

# 路面质量检测技术和应用

## Applications of Pavement Surface Quality Detection Techniques

陆键，王辰良，潘宝堂

论文发表在2007年国际道路与机场路面技术委员会特别会议（中国路面施工与养护技术大会），北京，2007年3月16-17日

### 摘要

本论文对路面平整度检测仪和路面车辙自动测定仪的基本原理和应用技术作简单的讨论，并对其技术检验给出实际的结果。这些实验结果是基于上海市市政局的研究项目的基础上的。除此之外，本论文对各检测技术的应用中的一些注意事项作出一定的说明。最后对各检测技术常用的指标和范围给出必要的参考指标，以供检测技术的标准制定作参考之用。

### 1、引言

路面质量检测的范围主要包括：（1）路面平整度，（2）路面车辙深度，（3）路面弯程，（4）路面摩擦系数，（5）路面破损，（6）路面构造深度。在所有这些检测中，路面平整度和路面车辙深度是最重要的，而且在我国交通部的行业标准，检定规程和验收规范中，路面平整度和车辙深度的检测技术也相对全面。路面平整度的检测可客观的反映行使车辆中乘客所感觉的舒适度，而路面车辙深度则能客观地反映路面对行使的车辆所提供的行使安全水平。一般说来粗糙的路面会让行使车辆中的乘客产生不舒服感。而较深的车辙则有可能形成积水和积冰，对行使的车辆造成不安全因素。事实上，路面平整度指标和路面车辙深度指标也是路面管理系统中的最为重要的指标。在我国交通部有关的标准，检定规程和验收规程方面，相对于路面弯程，路面摩擦系数和路面磨损而言，路面平整度和车辙深度的检测技术具有较完整的技术指标，检定规程，和指标验收规范。

## 2、基本的检测技术

### (1) 平整度检测技术

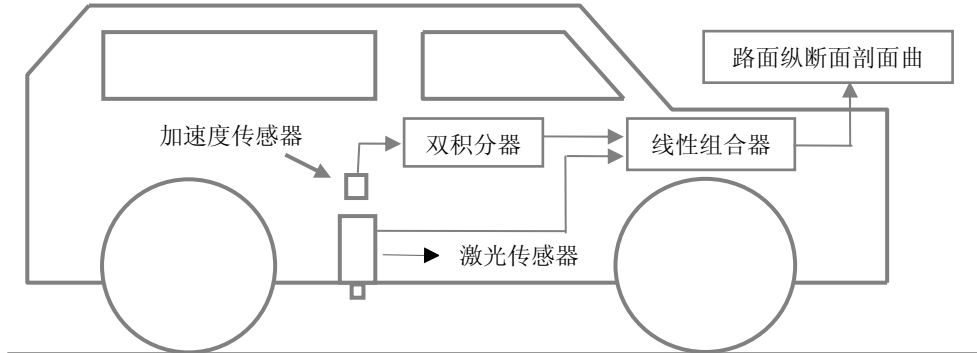
路面平整度的检测技术主要分为两大类，即直接式检测和响应式检测。直接式检测又分为步行式检测和高速惯性检测。一般说来步行式检测的检测精度较高，但检测速度较慢，因此主要用于路面施工质量验收和给其它平整度仪的标定提供参照。这些年来，一些路面施工单位已陆续采用步行式路面平整度检测仪进行施工过程中平整度质量的过程控制。图一显示的是目前较为先进的手推式（步行式）平整度检测仪的检测原理图和照片。目前在我国路面平整度检测仪的应用中，大多先进的技术主要应用于高等级的公路上，而城市中道路的平整度检测技术仍停留在三米直尺或八轮仪检测的技术上。事实上自动化手推式（步行式）完全可应用于城市道路的路面平整度检测，其主要原因是其体积小，自动化程度高，搬运方便，操作灵活，启动和停止方便，不受其它交通的影响。



图一、达普勒斯平整度仪

直接式平整度检测技术的另一类是高速检测技术，主要是以检测车垂直加速度作为惯性参照。图二显示的是高速惯性平整度仪（也称激光平整仪）的检测原理图和外形照片。由图可知，激光传感器主要是检测路面与车体之间的动态距离，加速度传感器主要是检测车体的垂直加速度，然后由双积分器完成二次积分获得车体的动态垂直弹跳。双积分器的输出和激光传感器的输出的组合即可获得路面纵断面剖面的曲线图，然后由软件可计算出国际平整度指标（IRI）。由于激光平整度仪可在高速

