

文章编号: 1002-0268 (2011) 01-0019-06

粗集料的表面微观纹理的激光测量方法及分形性质研究

张肖宁, 孙杨勇

(华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510641)

摘要: 研制了一种采用激光三角测量技术的微距测量系统, 对路面常用的花岗岩、玄武岩等粗集料的表面微观纹理进行测量, 并分析了系统各种误差等干扰因素。利用 MATLAB 平台, 采用盒子计数法对各种表面曲线及其所对应的原始数据进行分析, 得出表面纹理的分形维数。测量分析系统总体抗干扰能力较强, 满足粗集料微观测量要求, 系统总体可靠、可行。对比研究结果表明, 粗集料表面微观纹理分维数越大则其粗糙程度越复杂, 越有利于提高路面抗滑性能, 所选样品的玄武岩, 花岗岩和卵石的表面微观纹理分维数依次减小且分维数有明显差异, 符合实际应用情况, 因此本测量分析方法为沥青面层石料的优选提供了新的方法和指标。

关键词: 道路工程; 维数; 分形; 粗集料; 微观构造; 激光

中图分类号: U416.2

文献标识码: A

Research on Measurement of Surface Micro-texture of Aggregate Using Laser and Its Fractal Character

ZHANG Xiaoning, SUN Yangyong

(School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510641, China)

Abstract: A micro-distance measurement system was developed using laser triangulation technique, the surface micro-texture of granite, basalt and other coarse aggregates commonly used on the road was measured, and the system errors were analyzed. Using MATLAB platform, the curves and their original data of various surfaces were analysed by box-counting method, and the fractal dimension of surface texture was derived. The overall anti-interference ability of the measurement system is strong and meets the requirements of coarse aggregate micro-measurement, and the overall system is reliable and feasible. Comparative results show that (1) the larger the fractal dimension of surface micro-texture of coarse aggregate, the more complex its roughness, and more help to improve road skid resistance; (2) the fractal dimensions of surface micro-texture of the selected samples of basalt, granite and pebble decrease in order and the fractal dimensions are significantly different, which in line with the actual application. Therefore, this measurement method provides a new approach and indicators for the stone preferred for asphalt surface.

Key words: road engineering; dimension; fractal; aggregate; micro-structure; laser

0 引言

沥青路面的抗滑能力与表层集料物理性能、矿

料级配及施工控制等直接相关, 根据文献研究结果, 粗集料的物理性能对路面整个使用寿命内的全速度范围内抗滑性能有重要贡献。刘清泉、美国学者

Thomas Fletcher、日本学者 Hua Piao 等人研究认为,抗滑力的构成主要取决于路面粗糙度,所谓粗是指宏观构造形如麻面,它主要影响路面抗滑力随车速提高而衰减的幅度,所谓糙是指微观构造可形容为细砂纸,而它决定了各种车速下路面抗滑力的总体水平^[1-2]。因此,在优化沥青路面的抗滑能力设计时,首先应考虑的是粗集料材料性能,特别是其微观纹理状况。在对粗集料表面微观纹理进行定量研究过程中,首先是怎样精确取得微观纹理数据。美国 MTI Instruments Inc. 公司是美国激光微距测量领域的领先者,拥有各种测量范围和精度的激光传感器,也开发了一些常用的成套设备,但是目前没有针对粗集料表面纹理进行测量、分析的系统。美国 laser design inc. 公司主要侧重于细观以上的物体三维测量的 CAD 成像,对物体表面的微观构造涉及得不多。W A Tasong 等学者采用 Talysurf 120L 表面轮廓仪分别测量了玄武岩、石灰岩和石英岩集料颗粒的表面纹理。国内有学者对金属摩擦面进行了测量研究,主要是采用自行研制的触针轮廓仪来测量,测量精度均为毫米级^[3-4]。

根据文献研究,目前测量表面纹理的方法可以分为接触式和非接触式两大类。接触式主要有针描法,效率低,设备探针也容易损坏;非接触式方法根据不同的测量原理,有气动法、电容法、微波法、红外辐射法、电子显微镜法和光学法。光学法的应用较多,常见的有激光传感法和光纤传感法等,光纤传感方法对被测量物体表面的颜色非常敏感,颜色不同带来的测量误差较大。而激光传感法的影响因素要少很多,其系统精度和效率都可以满足使用要求^[5-6]。

