车车协同下无人驾驶车辆的加速换道轨迹规划

柏海舰1，申剑峰1，卫立阳1

1. 合肥工业大学 交通运输工程学院 安徽 合肥 230000 ）

**摘要:** 考虑到无人驾驶环境下车辆换道的复杂性和城市路段转向换道频繁的特点，本文研究了换道过程中的车车协同策略和轨迹规划方法。以换道协同策略和五次多项式的轨迹规划方法为基础，以车辆运动学和舒适度为控制条件，建立了目标车道后车不同协同程度下的主车换道轨迹优化模型。同时，考虑到传统椭圆、圆形车辆仿真模型的不足，通过分析可能碰撞点与车辆轮廓之间的边界关系，建立了在矩形车辆模型下的避碰边界条件。通过情景测试了不同环境、不同协同程度下的车辆换道轨迹模型。结果表明，通过车车协同，可以完成无人驾驶环境下的车辆安全换道，同时可满足换道舒适性以及动力学的要求。

**关键词：**无人驾驶；换道轨迹；车车协同；矩形车辆模型；加速换道

**中图分类号：**U491 **文献标识码：**A

Accelerated lane changing trajectory planning of self-driving vehicle under vehicle-to-vehicle communication

BAI Hai-jian1, SHEN Jian-feng1, WEI Li-yang1

(School of Automobile and Traffic Engineering, Hefei University of Technology)

**Abstract:** Considering the complexity of lane changing and characteristics of turning-lane for city section in the self-driving environment, this paper studies lane changing trajectory through vehicle-to-vehicle communication. Based on trajectory planning of polynomial method and cooperative strategy，with vehicle kinematics and comfort control condition, we established the lane changing model under diffident coordination degree of lagging vehicle in the target lane. Besides, we considering the shortcomings of traditional oval vehicle model and round vehicle model, through analyzing the relationship between possible collision point and outline of vehicle, establishing the rectangular vehicle model with collision boundary conditions. On this basis, we set up simulation model of lane changing process in different environment and different levels of collaboration. The results show that, vehicle-to-vehicle communication can realize safe lane changing trajectory , and can satisfy the requirement of vehicle kinematics and comfort control.

**Kewords:** self-driving; lane changing trajectory; vehicle-to-vehicle communication; rectangular vehicle model; Accelerated lane changing;

1 引言

在无人驾驶环境下，驾驶员因素对驾驶的影响将逐渐减弱，而周围交通状态的感知和车辆实时轨迹控制是无人车安全、高效运行的重要因素。现有的轨迹规划是机器人研究领域的路径规划方法的拓展，轨迹规划可以得到平滑连续的曲率轨迹，使之满足车辆的运动特性和安全要求。一类轨迹方法提出寻找连接起点到目标点的全局轨迹，但是对行驶环境变化的分析要花费很长时间，也不利于处理突发情况，所以全局轨迹难以实现[1.2]。而局部轨迹是在全局轨迹的引导下，依靠环境感知信息来生成实时轨迹，从而可广泛应用于自动驾驶车辆的轨迹规划[3.4]中。

无人车辆的轨迹包括跟驰、换道和超车等车辆行为下的轨迹。其中，无人车的跟驰方法研究在传统成熟的跟驰模型下已蓬勃发展，部分开发的相关技术已得到应用，而超车行为可以看作两次换道行为，因此车辆换道轨迹成为了无人驾驶研究的重点内容之一。现常用于自动驾驶车辆的换道轨迹规划方法有贝塞尔曲线[5.6]、样条曲线[7.8]和多项式曲线[9.10]。贝塞尔曲线生成的换道轨迹具有连续的曲率半径，但是需要选取控制点，只适用于静态规划，难以实现换道中的实时避碰行为。样条曲线可以对圆弧换道轨迹、正弦换道轨迹进行再规划，克服原有曲线曲率突变、不连续等缺点，但会导致无法实现实时控制。多项式曲线计算速度快，曲率连续便于实时控制，通过三次微分可得出舒适度方程，是评价换道可行性的重要指标。

