doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.10.021

阻力形式对坡面流流速修正系数的影响^{*}

赵春红 高建恩1.2 王 飞 张 通 张梦杰1

(1. 西北农林科技大学资源环境学院,陕西杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所,陕西杨凌 712100;3. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西杨凌 712100)

摘要: 坡面流平均流速是建立坡面土壤侵蚀过程模型的基础参数,主要通过示踪法测定的水流表层流速乘以修正 系数 α 获得,因此对 α 的合理取值是准确计算平均流速的关键。在收集和整理前人试验资料的基础上,利用室内 水槽冲刷试验,研究了不同阻力形式(颗粒阻力、输沙阻力、植被阻力)对坡面流流速修正系数的影响。结果表明: 坡面流流速修正系数随颗粒阻力、输沙阻力增加而减小,随植被阻力增加而增大,两者均可用幂函数表示;不同阻 力形式主要通过改变坡面流流速分布影响流速修正系数,颗粒阻力和输沙阻力主要使流速梯度变大,而植被阻力 主要使流速梯度变小。利用逐步回归分析给出了多种阻力形式作用下流速修正系数的预测公式,与实测值对比, 吻合较好。

关键词: 坡面流 阻力形式 流速修正系数 示踪法 预测 中图分类号: P333.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2013)10-0130-06

Effects of Resistance Forms on Velocity Correction Factor of Overland Flow

Zhao Chunhong¹ Gao Jian' en^{1,2} Wang Fei¹ Zhang Tong³ Zhang Mengjie¹

(1. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Soil and Water Conservation, China Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Mean flow velocity is one of the most important hydraulic variables in soil erosion modeling, which is normally estimated by multiplying surface velocity of flow with a correction factor (α). So a reasonable α value is imperative for precise estimation of mean flow velocity. The effects of grain resistance, transport resistance and vegetation resistance on correction factor α were investigated through indoor scouring experiment on the basis of the datasets collecting from the literature. The results showed that α decreased as grain resistance, transport resistance forms on α were mainly achieved by changing the velocity profile of overland flow. The grain resistance and transport resistance made the velocity profiles steeper, while the vegetation resistance made the velocity profiles gentler. The prediction equation of α under various forms of resistance was proposed by using stepwise regression analysis and the predicted values agreed well with the measured ones.

Key words: Overland flow Resistance form Velocity correction factor Tracing technique Prediction

引言

坡面流平均流速是坡面土壤侵蚀模型中最重要 的水动力学参数之一,且是计算其他水动力参数的 基础,直接关系到坡面水蚀的土壤分离、泥沙输移和 沉积过程,历来受到各国学者的重视^[1]。目前,测 量坡面流流速的方法主要有示踪法(染色剂、盐溶 液)^[2-3]和流量法等,还有一些以光学为基础并结合

* "十二五"国家科技支撑计划资助项目(2011BAD31B05)和国家科技重大专项资助项目(2009ZX07212-002-003-002)

收稿日期: 2013-04-03 修回日期: 2013-05-09

作者简介:赵春红,博士生,主要从事土壤侵蚀与坡面流水动力学研究,E-mail: zhaochunhong1987@163.com

通讯作者:高建恩,研究员,博士生导师,主要从事水土资源高效利用与保育研究,E-mail: gaojianen@126.com

自动化量测技术的方法,如热成像流速仪、Doppler 流速仪等,但这些精密仪器不仅价格昂贵、维护费用 高,而且对使用条件要求严格,多用于清水且水深较 大的水流^[4]。因此,示踪法仍是野外及室内研究土 壤侵蚀时测量坡面流流速最常用的方法。但示踪法 测量的流速是坡面流表层流速,要获得平均流速就 需要对示踪法测量的流速进行修正,即流速修正系 数 α,它表示坡面流平均流速与表层流速的比值。 国内外许多学者对 α 的取值和影响因素进行了相 关研究^[5-12]。

然而,不同研究者给出的α值差异很大,这对α 的合理取值造成了很大的困难。不同试验条件下坡 面流承受的阻力形式不同是造成α值差异大的一 个重要原因,目前专门进行这方面的研究很少。本 文在收集和整理以往研究资料的基础上,利用室 内水槽冲刷试验,研究不同阻力形式,即颗粒阻 力、输沙阻力和植被阻力对坡面流流速修正系数 α 的影响,并给出多种阻力形式作用下的 α 值预测 公式,以期为揭示阻力特征对坡面流示踪法流速 修正系数的影响机理和平均流速的准确计算提供 理论支撑。

