

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.01.049

汽车半主动空气悬架的模糊滑模控制方法研究

杨沐丰¹, 李涛¹, 吕艳², 张元良¹

(1. 大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 大连工业大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 大连 116034)

摘要:针对半主动空气悬架系统在车辆行驶过程中存在平顺性、操作稳定性等问题,研究半主动空气悬架动力学特性以及传统滑模控制的抖动机制,采用模糊滑模控制来提升系统控制性能,并提出一种并联控制方法(模糊滑模+滑模)。用 MATLAB/Simulink 对两种不同控制策略下悬架簧载质量位移、加速度以及悬架动挠度的动态变化进行仿真分析。研究结果表明:该并联控制方法相较于传统滑模控制可提高车辆行驶过程中的平顺性以及操作稳定性。

关键词:汽车;半主动空气悬架;模糊滑模控制;滑模控制;并联控制

中图分类号:TP273 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)01-0260-05

Research on Fuzzy Sliding Mode Control Method of Automobile Semi-active Air Suspension

YANG Mufeng¹, LI Tao¹, LYU Yan², ZHANG Yuanliang¹

(1. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. School of Mechanical Engineering and Automation, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China)

Abstract: Regarding the ride discomfort and operation instability of semi-active air suspension system during running, this paper studies the dynamic characteristics of semi-active air suspension and the jitter mechanism of traditional sliding mode control, adopts fuzzy sliding mode control to improve the system control performance, and proposes a parallel control method (fuzzy sliding mode + sliding mode). The dynamic changes of sprung mass displacement, acceleration and dynamic deflection of suspension under two different control strategies are simulated and analyzed in MATLAB/Simulink. The research results show that the parallel control method can improve the ride comfort and operation stability of vehicle during driving compared with traditional sliding mode control.

Keywords: vehicle; semi-active air suspension; fuzzy sliding mode control; sliding mode control; parallel control

0 引言

车体悬架系统的控制是决定车辆行驶平顺性的关键因素,悬架可分为被动式、半主动式、全主动式^[1-5]。其中半主动式空气悬架由于集成其余两者优点且易于控制并能更好地提高驾驶人乘坐舒适性以及操纵稳定性而备受青睐^[6-9]。半主动空悬的控制又分为刚度可调式和阻尼可调式,本文以阻尼可调式为基础进行控制算法研究^[10-11]。

2011 年韩卫沙^[12]通过对半主动悬架阻尼进行控制,验证模糊滑模控制相较于滑模控制的有效性。2015 年郑明军等^[13]建立基于滑模控制的控制算法,在空悬系统的隔振指标方面得到提升。2021 年元艳玲等^[14]将混合天地棚模型作为参考模型,设计滑模控制器,通过控制半主动空悬系统

阻尼力,改善了行驶过程中的平顺性。2022 年班小强等^[15]针对传统 PID 控制精度不足问题,设计 BP-PID 控制器减小了半主动空悬系统的加速度。2023 年荆航等^[16]提出改进的人工蜂群算法优化 PID 控制,提升了主动悬架的综合性能。

传统滑模控制在系统临界目标附近存在抖振现象,而单纯的模糊控制缺乏系统性,依赖大量经验,对复杂系统控制效果不佳^[17-19]。针对以上研究现状,本文利用模糊控制补偿滑模控制的趋近率参数,保证系统稳定性。将模糊滑模控制和滑模控制进行复合,形成并联控制。新控制策略在系统误差较大时可保证趋近速度,系统误差较小时保证平顺性。同时对半主动空气悬架动力学进行研究,在 Simulink 中搭建半主动空悬系统模型以及两种控制算法模型,进行仿真分析。

基金项目:辽宁省教育厅 2021 年度科学研究经费面上项目(LJKZ0526);2021 年度辽宁省自然科学基金资助计划项目(2021-MS-300)

