

车云协同液罐车防侧翻 行驶规划与控制研究

(申请清华大学工学硕士学位论文)

培养单位：车辆与运载学院

学 科：机械工程

研 究 生：戚笑景

指 导 教 师：罗禹贡 研究员

副指导教师：高博麟 副研究员

二〇二六年二月

车云协同液罐车防侧翻行驶规划与控制研究

戚笑景

Vehicle Cloud Collaborative Anti-rollover Planning and Control for Tank Trucks

Thesis submitted to
Tsinghua University
in partial fulfillment of the requirement
for the degree of

Master of Science

in
Mechanical Engineering

by

Qi Xiaojing

Thesis Supervisor: Professor Luo Yugong

Associate Supervisor: Professor Gao Bolin

February, 2026

学位论文指导小组、公开评阅人和答辩委员会名单

指导小组名单

李 XX	教授	清华大学
王 XX	副教授	清华大学
张 XX	助理教授	清华大学

公开评阅人名单

刘 XX	教授	清华大学
陈 XX	副教授	XXXX 大学
杨 XX	研究员	中国 XXXX 科学院 XXXXXXX 研究所

答辩委员会名单

主席	赵 XX	教授	清华大学
委员	刘 XX	教授	清华大学
	杨 XX	研究员	中国 XXXX 科学院 XXXXXXX 研究所
	黄 XX	教授	XXXX 大学
	周 XX	副教授	XXXX 大学
秘书	吴 XX	助理研究员	清华大学

关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解清华大学有关保留、使用学位论文的规定，即：

清华大学拥有在著作权法规定范围内学位论文的使用权，其中包括：（1）已获学位的研究生必须按学校规定提交学位论文，学校可以采用影印、缩印或其他复制手段保存研究生上交的学位论文；（2）为教学和科研目的，学校可以将公开的学位论文作为资料在图书馆、资料室等场所供校内师生阅读，或在校园网上供校内师生浏览部分内容；（3）按照上级教育主管部门督导、抽查等要求，报送相应的学位论文。

本人保证遵守上述规定。

作者签名：_____

导师签名：_____

日 期：_____

日 期：_____

摘 要

论文的摘要是对论文研究内容和成果的高度概括。摘要应对论文所研究的问题及其研究目的进行描述，对研究方法和过程进行简单介绍，对研究成果和所得结论进行概括。摘要应具有独立性和自明性，其内容应包含与论文全文同等量的主要信息。使读者即使不阅读全文，通过摘要就能了解论文的总体内容和主要成果。

论文摘要的书写应力求精确、简明。切忌写成对论文书写内容进行提要的形式，尤其要避免“第 1 章……；第 2 章……；……”这种或类似的陈述方式。

关键词是为了文献标引工作、用以表示全文主要内容信息的单词或术语。关键词不超过 5 个，每个关键词中间用分号分隔。

关键词：关键词 1；关键词 2；关键词 3；关键词 4；关键词 5

Abstract

An abstract of a dissertation is a summary and extraction of research work and contributions. Included in an abstract should be description of research topic and research objective, brief introduction to methodology and research process, and summary of conclusion and contributions of the research. An abstract should be characterized by independence and clarity and carry identical information with the dissertation. It should be such that the general idea and major contributions of the dissertation are conveyed without reading the dissertation.

An abstract should be concise and to the point. It is a misunderstanding to make an abstract an outline of the dissertation and words “the first chapter”, “the second chapter” and the like should be avoided in the abstract.

Keywords are terms used in a dissertation for indexing, reflecting core information of the dissertation. An abstract may contain a maximum of 5 keywords, with semi-colons used in between to separate one another.

Keywords: keyword 1; keyword 2; keyword 3; keyword 4; keyword 5

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	II
目 录.....	III
符号和缩略语说明.....	IV
第 1 章 车端防侧翻轨迹跟踪控制与模型试验	1
1.1 顺序编码制	1
第 2 章 总结与展望	2
2.1 数学公式	3
2.2 数学定理	3
2.3 表格	3
2.4 算法	4
参考文献	6
附录 A 补充内容	7
致 谢	18
声 明	19

符号和缩略语说明

ICV	智能网联汽车（Intelligent and Connected Vehicle）
MBSE	基于模型的系统工程（Model-Based System Engineering）
SoS	体系（System-of-Systems）
MBSoS	基于模型的体系工程
ITS	智能交通系统
IVCPS	智能汽车信息物理系统
CVRIA	美国网联汽车参考应用架构
ARC-IT	协同式智能交通系统参考架构
CFD	计算流体动力学（Computational Fluid Dynamics）
ARC-IT	聚苯基不对称三嗪
MAsPPT	聚苯基不对称三嗪单模型化合物，3,5,6-三苯基-1,2,4-三嗪
DMAsPPT	聚苯基不对称三嗪双模型化合物（水解实验模型化合物）
S-PPT	聚苯基对称三嗪
MSPPT	聚苯基对称三嗪模型化合物，2,4,6-三苯基-1,3,5-三嗪
PPQ	聚苯基喹噁啉
MPPQ	聚苯基喹噁啉模型化合物，3,4-二苯基苯并二嗪
HMPI	聚酰亚胺模型化合物的质子化产物
HMPY	聚吡咯模型化合物的质子化产物
HMPBI	聚苯并咪唑模型化合物的质子化产物
HMAAsPPT	聚苯基不对称三嗪模型化合物的质子化产物
HMSPPT	聚苯基对称三嗪模型化合物的质子化产物
HMPPQ	聚苯基喹噁啉模型化合物的质子化产物
PDT	热分解温度
HPLC	高效液相色谱（High Performance Liquid Chromatography）
HPCE	高效毛细管电泳色谱（High Performance Capillary lectrophoresis）
LC-MS	液相色谱-质谱联用（Liquid chromatography-Mass Spectrum）
TIC	总离子浓度（Total Ion Content）
<i>ab initio</i>	基于第一原理的量子化学计算方法，常称从头算法
DFT	密度泛函理论（Density Functional Theory）
E_a	化学反应的活化能（Activation Energy）
ZPE	零点振动能（Zero Vibration Energy）

PES	势能面 (Potential Energy Surface)
TS	过渡态 (Transition State)
TST	过渡态理论 (Transition State Theory)
ΔG^\ddagger	活化自由能 (Activation Free Energy)
κ	传输系数 (Transmission Coefficient)
IRC	内禀反应坐标 (Intrinsic Reaction Coordinates)
ν_i	虚频 (Imaginary Frequency)
ONIOM	分层算法 (Our own N-layered Integrated molecular Orbital and molecular Mechanics)
SCF	自洽场 (Self-Consistent Field)
SCRF	自洽反应场 (Self-Consistent Reaction Field)