1 材料与方法

根据本文的研究内容,所需数据资料主要通过 两种方式获得。颗粒阻力和输沙阻力对流速修正系 数α值的影响主要通过收集、整理和分析以往的试 验资料完成,而植被阻力对α值的影响由于目前研 究较少,其数据资料主要通过专门的试验获得。在 收集和整理以往试验数据时,为消除坡度、床面变 形、水流型态等因素对结果造成的影响,所选择的数 据均满足一定条件,具体要求见下文分析。收集数 据基本概况如表1所示。

	表1 收集数据及试验数据概况				
Tab. 1	Overview of	literature	datasets and	experimental	dat

资料来源	中值粒径	坡度	单宽流量	水深	含沙量	雷诺数	修正系数	组数	
	d_{50}/mm	J∕(°)	$q/m^2 \cdot s^{-1}$	h/mm	$S/kg \cdot m^{-3}$	Re	α		
文	献[8]	0.4 0.67	1.2	$(1.00 \sim 6.00) \times 10^{-5}$	0.84 ~1.33	0	26 ~ 102	0.56~0.61	8
文	献[9]	0.74	3.5,5.5	$(0.13 \sim 1.46) \times 10^{-3}$	2.37~5.79	0	295 ~3 188	0.33~0.86	71
文	献[11]	0.28	$5 \sim 20$	$(0.66 \sim 5.26) \times 10^{-3}$	1.88 ~6.36	$0 \sim 1 \ 000$	$320 \sim 5\ 000$	$0.23 \sim 0.78$	42
文	献[13]	0.74	2.7	$(0.64 \sim 1.44) \times 10^{-3}$	4.50~7.00	$0 \sim 40$	1 600 ~ 3 500	$0.64 \sim 0.80$	15
本	文	0.012	9	$(1.00 \sim 3.00) \times 10^{-3}$	2.82 ~10.54	$0 \sim 150$	780 ~3 800	0.34 ~0.86	120

1.1 试验材料及测定方法

利用室内水槽放水试验专门研究了植被阻力对 α的影响。试验在中科院水利部水土保持研究所黄 土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室人工降 雨大厅进行。试验水槽长 8.0 m, 宽 0.5 m, 槽壁为 有机玻璃板,槽底为铝塑板。共设置4种不同下垫 面,其中3种为人工加糙坡面,设有大尺度糙度源, 用来模拟植被阻力对水流的影响,另外一种为光滑 坡面,作为对照坡面(图1)。人工加糙坡面就是分 别利用3种不同管径的 PVC 管材来模拟地表不同 植被茎干,管材直径 D 分别为 2.0、3.2 和 4.0 cm。 将不同直径的 PVC 管材截成长度为 20 cm 的短管 作为不同的植被糙度单元,保证每种糙度单元都能 突出水面。利用同等直径的打孔器在槽底打出排列 均匀的孔,然后用 PVC 管材专用胶将与孔同等直径 的糙度源粘于床面,并保证床面不发生漏水现象。 植被糙度源在床面上呈梅花形排列,排列密度为 136 个/m²,4 种下垫面的糙度源覆盖度在 0~0.17 之间变化。

为充分模拟野外实际坡面流,水槽上方来水为 含沙水流,水流通过浑水输送装置供应。试验用沙



图 1 4 种不同下垫面 Fig. 1 Four underlaying surfaces

(a) 光滑坡面 (b) D = 2.0 cm (c) D = 3.2 cm (d) D = 4.0 cm

为黄土高原典型的武功黄土,中值粒径 0.012 mm, 干密度 2.6 g/cm³。试验坡度为 9°,放水流量分别为 5×10⁻⁴、7.5×10⁻⁴、1.0×10⁻³、1.25×10⁻³和 1.5×10⁻³m³/s(即单宽流量 q分别为 1.0×10⁻³、 1.5×10⁻³、2.0×10⁻³、2.5×10⁻³和 3.0×10⁻³m²/s), 含沙量 S 分别为 0、30、60、90、120、150 kg/m³。试验 采用完全组合,共进行 120 组试验。

