

同濟大學

# 课程设计任务书

课程名称： 轨道交通运行控制与管理课程设计

专业： 交通工程

班级： 智能交通系统工程方向

姓名： 陈彦宇

学号： 2153708

指导老师： 沈拓

同济大学交通学院

## 目录

一、课程设计与报告架构 .....	2
1 列车驾驶仿真软件开发 .....	2
1.1 人工驾驶功能 .....	2
1.2 自动驾驶功能（个人负责板块） .....	2
2 驾驶评价系统开发 .....	3
2.1 在线评价模块 .....	3
2.2 离线评价模块（个人负责板块） .....	3
3 各系统模块基本关联 .....	3
4 后续报告组织框架 .....	4
二、项目概况 .....	4
1 设计目的 .....	4
2 基本变量说明 .....	4
3 基本约束说明与异常状态处置 .....	6
3.1 舒适性约束 .....	6
3.2 工况转换约束 .....	6
3.3 ATP 超速防护约束 .....	6
3.4 列车牵引、制动曲线约束 .....	6
4 列车驾驶仿真软件详解 .....	7
4.1 列车驾驶仿真软件按钮功能 .....	7
4.2 人工驾驶功能 .....	8
4.3 自动驾驶功能 .....	9
4.4 信息发送功能 .....	9
5 驾驶评价系统详解 .....	10
5.1 驾驶评价系统按钮功能 .....	10
5.2 在线评价指标与在线评价模块功能 .....	11
三、个人工作——自动驾驶功能开发 .....	12
1 基本原理 .....	12
2 运行实现 .....	13
四、个人工作——离线评价功能开发 .....	14
1 离线评价指标 .....	14
1.1 列车运行平稳性指标 .....	14
1.2 列车停站指标 .....	15
2 离线评价模块功能 .....	15
3 自动驾驶控制效果评价 .....	16
五、不足之处与改进方向 .....	17
1 自动驾驶功能 .....	17
2 离线评价功能 .....	17
参考文献 .....	17

## 一、课程设计与报告架构

本次课程设计任务共包含**列车驾驶仿真软件开发**与**驾驶评价系统开发**两项。各系统需具备的核心功能、各系统模块间关联如下 1~3 部分。

### 1 列车驾驶仿真软件开发

列车驾驶仿真软件（简称“仿真软件”）需实现**人工驾驶**与**自动驾驶**功能。具体如下。

#### 1.1 人工驾驶功能

##### 1) 基本信息显示

导入给定的数据文件，在可视化窗口界面中展示各项基本数据。包括：

**列车基本信息：**展示车长、列车编组与列车质量。

**速度-位置曲线绘图区：**根据导入数据绘制列车运行顶棚曲线与目标速度曲线。

**实时状态区：**展示列车当前工况、驾驶模式、速度、位置与仿真时间。

**列车状态仪表：**展示列车当前速度、由列车发动机输入的加速度。

##### 2) 实时操控功能

通过键盘实时操控，直接改变列车工况与输入的加速度值，实时更新列车各项基本参数(如速度,位置等),并最终可视化为**速度-位置曲线**与**列车状态仪表显示**。

在实时操控过程中，有关运行的重要信息将会实时展示在**运行信息框**中。

#### 1.2 自动驾驶功能（个人负责板块）

##### 1) 基本信息显示

进入自动驾驶功能后，程序将基于目标速度曲线与给定的停站信息，直接控制列车工况与发动机输入的加速度大小，进而控制列车运行状态。需要展示的基本信息与人工驾驶模式下相同。

## 2) 追踪方法开发

追踪方法以 PID 控制为核心，并补充开发列车停站处理，保证列车准点、准确停车。详细原理见下文**第三部分**。

## 2 驾驶评价系统开发

基于给定的目标速度曲线，结合**仿真软件**传递的实时列车运行数据与生成的离线运行日志，开发一个独立的**驾驶评价系统**（简称评价系统）。该驾驶评价系统包含**实时评价模块**与**离线评价模块**。

### 2.1 在线评价模块

先后启动驾驶评价系统与列车仿真软件后，两者将建立通信联系。在列车仿真软件运行过程中，每隔 1 秒向驾驶评价系统发送一次实时数据。**在线评价模块**在线处理获得的数据信息，计算超调量、舒适度等信息，并实时展示。

