

一、项目名称：基于多信息源流数据的连铸扇形段辊缝值预测技术

二、提名者及提名意见

提名单位：陕西省委军民融合发展委员会办公室

提名意见：

连铸过程是一个复杂、连续的相变过程，影响铸坯质量的控制环节众多，现有技术难以实现多变量、多环节的协同优化控制。现有工艺参数的制定难以充分兼顾铸坯状态、设备状态和生产工况三者的实时变化，且工艺参数的制定与其在连铸生产中的准确执行之间存在明显脱节，导致参数设定与实际生产条件之间存在较大偏差。尤其是作为保证铸坯质量关键环节的扇形段辊缝值控制，目前仍缺乏有效的动态自适应预测模型，无法依据实际生产工况对辊缝值进行实时、精准的自适应调整，严重制约了高品质铸坯质量的稳定提升。该项目基于数据分析挖掘的思想，围绕“多信息源流数据的连铸扇形段辊缝值预测”开展了深入研究，并在连铸工艺改进、铸坯质量提升等领域实际应用，拓宽了工业数据处理的应用领域和使用场景，经济、社会效益显著。

该项目成果材料齐全、规范，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省科学技术奖提名条件。特提名为陕西省科学技术进步奖三等奖。

三、项目简介

钢铁连铸技术已经是现代冶金三大突破性技术之一，在近代钢铁工业高新技术领域占有举足轻重的战略地位。连铸生产的目标是获得高质量钢铁产品，这个目标是通过工艺参数和连铸设备实现的。在现代钢铁连铸技术中，结晶器、扇形段以及钢液成分等工艺参数的精准控制是高品质钢连铸的关键技术，其中，保证铸坯产品综合性能的关键环节之一是扇形段辊缝值的控制。因此，研究连铸机扇形段辊缝值精确调整技术成为了提高连续铸造产品综合性能的重要方法，需要对连铸过程工艺参数、铸坯凝固传热机理及辊缝值预测模型进行深入地认识和理解。传统基于连铸数值传热冶金模型和专家经验的辊缝值调整模式已无法满足辊缝值实时动态调整需求。因此，本文针对连续铸造过程中连铸机扇形段辊缝值预测的关键技术开展了理论分析、数据采集、维数规约、信号降噪、预测方法等方面的研究，充分利用连铸生产过程现场数据，为连铸辊缝值预测开辟了新的思路。

项目组以国家项目为依托，历经多年产学研协同攻关，开发了工艺参数影响机理分析与降维方法、建立了连铸过程数值传热冶金模型和有限元分析模型、开发了连铸工艺参数自适应降噪方法、建立了一种基于多尺度分析和预测回归相结合的连铸工艺参数时间序列预测模型，通过系统的对比试验对所提方法的有效性进行了全面验证。

主要的科学发现和技术要点有以下方面：

- (1) 首次进行了系统的连铸工艺参数影响机理分析，实现了多重工艺参数景区解耦。

针对铸坯性能和辊缝值影响因素种类众多，通过数值模拟和理论分析获取对铸坯性能和辊缝值影响关系密切的工艺参数。建立了宽厚板坯连铸数值传热冶金模型，探究了在连铸生产过程中与辊缝值关系密切的工艺参数对铸坯综合性能和辊缝值的影响规律。以宽厚板坯为研究对象，根据连铸现场工艺条件和连铸机辊列布置特点，建立了连铸过程有限元分析模型，获得了13种与辊缝值关系密切的工艺参数。同时，通过模拟连铸轻压下实验验证了辊缝值是影响铸坯产品综合性能的重要因素。

- (2) 开展了海量连铸工艺参数的高效降维研究，实现了连铸工艺参数有效降维，提高了计算效率，降低了计算误差，更加适合连铸实际生产需要。

针对连铸生产过程工艺参数种类众多、相互之间耦合严重，并且这些工艺参数并不是同等重要的问题，对与辊缝值参数影响较为密切的连铸工艺参数进行了主成分分析，从种类维度上降低了60%，利用数据重构误差定量判断维数规约的方法并验证了其有效性。研究了主成分物理意义解释机制，利用主成分中载荷系数较大的工艺参数对主成分进行物理意义的解释。建立基于滑动窗主成分分析的自适应连铸工艺参数维数规约模型，充分考虑最新数据对主成分分析模型的影响，经过与传统的主成分分析方法的比较，其数据重构误差更小，更加适合连铸实际生产需要。