每次试验开始前,首先率定流量,保证每次流量 均在设计数值允许范围内。待坡面水流稳定后,开 始测定水流表层流速及深度。沿水槽纵向将坡面每 隔1m分成8等分,从坡顶自上而下依次洗择3~4、 4~5、5~6、6~7和7~8m5个断面作为观测断面, 每个观测断面沿横向每隔10 cm 平分成5 等分4 个 测点。表层流速采用染色示踪法测定,3次重复。 水深采用重庆水文仪器厂生产的数显测针测定,测 定精度为0.01 mm。测定位置选择在沿水槽从上到 下 3.5、4.5、5.5、6.5 和 7.5 m 处,仍重复 3 次。多 次测量数据的平均值作为表层流速、水深测量值。 试验过程中,每2min收集一次径流泥沙过程样,并 利用温度计测定水流的温度来计算水流粘滞系数。 试验结束后,量取浑水水样体积,并静止水样5h,把 水样上部的清水倒掉,剩下的沙样放入干燥箱干燥 后称量,以水槽出口处实测含沙量为水流实际含沙 浓度。试验历时15 min 左右。

1.2 数据分析

流速修正系数计算式为

$$\alpha = v/v_s \tag{1}$$

v----坡面流平均流速,m/s

h——水深,m

根据 Hirsch 等^[14-15]的研究结果,坡面流植被 阻力主要与植被糙度源覆盖度 C 和分布密度 e 两个 参数有关。糙度源覆盖度 C 为单位面积床面上糙 度源的垂直投影面积;糙度源分布密度 e 为单位面 积床面上糙度源的等效分布密度,为无量纲参数,两 个参数的计算公式分别为

$$C = NA'/A \tag{3}$$

$$e = NA''/A \tag{4}$$

式中 A---床面面积,m²

N——床面面积 A 范围内糙度源数目

A'——单个糙度源在床面上的投影面积,m²

A"——糙度源与水流垂直方向迎水面的投影 面积,m²

含沙水流雷诺数 Re 计算式为

$$Re = \frac{vh}{v_m} \tag{5}$$

式中 v_m——浑水运动粘滞系数,m²/s

根据试验泥沙情况, v_m选用沙玉清公式计算^[16]

$$v_{m} = \frac{v}{1 - \frac{S_{v}}{2\sqrt{d_{50}}}}$$
(6)

其中
$$v = 0.01775/(1+0.0337t+0.000221t^2)$$
 (7)

$$f = \frac{8ghJ}{v^2} \tag{8}$$

式中 g----重力加速度,取9.8 m/s²

J——水流能坡,采用坡面比降近似代替 试验数据统计情况如表1所示。

2 结果与分析

2.1 颗粒阻力对流速修正系数的影响

颗粒阻力是指由高度小于 10 倍水流粘性底层 厚度的土壤颗粒或微团聚体引起的阻力^[17],它与坡 面水流条件、土壤颗粒粒径等因素均有关系。图 2 显示了不同试验条件下水流颗粒阻力对坡面流 α 值的影响。为消除其他因素对 α 值的影响,保证水 流所受的阻力仅为颗粒阻力,图 2 中选择比较的试 验数据均满足:水流均为清水;水槽均为定床粘砂; 水槽坡度相同。由图可知,颗粒阻力越大,α 值越 小,两者呈极显著幂函数关系。造成这种现象的原 因是:坡面颗粒阻力越大,对底部水流的阻碍作用也 越大,进而引起坡面流底部流速大大减小,而水流顶 部的流速受颗粒阻力影响较小,故颗粒阻力越大,流 速梯度越陡,流速分布越不均匀,α 值越小。



图 2 不同试验条件下颗粒阻力对 α 的影响

Fig. 2 Effect of grain resistance on α under different experimental conditions

(a) 文献[9] 数据 (b) 文献[11] 数据

Dunkerley^[8]测量了层流条件下清水流经不同 粒径粘沙床面时的α值,得出床面粘沙中值粒径为 0.67 mm 时水流平均α值为0.568,中值粒径为 0.4 mm时α值平均为0.585,两者均大于Li等^[9]给 出的层流下粒径为0.74 mm 时平均α值0.37,小于

