

同濟大學

課程設計報告

課程名稱： 軌道交通運行控制與管理課程設計

專業： 交通工程

班級： 智能交通系統工程方向

姓名： 胡家晗

學號： 2152981

指導老師： 沈拓

同濟大學交通學院

目录

一、课程设计及目标	2
1 课程学习内容	2
2 课程学习目标	2
二、设计成果介绍	2
1 核心构建思路	2
2 仿真系统	3
3 评价系统	4
4 通信系统	5
三、评价指标选取（负责部分）	6
1 超调量	6
2 舒适度	6
3 准点率	7
4 停车误差	7
四、实时评价系统构建过程（负责部分）	8
1 驾驶评价界面构建	8
2 在线评鉴系统构建	9
五、仿真软件仿真效果评价及展望	11
1 仿真效果评价	11
2 系统局限与改进方向	11
3 展望	12
参考文献	12

一、课程设计及目标

1 课程设计内容

课程设计的内容主要包含四部分：人工控制系统、自动控制系统、列车运行评价系统、通信系统。

在开发列车驾驶仿真系统时，我们模拟人工驾驶和自动驾驶功能，实现对列车速度、加速度、位置等参数的实时计算与显示。构建的驾驶评价系统通过接收仿真系统的数据进行实时评价，同时支持离线分析仿真运行日志。仿真系统能模拟多种运行状态，包括正常运行、停站、ATP（自动列车防护）紧急制动等。评价系统需要实现对列车运行过程中的关键指标分析，我们在构建系统时选取了超调量、舒适度、准点率和停车误差作为评价指标。

下面的报告中会概略介绍各个系统的设计思路和实现的功能，我个人负责的驾驶评价系统界面和在线评价实现会在后文单独进行详细报告。

2 课程设计目标

本课程设计以列车驾驶仿真和驾驶评价为核心，通过构建综合性平台，模拟列车运行状态并对驾驶行为进行评估。轨道交通仿真控制及可视化程序设计通过对列车仿真控制、列车响应仿真、列车运行可视化的程序设置，实现对现有列车控制系统的简单化构建。列车的自动驾驶系统可以帮助我们进一步了解ATO自动驾驶控制结构，了解ATO自动控制机理。

二、设计成果介绍

1 核心构建思路

仿真系统和评价系统的开发在实现基础功能的基础上考虑了通信功能的实现，

最终在以 Python 程序语言完成了各个功能的程序编写，实现了程序的模块化和一定的拓展性。仿真系统的构建基于列车动力学模型，通过离散时间步长实现列车运行参数的迭代更新；评价系统则基于 PyQt5 框架实现图形用户界面，并利用 TCP 通信模块实现与仿真系统的数据交互。两者的集成使得用户可以在一个平台上完成从驾驶模拟到行为评估的全过程操作。

设计过程中我们注重功能实现和用户体验的平衡，例如通过颜色和文字提示增强界面的交互性，通过优化算法提高系统运行效率等。整个系统的设计不仅实现了列车驾驶和评价的基本功能，也为进一步研究和优化提供了良好的基础。

2 仿真系统

列车驾驶仿真系统是本次设计的核心模块之一，其功能涵盖了人工驾驶和自动驾驶两种模式。在人工驾驶模式下，用户可以通过键盘操作直接调整列车的运行状态，包括牵引、惰行和制动等，同时实时查看速度、位置、加速度等参数的变化。系统还集成了基本的 ATP 超速保护功能，当列车速度超过顶棚速度曲线时，系统将强制进入紧急制动状态并暂停驾驶员操作。

自动驾驶模式是基于 PID 控制器实现的，它能够根据目标速度曲线动态调整列车加速度，确保运行轨迹尽可能贴合目标速度曲线。此外，系统还针对停站场景开发了精准停车处理模块，确保列车在设定位置范围内平稳停车。仿真系统的运行过程实时生成日志文件，记录列车速度、位置、运行状态等关键数据，为后续的离线分析提供支持。完整的仿真界面如图 2.1 所示。