为帮助驾驶员更好地控制速度，在线评价模块搭载了**实时评价交流**功能。该功能将展示 ATP 触发情况与列车速度调整建议，帮助驾驶员更好地控制速度。

### 2.2 离线评价模块（个人负责板块）

离线评价模块针对列车驾驶仿真软件生成的日志文件进行评价。通过对比日志文件记录的列车实际运行曲线与给定的目标速度曲线，计算各项评价指标，并输出为可供保存的离线评价报告。

## 3 各系统模块基本关联

本次课程设计中各系统模块的关联如下**图 1**。

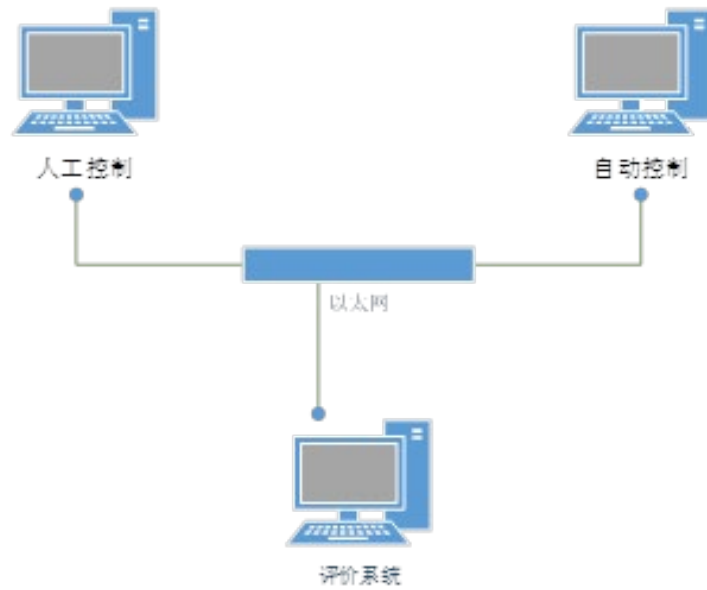


图 1 列车驾驶与评价系统结构示意图

## 4 后续报告组织框架

后续报告将主要划分为 2 个部分。其中，**项目概况**部分将介绍本次课程设计涉及到的各模块细化功能、简单介绍各功能的实现方法，**个人工作**部分将介绍个人在本次课程设计中主要负责的自动驾驶功能实现与离线评价功能实现任务。

## 二、项目概况

### 1 设计目的

- ① 实现列车控制系统的简单构建；
- ② 进一步了解 ATO 自动驾驶控制结构，了解 ATO 自动控制机理；
- ③ 巩固课程理论知识，提升动手能力、分析与解决问题的能力。

### 2 基本变量说明

为后续描述方便，在此说明本次课程设计涉及到的各项基本变量如下**表 1**。

表 1 基本变量说明

变量符号	变量涵义
$s(t)$	时刻 $t$ 车辆位置( $m$ )
$v(t)$	时刻 $t$ 车辆实际速度( $km/h$ )
$v(s)$	列车在位置 $s$ 处的实际速度( $km/h$ )
$v_0(s)$	列车在位置 $s$ 处的目标速度( $km/h$ )
$a(t)$	时刻 $t$ 车辆实际加速度( $m/s^2$ )
$a_\omega(t)$	时刻 $t$ 车辆附加阻力加速度( $m/s^2$ )
$a_F(t)$	时刻 $t$ 车辆牵引加速度( $m/s^2$ )
$a_B(t)$	时刻 $t$ 车辆制动加速度( $m/s^2$ )
$status(t)$	时刻 $t$ 列车运行状态
$t$	列车仿真运行时刻(仿真秒)
$dt$	仿真更新时间间隔(仿真秒), 取为 0.1
$M$	列车质量( $10^3 kg$ )
$g$	重力加速度( $m/s^2$ )

其中,  $status(t)$ 包括了列车运行过程中可能发生的情况, 各状态名称与列车运动状态情况如下:

- ① “正常运行：牵引”：列车发动机牵引,  $a_F(t) \geq 0, a_B(t) = 0$ ;
- ② “正常运行：惰行”：列车发动机断开传动,  $a_F(t) = 0, a_B(t) = 0$ ;
- ③ “正常运行：制动”：列车发动机制动,  $a_F(t) = 0, a_B(t) \geq 0$ ;
- ④ “ATP 紧急制动”：列车速度-位置曲线触碰顶棚曲线后进入该状态, 列车以最大 $a_B$ 制动, 直至速度为 0。
- ⑤ “紧急制动罚时”：触发“ATP 紧急制动”状态并减速至停车后, 列车立刻进入该状态, 持续 5 仿真秒。该状态结束后自动进入“正常运行：惰行”状态。
- ⑥ “停站”：列车进入停靠站点位置范围（与站点中心位置相距 5m 及以下）且速度降至 0 时进入此状态, 持续时长由目标速度曲线决定。该状态结束后自动进入“正常运行：惰行”状态。

