

T/CCAATB

中国民用机场协会团体标准

T/CCAATB 0057—2024

民用机场道面智能检测与数字化管理规范

Specifications for intelligent inspection and digital management of civil airport
pavement

2024 - 5 - 23 发布

2024 - 6 - 23 实施

中国民用机场协会 发布

目 次

前言 II

1 总则 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和符号 1

4 检测装备/平台技术要求 3

5 道面表观与隐性病害智能检测方法与指标 3

 5.1 道面表观病害智能检测方法与技术要求 3

 5.2 道面隐性病害智能检测方法与技术要求 3

6 道面性能评价和预测方法 4

 6.1 水泥混凝土道面性能评价 4

 6.2 沥青混凝土道面性能评价 5

 6.3 道面性能预测 6

7 机场道面健康数字化管理系统 6

 7.1 智能检测数字化管理 6

 7.2 机场道面数字化管理系统 6

附录 A 表观破损指数（SDI）计算方法 8

附录 B 单一道面板结构隐性病害评价方法 10

附录 C 沥青混凝土道面性能指数（PPI）计算方法 13

附录 D 道面性能预测模型构建方法 16

 D.1 有 1 次检测数据时预测模型构建 16

 D.2 有 2 次检测数据时预测模型构建 18

 D.3 有 3 次及以上检测数据时预测模型构建 19

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本规范的发布机构不承担识别专利的责任。

《民用机场道面智能检测与数字化管理规范》共分七章，分别是总则、规范性引用文件、术语和符号、检测装备/平台技术要求、道面表观与隐性病害智能检测方法、道面性能评价和预测方法以及机场道面健康数字化管理系统。

本文件由成都圭目机器人有限公司提出。

本文件由中国民用机场协会归口。

《民用机场道面智能检测与数字化管理规范》由主编单位负责日常管理。执行过程中如有意见和建议，请函告成都圭目机器人有限公司（地址：四川省成都市龙泉驿区成龙大道888号总部经济港G4栋；邮编：610100；电话：028-64023186；电子邮箱：zhongxinran@gm-robot.com），以便修订时参考。

本文件起草单位：成都圭目机器人有限公司、同济大学、中国民航大学、北京首都国际机场股份有限公司、长安大学、哈尔滨工业大学、上海工程技术大学、上海同科交通科技有限公司。

本文件主要起草人：凌建明、桂仲成、袁捷、李海丰、王大为、钟新然、李永亮、张久鹏、李一凡、方志军、邓勇军、刘照炜、刘志福、张瑞军、陈君德、官盛飞、李柏林、杨戈、刘人玮。

本文件主要审查人：赵家麟、姜昌山、蔡良才、高志斌、李翔、魏亚、贾志国、毕军、杜文博、江慧娟、张天旺、朱方海、郝航程、滕小楷、闫光辉、杨巨成、汪剑鸣、李浥东、游庆龙。

本文件为首次发布。

民用机场道面智能检测与数字化管理规范

1 范围

本规范对民用机场飞行区道面智能检测的装备技术要求、道面表观和隐性病害智能检测方法与技术作出了要求，规定了道面表观病害、道面隐性病害和道面综合性能的评价方法，提供了道面综合性能预测方法，并对面向机场道面智能检测的数字化管理系统的基本功能、数据接入和交互方式等提出了要求。

本规范适用于使用智能检测方法的民用机场飞行区道面状况的定期调查、新建机场道面质量检测评定、运营机场道面维修养护前后的道面专项调查。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本规范必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本规范；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

MH/T 5024 民用机场道面评价管理技术规范
MH/T 5110 民用机场道面现场测试规程
MH/T 5049 四型机场建设导则
MH/T 5053 机场数据基础设施技术指南
MH/T 5004-2010 民用机场水泥混凝土道面设计规范
AC-140-CA-2010-3 民用机场飞行区场地维护技术指南
AP-140-CA-2022-04 运输机场飞行区场地管理办法
MH/T 5057-2021 智慧民航数据治理规范-数据安全
JGJ 437-2018 城市地下病害体综合探测与风险评估技术标准

3 术语和符号

3.1 术语

下列术语和定义适用于本规范。

3.1.1 智能检测 intelligent inspection

采用自动化、智能化等新技术手段对道面病害及道面性能状况进行调查和评估。

3.1.2 三维深度相机 3D depth camera

一种采用外部线激光光源，基于激光三角测量法的三维视觉采集设备，可同时测量三维形状、灰度、深度等多种特征。

3.1.3 三维探地雷达 3D ground penetrating radar

一种向被探测目标体发射高频电磁波束，通过观测反射电磁波的时间滞后及强弱特征以达到研究目标体特性的电磁勘探设备。

3.1.4 道面表观病害 pavement surface distress

出现在道面上，目视可见的病害。

3.1.5 道面隐性病害 pavement hidden distress

出现在道面结构内部，无法从表面观察到的隐蔽病害。

3.1.6 表观破损指数 surface damage index (SDI)

表征水泥混凝土道面表观病害状况的量化评价指标。

3.1.7 隐性病害率 hidden distress rate

表征水泥混凝土道面板整体隐性病害状况的量化评价指标。

3.1.8 道面性能指数 pavement performance index (PPI)

