

清 华 大 学

综 合 论 文 训 练

题目：基于队列稳定性的混合车队碰撞风险演化机理研究

系 别：自动化系

专 业：自动化

姓 名：蔡宇哲

指 导 教 师：李 力 副教授

联合指导教师：裴 欣 副研究员

2022 年 5 月 6 日

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：学校有权保留学位论文的复印件，允许该论文被查阅和借阅；学校可以公布该论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存该论文。

(涉密的学位论文在解密后应遵守此规定)

签 名：_____ 导师签名：_____ 日 期：_____

中文摘要

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

第 1 章 引言	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外研究现状综述	2
1.2.1 跟驰行为建模研究现状	2
1.2.2 车队稳定性分析研究现状	3
1.2.3 车队碰撞风险评估指标研究现状	3
1.2.4 研究现状总结	3
1.3 课题研究目标与难点	3
1.3.1 研究目标	3
1.3.2 研究难点	3
1.4 论文结构及章节安排	3
第 2 章 仿真平台搭建及分析	4
2.1 跟驰行为建模	4
2.2 仿真平台的搭建	4
2.3 仿真平台真实性分析	6
第 3 章 碰撞样本分析	7
3.1 数学符号	7
3.2 数学公式	8
3.3 数学定理	8
第 4 章 非碰撞样本分析	9
4.1 顺序编码制	9
4.2 著者-出版年制	9
第 5 章 人类驾驶行为分析	10
5.1 数学符号	10
5.2 数学公式	11
5.3 数学定理	11

插图索引.....	12
表格索引.....	13
参考文献.....	14
附录 A 外文资料的书面翻译.....	17
附录 B 补充内容.....	29
致 谢.....	31
声 明.....	33
在学期间参加课题的研究成果.....	35

主要符号表

PI	聚酰亚胺
MPI	聚酰亚胺模型化合物, N-苯基邻苯酰亚胺
PBI	聚苯并咪唑
MPBI	聚苯并咪唑模型化合物, N-苯基苯并咪唑
PY	聚吡咙
PMDA-BDA	均苯四酸二酐与联苯四胺合成的聚吡咙薄膜
MPY	聚吡咙模型化合物
As-PPT	聚苯基不对称三嗪
MA sPPT	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
DMA sPPT	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
MS PPT	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	聚吡咙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
HMA sPPT	聚苯基不对称三嗪模型化合物的质子化产物
HMS PPT	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 electrophoresis)
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 引言

1.1 研究背景

根据世界卫生组织 (WHO) 2018 年发布的《2018 年全球道路安全现状报告》，全球每年交通事故死亡人数达到了 135 万。交通事故已经成为 5 至 29 岁人群的主要死亡原因。对于发展中国家，道路交通安全形势更加严峻。^[1] 根据国家统计局发布的数据，2022 年我国共发生交通事故 2.4 万余起，交通事故死亡人数总计 6.1 万余人，交通事故造成直接财产损失 13 余亿元。^[2]

随着科学技术的发展，自动驾驶技术日渐成熟，各大国内外公司和研究机构都表现出了对自动驾驶技术的浓厚兴趣。自动驾驶技术有望减轻驾驶员的驾驶负担、为残障人士和老人提供自动驾驶服务、提高道路交通安全、改善道路拥挤堵塞情况，并很可能在不远的未来成为影响交通状况、交通安全的重要元素。但自动驾驶汽车的加入，也会引入新的问题，一方面，随着自动驾驶技术的逐渐普及，可以预见将长期存在自动驾驶车辆和人工驾驶车辆共存的局面，这会使得交通路况更加复杂，引入更多的不确定性因素和安全隐患；另一方面，目前自动驾驶技术和测试手段仍然不够成熟，自动驾驶相关法律仍在完善之中，法律责任的确定比较模糊，这些问题使得人们仍然对自动驾驶心存顾虑。

近年来，美国电动汽车及能源公司特斯拉因为自动驾驶技术已发生多起安全事故。2018 年 5 月 8 日，在美国佛罗里达州劳德代尔堡，一辆 2014 年产的特斯拉汽车撞上混凝土墙并起火，造成 2 名高中生死亡，另有一名高中人受伤；2021 年 5 月 7 日，在中国广东省韶关市，一辆特斯拉汽车追尾一辆小型货车，造成前者驾驶人当场死亡。这些事故使得人们越来越关注自动驾驶的安全问题。

车队的控制有一个特殊的困难，称为“队列不稳定性”，即系统中的扰动沿着车队不断放大。自动驾驶技术的引入，使得人类可以更加精准地控制车辆，通过控制手段，可以使车队达到“稳定”。围绕车队稳定性，已经有非常丰富的研究。

直观感受上，车队中车辆在速度和位置上的波动是造成车辆碰撞的主要原因，前者可以用车队的队列稳定性来描述，后者可以用碰撞风险来描述，如果能够将二者建立联系，就能够用车队的队列稳定性预测碰撞风险，同时可以通过控制车队的队列稳定程度达到减小碰撞概率的目的，提高道路交通安全程度。

本研究旨在建立自动驾驶车辆和人工驾驶车辆混合车队情景下队列稳定性

与碰撞风险的关系，探究碰撞风险在车队中的演化机理，为车队的安全性分析提供理论基础。

1.2 国内外研究现状综述

1.2.1 跟驰行为建模研究现状

驾驶员的驾驶行为和所产生的车辆运行特征是研究交通流的基础。而非自由驾驶情况下，车辆直接的相互作用和导致的交通流变化则是研究的重点。

车辆运动行为主要可以分为车辆跟驰行为和换道行为两大类，跟驰模型的研究对象是前者。用数学模式对跟驰行为加以分析阐明，使得研究人员可以定量地描述跟驰行为，对现代交通的模拟有着重要的意义。跟驰模型研究主要是运用动力学、统计学等方法，利用驾驶行为问卷调查、模拟驾驶或自然驾驶实验的方式，对前车速度、加速度等行车特征变化引起后车的反应进行研究。