### 3 基本约束说明与异常状态处置

#### 3.1 舒适性约束

列车的加加速度大小不能超过 $0.75m/s^3$ ，即： $\frac{|a(t+dt)-a(t)|}{dt} \geq 0.75m/s^2$ 。

#### 3.2 工况转换约束

列车正常运行状态（牵引、惰行与制动）之间的转换情况如下表 2。表中“√”表示两状态间可以直接切换，“×”表示两状态间不能直接切换。

表 2 工况切换情况表

	牵引	惰行	制动
牵引	--	√	×
惰行	√	--	√
制动	×	√	--

在牵引向制动的切换（或制动向牵引的切换）时，列车需首先由当前状态进入惰行状态，在惰行至少 0.6s 后方能切换为目标状态。

#### 3.3 ATP 超速防护约束

列车实际运行过程中，速度-运动曲线不得触碰给定的顶棚曲线。

若触碰，则认为列车进入异常状态，触发 ATP 超速防护：列车进入“ATP 紧急制动”状态，后进入“紧急制动罚时状态”。以上两状态下，列车无论处于何种驾驶模式，均失去发动机的掌控权（无法切换状态，无法介入修改列车加速度）。以上两个状态均结束后，列车方能恢复正常运行。

#### 3.4 列车牵引、制动曲线约束

列车实际运行过程中，其牵引加速度、制动加速度受到列车牵引特性曲线与制动特性曲线的约束：不能提供大小超过特性曲线规定最大值的加速度。

## 4 列车驾驶仿真软件详解

该部分将介绍本小组开发的列车驾驶仿真软件功能，并简要介绍部分核心功能的实现方法。

### 4.1 列车驾驶仿真软件按钮功能

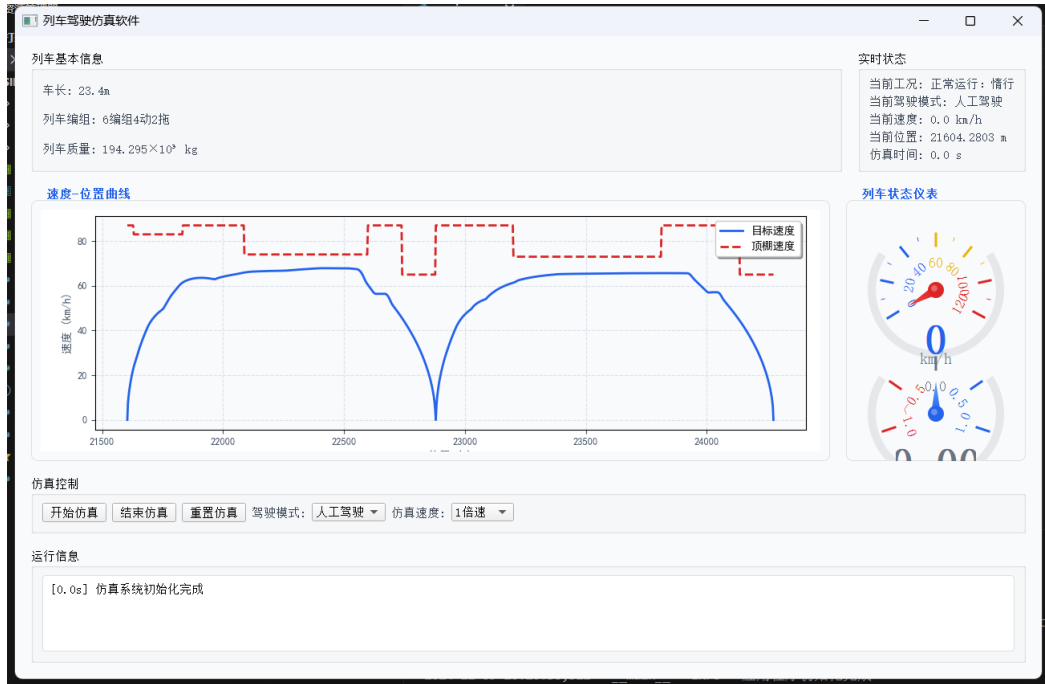


图 2 仿真软件基本界面

列车仿真软件基本界面（上图 2）包含以下按钮：

- ① “仿真速度”按钮：指定列车仿真速度，可选 1 倍、2 倍、5 倍、10 倍。
- ② “驾驶模式”按钮：指定列车驾驶模式，可选“人工驾驶”、“自动驾驶”。
- ③ “开始仿真”按钮：根据指定的仿真速度与驾驶模式，开始仿真。
- ④ “结束仿真”按钮：结束当前仿真进程，并自动保存仿真运行相关文件（运行日志文件（.log 文件）、运行日志（.csv 文件）与速度-位置曲线绘图结果（.png 图片））。
- ⑤ “重置仿真”按钮：清除已结束的仿真进程的所有可视化结果，重置软件。



## 4.2 人工驾驶功能

### 1) 操作方式

#### ① 列车状态切换

仿真开始后通过按下 Q、W、E 键之一向仿真软件发出切换列车状态的请求，列车驾驶仿真软件检查当前列车运行状态后，按[基本约束说明与异常状态处置](#)规定判断并执行列车状态切换指令。发送指令与键盘事件对应关系见下表 3。

表 3 列车状态切换与键盘事件

发送指令	键盘事件
切换至“正常运行：牵引”状态	按下 Q 键
切换至“正常运行：惰行”状态	按下 W 键
切换至“正常运行：制动”状态	按下 E 键

#### ② 列车加速度调整

在“正常运行：牵引”或“正常运行：制动”时，通过按下键盘 O、P 键之一，改变 $a_F$ 或 $a_B$ 的大小。发送指令与键盘控制对应关系见下表 4。