133

Horton 等^[5]给出的层流时光滑壁面的理论流速修正 系数 α = 0.67,表明颗粒粒径越大,α 值越小,进一 步证实了上述结果,即α 值随颗粒阻力增大而减 小。这与 Ali 等^[12]研究不同泥沙颗粒粒径对坡面流 平均流速影响的结果恰好相反,这主要由试验条件 不一致造成的。Ali 等的试验是在动床条件下进行 的,坡面流阻力不仅包括颗粒阻力,还包括了输沙阻 力、沙波、细沟等形态阻力,因此得出的流速修正系 数随泥沙粒径增大而增大并不是颗粒阻力单因素作 用的结果,而是多种阻力形式下的综合体现。

2.2 输沙阻力对流速修正系数的影响

输沙阻力是指坡面流由于挟带泥沙而引起的阻 力^[16],它与水流中泥沙的含量有直接关系。图3显 示了不同试验条件下输沙阻力对α值的影响。为 分离出输沙阻力对α值的影响,图3中选择比较的 试验数据均满足:水槽为定床粘沙;坡度、流量相同; 床面糙度相同,即颗粒阻力相同,水流阻力的变化仅 为输沙阻力的变化。由图3可知,3种试验条件下, 流速修正系数α值与输沙阻力均呈负相关关系,两 者定量关系基本可以用极显著的幂函数表示。造成这 种结果的原因主要是:水流中由于泥沙颗粒的存在,其 粘滞性大大增加,水流流速分布发生改变,随含沙量的 增加,流速梯度变陡,流速分布也变得越不均匀,导致α 值随之减小^[9,16],同时随含沙量的增加,输沙阻力也增







(a) 文献[13]数据 (b) 文献[11]数据 (c) 本文试验数据

加^[16~17],故α值随输沙阻力增加而减小。

2.3 植被阻力对流速修正系数的影响

植被阻力统指地表由于植被、砾石等较大尺度 被作用的坡面,植被阻力在坡面流所受不同阻力形 式中往往占主导地位,其在一定程度上包含了形态 阻力和波阻力的范畴^[18]。为消除其他因素的影响, 保证水流 α 值的变化仅为植被阻力引起的,选择比 较的试验数据均满足:水槽为定床;坡度、流量相同; 床面糙度、含沙量相同,即颗粒阻力和输沙阻力相 同,水流阻力的变化主要为植被阻力的变化。图4 显示了不同流量条件下植被阻力与流速修正系数 α 值的关系,由图可知,5种流量条件下,随植被阻力 的增加,流速修正系数 α 值均呈极显著幂函数趋势 增加,两者存在正相关关系。这也主要与坡面流流 速梯度变化有关。当坡面上存在植被等较大尺度糙 度源时,水流的植被阻力就大大增加,根据以往研究 结果^[19-21],植被阻力越大,流速梯度越小,流速分布 越均匀,故α值也越大。

2.4 流速修正系数预测公式建立

目前,流速修正系数的预测公式主要包括以下 3种:Dunkerley^[8]利用染色示踪法研究了不同粗糙 床面下α值的变化情况,发现α值与水流的平均水 深存在良好的幂函数关系,其表达式为

$$\alpha = 0.587h^{-0.165} \tag{9}$$

Li 等^[7]回归了 α 值与坡度 J、雷诺数 Re 的关系

 $\alpha = -0.251 - 0.327 \lg J + 0.114 \lg Re \quad (10)$

Zhang 等^[11]在总结前人研究的基础上,引入了 含沙量对 α 值的影响,得出

 $\alpha = -0.551 - 0.141 \lg J + 0.279 \lg Re -$

$$0.056 \lg(Q_s + 0.001) \tag{11}$$

式中 Q_s ——单宽输沙量,kg/(m·s)