研究者提出了多种跟驰模型，下面分别进行简要介绍。

(1) 刺激-反应跟驰模型

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

注意有限增量符号 Δ 固定使用正体，模板提供了 `\increment` 命令。

小于等于号和大于等于号使用倾斜的字形 \leq 、 \geq 。

积分号使用正体，比如 \int 、 \oint 。

行间公式积分号的上下限位于积分号的上下两端，比如

$$\int_a^b f(x) \mathrm{d}x.$$

行内公式为了版面的美观，统一居右侧，如 $\int_a^b f(x) \mathrm{d}x$ 。

偏微分符号 ∂ 使用正体。

省略号 `\dots` 按照中文的习惯固定居中，比如

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

实部 **Re** 和虚部 **Im** 的字体使用罗马体。

1.2.2 车队稳定性分析研究现状

1.2.3 车队碰撞风险评估指标研究现状

1.2.4 研究现状总结

1.3 课题研究目标与难点

1.3.1 研究目标

1.3.2 研究难点

1.4 论文结构及章节安排

一篇学位论文的引言大致包含如下几个部分：1、问题的提出；2、选题背景及意义；3、文献综述；4、研究方法；5、论文结构安排。

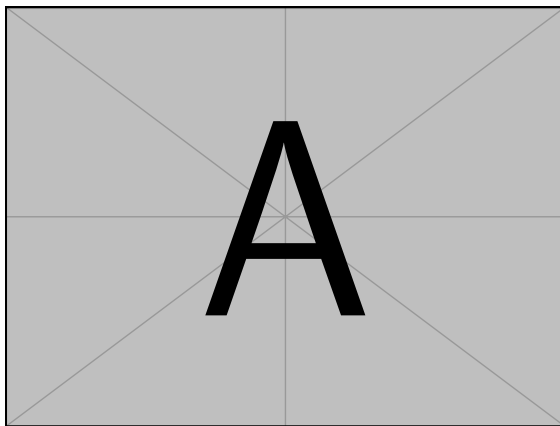
- 问题的提出：要清晰地阐述所要研究的问题“是什么”。^①
- 选题背景及意义：论述清楚为什么选择这个题目来研究，即阐述该研究对学科发展的贡献、对国计民生的理论与现实意义等。
- 文献综述：对本研究主题范围内的文献进行详尽的综合述评，“述”的同时一定要有“评”，指出现有研究状态，仍存在哪些尚待解决的问题，讲出自己的研究有哪些探索性内容。
- 研究方法：讲清论文所使用的学术研究方法。
- 论文结构安排：介绍本论文的写作结构安排。

^① 选题时切记要有“问题意识”，不要选不是问题的问题来研究。

第 2 章 仿真平台搭建及分析

2.1 跟驰行为建模

图片通常在 **figure** 环境中使用 `\includegraphics` 插入，如图 2.1 的源代码。建议矢量图片使用 **PDF** 格式，比如数据可视化的绘图；照片应使用 **JPG** 格式；其他的栅格图应使用无损的 **PNG** 格式。注意，**LaTeX** 不支持 **TIFF** 格式；**EPS** 格式已经过时。



国外的期刊习惯将图表的标题和说明文字写成一段，需要改写为标题只含图表的名称，其他说明文字以注释方式写在图表下方，或者写在正文中。

图 2.1 示例图片标题

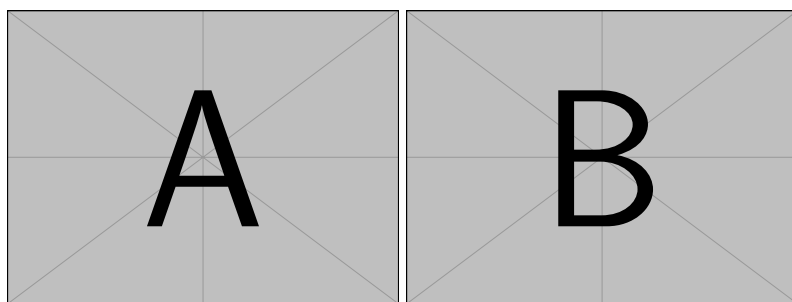
若图或表中有附注，采用英文小写字母顺序编号，附注写在图或表的下方。国外的期刊习惯将图表的标题和说明文字写成一段，需要改写为标题只含图表的名称，其他说明文字以注释方式写在图表下方，或者写在正文中。

如果一个图由两个或两个以上分图组成时，各分图分别以 (a)、(b)、(c)..... 作为图序，并须有分图题。推荐使用 **subcaption** 宏包来处理，比如图 2.2(a) 和图 2.2(b)。

2.2 仿真平台的搭建

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**



(a) 分图 A

(b) 分图 B

图 2.2 多个分图的示例

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

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			

2.3 仿真平台真实性分析

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

第 3 章 碰撞样本分析

3.1 数学符号

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 T_EX 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。

2. 小于等于号和大于等于号使用倾斜的字形 \leq 、 \geq 。
3. 积分号使用正体，比如 \int 、 \oint 。
4. 行间公式积分号的上下限位于积分号的上下两端，比如

$$\int_a^b f(x) \, dx.$$

行内公式为了版面的美观，统一居右侧，如 $\int_a^b f(x) \, dx$ 。

5. 偏微分符号 ∂ 使用正体。
6. 省略号 `\dots` 按照中文的习惯固定居中，比如

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

7. 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

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

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

^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。

英文论文的数学符号使用 $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ 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} ， $10^\circ\text{C} \sim 20^\circ\text{C}$ 。

3.2 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，建议使用 `\eqref` 命令，比如式 (5.1)。

$$\frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} f = \sum_{k=1}^m n(\gamma; a_k) \mathcal{R}(f; a_k) \quad (3.1)$$

注意公式编号的引用应含有圆括号，可以使用 `\eqref` 命令。

多行公式尽可能在“=”处对齐，推荐使用 `align` 环境。

$$a = b + c + d + e \quad (3.2)$$

$$= f + g \quad (3.3)$$

3.3 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 `thoerem`、`proof` 等环境。

定理 3.1 (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

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P \left(\frac{\sqrt{n}(\bar{X}_n - \mu)}{\sigma} \leq z \right) = \Phi(z), \quad (3.4)$$

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`、`remar`、`problem`、`conjecture` 这些相关的环境。

第 4 章 非碰撞样本分析

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。

4.1 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。

\cite{zhangkun1994}	⇒	[3]
\citet{zhangkun1994}	⇒	张昆 等 ^[3]
\citep{zhangkun1994}	⇒	[3]
\cite[42]{zhangkun1994}	⇒	[3] ⁴²
\cite{zhangkun1994,zhukezhen1973}	⇒	[3-4]

也可以取消上标格式，将数字序号作为文字的一部分。建议全文统一使用相同的格式。

\cite{zhangkun1994}	⇒	[3]
\citet{zhangkun1994}	⇒	张昆 等 [3]
\citep{zhangkun1994}	⇒	[3]
\cite[42]{zhangkun1994}	⇒	[3] ⁴²
\cite{zhangkun1994,zhukezhen1973}	⇒	[3-4]

4.2 著者-出版年制

著者-出版年制下的 \cite 跟 \citet 一样。

\cite{zhangkun1994}	⇒	张昆 等 (1994)
\citet{zhangkun1994}	⇒	张昆 等 (1994)
\citep{zhangkun1994}	⇒	(张昆 等, 1994)
\cite[42]{zhangkun1994}	⇒	(张昆 等, 1994) ⁴²
\citep{zhangkun1994,zhukezhen1973}	⇒	(张昆 等, 1994; 竺可桢, 1973)

注意，引文参考文献的每条都要在正文中标注^[3-36]。

第 5 章 人类驾驶行为分析

5.1 数学符号

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 T_EX 默认的美国数学会 (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。

