



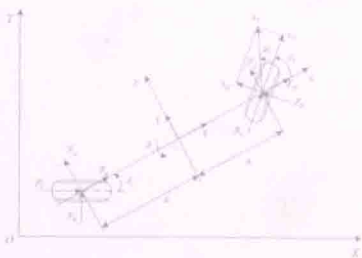
智能车辆先进技术丛书



Model Predictive Control for  
Self-driving Vehicles

# 无人驾驶车辆 模型预测控制

龚建伟 姜岩 徐威 著  
陈慧岩 主审



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

智能车辆先进技术丛书

# 无人驾驶车辆模型预测控制

龚建伟 姜岩 徐威 著  
陈慧岩 主审

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

## 内 容 提 要

本书主要介绍模型预测控制理论与方法在无人驾驶车辆运动规划与跟踪控制中的应用。由于模型预测控制理论数学抽象特点明显,初涉者往往需要较长时间的探索才能真正理解和掌握,而进一步应用到具体研究,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,结合运动规划与跟踪控制实例详细说明了预测模型建立、方法优化、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。所有代码都提供了详尽的注解,并且融入了研究团队在本领域的研究成果。

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材。

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,姜岩,徐威著. —北京:北京理工大学出版社,2014.4

ISBN 978 - 7 - 5640 - 9084 - 5

I. ①无… II. ①龚… ②姜… ③徐… 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 (2014) 第 076602 号

---

出版发行 / 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)

82562903 (教材售后服务热线)

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 / 北京地大天成印务有限公司

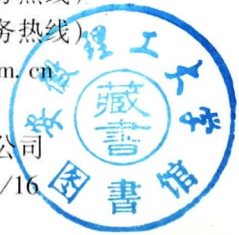
开 本 / 710 毫米 × 1000 毫米 1/16

印 张 / 13

字 数 / 220 千字

版 次 / 2014 年 4 月第 1 版 2014 年 4 月第 1 次印刷

定 价 / 68.00 元



责任编辑 / 梁铜华

文案编辑 / 梁铜华

责任校对 / 周瑞红

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

# 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 (Intelligent Vehicle Research Center, Beijing Institute of Technology) 自 1990 年开始进行无人驾驶车辆技术研究和探索, 并且于 2009—2013 年连续 5 届参加国家自然科学基金委主办的“中国智能车未来挑战赛”, 取得良好成绩, 其中在 2013 年比赛中获得冠军。

在研究过程中, 我们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运动规划与控制算法、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比较抽象。我们将在无人驾驶车辆研究过程中应用模型预测控制理论的基础概念和方法、算法代码整理出来, 一方面给课题组形成较为系统的学习资料, 方便后续研究; 另一方面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。另外, 也可作为车辆工程、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, 实验室在读研究生刘凯、孙银健、袁盛玥、蒋健、徐大陆、张瑞琳参与了部分章节的初稿写作、代码测试和全书校对, 于宏啸提供附录 A 说明; 陈慧岩教授和熊光明副教授对全书内容进行了审校; 清华大学汽车研究所李升波博士审阅了本书部分内容, 给出了很中肯的修改意见。在此一并致谢。

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，是该项目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。本书的出版，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，本书所述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。该研究工作促成了基金项目“51275041”的申报，同时这些研究成果也被收录在本书中。

