

文章编号:1671-8879(2007)00-0034-03

## 路面车辙多路传感器检测误差分析

马荣贵<sup>1</sup>, 沙爱民<sup>2</sup>, 宋宏勋<sup>1</sup>

(1. 长安大学 信息工程学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:**为评价车辙检测误差,分析了多路传感器车辙检测原理,通过研究车辙的统计分布,应用双余弦车辙数学模型计算分析,得出了传感器横向布置数目与车辙检测最大误差的关系。结果表明:当横向布置传感器数目较小时,车辙误差主要由采样点有限引起的不重合误差决定;当传感器数目较大时,车辙误差主要由位移传感器的测量准确度决定;随着传感器数目的增加,车辙测量最大误差在传感器数目小于 21 时减小较快,在传感器数目大于 33 时衰减缓慢。

**关键词:**道路工程;路面;车辙;检测;误差分析;多路传感器

**中图分类号:**U416.06

**文献标志码:**A

## Error analysis in road rut measurement with multi-sensors

MA Rong-gui<sup>1</sup>, SHA Ai-min<sup>2</sup>, SONG Hong-xun<sup>1</sup>

(1. School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China,

2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** For estimating the road rut measurement errors, the rut's measuring method was developed with multi-sensors, the road rut statistical principle was discussed, the relation between the transverse sensors number and the maximal rut measurement errors was given with a mathematical model of bi-cosine. The results show that: the maximal rut measurement errors is mainly due to the sample's mismatching with the extreme value when the sensor number is smaller; when the sensors number is bigger it mainly due to the precision of the sensors. This errors decrease very fast when the sensors number is smaller than 21, and decrease slowly when the sensors number is bigger than 33. 1 tab, 4 figs, 10 refs.

**Key words:** road engineering; pavement; rut; measurement; error estimating; multi-sensors

## 0 引言

车辙是高速公路上常见的破损现象之一<sup>[1-3]</sup>,由于中国在现阶段缺少足够的数据和经验来建立车辙深度评价模型,同时也缺少经济适用的高效检测设备,现有标准中暂时无法将车辙作为独立指标进行评定<sup>[4-5]</sup>。在国外的车辙检测设备中,大多采用多传

感器检测法,在横断面方向上布设 7~9 个、23~25 个激光探头或 37 个超声探头<sup>[6-8]</sup>。该类设备只给出了位移传感器的准确度(通常为 0.1~0.5 mm)<sup>[9]</sup>,较少给出实际车辙检测准确度。本文通过分析多路传感器车辙检测原理,以路面车辙统计分布为基础,建立了车辙的双余弦数学模型,分析了基于多传感器车辙检测方法中误差形成原因,给出了横向布置

收稿日期:2006-05-09

基金项目:国家西部交通建设科技项目(200431881213)

