

车道保持辅助控制系统设计

薛亮 郭刚

中汽研汽车检验中心（广州）有限公司，广东省广州市，511300；

摘要：车道保持辅助系统（Lane Keeping Assistance System, LKAS）发挥着至关重要的作用。LKAS 系统通过集成多种传感器收集车辆状态信息和驾驶操作信息，利用电子控制单元进行数据分析，从而实现对车辆是否偏离车道的精准判断。本文结合线性二次调节（Linear Quadratic Regulator, LQR）控制策略设计了高效的 LKAS 系统控制器。

关键词：车道保持辅助系统；线性二次调解

DOI: 10.64216/3080-1508.25.10.023

LQR 通过对系统状态和控制输入进行加权求解最优控制策略，能够实现多输入多输出系统的最优控制。设计了仿真实验验证了线性二次调节控制策略在车道保持辅助系统中的有效性和重要性。仿真结果表明，LQR 控制策略在复杂驾驶环境中表现出优越的性能，能够显著提高车道保持的稳定性和精度。

车道保持辅助控制系统的总体方案设计：

（1）车辆控制：一旦车道线被检测到，车道保持辅助控制系统可以采取控制措施来保持车辆在车道内行驶。这通常通过车辆的电子稳定控制系统（ESC）或电动助力转向系统（EPAS）来实现。系统可以自动调整转向力或制动力，使车辆保持在车道中心。

（2）警告和干预：在驾驶员未采取行动的情况下，系统可以进行干预，例如轻微调整方向或施加轻微制动力，以将车辆带回到车道中心。

总体而言本文的技术路线是，车道保持辅助控制系统通过使用传感器、数据处理、车辆控制和警告干预等技术，帮助驾驶员保持车辆在车道内行驶，提高驾驶安全性和舒适性。这些系统可以减少驾驶员的疲劳和注意力分散，并减少因驾驶错误而导致的事故风险。

1 车-路模型构建

在 carsim 中设置道路仿真环境。左侧和中间部分是车辆动力学行驶需求参数，这些参数确保了车辆在模拟环境中的行驶行为与实际道路行驶相似。而右侧则展示了道路动画场景，包括道路的设计、绿化带的布局以及交通标志的摆放等，都高度还原了真实的道路交通环境。

2 TLC 预警算法

TLC（Time to Lane Crossing）法通过计算车辆从当前位置到接触车道边界的时间实现偏离预警。当 TLC 低于阈值时，LDW 系统发出警报。横向 TLC 法假设车辆横向速度与偏航角恒定，通过横向距离与速度关系计算，

但未考虑道路几何参数。纵向 TLC 法更精确，可融合道路曲率、坡度及实时车辆状态，支持主动控制，但对传感器实时性要求较高。基于实时性与精度权衡，本研究选用纵向 TLC 法进行车道偏离预警。

$$TLC = \frac{d_x}{v_x} \quad (2-1)$$

其中： d_x 是当车辆与车道边界接触时，其行程的长度； v_x 是车辆的纵向移动速度。

根据车道中线曲率，行车分为弯道与直道。车辆行驶中可能向左或右偏移，因此在任意道路上共有 8 种偏离情形。本研究选取一种典型复杂的偏离模式建立 TLC 模型，其余 7 种情形可参照其计算方法。

在笔直的公路上，车辆沿一条弯曲的轨道向左侧偏移，按照国家规范，山区高速公路弯道曲率半径不应低于 250 米，平原丘陵地区不低于 650 米。高速公路多以直线提升通行能力与便利度，但受横向风、坡度及扰动影响，车辆仍易发生偏移，需通过持续转向控制以保持直线行驶，驾驶员也需不断调整方向盘角度。若偏航角保持恒定，车辆将沿图 1 所示规律弧线行驶。

