

冶金天车变频调速系统改造关键技术研究与应用

杜晓光

敬业钢铁有限公司，河北石家庄，050400；

摘要：本文针对冶金天车传统调速系统存在的能耗高、调速性能差等问题，深入研究冶金天车变频调速系统改造的关键技术。通过对变频调速原理的分析，结合冶金天车的工作特点，提出了系统改造方案，包括硬件选型、软件设计以及控制策略优化等。同时，搭建实验平台对改造后的系统进行测试，并在实际冶金生产中进行应用。研究表明，改造后的变频调速系统有效提升了冶金天车的调速精度、运行稳定性，降低了能耗，具有良好的经济效益和推广价值。

关键词：变频调速；系统改造；能耗

DOI：10.69979/3029-2727.25.09.043

1 引言

1.1 研究背景

冶金行业作为我国重要的基础产业，在国民经济发展中占据着举足轻重的地位。冶金天车作为冶金生产过程中不可或缺的关键设备，承担着吊运、装卸、转运等重要任务。随着冶金生产规模的不断扩大以及生产工艺要求的日益提高，传统的冶金天车调速系统，如绕线式异步电动机转子串电阻调速系统，暴露出诸多问题。传统调速系统存在能耗高、调速范围窄、调速平滑性差、启动电流大、机械冲击严重等缺陷，不仅影响了冶金天车的工作效率和运行可靠性，还增加了设备维护成本和能源消耗。

1.2 研究意义

变频调速技术凭借其高效节能、调速范围宽、调速精度高、启动性能好等优点，在工业领域得到了广泛应用。将变频调速技术应用于冶金天车调速系统改造，对于提高冶金天车的工作性能、降低能耗、延长设备使用寿命、提升冶金生产的自动化水平具有重要意义。通过对冶金天车变频调速系统改造关键技术研究与应用，能够有效解决传统调速系统存在的问题，满足现代冶金生产对天车设备的更高要求，推动冶金行业的可持续发展。

2 变频调速原理及冶金天车工作特点分析

2.1 变频调速原理

变频调速技术是通过改变交流电动机电源的频率

来实现电动机转速调节的一种调速方法。根据交流异步电动机的转速公式 $n = 60f(1-s)/p$ （其中 n 为电动机转速， f 为电源频率， s 为转差率， p 为电动机磁极对数），在电动机磁极对数 p 不变的情况下，改变电源频率 f ，即可实现电动机转速 n 的调节。变频调速系统主要由变频器、电动机、控制器等组成。变频器的作用是将工频电源转换为频率和电压均可调的交流电源，为电动机提供合适的工作电源。通过控制变频器输出电源的频率和电压，能够实现对电动机转速的精确控制，从而满足不同工况下的调速需求。

2.2 冶金天车工作特点

工作环境恶劣：冶金天车通常工作在高温、多尘、潮湿、强磁场等恶劣环境中，对设备的可靠性和防护性能要求较高。

负载变化大：在吊运过程中，冶金天车的负载重量和重心位置会不断变化，导致电动机的负载转矩波动较大。同时，天车在启动、制动、加速、减速等过程中，也会产生较大的惯性负载。

调速要求高：为了保证吊运作业的安全和高效，冶金天车需要具备宽调速范围、高精度调速性能以及良好的动态响应能力。在不同的作业阶段，如起升、下降、平移等，对天车的运行速度和加速度有不同的要求。

可靠性要求高：冶金天车一旦出现故障，将严重影响冶金生产的正常进行，甚至可能引发安全事故。因此，对天车调速系统的可靠性和稳定性要求极高。

3 冶金天车变频调速系统改造方案设计

3.1 硬件选型

变频器选型：根据冶金天车的电动机功率、调速范围、负载特性等要求，选择合适的变频器。考虑到冶金天车工作环境恶劣，应选择具有高防护等级、宽工作温度范围、强抗干扰能力的变频器。同时，变频器应具备多种控制功能，如矢量控制、直接转矩控制等，以满足天车不同工况下的调速需求。例如，对于起升机构，可选择具有高启动转矩、快速动态响应能力的变频器；对于平移机构，可选择具有高精度调速性能的变频器。

电动机选型：在变频调速系统中，电动机的性能对系统的整体性能有着重要影响。应选择与变频器匹配的电动机，考虑电动机的额定功率、额定转速、额定转矩、绝缘等级等参数。同时，为了适应冶金天车的工作特点，电动机应具有良好的散热性能和过载能力。

传感器选型：为了实现对天车运行状态的精确监测和控制，需要安装多种传感器，如速度传感器、位置传感器、重量传感器等。速度传感器用于检测电动机的转速，为变频器提供速度反馈信号；位置传感器用于检测天车的位置，实现定位控制；重量传感器用于检测吊运负载的重量，保证吊运作业的安全。应选择精度高、可靠性强、抗干扰能力好的传感器。