表 4 列车牵引/制动加速度控制与键盘事件

发送指令	键盘事件
加速度大小增加 $0.1m/s^2$	按下 O 键
加速度大小减小 $0.1m/s^2$	按下 P 键

### 2) 运行实现

仿真软件将每隔 $dt$ （0.1 仿真秒）更新一次其内置的各项属性值，并将这些属性值作为可视化展示的基础数据，以实现列车人工驾驶运行。简单说明更新方式如下，所有运行步骤均受到[基本约束说明与异常状态处置](#)部分控制。更新方法详见 simulation.py 文件 update 函数。

#### 步骤 1 ATP 超速防护

若 $v(t) \geq \text{当前位置顶棚速度}$ ，则 $status < -\text{"ATP 紧急制动"}$ 。

#### 步骤 2 列车状态 $status$ 更新

若 $status = \text{ATP 紧急制动 or 紧急制动罚时 or 停站}$ ，则按照[基本变量说明](#)相关描述，完成 $status$ 更新。

否则，根据驾驶员发送的列车状态切换指令（见表 3）与停站行为更新 $status$ 。

### 步骤 3 列车运动状态更新

若 $status = ATP$  紧急制动 *or* 紧急制动罚时 *or* 停站，则按照[基本变量说明](#)相关描述，完成列车运动状态更新。

否则，首先根据驾驶员发送的列车牵引/制动加速度控制指令（见表 4）更新 $a_F$ 与 $a_B$ ，再按下列式子更新运动状态（各符号涵义见[表 1](#)）。下列各式中，常量 $a = 2.03, b = 0.062, c = 0.0018$ 。

$$\omega_0 = a + b * v(t) + c * v^2(t) \quad (2-1)$$

$$a_w(t + dt) = \frac{\omega_0 g}{1000} \quad (2-2)$$

$$a(t + dt) = a_w(t + dt) + a_F(t + dt) + a_B(t + dt) \quad (2-3)$$

$$v(t + dt) = v(t) + 3.6 * a(t + dt) * dt \quad (2-4)$$

$$s(t + dt) = s(t) + v(t + dt)/3.6 * dt \quad (2-5)$$

### 3) 可视化

每隔 $dt$  (0.1 仿真秒)，在仿真软件界面中作列车实际速度-位置曲线，同时更新界面中各项信息显示。

## 4.3 自动驾驶功能

该部分为个人主要负责工作板块之一，移步至[三、个人工作——自动驾驶模式开发](#)介绍。

## 4.4 信息发送功能

基于 PyQt5 库，仿真系统成功装载了信息发送功能：若仿真系统通过接口成功连接评价系统，列车运动状态等信息将通过 TCP 实时传输至评价系统。否则，仿真系统将以 5s 一次的频率尝试重新连接评价系统，直到成功为止。