行驶条件下工作（与普通车速一样），因此可用于长距离的平整度检测，即可用于路面施工质量验收，又可用于路面管理的周期性检测和评价。

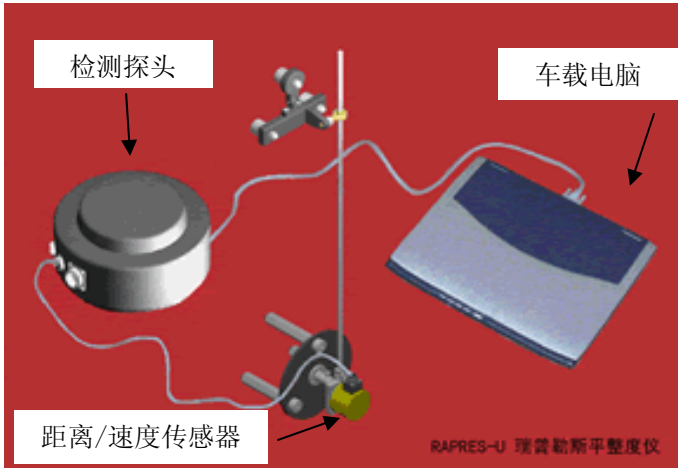


图二、激光平整度仪的系统原理图（上图）和外形照片（左图）

响应式平整度检测仪的主要目的不是获得路面的纵断剖面曲线，而是获得乘客对路面变化的感觉，也称动态反应。在技术上，乘客对路面变化的动态感觉是无法客观地检测出的。因此在技术上常用其它的客观物理量来代替乘客的动态感觉，而且必须是可测的。目前在国际上最为流行的技术是机械式检测，即检测出车体与轮轴之间弹跳的距离累积（也称机械式颠簸累积仪）和电子式检测，即检测车体的垂直加速度（也称电子式或响应式颠簸累积仪）。图三显示的是电子式颠簸累积仪的硬件系统和检测式。硬件系统是装在检测车内的，可随时拆卸。一般响应式平整度检测仪可在正常车速的状况下检测，但无法获得路面纵断剖面曲线，因此可用于快速，长距离的平整度检测，仅可用于周期性的平整度评价，而不能用于路面质量的验收。

从单纯技术上讲，直接式平整度检测仪可直接获得路面纵断剖面曲线，且对检测车速不太敏感，而响应式平整度检测仪的检测结果受车辆减震系统的影响，因此检

测车速会对检测结果有较大影响，同时需要定期实施技术标定（一般6 - 12个月标定一次）。



图三、电子式颠簸累积仪硬件系统

## (2) 路面车辙检测技术

目前在国际上较为广泛使用的路面车辙检测技术是激光多探头的路面横断面多点检测技术。图四显示的是多激光探头的路面车辙检测仪（也称路面车辙自动测定仪）及检测示意图。从图中可知，激光传感器的主要功能是：测出路面与检测横梁之间的间距，由此可获得路面横断面剖面，同时通过车载式电脑对路面横断面剖面进行处理，获得路面车辙深度指标。由于车辙检测仪的检测横梁不够宽（一般在2.6米以内），为检测整个车道的横断面，检测横梁上边上的两个激光传感器必须要斜装，这也是国际上最为常用的办法。

## 3、检测仪的技术检验

一般检测仪的最重要的指标是与标准检测的相关性及检测仪本身检测的重复性。在路面检测中，若不知道路面的实际剖面曲线，检测仪的检测精度（准确度）是无法确认的。

### (1) 平整度检测仪的检验

笔者在过去的几年间曾领导一研究组完成了上海市市政工程局的一项研究任务，研

究课题的主要内容是国内现有的主要的平整度检测系统进行技术检验和制定相应的技术标准。技术检验的主要内容是检测仪相对标准检测的相关性及仪器本身的重复性。在研究项目中，精密水准仪用来测试路面纵断面剖面曲线，然后由电脑程序计算每个检测路段的平整度指标（主要是国际平整度指标IRI）。因此，由精密水准仪测得的国际平整度指标（IRI）可作为标准检测，为相关分析提供标准参考。

