

文章编号:1671-8879(2015)05-0153-06

摊铺机自动调平熨平板运动学模型与特性

刘洪海, 谢王宝, 郝玉飞

(长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘 要:为了研究摊铺机的摊铺特性,提高摊铺平整度和弯道变坡控制精度,通过对配置自动调平系统摊铺机工作装置的作业机理和运动学分析,建立了摊铺机熨平板的运动学模型,确定了自动调平系统传感器安装位置、摊铺机作业速度、地面输入激励函数与熨平板输出响应之间的关系;采用正弦函数和阶跃函数分别模拟路面平整度激励和弯道变坡输入激励,建立了输出响应模型,应用 Matlab 软件在常用摊铺速度下进行了仿真研究。研究结果表明:调平系统传感器与熨平板后沿的安装距离越近,熨平板的随动性越好,变坡响应越快;安装距离越远,滤波效果越好,平整度越高;传感器的安装位置应在熨平板大臂的 $1/4 \sim 1/2$ 之间,变坡控制要求高时取小值,平整度控制要求高时取大值,进行综合控制时取中间值。

关键词:机械工程;摊铺机;熨平板;自动调平系统;运动学模型

中图分类号:U411.75

文献标志码:A

Kinematic model and characteristics of automatic leveling screed plate on paver

LIU Hong-hai, XIE Wang-bao, HAO Yu-fei

(Key Laboratory of Road Construction Technology and Equipment of the Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the paving characteristics of paver, and improve paving smoothness and variable slope curve precision control of paver, this paper established kinematic model of paver screed and determined the installed position of automatic leveling system sensor, paver operating speed, and the relationship between ground input excitation function and output response screed through analysing operating mechanism and kinematic characteristics of configure paver working device in automatic leveling system. This paper used sine function and step function to simulate pavement roughness excitation and input variable slope curve excitation respectively. It also established the output response model, and carried on a simulation study in common paving speed by use of Matlab. The results show that the closer the installed distance between leveling system sensors and screed trailing edge is, the better the screed trackability is, and the faster the variable slope response is. Furthermore, the farther the installed distance between leveling system sensors and screed trailing edge is, the better filtering effect it has and the higher the flatness is. Sensor should be installed in the position between $1/4$ and $1/2$ of the

收稿日期:2015-04-08

基金项目:国家十二五科技支撑项目(2011BAE28B03);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2014G3252006)

作者简介:刘洪海(1963-),男,陕西西安人,教授,博士研究生导师,E-mail:liuhonghai@chd.edu.cn。

screed plate arm. It requires taking a small value when the variable slope control requirement is high, taking a great value when flatness control requirement is high, and taking the middle value when integrated control is needed. 6 figs, 16 refs.

Key words: mechanical engineering; paver; screed; automatic leveling system; kinematic model

0 引言

在沥青路面施工中,摊铺机将混合料进行摊铺、整形,得到具有一定几何形状的铺层^[1]。为了提高路面横、纵坡度控制精度和平整度,国内外许多学者和制造厂家对摊铺机的结构和使用性能进行了大量研究。美国 Barber-Greene 公司改进了沥青混合料摊铺机的结构,采用刮板摊铺混合料,浮动熨平板作为工作装置,在摊铺机熨平板上装备了自动调平系统控制平整度和坡度^[2-3]。孙祖望等对沥青路面平整度的传递规律进行了理论分析和试验研究,指出下承层平整度和摊铺机的摊铺平整度对成型路面平整度有重要影响^[4-8];孙庆丰等研究了沥青摊铺机调平基准的类型与工作特性之间的关系^[9-10];Carol 介绍了数字控制阀应用在自动调平系统的研究进展和数字调平系统的性能^[11]。以前的研究更多地集中在对设备结构、调平系统的组成及平整度传递规律等方面,张新荣指出为了更准确的描述沥青路面摊铺机的摊铺特性,需要对路面激励和自动调平系统的联合工作特性进行深入研究^[12]。

为此,本文在已有研究成果的基础上,通过对摊铺机熨平板的工作机理和运动学分析,建立装备自动调平系统的熨平板与路面激励函数的共同工作运动学模型,并分析其在摊铺过程中对典型输入激励函数作用下的输出响应特性,确定摊铺平整度和变坡控制的最佳参数。

