

# 基于无损检测技术的机场道面承载能力评价应用

李柱峰<sup>1</sup>, 黄志勇<sup>2</sup>, 陈 搏<sup>2</sup>

(1. 广州白云国际机场股份有限公司, 广州 510406; 2. 广州肖宁道路工程技术研究事务所有限公司, 广州 510641)

**摘要:**机场跑道路面的隐性结构病害严重威胁飞机的运行安全,为了准确、及时对道面结构承载能力进行检测和内部结构病害的精准识别,依托广东白云机场开展跑道道面无损检测技术研究。采用落锤弯沉仪法获取的弯沉盆反演道面结构层弹性模量,联合水泥板间弯沉比传递系数,可以全面评价机场道面承载能力,模量偏低的道面水泥板,其板间弯沉比传递系数偏小,二者间存在良好的映射关系。采用三维探地雷达技术开展道面结构层内部病害检测,发现弯沉比传递系数偏低位置出现传力杆断裂、变形,混凝土板内部破碎,接缝处积水等问题,建议对不同病害开展分质处治措施。两种无损检测技术的结合可以高效检测与评价跑道道面路用性能,也为路面病害探测与处治提供准确可靠的技术依据。

**关键词:**机场道面;落锤弯沉仪;三维雷达;承载能力;结构病害

**中图分类号:**U416.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2019)10-0158-05

中国民用机场跑道路面以水泥混凝土为主,比例高达90%以上。随着时间推移,除小部分新建机场外,我国大部分机场使用年限较长,出现了开裂、嵌缝料破坏及沉陷等病害,导致机场道面承载能力以及使用性能下降,难以保证飞机的安全起飞与降落<sup>[1]</sup>。为避免病害进一步扩张发展以及影响道面使用性能,迫切需要开展营运机场道面的综合检测评价研究工作,及时发现机场道面承载力不足以及存在结构损坏的路段,开展维修养护工作。

近年来,国内公路行业使用落锤式弯沉仪(FWD)在路面结构强度方面进行了较多的应用,并在机场道面检测中开展了较多的应用尝试<sup>[2]</sup>。落锤式弯沉仪能较好地评价机场道面承载能力及接缝传荷性能,发现承载能力不足路段。然而,承载能力不足段落往往存在路面内部结构损坏,落锤式弯沉仪无法评价路面内部结构完整性,根据结构损坏类型,采取针对性的处治措施<sup>[3]</sup>。对于路面结构病害的检测,主要采用现场人工目测调查路表开裂、错台等病害;对于内部结构脱空、松散等,常用钻芯取样法,对路面造成二次破坏,且容易成为后期运营的薄弱点。因此,道路的无损检测技术应运而生。路面内部结构损坏检测方法主要有基于电磁波反射原理的探地雷达

法,包括二维探地雷达和三维探地雷达<sup>[4-5]</sup>。二维探地雷达与三维探地雷达检测原理相同,具根据路面内部电磁回波判定路面内部结构状况。二者区别在于,二维探地雷达法单次检测只能采集一个纵剖面数据,难以准确判断路面内部状况;三维探地雷达采用多通道天线,可采集覆盖全断面的多道纵剖面数据并重构为三维图像,大幅降低了对道面内部病害的误判率<sup>[6-7]</sup>。

本文拟采用落锤式弯沉仪检测道面结构承载能力及接缝传荷性能,针对承载能力不足及接缝传荷性能不足路段,采用三维探地雷达作为辅助检测手段评价薄弱段落路面内部结构状况,以便开展针对性处治措施。

## 1 落锤式弯沉仪检测原理

### 1.1 基本原理

落锤式弯沉仪主要用以测量路面弯沉变化,工作原理见图1。主要使用电脑控制器操作重锤的提升与下落,对路面施加动态脉冲荷载,通过调整落锤重量和下落高度改变脉冲荷载。道面的变形由9个传感器采集,荷载影响区域形成弯沉盆。FWD测量速度快(40秒/单点),弯沉值相对精度小于1%±1微米,设备的分辨率为1微米,所测荷载精度为小于

