



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110435655 B

(45) 授权公告日 2020.12.22

(21) 申请号 201910784317.1

B60W 30/09 (2012.01)

(22) 申请日 2019.08.23

B60L 7/10 (2006.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 110435655 A

(56) 对比文件

CN 109367537 A, 2019.02.22

US 2012330494 A1, 2012.12.27

(43) 申请公布日 2019.11.12

US 2014129075 A1, 2014.05.08

(73) 专利权人 吉林大学
地址 130012 吉林省长春市前进大街2699号

CN 102815301 A, 2012.12.12

CN 110070707 A, 2019.07.30

审查员 张纵纵

(72) 发明人 初亮 王嘉伟 郭建华 许楠
郭崇 赵迪 许炎武 王引航

(74) 专利代理机构 长春市恒誉专利代理事务所
(普通合伙) 22212
代理人 李荣武

(51) Int. Cl.

B60W 30/165 (2020.01)

权利要求书5页 说明书11页 附图2页

(54) 发明名称

一种考虑再生制动的电动汽车车队自适应巡航优化方法

(57) 摘要

本发明公开了一种考虑再生制动的电动汽车车队自适应巡航优化方法,针对由多辆电动汽车做成的车队进行智能驾驶的自适应巡航过程中,从头车开始减速的情况,由前到后地使用模型预测控制算法对车队中所有车辆未来一段时间内的状态进行预测,通过设置优化目标函数以及约束方程对整体车队运行性能进行优化,以获得电动汽车车队的最优制动减速方案;对于车队中所有车辆之间实现互相通信的情况而言,在车队的总能量优化方面,设置所有电动汽车实现总回收能量的最优性指标;本发明所述方法可以有效提高电动汽车车队行驶的经济性,稳定性,安全性以及舒适性,在单个车辆能量优化的基础上进一步达到车队整体经济性的最优。



1. 一种考虑再生制动的电动汽车车队自适应巡航优化方法,其特征在于:

电动车车队具有若干辆电动汽车,令其总数为N,在一条车道上所有车辆以相同的速度,相同的车间距直线行驶;电动汽车车队行驶车道的前方存在其他车辆,且该车辆行驶速度较电动车车队行驶速度慢,此时电动汽车车队自适应巡航行驶的目的是以让车队内所有车辆以合适的制动力减速至避免与自身前方行驶的车辆碰撞,同时达到使电动汽车制动过程中产生的再生制动能量尽可能多,这个过程中还需要考虑汽车制动对乘客的舒适性,为了避免车队间各个车辆都能很好的跟随自身前方的相邻车辆运行,还需要考虑到车队的跟随性能;此时车队中的车辆处于一种正常制动状态,能够在足够远的距离外探测到存在速度较慢的车辆,从而使用现有的自适应巡航算法使车队在制动过程中有足够的时间和制动距离使车速下降到与前方车辆速度一致时,还留有足够的安全距离;

电动汽车车队中的车辆为具有再生制动系统的前轴驱动纯电动汽车,且全部车辆的物理参数相同,在同一车道内直线行驶;如果车队内所有汽车都能装备上无线通信装置并能够实现每辆汽车上的CAN总线信息能够接入此无线通信局域网中,则车队所有汽车上的轮速传感器,纵向加速度传感器,电机转矩传感器,液压制动力传感器,踏板位移传感器,踏板速度传感器,自适应巡航控制器记录的轮速,纵向加速度,电机转矩,液压制动力,踏板位移和速度信息都能被车队总控制器接收并处理,这种情况下只需在车队的头车上装备雷达传感器,其他车上不需要装雷达传感器,如果车队内所有汽车不能够通过无线通信装置互相连接,则车队内所有汽车都必须装备雷达传感器;

在制动过程开始前车队中所有车辆以相同的速度行驶,其中通过已有的自适应巡航控制算法能够使电动汽车车队中的头车获得一个期望的制动加速度,并通过纯电动汽车制动力分配策略将前后轴上的制动力进行分配,前轴所需制动力较小时由电机制动力提供,逐渐变大过程中一直由电机制动力提供补足,在超过电机最大制动力之后由液压力补足;

电动汽车车队行驶过程中,电动汽车车队行驶车道的前方存在其他车辆,且该车辆行驶速度较电动车车队行驶速度慢,电动汽车车队需要以合适的制动力减速至避免与自身前方行驶的车辆碰撞,利用已有的自适应巡航控制算法能够使电动汽车车队中的头车获得一个期望的制动加速度 a_u ,作为模型的输入,从期望加速度 a_u 到实际整车制动系统输出加速度

a_h 存在时延,其控制状态方程的传递函数为 $a_h = \frac{K}{\tau s + 1} a_u$,其中参数K为增益, τ 为时间常数,

这两个参数可对实际车辆进行系统辨识和参数标定获得, s 为传递函数中的微分算子;

使用模型预测控制算法对车队中所有车辆进行状态预测并根据预测结果设置成本函数和约束条件,求解模型最优解并将其作为系统控制目标,具体步骤为(1)电动汽车车队共

n_{\max} 辆车,其中第1辆车状态空间表达式设置为 $x_1 = \begin{bmatrix} x_{rel1} \\ v_{rel1} \\ v_1 \\ a_{h1} \\ j_1 \end{bmatrix}$, x_{rel1} 为与其前方车辆的纵向相对

距离,由雷达传感器获得; v_{rel1} 为与其前方车辆的纵向相对速度,也由雷达传感器获得; v_1 为第1辆车的纵向速度,由轮速传感器测量并通过CAN总线读取; a_{h1} 为第1辆车的纵向加速度,

由加速度传感器测量并通过CAN总线读取； j_1 为第1辆车的纵向加速度变化率，由相邻两个采样时间间隔内的 a_{h1} 作差后再除以采样时间获得；采样时间为 T ，离散化得到的第 $k+1$ 个采样时间获得的状态空间表达式用第 k 个采样空间的状态空间表达式表达的状态方程为

$$x_1(k+1) = Ax_1(k) + Ba_{u1}(k) + Gw_1(k)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & -\frac{T^2}{2} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -T & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 - \frac{T}{\tau_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\tau_1} & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{TK_1}{\tau_1} \\ \frac{K_1}{\tau_1} \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} \frac{T^2}{2} \\ T \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

参数 K_1 为增益， τ_1 为时间常数，这两个参数可对实际车辆进行标定获得；用 $w_1(k)$ 表示干扰输入，第 k 步的干扰预测为期望加速度本身，因此可写为 $w_1(k+j|k) = w_1(k) = a_{h1}$ ；

设预测时域为 N ，第 k 步开始往后 j 步的预测时域控制状态可以写为

$$x_1(k+j|k) = A^j x_1(k) + \begin{bmatrix} A^{j-1} & A^{j-2} & \dots & I \end{bmatrix} B \begin{bmatrix} u_1(k|k) \\ \dots \\ u_1(k+j-1|k) \end{bmatrix} + (A^{N-1} + A^{N-2} + \dots + A + I)Gw_1(k)$$

其中 $\begin{bmatrix} u_1(k|k) \\ \dots \\ u_1(k+j-1|k) \end{bmatrix}$ 表示第 k 步开始往后 j 步中，每一步预测时域内第一辆车的期望加速度组成的列向量， I 为单位矩阵；

