

文章编号: 1671-6833(2023)03-0094-08

# 空气悬架混杂系统车身高度与可调阻尼分层控制

胡启国<sup>1</sup>, 魏晨<sup>1</sup>, 陆伟<sup>1</sup>, 雷旭东<sup>2</sup>, 梁栋<sup>1</sup>

(1. 重庆交通大学 机电与车辆工程学院 重庆 400074; 2. 重庆铁马工业集团有限公司 重庆 400050)

**摘要:** 针对空气悬架车身高度调节控制过程中车身高度和阻尼器阻尼力难以进行协调控制的难题, 提出一种基于混合逻辑动态(MLD)模型的空气悬架车身高度与可调阻尼分层控制策略。考虑空气悬架充放气过程中存在的混杂特性, 应用MLD建模方法建立具有电磁阀和磁流变阻尼器的非线性空气悬架混杂系统模型, 设计描述电磁阀开关状态的混杂自动机进行车高调节上层控制, 基于混杂模型预测控制方法对磁流变阻尼器输入电流进行下层控制, 进而通过改变电磁阀开关状态和磁流变阻尼器输入电流实现车身高度与可调阻尼分层控制。在随机路面激励工况下进行仿真验证, 结果表明: 所提控制方法在有效跟踪车身高度的同时, 车身加速度相比于被动悬架和混杂模型预测控制分别降低了34.33%、34.34%, 不仅能有效提高车辆乘坐舒适性, 也能直接防止电磁阀频繁切换现象的发生, 从而延长电磁阀的使用寿命。

**关键词:** 空气悬架; 混合逻辑动态; 混杂系统; 混杂模型预测控制; 分层控制

中图分类号: U463.33

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2023.03.009

悬架作为车辆缓冲路面激励和衰减自身振动的关键重要部件, 能够直接改善车辆行驶性能, 因此, 如何提升悬架的性能一直是车辆研究的重点<sup>[1]</sup>。空气悬架可以根据车辆实际行驶工况对空气弹簧进行充放气控制, 进而根据不同的路面状况选择对应的车身高度, 相比传统悬架, 空气悬架的适应性更好<sup>[2]</sup>。

国内外学者对空气悬架的控制策略进行了许多研究, 主要可以归纳为天棚阻尼控制<sup>[3]</sup>、自适应控制<sup>[4]</sup>、分数阶控制<sup>[5]</sup>、神经网络控制<sup>[6]</sup>、模糊控制<sup>[7]</sup>等。上述控制策略中多是以空气质量流量或电磁阀的开启面积为控制变量, 然后转化为电磁阀开关状态的占空比, 从而实现电磁阀开关状态的控制, 这在一定程度上降低了控制精度。为此, Sun等<sup>[8]</sup>建立了电控空气悬架车高调节混杂模型, 采用混杂模型预测控制(hybrid model predictive control, HMPC)对电磁阀开关状态进行直接控制, 使得车高调节很好地跟踪了理想输出。但其控制策略只调节了空气弹簧的刚度, 忽略了半主动空气悬架控制过程中刚度调节和阻尼调节协调控制的难题, 从而导致车高调节过程中乘坐舒适性出现恶化。对空气悬架车身高度与可调阻尼器进行协调控制, 可将空气悬架阻

尼、刚度、车身高度调节达到最佳状态, 充分发挥电控空气悬架的优良性能<sup>[9]</sup>。但考虑到空气悬架电磁阀开关离散控制变量和磁流变阻尼器阻尼力连续变量之间的耦合问题, 如何实现上述变量之间的协调控制, 使车辆的各项性能指标均达到最优状态, 是一个亟待解决的难题。

基于上述分析, 首先, 本文通过分析空气悬架基本工作原理, 构建具有电磁阀和磁流变阻尼器的非线性空气悬架机理模型, 并对其非线性进行合理线性化, 借助混杂系统描述语言(HYSDEL)编译器将线性化后的模型转化为标准混合逻辑动态(mixed logical dynamical, MLD)模型; 其次, 设计混杂自动机对其电磁阀开关状态进行调节, 以实现车身高度上层控制, 结合电磁阀开关信号并基于递推得到的混杂系统预测模型对磁流变阻尼器输入电流进行求解, 进而获得可控阻尼力, 以实现下层控制; 最后, 通过仿真对比分析, 确定了该控制策略的有效性。

## 1 空气悬架充放气模型建立

### 1.1 管路及空气弹簧模型建立

空气悬架的实际充放气过程是较为繁杂的动态

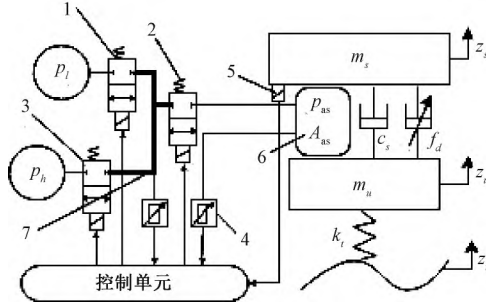
收稿日期: 2022-11-03; 修订日期: 2022-12-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52175042)

作者简介: 胡启国(1966—), 男, 重庆人, 重庆交通大学教授, 博士, 主要从事机械系统动力学及控制方面的研究, E-mail: swpihgq@126.com。

引用本文: 胡启国, 魏晨, 陆伟, 等. 空气悬架混杂系统车身高度与可调阻尼分层控制[J]. 郑州大学学报(工学版), 2023, 44(3): 94-101. (HU Q G, WEI C, LU W, et al. Hierarchical control of body height and adjustable damping in air suspension hybrid system[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2023, 44(3): 94-101.)