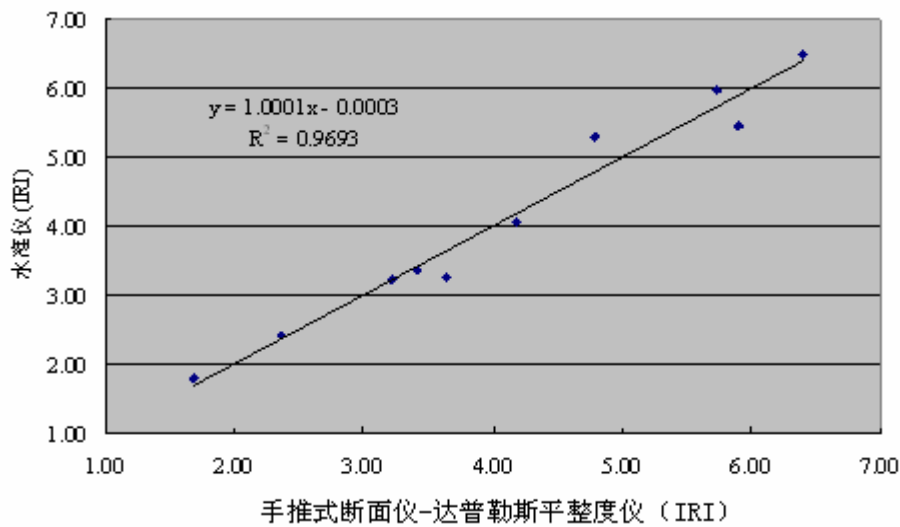


图四、多激光探头路面车辙自动测定仪（左图）及检测示意图（上图）

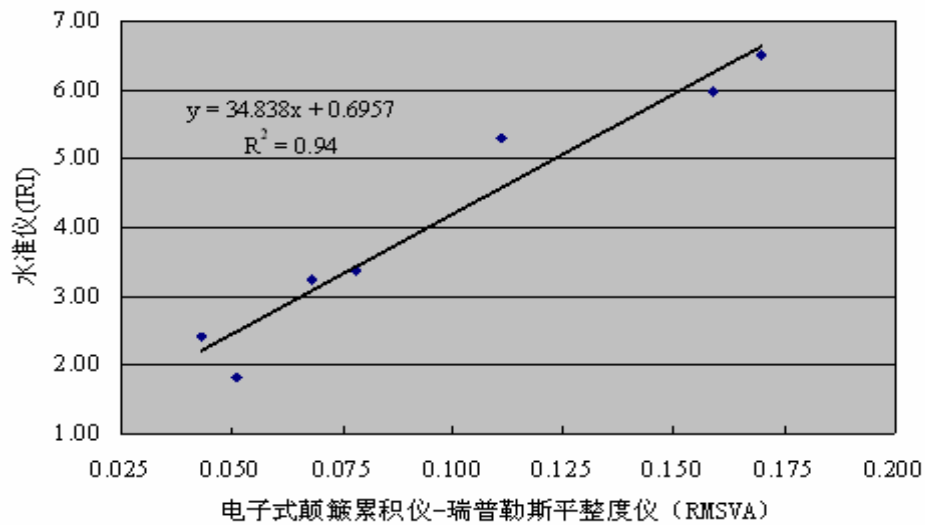
相关性的检验是在上海浦东新区完成的，共有10条实验路段选作实验路段，每段长为150 - 200米。图五 - 七分别显示的是手推式（步行式）平整度仪，电子式（响应式）颠簸累积仪和激光高速平整度仪与标准检测的相关性。可以看出，这三种平整度仪与标准检测都具有良好的相关性。

如前所述，相关性是检验平整度仪质量性能的一个重要指标之一。但相关性的好坏有时也取决于现场检测的手段和方法。在一般条件下，试验路段越少，有可能会导导致较高的相关性（高 $R^2$ 值）。从合理地相关分析的角度来说，实验路段越多越好，一般应多于5条实验路段，而且尽可能包括各种平整度条件下的试验路段。