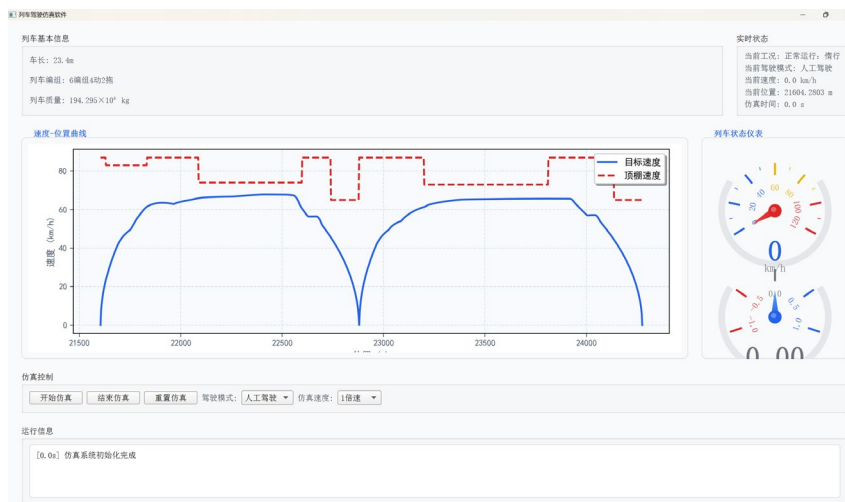


图 2.1 仿真界面

该界面的按钮和图表功能如表 2.1 所示。

表 2.1 仿真界面按钮和图表功能一览表

按钮/图表名	功能	可选值
开始/结束仿真	开始或中断仿真	
重置仿真	将仿真状态重置为起始状态	
驾驶模式	选择仿真的驾驶模式	人工/自动
仿真速度	仿真运行的速率	1/2/5/10
列车状态仪表（上）	显示列车的车速	
列车状态仪表（下）	显示列车的加速度	
Q	切换为牵引工况	
E	切换为制动工况	
O	增大加速度	
P	减小加速度	

3 评价系统

驾驶评价系统通过 TCP 通信接收仿真数据，分为实时评价和离线评价两个模块。在实时评价模块中，系统每秒更新一次仿真数据，并计算超调量、舒适度、与目标速度偏差等指标，动态显示在界面中。评价界面还设计了交互反馈功能，例如当列车速度超标或触发 ATP 时，系统会生成相应的提示信息，帮助驾驶员调整操作。

离线评价模块则主要面向仿真运行日志文件的分析。用户可以上传仿真日志文件，系统会根据记录的数据计算准点率、停车误差、运行平稳性等指标，并生成评价报告。离线评价报告以文本形式呈现，用户可以直接保存文件，以便进一步分析。通过离线评价，用户可以全面了解列车在不同运行场景下的表现，为优化驾驶策略提供参考。完整的评价界面如图 2.2 所示。



图 2.2 评价界面

该界面的按钮功能如表 2.2 所示。

表 2.2 评价界面按钮功能一览表

按钮	功能
重置实时评价界面	将实时评价重置为原始值
选择 CSV 文件	为离线评价上传列车运行状态文件
保存离线评价结果	将离线评价存储为.txt 文件
清空离线评价结果	清除已有的离线评价结果

4 通信系统

通信系统是仿真系统和评价系统的桥梁，确保两者之间的数据实时传输与交互。系统采用 TCP 通信协议，基于 PyQt5 提供的 QTcpServer 和 QTcpSocket 模块实现。仿真系统作为客户端，每隔一定时间发送 JSON 格式的运行数据，包括列车时间、位置、速度、加速度等；评价系统作为服务器，监听指定端口并接收数据，解析后更新实时评价界面。