1 建立自动调平熨平板运动学模型

现代摊铺机主要由牵引车和自动调平熨平板两部分组成,如图 1 所示。自动调平熨平板的工作原理:通过传感器检测摊铺层实际标高与基准值之间的偏差,转变成电信号送入控制器。控制器根据偏差的大小和方向,经过转换后送出功率信号驱动电磁阀调节调平液压缸上下油腔的油路通断,使熨平板牵引点进行相应的运动,改变铺层厚度,实现对平整度和横坡的控制。由于摊铺机的熨平板采用浮动原理进行工作,控制信号与执行机构之间存在滞后性,这种滞后性决定了摊铺厚度变化在距离上滞后于调节信号。而且这种滞后性与调节信号的作用

点、输入信号类型等因素有密切关系,在进行变坡摊铺和摊铺平整度控制时会产生一定的误差。变坡误差较大时,会对车辆行驶稳定性产生影响,给行车安全带来隐患;摊铺平整度误差较大时,会影响行车平顺性和乘坐舒适性。



图 1 带自动调平熨平板的摊铺机

Fig. 1 Paver with automatic-leveling screed plate

为了对摊铺机熨平板进行运动学分析,建立自动调平熨平板运动学模型,需作如下假设:①稳定作业时摊铺机匀速运行,熨平板的受力处于平衡状态;②工作装置自动调平系统的控制器灵敏度足够高(死区很小),能及时准确地跟随输入信号的变化。

将摊铺机熨平板的空间几何关系放入坐标系中,如下页图 2 所示, A 点为熨平板后沿,其坐标为 (x_A, y_A) ; B 点为调平传感器安装位置,其坐标为 (x_B, y_B) ; C 点为大臂牵引点,其坐标为 (x_C, y_C) 。摊铺作业时, A 点的位移在 X 轴上的投影为 dx_A ,在 Y 轴上的投影为 dy_A ; B 点的位移在 X 轴上的投影为 dx_B ,在 Y 轴上的投影为 dy_B 。设 AB 连线与 X 轴的夹角为 α ,在进行运动学分析时,仅涉及运动参数之间的关系,不考虑力对运动的影响。由杆件不可伸缩原理可得 A 点和 B 点的位移在 AB 连线上的投影相等,见式(1)和式(2)

$$\frac{dy_A}{\sin(\alpha)} = \frac{dx_B}{\cos(\alpha)} \quad (1)$$

$$\frac{dy_A}{dx_B} = \frac{\sin(\alpha)}{\cos(\alpha)} = \tan(\alpha) = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} = \frac{y_B - y_A}{KL \cos(\gamma)}$$

$$dy_A = \frac{dx_B}{KL \cos(\gamma)} (y_B - y_A) \quad (2)$$

式中: dy_A 为 A 点在 Y 轴上的位移增量; dx_B 为 B 点在 X 轴上的位移增量; L 为浮动熨平板大臂长度(A 点与 C 点之间的距离); K 为调平传感器安装位

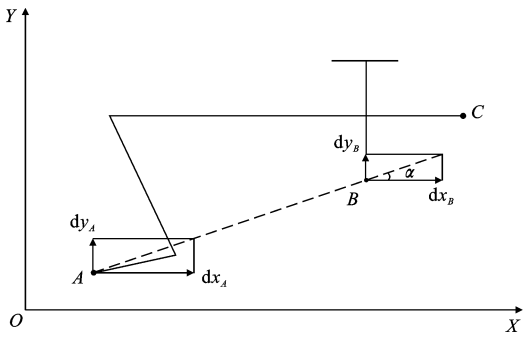


图 2 熨平板运动分析示意

Fig. 2 Kinematic analysis of screed plate

置到浮动熨平板后沿的距离与大臂长度的比值(即 AB/AC),取值范围 $0 \sim 1$; γ 为浮动熨平板大臂与地面之间的夹角。

式(2)两边同除以时间增量 dt 得

$$\dot{y}_A + \frac{V}{KL \cos(\gamma)} y_A - \frac{V}{KL \cos(\gamma)} y_B = 0 \quad (3)$$

式(3)的通解为

$$y_A = e^{-\frac{Vt}{KL \cos(\gamma)}} \left[\frac{V}{KL \cos(\gamma)} \int_0^t y_B \cdot e^{\frac{Vt}{KL \cos(\gamma)}} dt + c \right] \quad (4)$$

