

国之重器出版工程

制造强国建设

智能车辆先进技术丛书

Model Predictive Control for Self-driving Vehicles (2nd Edition)

无人驾驶车辆模型预测控制（第2版）

龚建伟 刘凯 齐建永 著　陈慧岩 主审

中国工信出版集团

北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

国之重器出版工程智能车辆先进技术丛书

无人驾驶车辆模型预测控制

（第2版）

龚建伟　刘　凯　齐建永　著
陈慧岩　主审

北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书主要介绍模型预测控制理论与方法在无人驾驶车辆路径规划与跟踪控制中的应用。由于模型预测控制理论数学推导比较抽象，所以初涉者往往需要较长时间的探索才能真正理解和掌握；进一步应用到具体研发项目，则需要更长的过程。本书详细介绍了应用模型预测控制理论进行无人驾驶车辆控制的基础方法，结合路径规划与跟踪控制实例详细说明了预测模型建立、优化方法、约束处理和反馈校正的方法，给出了 MATLAB/CarSim 仿真代码和详细图解仿真步骤，所有代码都提供详尽的注解。

本书 2014 年第 1 版出版后，得到很多读者的应用和反馈，本次再版，作为教材型专著出版，融入了北京理工大学智能车辆研究所团队最新的相关研究成果，扩充了运动学和动力学模型，考虑了高速无人驾驶车辆跟踪控制方法，并在稳定性判据方面进行了扩充。

本书可以作为地面无人车辆、空中无人机、无人艇及移动机器人等无人车辆模型预测控制的教学资料和研究参考资料，同时也可以作为学习模型预测控制理论的应用教程。

版权专有　侵权必究

图书在版编目（CIP）数据

无人驾驶车辆模型预测控制/龚建伟，刘凯，齐建永著．—2 版．—北京：北京理工大学出版社，2020.4（2020.9 重印）

ISBN 978－7－5682－8232－1

Ⅰ.①无…　Ⅱ.①龚…②刘…③齐…　Ⅲ.①无人驾驶－汽车－模型－预测控制　Ⅳ.①U46

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2020）第 041016 号

出　版／北京理工大学出版社有限责任公司
社　址／北京市海淀区中关村南大街 5 号
邮　编／100081
电　话／（010）68914775（总编室）
（010）82562903（教材售后服务热线）
（010）68948351（其他图书服务热线）
网　址／http：//www.bitpress.com.cn
经　销／全国各地新华书店
印　刷／固安县铭成印刷有限公司
开　本／710mm×1000mm　1/16
印　张／16.75　　责任编辑／梁铜华
字　数／286 千字　　文案编辑／梁铜华
版　次／2020 年 4 月第 2 版　2020 年 9 月第 2 次印刷　　责任校对／周瑞红
定　价／68.00 元　　责任印制／王美丽

图书出现印装质量问题，请拨打售后服务热线，本社负责调换

《国之重器出版工程》
编 辑 委 员 会

编辑委员会主任：苗　圩

编辑委员会副主任：刘利华　辛国斌

编辑委员会委员：

冯长辉	梁志峰	高东升	姜子琨	许科敏
陈　因	郑立新	马向晖	高云虎	金　鑫
李　巍	高延敏	何　琼	刁石京	谢少锋
闻　库	韩　夏	赵志国	谢远生	赵永红
韩占武	刘　多	尹丽波	赵　波	卢　山
徐惠彬	赵长禄	周　玉	姚　郁	张　炜
聂　宏	付梦印	季仲华		