1 微观纹理图形的测量和获取方法

1.1 设备基本原理及参数

基于以上分析结果,本文采用非接触式的激光三角成像法测量原理,结合直流脉冲轴承触发激光信号并记录横向位移的方法,由激光器发出的激光束经过准直透镜组准直后,在被测集料表面形成一均匀散射斑,根据正交成像原理,散射斑成像于激光器接受像面,且物像的位移成严格的线性关系,实际也证明该套方法测试效率和精度都可以满足要求^[9]。

激光器的发射和接收光线呈三角形布置,在测量时,激光头和被测物体表面的相对运动方向应该垂直于激光三角形平面,从而避免精密测量时,前

后测点的发射光和反射光相互干扰,如图1、图2所示。

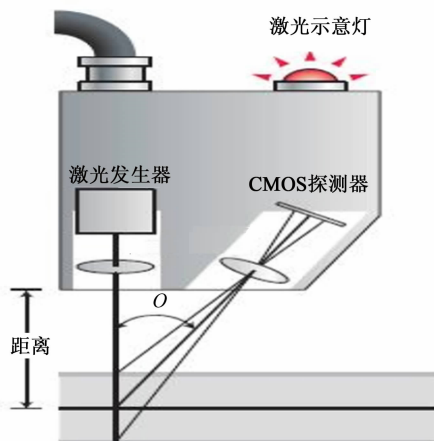


图1 激光器结构及测量原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of laser structure and measurement principle

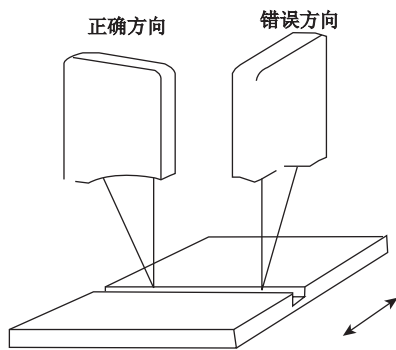


图2 正确的激光头安装方向图

Fig.2 Correct installation pattern of laser

本文采用的激光器型号为 LTC-050-20SA, 波长: 670 nm; 分辨率: 2.5 μm; 标称测量范围: 中心点上下(正、负)10 mm; 高程的实际有效测量范围是中心点上下各12.5 mm; 激光点直径: 30 μm。激光器的 CMOS 传感器为 1 024 像素, 数字信号处理器控制激光点每秒采集 40 000 次。

横向位移采用一个直流脉冲轴承控制, 其一个脉冲为 8 μm, 该脉冲轴承和激光控制器连接, 激光器发射采集信号的频率和速度与脉冲的发射频率和速度一致, 这样可以让集料表面横向的位移和竖向的高程信息采集保持统一。激光器高程按式(1)计算:

$$ps = \frac{count - (2^{16}/2)}{(2^{16}/2)} \times 2 \times sf \times 10^{-dp}, \quad (1)$$

式中, ps 为测点高程; $count$ 为激光器返回的计数值; sf 为放大系数; dp 为激光器点位参数。由于在

不同介质上反射和漫射光信号的强度变化很大, 所以在信号线性化和数字化之前, 用 MTI 专利电路对信号进行处理, 用以稳定接收信号的强度。

1.2 干扰及误差分析

首先是分析激光器本身的测量误差, 光斑直径的大小直接决定测量精度, 光斑直径 D_s 由距被测表面的有效距离 L 和棱镜的直径 D_L 决定, $D_s \propto L/D_L$, 由于本文采用的激光传感器是美国 MTI 公司目前较为先进的微距激光器, 其 L 较小, D_L 设计相对较大, 因此光斑直径仅为 30 μm , 分辨率达到 2.5 μm , 其对被测面的表面纹理, 颜色、光线等影响干扰小, 能根据被测面的状况自动调整发射光强度。由于激光斑点在被测面分布的不均匀性, 以及部分目标的反射光存在偏离现象和反射点位置的偏斜等都会不同程度的影响到计算结果。但是该产品的激光斑点被 CMOS 感应器划分为 $1\,024 \times 1\,024$ 个像素阵列来有分别的监测反射光强度, 从被测表面散射回来的小能量光被自动忽略, 而根据文献分析, 光斑的中心光点区域反射能量一般最高, 系统能自动寻找中心最强点, 因此能给出精确和重复性较好的测量结果。图 3 为激光器出厂检定的误差结果, 可见其负值区间 (-100, -50) 即离激光器相对较近的有效测量区间的误差最小, 因此本文选用其负值区间进行测量, 进一步减小了测量误差。

