

起重机运行状态下转速转矩测量方法综述

黄永欣, 段晨毅, 马 鑫, 杨毅宸, 包瑞新*, 曾鸿皓

辽宁石油化工大学机械工程学院, 辽宁 抚顺

收稿日期: 2025年11月8日; 录用日期: 2025年12月1日; 发布日期: 2025年12月8日

摘 要

起重机作为重型装备核心组成, 其运行状态下的转速与转矩参数直接决定设备安全性能与作业效率。本文系统梳理近15年国内外起重机转速转矩测量技术, 我们定义“直接测量”与“间接估算”两类方法的判别标准: 前者指通过传感器直接获取扭转轴或其附加元件的物理形变信号, 后者则基于系统外部可测参数通过建模反推。在此基础上, 对比不同方法在测量精度、动态响应、成本控制等维度的差异, 总结从“静态单点测量”到“动态实时监测”、从“单一参数建模”到“多场耦合分析”的研究演进路线。

关键词

起重机, 转速测量, 转矩测量

A Survey of Measurement Method of Rotating Speed and Torque of Crane in Operation

Yongxin Huang, Chenyi Duan, Xin Ma, Yichen Yang, Ruixin Bao*, Honghao Zeng

School of Mechanical Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun Liaoning

Received: November 8, 2025; accepted: December 1, 2025; published: December 8, 2025

Abstract

Crane is the core component of heavy equipment, and its speed and torque parameters directly determine the safety performance and operation efficiency of the equipment. This paper systematically reviews the domestic and foreign crane speed and torque measurement technology in the past 15 years, and defines the criteria of “direct measurement” and “indirect estimation”: the former refers to the

*通讯作者。

physical deformation signal of the torsion shaft or its additional components directly obtained by the sensor, while the latter is based on the external measurable parameters of the system through modeling. On this basis, the differences of different methods in measurement accuracy, dynamic response, cost control and other dimensions are compared, and the research evolution routes from “static single-point measurement” to “dynamic real-time monitoring”, from “single parameter modeling” to “multi-field coupling analysis” are summarized.

Keywords

Crane, Tachometric Survey, Torque Measurement

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 研究背景与意义

起重机在建筑、港口、物流等领域广泛应用,其起升、变幅、回转机构的转速与转矩参数,是反映传动系统健康状态的核心指标。转速异常可能导致机构卡顿,转矩过载则易引发齿轮磨损、轴系断裂等重大故障。据《中国起重机械安全发展报告》统计,2020~2024 年因转速转矩监测失效导致的起重机械事故占比达 32% [1],因此在动态工况(如载荷波动、变幅运动)下实现高精度测量,是保障设备安全、延长使用寿命的关键需求。

1.2. 文献研究现状

通过 CNKI、Web of Science 数据库检索,筛选近 15 年(2010~2025)相关文献。国内研究以“低成本适配性”为核心,聚焦传感器改进与简化建模;国外研究侧重“高精度与智能化”,突出无线传输、多场耦合与物联网技术融合。当前研究痛点集中于:动态载荷下测量误差超差(国内部分方法误差 >2%)、复杂环境(粉尘/振动)抗干扰能力不足、高端设备依赖进口(国外无线传感器单价超 10 万元),尚未形成普适性强、性价比高的测量方案。

2. 测量方法分类标准

本文对“直接测量”与“间接估算”作如下操作性定义:

直接测量: 通过传感器直接检测扭转轴或其附加元件的物理形变或运动状态,从而获取转速或转矩信号。其核心特征是信号来源于被测对象的机械响应。

间接估算: 不直接测量轴的形变或运动,而是通过系统外部可测参数,结合物理或数学模型,反推转速与转矩值。

3. 国内起重机转速转矩测量方法

3.1. 直接测量类方法

3.1.1. 接触式测量方法

应变片技术: 在被测轴外圆周 45°和 135°方向粘贴应变片,将切应力转化为应变信号,通过滑环或感

应式传输装置将信号传至应变仪。该方法精度极高(误差 $<0.1\%$), 适用于实验室电机标定等高精度场景, 但滑环易磨损, 不适用于高速或恶劣环境[2]。其物理极限受材料疲劳寿命与信号传输方式制约, 改进策略包括采用无线应变片或光纤光栅传感器。

