

车辆驾驶员操纵运动的 前视轨线曲率控制模型

孙义刚^① 余 群

(中国农业大学车辆工程学院)

摘 要 提出了一种新的驾驶员前视策略——“前视轨线”假设,并给出了前视轨线可能的多项式描述方程。在此基础上,建立了驾驶员“前视轨线曲率”控制模型。仿真结果表明,这一驾驶员模型具有很高的轨道跟随精度和较强的鲁棒性。

关键词 人-车系统; 操纵; 前视

中图分类号 U 461.6

Preview Trajectory Curvature Method for Driver/Vehicle Directional Control Systems

Sun Yigang Yu Qun

(College of Vehicle Engineering, CAU)

Abstract A new preview strategy assumption, the preview trajectory, was proposed and a 5th order polynomial of the preview trajectory was derived. The handling model of the preview trajectory curvature for the driver/vehicle direction control systems was set up based on the trajectory equation. Simulation results show that the proposed driver model rendered very high tracking accuracy and robustness.

Key words man-vehicle system; handling; preview

在车辆行驶过程中,驾驶员的前视作用对车辆行驶有重要影响。以往的驾驶员模型最终都将前视作用简化为单点预瞄,更确切地说,是“单点位置预瞄”。因为这些模型所利用的道路信息仅仅是前方道路上某一点相对于车辆的平面位置坐标,且前视时间一般都取作 1.1 s 左右^[1]。然而,在实际行车过程中驾驶员决不会只利用一点的位置信息,他还会考虑前方道路的走向和曲率等,他向车辆前方的目光注视点距离要比以往所谓的“前视距离”大得多。譬如,当车速为 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,驾驶员的前方视点距离大致为 330 m ^[2],而以往的“前视距离”只有 20 m 左右。这两者之间如此巨大的差异只能解释为“单点位置预瞄”与驾驶员实际采用的前视策略不一致。

为了克服“单点位置预瞄”的局限性,充分利用前方道路的位置、方向、曲率、凹向等几何特征信息,笔者提出了一种更可能与实际情况一致的前视策略——“前视轨线”假设,并由此建立了一种新的驾驶员方向控制模型——前视轨线曲率控制模型。

收稿日期:1998-09-09

^①孙义刚,北京清华东路 17 号 中国农业大学(东校区)43 信箱,100083

1 驾驶员的前视策略及前视轨线

经分析和调查,笔者认为驾驶员实际更可能采取的前视策略是:根据前方相当长一段的道路情况、车辆现时刻运动状态及其他安全行车方面的考虑,驾驶员在头脑中规划出一条以车辆现时刻位置为起点、向前伸向远方、车辆可能实现的车辆未来运动轨迹曲线,该轨线上的点随着与现时刻车辆位置距离的增大越来越模糊和不确定,驾驶员将力图使车辆沿着他所规划出的这条轨线行驶。在车辆不断向前运动中,原来远方模糊的、不十分确定的轨线随着与车辆距离的缩短,在驾驶员的头脑中也变得越来越清晰。由于这种前视作用,驾驶员预见性地决策出未来他应完成的一连串连续的操纵动作,当然,这些未来动作离现时刻的时间越远也越模糊和不确定。然后他再将那些因时刻临近而清晰化了的动作不失时机地做出,而这个时机的选择是驾驶员考虑了他的动作滞后和车辆的反应时间后由经验确定的。

驾驶员在头脑中规划出的车辆即将沿其行驶的有向轨道迹线具有模糊性,我们将有向轨道迹线这一模糊集上的隶属度最大的点组成的曲线简称为前视轨线。下面用数学语言来描述这条前视轨线。

车辆在正常行驶条件下,其轨迹曲线至少应当是处处存在连续的 2 阶导数,以保证车辆加速度的连续。图 1 示出了前视轨线可能的形状:起点 O 的左边(第 3 象限内的实线)是车辆到现时刻为止所走过的实际轨迹;起点 O 的右边(第 1 象限内的点划线)是前视轨线。设现时刻这条前视轨线在车辆坐标系下的方程为

$$y = h(x) \tag{1}$$

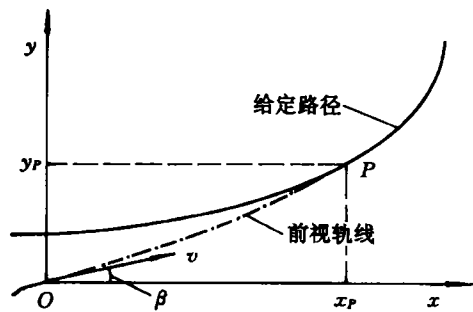


图 1 前视轨线示意图

式(1)在原点 O 处的一些几何特征应与车辆现时刻的状态相吻合,它至少应满足下列条件:

