

机电一体化系统中能量回收与节能技术探索

吕俊毅¹ 庞鑫森^(通讯作者)² 陈晓虎³

1. 中联资产评估集团(新疆)有限公司 新疆乌鲁木齐市 830000

2. 南水北调中线信息科技有限公司 北京市 100070

3. 四川德运水务建设投资有限公司 四川省南充市 637676

【摘要】：针对汽车零部件伺服冲压—机器人搬运产线制动能量频繁耗散、网侧用电波动较大的问题，研究以4台15 kW伺服冲压单元、2台5 kW搬运机器人及6 kW输送辅助机构为对象，分析制动能量来源与回收边界，并设计直流母线耦合、超级电容储能缓冲及多源协同控制方案。结果表明，产线平均制动能量约9.8 kWh/h，工程可回收利用量约7.1 kWh/h；结合伺服待机降功率、输送变频优化和机器人轨迹平滑，综合节能量达到10.5 kWh/h。改造后平均用电量由40.0 kWh/h降至29.5 kWh/h，年耗电量由96000 kWh降至70800 kWh，年节电25200 kWh，综合节能率为26.25%，年节约电费约2.07万元，年CO₂减排约14.36 t。研究表明，该方案可有效提升再生能源就地消纳能力，并为同类机电一体化产线节能改造提供参考。

【关键词】：伺服冲压；机器人搬运；制动能量回收；直流母线；超级电容

0 引言：

汽车零部件冲压生产逐步向伺服化、自动化和连续化方向发展，伺服压力机、搬运机器人及输送机构在提升节拍稳定性和加工柔性的同时，也带来频繁启停、加减速和制动能量耗散问题。传统制动电阻消耗方式不仅增加热负荷，还降低系统综合能效。在“双碳”目标和制造业降本增效需求下，围绕机电一体化产线开展制动能量回收、储能缓冲与协同控制研究，具有较强的工程应用价值。

1 某汽车零部件伺服冲压—搬运产线能耗特征与回收边界

本研究选取某汽车零部件厂伺服冲压—机器人搬运一体化产线作为分析对象，产线由4台15 kW伺服冲压单元、2台5 kW搬运机器人以及6 kW输送与辅助机构构成，运行制度为每日8 h、每年300 d。改造前现场计量数据表明，产线平均用电量为40.0 kWh/h，折算年耗电量为96000 kWh，能耗集中度与工艺节拍波动存在明显关联。从能量流向观察，冲压滑块在减速回程阶段会把机械惯性能量转化为直流侧反灌能量，机器人下降、姿态调整以及末端制动过程同样形成短时再生功率，输送机构频繁启停则产生幅值较低但出现频次较高的制动能量。现场测得平均制动能量约9.8 kWh/h，受功率变换效率、储能单元容量以及同步负载吸收能力约束，工程可回收利用量约7.1 kWh/h。由此可将回收边界限定在伺服驱动直流母线、机器人再生单元以及输送驱动制动环节，为后续储能配置和协同控制方案设计提供依据。

2 机电一体化系统能量回收与节能技术方案设计

2.1 制动能量回收拓扑与直流母线耦合设计

围绕4台15 kW伺服冲压单元、2台5 kW搬运机器人以及输送变频器的共同制动特性，方案把直流母线耦合当作能量回收主通道来开展拓扑设计。冲压滑块减速回程、机器人下降制动以及输送机构停机减速时，制动电机把机械惯性能量反灌至驱动器直流侧，能量流向可表述为制动电机—伺服驱动器—公共直流母线—运行负载或储能单元—再利用负载。当相邻冲压单元处于加速建压、机器人处于姿态调整或输送电机处于启动阶段时，公共直流母线优先向这些即时负载供电，使再生能源在产线内部完成就地消纳。若母线电压超过设定阈值，双向DC/DC变换器把多余电能导入储能单元，降低制动电阻发热损耗。该拓扑不改变压力机、机器人本体以及输送机械结构，仅在驱动电气侧增加母线汇流、隔离保护以及能量管理环节，工程改造边界较清晰，控制流程见图1。