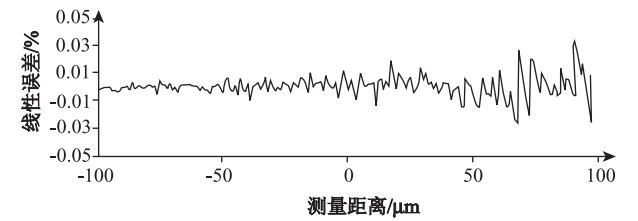


图3 激光器出厂检定的误差结果

Fig.3 Laser errors in the results of factory test

其次, 由于不同的被测面的反射效果差异带来的误差, 特别是透明表面, 本系统控制软件能根据被测面反射光强度情况自动选择带宽 Bandwidth, 一般的, 对于接近纯黑或纯透明的反射面来说, 选 4 kHz 或以下的带宽, 分辨效果进一步得到提高。

第 3, 来自外界的扰动和机械震动等干扰, 由于该系统安装在一个台架上, 在触发横向距离脉冲时, 整个台架不可避免的会产生不同程度的震动和晃动, 如果把石料放在与台架分离的台面上测量, 那么台架的晃动所产生的位移也会被系统采集到, 产生测量误差。因此, 根据台架的各器件的布局, 结合激光器的有效量程, 我们给系统设计了一个连体托架,

将被测粗集料放在连体的托架上进行测量, 并通过固定点的模拟扰动测量进行了误差统计。

图 4 为实时干扰测量结果片段, 根据反复测量的数据结果可知, 对固定的静止点在没有任何外界干扰的情况下进行重复测量, 程序每 50 ms 测量一次, 共采集到 728 点, 平均值 7.603 mm, 最小值 7.602 mm, 最大值 7.606 mm, 标准差 0.000 6 mm, 数据结果表明系统稳定, 噪声等干扰极小, 满足测量要求。然后对于同一测点, 在重复测量过程中, 采用人工正常晃动测量台架的方式来模拟外界扰动, 程序仍每 50 ms 测量一次, 共采集到 1 044 点, 平均值 7.605 mm, 最小值 7.598 mm, 最大值 7.618 mm, 标准差 0.006 mm, 数据结果表明, 增加连体测量台架后, 系统测量偏差相对完全静止状态下有所增大, 但是平均值仅相差 2 μm , 标准差也在可接受范围内, 因此认为系统总体抗外界干扰能力较强, 基本满足测量要求。

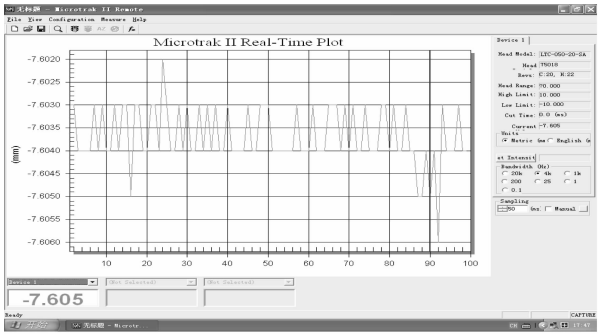


图4 固定点实时干扰测量结果

Fig.4 Real-time interference measurement results at fixed-point

1.3 设备图形及参数标定

整套测量系统由激光器、横向位移脉冲轴承、数据采集板、电源和电脑采集显示存储终端组成, 安装在一个足够刚度的钢制架子上, 如图 5、图 6 所示。



图5 全套设备照片

Fig.5 Full set of equipment

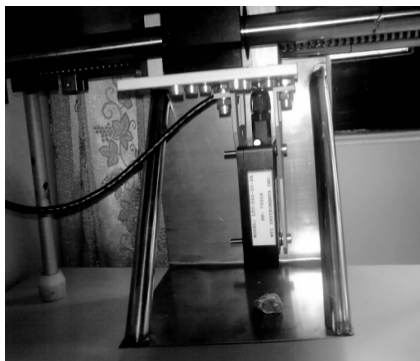


图6 激光及脉冲轴承

Fig. 6 Laser and pulsed bearings

系统采集软件是利用 ActiveX 控件和激光器和采集电路板控制和通讯的,能实时显示采集到的高程值以及连续的高程曲线,并带有激光器信号标定和横向直流脉冲距离标定,标定结果见图7、图8。