- 1) 通过坐标原点,即 $y|_{x=0} = 0$;
- 2) 在原点 O 处的切线方向与现时刻车辆速度 v 的方向一致,即 $y'|_{x=0} = \tan \beta$,式中 β 为车辆在现时刻的侧偏角;
- 3) 在原点 O 处的曲率与现时刻车辆运动轨迹的曲率相一致,即

$$\frac{1}{R} = \frac{|\ddot{y} \cos \beta|}{v^2} = \frac{|y''|}{\sqrt{(1+y'^2)^3}} \quad (\text{当 } x=0 \text{ 时}) \tag{2}$$

式中: R 为现时刻车辆运动的曲率半径; \ddot{y} 为现时刻车辆的侧向加速度; v 为车速; y'' 是式(1)中的 y 对 x 的 2 阶导数。将条件 2) 代入式(2),可解得 $y''|_{x=0} = \ddot{y}/(v^2 \cos^2 \beta)$ 。

在给定一条理想路径的条件下,可以想像出前视轨线必定从前方某点以远与理想路径完全重合。这里设前视轨线向理想路径的切入点为 P (参见图 1),点 P 的坐标为 (x_P, y_P) ,那么式(1)在切入点 P 也应满足与上述起点对应的 3 个条件,即有

$$4) \quad \begin{cases} y|_{x=x_P} = y_P \\ y'|_{x=x_P} = y'_P \\ y''|_{x=x_P} = y''_P \end{cases}$$

如果再进一步假设式(1)中的 $h(x)$ 在 OP 段是 x 的多项式曲线, 即设驾驶员在头脑中规划生成的前视轨线在车辆前方近处为低阶曲线, 则这条曲线至少应满足上述 1)~4) 所列条件, 那么在 OP 段, $h(x)$ 应是一个含有 6 个待定系数的 5 阶多项式:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + a_5x^5 \quad (\text{当 } 0 \leq x \leq x_P) \quad (3)$$

将条件 1)~4) 分别代入式(3), 联立线性方程组后可解得

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= 0 \\ a_1 &= \tan \beta \\ a_2 &= \frac{\ddot{y}}{2v^2 \cos^2 \beta} \\ a_3 &= \frac{10y_P}{x_P^3} - \frac{6 \tan \beta}{x_P^2} - \frac{3\ddot{y}}{2v^2 x_P \cos^2 \beta} - \frac{4y'_P}{x_P^2} + \frac{y''_P}{2x_P} \\ a_4 &= -\frac{15y_P}{x_P^4} + \frac{8 \tan \beta}{x_P^3} + \frac{3\ddot{y}}{2v^2 x_P^2 \cos^2 \beta} + \frac{7y'_P}{x_P^3} - \frac{y''_P}{x_P^2} \\ a_5 &= \frac{6y_P}{x_P^5} - \frac{3 \tan \beta}{x_P^4} - \frac{\ddot{y}}{2v^2 x_P^3 \cos^2 \beta} - \frac{3y'_P}{x_P^4} + \frac{y''_P}{2x_P^3} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

将式(4)代入(3)便得到前视轨线描述方程的具体形式。这里定义前视轨线上点 (x, y) 处的“有向曲率” \check{C} (其绝对值即为数学分析上所定义的曲率) 如下:

