

基于高精度测试与改进视觉检测的 司控器自动化诊断系统

岳 刚¹, 杨海军¹, 刘 真¹, 吕 昕², 郭 浩², 王 凯²

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司 技术工程部, 山东 青岛 266111;

2. 青岛大学威海创新研究院 电气工程学院, 山东 青岛 266071)

摘要: 司控器作为轨道交通系统中的关键电气控制装置, 主要负责牵引与制动控制, 确保列车在运行过程中的安全性与稳定性; 随着轨道交通的发展, 对其检修的需求也愈加迫切; 传统的司控器检修效率低下, 而且存在精度不足、检修周期长、数据记录不完整等问题, 由此引发了对基于高精度电气测试与视觉检测的一体化诊断系统的研究; 采用视觉测距技术与电气性能测试技术相结合的方法, 实现了司控器各项参数的自动化检测; 通过引入自学习算法优化诊断模型, 提升了故障预判准确性; 经实验测试, 该系统显著提高了检测效率和精准度, 减少了人工干预; 实际应用表明, 该系统能够满足轨道交通司控器智能化检修的需求。

关键词: 司控器检修; 电气测试; 视觉检测; 自动化检测; 自学习诊断

Automatic Diagnosis System of a Controller Based on High Precision Test and Improved Visual Inspection

YUE Gang¹, YANG Haijun¹, LIU Zhen¹, LÜ Xin², GUO Hao², WANG Kai²

(1. Department of Technical Engineering, Qingdao Sifang Co., Ltd., CRRC, Qingdao 266111, China;

2. School of Electrical Engineering, Weihai Innovation Research Institute, Qingdao University,
Qingdao 266071, China)

Abstract: A train control unit (TCU), as a critical electrical control device in rail transit systems, is primarily responsible for traction and braking control to ensure operational safety and stability. With the development of rail transit, it is of increasingly urgency to the efficient maintenance of the TCU. Traditional maintenance methods have the shortages of low efficiency, insufficient accuracy, prolonged inspection cycles, and incomplete data recording. To address these issues, and based on high-precision electrical testing and visual inspection, this paper makes a study of an integrated diagnostic system. By using visual ranging and electrical performance testing technologies, the system achieves the automated detection of TCU parameters. Furthermore, a self-learning algorithm is introduced to optimize the diagnostic model, which improves the accuracy of fault prediction. Experimental results demonstrate that the system significantly enhances detection efficiency and precision while reducing manual intervention. Practical applications confirm that the proposed system meets the requirements for intelligent TCU maintenance in rail transit.

Keywords: controller maintenance; electrical testing; visual inspection; automated detection; self-learning diagnosis

0 引言

司机室控制器（司控器）作为轨道交通车辆的核心控制设备, 主要承担输出牵引和指令制动等功能, 是确

保列车安全运行的关键部件。然而, 当前司控器的检修技术仍存在诸多不足: 首先, 机电数据主要依赖人工操作, 数字化水平较低^[1-2], 导致测试效率低下且易受人为因素影响^[3], 如现有速动开关触点的电压测试中, 主

收稿日期:2025-03-19; 修回日期:2025-05-09。

作者简介:岳 刚(1978-),男,大学本科,高级工程师。

王 凯(1985-),男,博士,教授。

引用格式:岳 刚,杨海军,刘 真,等. 基于高精度测试与改进视觉检测的司控器自动化诊断系统[J]. 计算机测量与控制, 2025,33(9):1-9,19.

要方法还是使用万用表重复多次测量,容易出现漏判、误判;其次,测试点数量多,操作复杂,且过程数据缺乏系统化记录,难以追溯和分析故障原因^[4-5]。因此,如何提高故障识别的效率与精度,已成为司控器检修技术发展的重点研究方向。

在现有研究中,文献[6]的司控器采集模块使用两组并联板件设计,并通过精密的硬件设计与线性回归算法校正达到了0.1%的采集精度,为电压数据的高精度采集提供了技术参考。文献[7]分析了非脉宽调制式(PWM, pulse width modulation)司控器的电压输出异常故障进行了深入分析,但该分析方法仅针对特定类型的异常故障,缺乏普适性。文献[8]提出了使用单片机和组态触摸屏(MCGS, monitor and control generated system)进行实时故障检测,并能够自动分析多达889种故障,然而其适用性可能受限于HXD3型的接口标准,难以推广至其他车型。

针对上述问题,本文研究了一种新型司控器自动测试装置,旨在兼顾机械与电器参数的全面测试,实现故障的精准诊断。该装置通过集成视觉测距、接触电阻自动测试及自学习诊断等技术,不仅提高了测试效率,还增强了数据的可追溯性和分析的准确性。通过优化检修流程与工具,本文的研究为提升司控器运行安全性及检修效率提供了切实可行的解决方案。

1 司控器自动化诊断系统总体设计

由于复杂的检修流程及检修精度低下的问题,本文针对电气检修及机械部件检测的诸多痛点,设计了一种基于高精度电气测试与视觉检测的司控器自动化诊断系统,旨在提高司控器检修的效率、精度和可追溯性,实现对司控器各项性能参数的自动化、智能化检测。新型检测装置工作流程如图1所示。