在无人驾驶环境下，车辆大多处于高速行驶状态，且车速稳定，车辆之间的跟驰距离很小，给无人车的换道带来困难。虽然超车换道等非转向换道会减少甚至避免，但道路出入口的强制换道和城市路段的转向换道是不可避免的，所以本文立足于车车协同的思想，依靠车辆之间的信息交流简化并实现无人驾驶环境下的车辆的安全舒适换道。考虑到多项式曲线的实时性能更好的解决车辆相互协同、避免碰撞的问题，现有的舒适度方程一般为关于时间的二次函数，通过3次积分可得车辆换道轨迹，所以本文采用五次多项式进行轨迹规划。

2 车车协同策略

如图1所示，主车在换道过程中，周围车辆主要有当前车道前车，当前车道后车，目标车道前车和目标车道后车。当主车加速换道时，当前车道前方车辆和目标车道后车对主车的影响较大。与的车头间距影响是否能加速换道而不与碰撞，与的车头间距影响换道到目标车道时与是否碰撞。

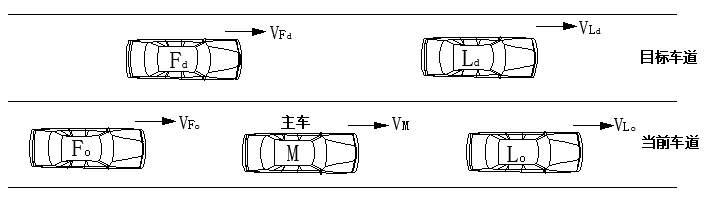


图1 主车与周围其他车辆的相对位置

主车产生换道意图后，会根据与的车头间距、与期望速度间的速度差预生成安全的换道轨迹，同时将换道信号发送给，以及。和在接收信号后根据自身的驾驶情况及附近车辆的驾驶状态，做出相应反馈，车车协同的过程见图2。



图2 车车协同的过程

在换道前，与、的间距分别为和，各车速度分别为、、和。当和接收换道信号会根据当前的行驶状态来判断是否接受换道请求：

（1）当前车道前车：由于前方车辆的限制，导致很难通过加速给提供换道空间，但在稳定交通流下可以保证的匀速行驶。在接受的换道信号后，根据周围环境判断能否保证匀速行驶和按照轨迹行驶是否与相碰撞，若能保证匀速行驶且不会与相碰撞，即接受的换道请求，否则拒绝换道请求。

（2）目标车道后车：以当前速度生成的行驶轨迹和的规划换道轨迹为依据，判断在换道过程中是否会发生碰撞。若无碰撞，接受换道请求，并以当前速度匀速协同，直至换道成功；若碰撞，将考虑与其后车的位置关系和协同程度的要求，在可接受的协同程度下减速，并判断减速协同的是否与发生碰撞，若无碰撞，接受换道请求，并在预定协同程度下减速协同，直至换道成功，若碰撞，则拒绝换道请求。

在车车协同作用下，和接收并接受换道信号后将改变行驶状态。为了简化计算，以换道前所在的位置为原点，换道前车辆行驶的方向为x轴，垂直于行驶方向为y轴，建立平面直角坐标系，那么和在换道过程中的行驶轨迹为：

当前车道前车的行驶轨迹：

（1）

目标车道后车的行驶轨迹:

（2）

式中，、分别表示与、之间换道前的车头间距；、分别表示、的初始行驶速度；表示车辆到的横向距离，文中记为车道的宽度；表示的减速度；表示通过减速达到可接受速度的时间。

3主车的换道轨迹规划方法

本文将主车的运动轨迹用下列五次多项式表示：

（3）

式中，和分别表示的纵向位移和横向位移，是以时间为自变量的五次多项式；和分别是是纵向位移和横向位移的参数；表示时间。

上式中共有12个参数，为了求解上述方程，要知道的换道起始状态和换道结束状态：

起始状态：

结束状态：

式中，和表示在起始状态的横向和纵向位移，和表示在起始状态的横向和纵向速度，和表示在起始状态的横向和纵向加速度；和表示换道结束时的横向和纵向位移，和表示在换道结束时的横向和纵向速度，和表示在换道结束时的横向和纵向加速度，为换道时间。其中，和两个参数难以确定，这也是解五次多项式换道轨迹的难题，我们将在第7部分解决。