表征道面使用性能的综合量化评价指标。

3.1.9 机场道面数字化管理系统 digital management system for airport pavement

面向机场道面智能检测，用于道面智能检测中的数据管理、数据分析处理、道面性能评价、道面性能状况预测、以及道面数字化管理的软件系统平台。

3.1.10 地理信息系统 geographic information system (GIS)

利用计算机和地理信息技术，实现对各种空间、非空间数据的输入、存贮、查询、检索、处理、分析、显示、更新和提供应用，并以处理空间实体及其关系为主的系统。

3.2 符号

PCI —— 道面状况指数，无量纲

SDI —— 道面表观破损指数，无量纲

D_t —— 水泥混凝土道面隐性病害率，%

CDV —— 道面表观破损综合折减值，无量纲

PPI —— 道面性能指数，无量纲

4 检测装备/平台基本要求

4.1 检测装备/平台应能够搭载相机、探地雷达等无损检测装置，具备机场道面表观图像和内部电磁波反射信号等数据的自动采集和存储功能。

4.2 检测装备/平台可采用道面检测机器人系统或车载式系统，并具有智能化的自动采集功能。道面检测机器人系统应具备自动运行功能，可在检测区域内自动规划运行路径、自主定位导航。车载式系统应具备已覆盖面积提示、作业路径提示等辅助驾驶功能。

4.3 检测装备/平台作业时应保证检测区域全覆盖。

5 道面智能检测方法 with 指标

5.1 道面表观病害智能检测方法 with 技术要求

5.1.1 道面表观病害的检测宜采用基于激光线扫描的三维深度相机，实现道面二维和三维图像同步成像。相机搭载在检测装备/平台上且拍摄角度垂直于道面，针对待检测区域全覆盖采集数据，单张图像覆盖宽度宜大于 1 m。二维图像的水平平面空间分辨率应不低于 1 mm，三维图像的水平空间及深度分辨率应不低于 1 mm。

【条文说明】基于激光线扫描的三维深度相机采集可同时采集道面二维图像及道面三维深度图像，二维灰度图像可用于检测裂缝类、接缝类、修补等病害，三维深度图像可用于检测错台、轮辙等竖向位移类病害。

5.1.2 水泥混凝土道面需要检测的表观病害类型应包括：结构裂缝、接缝破碎、板角剥落、小补丁、大补丁、错台。

5.1.3 沥青道面需要检测的表观病害类型应包括：裂缝、竖向变形、补丁。

【条文说明】道面病害类型的划分是考虑到目前算法的检测精度和种类划分水平以及《民用机场道面评价管理技术规范》（MH/T 5024-2019）中描述的病害特征。对于水泥混凝土道面，结构裂缝这类病害包括纵向、横向和斜向裂缝、角隅断裂、破碎板或交叉裂缝、胀裂四种属于道面结构性损坏的裂缝，一方面，这些裂缝对道面性能影响较大，需要对其检测和记录，另一方面，这些裂缝相对较宽，通常能够被有效检测和记录；板角剥落为角隅处病害检测算法的结果，根据智能检测算法应用效果，板角剥落这类病害可能包含尺寸较小的角隅断裂、板角剥落和板角处的接缝破碎三种病害。对于沥青混凝土道面，裂缝包括各种裂缝类病害，竖向变形包括各种竖向变形类病害。

5.1.4 二维图像、三维图像和道面表观病害应按对应道面区域的空间位置进行全局拼接，并形成道面表观实景模型。

5.1.5 道面表观病害应在道面表观实景模型上提取完整信息，包括类型、位置、轮廓、尺寸。

5.1.6 道面表观病害识别宜采用自动识别技术，并可通过人工辅助识别、复核和更正病害信息。采用自动识别技术分析道面表观病害时，结构裂缝、接缝破碎、板角剥落病害的召回率应不低于 80%，准确率应不低于 80%。

5.2 道面隐性病害智能检测方法 with 技术要求

- 5.2.1 道面隐性病害的检测应采用三维探地雷达检测法，探地雷达中心频率宜为 400-900 MHz，作业时纵向采样间隔设置宜不大于 5 cm。探地雷达搭载在检测装备/平台上，针对待检测区域全覆盖采集数据。
- 5.2.2 三维探地雷达数据应按对应道面区域的空间位置全局拼接成道面整体雷达反射波组，并可通过三维切片方式查看任意位置的探地雷达图谱信息。
- 5.2.3 道面需要检测的隐性病害应包括：脱空、空洞、疏松、富水体、裂缝。
- 5.2.4 道面隐性病害应在道面整体雷达反射波组中提取完整信息，包括类型、位置、深度、投影轮廓和尺寸。
- 5.2.5 道面隐性病害分类及判读应按照《城市地下病害体综合探测与风险评估技术标准》（JGJ 437-2018）的有关规定执行。
- 5.2.6 道面隐性病害识别宜采用自动识别技术，并可通过人工辅助识别、复核和更正病害信息。采用自动识别技术分析道面隐性病害时，脱空、疏松病害的检出率应不低于 80%，准确率应不低于 80%。
- 5.2.7 道面隐性病害智能检测方法还宜能检测钢筋、管线等地下目标，并获取其位置、埋深等信息。