$$\check{C} = \frac{y''}{\sqrt{(1+y'^2)^3}} \quad (5)$$

在点 P 以远, y' 和 y'' 由给定的理想路径方程确定; 在 OP 段, y' 和 y'' 则由式(3)对 x 分别求 1 阶和 2 阶导数而得。

2 驾驶员前视轨线曲率控制模型

驾驶员在头脑中规划出前视轨线后, 接下来他会如何据此来决定他应采取的转向操作呢? 最直觉的一种操纵策略是: 现时刻转向盘转角 θ 的大小与前视轨线上的某点 S 处的“有向曲率” \check{C}_S 成正比。由于前视轨线的“有向曲率”是连续的, 在现时刻之后的转向盘转角依然与前视轨线上点 S 之前 (即离车辆更远处) 的那些点的“有向曲率”成正比 (当然其不确定性更大一些), 这样, 驾驶员便规划出一段时间内连续的、不确定性递增的转向盘转角操纵动作, 在完成现时刻转向操纵的同时, 也做好了现时刻之后一段时间内的转向操作准备。这段时间的长短以前视轨线的不确定性大到某一程度时为限, 这里不做进一步的讨论。

设车辆从现时刻位置到达点 S 将用时间 t_s (若点 S 在现时刻车辆位置之后, 则 t_s 为负值, 但一般正常情况下有: $t_s > 0$), 称为动作提前时间。不难理解, 将 t_s 取为车辆的反应滞后时间较为合理。一般驾驶员通过驾驶实践能很快感觉出车辆整车响应对转向动作的滞后时间。由于在车辆前方附近的前视轨线切线与 x 轴的夹角较小 (原点处的切线与 x 轴的夹角即为现时刻车辆运动侧偏角), 故可将点 S 的横坐标 x_s 近似取为

$$x_s = vt_s \quad (6)$$

将式(6)代入(5), 并利用预先给定的道路方程及式(3), 不难算出点 S 的“有向曲率” \check{C}_S 。而现时刻的转向盘转角 θ 应为

$$\theta = K \bar{C}_S \quad (7)$$

式中 K 为转向盘转角对前视轨线上点 S 曲率的比例系数,称为转向增益。 K 值一般除与车辆本身的结构、性能及路面条件有关外,与车辆的速度也有一定的关系,特别是对于那些不具有中性转向特性的车辆。驾驶员在不断的驾驶实践中,能逐渐掌握 K 的大小及与速度的关系,而在驾驶员-车辆-环境闭环系统的研究中,通过多次的仿真实验(相当于驾驶车辆实践),便不难得得出 K 的取值规律。

现在讨论前视轨线与给定理想路径开始重合的切入点 P 的位置。显然,点 P 越接近原点 O ,即前视轨线与理想路径不重合段越短,前视轨线 OP 段上的最大曲率会越大, OP 段上各点有向曲率的变化越剧烈。在 OP 段的最大曲率低于某临界值、各点的有向曲率变化较平缓的条件下, OP 段越短,则车辆对理想路径的跟随精度会越高;而当 OP 段的最大曲率过大、各点有向曲率变化剧烈时,这时的前视轨线会使车辆更难以准确实现跟随,从而使车辆的轨道跟随精度降低,同时也使转向盘的忙碌程度增加;所以,点 P 位置的确定至少应将 OP 段的最大曲率值作为主要考虑因素。虽然可以通过式(3)~(5)及给定理想路径在现时刻车辆坐标系下的方程求出 OP 段最大曲率值与点 P 横坐标的关系式,但计算较繁琐。在一般正常情况下,可将 x_P 近似为 $x_P = vt_P$,式中 t_P 可称为前视轨线的“切入时间”。在实际行车中,驾驶员凭经验和车辆位置、状态来确定 t_P 的大小,而用计算机作移线运动仿真时,可将 t_P 近似取作 1.1 s 左右。

上述的驾驶员行为过程可简要综述如下:驾驶员根据前方道路情况和车辆即刻的运动状态(由 β, \dot{y} 和 v 等状态变量表征),规划出一条他欲令车辆即将行驶的路线——前视轨线,驾驶员依据前视轨线上离他时距为 t_S (动作提前时间)处的有向曲率之正比关系原则来决定转向盘转角,以实现对车辆行驶方向的控制。笔者将这一驾驶员控制行为过程命名为“前视轨线曲率控制模型”。

3 仿真实例

3.1 前视轨线曲率控制模型参数的确定

在用驾驶员前视轨线曲率控制模型进行闭环系统计算机模拟时,应先通过仿真实验来确定该模型中所含的对具体控制对象的待定参数,这一过程相当于驾驶员开始接触一部陌生车辆时对新车驾驶特性参数的“品尝”过程。