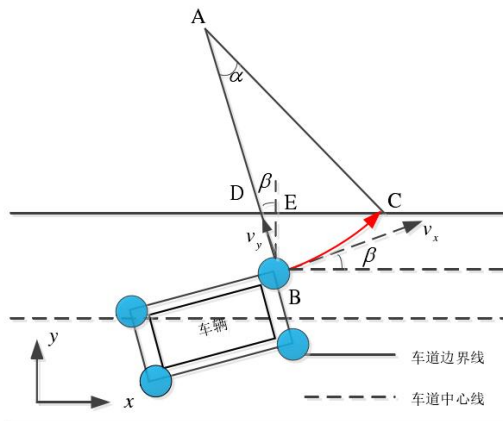


图 1 直线车道上车辆以曲线轨迹向左偏离原理图

在图 1 所建立的坐标系中, 将 x 轴设为车道中线, 将车辆行进方向设为正方向, y 轴为垂直于 x 轴, y 轴为向左为 y 轴。B 点表示汽车的左前轮, 而 C 点则表示汽车在目前的情况下与道路边界线的交点处, 通过对偏移轨道的 BC 长度进行计算, 就可以得到 TLC, 其计算公式为:

$$d_x = BC = R_v \cdot \alpha \quad (2-2)$$

式中: R_v 为曲率半径, 为圆心角, 根据匀速圆周运动可得 R_v 如式 2-3 所示:

$$R_v = \frac{v_x}{\omega} \quad (2-3)$$

式中: v_x 和 ω 分别表示纵向速度和横摆角速度。由传感器得到的 v_x 和经简单计算可得到 R_v , 因此计算 dx 还需计算圆心角即可。

在图 1 中利用几何关系可得:

$$BD = \frac{BE}{\cos \beta} \quad (2-4)$$

式中: BE 为左前轮至道路边界线的垂直距离, β 为车辆偏航角, 结合车道宽度 W_{width} 和左前轮侧向坐标 y_f 求得 BE 如式 2-5 所示:

$$BE = \frac{W_{width}}{2} - |y_f| \quad (2-5)$$

根据几何关系得 $\cos \alpha$ 如式 2-6 所示:

$$\cos \alpha = \frac{AD^2 + AC^2 - BC^2}{2AD \cdot AC} = \frac{2R_v^2 \cos^2 \beta + BE^2 - 2R_v \cdot BE \cdot \cos \beta - CD^2 \cdot \cos^2 \beta}{2R_v^2 \cos^2 \beta - 2R_v \cdot BE \cdot \cos^2 \beta} \quad (2-6)$$

$$AD = AB - BD = R_v - \frac{BE}{\cos \beta} \quad (2-7)$$

由三角几何关系可得 CD 如式 2-8 所示:

$$CD = R_v \cdot \cos(90 + \beta) + \sqrt{AC^2 - (AD \cdot \cos \beta)^2} \quad (2-8)$$

至此利用三角函数求圆心角 α 的公式中参数已求出, 综合公式 2-5、公式 2-7、公式 2-8、公式 2-6 得 α 为:

$$\alpha = \arccos \frac{2\left(\frac{v}{\omega}\right)^2 \cdot \cos^2 \beta + BE^2 - 2\left(\frac{v}{\omega}\right) \cdot BE \cdot \cos \beta - \left[-\frac{v}{\omega} \cdot \sin \beta + \sqrt{\left(\frac{v}{\omega}\right)^2 - \left[\left(\frac{v}{\omega} - \frac{BE}{\cos \beta}\right) \cdot \cos \beta\right]^2}}}{2\left(\frac{v}{\omega}\right)^2 \cdot \cos^2 \beta - 2\left(\frac{v}{\omega}\right) \cdot (BE) \cdot \cos \beta} \quad (2-9)$$

