 500 r/min。控制器中设置恒扭矩控制模式,并根据盖网网具材质、卷网直径等参数设定合适的扭矩值,避免扭矩过小导致盖网松弛堆积,或扭矩过大导致盖网拉伸断裂。亦可设置盖网的收放速度、距离等参数。

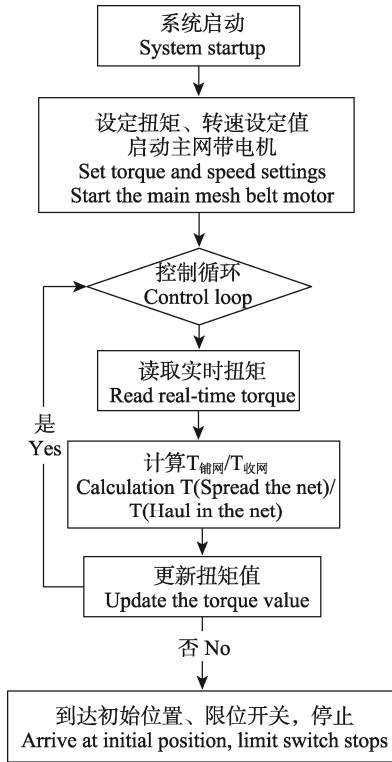


图9 控制流程图

Fig.9 Control flow diagram

盖网收放过程扭矩控制的目标是提供一个反向、可控的阻力矩(制动扭矩)。盖网卷网盘伺服电机被施加一个与载料网运动方向相反的微小扭矩 T 。该扭矩使盖带被张紧,并紧压在载料网上。此时,盖网卷网盘自身并不会主动转动,而是被前进的载料网“拖着走”,从而实现盖网的自动铺放。这种“被动放收,主动制动”的方式,能有效防止盖网因惯性而过度松弛或打滑。

扭矩设定:

$$T_{\text{盖网}} = K_1 \cdot D_{\text{盖网}} \quad (15)$$

卷网盘盖网实时直径:

$$D_{\text{盖网}} = D_{0\text{盖网}} - \frac{2L_{\text{放出}}}{\pi} \quad (16)$$

式中, K_1 为根据网带材料和摩擦力经验设定的基础张力系数; $D_{\text{盖网}}$ 、 $D_{0\text{盖网}}$ 分别为卷网盘盖网的实时直径和盖网的初始直径(m); $L_{\text{放出}}$ 为盖网的放出长度(m)。

绞放盖网时,卷网直径 $D_{\text{盖网}}$ 减小,所需制动扭矩也相应线性减小,以保持盖网被带出的张力恒定。同时,驱动器按照设定的扭矩值驱动伺服电机以一定的速度旋转。伺服电机驱动卷网盘绞放盖网,使盖网从固定位置逐渐沿展开来,并跟随载料网一起前行(图9)。

2 中试试验与分析

2025年6月,在山东省威海市寻山集团海带养殖场开展海带绳网连续输送铺晒设备试验。设备总长50 m,输送载料网宽1.2 m。设备可铺晒鲜海带125~150棵,输送速度0.482 m/s,电机功率2.2 kW。

2.1 张力测试

在输送钢丝绳端部靠近传动滚筒处安装拉力传感器,当滚筒以12.17 r/min的匀转速拖动钢丝绳网及上方承载物料移动时,测得钢丝绳拖拽处的张力(图10)。由图10可得,拖拽钢丝绳张力和承载物料质量分布点与形成的趋势线 $y=2.8984x+778.46$ 具有极强的相关性, R^2 值为0.9609。由于钢丝绳张力会随着铺晒长度及物料重量的增加而递增,该趋势线公式可为后续100~300 m长的连续铺晒设备的张力估算、功率配置等提供重要依据。

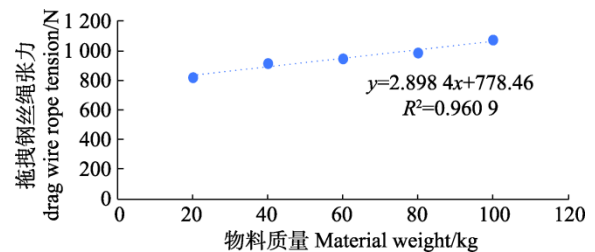


图10 拖拽钢丝绳张力与承载物料质量关系图

Fig.10 Diagram of the relationship between tension of the towing wire rope and the mass of the load material