代码下载地址：<http://www.bitpress.com.cn>。

著者

# 目 录

第 1 章	无人驾驶车辆与模型预测控制 / 1
1.1	无人驾驶车辆 / 1
1.1.1	无人车辆通用概念 / 1
1.1.2	考虑乘坐舒适性的无人驾驶车辆 / 4
1.2	路径跟踪与轨迹跟踪 / 5
1.2.1	路径规划与轨迹规划 / 5
1.2.2	路径跟踪与轨迹跟踪 / 6
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 / 6
1.3.1	运动规划算法的模型约束 / 7
1.3.2	轨迹跟踪控制的模型约束 / 11
1.4	本书内容与结构说明 / 16
第 2 章	车辆运动学与动力学建模 / 18
2.1	车辆运动学建模及验证 / 18
2.1.1	车辆运动学建模 / 19
2.1.2	车辆运动学模型验证 / 20
2.2	车辆动力学建模及验证 / 22
2.2.1	车辆单轨模型 / 22
2.2.2	轮胎模型 / 25
2.2.3	小角度假设下的车辆动力学模型 / 33
第 3 章	模型预测控制算法基础与仿真分析 / 36
3.1	基本理论 / 36
3.1.1	生活中的启示 / 36
3.1.2	控制理论中的描述 / 38
3.2	一个简单的实例 / 40
3.3	线性时变模型预测控制算法 / 45
3.3.1	问题描述 / 45
3.3.2	非线性系统线性化方法 / 49
3.3.3	工程实例 / 50
3.4	非线性模型预测控制算法 / 59
3.4.1	问题描述 / 59
3.4.2	非线性模型预测控制的数值解法 / 60
3.4.3	工程实例 / 61

- 3.5 线性约束下的二次型规划控制算法 / 66
  - 3.5.1 线性约束转化为 LQR 问题 / 66
  - 3.5.2 LQR 在无人驾驶车辆路径跟踪中的应用 / 67
  - 3.5.3 LQR 进行路径跟踪的工程实例 / 69
  - 3.5.4 小结 / 73
- 第 4 章 给定轨迹的轨迹跟踪控制 / 74**
  - 4.1 问题的描述 / 74
  - 4.2 基于运动学模型的轨迹跟踪控制器设计 / 76
    - 4.2.1 车辆运动学建模 / 76
    - 4.2.2 目标函数设计 / 78
    - 4.2.3 约束条件设计 / 79
  - 4.3 仿真平台概述 / 81
    - 4.3.1 CarSim 软件介绍 / 82
    - 4.3.2 Simulink/CarSim 联合仿真平台 / 83
  - 4.4 仿真实例 / 85
    - 4.4.1 CarSim 与 Simulink 联合仿真 / 86
    - 4.4.2 基于 MPC 的轨迹跟踪控制器的设计 / 99
  - 4.5 基于运动学模型的轨迹跟踪仿真结果分析 / 105
- 第 5 章 基于动力学模型的无人驾驶车辆主动转向控制 / 110**
  - 5.1 理论基础 / 111
    - 5.1.1 线性误差方程 / 111
    - 5.1.2 约束条件建立 / 113
    - 5.1.3 模型预测控制器设计 / 115
  - 5.2 联合仿真平台搭建 / 116
    - 5.2.1 在 CarSim 中建立车辆模型 / 116
    - 5.2.2 控制程序编写 / 117
  - 5.3 仿真验证 / 129
    - 5.3.1 参考轨迹选择 / 129
    - 5.3.2 不同仿真工况下的仿真结果 / 130
- 第 6 章 加入规划层的轨迹跟踪控制 / 134**
  - 6.1 结合规划层的轨迹跟踪控制系统 / 134
  - 6.2 基于 MPC 的轨迹规划器 / 136
    - 6.2.1 参考点的选择 / 137

6.2.2	避障功能函数 / 138
6.2.3	5次多项式轨迹拟合 / 139
6.2.4	非线性二次规划计算 / 141
6.3	基于MPC的路径跟踪控制器 / 149
6.4	不同车速下的跟踪控制仿真实例验证 / 159
6.4.1	车辆参数设置 / 160
6.4.2	仿真工况设置 / 160
6.4.3	CarSim/Simulink联合求解 / 163
<b>第7章</b>	<b>航向跟踪预估控制算法 / 171</b>
7.1	概述 / 171
7.2	二自由度无人驾驶车辆动力学模型 / 172
7.3	航向预估算法原理 / 173
7.4	PID控制算法 / 175
7.5	仿真结果 / 175
7.5.1	航向阶跃响应仿真 / 176
7.5.2	路径偏差阶跃响应仿真 / 177
7.6	实验结果 / 178
7.6.1	实验1——航向阶跃实验 / 178
7.6.2	实验2——航向连续跟踪实验 / 179
7.6.3	实验3——航向预估算法在路径跟踪控制中的应用 / 180
<b>附录A</b>	<b>CarSim 8.02应用高版本Matlab / 184</b>
	符号表 / 187
	参考文献 / 191