2. 小于等于号和大于等于号使用倾斜的字形 \leq 、 \geq 。
3. 积分号使用正体，比如 \int 、 \oint 。
4. 行间公式积分号的上下限位于积分号的上下两端，比如

$$\int_a^b f(x) \mathrm{d}x.$$

行内公式为了版面的美观，统一居右侧，如 $\int_a^b f(x) \mathrm{d}x$ 。

5. 偏微分符号 ∂ 使用正体。
6. 省略号 `\dots` 按照中文的习惯固定居中，比如

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

7. 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

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

2. 微分号使用正体，比如 $\mathrm{d}y/\mathrm{d}x$ 。
3. 向量、矩阵和张量用粗斜体 (`\symbf`)，如 \boldsymbol{x} 、 $\boldsymbol{\Sigma}$ 、 \boldsymbol{T} 。
4. 自然对数用 $\ln x$ 不用 $\log x$ 。

^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。

英文论文的数学符号使用 $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ 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} ， $10^\circ\text{C} \sim 20^\circ\text{C}$ 。

5.2 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，建议使用 `\eqref` 命令，比如式 (5.1)。

$$\frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} f = \sum_{k=1}^m n(\gamma; a_k) \mathcal{R}(f; a_k) \quad (5.1)$$

注意公式编号的引用应含有圆括号，可以使用 `\eqref` 命令。

多行公式尽可能在“=”处对齐，推荐使用 `align` 环境。

$$a = b + c + d + e \quad (5.2)$$

$$= f + g \quad (5.3)$$

5.3 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 `thoerem`、`proof` 等环境。

定理 5.1 (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

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P \left(\frac{\sqrt{n}(\bar{X}_n - \mu)}{\sigma} \leq z \right) = \Phi(z), \quad (5.4)$$

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`、`remar`、`problem`、`conjecture` 这些相关的环境。

插图索引

图 2.1	示例图片标题	4
图 2.2	多个分图的示例	5

表格索引

表 2.1	三线表示例	5
表 2.2	带附注的表格示例	5
表 2.3	跨页长表格的表题	6

参考文献

- [1] Geneva: Global status report on road safety 2018: summary[R]. World Health Organization, 2018.
- [2] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [3] 张昆, 冯立群, 余昌钰, 等. 机器人柔性手腕的球面齿轮设计研究[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1994, 34(2): 1-7.
- [4] 竺可桢. 物理学论[M]. 北京: 科学出版社, 1973: 56-60.
- [5] 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.
- [6] 郑开青. 通讯系统模拟及软件[D]. 北京: 清华大学无线电系, 1987.
- [7] 姜锡洲. 一种温热外敷药制备方案: 中国, 88105607.3[P]. 1980-07-26.
- [8] 中华人民共和国国家技术监督局. GB3100-3102. 中华人民共和国国家标准-量与单位[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.
- [9] Merkt F, Mackenzie S R, Softley T P. Rotational autoionization dynamics in high rydberg states of nitrogen[J]. J Chem Phys, 1995, 103: 4509-4518.
- [10] Mellinger A, Vidal C R, Jungen C. Laser reduced fluorescence study of the carbon monoxide nd triplet rydberg series - experimental results and multichannel quantum defect analysis[J]. J Chem Phys, 1996, 104: 8913-8921.
- [11] Bixon M, Jortner J. The dynamics of predissociating high Rydberg states of NO[J]. J Chem Phys, 1996, 105: 1363-1382.
- [12] 马辉, 李俭, 刘耀明, 等. 利用 REMPI 方法测量 BaF 高里德堡系列光谱[J]. 化学物理学报, 1995, 8: 308-311.
- [13] Carlson N W, Taylor A J, Jones K M, et al. Two-step polarization-labeling spectroscopy of excited states of Na₂[J]. Phys Rev A, 1981, 24: 822-834.
- [14] Taylor A J, Jones K M, Schawlow A L. Scanning pulsed-polarization spectrometer applied to Na₂[J]. J Opt Soc Am, 1983, 73: 994-998.
- [15] Taylor A J, Jones K M, Schawlow A L. A study of the excited $1\Sigma_g^+$ states in Na₂[J]. Opt Commun, 1981, 39: 47-50.

- [16] Shimizu K, Shimizu F. Laser induced fluorescence spectra of the $a\ 3\Pi_u-X\ 1\Sigma_g^+$ band of Na_2 by molecular beam[J]. J Chem Phys, 1983, 78: 1126-1131.
- [17] Atkinson J B, Becker J, Demtröder W. Experimental observation of the $a\ 3\Pi_u$ state of Na_2 [J]. Chem Phys Lett, 1982, 87: 92-97.
- [18] Kusch P, Hessel M M. Perturbations in the $a\ 1\Sigma_u^+$ state of Na_2 [J]. J Chem Phys, 1975, 63: 4087-4088.
- [19] 广西壮族自治区林业厅. 广西自然保护区[M]. 北京: 中国林业出版社, 1993.
- [20] 霍斯尼. 谷物科学与工艺学原理[M]. 李庆龙, 译. 2 版. 北京: 中国食品出版社, 1989: 15-20.
- [21] 王夫之. 宋论[M]. 刻本. 金陵: 曾氏, 1865 (清同治四年) .
- [22] 赵耀东. 新时代的工业工程师[M/OL]. 台北: 天下文化出版社, 1998[1998-09-26]. <http://www.ie.nthu.edu.tw/info/ie.newie.htm>.
- [23] 全国信息与文献工作标准化技术委员会出版物格式分委员会. GB/T 12450-2001 图书书名页[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002: 1.
- [24] 全国出版专业职业资格考试办公室. 全国出版专业职业资格考试辅导教材: 出版专业理论与实务·中级[M]. 2014 版. 上海: 上海辞书出版社, 2004: 299-307.
- [25] World Health Organization. Factors regulating the immune response: Report of WHO Scientific Group[R]. Geneva: WHO, 1970.
- [26] Peebles P Z, Jr. Probability, random variables, and random signal principles[M]. 4th ed. New York: McGraw Hill, 2001.
- [27] 白书农. 植物开花研究[M]//李承森. 植物科学进展. 北京: 高等教育出版社, 1998: 146-163.
- [28] Weinstein L, Swertz M N. Pathogenic properties of invading microorganism[M]//Sodeman W A, Jr, Sodeman W A. Pathologic physiology: mechanisms of disease. Philadelphia: Saunders, 1974: 745-772.
- [29] 韩吉人. 论职工教育的特点[C]//中国职工教育研究会. 职工教育研究论文集. 北京: 人民教育出版社, 1985: 90-99.
- [30] 中国地质学会. 地质评论[J]. 1936, 1(1)-. 北京: 地质出版社, 1936-.
- [31] 中国图书馆学会. 图书馆学通讯[J]. 1957(1)-1990(4). 北京: 北京图书馆, 1957-1990.
- [32] American Association for the Advancement of Science. Science[J]. 1883, 1(1)-. Washington, D.C.: American Association for the Advancement of Science, 1883-.
- [33] 傅刚, 赵承, 李佳路. 大风沙过后的思考[N/OL]. 北京青年报, 2000-04-12(14)[2002-03-06]. <http://www.bjyouth.com.cn/Bqb/20000412/B/4216%5ED0412B1401.htm>.