过程 根据文献[8]作出的假设,建立了图1所示的空气悬架充放气简化模型。其中,  $m_s$  为簧上质量;  $m_u$  为簧下质量;  $c_s$  为阻尼器阻尼系数;  $k_t$  为轮胎刚度;  $z_s$  和  $z_u$  分别为簧上质量和簧下质量垂向位移;  $z_r$  为路面垂向位移激励;  $f_d$  为磁流变阻尼器输出力;  $p_l$  为大气气压;  $p_h$  为储气罐气压。



1—放气电磁阀; 2—空气弹簧电磁阀; 3—充气电磁阀;  
4—压力传感器; 5—位移传感器; 6—空气弹簧; 7—管路。

图1 空气悬架充放气模型

Figure 1 Charging and discharging model of air suspension

将空气弹簧视作变质量充放气系统 结合变质量充放气热力学原理 得到其内部气压变化方程<sup>[8]</sup>:

$$\dot{p}_{as} A_{as} (z_0 + z_{as}) = \kappa RT (q_{in} - q_{out}) - \kappa p_{as} A_{as} \dot{z}_{as} \quad (1)$$

式中:  $p_{as}$  为空气弹簧气压;  $A_{as}$  为空气弹簧截面积;  $\kappa$  为气体多变指数;  $R$  为理想气体常数;  $T$  为温度;  $z_0$  为车身初始高度;  $z_{as} = z_u - z_s$  为空气弹簧垂向位移。

同理,也可将管路视作变质量充放气系统,只是在 工作过程中的体积不变,因此管路模型可描述为

$$\dot{p}_{pi} V_{pi} = \kappa RT (q_{pi-in} - q_{pi-out}) \quad (2)$$

式中:  $p_{pi}$  和  $V_{pi}$  分别为管路气压和体积;  $q_{pi-in}$  和  $q_{pi-out}$  分别为流入和流出管路的气体质量流量。

## 1.2 开关电磁阀模型建立

空气质量流量通过电磁阀时,将其等效为一个 节流孔,则流经电磁阀的空气质量流量表示为<sup>[10]</sup>

$$q_n(p_u, p_d) = \begin{cases} K p_u \sqrt{p_d/p_u} & p_d/p_u \leq b; \\ K p_u \sqrt{b} & b < p_d/p_u \leq 1. \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $K = \left( \frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa+1}{2(\kappa-1)}} \sqrt{\frac{\kappa}{RT}}$   $s$  为电磁阀等效截面积;

$\nu = \sqrt{1 - \left( \frac{p_d/p_u - b}{1-b} \right)}$ ;  $p_d$  为上游气压;  $p_u$  为下游气压;

$b=0.528$  为临界压力比。

结合图1和式(3),可以将充放气过程中流经3 个电磁阀的空气质量流量表达如下:

$$\begin{cases} q_{nac} = q_n(p_{pi}, p_{as}); \\ q_{npd} = q_n(p_{as}, p_{pi}); \\ q_{npe} = q_n(p_h, p_{pi}); \\ q_{nad} = q_n(p_{pi}, p_l). \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $q_{nac}$  和  $q_{npe}$  分别为充气时流入空气弹簧和管路的空气质量流量;  $q_{npd}$  和  $q_{nad}$  分别为放气时流出空气弹簧和管路的空气质量流量。

## 1.3 空气悬架模型建立

空气悬架动力学模型表达式为

$$\begin{cases} f_{as} = p_{as} A_{as} - m_s g; \\ m_s \ddot{z}_s = c_s (\dot{z}_u - \dot{z}_s) + f_{as} + f_d; \\ m_u \ddot{z}_u = k_t (z_r - z_u) - c_s (\dot{z}_u - \dot{z}_s) - f_{as} - f_d. \end{cases} \quad (5)$$

基于滤波白噪声法建立路面输入时域模型<sup>[11]</sup>:

$$\dot{z}_r(t) = -2\pi n_{00} u \cdot z_r(t) + 2\pi n_0 \sqrt{G_q(n_0)} u w(t) \quad (6)$$

式中:  $G_q(n_0)$  为路面不平度系数;  $u$  为车速;  $w$  为数学期望为0的高斯白噪声;  $n_{00}$  为下截止频率,  $n_{00} = 0.011 \text{ m}^{-1}$ ;  $n_0$  为参考空间频率,  $n_0 = 0.1 \text{ m}^{-1}$ 。

磁流变阻尼器采用文献[12]中所提出的模型, 其输出阻尼力  $f_d$  与控制输入电流  $I$  的关系为

$$f_d = \begin{cases} 1170(\dot{z}_u - \dot{z}_s) - 157I^4 + 588I^3 - \\ 912I^2 + 847I - 3.7(\dot{z}_u - \dot{z}_s) \geq 0; \\ 1648(\dot{z}_u - \dot{z}_s) - 75.8I^4 + 146I^3 - \\ 267I^2 - 794I + 53(\dot{z}_u - \dot{z}_s) < 0. \end{cases} \quad (7)$$

引入二进制辅助变量  $\delta_f, \delta_e, \delta_a$  根据式(4) 流入和流出空气弹簧以及管路的空气质量流量描述如下:

$$\begin{cases} q_{in} = q_{nac} \delta_f; \\ q_{pi-in} = q_{npe} \delta_f + q_{npd} \delta_e; \\ q_{out} = q_{nad} \delta_e; \\ q_{pi-out} = q_{nac} \delta_f + q_{nad} \delta_e. \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\delta_f, \delta_e$  分别为充气、放气电磁阀开关状态信号。

根据式(1)、式(2)和式(8),可将空气弹簧和管路模型进一步表示为

$$\begin{cases} \dot{p}_{as} A_{as} (z_0 + z_{as}) = \kappa RT (q_{nac} \delta_f - q_{npd} \delta_e) - \kappa p_{as} A_{as} \dot{z}_{as}; \\ \dot{p}_{pi} V_{pi} = \kappa RT (q_{npe} \delta_f + q_{npd} \delta_e - q_{nac} \delta_f - q_{nad} \delta_e). \end{cases} \quad (9)$$