第 1 章 车端防侧翻轨迹跟踪控制与模型试验

模板支持 BibTeX 和 BibLaTeX 两种方式处理参考文献。下文主要介绍 BibTeX 配合 `natbib` 宏包的主要使用方法。

1.1 顺序编码制

在顺序编码制下，默认的 `\cite` 命令同 `\citet` 一样，序号置于方括号中，引文页码会放在括号外。统一处引用的连续序号会自动用短横线连接。

第2章 总结与展望

总结与展望

中文论文的数学符号默认遵循 GB/T 3102.11—1993《物理科学和技术中使用的数学符号》^①。该标准参照采纳 ISO 31-11:1992^②，但是与 TeX 默认的美国数学学会（AMS）的符号习惯有所区别。具体地来说主要有以下差异：

1. 大写希腊字母默认为斜体，如

$$\Gamma \Delta \Theta \Lambda \Xi \Pi \Sigma \Upsilon \Phi \Psi \Omega.$$

注意有限增量符号 Δ 固定使用正体，模板提供了 `\increment` 命令。测试一下 Δ 命令。虽然需要花费的时间比较长，但是仍然能够在十秒左右完成编译。接下来我们就测试一下新的命令。

2. 小于等于号和大于等于号使用倾斜的字形 \leqslant 、 \geqslant 。
3. 积分号使用正体，比如 \int 、 \oint 。
4. 偏微分符号 ∂ 使用正体。
5. 省略号 `\dots` 按照中文的习惯固定居中，比如

$$1, 2, \dots, n \quad 1 + 2 + \dots + n.$$

6. 实部 Re 和虚部 Im 的字体使用罗马体。

以上数学符号样式的差异可以在模板中统一设置。另外国标还有一些与 AMS 不同的符号使用习惯，需要用户在写作时进行处理：

1. 数学常数和特殊函数名用正体，如

$$\pi = 3.14 \cdots; \quad i^2 = -1; \quad e = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n. \quad (2.1)$$

2. 微分号使用正体，比如 dy/dx 。
3. 向量、矩阵和张量用粗斜体 (`\mathbf`)，如 x 、 Σ 、 T 。
4. 自然对数用 $\ln x$ 不用 $\log x$ 。

英文论文的数学符号使用 TeX 默认的样式。如果有必要，也可以通过设置 `math-style` 选择数学符号样式。

关于量和单位推荐使用 `siunitx` 宏包，可以方便地处理希腊字母以及数字与单位之间的空白，比如： $6.4 \times 10^6 \text{ m}$, $9 \mu\text{m}$, kg m s^{-1} , $10^\circ\text{C} \sim 20^\circ\text{C}$, $10\% \sim 20\%$ 。

^① 原 GB 3102.11—1993，自 2017 年 3 月 23 日起，该标准转为推荐性标准。

^② 目前已更新为 ISO 80000-2:2019。

2.1 数学公式

数学公式可以使用 `equation` 和 `equation*` 环境。注意数学公式的引用应前后带括号，通常使用 `\eqref` 命令，比如式 (2.2)。

$$\frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} f = \sum_{k=1}^m n(\gamma; a_k) \mathcal{R}(f; a_k). \quad (2.2)$$

多行公式尽可能在“=”处对齐，推荐使用 `align` 环境。

$$a = b + c + d + e \quad (2.3)$$

$$= f + g \quad (2.4)$$

2.2 数学定理

定理环境的格式可以使用 `amsthm` 或者 `ntheorem` 宏包配置。用户在导言区载入这两者之一后，模板会自动配置 `theorem`、`proof` 等环境。

定理 2.1 (Lindeberg–Lévy 中心极限定理): 设随机变量 X_1, X_2, \dots, X_n 独立同分布，且具有期望 μ 和有限的方差 $\sigma^2 \neq 0$ ，记 $\bar{X}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$ ，则

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P\left(\frac{\sqrt{n}(\bar{X}_n - \mu)}{\sigma} \leq z\right) = \Phi(z), \quad (2.5)$$

其中 $\Phi(z)$ 是标准正态分布的分布函数。

证明 Trivial. ■

同时模板还提供了 `assumption`、`definition`、`proposition`、`lemma`、`theorem`、`axiom`、`corollary`、`exercise`、`example`、`remark`、`problem`、`conjecture` 这些相关的环境。

2.3 表格

表应具有自明性。为使表格简洁易读，尽可能采用三线表，如表 2.1。三条线可以使用 `booktabs` 宏包提供的命令生成。

表 2.1 三线表示例

文件名	描述
thuthesis.dtx	模板的源文件，包括文档和注释
thuthesis.cls	模板文件
thuthesis-*.bst	BibTeX 参考文献表样式文件

表格如果有附注，尤其是需要在表格中进行标注时，可以使用 **threeparttable** 宏包。研究生要求使用英文小写字母 a、b、c……顺序编号，本科生使用圈码①、②、③……编号。

表 2.2 带附注的表格示例

文件名	描述
thuthesis.dtx ^a	模板的源文件，包括文档和注释
thuthesis.cls ^b	模板文件
thuthesis-*.bst	BibTeX 参考文献表样式文件

^a 可以通过 xelatex 编译生成模板的使用说明文档；使用 xetex 编译 thuthesis.ins 时则会从 .dtx 中去除掉文档和注释，得到精简的 .cls 文件。

^b 更新模板时，一定要记得编译生成 .cls 文件，否则编译论文时载入的依然是旧版的模板。

如某个表需要转页接排，可以使用 **longtable** 宏包，需要在随后的各页上重复表的编号。编号后跟表题（可省略）和“（续）”，置于表上方。续表均应重复表头。

表 2.3 跨页长表格的表题

表头 1	表头 2	表头 3	表头 4
Row 1			
Row 2			
Row 3			
Row 4			
Row 5			
Row 6			
Row 7			
Row 8			
Row 9			
Row 10			

2.4 算法

算法环境可以使用 **algorithms** 或者 **algorithm2e** 宏包。

算法 2.1 Calculate $y = x^n$

输入: $n \geq 0$
输出: $y = x^n$

```
     $y \leftarrow 1$ 
     $X \leftarrow x$ 
     $N \leftarrow n$ 
while  $N \neq 0$  do
    if  $N$  is even then
         $X \leftarrow X \times X$ 
         $N \leftarrow N/2$ 
    else { $N$  is odd}
         $y \leftarrow y \times X$ 
         $N \leftarrow N - 1$ 
    end if
end while
```

