



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103303157 A

(43) 申请公布日 2013. 09. 18

(21) 申请号 201310242018. 8

(22) 申请日 2013. 06. 19

(71) 申请人 电子科技大学

地址 611731 四川省成都市高新区(西区)西
源大道 2006 号

(72) 发明人 秦刚 李文 辛晓帅 邹见效

(74) 专利代理机构 成都行之专利代理事务所
(普通合伙) 51220

代理人 温利平

(51) Int. Cl.

B60L 15/00 (2006. 01)

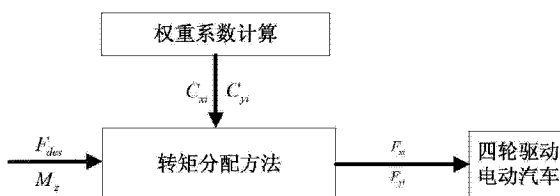
权利要求书3页 说明书8页 附图6页

(54) 发明名称

一种四轮驱动电动汽车转矩分配方法

(57) 摘要

本发明提供了一种四轮驱动电动汽车转矩分配方法,考虑前轮纵向力和横向力、后轮轮胎纵向力、轮胎的摩擦系数、轮胎的载荷、轮胎半径和轮毂电机的最大驱动力矩等参数,并优化了参数的权重系数,同时考虑驱动电机的驱动力限制条件,采用线性解析方法,提出了以稳定性的转矩分配优化方法,保证车身稳定性和可控性,并最大限度地利用了地面摩擦力。



1. 一种四轮驱动电动汽车转矩分配方法,其特征在于,包括以下步骤:

(1)、目标函数:

$$J = \frac{c_{x1}F_{x1}^2 + c_{y1}F_{y1}^2}{(u_1F_{z1})^2} + \frac{c_{x2}F_{x2}^2 + c_{y2}F_{y2}^2}{(u_2F_{z2})^2} + \frac{c_{x3}F_{x3}^2}{\min((u_3F_{z3})^2, (T_3^{\max}/r_3)^2)} + \frac{c_{x4}F_{x4}^2}{\min((u_4F_{z4})^2, (T_4^{\max}/r_4)^2)} \quad (1)$$

其中, c_{xi} 表示第 i 个轮胎的纵向力权重系数, c_{yi} 表示第 i 个轮胎的侧向力权重系数, F_{xi} 为第 i 个轮胎的轮胎纵向力, F_{yi} 为第 i 个轮胎的轮胎侧向力, u_i 为第 i 个轮胎的附着系数, F_{zi} 为第 i 个轮胎的轮胎载荷, T_i^{\max} 为第 i 个轮胎的轮毂电机最大驱动力矩, x 为纵向方向, y 为侧向方向, z 为垂直于 xy 平面方向, $\min(*, *)$ 表示取二者中的最小值, $i=1, 2, 3, 4$ 分别代表左前轮, 右前轮, 左后轮, 右后轮;

(2)、选择左前车轮的侧向力 F_{y1} 和左右前轮两个纵向力 F_{x1} 、 F_{x2} 为未知参数, 则:

$$F_{x3} = -F_{x1} + \frac{l_f(u_1F_{z1} + u_2F_{z2})}{B * u_1F_{z1}} * F_{y1} + \frac{F_{x_des}}{2} - \frac{M_z}{B} \quad (2)$$

$$F_{x4} = -F_{x2} - \frac{l_f(u_1F_{z1} + u_2F_{z2})}{B * u_1F_{z1}} * F_{y1} + \frac{F_{x_des}}{2} + \frac{M_z}{B} \quad (3)$$

$$F_{y2} = \frac{u_2F_{z2}}{u_1F_{z1}} * F_{y1} \quad (4)$$

其中, B 表示车轮前轮两轮间距;

$$F_{x_des} = F_{x1} + F_{x2} + F_{x3} + F_{x4}$$

$$M_z = l_f(F_{y1} + F_{y2}) + B(|F_{x1} - F_{x2}| + |F_{x3} - F_{x4}|) / 2$$

F_{x_des} 表示期望的纵向净力, M_z 表示车辆稳定所需要的横摆力矩, 其由横摆力矩控制模块确定;

(3)、将公式(2)、(3)、(4)代入到目标函数(1)中, 求解现在目标函数的极小值, 分别对前轮左侧车轮的侧向力 F_{y1} 和左右前轮两个纵向力 F_{x1} 、 F_{x2} 求偏导并令其等于 0, 可得:

$$\frac{\partial J}{\partial F_{x1}} = 2 * \left(\frac{c_{x1}}{(u_1F_{z1})^2} + \frac{c_{x3}}{\min((u_3F_{z3})^2, (T_3^{\max}/r_3)^2)} \right) * F_{x1} - 2 * \frac{l_f(u_1F_{z1} + u_2F_{z2})}{B * u_1F_{z1}} * \frac{c_{x3}}{\min((u_3F_{z3})^2, (T_3^{\max}/r_3)^2)} * F_{y1} - 2 * \left(\frac{F_{x_des}}{2} - \frac{M_z}{B} \right) * \frac{c_{x3}}{\min((u_3F_{z3})^2, (T_3^{\max}/r_3)^2)} = 0; \quad (5)$$

$$\frac{\partial J}{\partial F_{x2}} = 2 * \left(\frac{c_{x2}}{(u_2F_{z2})^2} + \frac{c_{x4}}{\min((u_4F_{z4})^2, (T_4^{\max}/r_4)^2)} \right) * F_{x2} + 2 * \frac{l_f(u_1F_{z1} + u_2F_{z2})}{B * u_1F_{z1}} * \frac{c_{x4}}{\min((u_4F_{z4})^2, (T_4^{\max}/r_4)^2)} * F_{y1} - 2 * \left(\frac{F_{x_des}}{2} + \frac{M_z}{B} \right) * \frac{c_{x4}}{\min((u_4F_{z4})^2, (T_4^{\max}/r_4)^2)} = 0; \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial J}{\partial F_{y1}} = & -2 * \frac{l_f(u_1 F_{z1} + u_2 F_{z2})}{B * u_1 F_{z1}} * \frac{c_{x3}}{\min((u_3 F_{z3})^2, (T_3^{\max}/r_3)^2)} * F_{x1} + \\
& 2 * \frac{l_f(u_1 F_{z1} + u_2 F_{z2})}{B * u_1 F_{z1}} * \frac{c_{x4}}{\min((u_4 F_{z4})^2, (T_4^{\max}/r_4)^2)} * F_{x2} + \\
& 2 * \left(\frac{c_{y1}}{(u_1 F_{z1})^2} + \left(\frac{u_2 F_{z2}}{u_1 F_{z1}} \right)^2 * \frac{c_{y2}}{(u_2 F_{z2})^2} + \left(\frac{l_f(u_1 F_{z1} + u_2 F_{z2})}{B * u_1 F_{z1}} \right)^2 * \right. \\
& \left. \left(\frac{c_{x3}}{\min((u_3 F_{z3})^2, (T_3^{\max}/r_3)^2)} + \frac{c_{x4}}{\min((u_4 F_{z4})^2, (T_4^{\max}/r_4)^2)} \right) \right) * F_{y1} + \quad (7) \\
& 2 * \frac{l_f(u_1 F_{z1} + u_2 F_{z2})}{B * u_1 F_{z1}} * \left(\left(\frac{F_{x_des}}{2} - \frac{M_z}{B} \right) * \frac{c_{x3}}{\min((u_3 F_{z3})^2, (T_3^{\max}/r_3)^2)} - \right. \\
& \left. \left(\frac{F_{x_des}}{2} + \frac{M_z}{B} \right) * \frac{c_{x4}}{\min((u_4 F_{z4})^2, (T_4^{\max}/r_4)^2)} \right) = 0;
\end{aligned}$$

求解方程(5)、(6)、(7)得到所需要分配的左前车轮的侧向力 F_{y1} 和左右前轮两个纵向力 F_{x1} 、 F_{x2} ，再由公式(2)、(3)、(4)计算出其余所需分配的右前车轮的侧向力 F_{y2} 和左右后轮两个纵向力 F_{x3} 、 F_{x4} ；