收稿日期:2019-05-30

基金项目:广东省科技厅科技计划项目(2014B010105005)。

作者简介:李柱峰(1981—),男,广东从化人,广州白云国际机场股份有限公司,飞行区管理部,助理工程师,大学本科,主要从事机场跑道运营与管理工作。

2%±0.3 kN。分辨率为 0.03 至 0.2 kN(对荷载),大小由荷载幅值确定。相比贝克曼梁静态弯沉法,FWD 可以更好地模拟交通动荷载作用,是较理想的快速检测设备,为路面结构承载能力测试与评价提供了关键技术支持。

本测试采用 FWD 检测道面板板中、板边两个位置的动态弯沉,对于出现裂缝的道面板块还需检测板角的弯沉,以评定道面板是否脱空。根据《民用机场

道面评价管理技术规范》的规定,测点应沿着机场典型机型的两条轮迹线交替布置,测点纵向间距小于或等于 50 m。本次测点布置的纵向间距为 50 米,即每 10 块板为间距设置两个测点,分别位于板中和板边(出现裂缝板块还包括板角),板中荷载为 140 kN,板边荷载为 50 kN,板角三级荷载分别为 50 kN,100 kN,120 kN,测点沿着轮迹带交替布设。

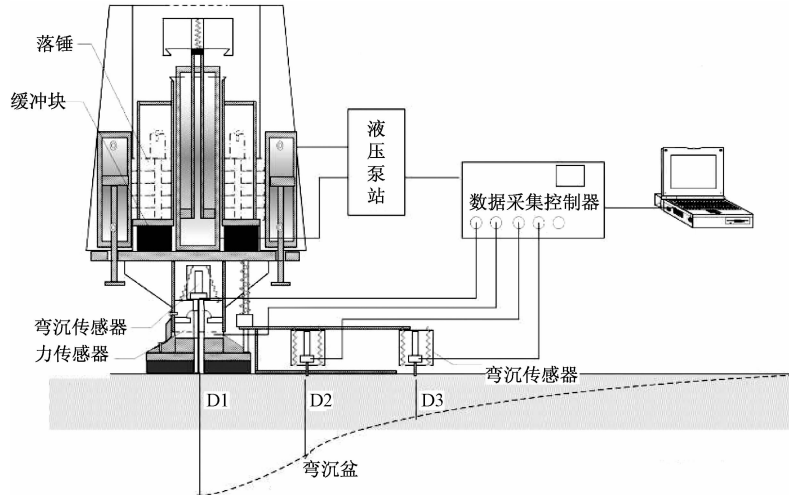


图 1 落锤式弯沉仪工作原理

## 1.2 道面承载能力评价原理

按机场道面技术规范推荐的计算方法,根据弯沉盆面积指数进行道面结构参数反演方法计算水泥混凝土道面基层顶面的反应模量  $K$  和水泥混凝土板弹性模量  $E_r$ ,最后采用水泥混凝土板弹性模量评价道面承载能力。具体计算步骤如下:

$$A_w = \frac{s}{2d_0} [d_0 + 2(d_1 + d_2 + d_3 + d_4) + d_5] \quad (1)$$

式中,  $A_w$  为弯沉盆面积指数(m);  $s$  为传感器之间的间距,取值为 0.3 m;  $d_0$  为荷载中心处弯沉值(m);  $d_i$  为第  $i$  个传感器的弯沉值(m)。

$$l = a_1 A_w^7 + a_2 A_w^6 + a_3 A_w^5 + a_4 A_w^4 + a_5 A_w^3 + a_6 A_w^2 + a_7 A_w^1 + a_8 \quad (2)$$

式中:  $l$  为道路结构的相对刚度半径(m);  $a_i$  为回归系数,取值见表 1。

表 1 回归系数  $a$  的取值

| $a_1$ | $a_2$  | $a_3$ | $a_4$  | $a_5$ | $a_6$  | $a_7$ | $a_8$ |
|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|
| 282   | -1 951 | 5 779 | -9 477 | 9 289 | -5 438 | 1 761 | -243  |

$$\bar{w}(l) = b_1 l^7 + b_2 A^6 + b_3 A^5 + b_4 A^4 + b_5 A^3 + b_6 A^2 +$$

$$b_7 A^1 + b_8 \quad (3)$$

式中,  $\bar{w}(l)$  为荷载中心位置处的弯沉系数(m-1);  $l$  为道面结构的相对刚度半径(m);  $b_i$  为回归系数,取值见表 2。