# 第 1 章

## 无人驾驶车辆与模型预测控制

无人驾驶车辆 (Self-driving Vehicle) 是地面无人车辆的一种, 在未来智能交通系统中有着广阔的应用前景。不仅各大汽车厂商纷纷研发无人驾驶技术测试样车, 互联网与移动通信公司也积极涉足这一领域。本章首先介绍无人车辆通用概念、无人驾驶车辆与无人车辆的关系, 说明无人车辆的主要组成部分, 即任务决策、环境感知、路径规划、路径跟踪与车辆平台控制子系统, 总结了无人驾驶车辆的特点, 最后介绍模型预测控制理论在无人驾驶车辆控制过程中的应用情况。

### 1.1 无人驾驶车辆

#### 1.1.1 无人车辆通用概念

无人车辆 (Unmanned Vehicle), 根据其行驶环境的不同, 可以分为空中无人机 (Unmanned Aerial Vehicle)、水面无人艇 (Unmanned Surface Vehicle)、水下无人潜水器 (Unmanned Underwater Vehicle) 和地面无人车辆 (Unmanned Ground Vehicle)。无人车辆是一种可以较高速度或高速移动的机器人, 能够感知行驶环境, 进行自主决策, 规划行驶路径, 并控制车辆跟踪期望路径, 到达设定的目的地, 完成预定任务。与机器人类似, 无人车辆可以独立或者协调合作完成预定任务。同时, 需要指出的是, 遥操作也是无人车辆的一种重要控制

方式。遥操作无人车辆不等同于完全的遥控车辆，而是在自主行驶无人车辆基础上，增加了人在回路的任务决策、环境感知与规划、控制等功能，是一种提升自主无人车辆控制能力的人机交互方式，或者被称为人在回路的决策、规划与控制方法<sup>[1]</sup>。

根据以上定义，这里将无人车辆系统分为任务决策、环境感知、路径规划，以及车辆控制与平台4个子系统。

### (1) 任务决策子系统

无人车辆首先是一个任务平台，在军事领域，能够完成侦察、打击、排暴和后勤保障等任务，空中、水面、水下、地面的各种无人车辆之间，或者无人车辆与有人车辆之间能够进行任务分配与协调，不同功能（异构）或相同功能（同构）的车辆协同完成规定任务；在民用领域，无人车辆也可以完成农业灌溉、采矿、码头运输、交通运输等任务。多无人车辆协同完成任务时，具有更高的效率。其任务分配与协调在这里不做详细介绍，可以参阅著者前期研究文献 [2, 3, 4]。

当任务分配到单台无人车辆后，无人车辆就需要根据任务特性、自身功能条件及已知环境信息进行任务决策与规划。无人车辆在任务决策与规划时，任务完成往往与车辆平台全局路径规划是关联的。比如军用无人侦察车辆任务规划包括两部分内容：一是根据车辆平台任务载荷特点确定完成任务的方式；二是确定完成任务的全局路径，进行初始全局路径规划。任务决策与规划是一种动态规划，需要根据任务和全局环境信息的变化进行调整。以完成侦察任务为例，无人车辆需要遍历侦察区域，同时需要规划出遍历这些区域的最短或最经济全局路径。

### (2) 环境感知子系统

和有人操控车辆一样，无人车辆需要实时得到行驶环境信息。环境信息一般可以通过以下两种途径获得：一是通过无人车辆环境感知子系统利用车载传感器系统获取行驶环境信息，结合环境模型对传感器信息进行融合、理解和识别行驶环境；二是通过通信网络提供的外部环境信息，例如车联网给无人驾驶车辆提供的前方道路拥堵情况和周围车辆行驶趋势，路基交通设施发送的路口交通信号灯情况和变化趋势，或者地面指挥系统给无人机提供的大范围空域环境信息。