盘式扭矩传感器: 作为应变片技术的集成化产品, 采用无轴承结构, 通过法兰联轴器连接动力端与负载端, 其量程可达 $0\sim 5000\text{ N}\cdot\text{m}$, 转速支持 $0\sim 12,000\text{ r/min}$, 精度 $0.1\%\sim 0.5\%\text{ F.S.}$ [3]。安装时需保证轴线同轴度 $\leq 0.05\text{ mm}$, 否则将引入额外弯矩误差。

磁电式测量法: 利用齿轮与磁电传感器的电磁感应, 产生与转速成正比的交变电动势。该方法结构简单、成本低、抗干扰强, 误差约 $0.5\%\sim 1\%$, 适用于中低速($<3000\text{ r/min}$)工业设备[4]。

3.1.2. 非接触式测量方法

为解决安装与环境问题, 国内学者开发非接触方案, 以霍尔电流传感器与激光转速传感器为代表。哈尔滨工业大学在塔式起重机回转机构中, 利用霍尔传感器采集电机定子电流, 结合电机转矩与电流的线性关系反推转矩(误差 $\pm 1.2\%$), 搭配激光传感器非接触测量转速(精度 $\pm 0.1\text{ r/min}$) [5]。该方法无需拆解设备, 可在线安装, 但受电机磁路饱和影响, 载荷波动超 30% 时误差增至 $\pm 2.5\%$ 。

3.2. 间接估算类方法

3.2.1. 电机参数建模法

基于异步电机的等效电路模型, 通过电压、电流等参数估算转速与转矩。中南大学在门式起重机中采用矢量控制理论建立估算模型, 成本仅为直接测量的 $1/5$ 。但忽略铁损与铜损, 连续作业后因电机发热导致参数漂移, 误差从 $\pm 1.8\%$ 升至 $\pm 3.2\%$ [6]。

3.2.2. 振动/噪声反演法

通过加速度传感器采集齿轮箱振动信号, 结合频谱分析反推转速与转矩。武汉理工大学在 20 吨级 塔式起重机中实现精度约 $\pm 2.0\%$ [7]。该方法适配性强, 但受环境噪声干扰大, 在嘈杂场景中误差会扩大至 $\pm 4.5\%$ 。

4. 国外起重机转速转矩测量方法

4.1. 高精度直接测量类方法

无线扭矩传感器法: 以美国 KISTLER 无线扭矩变送器为代表, 采用蓝牙 5.0 协议传输数据, 测量精度达 $\pm 0.1\%$, 动态响应速度 10 ms , IP67 密封设计适应恶劣环境[8]。在德国汉堡港的岸桥起重机中连续运行 12 个月 故障率仅 2% , 但设备单价超 12 万元 。

光学测量法: 光学测量通过激光技术实现完全非接触测量, 典型方案为德国 POLYTEC 的激光多普勒测速仪(LDV)与扭矩计算模型组合。其原理是: 激光照射起重机传动轴表面, 通过多普勒频移计算转速, 精度 $\pm 0.01\text{ r/min}$, 同时采集传动轴的微小形变, 结合材料力学模型计算转矩, 精度 $\pm 0.08\%$ [9]。该方法无机械干扰, 但对环境光照敏感, 需配套遮光装置, 调试周期长达 1 周 。

4.2. 智能化间接测量类方法

物联网融合法: 西门子“传感器 + 云平台”系统通过多传感器数据上传云端, 利用大数据算法修正误差, 在鹿特丹港的门式起重机中转矩误差稳定在 $\pm 0.3\%$ [10]。但依赖网络环境, 延迟 $> 100\text{ ms}$ 时动态响应会出现滞后。

多物理场耦合建模法: MIT 针对履带式起重机, 融合力学、电磁学与热力学模型, 通过有限元分析

优化转矩估算公式，在载荷波动超 50% 时误差仍控制在 $\pm 0.3\%$ [11]。该方法计算复杂度高，需配套工业级算力芯片。

5. 技术路线比较与适用性分析

5.1. 物理极限与关键影响因素

直接测量的精度受限于传感器分辨率、材料特性与信号传输方式。例如，应变片法的极限精度受制于应变片粘贴质量与信号漂移。间接估算的精度依赖于模型完备性与参数稳定性。如电机参数建模法在温升、磁饱和等非线性效应下精度显著下降。