则式(5)和式(9)构成了空气悬架充放气模型。

## 2 空气悬架混杂系统动态建模

### 2.1 磁流变阻尼器阻尼力 MLD 建模

考虑 MLD 建模方法是基于线性动态方程表达 系统状态变量的更新过程,由式(7)可知磁流变阻 尼器阻尼力  $f_d$  与电流  $I$  呈现出非线性关系,为建立 磁流变阻尼器混合逻辑动态模型,需要对其非线性 模型进行线性化<sup>[13]</sup>。因此,考虑通过选取合适的分 段点,采用分段近似线性化的方法建立磁流变阻尼 器分段仿射模型:

$$f_{ex1} = \begin{cases} 1170(\dot{z}_u - \dot{z}_s) + 622I - 3.7, & 0 \leq I \leq 0.3; \\ 1170(\dot{z}_u - \dot{z}_s) + 333I + 83, & 0.3 < I \leq 0.6; \\ 1170(\dot{z}_u - \dot{z}_s) + 178.5I + 175.7, & 0.6 < I \leq 1.2; \\ 1170(\dot{z}_u - \dot{z}_s) + 75I + 299.9, & 1.2 < I \leq 1.4; \\ 1170(\dot{z}_u - \dot{z}_s) - 43I + 465.1, & 1.4 < I \leq 1.6; \end{cases} \quad (10)$$

$$f_{ex2} = \begin{cases} 1648(\dot{z}_u - \dot{z}_s) - 702.7I + 53, & 0 \leq I \leq 0.3; \\ 1648(\dot{z}_u - \dot{z}_s) - 492.7I - 10, & 0.3 < I \leq 0.6; \\ 1648(\dot{z}_u - \dot{z}_s) - 310I - 119.6, & 0.6 < I \leq 0.8; \\ 1648(\dot{z}_u - \dot{z}_s) - 154.7I - 243.9, & 0.8 < I \leq 1.1; \\ 1648(\dot{z}_u - \dot{z}_s) - 37.2I - 373.1, & 1.1 < I \leq 1.6. \end{cases} \quad (11)$$

磁流变阻尼器分段仿射模型中存在着分段线性关系及约束,故连续辅助变量 $f_{ex1 \sim 5}$ 可定义为

$$\begin{cases} f_{ex1} = \{ \text{IF } \neg \delta_v \wedge \delta_{ex1} \text{ THEN} \\ \quad 1170(\dot{z}_u - \dot{z}_s) + 622I - 3.7 \text{ ELSE } 0 \}; \\ f_{ex2} = \{ \text{IF } \neg \delta_v \wedge \delta_{ex2} \wedge \neg \delta_{ex1} \text{ THEN} \\ \quad 1170(\dot{z}_u - \dot{z}_s) + 333I + 83 \text{ ELSE } 0 \}; \\ f_{ex3} = \{ \text{IF } \neg \delta_v \wedge \delta_{ex3} \wedge \neg \delta_{ex2} \text{ THEN} \\ \quad 1170(\dot{z}_u - \dot{z}_s) + 178.5I + 175.7 \text{ ELSE } 0 \}; \\ f_{ex4} = \{ \text{IF } \neg \delta_v \wedge \delta_{ex4} \wedge \neg \delta_{ex3} \text{ THEN} \\ \quad 1170(\dot{z}_u - \dot{z}_s) + 75I + 299.9 \text{ ELSE } 0 \}; \\ f_{ex5} = \{ \text{IF } \neg \delta_v \wedge \delta_{ex5} \wedge \neg \delta_{ex4} \text{ THEN} \\ \quad 1170(\dot{z}_u - \dot{z}_s) - 42I + 465.1 \text{ ELSE } 0 \}. \end{cases} \quad (12)$$

引入离散辅助变量 $\delta_v, \delta_{ex1 \sim 5}$ ,定义为

$$\begin{cases} [\delta_v = 1] \leftrightarrow \dot{z}_u - \dot{z}_s \leq 0; \\ [\delta_{ex1} = 1] \leftrightarrow I \leq 0.3; \\ [\delta_{ex2} = 1] \leftrightarrow I \leq 0.6; \\ [\delta_{ex3} = 1] \leftrightarrow I \leq 1.2; \\ [\delta_{ex4} = 1] \leftrightarrow I \leq 1.4; \\ [\delta_{ex5} = 1] \leftrightarrow I \leq 1.6. \end{cases} \quad (13)$$

同理,引入离散辅助变量 $\delta_{co1 \sim 5}$ 、连续辅助变量 $f_{co1 \sim 5}$ 对式(11)进行类似定义,则工作过程中磁流变阻尼器的可调阻尼力可定义为 $f_{ex-co} = f_{ex1 \sim 5} + f_{co1 \sim 5}$ 。其中, $\leftrightarrow$ (等价)、 $\wedge$ (且)、 $\neg$ (非)为逻辑运算符。

## 2.2 电磁阀流量特性 MLD 建模

由于空气弹簧在充放气过程中的压力变化率很小<sup>[14]</sup>,因此,考虑采用一个常数 $\rho$ 代替式(3)中的非线性部分,通过多次仿真试验(仿真结果见2.3节),最终选取 $\rho = 0.75$ ,则线性化后电磁阀分段表达式为

$$q_l(p_u, p_d) = \begin{cases} Kp_u \cdot p_d / p_u \leq b; \\ Kp_u \rho b \leq p_d / p_u \leq 1. \end{cases} \quad (14)$$

为了对线性化后的电磁阀分段模型进行 MLD 建模,引入离散辅助变量 $\delta_{lac}, \delta_{lpc}, \delta_{lpd}, \delta_{lad}$ 来对其分段边界条件进行描述,结合式(3)给出边界条件:

$$\begin{cases} [\delta_{lpc} = 1] \leftrightarrow p_{pi} \leq 0.528p_h; \\ [\delta_{lad} = 1] \leftrightarrow p_l \leq 0.528p_{pi}; \\ [\delta_{lac} = 1] \leftrightarrow p_{as} \leq 0.528p_{pi}; \\ [\delta_{lpd} = 1] \leftrightarrow p_{pi} \leq 0.528p_{as}. \end{cases} \quad (15)$$

通过引入连续辅助变量 $q_{lac}, q_{lpc}, q_{lpd}, q_{lad}$ ,结合式(14)和式(15),则充放气过程中流经各电磁阀的空气质量流量为

$$\begin{cases} q_{lpc} = \{ \text{IF } \delta_{lpc} \text{ THEN } Kp_h \text{ ELSE } Kp_{pi} \rho \}; \\ q_{lac} = \{ \text{IF } \delta_{lac} \text{ THEN } Kp_{pi} \text{ ELSE } Kp_{pi} \rho \}; \\ q_{lad} = \{ \text{IF } \delta_{lad} \text{ THEN } Kp_{pi} \text{ ELSE } Kp_{pi} \rho \}; \\ q_{lpd} = \{ \text{IF } \delta_{lpd} \text{ THEN } Kp_{as} \text{ ELSE } Kp_{as} \rho \}. \end{cases} \quad (16)$$