一些关键的通信参数如下表 5。信息发送功能详见 `network_client.py`。

表 5 主要通信参数

字段	解释	取值
host	客户端	由运行仿真系统的设备决定

字段	解释	取值
port	接口号	5000

仿真系统实时传输的数据形式为.json，以数据包的形式统一发送。包含的字段与其涵义如下表 6。

表 6 实时通信发送字段及释义

字段名称	释义	字段名称	释义
<b>time</b>	仿真时间（仿真秒）	<b>target_speed</b>	列车目标速度（km/h）
<b>position</b>	列车位置（m）	<b>ceiling_speed</b>	顶棚速度（km/h）
<b>speed</b>	列车速度（km/h）	<b>status</b>	列车运行状态
<b>acceleration</b>	列车加速度（m/s <sup>2</sup> ）	-	-

## 5 驾驶评价系统详解

### 5.1 驾驶评价系统按钮功能

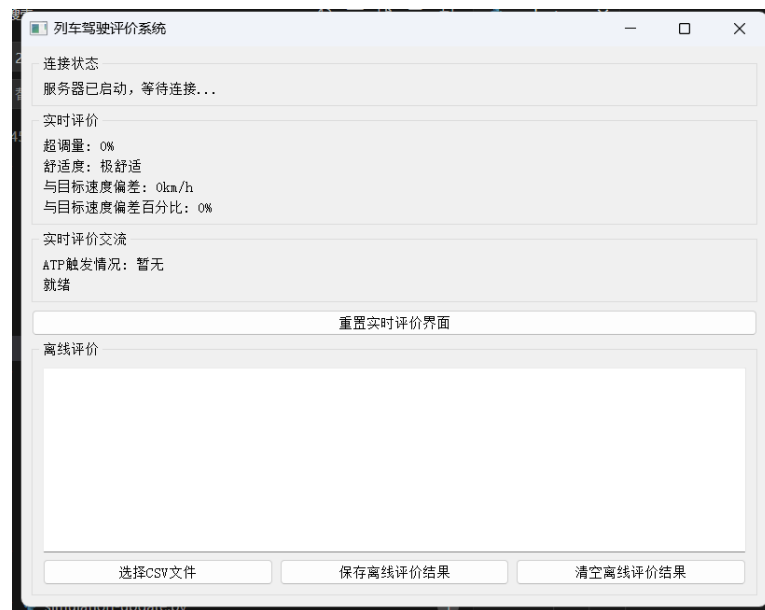


图 3 驾驶评价系统基本界面

驾驶评价系统基本界面（上图 3）包含以下按钮：

① “重置实时评价”按钮：重置“连接状态”、“实时评价”与“实时评价交流”三个窗格中的所有数据。

② “选择 csv 文件”按钮：选择需要评价的离线日志文件（.csv 格式），离线评价报告将显示在“离线评价”窗口中。每上传一次文件，都会先清空“离线评价”

窗口中的所有内容，随后再显示当前日志文件的离线评价结果。

③ “保存离线评价结果”按钮：按下此按钮后，评价系统将把“离线评价”窗口中的报告内容写入一个文本文件（.txt 文件），用户可指定该文本文件的保存位置。

④ “清空离线评价结果”按钮：清空“离线评价”窗口中的所有内容。

## 5.2 在线评价指标与在线评价模块功能

在线评价模块搭载的评价指标如下。该部分涉及到的符号涵义见[表1](#)。

### ① 超调量

定义“超调量” *overshoot* 如下：

$$overshoot = \max \left( 0, \frac{v(s) - v_0(s)}{v_0(s)} * 100\% \right) \quad (2-6)$$

### ② 舒适度

根据标准文件<sup>[1]</sup>与相关研究<sup>[2]</sup>，小组规定舒适度与加速度关系如下表7。

表7 舒适度与加速度关系表

加速度(m/s <sup>2</sup> )	舒适度	舒适度指数
$a \leq 0.28$	极舒适	1
$0.28 < a \leq 1.23$	舒适	2
$1.23 < a \leq 2.12$	不舒适	3
$a > 2.12$	无法忍受	4