作者简介:马荣贵(1967-),男,河南荥阳人,副教授,博士研究生,E-mail:Rgma@chd.edu.cn。



传感器数目与车辙检测最大误差的关系。

## 1 多路传感器车辙检测原理

多路传感器车辙检测原理如图1所示。在一刚性梁上均匀安装  $n$  个位移传感器,各传感器沿横断面方向以间距  $d$  均匀排列。

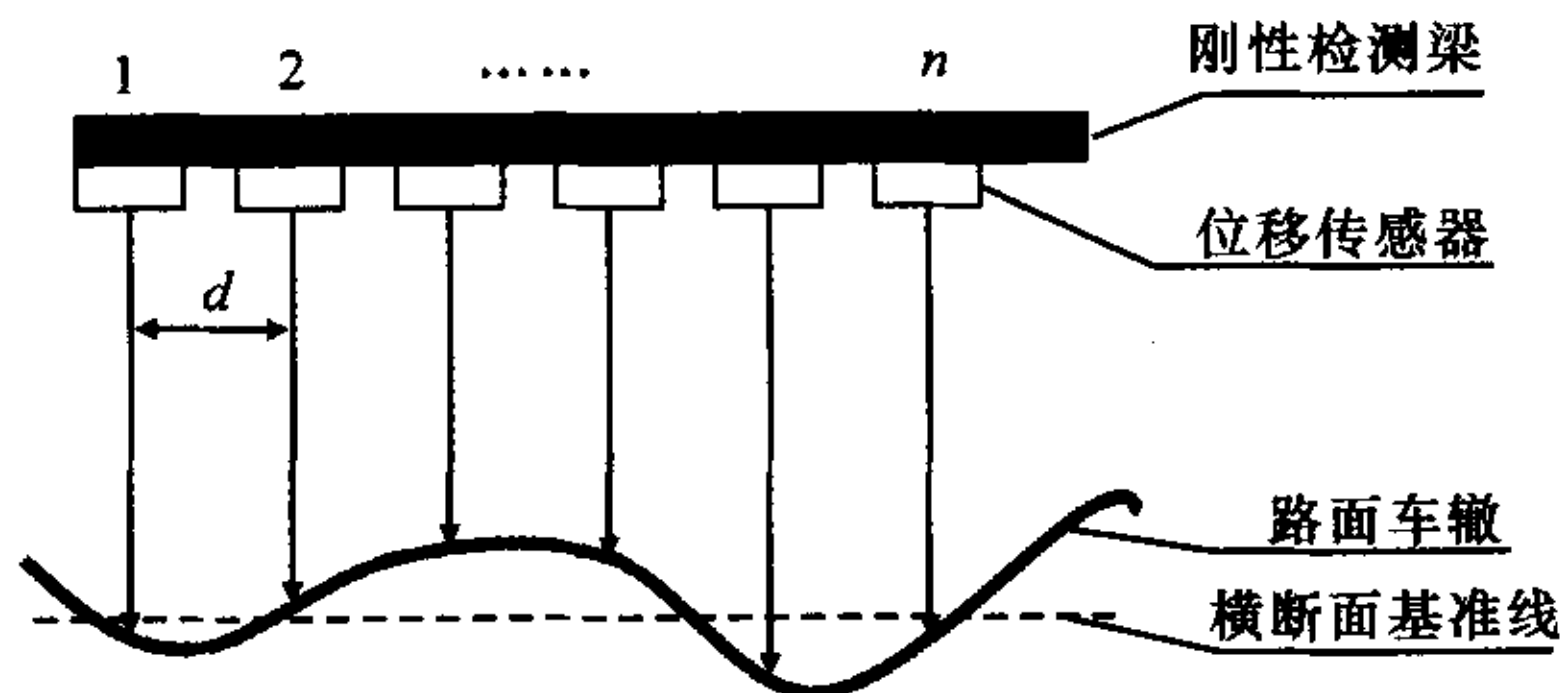


图1 多路传感器车辙检测原理

检测之前,应先对该系统进行标定,以消除系统误差。假设当用该系统检测一平行于刚性梁的平面(车辙为0)时,各传感器的输出为  $h_{i0}$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ),用矩阵  $Z_0$  表示为

$$Z_0 = [h_{10} \ h_{20} \ h_{30} \ \dots \ h_{n0}] \quad (1)$$

当检测到某一时刻  $t$  时,各传感器的输出为  $h_{it}$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ),用矩阵  $Z_t$  表示为

$$Z_t = [h_{1t} \ h_{2t} \ h_{3t} \ \dots \ h_{nt}] \quad (2)$$

则该横断面上  $n$  个采样点的相对高差可表示为以上两个矩阵的差

$$Z_t - Z_0 = [h_{1t} - h_{10} \ h_{2t} - h_{20} \ h_{3t} - h_{30} \ \dots \ h_{nt} - h_{n0}] \quad (3)$$

在刚性梁平行于横断面基准线时,该断面最大车辙  $Z_{t,max}$  可近似表示为矩阵  $Z_t - Z_0$  的最大值和最小值的差,即

$$Z_{t,max} \approx \max(Z_t - Z_0) - \min(Z_t - Z_0) \quad (4)$$

如果实际横断面的相对高差可表示为路面宽度  $x$  的函数  $f(x)$ ,该断面最大车辙可定义为该断面上最高点和最低点之差

$$Z_{t,max} \approx \max(f(x)) - \min(f(x)) \quad (5)$$

则最大车辙测量误差为式(5)和式(4)的差

$$\Delta_{t,max} = (\max(f(x)) - \max(Z_t - Z_0)) - (\min(f(x)) - \min(Z_t - Z_0)) \quad (6)$$

当横梁发生倾斜时,应先对式(3)进行线性变换,再计算最大车辙。

由式(6)可以看出,车辙测量误差由两部分组成,前面一项是由于采样最大值和断面实际最大值不相等造成的峰值误差,后面一项是由于采样最小值和断面实际最小值不相等造成的谷值误差。