第一作者简介:杨沐丰(1998—),男,河南信阳人,硕士研究生,研究方向为单片机嵌入式系统开发, mu_feng_y@163.com。

1 半主动空气悬架系统模型及路面激励建模

1.1 半主动空气悬架系统 1/4 车体动力学建模

传统被动空悬台架的阻尼为固定值,对车辆所受干扰改善程度有限。为便于研究路况激励对半主动空气悬架的扰动,现搭建阻尼可调的二自由度 1/4 半主动空气悬架模型,如图 1 所示。对系统进行动力学分析,由牛顿第二定律得,其运动微分方程如下:

$$\begin{cases} m_p \ddot{z}_p + k_p(z_p - z_s) + c_0(\dot{z}_p - \dot{z}_s) = -u \\ m_s \ddot{z}_s + k_p(z_s - z_p) + k_s(z_s - q) + c_0(\dot{z}_s - \dot{z}_p) = u \end{cases} \quad (1)$$

式中: m_p 为簧载质量; m_s 为非簧载质量; k_p 为空气悬架刚度; k_s 为轮胎刚度; z_p 、 z_s 分别为车身垂直位移、轮胎垂直位移; q 为随机路面激励; c_0 为减震器固定阻尼系数; u 为半主动悬架可控阻尼力。

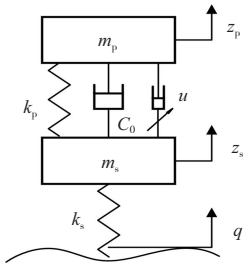


图 1 1/4 车半主动空气悬架系统模型

选取状态变量 $X = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T = [z_s \ z_p \ \dot{z}_s \ \dot{z}_p]^T$, 则 $\dot{X} = AX + Bu + Eq$, 输出变量 $Y = [y_1 \ y_2]^T = [z_p \ z_s]^T$, 则 $Y = GX$ 。式中:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{k_p + k_s}{m_s} & \frac{k_p}{m_s} & -\frac{c_0}{m_s} & \frac{c_0}{m_s} \\ \frac{k_p}{m_p} & -\frac{k_p}{m_p} & \frac{c_0}{m_p} & -\frac{c_0}{m_p} \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{m_s} \\ -\frac{1}{m_p} \end{bmatrix};$$

$$E = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{k_s}{m_s} \\ 0 \end{bmatrix}; G = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}。$$

1.2 天棚阻尼悬架系统建模

在进行半主动空气悬架系统阻尼力控制时,使用天棚阻尼悬架模型作参考模型,如图 2 所示。

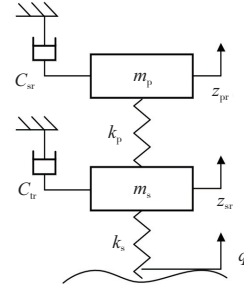


图 2 天棚阻尼悬架系统模型

系统动力学方程为

$$\begin{cases} m_p \ddot{z}_{pr} = -k_p(z_{pr} - z_{sr}) - c_{sr}\dot{z}_{pr} \\ m_s \ddot{z}_{sr} = k_p(z_{pr} - z_{sr}) + c_{tr}\dot{z}_{sr} + k_s(q - z_{sr}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: z_{pr} 、 z_{sr} 分别为簧载位移、非簧载位移; c_{sr} 、 c_{tr} 为减震器阻尼系数。

选取状态变量 $X_r = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T = [z_{sr} \ z_{pr} \ \dot{z}_{sr} \ \dot{z}_{pr}]^T$, 则状态方程为: $\dot{X}_r = A_r X_r + E_r q$ 。式中:

$$A_r = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{k_p + k_s}{m_s} & \frac{k_p}{m_s} & -\frac{c_{tr}}{m_s} & 0 \\ \frac{k_p}{m_p} & -\frac{k_p}{m_p} & 0 & -\frac{c_{sr}}{m_p} \end{bmatrix}; E_r = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{k_s}{m_s} \\ 0 \end{bmatrix}。$$

1.3 随机路面激励建模

路面激励可以采用路面功率谱密度函数来表示:

$$G_q(n) = G_q(n_0) \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-\omega} \quad (3)$$

式中: $G_q(n_0)$ 为路面不平度系数, m^2/m^{-1} ; n 为空间频率, 是波长 λ 的倒数, m^{-1} ; n_0 为参考空间频率, $n_0 = 0.1, m^{-1}$; ω 为频率指数, 通常取值 2。常见路面不平度系数如表 1 所示。