专家委员会委员（按姓氏笔画排列）：

于　全　中国工程院院士

王少萍　“长江学者奖励计划”特聘教授

王建民　清华大学软件学院院长

王哲荣　中国工程院院士

王　越　中国科学院院士、中国工程院院士

尤肖虎　“长江学者奖励计划”特聘教授

邓宗全　中国工程院院士

甘晓华　中国工程院院士

叶培建　中国科学院院士

朱英富　中国工程院院士

朵英贤　中国工程院院士

邬贺铨　中国工程院院士

刘大响　中国工程院院士

刘怡昕　中国工程院院士

刘韵洁　中国工程院院士

孙逢春　中国工程院院士

苏彦庆　“长江学者奖励计划”特聘教授



苏哲子　中国工程院院士

李伯虎　中国工程院院士

李应红　中国科学院院士

李新亚　国家制造强国建设战略咨询委员会委员、中国机械工业联合会副会长

杨德森　中国工程院院士

张宏科　北京交通大学下一代互联网互联设备国家工程实验室主任

陆建勋　中国工程院院士

陆燕荪　国家制造强国建设战略咨询委员会委员、原机械工业部副部长

陈一坚　中国工程院院士

陈懋章　中国工程院院士

金东寒　中国工程院院士

周立伟　中国工程院院士

郑纬民　中国计算机学会原理事长

郑建华　中国科学院院士



屈贤明　国家制造强国建设战略咨询委员会委员、工业和信息化部智能制造专家咨询委员会副主任

项昌乐　“长江学者奖励计划”特聘教授，中国科协书记处书记，北京理工大学党委副书记、副校长

柳百成　中国工程院院士

闻雪友　中国工程院院士

徐德民　中国工程院院士

唐长红　中国工程院院士

黄卫东　“长江学者奖励计划”特聘教授

黄先祥　中国工程院院士

黄　维　中国科学院院士、西北工业大学常务副校长

董景辰　工业和信息化部智能制造专家咨询委员会委员

焦宗夏　“长江学者奖励计划”特聘教授



第 2 版前言

自本书 2014 年第 1 版出版至今，北京理工大学智能车辆研究所团队在地面无人车辆、水陆两栖车辆、民用自动驾驶规划与控制方法方面，新开展了大量的研究和应用测试。本次再版，增加了团队易于作为教程发布的相关成果。本书第 1 版在中国同行学者中产生较大影响，在国外同行中也有一定影响，在日本东京工业大学攻读学位的中国学生反馈说，日本导师让其专门研读并在组会中讨论几个月。读者们的这些鼓励也是激发本次再版的重要因素。

2014—2017 年，著者龚建伟承担了国家自然科学基金重点支持项目“城区真实交通环境无人驾驶车辆关键技术与平台研究（91420203）”，同时他主持的国家自然科学基金面上项目“高速地面车辆主动危险规避最优运动规划与控制的动力学模型分析（51275041，2017 年获基金委优秀结题题目提名）”2017 年结题。其中相关研究成果被呈现在本次再版内容中；著者刘凯博士在读期间（2013—2019 年）作为主要成员参加上述项目研究，他在俄亥俄州立大学汽车研究中心（Center for Automotive Research，CAR）被联合培养期间也延续从事该项研究；著者齐建永于 2016—2019 年负责课题组团队和学科公司北理慧动共同承担的城市、越野环境行驶的无人车实车和产业化工作，对本书相关工作成果进行了实车测试，为推动本书方法的实际应用做出了重要贡献；博士研究生王威和硕士研究生谢兼明、赵耀港、刘红炼、李德润、马建昊等在算法改进、仿真测试、实车应用方面做了大量的工作，直接推动了本书成果在跟踪控制方面的应用；硕士研究生龚诗雄完成了全书的整理和出版协助工作。感谢第 1 版作者徐威和姜岩为本书做出的贡献，加拿大 University of Waterloo 的

Amir Khajepour 教授团队博士研究生 Yadollah Rasekhipour 于 2017 年在北京理工大学智能车辆研究所课题组开展 MPC（模型预测控制）实车控制算法实验，测试成果也促进了后续的研究和测试工作，在此一并致谢。陈慧岩教授主审本书内容。

北京理工大学智能车辆研究所，作为地面无人机动平台国防科技创新团队，以及无人车技术工业和信息化部重点实验室的重要组成团队，为本书工作成果提供了大量的测试和支撑条件，感谢团队熊光明、吴绍斌、吕超、席军强、翟涌、刘海鸥、胡宇辉等老师在本书相关工作中的付出。团队学科公司北理慧动在其多个产业化项目工作中应用相关成果，推动了成果的应用，对方法的改进提出了需求。