4 车辆换道的安全条件

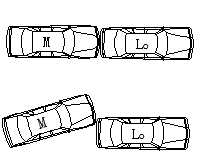
以往研究车辆换道时，为避免前车突然减速的情况，会设置一个最小安全间距，从而保证主车在这个最小安全间距内可以紧急制动，避免碰撞。最小安全距离的设置，会使得车辆跟驰距离较近时无法换道，不适用于无人驾驶环境。而车车协同是周围车辆在接受换道车辆的请求后，保持稳定行驶，不会突然减速。因此，可以减小换道间隙甚至可达到无人驾驶环境下的最小间隙，增加了换道可能性。

4.1换道中的碰撞形式

车辆在换道时的安全条件，主要指车辆在换道中的无碰撞要求。为了使成功换道，本文要避免换道过程中车辆之间的碰撞。大多数有关换道文献通常考虑换道开始和结束时与周围车辆的位置关系，没有考虑在换道过程中随着换道车辆偏转角的变化，是否也会发生碰撞，无法达到实时避碰。

车辆之间发生的碰撞事故，按事故发生时车辆的相对位置，可分为正面碰撞、追尾碰撞、迎头侧面碰撞、斜碰撞等。正面碰撞是指相向行使的车辆间发生的迎头正面碰撞，故在车辆换道过程中不考虑这一碰撞。在换道时与可能发生的碰撞行为先是追尾碰撞，然后在的转向过程中也可能发生斜碰撞。在换道时与可能发生的碰撞行为是转向过程中的斜碰撞和在目标车道上的追尾碰撞。

|  |  |
| --- | --- |
| C:\Users\程士强\Desktop\QQ截图co1.pngC:\Users\程士强\Desktop\QQ截图co1.pngC:\Users\程士强\Desktop\QQ截图cM.pngC:\Users\程士强\Desktop\QQ截图cM.png | C:\Users\程士强\Desktop\QQ截图cd2.pngC:\Users\程士强\Desktop\QQ截图cd2.pngC:\Users\程士强\Desktop\QQ截图cM.pngC:\Users\程士强\Desktop\QQ截图cM.png |
| 与潜在的碰撞形式 | 与潜在的碰撞形式 |

C:\Users\程士强\Desktop\QQ截图cd1.pngC:\Users\程士强\Desktop\QQ截图cM.png图3 车辆碰撞形式

4.2车辆模型选择

在换道过程中，车辆的几何特性影响车辆碰撞角度和碰撞点，因此要建立合适的车辆模型。以往的研究为了简化模型的建立过程以及计算过程，通常把车辆看作一个质点，但这对于换道过程的微观描述不够准确。考虑到圆的几何性质，一些学者用圆来将车辆包围起来建立车辆模型，如图4（a）。但是以车辆长度作为直径，会将车辆侧面很多非车辆甚至超出单车道宽度的区域包含起来，不适用于处理换道行为。在此基础上，有学者提出使用车辆宽度为直径动态圆来包围整个车辆，用动态圆扫过的区域作为车辆的区域[9.11]，如图4（b）。但该方法只考虑车辆的物理特性，未考虑不同速度下车辆碰撞的可能性不同，建立的车辆模型也应该对应地发生变化，而且也没考虑车辆在横纵方向发生碰撞的概率是不同的。而另外一些学者采用椭圆来包裹车辆，如图4（c）。其中，椭圆的长半轴随速度的变化而改变，但是建立的椭圆模型难以确定合适短半轴长，很难模拟车辆在换道过程中的偏转过程[12.13]。

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |
| （a）静态圆模型 | （b）动态圆模型 | （c）动态椭圆模型 | （d）矩形车辆模型 |

图4 车辆模型示意图

考虑到各种车辆模型的优缺点，结合了要实现车辆在换道过程中避碰的要求，本文采用了矩形作为车辆模型，如图4（d）。矩形车辆模型可准确模拟车辆的尺寸大小和轮廓边界，便于微观模拟，但难以计算车辆模型中心点到外在轮廓的所有距离。本文通过分析车辆换道过程，发现不需要计算车辆中心到车辆轮廓的所有距离，只要确定换道中可能的碰撞点，就能准确判断换道是否可行。

4.3矩形车辆模型下安全换道条件

在主车的换道过程中，只有主车发生偏转，其他车辆的行驶较为稳定，换道的潜在碰撞点如图5所示：1、2号碰撞点为和的可能碰撞点，3号碰撞点为和的可能碰撞点。要避免换道过程中的碰撞，就要判断碰撞点1与直线的位置关系，碰撞点2与直线的位置关系以及碰撞点3与直线、的位置关系。