表 1 路面不平度系数 单位: m^2/m^{-1}

路面等级	A	B	C	D	E	F
路面不平度系数 ($\times 10^{-6}$)	16	64	256	1 024	4 096	16 384

由式(3),将车速代入可得路面激励与车速及路面不平度系数的关系^[20]为

$$\dot{q}(t) = -2\pi n_1 q(t) + 2\pi \omega(t) n_0 \sqrt{G_q(n_0)} v \quad (4)$$

式中: $q(t)$ 为路面激励; v 为车速; $\omega(t)$ 为单位高斯白噪声。

选取 C 等级路面,车速 $v=20 \text{ km/h}$,搭建路面激励仿真模型如图 3 所示。

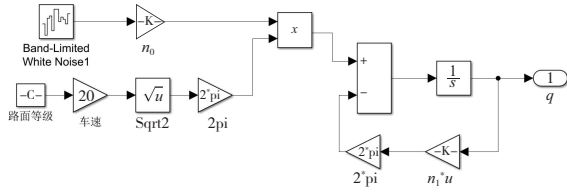


图 3 路面激励仿真模型

C 等级的随机路面激励曲线如图 4 所示。

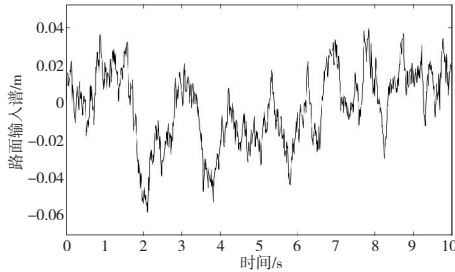


图 4 C 等级随机路面激励仿真图

2 半主动空气悬架并联控制器设计

2.1 滑模控制器设计

根据所建立的参考动力学模型以及半主动空气悬架动力学模型,选择误差矢量 E 为

$$E = [z_p - z_{pr} \quad z_p - z_{pr} \quad \int (z_p - z_{pr})]^T \quad (5)$$

则有误差方程

$$\dot{E} = A_e E + B_e X + H_e X_r + G_e u \quad (6)$$

式中:

$$A_e = \begin{bmatrix} -\frac{c_0}{m_p} & -\frac{k_p}{m_p} & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}; B_e = \begin{bmatrix} \frac{k_p}{m_p} & 0 & \frac{c_0}{m_p} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$G_e = \begin{bmatrix} -\frac{1}{m_p} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; H_e = \begin{bmatrix} \frac{k_p}{m_p} & 0 & 0 & \frac{c_{sr}-c_0}{m_p} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}。$$

系统误差矢量的滑模面选择为 $s = CE$, 由此可知 $\dot{s} = CE$, 式中, $C = [c_1 c_2 c_3]$ 。当滑模运动方程 $C(s) = c_1 s^2 + c_2 s + c_3$ 的所有特征根都落在 s 平面的左边, 此时系统的滑模运动方程是稳定的, 且有较好的动态特性。在滑模控制特性中, 系统的控制

量 u 由两部分组成, 一个为等效控制, 另一个为切换控制, 这里可以定义为 $u = u_{\text{deq}} + u_v$ 。此时对 $\dot{s}$ 进行整理如下:

$$\dot{s} = c_1 (\ddot{z}_p - \ddot{z}_{pr}) + c_2 (\dot{z}_p - \dot{z}_{pr}) + c_3 (z_p - z_{pr}) = C[A_e E + B_e X + H_e X_r + G_e u] \quad (7)$$

将式(6)与式(7)结合可得

$$\dot{s} = (c_3 m_p - c_1 k_p)(z_p - z_{pr}) + (c_2 m_p - c_1 c_0)(\dot{z}_p - \dot{z}_{pr}) + c_1 k_p(z_s - z_{sr}) + c_1 c_0 \dot{z}_s + c_1(c_{sr} - c_0)\dot{z}_{pr} - u \quad (8)$$

当系统进入滑模面, 即 $s=0$ 时, 令 $\dot{s} = CE = 0$, 可得滑模的等效控制率为

$$u_{\text{deq}} = (c_2 m_p - c_1 c_0)(\dot{z}_p - \dot{z}_{pr}) + (c_3 m_p - c_1 k_p)(z_p - z_{pr}) + c_1 k_p(z_s - z_{sr}) + c_1 c_0 \dot{z}_s + c_1(c_{sr} - c_0)\dot{z}_{pr} \quad (9)$$