本版在第 1 版的基础上，在第 1 章增加了第 1.4 小节，概述了模型预测控制（MPC）在车辆操控稳定性中的应用。首先介绍了传统车辆的稳定性控制系统及其不足，然后总结了无人驾驶车辆的操纵稳定性控制研究现状。第 2 章扩充了车辆运动学和动力学模型，在运动学模型部分，增加了跟踪误差模型。在动力学建模部分，增加了横摆动力学模型和综合等效动力学模型，充分考虑了道路曲率和道路倾角对车辆运动的影响。删除了第 3 章第 1 节，然后以无人驾驶车辆的速度跟踪控制为例，基于 MPC 设计实现了速度跟踪控制，阐述了 MPC 的基本原理和实现过程。本版对第 3 章进行了较大的修改，原因是第 1 版发行后收到很多读者的反馈意见。意见指出，第 3 章和第 4 章的内容有部分重合，而且第 3 章所提供的 Matlab 程序运行容易出错，增加了初学者的学习难度。第 4 章中增加了参考路径的自适应拟合算法，能够充分提取参考路径的信息，扩大了本章设计的 MPC 控制器的应用范围。在第 5 章基于动力学模型的 MPC 路径跟踪控制器，增加了基于递推最小二乘法的轮胎线性侧偏刚度估计方法，为车辆动力学建模提供了依据。第 6 章基本保持不变。删除了第 1 版的第 7 章，替换为高速无人驾驶车辆的模型预测控制，针对实现高速无人驾驶车辆所面临的三个挑战展开论述，提出了变步长的离散化方法，实现了较长的预测时域，同时保持了计算的实时性，推导了基于包络线的横摆稳定性判据，依次设计了针对高速无人驾驶车辆路径跟踪的 MPC 控制器，并在多种路面条件下进行了验证。增加了第 8 章，设计实现了考虑侧倾约束的 MPC 路径跟踪控制器，分析了车辆的侧倾机理，推导了基于零力矩点的侧倾稳定性判据。选择考虑道路倾角影响的动力学模型设计 MPC，并在联合仿真环境中对侧倾稳定性判据的有效性和本章所设计的跟踪算法进行了验证。

本书的初版和再版，得到了前面提到的研究项目资助；本版还得到了北京



理工大学研究生院2019年度研究生教材建设项目资助。感谢为本版工作付出大量心血的北京理工大学出版社的编辑老师们。

由于不同章节由不同作者编写，全书物理量的表示字母难于统一，每章之内自成体系，请读者阅读时予以注意。

配套代码下载网址：http://www.ivedu.cn/page/download

http://www.bitpress.com.cn

作　者

2019年10月于北京理工大学中关村校区车辆实验楼



第 1 版前言

无人驾驶车辆技术在智能交通系统和军事领域有着广阔的应用前景，著者所在北京理工大学机械与车辆学院智能车辆研究所自 1990 年开始进行无人驾驶车辆技术研究和探索，并且在 2009—2013 年参加了连续五届的国家自然科学基金委主办的“中国智能车未来挑战赛”，取得了良好成绩，尤其在 2013 年的比赛中获得了冠军。

我们在研究过程中，认识到无人驾驶车辆的环境感知、规划决策方法与车辆平台控制是密切相关的，特别是高速无人车辆的运动学与动力学特性不仅影响到感知算法，而且与规划算法和跟踪控制算法有着内在的联系。车辆运动学约束与动力学约束如果不能有效体现在路径规划与控制算法、传感器感知算法中，就无法得到很好的控制效果。

模型预测控制算法有其天然的多模型约束处理优势，能够与规划控制、感知过程的传感器数据预处理算法很好地结合，是在无人驾驶车辆控制过程中体现车辆运动学与动力学约束的理想方法。但模型预测控制算法较为复杂，计算方法复杂对于不是从事控制理论学习的工科学者来说比较抽象，所以我们把在无人驾驶车辆研究过程中应用的模型预测控制理论的基础概念和方法、算法代码整理出来，不仅可以给课题组形成较为系统的学习资料，方便后续研究，也可以供从事移动机器人、无人车辆（包括无人机、无人艇）的研究者们参考，还可以作为车辆工程、自动控制等专业高年级本科生和研究生学习模型预测控制的辅助资料。