式(4)为摊铺机自动调平熨平板的运动学模型,它表明了调平传感器的安装位置 K ,摊铺机的作业速度 V ,输入函数类型 y_B 等参数与输出 y_A 之间的关系。式中浮动熨平板大臂长度 L 为常数,在稳定摊铺过程中夹角 γ 也基本保持不变。

由式(4)可见,在稳定摊铺过程中熨平板的输出主要决定于输入函数和调平传感器安装位置,施工过程中调平系统典型的输入信号有 2 种模式,即下承层平整度的变化历程和摊铺厚度调节过程。可以用相应的函数对以上输入信号进行模拟:一是正弦函数,模拟下承层平整度变化;二是阶跃函数,模拟摊铺厚度调节。

2 正弦函数激励下的自动调平熨平板输出响应

在摊铺作业过程中,控制铺层平整度时,无论以下承层还是以拉线作为自动调平传感器的基准,输入激励都可以用正弦信号进行模拟。因此,将正弦函数作为自动调平系统的一种典型输入激励。设正弦函数为 $y_B = A \sin(\omega t)$,其中 A 为正弦函数的振幅(mm), ω 为信号变化角速度(rad/min), t 为摊铺时间(min)。将其代入熨平板运动学方程式(4)中得式(5),经过运算得式(6)

$$y_A = e^{-\frac{Vt}{KL \cos(\gamma)}} \left[\frac{V}{KL \cos(\gamma)} \int_0^t e^{\frac{Vt}{KL \cos(\gamma)}} \cdot A \sin(\omega t) dt + c \right] \quad (5)$$

计算后得

$$y_A = e^{-\frac{Vt}{KL \cos(\gamma)}} \left\{ \frac{AV}{KL \cos(\gamma)} \left[\frac{e^{Vt/KL \cos(\gamma)}}{(V/(KL \cos(\gamma)))^2} \cdot \left(\frac{V}{KL \cos(\gamma)} \sin(\omega t) - \omega \cos(\omega t) \right) \right]_0^t + c \right\}$$

令

$$\frac{V}{KL \cos(\gamma)} = A_1 \cos(\varphi), \omega = A_1 \sin(\varphi)$$

则

$$\frac{V}{KL \cos(\gamma)} \sin(\omega t) - \omega \cos(\omega t) = A_1 \sin(\omega t - \varphi)$$

$$\text{式中: } A_1 = \sqrt{\left(\frac{V}{KL \cos(\gamma)} \right)^2 + \omega^2};$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{KL \omega \cos(\gamma)}{V} \right).$$

$$\text{可得 } y_A = e^{-\frac{Vt}{KL \cos(\gamma)}} \left\{ \frac{AV}{KL \cos(\gamma)} \left[\frac{e^{Vt/KL \cos(\gamma)}}{(V/(KL \cos(\gamma)))^2} \cdot A_1 \sin(\omega t - \varphi) \right]_0^t + c \right\} =$$

$$\frac{A}{\sqrt{1 + (KL \omega \cos(\gamma)/V)^2}} \left[\sin(\omega t - \varphi) - e^{-\frac{Vt}{KL \cos(\gamma)}} \sin(\varphi) \right] + c e^{-\frac{Vt}{KL \cos(\gamma)}} \quad (6)$$

考虑初始条件 $t=0$ 时, $\Delta y_A = 0$, 则式(6)积分常数 $c=0$ 。因此,式(6)的特解为式(7)。式中括号内第 1 项为稳态分量,第 2 项为瞬态分量。

$$y_A = \frac{A}{\sqrt{1 + (KL \omega \cos(\gamma)/V)^2}} \left[\sin(\omega t - \varphi) - e^{-\frac{Vt}{KL \cos(\gamma)}} \sin(\varphi) \right] \quad (7)$$

在正弦激励下自动调平熨平板的稳态响应为

$$y_A = \frac{A}{\sqrt{1 + (KL \omega \cos(\gamma)/V)^2}} \left[\sin(\omega t - \varphi) \right] \quad (8)$$

由式(8)可以看出:自动调平熨平板的正弦响应仍然是正弦函数,在相位上滞后一个 φ 角。该正弦函数的振幅有一定衰减,衰减程度决定于熨平板结构参数和工作参数。对于成型摊铺机而言,熨平板大臂长度在 X 轴的投影 $L \cos(\gamma)$ 是定值($L=2.5$ m, $\gamma=5^\circ 00'$),则振幅的衰减程度决定于调平传感器的安装位置 K 、摊铺速度 V 和输入函数 y_B 的变化频率 ω 。