表 2 回归系数  $b$  的取值

| $b_1$ | $b_2$ | $b_3$ | $b_4$ | $b_5$ | $b_6$ | $b_7$ | $b_8$ |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| -0.2  | 2.0   | -8.9  | 21.8  | -31.1 | 26.1  | -12.1 | 2.5   |

$$K = \frac{qr \bar{w}(l)}{d_0} \quad (4)$$

式中,  $K$  为基层顶面的反应模量(MN/m<sup>3</sup>),下同;  $q$  为 FWD 测试承载板接地应力(MPa);  $r$  为 FWD 测试承载板半径,取值为 0.15 m;  $d_0$  为荷载中心处弯沉值(m)。

$$E_r = \frac{12(1-\mu^2)Kl^4}{h^3} \times 10^{-3} \quad (5)$$

式中,  $E_r$  为水泥混凝土板的弹性模量(GPa);  $\mu$  为水泥混凝土材料的泊松比,取值为 0.15;  $h$  为道面结构有效厚度(m)。

## 1.3 道面接缝传荷能力评价指标

采用 FWD 在板边进行中点跨缝测量,根据检测

接缝两边弯沉检测结果计算弯沉比传递系数  $LTE_{\delta}$ 。以评价水泥混凝土道面接缝传荷能力, 计算公式如下:

$$LTE_{\delta} = \frac{D_{\text{unload}}}{D_{\text{load}}} \quad (6)$$

式中:  $LTE_{\delta}$  为弯沉比传递系数(%);  $D_{\text{unload}}$  为未受荷板距缝 15 cm 处的实测弯沉( $\mu\text{m}$ );  $D_{\text{load}}$  为受荷板距缝 15 cm 处的实测弯沉( $\mu\text{m}$ )。

## 2 三维探地雷达检测原理

本研究采用的是路用三维探地雷达系统, 包括 GeoscopeTM MKIV 雷达主机、DX 系列多通道空气耦合天线阵。探地雷达主要通过发射与接收特定频率范围的电磁波信号来识别地下结构特征, 最后进行采集分析与处理, 工作原理如图 2 所示。

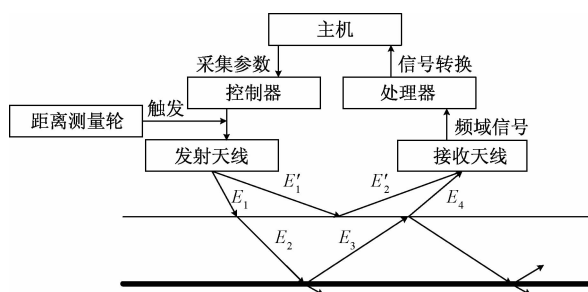


图 2 三维探地雷达工作原理

发射的电磁波在检测物质中传播时, 被检测介质的电参数(沥青路面为非磁化, 非导电材料, 主要为介电常数)发生变化, 部分电磁波向后散射(被接收天线采集), 部分电磁波继续传播, 反射电磁波电平可通过式(7)、式(8)计算。

$$\Gamma_{1,2} = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (7)$$

$$E_{ri} = E_i \Gamma_{1,2} \quad (8)$$

式中,  $\Gamma_{1,2}$  为电磁波传播过程中的反射系数,  $\epsilon_{r1}$  为入射侧介质介电常数,  $\epsilon_{r2}$  为出射侧介质介电常数,  $E_i$  为入射侧电磁波电平,  $E_{ri}$  为反射电磁波电平。

表 3 常见物质的相对介电常数

| 材质     | 空气 | 水     | 铁       | 水泥混凝土 |
|--------|----|-------|---------|-------|
| 相对介电常数 | 1  | 75~88 | $>10^4$ | 4~11  |