- (3) 开发了连铸工艺参数自适应降噪方法，实现了连铸工艺参数多尺度自适应降噪。

针对连铸生产现场工艺参数缺乏高可靠性、高信噪比数据的问题，研究了连铸工艺参数自适应降噪方法。建立了连铸生产现场数据自适应降噪模型，揭示了连铸生产现场数据的噪声影响规律。针对传统降噪方法中普遍使用的经验模态分解方法存

在边界效应、模态混叠和小波变换方法过度依赖先验知识等问题，提出一种基于互信息熵的连铸工艺参数多尺度自适应降噪方法，探索了集成算法的自适应能力。使用了八种对比算法、两个统计指标对降噪效果进行对比分析，集成算法在均方根误差和信噪比两方面全面优于其他方法，为连铸工艺参数的降噪研究提供了指导。

（4）建立了一种基于多尺度分析和预测回归相结合的连铸工艺参数时间序列预测模型，实现了连铸工艺参数的精确预测。

针对传统时间序列预测模型常常存在预测精度低、系统耗时长等问题，建立了一种基于多尺度分析和预测回归相结合的连铸工艺参数时间序列预测模型。使用支持向量回归模型进行连铸工艺参数变分模态分解后本征模态分量的时间序列预测，重构获得的预测后信号误差比传统自回归滑动平均预测方法提高了29.6%。引入深度学习计算框架对回归预测模型进行改造，基于一维卷积滤波技术的复杂时间序列优化技术，结合多层深度学习框架进行了连铸工艺参数时间序列预测，并与支持向量回归模型进行了对比，1D Conv-LSTM（一维卷积-长短期记忆）模型不仅通过结构寻优、最优参数确立实现了预测的高精度，同时其一维卷积滤波层通过去除白噪声、横向压缩样本序列等手段优化了训练样本，解决计算冗杂难题，训练时间大幅降低。

项目研究成果获国家核心知识产权 2 项（发明专利 2 项）；发表科研论文7篇。多名知名专家认为，该成果技术先进，创新性强，总体达到国内领先水平，国际先进水平。研究成果已成功应用于唐山钢铁集团有限责任公司等，社会效益显著。

四、客观评价

（1）项目验收结题及成果应用情况

本成果依托国家自然科学基金（51575429）项目凝练而成，项目圆满完成各项考核指标和研究任务，顺利验收结题，并取得重要科技成果，获得显著经济、社会和生态效益，具有广阔的应用前景。

（2）项目成果、奖励及引用情况

项目主要在连铸扇形段辊缝值动态实时自适应预测、连铸工艺参数自适应维数规约和连铸工艺参数信号自适应降噪三方面取得了重要的研究成果，该研究成果获国家核心知识产权2项（发明专利2项）；发表科研论文7篇。成果被国际知名期刊引用，引用次数累计69次。

五、项目的应用推广及效益情况

本成果将流数据分析、深度学习等信息学科前沿技术与钢铁冶金工艺融合，为传统冶金工业的智能化转型升级提供了新的技术路径和方法论参考，对推动我国高效连铸技术向智能化、数字化方向发展具有积极的示范引领意义。

本成果在连铸车间开展了工程应用验证。选取该厂两台规格相同的板坯连铸机（A机、B机）作为对照组，生产品种为Q235铸坯，断面尺寸210mm×210mm。在相同生产条件下，A机应用本成果辊缝值预测模型，B机维持原有工艺，连续10天每两天采集一次全断面低倍样进行质量评价。

低倍检验结果表明：A机铸坯仅存在极轻微的中部裂纹，中心疏松与中心偏析均小于0.5级；B机铸坯的三角区裂纹、中部裂纹、中心疏松及中心偏析程度均明显重于A机，差异显著。

在线质量统计数据显示：应用本成果前，A、B两台连铸机在线缺陷率均维持在3.3%左右；应用辊缝值预测模型后，A机在线缺陷率大幅降低至0.9%，降幅达72.7%。铸坯中部裂纹、中心线缺陷及三角区裂纹基本消除，产品内部质量显著提升。