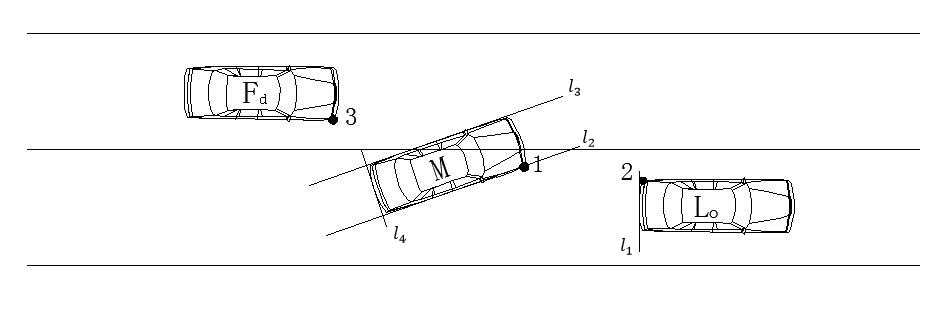


图5 车辆的碰撞关系

通过分析上述位置关系，结合前面提及的、和的行驶轨迹，可以得到与碰撞的条件：

（4）

与相碰撞的条件：

（5）

式中，、分别表示的车长与车宽，与分别表示的车长与车宽；，是车辆沿质心旋转的角度；为车辆的偏转角，，为主车的矩形模型顶点与水平方向的夹角。

5 车辆换道的运动学及舒适度要求

在向和发出换道请求后，会预生成一系列换道轨迹，这些轨迹形成了的换道空间。在分析车辆的运动学和舒适度要求的基础上，可以进一步缩小的换道空间，使之符合实际换道要求。

5.1车辆运动学要求

本文的加速换道在无人驾驶环境下进行，结合已有文献，考虑了以下运动学约束：

（1）转向角：，为车辆单位时间内变化的转向角，为车辆设置的在不影响驾驶安全性能下，单位时间内变化的最大转向角；为在时刻的横向速度，为在时刻的纵向速度。

（2）曲率：，为曲率，为转弯半径，为主车的轴距，为不影响驾驶安全性能的最大曲率。

（3）速度：，为纵向的行驶速度，为路段上限制的最大纵向行驶速度。

（4）位置：，为的横向位移，为车道的宽度。

5.2舒适度要求

舒适度是乘客的主观感受，在无人驾驶环境下，也是评价换道轨迹是否合理的关键因素。在模型中，舒适度可以通过横纵向的加速度和加加速度来判断。

（6）

式中，和分别为纵向的加速度和加加速度；和分别为横向的加速度和加加速度；和为考虑舒适度而允许的最大纵向加速度和加加速度；和为考虑舒适度而允许的最大横向加速度和加加速度。

6费用函数

车辆换道时，会对人和其他车辆甚至交通流产生一定的影响，为了使这个影响达到最小，本文建立了评价换道轨迹影响程度的模型，即费用函数。该费用函数包含三个组成部分，分别为人的舒适程度、换道的纵向位移和换道时间。

人的舒适程度是选取最优换道轨迹的一个重要标准，人的舒适度函数如下[14]：

（7）

式中，和是横纵向位移的三阶导数，表示横纵向的加加速度与时间的关系；是评价换道舒适程度的函数，其值越小表示舒适程度越高。

换道的纵向距离是衡量换道车辆对周围交通流的影响指标，换道距离越短，对交通流影响越小；换道时间影响车辆的换道效率。在匀速协同时，本文建立的费用函数如下：

（8）

式中，、、是权重系数，其和为1；、和分别为可行换道轨迹集中的舒适度函数、纵向换道距离、换道时间的最大值。

当减速协同时，自身的减速会对周围交通造成影响，考虑到该负面效应，建立的后车减速协同的费用函数如下：

（9）

式中，、、、是权重系数，其和为1；是换道时间内减速协同的距离，是换道时间内如果保持匀速行驶的距离。

7 情景仿真分析

本文依托Matlab编程实现模拟仿真，考虑到的协同方式有匀速协同和减速协同，通过情景测试研究了两种协同下换道轨迹的差异。测试主要参数如下：所有车辆车长均为4.5m，车宽均为1.8m；的速度为30km/h，换道到目标车道的速度为40km/h，的速度30km/h；与的车头间距为8m。考虑到求解五次多项式的难题在于难于确定换道时间和换道纵向位移，本文基于真实换道情况，将换道时间设为1-12s，仿真步长为0.1s。而以往的研究发现[7.15.16]，如果考虑舒适度对换道的影响，那么加速换道就会呈现近似匀加速过程。也就是说，通过确定换道时间和主车换道前后的速度差，可以近似得到加速度，进而确定换道的纵向位移。

