

轮轨接触式传动机构 在船舶牵引系统中的应用研究

刘金华¹, 潘志翔¹, 周宏基¹, 陈文博²

(1. 共青科技职业技术学院, 江西 九江 332020; 2. 武汉理工大学船海与能动学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 船舶在隧洞中通航时危险系数较大, 因此采用轨道牵引车牵引船舶通过隧洞。该牵引系统中轮轨结构在运行过程中易出现车轮空转现象, 使被牵引船舶航速及位置无法精确控制, 导致出现安全事故, 因此本文通过模拟牵引车运行情况, 对比设定电机转速与牵引车运行速度之间关系, 论证船舶牵引系统速度和加速性能, 为实际通航隧洞牵引系统建设提供理论依据。

关键词: 船舶牵引系统; 轮轨接触式传动机构; 通航隧洞; Adams 仿真分析

中图分类号: U664.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2021) 12—0089—03

乌江地形地质条件复杂, 乌江航道 1000t 级运输船标准船型体态较大, 又由于长距离隧洞内光线暗、船—岸富余距离较小, 对航行稳定性有较高要求, 因此船舶采用一种隧洞牵引系统来通过。这种应用于隧洞中牵引系统, 通过对应用于船坞中引船系统改进而来^[1], 国内齐俊麟论证这种引船技术在三峡船闸应用前景^[2]。应用于通航隧洞中牵引系统由驱动机构、导向机构、传动机构、供电系统、控制系统等组成, 设置在航道两侧轨道上运行牵引车随船前进, 为船舶提供牵引力与横向拉力。

其中, 传动机构作为牵引系统中重要组成部分, 承载船舶横向牵引力以及前进动力, 关系到船舶能否在隧洞中安全通航。船舶牵引系统中轮轨接触式传动机构类似于轮轨式铁路列车, 列车在高速轮轨运动时由于地面不平整以及受力不均匀, 会出现车轮腾空瞬间脱离轨道导致车轮空转^[3]。对于牵引系统中轮轨结构, 不仅受到向下压力, 还会受到较大侧向拉力, 可能会发生车轮空转现象, 使被牵引船舶航速及位置无法精确控制, 导致出现安全事故。因此, 本文通过探究轮轨接触式传动机构传动下, 船舶能否与牵引车同步运行, 进而探究牵引系统速度以及加速性能, 并以此为实际通航隧洞牵引系统建设提供理论依据。

1 船舶牵引系统及其轮轨结构

牵引绳从隧洞入口开始系揽进入隧洞, 前两组牵引小车提供航向驱动力, 后两组牵引小车提供定位作用力和制动力。四组车相对位置提供缆绳内部预紧力, 固定

船舶航道内位置, 牵引车运行于航道两侧轨道, 该方案运行方式如图 1 所示。

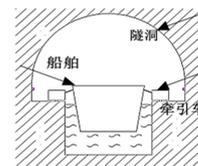


图 1 四车牵引式牵引方案左视图

牵引系统轮轨结构如图 2 所示, 其中左图侧向限位滚轮、上侧限位小轮以及牵引车行驶轮组成定位滚轮结构 (右图), 应用于船舶牵引系统中轮轨结构采用固定于地面槽型导轨以及牵引车滚轮组成定位导向结构, 以此避免牵引车受到钢丝绳侧向拉力出现空转及侧翻可能。为验证该结构实用性, 下文通过仿真模拟牵引车在轨道上受侧向拉力时运行情况。

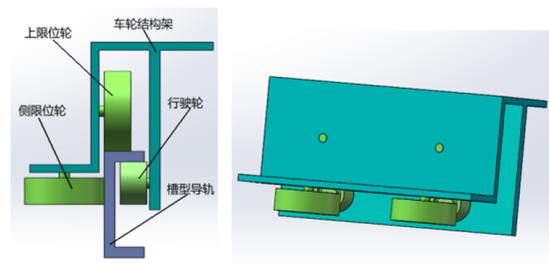


图 2 牵引系统轮轨结构

2 船模运行速度运动学仿真

尾部钢丝绳主要作用是调整小车偏转位置, 起定位作用, 牵引力大小视所需稳定程度与船舶惯性力而定, 此处以提供牵引力前部牵引车为例, 给定钢丝绳侧向拉

力恒定 1KN。

表 1 船模主要计算参数

序号	名称	规格	单位
1	航速 V	0.313049517	m/s
2	Fr	0.059868434	无量纲
3	Cr 剩余阻力系数	0.431649494	无量纲
4	有效横截面积 S1	1.9696284	m ²
5	Rr (剩余阻力)	0.041659266	N
6	Re (雷诺数)	865875.0392	无量纲
7	Cf (摩擦阻力系数)	0.004837601	无量纲
8	△ Cf	0.0004	N
9	Cts (总阻力系数)	0.00566925	无量纲