电动汽车车队中的第1辆车体现跟随前车的跟随性能，状态空间表达式中参数较多，后续车辆由于处在车队环境，从电动汽车车队中第1辆车后面的车辆开始，所有车辆初始状态均为已知，因此可以简化状态空间表达式；

$$(2) \text{ 电动汽车车队中第 } n \text{ 辆车的状态空间表达式设置为 } x_n = \begin{bmatrix} x_{reln} \\ v_{reln} \\ v_n \\ a_{hn} \end{bmatrix}, \text{ 其中 } n = 2, 3, \dots,$$

x_{reln} 为第 n 辆车与第 $n-1$ 辆车间的纵向相对距离，在车队间车辆没有无线通讯装置来实现信息交互的情况下由车上的雷达传感器获得，在车队间车辆有无线通讯装置实现前后车行驶距离信息交互的情况下由第 n 辆车和第 $n-1$ 辆车行驶距离作差获得； v_{reln} 为第 n 辆车与第 $n-1$ 辆车间的纵向相对速度，在车队间车辆没有无线通讯装置来实现信息交互的情况下由车上的雷达传感器获得，在车队间车辆有无线通讯装置实现前后车行驶距离信息交互的情况下由第 n 辆车和第 $n-1$ 辆车行驶速度作差获得； v_n 为第 n 辆车的纵向速度，由轮速传感器

测量并通过CAN总线读取, a_{hn} 为第 n 辆车的纵向加速度,由第 n 辆车上的加速度传感器测量并通过CAN总线读取;第 n 辆车的离散化状态方程为 $x_n(k+1) = Ax_n(k) + Ba_{un}(k) + Gw_n(k)$

其中

$$A = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & -\frac{T^2}{2} \\ 0 & 1 & 0 & -T \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 - \frac{T}{\tau_n} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{TK_n}{\tau_n} \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} \frac{T^2}{2} \\ T \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

参数 K_n 为增益, τ_n 为时间常数, K_n 、 τ_n 参数可对实际车辆进行标定获得;用 $w_n(k)$ 表示干扰输入,第 k 步的干扰预测为期望加速度本身,因此可写为 $w_n(k+j|k) = w_n(k) = a_{hn}$,其中 K_n 、 τ_n 、 $w_n(k)$ 、 $w_n(k+j|k)$ 这四项参数中, n 的取值为 $n=2, 3, \dots, n_{\max}$;

设预测时域为 N ,第 k 步开始往后 j 步的预测时域控制状态可以写为

$$x_n(k+j|k) = A^j x_n(k) + \begin{bmatrix} A^{j-1} & A^{j-2} & \dots & I \end{bmatrix} B \begin{bmatrix} u_n(k|k) \\ \dots \\ u_n(k+j-1|k) \end{bmatrix} + (A^{N-1} + A^{N-2} + \dots + A + I)Gw_n(k)$$

其中 $\begin{bmatrix} u_n(k|k) \\ \dots \\ u_n(k+j-1|k) \end{bmatrix}$ 表示第 k 步开始往后 j 步中,每一步预测时域内第 n 辆车的期望加速度组成的列向量, I 为单位矩阵。

2. 如权利要求1所述的一种考虑再生制动的电动汽车车队自适应巡航优化方法,其特征在于,所述模型预测控制方法能够预测未来一段时间内电动汽车车队内所有汽车的状态,在获得这些状态之后,通过设置优化目标函数以及约束方程对包含再生制动能量回收性能,安全性,舒适性和跟随性在内的整体车队运行性能进行优化,以获得电动汽车车队的最优制动减速方案。

3. 如权利要求1所述的一种考虑再生制动的电动汽车车队自适应巡航优化方法,其特征在于,具体目标函数和约束的设置再生制动能量回收性能指标 E_m :确定每一步汽车的加速度和车速之后,制动过程中电机制动力矩 T_m 是车速 v 和加速度 a_h 的函数,而且此函数关系可通过试验确定,为一已知关系,令 i_n 表示后车 n 前轴到电机的总传动比, E_{mn} 表示后车 n 制动产生的再生制动能量, $a_{hn}(k)$ 表示第 k 步后车 n 的加速度, $v_n(k)$ 表示第 k 步后车 n 的纵向速度, T_{mn} 表示第 k 步后车 n 的电机制动力矩, r_{wn} 表示后车 n 的车轮半径, T 为每一步所经历的时间即采样时间,则第 k 步后车 n 所完成的制动回收能量为

$$E_{mn}(a_{hn}(k), v_n(k)) = \frac{T_{mn}(a_{hn}(k), v_n(k))i_n}{r_{wn}} \times [v_n(k)T + \frac{1}{2}a_{hn}(k)T^2]$$

舒适性指标Conf:加权的相邻两步长内加速度差平方与这一步加速度平方之和

$$\text{Conf}_n(k) = c_1(a_{hn}(k) - a_{hn}(k-1))^2 + c_2 a_{hn}(k)^2$$

跟随性指标Foll:加权的相邻两车间距与安全间距之差平方与该两车车速之差平方之和

$$Foll_n(k) = c_3(x_{rel(n)}(k) - d)^2 + c_4(v_{rel(n)}(k))^2$$

安全性指标为约束,令电动汽车车队中车辆总数为 n_{max} ,同时令 k 表示模型预测中任意一个采样时间内得到的参数,约束表示为各个车辆间的相对速度不超过一个极限值 v_{relmax} ,各个车辆的实际产生加速度绝对值有一个区间范围的约束,车1的相邻两采样时间内加速度变化率绝对值有一个区间范围的约束,各个车辆间的相对距离不小于一个极限值 x_{relmin} ,相邻两采样时间范围内车辆车速之差的绝对值不大于一个极限值 v_{max} ,同时为了保证车队行驶的稳定性,各个车辆间的相对距离不大于一个极限值 x_{relmax} :

$$v_{reln}(k) \in [0, v_{relmax}], n=1, 2, 3, \dots, n_{max}$$

$$|a_{hn}(k)| \in [0, a_{hmax}], n=1, 2, 3, \dots, n_{max}$$

$$|j_1| \in [0, j_{max}]$$

$$|\Delta v_n(k)| = |v_n(k) - v_n(k-1)| \in [0, \Delta v_{max}], n=1, 2, 3, \dots, n_{max}$$

$$x_{reln}(k) \in [x_{relmin}, x_{relmax}], n=1, 2, 3, \dots, n_{max}$$

以上各式中,下标 n 代表车 n 的相关指标, c_1, c_2, c_3, c_4 表示该项指标里各个小指标所占的权重,可以根据驾驶员驾驶风格和驾驶习惯进行调节。

4. 如权利要求3所述的一种考虑再生制动的电动汽车车队自适应巡航优化方法,其特征在于,综合对各项指标进行加权,得到目标函数,对于单个车辆为

$$J_n = \sum_{i=1}^N \{C_1 E_{mn}(a_{mn}(k+i), v_{mn}(k+i)) + C_2 Conf_n(k+i) + C_3 Foll_n(k+i)\}$$