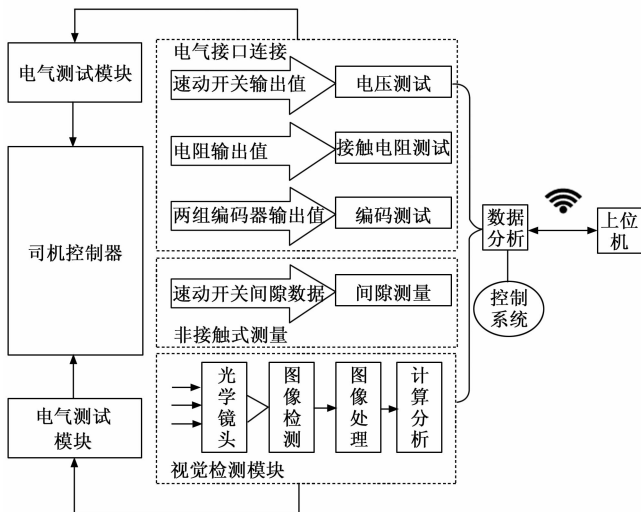


图1 司控器自动测试装置系统图

弹片组件触点接触电阻自动测试方法通过自动化的电桥测试、多通道电扫扫描等技术,实现了触点接触电阻的全自动检测,高精度电气测试后,还可以自动生成测试报告,便于维护人员进行后续分析与处理。

视觉测距方法结合司控器的安装特点,针对滚轮弹片组件的动、静触头间隙进行建模与自动化分析。系统替代传统的人工检测,将这些参数建立关联。待测司控器经过探测成像后,实际测量数据会通过分析模型进行计算与转换,最终得出间隙尺寸。

在大规模的司控器自动化检修过程中,测试数据的积累与分析是提高检修效率的关键。为此,本研究引入了测试结果自学习诊断方法。通过基于不同修程下的司控器弹片间隙与接触电阻测试的大量样本,系统能够建立分析模型,识别不同修程下触点间隙、接触电阻数据的差异,并据此预判滚轮弹片组件触点的潜在故障。其核心优势在于基于历史数据的智能学习,不断增强系统的自适应能力,从而实现更加精准的故障预判。

2 司控器结构与工作原理概述

司控器是轨道交通车辆的核心控制设备,其整体结构可分为机械部分、电气部分与软件接口3大模块,三者协同工作,确保驾驶员的操作指令能够准确、高效地传输至车辆控制系统(TCMS)。

2.1 司控器结构分析

2.1.1 机械结构

司控器的机械结构主要由操作手柄组件、传动机构及防护壳体3部分组成^[9],负责将驾驶员的操作动作准确转化为电信号。

操作手柄通过控制列车牵引、制动及方向切换指令,联锁机构用于防止误操作,传动齿轮组确保动作的平稳传递。滚轮弹片组件作为信号触点的重要机构,其动态位移直接关系到电气状态切换的可靠性。由于机械磨损和松动现象易导致触点间隙异常,本系统结合视觉检测模块对动静触头间距进行实时监测与智能识别,确保结构动作的准确性。

2.1.2 电气系统

司控器的电气系统是实现信号传输与控制的核心部分,主要包括电位器/编码器、微动开关及接线端子等关键组件。

其中,电位器用于检测手柄角度变化,输出模拟电压信号;编码器提供数字位置信息,辅助指令精确定位;微动开关则负责判断手柄各挡位切换状态,是司控器中最关键的开关元件。如图2所示,微动开关通过受力动作实现信号通断,触点状态直接影响司控器指令输出的准确性。本系统通过接触电阻测试模块,对微动开关触点电阻变化进行高精度检测,有效识别触点失效或

异常磨损问题。

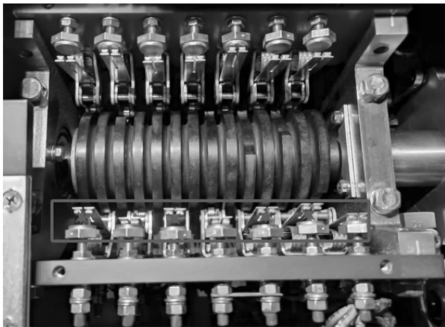


图 2 微动开关示意图

2.1.3 软件系统

司控器的软件接口是其与车辆控制系统 (TCMS) 及其他外部设备进行数据交互的核心部分, 主要包括通信协议和自诊断功能模块。这些接口的设计直接影响到司控器的运行效率、故障诊断能力及系统的可维护性。

通过多功能车辆总线 (MVB) 或控制器局域网 (CAN 总线) 实现与 TCMS 的实时数据通信, 完成列车牵引、制动、方向等操作指令的高效传输。软件系统还集成了基础自诊断模块, 能够持续监测电气连接状态、触点动作一致性及编码器输出异常等常见故障。故障信息通过编码规则快速定位并生成故障代码, 辅助维护人员初步诊断。

2.2 司控器检修内容

司控器的机械、电气及软件系统的协同设计, 直接决定了其检修的复杂性和技术需求。例如, 机械部件的磨损可能引发电气触点接触不良, 而软件接口的通信异常则可能掩盖真实的硬件故障。因此, 检修流程需针对不同模块的特点制定差异化策略。

司控器的检修流程分为预检阶段、分解检修阶段和组装调试阶段, 每个阶段均针对不同的部件和功能进行详细检查与维护, 以确保司控器的正常运行和长期可靠性。

预检阶段是检修流程的第一步, 旨在通过初步检查发现司控器的明显故障或异常, 为后续的分解检修提供依据。其中, 目视检查外壳完整性主要检查外壳是否存在裂纹、变形或其他物理损伤, 及检测外壳固定螺栓是否松动, 确保设备在运行过程中不会因震动导致结构损坏; 其次, 还须对司控器进行通电测试, 验证其指令响应是否正常, 通过录制波形图分析信号延迟, 确保牵引、制动及方向选择等指令能够准确传输至 TCMS。

分解检修阶段是对司控器进行深度维护的关键步骤, 主要分为机械部分和电气部分的检修。

机械部分包含清洁润滑齿轮组与更换磨损弹簧。清洁润滑齿轮组即拆卸齿轮组, 清除表面污垢及更换润滑

脂; 更换磨损弹簧时, 需要检查关键弹簧部件的磨损情况, 更换疲劳断裂或弹性不足的弹簧。按照扭矩参数表 (如表 1) 进行操作。

表 1 扭矩参数表

弹簧类型	扭矩参数/(N·m)
复位弹簧	5~8
定位弹簧	3~5

电气部分包含测量接触电阻及校准电位器线性度。接触电阻应确保其值小于 100 mΩ, 对于异常触点需进行清洁或更换; 校准电位器线性度通过示波器进行对比分析, 确保在不同挡位下的输出信号符合标准。