水、空气、铁以及水泥混凝土相对介电常数如表 3 所示。空洞、破碎、高含水率区域等病害内部为水或空气, 传力杆等结构物所用材料为铁。由表 3 可知, 电磁波传播到空洞、破碎、高含水率区域以及传力杆等区域时电磁波便发生反射, 不同的地下目标体材

料属性不同, 导致产生电磁回波存在差异, 将接收的反射电磁波进行处理与分析, 根据电磁回波的特征信号, 可获得道路结构相关状况。其中, 传力杆雷达图像特征信号为长条形的高亮强信号如图 3、图 4 所示。

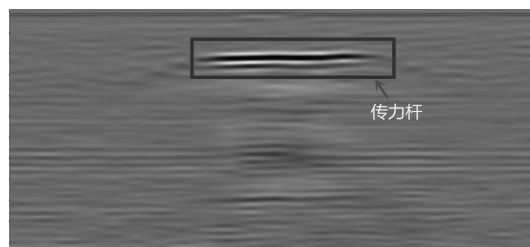


图 3 传力杆雷达纵向剖面图



图 4 传力杆雷达横向剖面图

## 3 工程应用

### 3.1 工程概况

依托广东白云机场选取跑道道面中承受轮载最大的区域, 即飞机轮迹带处开展 FWD 及三维探地雷达检测, 以评价路面结构承载能力及内部结构状况。跑道结构为: 42 cm 水泥混凝土 + 18 cm 水泥碎石 + 18 cm 水泥碎石 + 30 cm 混渣垫层。

### 3.2 检测方案

采用 FWD 检测道面板板中、接缝两个位置的动态弯沉, 测点纵向间距为 50 米, 即每 50 米设置两个测点, 分别位于板中和板边。板中荷载为 140 kN, 接缝处荷载为 50 kN, 分别计算水泥混凝土板弹性模量与弯沉比传递系数。对于承载能力较低的位置, 采用三维探地雷达检测该测点前后 5 m 路面内部结构状况。

### 3.3 检测结果讨论与分析

#### 3.3.1 道面承载力评价

根据 FWD 采集的道面弯沉盆数据, 反演计算道面水泥混凝土板弹性模量(见图 6)和弯沉比传递系数(见图 7)。

由检测结果可知, 水泥混凝土板弹性模量均值为 35.4 GPa, 最大值为 45.6 GPa, 最小值为 26.3 GPa。其中 K0+100、K0+450 两处弹性模量偏低, 均小于 30 GPa, 为该路段承载力的薄弱部位。进一步对水