其中 C_1, C_2, C_3 表示各项指标所占权重,亦可由驾驶员驾驶风格和驾驶习惯进行调节; N 表示整个预测过程所经历的步数;约束为 $v_{reli} \in [0, v_{relmax}], i=1, 2, 3, \dots, k$,结合模型预测方程获得的未来一段时刻内的车辆状态,即可对带有约束控制的目标函数进行求解,获得最优控制方案。

5. 如权利要求3所述的一种考虑再生制动的电动汽车车队自适应巡航优化方法,其特征在于,对于存在无线通信装置使电动汽车车队中所有车辆之间实现状态的互相通信的情况而言,在车队的总能量优化方面,还可以设置一个所有电动汽车实现的总回收能量最优

指标 $E = \sum_{n=1}^{n_{max}} \{ \sum_{i=1}^N E_{mn}(a_{mn}(k+i), v_{kn}(k+i)) \}$ 其中 n_{max} 表示电动汽车车队中的车辆总数,此时重新

设置目标函数,将舒适性指标和跟随性指标在不违反约束条件的情况下适当弱化,得到电动汽车车队的整体加权优化目标函数

$$J = R_E E + \sum_{n=1}^{n_{max}} \left[\sum_{i=1}^N R_n \{ C_2 Conf_n(k+i) + C_3 Foll_n(k+i) \} \right]$$

其中 $R_E, R_n, i=1, 2, \dots, n_{max}$ 是重新设置的权重系数,该目标函数的约束条件不变,目的是对车队行驶的总体过程进行优化,使用非线性规划算法,通过取新的成本函数的最值,求解该目标函数和约束下的最优控制序列问题,其中每辆车的加速度和速度的控制序列即为车队中各个汽车最佳的制动减速方案。

6. 如权利要求1或4所述的一种考虑再生制动的电动汽车车队自适应巡航优化方法,其特征在于,在求取目标函数的各项指标过程中,如果整车控制器检测到电动汽车的电池SOC值大于发生过充电的阈值时,此时制动力全部由液压制动力提供,目标函数中的经济性指

标权重变为0。

一种考虑再生制动的电动汽车车队自适应巡航优化方法

技术领域

[0001] 本发明属于电动汽车再生制动能量回收和自适应巡航技术领域,具体涉及一种考虑再生制动的电动汽车车队自适应巡航优化方法。

背景技术

[0002] 现有的电动汽车再生制动技术主要目的是在电动汽车进行制动的过程中将电机制动与液压制动产生的制动力进行合理的分配,使电动汽车的动力电池能够在保证制动安全性的前提下尽可能多地回收汽车在制动,下坡等工况下损耗的动能。现有的汽车自适应巡航系统是一种驾驶员辅助驾驶技术,有定速巡航和跟车两种模式,能够在驾驶员设置打开自适应巡航功能之后对汽车纵向行驶动力学进行控制,实现汽车在道路上自主行驶的功能。随着汽车保有量的增加,道路交通负载逐渐饱和,现有的多车跟驰模型的研究集成了汽车的纵向和横向动力学以及交通流建模技术,能够应用在车队运行的条件下,提高车队整体运行的效率并获得整体最优的行驶方案。

[0003] 目前传统燃油汽车的自适应巡航系统发展较为成熟,对于电动汽车的自适应巡航系统的研究也已经提出了很多相关的方案,电动汽车由于具有再生制动能量回收系统,而且整车电路控制方面与传统燃油汽车存在很大差异,因此需要对电动汽车的自适应巡航系统提出符合其自身特点的需求和解决方案。但是目前对于电动车车队进行的多车自适应巡航控制的研究较少,即车队自适应巡航行驶和电动车尤其是再生制动能量回收系统的结合不紧密。因此对于电动车车队而言,对其进行模型的建立与求解是有必要的。

发明内容

[0004] 为了克服现有技术中对于车队自适应巡航行驶和电动车尤其是再生制动能量回收系统的结合不紧密的缺点,本发明提供一种考虑再生制动的电动汽车车队自适应巡航优化方法。本发明设想的问题解决场景为电动汽车车队中若干辆汽车在以相同车距相同车速匀速在一条车道上行驶时,车道正前方出现一辆正在行驶且车速比车队整体车速慢的汽车,此时需要车队中各个车辆在保持安全距离的前提下减速,直至车速变为与前车相同,而且过程中始终保证任意相邻两辆车之间不发生碰撞。本发明提出的算法目标是保证上述过程的进行,同时使这个过程中发生的电动汽车制动过程能够尽可能多地回收制动能量。

[0005] 在本发明中,对于背景技术的改进有:将自适应巡航功能加入电动汽车车队的行驶过程中,并且考虑到电动汽车的再生制动系统,将再生制动所回收的能量多少作为评判车队中各个车辆制动减速方案的指标之一。其好处是将电动汽车车队行驶成本降低,能够保证车队行驶的经济性。本发明提供的一种考虑再生制动的电动汽车车队自适应巡航优化方法同时还能够兼顾车队行驶的稳定性和安全性以及制动过程的舒适性。在车队的基础上,本发明能够为以下两种情况提供技术方案,一种是在车队的各个车辆之间能够建立无线通信使每个车辆都能获取其它所有车辆的行驶信息;另外一种是在车队的各个车辆之间没有无线通信方式建立信息传递渠道,各个车辆只能凭借其车上的传感器获得自己前方相邻的车

辆行驶的相关信息。

[0006] 结合说明书附图,本发明的技术方案如下:

[0007] 一种考虑再生制动的电动汽车车队自适应巡航优化方法,其中电动车车队具有若干辆电动汽车,令其总数为N,在一条车道上所有车辆以相同的速度,相同的车间距直线行驶。电动汽车车队行驶车道的前方存在其他车辆,且该车辆行驶速度较电动车车队行驶速度慢,此时电动汽车车队自适应巡航行驶的目的是以让车队内所有车辆以合适的制动力减速至避免与自身前方行驶的车辆碰撞,同时达到使电动汽车制动过程中产生的再生制动能量尽可能多,这个过程中还需要考虑汽车制动对乘客的舒适性,为了避免车队间各个车辆都能很好的跟随自身前方的相邻车辆运行,还需要考虑到车队的跟随性能。此时车队中的车辆处于一种正常制动状态,能够在足够远的距离外探测到存在速度较慢的车辆,从而使用现有的自适应巡航算法使车队在制动过程中有足够的时间和制动距离使车速下降到与前方车辆速度一致时,还留有足够的安全距离。

[0008] 一种考虑再生制动的电动汽车车队自适应巡航优化方法,其中电动汽车车队中的车辆为具有再生制动系统的前轴驱动纯电动汽车,且全部车辆的物理参数相同,在同一车道内直线行驶。如果车队内所有汽车都能装备上无线通信装置并能够实现每辆汽车上的CAN总线信息能够接入此无线通信局域网中,则车队所有汽车上的轮速传感器,纵向加速度传感器,电机转矩传感器,液压制动力传感器,踏板位移传感器,踏板速度传感器,自适应巡航控制器等硬件记录的信息都能被车队总控制器接收并处理,这种情况下只需在车队的头车上装备雷达传感器,其他车上不需要装雷达传感器。如果车队内所有汽车不能够通过无线通信装置互相连接,则车队内所有汽车都必须装备雷达传感器。