参考文献

附录 A 补充内容

附录是与论文内容密切相关、但编入正文又影响整篇论文编排的条理和逻辑性的资料，例如某些重要的数据表格、计算程序、统计表等，是论文主体的补充内容，可根据需要设置。

附录中的图、表、数学表达式、参考文献等另行编序号，与正文分开，一律用阿拉伯数字编码，但在数码前冠以附录的序号，例如“图 A.4”，“表 ??”，“式 (A.19)”等。

A.1 理论补充

A.1.1 图扩散流匹配理论证明

我们希望学习得到的是动态特征速度的边缘向量场： v_t^θ ，其不依赖于未来真值 \mathcal{V}_{k+1} ，那么我们使用条件向量场计算出来的速度向量 $v_t^{target}(F_{dyn}^t | \mathcal{V}_{k+1})$ 是否可以拿来当做训练的标签，即是否可以将无条件损失式 (A.1) 替换为有条件损失式 (A.2)。

$$\mathcal{L}_{FM}(\theta) = \mathbb{E}_{t \sim \mathcal{U}, x \sim p_t} \left[\|v_t^\theta(F_{dyn}^t) - v_t^{target}(F_{dyn}^t)\|^2 \right] \quad (\text{A.1})$$

$$\mathcal{L}_{CFM}(\theta) = \mathbb{E}_{t \sim \mathcal{U}, x \sim p_t(\cdot|z), z \sim p_1} \left[\|v_t^\theta(F_{dyn}^t) - v_t^{target}(F_{dyn}^t | \mathcal{V}_{k+1})\|^2 \right] \quad (\text{A.2})$$

其实是可以的，下面来进行证明：

为了简化证明过程，不妨令真值 $z = \mathcal{V}_{k+1}$ ，动态特征场 $x = F_{dyn}^t$ 。我们有了条件向量场，现在需要求出边缘向量场，也就是不依赖于 z 的向量场。边缘概率路径是对条件概率路径乘以条件 z 的概率然后对所有可能的 z 积分，即

$$p_t(x) = \int_z p_t(x|z)p_1(z)dz \quad (\text{A.3})$$

本质上应用了全概率公式，按照各种条件对 z 进行汇总，然后对所有可能的 z 积分。那么是否可以通过对所有条件向量场乘以 $p(z)$ ，然后对所有可能的 z 积分，得到边缘向量场？即

$$v_t^{target}(x) = \int_z v_t^{target}(x|z)p_1(z)dz \quad (\text{A.4})$$

答案是不行的，因为这里的 v_t^{target} 是个向量场，不是概率值，不能应用全概率

公式。实际上的公式是这样的

$$v_t^{target}(x) = \int_z v_t^{target}(x|z)p_t(z|x)dz \quad (\text{A.5})$$

我们可以利用贝叶斯公式 $p_t(z|x) = \frac{p_t(x|z)p(z)}{p_t(x)}$ 转化一下上述边缘向量场公式，得到

$$v_t^{target}(x) = \int_z v_t^{target}(x|z) \frac{p_t(x|z)p_1(z)}{p_t(x)} dz \quad (\text{A.6})$$

这个表达式在后面证明时会用到。

接下来就来证明为什么边缘向量场的公式是那样的。我们需要验证的是这个边缘向量场公式符合连续性方程：

$$\frac{\partial p_t(x)}{\partial t} + \nabla \left(p_t(x)v_t^{target}(x) \right) = 0 \quad (\text{A.7})$$

证明

定理 A.1 (连续性方程): 设存在流，其质量场为 ρ ，速度场为 \mathbf{v} ，时间变量为 t ，则流场满足：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (\text{A.8})$$

连续性方程第一项，概率密度对时间求导，代入边缘概率的公式

$$\frac{\partial p_t(x)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \int_z p_t(x|z)p_1(z)dz \quad (\text{A.9})$$

然后将求导符号移入积分符号，其中 $p(z)$ 可以看做常数项

$$= \int_z \frac{\partial p_t(x|z)}{\partial t} p_1(z) dz \quad (\text{A.10})$$

偏导部分满足连续方程，可代入

$$= \int_z -\nabla \left(p_t(x|z)v_t^{target}(x|z) \right) p_1(z) dz \quad (\text{A.11})$$

因为散度计算是对 x 进行的，而这里的积分是对 z 进行的，所以可以将散度符号移到积分号外边

$$= -\nabla \left(\int_z p_t(x|z)v_t^{target}(x|z)p_1(z)dz \right) \quad (\text{A.12})$$

下一步在积分号外乘 $p_t(x)$ ，在积分号内除 $p_t(x)$ ，得到

$$= -\nabla \left(p_t(x) \int_z v_t^{target}(x|z) \frac{p_t(x|z)p_1(z)}{p_t(x)} dz \right) \quad (\text{A.13})$$

可以发现这里的积分项就是我们之前定义的边缘向量场公式，故上式为

$$= -\nabla \left(p_t(x) v_t^{target}(x) \right) \quad (\text{A.14})$$

证明完毕。 ■

故上述流匹配过程在未来预测上应满足连续性方程，从而保证了通过条件流匹配学习得到的边缘向量场的正确性。同时，可以保证自车和周车存在概率在宏观扩散过程中保持一致，即使原本集中的概率扩散到更宽阔的道路空间中以更低的概率存在。

A.1.2 Trailer-MEI 指标推导计算

目前一维替代安全指标（Surrogate Safety Index, SSI）如碰撞时间（Time to Collision, TTC）、车头时距（Time Head Way, THW）等仅在跟车情况下有效，不考虑车辆真实宽度与几何形状，对二维空间中的碰撞无法有效监测；而二维碰撞指标如 RTTC 虽考虑二维几何形状，对斜碰等问题可以探测，但计算过于乐观且不考虑不同撞击重叠面积风险的不同。Cheng 等震碎上述问题在 2024 年提出紧急因子（Emergency Index, EI）^[A.1] 安全评价指标，并在 2025 年进一步提出修正紧急因子（Modified Emergency Index, MEI）^[A.2]。

MEI 通过计算侵入距离（InDepth）来评估车辆最大的安全损失，计算紧急操作时间（Time for Emergency Manoeuvre, TEM）即可用于规避风险的操作时间来衡量风险的紧急程度，其定义为：

$$\text{MEI} = \frac{\text{InDepth}}{\text{TEM}} \quad (\text{A.15})$$

其中 InDepth 如图 A.1 所示，定义为自车和周车都匀速直线运动的前提下，将周车在未来无限时域内的空间位置投影在自车坐标系下以后，自车轮廓与周车投影相交的最大距离。当沿着匀速直线运动可能发生碰撞时，InDepth 大于 0，否则 InDepth 小于 0。TEM 定义为自车和周车都匀速直线运动的前提下，两车轮廓