环境感知子系统利用上述环境信息，并结合先验环境模型，就能对行驶环境进行理解识别。环境感知是无人车辆可靠行驶的关键。在各种无人车辆中，空中无人机的行驶环境识别较为简单。这也是现在无人机无论是在军事领域还是在民用领域都已经得到广泛应用的原因。地面无人车辆的环境感知是最复杂

的。以行驶在城市环境的无人驾驶车辆为例，如果不依赖外部网络提供的环境信息，独立的无人驾驶车辆需要识别行驶道路及与交通规则相关的各类环境信息，包括车道线以及无车道线情况下的道路识别<sup>[5-9]</sup>、路沿检测<sup>[10]</sup>、交通标识与信号灯检测<sup>[11,12]</sup>，以及行人、车辆检测<sup>[13]</sup>等，而且要综合多种道路交通要素对比较复杂的环境进行理解，为路径规划子系统提供行驶区域信息和障碍物信息。

### (3) 路径规划子系统

路径规划 (Path Planning) 是指在具有障碍物的环境中，按照一定的评价标准，比如路径长度最短或能量消耗最少原则等，寻找一条从起始状态到目标状态的无碰撞路径。无人车辆路径规划主要继承了机器人研究领域关于路径规划的研究成果<sup>[14-20]</sup>，一般分为全局路径规划<sup>[1,15,17,18,19,20]</sup>和局部路径规划<sup>[14,15]</sup>。全局路径规划功能同时也被视为任务决策规划的一部分。在大多数情况下，无人系统全局路径规划和任务决策与规划是相联系的，二者结合得到无人车辆的全局路径信息；而局部路径规划则是在无人车辆周围局部环境里进行的。

全局路径规划是在地图已知的情况下，利用已知局部信息，如障碍物位置和道路边界，确定可行和最优的路径；但是当环境发生变化，如出现未知障碍物时，就必须通过局部路径规划来生成无人车辆的局部行驶路径或轨迹。局部路径规划是在全局路径引导下，依据传感器感知到的局部环境信息来实时生成车辆所需要行驶的路径。在规划过程中不仅要考虑影响当前任务完成的最优原则，如路径最短、能源消耗最少，或者车辆最安全等，而且要考虑动态环境带来的约束问题。

路径规划技术的研究重点主要包括环境建模和路径搜索策略两个子问题，如图 1.1 所示。路径规划与障碍物环境信息密切相关，因此障碍物环境的建模方法是路径规划问题研究中的一个关键问题。目前，最常用的 3 种环境建模方法是单元分解法 (Cell Decomposition)、道路图法 (Roadmap) 和人工势场法 (Potential Fields)<sup>[21]</sup>。其中人工势场法在实时避障方面具有独特优势。在此基础上，又提出了虚拟力场法 (Virtual Force Fields, VFF)、矢量场直方图法 (Vector Field Histogram, VFH) 和向量极坐标直方图法 (Vector Polar Histogram, VPH)<sup>[14,22]</sup>。这些方法在机器人和无人车辆障碍规避方面得到大量应用。

在无人车辆和机器人局部路径规划过程中，还需要考虑的一个重要问题是运动规划 (Motion Planning)，即局部路径规划要满足无人车辆的运动学与动力学约束条件。文献 [16] 提出的满足无人车辆运动微分约束的纵横向协同

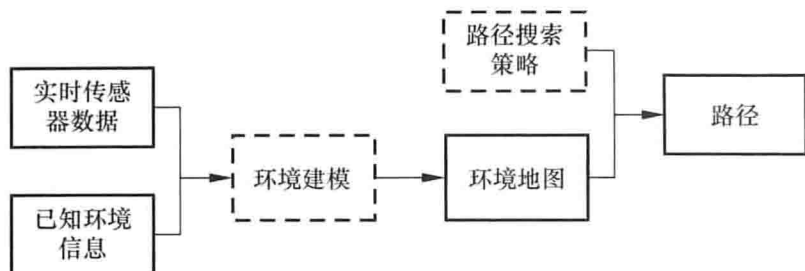


图 1.1 路径规划、环境信息与环境建模的关系

规划算法就是一种典型的局部路径规划的运动规划方法。将模型预测控制理论应用在无人车辆运动规划时，也将重点探索该方法在处理运动学和动力学约束的途径，在后续章节中将对其中重点阐述。