3 高精度电气测试模块

3.1 接触电阻测试模块

接触电阻测试模块包含接触电阻测试软件、电源系统、低电阻测试模块、单片机控制隔离电路、CAN (controller area network) 总线通讯模块电路^[10]、系统 EMC (electromagnetic compatibility, 电磁兼容性) 保护电路^[11-13]、模拟量数据采集电路、导通绝缘测试电路、转接线等, 拓扑示意图如图 3 所示。

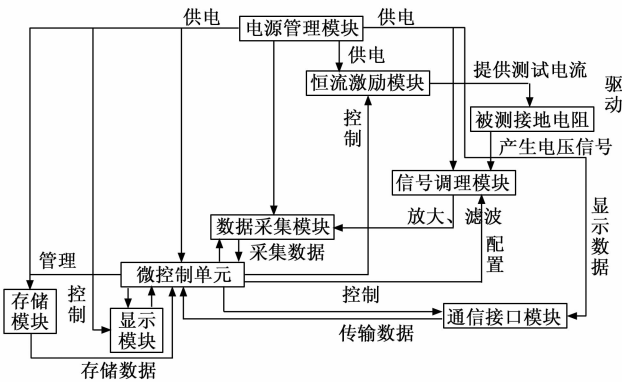


图 3 接触电阻模块拓扑示意图

在高精度电气测试模块中, 接触电阻测试模块的设计与实现是确保司控器电气性能可靠性的关键环节。该模块通过集成先进的低电阻测试技术和单片机控制的光耦隔离电路, 能够精确测量触点的电阻值, 并有效隔离外部干扰, 确保测试结果的准确性。CAN 总线通讯模块的应用进一步提升了系统的实时性和数据传输效率, 使得测试数据能够快速、可靠地传输至主控系统进行分析与处理。此外, 系统 EMC 保护电路的设计有效抑制了电磁干扰, 保障了测试过程的环境适应性。通过这些技术的综合应用, 接触电阻测试模块不仅满足了司控器挡位导通逻辑的测试要求, 还显著提升了测试的自动化水平和可靠性。

接触电阻测试模块根据司控器挡位导通逻辑的测试要求, 能够自动完成触点的通路、短路、断路等链

接关系的阻值测量与结果判定。其测试要求为：通路测试即测量触点闭合状态下的接触电阻，确保其值小于 100 mΩ（符合行业标准）；短路测试即检测触点间是否存在异常短路，避免电气故障；断路测试即验证触点断开状态下的绝缘性能，确保无漏电现象。整体测试流程如图 4 所示。

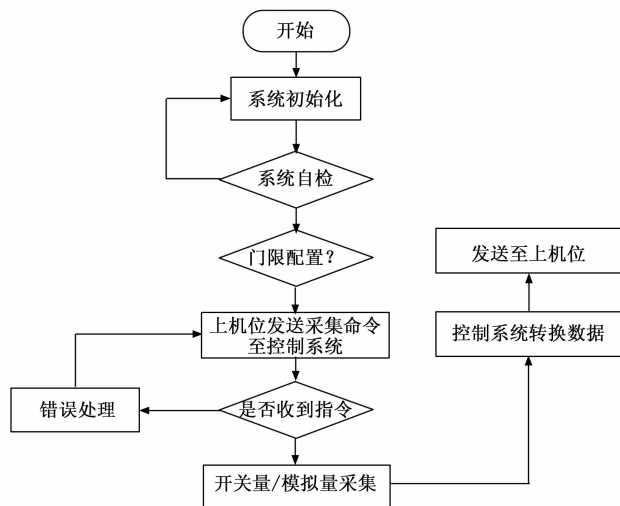


图 4 电气测试模块测试流程

试验装置内部设置控制与通讯模块，主要负责单元电路的信号采集与控制，连接器内部多个采样模块之间使用 CAN 总线协议进行数据通信。CAN 总线通讯模块采用多重抗干扰设计确保信号传输可靠性：首先通过光耦隔离 CAN 收发器和隔离电源模块实现信号与电源的双重电气隔离；其次在总线入口串联共模扼流圈有效抑制 10 MHz 以上高频共模噪声；同时采用 TVS 二极管阵列（响应时间 < 1 ns）抑制浪涌电压；通过可调终端电阻匹配总线阻抗，消除信号反射；最后选用屏蔽双绞线作为传输介质，显著降低电磁干扰。该设计完全满足轨道交通设备的电磁兼容要求。信息采集模块信号通过 CAN 总线发出后，由控制模块进行汇总与处理。

电阻测量采用四线制法，其原理见图 5，其中 R_1 、 R_4 为引线电阻， R_2 、 R_3 为接触电阻，电压表内阻为 R_V ，电压表支路电流为 I_V ，被测电阻为 R_X ，被测电阻支路电流为 I_S ，被测电阻压降为 U_S 。