5.2. 适用场景边界

高精度直接测量适用于港口起重机、航空航天等对精度与可靠性要求极高的场景；间接估算更适用于中低端起重机、老旧设备改造或预算受限项目；多传感器融合与云平台辅助是未来提升间接方法精度的关键路径。

5.3. 融合可能性

国内外方法在“传感 - 建模 - 平台”三个层面存在互补空间。例如，将国内低成本传感器与国外多场耦合模型结合，构建“本地传感 + 云端修正”的混合系统，可在控制成本的同时提升动态精度。

6. 结论与展望

国内方法以“低成本、易推广”为优势，适用于中低端起重机，但在动态精度与抗干扰能力上存在短板；国外方法聚焦“高精度、智能化”，适配高端港口、履带式起重机，但成本高、依赖进口。

两类方法的核心差异在于“技术目标”——国内优先满足工程需求，国外追求性能极致，未来需结合两者优势，形成“高精度 + 低成本”的平衡方案。

未来，随着人工智能与先进传感技术的深度结合，起重机转速转矩测量技术将朝着更智能、更可靠、更集成的方向发展，为起重机械的智能化升级与安全运行提供坚实的技术支撑。

致 谢

本论文的顺利完成，离不开各方的支持与帮助。首先，衷心感谢我的指导教师包瑞新，从论文选题、框架搭建到内容打磨，您都给予了专业且细致的指导，让我得以清晰梳理起重机转速转矩测量领域的研究脉络。

同时，感谢大创项目团队成员的协作与付出，项目研究过程中的每一次讨论与实践，都为论文的撰写积累了宝贵素材。也感谢期刊审稿专家提出的建设性意见，帮助我进一步完善论文质量。

最后，向所有在学业与科研道路上给予我鼓励的家人和朋友致以诚挚谢意。

基金项目

辽宁省大学生创新训练计划项目(项目编号: S202410148049); 辽宁省市场监督管理局科技计划项目(项目编号: 2024ZC013)。

参考文献

- [1] 工程起重机[J]. 工程机械文摘, 2018(1): 34-35.
- [2] 尹海兵, 吴建奎. 大型液压起重机同步控制的研究[J]. 液压气动与密封, 2017, 37(5): 1-5.

- [3] 王慧敏. 装甲车风扇传动轴转矩转速测试系统的设计[D]: [硕士学位论文]. 太原: 中北大学, 2023.
- [4] 梁桃华, 周江, 肖冠南. 霍尔开关 DH621 在电机转速测量中的应用研究[J]. 电子制作, 2024, 32(16): 69-71+75.
- [5] 朱良红. 永磁同步电机低速运行高频信号注入无位置传感器鲁棒控制策略[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
- [6] 曹心如, 殷晨波, 乔文华, 等. 塔式起重机变幅机构虚拟传感器研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2023(6): 83-88.
- [7] 王维, 罗华, 彭天玲, 等. 一种基于振动信号的电机转速计算方法[J]. 防爆电机, 2022, 57(2): 27-30+42.
- [8] Karlovský, P. and Lettl, J. (2017) Application of MRAS Algorithm to Replace the Speed Sensor in Induction Motor Drive System. *Procedia Engineering*, **192**, 421-426. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.073>
- [9] Siemens, A.G. (2024) SIMOCRANE Intelligent Monitoring System for Port Cranes. Siemens AG.
- [10] Paramo-Balsa, P., Roldan-Fernandez, J.M., Burgos-Payan, M. and Riquelme-Santos, J.M. (2021) A Low-Cost Non-Intrusive Method for In-Field Motor Speed Measurement Based on a Smartphone. *Sensors*, **21**, Article 4317. <https://doi.org/10.3390/s21134317>
- [11] MIT Mechanical Engineering Department (2023) Dynamic Torque Measurement for Off-Road Cranes Using Multi-Field Fusion. Massachusetts Institute of Technology.