#### (4) 车辆平台控制子系统

车辆控制主要是控制车辆平台跟踪路径规划子系统得到的路径，也即车辆的横向与纵向控制<sup>[23-25]</sup>。和机器人控制一样，无人车辆也存在着路径（Path）与轨迹（Trajectory）的区分。本书约定轨迹是路径的一种，即同时考虑空间和时间因素的路径。路径跟踪实质是通过控制车辆的运动来减少车辆与参考路径之间的空间上的误差。如果考虑轨迹，则还包括时间误差。因模型预测控制重点应用在跟踪控制方法中，后续章节将继续对这一点进行详细说明。

车辆平台是无人车辆的重要组成部分。环境感知、决策规划及控制必须与车辆平台进行一体化设计。各种无人车辆在行驶环境中，以较高速度行驶时，都会与环境发生相互作用，这时车辆动力学与运动学特性就会影响到环境感知、决策规划和控制效果。以最为复杂的地面无人车辆为例，高速行驶的车辆执行机构的控制输入、轮胎与地面摩擦引起的滑移、横向加速度引起的侧倾等动力学非线性约束条件比低速时更加苛刻。因此，无人车辆一方面要在运动规划阶段计算出满足车辆动力学和运动学约束的无碰撞运动轨迹，另一方面需要在跟踪阶段生成满足非线性动力学约束和执行机构极限约束的控制量。

### 1.1.2 考虑乘坐舒适性的无人驾驶车辆

由上面简要介绍的通用无人车辆概念及其主要组成部分可以看出，无人车辆种类有很多。有的车辆有乘坐人员，但不直接驾驶；而有的没有乘坐人员，完全不需要考虑人员的乘坐感受。根据其特点不同，规划与控制时需考虑的要素也不同。如军用无人车辆在危险环境中行驶时，只需要搭载执行任务的执行

机构、传感器以及车辆平台本身能够适应环境，因此规划与控制时就只需要考虑机器的承受能力，而不需要考虑人的乘坐舒适性，这样有可能形成更高的机动能力。本书主要以与普通乘用车类似的地面无人车辆为对象进行建模，并且约定该车辆为前轮转向，即一种能够自动或自主驾驶的无人驾驶车辆（Self-driving Vehicle）。虽然没有驾驶员，但还有乘客，因此需要考虑人的乘坐舒适性。

选择有人乘坐的无人驾驶车辆（Self-driving Vehicle）还有两个原因：一是这类车辆的运动学模型和动力学模型都比较成熟，在仿真软件 CarSim 和 Adams 中都有相应的模型，便于我们重点介绍模型预测控制理论在无人驾驶车辆控制中的应用；二是著者前期公开发表的工作成果也都是基于这类车辆平台，并且有多辆可以实际测试的无人驾驶车辆可作为验证平台。图 1.2 所示为北京理工大学智能车辆研究所与比亚迪汽车有限公司共同研发的 Ray 号无人驾驶车辆。



图 1.2 无人驾驶车辆 Ray（获 2013 年“中国智能车未来挑战赛”冠军）

## 1.2 路径跟踪与轨迹跟踪

模型预测控制理论将主要应用在无人驾驶车辆的路径或轨迹生成与跟踪控制中。这里首先介绍无人车辆路径与轨迹的概念，然后说明路径跟踪（Path Following）与轨迹跟踪（Trajectory Tracking）的特点。