(4)、根据左前车轮的侧向力 F_{y1} 、右前车轮的侧向力 F_{y2} 以及左右前轮两个纵向力 F_{x1} 、 F_{x2} 计算出左右前轮的驱动转矩和方向盘转角修正值，将左右后轮两个纵向力 F_{x3} 、 F_{x4} 计算出左右后轮的驱动转矩，然后，用四个驱动转矩控制四轮驱动电动汽车。

(5)、由车轮的侧向力和纵向力可以计算出四个车轮分别所需的力矩为：

$$M_i = \sqrt{M_{xi}^2 + M_{yi}^2}, \text{ 其中, } M_{xi} = l_f \cdot F_{xi}, M_{yi} = l_f \cdot F_{yi} \quad i=1, 2,$$

$$M_i = M_{xi} = l_f \cdot F_{xi} \quad i=3, 4,$$

其中， M_i 表示四个轮子的力矩。

2. 一种四轮驱动电动汽车转矩分配方法，其特征在于，所述的第 i 个轮胎的纵向力权重系数 c_{xi} 、侧向力权重系数 c_{yi} 为：

$$C_{xi} = \begin{cases} 0.5 & m \geq 0.6 \\ 0.3 + 0.1 * \left(\frac{m}{0.6} + \frac{|n|}{0.8} \right) & 0 \leq m < 0.6 \\ 0.3 + 0.2 * \left(\frac{|m|}{0.7} - \frac{|n|}{0.8} \right) & -0.7 < m < 0 \\ 0.5 & m \leq -0.7 \end{cases}$$

$$C_{yi} = 1 - C_{xi};$$

轮胎纵向重心转移率 m 和侧向重心转移率 n 为：

$$m = \frac{l_f(u_1 * F_{z1} + u_2 * F_{z2}) - l_r(u_3 * F_{z3} + u_4 * F_{z4})}{u_1 * F_{z1} + u_2 * F_{z2} + u_3 * F_{z3} + u_4 * F_{z4}}$$

$$n = \frac{B}{2} \frac{(-u_1 * F_{z1} + u_2 * F_{z2} - u_3 * F_{z3} + u_4 * F_{z4})}{u_1 * F_{z1} + u_2 * F_{z2} + u_3 * F_{z3} + u_4 * F_{z4}}$$

其中, l_f 表示前轮到车辆质心之间的距离, B 表示车轮前轮两轮间距, l_r 表示后轮到车辆质心之间的距离;

m 正方向越大, 表示汽车减速度越大, 汽车提供制动力, 汽车载荷向前转移, m 负方向越大, 表示汽车加速度越大, 汽车提供驱动力, 汽车载荷向后转移; n 正方向越大, 表示汽车向左转弯程度越大, 载荷向右转移, n 负方向越大, 表示汽车向右转弯程度越大, 载荷向左转移; 汽车纵向重心转移率 m 和侧向重心转移率 n 规定在 -0.8 到 0.8 之间, 若计算超出该范围, 则取边界值。

一种四轮驱动电动汽车转矩分配方法

技术领域

[0001] 本发明属于电动车电机控制技术领域,更为具体地讲,涉及一种四轮驱动电动汽车转矩分配方法,即当四驱电动车运行时,如何对四轮转矩进行分配的问题。

背景技术

[0002] 为了应对能源短缺、环境污染等日益突出的问题,电动车以其低排放、低噪声等优点目前已成为研究的热点。四轮驱动电动汽车因为其在控制和节能上面的优势,在电动汽车的研究领域里面,占有越来越大的比重。作为四驱电动车电控技术之一的转矩分配策略,已经受到众多科研机构和企业的高度重视。

[0003] 目前四轮驱动电动汽车转矩分配方法主要是基于规则的分配方法和基于目标优化的分配方法,转矩分配算法多是以经济性和稳定性为优化目标,考虑纵向力或侧向力的影响,对四轮转矩进行分配。对于传统的汽车和大多数基于规则方法的驱动力矩分配策略中,仅仅是考虑控制某个影响因子大的轮胎进行制动力控制,从而达到相应的控制目标,这样的控制并没有充分考虑每个轮胎能够提供的横摆力矩和每个轮胎的附着系数状态,容易造成某个车轮完全抱死,影响车辆稳定性。

发明内容

[0004] 本发明的目的在于克服现有技术的不足,提供一种四轮驱动电动汽车转矩分配方法,以保证车身稳定性和可控性,并最大限度的利用地面摩擦力。

[0005] 为实现以上目的,本发明四轮驱动电动汽车转矩分配方法,其特征在于,包括以下步骤:

[0006] (1)、确定目标函数:

[0007]

$$J = \frac{c_{x1}F_{x1}^2 + c_{y1}F_{y1}^2}{(u_1F_{z1})^2} + \frac{c_{x2}F_{x2}^2 + c_{y2}F_{y2}^2}{(u_2F_{z2})^2} + \frac{c_{x3}F_{x3}^2}{\min((u_3F_{z3})^2, (T_3^{\max}/r_3)^2)} + \frac{c_{x4}F_{x4}^2}{\min((u_4F_{z4})^2, (T_4^{\max}/r_4)^2)} \quad (1)$$

[0008] 其中, c_{xi} 表示第 i 个轮胎的纵向力权重系数, c_{yi} 表示第 i 个轮胎的侧向力权重系数, F_{xi} 为第 i 个轮胎的轮胎纵向力, F_{yi} 为第 i 个轮胎的轮胎侧向力, u_i 为第 i 个轮胎的附着系数, F_{zi} 为第 i 个轮胎的轮胎载荷, T_i^{\max} 为第 i 个轮胎的轮毂电机最大驱动力矩, r_i 为第 i 个轮胎的车轮半径, x 为纵向方向, y 为侧向方向, z 为垂直于 xy 平面方向, $\min(*,*)$ 表示取二者中的最小值, $i=1, 2, 3, 4$ 分别代表左前轮, 右前轮, 左后轮, 右后轮;

[0009] (2)、选择左前车轮的侧向力 F_{y1} 和左右前轮两个纵向力 F_{x1} 、 F_{x2} 为未知参数, 则:

$$[0010] \quad F_{x3} = -F_{x1} + \frac{l_f(u_1F_{z1} + u_2F_{z2})}{B * u_1F_{z1}} * F_{y1} + \frac{F_{x_des}}{2} - \frac{M_z}{B} \quad (2)$$

$$[0011] \quad F_{x4} = -F_{x2} - \frac{l_f(u_1F_{z1} + u_2F_{z2})}{B * u_1F_{z1}} * F_{y1} + \frac{F_{x_des}}{2} + \frac{M_z}{B} \quad (3)$$

$$[0012] \quad F_{y2} = \frac{u_2 F_{z2}}{u_1 F_{z1}} * F_{y1} \quad (4)$$

[0013] 其中, B 表示车轮前轮两轮间距;

$$[0014] \quad F_{x_des} = F_{x1} + F_{x2} + F_{x3} + F_{x4}$$

$$[0015] \quad M_z = l_f (F_{y1} + F_{y2}) + B (|F_{x1} - F_{x2}| + |F_{x3} - F_{x4}|) / 2$$

[0016] F_{x_des} 表示期望的纵向净力, M_z 表示车辆稳定所需要的横摆力矩, 其由横摆力矩控制模块确定;