除封面署名作者外，实验室在读研究生徐威参与了所有章节的初稿写作，

并对代码进行了仿真测试，孙银健参加了第4章的写作与代码测试，袁盛玥和蒋健参加了部分章节的写作与全书校对。张瑞琳、宗莹等同学参加了书稿的核对工作。

本书的研究工作得到国家自然科学基金项目“高速地面车辆主动危险规避最优运动规划与控制的动力学模型分析”（51275041）资助，是该课题前期的初步研究成果，后续工作将进一步在高速车辆控制过程中应用模型预测控制方法；同时也得到国家自然科学基金项目“复杂交通条件下弱环境约束区域无人驾驶车辆相对定位方法关键问题的研究”（61304194）部分资助，该项目提供了实验车辆的定位和感知方法基础。本书的工作同时也与著者龚建伟于2011—2012年在美国麻省理工学院Karl Iagnemma博士主持的Robotic Mobility Group课题组访问研究期间从事的研究工作相关，当时的研究工作促成了基金项目51275041的创意。



目　录

第 1 章　无人驾驶车辆与模型预测控制 …… 001

1.1　无人驾驶车辆 …… 002
1.1.1　无人车辆通用概念 …… 002
1.1.2　考虑乘坐舒适性的无人驾驶车辆 …… 005
1.2　路径跟踪与轨迹跟踪 …… 006
1.2.1　路径规划与轨迹规划 …… 006
1.2.2　路径跟踪与轨迹跟踪的特点 …… 007
1.3　模型预测控制在无人驾驶车辆运动规划与控制中的应用 …… 007
1.3.1　运动规划算法的模型约束 …… 007
1.3.2　轨迹跟踪控制的模型约束 …… 011
1.4　模型预测控制在车辆稳定性操控中的应用 …… 017
1.4.1　传统汽车的稳定性控制系统 …… 017
1.4.2　无人驾驶车辆的操纵稳定性分析方法 …… 018
1.5　本书内容与结构说明 …… 022

第 2 章　车辆运动学与动力学建模 …… 025

2.1　车辆运动学建模 …… 027
2.1.1　车辆运动学模型 …… 027

2.1.2 车辆运动学模型验证 …… 029
2.1.3 车辆跟踪误差模型 …… 030
2.2 车辆横摆动力学建模 …… 031
2.2.1 车辆横摆动力学微分方程 …… 031
2.2.2 轮胎模型及其线性化 …… 033
2.2.3 考虑道路曲率的车辆横摆动力学模型 …… 036
2.2.4 考虑轮胎滑移的车辆动力学模型 …… 038
2.2.5 点质量车辆动力学模型 …… 039
2.3 综合等效约束车辆动力学建模 …… 040
2.3.1 考虑侧倾约束的车辆动力学模型 …… 040
2.3.2 考虑道路倾角与曲率的车辆动力学模型 …… 041
2.4 联合仿真平台概述与仿真实例 …… 045
2.4.1 CarSim 软件介绍 …… 045
2.4.2 Simulink/CarSim 联合仿真平台 …… 047
2.4.3 基于联合仿真平台验证车辆运动学模型 …… 051
2.4.4 车辆动力学模型的仿真验证 …… 052

第3章 模型预测控制算法基础与纵向控制仿真分析 …… 056

3.1 模型预测控制算法基础 …… 057
3.2 一个基于 MPC 工具箱的速度控制实例 …… 059
3.3 速度跟踪的模型预测控制方法 …… 063
3.3.1 问题描述 …… 063
3.3.2 速度跟踪的模型预测控制器设计 …… 064
3.4 Simulink/CarSim 联合仿真分析 …… 068
3.4.1 联合仿真平台的设计 …… 068
3.4.2 基于 MPC 的速度跟踪控制器的设计 …… 075
3.4.3 仿真结果分析 …… 080

第4章 基于运动学模型的轨迹跟踪控制 …… 081

4.1 问题的描述 …… 082
4.2 基于运动学模型的轨迹跟踪控制器设计 …… 084
4.2.1 车辆运动学建模 …… 084
4.2.2 目标函数设计 …… 085