图7 激光信号标定

Fig. 7 Calibration of laser signals



图8 距离系数标定

Fig. 8 Calibration of distance

分别用2~10 mm高的标准块对激光信号进行标定,校验结果误差均为0.1%以内。通过与5~20 mm长的标准尺多次标定横向脉冲位移,校验结果误差均在0.1%左右,距离脉冲标定结果为一个脉冲代表8 μm 。

2 测量结果图像实例分析计算

分形理论是20世纪70年代末由法国数学家Mandelbrot通过对许多形状复杂的不规则物体进行综合分析后,认为分形特征是在不同尺度下均具备自相似性的构造,并提出了维数的定量概念。通过文献和实测数据认为,粗集料颗粒在不同的尺度范围内都表现出一定的分形特征,因此借用分形维数等手段,对其微观构造特征进行定量研究,对描述和评价沥青混合料抗滑及其他性能的具有重要的意义^[7-8]。采用计盒维数法,利用MATLAB平台编写算法,选取卵石、玄武岩、花岗岩等不同类型石料进行实测计算分析,结果如下。

图9为系统测得的光滑卵石的表面纹理轮廓曲线,通过计算可得盒子尺寸和覆盖曲线所需要的盒子数量关系,可得该轮廓曲线符合分形特征的无标度区域,该区域即作为维数统计区间,图10为盒子尺寸和对应算得的维数关系。从结果可知,在最大盒子尺寸在10~100的区间内的维数基本一致,该区间平均值计为表面曲线维数 $D = 1.07$,维数越小则表明表面纹理复杂程度越底,该结果和卵石的光滑表面实际情况吻合。

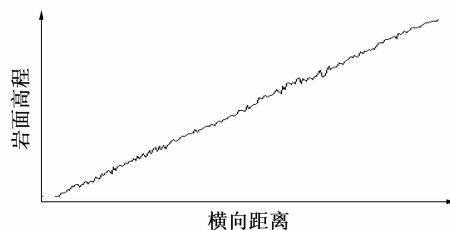


图9 表面光滑的卵石

Fig. 9 Smooth surface of pebbles

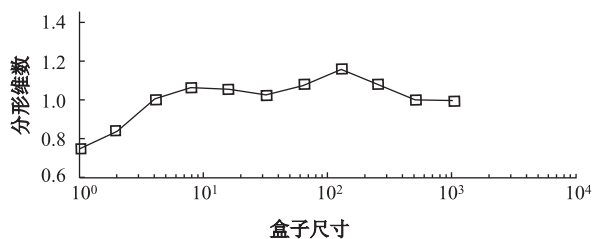


图10 卵石的盒子尺寸和对应算得的维数关系

Fig. 10 Relationship between box size and corresponding dimension of pebbles

图11为花岗岩表面纹理曲线,图12为盒子尺寸和对应算得的维数关系。在最大盒子尺寸在6~60的区间内的维数基本一致,该区间平均值计为表面维数 $D = 1.24$,其表面纹理复杂程度有所增加。

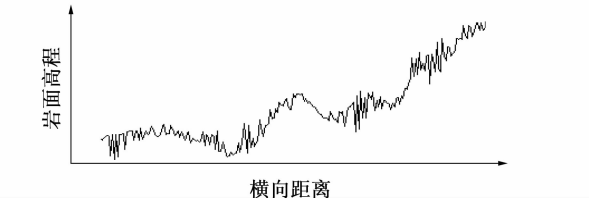


图 11 花岗岩
Fig. 11 Granite

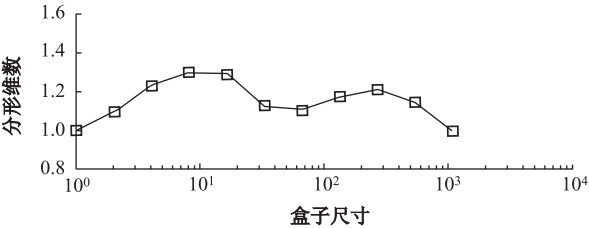


图 12 花岗岩的盒子尺寸和对应算得的维数关系
Fig. 12 Relationship between box size and corresponding dimension of granite