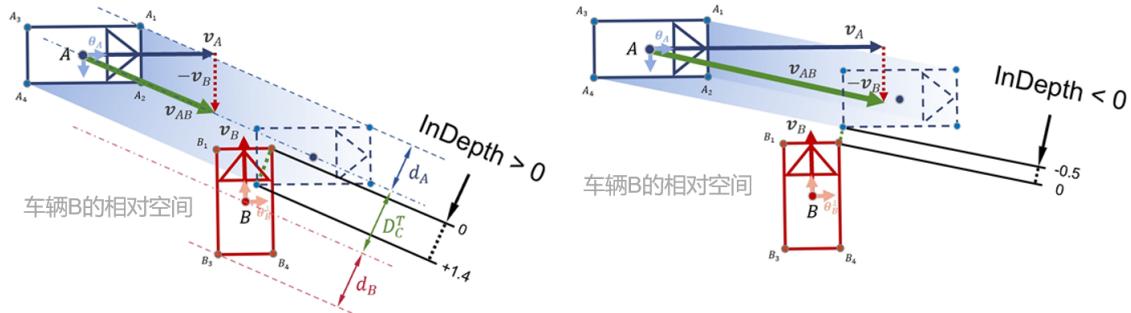


图 A.1 InDepth 概念描述

最早发生重叠的时间，若不发生重叠则 TEM = ∞ 。

MEI 经过对比测试，相比于现有二维 SSI 能够有效反映车辆实际风险，且计算速度很快，经过 C++ 编译后单次计算时间大约在 $6\mu\text{s} \sim 10\mu\text{s}$ 。但 MEI 仍存在一些问题，如其匀速直线运动假设过强，且针对如环岛等匀速恒定前轮转角的情况适用性较差，以及针对本文而言，其无法计算辆车中其一或全部为半挂车时的风险，即只能针对两辆单车计算风险。为对包含挂车的车辆对（Vehicle Pair）计算 MEI 指标，本文提出 Trailer-MEI 方法。

假设半挂车的牵引车部分匀速直线运动，挂车后轴轨迹为曳物线（tractrix），如图 A.2 所示，设铰接角为 γ ，牵引车车速为 v_{1x} ，其解析形式可描述为式 (A.16) 到式 (A.18)。其中铰接角随时间变化为 $\theta(t)$ 如式 (A.16) 所示，则牵引车轨迹直线为式 (A.17)，挂车曳物线为式 (A.18)。

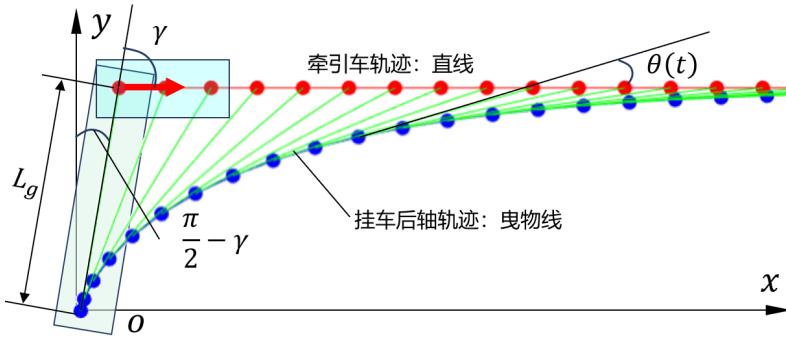


图 A.2 挂车曳物线轨迹

$$\theta(t) = \pi - 2 \arctan \left(\tan \frac{\pi - \gamma}{2} e^{\frac{v_{1x}}{L_g} t} \right) \quad (\text{A.16})$$

$$x_{\text{tractor}}(t) = v_{1x} t + L_g \cos \gamma, \quad y_{\text{tractor}}(t) = L_g \sin \gamma \quad (\text{A.17})$$

$$x_{\text{trailer}}(t) = -L_g \left(\ln \left(\tan \frac{\theta(t)}{2} + \cos \theta(t) \right) \right) + L_g \left(\ln \left(\tan \frac{\gamma}{2} + \cos \gamma \right) \right) \quad (\text{A.18})$$

$$y_{\text{trailer}}(t) = -L_g (\sin \theta(t) - \sin \gamma)$$

由于将曳物线根据相对自车车速投影到坐标系后并没有和直线相交的解析解存在，故需采用数值方法进行近似。为计算在曳物线上距离均匀划分的采样点，如图 A.3(a)所示，采用对时间 t 进行均匀划分的方法，得到 N_{pred} 个时间点 $t_1, t_2, \dots, t_{N_{\text{pred}}}$ 对应的角度 $\theta(t)$ ，从而可以计算出 N_{pred} 个挂车轮廓位置 $B_g^k, k \in \{1, 2, \dots, N_{\text{pred}}\}$ 。可包含半挂车的车辆对共有三种情况：全无挂车、其一有挂车、两者都有挂车。对于第一种情况可以直接采用 MEI 进行计算；对第二种情形，假设 A 车为半挂车 B 车为单车，需要计算 A 车牵引车与 B 车的 MEI，以及利用离散的时间分别将平移后的 A 车挂车轮廓 $B_g^{k,*}$ 与 B 车车头轮廓 B_{veh} 进行 N_{pred} 次碰撞检测

与 InDepth 计算, InDepth 解析计算方法见^[A.2], 假设 t_k 时刻挂车发生碰撞, 则挂车与自车计算的等效 MEI 指标为 $\tilde{MEI} = \frac{\text{InDepth}}{t_k}$, 最终取 Trailer-MEI = $\max(\tilde{MEI}, MEI)$; 对于第三种情况, 需要验证 A 车与 B 车车头的 MEI, 以及 A 车车头与 B 车挂车、B 车车头与 A 车挂车在第二种情况的 \tilde{MEI}_1 和 \tilde{MEI}_2 , 并分别对两车挂车在 N_{pred} 个时刻的绝对轮廓进行 InDepth 计算, 计算过程不再赘述, 最终取 4 者中最大者为此情况的 Trailer-MEI。