下页图 3~图 5 为用 Matlab 软件绘出的在常用摊铺速度下($V=2$ m/min),调平传感器的安装位置 K (K 分别为 $1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 0$)和输入函数

y_B 的变化频率 ω (取值 5 rad/min、10 rad/min、50 rad/min) 对输出的影响曲线^[13]。图中曲线表明:①自动调平熨平板对下承层的变化有滤波作用,这种作用的效果受输入函数的变化频率影响较大,频率越低,滤波效果越差;频率越高,滤波效果越好,称之为自动调平熨平板的滤波特性;②调平传感器的安装位置 K 对输出响应有重要影响, K 值越大,效果越好。

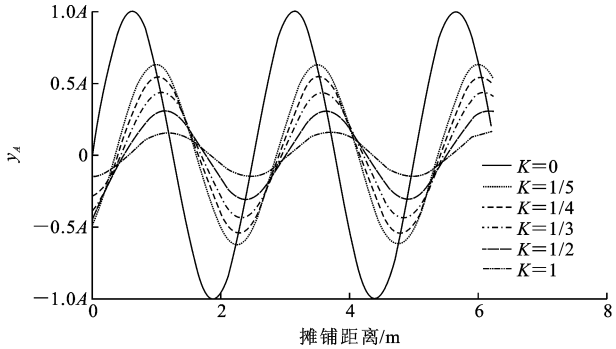


图 3 K 和 ω 对输出响应的影响曲线 ($\omega=5$ rad/min)
Fig. 3 Influence curve of K and ω ($\omega=5$ rad/min) on output response

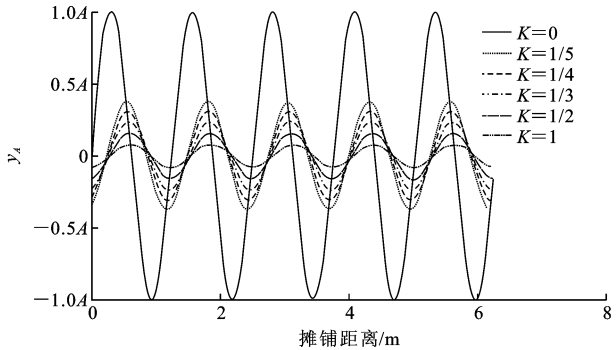


图 4 K 和 ω 对输出响应的影响曲线 ($\omega=10$ rad/min)
Fig. 4 Influence curve of K and ω ($\omega=10$ rad/min) on output response

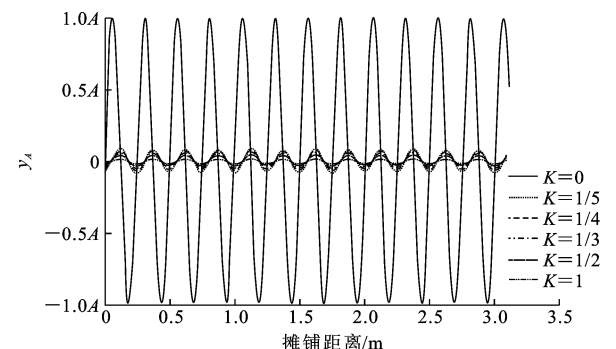


图 5 K 和 ω 对输出响应的影响曲线 ($\omega=50$ rad/min)
Fig. 5 Influence curve of K and ω ($\omega=50$ rad/min) on output response

对于成型的下承层而言,平整度的变化频率不

能改变,因此只能通过改变调平传感器的安装位置 K 提高摊铺平整度。通常摊铺机出厂时 K 值建议在 1/3 附近^[14],为了提高摊铺平整度,结合输出响应曲线,建议 K 的取值应在 1/3~1/2 之间,以提高摊铺平整度,并兼顾对熨平板干扰的抑制作用。