根据欧姆定律，有：

$$R_X = \frac{U_S}{I_S} \quad (1)$$

根据 KCL 有：

$$I_S = I_1 - I_V \quad (2)$$

根据 KVL 有：

$$U_S = I_V(R_2 + R_V + R_3) = I_S R_X \quad (3)$$

若 $R_2 + R_V + R_3 \gg R_X$ ，则：

$$I_S = I_1 \quad (4)$$

因为 $R_V \gg R_2 + R_3$ ，则：

$$U_S = I_V R_V = I_S R_X = U_V \quad (5)$$

得出：

$$R_X = \frac{U_S}{I_S} = \frac{U_V}{I_1} \quad (6)$$

前述公式表明，利用开尔文四线测量技术时，由于电压表内阻很大，所以可以有效去除分支电路电阻和连线电阻带来的影响，进而大幅优化测量数据的准确性和系统整体的稳定性，每个检测节点都有专属的激发线路和检测线路，它们相互隔绝开来，各自成为单独的闭合回路，要想达成高精度检测，检测线路要接到一个输入阻抗极高的检测回路里，这样就能极大减小流经检测线路的电流，尽量让它为零。

激励线充当电流供应的通道，检测线负责执行电压测量任务，这两条回路在功能上彼此独立^[14]，电流供给回路的两个终端和电压测定回路的两个终端一共构成了 4 个接点，于是这种检测方法便被称作四线检测。

四线制测量法首先能够实现高精度测量，通过消除导线电阻的影响，可实现 1 mΩ ~ 100 kΩ 的阻值精确测量。

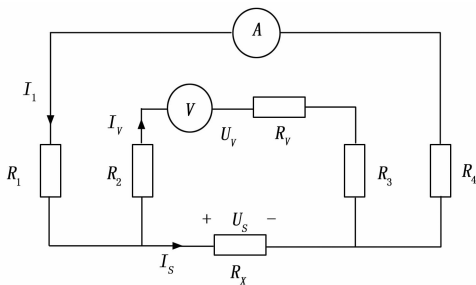


图 5 四线测试原理图

应用数字信号处理（DSP，digital signal processing）控制芯片（AD 芯片 16 bit 隔离芯片），可进行低电阻测试电路的模拟量采集。所有对外通信数据接口全部采用高速光耦隔离电路，确保该系统的抗干扰能力。

对硬件电路提供稳定电流匹配主要依靠高精度电流信号源，整个电路能够实现 1 mΩ ~ 100 kΩ 的阻值精确测量，测量值精度为 1 mΩ，进行测量时，无需切换测试档位，系统自动识别，进行自动测试，并记录阻值。

3.2 编码器输出编码测试

标准动车组一般装有两套对称设置的编码器，就如同图 6 所显示的，它们共同协作，一同产生两路格雷码信号，每个格雷码序列包含九位二进制数码，当该编码器接通 24 伏直流电源之后，凭借操作人员经由司控器手柄所实施的操作改变情况，相关的电路板会获取并分析来自编码器的输出信号。

在常规运作模式当中，列车控制与守护系统（TC-MS）依靠远程输入输出模块（RIOM）来采集列车各

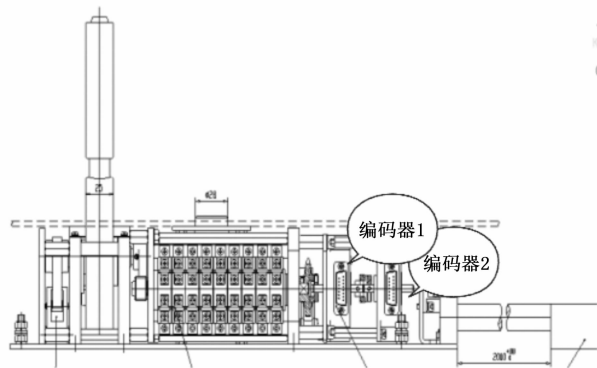


图 6 编码器示意图

种数字信号及模拟信号, 并且承担输出控制信号的任务, 此机制保证了对列车运行状态实施有效观察和精准调节, 来自司机控制室 RIOMA 设备的九个数字量信号, 在被采集之后会发送到主处理单元执行后续处理。因此, 通过装置内的模拟量采集板卡采集手柄原始模拟量信息, 并通过计算与转换, 可得到原始数据转出的格雷码信息, 并由此与编码器采集的数字量进行比较, 从而判定数字编码器的故障状态。具体流程如图 7 所示。

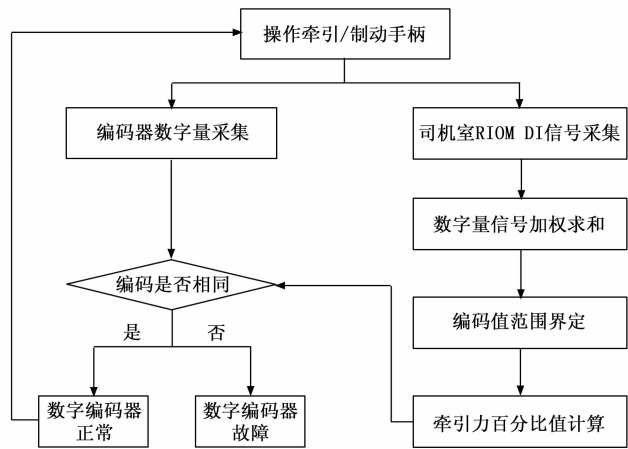


图 7 编码器故障判定流程

4 视觉检测模块

电气性能测试虽能有效诊断触点电阻、编码器输出等电气参数异常, 但司控器的机械状态(如触点间隙)仍需依赖高精度空间测量技术。为此, 在完成电气测试后, 系统通过视觉检测模块进一步量化机械部件的形变与位移, 实现电气—机械参数的联合诊断。

间隙图像测距模块包含光学镜头、探测器、专业成像分析软件等。光学镜头可获取司控器内多个滚轮弹片组件触点间距等^[15]。间隙图像测距模块功能图见图 8。

图 8 所示的间隙测试检测模块具体如下: 图像测距模型软件开放参数调节补偿窗口, 通过对模型参数进行

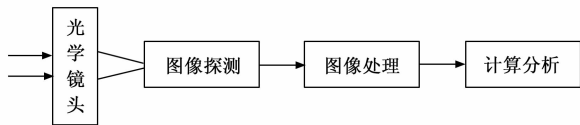


图 8 间隙测试图像测距模块功能图

修改配置, 可提高距离检测准确度。间隙图像测距模块内设置有间隙开关触点间隙标准, 作业过程中发生间隙超差位移故障时, 故障模型进行报警, 报警信息明确表达故障位置及故障现象。