6 道面性能评价和预测

6.1 水泥混凝土道面性能评价

- 6.1.1 水泥混凝土道面性能评价应包括表观病害评价、隐性病害评价和性能综合评价。
- 6.1.2 水泥混凝土道面性能评价应以区块为基本单位进行评价，区块面积宜不小于 500 m²，区块划分应按照《民用机场道面评价管理技术规范》（MH/T 5024-2019）附录 A 执行。
- 6.1.3 水泥混凝土道面表观病害的评价指标应采用表观破损指数（SDI），应参照本规范附录 A 的有关规定进行计算，并参照表 6.1.3 的标准进行评定。

表 6.1.3 水泥混凝土道面表观破损状况评定标准

评价等级	优	良	中	差
SDI 范围	$SDI \geq 90$	$75 \leq SDI < 90$	$55 \leq SDI < 75$	$SDI < 55$

【条文说明】根据我国 32 个机场水泥混凝土道面的 PCI 计算结果，只有 3 个区块的 PCI 值小于 55，仅占区块总数的 0.99%，其占比极低，主要原因是 PCI 接近 55 之前，我国绝大多数机场都已经采取了工程措施进行道面整修。故将 PCI<55 的损坏状况等级合并，其他评定等级标准沿用《评价规范》，形成 4 个等级。SDI 和 PCI 之间具有趋势一致性，表 6.1.3 中的等级阈值是根据 PCI 的等级阈值和 SDI 的计算特征确定的。

6.1.4 水泥混凝土道面隐性病害评价应包括区块内道面板结构整体隐性病害状况评价和区块内单一道面板结构隐性病害评价。

【条文说明】探地雷达能检测出的道面结构内部隐性病害包含脱空、疏松、裂缝、富水体、空洞。其中，探地雷达检测出的裂缝也应归为结构裂缝类病害。疏松、富水体为脱空早期的表现或原因，空洞的影响效果与脱空基本相同。因此，基于探地雷达的道面结构隐性病害评价计入脱空、疏松、富水体、空洞病害，而道面板内部裂缝则可计入 SDI 指标的计算。

6.1.5 区块内道面板结构整体隐性病害状况评价指标应采用隐性病害率，隐性病害率根据探地雷达检测结果，按照“板块比”式 6.1.5 计算，评价标准可按表 6.1.5 执行。

$$D_t = \frac{n_t}{N}$$

(6.1.5)

式中： D_t ——待评价区块的道面隐性病害率；
 n_t ——待评价区块中板底存在隐性病害的板块数；
 N ——区块中的板块数量。

表 6.1.5 道面隐性病害率评价标准

评价等级	优	良	中	差
D_t 范围	$D_t \leq 25\%$	$25\% < D_t \leq 50\%$	$50\% < D_t \leq 75\%$	$D_t > 75\%$

6.1.6 区块内单一道面板结构隐性病害评价包括待评价道面板板角脱空评价和板边脱空评价，宜按本规范附录 B 的方法确定评价标准。

6.1.7 水泥混凝土道面性能综合评价指标应采用道面性能指数（PPI），水泥混凝土道面的 PPI 应按照式 6.1.7 计算，并参照表 6.1.7 的标准进行评定。

$$PPI = 51 + 0.49SDI - 23.79\ln(2.924D_t + 1)$$

(6.1.7)

式中：APSI——道面性能指数。

表 6.1.7 水泥混凝土道面性能综合评价标准

评价等级	优	良	中	差
PPI 范围	$PPI \geq 92$	$84 \leq PPI < 92$	$75 \leq PPI < 84$	$PPI < 75$

【条文说明】PPI 这一指标同时考虑了区块内道面表观和隐性病害状况两个方面，我国 16 个机场 67 个水泥混凝土区块的实际检测数据表明：对于水泥混凝土道面，PPI 与 PCI 之间具有较强的线性相关性，二者之间大致符合 $PPI=0.55PCI+45$ ， $R^2=0.99$ 的关系。

6.1.8 水泥混凝土加铺道面性能评价方法和标准应与水泥混凝土道面性能评价相同。

6.2 沥青混凝土道面性能评价

6.2.1 沥青混凝土道面性能评价同样应以区块为基本单位进行评价，区块面积宜不小于 500 m²，区块划分应按照《民用机场道面评价管理技术规范》（MH/T 5024-2019）附录 A 执行。

6.2.2 沥青混凝土道面性能评价同样应采用 PPI，应按照附录 C 的有关规定计算，并参照表 6.2.2 的标准进行评定。

表 6.2.2 沥青混凝土道面性能评价标准

评价等级	优	良	中	差
PPI 范围	$PPI \geq 81$	$64 \leq PPI < 81$	$47 \leq PPI < 64$	$PPI < 47$

【条文说明】我国 9 个机场 45 个沥青混凝土道面区块的实际检测数据表明：对于沥青混凝土道面，PPI 与 PCI 之间同样具有一定线性相关性，二者之间大致符合 $PPI=1.14PCI-15.12$ ， $R^2=0.74$ 的关系。