六、主要知识产权

序号	知识产权类别	知识产权名称	国家(地区)	授权号(批准号)	授权日期	证书编号	权利人	发明人
1	发明专利	一种基于变分模态分解和支持向量回归的信号预测方法	中国	ZL201810783956.1	2021年7月13日	4542018	西安交通大学	苏文斌, 雷竹峰, 梁显祺, 胡桥, 侯秉睿, 赵航, 郑艳妮, 丁明杰, 张阳坤, 田芮铭
2	发明专利	一种随动式被动伺服加载装置及载荷获取方法	中国	ZL201710365420.3	2023年8月15日	6236004	西安交通大学	苏文斌, 雷竹峰, 曹明阳, 李天石, 王朝晖
3	SCI论文	Mold Level Predict of Continuous Casting Using Hybrid EMD-SVR-GA Algorithm	中国	2019,7(3),177	2019年4月26日	PROCESSES	西安交通大学	雷竹峰, 苏文斌
4	SCI论文	Mold-Level Prediction for Continuous Casting Using VMD - SVR	中国	2019,9(4),458	2019年4月1日	METALS	西安交通大学	苏文斌, 雷竹峰, 杨拉道
5	SCI论文	Research and Application of a Rolling Gap Prediction Model in Continuous Casting	中国	2019,9(3),380	2019年4月19日	METALS	西安交通大学	雷竹峰, 苏文斌
6	SCI论文	Multimode Decomposition and Wavelet Threshold Denoising of Mold Level Based on Mutual Information Entropy	中国	2019,21(2),202	2019年3月22日	ENTROPY	西安交通大学	雷竹峰, 苏文斌, 胡桥

7	SCI论文	Mold-level prediction based on long short-term memory model and multi-mode decomposition with tual information entropy	中国	2019. 12	2019年12月31日	ADVANCES IN MECHANICAL ENGINEERING	西安交通大学	苏文斌，雷竹峰
8	EI论文	Research on Fuzzy Rule-Based Reasoning System for CC Quality Assurance	中国	2018. 1900-1908	2018年12月15日	2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimics(ROBIO)	西安交通大学	雷竹峰，苏文斌，刘瑜，高琦，杨拉道，胡桥
9	EI论文	Stiffness Analysis and Experimental Verification of Segment Frame of Continuous Casting Machine	中国	2019. 253	2019年2月14日	2018 International Conference on Materials Science and Manufacturing Engineering(MSME2018)	西安交通大学	雷竹峰，苏文斌，侯秉睿，高琦

七、主要完成人

排名	姓名	技术职称	行政职务	工作单位	完成单位	对本项目的贡献
1	雷竹峰	高级工程师	无	西安航空学院	西安航空学院	是本项目的统筹者和执行者，全面负责该项目的整体规划以及具体的实施工作。是西安航空学院对项目的技术创造性贡献中两项知识产权的主要完成者。
2	苏文斌	教授	无	西安交通大学	西安交通大学	主要参与技术方案制定、理论研究，研究报告审定等工作，是西安交通大学对项目的技术创造性贡献中知识产权的主要完成者。
3	杨拉道	研究院	无	中国重型机械研究院股份公司	中国重型机械研究院股份公司	主要负责工艺优化指导工作，是中国重型机械研究院对项目的技术创造性贡献的主要完成者。

八、主要完成单位情况

排名	单位名称	主要贡献
1	西安航空学院	作为本项目的第一完成单位，负责组织项目实施。在项目的实施过程中负责项目的支持、管理和监督等工作。自本项目立项以来，作为项目的第一承担单位，在人力、物力、财力等方面给予了全面的支持，在人员、工作安排、研究条件、实验设备、分析检测、场地等方面给予了大力的支持，确保了项目的按时完成。
2	西安交通大学	作为第二完成单位，在本项目实施过程中，我校教师积极参与项目的策划、预研、可行性研究和申报等工作，并承担了项目主要的实验室研究工作。
3	中国重型机械研究院股份公司	作为第三完成单位，在本项目实施过程中，积极配合该项目的工作，并在设备使用等方面给予积极的支持与配合。

九、完成人合作关系说明

本成果共有3位主要完成人。其中，第一成果完成人均毕业于西安交通大学，现工作单位均为西安航空学院；第二完成人来自西安交通大学；第三完成人来自中国重型机械研究院股份公司；西安航空学院、西安交通大学和长安大学共同推动了“基于多信息源流数据的高效连铸工艺参数预测技术”。

第一、第二完成人共同完成了ZL201810783956.1，ZL201710365420.3，第一、第二和第三完成人共同发表论文，并以协作开展调研等多种方式参与该成果的理论框架构建与研究内容开展。