### ③ 与目标速度偏差（km/h）

简单实际速度与目标速度相减得到“与目标速度偏差” *deviation*：

$$deviation = v(s) - v_0(s) \quad (2-7)$$

### ④ 与目标速度相对偏差

定义“与目标速度相对偏差” *deviation\_per* 如下。认为  $-5\% \leq deviation\_per \leq 5\%$  时，速度控制情况良好，否则认为当前速度偏差过大。

$$deviation\_per = \frac{v(s) - v_0(s)}{v_0(s)} \quad (2-8)$$

评价系统将从仿真系统中实时接收列车运行数据（仿真系统[信息发送功能](#)见上），实时计算并于评价系统界面展示在线评价指标。为模拟实际列车开行在线评

价场景，使用在线评价模块时请将仿真速度设为 1 倍。

### 三、个人工作——自动驾驶功能开发

#### 1 基本原理

在人工驾驶功能的基础上，进一步开发自动驾驶功能。列车运动模型如图 8 所示，基于 PID 控制方式的 ATO 速度曲线跟踪模型如图 9 所示。其中， $e^{-s\sigma}$  为时间传输延迟， $\frac{1}{\tau s+1}$  为相应延迟， $\Delta a(t)$  为阻力加速度。在本次课程设计中，不考虑时间传输延迟。

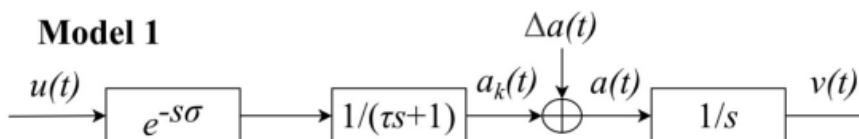


图 8 列车运动模型

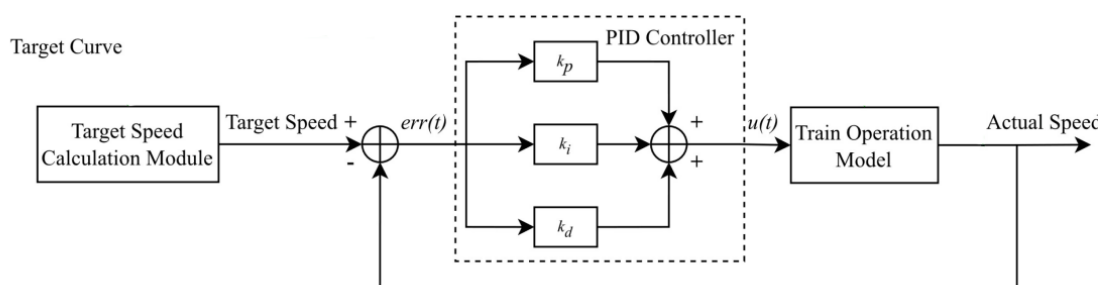


图 9 基于 PID 控制方式的 ATO 速度曲线跟踪模型

若将图 9 抽象为函数形式，则形如下式 3-1。

$$u_k = K_p * e_k + K_i * \sum_{j=0}^k (e_j) + K_d(e_k - e_{k-1}) \quad (3-1)$$

式中：

$k$ ：采样编号；

$u_k$ ：第  $k$  次采样时计算机输出值，即 PID 控制器给出的参考加速度（注意，

该参考加速度带有符号)，单位为  $\text{m/s}^2$ ；

$e_k$ : 第 $k$ 次采样时输入的偏差值，即当前位置目标速度 $v_0(s)$ 与当前位置实际速度 $v(s)$ 之差，单位为  $\text{km/h}$ ；

$e_{k-1}$ : 第 $(k-1)$ 次采样时输入的偏差值。

$K_p$ : 比例系数；

$K_i$ : 积分系数；

$K_d$ : 微分系数。

## 2 运行实现

与人工驾驶模式下相似，自动驾驶模式下所有运行步骤均受到[基本约束说明与异常状态处置](#)部分控制。仿真系统实现自动驾驶功能的运行步骤如下。若未特殊说明，该部分中出现的变量涵义见[表1](#)。

### 步骤 1 ATP 超速防护

若 $v(t) \geq \text{当前位置顶棚速度}$ ，则 $status < -\text{"ATP 紧急制动"}$ 。

### 步骤 2 列车状态 $status$ 更新

若 $status = \text{ATP 紧急制动 or 紧急制动罚时 or 停站}$ ，则按照[基本变量说明](#)相关描述，完成 $status$ 更新。

若列车到达停站位置，则算法将列车状态 $status$ 自动切换为“停站”。

### 步骤 3.1 初始化 PID 控制器

初始化比例系数 $K_p = 0.8$ ，积分系数 $K_i = 0.2$ ，微分系数 $K_d = 0.3$ 。根据列车牵引与制动特性曲线，规定 PID 控制器输出结果范围为 $(-1.1, 1.1)$ 。