通信系统还对数据的完整性和错误容忍性进行了优化。例如，评价系统在接收到数据后会立即进行数据完整性检查，如果发现数据丢失或格式错误，将记录日志并跳过该次更新，避免对界面造成干扰。通过定时器触发的数据更新机制，系统能

够保证即使通信中断，界面显示也能迅速恢复。

此外，通信系统还设计了灵活的状态监控功能。在仿真和评价系统启动时，双方会建立初始连接，评价界面顶部的状态栏会显示连接状态，例如“正在连接”、“通信正常”、“客户端断开”等。这种设计不仅提高了系统的易用性，也便于用户在调试阶段快速定位问题。

通过 TCP 通信的实现，仿真系统生成的动态数据能够实时呈现在评价界面上，用户可以在运行过程中获得直观的驾驶行为反馈。

三、评价指标选取（负责部分）

1 超调量

超调量是控制系统稳定性的一个指标，通常在控制系统设计和分析中会涉及到。在列车运行控制中，超调量可以通过模拟列车的动态响应来计算，具体计算方法会依据列车的具体动力学模型和控制策略而定。

在系统设计中将数据文件中的目标速度作为稳态值，将列车此时的速度作为峰值计算该时刻的超调量，计算公式如下：
$$\text{超调量} = \frac{\text{该时刻速度} - \text{目标速度}}{\text{目标速度}} \times 100\%$$

2 舒适度

舒适度的评估涉及到多个因素，包括温度、振动、噪音等。但由于仿真实验中得到的参数较少，许多计算舒适度的公式无法使用，所以使用加速度作为评价舒适度的指标。

由标准文件可知，对于坐着的人，可接受加速度的阈值约为 1.23 m/s^2 [1]。参照其他有关加速度和舒适度关系的研究，当正弦纵向加速度达到 0.28 m/s^2 时，参与者感觉为‘优秀’，而超过 2.12 m/s^2 时参与者感觉‘可怕’ [2]。基于上述几个加速度标准，对于模拟过程中的舒适度与加速度关系进行如下表 3.1 规定。

表 3.1 舒适度与加速度关系表

加速度	舒适度	舒适度指数
$a \leq 0.28$	极舒适	1

$a > 0.28, a \leq 1.23$	舒适	2
$a > 1.23, a \leq 2.12$	不舒适	3
$a > 2.12$	无法忍受	4

3 准点率

准点率是指列车按照预定时刻出发和到达的准确程度。具体来说，准点列车是指在执行列车运行图过程中，列车到达终到站的时刻与列车运行图计划时刻相比误差不大于规定时间界限的列车。对于普通轨道交通系统，这个时间界限通常是 2 分钟；对于市域快速轨道交通系统，时间界限是 3 分钟^[3]。

对于仿真系统，由于模拟的是单一列车的运行情况，因此将准点率的评价对象改为区间运行时间，将数据文件中的区间运行时间作为标准，评价各个区间列车的运行是否准时。评价的区段名称和目标时间如表 3.2 所示。

表 3.2 准点率评价区间和标准

区间名称	列车位置	目标时间/s
A-B	21604.28-22878.32	98.2
B-C	22879.31-24275.31	228.6

该评价指标应用在离线评价系统中，在线评价完成后的列车运行 csv 文件也可用于离线评价系统。平均准点率的计算公式为：
$$\text{准点率} = \frac{\sum \text{区间准点率}}{\text{区间数}}$$

4 停车误差

停车误差是指列车在停站时的实际停车位置与预定停车位置之间的偏差。这个误差对于确保乘客安全、便捷地上下车以及列车的正点运行至关重要。在城市轨道交通中，停车误差通常要求控制在一定的范围内，以确保列车车门与站台门对齐，方便乘客上下车^[4]。

线路包含三个车站：A 站、B 站、C 站。从目标曲线可以看到列车运行的停靠站为 B 站（22878.32 m），C 站（24275.31 m）。根据列车实际停靠距离和车站位置可以计算出停车误差。停车误差计算公式为：
$$\text{停车误差} = |\text{车站距离} -$$