- [34] 萧钰. 出版业信息化迈入快车道[EB/OL]. (2001-12-19)[2002-04-15]. <http://www.creader.com/news/20011219/200112190019.htm>.
- [35] Online Computer Library Center, Inc. About OCLC: History of cooperation[EB/OL]. [2000-01-08]. <http://www.oclc.org/about/cooperation.en.htm>.
- [36] Scitor Corporation. Project scheduler[CP/DK]. Sunnyvale, Calif.: Scitor Corporation, 1983.

附录 A 外文资料的书面翻译

车队的队列稳定性：定义和分析方法

摘要：由互相关联的自动驾驶车辆 (connected and automated vehicles, CAVs) 组成的车队预计将对道路交通产生变革性影响，例如提高高速公路安全性、提高交通效率和减少燃料消耗。控制车队时的一项关键任务是实现队列稳定性 (String Stability)，为此提出了许多模型和算法。但是，尽管这些年来针对队列稳定性提出了许多不同的定义和分析方法，但是没有进行详尽的比较。为了填补这些空白，本文旨在阐明这些模糊的定义与各种分析方法之间的关系，为今后的研究提供一个坚实的基础。本文总结和讨论了一系列等价的定义和算法，也讨论了不同分析方法和定义的优、缺点。所有这些讨论为在实际使用中选择车队的分析方法提供了见解。

A.1 引言

作为一种提高交通效率的有效方式，车队控制引起了广泛的兴趣。(Guanetti, Kim, and Borrelli, 2018; Horowitz and Varaiya, 2000; Ioannou and Chien, 1993; Li, Zheng, Li, and Wang, 2015; Sheikholeslam and Desoer, 1990; Shladover, 1995) 在一个车队中，由两辆及以上车辆组成的车队按照预先设置的巡航速度和车间距行驶。与人工驾驶相比，自动驾驶车队有着车与车之间的距离更小的优点（即队形更加紧密），被认为是一个很有希望的降低交通阻塞、空气阻力和燃油损耗的方法。(Al Alam, Gattami, and Johansson, 2010; Chien and Ioannou, 1992; Li and Chen, 2017)

车队的紧密编队控制有一个特殊的困难，称为“队列不稳定性”，即系统中的扰动沿着车队不断放大，如图 A.1 (b) 所示（参见 Peppard (1974)）。正如观察 (Treiterer and Myers, 1974) 和实验 (Sugiyama et al., 2008) 所证明的那样，紧密编队车队的队列不稳定性会导致在环形线路和高速公路上出现没有瓶颈的堵塞（例如，走走停停），这严重损害了车队控制的好处。

为了解决这个问题，队列稳定性的性质已经被广泛研究并应用于车队控制。直观地说，如果一个车队具有以下特性，则称它是队列稳定的，即扰动不会沿着车队被不断放大 (Peppard, 1974)，如图 A.1 (c) 所示。研究队列稳定性的基本过程可分为三个步骤：(1) 数学上定义队列稳定性的性质；(2) 根据分析方法推

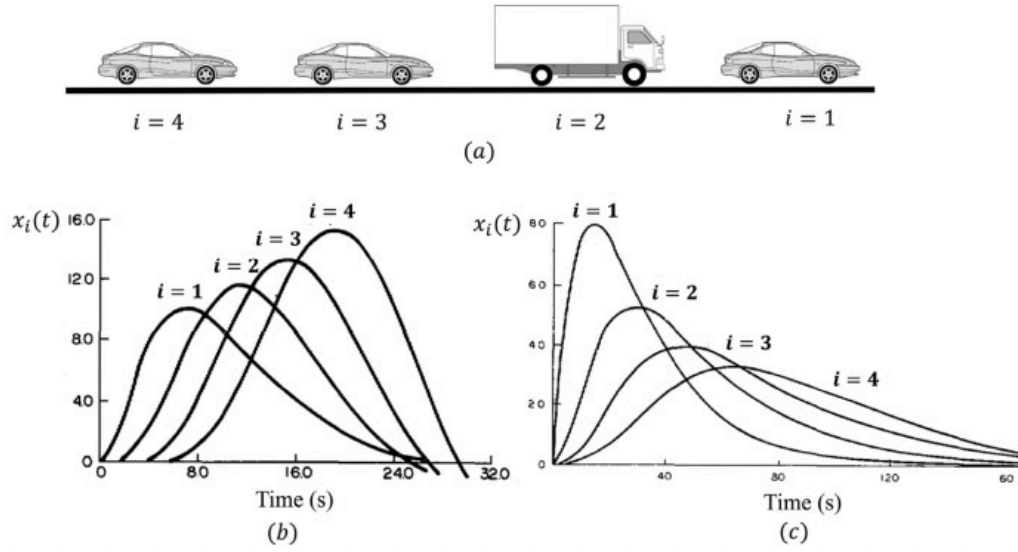


图 A.1 车队系统图示 (a) 和队列稳定性的直观描述 (b-c) (Peppard, 1974), 其中 $x_i(t)$ 表示车辆 i 在时间 t 的状态波动 (例如位置误差)。

导出充分条件; (3) 设计控制器以满足充分条件

A.1.1 研究动机

大量文献提出了很多种不同的定义和分析方法。在许多研究中, 虽然仿真结果显示出与图 A.1 (c) 相似的性质, 但队列稳定性的性质存在令人困惑的差异。许多不同的定义是基于不同的域 (例如频域和时域) 和范数 (例如 \mathcal{L}_2 、 \mathcal{L}_p 和 \mathcal{L}_∞)、强度 (例如弱和强)。模棱两可的定义阻碍了不同研究之间的比较。需要对它们之间的关系进行严格的分析以帮助进一步研究的进行。此外, 学者已经提出了许多分析方法并衍生了许多性质, 它们的关系、利弊以及可以解决什么问题尚未得到太多讨论。更好地理解这些方法和性质是进一步研究困难问题的基础。

A.1.2 研究范围和目的

本文重点介绍队列稳定性的定义和推导队列稳定性质的分析方法。为了更好地解释相关概念, 我们将简要介绍一些车队控制的研究工作。然而, 为了简明扼要, 本文将不讨论车队控制领域的其他问题。(Li et al., 2015; Li, Zheng et al., 2017)。

本文的目的是: (1) 阐明队列稳定性模糊定义之间的关系, 提出统一的定义; (2) 讨论各种分析方法的关系、利弊、可以解决什么问题, 并针对存在的棘手问题提出方法建议; (3) 深入研究各性质之间的关系, 这为解决队列不稳定的问题提供了思路。

A.1.3 主要贡献

本工作的主要贡献为：

第一，严格分析了模糊不清的定义之间的关系。对常用的定义进行了介绍和比较。总结了队列稳定性的三个基本属性，即收敛性、有界性和可扩展性。类似于控制理论中稳定性定义，本文提出了三种类型的队列稳定性定义作为不同定义之间的桥梁，即李雅普诺夫稳定性、输入-输出稳定性和输入-状态队列稳定性。定理 1 详细阐述了对这些队列稳定性定义的严格分析。受该定理的启发，建议将所提出的定义，即输入-状态队列稳定性 (ISSS) 用于未来的研究。并且给出了推荐 ISSS 的理由。本文扩展并深化了对该领域先前主要对定义的讨论。(Ploeg, Van De Wouw, and Nijmeijer, 2014; Stüdli, Seron, and Middleton, 2017)