利用本文收集到的资料及试验数据对式(9)~ (11)进行了验证,结果如图 5a~5c 所示,并利用决 定系数 R^2 、偏差(计算值与实测值的比)及纳什系数 NSE 3 个统计参数对上述公式的预测结果进行了进 一步评价,如表 2 所示。其中,式(9)~(11)处于 0.75~1.25 范围内的偏差分别占总偏差个数的 48.8%、51.6%和72.4%。图5和表2表明,利用单 个因素预测 α 值是远远不够的,如 Dunkerley 公式; Li 公式在 α 小于 0.45 时,计算值与实测值符合较 好,一旦 α 大于 0.45,计算值偏小;Zhang 公式与其 他两个公式相比,计算结果相对较好,但 Zhang 计算 的 α 值与实测值相比整体偏小。故上述 3 个公式在 预测多种阻力形式作用下的流速修正系数 α 值时 是不适用的。





(a)
$$q = 1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$
 (b) $q = 1.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
(c) $q = 2.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (d) $q = 2.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
(e) $q = 3.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$

无降雨条件下,坡面流流速修正系数主要受颗 粒阻力、输沙阻力及植被阻力的影响,表征上述阻力 形式的参数主要包括泥沙中值粒径 d₅₀、雷诺数 Re、 坡度 J、体积含沙量 S。、植被糙度源覆盖度 C 及糙度



Fig. 5 Comparison of calculated α and measured ones through different prediction equations

(a) 式(9) (b) 式(10) (c) 式(11) (d) 式(12)

源分布密度 *e*,利用逐步回归方法建立了 α 与上述 参数的表达式,为

 $\alpha = -0.617 - 0.340 \lg J + 0.294 \lg Re +$

 $0.048 \lg(C + 0.001) - 0.049 \lg(S_v + 0.001)$ (12)

利用式(12)计算的 α 值与实测值对比关系如 图 5d 和表 2 所示,计算值与实测值符合较好,表明 式(12)可以用于复杂水流条件下的 α 值预测。值 得指出的是,式(12)没有考虑降雨的影响,这需要 进一步深入研究。 表 2 各公式计算的 α 值与实测值对比的统计分析 Tab. 2 Statistical analysis between calculated α and measured ones through different prediction equations

公式	决定 系数 R ²	偏差范围	纳什系数 NSE	资料数
式(9)	0.003	0.46~2.25	- 0. 802	256
式(10)	0.439	0.55~1.46	- 0. 305	256
式(11)	0.584	0.44 ~1.51	0.446	256
式(12)	0.764	0.55~1.50	0.764	256

3 结论

(1)在收集和整理前人试验资料的基础上,利

用室内水槽冲刷试验,研究了颗粒阻力、输沙阻力和 植被阻力对坡面流流速修正系数α值的影响。

(2)α值随颗粒阻力和输沙阻力的增大均呈极显著幂函数减小趋势,颗粒阻力和输沙阻力主要通过使坡面流流速梯度变大影响α值。

(3)α值随植被阻力的增大呈极显著幂函数增 大趋势,植被阻力主要通过使坡面流流速梯度变小 影响α值。

(4)利用逐步回归分析方法给出了不同阻力形 式作用下 α 值的预测公式,与实测值对比,符合较 好。公式表明雷诺数 Re、坡面坡度、植被糙度源覆 盖度和含沙量是影响 α 值的主要因素。

