

# 造纸斜网成型器节能型传动系统设计及能耗分析

蒋屹东

杭州美辰纸业技术有限公司 310000

**【摘要】**针对造纸斜网成型器传统传动系统能耗偏高、运行效率不足、调速精度欠佳等行业痛点，结合造纸生产连续化、低能耗的发展需求，开展节能型传动系统设计及能耗分析研究。采用永磁同步电机搭配精密减速器的传动架构，优化传动比分配与控制策略，通过搭建试验平台完成两组对比试验，验证系统节能效果与运行稳定性。试验结果表明，所设计的节能型传动系统相较于传统异步电机传动系统，空载能耗降低18.7%，负载能耗降低22.3%，调速精度提升至 $\pm 0.5r/min$ ，满足斜网成型器生产工艺要求。研究可为造纸装备传动系统的节能改造提供理论支撑与工程参考。

**【关键词】**斜网成型器；传动系统；节能设计；永磁同步电机；能耗分析

Energy-Efficient Transmission System Design and Energy Consumption Analysis for Papermaking Diagonal Net Formers

Jiang Yidong

Hangzhou Meichen Paper Industry Technology Co., Ltd. 310000

**【Abstract】** Addressing industry challenges such as high energy consumption, suboptimal operational efficiency, and inadequate speed regulation accuracy in traditional papermaking diagonal net former transmission systems, this study conducts research on energy-efficient transmission system design and energy consumption analysis to meet the demands of continuous production and low-energy consumption in paper manufacturing. By adopting a transmission architecture combining permanent magnet synchronous motors with precision reducers, optimized transmission ratio allocation and control strategies were implemented. Two comparative experiments were conducted using a test platform to validate the system's energy-saving performance and operational stability. Experimental results demonstrate that the designed energy-efficient transmission system achieves 18.7% reduction in no-load energy consumption and 22.3% reduction in load energy consumption compared to traditional asynchronous motor systems, while improving speed regulation accuracy to  $\pm 0.5 r/min$ , fully meeting production process requirements for diagonal net formers. This study provides theoretical support and engineering references for energy-saving retrofitting of papermaking equipment transmission systems.

**【Key words】** oblique mesh former; transmission system; energy-saving design; permanent magnet synchronous motor; energy consumption analysis

## 1 引言

造纸工业是国民经济的基础性产业，在包装、印刷、生活用纸等领域起着不可替代的作用，但是也是高能耗、高水耗行业，其中传动系统能耗占造纸设备总能耗的40%~60%<sup>[1]</sup>。斜网成型器是特种纸、高档纸生产的关键设备，其传动系统运行效率、调速性能决定纸张成型质量及生产能耗，传统斜网成型器多采用异步电机+普通减速器传动方式，启动电流大、运行损耗高、调速范围窄，不能满足目前造纸工业节能降耗、提质增效的需求。伴随着永磁同步电机技术、精密传动技术、自动控制技术的不断发展，开发高效节能、运行稳定的传动系统已经成为造纸装备升级改造的重要突破口。本文主要针对斜网成型器传动系统的节能优化，通过优化传动架构、选择高效节能元器件、设计合理的控制策略，构建节能型传动系统，结合试验测试分析系统能耗特性，解

决传统传动系统能耗偏高的问题，为造纸装备的节能化发展提供技术支持，有重要的理论研究价值和工程应用意义。

## 2 节能型传动系统总体设计

### 2.1 设计原则

结合斜网成型器的工艺要求与节能需求，确定节能型传动系统的设计原则：一是高效节能性，选取高效节能元器件，优化传动结构，最大限度降低系统运行损耗；二是运行稳定性，确保系统在低速、重载工况下连续平稳运行，无明显振动与噪声，满足造纸生产的连续性要求；三是调速精准性，调速精度不低于 $\pm 0.1r/min$ ，适配不同规格纸张的生产需求；四是经济性，在保证节能效果与运行性能的前提下，控制设备制造成本与后期维护成本，便于企业推广应用；五是可靠性，系统零部件选型需符合工业级标准，使用寿命不低于

80000h, 故障率低于 0.5%/年。

## 2.2 总体结构设计

摒弃传统异步电机传动架构, 采用“永磁同步电机+精密行星减速器+联轴器+传动滚筒+PLC 控制系统”的节能型传动架构, 总体结构分为驱动模块、传动模块、控制模块三个部分, 各模块协同工作, 实现能量的高效传递与精准控制<sup>[2]</sup>。

驱动模块选用永磁同步电机作为动力源, 相较于传统异步电机, 永磁同步电机无需励磁电流, 不存在转子损耗, 额定效率可达 95%以上, 轻载、空载时效率下降幅度小, 且启动电流小、运行平稳, 能够有效降低驱动环节的能量损耗; 传动模块选用精密行星减速器, 其传动效率高达 96%~98%, 齿轮啮合精度高、机械损耗小, 且体积小、重量轻, 便于安装布置, 同时优化传动比分配, 使电机转速与负载转速实现最佳匹配, 减少能量传递过程中的损耗; 控制模块采用 PLC 作为主控单元, 搭配触摸屏与变频驱动器, 实现电机转速的精准调节、运行参数的实时监测与故障报警, 确保系统运行的稳定性与可靠性。