第二，本文对各种分析方法进行了比较，并对通过使用这些分析方法推导得到的性质进行了严格的分析。这些方法可以分为三类：时间域分析方法、 z 域分析方法和 s 域分析方法。带分析的问题可分为时间维度和空间维度。本文分别从两个维度讨论了这些分析方法的优缺点，在此基础上我们推荐了针对现有困难问题的方法。此外，在定理 2 中对推导得到的性质进行了严格分析，从中展现了这些性质以及常用研究队列系统的推荐定义（即 ISSS）之间的关系。并将解决队列不稳定的常用解决方法与“弱耦合性质”进行了比较。

A.2 预备知识

记实数域为 \mathbb{R} ，自然数集 $\mathbb{N} = 1, 2, \dots$ ，对于向量 $\chi \in \mathbb{R}^n$ ，其 p 范数为

$$\|\chi\|_p = \left(\sum_{i=1}^n |\chi_i|^p \right)^{1/p}, p \in [1, \infty) \quad (\text{A.1})$$

$$\|\chi\|_\infty = \max_i |\chi_i|. \quad (\text{A.2})$$

对于一个勒贝格可测的信号 $\chi(t) : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ ，其 \mathcal{L}_p 范数 $\|\chi\|_{\mathcal{L}_p}^I$ 定义为

$$\|\chi\|_{\mathcal{L}_p}^I = \left(\int_I \|\chi\|_p^p dt \right)^{1/p} < \infty, p \in [1, \infty) \quad (\text{A.3})$$

$$\|\chi\|_{\mathcal{L}_\infty}^I = \sup_{t \in I} \|\chi\|_\infty, \quad (\text{A.4})$$

当 $I = [0, \infty]$ 时, $\|\chi\|_{\mathcal{L}_\infty}^{[0, \infty]}$ 简记为 $\|\chi\|_{\mathcal{L}_\infty}$ 。给定一个系统的传递函数 $G(j\omega)$, 系统的 \mathcal{H}_∞ 范数定义为

$$\|G\|_{\mathcal{H}_\infty} = \sup_{\omega} |G(j\omega)|, (\text{SISO}) \quad (\text{A.5})$$

$$\|G\|_{\mathcal{H}_\infty} = \sup_{\omega} \bar{\sigma}(G(j\omega)), (\text{MIMO}) \quad (\text{A.6})$$

SISO 代表单输入单输出系统, MIMO 代表多输入多输出系统。 $\bar{\sigma}(G(j\omega))$ 是矩阵 $G(j\omega)$ 的最大奇异值 (参见 Zhou, Doyle, Glover et al., 1996)。对于连续函数 $\alpha: [0, a) \rightarrow [0, \infty)$, $a \in \mathbb{R}^+$, 如果在其定义域上是严格单调递增的, 并且 $\alpha(0) = 0$, 那么我们称这个函数是 \mathcal{K} 类函数。对于连续函数 $\beta: [0, a) \times [0, \infty) \rightarrow [0, \infty)$, 如果对于每一个固定的 s , 函数 $\beta(\cdot, s)$ 是 \mathcal{K} 类函数, 并且对于每一个固定的 r , 函数 $\beta(r, \cdot)$ 在其定义域上是单调递减的, 且满足当 $s \rightarrow 0$ 时, $\beta(r, s) \rightarrow 0$, 那么我们称这个函数是 \mathcal{KL} 类函数。如果 $\|\chi\|_{\mathcal{L}_\infty} < \infty$, 我们称 $\chi \in \mathcal{L}_\infty$ 。

通常, 我们考虑一个车队

$$\dot{\chi} = f(\chi, \omega), \quad (\text{A.7})$$

$$y = g(\chi) \quad (\text{A.8})$$

这里, 函数 $f(\chi, \omega): \mathbb{R}^{mn} \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^{mn}$ 是连续可导且全局 Lipschitz 的, 函数 $g(\chi): \mathbb{R}^{mn} \rightarrow \mathbb{R}^m$ 是连续可导且全局 Lipschitz 的。 $\chi \in \mathbb{R}^{mn}$ 代表系统状态向量, $\omega \in \mathbb{R}^m$ 代表扰动。我们假设原点 $\chi = 0$ 是非受迫系统 $\dot{\chi} = f(\chi, 0)$ 的一个稳定平衡点。对于车队, $m \in \mathbb{N}$ 代表了车队长度, $n \in \mathbb{N}$ 代表子系统的状态阶数, 表A.1列出了这些符号的含义。

A.3 车队控制

本节简要介绍了车队的控制问题, 该问题引发了对队列稳定性的研究。车队的控制问题最初由 Levine 和 Athans 于 1966 年提出, 研究如何设计一个控制器来实现队列系统的控制。这包括队列系统描述、控制目标 and 控制器设计方法。并且介绍了本文的两个重点的背景, 即队列稳定性的定义和分析方法。

A.3.1 队列系统描述

车队系统的描述确定了队列稳定问题的研究场景。本文采用了由四个部分组成的框架 (Li et al., 2015), 即节点动力学、信息流拓扑结构、分布式控制和构成几何。此外, 还强调了系统的通信质量和收到的干扰。一个特定的车队系统可以

表 A.1 所用变量的符号

变量	符号
S_m	$S_m = \{0\} \cup \{i \in \mathbb{N} 1 \leq i \leq m-1\}.$
$S_{e,m}$	$S_m = \{i \in \mathbb{N} 1 \leq i \leq m-1\}.$
$\chi_i(t)$	$\chi_i(t) \in \mathbb{R}^n$ 代表第 i 个子系统的状态
$\omega_i(t)$	$\omega_i(t) \in \mathbb{R}$ 代表第 i 个子系统受到的扰动
$y_i(t)$	$y_i(t) \in \mathbb{R}$ 代表第 i 个子系统的输出
$\chi(t)$	$\chi(t) \in \mathbb{R}^{mn}$ 代表系统的状态
$\omega(t)$	$\omega(t) \in \mathbb{R}^m$ 代表系统受到的扰动
$y(t)$	$y(t) \in \mathbb{R}^m$ 代表系统的输出
$X_i(s), Y_i(s), U_i(s)$	$\chi_i(t), y_i(t), u_i(t)$ 的拉普拉斯变换
$X(s), Y(s), U(s)$	$\chi(t), y(t), u(t)$ 的拉普拉斯变换
$X(z), Y(z), U(z)$	$\chi(t), y(t), u(t)$ 的 z 变换

通过这六个部分来唯一确定，本小节中用到的缩写见表A.2中列出。

A.3.1.1 节点动力学

节点动力学（node dynamics, ND）表示车辆在纵向的动力学。根据建模，车辆动力学模型可分为非线性（Dunbar and Caveney, 2012; Rajamani, 2011），二阶模型（Naus, Vugts, Ploeg, van de Molengraft, and Steinbuch, 2010; Yanakiev and Kanellakopoulos, 1996），三阶模型（Godbole and Lygeros, 1994; Liang and Peng, 1999; Warnick and Rodriguez, 2000），和一般线性模型（Liang and Peng, 2000; Seiler, Pant, and Hedrick, 2004）。