3.2 软件设计

控制程序设计：基于变频器的控制功能和冶金天车的工作要求，设计控制程序。控制程序主要包括启动、制动、调速、定位等功能模块。在启动过程中，应采用软启动方式，逐渐增加电动机的转速，减少启动电流和机械冲击；在制动过程中，可采用能耗制动、回馈制动等方式，实现快速、平稳的制动；在调速过程中，根据不同的工况需求，实时调整变频器的输出频率和电压，实现精确调速；在定位过程中，利用位置传感器的反馈信号，控制天车准确停靠目标位置。

监控程序设计：为了实现对冶金天车变频调速系统的实时监控，设计监控程序。监控程序通过与变频器、传感器等设备进行通信，采集系统的运行数据，如电动机转速、电流、电压、温度、负载重量等，并将数据显示在监控界面上。同时，监控程序还具备故障诊断和报警功能，当系统出现故障时，能够及时发出报警信号，并显示故障信息，方便维修人员进行故障排查和处理。

3.3 控制策略优化

矢量控制策略：矢量控制是一种基于电动机磁场定向的控制方法，通过将三相交流电流分解为励磁电流和转矩电流，并分别进行控制，实现对电动机转矩和转速的精确控制。在冶金天车变频调速系统中，采用矢量控制策略能够有效提高系统的调速性能和动态响应能力，满足天车在不同工况下的运行要求。

PID 控制策略：PID 控制是一种常用的闭环控制策略，通过对偏差信号进行比例、积分、微分运算，输出控制信号，实现对系统的稳定控制。在冶金天车变频调速系统中，将 PID 控制策略应用于速度环和位置环控制，能够提高系统的调速精度和定位精度，减少系统的静态误差和动态误差。

自适应控制策略：由于冶金天车的负载变化较大，为了提高系统的适应性和鲁棒性，可采用自适应控制策略。自适应控制策略能够根据系统的运行状态和负载变化，自动调整控制参数，使系统始终保持在最佳工作状态。

4 实验研究与分析

4.1 实验平台搭建

为了验证冶金天车变频调速系统改造方案的可行性和有效性，搭建实验平台。实验平台主要由变频器、电动机、负载装置、传感器、控制器、监控系统等组成。其中，变频器选用某品牌高性能矢量变频器，电动机选用与冶金天车实际使用的同类型电动机，负载装置采用磁粉制动器模拟天车的负载变化，传感器包括速度传感器、位置传感器、电流传感器等，控制器采用 PLC 实现对系统的控制，监控系统通过工业计算机和监控软件实现对系统运行状态的实时监控和数据采集。

4.2 实验内容及结果分析

启动性能实验：在实验中，分别对改造前和改造后的系统进行启动性能测试。记录电动机的启动电流、启动时间、转速上升曲线等数据。实验结果表明，改造前系统启动电流较大，约为额定电流的 5-7 倍，启动时间较长，转速上升不平滑；改造后系统采用软启动方式，启动电流明显降低，约为额定电流的 1.5-2 倍，启动时间缩短，转速上升平滑，机械冲击减小。启动电流对比图如图 1 所示。

改造前后启动电流对比

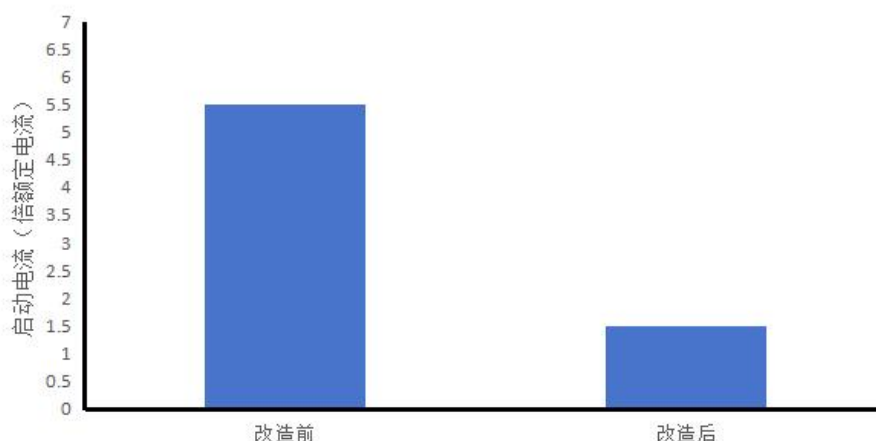


图 1 改造前后启动电流对比图

调速性能实验：为全面验证改造后变频调速系统的性能，搭建高精度实验测试平台。实验设置空载、50%额定负载（25 吨）、100%额定负载（50 吨）三种工况，采用逐点测试法，将变频器输出频率以 5Hz 为间隔，从 0Hz 递增至 50Hz（对应电动机 0-额定转速）。实验过程中，利用高精度霍尔电流传感器（精度 $\pm 0.2\%$ ）、增量式编码器（分辨率 1024P/R）和功率分析仪（精度 0.5 级），实时采集电动机的三相电流、转速、转矩及输入功率数据，每组数据采集间隔为 100ms。