4.2.3　约束条件设计 …… 087
4.3　参考路径的自适应分段拟合 …… 089
4.3.1　基于三次贝塞尔曲线的自适应分段拟合方法 …… 089
4.3.2　自适应分段拟合效果分析 …… 091
4.4　仿真实例 …… 093
4.4.1　CarSim 与 Simulink 联合仿真的车辆参数设置 …… 093
4.4.2　基于 MPC 的轨迹跟踪控制器的设计 …… 102
4.4.3　基于运动学模型的轨迹跟踪仿真结果分析 …… 109
4.5　本章小结 …… 112

第 5 章　基于动力学模型的无人驾驶车辆主动转向控制 …… 114

5.1　理论基础 …… 116
5.1.1　线性误差方程 …… 116
5.1.2　约束条件建立 …… 118
5.1.3　模型预测控制器设计 …… 120
5.2　主动转向控制的联合仿真 …… 121
5.2.1　在 CarSim 中建立车辆模型 …… 122
5.2.2　控制程序编写 …… 124
5.3　主动转向控制的仿真验证 …… 133
5.3.1　参考轨迹选择 …… 133
5.3.2　不同仿真工况下的仿真结果 …… 134
5.4　基于递推最小二乘法的轮胎线性侧偏刚度估计 …… 138
5.5　轮胎线性侧偏刚度估计的仿真验证 …… 140
5.5.1　联合仿真平台的设计 …… 140
5.5.2　轮胎线性侧偏刚度估计的 RLS 算法设计 …… 143
5.5.3　仿真结果分析 …… 146

第 6 章　加入规划层的轨迹跟踪控制 …… 147

6.1　结合规划层的轨迹跟踪控制系统 …… 149
6.2　基于 MPC 的轨迹规划器 …… 150
6.2.1　参考点的选择 …… 151
6.2.2　避障功能函数 …… 152
6.2.3　5 次多项式轨迹拟合 …… 154

6.2.4 非线性二次规划计算 …… 156
6.3 基于 MPC 的路径跟踪控制器 …… 164
6.4 不同车速下的跟踪控制仿真实例验证 …… 173
6.4.1 车辆参数设置 …… 175
6.4.2 仿真工况设置 …… 175
6.4.3 Simulink/CarSim 联合求解 …… 177

第 7 章 高速无人驾驶车辆的模型预测控制 …… 186

7.1 面临的挑战 …… 188
7.2 变步长的离散化方法 …… 189
7.3 基于 MPC 的高速车辆轨迹跟踪控制器设计 …… 191
7.3.1 高速无人驾驶车辆的横摆稳定性判据 …… 191
7.3.2 道路环境及执行机构饱和约束 …… 192
7.3.3 模型预测控制问题 …… 193
7.4 仿真试验研究 …… 195
7.4.1 联合仿真平台搭建 …… 195
7.4.2 MPC 横摆稳定性控制的实现 …… 198
7.4.3 仿真试验分析 …… 205
7.4.4 不同求解器性能对比 …… 211
7.5 本章小结 …… 213

第 8 章 考虑侧倾稳定性的无人驾驶车辆模型预测控制 …… 214

8.1 无人驾驶车辆的侧倾机理与侧倾稳定性判据 …… 215
8.1.1 车辆侧倾的机理分析 …… 215
8.1.2 无人驾驶车辆的侧倾稳定性判据 …… 215
8.2 基于模型预测的操控稳定性控制 …… 217
8.2.1 带反馈矫正的 MPC 控制器设计 …… 217
8.2.2 考虑操控稳定性的模型预测控制问题 …… 218
8.3 操纵稳定性控制联合仿真平台搭建 …… 220
8.3.1 在 CarSim 中建立车辆模型 …… 220
8.3.2 带倾角的道路模型设置 …… 223
8.3.3 MPC 控制程序编写 …… 224
8.4 仿真验证与结果分析 …… 230



8.4.1　存在时变道路曲率及侧向坡度角时的仿真实例 …… 230
8.4.2　模型预测控制算法的实时性分析 …… 233
8.4.3　侧倾稳定性判据有效性验证 …… 233
8.5　本章小结 …… 236
附录 A　CarSim 8.02 应用高版本 MATLAB …… 237
参考文献 …… 240