实际停车距离|。

四、实时评价系统构建过程（负责部分）

1 驾驶评价界面构建

在本项目中，驾驶评价界面的开发主要基于 PyQt5 框架，通过精细的功能设计和交互实现，构建了一套结构清晰、功能全面的图形化评价系统。同时，在线评价系统的实现通过 TCP 网络通信实现仿真数据的实时传输与解析，将仿真系统生成的动态数据无缝集成至评价界面中。以下将详细讲述系统构建的过程与关键技术。

驾驶评价界面的开发以用户体验为核心，通过分区设计明确界面功能区域，使实时评价和离线分析井然有序。界面最上方设置了连接状态区，用于显示 TCP 服务器的状态，例如是否与仿真系统建立连接、客户端是否断开等。当仿真系统连接成功后，该区域会实时更新状态，确保用户能够及时知晓通信情况。界面中间部分是实时评价区，包含多个动态指标的显示。通过 PyQt5 的 QLabel 控件，实时呈现如超调量、舒适度、速度偏差等关键评价指标。例如，超调量的计算基于实际速度与目标速度的差异，通过 `calculate_overshoot` 函数动态更新，并以百分比形式显示在界面上。同时，舒适度的评价以加速度为基础，调用 `calculate_comfort_level` 函数对加速度大小进行分级，从“极舒适”到“无法忍受”逐级显示，并通过层级数字和评价结果直观传递信息。速度偏差既有绝对值的显示，也有相对百分比的显示，帮助驾驶员了解偏离目标速度的程度。这一部分的构建逻辑不仅关注数据准确性，也强调了视觉层次感与用户体验的优化。实时评价的界面如图 4.1 所示。

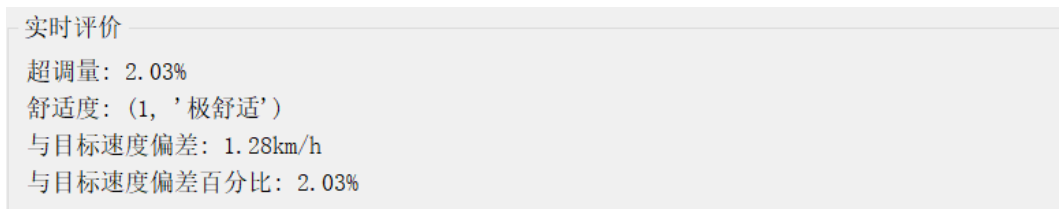


图 4.1 实时评价界面

在驾驶评价界面中，为增强用户的主动交互性，还设计了实时评价的交流反馈区域。例如，当列车触发了 ATP 紧急制动时，系统通过 `ATP_TRIGGERED` 标签向用户发出明确的警告信息，并建议立即处理。同时，根据列车当前速度与目标速度的偏差，系统通过 `encoragement_label` 标签以不同颜色显示操作建议，例如“速度过快，请减速”或“速度过慢，请加速”。这种动态反馈设计基于 PyQt5 的样式表功能，调整字体颜色和大小，使得评价信息更加醒目。整体实时评价界面的构建从

功能实现到视觉优化，为驾驶员提供了一个直观、易用的操作环境。实时评价交流面板的表现如图 4.2 所示。

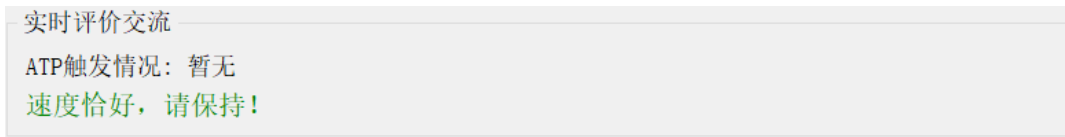


图 4.2 实时评价交流面板

除了显示通信状态、实时评价结果、评价交流反馈外，驾驶评价界面还融合了离线评价，可以选择在界面中上传列车运行数据的 CSV 文件，完成离线评价。完整的列车驾驶评价系统界面如图 4.3 所示。