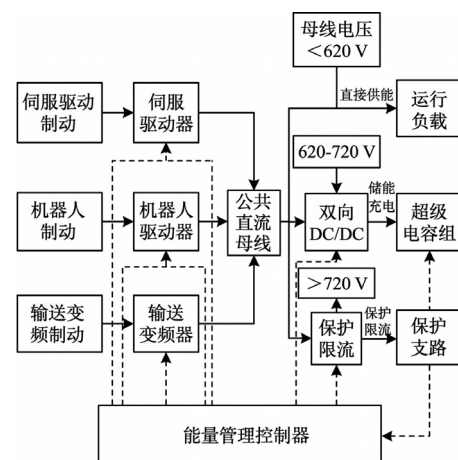


图1 机电一体化系统能量回收与节能控制流程图

2.2 负载匹配的储能单元与功率变换配置

鉴于该产线制动能量呈高频、短时、脉冲式释放特性，储

能配置不宜沿用大容量电池长期储电思路，而应把超级电容组当作功率缓冲单元来使用。按照平均可回收能量 7.1 kWh/h、单次冲压与搬运节拍约 12 s 以及母线电压稳定区间 620 ~ 720 V 进行匹配，双向 DC/DC 变换模块额定功率选为 30 kW，可覆盖冲压回程、机器人末端制动以及输送停机叠加时的短时功率波动。超级电容具备较高倍率充放电能力，适宜承接数秒级能量脉冲，并且可在下一个加速节拍马上释放给公共直流母线。容量设定侧重平滑母线电压、削减网侧峰值功率以及提高就地消纳率，而非追求长时间供电。由此，储能单元规模能够控制在较小范围内，避免容量冗余带来的投资增加、维护复杂化以及柜内散热压力上升，使方案在汽车零部件冲压搬运产线中具备较好的经济适配性。

2.3 多源节能协同控制与能量收益计算

在制动能量回收链路形成后，节能控制还需把伺服待机降功率、输送机构变频调速、机器人轨迹平滑以及母线电压分层控制纳入同一调度框架。公共直流母线存在加速负载时，能量管理控制器优先把再生功率分配给运行负载；无即时负载且母线电压升高时，双向 DC/DC 模块转入超级电容充电状态；储能荷电状态达到上限后，系统再进行回收限制或启用保护支路。为量化制动能量回收边界，可按各制动环节能量及变换效率计算可回收电量，公式如下：

$$E_{rec} = \sum_{i=1}^n E_{br,i} \eta_{drv,i} \eta_{dc} \eta_{st}$$

其中， E_{rec} 表示制动可回收能量，单位为 kWh/h； $E_{br,i}$ 表示第 i 类制动源产生的制动能量，单位为 kWh/h； $\eta_{drv,i}$ 表示对应驱动器回馈效率； η_{dc} 表示直流母线耦合效率； η_{st} 表示储

能充放电综合效率； n 表示制动源类别数量。

结合现场边界，制动再利用量取 7.1 kWh/h，待机降功率以及变频优化可额外节省约 3.4 kWh/h，理论平均节能量为 10.5 kWh/h。综合节能率可按改造前平均用电量进行折算，公式如下：

$$R_s = \frac{E_{rec} + E_{aux}}{E_0} \times 100\%$$

其中， R_s 表示综合节能率； E_{aux} 表示伺服待机降功率、输送变频优化以及机器人轨迹平滑形成的附加节能量，单位为 kWh/h； E_0 表示改造前产线平均用电量，单位为 kWh/h。代入 $E_{rec} = 7.1$ 、 $E_{aux} = 3.4$ 、 $E_0 = 40.0$ 后，可为后续运行效果评估提供统一计算口径。

3 能量回收与节能技术应用效果及优化方向

3.1 改造运行结果与节能效果评估

依托前述直流母线耦合、超级电容功率缓冲以及多源协同控制方案，产线完成连续 30 d 试运行后，对电能计量、母线能量回馈以及辅助节能记录进行统一折算。改造后平均用电量由 40.0 kWh/h 降至 29.5 kWh/h，按每日 8 h、每年 300 d 运行制度计算，年耗电量由 96000 kWh 降至 70800 kWh，年节电量为 25200 kWh，综合节能率为 26.25%。其中，制动能量回收贡献保持在 7.1 kWh/h 左右，伺服待机降功率、输送变频优化以及机器人轨迹平滑形成的协同控制节能贡献约 3.4 kWh/h。按电价 0.82 元 /kWh 测算，年节约电费约 2.07 万元；按电网排放因子 0.570 kg CO2/kWh 折算，年减排二氧化碳约 14.36 t，结果见表 1。