参考文献

- 1 张宽地,王光谦,吕宏兴,等. 模拟降雨条件下坡面流水动力学特性研究[J]. 水科学进展,2012,23(2):229~235. Zhang Kuandi, Wang Guangqian, Lü Hongxing, et al. Experimental study of shallow flow hydraulics on a hillslope under artificial rainfall conditions[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(2):229~235. (in Chinese)
- 2 肖培青,姚文艺,申震洲,等. 苜蓿草地侵蚀产沙过程及其水动力学机理试验研究[J]. 水利学报,2011,42(2):232~237.
- Xiao Peiqing, Yao Wenyi, Shen Zhenzhou, et al. Experimental study on erosion process and hydrodynamics mechanism of alfalfa grassland[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(2): 232 ~237. (in Chinese)
- 3 董月群,雷廷武,张晴雯,等.集中水流冲刷条件下浅沟径流流速特征研究[J].农业机械学报,2013,44(5):96~100. Dong Yuequn, Lei Tingwu, Zhang Qingwen, et al. Ephemeral gully flow velocity under concentrated water flow[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5):96~100. (in Chinese)
- 4 罗榕婷,张光辉,曹颖. 坡面含沙水流水动力学特征研究进展[J]. 地理科学进展,2009,28(4):567~574. Luo Rongting, Zhang Guanghui, Cao Ying. Progress in the research of hydrodynamic characteristics of sediment-laden overland flow[J]. Progress in Geography, 2009, 28(4): 567~574. (in Chinese)
- 5 Horton R E, Leach H R, Vliet V R. Laminar sheet flow [J]. Transactions of the American Geophysical Union, 1934, 15(2): 393 ~ 404.
- 6 Emmett W W. The hydraulics of overland flow on hillslope [M] // US Geological Survey Professional Paper, Washington: US Governent Printing Office, 1970, 18: 662 ~ 668.
- 7 Li G, Abrahams A D, Atkinson J F. Correction factors in the determination of mean velocity of overland flow [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1996, 21(6): 509 ~ 515.
- 8 Dunkerley D. Estimating the mean speed of laminar overland flow using dye injection-uncertainty on rough surfaces [J]. Earth Surface Process and Landforms, 2001, 26(4): 363 ~ 374.
- 9 Li G, Abrahams A D. Effect of saltating sediment load on the determination of the mean velocity of overland flow [J]. Water Resource Research, 1997, 33(2): 341 ~ 347.
- 10 夏卫生, 雷廷武, 赵军. 泥沙含量对盐液示踪法经验系数影响的研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(4): 97~100.
 Xia Weisheng, Lei Tingwu, Zhao Jun. Research of empirical coefficient of salt tracer method affected by sediment [J].
 Transactions of the CSAE, 2003, 19(4): 97~100. (in Chinese)
- 11 Zhang G H, Luo R T, Cao Y, et al. Correction factor to dye-measured flow velocity under varying water and sediment discharges [J]. Journal of Hydrology, 2010, 389(1 ~ 2): 205 ~ 213.
- 12 Ali M, Sterk G, Seeger M, et al. Effect of flow discharge and median grain size on mean flow velocity under overland flow [J]. Journal of Hydrology, 2012, 452 ~ 453: 150 ~ 160.
- 13 Abrahams A D, Li G. Effect of saltating sediment on flow resistance and bed roughness in overland flow [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1998, 23(10): 953 ~ 960.
- 14 Hirsch P J. Hydraulic resistance to overland flow on semiarid hillslopes: a physical simulation [D]. Buffalo: State University of New York, 1996.
- 15 Petryk S, Bosmajian G. Analysis of flow through vegetation [J]. Journal of the Hydraulics Division, 1975, 101(7): 871 ~ 884.
- 16 沙玉清. 泥沙运动学引论[M]. 北京:中国工业出版社, 1965.
- 17 Zhang G H, Shen R C, Luo R T, et al. Effects of sediment load on hydraulics of overland flow on steep slopes [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010, 35(15): 1811 ~ 1819.
- 18 刘清泉,李家春,陈力,等. 坡面流及土壤侵蚀动力学-坡面流[J]. 力学进展,2004,34(3): 360~372.
 Liu Qingquan, Li Jiachun, Chen Li, et al. Dynamics of overland flow and soil erosion-overland flow [J]. Advances in Mechanics, 2004, 34(3): 360~372. (in Chinese)

型更加贴近实际。

(2)分析了转向系动态参数对其非线性振动特性的影响规律,特别是模型中包含的双间隙对系统振动特性的影响以及横拉杆刚度、阻尼,转向器的啮合刚度、阻尼等对系统振动特性的影响。指出了转向系动态设计时应该注意的重要问题,为摆振的综合动态设计提供了重要的理论依据。

(3)研究了系统以转向器齿条与横拉杆间的夹 角为分岔参数的分岔行为,结果表明转向系的振动 不仅和系统的动态参数有关,还与转向器齿条和横 拉杆的安装位置有关,安装位置和动态参数匹配不 合理会导致轿车转向系周期运动失稳,严重影响车 辆的行驶稳定性,设计时应综合加以考虑。