[0017] (3)、将公式(2)、(3)、(4)代入到目标函数(1)中, 求解现在目标函数的极小值, 分别对前轮左侧车轮的侧向力 F_{y1} 和左右前轮两个纵向力 F_{x1} 、 F_{x2} 求偏导并令其等于 0, 可得:

$$[0018] \quad \frac{\partial J}{\partial F_{x1}} = 2 * \left(\frac{c_{x1}}{(u_1 F_{z1})^2} + \frac{c_{x3}}{\min((u_3 F_{z3})^2, (T_3^{\max} / r_3)^2)} \right) * F_{x1} -$$

$$[0019] \quad 2 * \frac{l_f (u_1 F_{z1} + u_2 F_{z2})}{B * u_1 F_{z1}} * \frac{c_{x3}}{\min((u_3 F_{z3})^2, (T_3^{\max} / r_3)^2)} * F_{y1} - \quad (5)$$

$$[0020] \quad 2 * \left(\frac{F_{x_des}}{2} - \frac{M_z}{B} \right) * \frac{c_{x3}}{\min((u_3 F_{z3})^2, (T_3^{\max} / r_3)^2)} = 0;$$

$$[0021] \quad \frac{\partial J}{\partial F_{x2}} = 2 * \left(\frac{c_{x2}}{(u_2 F_{z2})^2} + \frac{c_{x4}}{\min((u_4 F_{z4})^2, (T_4^{\max} / r_4)^2)} \right) * F_{x2} +$$

$$[0022] \quad 2 * \frac{l_f (u_1 F_{z1} + u_2 F_{z2})}{B * u_1 F_{z1}} * \frac{c_{x4}}{\min((u_4 F_{z4})^2, (T_4^{\max} / r_4)^2)} * F_{y1} - \quad (6)$$

$$[0023] \quad 2 * \left(\frac{F_{x_des}}{2} + \frac{M_z}{B} \right) * \frac{c_{x4}}{\min((u_4 F_{z4})^2, (T_4^{\max} / r_4)^2)} = 0;$$

$$[0024] \quad \frac{\partial J}{\partial F_{y1}} = -2 * \frac{l_f (u_1 F_{z1} + u_2 F_{z2})}{B * u_1 F_{z1}} * \frac{c_{x3}}{\min((u_3 F_{z3})^2, (T_3^{\max} / r_3)^2)} * F_{x1} +$$

$$[0025] \quad 2 * \frac{l_f (u_1 F_{z1} + u_2 F_{z2})}{B * u_1 F_{z1}} * \frac{c_{x4}}{\min((u_4 F_{z4})^2, (T_4^{\max} / r_4)^2)} * F_{x2} +$$

$$[0026] \quad 2 * \left(\frac{c_{y1}}{(u_1 F_{z1})^2} + \left(\frac{u_2 F_{z2}}{u_1 F_{z1}} \right)^2 * \frac{c_{y2}}{(u_2 F_{z2})^2} + \left(\frac{l_f (u_1 F_{z1} + u_2 F_{z2})}{B * u_1 F_{z1}} \right)^2 * \right. \\ \left. \left(\frac{c_{x3}}{\min((u_3 F_{z3})^2, (T_3^{\max} / r_3)^2)} + \frac{c_{x4}}{\min((u_4 F_{z4})^2, (T_4^{\max} / r_4)^2)} \right) \right) * F_{y1} + \quad (7)$$

$$[0027] \quad 2 * \frac{l_f (u_1 F_{z1} + u_2 F_{z2})}{B * u_1 F_{z1}} * \left(\left(\frac{F_{x_des}}{2} - \frac{M_z}{B} \right) * \frac{c_{x3}}{\min((u_3 F_{z3})^2, (T_3^{\max} / r_3)^2)} - \right. \\ \left. \left(\frac{F_{x_des}}{2} + \frac{M_z}{B} \right) * \frac{c_{x4}}{\min((u_4 F_{z4})^2, (T_4^{\max} / r_4)^2)} \right) = 0;$$

[0028] 求解方程(5)、(6)、(7)得到所需要分配的左前车轮的侧向力 F_{y1} 和左右前轮两个纵向力 F_{x1} 、 F_{x2} , 再由公式(2)、(3)、(4)计算出其余所需分配的右前车轮的侧向力 F_{y2} 和左右

后轮两个纵向力 F_{x3} 、 F_{x4} ；

[0029] (4)、根据左前车轮的侧向力 F_{y1} 、右前车轮的侧向力 F_{y2} 以及左右前轮两个纵向力 F_{x1} 、 F_{x2} 计算出左右前轮的驱动转矩和方向盘转角修正值,将左右后轮两个纵向力 F_{x3} 、 F_{x4} 计算出左右后轮的驱动转矩,然后,用四个驱动转矩控制四轮驱动电动汽车。

[0030] (5)、由车轮的侧向力和纵向力可以计算出四个车轮分别所需的力矩为：

$$[0031] \quad M_i = \sqrt{M_{xi}^2 + M_{yi}^2}, \text{ 其中, } M_{xi} = l_f \cdot F_{xi}, M_{yi} = l_f \cdot F_{yi} \quad i=1, 2,$$

$$[0032] \quad M_i = M_{xi} = l_f \cdot F_{xi} \quad i=3, 4,$$

[0033] 其中, M_i 表示四个轮子的力矩。

[0034] 作为本发明的进一步改进,步骤(1)中所述的第 i 个轮胎的纵向力权重系数 c_{xi} 、侧向力权重系数 c_{yi} 为：

$$[0035] \quad C_{xi} = \begin{cases} 0.5 & m \geq 0.6 \\ 0.3 + 0.1 * \left(\frac{m}{0.6} + \frac{|n|}{0.8} \right) & 0 \leq m < 0.6 \\ 0.3 + 0.2 * \left(\frac{|m|}{0.7} - \frac{|n|}{0.8} \right) & -0.7 < m < 0 \\ 0.5 & m \leq -0.7 \end{cases}$$

$$[0036] \quad C_{yi} = 1 - C_{xi};$$

[0037] 轮胎纵向重心转移率 m 和侧向重心转移率 n 为：

$$[0038] \quad m = \frac{l_f(u_1 * F_{z1} + u_2 * F_{z2}) - l_r(u_3 * F_{z3} + u_4 * F_{z4})}{u_1 * F_{z1} + u_2 * F_{z2} + u_3 * F_{z3} + u_4 * F_{z4}}$$

$$[0039] \quad n = \frac{B(-u_1 * F_{z1} + u_2 * F_{z2} - u_3 * F_{z3} + u_4 * F_{z4})}{u_1 * F_{z1} + u_2 * F_{z2} + u_3 * F_{z3} + u_4 * F_{z4}}$$

[0040] 其中, l_f 表示前轮到车辆质心之间的距离, B 表示车轮前轮两轮间距, l_r 表示后轮到车辆质心之间的距离；

[0041] m 正方向越大,表示汽车减速度越大,汽车提供制动力,汽车载荷向前转移, m 负方向越大,表示汽车加速度越大,汽车提供驱动力,汽车载荷向后转移; n 正方向越大,表示汽车向左转弯程度越大,载荷向右转移, n 负方向越大,表示汽车向右转弯程度越大,载荷向左转移;汽车纵向重心转移率 m 和侧向重心转移率 n 规定在 -0.8 到 0.8 之间,若计算超出该范围,则取边界值。

[0042] 本发明的目的是这样实现的：

[0043] 本发明四轮驱动电动汽车转矩分配方法,考虑前轮纵向力和横向力、后轮轮胎纵向力、轮胎的摩擦系数、轮胎的载荷、轮胎半径和轮毂电机的最大驱动力矩等参数,并优化了参数的权重系数,同时考虑驱动电机的驱动力限制条件,采用线性解析方法,提出了以稳定性的转矩分配优化方法,保证车身稳定性和可控性,并最大限度地利用了地面摩擦力。

附图说明

[0044] 图 1 是本发明四轮驱动电动汽车转矩分配方法；

- [0045] 图 2 是方向盘转角输入曲线图；
 [0046] 图 3 是加速踏板深度曲线图；
 [0047] 图 4 是权重系数图；
 [0048] 图 5 是前轮转矩曲线图；
 [0049] 图 6 是后轮转矩曲线图；
 [0050] 图 7 是车身侧倾角曲线图；
 [0051] 图 8 是车辆纵向速度曲线图；
 [0052] 图 9 是车辆侧向速度曲线图；
 [0053] 图 10 是本发明四轮驱动电动汽车转矩分配方法与平均分配方法对比车辆轨迹曲线。

具体实施方式

[0054] 下面结合附图对本发明的具体实施方式进行描述，以便本领域的技术人员更好地理解本发明。需要特别提醒注意的是，在以下的描述中，当已知功能和设计的详细描述也许会淡化本发明的主要内容时，这些描述在这里将被忽略。

[0055] 地面对轮胎施加的纵向力和侧向力均是由地面摩擦力产生的，所以根据地面摩擦系数的状况，地面能够提供的最大纵向力必须满足以下公式：

$$[0056] \quad F_{xi} \leq \sqrt{(u_i F_{zi})^2 - F_{yi}^2} = F_i^{\text{lim}}, i=1,2,3,4;$$

[0057] 其中， F_{xi} 为第 i 个轮胎的纵向力， F_{yi} 为第 i 个轮胎的侧向力， u_i 为第 i 个轮胎的附着系数， F_{zi} 为 i 个轮胎的轮胎载荷， F_i^{lim} 表示在实际附着系数的条件下，地面能够提供给第 i 个轮胎的最大纵向力； x 为纵向方向， y 为侧向方向， z 为垂直于 xy 平面方向， $i=1,2,3,4$ 分别代表左前轮，右前轮，左后轮，右后轮。