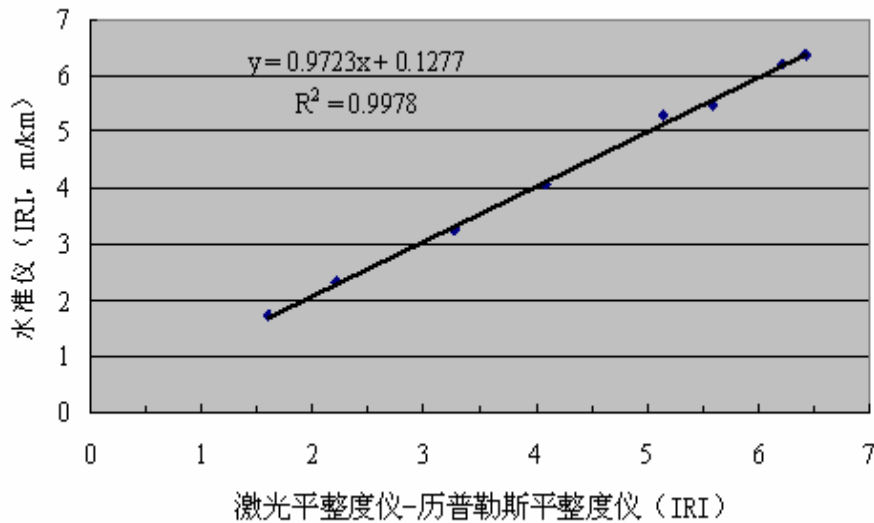
平整度仪的重复性检验是为了证明检测仪的稳定性，也就是对同一试验路段进行多次重复检验，而其它的给定条件则保持相对稳定。多次重复检验的标准偏差（或方差）是反映平整度仪重复性的一个较客观的指标。标准偏差越少，表示重复性越好。本重复性检验是在上海浦东新区的金科路上完成的。表一列出了多种平整度检测仪在此试验路段上重复性检验的结果。可以看出，这几种平整度仪都有较好的重复性。与相关性检验一样，重复性检验的过程对检验的结果有一定的影响。合理和正确地检验过程将会使检验结果更为客观和可靠。



图五、手推式断面仪 (IRI) 与水准仪 (IRI) 的相关性



图六、电子式颠簸累积仪 (RMSVA) 与水准仪 (IRI) 的相关性



图七、激光平整度仪 (IRI) 与水准仪 (IRI) 的相关性

表一、各种平整度检测仪的检测重复性 (国际平整度指标IRI- m/km)

平整度检测仪	测试1	测试2	测试3	测试4	重复性 (标准偏差)
手推式平整度仪 (DAPRES)	2.25	2.28	2.22	2.24	0.025 m/km
响应式平整度仪 (RAPRES)	2.31	2.37	2.22	2.25	0.067 m/km
激光平整度仪 (LIPRES)	2.29	2.18	2.21	2.20	0.048 m/km

## (2) 路面车辙仪技术检定

路面车辙仪动态相关性检验是一项较为困难的工作，主要原因是无法找到一种精度较好的相对检验标准。采用自动化检测手段来获得路面的车辙深度数据并使之成为标准检测结果，这本身就是一个问题，原因是如何验证这个标准检测结果的正确性。因此只有采用人工的方法来获得标准检验结果，这将是十分费时和费力的工作。正因为如此，国际上的路面车辙检测仪的动态检验一般只涉及到动态重复性的检验。本论文所涉及的路面车辙检测仪的动态检验也只涉及到重复性的动态检验。本研究的车辙检测仪重复性检验的试验路段选在上海市外环线，这些试验路段也有多年的运营历史，因此有较为明显的路面车辙深度。表二列出了路面车辙仪的重复性动态检验数据。从表二的数据可以看出，路面车辙仪有相对较好的动态检测重复性。

表二、路面车辙自动测定仪（亚普勒斯车辙仪）的重复性动态检验结果

试验路段	车辙深度指标RD (mm)				重复性 (标准偏差)
	测试1	测试2	测试3	测试4	
路段1	6.7	7.3	7.1	6.9	0.26 mm
路段2	7.2	8.0	7.6	7.6	0.33 mm
路段3	5.7	6.1	6.3	6.2	0.26 mm

#### 四、常用的评价指标

从一般的应用来说，衡量平整度检测仪的最为主要的指标有以下几个：（1）平整度指标检测范围，（2）检测结果与标准检测的相关性，（3）检测结果的重复性，（4）检测仪可检测的路面波长范围，（5）检测仪的最小采样间隔，（6）连续可检测的距离，（7）检测速度。对路面车辙自动测定仪来说，其主要指标有：（1）可检测的最大车辙深度，（2）检测结果的重复性，（3）检测仪的最小采样间隔，（4）连续可检测的距离，（5）可测得的路面横断面宽度，（6）检测速度。除此之外，检测车（仪）的纵向距离检测精度和分辨率也是衡量检测仪质量的重要指标。表三列出了常用的指标范围，可供制定基本的检测仪标准之用。