求出 α 之后, 利用公式 2-2 即可求出 dx , 也就求出偏移轨道的长度 BC 。

3 LQR 控制算法

线性二次最优控制器的研究对象是一类用状态空间方程表示的线性系统, 其性能目标函数为二次函数。LQR 控制算法能够在闭环控制下, 使控制系统的动态范围从初始状态转移到控制目标, 并使其尽可能地优化被控目标值, 能够兼顾多项性能指标, 并通过状态的线性

反馈, 获得最优的控制律。其中, 线性二次型最早也是最成熟的一种, 在智能汽车的轨迹追踪中得到了广泛的应用。线性二次型二次型控制的实质就是在完全状态反馈的基础上求出最优阵 K 。根据建立的车路误差模型, 期望横向位置偏差和横摆角偏差能够快速稳定的趋近于零并保持平衡, 同时前轮转角控制输入又尽可能的小, 因此利用 LQR 控制理论求解多目标优化的最优控制问题。

定义最优控制性能指数,

$$I = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (X^T Q X + u^T R u) dt \quad (3-1)$$

根据车路误差模型的状态方程和最优控制性能指数构造哈密顿函数,以求解最优控制量。

$$H = \frac{1}{2} (X^T Q X + u^T R u) + p^T (A X + B_1 u) \quad (3-2)$$

式中: p 为拉格朗日乘子矢量,通过建立黎卡提方程求解。

$$A^T P + P A + Q - P B_1 R^{-1} B_1^T P = 0 \quad (3-3)$$

对上式 (3-2) 中的 u 求解一阶偏导数,寻找 u 使得 H 最小

$$\frac{\partial H}{\partial u} = R^T u + B_1^T P = 0 \quad (3-4)$$

求得反馈增益矩阵

$$K = R^{-1} B_1^T P \quad (3-5)$$

则最优控制输入

$$u^* = -K X \quad (3-6)$$

LQR 前馈反馈控制

目前, LQR 反馈控制方法未充分考虑轨迹自身的动力学特征,导致当路面曲线急剧改变时,其超调过大,导致汽车转向时存在稳态误差。在此基础上,增加一输入前馈控制输入,以消除系统的稳态误差。

$$\delta_c = -K X + \delta_q \quad (3-7)$$

$$\dot{X} = (A - B_1 K) X + B_1 \delta_q + B_2 \theta_r \quad (3-8)$$

对上式 (3-8) 进行拉普拉斯变换得,

$$X(s) = [sI - (A - B_1 K)]^{-1} \cdot \left[B_1 L(\delta_q) + B_2 L(\theta_r) \right] \quad (3-9)$$

用 $x(t)$ 表示稳态跟踪误差,由终值定理有:

$$x_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s X(s) = -(A - B_1 K)^{-1} (B_1 \delta_q + B_2 \theta_r) \quad (3-10)$$

通过求解式 (3-10), 得稳定状态下的误差:

$$x_{ss} = \begin{bmatrix} e_{y_{ss}} \\ e_{y_{ss}} \\ e_{\varphi_{ss}} \\ e_{\varphi_{ss}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\delta_q}{k_1} - \frac{L - k_3 b}{R k_1} - \frac{m v_x^2}{2 R k_1 L} \left(\frac{a k_3}{C_{ar}} - \frac{a}{C_{ar}} + \frac{b}{C_{af}} \right) \\ 0 \\ \frac{-2 a b C_{ar} - 2 b^2 C_{ar} + a m v_x^2}{2 R L C_{ar}} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3-11)$$

式中: k_1 、 k_3 为矩阵 K 中的横向位置偏差和横摆角偏差反馈控制增益部分。

根据式 (3-11) 可知, 横向位置偏差的稳态误差可以利用前馈控制输入量 δ_q 消除。

$$\delta_q = \frac{L - k_3 b}{R} - \frac{m v_x^2}{2 R L} \left(\frac{a k_3}{C_{ar}} - \frac{a}{C_{ar}} + \frac{b}{C_{af}} \right) \quad (3-12)$$