[0058] 因此，当为了产生足够的横摆力矩而进行车轮驱动力分配的时候，应当认为，每一个车轮产生的驱动力均不能超过地面能够提供的最大纵向力，此时车辆才能处于稳定状态。若某个车轮所分配的转矩超过地面附着极限限制，车轮便会产生滑移，当车轮滑移达到某个阈值时，地面提供的附着系数便会大范围下降，更加加重了车轮的不稳定的趋势。

[0059] 四轮驱动电动汽车装备有 4 个能够独立分配不同的驱动力转矩和制动力压力的轮毂电机。轮毂电机最大驱动转矩是基于电机本身特性的基础上并且由轮胎的角加速确定，因此轮胎提供的纵向力必须满足以下公式：

$$[0060] \quad F_{xi} \leq T_i^{\text{max}} / r, \quad i=1,2,3,4;$$

[0061] 其中， T_i^{max} 为第 i 个轮胎的轮毂电机最大驱动力矩， r 为车轮半径。

[0062] 对于前轮转向的四轮驱动电动汽车，侧向力主要是由转向轮提供，所以仅仅考虑前两轮的侧向力，同时考虑 4 个轮胎的纵向力，最终以前轮的纵向力、侧向力以及后轮的纵向力 6 个参数作为分配对象。考虑路面附着系数和驱动电机的转矩限制，给出本论文的最优化方法的目标函数如公式(3)所示。

[0063]

$$J = \frac{c_{x1}F_{x1}^2 + c_{y1}F_{y1}^2}{(u_1F_{z1})^2} + \frac{c_{x2}F_{x2}^2 + c_{y2}F_{y2}^2}{(u_2F_{z2})^2} + \frac{c_{x3}F_{x3}^2}{\min((u_3F_{z3})^2, (T_3^{\max}/r_3)^2)} + \frac{c_{x4}F_{x4}^2}{\min((u_4F_{z4})^2, (T_4^{\max}/r_4)^2)} \quad (1)$$

[0064] 其中, c_{xi} 表示第 i 个轮胎的纵向力权重系数, c_{yi} 表示第 i 个轮胎的侧向力权重系数, $\min(*, *)$ 表示取二者中的最小值。

[0065] 为了保证四轮驱动电动汽车满足驾驶员期望的车速, 各个轮胎提供的纵向力必须满足车速控制模块输出的纵向净力:

$$[0066] \quad F_{x_des} = F_{x1} + F_{x2} + F_{x3} + F_{x4}; \quad (8)$$

[0067] 其中, F_{x_des} 表示期望的纵向净力。

[0068] 轮胎所需要的纵向净力是所有轮胎的纵向力之和, 保证了汽车的驱动能力。

[0069] 同时为了保证汽车能够安全稳定性的行驶, 各个车轮提供的纵向力和侧向力必须满足车辆稳定所需要的横摆力矩值:

$$[0070] \quad M_z = l_f(F_{y1} + F_{y2}) + B(|F_{x1} - F_{x2}| + |F_{x3} - F_{x4}|) / 2 \quad (9)$$

[0071] 其中, l_f 表示前轮到车辆质心之间的距离; B 表示车轮前轮两轮间距; M_z 表示车辆稳定所需要的横摆力矩, 其由横摆力矩控制模块确定。

[0072] 针对前轮转向的电动汽车, 因此前轮两个轮胎的方向盘转角是一致的。

$$[0073] \quad \frac{F_{y1}}{u_1F_{z1}} = \frac{F_{y2}}{u_2F_{z2}} \quad (10)$$

[0074] 上式表示左侧前轮和右侧前轮的额外轮胎力之间的关系。左侧前轮和右侧线轮额外轮胎力是与相应地面的摩擦圆大小互成比例, 即相应轮胎的路面摩擦圆越大, 则其提供的侧向力相应的就越大。

[0075] 公式(8)、(9)、(10)是对目标函数中 6 个独立变量 F_{x1} 、 F_{x2} 、 F_{x3} 、 F_{x4} 、 F_{y1} 、 F_{y2} 的 3 个约束条件, 这 3 个约束条件不仅保证了车辆满足驾驶员期望的车辆行驶状态, 同时也考虑了车辆的稳定性和可控性, 保证最终的优化结果能够达到控制最优。

[0076] 选择左前车轮的侧向力 F_{y1} 和左右前轮两个纵向力 F_{x1} 、 F_{x2} 为未知参数。则具体方程如下所示:

$$[0077] \quad F_{x3} = -F_{x1} + \frac{l_f(u_1F_{z1} + u_2F_{z2})}{B * u_1F_{z1}} * F_{y1} + \frac{F_{x_des}}{2} - \frac{M_z}{B} \quad (2)$$

$$[0078] \quad F_{x4} = -F_{x2} - \frac{l_f(u_1F_{z1} + u_2F_{z2})}{B * u_1F_{z1}} * F_{y1} + \frac{F_{x_des}}{2} + \frac{M_z}{B} \quad (3)$$

$$[0079] \quad F_{y2} = \frac{u_2F_{z2}}{u_1F_{z1}} * F_{y1} \quad (4)$$

[0080] 其中, B 表示车轮前轮两轮间距。

[0081] 将公式(2)、(3)、(4)作为必要条件代入到目标函数(1)中, 求解现在目标函数的极小值, 分别对前轮左侧车轮的侧向力 F_{y1} 和左右前轮两个纵向力 F_{x1} 、 F_{x2} 求偏导并令其等于 0, 可得:

$$[0082] \quad \frac{\partial J}{\partial F_{x1}} = 2 * \left(\frac{c_{x1}}{(u_1F_{z1})^2} + \frac{c_{x3}}{\min((u_3F_{z3})^2, (T_3^{\max}/r_3)^2)} \right) * F_{x1} -$$

$$[0083] \quad 2 * \frac{l_f(u_1 F_{z1} + u_2 F_{z2})}{B * u_1 F_{z1}} * \frac{c_{x3}}{\min((u_3 F_{z3})^2, (T_3^{\max} / r_3)^2)} * F_{y1} - \quad (5)$$

$$[0084] \quad 2 * \left(\frac{F_{x_des}}{2} - \frac{M_z}{B} \right) * \frac{c_{x3}}{\min((u_3 F_{z3})^2, (T_3^{\max} / r_3)^2)} = 0;$$

$$[0085] \quad \frac{\partial J}{\partial F_{x2}} = 2 * \left(\frac{c_{x2}}{(u_2 F_{z2})^2} + \frac{c_{x4}}{\min((u_4 F_{z4})^2, (T_4^{\max} / r_4)^2)} \right) * F_{x2} +$$

$$[0086] \quad 2 * \frac{l_f(u_1 F_{z1} + u_2 F_{z2})}{B * u_1 F_{z1}} * \frac{c_{x4}}{\min((u_4 F_{z4})^2, (T_4^{\max} / r_4)^2)} * F_{y1} - \quad (6)$$

$$[0087] \quad 2 * \left(\frac{F_{x_des}}{2} + \frac{M_z}{B} \right) * \frac{c_{x4}}{\min((u_4 F_{z4})^2, (T_4^{\max} / r_4)^2)} = 0;$$

$$[0088] \quad \frac{\partial J}{\partial F_{y1}} = -2 * \frac{l_f(u_1 F_{z1} + u_2 F_{z2})}{B * u_1 F_{z1}} * \frac{c_{x3}}{\min((u_3 F_{z3})^2, (T_3^{\max} / r_3)^2)} * F_{x1} +$$

$$[0089] \quad 2 * \frac{l_f(u_1 F_{z1} + u_2 F_{z2})}{B * u_1 F_{z1}} * \frac{c_{x4}}{\min((u_4 F_{z4})^2, (T_4^{\max} / r_4)^2)} * F_{x2} +$$

$$[0090] \quad 2 * \left(\frac{c_{y1}}{(u_1 F_{z1})^2} + \left(\frac{u_2 F_{z2}}{u_1 F_{z1}} \right)^2 * \frac{c_{y2}}{(u_2 F_{z2})^2} + \left(\frac{l_f(u_1 F_{z1} + u_2 F_{z2})}{B * u_1 F_{z1}} \right)^2 * \right. \\ \left. \left(\frac{c_{x3}}{\min((u_3 F_{z3})^2, (T_3^{\max} / r_3)^2)} + \frac{c_{x4}}{\min((u_4 F_{z4})^2, (T_4^{\max} / r_4)^2)} \right) \right) * F_{y1} + \quad (7)$$

$$[0091] \quad 2 * \frac{l_f(u_1 F_{z1} + u_2 F_{z2})}{B * u_1 F_{z1}} * \left(\left(\frac{F_{x_des}}{2} - \frac{M_z}{B} \right) * \frac{c_{x3}}{\min((u_3 F_{z3})^2, (T_3^{\max} / r_3)^2)} - \right. \\ \left. \left(\frac{F_{x_des}}{2} + \frac{M_z}{B} \right) * \frac{c_{x4}}{\min((u_4 F_{z4})^2, (T_4^{\max} / r_4)^2)} \right) = 0;$$