(a) FWD检测



(b) 三维雷达检测

图5 现场检测

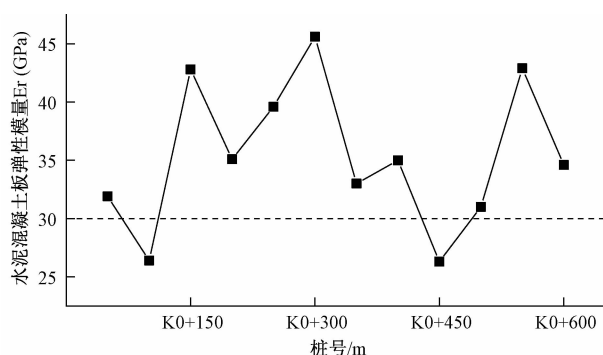


图6 道面水泥混凝土板弹性模量

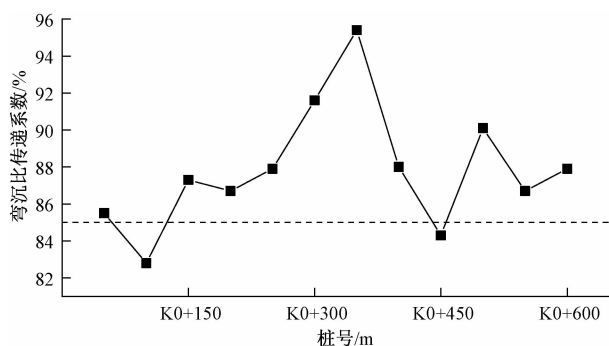


图7 水泥板间弯沉传递系数

泥混凝土板的整体承载性能进行评价,采用弯沉比传递系数作为指标,计算结果见图7。根据弯沉比传递

系数评价标准,该路段的大部分板块间弯沉比传递系数均在85%以上,处于优良状态。弯沉比传递系数最大值为95.4%,最小值为82.8%,其中K0+100、K0+450两处弯沉比传递系数小于85%,该部位与水泥混凝土板弹性模量薄弱点处于同一段落,说明水泥板间弯沉传递系数与弹性模量存在紧密关联。而从现场的道面外观上看,水泥板块表面未出现明显的断板、开裂、错台等病害,而可能其内部结构出现一定的病害隐患,因此,有必要采用探地雷达对道面水泥混凝土板的薄弱部位进行损伤检测。

### 3.3.2 结构内部病害检测

根据机场道面承载能力及接缝传荷性能分析结果,采用三维探地雷达针对承载能力与接缝传荷性能均较差的K0+100、K0+450开展路面内部状况检测。检测结果如图8,图9所示。

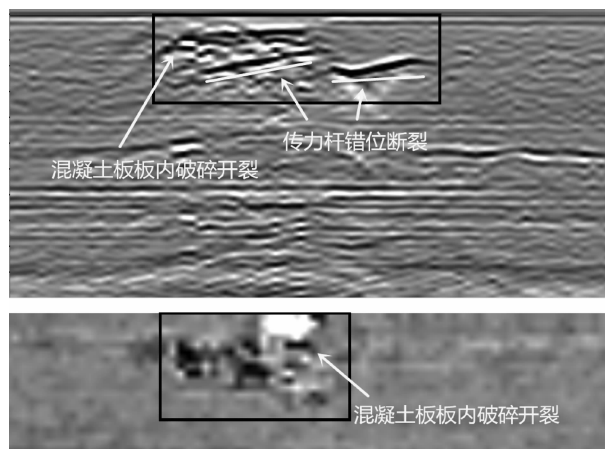


图8 K0+100处的雷达扫描图像

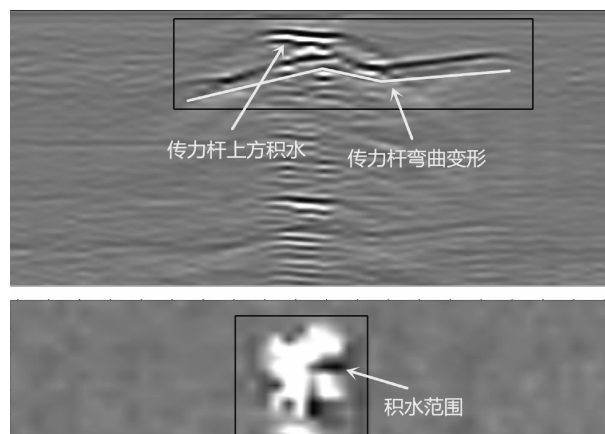


图9 K0+450处的雷达扫描图像

由雷达图像可知,K0+100接缝处传力杆信号出现上下错位的问题,传力杆连接的左边水泥板块存在板内破碎开裂。原因可能为飞机荷载作用下,传力

杆产生剪切应力过大,超出容许值,发生剪切破坏。传力杆断裂后,水泥混凝土板块板角间无法协同承担飞机荷载,导致板角应力过大,导致内部发生破碎开裂。

在 K0+450 断面,接缝处传力杆信号弯曲变形,传力杆上方存在高亮信号,一方面为传力杆在大荷载作用下发生的变形,另一方面可能在变形区域存在积水现象。究其原因,在飞机荷载作用下,传力杆发生重复荷载下的疲劳弯曲变形。经现场勘测确认,该处嵌缝料缺失,缝内存在积水,因此可确定该处高亮信号为高含水率区域雷达信号。