2.2 电机功率计算

通过实际试验,测得钢丝绳拖拽处的张力趋势线。得出承载物料为100 kg时,钢丝绳实测张力为1068.3 N。在速度为0.482 m/s运行时,根据公式:

$$P = F \cdot v \quad (17)$$

式中, P 为钢丝绳平稳输送时的实际功耗(W), F 为钢丝绳实测张力(N), v 为钢丝绳运行速度(m/s)。

得出钢丝绳平稳输送时的实际功耗为514.92 W,输送电机的输入电压为380 V,额定电流为1.36 A。由于铺晒设备处于频繁启停状态,故取电机启动电流为额定电流的4倍,启动时所需电流为5.44 A,实际启动功耗为2.07 kW。

2.3 盖网运行试验

2.3.1 盖网绞收、放试验 盖网长50 m,宽1.2 m,网目长度为0.2 m。50根直径 $\varnothing 10$ mm、长度1.2 m的支撑横杆平行排列,间距为1 m,杆两端与两根直径6 mm、长度50 m的聚乙烯绳紧固连接。支撑横杆与

聚乙烯绳纵横连接形成框架, 框架的长×宽为 50 m×1.2 m, 盖网铺设在框架上。盖网一端与绞盘连接, 另一端采用绳钩与承载网的支撑横杆快速连接, 见图 11。



图 11 盖网及绞收放装置

Fig.11 Net covering and reeving device

试验时, 设定盖网卷网盘的伺服电机反向扭矩为 5 N·m (图 11 中的卷网盘为顺时针转向), 卷网盘的绞收线速度略高于载料网送回的速度。操作人员在载料网上顺序铺放海带, 载料网将物料及覆盖在物料上的盖网, 逐渐向远处输送, 移动形式为间歇式。由于载料网的拖拽力大于盖网绞盘电机的反向扭矩, 盖网被拖拽出覆盖在物料上。当物料晒干后, 载料网送回, 盖网绞盘反向扭矩的作用, 绞收盖网。同时, 盖网绞盘转速会跟随载料网送回的速度自动调节, 当绞收的盖网线速度高于承载网送回速度时, 承载网的作用力会大于卷网盘的反向扭矩, 使盖网张紧, 并按载料网的速度移动。试验显示, 盖网能自动稳定地铺盖在载料网的海带上, 并随载料网送回而自动绞收, 系统运行稳定。

2.3.2 盖网重量试验 通常 1 kg 鲜海带晒干后仅为 0.17 kg 左右, 载料网上的海带晒干后, 重量大幅减轻。由于载料网透风性能好, 若无盖网, 微风很容易将干海带吹翻; 即使有盖网, 在盖网重量不足的情况下, 稍大的风也会将盖网吹起。试验通过增加盖网的支撑横杆重量, 以应对不同的风速(表 1)。

表 1 盖网重量及适宜风速

Tab.1 Net weight and suitable wind speed

盖网重量 Net weight/kg	单位长度盖网重量 Weight per unit length of netting/(kg/m)	瞬时风速 Instantaneous wind speed/(m/s)
无盖网	无盖网	>7.9
4	0.08	8.0~10.7
40	0.80	10.8~13.8

增设盖网在海带铺晒过程中对海带的平整度是有利的。图 12、图 13 显示了有无盖网时, 铺晒过程中海带的状态。试验显示, 无盖网的海带边沿会被风吹起翻叠, 有盖网的海带总体比较平整。



图 12 无盖网的海带状态

Fig.12 The state of kelp in a net without a cover



图 13 有盖网的海带状态

Fig.13 The state of kelp with a covering net

2.4 海带铺晒试验

2.4.1 海带铺晒过程试验 作业人员将切稍后长度为 1.2 m 的鲜海带依次铺晒在设备的载料网上, 铺完一棵海带后, 载料网自动间歇前行, 直至海带铺放完毕, 移动速度为 0.482 m/s。盖网随载料网送出自动覆盖在海带上。50 m 长的载料网可铺放海带 150 棵, 耗时 15 min, 如图 14 所示。