引起峰值误差和谷值误差的因素又分为采样点不重合引起的随机误差和传感器准确度有限造成的系统误差。当  $n$  较小时,车辙误差主要由采样点不重合引起的随机误差决定;当  $n$  趋于无穷时,车辙误差主要由位移传感器的测量误差决定。

## 2 误差分析

根据大量的统计调查,可将车辙分布归结为如图2所示的7种类型<sup>[10]</sup>。

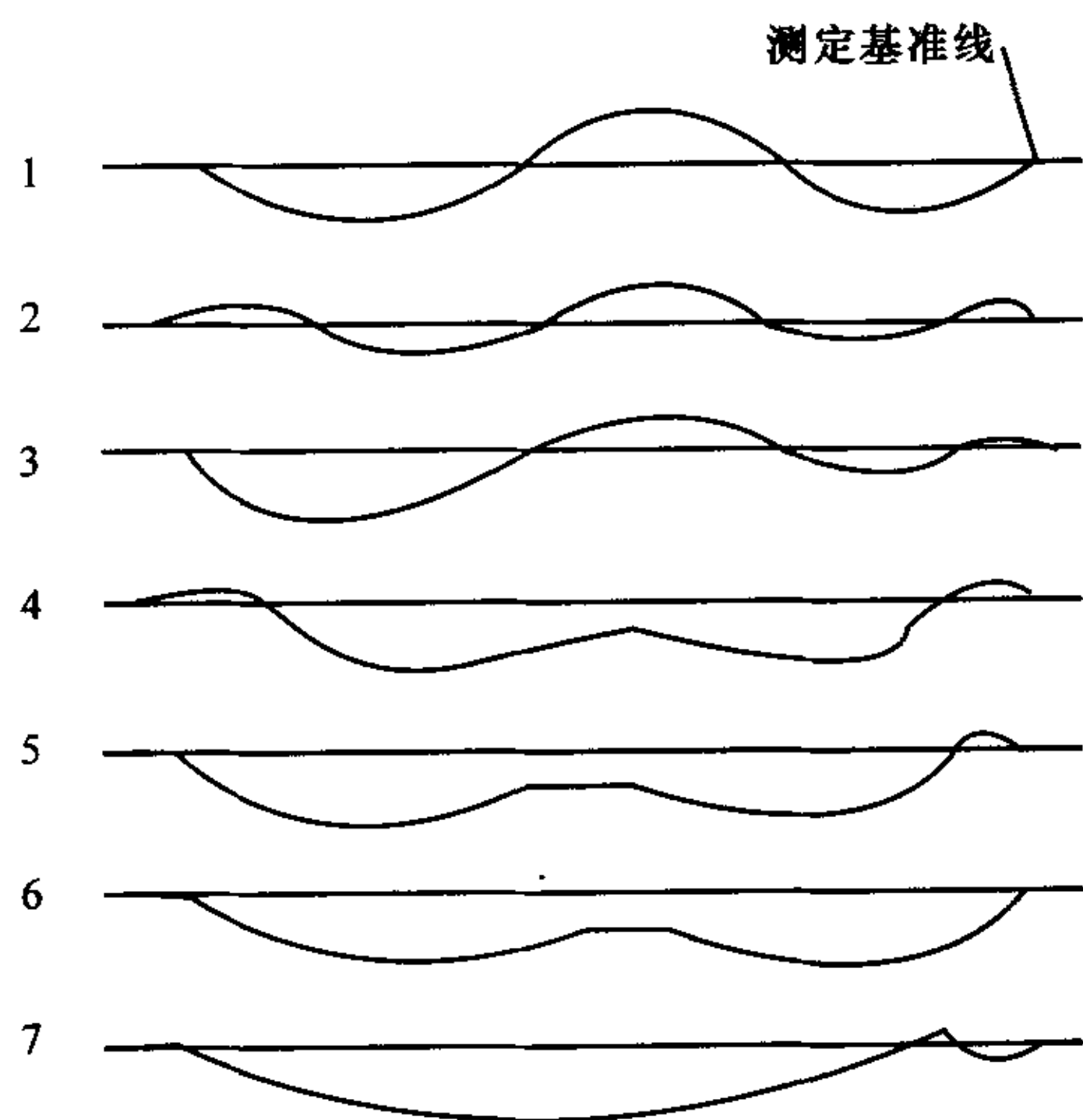


图2 各种车辙的分布

从图2可以看出,单个车道横断面基本遵从双余弦分布,因此可以建立一个双余弦方程,模拟横断面曲线  $f(x)$ 。设

$$f(x) = A \cos(4\pi x / 3.75), \quad 0 \leq x \leq 3.75 \text{ m} \quad (7)$$

式中: $x$  为横断面宽度坐标,取值为  $0 \sim 3.75 \text{ m}$ ;  $A$  为余弦振幅。

为分析方便,将式(7)的振幅归一化,范围限制在  $0 \sim 1$  之间,则式(7)可改为

$$f(x) = \frac{1}{2} [\cos(4\pi x / 3.75) + 1] \quad (8)$$

代入式(6),可得

$$\Delta_{t,max} = 1 - Z_{t,max} \quad (9)$$

如果各个传感器一致性较好,安装在同一水平线上,且刚性梁平行于标准平面(车辙为0),则用标准平面标定时,各传感器的输出应为一常量。式(9)可简化为