### 步骤 3.2 参考加速度计算

在采样时刻 $t$ 获取 $v_0(s)$ 与 $v(s)$ ，按照下列各式计算出参考加速度 $a_{raw}$ 。若现在为第一轮采样，则上一轮采样时的误差 $e(t-dt)$ 取为 0，上一轮采样的积分项 $I(t-dt)$ 取为 0。

$$setpoint = \frac{v_0(s)}{3.6} \quad (3-2)$$

$$measurement = \frac{v(s)}{3.6} \quad (3-3)$$

$$e(t) = \text{setpoint} - \text{measurement} \quad (3-4)$$

$$P(t) = K_p * e(t) \quad (3-5)$$

$$I(t) = \max(-1.1, \min(I(t-dt) + 0.5 * K_i * (e(t) + e(t-dt)) * dt, 1.1)) \quad (3-6)$$

$$D(t) = K_d * (e(t) - e(t-dt)) \quad (3-7)$$

$$a_{raw} = P(t) + I(t) + D(t) \quad (3-8)$$

### 步骤 3.3 控制加速度计算

按下列各式计算出控制加速度 $a_{control}$ 。下式中，值“0.75”为最大加加速度（ $m/s^3$ ）， $sgn(x)$ 表示取值 $x$ 的符号。

$$a_{control} = \begin{cases} a_{raw}, & \text{当 } |a_{raw} - a(t)| \leq 0.75dt \\ a(t) + sgn(a_{raw} - a(t)) * 0.75 * dt, & \text{其他} \end{cases} \quad (3-9)$$

### 步骤 4 参数更新

按 $a_{control}$ 更新列车实际加速度如式。列车速度与位置数据更新按式 2-4 与 2-5 进行。

$$a(t+dt) = a_{control} \quad (3-10)$$

## 四、个人工作——离线评价功能开发

### 1 离线评价指标

拟从列车运行平稳性与列车停站任务完成情况两方面展开离线评价。

#### 1.1 列车运行平稳性指标

##### ① 与目标速度平均相对偏差

与目标速度平均相对偏差 $avg\ deviation\ per$ 按下式 4-1 计算。

$$avg\ deviation\ per = \frac{\sum_{t=dt}^{N*dt} |v(t,s) - v_0(s)|}{N} \quad (4-1)$$

式中， $N$ 为采样次数， $v(t,s)$ 为列车在时刻 $t$ 、位置 $s$ 时的速度。

##### ② 极舒适时间占比

舒适度为“极舒适”的时间占比（舒适度按表 7 规定计算，下同），按下式给

出：

$$\text{极舒适时间占比} = \frac{\text{“极舒适”时间}}{\text{列车非停站总时间}} * 100\% \quad (4-2)$$

### ③ 舒适时间占比

舒适度为“极舒适”与“舒适”的时间占比，按下式给出：

$$\text{舒适时间占比} = \frac{\text{“极舒适”时间} + \text{“舒适”时间}}{\text{列车非停站总时间}} \quad (4-3)$$

### ④ 不舒适时长

舒适度为“不舒适”与“无法忍受”的时长（s）。

## 1.2 列车停站指标

若列车完成了所有停站任务，对列车停站指标进行展示，具体如下。

### ① 准点率<sup>[3]</sup>

对比列车实际进/出站时刻与目标速度曲线给出的计划进/出站时刻，认为时间差在 1 分钟以内的为准点。准点率按下式给出。

$$\text{准点率} = \frac{\text{准点次数}}{\text{总进出站次数}} \quad (4-4)$$

### ② 平均停车误差<sup>[4]</sup>

对比列车实际停站位置与目标速度曲线给出的计划停车位置，计算各停靠站平均停车误差（m），按下式给出：

$$\text{平均停车误差} = \frac{\sum_{\text{站点}} |\text{实际停车位置} - \text{计划停车位置}|}{\text{停站数}} \quad (4-5)$$