海带晒干后, 载料网将物料送回, 操作人员可站在原位, 将干海带从网上依次收回叠放, 同时自动绞收盖网。整个过程设备运行平稳, 钢丝绳及载料网总体平直, 2 个支撑托辊间距为 5 m, 辊筒间的钢丝绳垂度普遍小于 100 mm。



图 14 海带铺晒试验

Fig.14 Kelp spreading and drying test

钢丝绳在主滚筒与被动滚筒间缠绕 6 圈，钢丝绳与滚筒的包角达到了 1800° ，大幅增加了钢丝绳与滚筒槽的摩擦力。在两侧钢丝绳上与传动滚筒等距位置设置标记，经 20 批次的海带铺晒与回收，两标记的相对位置在 $\pm 4\text{ mm}$ 的范围内循环变化(图 15)，证明两侧钢丝绳的移动达到了同步，输送和铺晒的海带未出现向中部钢丝绳网滑移叠堆的现象。

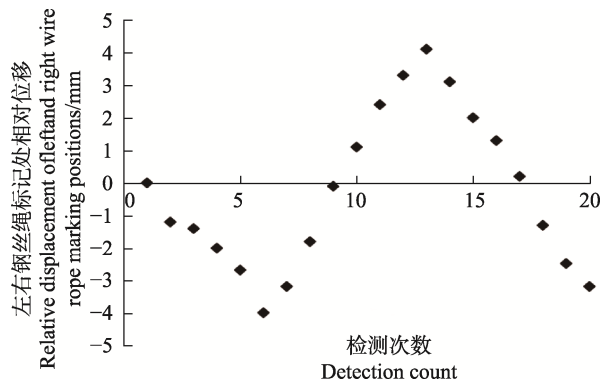


图 15 左、右两侧钢丝绳相对位移

Fig.15 Relative displacement of steel wire ropes on the left and right sides

经分析，两侧左、右钢丝绳相对位置循环变化的原因在于传动滚筒及尾部的反向卷筒在安装时难以做到绝对平行，使钢丝绳在传动过程中，相对位置会发生变化，但钢丝绳与传动滚筒之间没有相对滑移，所以钢丝绳始终在该区间内相对位移发生循环变化。相对变化的幅度通过网片的柔性变形得以吸收，不会形成网片撕裂。证明采用主滚筒与被动滚筒间缠绕 6 圈以增加钢丝绳与滚筒的摩擦力，完全满足设备安全正常运行的需求。

2.4.2 海带铺晒与垂挂晾晒对照试验 对照组分别为铺晒海带(图 16)与悬挂晾晒海带(图 17)，放置方向为南北方向。每间隔 30 min 测量光照度以及后期含水率等变化情况(表 2)，测得最高风速为 4.21 m/s 。



图 16 铺晒海带

Fig.16 Drying kelp



图 17 悬挂海带

Fig.17 Hanging kelp

06:30 完成海带铺设与悬挂，海带得初始含水率为 90%；12:19 取样实验海带，测得铺晒海带含水率为 25.02%，悬挂海带含水率为 55.00%，操作人员开始收拢铺晒海带等待储运；13:09 取样悬挂晾晒海带，测得含水率为 42.51%。证明相同初始含水率的海带，铺晒比悬挂干燥速度快。

绳网铺晒方式的干燥速度快于自然垂挂晾晒，原因在于：网铺是将海带均匀展开不会重叠，同时载料网透气性好，能较快带走水分，达到快速干燥的效果；自然垂挂晾晒海带时，海带在重力作用下，海带边会卷拢，使内部水分无法快速蒸发，有时在风力的作用下，海带间会相互粘连，也影响了粘连处的水分散发，因此干燥速度较慢。本设备的平铺海带干燥后，整体平整，达到优质海带的要求；垂挂晾晒后的干海带，成卷曲的长条状，品相不佳，见图 18、图 19。