## 2.3 空气悬架 MLD 建模

由于空气弹簧在充放气过程中的压力变化率很小,故可以把空气弹簧内部气压 $p_{as}$ 用车辆静平衡时的气压 $p_{as0}$ 进行代替。另外,忽略在实际的车身高度调节过程中空气弹簧垂向位移 $z_{as}$ 的微小变化。因此,线性化后的空气弹簧表达式为

$$\dot{p}_{as} A_{as} z_0 = \kappa RT (q_{in} - q_{out}) - \kappa p_{as0} A_{as} \dot{z}_{as0}. \quad (17)$$

结合式(5)、式(17)以及2.1节、2.2节定义的辅助变量,选择采样时间 $t_s = 0.01$  s,可得到离散化后的空气悬架 MLD 模型的状态变量更新方程:

$$\begin{cases} \dot{z}_s(t+1) = \dot{z}_s(t) + t_s (c_s(\dot{z}_u(t) - \dot{z}_s(t)) + \\ \quad f_{as} + f_{ex-co}) / m_s; \\ \dot{z}_u(t+1) = \dot{z}_u(t) + t_s (k_t(z_r(t) - z_u(t)) - \\ \quad c_s(\dot{z}_u(t) - \dot{z}_s(t)) - f_{as} - f_{ex-co}) / m_u; \\ p_{as}(t+1) = p_{as}(t) + t_s (\kappa RT (q_{lac} \delta_f - q_{lpd} \delta_e) - \\ \quad \kappa p_{as0} A_{as} \dot{z}_{as}) / A_{as} z_0; \\ p_{pi}(t+1) = p_{pi}(t) + t_s \kappa RT (q_{lpc} \delta_f + q_{lpd} \delta_e - \\ \quad q_{lac} \delta_f - q_{lad} \delta_e) / V_{pi}; \\ z_u(t+1) = z_u(t) + t_s \dot{z}_u(t); \\ z_s(t+1) = z_s(t) + t_s \dot{z}_s(t). \end{cases} \quad (18)$$

利用混叠系统工具箱中的 HYSDEL 编译器可将上式转化为标准 MLD 模型,即

$$\begin{cases} x(t+1) = Ax(t) + B_1 u(t) + B_2 \delta(t) + B_3 z(t); \\ y(t) = Cx(t) + D_1 u(t) + D_2 \delta(t) + D_3 z(t); \\ E_2 \delta(t) + E_3 z(t) \leq E_1 u(t) + E_4 x(t) + E_5. \end{cases} \quad (19)$$

式中:  $x = [p_{as} \ p_{pi} \ \dot{z}_s \ \dot{z}_u \ z_s \ z_u]^T$ ;  $u = [I \ \delta_f \ \delta_e \ \delta_a]^T$ ;  $y = [z_s - z_u \ z_s \ z_u - z_r]^T$ ;  $\delta_{25 \times 1} \in \{0, 1\}$  为离散辅助变量;  $z_{22 \times 1} \in \mathbf{R}$  为连续辅助变量; 编译得到的不等式个数为 154;  $A$ 、 $B_{1 \sim 3}$ 、 $C$ 、 $D_{1 \sim 3}$ 、 $E_{1 \sim 5}$  为对应维数矩阵。

为体现所构建线性化模型和 MLD 模型的可行性, 分别对空气悬架线性化模型和非线性化模型在静态工况下进行仿真, 可得到悬架部分响应输出对比图如图 2 和图 3 所示, 空气悬架系统具体仿真参数如表 1 所示<sup>[8]</sup>。

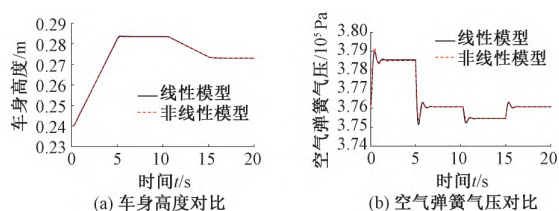


图2 线性模型与非线性模型对比

Figure 2 Comparison of linear model and nonlinear model

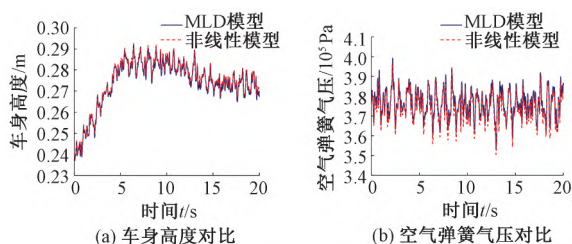


图3 MLD模型与非线性模型对比

Figure 3 Comparison of MLD model and nonlinear model

表1 模型仿真参数

Table 1 Simulation parameter of model

参数	取值	参数	取值
大气气压 $p_l$ / Pa	101 325	簧上质量 $m_s$ / kg	1 535
储气罐气压 $p_h$ / Pa	$1.5 \times 10^6$	簧下质量 $m_u$ / kg	400
多变指数 $\kappa$	1.4	气体温度 $T$ / K	293.1
理想气体常数 $R$ / ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )	287.1	空气弹簧截面积 $A_{as}$ / $m^2$	0.04
减振器阻尼系数 $c_s$ / ( $N \cdot s \cdot m^{-1}$ )	11 086	静平衡时气压 $p_{as0}$ / Pa	376 075
轮胎刚度系数 $k_t$ / ( $kN \cdot m^{-1}$ )	650	电磁阀有效面积 $s$ / $m^2$	$6 \times 10^{-7}$
初始车身高度 $z_{as0}$ / m	0.24	管路体积 $V_{pi}$ / $m^3$	$4 \times 10^{-5}$

从图 2 中可以看出, 在静态工况下, 线性模型和非线性模型的车高上升、下降和保持过程基本一致, 虽然空气弹簧气压在车高切换时瞬态响应值稍有差别, 但达到稳态时车身高度和空气弹簧气压的最大误差分别为 0.139% 和 0.09%。也进一步确定了对磁流变阻尼器和电磁阀进行线性化的有效性。