6.2.3 沥青混凝土加铺道面性能评价方法和标准应与沥青混凝土道面性能评价相同。

6.3 道面性能预测

6.3.1 道面性能预测时应针对不同区块，以 PPI 作为预测指标，若历史数据中有 PCI，则应先将 PCI 按照 6.1.7 或 6.2.2 中条文说明所述关系换算为 PPI，再利用历史数据进行预测。

6.3.2 用于道面性能预测的历史数据包括已积累的其他道面区块的 PPI 数据和待预测区块历次检测的 PPI 数据。

6.3.3 道面性能预测可根据《民用机场道面评价管理技术规范》（MH/T 5024-2019）第 9.3 节相关规定或者根据本规范附录 D 的方法，构建预测模型进行预测。

7 机场道面智能检测数字化管理

7.1 智能检测数字化管理

7.1.1 机场道面智能检测数字化管理主要面向机场道面智能检测，采用信息化、数字化的技术及平台对智能检测的数据及检测结果进行管理与应用。

7.1.2 机场道面管理单位宜依托数字化软件系统平台开展道面智能检测的数字化管理。

7.2 机场道面数字化管理系统

7.2.1 系统应支持多种检测数据导入和处理，包括探地雷达数据、表观相机 2D/3D 图像等相关检测数据的导入和处理功能，以及道面设计数据、航空交通量、道面历史维护记录等相关数据的导入功能。

7.2.2 系统应具备检测数据处理功能，具体包括：

- 1) 原始检测数据与 GIS 位置信息关联功能；
- 2) 表观图像自动拼接，支持生成道面表观全景模型，便于表观病害的分析及可视化展示；
- 3) 基于三维探地雷达的道面结构数据三维切片建模，便于内部隐性病害的分析及可视化展示。

7.2.3 系统宜确保具有较高的数据处理效率，完成一条完整跑道（长 3800 m，宽 60 m）数据处理的时间宜不大于 6 h。

7.2.4 机场道面数字化管理系统应具备病害标注及统计分析功能，具体包括：

- 1) 表观病害标注，并自动计算病害的长度（线状病害）及面积（块状病害）；
- 2) 隐性病害标注，并自动计算病害的长度（线状病害）及投影面积（块状/体状病害），还应支持同一位置表观图像和内部结构数据融合分析功能；
- 3) 病害数据自定义统计分析，并可按照病害类型、发生区域、病害尺寸、严重程度等信息生成对应的统计图表。
- 4) 道面全生命周期下同一病害的发展及演化对比，并统计病害尺寸（长度/面积）的变化情况。

7.2.5 系统应支持道面二维/三维可视化交互，显示病害详细信息、道面各区块性能的评价指标。

7.2.6 系统应具备道面性能状况评价功能，并可根据道面划分的区块计算和生成道面性能状况评价和预测结果。

7.2.7 系统宜采用面向服务的分布式系统架构，系统应具有可扩充性。

【条文说明】 随着分布式技术的发展，系统的应用已经经历了单机构架—服务器—桌面客服端构架—

泛在介入端—云服务器构架的转变，应用模式更加灵活。

7.2.8 系统应配置大存储服务器，便于存储机场全生命周期下的多次道面检测数据，便于使用人员研究分析道面性能状况变化规律及发展趋势。

7.2.9 系统应具有良好的易用性，便与使用人员上手操作。

7.2.10 系统应具有较灵活的兼容性和可拓展性，支持以模块化的方式集成在现有道面管理平台中。

7.2.11 系统应能独立部署在机场专用服务器上，并能符合机场道面管理单位的管理规定。

7.2.12 机场管理单位宜结合机场道面数字化管理系统中性能状况综合评价及预测结果，制定专项检测或道面维修养护计划。

7.2.13 系统的数据安全分级管理与防护机制应符合《智慧民航数据治理规范-数据安全》（MH/T 5057-2021）的有关规定及要求。

附录 A 表观破损指数（SDI）计算方法

A.0.1 表观破损指数（SDI）应以区块为基本单位分别计算结构裂缝、板角剥落、接缝破碎、小补丁、大补丁的损坏密度，损坏密度按照“板块比”式 A.0.1 计算：

$$D_i = \frac{n_i}{N}, i = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (\text{A.0.1})$$

式中： D_i ——自动检测出的第*i*类表观病害损坏密度；

n_i ——区块中出现第*i*类表观病害的板块数量；

N ——区块中的板块数量。

A.0.2 根据病害类型和损坏密度，按式 A.0.2 分别计算结构裂缝、板角剥落、接缝破碎、小补丁、大补丁的扣分值：

$$g_i(D_i) = a_i D_i^5 + b_i D_i^4 + c_i D_i^3 + d_i D_i^2 + e_i D_i, i = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (\text{A.0.2})$$

式中： $g_i(D_i)$ ——自动检测出的第*i*类表观病害扣分值；

a_i 、 b_i 、 c_i 、 d_i 、 e_i ——第*i*类表观病害系数，参照表 A.0.2 取值。

表 A.0.2 第*i*类表观破损病害系数取值

i	病害类别	a_i	b_i	c_i	d_i	e_i
1	结构裂缝	26.016	-103.647	168.845	-155.816	134.309
2	板角剥落	-10.695	19.821	2.540	-32.763	45.964
3	接缝破碎	76.063	-211.051	213.021	-109.311	50.106
4	小补丁	14.234	-38.925	32.967	-15.312	19.319
5	大补丁	20.005	-78.280	121.528	-112.112	89.312