3 经济性分析

本研究以链网输送设备(图 20)作为经济性分析的参照物。链网输送设备由链轮、链条、驱动部件、载料网组件、支撑横杆、托辊组件、机架等构成。载

表 2 光照度及温湿度变化

Tab.2 Changes in light intensity, temperature, and humidity

时间 Time	光照度 Illuminance/ lux	温度 Temperature/ ℃	湿度 Humidity/%
06:30	28 700	26.02	68.18
07:00	53 000	27.80	60.04
07:40	80 000	31.00	50.24
08:00	91 000	30.15	51.00
08:30	82 900	33.41	40.84
09:00	91 900	34.10	37.60
09:45	103 400	37.90	28.50
10:10	107 600	38.11	34.80
10:40	111 100	40.00	30.20
11:20	115 800	44.38	22.19
12:10	114 200	36.29	33.50
12:30	112 300	41.00	28.00
13:00	109 800	40.70	33.70
13.15	108 300	39.00	30.40

料网铺设在以两侧链条与数根间隔的支撑横杆组成的框架上。由于设备通常放置于沿海地区, 设备零部件容易腐蚀, 但完全耐海水腐蚀的材料价格昂贵, 为兼顾耐腐蚀性及经济成本, 通常链网结构的链条与本研究绳网结构的钢丝绳均采用国标 06Cr19Ni10 材料, 链网与绳网的长度均取决于链条(或钢丝绳)及支撑横杆的数量, 但链条单位长度的价格是钢丝绳的 5~6 倍

链网因链条价格昂贵未在实际铺晒中应用, 若构建长度为 300 m 的输送铺晒设备(表 3), 采用本研究的绳网结构对比现有链网结构成本节省约 11.1 万元, 本设备总体成本为 12.5 万元(含盖网装置)。输送铺晒设备长期置于户外海边, 盐雾腐蚀是影响设备传动部件寿命的主要因素。链网输送装置运行稳定性及可靠性较高, 但因未配置盖网装置, 晒制过程中海带易吹散, 需经常人工整理, 设备运行的连续性低。输送链条即使采用 06Cr19Ni10 的不锈钢材质, 仍会在短期



图 18 铺晒的干海带状态

Fig.18 The state of dried kelp being spread out to dry



图 19 悬挂晾晒的干海带状态

Fig.19 The state of dried kelp hung for airing



图 20 链网输送设备

Fig.20 Chain mesh conveyor equipment

内受海边盐雾腐蚀而损坏, 影响使用寿命。若采用耐海水腐蚀的不锈钢材质如 022Cr17Ni12Mo2 (对应

ASTM 标准中的 316L 和日标标准的 SUS316L), 材料成本更是前者的 1.8 倍, 极高材料成本难以应用于远距离海带铺晒。本研究的传动钢丝绳采用 06Cr19Ni10 的不锈钢材质, 通过钢丝绳外包胶处理, 可有效地隔绝钢丝绳受盐雾的腐蚀, 大幅提高该传动部件的使用寿命。试验过程中, 两侧钢丝绳传动过程中不打滑, 实现了同步传动, 配置了盖网装置, 晒制过程中受风海带固定可靠, 整套设备连续稳定运行。

300 m 输送铺晒设备每批可晒制优质海带 900 棵, 单棵鲜海带平均重量为 2.64 kg, 晒制后, 单棵干海带平均重量 0.39 kg, 总重量为 351 kg, 优质海带售价为 17 元/kg, 计 5 967 元/批。每年生产季为 60 d, 海带晒制过程中, 在盖网的作用下, 海带平整

表3 300 m绳网、链网设备成本
Tab.3 Cost of 300 m rope net and chain net equipment

传动 Drive	动力、轴系与 机架等(万元) Power, shafting, frame, etc. (¥10,000)	盖网组件 (万元) Covering net assembly (¥10,000)	支架及导轨 (万元) Support and guide rail (¥10,000)	传动链条/ 钢丝绳(万元/ Transmission chain/steel wire rope (¥10,000)	载料网组件 (万元) Carrier net assembly (¥10,000)	合计 (万元) Total cost (¥10,000)
链条 Chain	2.3	/	9.0	9.6	2.7	23.6
钢丝绳 Rope	3.0	0.8	6.0	1.8	0.9	12.5