建立牵引系统三维模型，确定模型中柔性连接处以及船体接触库伦摩擦代换等效参数，将模型连接处进行布尔操作，传动机构和电机等关键部位进行 ADAMS 仿真软件内参数化建模并给予替换。根据实验室实验需求和环境要求，从 STARCCM+ 中算出转化为 ADAMS 相关等效参数进行模拟分析。经过相关参数和运动副设定，在建模过程中对除计算域外对结构做出简化，进行牵引系统运动学仿真。

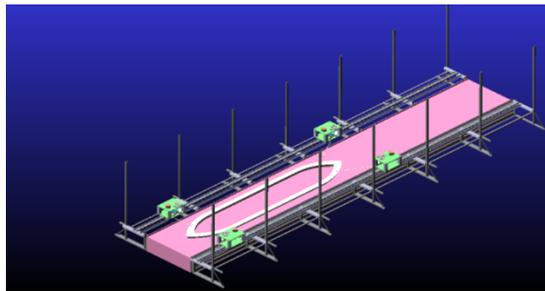


图 3 ADAMS 导入后模型

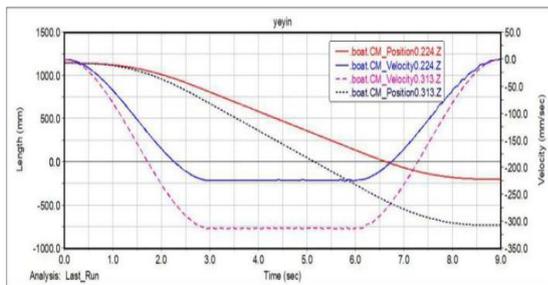


图 4 两组速度下位移与速度曲线图

图 4 实线表示 z 轴负方向船模位移曲线，为和实验数据单位一致，设 z 轴负方向为运行方向，红色实线为速度为 0.224m/s 时位移曲线，蓝色实线为其速度曲线。黑色虚线为速度为 0.313m/s 时位移曲线，玫红色虚线为其速度曲线。曲线可以看出是连贯柔和，表明不同速度下齿轮齿条传动机构运行可靠，同时与设定牵引车驱动达到同步状态。

图 5 表示不同加速时间位移和速度曲线，实线为加速时间 6s 速度和位移曲线，绘制曲线，导出数值与实

验数据进行拟合对比。

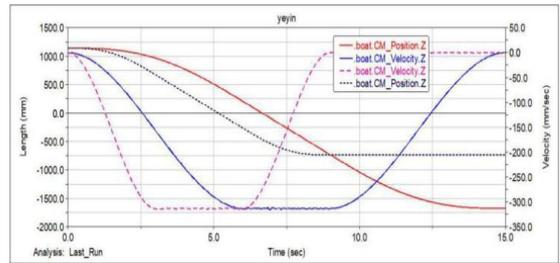


图 5 0.313m/s 速度下两个加速时间位移、速度曲线图

3 加速性能测试

根据实际通航隧洞环境以及通航建筑物之间连接渠道和渡槽等特殊限制性航道特征，船舶在长距离封闭水域条件下运行时，航速应低于 2m/s，结合相应船舶宽度、吃水与航道尺度关联性模型^[4]，对长距离通航隧洞牵引系统进行实验分析。设置实验条件为 0.8m 航宽，0.25m 水深，0.335m/s,0.313m/s, 0.219m/s 三种速度横向偏移量，探究船舶在运动中受到冲击力时系统稳定性。通过等比例缩小船舶与牵引系统，按照相似准则^[5]构建与实际相符合船体结构、隧洞通航环境与牵引系统。测试对象是牵引船模，通过对船模数据采集反映牵引系统各种性能。



图 6 船舶牵引系统实验装置

以 0.7 米航宽、0.25m 水深、最终速度 0.313m/s、加速实时间 9s 为例，对实验过程中运行方向绘制位移时间图，并对加速段进行多项式拟合和线性拟合，拟合图如 8，拟合报表如表 2。

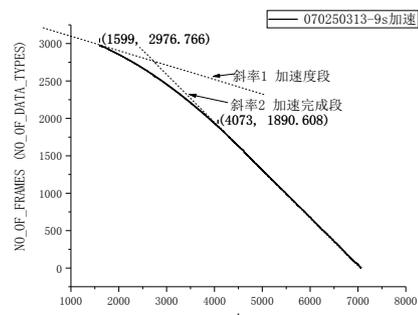


图 7 船模 0.313m/s 速度 9s 加速位移时间曲线

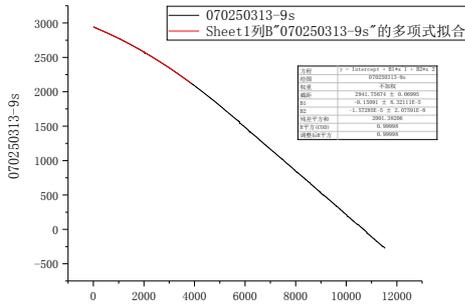


图8 加速段拟合图

表2 船模 0.313m/s 速度 9s 加速时间加速段多项式拟合报表

	截距		B1		B2		统计
	值	标准误差	绝对值	标准误差	绝对值	标准误差	
070250313 -9s	2941.75674	0.06995	0.15091	8.32111E-5	1.57285E-2	2.07591E-8	0.99998