表三、检测仪常用的技术指标范围

##### 激光平整度检测仪

平整度指标检测范围	与标准检测的相关性	检测结果的重复性	可检测路面波长范围	最小采样间隔	连续可测距离	检测速度
IRI: 0 - 12 m/km	$R^2 > 0.95$	标准偏差 < 5%	0-80 m	1 mm	> 50 km	0 - 100 km/h

##### 路面车辙自动测定仪（车辙检测仪）

可检测的最大车辙深度	检测结果的重复性	最小采样间隔	连续可测距离	可测得的路面横断面宽度	检测速度
RD: 0 - 100 mm	标准偏差 < 5%	500 mm	> 50 km	2.5-3.5 m	0 - 100 km/h

##### 检测车纵向距离检测装置

纵向距离检测精度	纵向距离检测分辨率
10 mm	< 1%



## 5、检测仪的应用注意事项

路面检测仪的应用具有一定的操作局限性，若操作不当，其检测结果就有可能缺乏可依赖性。。

### (1) 检测仪操作过程对检测结果的影响

路面质量检测结果有时往往受仪器操作过程的影响。在操作过程中主要考虑的因素有：（1）检测的起点和终点，（2）检测的速度，（3）检测车的载重，（4）检测的轮迹。在检测过程中必须明确列出检测的起点和终点，尤其是在作重复性检测时，若重复性检测的起点和终点不一致，则检测的重复性会受到影响。大量的实践已表明检测仪的运行速度对检测的结果会有一定的影响（尤其是响应式平整度检测仪）。在实际检测时必须严格规定检测的行驶速度，并尽可能使检测仪按此速度平稳的运行，否则检测结果会受到一定的影响。对响应式平整度检测仪来说，车体的载重会直接影响到车体对路面不平整的动态响应。一般来说，在技术标定时要规定车体的载重（如以人数为准），在实际检测时也应使检测车保持此重量，以确保检测结果的准确性。平整度和车辙的检测结果还取决于检测车在路面横断面的上的位置。若检测车的横向位置不同，其平整度或车辙检测的结果也不同。在作重复性检测或作对比试验及标定仪器时，一般要尽可能使仪器行驶在指定的轮迹上，减少检测偏差。

### (2) 平整度检测仪可检测的路面波长检测的范围

路面纵断面剖面曲线事实上反映的是一个随机过程。剖面曲线既有长波长的剖面也有短波长的剖面。长波长的剖面主要由大斜坡，桥面，以及起伏缓慢的剖面组成，主要反映的是路面剖面较宏观的部分，而短波长的剖面则是剖面起伏较快的部分，反映的是路面剖面较微观的部分。乘客在坐车时，当车的行驶速度在 80km/h 时，对波长的敏感范围大约在 0.3m - 80m 之内。一个比较好的直接式（类）平整度检测仪一般要尽可能检测出包括以上波长范围的路面纵断面曲线。从理论上讲，精密水准仪和手推式断面仪（路面纵断面剖面检测仪）均能达到此要求。激光断面仪一般能检测出 80m 以下波长的路面，因此也能满足要求。而连续式平整度仪（八轮仪）由

于其前后轮支架之间的间距为 3 米，根据数字采样定理，最多仅能检测出 1.5 米波长的路面（即仅能检测短波长的路面）。

事实上，平整度检测中最重要的二个指标为国际平整度指标 IRI 和平整度标准差  $\sigma$ 。IRI 检测所需要包括的波长范围为 0.3~80m，而  $\sigma$  检测所需包括的仅为短波长的路面，一般取决于八轮仪的检测波长范围。因此，如果要直接检测 IRI，则必须使用精密水准仪，手推式断面仪，或激光平整度仪，用八轮仪是无法直接获得 IRI 的。而  $\sigma$  的检测则可采用各种直接式平整度仪，但必须限定检测的波长范围。我国在路面质量测试规程中未涉及到  $\sigma$  的检测的波长范围，这也是不足之处。