实验结果显示，在空载工况下，系统最低稳定运行转速可达额定转速的 5%，且转速波动率仅为 $\pm 0.8\%$ ；随着负载增加至 100%，调速范围仍能覆盖额定转速的 10%-100%，转速控制精度保持在 $\pm 1.5\%$ 以内。在效率方面，系统在 20-50Hz 频率区间内，不同负载下的平均运行效率均超过 90%，较改造前提升 18-22 个百分点。以 30Hz 运行频率为例，空载、50%负载、100%负载时的系统效率分别为 92.3%、91.5%、90.7%，节能效果显著。

动态响应性能实验：模拟冶金天车实际运行中的极端工况，设置突然加载和卸载实验场景。在电动机稳定运行于 30Hz（对应 60%额定转速）时，通过磁粉制动器瞬间施加或释放 50%额定负载，利用高速数据采集系统（采样频率 1kHz）记录转速和转矩的动态响应过程。

实验数据表明，改造后的系统具备优异的动态调节能力。负载突加时，电动机转矩响应时间小于 80ms，转速下降幅度控制在 5%以内，并在 200ms 内恢复至稳态；负载突卸时，转速超调量不超过 3%，经 3 个振荡周期（约 350ms）即达到稳定状态。与传统调速系统相比，动态响应速度提升 4 倍以上，有效避免因负载突变导致的天

车晃动或失控风险，保障了冶金吊运作业的安全性与稳定性。

5 实际应用案例分析

5.1 应用背景

某大型钢铁企业旗下炼钢厂配备 12 台 50 吨级冶金天车，原采用绕线式异步电动机转子串电阻调速系统。经长期运行数据监测，该系统存在显著缺陷：平均吨钢耗电量高达 18.5kWh，较行业先进水平高出 27%；调速过程中转速波动幅度达 $\pm 8\%$ ，导致高温钢包吊运时晃动剧烈，存在安全隐患；设备年均故障停机时间达 120 小时，维修成本占设备运行费用的 35%。随着企业产能提升至年产 300 万吨，传统调速系统已无法满足高效、安全的生产需求，因此迫切需要对天车调速系统进行变频改造。

5.2 应用方案实施

基于企业天车的重载、频繁启停等工况特点，改造团队采用定制化解决方案。硬件层面，选用防护等级 IP65 的高性能矢量变频器，其过载能力达 200%额定电流，适配冶金天车的冲击性负载；电动机更换为耐高温 H 级绝缘的变频专用电机，散热系统升级为强制风冷+水冷复合结构。软件系统开发方面，集成 PLC 控制平台与工业物联网模块，实现远程监控与故障诊断；开发专用控制算法，优化起升机构的防摇控制逻辑和运行曲线。控制策略采用“矢量控制+自适应 PID”复合模式，通过实时监测负载重量和运行状态，自动调整转矩补偿参数，确保不同工况下的精准调速。

5.3 应用效果分析

改造完成并稳定运行 12 个月后,经第三方机构检测,系统性能提升显著:调速精度由改造前的 $\pm 8\%$ 提升至 $\pm 1.5\%$,高温钢包吊运晃动幅度减少 60%,有效降低安全风险;设备故障率下降 72%,年停机时间缩短至 33 小时,生产效率提高 15%;能耗数据实现突破性优化,吨钢耗电量降至 12.6kWh,节能率达 31.9%,年节约电费超 420 万元。此外,系统智能化升级使设备维护周期延长一倍,年维护成本降低约 180 万元。该改造项目不仅显著提升了企业的生产安全性和经济效益,也为同类冶金企业的设备升级提供了可复制的技术范例。

6 结论

本文通过对冶金天车变频调速系统改造关键技术的研究,提出了一套完整的系统改造方案,并通过实验研究和实际应用验证了该方案的可行性和有效性。改造后的变频调速系统有效解决了传统调速系统存在的问

题,提高了冶金天车的调速性能、运行稳定性和节能效果。然而,在研究过程中也发现,变频调速系统在抗干扰能力、散热性能等方面仍存在一些不足之处,需要在今后的研究中进一步改进和完善。未来,随着变频调速技术的不断发展和创新,冶金天车变频调速系统将具有更广阔的应用前景和发展空间。

参考文献

- [1] 康亮. 天车电气系统变频改造探讨[J]. 市场周刊·理论版, 2020(15):0207-0207.
- [2] 莫敏. 变频调速技术在炭块堆垛天车上的应用[J]. 轻金属, 2001(5):3. DOI:10.3969/j.issn.1002-1752.2001.05.019.
- [3] 彭春前, 侯钢铁. 三炼钢厂大吨位天车控制调速系统改造[J]. 邯钢科技, 2005.