为了进一步验证 LKAS 系统的车辆保持辅助效果, 设计了联合仿真验证, 模拟驾驶员疲劳产生车道偏移时, LKAS 系统进行车辆保持, 利用双移线的偏差情况反映出车辆保持状况。

LKAS 系统性能主要受车辆状态与道路环境影响, 目前多用于高速公路等结构化道路。根据 GB/T 39323—2020, 系统需在指定车速范围、附着系数大于 0.8 的长试验道路上运行。为验证 LQR 控制器性能, 在双移线工

况下进行了仿真实验,车速为 45km/h,时长为 18s。

图 2 显示,实际横向偏差(红)能够紧密跟踪期望横向偏差(蓝),误差始终较小,说明 LQR 控制器具有良好的横向跟踪性能。此外,通过质心侧偏角的变化数据分析可以发现,该角度反映车辆横向稳定性,虽在第 2-6 秒出现一定抖动,但最终趋于稳定。数据显示,横向跟踪误差较小,最大值为 0.06m(第 4 秒)。航向跟踪误差变化与质心侧偏角趋势接近,在路径曲率较大时存在一定波动,但整体控制性能可接受。综上所述,LQR 控制器在该工况下跟踪效果良好,横向控制精度较高。

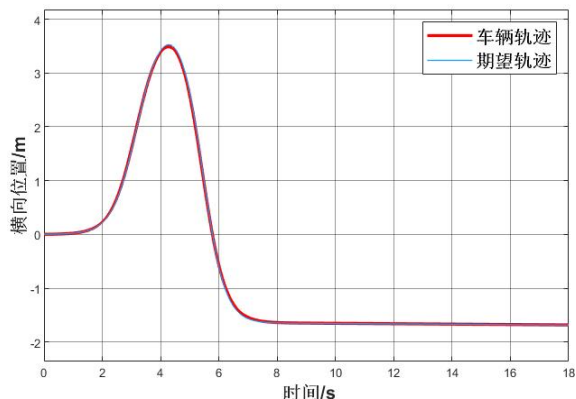


图 2 路径跟踪对比

车辆质心位置变化如图 3 所示,其在车道中心线附近波动且未越界,与车道中线基本重合,表明行驶轨迹稳定。横向位置偏差多数时间数值较小并逐渐趋近于零,但存在最大约 0.06m 的峰值。该峰值由行驶路线引起,处于合理范围内,并非系统设计所致。

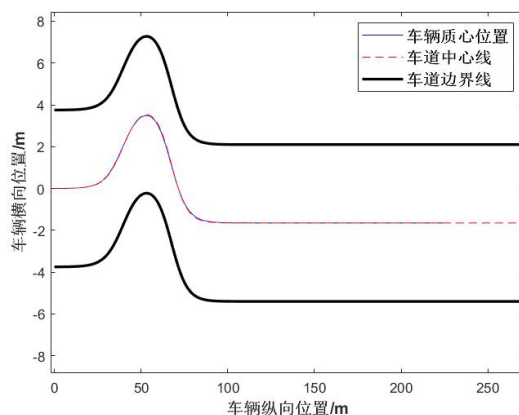


图 3 质心位置变化

车道保持辅助控制系统(LKAS)通过传感器融合、LQR 控制算法及实时干预技术,有效提升了车辆行驶的安全性与稳定性。仿真实验表明,该系统在复杂道路环境下具备良好的轨迹跟踪能力,横向误差控制在 0.06m 以内,质心侧偏角稳定趋近于零,符合 GB/T 39323-2020 的性能要求。未来可结合深度学习优化车道线检测精度,并拓展至非结构化道路场景,进一步推动智能驾驶技术的发展。

参考文献

- [1]GB/T 39323-2020, 乘用车车道保持辅助(LKA)系统性能要求及试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [2]Anderson B D O, Moore J B. Optimal Control: Linear Quadratic Methods[M]. Prentice-Hall, 1989. (LQR 控制理论经典著作)。