### （3）响应式平整度检测仪的定期标定

响应式平整度检测仪主要是检测车体对路面的动态响应，而不是检测路面纵断面剖面，因此无法直接得到 IRI 和  $\sigma$ 。为获得平整度指标 IRI 和  $\sigma$ ，响应类平整度检测仪需通过参考标准检测来进行技术标定，将测得的平整度指标换算成 IRI 和  $\sigma$ 。一般响应式平整度检测仪测得的平整度指标与直接式平整度仪测得的 IRI 和  $\sigma$  具有线性相关性，因此标定的过程也是相关分析的过程。

由于响应式平整度检测仪是通过检测车体对路面纵断面剖面变化的动态响应而获取平整度指标的，当车体的机械性能（如悬挂系统）发生变化时，其动态响应的特性也将发生变化，导致检测结果发生变化。因此响应式平整度检测仪需定期进行技术标定（即定期通过相关分析得到新的线性关系）。一般情况下，响应式平整度检测仪需 6~12 月进行一次标定。标定用的参照检测（标准检测）可采用路面纵断面剖面仪（如手推式断面仪或激光断面仪）来完成，也可采用精密水准仪，但其过程是十分耗时耗力的，一般不建议采用。标定的详细过程可参阅《路面平整度评价体系及其工程应用研究》<sup>1</sup>。

### （4）检测仪的定期养护和校正

---

<sup>1</sup>陆键（东南大学），李俊（上海市高速公路技术学科研究发展中心），等，《路面平整度评价体系及其工程应用研究》，上海市建设与交通委员会项目（项目编号：A0300452）研究报告，2005 年

平整度检测仪和车辙检测仪与其它检测仪器一样，需定期进行养护和校正。由于平整度检测仪和车辙检测仪应用在道路检测中，其操作环境相对恶劣，更应多加以保养和校正。在一般条件下，检测仪的传感器有一定的使用寿命，超过时限后，会影响到检测质量，如温度漂移会更严重，非线性会更明显，精度下降，动态响应变差等。因此必须在使用期限到来之前更换传感器。当这些另器件更换后，检测仪需进行校正，主要原因是各种传感器的性能不相同，会使检测结果不一致。一般静态校正主要是对传感器的零点和放大系数进行设置，而动态系统校正大多依靠技术标定。由于这些养护和校正涉及到技术问题，一般应由检测仪的生产厂家的技术人员来完成。对于国产的检测仪相对说来较方便些，费用也低；而对于进口的检测仪来说，则极为不方便，而且费用极高。因此，一般建议平整度检测仪和车辙检测仪最好购买国内产品，以利于养护和校正。若需买进口的检测仪，则必须保证在国内有定点维修站。若检测仪不实施定期的保养和校正，则测得的结果会有较大的偏差。

#### （5）检测规范和技术标准

我国交通部在行业规范中对路面施工质量验收和养护有平整度检测和车辙检测的规范要求。早期的规范要求检测的平整度指标包括三米直尺检测结果和平整度标准差。随着平整度检测新技术的不断改进，国际平整度指标IRI被引入到规范中来，并逐渐成为主要的平整度检测指标。必须强调的是我国行业规范中并未指定何种平整度检测仪（若指定平整度检测仪则会导致于行业垄断）。事实上，任何平整度检测仪只要在技术上达到要求，同时能获得国际平整度指标IRI或平整度标准差，均符合规范的要求。如此解释将有利于平整度检测技术的发展，防止过时的平整度检测技术垄断行业。路面车辙检测的规范是要求检测车辙深度指标。2005年交通部制定了路面车辙自动测定仪的技术标准和检定规程<sup>2</sup>，从而使路面车辙检测技术标准化，并使车辙检测仪的技术检定规范化。

## 六、小结

---

<sup>2</sup>中华人民共和国交通行业标准（JT/T613—2004）《路面车辙自动测定仪》，2005年

路面平整度检测仪和路面车辙自动测定仪是路面质量最为主要和重要的检测系统。随着我国公路建设的发展，这些检测技术的应用将变得更加迫切。目前为止，我国在这方面的技术已达到了相当的程度，国内已有多家企业能制造出达到国际先进水平的检测仪。但在应用上，我国尚较为落后，大多仍停留在人工检测的水平。事实上，先进的路面检测技术的应用已相当迫切了，交通部也明确表示我国公路建设和养护要采用先进的检测技术，并采用国际上普遍采用的检测指标（如国际平整度指标IRI和车辙深度指标RD）。可以预见，在不久的将来，我国将全力推广使用先进的路面检测技术，以适应我国公路建设和养护管理的需求。