等效控制的作用就是使系统的运动轨迹跟踪所设计的滑模切换函数面, 此时选用等速趋近率, 来确保系统运动轨迹趋向于所设计的滑模切换函数面, 并改善系统动态特性。

等速趋近率为

$$\dot{s} = -k \text{sgn}(s), \quad k > 0 \quad (10)$$

由式(8)一式(10)可得滑模控制系统的可控阻尼力为

$$u = u_{\text{deq}} + k \text{sgn}(s) \quad (11)$$

2.2 模糊滑模控制器设计

如图 5 所示, 通过模糊控制输出一个滑模控制中符号函数的参数补偿量, 从而对等速趋近率参数 k 进行调节, 减小单独滑模控制时的抖动, 使其更趋于平滑控制。在该控制器中, 模糊控制的输入量为所设计的滑模切换函数 s 以及其对时间的导数。

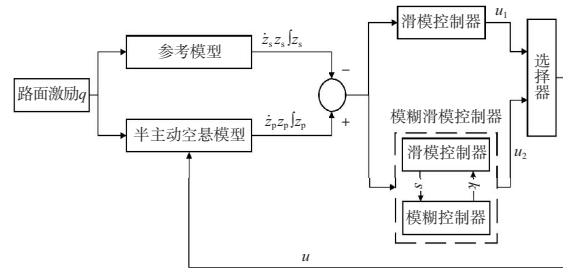


图 5 并联控制系统框图

在模糊规则设计中, 输入量分别为 s 和 $\dot{s}$, 两者对应的模糊化变量分别为 S 和 S_c , 模糊控制器中输出的变化率参数 k 的增益量定义为 E 。

模糊控制器中输出 E 的控制规则如表 2 所示。

表 2 模糊(E)控制规则表

S	S_c						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	NS	ZE
NM	NB	NB	NM	NS	NS	NS	ZE
NS	NM	NM	NS	ZE	ZE	ZE	ZE
ZE	NM	NM	NS	ZE	ZE	PS	PS
PS	NS	NS	ZE	ZE	PS	PS	PM
PM	ZE	PS	PS	PS	PS	PM	PB
PB	PS	PS	PS	PM	PB	PB	PB

模糊规则中模糊集定义为:负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(ZE)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PB)。输入输出变量的模糊论域定义为: $\{S\} = \{S_c\} = \{E\} = \{-1, 0, 1\}$ 。选取常用的Gaussmf(高斯曲线)作为模糊变量 S 、 S_c 、 E 的隶属度函数。

2.3 并联控制器设计

图5中路面激励作为参考模型以及半主动空悬模型的输入,使半主动空悬系统输出跟随参考

模型理想输出,以此为基础进行半主动空悬系统阻尼力控制,可消除系统部分震动。

并联控制器将模糊滑模控制和滑模控制进行复合,根据系统控制量的误差大小选择使用哪一种控制策略。在该并联控制策略中,输入控制器之中的误差较大时进行单独的滑模控制,此时可以保证系统的趋近速度。输入控制器之中的误差较小时进行模糊滑模控制,由于误差较小时未采用单独的滑模控制,可以从根本上避免抖动现象。

3 仿真实验和结果分析

3.1 仿真模型建立

根据第 1 节所推导的动力学方程,利用 S 函数建立参考悬架系统以及半主动空悬系统。根据第 2 节所设计的控制器,建立基于滑模以及并联控制策略的 Simulink 仿真模型如图 6 所示。以某轿车为例,仿真模型参数如下:

$$k_p = 16\,000\text{ N/m}, k_s = 190\,000\text{ N/m}, c_0 = 1\,750\text{ Ns/m}, m_s = 40\text{ kg}, c_{sr} = 4\,250\text{ Ns/m}, c_{tr} = 1\,750\text{ Ns/m}, m_p = 350\text{ kg}_\odot$$