间隙测试的流程如图 9 所示: 通过光学镜头获取司控器内多个滚轮弹片组件触点的图像; 利用探测器和高清图像技术对获取的图像进行区域检测和图像识别, 确保图像质量满足分析要求; 图像识别模块对触点间隙进行精确测量, 并通过专业成像分析软件进行间隙计算; 系统根据计算结果判断触点间隙是否符合标准, 并生成相应的检测报告。这一流程确保了间隙测试的高精度和自动化, 提高了司控器诊断的效率和准确性。

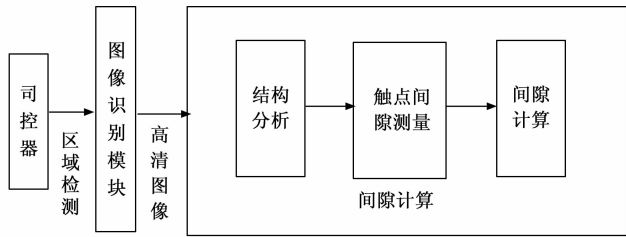


图 9 间隙测试检测流程

4.1 基于图像的间隙测量功能流程

所测的物理量为司控器内部触点在分开状态下, 触点之间或衔铁与铁芯之间的距离。该距离式司控器正常工作的一个重要参数, 它影响着触点之间的通断能力和电气性能。触点分开时, 动静触头间隙 3.5~4.5 mm 为正常范围, 该间隙保持在正常范围内, 可确保司控器能够可靠地进行电气连接与断开。

标定参数的质量对最终测量准确度有着决定性的影响, 就司控器动静触点间距, 也就是触点间距而言, 在其测量环境当中, 本研究采用了一种定制化的校准策略, 此策略依托经典的网格校准技术^[16-17], 精妙地融合了位移控制系统, 从而达成高度精准的校准目的。

把面阵相机精准地放置在位移控制系统上, 然后把它定位到两个触点的交叉点处来做到精准聚焦, 这样就能保证拍摄到高分辨率的照片。之后, 要想保证实验的一致性和准确性, 就要把所有的相关设备牢牢固定住, 用误差小于 1 微米的量块创建起一个标准的矩形空隙, 并当作参考基准, 用来代替实际要检测的空隙来进行校正, 图 10 表现了相机标定的过程和结果。

校准时, 要在物体表面的 X—Y 平面上执行投影,

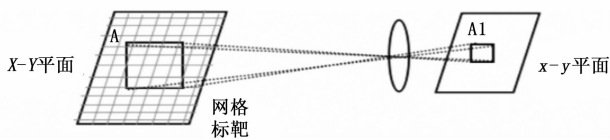


图 10 相机标定

然后在对应的像面上创建网格靶标图以定位特征点, 这些特征点往往选为矩形网格的四个角。接着, 要精确地从这个网格靶标里识别并获取这些特征点当作校准点, 利用这些校准点做亚像素级别的细节分析, 这样才能准确得到矩阵在像面上的矩形像素尺寸 L 和 w (单位为毫米), 这个过程不但保证了图像分辨率的高精度, 而且可以正确算出所需的标定参数用作间隙测量的精准化。

4.2 图像去噪与边缘检测

要从得到的图像信号里获取更鲜明, 更精准边缘特征, 进而符合图像检测需求, 就必要采用一些有效技术手段去改善图像质量和细节显示效果, 于是, 本研究利用小波变换当作去噪方法来做数据预处理^[16], 把存在噪声的信号表示成 $f(a)$, 先对它执行小波变换, 这样就能得到小波系数 W_b , 接着, 经由执行门限阈值操作, 把幅度比较小的小波系数设置成零, 对于那些幅度很大的小波系数, 则采用收缩策略, 以此创建出新的小波系数集合, 可以把它记作 m_b , W_b 。具体变换为公式 (7):

$$m_b = \begin{cases} x - y, & x \geq y \\ 0, & |x| < t \\ x + y, & x \leq y \end{cases} \quad (7)$$

本研究所采集的司控器触点图像呈现边缘过渡区域灰度梯度明显、整体亮度均匀、局部会因反光或暗角产生细碎高频噪声等特点。因此, 在小波基选择中需兼顾边缘特征保持与高频噪声抑制能力。

表 2 展示不同小波基在 MSE (均方误差)、PSNR (峰值信噪比) 和边缘保留性能上的对比。

表 2 不同小波基的性能对比

小波基	MSE	PSNR/dB	边缘保留
Haar	4.82	31.2	差
db2	3.95	32.5	中等
db4	2.88	33.7	最优
sym4	2.91	33.5	次优

经试验对比发现, Daubechies 小波 (db4) 在视觉保边性与误差控制之间取得最优平衡。

小波系数采用软阈值函数处理, 通过该处理可提高信噪比并保留关键边缘信息。

将处理后的小波系数做逆变换, 将信号重构。使用

小波变换进行图像去噪能够有效地保护图像的边缘细节, 便于后期测量^[15]。

将图像去噪后, 为了使图片更加清晰, 能够凸显出原本并不明显的特征, 针对图像进行图像增强处理。本方法中使用线性灰度变换的方式^[18-19], 解决成像时的欠曝与过曝问题。假定原始图像 $f(x, y)$ 的灰度范围为 $[a, b]$, 希望通过变换后的图像 $g(x, y)$ 的灰度范围扩展到 $[c, d]$, 则灰度变换过程表现为公式 (8):

$$g(x, y) = \begin{cases} c & 0 \leq f(x, y) < a \\ \frac{d-c}{b-a} \cdot f(x, y) & a \leq f(x, y) < b \\ d & b \leq f(x, y) < m_f \end{cases} \quad (8)$$