从图 3 中可以看出, 在动态工况下, MLD 模型响应输出与非线性模型的动态响应大致相同。对于车身高度, 2 种模型的均值分别为 0.273 8 m 和

0.274 7 m, 最大误差为 0.23%; 对于空气弹簧气压, 2 种模型的均值分别为 376 269、374 318 Pa, 最大误差为 1.5%, 这证明了 MLD 模型的可行性。

### 3 空气悬架分层控制策略

为了实现电磁阀开关状态离散控制变量和磁流变阻尼器输入电流连续控制变量之间的协调控制, 解决电磁阀频繁切换问题, 根据空气悬架系统的实际运行特性, 提出图 4 所示的分层控制策略。

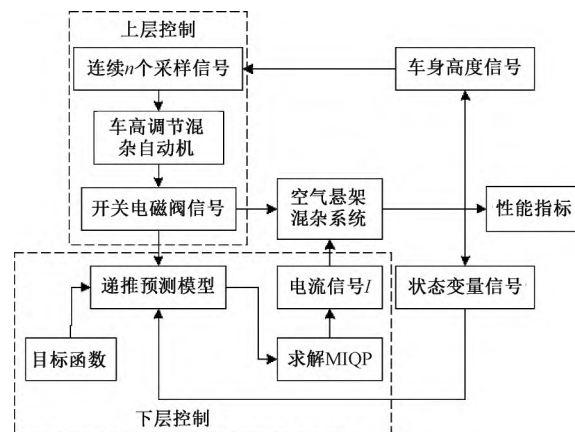


图4 分层控制策略原理图

Figure 4 Schematic diagram of layered control strategy

#### 3.1 基于混杂自动机的电磁阀开关控制策略

图 5 为动态工况下车高调节示意图, 其中  $h_a$  为目标高度值,  $[h_1 \ h_2]$  为容许误差,  $[h_3 \ h_4]$  为极限误差。设置容许误差, 可使实际车高到达目标车高值之前进行保压操作, 从而防止过充和过放现象发生<sup>[15]</sup>。同时设置极限误差, 针对  $n$  个连续采样时刻的车身高度平均值是否超过极限误差进行判断, 以防止系统错误调节而缩短电磁阀使用寿命。电磁阀开关控制策略采用图 6 所示的混杂自动机进行表达。

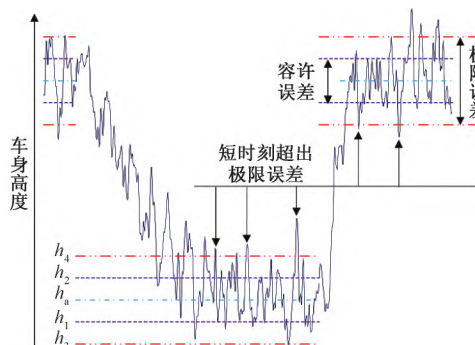


图5 车高调节示意图

Figure 5 Vehicle height control diagram

为了对混杂自动机进行建模<sup>[16]</sup>, 引入辅助变量  $\delta_1$ 、 $\delta_2$ 、 $\delta_3$ 、 $\delta_4$ 、 $\delta_5$ 、 $\delta_6$  并将其定义为

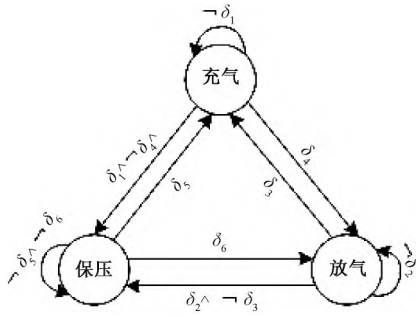


图6 车高调节混杂自动机

Figure 6 Vehicle height regulation hybrid automaton

$$\begin{cases} [\delta_1 = 1] \leftrightarrow z_{as} \geq h_1; \\ [\delta_2 = 1] \leftrightarrow z_{as} \leq h_2; \\ [\delta_3 = 1] \leftrightarrow z_{as} \leq h_3; \\ [\delta_4 = 1] \leftrightarrow z_{as} \geq h_4; \\ [\delta_5 = 1] \leftrightarrow z_{av} \leq h_3; \\ [\delta_6 = 1] \leftrightarrow z_{av} \geq h_4. \end{cases} \quad (20)$$

式中:  $z_{av}$  为连续  $n$  个采样时刻的  $z_{as}$  平均值。

对 1.3 节定义的各电磁阀开关离散变量, 引入逻辑状态  $x_b$ :

$$x_b = [\delta_f \quad \delta_e \quad \delta_a]^T = \begin{cases} [1 & 0 & 1]; \\ [0 & 0 & 0]; \\ [0 & 1 & 1]. \end{cases} \quad (21)$$

式中:  $\delta_a$  为空气弹簧电磁阀开关信号;  $[1 \quad 0 \quad 1]$  为充气状态;  $[0 \quad 0 \quad 0]$  为保压状态;  $[0 \quad 1 \quad 1]$  为放气状态。

结合图 6 的车高调节混杂自动机, 得到空气悬架充气、放气、保压时的逻辑表达式分别为

$$\begin{aligned} V_c = & (\neg \delta_f(t) \wedge \neg \delta_e(t) \wedge \neg \delta_a(t) \wedge \delta_5) \vee \\ & (\neg \delta_f(t) \wedge \delta_e(t) \wedge \delta_a(t) \wedge \delta_3) \vee \\ & (\delta_f(t) \wedge \neg \delta_e(t) \wedge \delta_a(t) \wedge \neg \delta_1); \quad (22) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_d = & (\neg \delta_f(t) \wedge \neg \delta_e(t) \wedge \neg \delta_a(t) \wedge \delta_6) \vee \\ & (\neg \delta_f(t) \wedge \delta_e(t) \wedge \delta_a(t) \wedge \neg \delta_2) \vee \\ & (\delta_f(t) \wedge \neg \delta_e(t) \wedge \delta_a(t) \wedge \delta_4); \quad (23) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_m = & (\neg \delta_f(t) \wedge \neg \delta_e(t) \wedge \neg \delta_a(t) \wedge \neg \delta_5 \wedge \neg \delta_6) \vee \\ & (\neg \delta_f(t) \wedge \delta_e(t) \wedge \delta_a(t) \wedge \delta_2 \wedge \neg \delta_3) \vee \\ & (\delta_f(t) \wedge \neg \delta_e(t) \wedge \delta_a(t) \wedge \delta_1 \wedge \neg \delta_4). \quad (24) \end{aligned}$$