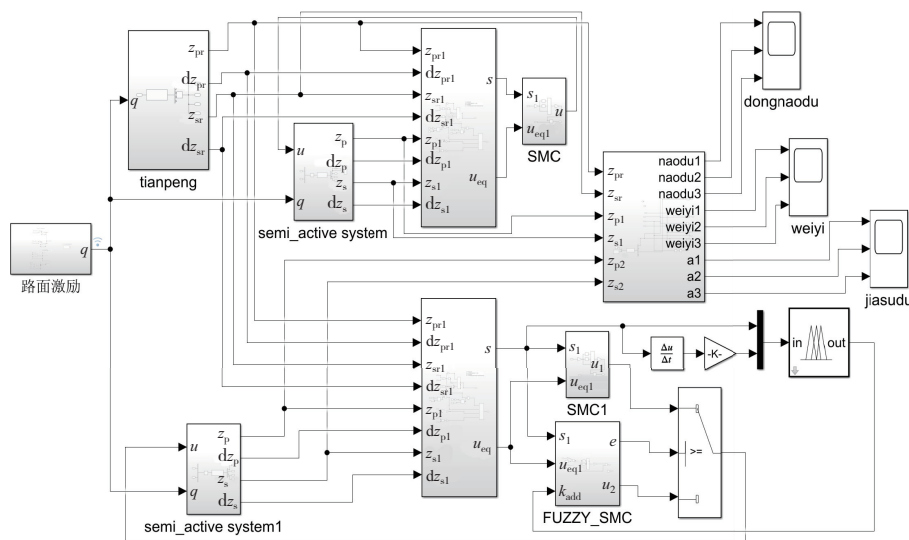


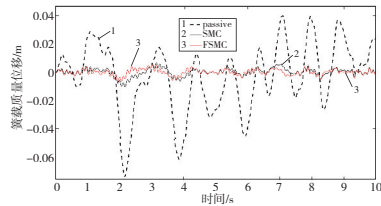
图 6 滑模和并联控制仿真模型

3.2 仿真结果分析

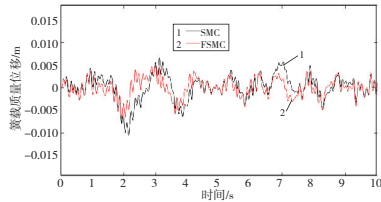
本文选择半主动空气悬架的簧载垂直位移 z_p 、车身加速度 $\ddot{z}_{dp}$ 以及悬架动挠度 $z_p - z_s$ 作为性能指标检验控制效果的可行性, 仿真结果如图 7—图 9 所示。其中 passive 曲线为参考被动悬架, SMC 和 FSMC 曲线分别为滑模控制和并联控制下的半主动空气悬架系统曲线。

由图 7 可知,被动悬架簧载质量位移最大值

和最小值分别为 4.01 cm、-7.41 cm;滑模控制悬架位移最大值和最小值分别为 0.68 cm、-1.05 cm;并联控制悬架位移最大值和最小值分别为 0.52 cm、-0.68 cm。结果表明:本文所设计的滑模控制以及并联控制策略均可有效降低簧载质量的位移,减小车身的垂直震动幅值,且后者相较于前者,位移最大值和最小值控制效果分别提高了 23.5%、35.2%,位移时间图也更为平缓,提高了车辆行驶时的平顺性。



(a) 含参考模型



(b) 局部放大图

图7 簧载质量位移图

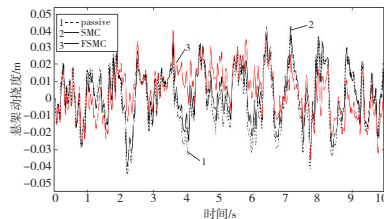


图8 悬架动挠度图

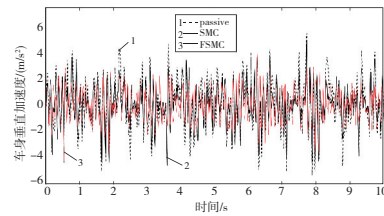


图9 车身垂直加速度图

对图8、图9的仿真结果进行分析,如表3所示。结果表明并联控制算法下半主动空气悬架动挠度以及加速度的最大值、最小值和方均根均小于前两者。评价动挠度以及加速度控制效果时主要采用方均根进行评判。在滑模和并联控制下的半主动空气悬架动挠度分别降低了7.9%、16.4%,车身加速度依次降低了24.0%、37.1%。