为了有效提取待检测的边缘信息, 使用改进的形态学算子边缘检测方法, 设 $f(x, y)$ 为图像函数, $s(x, y)$ 为子图像函数, m_f 与 m_g 分别是函数 $f(x, y)$ 与 $s(x, y)$ 的定义域, 将图像形态学算子膨胀、腐蚀、开操作与闭操作分别表示为公式 (9~12):

$$[f(+)s](u, w) = \max\{f(u-x, w-y) + s(x, y) | (u-x), (w-y) \in mp; (x, y) \in ms\} \quad (9)$$

$$(f\theta s)(u, w) = \min\{f(u+x, w+y) - s(x, y) | (u+x), (w+y) \in mp; (x, y) \in mg\} \quad (10)$$

$$f \circ s = (f\theta s)(+)s \quad (11)$$

$$f \cdot s = [f(+)s]\theta s \quad (12)$$

则梯度算子可以表示为公式 (13):

$$g = [f(+)s] - (f\theta s) \quad (13)$$

针对本方法中目标的边缘识别特点, 为了得到更精细的边缘细节, 将上述方法进行组合表示为公式 (14):

$$l(x, y) = q | [(f\theta s)(+)s - (f \cdot s)\theta s] - [f(+)s - f \cdot s] | + tg \quad (14)$$

式中, q, t 为常系数, $q+t=1$, 通过设置 q, t 的不同组合选取最佳的边缘检测算子。若图像边界模糊或噪声大, 适当增大 t ; 若需增强细节表现, 则提高 q 。

实验调参如下:

$q = 0.8, t = 0.2$ 时, 边缘细节清晰但误检多; $q = 0.5, t = 0.5$ 时, 主边缘良好, 适中处理;

$q = 0.3, t = 0.7$ 时主边缘突出, 最适用于本研究图像。

最终选取 $q = 0.3, t = 0.7$, 能够更好抑制触点图像中轻微灰度波动带来的伪边缘, 提取清晰的真实边界。

检测后的边缘图像, 存在许多“毛刺”, 所以会导致在实际的间隙测量过程中出现误差。为了避免误差现象, 将提取的边缘图像中的边缘细节, 使用 Hough 直线变换转换为标准的平行直线。利用图像空间中直线的点映射为参数空间里相交的直线, 直线坐标系 $\rho =$

$x\cos\alpha + y\sin\alpha$ 作为参数空间。使用霍夫变换拟合直线可得结果图 11 所示。

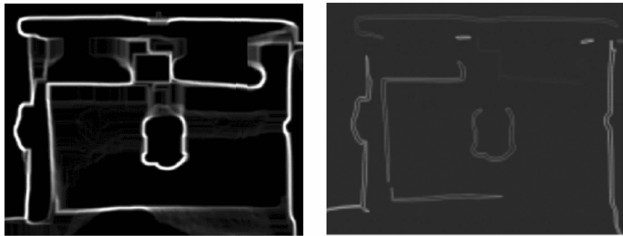


图 11 修正前后对比图

左图为经过改进形态学边缘检测后的图像, 右图为经过霍夫直线变换修正后的图像, 本系统使用变换后的内边缘作为测量间隙的标准。

4.3 间隙值计算

基于最小二乘法, 对间隙区域的上下边界进行直线拟合^[20], 得到上边缘轮廓和下边缘轮廓的数学表达式 (15) 为:

$$\begin{cases} f(x,y) = kx + a \\ g(x,y) = lx + b \end{cases} \tag{15}$$

最小二乘目标函数为 (16):

$$\min \sum (y_i - kx_i - a)^2 \tag{16}$$

解析解:

$$k = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \tag{17}$$

$$a = \frac{\sum y_i - k \sum x_i}{n} \tag{18}$$

当两条边界近似平行 ($|k-l| < 0.05$) 时, 可用平均斜率计算间隙, 由于上边缘与下边缘可近似为斜率相同的平行线, 因此, 可令 $k \approx 1 = c$, 所以间隙为两条直线间的距离与标定参数 C 的乘积, 间隙距离 (以像素为单位精确到 0.1 mm):

$$d = \frac{1}{L} \left(\frac{1}{L} + \frac{w}{W} \right) \frac{|a-b|}{\sqrt{1+c^2}} \tag{19}$$

由于霍夫变换检测出的直线使用极坐标系表示, 因此将上式 (19) 转换回笛卡尔坐标系求间隙为公式 (20):

$$d = \frac{1}{L} \left(\frac{1}{L} + \frac{w}{W} \right) \cdot \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\sqrt{\cos^2\theta + \sin^2\theta}} \tag{20}$$

以图 12 为例, 根据待测边缘的特征提取出待测边缘的两条拟合直线。

选取 30 组司控器间隙样本, 分别使用传统人工测量工具 (如游标卡尺) 和所提视觉检测系统进行测量, 记录测量时间和结果精度等数据具体的多次测试结果表 3 所示。