[0092] 求解方程(5)、(6)、(7)得到所需要分配的左前车轮的侧向力 F_{y1} 和左右前轮两个纵向力 F_{x1} 、 F_{x2} ，再由公式(2)、(3)、(4)计算出其余所需分配的右前车轮的侧向力 F_{y2} 和左右后轮两个纵向力 F_{x3} 、 F_{x4} ；

[0093] 不同的运动状态，需要的权重因子也不相同，所以确定汽车的运动状态参数至关重要。选择电动车的纵向重心转移率来表示汽车加速和减速的程度，选择电动车的侧向重心转移率来表示汽车转弯的程度，然后使用纵向和横向两个重心转移率来计算出汽车轮胎力的权重系数。轮胎纵向重心转移率 m 和侧向重心转移率 n 计算公式如下所示：

$$[0094] \quad m = \frac{l_f(u_1 * F_{z1} + u_2 * F_{z2}) - l_r(u_3 * F_{z3} + u_4 * F_{z4})}{u_1 * F_{z1} + u_2 * F_{z2} + u_3 * F_{z3} + u_4 * F_{z4}}$$

$$[0095] \quad n = \frac{B(-u_1 * F_{z1} + u_2 * F_{z2} - u_3 * F_{z3} + u_4 * F_{z4})}{u_1 * F_{z1} + u_2 * F_{z2} + u_3 * F_{z3} + u_4 * F_{z4}}$$

[0096] m 正方向越大,表示汽车减速度越大,汽车提供制动力,汽车载荷向前转移, m 负方向越大,表示汽车加速度越大,汽车提供驱动力,汽车载荷向右转移; n 正方向越大,表示汽车向左转弯程度越大,载荷向右转移, n 负方向越大,表示汽车向右转弯程度越大,载荷向左转移。汽车纵向重心转移率 m 和侧向重心转移率 n 规定在 -0.8 到 0.8 之间,若计算超出该范围,则取边界值。由此权重系数 C_{xi} 和 C_{yi} 是由汽车纵向重心转移率 m 和侧向重心转移率 n 计算得到。($i=1,2,3,4$ 分别代表左前轮,右前轮,左后轮,右后轮)

$$[0097] \quad C_{xi} = \begin{cases} 0.5 & m \geq 0.6 \\ 0.3 + 0.1 * \left(\frac{m}{0.6} + \frac{|n|}{0.8} \right) & 0 \leq m < 0.6 \\ 0.3 + 0.2 * \left(\frac{|m|}{0.7} - \frac{|n|}{0.8} \right) & -0.7 < m < 0 \\ 0.5 & m \leq -0.7 \end{cases}$$

$$[0098] \quad C_{yi} = 1 - C_{xi}$$

[0099] 本发明的优点是:

[0100] 1、基于目标优化的转矩分配算法采用轮胎负荷率最小为控制目标,保证车身稳定性和可控性为前提,进行转矩分配。

[0101] 2、控制算法中通过修正权重系数来保证电动汽车在不同工况下纵向力和侧向力所占有的分配比例,保证最大限度的利用地面摩擦力。

[0102] 实例

[0103] 针对总质量 1296kg,绕 Z 轴转动惯量 1750kgm²,轴距 2.57m,质心到前轴的距离 1.25m,质心到后轴的距离 1.32m,前轮距 1.405m,后轮距 1.399m,质心高度 0.45m,车轮半径 0.326m 的四驱电动车进行验证。车速由 0km/h 增加到 70km/h,同时在 8 ~ 25s 内绕过 7 个障碍物,模拟蛇形运动工况,路面摩擦系数设为 $\mu=0.7$,该路面摩擦系数为干燥柏油路面的正常摩擦系数。

[0104] 图 1 所示四轮驱动电动汽车转矩分配方法首先由汽车传感器系统采集车辆每个轮毂电机的实时驱动力矩 (T_i) 和横摆力矩值 (M_z);接着通过权重系数计算模块确定纵向力权重因子 (C_{xi}) 和侧向力权重因子 (C_{yi});最后由转矩分配方法计算出最优的轮胎纵向力和侧向力 F_{xi} 、 F_{yi} ,然后由参数修正模块将其转换成为每个轮胎的驱动转矩和方向盘转角修正值,最终达到控制四轮驱动电动汽车,令其稳定运行的目的。

[0105] 图 2 和图 3 所示,驾驶员期望的运动状态,显然车辆在直线行驶时保持较大的加速度,并且在 7s 左右达到 70km/h 的车速,然后在 8s 以后,驾驶员按照蛇形工况转动方向盘,使汽车避开前方 7 个障碍物。

[0106] 从图 4、图 5 和图 6 可以看出,汽车转矩分配的控制量,权重系数修正中,在方向盘急急速的过程中,提高了权重系数 C_{xi} ,降低了权重系数 C_{yi} ,而在汽车转向的过程中,根据转向方向和需求力矩的正负不断的修正 C_{xi} 的值;在汽车方向盘修正曲线中,根据方向盘转向方向不同,均对转向角度进行修正,而在驱动力矩左右轮分配的过程中,均是外侧车轮的驱动力矩大于内侧车轮的驱动力矩,提供了额外的横摆力矩,保证转向的稳定性。

[0107] 图 7 表示了车辆稳定性指标,显然,此时车辆的侧倾角小,车辆处于稳定状态,图 8 和图 9 表明了车辆的运动状态,其纵向速度开始快速增加,转弯时基本保持不变,横向速度

根据转弯方向的不同,实时变化的。

[0108] 图 10 是本发明四轮驱动电动汽车转矩分配方法与平均转矩分配方法的对比曲线,均转矩分配方法是模拟传统汽车力矩的控制方式,平均转矩分配方法在避过最后两个障碍时,车辆已经失稳,运动曲线完全不符合驾驶员期望,而四轮转矩分配算法的运动轨迹一直满足驾驶员期望运动轨迹,处于稳定状态。

[0109] 尽管上面对本发明说明性的具体实施方式进行了描述,以便于本技术领域的技术人员理解本发明,但应该清楚,本发明不限于具体实施方式的范围,对本技术领域的普通技术人员来讲,只要各种变化在所附的权利要求限定和确定的本发明的精神和范围内,这些变化是显而易见的,一切利用本发明构思的发明创造均在保护之列。