A.0.3 由随行检测人员根据《民用机场道面评价管理技术规范》（MH/T 5024-2019）附录 B.1 对待评价区块的填缝料损坏程度进行划分，填缝料损坏的扣分值按式 A.0.3 计算：

$$g_6(D_6) = \begin{cases} 2, \text{填缝料轻微损坏} \\ 7, \text{填缝料中等损坏} \\ 12, \text{填缝料严重损坏} \end{cases} \quad (\text{A.0.3})$$

式中： $g_6(D_6)$ ——填缝料损坏的扣分值。

A.0.4 道面表观病害综合折减值按式 A.0.4 计算：

$$\text{CDV} = l(\sum_{i=1}^6 g_i(D_i))^2 + m \sum_{i=1}^6 g_i(D_i) + p, i = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (\text{A.0.4})$$

式中：CDV——道面表观病害综合折减值；

l 、 m 、 p ——系数，与扣分值 $g_i(D_i)$ ， $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ 中大于 5 的病害数量 q 有关，参照表 A.0.4 取值。

表 A.0.4 综合折减系数

q	l	m	p
0 或 1	0	1	0
2	-0.0010	0.9400	-1.5646

3	-0.0009	0.8530	-1.7995
4	-0.0014	0.8373	-2.1591
5	-0.0014	0.8183	-1.9224
6	-0.0013	0.7856	-1.4810

A.0.5 待评价区块内道面 SDI 值按式 A.0.5 计算：

SDI = 100 - CDV

(A.0.5)

式中：SDI——表观破损指数。

附录 B 单一道面板结构隐性病害评价方法

B.0.1 水泥混凝土道面面层材料的容许弯拉疲劳强度按以下步骤计算：

1) 根据《民用机场道面评价管理技术规范》(MH/T 5024-2019)附录 D 的相关规定确定待评价机场的评价机型和航空交通量参数。

2) 针对机场机型组合中的所有机型，分别将其他机型的运行架次参照式 B.0.1-1 换算成评价机型的当量年运行次数：

$$N_s = \sum_{i=1}^m (0.8^{(n_s - n_i)} N_i) \sqrt{\frac{P_i}{P_s}} \quad (\text{B.0.1-1})$$

式中：\$N_s\$——评价机型的当量年运行次数；

\$m\$——检测机场运行机型种类数；

\$n_s\$——评价机型一个主起落架上的轮胎数量；

\$n_i\$——第 \$i\$ 种机型一个主起落架上的轮胎数量；

\$N_i\$——第 \$i\$ 种机型的年运行次数，由调查和预测确定，每年年运行次数不同时，取评价期内的平均值；

\$P_i\$——第 \$i\$ 种机型主起落架上的单轮荷载，kN；

\$P_s\$——评价机型主起落架上的单轮荷载，kN。

计算时，\$P_i/P_s < 0.75\$ 的飞机不计入。

3) 根据机场的使用要求由机场管理机构或者相关技术人员确定评价期和道面设计剩余使用时间。

4) 评价机型在道面设计剩余使用时间、评价期内的当量累计作用次数按照式 B.0.1-2 计算：

$$N_{ei} = \frac{0.075 n_s W}{100T} N_s t_i, \quad i = 1, 2 \quad (\text{B.0.1-2})$$

式中：\$N_{ei}\$——评价机型在时间 \$t_i\$ 内的当量累计作用次数，\$t_1\$ 表示道面设计剩余使用时间，\$t_2\$ 表示评价期；

\$T\$——通行宽度，跑道取 11.4m，滑行道和机坪可取 2.3m；

\$W\$——评价机型主起落架一个轮印的宽度，mm，按照式 B.0.1-3 计算：

$$W = 0.6 \sqrt{\frac{10000P_s}{5.227q_s}} \quad (\text{B.0.1-3})$$

式中：\$P_s\$——评价机型主起落架单轮荷载，kN；

\$q_s\$——评价机型主起落架轮胎胎压，MPa。

5) 评价机型作用下道面设计剩余使用时间、评价期处对应的水泥混凝土道面面层材料的容许弯拉疲劳强度按照式 B.0.1-4 计算：

$$\sigma_{ri} = f_{cm} (0.885 - 0.0163 \lg N_{ei}), \quad i = 1, 2 \quad (\text{B.0.1-4})$$

式中：\$\sigma_{ri}\$——评价机型作用下道面设计剩余使用时间、评价期处对应的水泥混凝土道面面层材料的容许弯拉疲劳强度，\$\sigma_{r1}\$ 对应道面剩余使用时间，\$\sigma_{r2}\$ 对应评价期；

\$f_{cm}\$——水泥混凝土弯拉强度，MPa，宜由现场芯样试验确定，若未开展取芯试验，则将道面设计

强度作为水泥混凝土弯拉强度。

B.0.2 根据待评价区块内典型道面板尺寸及结构参数，构建道面板有限元模型，该有限元模型应在道面板底部分别设置板角脱空和板边脱空工况，其中，板角脱空的形状应为正方形，板边脱空的形状应为以板缝为长边的矩形。