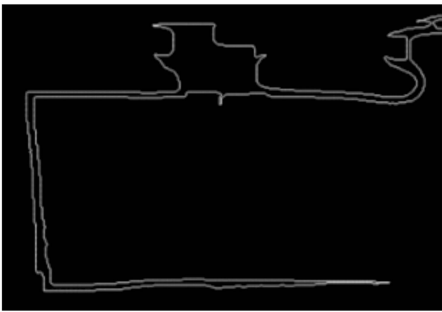


图 12 经过特征提取的动静触点边界

表 3 间隙样本测距对比记录

样本编号	真实间隙/mm	游标误差/mm	测量用时/s	视觉误差/mm	测量用时/s
1	4	0.15	61	0.02	8
2	3.8	0.12	59	-0.01	7
3	4.1	-0.15	62	-0.02	9
4	3.7	-0.15	58	-0.01	7
5	4.2	-0.15	65	-0.02	8
6	3.9	0.12	57	0.01	7
7	4.3	0.18	67	-0.01	9
8	3.6	-0.17	61	-0.01	7
9	4.15	0.13	60	0.01	8
10	3.85	0.13	58	0.01	7
11	3.95	-0.14	62	0.01	8
12	4.05	0.15	64	-0.01	8
13	3.75	-0.14	59	0.01	7
14	4.25	0.16	66	-0.01	8
15	3.65	-0.16	58	0.01	7
16	3.95	0.15	61	0.01	7
17	4.05	-0.15	60	0	8
18	3.8	-0.12	59	0	7
19	4	0.16	63	0	8
20	3.85	-0.15	60	0	7
21	4.2	0.16	64	-0.01	8
22	3.75	-0.15	58	0	7
23	4.1	0.16	63	0.01	8
24	3.7	-0.14	59	0	7
25	4	-0.15	61	0.01	8
26	4.3	0.15	65	-0.01	9
27	3.85	-0.12	58	0	7
28	4.05	0.14	62	-0.01	8
29	3.9	-0.14	59	0	7
30	4.2	-0.14	61	0.01	8

根据表 3 的对比记录, 计算评价指标如表 4 所示。

表 4 间隙测距评价指标对比

指标	游标卡尺人工	自动化视觉检测
平均测量误差 (绝对值)	0.145 mm	0.008 mm
最大测量误差 (绝对值)	0.18 mm	0.02 mm
平均测量时间	61 秒	7.8 秒
测量一致性 (标准差)	0.015	0.003

实验数据表明，基于视觉检测的自动化测距方法在精度、效率和一致性上均显著优于传统人工测量。具体而言，自动化系统的平均测量误差（0.008 mm）仅为游标卡尺测量（0.145 mm）的 5.5%，最大误差降低 88.9%，且标准差从 0.015 优化至 0.003，体现出更高的稳定性和可重复性。在效率方面，自动化检测单次耗时仅 7.8 秒，较人工测量的 61 秒提升 87.2%，尤其适用于批量检测场景。尽管对硬件成本和环境适应性有一定要求，但其亚毫米级精度和快速响应能力完全满足司控器检修的严苛标准（±0.1 mm），为智能化检修提供了可靠的技术支撑。未来可通过动态曝光调整和多传感器融合进一步提升复杂工况下的鲁棒性。

5 实验结果与分析

通过电气测试与视觉检测的集成，系统可覆盖司控器的主要故障类型。为验证该方法的有效性，需结合实际故障场景对系统性能进行定量评估。本节将基于典型故障案例，对比自动化测试与传统人工检修的效率与精度差异，并分析关键参数（如接触电阻、间隙误差）的实测数据。

5.1 故障类型与实验方法

表 5 概述了司控器常见故障类型^[17]、本系统中对应的自动化应对方式、以及检查这些故障时使用的测试方法，以便系统能够高效、准确地进行故障检测和判定。

表 5 故障类型与处理方法

故障类型	实验类型
接触电阻异常	接触电阻测试(电桥测试法、多通道电平扫描)
触点间隙异常	间隙测量实验(视觉检测与图像分析)
编码器输出异常	编码器输出测试(自动化测试)
电气连接不良或断路	导通测试(四线制电阻测量)
电气短路或开路	绝缘试验(绝缘电阻测试)
弹片组件磨损或疲劳	弹片组件检测实验(视觉检测与电阻测试)
机械部件松动或损坏	机械部件检查实验(视觉检测与机械力学实验)
温度异常	温度测试(设备温度监测)

5.2 判别系统的在线应用与精度分析

司控器自动测试技术关键技术见表 6。

架设高精度电阻测试仪，通过 RS485/RS422 进行实时通讯，针对司控器档位中点位进行电阻判定，根据预设值 0—∞（可设置），进行判定导通电阻是否合格，预设值 50—∞（可设置），则进行判定绝缘电阻是否合格，并将数据反馈至上位机软件，本档位中电阻测量全部合格，该档位即算合格档位，否则即算不合格档位。系统工作中判定记录为图 13，存在 2 个不合格点位，此时本档位判定为不合格。

表 6 司控器技术参数表

序号	项目	参数/规格
1	输入电压	AC220×(1±10%)V,50×(1±2%)Hz 或锂电池,在不外接电源的情况下,电池可连续工作不得少于 4 小时。电池充满电时间小于 2 小时。
2	测试点	不少于 160 点(电阻、电压测试)
3	导通接触电阻	电阻测量范围:0~200 Ω(分段式测量),±0.01Ω
4	电压测试	电压测量范围:DC 0~36 V,±0.5%(最大值)
5	图像尺寸自动测量精度	±0.1 mm
6	光学成像分辨率	2 560 * 1 440
7	光学成像工作距离	0~0.5 m

方向	档位	起始针	终端针	电阻标准值	电阻实测值	状态
制动控制	2档	2	19	<∞,∞>	电阻开路	合格
制动控制	2档	2	18	<∞,∞>	电阻开路	合格
制动控制	2档	2	17	<∞,∞>	电阻开路	合格
制动控制	2档	2	16	<∞,∞>	电阻开路	合格
制动控制	2档	2	15	<∞,∞>	电阻开路	合格
制动控制	2档	2	14	<0,5>	电阻开路	不合格
制动控制	2档	1	23	<0,5>	电阻开路	不合格

图 13 在线导通电阻对比图

高精度绝缘耐压测试仪同样通过 RS485/RS422 进行实时通讯，针对司控器档位中点位进行对地耐压判定，并将数据反馈至上位机软件，耐压仪可直接反馈泄露电流及对地耐压是否合格，系统工作中耐压判定记录为图 14，系统将自动进行记录不合格司控器。