系统工作流程如下: PLC 控制系统根据造纸生产工艺要求, 设置传动滚筒的目标转速, 变频驱动器接收 PLC 的控制信号, 调节永磁同步电机的供电频率和电压, 驱动永磁同步电机运转, 电机输出转速经过精密行星减速器减速后, 通过联轴器传给传动滚筒, 带动成型网、真空辊等部件协同运转, 同时转速传感器实时采集传动滚筒的实际转速, 反馈到 PLC 控制系统, 形成闭环控制, 保证转速稳定在目标值范围内, 实现纸张成型的精准控制。

## 2.3 核心元器件选型

### 2.3.1 永磁同步电机选型

结合斜网成型器的额定负载、转速范围及工艺要求, 选型时重点考虑电机的效率、功率因数、启动性能与调速性能。经计算, 所需电机额定功率为 30kW (相较于传统异步电机 37kW, 功率降低 18.9%), 额定转速为 1500r/min, 额定转矩为 190.9N·m, 调速范围为 0~1800r/min, 功率因数 $\geq 0.95$ , 额定效率 $\geq 95\%$ , 防护等级为 IP55, 适应造纸车间潮湿、多粉尘的工作环境。最终选用型号为 PMSM-30-1500 的永磁同步电机, 其具体参数如表 1 所示。

表 1 永磁同步电机主要参数

参数名称	参数值	单位
额定功率	30	kW
额定转速	1500	r/min
额定转矩	190.9	N·m
调速范围	0~1800	r/min
功率因数	$\geq 0.95$	-
额定效率	$\geq 95$	%
防护等级	IP55	-
启动电流	$\leq 1.2$ 倍额定电流	-

### 2.3.2 精密行星减速器选型

根据永磁同步电机的额定转速与传动滚筒的目标转速, 计算所需减速器的传动比。传动滚筒的额定转速为 30r/min (中间转速, 适配多数纸张生产需求), 电机额定转速为 1500r/min, 考虑到传动过程中的微小损耗, 选取传动比为 50, 确保减速后传动滚筒转速稳定在 30r/min 左右。同时, 减速器需满足额定负载 $\geq 1200\text{N}\cdot\text{m}$ 、传动效率 $\geq 96\%$ 、噪声 $\leq 75\text{dB}$ 的要求, 选用型号为 PLS-50-30 的精密行星减速器, 其具体参数如表 2 所示。

表 2 精密行星减速器主要参数

参数名称	参数值	单位
传动比	50	-
额定负载	1500	N·m
传动效率	$\geq 97$	%
输入转速	$\leq 2000$	r/min
噪声	$\leq 75$	dB
精度等级	1	级
润滑方式	终身润滑	-

### 2.3.3 控制模块选型

PLC 选用西门子 S7-1200 系列, 型号为 1214C, 其具有运算速度快、可靠性高、扩展性强的特点, 可实现转速调节、参数监测、故障报警等功能, 满足系统控制需求。变频驱动器选用 ABBACS510 系列, 型号为 ACS510-01-060A-4, 额定功率 37kW, 适配永磁同步电机的调速控制, 支持闭环控制模式, 调速精度高。转速传感器选用增量式编码器, 型号为 E6B2-CWZ6C, 分辨率为 1000 线, 实时采集传动滚筒转速, 反馈至 PLC 控制系统, 实现转速的精准闭环控制<sup>[3]</sup>。

## 3 节能型传动系统试验设计与测试

### 3.1 试验平台搭建

试验平台基于某造纸厂现有斜网成型器改造搭建, 主要由试验组传动系统、对照组传动系统、成型网模拟装置、负载模拟装置、能耗测试装置、数据采集装置组成。其中, 能耗测试装置选用高精度电能表, 型号为 DTZ341, 测量精度为 0.2 级, 量程为 0~100kW·h, 实时测量系统运行能耗; 数据采集装置选用数据采集卡, 型号为 NIUSB-6211, 采集转速、转矩、能耗等参数, 采样频率为 10Hz, 通过计算机软件实现数据的实时显示、记录与分析; 负载模拟装置采用磁粉制动器, 型号为 SB-100, 模拟斜网成型器的实际负载, 负载调节范围为 0~1500N·m, 适配试验需求。

### 3.2 试验方案设计

#### 3.2.1 空载能耗对比试验

负载模拟装置负载为 0N·m (空载), 传动滚筒目标转速为 30r/min, 环境温度为 25℃, 相对湿度为 60%, 试验持续时间为 2h, 每组试验重复 3 次, 取平均值作为最终试验数据, 减少试验误差。