### 1.2.1 路径规划与轨迹规划

路径与轨迹延续了机器人控制的概念。对于无人车辆来说，全局路径点只要包含空间位置信息即可，也可以包含姿态信息，而不需要与时间相关，但局

部规划时,则可以考虑时间信息。这里规定轨迹点也是一种路径点,即当路径点信息中加入了时间约束,就可以被称为轨迹点。从这个角度理解,轨迹规划就是一种路径规划,当路径规划过程要满足无人车辆的纵向和横向动力学约束时,就成为轨迹规划。路径规划与轨迹规划既可以在状态空间中表示<sup>[15]</sup>,也可以在笛卡尔坐标系中表示<sup>[16]</sup>。

无人车辆纵向速度规划与时间密切相关,而车辆横向动力学对纵向速度的影响非常大。文献[16]提出一种基于运动微分约束的无人车辆纵、横向协同规划算法,实际上考虑了无人车辆通过某一路径点的速度要求,是一种轨迹规划算法。

### 1.2.2 路径跟踪与轨迹跟踪

路径跟踪过程中,参考路径(Reference Path)曲线可与时间参数无关,跟踪控制时,可以假设无人车辆以当前速度匀速前进,以一定的代价规则形成行驶路径趋近于参考路径;而轨迹跟踪时,参考路径曲线与时间和空间均相关,并要求无人车辆在规定的时间内到达某一预先设定好的参考路径点。

路径跟踪不同于轨迹跟踪,不受制于时间约束,只需要在一定误差范围内跟踪期望路径。路径跟踪中的运动控制就是寻找一个有界的控制输入序列,以使无人车辆从一个初始位形到设定的期望位形。文献[26]指出,无人车辆系统是一个欠驱动的非完整约束系统,同时也是一个零动力学系统。轨迹跟踪问题会受限于这种不稳定的零动力学约束。

## 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

车辆动力学模型分析对于解决无人驾驶车辆运动规划与控制问题具有十分关键的作用。首先,在规划与控制系统中引入动力学模型可以通过模型的等效约束转化减少规划与控制的计算量,提高系统的实时性。其次,以准确的动力学模型作为预测模型,可以提高控制器对车辆未来行为的预测能力,进而在保证车辆稳定运行的同时,充分发挥车辆的机动潜能,比如高速运行状况下的主动危险规避运动规划与控制,充分体现车辆平台运动学与动力学约束条件的影响。

模型预测控制最明显的优点是能在控制过程中增加多种约束。无人车辆在低速时,车辆平台运动学约束影响较大,而随着速度的增加,动力学特性对运动规划与控制的影响就越明显,带来多种模式的约束。这正是模型预测控制在



无人车辆运动规划控制方面的应用优势。下面介绍地面无人驾驶车辆的运动规划和控制算法研究现状，同时说明模型预测控制理论在这些算法中的应用情况。

### 1.3.1 运动规划算法的模型约束

研究无人驾驶车辆的运动规划问题时，利用感知系统提供的障碍物位置与运动属性、路面特性以及车辆本身状态，可计算出从当前位置到局部目标位置的没有碰撞的行驶轨迹。根据前面对路径规划与轨迹规划的特点介绍，一旦轨迹被确定了，车辆沿着路径的运动形式也就被确定了。轨迹规划既可以是在路径规划后的二次规划，也可以根据感知信息一次规划获得。

#### (1) 路径规划算法约束条件

无人驾驶车辆的局部路径规划算法不同于一般移动机器人的路径规划问题。为满足车辆转向过程中的平稳性以及安全性需求，车辆运动微分约束和动力学特性约束是需要考虑的重要特征，同时还需要考虑车辆操纵稳定性及舒适性问题带来的控制约束。文献 [26] 利用弹性带理论 (Elastic Band Theory) 对无人驾驶车辆的紧急避障路径进行规划，在规划时提出将路径的局部曲率变化最小作为约束条件，从而提高车辆紧急避障时的操纵稳定性。文献 [27] 讨论了非结构化环境下基于滚动窗口的无人车辆路径规划问题，并在规划过程中考虑了车辆的安全约束。