耐压类型	温度	湿度	电压值	耐压时长	泄露电流值	状态
对地耐压			1150V	60s	0.810mA	不合格
对地耐压			960V	45s	0.091mA	合格
对地耐压	15.0℃	39.8rh%	1250V	60s	0.044mA	合格

图 14 在线对地耐压对比图

架设高精度视觉相机，通过模型算法服务针对司控器档位间隙进行判定，间隙测量实物图见图 15，根据预设值 1 mm（可设置），判定间隙距离是否合格，与导通电阻类似，若全部合格，该档位即算合格档位，否则即算 NG（不合格档位），并可从记录中查找。



图 15 间隙测量实物图

5.3 判别系统适用性验证

为提升模型的泛化与自适应能力, 本系统构建了基于梯度提升树 (GBDT) 的自学习故障识别模型。模型以检测特征数据为输入, 通过多轮迭代训练实现参数自更新。

训练过程如下:

- 1) 以 200 组标注样本训练基础模型;
- 2) 系统在线运行采集样本, 追加 50 组用于迭代;
- 3) 每轮迭代重新调整样本权重, 更新树结构。

模型迭代精度如下:

- 初始准确率: 87.3%;
- 第 1 轮提升至: 89.8%;
- 第 3 轮提升至: 91.2%;
- 第 5 轮提升至: 93.6%。

选取 10 组具有代表性的司控器样本 (S1~S10), 覆盖多种型号、使用年限和运行工况, 具体介绍如表 7, 以验证自动化诊断系统的适用性。

表 7 适用性判定司控器具体工况

	型号	使用年限	运行里程(104 km)	使用工况	备注
1	HXD3	6	120	高负荷、南方潮湿环境	曾经历过 3 次大修
2	CRH2A	8	180	高速线路运行	部分接触器老化
3	HXD1D	4	90	普通客运	维护周期正常
4	CRH380BL	7	160	高速、气候干燥	轻微磨损
5	DF11G	10	210	普通干线, 载重大	触点磨损严重
6	CR400AF	2	30	新型复兴号, 稳定运行	几乎无异常
7	HXD2B	5	110	山区线路, 气候复杂	潮湿导致部分锈蚀
8	CRH3C	9	190	北方寒冷地区	冬季运行导致材料脆化
9	DF4D	12	250	老旧货运线路	故障率较高
10	CRH6F	3	45	城际轻载交通	状态良好

评价采用严格的判定标准: 接触电阻合格阈值为测量值小于 100 mΩ, 间隙合格范围为触点分开时动静触头间隙 3.5~4.5 mm。综合判定采用“一票否决”原则, 即任一项参数超出合格范围即判定整体不合格。该标准基于行业规范制定, 其中接触电阻阈值确保电气连接可靠性, 间隙范围保障机械动作准确性, 双重标准协同作用可全面评估司控器的工作状态, 评估结果为表 8 所示。

实验数据显示, 该判定体系能有效识别潜在故障 (如 2、4 等样本), 且与人工复检结果保持 100% 一致性, 验证了标准设置的合理性与诊断系统的准确性。

表 8 司控器工况综合评价

样本编号	接触电阻	间隙测量	接触电阻判定	间隙判定	综合判定
1	85	4.2	合格	合格	合格
2	110	3.9	不合格	合格	不合格
3	78	4.4	合格	合格	合格
4	92	3.2	合格	不合格	不合格
5	140	5.1	不合格	不合格	不合格
6	45	4.1	合格	合格	合格
7	98	4.7	合格	不合格	不合格
8	88	3.6	合格	合格	合格
9	125	4	不合格	合格	不合格
10	53	3.8	合格	合格	合格

6 结束语

本研究成功建立了一种司控器自动测试方法, 该方法能够实现对一体式司控器和分体式司控器的全面检修测量。通过该系统, 传统的人工测试和记录过程得以替代, 自动化测试和判定功能不仅提高了检修效率, 还大幅度提升了测试精度和可追溯性。

随着自动化技术和智能诊断算法的不断发展, 该自动测试系统有望在更多轨道交通设备的检修领域得到广泛应用, 进一步提高设备维护的效率与质量。未来的研究可进一步优化系统的智能诊断功能, 结合人工智能与大数据分析, 提升故障预判和维修决策的精确度。此外, 随着新型测试技术的不断涌现, 系统的可扩展性和适应性也将是未来发展的重点, 使其能够更好地适应复杂和多变的检修任务, 推动轨道交通行业向更加高效、智能、精准的方向发展。

参考文献:

[1] 李 宏, 谭南林, 苏树强, 等. 下一代地铁列车数字式司机控制器设计 [J]. 电子测量技术, 2021, 44 (15): 167 - 171.

[2] 周宝玲, 柳贵东. 和谐大功率交流机车司控器自动检定装置的研究 [J]. 电子世界, 2019 (7): 137 - 139.

[3] 黄浩东, 陈毓慧. 广州地铁 14 号线司控器问题分析及改进措施 [J]. 机电信息, 2022 (1): 44 - 46.

[4] 杨 海, 陈 静, 侯天英, 等. S702D 型司控器增加自检功能探索 [J]. 铁道技术监督, 2020, 48 (5): 27 - 30.

[5] 张邦成, 步倩影, 周志杰, 等. 基于置信规则库专家系统的司控器开关量健康状态评估 [J]. 控制与决策, 2019, 34 (4): 805 - 810.

[6] 许晓东, 彭冬良, 许晋荣, 等. 轨道交通车辆司控器模拟量高精度采集模块的设计 [J]. 技术与市场, 2021, 28 (5): 17 - 19.

(下转第 19 页)