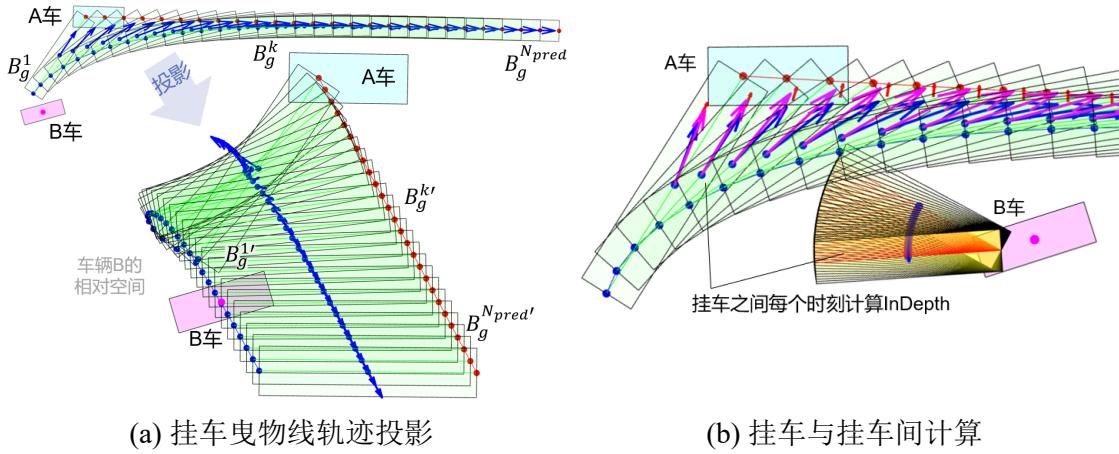


图 A.3 包含挂车的计算示意

在最坏情况, 即需计算 SSI 的辆车都为半挂车时, Trailer-MEI 指标的计算时间仅为 MEI 的 6 倍, C++ 编译后单次计算时间大约在 $30\ \mu\text{s} \sim 50\ \mu\text{s}$, 在实现半挂车间计算的同时计算时间依然可以忽略。本文为平衡精度与计算速度, 计算 Trailer-MEI 指标采用的离散步长 $\Delta t = 0.2\ \text{s}$, 预测时域为 $5\ \text{s}$ 。

A.2 插图

A.3 表格

表 A.1 仿真训练与验证场景设置

路口	序号	名称	t_{depr}	t_{start}	终止点	q_{main}	q_{merge}	q_{exit}	q_{avg}	用途
No.1	1	pass_1	280	287	(3377, 125023)	2250	1125	1125	4500	验证
	2	merge_1	120	230	(3377, 125023)	2250	1125	1125	4500	验证
	3	exit_1	120	140	(1353, 127222)	2250	1125	1125	4500	验证
	4	cruise_1	120	210	(6628, 122202)	2250	1125	1125	4500	验证
No.2	5	pass_2	50	150	(8827, 121224)	2000	1000	1000	4000	验证
	6	merge_2	120	125	(8827, 121224)	2000	1000	1000	4500	验证
	7	exit_2	120	190	(7084, 121972)	2000	1000	1000	4500	验证

附录 A 补充内容

续表 A.1 仿真训练与验证场景设置

路口	序号	名称	t_{depr}	t_{start}	终止点	q_{main}	q_{merge}	q_{exit}	q_{avg}	用途
	8	cruise_2	120	225	(13358, 119455)	2000	1000	1000	4500	验证
No.3	9	pass_3	100	145	(15097, 118843)	1750	875	875	3500	验证
	10	merge_3	100	160	(15097, 118843)	1750	875	875	3500	验证
	11	exit_3	100	120	(13647, 119360)	1750	875	875	3500	验证
	12	cruise_3	100	450	(26200, 113761)	1750	875	875	3500	验证
No.4	13	pass_4	150	160	(35853, 108391)	1500	750	750	3000	验证
	14	merge_4	150	185	(35853, 108391)	1500	750	750	3000	验证
	15	exit_4	150	190	(34593, 108938)	1500	750	750	3000	验证
	16	cruise_4	150	250	(42564, 102705)	1500	750	750	3000	验证
No.5	17	pass_5	150	165	(44006, 101780)	1250	625	625	2500	验证
	18	merge_5	150	230	(44004, 101780)	1250	625	625	2500	验证
	19	exit_5	150	160	(43231, 02663)	1250	625	625	2500	验证
	20	cruise_5	150	240	(49888, 07671)	1250	625	625	2500	验证
No.6	21	pass_6	150	190	(51242, 95154)	1000	500	500	2000	验证
	22	merge_6	150	155	(51242, 95154)	1000	500	500	2000	验证
	23	exit_6	150	160	(50189, 96489)	1000	500	500	2000	验证
	24	cruise_6	150	220	(58738, 87984)	1000	500	500	2000	验证
No.7	25	pass_7	150	170	(60200, 86293)	750	375	375	1500	验证
	26	merge_7	150	160	(60200, 86293)	750	375	375	1500	验证
	27	exit_7	150	310	(59676, 78847)	750	375	375	1500	验证
	28	cruise_7	150	310	(69330, 89515)	750	375	375	1500	验证
No.8	29	pass_8	100	130	(70907, 78147)	1250	1125	1125	4500	训练
	30	merge_8	100	130	(70907, 78147)	1250	1125	1125	4500	训练
	31	exit_8	100	130	(69498, 79025)	1250	1125	1125	4500	训练
	32	cruise_8	100	130	(74891, 72481)	1250	1125	1125	4500	训练
No.9	33	pass_9	120	150	(75573, 70800)	2000	1000	1000	4000	训练
	34	merge_9	120	150	(75573, 70800)	2000	1000	1000	4000	训练
	35	exit_9	120	150	(74896, 71940)	2000	1000	1000	4000	训练
	36	cruise_9	120	150	(85038, 58160)	2000	1000	1000	4000	训练
No.10	37	pass_10	100	130	(92050, 46785)	1750	875	875	3500	训练
	38	merge_10	100	130	(92050, 46785)	1750	875	875	3500	训练
	39	exit_10	100	130	(92054, 48293)	1750	875	875	3500	训练
	40	cruise_10	100	130	(96740, 37970)	1750	875	875	3500	训练
No.11	41	pass_11	150	180	(98075, 37971)	1500	750	750	3000	训练
	42	merge_11	150	180	(98075, 37971)	1500	750	750	3000	训练
	43	exit_11	150	180	(97180, 30472)	1500	750	750	3000	训练
	44	cruise_11	150	180	(34068, 110111)	1500	750	750	3000	训练
No.12	45	pass_12	150	180	(99643, 35167)	1250	625	625	2500	训练
	46	merge_12	150	180	(99643, 35167)	1250	625	625	2500	训练