不卷曲,利于水分快速蒸发。晴天可晒制2批,多云晒制1批,按晴天和多云天气各占50%计,平均每日晒制1.5批,销售收入为53.7万元。同样面积下,沙滩摊晒的海带,因海带易吹散和卷曲,不利于快速干燥,每日晒制1批,海带含有沙粒,品质低,海带售价为14元/kg,销售收入为29.5万元。可见采用本设备晒制的优质海带可增收24.2万元。因此,采用绳网结构作为铺晒设备,具有较好的经济性,便于产业推广应用。

4 结论

研发的海带绳网连续输送铺晒设备经中试试验验证,在关键技术指标与实际应用中均取得了显著成效。主要结论如下:

(1) 关键性能参数设计

通过中试试验,获得了设备的核心运行参数:在50 m长度、承载100 kg载荷的条件下,钢丝绳拖拽张力为1 078 N。建立了张力-长度趋势线公式($y=2.898 4x+778.46$),为延伸设备作业长度所需的拖拽力提供了精确的设计依据。

(2) 同步防滑与运行可靠性

本研究创新的双槽轮钢丝绳同步防滑装置,有效解决了长距离输送中的打滑问题。经反复测试,设备运行时两侧钢丝绳的相对位移距离被控制在 ± 4 mm以内,确保了网带同步稳定运行,杜绝了因打滑引发的故障,验证了该设计的安全性与可靠性。

(3) 作业轻简化与品质提升

该设备实现了海带铺晒作业的轻简化与盖网自动化。作业人员无需移动即可在原地完成海带的摆放与回收,并省去了人工翻晒环节。集成的防风盖网系统,可抵抗13.8 m/s的风速,有效防止物料被吹散。与垂挂晾晒相比,此铺晒方式所得干海带平整度更佳、干燥速度更快,干品无砂砾污染,品质显著提升,达到优质海带的标准。

(4) 经济效益与成本优势

相较于传统的链网结构,本设备在制造成本上展

现出巨大优势。经核算,300 m长的设备其关键部件费用12.5万元,比同等作业规模的链网结构可节省11.1万元,经济性突出,为大规模产业化应用推广奠定了坚实基础。

综上所述,研发的海带绳网连续输送铺晒设备,解决了人工频繁往返、劳动强度高的问题,并且干制海带品质高,设备成本投入低,具有显著的经济效益。

参 考 文 献

- 陈婷茹,王茵,王晓玲,等. 加工工艺对海带色泽品质的影响. 广东海洋大学学报, 2025, 45(3): 127-135 [CHEN T R, WANG Y, WANG X L, *et al.* Effects of processing technologies on color quality of kelp. Journal of Guangdong Ocean University, 2025, 45(3): 127-135]
- 崔瑞阳,张伟,路宇,等. 盐渍海带初加工自动化生产线设计. 机械工程师, 2025(1): 64-67 [CUI R Y, ZHANG W, LU Y, *et al.* Design of an automated production line for initial processing of salted kelp. Mechanical Engineer, 2025(1): 64-67]
- 福建总站. 15万亩海带“空中晒场”挂出“绿色瀑布”. 2025 https://content-static.cctvnews.cctv.com/snow-book/index.html?item_id=11774900269207048303 [Fujian General Station. At the Fujian branch of the General Station, a 150,000-mu kelp “sky drying ground” has hung a “green waterfall”. 2025. https://content-static.cctvnews.cctv.com/snow-book/index.html?item_id=11774900269207048303]
- 郭赛飞,周荣,沈建,等. 海带晾晒干燥特性及干燥模型研究. 渔业现代化, 2022, 49(1): 97-105 [GUO S F, ZHOU R, SHEN J, *et al.* Study on drying characteristics and drying model of kelp. Fishery Modernization, 2022, 49(1): 97-105]
- 国家藻类产业技术体系. 海带产业发展报告. 中国水产, 2021(8): 23-41 [National Algae Industry Technology System. Report on the development of kelp industry. China Fisheries, 2021(8): 23-41]
- 何永艳,朱焯. 海带晾晒杆自动周转控制系统设计. 自动化技术与应用, 2025, 44(7): 39-42 [HE Y Y, ZHU Y. Design of automatic turnover control system for kelp drying rod. Techniques of Automation and Applications, 2025, 44(7): 39-42]
- 姜稀宸. 基于模块化方法的海工机械晾晒系统研究与应用.