若列车没有完成所有停站任务（出现了漏停站行为），认为本次列车驾驶任务失败，告知用户“未完成停站任务”。

## 2 离线评价模块功能

评价系统将读取用户上传的列车运行日志（.csv 文件），在评价系统界面中展示离线评价报告，用户可在评价系统中浏览报告，也可将报告保存为.txt 文件。



### 3 自动驾驶控制效果评价

利用离线评价功能，整体评价自动驾驶的控制效果，由自动驾驶控制的列车速度-位置曲线见下图 10，由离线评价系统生成报告的情况见下图 11。

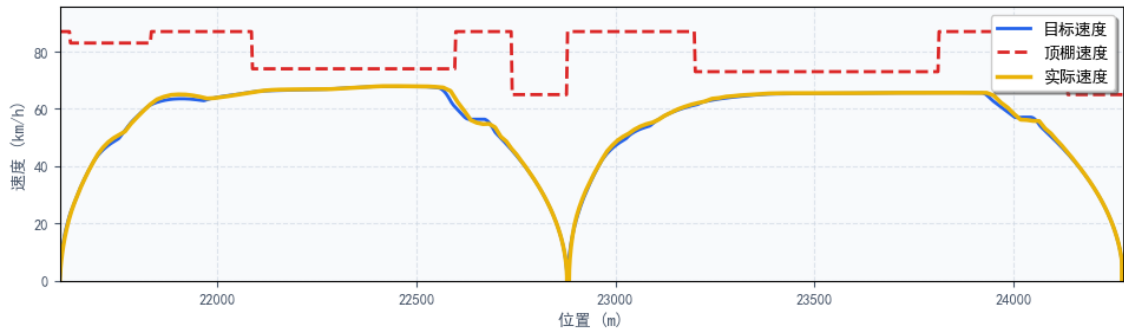


图 10 自动驾驶模式下列车运行情况

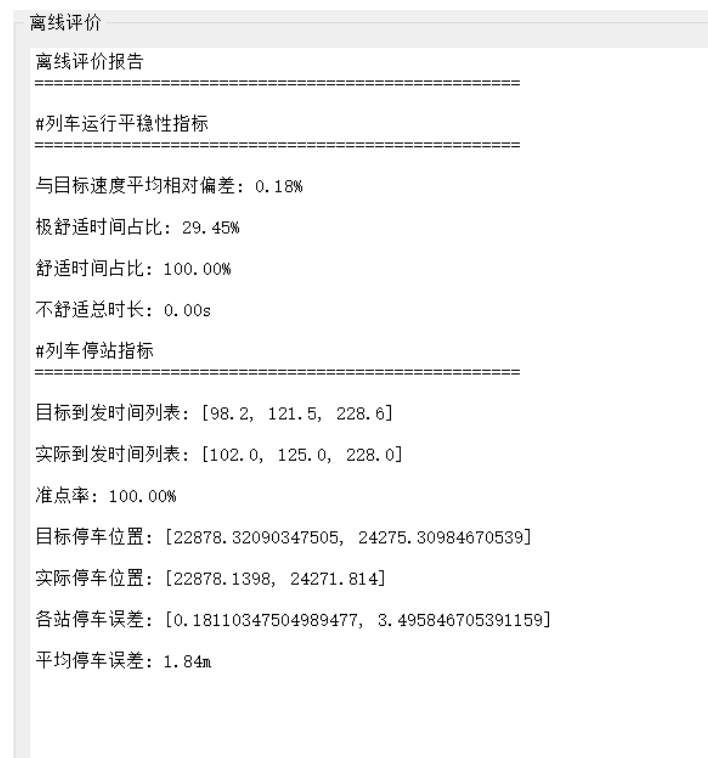


图 11 离线评价报告生成情况

从图 10 来看，自动驾驶控制下列车运行基本能贴合目标速度曲线。从图 11 来看，列车能够完整完成目标速度曲线指定的停车任务，且各项指标表现良好。认为自动驾驶功能开发成功。

## 五、不足之处与改进方向

在本次课程设计中，个人认为仿真软件与评价系统仍有完善空间。针对个人工作提出不足之处与改进方向如下。

### 1 自动驾驶功能

当前自动驾驶功能基本控制效果良好，但 PID 控制器为程序内置，无法更改各项参数。对于用户而言，自动驾驶暂无优化渠道。

在未来可以在仿真系统中增设 PID 控制器设置功能，用户可以在该功能下修改 PID 控制器参数，以求更好的自动驾驶效果。

### 2 离线评价功能

尚未有能力甄别异常的数据。若上传的数据存在异常、离线评价模块无法计算的情况下，模块仅会显示计算错误，暂不能提示用户上传数据出现的问题，对于数据修复无帮助。

在未来可以进一步完善离线评价算法，使其能够处理并向用户提示一些常见的数据异常（终止计算并告知用户上传数据具体错误），如：用户上传了字段错误的 csv 文件、用户上传了空文件等。

## 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.