A.3.1.2 信息流拓扑结构

信息流拓扑结构（information flow topology, IFT）描述了车辆如何与其他车辆交换信息。图A.2所示为常用的拓扑结构，包括前继跟随拓扑（PF）（Naus et al., 2010）、前继领导跟随拓扑（PLF）（Sheikholeslam and Desoer, 1990; Swaroop and Hedrick, 1999）、双向拓扑（BD）（Eyre, Yanakiev, and Kanellakopoulos, 1997; Ghasemi, Kazemi, and Azadi, 2013; Knorn, Donaire, Agüero, and Middleton, 2014; Yanakiev and Kanellakopoulos, 1996），双向领导拓扑（BDL）（Zheng, Li, Wang, Cao, and Li, 2016），双前继跟随拓扑（TPF）（Swaroop and Hedrick, 1999），以及

双前继领导跟随拓扑 (TPLF) (Li et al., 2015)。也可以应用更一般的信息流拓扑结构, 例如, r 前继跟随拓扑 (r PF) 和 r 前继领导跟随拓扑 (r PLF), 其中 r 表示有之交流的前继数量。

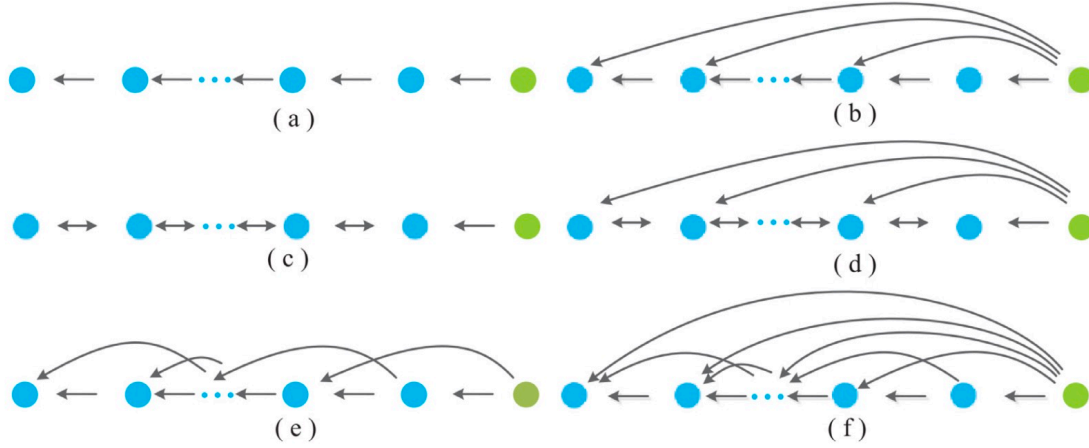


图 A.2 车队的典型信息流拓扑结构, 其中绿色圆圈表示头车。(a) PF; (b) PLF; (c) BD; (d) BDL; (e) TPF; (f) TPLF (Li et al., 2015)。

A.3.1.3 分布式控制器

分布式控制器 (distributed controller, DC) 描述了用于实现控制目标的对车队系统的控制器, 例如, 线性控制器 (Naus et al., 2010; Sheikholeslam and Desoer, 1993)、最优控制器 (Chu, 1974b; Jin and Orosz, 2017; Liang and Peng, 1999)、 H_∞ 控制器 (Ploeg, Shukla, van de Wouw, and Nijmeijer, 2014)、模型预测控制 (MPC) (Dolk, Ploeg, and Heemels, 2017; Dunbar and Caveney, 2012), 以及滑模控制 (SMC) (Fernandes and Nunes, 2012)。

A.3.1.4 构成几何

车队的构成几何 (formation geometry, FG) 表示车队所期望的车辆间距离, 在许多研究中也称为间距策略。现在存在三种主要政策, 即恒定距离 (constant distance, CD) 政策 (Liu, Goldsmith, Mahal, and Hedrick, 2001; Sheikholeslam and Desoer, 1993)、恒定时间间隔 (constant time headway, CTH) 政策 (Chien and Ioannou, 1992; Zhou and Peng, 2005), 以及非线性距离 (nonlinear distance, NLD) 政策 (Orosz, 2016; Santhanakrishnan and Rajamani, 2003)。

A.3.1.5 通信质量

通信质量 (communication quality, CQ) 描述了由其引起的问题, 即通信时间延迟 (di Bernardo, Salvi, and Santini, 2015; Liu et al., 2001; Oncu, Van de Wouw, Heemels, and Nijmeijer, 2012; Qin, Gomez, and Orosz, 2017; Xiao, Darbha, and Gao, 2008; Xiao, Gao, and Wang, 2009) 和丢包 (Moreau, 2005; Ploeg, Semsar-Kazerooni, Lijster, van de Wouw, and Nijmeijer, 2015; Teo, Stipanovic, and Tomlin, 2002; 2003)。

A.3.1.6 扰动

扰动是造成车队系统产生偏差的原因, 常用的扰动类型包括:

- 第一类: 头车的初始条件扰动;
- 第二类: 所有车辆的初始条件扰动;
- 第三类: 头车受到的零初始条件外部扰动;
- 第四类: 所有车辆受到的零初始条件外部扰动。

最后, 介绍两个车队系统的重要术语, 即同质性和无限性。如果所有车辆都具有相同的动力学特性, 则称该车队具有同质性 (Chu, 1974a); 否则称其具有异质性 (Naus 等, 2010)。此外, 如果车队有无限辆车辆组成, 则称其为无限的 (Swaroop and Hedrick, 1996); 否则称为有限的 (Jin and Orosz, 2014)。理论分析使得研究人员可以通常研究无限车队, 以研究由大量但有限辆车组成的车队的本质 (Curtain, Iftime, and Zwart, 2010; Jovanovic and Bamieh, 2005) 和车队的可扩展性。

A.3.2 控制目标

控制自动驾驶车辆车队的目的是确保同一组的所有车辆以一致的速度移动, 同时相邻车辆之间保持理想距离, 从而提高交通容量, 改善交通安全性, 并减少燃料消耗 (Horowitz and Varaiya, 2000)。车队系统的稳定性特性是上述所有控制目标的基础。研究人员已经提出了两种类型的稳定性, 个体稳定性和队列稳定性。

个体稳定性描述了车辆向给定轨迹收敛的情况 (Dolk et al., 2017; Dunbar and Caveney, 2012; Ghasemi et al., 2013; Guo, Ding, and Han, 2014; Ploeg, Shukla et al., 2014; Swaroop and Hedrick, 1999; Zheng, Li, Wang et al., 2016), 收敛速度由稳定系数描述 (Barooah, Mehta, and Hespanha, 2009; Hao and Barooah, 2012; Hao, Barooah, and Mehta, 2011; Zheng, Li, Li, and Wang, 2016)。然而, 随着长度的增加, 一个每个个体都稳定的车队仍然可能将一个小的扰动放大并造成交通拥堵 (例如走走停停) (Hedrick, Tomizuka, and Varaiya, 1994; Naus et al., 2010。Shaw and Hedrick, 2007b; Sugiyama et al., 2008)。