则电磁阀开关变量的状态转换方程为

$$\begin{cases} \delta_f(t+1) = V_c \wedge \neg V_d \wedge \neg V_m; \\ \delta_e(t+1) = \neg V_c \wedge V_d \wedge \neg V_m; \\ \delta_a(t+1) = \delta_f(t+1) \vee \delta_e(t+1). \end{cases} \quad (25)$$

### 3.2 基于 HMPC 的磁流变阻尼器电流控制

将上层控制求解得到的电磁阀开关信号作为已知信号, 输入下层混杂模型预测控制器, 进而求解最优控制电流  $I$ 。对式 (19) 中的  $u(t)$  进行处理, 令

$B_1 u(t) = B_r u_r(t) + B_s u_s(t)$ ,  $D_1 u(t) = D_r u_r(t) + D_s u_s(t)$ ,  $E_1 u(t) = E_r u_r(t) + E_s u_s(t)$ , 其中  $u_r = [I]$ ;  $u_s = [z_r \quad \delta_f \quad \delta_e \quad \delta_a]^T$ ;  $B_r, B_s, D_r, D_s, E_r, E_s$  为对应维数的矩阵, 可得

$$\begin{cases} x(t+1) = Ax(t) + B_r u_r(t) + B_s u_s(t) + \\ \quad B_2 \delta(t) + B_3 z(t); \\ y(t) = Cx(t) + D_r u_r(t) + D_s u_s(t) + \\ \quad D_2 \delta(t) + D_3 z(t); \\ E_2 \delta(t) + E_3 z(t) \leq E_r u_r(t) + \\ \quad E_s u_s(t) + E_4 x(t) + E_5. \end{cases} \quad (26)$$

为了采用混杂模型预测控制对磁流变阻尼器电流信号在有限时域内进行优化求解, 设预测时域为  $N$ , 对式 (26) 进行递推, 可得到以下预测模型:

$$\begin{cases} Y(t) = \bar{C}x(t) + \bar{D}_r U_r(t) + \bar{D}_s U_s(t) + \bar{D}_2 \Delta(t) + \bar{D}_3 Z(t); \\ \bar{E}_2 \Delta(t) + \bar{E}_3 Z(t) \leq \bar{E}_r U_r(t) + \bar{E}_s U_s(t) + \bar{E}_4 x(t) + \bar{E}_5. \end{cases} \quad (27)$$

式中:  $U_s(t) = U_s(t|t) \quad U_s(t+1|t) \quad \dots \quad U_s(t+N-1|t)^T$ ;  $\bar{C}, \bar{D}_r, \bar{D}_s, \bar{D}_{2-3}, \bar{E}_r, \bar{E}_s, \bar{E}_{2-5}$  分别为对应维数矩阵。

由于下层控制器无须控制车身高度, 故取车身高度、车身加速度、轮胎动位移性能指标的加权系数矩阵  $q = \text{diag}(0 \quad q_a \quad q_d)$ , 控制变量加权系数为  $r$ , 建立二次型性能加权指标函数为

$$J = \|Y(t) - Y_{ref}(t)\|_Q^2 + \|U_r(t)\|_R^2. \quad (28)$$

式中: 下标  $Q$  和  $R$  均为加权系数矩阵,

$$Q = \begin{bmatrix} q & 0 & \dots & 0 \\ 0 & q & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & q \end{bmatrix}; R = \begin{bmatrix} r & 0 & \dots & 0 \\ 0 & r & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & r \end{bmatrix}.$$

将式 (27) 代入性能指标函数, 可得

$$J = \frac{1}{2} \xi^T H \xi + F \xi + \frac{1}{2} \gamma^T G \gamma. \quad (29)$$

式中:

$$H = \begin{bmatrix} D_r^T Q D_r + G D_r^T Q D_2 & D_r^T Q D_3 \\ D_2^T Q D_r & D_2^T Q D_2 & D_2^T Q D_3 \\ D_3^T Q D_r & D_3^T Q D_2 & D_3^T Q D_3 \end{bmatrix}; \xi = \begin{bmatrix} U_r(t) \\ \Delta(t) \\ Z(t) \end{bmatrix};$$

$$F = 2 \begin{bmatrix} x^T(t) C^T Q D_r + U_s^T D_s^T Q D_r \\ x^T(t) C^T Q D_2 + U_s^T D_s^T Q D_2 \\ x^T(t) C^T Q D_3 + U_s^T D_s^T Q D_3 \end{bmatrix}^T; G = \begin{bmatrix} C^T Q C & C^T Q D_s \\ D_s^T Q C & D_s^T Q D_s \end{bmatrix};$$

$$\gamma = \begin{bmatrix} x(t) \\ U_s(t) \end{bmatrix}.$$

式 (29) 的不等式可进一步写成:

$$P \xi \leq \bar{E}_5 + S \gamma. \quad (30)$$



式中:  $P = [\bar{E}_1 \quad \bar{E}_2 \quad \bar{E}_3]$ ;  $S = [\bar{E}_4 \quad \bar{E}_5]$ 。

根据式(29)和式(30), 空气悬架中磁流变阻尼器的控制输入电流求解转化为混合整数二次规划问题:

$$\begin{cases} J \triangleq \min_{\xi} \left( \frac{1}{2} \xi^T H \xi + F \xi \right); \\ \text{s.t. } P \xi \leq \bar{E}_5 + S \gamma, \rho \leq I \leq 1.6. \end{cases} \quad (31)$$

#### 4 仿真验证

空气悬架模型参数如表1所示。假设车辆以30 m/s的速度行驶于B级路面, 车身的初始高度为0.24 m, 随后在5 s时将其提升至0.26 m, 最后在15 s时降低至0.24 m, 仿真时间为20 s。针对车高调节上层控制, 设置容许误差为 $\pm 0.002$  m, 极限误差为 $\pm 0.004$  m, 设定用于计算车身高度平均值的 $n$ 个连续采样时刻数为20, 采样周期为0.01 s; 针对基于HMPC的磁流变阻尼器电流下层控制, 经过多次试算, 取预测时域 $N = 2$ ,  $q_a = 200$ ,  $q_d = 10$ ,  $r = 0.001$ 。将分层控制策略与文献[8]的HMPC进行对比。