【条文说明】板角和板边脱空的形状是较为常见的唧泥型脱空形状近似，该设置方式较实际脱空偏保守。

B.0.3 有限元模型中施加荷载应为评价机型主起落架荷载，板角脱空时荷载应作用于脱空正上方板角处，且主起落架轮印外侧应与道面板边界相切，板边脱空时荷载作用位置参照《民用机场水泥混凝土道面设计规范》（MH/T 5004-2010）中第 5 章的相关内容设置。

B.0.4 应改变有限元模型中脱空宽度，并计算获得板角脱空、与滑跑方向平行的板边脱空、与滑跑方向垂直的板边脱空三种情况下各自的一组“脱空宽度-最大弯拉应力”的数据点，对该三组数据分别拟合，获得最大弯拉应力和脱空宽度的函数关系式 B.0.4：

$$\sigma = f_i(b'), i = 1, 2, 3 \quad (\text{B.0.4})$$

式中： σ ——水泥混凝土道面板上的最大弯拉应力，MPa；

b' ——脱空宽度，m；

$f_i(*)$ ——第*i*种情况对应的函数关系式， $i = 1, 2, 3$ 分别对应板角脱空、与滑跑方向平行的板边脱空、与滑跑方向垂直的板边脱空三种情况。

【条文说明】脱空宽度改变时应固定步长，宜以 0.25m 为步长，以道面板宽度的一半为最大脱空宽度。最大弯拉应力和脱空宽度的函数关系式应具有较好的拟合效果，能反映二者的变化关系，不宜太复杂，应能由给定的最大弯拉应力反推出脱空宽度。

B.0.5 区块内单一道面板脱空状况评价阈值通过求解方程式 B.0.5 计算：

$$\sigma_j = f_i(b'_{ij}), i = 1, 2, 3, j = 1, 2, 3 \quad (\text{B.0.5})$$

式中： σ_j ——第*j*个道面弯拉应力阈值，MPa， σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为评价机型作用下道面设计剩余使用时间对应的水泥混凝土道面面层材料的容许弯拉疲劳强度 σ_{r1} 、评价机型作用下评价期对应的水泥混凝土道面面层材料的容许弯拉疲劳强度 σ_{r2} 、水泥混凝土弯拉强度 f_{cm} ；

$f_i(*)$ ——式 B.0.4 所述函数关系式；

b'_{ij} ——在第*i*种情况下由第*j*个道面弯拉应力阈值反算出对应的脱空宽度，m。

B.0.6 针对探地雷达探测出的单一道面板脱空范围，应以待评价道面板的各边为外围边界，在该边界内绘制板底脱空范围的外接矩形，且保证外接矩形有至少一条边与边界重合，该脱空类型及脱空尺寸按以下方法确定：

1) 若外接矩形的两条边与互相垂直的板缝重合，则归为板角脱空；若外接矩形只有一条边与板缝重合，且外接矩形全部位于该重合板缝的对称轴的一侧，且该外接矩形的对称轴（与重合板缝垂直）距最近的道面板板角的距离，小于该重合板缝长度的 1/4，则也归为板角脱空。除此之外的其他脱空均归为板边脱空。

2) 对于板角脱空，长 *a* 为外接矩形较长的边的长度，宽 *b* 为外接矩形较短的边的长度；对于板边脱空，长 *a* 为外接矩形与边界重合的边的长度，宽 *b* 为外接矩形与边界垂直的边的长度。

B.0.7 区块内单一道面板脱空状况评价标准可按表 B.0.7 执行。

表 B.0.7 单一道面板脱空状况评价标准

脱空位置	脱空方向	优	良	中	差
板角	—	$(a+b)/2 \leq b'_{11}$	$b'_{11} < (a+b)/2 \leq b'_{12}$	$b'_{12} < (a+b)/2 \leq b'_{13}$	$(a+b)/2 > b'_{13}$
板边	平行于滑跑方向	$b \leq b'_{21}$	$b'_{21} < b \leq b'_{22}$	$b'_{22} < b \leq b'_{23}$	$b > b'_{23}$
	垂直于滑跑方向	$b \leq b'_{31}$	$b'_{31} < b \leq b'_{32}$	$b'_{32} < b \leq b'_{33}$	$b > b'_{33}$

附录 C 沥青混凝土路面性能指数（PPI）计算方法

C.0.1 以区块为基本单位分别计算裂缝、竖向变形、补丁、隐性病害的损坏密度，损坏密度按照“面积”式 C.0.1 计算：

$$D_i = \frac{A_i}{A}, i = 1, 2, 3, 4 \quad (C.0.1)$$

式中： D_i ——自动检测出的第*i*类病害的损坏密度；

A_i ——区块中出现第*i*类病害的面积，其中，裂缝面积指裂缝两侧各 0.15m 区域的面积；竖向变形面积指发生竖向变形的区域轮廓面积；隐性病害面积指脱空、疏松、富水体等区域的竖向投影面积；