$$\Delta_{t,max} = 1 - \max(Z_t) - \min(Z_t) \quad (10)$$

当  $n$  较小时,传感器检测准确度引起的误差可以忽略,误差基本上全部由采样点有限造成的随机误差产生。同时,在行车过程中不可能一直沿着一条直线行驶,因此车辙的最大误差随着行驶轨迹偏离最大车辙的距离而变化。



显而易见,如果传感器间距为  $d$ ,则最大误差通常发生在采样点偏移  $d/2$  处,通过计算机模拟,得到图 3 所示的多个模拟曲线和表 1、图 4 所示的传感器与车辙检测最大误差关系曲线。

从图 3 和表 1 中可以看出,当横向布置 5 个传感器( $n=5$ )时,当采样点偏离轮迹带  $d_5/2$  时,将测不到车辙,车辙检测最大误差为 100%。

当横向布置 9 个传感器( $n=9$ ),采样点偏离轮迹带  $d_9/2$  时,最大误差为 29.3%;横向布置 21 个传感器( $n=21$ ),采样点偏离轮迹带  $d_{21}/2$ ,最大误差为 4.9%;当横向布置 29 个传感器( $n=29$ ),采样点偏离轮迹带  $d_{29}/2$  时,最大误差为 2.5%。

从图 4 可以看出,随着传感器数目的增加,车辙测量最大误差在  $n < 21$  时,减小较快;在  $n > 33$  后,衰减缓慢。因此,在一般准确度检测时,至少要选用  $n=21$ ,才能保证车辙的最大误差不超过 5%,在较高准确度检测时,选  $n=33$  可保证车辙的最大误差