局部路径规划算法中考虑约束的一种思路是对车辆行驶曲线进行描述，通过设计评价函数选取不同工况下的行驶曲线完成规划。文献 [16] 利用 5 次多项式描述行驶曲线，将问题变为求取连接两个确定的目标点之间的曲线，并且满足目标点处有固定的航向角和固定曲率的要求，如图 1.3 所示；同时，在全局或者局部环境中的参考路径上用不同预瞄距离确定若干个预瞄位姿，对于每个预瞄位姿沿其法线方向按照不同横向位置偏差再确定若干个目标位姿，各目标位姿航向与预瞄位姿相同，计算当前车辆位姿和各目标位姿之间的行驶曲线作为候选曲线集合，行驶曲线需要满足车辆运

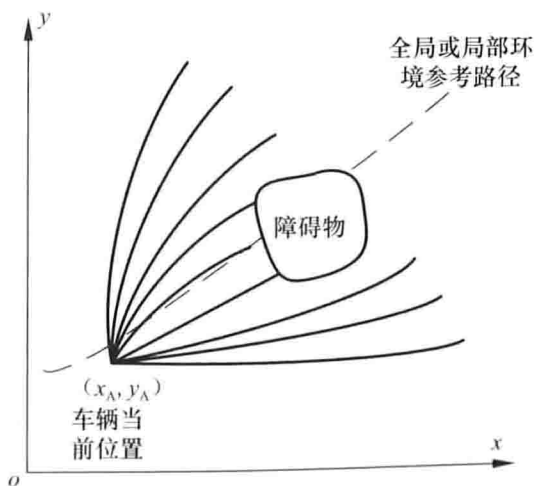


图 1.3 基于 5 次多项式的路径规划

姿和各目标位姿之间的行驶曲线作为候选曲线集合，行驶曲线需要满足车辆运

动微分约束。候选曲线集合包含了用不同预瞄距离生成的行驶曲线，而对于同一预瞄距离处的多条行驶曲线，其目标位姿相对于期望路径是对称分布的。首先对各条行驶曲线进行碰撞分析，在行驶曲线上的每一位姿处增加车辆的宽度和长度信息，与构形空间中的障碍物检测结果进行对比，判断行驶曲线与障碍物发生碰撞的位置，仅保留此位置以前的行驶曲线。然后，在具有相同横向位置偏差的行驶曲线中保留最长的一条用于路径评价。经过碰撞安全性分析，在每个横向位置偏差仅保留了一条满足横向安全和路径跟踪要求的行驶曲线。车辆的实际驾驶行为，如跟随或超车，则由选择哪一条行驶曲线作为待执行路径实现。

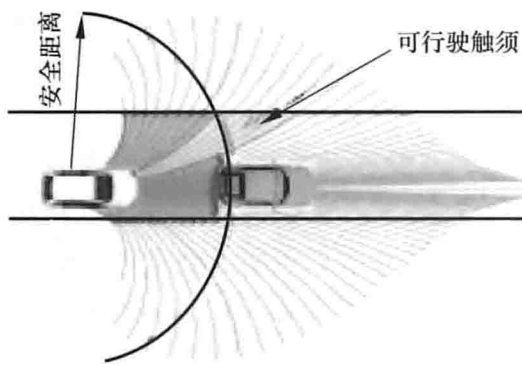


图 1.4 基于触须的路径规划

德国卡尔斯鲁厄大学在 DARPA Urban Challenge 的参赛车辆 AnnieWAY 上采用了基于触须原理的局部路径规划算法<sup>[28]</sup>，利用多组不同半径的圆弧描述不同车速下的行驶路径，如图 1.4 所示。文献 [18] 对该算法进行了改进，使之适用于全局环境未知的智能车自主行驶，但由于它在进行触须生成时采用圆弧曲线，而忽略了车辆转弯半径的变化，故在车速较快

时容易发生跟踪失败的情况。这也说明在高速时还需要进一步考虑车辆动力学特性的约束。

文献 [29] 结合预测控制理论进行无人车辆的局部路径规划。借鉴预测控制的滚动优化原理，提出了基于滚动窗口的移动机器人路径规划方法。该方法在全局环境未知时能够充分利用已探知的局部信息，有效地结合优化与反馈机制，不仅使局部规划的计算量保持在较低水平，而且保证了全局的收敛性，获得了较好的规划效果。文献 [30] 同样借鉴了滚动优化的原理，提出了一种带约束曲线拟合的路径规划方式，如图 1.5 所示。该方法通过在规划中引入几何约束，如起始位姿约束、最小转弯半径约束等，有效地避免了在跟踪过程中同时考虑位置和航向误差的问题。