[0009] 一种考虑再生制动的电动汽车车队自适应巡航优化方法,在制动过程开始前车队中所有车辆以相同的速度行驶,其中通过已有的自适应巡航控制算法能够使电动汽车车队中的头车获得一个期望的制动加速度 a_u ,并且由此获得制动器的制动强度 $z = a_u/g$, g 为重力加速度;考虑到法规对制动力的要求和尽可能多回收制动能量的需求,设计的纯电动汽车制动力分配策略按照制动强度 z 的不同划分为

[0010] 当 $0 < z \leq z_1$ 时, $F_{bf} = F_b, F_{br} = 0$;

[0011] 当 $z_1 < z \leq z_2$ 时, $F_{bf} = \beta_{ECE-B} F_b, F_{br} = (1 - \beta_{ECE-B}) F_b, \beta_{ECE-B} = \frac{(z_2 + 0.04)(b + h_g z_2)}{0.7 z_2 L}$;

[0012] 当 $z_2 < z \leq z_3$ 时, $F_{bf} = \frac{T_{b_max} i_0 i_g \eta}{r_w}, F_{br} = F_b - F_{bf}$;

[0013] 当 $z > z_3$ 时, $F_{bf} = \beta F_b, F_{br} = (1 - \beta) F_b$

[0014] 边界条件为

[0015] $z_1 = 0.1$;

[0016] $z_2 = \frac{-(b + 0.04 h_g) + \sqrt{(b - 0.04 h_g)^2 + 2.8 T_{b_max} i_0 i_g h_g L \eta / (r_w G)}}{2 h_g}$;

[0017] $z_3 = \frac{T_{b_max} i_0 i_g \eta}{G \beta r_w}$;

[0018] 其中 F_b 为需求总制动力,由已有的单车自适应巡航控制算法得出的车辆期望加速

度得到, F_{bf} 为前轴所需制动力 (该力较小时由电机制动力提供, 逐渐变大过程中一直由电机制动力提供补足, 在超过电机最大制动力之后由液压力补足), F_{br} 为后轴所需制动力 (完全由液压力产生), b 为质心到后轴距离, h_g 为质心高度, L 为轴距, T_{b_max} 为电机最大制动转矩, i_0 为变速器传动比, i_g 为主减速器传动比, η 为总传动效率, r_w 为车轮滚动半径, β 为制动器制动力分配系数, G 为车重。

[0019] 一种考虑再生制动的电动汽车车队自适应巡航优化方法, 其中电动汽车车队行驶过程中适用本发明提供方法的前提是电动汽车车队行驶车道的前方存在其他车辆, 且该车辆行驶速度较电动车车队行驶速度慢, 电动汽车车队需要以合适的制动力减速至避免与自身前方行驶的车辆碰撞, 利用已有的自适应巡航控制算法能够使电动汽车车队中的头车获得一个期望的制动加速度 a_u , 作为模型的输入, 从期望加速度 a_u 到实际整车制动系统输出加速度 a_h 存在时延, 其控制状态方程的传递函数为 $a_h = \frac{K}{\tau s + 1} a_u$, 其中参数 K 为增益, τ 为时间常数, 这两个参数可对实际车辆进行系统辨识和参数标定获得。使用模型预测控制算法对车队中所有车辆进行状态预测并根据预测结果设置成本函数和约束条件, 求解模型最优解并将其作为系统控制目标, 具体步骤为

[0020] 电动汽车车队中的头车 (以下称为车1) 状态空间表达式设置为 $x_1 = \begin{bmatrix} x_{rel1} \\ v_{rel1} \\ v_1 \\ a_{h1} \\ j_1 \end{bmatrix}$, x_{rel1} 为

与其前方车辆的纵向相对距离, 由雷达传感器获得; v_{rel1} 为与其前方车辆的纵向相对速度, 也由雷达传感器获得; v_1 为车1的纵向速度, 由轮速传感器测量并通过CAN总线读取; a_{h1} 为车1的纵向加速度, 由加速度传感器测量并通过CAN总线读取; j_1 为车1的纵向加速度变化率, 由相邻两个采样时间间隔内的 a_{h1} 作差后再除以采样时间获得。采样时间为 T , 离散化得到的第 $k+1$ 个采样时间获得的状态空间表达式用第 k 个采样空间的状态空间表达式表达的状态方程为

[0021] $x_1(k+1) = Ax_1(k) + Ba_{u1}(k) + Gw_1(k)$

[0022] 其中

$$[0023] \quad A = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & -\frac{T^2}{2} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -T & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 - \frac{T}{\tau_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\tau_1} & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{TK_1}{\tau_1} \\ \frac{K_1}{\tau_1} \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} \frac{T^2}{2} \\ T \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

[0024] 参数 K_1 为增益, τ_1 为时间常数, 这两个参数可对实际车辆进行标定获得; 用 $w_1(k)$ 表

示干扰输入,第k步的干扰预测为期望加速度本身,因此可写为 $w_1(k+j|k) = w_1(k) = a_{h1}$ 。

[0025] 设预测时域为N,第k步开始往后j步的预测时域控制状态可以写为

$$x_1(k+j|k) = A^j x_1(k) + [A^{j-1} \ A^{j-2} \ \dots \ I] B \begin{bmatrix} u_1(k|k) \\ \dots \\ u_1(k+j-1|k) \end{bmatrix} + (A^{N-1} + A^{N-2} + \dots + A + I) G w_1(k) \quad \text{车1体现}$$

跟随前车的跟随性能,状态空间表达式中参数较多,后续车辆由于处在车队环境,从电动汽车车队中车1相邻的后方车辆开始,所有后车相邻的前方的车辆初始状态均为已知,因此可以简化状态空间表达式。

[0026] 电动汽车车队中车1后方相邻车辆(以下称为车2)的状态空间表达式设置为

$$x_2 = \begin{bmatrix} x_{rel2} \\ v_{rel2} \\ v_2 \\ a_{h2} \end{bmatrix}, \quad x_{rel2} \text{为车2与车1间的纵向相对距离,在车队间车辆没有无线通讯装置来实现信}$$

息交互的情况下由车上的雷达传感器获得,在车队间车辆有无线通讯装置实现前后车行驶距离信息交互的情况下由车2和车1行驶距离作差获得; v_{rel2} 为车2与车1间的纵向相对速度,在车队间车辆没有无线通讯装置来实现信息交互的情况下由车上的雷达传感器获得,在车队间车辆有无线通讯装置实现前后车行驶距离信息交互的情况下由车2和车1行驶速度作差获得, v_2 为车2的纵向速度,由轮速传感器测量并通过CAN总线读取, a_{h2} 为车2的纵向加速度,由车2上的加速度传感器测量并通过CAN总线读取;车2的离散化状态方程为

$$[0027] \quad x_2(k+1) = A x_2(k) + B a_{u2}(k) + G w_2(k)$$

[0028] 其中

$$[0029] \quad A = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & -\frac{T^2}{2} \\ 0 & 1 & 0 & -T \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 - \frac{T}{\tau_2} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{TK_2}{\tau_2} \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} \frac{T^2}{2} \\ T \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