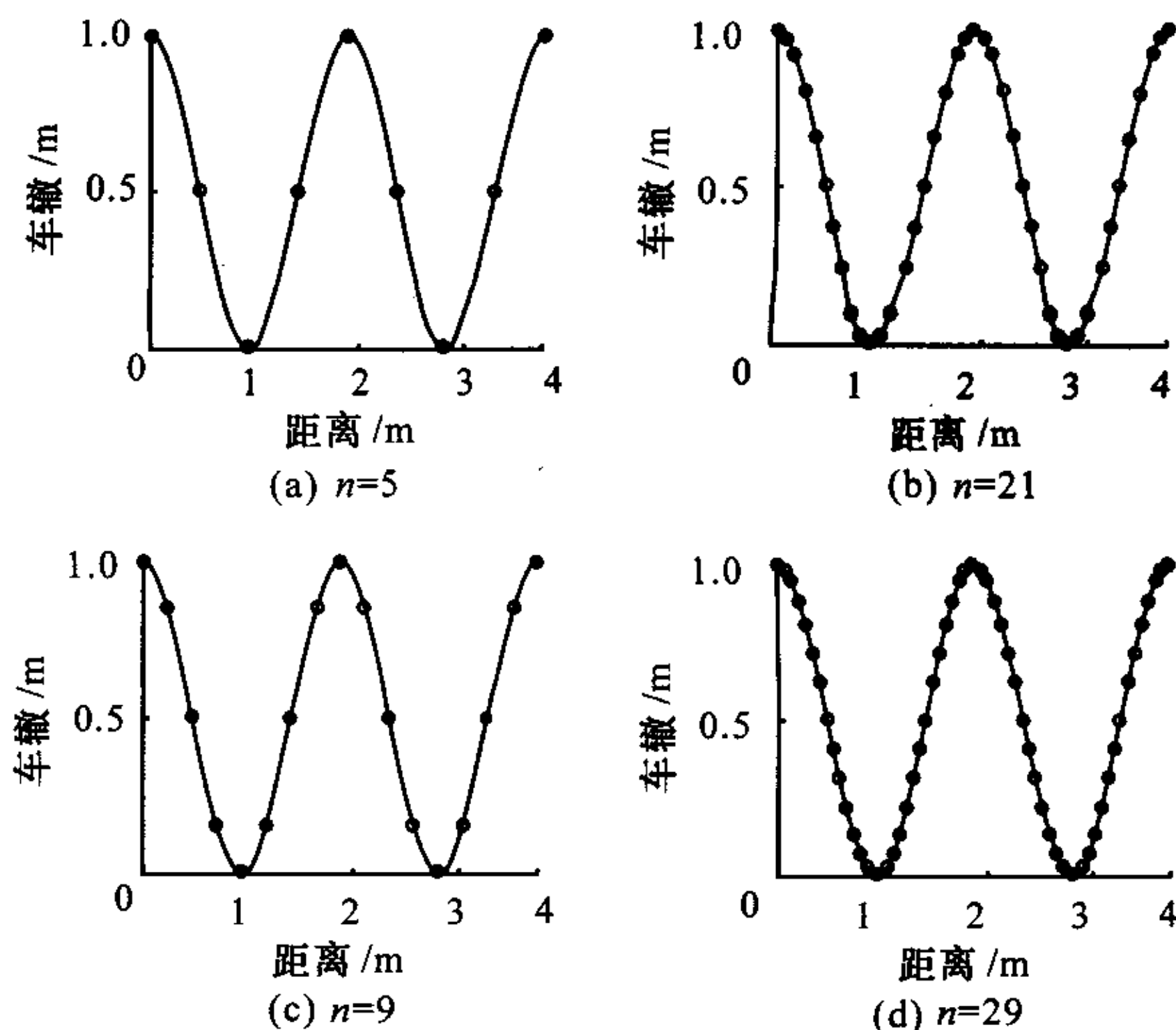


图 3 传感器个数不同时车辙最大误差计算机模拟曲线

注:曲线表示模拟实际横断面,实心圆点表示传感器理想的安装位置,此时车辙的检测误差为 0;空心圆点表示由于行驶轮迹偏离最大车辙,引起的车辙检测最大误差处。

不超过 2%。

表 1 不同传感器数目时的车辙最大误差

传感器数 / 个	5	9	13	17	21	25	29	33	37	41
车辙最大误差 / %	100.00	29.30	14.00	7.60	4.90	3.30	2.50	1.92	1.52	1.23