A ——区块的总面积。

C.0.2 根据病害类型和损坏密度，按式 C.0.2-1 和式 C.0.2-2 计算裂缝、竖向变形、补丁、隐性病害的扣分值：

$$B_{ij} = lg(D_i) + x_{ij}, i = 1, 2, 3, 4 \quad (C.0.2-1)$$

$$g_i(D_i) = \sum_{j=1}^n (a_{ij}B_{ij}^5 + b_{ij}B_{ij}^4 + c_{ij}B_{ij}^3 + d_{ij}B_{ij}^2 + e_{ij}B_{ij}), i = 1, 2, 3, 4 \quad (C.0.2-2)$$

式中： $g_i(D_i)$ ——基于第*i*类病害损坏密度 D_i 计算的第*i*类病害扣分值；

x_{ij} 、 a_{ij} 、 b_{ij} 、 c_{ij} 、 d_{ij} 、 e_{ij} ——第*i*类病害中第*j*组系数，裂缝、竖向变形、补丁、隐性病害的系数见表 C.0.2-1、表 C.0.2-2、表 C.0.2-3、表 C.0.2-4；

B_{ij} ——第*i*类病害中第*j*组过渡参数。

表 C.0.2-1 裂缝病害系数

j	x_{1j}	a_{1j}	b_{1j}	c_{1j}	d_{1j}	e_{1j}
1	1.797	0.386	-4.047	15.133	-19.629	15.092
2	1.710	0.167	-1.877	8.459	-15.709	13.694
3	1.580	0.613	-6.246	24.338	-40.729	29.928
4	3.279	-0.708	6.152	-16.606	17.577	-4.417
5	3.456	-0.870	7.770	-22.495	28.250	-9.489
6	1.764	-0.627	5.062	-12.018	12.918	1.584
7	3.679	-0.192	1.928	-7.167	15.756	-13.983
8	2.285	0	-1.316	9.481	-14.491	6.237
9	1.625	-0.041	-1.140	9.793	-14.060	6.400
10	1.279	-0.357	0.633	10.171	-29.231	24.643

表 C.0.2-2 竖向变形病害系数

j	x_{2j}	a_{2j}	b_{2j}	c_{2j}	d_{2j}	e_{2j}
1	1.786	-0.272	2.496	-6.466	6.598	-1.287
2	0.512	-0.260	2.024	-2.264	-6.212	16.739
3	0.094	0.149	-2.741	19.309	-52.236	63.821
4	3.638	0.046	-0.515	3.037	-6.512	11.955
5	1.958	0.310	-3.265	13.558	-23.399	25.841
6	3.134	0.718	-7.157	27.958	-47.283	45.688
7	3.601	0.460	-4.506	16.768	-22.910	12.205
8	0.937	0.656	-6.305	22.754	-29.956	18.546
9	0.791	0.027	0.210	-1.658	8.619	3.935
10	1.625	-0.118	1.021	-2.387	3.078	0.492
11	1.848	0.287	-3.043	12.058	-17.371	13.782
12	1.393	0.032	-0.421	2.541	-2.452	10.114

表 C.0.2-3 补丁病害系数

j	x_{3j}	a_{3j}	b_{3j}	c_{3j}	d_{3j}	e_{3j}
1	3.995	-0.142	1.274	-2.734	1.653	1.637
2	2.061	-0.374	3.423	-8.307	5.166	6.423

表 C.0.2-4 隐性病害系数

j	x_{4j}	a_{4j}	b_{4j}	c_{4j}	d_{4j}	e_{4j}
1	3.926	0	-0.282	2.699	-2.558	-0.424
2	2.992	0.449	-4.629	17.773	-24.623	15.365
3	2.761	0.189	-1.897	8.013	-12.404	17.364

C.0.3 将松散和老化、泛油、集料磨光、喷气烧蚀、油料腐蚀 5 种表层材料病害作为第 5 类病害，基于竖向变形类病害的损坏密度，按式 C.0.2-1 和式 C.0.2-2 计算其扣分值 $g_5(D_2)$ ，其系数见表 C.0.3。

表 C.0.3 表层材料病害系数

j	x_{5j}	a_{5j}	b_{5j}	c_{5j}	d_{5j}	e_{5j}
1	3.899	0.049	-0.517	2.746	-5.283	4.464
2	1.986	-0.021	0.466	-0.696	-1.183	5.964
3	1.271	0	-2.287	16.177	-28.952	20.394
4	0.881	-0.464	2.668	-0.994	-6.442	6.415
5	3.663	-0.090	0.735	-0.214	-3.028	3.985
6	0.436	-0.973	8.785	-26.920	34.303	-13.834

C.0.4 沥青混凝土道面病害综合折减值按式 C.0.4 计算：

$$CDV = l(\sum_{i=1}^5 g_i(D))^2 + m \sum_{i=1}^5 g_i(D) + p, i = 1,2,3,4,5 \tag{C.0.4}$$

式中：CDV——沥青混凝土道面病害综合折减值；

l 、 m 、 p ——系数，与扣分值 $g_i(D)$, $i = 1,2,3,4,5$ 中大于 5 的病害数量 q 有关，参照表 C.0.4 取值。

表 C.0.4 综合折减系数

q	l	m	p
0	0	1	0
1	-0.0011	0.8615	-6.8358
2	-0.0017	0.9099	-12.3400
3	-0.0012	0.7760	-13.4380
4	-0.0012	0.7575	-12.4510
5	-0.0012	0.7207	-10.7740