[0030] 参数 K_2 为增益, τ_2 为时间常数,这两个参数可对实际车辆进行标定获得;用 $w_2(k)$ 表示干扰输入,第k步的干扰预测为期望加速度本身,因此可写为 $w_2(k+j|k) = w_2(k) = a_{h2}$ 设预测时域为N,第k步开始往后j步的预测时域控制状态可以写为

$$[0031] \quad x_2(k+j|k) = A^j x_2(k) + [A^{j-1} \ A^{j-2} \ \dots \ I] B \begin{bmatrix} u_2(k|k) \\ \dots \\ u_2(k+j-1|k) \end{bmatrix} + (A^{N-1} + A^{N-2} + \dots + A + I) G w_2(k)$$

[0032] 车2后方所有电动汽车车队中的汽车(以下不失一般性地称为车n)的状态空间表达式与离散化状态方程和预测时域控制与车2相同。

[0033] 一种考虑再生制动的电动汽车车队自适应巡航优化方法,其中按照前述模型预测控制方法能够预测未来一段时间内电动汽车车队内所有汽车的状态,在获得这些状态之

后,通过设置优化目标函数以及约束方程对包含再生制动能量回收性能,安全性,舒适性和跟随性在内的整体车队运行性能进行优化,以获得电动汽车车队的最优制动减速方案。具体目标函数和约束的设置:

[0034] 再生制动能量回收性能指标 E_m :确定每一步汽车的加速度和车速之后,由于前述已经确定制动力的分配,因此制动过程中电机制动力矩 T_m 是车速 v 和加速度 a_h 的函数,而且此函数关系可通过试验确定,为一已知关系。令 i_n 表示后车 n 前轴到电机的总传动比, E_{mn} 表示后车 n 制动产生的再生制动能量, $a_{hn}(k)$ 表示第 k 步后车 n 的加速度, $v_n(k)$ 表示第 k 步后车 n 的纵向速度, T_{mn} 表示第 k 步后车 n 的电机制动力矩, r_{wn} 表示后车 n 的车轮半径, T 为每一步所经历的时间即采样时间,则第 k 步后车 n 所完成的制动回收能量为

$$[0035] \quad E_{mn}(a_{hn}(k), v_n(k)) = \frac{T_{mn}(a_{hn}(k), v_n(k))i_n}{r_{wn}} \times [v_n(k)T + \frac{1}{2}a_{hn}(k)T^2]$$

[0036] 舒适性指标 $Conf$:加权的相邻两步长内加速度差平方与这一步加速度平方之和

$$[0037] \quad Conf_n(k) = c_1(a_{hn}(k) - a_{hn}(k-1))^2 + c_2 a_{hn}(k)^2$$

[0038] 跟随性指标 $Foll$:加权的相邻两车间距与安全间距之差平方与该两车车速之差平方之和

$$[0039] \quad Foll_n(k) = c_3(x_{rel(n)}(k) - d)^2 + c_4(v_{rel(n)}(k))^2$$

[0040] 安全性指标为约束,令电动汽车车队中车辆总数为 n_{max} ,同时令 k 表示模型预测中任意一个采样时间内得到的参数,约束表示为各个车辆间的相对速度不超过一个极限值 v_{relmax} ,各个车辆的实际产生加速度绝对值有一个区间范围的约束,车1的相邻两采样时间内加速度变化率绝对值有一个区间范围的约束,各个车辆间的相对距离不小于一个极限值 x_{relmin} ,相邻两采样时间范围内车辆车速之差的绝对值不大于一个极限值 v_{max} ,同时为了保证车队行驶的稳定性,各个车辆间的相对距离不大于一个极限值 x_{relmax} :

$$[0041] \quad v_{reln}(k) \in [0, v_{relmax}], n=1, 2, 3, \dots, n_{max}$$

$$[0042] \quad |a_{hn}(k)| \in [0, a_{hmax}], n=1, 2, 3, \dots, n_{max}$$

$$[0043] \quad |j_1| \in [0, j_{max}]$$

$$[0044] \quad |\Delta v_n(k)| = |v_n(k) - v_n(k-1)| \in [0, \Delta v_{max}], n=1, 2, 3, \dots, n_{max}$$

$$[0045] \quad x_{reln}(k) \in [x_{relmin}, x_{relmax}], n=1, 2, 3, \dots, n_{max}$$

[0046] 以上各式中,下标 n 代表车 n 的相关指标, c_1, c_2, c_3, c_4 表示该项指标里各个小指标所占的权重,可以根据驾驶员驾驶风格和驾驶习惯等进行调节。综合对各项指标进行加权,得到目标函数,对于单个车辆为

$$[0047] \quad J_n = \sum_{i=1}^N \{C_1 E_{mn}(a_{hn}(k+i), v_{hn}(k+i)) + C_2 Conf_n(k+i) + C_3 Foll_n(k+i)\}$$

[0048] 其中 C_1, C_2, C_3 表示各项指标所占权重,亦可由驾驶员驾驶风格和驾驶习惯等进行调节; N 表示整个预测过程所经历的步数;

[0049] 约束为 $v_{reli} \in [0, v_{relmax}], i=1, 2, 3, \dots, k$ 。

[0050] 结合模型预测方程获得的未来一段时刻内的车辆状态,即可对带有约束控制的目标函数进行求解,获得最优控制方案。

[0051] 一种考虑再生制动的电动汽车车队自适应巡航优化方法,其中在求取目标函数的

各项指标过程中,如果整车控制器检测到电动汽车的电池SOC值大于发生过充电的阈值时,此时制动力全部由液压制动力提供,目标函数中的经济性指标权重变为0。

[0052] 一种考虑再生制动的电动汽车车队自适应巡航优化方法,其中对于存在无线通信装置使电动汽车车队中所有车辆之间实现状态的互相通信的情况而言,在车队的总能量优化方面,还可以设置一个所有电动汽车实现的总回收能量最优指标

$$[0053] \quad E = \sum_{n=1}^{n_{\max}} \left\{ \sum_{i=1}^N E_{mn}(a_{hn}(k+i), v_{kn}(k+i)) \right\}$$

[0054] 其中 n_{\max} 表示电动汽车车队中的车辆总数。

[0055] 此时重新设置目标函数,将舒适性指标和跟随性指标在不违反约束条件的情况下适当弱化,得到电动汽车车队的整体加权优化目标函数

$$[0056] \quad J = R_E E + \sum_{n=1}^{n_{\max}} \left[\sum_{i=1}^N R_n \{ C_2 \text{Conf}_n(k+i) + C_3 \text{Foll}_n(k+i) \} \right]$$

[0057] 其中 $R_E, R_n (i=1, 2, \dots, n_{\max})$ 是重新设置的权重系数。该目标函数的约束条件不变,目的是对车队行驶的总过程进行优化。使用非线性规划算法,通过取新的成本函数的最值,求解该目标函数和约束下的最优控制序列问题,其中每辆车的加速度和速度的控制序列即为车队中各个汽车最佳的制动减速方案。

[0058] 与现有技术相比,本发明的有益效果在于:

[0059] 本发明将自适应巡航功能加入电动汽车车队的行驶过程中,并且考虑到电动汽车的再生制动系统,将再生制动所回收的能量多少作为评判车队中各个车辆制动减速方案的指标之一。其好处是将电动汽车车队行驶成本降低,能够保证车队行驶的经济性。本发明提供的一种考虑再生制动的电动汽车车队自适应巡航优化方法同时还能够兼顾车队行驶的稳定性,安全性以及制动过程的舒适性。

[0060] 本发明可以将车辆间信息互联引入电动汽车车队中,在自适应巡航过程中能够通过控制器的设计使车队总体回收的制动能量达到最优,在单个车辆能量优化的基础上进一步达到车队整体制动能量回收效果的最优,这样的效果比单个车辆完成制动能量回收的效果要好。

附图说明

[0061] 图1为本发明所述的一种考虑再生制动的电动汽车车队自适应巡航优化方法中,电动汽车车队行驶过程中各个车辆状态的示意图;

[0062] 图2为本发明所述的一种考虑再生制动的电动汽车车队自适应巡航优化方法的流程图;

具体实施方式

[0063] 为了进一步说明本发明的技术方案,结合说明书附图,本发明的具体实施方式如下:

[0064] **【实施例1】**

[0065] 一种考虑再生制动的电动汽车车队自适应巡航优化方法,以三辆完全相同的电动汽车组成的车队在高速公路上同一车道内以相同的车间距和相同的速度直线行驶,高速公

路笔直且无坡度。电动汽车车队中三辆汽车从前到后分别称为车1,车2和车3。车1上装载有自适应巡航控制器和雷达传感器,车2和车3上装载自适应巡航控制器,且三辆车之间设置有无线通信装置,能够实现三辆车之间的车速,行驶距离,行驶加速度等行驶信息交互,三辆车上的自适应巡航控制器能够获取这些行驶信息。在同车道前方没有低速车辆行驶时,车队中各个车辆上的自适应巡航控制器控制车辆保持着自适应巡航模式中的定速巡航模式。三辆电动汽车的动力电池SOC值均适合再生制动的能量回收需求。

[0066] 在车1的雷达传感器的可探测范围内存在一辆同车道内行驶的前车,而且该前车行驶速度小于车队的总体行驶速度。此时,车1的自适应巡航控制器控制车辆进入自适应巡航控制的接近模式,整车开始制动。控制器根据已有的自适应巡航控制算法获取一个理想的制动减速度 a_{u1} ,此时制动器的制动强度 $z_1 = a_{u1}/g$, g 为重力加速度。根据本发明提供的制动力分配方法,根据 z_1 的大小获取合适的前后轴制动力分配,从期望加速度 a_{u1} 到实际整车

制动系统输出加速度 a_{h1} 存在时延,其控制状态方程的传递函数为 $a_h = \frac{K}{\tau s + 1} a_u$,其中参数 K

为增益, τ 为时间常数,这两个参数对车队中的车辆进行系统辨识,参数识别与标定试验获得。在整个行驶过程中,车1上的雷达传感器实时获取并向自适应巡航控制器发送与其前方车辆的纵向相对距离 x_{rel1} ,与其前方车辆的纵向相对速度 v_{rel1} ;轮速传感器测量并通过CAN总线实时向自适应巡航控制器发送车1的纵向速度 v_1 ;加速度传感器测量并通过CAN总线实时向自适应巡航控制器发送车1的纵向加速度 a_{h1} ;相邻两个采样时间间隔内的 a_{h1} 作差后再除以采样时间获得车1的纵向加速度变化率 j_1 ,采样时间为 T 。车1的状态空间表达式设置为

$x_1 = \begin{bmatrix} x_{rel1} \\ v_{rel1} \\ v_1 \\ a_{h1} \\ j_1 \end{bmatrix}$,离散化得到的第 $k+1$ 个采样时间获得的状态空间表达式用第 k 个采样空间的状态空间表达式表达的状态方程为 $x_1(k+1) = A_1 x_1(k) + B_1 a_{u1}(k) + G_1 w_1(k)$ 。其中

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & -\frac{T^2}{2} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -T & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 - \frac{T}{\tau_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\tau_1} & 0 \end{bmatrix}, \quad B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{TK_1}{\tau_1} \\ \frac{K_1}{\tau_1} \end{bmatrix}, \quad G_1 = \begin{bmatrix} \frac{T^2}{2} \\ T \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

T 为采样时间,参数 K_1 和 τ_1 通过对于车1进行

系统辨识,参数识别与标定试验获得。

[0067] 用 $w_1(k)$ 表示干扰输入,第 k 步的干扰预测为期望加速度本身,因此可写为 $w_1(k+j|k) = w_1(k) = a_{h1}$ 。设预测时域为 N ,第 k 步开始往后 j 步的预测时域控制状态可以写为

$$x_1(k+j|k) = A_1^j x_1(k) + \begin{bmatrix} A_1^{j-1} & A_1^{j-2} & \dots & I \end{bmatrix} B_1 \begin{bmatrix} u_1(k|k) \\ \dots \\ u_1(k+j-1|k) \end{bmatrix} + (A_1^{N-1} + A_1^{N-2} + \dots + A_1 + I) G_1 w_1(k) \quad \text{由此获}$$

得在预测时域内的每一步下车1与其前方车辆的纵向相对距离与相对速度,车1的速度与加速度等信息。

[0068] 后续的车2和车3由于处在车队环境,从电动汽车车队的车2开始,所有后车相邻的前方的车辆初始状态均为已知,因此可以简化状态空间表达式。由于车队的车辆之间装有实时无线通讯装置,因此车2和可以通过与前方的相邻车辆的车间通信获得并通过距离和速度的作差向车上的自适应巡航装置传送车2与车1间的相对纵向距离 x_{rel2} 和相对纵向速度 v_{rel2} ,通过车2的轮速传感器测量并通过CAN总线实时向自适应巡航控制器发送车2的纵向速度 v_2 ;加速度传感器测量并通过CAN总线实时向自适应巡航控制器发送车2的纵向加速度 a_{h2} 。车3获得并通过距离和速度的作差向车上的自适应巡航装置传送车3与车2间的相对纵向距离 x_{rel3} 和相对纵向速度 v_{rel3} ,通过车3的轮速传感器测量并通过CAN总线实时向自适应巡航控制器发送车3的纵向速度 v_3 ;加速度传感器测量并通过CAN总线实时向自适应巡航控制器发送车3的纵向加速度 a_{h3} 。

[0069] 由于在车间通讯的情景下车队内部的车辆之间的状态参数可以比较方便地通过无线通信装置获取,因此可以与车1类似的方式对车队内其他车辆进行状态的预测,同时简

化预测参数。简化车2的状态空间表达式设置为 $x_2 = \begin{bmatrix} x_{rel2} \\ v_{rel2} \\ v_2 \\ a_{h2} \end{bmatrix}$,经过离散化之后的状态方程为

$$x_2(k+1) = A_2 x_2(k) + B_2 a_{h2}(k) + G_2 w_2(k) \quad \text{。其中 } A_2 = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & -\frac{T^2}{2} \\ 0 & 1 & 0 & -T \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 - \frac{T}{\tau_2} \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{TK_2}{\tau_2} \end{bmatrix}, \quad G_2 = \begin{bmatrix} \frac{T^2}{2} \\ T \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, T$$