3 阶跃函数激励下的自动调平熨平板输出响应

对于配置自动调平系统的摊铺机,通过调节传感器高度调整摊铺厚度时,相当于对熨平板调平传感器给一个瞬时的阶跃信号^[15-16],用函数 $y_B = \Delta h$ 表示,将其代入式(4),得特殊解式(9)。考虑初始条件,在阶跃信号为 0 时,熨平板后沿垂直方向的位移增量为 0,将 $\Delta h = 0, \Delta y_A = 0$ 代入式(9),得 $c = 0$ 。因此,自动调平熨平板对阶跃信号的响应可用式(10)表示

$$\begin{aligned} \Delta y_A &= e^{-\frac{Vt}{KL\cos(\gamma)}} \left[\frac{V}{KL\cos(\gamma)} \int_0^t \Delta h e^{\frac{Vt}{KL\cos(\gamma)}} dt + c \right] = \\ &= e^{-\frac{Vt}{KL\cos(\gamma)}} \left[\int_0^t \Delta h e^{\frac{Vt}{KL\cos(\gamma)}} d\left(\frac{Vt}{KL\cos(\gamma)}\right) + c \right] = \\ &= e^{-\frac{Vt}{KL\cos(\gamma)}} \left[\Delta h e^{\frac{Vt}{KL\cos(\gamma)}} \right]_0^t + c e^{-\frac{Vt}{KL\cos(\gamma)}} = \\ &= \Delta h - \Delta h e^{-\frac{Vt}{KL\cos(\gamma)}} + c e^{-\frac{Vt}{KL\cos(\gamma)}} \end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned} \Delta y_A &= \Delta h (1 - e^{-\frac{Vt}{KL\cos(\gamma)}}) = \\ &= \Delta h (1 - e^{-\frac{x}{KL\cos(\gamma)}}) \end{aligned} \tag{10}$$

式中: x 为摊铺机的摊铺距离, $x = Vt$ 。

式(10)表明:配置自动调平系统的熨平板对于阶跃输入信号的输出(摊铺厚度变化)响应按指数曲线变化,其变化趋势受结构和使用参数影响。对于成型摊铺机而言熨平板大臂的长度在 X 轴的投影 $L\cos(\gamma)$ 是定值,则调节速度决定于调平传感器的安装位置 K , K 值越小,调节越迅速,随动性越好;但是 K 值过小,会引起系统振荡。下页图 6 为采用 Matlab 软件绘出的调平传感器安装位置 K 的取值 (K 分别为 1、1/2、1/3、1/4、1/5、0)对输出响应的影响。图 6 曲线表明:

(1)自动调平熨平板的调节存在滞后性,当给出一个阶跃信号 Δh 时,摊铺厚度并不会立刻改变,需要经过一定的距离后才能达到完全的响应;理论上当 $x \rightarrow \infty$ 时, $\Delta y_A = \Delta h$ 。实际上,并不需要如此长的时间,只要 $\Delta y_A \geq 95\% \Delta h$ 时,便认为两者已十分接近;根据式(10)可计算其变化过程的特征点 $x = 3KL\cos(\gamma)$ 时, $\Delta y_A = 95.2\% \Delta h$ 。

(2)对于阶跃信号, $\Delta y_A \geq 95\% \Delta h$ 时的响应距

离受传感器的安装位置 K 影响较大, K 值越大, 调节距离越长, 厚度调节速度越慢; K 值越小, 调节距离越短, 厚度调节速度越快, 随动性能越好。

在进行弯道摊铺时, 为了使超高和超高缓和段符合设计要求, 避免由于响应滞后带来较大的横坡误差, 需要响应快, 调节距离短, 此时 K 值应取小值。通常摊铺机出厂时 K 值建议在 $1/3$ 附近^[14], 结合输出响应曲线, 为了减小弯道摊铺横坡误差, K 的取值应在 $1/3 \sim 1/4$ 之间, 以提高变坡控制精度, 避免产生谐振, 引起系统超调或发生振荡。

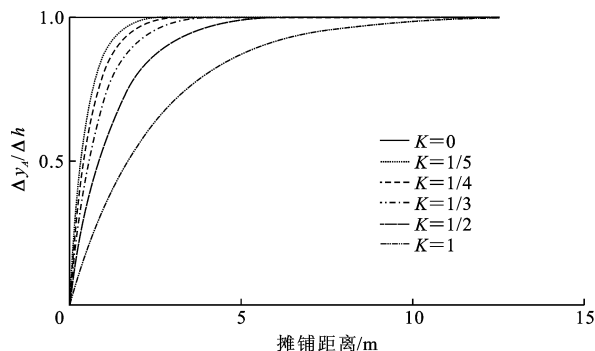


图6 自动调平熨平板的阶跃响应

Fig. 6 Step response of automatic-leveling screed plate

4 结 语

(1) 摊铺机进行弯道变坡摊铺时, 由于响应与激励函数之间存在滞后性, 会产生实际值与设计值之间的偏差, 其偏差大小决定于自动调平传感器的安装位置。传感器与熨平板的距离越近, 响应越快, 随动性能越好, 误差越小。