图 13, 图 14 为玄武岩表面纹理测量结果, 可见盒子尺寸在 6 ~ 90 区间内的维数基本一致, 该区间平均值计为表面维数 $D = 1.47$, 表面纹理复杂程度比花岗岩表面又有明显增加。

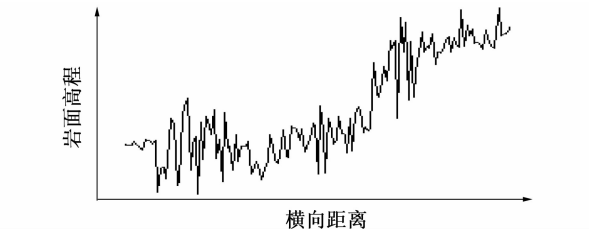


图 13 玄武岩
Fig. 13 Basalt

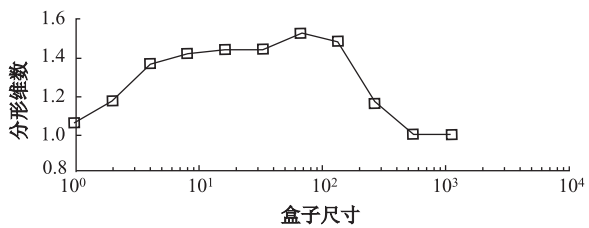


图 14 玄武岩的盒子尺寸和对应算得的维数关系
Fig. 14 Relationship between box size and corresponding dimension of basalt

3 结论

(1) 粗集料表面微观纹理具备分形特征, 且采用本文设计的激光三角测量原理的微观测量系统可对表面纹理进行精确测量, 系统总体抗干扰能力较强, 基本满足测量要求, 系统可靠、可行。

(2) 粗集料表面微观纹理维数越大则其粗糙程度越复杂, 越有利于提高路面抗滑性能, 由计算结果可知, 本文所选样品的玄武岩, 花岗岩和卵石的表面纹理维数依次减小且维数有明显差异, 符合实际应用情况, 因此本方法为面层石料的优选提供了新的方法和指标。

(3) 可进一步对系统进行改进, 提高路面现场检测的精度和效率, 对不同路面类型和交通荷载条件下的表面纹理衰减情况进行研究, 从而得出更系统的抗滑性能研究结果。

参考文献:
References:

[1] 刘清泉. 沥青路面抗滑表层的修筑 [J]. 中国公路学报, 1994, 11 (9): 5-8.
LIU Qingquan. Construction of Anti-slide Surface of Asphalt Pavement [J]. China Journal of Highway, 1994, 11 (9): 5-8.

[2] 刘清泉. 路面抗滑对策 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1995.
LIU Qingquan. Pavement Anti-slide Measures [M]. Beijing: China Communications Press, 1995.

[3] MANDELBROT B B. Fractal Character of Fracture Surfaces of Metals [J]. Nature, 1994, 19 (8): 36-39.

[4] 谢和平, 薛秀谦. 分形应用中的数学基础与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1997.
XIE Heping, XUE Xiuqian. Mathematical Foundations and Methods in the Fractal Applications [M]. Beijing: Science Press, 1997.

[5] 林道云, 胡小芳. 基于 Matlab 的断面分维求算方法研究 [J]. 煤炭技术, 2009, 22 (12): 12-16.
LIN Daoyun, HU Xiaofang. Research on Calculation Method for Section Fractional Dimension Based on Matlab [J]. Coal Technology, 2009, 22 (12): 12-16.

[6] 穆在勤, 龙期威. 测量断面分维的周长-最大直径方法 [J]. 材料科学进展, 1996, 13 (6): 23-27.
MU Zaiqin, LONG Qiwei. A Perimeter-maximum Diameter Method to Measure Fractal Dimension of Fractured Surface [J]. Materials Science, 1996, 13 (6): 23-27.