图7为B级路面时的车身高度控制效果图, 经计算得出, 车高上升调节稳定后, HMPC与分层控制下的车身高度平均值分别为0.258 8、0.260 4 m, 车高下降调节稳定后, 对应车身高度平均值分别为0.241 3、0.240 8 m。可以看出, 相对于目标车身高度, HMPC和分层控制均可有效跟踪车身高度目标值, 且分层控制的车身高度跟踪效果略优于HMPC。

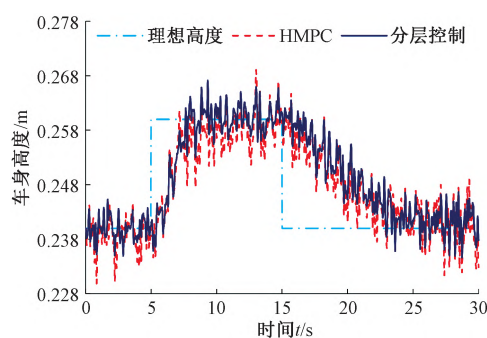


图7 车身高度对比

Figure 7 Comparison of vehicle height

图8为2种控制策略下的电磁开关状态对比图, 从图8中可以看出, 与HMPC控制相比, 基于混杂自动机的电磁阀开关控制策略可以有效降低开关切换频率, 减少车高调节过程中因外界激励导致的电磁阀误调节操作, 从而延长电磁阀的使用寿命。

图9为被动控制、HMPC控制、分层控制作用下, 车身垂向加速度和车轮动位移响应对比图。从图9可知, 分层控制相对于被动控制和HMPC, 悬架

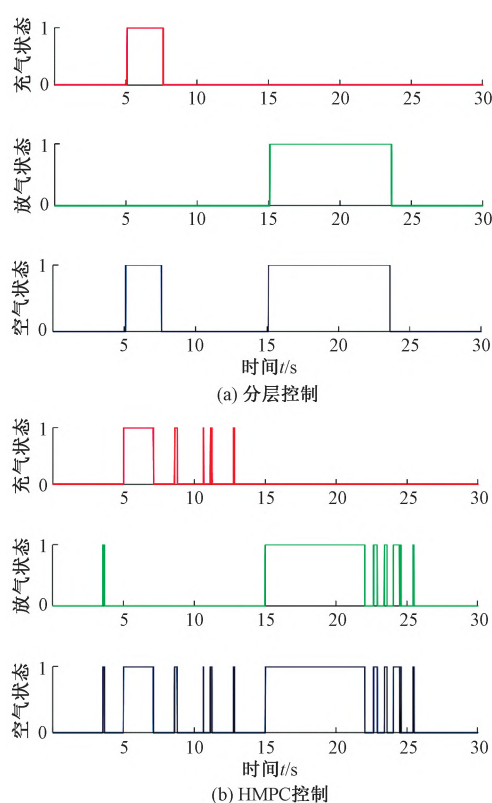
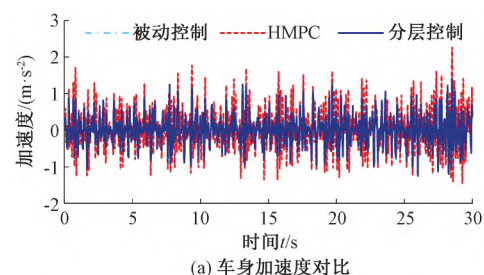


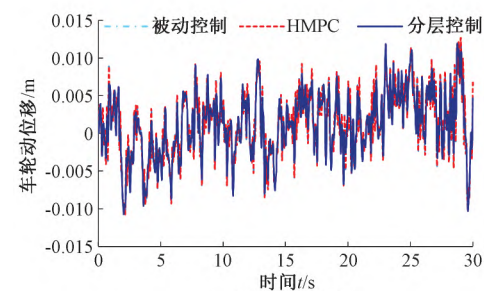
图8 电磁阀开关状态对比

Figure 8 Comparison of solenoid valve on-off states

系统性能指标明显有所改善。经计算, 空气悬架系统车身加速度相对于被动控制和HMPC分别降低了34.33%、34.34%, 较好地改善了车辆的乘坐舒适性。这表明系统在分层控制作用时, 上层控制中空气弹簧由于充放气过程而连续变化的刚度可与下层控制中磁流变阻尼器产生的阻尼力相协调, 能够达到车身高度与阻尼力分层控制的目的。



(a) 车身加速度对比



(b) 车轮动位移对比

图9 悬架动态响应对比

Figure 9 Comparison of suspension dynamic response

## 5 结论

(1) 建立了半主动空气悬架非线性模型,通过引入辅助变量对电磁阀模型、磁流变阻尼器模型中存在的分段近似边界约束条件进行了描述,利用混杂系统描述语言建立了空气悬架混杂模型,并将其编译为标准的混合逻辑动态模型。

(2) 针对空气悬架的工作特点,提出了基于混杂自动机的电磁阀开关离散信号控制策略,推导了电磁阀开关状态的更新方程,进行了充气、放气和保压 3 种工作模式的切换设计,可对目标车身高度进行有效调节。

(3) 设计了基于 HMPC 的磁流变阻尼器阻尼力控制器,通过在随机路面工况下进行仿真验证可知,所提控制策略在有效跟踪车身高度的同时,不仅能提高车辆乘坐舒适性,还能直接防止电磁阀频繁切换现象的发生。