(2) 自动调平熨平板对下承层的平整度变化有滤波功能, 滤波效果受输入函数的变化频率和调平传感器安装位置的影响。传感器与熨平板距离越远, 滤波效果越好, 下承层的变化对输出的影响越小, 可以得到较好的摊铺平整度。

(3) 传感器安装位置 K 的合理取值范围在 $1/4 \sim 1/2$ 之间, 以控制平整度为主时, 取值应在 $1/3 \sim 1/2$ 之间; 在山区高速公路, 以控制变坡误差为主时, 取值应在 $1/3 \sim 1/4$ 之间; 综合控制时, 宜取两者中间值。

(4) 本文是在假设熨平板处于受力平衡条件下建立的稳态运动学模型, 在调节过程中还存在着从一个平衡状态过渡到另一个平衡状态的动态过程, 过渡过程中伴随着加速与减速运动, 是一个动力学过程。因此, 自动调平熨平板过渡过程的特性需要做进一步的动力学研究。

参考文献:

References:

- [1] 绍明建. 沥青路面机械化施工技术 with 质量控制[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
SHAO Ming-jian. Asphalt pavement mechanization construction technology and quality control[M]. Beijing: China Communications Press, 2001. (in Chinese)
- [2] Roberts F L, Kandhal P S, Brown E R, et al. Hot mix asphalt materials, mixture design and construction [M]. Auburn: National Center for Asphalt Technology, 1991.
- [3] Lavin P G. Asphalt pavements: a practical guide to design, production and maintenance for engineers and architects[M]. London: Spon Press, 2003.
- [4] 孙祖望, 刘洪海. 沥青路面平整度的传递规律及其试验研究(1)[J]. 筑路机械与施工机械化, 1999, 16(1): 9-12.
SUN Zu-wang, LIU Hong-hai. Transfer law and test research of asphalt pavement evenness[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 1999, 16(1): 9-12. (in Chinese)
- [5] 孙祖望, 刘洪海. 沥青路面平整度的传递规律及试验研究(2)[J]. 筑路机械与施工机械化, 1999, 16(2): 11-16.
SUN Zu-wang, LIU Hong-hai. Transfer law and test research of asphalt pavement evenness (2)[J]. Road Machinery & Construction Technology, 1999, 16(2): 11-16. (in Chinese)
- [6] 孙祖望, 刘洪海. 沥青路面平整度的传递规律及试验研究(3)[J]. 筑路机械与施工机械化, 1999, 16(3): 11-14.
SUN Zu-wang, LIU Hong-hai. Transfer law and test research of asphalt pavement evenness (3)[J]. Road Machinery & Construction Technology, 1999, 16(3): 11-14. (in Chinese)
- [7] 刘献栋, 邓志党. 基于逆变换的路面不平整度仿真[J]. 中国公路学报, 2005, 18(1): 122-126.
LIU Xian-dong, DENG Zhi-dang. Study of simulation of road roughness based on inverse transform[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(1): 122-126. (in Chinese)
- [8] 宋永刚, 谭 英. 基于 MATLAB 分析的路面平整度控制方法[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(5): 90-93.
SONG Yong-gang, TAN Ying. Pavement roughness control method based on MATLAB [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(5): 90-93. (in Chinese)
- [9] 孙庆丰, 张 伟. 沥青摊铺机调平基准的结构特点与