根据结构病害综合处治方法,对于出现脱空、传力杆变形、板内破碎等病害的道面板,建议采取注浆或直接更换板块,以保证机场道面安全运营。对于嵌缝料缺失、传力杆处积水导致传荷能力较差的板块,建议对嵌缝料进行修补,保证接缝传荷能力并防止雨水的下渗,避免出现唧泥并进一步发展成脱空病害。

#### 4 结论

1)与传统的贝克曼梁静载法相比,落锤弯沉仪能够更好地模拟飞机起降过程的冲击荷载,通过弯沉盆反演道面结构层弹性模量,结合水泥板间弯沉比传递系数,可以全面评估机场道面承载能力。实测数据规律表明,模量偏低的道面水泥板,其板间弯沉比传递系数偏小,二者之间存在着良好的映射关系。

2)采用三维探地雷达技术开展道面结构层内部病害检测,发现弯沉比传递系数偏低位置出现传力杆

断裂、变形,混凝土板内部破碎,接缝处积水等问题,建议对不同病害开展分质处治措施,以防病害扩展,影响飞机起降过程的交通安全性能。

3)采用 FWD 法能够快速评价机场道面厚水泥板承载能力,而三维探地雷达技术可以有助于全面探测结构内部各种病害,二者的结合可以高效检测与评价跑道道面路用性能,也为路面病害探测与处治提供准确可靠的技术依据。

#### 参考文献

- [1] 陈文来,凌建明,袁捷,李萌. 机场道面病害维修对策选择优化模型研究[J]. 公路工程,2012,37(3):79-84.
- [2] 史保华,操兵,张亚瑞,许巍,任伟. 基于重落锤式弯沉仪法(HWD)的公路飞机跑道沥青道面承载能力测试分析[J]. 科学技术与工程,2015,15(20):134-140.
- [3] 雷亚伟,程国勇,郭稳厚. HWD 测试方法的可靠性分析[J]. 中外公路,2016,36(1):57-62.
- [4] 张宇辉,张献民. 机场道面及其下部地基脱空的测试方法[J]. 交通运输工程学报,2016,16(6):1-11.
- [5] 向会伦,邵显智,安彦卿,余国祝. 利用无损探测技术研究机场道面错台成因[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2013,37(6):1323-1326.
- [6] 罗传熙,张肖宁,虞将苗,李伟雄,阳经培. 基于介电常数沥青路面均匀性评价[J]. 科学技术与工程,2018,18(15):305-309.
- [7] 罗斌. 探地雷达在路基路面异常体病害探测中的应用[J]. 公路工程,2007(6):153-156.

### Study on the Application of Airport Pavement Bearing Capacity Evaluation Based on Nondestructive Testing Technology

LI Zhu-feng<sup>1</sup>, HUANG Zhi-yong<sup>2</sup>, CHEN Bo<sup>2</sup>

(1. Guangzhou Baiyun International Airport Co., Ltd., Guangzhou 510406, China;

2. Xiaoning Institute of Roadway Engineering, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** The hidden structural disease of the airport runway pavement seriously threatens the safety of the operational aircraft. In order to accurately and timely detect the bearing capacity of the pavement structure and accurately identify the internal structural diseases, the non-destructive testing technology research is carried out based on the runway surface of Guangdong Baiyun Airport. Inversion of the elastic modulus of the pavement structure by the deflection cone method obtained by the drop hammer deflection method, combined with the coefficient of transfer ratio between the cement plates, can comprehensively evaluate the pavement cement with low bearing capacity and low modulus. In the board, the deflection between the plates is smaller than the transfer coefficient, and there is a good mapping relationship between the two. The three-dimensional ground penetrating radar technology is used to detect the internal disease of the pavement structure layer. It is found that the deflection and deformation of the force-transmitting rod occur in the position where the deflection is lower than the transfer coefficient, and the interior of the concrete slab is broken and the water is accumulated at the joint. It is recommended to carry out different treatment measures according to diseases. The combination of two non-destructive testing technologies can efficiently detect and evaluate the road surface performance of the runway, and provide an accurate and reliable technical basis for the detection and treatment of pavement diseases.

**Key words:** airport pavement; falling weight deflectometer; three-dimensional radar; bearing capacity; structural damage