图 4.3 列车驾驶评价系统界面

2 在线评鉴系统构建

在线评鉴系统的核心是数据的实时接收与处理，它依赖于 PyQt5 提供的网络通信模块 QTcpServer 和 QTcpSocket。在构建过程中，首先在评价系统中启动 TCP 服务器，并监听指定端口。一旦仿真系统的客户端与服务器建立连接，系统会调用 handle_new_connection 方法处理连接事件，并在界面上更新连接状态。随后，通过 handle_client_data 方法接收仿真系统传输的 JSON 数据，并将这些数据解析为 Python 字典。解析后的数据会实时存储到 real_time_data 列表中，作为动态更新评价指标的基础。在实际操作中先运行评价代码 evaluate，启动 TCP 服务器，监听指定端口。之后再运行 main 主程序代码，启动仿真界面，此时评价系统会识别到端口并进行连接，连接的状态会在界面中显示。具体的服务器启动和端口连接代码如图 4.4 所示。

```
def setup_tcp_server(self):
    """ 初始化TCP服务器 """
    self.tcp_server = QTcpServer()
    if not self.tcp_server.listen(port=5000):
        QMessageBox.critical(self, "错误", "无法启动服务器")
        return

    self.tcp_server.newConnection.connect(self.handle_new_connection)
    self.status_label.setText("服务器已启动, 等待连接...")

def handle_new_connection(self):
    """ 处理新的客户端连接 """
    self.client_socket = self.tcp_server.nextPendingConnection()
    self.client_socket.readyRead.connect(self.handle_client_data)
    self.client_socket.disconnected.connect(self.handle_client_disconnect)
    self.status_label.setText("客户端已连接")
```

图 4.4 服务器启动和端口连接代码

数据传输的实时性对在线评鉴系统的稳定运行至关重要，因此在设计中特别关注通信的可靠性和数据完整性。例如，系统会在数据解析失败时记录日志以便调试，同时通过定时器定期触发 `update_realtime_evaluation` 方法，确保评价界面的信息是最新的。

实时评价指标的更新是在线评鉴系统的核心功能。`update_realtime_evaluation` 方法中，首先通过检查数据的完整性确保系统能够正常解析最新的仿真数据，然后逐一计算并更新各个评价指标。每个指标的计算逻辑均通过独立的静态方法实现，例如 `calculate_overshoot` 用于计算超调量，`calculate_comfort_level` 用于评估舒适度。为了增强用户对评价结果的直观感受，每个指标的显示都经过细致设计，例如舒适度通过文字分级呈现，而速度偏差则通过数值和百分比双重方式体现。此外，评价界面还结合列车当前运行状态，例如当列车处于紧急制动状态时，系统会突出显示相关警告信息，提醒驾驶员注意操作。触发 ATP 紧急制动时的评价界面如图 4.5 所示。

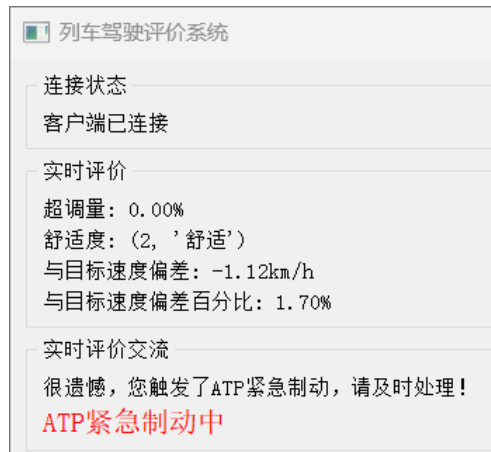


图 4.5 触发 ATP 时的评价界面

在线评鉴系统的构建并非单纯依赖仿真系统提供的数据，还注重对通信异常的容错性设计。例如，当客户端断开连接时，系统会触发 `handle_client_disconnect` 方法重置相关状态，避免出现界面信息滞留或错误显示的情况。同时，为便于系统测试与调试，界面还提供了实时评价的重置功能，通过 `reset_evaluation` 方法一键