- 工作特性[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(9): 141-143.
- SUN Qing-feng, ZHANG Wei. Configuration characteristic and work performance of leveling benchmark of asphalt pavers[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(9): 141-143. (in Chinese)
- [10] 陈繁华, 王清海. 挂线基准弯道摊铺控制特性的应用研究[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(9): 148-151.
- CHEN Fan-hua, WANG Qing-hai. Research on the control of the changing slope curve paving in application[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(9): 148-151. (in Chinese)
- [11] Carol S. Breakthrough in digital valves[J]. Machine Design, 2004, 66(4): 37-41.
- [12] 张新荣. 沥青混凝土摊铺机熨平板与热混合料相互作用的动力学模型[J]. 筑路机械与施工机械化, 1999, 16(1): 12-15.
- ZHANG Xin-rong. The acting dynamic model of asphalt paver screed and hotmix[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 1999, 16(1): 12-15. (in Chinese)
- [13] Edward B M. MATLAB 原理与工程应用[M]. 高会生, 译. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- Edward B M. The principle and engineering application of MATLAB[M]. Transtaled by GAO Hui-sheng. Beijing: Electronic Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [14] 郁录平, 高彦军. 沥青混凝土摊铺机自动找平系统抗干扰能力分析[J]. 工程机械, 2004, 35(12): 14-18.
- YU Lu-ping, GAO Yan-jun. An analysis of the anti-interference capability of auto-leveling system on asphalt concrete paver[J]. Construction Machinery and Equipment, 2004, 35(12): 14-18. (in Chinese)
- [15] 刘洪海, 张广. 浮动均衡梁基准弯道摊铺特性试验研究[J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2007, 33(9): 177-180.
- LIU Hong-hai, ZHANG Guang. The study of paving performance of curve based on the flotation balance beam[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 33(9): 177-180. (in Chinese)
- [16] Liu H, Chen B, Wang X B. On control characteristics of transverse slope controller paving in asphalt pavement in road curve[J]. International Conference on Electric Technology and Civil Engineering, 2011, 4(1): 521-524.
- ~~~~~
- (上接第 136 页)
- [8] Han X, Guo Y J, Zhao Y E. The application of power-based transfer path analysis to passenger car structure borne noise[J]. Journal of Automobile Engineering, 2008, 222(11): 2011-2023.
- [9] 高利, 陈荫三. 卧姿人体承受全身振动的试验方法研究[J]. 客车技术与研究, 1998, 20(2): 38-45.
- GAO Li, CHEN Yin-san. The test method research of human exposure to whole-body vibration in recumbent position[J]. Bus Technology and Research, 1998, 20(2): 38-45. (in Chinese)
- [10] 李沛然, 邓兆祥, 叶常景. 汽车 NVH 试验数据管理系统关键技术研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(2): 163-166.
- LI Pei-ran, DENG Zhao-xiang, YE Chang-jing. Key techniques of a test data management system for automotive NVH[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(2): 163-166. (in Chinese)
- [11] 刘菲菲. 坐姿人体动力学建模及低频振动脑血氧参量响应分析[D]. 济南: 山东大学, 2012.
- LIU Fei-fei. Analysis on driver's response to low frequency vibration based on cerebral oxygenation[D]. Jinan: Shandong University, 2012. (in Chinese)
- [12] 马谋超, 曹志强. 类别判断的模糊集模型和多级估量法[J]. 心理学报, 1983(2): 198-201.
- MA Mou-chao, CAO Zhi-qiang. Fuzzy set mode for category judgment and multistage evaluation method[J]. Acta Psychologica Sinica, 1983(2): 198-201. (in Chinese)
- [13] 陈荫三, 高利. 卧姿人体承受全身振动降低舒适性界限的研究[J]. 汽车工程, 1991, 13(4): 210-211.
- CHEN Yin-san, GAO Li. Comfort limits research of human exposure to whole-body vibration in recumbent position[J]. Automobile Engineering, 1991, 13(4): 210-211. (in Chinese)
- [14] 唐传茵, 张天侠, 李华, 等. 汽车振动舒适性评价研究[J]. 振动与冲击, 2008, 27(9): 158-161.
- TANG Chuan-yin, ZHANG Tian-xia, LI Hua, et al. Evaluation of ride comfort of a vehicle[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(9): 158-161. (in Chinese)
- [15] Peng S P, Li Y Z, Han Y B, et al. A frequency weighting contour for Chinese young males[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2000, 12(3): 162-163.
- [16] 乔宇锋, 黄其柏, 李天匀. 汽车 NVH 传递路径分析的一种参数化等效方法[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2010, 38(4): 83-89.
- QIAO Yu-feng, HUANG Qi-bai, LI Tian-yun. Parametric equivalence method for transfer paths analysis of vehicle NVH[J]. Huazhong University of Science & Technology: Natural Science Edition, 2010, 38(4): 83-89. (in Chinese)