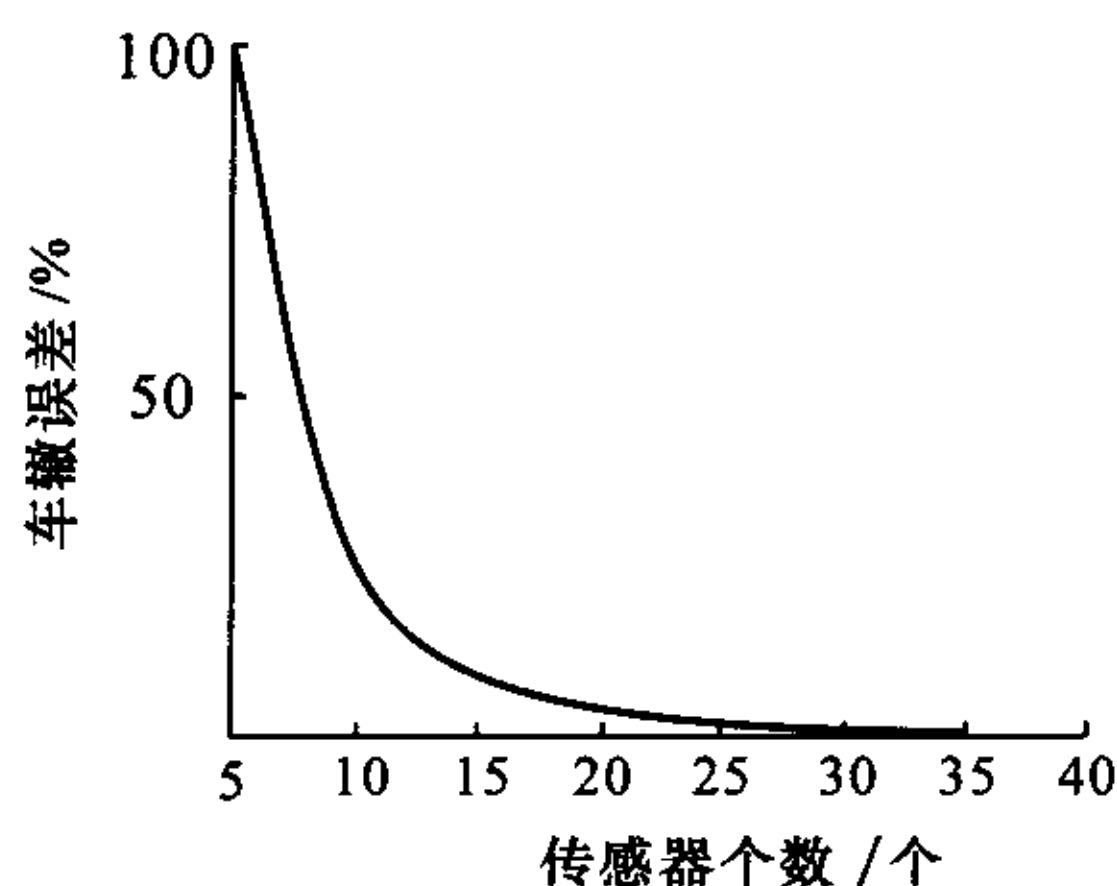


图 4 传感器个数和车辙检测最大误差的关系曲线

### 3 结 语

(1) 影响车辙测量最大误差的主要因素有两个:一个是采样点有限使最大高差和最小高差偏离实际位置引起的随机误差;一个是传感器准确度有限造成的系统误差。当横向布置传感器数目  $n$  较小时,车辙误差主要由采样点不重合引起的随机误差决定;当  $n$  较大时,车辙误差主要由位移传感器的测量误差决定。

(2) 随着传感器数目的增加,车辙测量最大误差在  $n < 21$  时减小较快,在  $n > 33$  后衰减缓慢。因此,在一般准确度检测时,至少要选用  $n=21$ ,才能保证车辙的最大误差不超过 5%;在较高准确度检测时,选  $n=33$  可保证车辙的最大误差不超过 2%。

### 参考文献:

#### References:

- [1] 武建民,伍石生. 沥青路面长期使用性能指标[J]. 长安大学学报:自然科学版,2004,24(3):17-20.  
WU Jian-min, WU Shi-sheng. Criteria of long term performance of asphalt pavement [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(3):17-20.
- [2] 刘红瑛,戴经梁. 不同级配对沥青混合料车辙性能的影响[J]. 长安大学学报:自然科学版,2004,24(5):11-16.  
LIU Hong-ying, DAI Jing-liang. Effect of different gradations on asphalt mixture resistance to rut [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(5):11-16.
- [3] 侯相深,马松林,王彩霞. 基于行车安全的沥青路面车辙测量与评价指标的研究[J]. 公路交通科技, 2006,23(8):14-17.  
HOU Xiang-shen, MA Song-lin, WANG Cai-xia. Research on measurement and evaluation of asphalt pavement rutting based-on traffic safety [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(8):14-17.
- [4] 贺安之,徐友仁,贺 宁. 高速公路路面状况的光学

(下转第 41 页)



加而扩大。

(2)当硬壳层厚度一定,随着硬壳层变形模量的增加,竖向附加应力在荷载作用宽度范围内明显变小,但在荷载作用宽度范围之外,竖向附加应力随着离开荷载作用范围边沿距离的增加而减小的速度变慢,进而大于相应厚度硬壳层变形模量较小的情况下的竖向附加应力,竖向附加应力扩散范围随着硬壳层变形模量的增加而扩大。