为了解决这个问题，研究人员提出了队列稳定性并对其做了大量研究。直观地说，如果扰动在沿车队向下游传播时不被放大，那么就可以说车队是队列稳定的（Peppard, 1974）。为了从数学上定义这一特性，在过去的几十年里，针对不同的车队系统提出了各种正式的队列稳定定义，例如（Jin and Orosz, 2014; Khatir and Davidson, 2004; Li, Shi, and Yan, 2016; Ploeg, Van De Wouw et al., 2014; Swaroop and Hedrick, 1996）。这些定义的详细情况将在下一节讨论，它们之间的关系是本文的一个重点。

A.3.3 控制器设计方法

设计一个车队控制器的关键是要实现控制目标，如个体稳定性和队列稳定性。

一类最常用的设计方法是预先确定一个反馈控制器并调整其参数以实现控制目标。数学上，实现队列稳定性被重新定义为传递函数需要满足的某些条件（Jin and Orosz, 2014; Naus et al., 2010; Orosz, 2016），或李雅普诺夫函数（Besselink and Johansson, 2017; Dolk et al., 2017; Swaroop and Hedrick, 1996）。这些方法的共同局限性是难以明确地满足饱和约束，如输入饱和和安全约束。

另一类设计方法是前馈控制（Li and Li, 2019; Liu, Li, Li, and Wang, 2017），例如分散模型预测控制（decentralized model predictive control, DMPC）方法（Dunbar and Caveney, 2012）。个体稳定性和队列稳定性的性质被显式约束。通过解决每个控制环节中的优化问题，控制器可以保证实现控制目标。

这两类方法的关键步骤是分析队列稳定性并推导出其充分条件。如果所设计的控制器满足其充分条件，则系统必然是队列稳定的。因此，队列稳定性质的分析方法是至关重要的，也是本文的另一个重点。

A.4 队列稳定性定义

本节介绍了车队控制问题中常用的队列稳定性的定义。队列稳定性定义的发展与车队系统的相关假设密切相关，并深深影响着分析方法。因此，在介绍一个新的定义时，将简要讨论具体的车队系统和分析方法。定义的缩写见表A.3。

A.4.1 队列稳定原始定义（OSS）

我们首先回顾 Chu(1974a)给出的队列稳定(original definition of string stability, OSS)的原始定义。

定义 A.1 (OSS): 如果对于车队中的所有车辆, 在初始时受到任意一组有界的扰动, 所有车辆的位置波动保持有界, 并且这些波动在 $t \rightarrow 0$ 时是趋于 0 的, 那么这个车队是稳定的。

如果受到的是有界的第一类或第二类干扰, 定义A.1 (OSS) 呈现了两个性质:

- 所有车辆位置波动的有界性;
- 所有车辆位置波动的收敛性。

为了使有界性非平凡, 其应该在车队有任何数量车辆的情况下均成立, 即:

- 有界性对于任意长度的车队均成立。

任意车队长度下的界限不变性是一个重要的性质, 它保证了队列稳定性的概念是可扩展的, 并且说明了从车队中增加或减少车辆是不影响稳定性的。在某些情况下, 收敛性也被称为个体稳定性。OSS 非常接近于对队列稳定性的直观描述 (Peppard, 1974), 只是位置波动不一定比受到的初始扰动小。位置波动可以被类推到其他系统状态的波动, 例如速度。OSS 的主要局限是在理论上不一定对一般车队系统可行。Chu(1974a) 提出的 z 变换方法只能用于具有同质 ND、IFT、DC、FG 和 CQ 的车队。

A.4.2 SFSS 与其变体 FSS、ESS、HTS

为了理论分析的方便, Peppard (1974) 提出了一个队列稳定在频域下的必要条件, 这个条件在之后对队列稳定的研究中得到了广泛的应用, 通常被认为是强弦稳定性的定义 (Naus et al., 2010)。因此, 我们把这个条件作为频域的强队列稳定 (strong frequency-domain string stability, SFSS) 的定义来介绍。

定义 A.2 (SFSS): 对于具有 PF 拓扑结构的线性车队系统, 我们称系统是频域的强队列稳定的 (SFSS), 如果第 i 辆车和其前车, 即第 $i-1$ 辆车, 之间的输出传递函数, 记作 $G_{i-1,i}$, 使得

$$\|G_{i-1,i}(j\omega)\|_{\mathcal{H}_\infty} \leq 1, \forall i \in S_{e,m}, \forall m \in \mathbb{N}. \quad (\text{A.9})$$

SFSS 的一个具体限制是关于车队系统的 PF 假设。SFSS 对于具有其他信息流拓扑结构的车队没有意义, 例如对于 BD, 公式A.9需要修改 (Peppard, 1974)。对于 r PF 和 r PLF 拓扑结构, 人们提出了三个修改的定义, 即频域队列稳定 (frequency-domain string stability, FSS) (Naus et al., 2010), 终态队列稳定 (eventual string stability, ESS) (Khatir and Davidson, 2004), 以及队首-队尾稳定 (head-to-tail stability, HTS) (Jin and Orosz, 2014; 2017)。

定义 A.3 (FSS): 对于具有 rPF 或 $rPLF$ 拓扑结构的线性车队系统，我们称系统是频域队列稳定的 (FSS)，如果头车 0 和任何其他车辆 i 之间的输出传递函数，记为 $G_{0,i}$ ，使得

$$\|G_{0,i}(j\omega)\|_{\mathcal{H}_\infty} \leq 1, \forall i \in S_{e,m}, \forall m \in \mathbb{N}. \quad (\text{A.10})$$

定义 A.4 (ESS): 对于具有 rPF 或 $rPLF$ 拓扑结构的线性车队系统，我们称系统是末态队列稳定的 (ESS)，如果头车 0 和任何其他车辆 i 之间的输出传递函数，记为 $G_{0,m}$ ，并且存在 $N < m$ ，使得

$$\|G_{0,i}(j\omega)\|_{\mathcal{H}_\infty} \leq 1, \forall i > N, \forall m \in \mathbb{N}. \quad (\text{A.11})$$

定义 A.5 (HTS): 对于具有 rPF 或 $rPLF$ 拓扑结构的线性车队系统，我们称系统是队首-队尾稳定的 (HTS)，如果头车 0 和任何其他车辆 i 之间的输出传递函数，记为 $G_{0,i}$ ，并且存在 $N < m$ ，使得

$$\|G_{0,m}(j\omega)\|_{\mathcal{H}_\infty} \leq 1, \forall m \in \mathbb{N}. \quad (\text{A.12})$$

FSS、ESS 和 HTS 都假定在车队中存在一个头车，这与实际情况是相符的。FSS 有时被称为弱队列稳定性，与 SFSS 相比，它在适用于更多的信息流拓扑结构。ESS 是 FSS 的一个特例，也就是说，如果一个系统是 FSS 的，那么它也是 ESS 的。HTS 最初是为混合交通设计的，在混合交通中相互通信的自动驾驶车辆一般在车队尾部 (Jin and Orosz, 2014; 2017)。