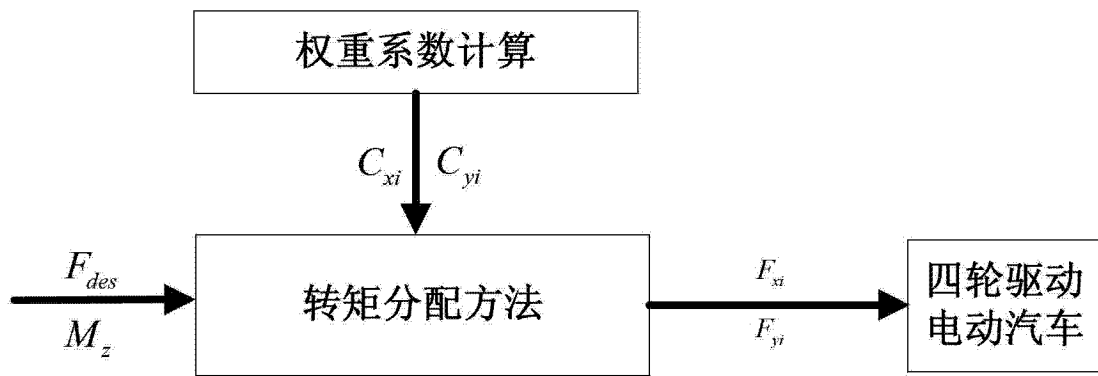


图 1

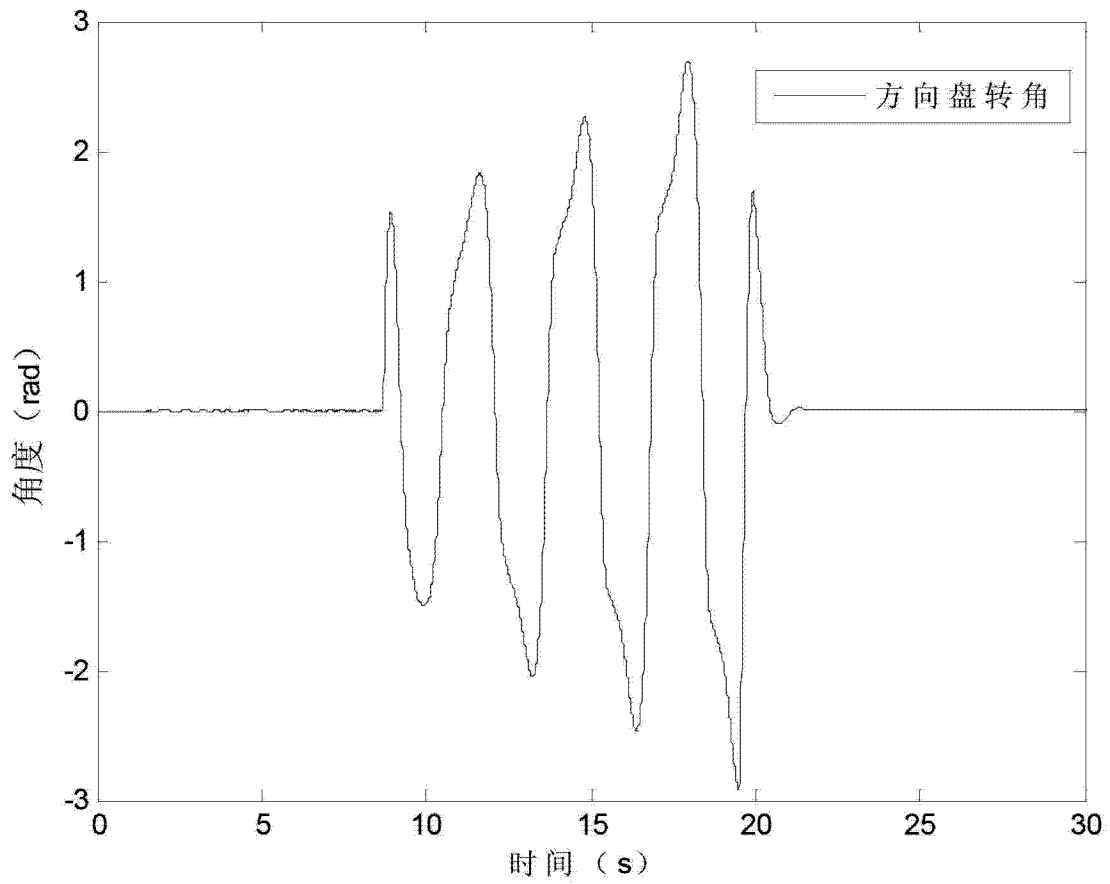


图 2

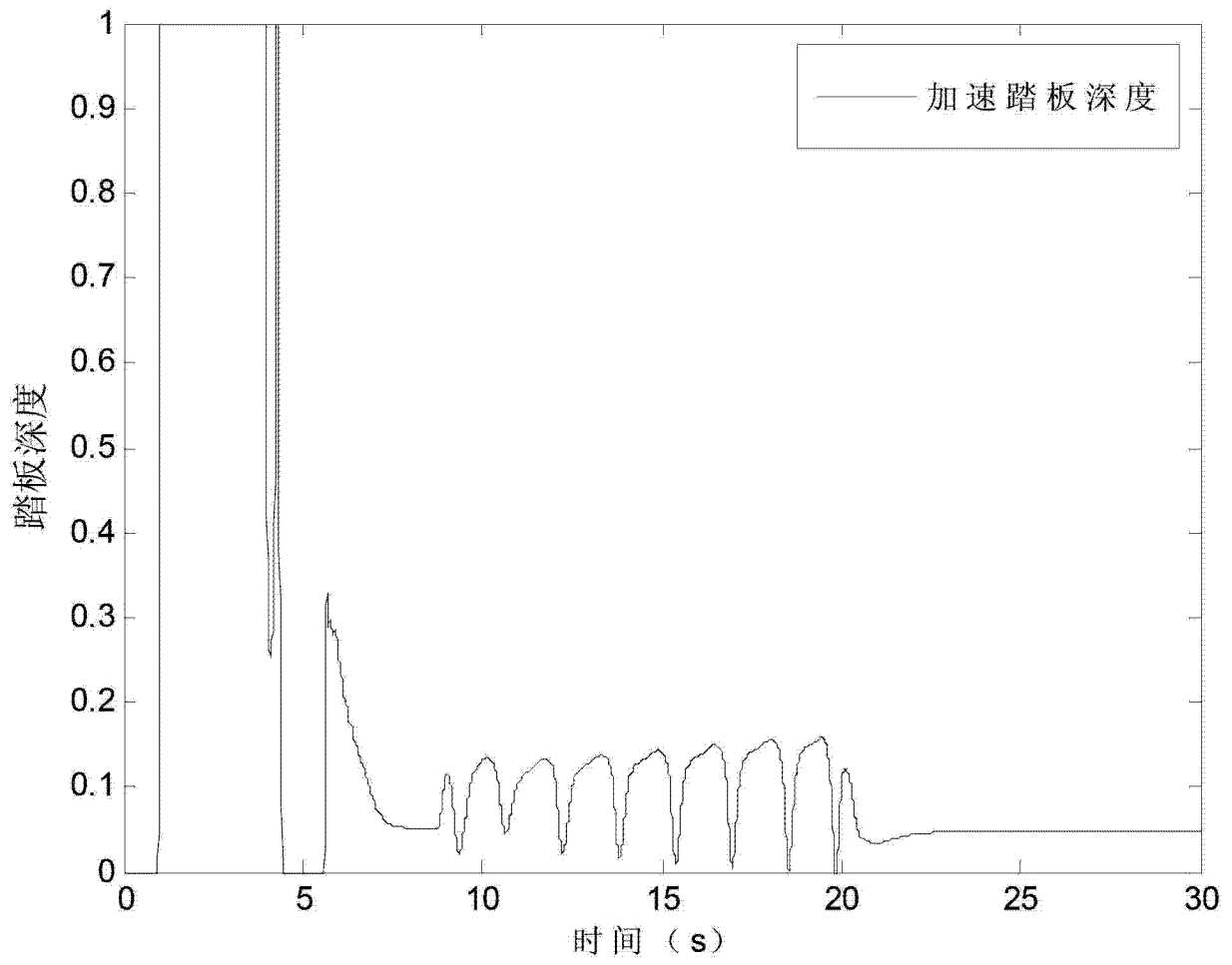


图 3