表1 改造前后运行能耗与节能效果结果表

指标项目	改造前	改造后	变化量或折算结果
平均用电量	40.0 kWh/h	29.5 kWh/h	降低10.5 kWh/h
年运行时间	2400 h	2400 h	运行制度一致
年耗电量	96000 kWh	70800 kWh	节电25200 kWh
制动能量回收贡献	0 kWh/h	7.1 kWh/h	回收贡献7.1 kWh/h
协同控制节能贡献	0 kWh/h	3.4 kWh/h	附加节能3.4 kWh/h
综合节能率	0%	26.25%	提高26.25个百分点
年节约电费	0万元	2.07万元	按0.82元/kWh折算
年CO2减排量	0 t	14.36 t	按0.570 kg CO2/kWh折算

3.2 工程应用约束与持续优化策略

从汽车零部件伺服冲压—机器人搬运产线的实际运行条件来看，能量回收效果会受到工艺节拍、储能状态以及原设备控制逻辑的共同影响。冲压滑块回程、机器人下降制动以及输送机构停机并不总是处在同步状态，负载节拍波动会把再生功率变成不稳定脉冲，进而影响公共直流母线的就地消纳比例。超级电容虽然适宜承接数秒级充放电脉冲，但其寿命与柜内温度、充放电倍率以及均压状态密切相关，若散热设计或荷电状态窗

口设置偏窄，容量衰减会提前影响功率缓冲能力。公共直流母线保护策略还需同原伺服驱动器、机器人控制柜以及输送变频器保持兼容，避免回馈阈值、故障联锁以及急停逻辑之间产生冲突。

后续优化可围绕数据驱动的能耗管理来开展。产线应持续采集工艺节拍、母线电压、超级电容荷电状态以及电机负载率数据，并把这些变量纳入能耗预测模型，用于判断再生能量出现时刻以及可吸收负载窗口。结合订单批量和节拍变化，机器

人轨迹平滑参数以及输送速度可进行动态调整,使加速负载更容易匹配制动回馈区间。储能单元还需设置健康状态监测,围绕容量衰减、等效内阻变化以及温升曲线开展周期评估,由此形成案例识别、方案设计、运行评估以及持续优化相衔接的工程闭环。

4 结语

本文围绕伺服冲压一机器人搬运产线构建了以公共直流母

线为核心的能量回收路径,并通过超级电容和双向DC/DC变换实现短时脉冲能量缓冲。运行结果验证了该方案在降低平均用电量、削减制动损耗和提升系统能效方面的可行性。后续应用中,应进一步结合节拍预测、储能健康监测和设备控制逻辑优化,提高再生能量与负载需求的匹配程度,推动节能方案向数据驱动和自适应控制方向发展。

参考文献

- [1]庄欠芬.利用单片机实现机电一体化系统的高效控制[J].时代汽车,2025,(18):130-132.
- [2]何静.PLC控制在机电一体化系统中的应用研究[J].中国设备工程,2025,(22):103-104.
- [3]郭金亮.机电一体化技术在化工机械中的应用——评《石油化工装置电气工程设计》[J].化学工程,2025,53(05):108.
- [4]李锋锋.广播系统视听设备绿色节能技术研究[J].电声技术,2024,48(04):112-114.
- [5]郭红玉.机电一体化技术的发展与应用[J].科技风,2024,(36):1-3.
- [6]张永哲,陶鑫.探讨煤矿机电设计工作中节能技术的应用[J].内蒙古煤炭经济,2024,(24):145-147.
- [7]雷富凯.地源热泵与光伏一体化系统的能效优化与仿真分析[J].自动化应用,2025,66(21):78-81.
- [8]段陆坤,姬红利.数据中心节能技术研究新探[A].江西省汽车工程学会、江西省工程师联合会,工程技术与新能源经济学术研讨会论文集(二)[C].中国电信股份有限公司内蒙古分公司;中朵云建设有限公司;江西省汽车工程学会,2025:123-125
- [9]曾祥勇.面向电力新能源的电气节能技术研析[J].电力设备管理,2024,(24):264-266.

作者简介:吕俊毅(1972—),男,汉族,本科,研究方向为机电工程。