续表 A.1 仿真训练与验证场景设置

路口	序号	名称	t_{depr}	t_{start}	终止点	q_{main}	q_{merge}	q_{exit}	q_{avg}	用途
	47	exit_12	150	180	(98931, 36237)	1250	625	625	2500	训练
	48	cruise_12	150	180	(104324, 24317)	1250	625	625	2500	训练
No.13	49	pass_13	150	180	(104781, 21843)	1000	500	500	2000	训练
	50	merge_13	150	180	(104781, 21843)	1000	500	500	2000	训练
	51	exit_13	150	180	(104332, 22626)	1000	500	500	2000	训练
	52	cruise_13	150	180	(107112, 14877)	1000	500	500	2000	训练
No.14	53	pass_14	150	180	(107705, 13226)	750	375	375	1500	训练
	54	merge_14	150	180	(107705, 13226)	750	375	375	1500	训练
	55	exit_14	150	180	(107203, 14112)	750	375	375	1500	训练
	56	cruise_14	150	180	(111286, 6653)	750	375	375	1500	训练
No.15	57	pass_15	150	180	(112301, 4704)	500	250	250	1000	训练
	58	merge_15	150	180	(112301, 4704)	500	250	250	1000	训练
	59	exit_15	150	180	(111604, 5761)	500	250	250	1000	训练
	60	cruise_15	150	180	(108764, 3804)	500	250	250	1000	训练

表 A.2 交通流仿真分任务得分情况 (mean \pm SEM)

Task	Reward term	IDM+MOBIL	TreeSearch	Graphflow
Task 1	Safe-1/TTC	-4.04 \pm 0.42	-3.84 \pm 0.27	-3.59\pm0.23
	Safe-MEI	-16.14 \pm 9.55	-2.17 \pm 0.52	-1.69\pm0.37
	Safe-RTTC	-0.93 \pm 0.14	-0.91 \pm 0.12	-0.68\pm0.11
	Safe-1/HW	-82.65 \pm 8.03	-62.00 \pm 4.84	-54.74\pm3.93
	Safe Reward	-103.76 \pm 12.56	-68.92 \pm 5.12	-60.70\pm4.27
	Effi Reward	183.15 \pm 5.03	198.16 \pm 5.58	198.75\pm5.39
	Navi-Lane	22.53\pm1.00	21.67 \pm 0.78	21.86 \pm 0.75
	Navi-Mission	2.86 \pm 2.01	88.57 \pm 3.83	95.71\pm2.44
	Navi Reward	25.39 \pm 2.36	110.24 \pm 3.84	117.57\pm2.58
	Comf Reward	-19.39 \pm 0.94	-18.34 \pm 0.68	-18.27\pm0.68
Task 2	Total Reward	85.38 \pm 13.46	221.13 \pm 7.27	237.35\pm6.02
	Safe-1/TTC	-1.43\pm0.12	-1.58 \pm 0.12	-1.87 \pm 0.13
	Safe-MEI	-26.79 \pm 11.12	-1.51\pm0.25	-2.99 \pm 0.84
	Safe-RTTC	-0.99 \pm 0.09	-0.73\pm0.07	-0.82 \pm 0.08
	Safe-1/HW	-35.22 \pm 3.25	-18.90 \pm 2.28	-17.45\pm2.44
	Safe Reward	-64.44 \pm 11.14	-22.71\pm2.41	-23.14 \pm 2.74
	Effi Reward	110.80 \pm 6.37	114.58 \pm 5.97	116.03\pm6.08
	Navi-Lane	14.46 \pm 0.69	15.48 \pm 0.71	16.77\pm0.73
	Navi-Mission	97.14 \pm 2.01	100.00\pm0.00	100.00\pm0.00
	Navi Reward	111.60 \pm 2.36	115.48 \pm 0.71	116.77\pm0.73
	Rule Reward	25.15 \pm 2.30	26.19 \pm 2.19	26.31\pm2.39
	Comf Reward	-11.42 \pm 0.58	-11.11\pm0.56	-11.18 \pm 0.54

附录 A 补充内容

续表 A.2 交通流仿真分任务得分情况 (mean \pm SEM)

Task	Reward term	IDM+MOBIL	TreeSearch	Graphflow
	Total Reward	171.70 \pm 14.83	222.42 \pm 6.43	224.80\pm7.27
Task 3	Safe-1/TTC	-3.10 \pm 0.17	-2.82\pm0.14	-3.16 \pm 0.18
	Safe-MEI	-12.42 \pm 5.45	-0.90\pm0.14	-1.37 \pm 0.29
	Safe-RTTC	-0.61 \pm 0.08	-0.26\pm0.04	-0.39 \pm 0.06
	Safe-1/HW	-41.23 \pm 3.13	-24.28\pm2.14	-27.34 \pm 2.35
	Safe Reward	-57.36 \pm 6.29	-28.26\pm2.19	-32.25 \pm 2.44
	Effi Reward	105.90 \pm 6.11	114.89 \pm 5.68	115.86\pm5.58
	Navi-Lane	15.77\pm0.66	14.74 \pm 0.58	15.59 \pm 0.65
	Navi-Mission	98.57 \pm 1.43	100.00\pm0.00	100.00\pm0.00
	Navi Reward	114.34 \pm 1.69	114.74 \pm 0.58	115.59\pm0.65
	Rule Reward	31.29\pm1.90	26.81 \pm 1.63	26.75 \pm 1.85
Task 4	Comf Reward	-12.85 \pm 0.46	-11.35\pm0.40	-11.72 \pm 0.40
	Total Reward	181.33\pm10.31	216.83 \pm 6.63	214.22 \pm 6.21
	Safe-1/TTC	-4.70 \pm 0.34	-4.10\pm0.26	-4.38 \pm 0.29
Task 4	Safe-MEI	-3.00 \pm 0.73	-1.55 \pm 0.24	-1.38\pm0.17
	Safe-RTTC	-0.70 \pm 0.13	-0.62 \pm 0.07	-0.57\pm0.06
	Safe-1/HW	-176.83 \pm 9.12	-135.01\pm7.39	-141.76 \pm 7.12
	Safe Reward	-185.23 \pm 9.47	-141.28\pm7.59	-148.09 \pm 7.25
	Effi Reward	547.09 \pm 17.74	559.02\pm17.30	554.70 \pm 18.17
	Navi-Lane	46.24\pm1.54	45.86 \pm 1.49	46.09 \pm 1.60
	Navi-Mission	1.43 \pm 1.43	72.86 \pm 5.35	84.29\pm4.38
	Navi Reward	47.67 \pm 2.16	118.72 \pm 4.68	130.37\pm3.63
	Rule Reward	151.05 \pm 7.44	168.74\pm5.89	157.62 \pm 7.21
	Comf Reward	-46.06 \pm 1.47	-45.62\pm1.39	-45.68 \pm 1.47
	Total Reward	514.52 \pm 23.24	659.59\pm19.52	648.93 \pm 21.99