清空所有动态评价信息，确保界面能够在新一轮仿真中以初始状态运行。在程序设计时考虑了较全面的状态管理，为系统的可靠性与稳定性提供了保障。

五、仿真软件仿真效果评价及展望

1 仿真效果评价

仿真软件在列车运行状态模拟方面表现优异。通过实际测试，人工驾驶模式能够实现对列车速度、加速度的精确控制，用户通过键盘调整牵引力或制动力后，速度和位置的变化能够实时更新并反映在界面上。自动驾驶模式下，列车能够按照目标速度曲线运行，运行轨迹与目标曲线的偏差小于 2%，尤其是在停站位置的停车误差控制在 1 米以内，充分体现了自动驾驶算法的准确性和鲁棒性。

在异常状态的处理上，仿真系统表现出较强的稳定性。例如，当列车速度超过顶棚曲线时，系统能够迅速触发 ATP 紧急制动，确保列车运行安全。系统还通过日志文件记录了完整的运行数据，包括时间、位置、速度、状态等，为后续的评价和分析提供了详实的数据支持。

评价系统的实时评价模块通过 TCP 通信接收仿真数据，能够准确计算并动态更新超调量、舒适度等指标。测试中，当列车加速度超过 1.2 m/s^2 时，系统界面即时显示“不舒适”状态提示，并以红色字体标注提醒驾驶员注意操作。此外，离线评价模块能够准确解析仿真日志文件并生成详细的评价报告，评价结果与实时评价一致，进一步验证了系统的可靠性。

2 系统局限与改进方向

尽管仿真软件和评价系统已完成基本功能开发，但仍存在一些局限性。例如，PID 控制器的参数是固定的，用户无法根据实际需求调整控制策略，这可能导致在复杂运行场景下的响应不够灵活。此外，离线评价模块在处理异常数据时的能力较弱，例如当日志文件格式不符合规范时，系统无法提供明确的错误提示或修复方案。

未来的改进方向包括以下几个方面：①优化自动驾驶算法，增加 PID 参数的可调节功能，提升自动驾驶的灵活性和适应性。②增强评价系统的容错性和智能性，使其能够识别并修复异常数据，提高评价的准确性和可靠性。③拓展仿真场景，例如增加多列车交互和复杂线路运行的仿真功能，为轨道交通运行控制研究提供更丰富的实验环境。

3 展望

本次完成的仿真软件和评价系统不仅满足了课程设计的要求，在评价选取、程序 UI 设计等方面也有自己的思考。未来，随着列车自动驾驶技术的发展，本项目的成果可能可以扩展至更复杂的控制场景，如列车编组的自动调整、列车间通信优化等。此外，通过结合机器学习算法和大数据分析技术，可以进一步提升系统的智能化水平，为轨道交通运行控制和安全保障提供更有效的解决方案。

参考文献

- [1] GB/T 13441.1-2007/ISO 2631-1:1997, 机械振动与冲击, 人体暴露于全身振动的评价第1部分:一般要求[S].
- [2] WANG C, ZHAO X, FU R, et al. Research on the Comfort of Vehicle Passengers Considering the Vehicle Motion State and Passenger Physiological Characteristics: Improving the Passenger Comfort of Autonomous Vehicles [J]. Int J Env Res Pub He, 2020, 17(18).
- [3] 国家市场监督管理总局. 城市轨道交通运营指标体系:GB/T 38374-2019[S].
- [4] 高翔.城市轨道交通列车停站定位精度随机误差研究[J].城市轨道交通研究,2014,17(S1):14-17.