参考文献

- 魏道高,蒋艮生. 主销后倾角对独立悬架汽车自激摆振极限环特性的影响[J]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 5~10.
 Wei Daogao, Jiang Gensheng. Effect of caster angle on multiple limit cycles in independent suspension shimmy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 5~10. (in Chinese)
- 2 王威,宋玉玲. 薛彦冰. 高速下轿车转向系非线性振动的分岔特性研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(9): 103~110. Wang Wei, Song Yuling, Xue Yanbing. Bifurcation characteristics on nonlinear vibration of a car's steering system when it runs at a high speed[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(9): 103~110. (in Chinese)
- 3 Wang W, Song Y. Nonlinear vibration semi-active control of automotive steering using magneto-rheological damper [J]. Meccanica, 2012, 47(8): 2 027 ~ 2 039.
- 4 Kovacs A P. Computational vibration analysis of vehicle shimmy by a power-work method [J]. Vehicle System Dynamics, 1998, 29(6): 341 ~ 364.
- 5 Kimura T, Hanmura Y, Takata H, et al. Analysis of steering shimmy accompanied by sprung mass vibration on light duty truck-fundamental mechanism [J]. JSAE Review, 1996, 17(3): 301 ~ 306.
- 6 Kageyama I, Emoto K. Shimmy phenomenon on steering system of two-wheeled vehicle [J]. Tansactions of the Japan Society of Mechanical Engineers: C, 1995, 61(582): 565 ~ 571.
- 7 Jan M, Anders H, Torsten L. Two types of limit cycles of a resonant converter modelled by a three-dimensional systems [J]. Nonlinear Analysis: Hybrid Systems, 2008, 2(4): 1275 ~ 1286.
- 8 Olivier A B, Jesus R. Simulation of wheels in nonlinear flexible multi-body systems [J]. Multi-body System Dynamics, 2002, 7(4): 407 ~ 438.
- 9 John L. Damper stops wheel wobble [J]. Design News, 2001(9): 55 ~ 62.
- 10 李胜,林逸. 非独立悬架汽车转向轮自激型摆振的分岔特性分析[J]. 机械工程学报,2004,40(12):187~191.
 Li Sheng, Lin Yi. Study on the bifurcation character of steering wheel self-excited shimmy of motor vehicle with dependent suspension[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2004, 40(12):187~191. (in Chinese)
- 11 张琪昌,陈予恕. 汽车转向轮摆振的稳定性和分叉特性[J]. 天津大学学报,1995,28(3):409~414. Zhang Qichang, Chen Yushu. Studying the stability and bifurcation character of automobile shimmy[J]. Transactions of Tianjin University, 1995, 28(3): 409~414. (in Chinese)
- 12 王望予,吕振华,姜红军. 微型汽车独立悬架转向轮摆振及其阻尼控制初步研究[J]. 中国公路学报,1993,6(4):72~78. Wang Wangyu, Lü Zhenhua, Jiang Hongjun. Independently sprung front wheel shimmy and its reduction of a light duty truck[J]. China Journal of Highway and Transport, 1993, 6(4):72~78. (in Chinese)
- 13 宋健,钱珠声,管迪华.独立悬架汽车摆振的研究[J].汽车技术,1996(1):1~6.
 Song Jian, Qian Zhusheng, Guan Dihua. Shimmy study on independent suspension automobile [J]. Automobile Technology, 1996(1):1~6. (in Chinese)
- 14 李胜,林逸. 汽车转向轮摆振分岔特性的数值仿真[J]. 吉林大学学报:工学版,2005,35(1):7~11. Li Sheng, Lin Yi. Numerical analysis of bifurcation character of steering shimmy[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition,2005, 35(1):7~11. (in Chinese)
- 15 贺丽娟. 汽车前轮摆振的仿真计算研究[D]. 天津:河北工业大学,2004.
 He Lijuan. A simulation calculation research on front wheel shimmy for automobile[D]. Tianjin: Hebei Institute of Techonology, 2004. (in Chinese)

(上接第135页)

- 19 Nepf H M, Vivoni E R. Flow structure in depth-limited, vegetated flow[J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105(C12): 547 ~ 557.
- 20 Luhar M, Rominger J, Nepf H. Interaction between flow, transport and vegetation spatial structure [J]. Environ. Fluid Mech., 2008, 8(5~6): 423~439.
- 21 Nepf H M. Hydrodynamics of vegetated channels [J]. Journal of Hydraulic Research, 2012, 50(3): 262 ~ 279.