- 烟台大学硕士研究生学位论文, 2019 [JIANG X B. Research and application of air-drying system of marine machinery based on modular method. Master's Thesis of Yantai University, 2019]
- 乐章丝. 带式输送机动力学特性分析及仿真研究. 武汉理工大学硕士研究生学位论文, 2016 [LE Z S. Study on dynamics analysis and simulation of belt conveyor. Master's Thesis of Wuhan University of Technology, 2016]
- 李颖, 王茵, 陈婷茹, 等. 海带高值化综合利用研究进展. 渔业研究, 2023, 45(2): 192–201 [LI Y, WANG Y, CHEN T R, *et al.* Research progress of high-value comprehensive utilization of *Laminaria japonica*. Journal of Fisheries Research, 2023, 45(2): 192–201]
- 李玉瑾. 带式输送机系统动力学设计与智能控制技术. 北京: 应急管理出版社, 2022 [LI Y J. Dynamic design and intelligent control technology of belt conveyor system. Beijing: Emergency Management Press, 2022]
- 刘福利, 梁洲瑞, 张朋艳, 等. 中国海带养殖向离岸深水区发展的初步探讨. 渔业科学进展, 2019, 40(1): 161–166 [LIU F L, LIANG Z R, ZHANG P Y, *et al.* Preliminary discussion on the development of *Saccharina japonica* offshore aquaculture in China. Progress in Fishery Sciences, 2019, 40(1): 161–166]
- 刘文权, 袁克廷. 当春晒海带. 走向世界, 2018(22): 80–81 [LIU W Q, YUAN K T. Drying kelps in spring. Openings, 2018(22): 80–81]
- 陆东和, 陈庆华, 陈慎, 等. 干燥方法对海带多糖得率及其部分理化性质的影响. 福建农业学报, 2020, 35(4): 450–455 [LU D H, CHEN Q H, CHEN S, *et al.* Effects of drying methods on content and properties of polysaccharides in *Laminaria japonica*. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2020, 35(4): 450–455]
- 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 2025 中国渔业统计年鉴. 北京: 中国农业出版社, 2025 [Bureau of Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. China fishery statistical yearbook 2025. Beijing: China Agriculture Press, 2025]
- 王振华, 闫欣, 朱焯, 等. 一种延绳式海带晾晒系统及晾晒方法: CN115176839B. 2024-11-29 [WANG Z H, YAN X, ZHU Y, *et al.* A longline-style kelp drying system and drying method: CN115176839B. 2024-11-29]
- 严国圣, 严涵伟, 陈金林, 等. 一种海带烘干用双线吊挂传送装置. CN120304560B. 2025-08-12 [YAN G S, YAN H W, CHEN J L, *et al.* A dual-line hanging conveyor device for kelp drying. CN120304560B. 2025-08-12]
- 严涵伟, 严国圣, 陈金林, 等. 基于人工智能的海带烘干生产过程全自动化管理系统: CN120335416B. 2025-09-05 [YAN H W, YAN G S, CHEN J L, *et al.* An AI-based fully automated management system for kelp drying production processes: CN120335416B. 2025-09-05]
- 杨勇. 摩擦提升系统静张力比与防滑安全系数的探讨. 矿山机械, 2024, 52(3): 28–32 [YANG Y. Discussion on static tension ratio and anti-skid safety factor of friction hoisting system. Mining & Processing Equipment, 2024, 52(3): 28–32]
- 赵茹月, 于源, 张雅婷, 等. 海带漂烫-盐渍加工过程中碘形态含量变化规律. 食品科学, 2024, 45(1): 75–81 [ZHAO R Y, YU Y, ZHANG Y T, *et al.* Variation in contents of iodine species in kelp during blanching-salting process. Food Science, 2024, 45(1): 75–81]
- 朱焯, 洪扬, 杨猛, 等. 一种具有反光结构的海带晾晒装置: CN114698857B. 2024-12-10 [ZHU Y, HONG Y, YANG M, *et al.* A kelp drying device with a reflective structure: CN114698857B. 2024-12-10]
- 朱焯, 江涛, 张现广, 等. 海带自然晾晒与热泵烘干级联干燥自动控制系统研制. 农业工程学报, 2020, 36(19): 298–305 [ZHU Y, JIANG T, ZHANG X G, *et al.* Development of automatic control system for cascade drying of kelp natural drying and heat pump drying. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(19): 298–305]
- AHMAD A, PRAKASH O, KUMAR A, *et al.* A comprehensive state-of-the-art review on the recent developments in greenhouse drying. Energies, 2022, 15(24): 9493
- DEMISSIE Y A, ABREHAM R E, WASSIE H M, *et al.* Advancements in solar greenhouse dryers for crop drying. Energy Reports, 2024, 11: 5046–5058
- Japan Fisheries Research and Education Agency. 昆布乾燥施設の効率的運用について～省エネルギー化のポイント～. 2018. https://www.fra.go.jp/gijutsu/project/fisheries_engineering/konbu_saving_energy.html [日本水产研究与教育机构. 《关于海带干燥设施的高效运用节能要点》. 2018. https://www.fra.go.jp/gijutsu/project/fisheries_engineering/konbu_saving_energy.html]
- PERRY J J, BRODT A, SKONBERG D I. Influence of dry salting on quality attributes of farmed kelp (*Alaria esculenta*) during long-term refrigerated storage. LWT, 2019, 114: 108362
- SPARVATH J S, CARDOSO A L, RUSTAD T, *et al.* Effect of pre-drying storage and drying method on the quality of dried kelp. Food Research International, 2025, 221: 117568