表 A.3 交通流仿真分流量得分情况 (mean \pm SEM)

Flow (veh/h)	Reward term	IDM+MOBIL	TreeSearch	Graphflow
4500	Safe-1/TTC	-4.47 \pm 0.71	-3.57 \pm 0.44	-3.39\pm0.35
	Safe-MEI	-2.75 \pm 0.80	-1.76\pm0.30	-2.65 \pm 0.61
	Safe-RTTC	-1.17 \pm 0.15	-0.92\pm0.12	-1.00 \pm 0.13
	Safe-1/HW	-121.10 \pm 12.19	-79.61 \pm 9.10	-74.66\pm8.29
	Safe Reward	-129.48 \pm 13.10	-85.86 \pm 9.27	-81.70\pm8.49
	Effi Reward	224.15 \pm 20.62	257.37\pm21.30	248.41 \pm 19.29
	Navi-Lane	27.23\pm1.73	27.01 \pm 1.61	26.74 \pm 1.52
	Navi-Mission	52.50 \pm 8.00	90.00 \pm 4.80	97.50\pm2.50
	Navi Reward	79.73 \pm 6.65	117.01 \pm 4.75	124.24\pm2.91
	Rule Reward	49.18 \pm 7.87	58.28\pm9.30	51.02 \pm 7.97
	Comf Reward	-25.60 \pm 1.77	-24.38 \pm 1.69	-23.76\pm1.58
	Total Reward	197.98 \pm 28.37	322.41\pm26.71	318.21 \pm 22.10

附录 A 补充内容

续表 A.3 交通流仿真分流量得分情况 (mean \pm SEM)

Flow (veh/h)	Reward term	IDM+MOBIL	TreeSearch	Graphflow
4000	Safe-1/TTC	-3.13 \pm 0.30	-2.92 \pm 0.28	-2.82\pm0.24
	Safe-MEI	-19.19 \pm 8.29	-2.74 \pm 0.83	-2.56\pm0.77
	Safe-RTTC	-1.09 \pm 0.23	-0.74\pm0.10	-0.80 \pm 0.11
	Safe-1/HW	-92.12 \pm 8.08	-61.43\pm6.29	-62.63 \pm 6.49
	Safe Reward	-115.53 \pm 10.11	-67.82\pm6.50	-68.81 \pm 6.54
	Effi Reward	183.22 \pm 15.37	198.06\pm15.70	193.86 \pm 14.40
	Navi-Lane	23.72\pm0.79	21.56 \pm 1.00	21.65 \pm 0.82
	Navi-Mission	50.00 \pm 8.01	95.00 \pm 3.49	100.00\pm0.00
	Navi Reward	73.72 \pm 7.40	116.56 \pm 3.42	121.65\pm0.82
	Rule Reward	37.20 \pm 4.82	41.14\pm6.07	35.77 \pm 5.02
3500	Comf Reward	-20.37 \pm 0.86	-18.86\pm1.06	-19.14 \pm 0.91
	Total Reward	158.24 \pm 12.92	269.08\pm17.18	263.32 \pm 13.17
	Safe-1/TTC	-2.90 \pm 0.26	-2.83\pm0.26	-3.30 \pm 0.28
	Safe-MEI	-63.06 \pm 24.50	-2.76\pm0.42	-4.77 \pm 1.25
	Safe-RTTC	-1.48 \pm 0.14	-1.17 \pm 0.16	-1.11\pm0.14
	Safe-1/HW	-84.28 \pm 13.73	-64.15\pm13.19	-66.83 \pm 12.05
	Safe Reward	-151.72 \pm 25.27	-70.91\pm13.51	-76.02 \pm 11.94
	Effi Reward	217.74 \pm 35.59	227.23 \pm 34.80	229.37\pm34.92
	Navi-Lane	23.45 \pm 2.59	23.81 \pm 2.36	24.17\pm2.41
	Navi-Mission	45.00 \pm 7.97	95.00\pm3.49	95.00\pm3.49
3000	Navi Reward	68.45 \pm 7.19	118.81 \pm 3.48	119.17\pm4.44
	Rule Reward	55.01\pm12.00	53.43 \pm 11.61	53.35 \pm 12.12
	Comf Reward	-21.25 \pm 2.78	-20.82\pm2.63	-20.82\pm2.73
	Total Reward	168.22 \pm 45.89	307.75\pm35.36	305.06 \pm 36.91
	Safe-1/TTC	-3.24 \pm 0.31	-2.96\pm0.28	-3.27 \pm 0.28
	Safe-MEI	-1.50 \pm 0.42	-1.08 \pm 0.29	-0.44\pm0.13
	Safe-RTTC	-0.61 \pm 0.15	-0.53 \pm 0.11	-0.35\pm0.07
	Safe-1/HW	-73.65 \pm 12.35	-61.42 \pm 9.19	-58.37\pm11.20
	Safe Reward	-78.99 \pm 12.48	-66.00 \pm 9.45	-62.43\pm11.35
2500	Effi Reward	260.07 \pm 37.21	253.20 \pm 34.42	264.12\pm37.18
	Navi-Lane	24.66 \pm 2.77	23.60 \pm 2.49	26.56\pm2.58
	Navi-Mission	52.50 \pm 8.00	100.00\pm0.00	100.00\pm0.00
	Navi Reward	77.16 \pm 6.55	123.60 \pm 2.49	126.56\pm2.58
	Rule Reward	58.11 \pm 12.92	56.19 \pm 12.54	59.99\pm13.54
	Comf Reward	-22.96 \pm 2.92	-21.28\pm2.72	-22.52 \pm 2.93
	Total Reward	293.39 \pm 34.55	345.71 \pm 38.04	365.73\pm39.82
	Safe-1/TTC	-2.01\pm0.17	-2.56 \pm 0.27	-2.43 \pm 0.23
	Safe-MEI	-6.73 \pm 2.73	-1.40 \pm 0.30	-0.92\pm0.19
	Safe-RTTC	-0.52 \pm 0.07	-0.45 \pm 0.07	-0.40\pm0.07
	Safe-1/HW	-48.46 \pm 8.90	-37.08\pm7.58	-38.62 \pm 7.76
	Safe Reward	-57.72 \pm 8.82	-41.50\pm7.82	-42.38 \pm 7.79
	Effi Reward	166.31 \pm 22.83	169.41 \pm 23.67	169.58\pm23.14