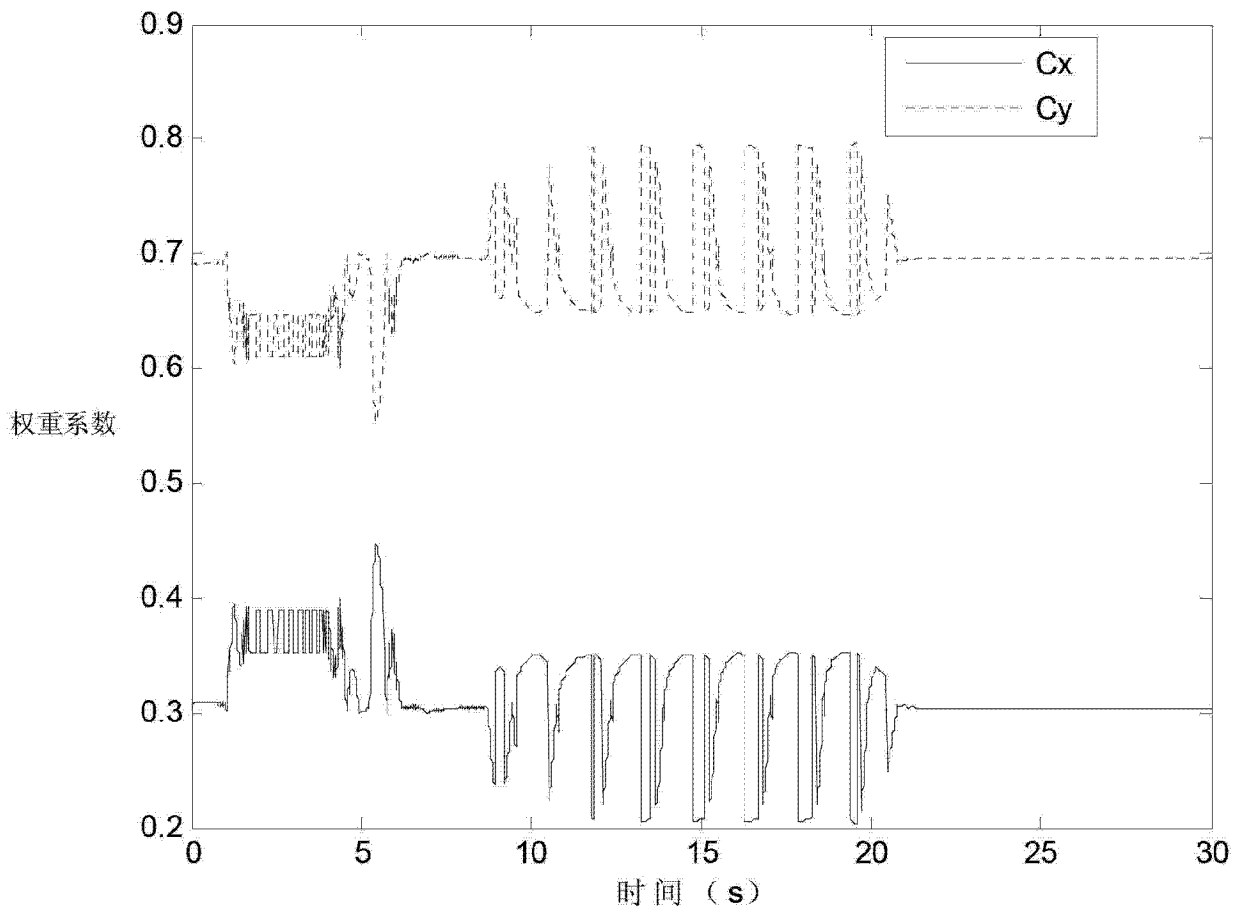


图 4

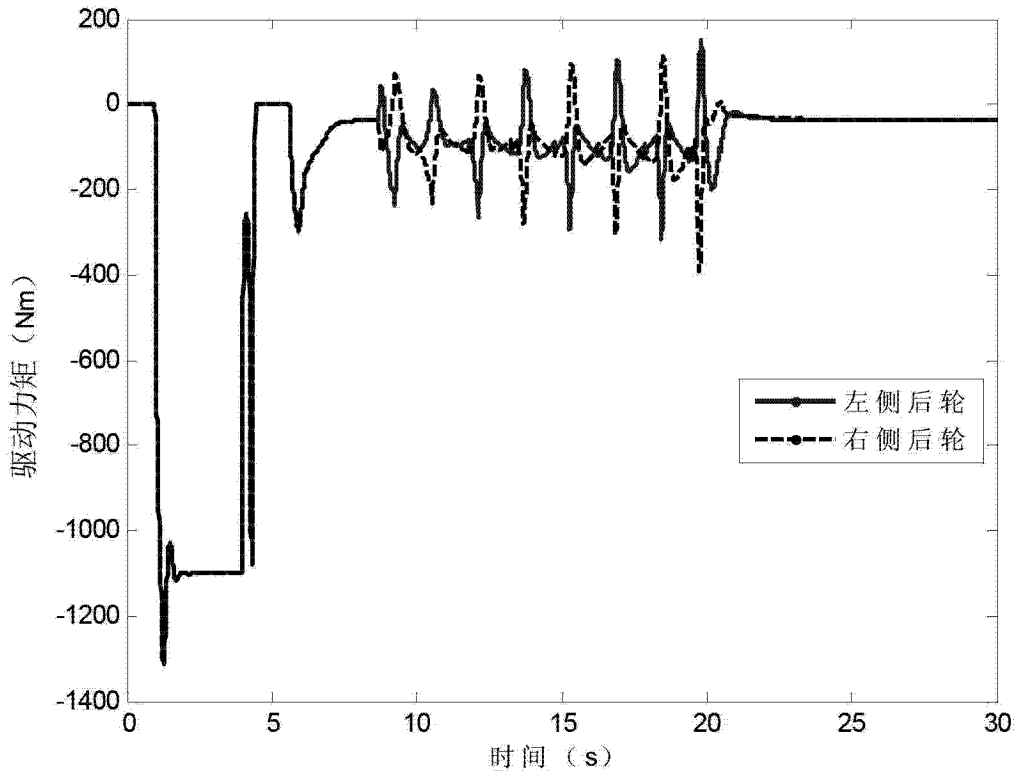


图 5

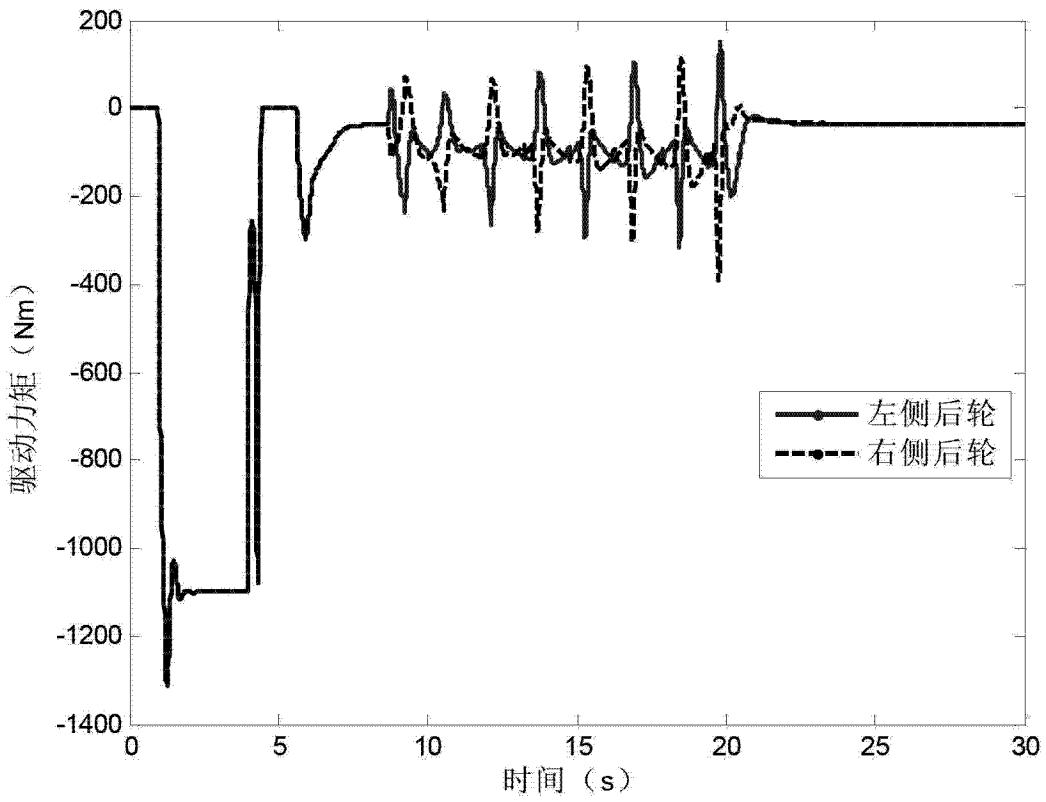


图 6

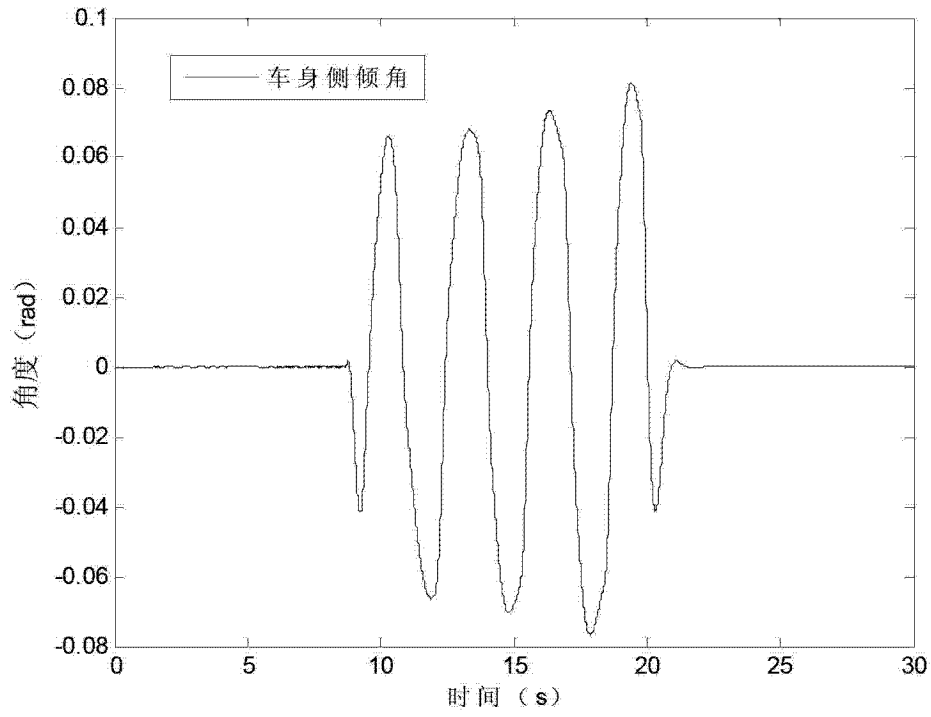