表3 仿真结果统计

类型	悬架动挠度/m			垂直加速度/(m/s ²)		
	最大值	最小值	方均根	最大值	最小值	方均根
参考被动悬架	0.040 8	-0.044 3	0.016 5	5.500 0	-5.473 0	1.878 0
滑模控制悬架	0.042 3	-0.039 3	0.015 2	4.942 0	-4.738 0	1.427 0
并联控制悬架	0.039 2	-0.033 9	0.013 8	3.887 0	-4.425 0	1.182 0

4 结语

本文搭建了天棚参考悬架模型以及半主动空气悬架模型,以C等级路面激励作为输入,验证半主动空气悬架在滑模控制以及并联控制策略下的效果。仿真结果显示:两种控制策略下动挠度分别减少了7.9%、16.4%,加速度分别减少了24.0%、37.1%。簧载质量位移的最大值与最小值控制中,后者比前者分别减小了23.5%、35.2%。由此证明所设计并联控制器相较于单独滑模控制更能提高车辆行驶时的平顺性以及舒适性。

参考文献:

- [1] JIANG L B, WANG D F, XIE D, et al. Buildup and simulation of a truck model with rear air suspension using leaf spring as guiding rod[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006(6): 13.
- [2] 肖磊,李国洪,李承亮. 车辆空气悬架的技术研究[J]. 专用汽车, 2023(9): 76-79.
- [3] 朱华. 电控空气悬架系统综述[J]. 汽车工程师, 2010(12): 19-21.
- [4] 付硕,许一虎,孙治博. 汽车空气悬架系统及精准控制技术综述[J]. 液压与气动, 2023, 47(4): 107-114.
- [5] 许敏. 新能源汽车电控技术的应用与发展[J]. 汽车与新动力, 2023, 6(6): 75-78.
- [6] 徐峰,荣兵. 半主动空气悬架的整车仿真分析及优化[J]. 汽车实用技术, 2024, 49(19): 61-67.
- [7] 金柏宇. 汽车平顺性实验分析[J]. 现代制造技术与装备, 2021, 57(8): 75-77.
- [8] 赵野. 某半主动空气悬架轻客的操稳性与平顺性研究[D]. 南京:南京理工大学, 2015.
- [9] 金传琦. 基于半主动悬架的车辆抗侧倾控制研究[J]. 江苏航运职业技术学院学报, 2022, 21(4): 38-43.
- [10] 李阳康,王睿,王磊,等. 电控空气半主动悬架控制策略分析[J]. 汽车实用技术, 2023, 48(15): 134-138.
- [11] 吕宝占,张如鑫. 模糊PID控制的半主动空气悬架系统仿真研究[J]. 机械设计与制造, 2024(12): 1-8.
- [12] 韩卫沙. 模糊滑模控制的研究及其在汽车半主动悬架上的应用[D]. 邯郸:河北工程大学, 2011.
- [13] 郑明军,张晓磊,吴文江. 半主动空气悬架的滑模变结构控制[J]. 机械设计与制造, 2015(1): 87-90.
- [14] 元艳玲,樊祺超,范英,等. 半主动空气悬架的非线性特性及控制算法研究[J]. 机械设计与制造, 2021(2): 153-156.
- [15] 班小强,覃桂全. 半主动空气悬架BP-PID控制器设计及其随机路面验证[J]. 机械制造与自动化, 2022, 51(3): 217-219, 235.

(下转第292页)

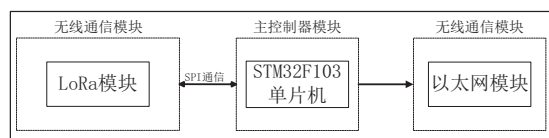


图 14 网关结构

7 结语

本文设计了一种输电线路防台风脱线保杆装置。该装置基于双弹簧机构,通过弹簧的弹力控制装置运转,以实现对高压线杆的保护。详细阐述了双弹簧定位机构、夹紧机构和防跳机构的工作原理和结构设计。通过理论计算、仿真分析和实验验证,证实了该装置在台风来临时可以自动脱落电线,保护高压线杆。同时,设计了基于传感器的远程监测系统,可及时反馈脱线信息,方便管理部门进行维修。该装置具有环境适应性强、实用性高的特点,可为电网线路抗风和灾后抢修提供重要支持。未来工作将进一步完善装置性能,优化监测系统,并进行现场试验,以促进该技术的应用和推广。

参考文献:

- [1] 程江洲,谢卓然,李欣,等. 海洋大气环境下输电塔线体系强风响应模拟分析[J]. 装备环境工程, 2025, 22(2): 52-61.
- [2] 罗俊平. 浅谈配网防风加强措施[J]. 南方电网技术, 2013, 7(3): 63-66.
- [3] 彭伟松. 台风登陆后对沿途电网线路破坏量预测研究[D]. 北京:华北电力大学, 2019.
- [4] 吴优,黄秀兵,王乃玉. 基于易损性分析的台风过程输电杆塔时变风险预测[J]. 自然灾害学报, 2025, 34(1): 137-146.
- [5] 梁树猷,冯志刚,程兴无,等. 影响淮河流域的台风统计特征分析[J]. 治淮, 2018(4): 13-16.
- [6] 张卓群,李静,秦玮,等. 138kV 输电线路连续倒塔原因分析[J]. 北京工业职业技术学院学报, 2016, 15(2): 18-22.

- [7] 耿贞伟,苏文伟,于凤荣,等. 基于 Ansys 的高压输电塔风振特性分析[J]. 电测与仪表, 2023, 60(2): 84-90.
- [8] 梁龙腾. 基于 TMD 的高压输电杆塔风振控制研究[D]. 长沙:长沙理工大学, 2016.
- [9] 田利,罗贤超,付朝阳,等. 基于倒塌延性的输电塔地震抗倒塌设计方法[J]. 振动·测试与诊断, 2024, 44(5): 916-921, 1037.
- [10] 张华恺,菅明健,张都清,等. 强对流天气下输电塔—线体系倒塌破坏与风雨组合系数研究[J]. 自然灾害学报, 2024, 33(3): 111-121.
- [11] 靳庆通,田利,刘俊才,等. 强风下输电塔破坏分析与加固研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2024, 54(5): 1133-1142.
- [12] 王贵奇,陈于思,马运阳,等. 一种防台风双弹簧定位输电线路脱线保杆装置: 中国, CN218976292U[P]. 2023-05-05.
- [13] 刘玉峰,吴海军,易戮. 台风阵风特性对配电线路电杆破坏受力分析[J]. 结构工程师, 2021, 37(6): 114-121.
- [14] 陈钧孚,郑寅,池小佳,等. 输电线路力学计算的作用[J]. 自动化应用, 2015(12): 125, 128.
- [15] 潘彩容. 10kV 军民输电线路电杆的受力分析[J]. 广东电力, 2008, 21(1): 47-49.
- [16] 肖元博,张林枫,张广玉,等. 架空输电线路荷载规范中导线风荷载的分析[J]. 电力勘测设计, 2024(2): 45-50.
- [17] 吴明祥,包建强,叶尹,等. 超强台风“桑美”引起温州电网输电线路事故的分析[J]. 电力建设, 2007, 28(9): 39-41.
- [18] 印华,方挺,董冲,等. 基于 LoRa 的低功耗温度采集传感器系统设计[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2024, 41(1): 53-59.
- [19] 周琦,王振华. 输电塔风致倒塌破坏研究进展[J]. 南方能源建设, 2024, 11(6): 59-68.
- [20] 顾志强,朱武,王光东. 基于 LoRa 和 NB-IOT 的远程温室监控系统的设计与应用[J]. 工业仪表与自动化装置, 2025(2): 48-53, 75.

收稿日期: 2024-03-26

(上接第 264 页)

- [16] 荆航,续彦芳. 基于改进人工蜂群算法优化的汽车主动悬架 PID 控制[J]. 机械制造与自动化, 2023, 52(5): 232-235.
- [17] 孙建民,王燕,赵国浩,等. 基于新型趋近律的半主动悬架模糊滑模控制[J]. 河北科技大学学报, 2023, 44(2): 123-131.
- [18] 朱茂源,朱洪林,刘小亚,等. 车身高度调节中的滑模控制神经网络消抖技术[J]. 中国测试, 2025,

51(6): 150-159.

- [19] 李刚,陈典锋,徐涵,等. 磁流变半主动空气悬架及复合控制策略研究进展[J]. 华东交通大学学报, 2023(6): 90-99.
- [20] 李彦阳. 汽车电控半主动空气悬架控制方法研究[D]. 长春:长春工业大学, 2018.

收稿日期: 2024-01-03