为了求得较合理的模型参数,可利用含有轨道误差、转向盘忙碌程度的综合跟随品质指标作为目标函数来进行优化选取。经过多次仿真优化实验,可求得针对奥迪-100型轿车较优的 t_P, t_S 参数值和 K 较优的取值规律^[3]如下:

$$\begin{cases} t_S = 0.18 \text{ s} \\ t_P = 1.2 \text{ s} \\ K = \delta / \bar{C}_S = 1.0 + 0.1v \end{cases}$$

式中: δ 为前轮名义转向角,rad; v 为车速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由于3自由度车辆运动数学模型中的输入变量为前轮转向角,未计入转向机构的迟滞,所以这里的动作提前时间 t_S 较小。转向指令若是现时刻从转向盘的角输入(即使已转换为名义前轮转角), t_S 的取值一般要大一些,大致为 0.2~0.3 s。在仿真实验中发现,当 t_P, t_S 和 K 在上式确定值的 $\pm 20\%$ 范围内变化时,跟随品质指标的变化不大,说明这一控制模型具有较强的鲁棒性。另外, t_P 和 t_S 的最优值随车速的增高都略

有增大的趋势。

3.2 折线路径的5次多项式圆滑

在进行仿真计算时,对于用标杆围成的折线路径,应将其对称中心线圆滑后的方程作为预期路径输入。以前一般用3次样条曲线来圆滑^[1],但因这一路径上的曲率有突变,而车辆的运动加速度具有连续性,故车辆不可能实现这种圆滑路径。用5次多项式圆滑时,不仅可使圆滑后的路径有连续的曲率变化,而且最大曲率值也小于用3次样条圆滑后路径的最大曲率^[3]。

3.3 双移线运动仿真实例

图2为车速等于 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时奥迪-100型轿车的双移线运动仿真结果。由图示及仿真结果分析可以看出,前视轨线曲率控制模型有非常好的控制精度。在作单移线和双移线操纵运动仿真时,其模拟轨迹对预期路径的全程最大绝对偏差均在 0.20 m 以下。圆周运动的模拟结果也显示出这一模型优良的轨道跟随性能。另外,由笔者所做的一些移线试验结果可以看出,实际驾驶员对转向盘操纵过程变化趋势与基于前视轨线曲率控制模型的闭环系统仿真过程中的转向盘转角变化过程趋势是一致的。

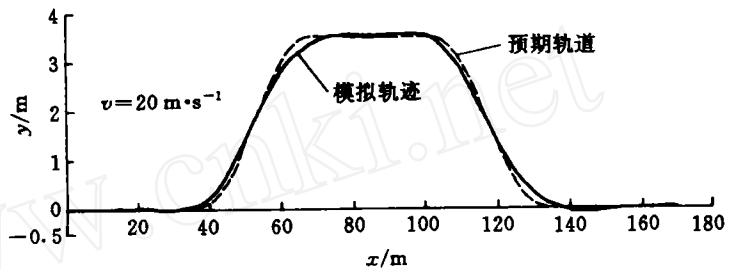


图2 双移线运动仿真结果

4 结束语

“前视轨线”假设较以前的“单点预瞄”更符合驾驶员实际行车情况,笔者建立的“前视轨线曲率控制模型”物理概念清晰,计算简单,考虑了更多的前方道路几何特征(位置、方向、曲率及其凹向)、车辆的运动状态(速度、侧偏角、侧向加速度)和车辆转向运动特性,具有很高的轨道跟随精度和较强的鲁棒性,可用于车辆的优化设计与试验,以及车辆自动驾驶技术的开发。

此外,笔者建议,应将“预瞄”与“前视”这2个名词区别开来,不要将“预瞄时间”、“预瞄距离”与“前视时间”、“前视距离”混作一谈。

参 考 文 献

- 1 郭孔辉. 汽车操纵动力学. 长春:吉林科学技术出版社,1991. 512,526
- 2 李正宜,张唯全,曾静康. 道路交通工程. 重庆:重庆大学出版社,1992. 11
- 3 孙义刚. 基于神经网络的驾驶员-汽车-环境闭环系统操纵稳定性研究:[学位论文]. 北京:中国农业大学,1996. 55~58,78~79