(3)当硬壳层厚度和变形模量一定时,随着荷载作用宽度的增加,其扩散应力的作用在减小,因此利用硬壳层时一定要考虑荷载宽度影响。

(4)计算出了考虑硬壳层厚度和变形模量以及荷载作用宽度影响的应力扩散角 $\theta$ ,建议在实际使用中 $\theta$ 的最大值不要超过 $30^\circ$ 。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 王晓谋. 河滩相软土地基的变形规律及硬壳层作用研究[D]. 西安:长安大学,2001.
- [2] 唐建中. 双层地基应力扩散的特性研究[J]. 地基处理,1993,(2):25-31.  
TANG Jian-zhong. On the stress spreading characteristic for double-layered foundation[J]. Ground Improvement,1993,(2):25-31.
- [3] 杨果林. 硬壳层软土地基中界面附加应力研究[J]. 湘潭矿业学院学报,1996,11(1):47-54.  
YANG Guo-lin. Study of boundary plane superimposed stress of two-parameter foundation[J]. Journal of Xiangtan Mining Institute,1996,11(1):47-54.
- [4] 张留俊. 高路堤下软土硬壳层工程性质的研究[J]. 公路,1999,(7):5-9.  
ZHANG Liu-jun. Research on the engineering properties of dry crust of soft clay foundation under high embankment[J]. Highway,1999,(7):5-9.
- [5] 吴邦颖. 公路软土路基人造硬壳层处理研究[J]. 路基工程,1996,(4):39-46.  
WU Bang-ying. Treatment on artificial hard shell layer on soft clay foundation under embankment[J]. Subgrade Engineering,1996,(4):39-46.
- [6] 王晓谋,袁怀宇,贾其军,等. 路堤下河滩相软土地基变形研究[J]. 中国公路学报,2003,16(2):22-26.  
WANG Xiao-mou, YUAN Huai-yu, JIA Qi-jun, et al. Study of deformation of alluvial flat soft clay foundation under embankment[J]. China Journal of Highway and Transport, 2003,16(2):22-26.
- [7] 王晓谋,袁怀宇. 河滩相软土地基路堤施工[J]. 长安大学学报:自然科学版,2003,23(3):26-29.  
WANG Xiao-mou, YUAN Huai-yu. Embankment construction on alluvial soil foundation[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2003, 23(3):26-29.
- [8] 王晓谋,袁怀宇. 高等级公路软土地基路堤设计与施工技术[M]. 北京:人民交通出版社,2001.
- [9] 王晓谋. 考虑硬壳层作用的软土地基临塑荷载计算[J]. 岩土工程学报,2002,24(6):720-723.  
WANG Xiao-mou. Calculation of proportional limit load for soft clay foundation involving the effect of dry crust[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2002,24(6):720-723.
- [10] GB 50007-2002,建筑地基基础设计规范[S].

(上接第36页)

- 智能检测与信息处理[J]. 光电子·激光,2002,13(12):1 181-1 284.  
HE An-zhi, XU You-ren, HE Ning. Intelligent optical test of surface's status of the highway and it's information processing[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2002,13(12):1 181-1 284.
- [5] 中华人民共和国交通部. 高速公路养护质量检评方法(试行)[M]. 北京:人民交通出版社,2003.
- [6] 马建,宋宏勋. 高速公路养护质量激光检测技术及应用[J]. 筑路机械与施工机械化,2005,22(6):1-4.  
MA Jian, SONG Hong-xun. Laser inspection technology and application of expressway maintenance quality [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2005,22(6):1-4.
- [7] 李中华. 激光断面仪在路面平整度及车辙检测中的应

- 用[J]. 交通科技,2004,(3):7-9.  
LI Zhong-hua. Application of the laser profile-meter in the roughness measurement [J]. Transportation Science and Technology,2004,(3):7-9.
- [8] 杨劲夫. 高速公路车辙检测数据分析方法[J]. 东北公路,2002,(1):8-9.  
YANG Jin-fu. Analysis of rut detected data in expressway [J]. Northeast Highway,2002,(1):8-9.
- [9] 马荣贵,宋宏勋,来旭光. 激光路面平整度检测系统[J]. 长安大学学报:自然科学版,2006,26(2):38-41.  
MA Rong-gui, SONG Hong-xun, LAI Xu-guang. Pavement roughness measurement system based on laser displacement sensors[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2006,26(2):38-41.
- [10] JTJ 059-95,公路路基路面现场测试规程[S].