这些在频域中的定义的第一个局限性是其对车队系统的线性假设。这并不意味着节点动力被假设是线性的，但可以通过适当的非线性反馈方法使其近似线性，例如 Sheikholeslam 和 Desoer (1993)，Stankovic、Stanojevic 和 Siljak (2000)，Ghasemi 等人 (2013)，Zheng、Li、Wang 等人 (2016) 的工作，这需要对车辆动力学有很好的先验知识。

这些定义的第二个局限性是只考虑车队收到了第三类扰动。这个局限性产生于这些定义中拉普拉斯变换时用到的零初始条件假设。其他扰动类型的系统特性需要进一步分析。

第三个也是更关键的局限性是， $\|G_{0,m}(j\omega)\|_{\mathcal{H}_\infty} \leq 1$ 只能从能量 (即 \mathcal{L}_2 范数) 的角度来描述信号，而不是它们的最大振幅 (即 \mathcal{L}_∞ 范数)。其详细差异将

在下一节讨论。

A.4.3 TSS 和 ATSS

将队列稳定性的概念推广到一类相互连接的系统中，如

$$\dot{\chi}_i = f_i(\chi_i, \chi_{i-1}, \dots, \chi_{i-r}), \quad (\text{A.13})$$

其中, $i \in \mathbb{N}$, $\chi \in \mathbb{R}^n$, $\chi_{i-j} \equiv 0, \forall i \leq j$, 并且 $f(0, \dots, 0) = 0$, Swaroop 和 Hedrick (1996) 提出了时域队列稳定 (time-domain string stability, TSS) 和时域渐进队列稳定 (asymptotically time-domain string stability, ATSS)。

定义 A.6 (TSS): A.13 的原点 $\chi_i = 0, i \in \mathbb{N}$ 是 TSS 的, 如果给定任何 $\epsilon > 0$, 存在一个 $\delta > 0$, 使得

$$\sup_i |\chi_i(0)| < \delta \Rightarrow \sup_i \|\chi_i(t)\|_\infty < \epsilon. \quad (\text{A.14})$$

定义 A.7 (ATSS): A.13 的原点 $\chi_i = 0, i \in \mathbb{N}$ 是 ATSS 的, 如果其是 TSS 的且渐进地 $\sup_i \|\chi_i(t)\|_\infty \rightarrow 0$ 。

A.A 缩写表

表 A.2 对车队系统的描述的缩写

缩写	全称	缩写	全称
ND	节点动力学	IFT	信息流拓扑结构
PF	前继跟随拓扑	PLF	前继领导跟随拓扑
BD	双向拓扑	BDL	双向领导拓扑
TPF	双前继跟随拓扑	TPLF	双前继领导跟随拓扑
r PF	r 前继跟随拓扑	r PLF	r 前继领导跟随拓扑
DC	分布式控制器	MPC	模型预测控制
SMC	滑膜控制	FG	构成几何
CD	恒距	CTH	恒定车头时距
NLD	非线性距离	CQ	通信质量

表 A.3 队列稳定定义的缩写

缩写	全称	定义
OSS	队列稳定原始定义	1
SFSS	频域的强队列稳定	2
FSS	频域队列稳定	3
ESS	末态队列稳定	4
HTS	队首-队尾稳定	5
TSS	时域队列稳定	6
ATSS	时域渐进队列稳定	7
LPSS	\mathcal{L}_p 队列稳定	8
SLPSS	严格 \mathcal{L}_p 队列稳定	9
DSS	扰动队列稳定	10
LSS	李雅普诺夫队列稳定	11
ALSS	渐进李雅普诺夫队列稳定	12
IOSS	输入-输出队列稳定	13
ISSS	输入-状态队列稳定	14

参考文献

书面翻译对应的原文索引

- [1] David Salomon. *The advanced T_EXbook*. Springer, New York, 1995.

附录 B 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。

B.1 图表示例

B.1.1 图

附录中的图片示例（图 B.1）。

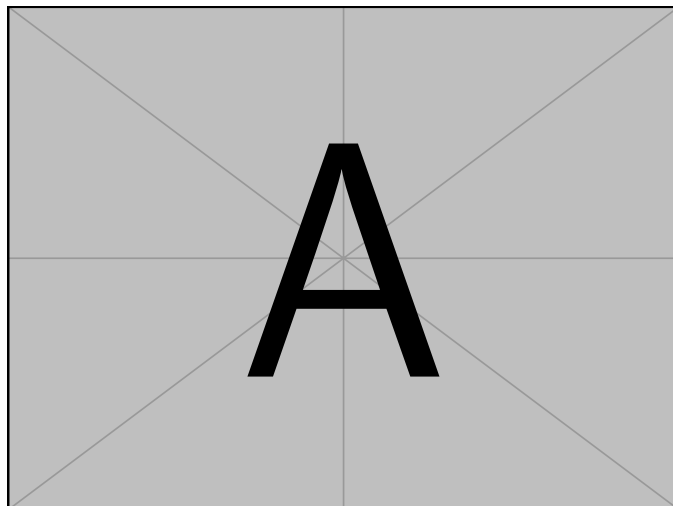


图 B.1 附录中的图片示例

B.1.2 表格

附录中的表格示例（表 B.1）。

B.2 数学公式

附录中的数学公式示例（公式（B.1））。

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

表 B.1 附录中的表格示例

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
thuthesis-*.bbx	BibLaTeX 参考文献表样式文件
thuthesis-*.cbx	BibLaTeX 引用样式文件

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：_____

在学期间参加课题的研究成果

个人简历

197×年××月××日出生于四川××县。

1992年9月考入××大学化学系××化学专业，1996年7月本科毕业并获得理学学士学位。

1996年9月免试进入清华大学化学系攻读××化学博士至今。

在学期间完成的相关学术成果

学术论文：

- [1] Yang Y, Ren T L, Zhang L T, et al. Miniature microphone with silicon-based ferroelectric thin films[J]. Integrated Ferroelectrics, 2003, 52:229-235.
- [2] 杨轶, 张宁欣, 任天令, 等. 硅基铁电微声学器件中薄膜残余应力的研究 [J]. 中国机械工程, 2005, 16(14):1289-1291.
- [3] 杨轶, 张宁欣, 任天令, 等. 集成铁电器件中的关键工艺研究 [J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(S4):192-193.
- [4] Yang Y, Ren T L, Zhu Y P, et al. PMUTs for handwriting recognition. In press[J]. (已被 Integrated Ferroelectrics 录用)

专利：

- [5] 任天令, 杨轶, 朱一平, 等. 硅基铁电微声学传感器畴极化区域控制和电极连接的方法: 中国, CN1602118A[P]. 2005-03-30.
- [6] Ren T L, Yang Y, Zhu Y P, et al. Piezoelectric micro acoustic sensor based on ferroelectric materials: USA, No.11/215, 102[P]. (美国发明专利申请号.)