7.1目标车道后车匀速协同

当换入到目标车道的空间足够时，为防止突然加速，导致与发生碰撞，这时要求匀速协同。测试参数为：的速度40km/h，与的车头间距为20m。在测试参数下本文通过五次多项式计算得到了无约束换道轨迹集，如图6（a）。轨迹集中，有部分轨迹不满足车辆的运动学和舒适度要求，本文进行相应地滤除，由此可以得到满足运动学、舒适度要求的有约束换道轨迹集，如图6（b）。此时轨迹的速度和加速度与时间的关系如图7，由于换道舒适程度对轨迹集的约束较大，当换道时间超过4.8s后，生成的换道轨迹才符合要求。在此基础上，会筛选与和避碰的轨迹，由此得到实际可行的换道轨迹集，如图6（c）。根据费用函数得到本次仿真中的最优换道时间为7.0s，最优纵向位移为68.06m，如图中黑色标记的轨迹。

|  |
| --- |
| （a）无约束换道轨迹集 |
| （b）有约束换道轨迹集 |
| （c）实际可行的换道轨迹集 |

图6 匀速协同下的换道轨迹集

|  |  |
| --- | --- |
| （a）纵向速度图（） | （b）纵向加速度图（） |
| （c）横向速度图（） | （d）横向加速度图（） |

图7 主车换道速度、加速度图

在得到最优轨迹后，本文对该轨迹进行动态仿真，如图8。通过仿真，主车确实可以实现无碰安全换道，且换道的曲线较为平缓，满足无人驾驶环境下乘客的舒适度要求。

|  |
| --- |
| （a）换道开始 |
| （b）换道中与位置关系 |
| （c）换道中与位置关系 |
| （d）换道结束 |

图8 匀速协同下最优轨迹仿真图

7.2目标车道后车减速协同

当换入到目标车道的空间不够时，需要减速协同。测试参数为：的速度48km/h，协同速度为40 km/h，与的车头间距为20m。通过五次多项式计算得到的无约束轨迹集和满足运动学、舒适度约束的有约束轨迹集与图6中相同。由于速度过大，保持匀速状态行驶会与碰撞，检测到这一情况的会根据自己的可接受减速程度进行减速，并在接受换道请求后以预定轨迹行驶，此时，实际可行的换道轨迹集如图9。根据费用函数得到本次仿真中的最优换道时间为6.1s，最优纵向位移为59.31m，如图中黑色标记的轨迹。最优轨迹下的测试仿真如图10。

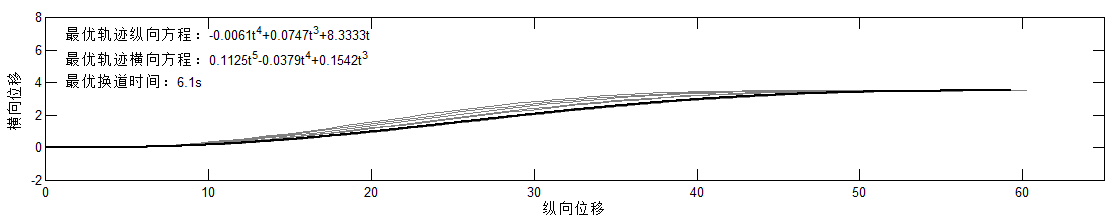


图9 减速协同下的换道轨迹集

|  |
| --- |
| （a）换道开始 |
| （b）换道中与位置关系 |
| （c）换道中与位置关系 |
| （d）换道结束 |

图10 减速协同下最优轨迹仿真图

7.3后车匀速协同与减速协同并存的情况

当与的距离一定时，加速换道产生的轨迹集会分两部分：一部分处于匀速协同，一部分处于减速协同。也就是说一些轨迹可能在匀速协同时不满足，但是在减速协同情况下却是满足的。理论上说，减速协同会增加主车换入到目标车道的机会，特别是对于换道时间较短的轨迹。但在实际仿真过程中，本文发现由于无人驾驶环境下对于舒适度的要求，导致换道时间普遍增加，这会导致匀速协同反而能满足换道时间短的轨迹，而当换道时间过长时，由于的速度高于会导致与的车头间距过小，此时的匀速协同无法满足的换道，只有减速协同才能满足的换道，如图11。其中，测试参数为：的速度48km/h，协同程度为40 km/h，与的车头间距为30m。