(编辑 冯小花)

Design and Testing of a Continuous Conveying and Spreading System for Drying Kelp

JIANG Tao^{1,2①}, ZHU Ye^{1,2}, HONG Yang^{1,2}, YANG Meng^{1,2}, TANG Zhenjie³

(1. Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200092, China;

2. Key Laboratory of Fishery Equipment and Engineering, Ministry of Agriculture and Rural Affairs;

3. Jiangyin Tenglong Machinery Manufacturing Co., Ltd., Wuxi 214400, China)

Abstract Large-scale algal cultivation plays a vital role in the aquaculture industry in China. *Saccharina japonica*, the predominant species, accounted for 61.4% of the national total algal aquaculture output of 3.0294 million tons in 2024. The harvest window for *S. japonica* is notably brief, typically lasting only to 2–3 months. Freshly harvested kelp has a very high moisture content (approximately 90% wet basis), necessitating immediate primary processing to prevent spoilage and facilitate storage and subsequent processing. The two primary traditional pretreatment methods are sun-drying and salting. Although salting is efficient and weather-independent, making it suitable for large-scale processing, sun-drying remains a crucial cost-effective method in regions with ample sunlight owing to its near-zero energy consumption. Sun-drying is mainly categorized into hang-drying and pavement drying. The practice of hang-drying is space efficient and yields cleaner products; however, it has several disadvantages, including longer drying cycles, severe product curling, and polysaccharide leaching. Pavement drying offers a higher drying efficiency, but traditional direct sand-beach spreading leads to significant sand contamination, relegating its use primarily to chemical feedstocks or abalone feed. Improved pavement-drying techniques, such as the use of pebble beds or polyethylene nets, have demonstrated the potential to produce high-quality dried kelp but remain labor intensive. The fundamental challenges in traditional sun-drying methods include high labor intensity and low operational efficiency, which severely constrain industrial-scale production. This issue is further exacerbated by the declining fishery labor force. Consequently, mechanization of the sun-drying process has become an urgent priority. Significant research efforts have been directed towards mechanizing hanging-drying, leading to the development of various systems, such as automatic lifting and hanging systems, multi-layer tray drying systems, and long-line continuous drying systems. These innovations have successfully mechanized the practice of hang-drying. In contrast, there are few studies of mechanized solutions geared towards pavement drying. Existing techniques involve fixed net frames that require laborers to traverse long distances for spreading and retrieval, thus failing to alleviate the core issue of labor intensity. Furthermore, a critical technological bottleneck for efficient and continuous mechanized pavement drying is the conveyor system. Although chain-and-net structures offer reliable performance, their prohibitively high manufacturing costs limit their large-scale application. In this study, we aimed to develop a novel continuous conveyor-type kelp pavement-drying equipment to overcome the limitations of existing methods. The primary objectives were to significantly reduce labor intensity, achieve automated operation for both spreading and retrieval, ensure high drying quality without sand contamination, and provide a cost-effective alternative to expensive chain-based conveyor systems, thereby facilitating widespread industrial adoption. A prototype "Continuous Conveyor Net for Pavement-Drying of Kelp" was designed