## 参考文献:

- [1] 时刚,田新涛. 工程卡车行驶引发地面振动特性研究[J]. 郑州大学学报(工学版),2020,41(5): 76-81.  
SHI G, TIAN X T. Research on ground vibration characteristics caused by engineering truck driving[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2020, 41(5): 76-81.
- [2] ZHAO R C, XIE W, WONG P K, et al. Robust ride height control for active air suspension systems with multiple unmodeled dynamics and parametric uncertainties[J]. IEEE Access, 2019, 7: 59185-59199.
- [3] HU Y L, CHEN M Z Q, SUN Y H. Comfort-oriented vehicle suspension design with skyhook inerter configuration[J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 405: 34-47.
- [4] NA J, HUANG Y B, WU X, et al. Adaptive finite-time fuzzy control of nonlinear active suspension systems with input delay[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2020, 50(6): 2639-2650.
- [5] WEN S F, SHEN Y J, LI X H, et al. Dynamical analysis of Mathieu equation with two kinds of van der Pol fractional-order terms[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2016, 84: 130-138.
- [6] ZHANG Y Q, LIU Y J, WANG Z F, et al. Neural networks-based adaptive dynamic surface control for vehicle active suspension systems with time-varying displacement constraints[J]. Neurocomputing, 2020, 408: 176-187.
- [7] SUN H, LI Y M, XU K, et al. Fuzzy adaptive backstepping control for a class of active suspension systems[J]. IFAC-PapersOnLine, 2018, 51(31): 136-141.
- [8] SUN X Q, CAI Y F, WANG S H, et al. A hybrid approach to modeling and control of vehicle height for electronically controlled air suspension[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 29(1): 152-162.
- [9] HAJFREJ G B, MOREAU X, HAMROUNI E, et al. Multi-modes control for semi-active suspension systems[J]. IFAC-PapersOnLine, 2020, 53(2): 14407-14412.
- [10] 徐兴,陈照章,黄俊明,等. 电控空气悬架充放气的动态建模及特性仿真[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(6): 1225-1228.  
XU X, CHEN Z Z, HUANG J M, et al. Dynamic modeling and characteristic simulation of charging-discharging system for electronically controlled air suspension[J]. Journal of System Simulation, 2011, 23(6): 1225-1228.
- [11] 刘本学,蔺超云,郭沛东,等. 基于 MATLAB 的汽车线性最优控制主动悬架仿真研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(5): 72-76.  
LIU B X, LIN C Y, GUO P D, et al. Research of simulation in the linear optimal control active suspension of vehicle based on MATLAB[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2016, 37(5): 72-76.
- [12] 马然,朱思洪,梁林,等. 磁流变减振器建模与试验[J]. 机械工程学报, 2014, 50(4): 135-141.  
MA R, ZHU S H, LIANG L, et al. Modelling and testing of magnetorheological damper[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(4): 135-141.
- [13] SUN X Q, WU P C, CAI Y F, et al. Piecewise affine modeling and hybrid optimal control of intelligent vehicle longitudinal dynamics for velocity regulation[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 162: 108089.
- [14] HU Q G, LU W, JIANG J Z. Dynamic modeling and adjustable damping layered control of air suspension hybrid system[J]. Australian Journal of Mechanical Engineering, 2022, 20(1): 1-13.
- [15] 孙士雷,韩振南. 轿车 ECAS 充放气时平顺性的控制研究[J]. 机械设计与制造, 2020(11): 49-52.  
SUN S L, HAN Z N. Study on the control of ride comfort based on ECAS car ramp[J]. Machinery Design & Manufacture, 2020(11): 49-52.
- [16] HEJRI M, GIUA A, MOKHTARI H. On the complexity and dynamical properties of mixed logical dynamical systems via an automaton-based realization of discrete-time hybrid automaton[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2018, 28(16): 4713-4746.

## Hierarchical Control of Body Height and Adjustable Damping in Air Suspension Hybrid System

HU Qiguo<sup>1</sup>, WEI Chen<sup>1</sup>, LU Wei<sup>1</sup>, LEI Xudong<sup>2</sup>, LIANG Dong<sup>1</sup>

( 1.School of Mechanotronics and Vehicle Engineering ,Chongqing Jiaotong University ,Chongqing 400074 , China; 2.Chongqing Tiema Industries Group Co.,Ltd., Chongqing 400050 , China)

**Abstract:** To address the difficult problem of coordinated control of body height and damper damping force during air suspension body height adjustment control , a hierarchical control strategy of air suspension body height and adjustable damping based on the mixed logic dynamic ( MLD) model was proposed. Considering the hybrid characteristics of the air suspension in the process of inflating and deflating , the MLD modelling method was used to establish a nonlinear air suspension hybrid model with solenoid valves and magnetorheological dampers. The hybrid automaton describing the switching state of the solenoid valves was designed for the upper level control of body height adjustment , and the input current of the magneto rheological dampers was controlled at the lower level based on the predictive control method of the hybrid model. And then hierarchical control of body height and adjustable damping was realized by changing the switching state of the solenoid valves and the input current of the magneto rheological dampers. Through the simulation verification in random road excitation conditions , it could be concluded that the proposed control method could effectively track vehicle height while reducing vehicle acceleration by 34.33% and 34.34% compared to passive suspension and hybrid model predictive control , respectively , which could not only improve the ride comfort of the vehicle , but also directly prevent the frequent switching of solenoid valves and extending the service life of solenoid valves.

**Keywords:** air suspension; mixed logical dynamical; hybrid system; hybrid model predictive control; hierarchical control

( 上接第 87 页)

## Local Path Planning of Artificial Potential Field Based on Improved Repulsive Model

CHEN Jiangyi , YIN Xiaoyong , WANG Tingting , QIN Dongchen

( School of Mechanical and Power Engineering , Zhengzhou University , Zhengzhou 450001 , China)

**Abstract:** Aim to the traditional artificial potential field algorithm was easy to fall into the local optimum , this study proposed an artificial potential field method which could improve the repulsive force model. According to the relative relationship between vehicle velocity direction and obstacle position and the distance between obstacle and road boundary , the repulsive deflection direction and deflection angle were determined to avoid vehicle falling into local optimum. The repulsive field function was redesigned to introduce the safety distance of vehicle obstacle avoidance into the scope of repulsive force. Logarithmic function and longitudinal relative distance adjustment factor were introduced into the repulsive force function to reduce the curvature and total rotation angle of the planned path. The simulation results showed that the selection of repulsive deflection angle had a direct influence on the stability and safety of the local path when the artificial potential field method of the improved repulsive model is used for local path planning , and the appropriate repulsive deflection angle could avoid the occurrence of local optimum in path planning. When the vehicle need continuous obstacle avoidance in multi-obstacle environment , the total path angle and curvature peak planned by the improved repulsive force model decreased significantly , which could effectively improve the driving safety index.

**Keywords:** improved repulsion model; local path planning; repulsive force deflection; local optimum; safe distance