|  |
| --- |
|  |
| （a）匀速协同下可行的换道轨迹集 |
|  |
| （b）减速协同下可行的换道轨迹集 |

图11 匀速协同与减速协同并存的轨迹集

8 结论

本文考虑了无人驾驶环境下，车辆高速稳定行驶，且车辆之间跟驰距离很小，导致换道困难的特点，依托车车协同实现了换道。文中研究了无人驾驶环境下主车通过目标车道后车的协同完成换道的整个过程，并在其他研究的基础上把该过程描述为近匀加速过程。由五次多项式生成无约束换道轨迹，通过实际的车辆运动学约束和满足乘客的舒适度的要求，缩小换道轨迹集，得到了的实际轨迹范围。结果表明，在的匀速协同或减速协同下，可以实现的换道轨迹规划；通过费用函数的计算，能够得到最优的换道轨迹；情景仿真表明，生成的换道轨迹在无人驾驶环境下能使主车安全舒适地完成换道。

参考文献：

[1]Hao-jie, ZHANG, Jian-wei, et al. An iterative linear quadratic regulator based trajectory tracking controller for wheeled mobile robot[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2012, 13(8):593-600.

[2]Zhang H, Xiong G, Su B, et al. Anytime path planning in graduated state space[C]// Intelligent Vehicles Symposium. IEEE, 2013.

[3]Luo Y, Xiang Y, Cao K, et al. A dynamic automated lane change maneuver based on vehicle-to-vehicle communication[J]. Transportation Research Part C Emerging Technologies, 2016, 62:87-102.

[4]李玮, 王晶, 段建民. 基于多项式的智能车辆换道轨迹规划[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(3):242-245.

[5]Choi J W, Curry R, Elkaim G. Path Planning Based on Bézier Curve for Autonomous Ground Vehicles[C]// World Congress on Engineering and Computer Science 2008, WCECS '08. Advances in Electrical and Electronics Engineering - IAENG Special Edition of the. 2008:158-166.

[6] 陈成, 何玉庆, 卜春光,等. 基于四阶贝塞尔曲线的无人车可行轨迹规划[J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(3):486-496.

[7]李玮, 高德芝, 段建民. 智能车辆自由换道模型研究[J]. 公路交通科技, 2010, 27(2):119-123.

[8]Connors J, Elkaim G. Analysis of a Spline Based, Obstacle Avoiding Path Planning Algorithm[J]. 2007:2565-2569.

[9]You F, Zhang R, Guo L, et al. Trajectory planning and tracking control for autonomous lane change maneuver based on the cooperative vehicle infrastructure system[J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42(14):5932-5946.

[10]马川. 智能车辆轨迹规划和控制算法研究[D]. 山东理工大学, 2013.

[11]游峰. 智能车辆自动换道与自动超车控制方法的研究[D]. 吉林大学, 2005.

[12]许伦辉, 胡三根, 罗强,等. 基于驾驶员类型的车辆换道模型[J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2014, 42(8):104-111.

[13]王崇伦, 李振龙, 陈阳舟,等. 考虑换道约束空间的车辆换道模型研究[J]. 公路交通科技, 2012, 29(1):121-127.

[14]Werling M, Ziegler J, Kammel S, et al. Optimal trajectory generation for dynamic street scenarios in a Frenét Frame[J]. 2010:987-993.

[15] 任殿波, 张京明, 王聪. 变曲率弯路车辆换道虚拟轨迹模型[J]. 物理学报, 2014, 63(7):78902-078902.

[16]Erkorkmaz K, Altintas Y. High speed CNC system design. Part I: jerk limited trajectory generation and quintic spline interpolation[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2001, 41(9):1323-1345.