为采样时间,由于是同样的车辆,参数 K_2 和 τ_2 与车1的对应参数相同。用 $w_2(k)$ 表示干扰输入,第k步的干扰预测为期望加速度本身,因此可写为 $w_2(k+j|k) = w_2(k) = a_{h2}$ 。设预测时域为N,第k步开始往后j步的预测时域控制状态可以写为

$$x_2(k+j|k) = A_2^j x_2(k) + \begin{bmatrix} A_2^{j-1} & A_2^{j-2} & \dots & I \end{bmatrix} B_2 \begin{bmatrix} u_2(k|k) \\ \dots \\ u_2(k+j-1|k) \end{bmatrix} + (A_2^{N-1} + A_2^{N-2} + \dots + A_2 + I) G_2 w_2(k) \quad \text{由此获}$$

得在预测时域内的每一步下车2与其前方的车1的纵向相对距离与相对速度,车2的速度与加速度等信息。

[0070] 简化车3的状态空间表达式设置为 $x_3 = \begin{bmatrix} x_{rel3} \\ v_{rel3} \\ v_3 \\ a_{h3} \end{bmatrix}$, 经过离散化之后的状态方程为 $x_3(k$

$$+1) = A_3 x_3(k) + B_3 a_{u3}(k) + G_3 w_3(k)。其中 A_3 = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & -\frac{T^2}{2} \\ 0 & 1 & 0 & -T \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 - \frac{T}{\tau_2} \end{bmatrix}, B_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{TK_3}{\tau_3} \end{bmatrix}, G_3 = \begin{bmatrix} \frac{T^2}{2} \\ T \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, T为采$$

样时间,由于是同样的车辆,参数 K_3 和 τ_3 与车1的对应参数相同。用 $w_3(k)$ 表示干扰输入,第 k 步的干扰预测为期望加速度本身,因此可写为 $w_3(k+j|k) = w_3(k) = a_{h3}$ 。设预测时域为 N ,第 k 步开始往后 j 步的预测时域控制状态可以写为

$$x_3(k+j|k) = A_3^j x_3(k) + \begin{bmatrix} A_3^{j-1} & A_3^{j-2} & \dots & I \end{bmatrix} B_3 \begin{bmatrix} u_3(k|k) \\ \dots \\ u_3(k+j-1|k) \end{bmatrix} + (A_3^{N-1} + A_3^{N-2} + \dots + A_3 + I) G_3 w_3(k) 由此获$$

得在预测时域内的每一步下车3与其前方的车2的纵向相对距离与相对速度,车3的速度与加速度等信息。

[0071] 在获取以上各个车辆的状态信息后,自适应巡航控制器通过设置优化目标函数以及约束方程对包含再生制动能量回收性能,安全性,舒适性和跟随性在内的整体车队运行性能进行优化,获得电动汽车车队的最优制动减速方案。确定每一步汽车的加速度和车速之后,由于前述已经确定制动力的分配,因此制动过程中电机制动力矩 T_m 是车速 v 和加速度 a_h 的函数,而且此函数关系可通过试验确定,为一已知关系。令 i_1, i_2, i_3 表示后车1,后车2,后车3前轴到电机的总传动比, E_{m1}, E_{m2}, E_{m3} 表示后车1,后车2,和后车3制动产生的再生制动能量, $a_{h1}(k), a_{h2}(k), a_{h3}(k)$ 表示第 k 步后车1,后车2和后车3的加速度, $v_1(k), v_2(k), v_3(k)$ 表示第 k 步后车1,后车2和后车3的纵向速度, T_{m1}, T_{m2}, T_{m3} 表示第 k 步后车1,后车2和后车3的电机制动力矩, r_{w1}, r_{w2}, r_{w3} 表示后车1,后车2和后车3的车轮半径, T 为每一步所经历的时间即采样时间,则第 k 步后车1,后车2和后车3所完成的制动回收能量为

$$[0072] \quad E_{m1}(a_{h1}(k), v_1(k)) = \frac{T_{m1}(a_{h1}(k), v_1(k)) i_1}{r_{w1}} \times [v_1(k)T + \frac{1}{2} a_{h1}(k)T^2]$$

$$[0073] \quad E_{m2}(a_{h2}(k), v_2(k)) = \frac{T_{m2}(a_{h2}(k), v_2(k)) i_2}{r_{w2}} \times [v_2(k)T + \frac{1}{2} a_{h2}(k)T^2]$$

$$[0074] \quad E_{m3}(a_{h3}(k), v_3(k)) = \frac{T_{m3}(a_{h3}(k), v_3(k)) i_3}{r_{w3}} \times [v_3(k)T + \frac{1}{2} a_{h3}(k)T^2]$$

[0075] 三辆车的舒适性指标使用加权的相邻两步长内加速度差平方与这一步加速度平方之和表示,即 $Conf_1(k) = c_{11}(a_{h1}(k) - a_{h1}(k-1))^2 + c_{21}a_{h1}(k)^2$, $Conf_2(k) = c_{12}(a_{h2}(k) - a_{h2}(k-1))^2 + c_{22}a_{h2}(k)^2$, $Conf_3(k) = c_{13}(a_{h3}(k) - a_{h3}(k-1))^2 + c_{23}a_{h3}(k)^2$

[0076] $C_{11}, C_{21}, C_{12}, C_{22}, C_{13}, C_{23}$ 为可调节权重系数,根据驾驶员和乘客的行为习惯进行设置。

[0077] 三辆车的跟随性指标使用加权的相邻两车间距与安全间距 d 之差的平方与该两车车速之差平方之和表示,即 $Foll_1(k) = C_{31}(x_{rel(1)}(k) - d)^2 + C_{41}(v_{rel(1)}(k))^2$,

[0078] $Foll_2(k) = C_{32}(x_{rel(2)}(k) - d)^2 + C_{42}(v_{rel(2)}(k))^2, Foll_3(k) = C_{33}(x_{rel(3)}(k) - d)^2 + C_{43}(v_{rel(3)}(k))^2$

[0079] $C_{31}, C_{41}, C_{32}, C_{42}, C_{33}, C_{43}$ 为可调节权重系数,根据驾驶员和乘客的行为习惯进行设置。

[0080] 安全性指标为约束,令 k 表示模型预测中任意一个采样时间内得到的参数,约束表示为各个车辆间的相对速度不超过一个极限值 v_{relmax} ,各个车辆的实际产生加速度绝对值有一个区间范围的约束,车1的相邻两采样时间内加速度变化率绝对值有一个区间范围的约束,各个车辆间的相对距离不小于一个极限值 x_{relmin} ,相邻两采样时间范围内车辆车速之差的绝对值不大于一个极限值 v_{max} ,同时为了保证车队行驶的稳定性,各个车辆间的相对距离不大于一个极限值 x_{relmax} :

[0081] $v_{reln}(k) \in [0, v_{relmax}], n=1, 2, 3$

[0082] $|a_{hn}(k)| \in [0, a_{hmax}], n=1, 2, 3$

[0083] $|j_1| \in [0, j_{max}]$

[0084] $|\Delta v_n(k)| = |v_n(k) - v_n(k-1)| \in [0, \Delta v_{max}], n=1, 2, 3$