续表 A.3 交通流仿真分流量得分情况 (mean \pm SEM)

Flow (veh/h)	Reward term	IDM+MOBIL	TreeSearch	Graphflow
2000	Navi-Lane	16.61 \pm 1.72	17.08 \pm 1.71	18.03\pm1.72
	Navi-Mission	50.00 \pm 8.01	90.00 \pm 4.80	100.00\pm0.00
	Navi Reward	66.61 \pm 6.99	107.08 \pm 5.22	118.03\pm1.72
	Rule Reward	35.64 \pm 7.38	40.39\pm8.56	36.54 \pm 7.67
	Comf Reward	-14.80 \pm 1.85	-14.66 \pm 1.87	-14.46\pm1.82
	Total Reward	196.04 \pm 19.29	260.73 \pm 25.71	267.31\pm23.59
	Safe-1/TTC	-3.93 \pm 0.52	-3.33\pm0.34	-4.00 \pm 0.43
	Safe-MEI	-6.94 \pm 4.29	-0.40\pm0.08	-0.81 \pm 0.19
	Safe-RTTC	-0.39 \pm 0.07	-0.31\pm0.06	-0.33 \pm 0.05
	Safe-1/HW	-92.65 \pm 14.01	-63.95 \pm 9.85	-62.42\pm8.78
1500	Safe Reward	-103.91 \pm 14.75	-67.99 \pm 10.12	-67.56\pm9.20
	Effi Reward	310.64 \pm 38.04	316.99 \pm 40.05	319.19\pm39.38
	Navi-Lane	29.58 \pm 3.22	29.64 \pm 3.27	30.44\pm3.31
	Navi-Mission	50.00 \pm 8.01	75.00\pm6.93	75.00\pm6.93
	Navi Reward	79.58 \pm 6.43	104.64 \pm 3.79	105.44\pm3.75
	Rule Reward	62.71 \pm 12.91	67.59\pm14.27	66.13 \pm 13.91
	Comf Reward	-26.75 \pm 3.15	-26.14\pm3.20	-26.44 \pm 3.18
	Total Reward	322.27 \pm 34.53	395.08 \pm 39.24	396.75\pm38.07
	Safe-1/TTC	-3.55 \pm 0.38	-3.40\pm0.30	-3.53 \pm 0.33
	Safe-MEI	-1.94 \pm 0.67	-0.58\pm0.13	-0.85 \pm 0.23
1000	Safe-RTTC	-0.41 \pm 0.08	-0.30\pm0.04	-0.32 \pm 0.05
	Safe-1/HW	-75.63 \pm 13.77	-52.70\pm9.85	-58.71 \pm 11.53
	Safe Reward	-81.53 \pm 14.53	-56.98\pm10.15	-63.41 \pm 11.94
	Effi Reward	295.01 \pm 38.57	304.37\pm39.75	299.81 \pm 38.77
	Navi-Lane	28.01 \pm 2.93	28.38\pm2.87	27.94 \pm 2.83
	Navi-Mission	50.00 \pm 8.01	87.50 \pm 5.30	97.50\pm2.50
	Navi Reward	78.01 \pm 6.58	115.88 \pm 4.08	125.44\pm3.19
	Rule Reward	65.26 \pm 13.16	71.01\pm14.37	65.89 \pm 13.18
	Comf Reward	-25.28 \pm 3.17	-25.09\pm3.22	-24.83 \pm 3.17
	Total Reward	331.47 \pm 36.95	409.20\pm41.14	402.90 \pm 42.51

A.4 数学表达式

$$\frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} f = \sum_{k=1}^m n(\gamma; a_k) \mathcal{R}(f; a_k) \quad (\text{A.19})$$

A.5 文献引用

附录[A.3] 中的参考文献引用[A.4]示例[A.3-A.4]。

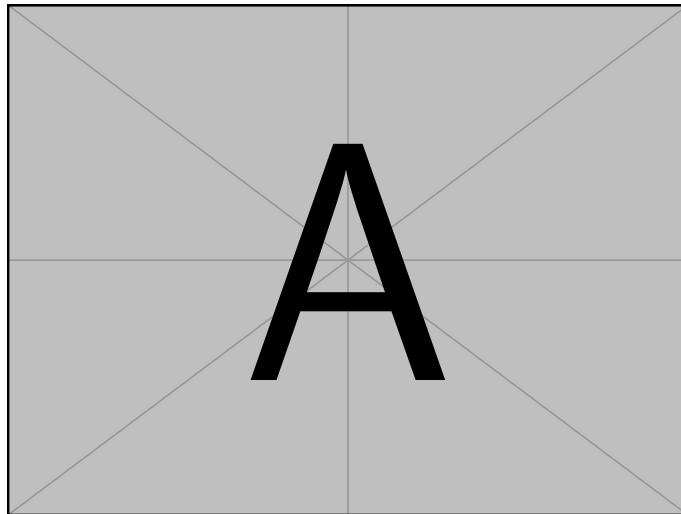


图 A.4 附录中的图片示例

参考文献

- [A.1] Cheng H, Jiang Y, Zhang H, et al. Emergency index (ei): A two-dimensional surrogate safety measure considering vehicles' interaction depth[J/OL]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2025, 174: 104289. DOI: 10.1016/j.trc.2025.104289.
- [A.2] Chen K, Cheng H, Jiang Y, et al. MEI: A motion-enhanced emergency index for surrogate safety assessment in complex interactions[C]//2025 IEEE 28th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). 2025: 1-8.
- [A.3] Dupont B. Bone marrow transplantation in severe combined immunodeficiency with an unrelated mhc compatible donor[C]//White H J, Smith R. *Proceedings of the third annual meeting of the International Society for Experimental Hematology*. Houston: International Society for Experimental Hematology, 1974: 44-46.
- [A.4] 郑开青. 通讯系统模拟及软件[D]. 北京: 清华大学无线电系, 1987.

致 谢

衷心感谢导师 ××× 教授和物理系 ×× 副教授对本人的精心指导。他们的言传身教将使我终生受益。

在美国麻省理工学院化学系进行九个月的合作研究期间，承蒙 Robert Field 教授热心指导与帮助，不胜感激。

感谢 ××××× 实验室主任 ××× 教授，以及实验室全体老师和同窗们学的热情帮助和支持！

本课题承蒙国家自然科学基金资助，特此致谢。

声 明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

签 名： _____ 日 期： _____