① Corresponding author: JIANG Tao, Email: jiangtao@fmiri.ac.cn

and fabricated. The core design incorporates a steel wire rope net belt as the conveying medium and an automated cover net system. The key components include a synchronous anti-slip device with dual-groove pulleys and steel wire ropes, the rope-net structure, a tail drum assembly, dual-roller support frames, and a cover net mechanism. A structural analysis was conducted by focusing on the stress distribution within the steel wire ropes and the tensioning mechanics of the drum assembly. Extensive pilot-scale trials were performed to evaluate the system performance. A 50 m long prototype was tested under varying mass loads (20–100 kg) to measure the resultant dragging tension on the steel wire ropes. The synchronization performance of the dual-groove pulley anti-slip device was quantified by measuring the relative displacement between two steel wire ropes during operation. The wind-resistance capability of the automatically deployed cover net was rigorously tested. Pilot-scale trials yielded critical operational data and validated the effectiveness of the design. The dragging tension on the steel wire ropes in the 50 m prototype correlated linearly with the applied load, ranging from 836.43–1068.3 N for masses between 20–100 kg. Regression analysis of these data produced a predictive trendline formula ($y = 2.8984x + 778.46$), which serves as a foundational basis for configuring the dragging force and motor power requirements for scaling the equipment to longer lengths, such as a projected 300 m system. The synchronous anti-slip device demonstrated exceptional performance, maintaining the relative displacement between the two steel wire ropes within a tight tolerance of ± 4 mm throughout the operation, ensuring smooth, synchronized movement without slippage and guaranteeing operational reliability. The automated cover net system proved highly effective, withstanding wind speeds of up to 13.8 m/s, thereby effectively preventing wind from dislodging or disrupting the drying kelp and eliminating a major source of product loss and contamination.

Operationally, the equipment enables a stationary work mode. The laborers remain at a fixed location to place fresh kelp onto the net belt, which then automatically conveys the material distally until the entire length of the belt is evenly covered. The cover net is deployed automatically. After drying, the process is reversed, and the dried kelp is conveyed back to the starting point for easy collection. This eliminates the need for workers to walk long distances across large drying fields, fundamentally reducing the labor intensity. Compared to hang-drying, pavement-drying achieved with this equipment resulted in superior product flatness, faster drying rates, and crucially, complete absence of sand or other particulate contaminants due to the elevated net belt, leading to a significant enhancement in the final product quality. A key economic advantage was confirmed: the manufacturing cost of the critical components of the steel wire rope net belt structure is substantially lower than that of an equivalent chain-and-net structure. For a 300 m system, this cost reduction was quantified at approximately 111,000 Yuan, underscoring the excellent cost effectiveness and potential for large-scale implementation. In summary, we successfully developed and validated a continuous conveyor net pavement-drying system that effectively addresses the major challenges associated with traditional kelp pavement drying. The system offers significant advantages by integrating a steel wire rope net belt with a synchronous anti-slip device and an automated wind-resistant cover net. It achieves a substantial reduction in labor intensity through automated conveying, enhances the drying quality and efficiency, prevents sand contamination, and offers a cost-effective solution superior to chain-based alternatives. These findings provide a reliable technical and theoretical foundation for the design and power configuration of large-scale systems. This technology represents a promising and practical solution for the mechanized, high-quality pavement-drying of kelp, with strong potential for widespread application and a positive impact on the industry.

Keywords Kelp spreading; Steel wire rope; Protective net device; Continuous conveying