## (2) 轨迹规划算法约束条件

轨迹规划问题一般是在考虑系统某项性能最优的同时，加入边界约束、环境几何约束以及系统的动力学约束等非线性约束，最终构成一个非线性最优化问题。因此，轨迹规划的主要研究方向集中在非线性最优求解和约束条件等价转换上。轨迹规划问题一般无法找到显式解，普遍的做法就是将这一优化问题转换为非线性规划问题，进而通过相应的非线性规划求解器求解。



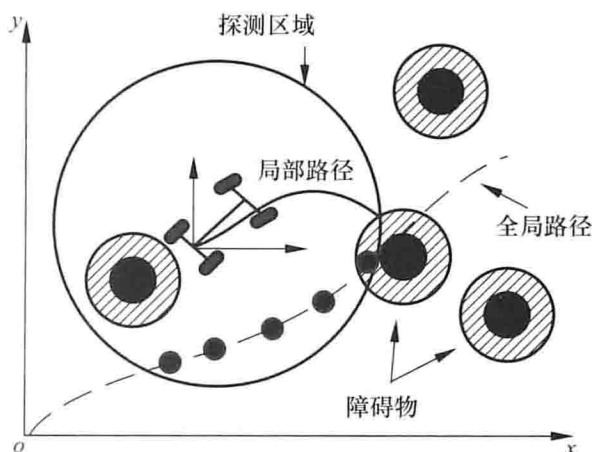


图 1.5 带约束曲线拟合的路径规划

文献 [31] 采用直接法, 利用多项式直接对系统状态进行参数化, 进而将轨迹规划问题转换为数学规划问题。文献 [32] 在借鉴样条法原理的基础上, 通过局部近似的方法构建全局连续的优化轨迹。虽然这种转换解决了在轨迹空间优化的难题, 但是其优化的速度依赖于参数空间的维度。为此, Fahroo 等人在对非线性系统平坦性研究的基础上, 给出了平坦系统的轨迹规划方法<sup>[33]</sup>。其主要优点就是通过系统的平坦性将高维度空间的参数优化问题降为低维度参数空间的优化问题, 从而提高了优化速度。吉林大学陈虹等也应用微分平坦理论对不同形式的机器人进行了轨迹规划方面的研究<sup>[34,35]</sup>。

侧倾约束下的运动规划也是高速运动车辆需要考虑的一个重要约束。侧倾主要采用横向载荷转移率 (LTR)、侧倾角和横向加速度作为判断标准。Tahirovic<sup>[36]</sup>在被动侧翻控制基础上进行了模型预测改进运动规划; Iagnemma<sup>[52,63]</sup>在机器人车辆运动轨迹规划时, 设计车辆动力学参数值窗口, 采用速度-曲率轨迹方法计算运动轨迹。由于采用窗口值只考虑曲率, 所以其计算速度快, 但并不具备车辆控制稳定的最优性。

在约束条件处理方面, 基于简化运动学模型满足车辆非完整约束的方法比较普遍<sup>[37,38]</sup>。假设车辆在运动过程中没有滑移, 那么就是非完整 (Nonholonomic) 动力学约束, 但是这种方法不适用于高速行驶车辆, 因为此时车辆的约束已经不再局限于非完整约束, 车辆的横向动力学成为规划中必须考虑的因素。文献 [39] 和 [40] 在考虑车辆动力学约束情况下对车辆的行驶轨迹进行了规划, 实现了连续曲率的轨迹规划。

为了减少动力学约束的复杂程度, 忽略车辆尺寸信息简化而来的点质量模型也在轨迹规划中得到了应用<sup>[41-43]</sup>。其受力分析如图 1.6 所示。从图 1.6 中