[7] 李启楷, 张跃, 褚武扬. 一维分形曲线与分维测量 [J]. 中国体视学与图象分析, 1998, 12 (9): 27-31.
LI Qikai, ZHANG Yue, CHU Wuyang. 1D Fractal Curve and Fractal Dimension Measurements [J]. China Stereology and Image Analysis, 1998, 2 (9): 27-31.

[8] MITCHELL M W, BONELL D. Quantitative Topographic Analysis of Fractal Surfaces by Scanning Tunneling

- Microscopy [J]. Journal of Materials Research, 1990, 15 (10): 212-219.
- [9] 王林高. 激光表面微观测量系统的设计 [J]. 淮阴工学院学报, 2003, 15 (2): 12-18.
- WANG Lingao. The Design of the Laser Measurement and Analysis System for Mechanic Surface Microcosmic Appearance [J]. Huaiyin Institute of Technology, 2003, 15 (2): 12-18.
- [10] 陈国明, 谭忆秋, 石昆磊, 等. 粗集料棱角性对沥青混合料性能的影响 [J]. 公路交通科技, 2006, 23 (3): 6-9.
- CHEN Guoming, TAN Yiqiu, SHI Kunlei, et al. Influence of Coarse Aggregate Angularity on Hot-mix Asphalt Properties [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23 (3): 6-9.
-
- (上接第 6 页)
- [6] 宋玉普, 赵国藩. 钢筋与混凝土间粘结应力-滑移关系的应力应变模型 [J]. 大连理工大学学报, 1994, 34 (1): 59-67.
- SONG Yupu, ZHAO Guofan. Stress Variation Model of Bond Stress-slip Relationship between Steel Bar and Concrete [J]. Journal of Dalian University of Technology, 1994, 34 (1): 59-67.
- [7] 汤广来. 钢筋与混凝土粘结应力计算模式的研究 [J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 1999, 22 (5): 103-107.
- TANG Guanglai. Study on Calculating Model of Bond Stress between Reinforcing Bar and Concrete [J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science Edition, 1999, 22 (5): 103-107.
- [8] 曹东伟. 连续配筋混凝土路面结构研究 [D]. 西安: 长安大学, 2001.
- CAO Dongwei. Research on Structure of Continuously Reinforced Concrete Pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2001.
- [9] 曹东伟, 胡长顺. 连续配筋混凝土路面温度应力分析 [J]. 西安公路交通大学学报, 2001, 21 (2): 1-5.
- CAO Dongwei, HU Changshun. Analysis of the Thermal Stress for Continuously Reinforced Concrete Pavement (CRCP) [J]. Journal of Xi'an Highway University, 2001, 21 (2): 1-5.
- [10] 李卓, 查旭东, 张起森. 连续配筋混凝土路面早期横向开裂分析 [J]. 中外公路, 2003, 23 (2): 26-28.
- LI Zhuo, CHA Xudong, ZHANG Qisen. Analysis of Dehiscence in Continuously Reinforced Concrete Pavement (CRCP) at Early Ages [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2003, 23 (2): 26-28.
- [11] 巨锁基, 黄晓明, 李宇峙. 真实条件下 CRCP 温度应力通用解析解 [J]. 公路交通科技, 2006, 23 (6): 14-17.
- JU Suoji, HUANG Xiaoming, LI Yuzhi. General Analytic Solution for Thermal Stress of CRCP Based on Actual Boundary Condition [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23 (6): 14-17.
-

《公路交通科技》进入全国科技期刊综合排名 50 强

日前, 科技部中国科技信息研究所公布了《2010 版中国科技期刊引证报告 (核心版)》, 根据该报告的统计, 《公路交通科技》在全国 1 946 种期刊综合评价得分为 81.5, 排名位列第 39 位, 比去年的第 81 位前进了 42 位。

由科技部中国科技信息研究所每年发布的《中国科技期刊引证报告 (核心版)》是目前国内对期刊评价的最权威报告之一, 主要通过对科技期刊上一年度的影响因子、被引频次等 19 个定量指标的分析, 最终得出该期刊的综合排名。2009 年, 《公路交通科技》总被引频次为 1 917 次, 影响因子为 0.682, 分别位居交通运输工程类期刊第 1 名和第 3 名。