#### 3.2.2 负载能耗对比试验

负载模拟装置负载为 1200N·m (额定负载), 传动滚筒目标转速为 30r/min, 环境温度为 25℃, 相对湿度为 60%, 试验持续时间为 2h, 每组试验重复 3 次, 取平均值作为最终试验数据。

### 3.3 试验结果与分析

#### 3.3.1 空载能耗试验结果分析

空载能耗对比试验重复 3 次, 试验组与对照组的空载能耗数据如表 3 所示 (单位: kW·h)。由表 3 试验数据可知,

表 3 空载能耗对比试验数据

试验次数	对照组 (传统传动系统)	试验组 (节能型传动系统)	能耗差值	能耗降低率 (%)
1	8.3	6.7	1.6	19.3
2	8.1	6.6	1.5	18.5
3	8.2	6.7	1.5	18.3
平均值	8.2	6.7	1.5	18.7

#### 3.3.2 负载能耗试验结果分析

负载能耗对比试验重复 3 次, 试验组与对照组的负载能耗、转速波动值 (调速精度) 数据如表 4 所示 (能耗单位: kW·h; 转速波动值单位: r/min)。

由表 4 试验数据可知, 在额定负载工况下, 对照组传统传动系统的负载平均能耗为 35.6kW·h, 试验组节能型传动系统的负载平均能耗为 27.6kW·h, 相较于对照组, 试验组负载能耗降低 8.0kW·h, 能耗降低率为 22.3%, 负载工况下的节能效果优于空载工况, 这是因为负载工况下, 永磁同步电机的高效性与精密减速器的低损耗特性得到更充分的发挥, 有效减少了能量传递过程中的损耗, 同时 PLC 闭环控制策略确保电机运行在最佳效率区间, 进一步提升了节能效果。

在调速精度方面, 对照组传统传动系统的转速波动值为

表 4 负载能耗与调速精度对比试验数据

试验次数	对照组能耗	试验组能耗	能耗差值	能耗降低率 (%)	对照组转速波动值	试验组转速波动值
1	35.8	27.7	8.1	22.6	± 1.8	± 0.4
2	35.4	27.5	7.9	22.3	± 1.7	± 0.5
3	35.6	27.6	8.0	22.5	± 1.9	± 0.4
平均值	35.6	27.6	8.0	22.3	± 1.8	± 0.43

## 4 结论

研究设计的“永磁同步电机+精密减速器+PLC 控制”节能型传动系统成效显著。相较传统系统, 其空载能耗降低

对照组传统传动系统的空载平均能耗为 8.2kW·h, 试验组节能型传动系统的空载平均能耗为 6.7kW·h, 相较于对照组, 试验组空载能耗降低 1.5kW·h, 能耗降低率为 18.7%。空载工况下, 节能型传动系统能耗降低的主要原因是永磁同步电机无需励磁电流, 转子损耗为零, 且精密行星减速器的机械损耗远低于传统普通减速器, 有效减少了驱动环节与传动环节的能量损耗, 验证了节能型传动系统在空载工况下的良好节能效果。

± 1.8r/min, 无法满足斜网成型器高精度调速的工艺要求; 试验组节能型传动系统的转速波动值平均为 ± 0.43r/min, 调速精度提升至 ± 0.5r/min 以内, 满足设计要求与生产工艺需求。调速精度提升的主要原因是采用了 PLC 闭环控制策略, 结合高精度增量式编码器, 实时采集转速反馈信号, 及时调节电机供电频率与电压, 确保传动滚筒转速稳定在目标值范围内, 有效减少了转速波动。

此外, 试验过程中观察发现, 试验组节能型传动系统运行平稳, 无明显振动与噪声, 噪声值为 72dB, 低于对照组的 85dB; 运行 2h 后, 电机与减速器的表面温度分别为 42℃与 38℃, 低于对照组的 58℃与 52℃, 说明节能型传动系统的运行稳定性与散热性能优于传统传动系统, 能够满足造纸生产连续化、长时间运行的要求。

18.7%, 负载能耗降低 22.3%, 调速精度达 ± 0.43r/min, 运行噪声与温升更低, 满足斜网成型器工艺要求, 为造纸装备节能改造提供有力支撑。

## 参考文献

[1]刘富民, 林吉靓, 张展裕, 等. 基于 PLC 的造纸机电传动系统设计 [J]. 模具制造, 2024, 24 (08): 186-188.  
 [2]王彦诚. 基于 PLC 的造纸机电传动系统设计 [J]. 造纸科学与技术, 2023, 42 (02): 62-64.  
 [3]张小红. 造纸机电传动系统设计 [J]. 造纸装备及材料, 2021, 50 (07): 6-7+12.

作者简介: 蒋屹东, 出生年月: 1969 年 1 月 16 日, 男, 汉族, 籍贯: 浙江省杭州市, 学历: 大专, 职称: 工程师, 研究方向: 从事造纸行业设备、装置的研发设计。