同样运行条件下，对仿真过程中运行方向绘制位移时间图，并将后处理数据导出绘制拟合图，对加速段进行多项式拟合和线性拟合，拟合图如图 10，拟合报表如表 3。

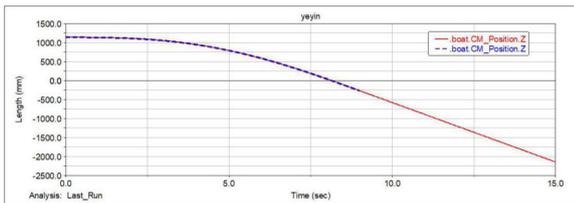


图9 船模质心位置 0.313m/s 速度 9s 加速时间位移时间曲线

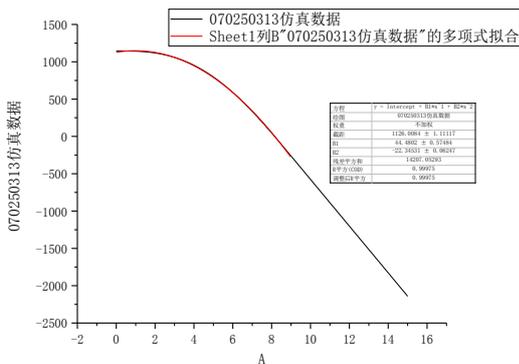


图10 仿真数据加速段拟合图

表3 仿真 0.313m/s 速度 9s 加速时间加速段多项式拟合报表

	截距		B1		B2		统计
	值	标准误差	绝对值	标准误差	绝对值	标准误差	
070250313 仿真数据	1126.0084	1.11117	0.4448	0.57484	1.7285E-2	0.06247	0.99975

由拟合报表 2 和表 3 可知，虽然记录起点由于设备和仿真设定不同不具有参考价值，但斜率值基本一致，即设定速度 0.313m/s 时实验过程中速度为 -0.31484m/s ，误差为 0.588%；仿真速度为 -0.313164m/s ，误差为 0.052%。

由拟合报表对加速度段做二次项拟合，B2 值 *2

为加速度值，理论设定值为 $-3.4778\text{E}-2\text{m/s}^2$ ，实验值为 $-3.1457\text{E}-2\text{m/s}^2$ ，误差为 9.55%；仿真值为 $-3.457\text{E}-2\text{m/s}^2$ ，误差为 0.598%。

除实验数据中加速过程加速度误差较大外，其他数据基本与设计一致，主要为加速段起始位置有初速度造成，即由于监测距离限制，数据拟合过程中无法得到完整方程。

加速与恒速性能测试中，通过拟合方程对仿真数据和实验数据进行对比，在统计学中对变量进行线性回归分析，采用最小二乘法进行参数估计时，R 平方为回归平方和与总离差平方和比值。R 平方介于 0 到 1 之间，越接近 1 回归拟合效果越好，一般认为超过 0.8 模型拟合优度就比较高。本文在仿真模型和数据值方面 R 平方值均为 0.9 以上，拟合效果很好时，比对位移时间曲线斜率，误差 1% 之内。

4 结论

加速性能测试印证得，可通过根据改变伺服电机脉冲频率来有效控制牵引车和被牵引船模速度和加速度，实现船模位置精确定位。通过拟合方程对仿真数据和实验数据进行对比，表明轮轨机构运行较稳定，不易发生空转，电机控制较佳，验证出牵引系统具有较好加速与恒速性能。

参考文献：

- [1] 国防科学技术工业委员会. 干船坞设计规范: CB/T 8524—2011. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [2] 齐俊麟. 机械牵引协助船舶进出船闸技术论证 [J]. 航海工程. 2017, 46(04): 215—219.
- [3] 杨素亭. 轮轨式铁路列车运动形态分析 [J]. 铁道警官高等专科学校学报. 2010, 20(06): 52—55.
- [4] 孙精石. 从《内河通航标准》看某些特殊限制性航道宽度确定 [J]. 水道港口, 2006 (05): 300—305.
- [5] 温过路. 大型船舶系缆力影响因素试验研究 [D]. 大连理工大学, 2006.
- [6] 周浩. 线性数据拟合方法误差分析及其改进应用 [J]. 大学数学, 2013, 29(01): 70—76.