[0085] $x_{reln}(k) \in [x_{relmin}, x_{relmax}], n=1, 2, 3$

[0086] 综合对各项指标进行加权,得到目标函数,对于车队中的单个车辆为

[0087] $J_1 = \sum_{i=1}^N \{C_{11}E_{m1}(a_{h1}(k+i), v_{h1}(k+i)) + C_{12}Conf_1(k+i) + C_{13}Foll_1(k+i)\}$

[0088] $J_2 = \sum_{i=1}^N \{C_{21}E_{m2}(a_{h2}(k+i), v_{h2}(k+i)) + C_{22}Conf_2(k+i) + C_{23}Foll_2(k+i)\}$

[0089] $J_3 = \sum_{i=1}^N \{C_{31}E_{m3}(a_{h3}(k+i), v_{h3}(k+i)) + C_{32}Conf_3(k+i) + C_{33}Foll_3(k+i)\}$

[0090] 其中 $C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{21}, C_{22}, C_{23}, C_{31}, C_{32}, C_{33}$ 为各项指标所占的权重,可以根据驾驶员和乘客的行为习惯进行设置。

[0091] 使用非线性规划算法,通过取成本函数的最值,求解上述目标函数和约束下的最优控制序列问题,得到每一步下的车1,车2和车3的状态最优解,即为汽车最佳的制动减速方案。

[0092] 在车队的总能量优化方面,令 N 表示预测的总步数,设置一个所有电动汽车实现的

总回收能量最优指标 $E = \sum_{n=1}^3 \{ \sum_{i=1}^N E_{mn}(a_{hn}(k+i), v_{kn}(k+i)) \}$ 。同时将舒适性指标和跟随性指标

在不违反约束条件的情况下适当弱化,得到电动汽车车队的整体加权优化目标函数

$$J = R_E E + R_1 \sum_{i=1}^N \{C_{12} Conf_1(k+i) + C_{13} Foll_1(k+i)\} + R_2 \sum_{i=1}^N \{C_{22} Conf_2(k+i) + C_{23} Foll_2(k+i)\} + R_3 \sum_{i=1}^N \{C_{32} Conf_3(k+i) + C_{33} Foll_3(k+i)\}$$

其中 R_E ,

R_1, R_2, R_3 是重新设置的权重系数。该目标函数的约束条件不变,目的是对车队行驶的总体过程进行优化。使用非线性规划算法,通过取新的成本函数的最值,求解该目标函数和约束下的最优控制序列问题,得到每一步下的车1,车2和车3的状态最优解,即为车队中各个汽车最佳的制动减速方案。

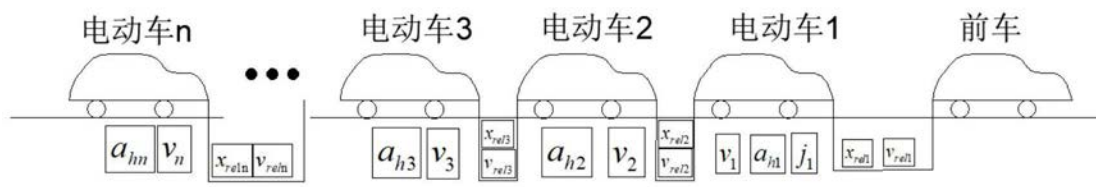


图1

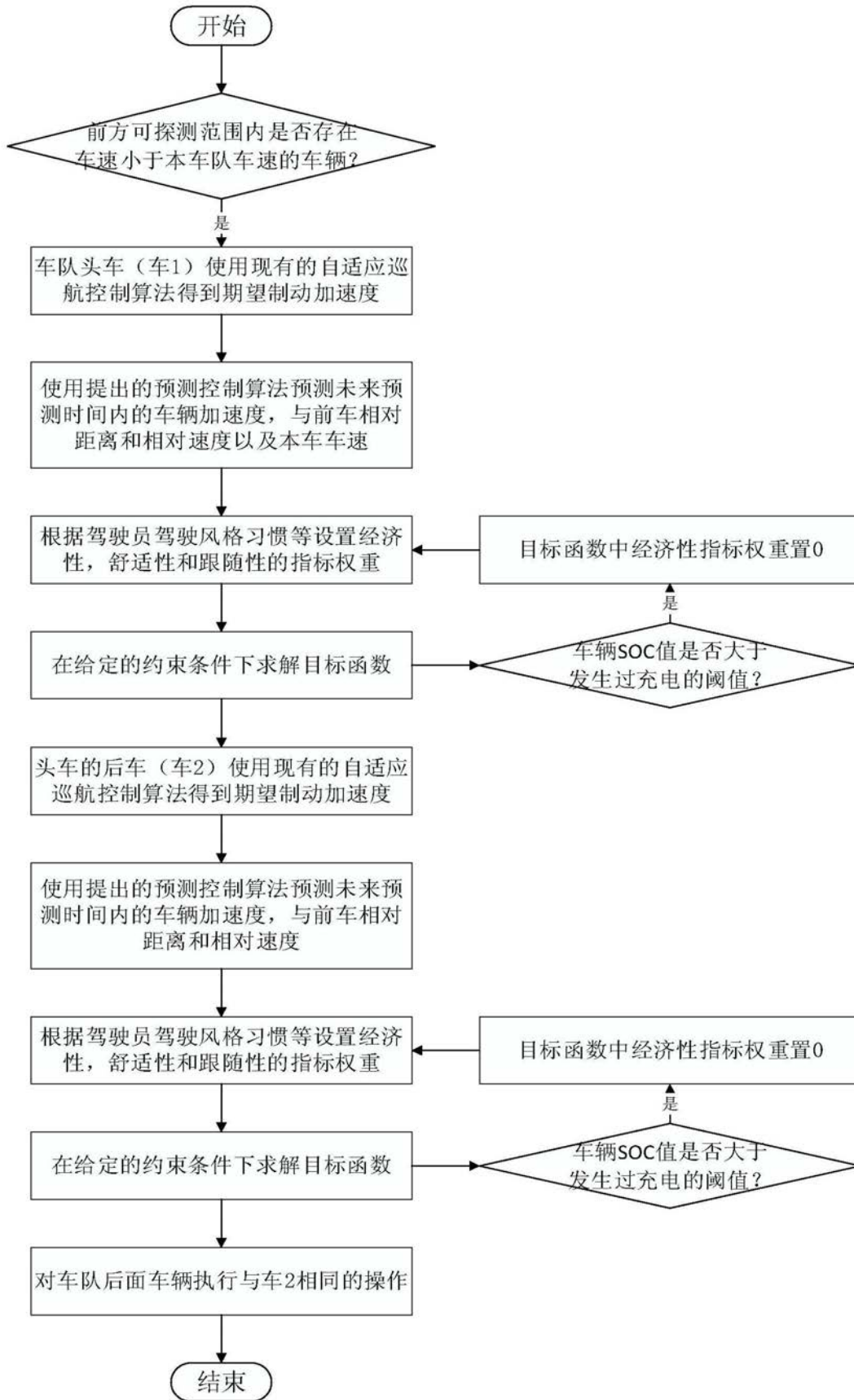


图2