图 7

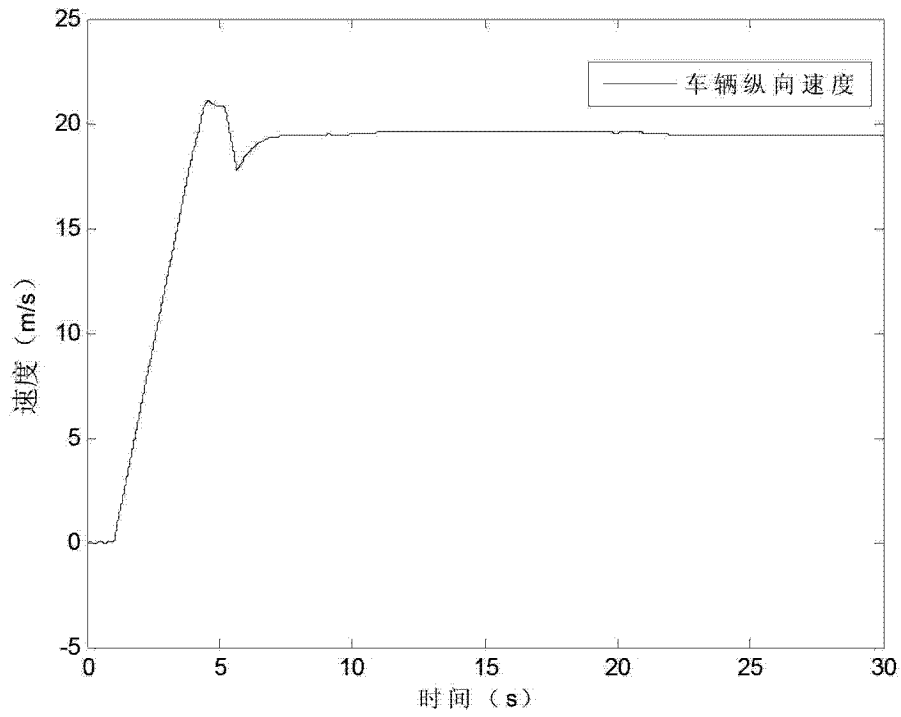


图 8

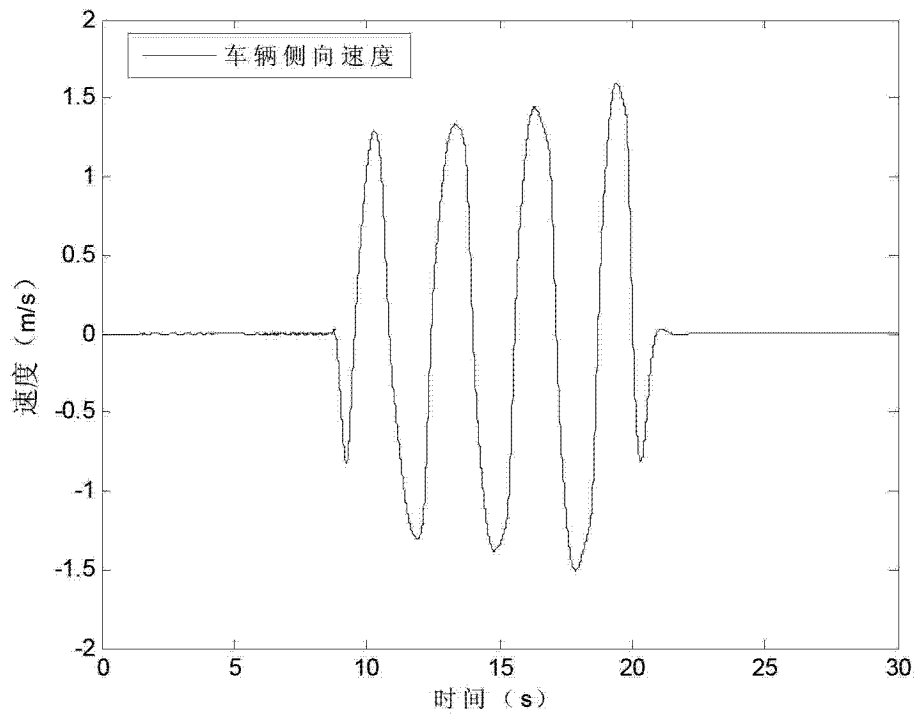


图 9

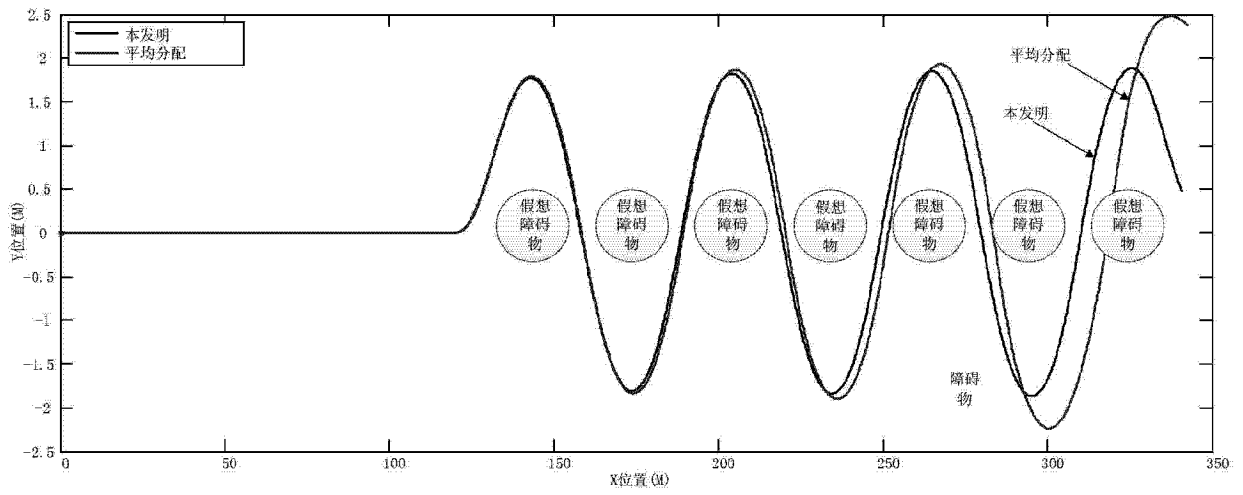


图 10