C.0.5 待评价区块内沥青混凝土道面 PPI 按式 C.0.5 计算：

$$PPI = 100 - CDV \tag{C.0.5}$$

附录 D 道面性能预测模型构建方法

D.1 有 1 次检测数据时预测模型构建

D.1.1 建模前应将历次检测积累的所有区块 PCI 换算为 PPI，各区块内道面建成时 PPI=100 不算作一次检测，而应作为有效数据进行补充，补充后的所有区块的 PPI 数据量应不少于 150 个。

D.1.2 收集并整理与每个 PPI 对应的以下数据：

1) 每次检测时的道面使用时间；

2) 机场所在地的环境参数，包括最近 5 年的年平均气温均值、道面使用时间内的累计温差、累计冻融循环次数和累计降水量等，可由中国气象局官网获取距机场最近的气象站数据或由机场气象台获取气象数据，当气象数据部分缺失时，可根据其他时段数值合理推算；

3) 航空交通量参数，包括区块道面所承受的飞机荷载作用次数、飞机机型组成及占比等，参照式 D.1.2 将各机型荷载累计作用次数换算为典型机型的当量累计作用次数，可由机场相关部门获取该数据。

$$N_s = \sum_{i=1}^m (0.8^{(n_s - n_i)} N_i) \sqrt{\frac{P_i}{P_s}} \quad (\text{D.1.2})$$

式中：\$N_s\$——典型机型的当量累计作用次数，典型机型宜选取在各区块均有运行的机型；

\$m\$——检测区块上运行机型种类数；

\$n_s\$——典型机型一个主起落架上的轮胎数量；

\$n_i\$——第 \$i\$ 种机型一个主起落架上的轮胎数量；

\$N_i\$——第 \$i\$ 种机型的累计作用次数；

\$P_i\$——第 \$i\$ 种机型主起落架上的单轮荷载，kN；

\$P_s\$——典型机型主起落架上的单轮荷载，kN。

4) 道面结构参数，包括水泥混凝土道面板厚度、基层材料和基层厚度，并根据《民用机场道面评价管理技术规范》（MH/T 5024-2019）和《民用机场水泥混凝土道面设计规范》（MH/T 5004-2010）的有关规定分别计算水泥混凝土道面有效厚度和基层当量厚度。

5) 检测区块的飞行区指标，可采用布尔型数据或直接赋值的形式进行量化，当采用直接赋值的形式时，4C、4D、4E、4F 等级可分别赋值 1、2、3、4。

D.1.3 应对收集的上述 5 类数据进行预处理，并将其作为特征输入，PPI 作为输出，构建机器学习模型。该模型除满足泛化、精度要求外，还应保证道面建成至最近一次检测期间，待预测区块 PPI 的单调衰减趋势。

D.1.4 应将待预测区块内道面建成至最近一次检测期间历年的输入数据代入机器学习模型计算对应的 PPI，将计算得到的 PPI 与对应的道面使用时间代入式 D.1.4（称其为“改进双参数模型”），反算道面寿命因子 \$\alpha\$ 和衰变形式因子 \$\beta\$。

$$\text{PPI} = 100 \times \{1 - 0.16e^{[1 - (\frac{\alpha}{t})^\beta]}\} \quad (\text{D.1.4})$$

式中：\$\alpha\$——道面寿命因子，其数值大小表示 PPI 由 100 衰减至 84（即所处等级由“优”变为“中”）的时间，与道面结构、交通量、环境、使用时间等因素有关。

β ——衰变形式因子，与道面结构、交通量、环境、使用时间等因素有关。

t ——从通航之日算起的道面使用时间，年。

D.1.5 状态转移概率矩阵应按照以下步骤进行计算：

1) 在待预测区块内道面建成至最近一次检测期间，改进双参数模型与机器学习模型计算得到历年 PPI 的样本方差 S^2 按式 D.1.5-1 计算：

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (PPI_{yi} - PPI_i)^2}{n-1} \quad (D.1.5-1)$$

式中： S^2 ——改进双参数模型与机器学习模型计算出道面使用历年 PPI 的样本方差；

n ——待预测区块内道面建成至最近一次检测期间所经历的年数（取整）；

PPI_{yi} ——由改进双参数模型算得的第 i 年的 PPI；

PPI_i ——由机器学习模型算得的第 i 年的 PPI。

2) 将 PPI 在优、良、中、差四个状态空间的状态中值 $M=[96, 88, 79.5, 37.5]$ 分别代入式 C.1.3，反算出对应的使用年数 t_i 。

3) 由式 D.1.4 分别计算第 (t_i+1) 年对应的 PPI 数值 $PPI(E)_i$ 。

4) 以 $PPI(E)_i$ 为正态分布均值，样本方差 S^2 为正态分布方差，在各个状态上离散该分布，然后计算落在各状态上的概率，得到状态转移概率矩阵 P 。

【条文说明】在日常维修养护条件下，道面 PPI 由低水平状态向高水平状态转移的情况基本不会发生；在一年时间内 PPI 等级不会下降太快，可近似认为 PPI 衰减只发生在相邻的两个状态之间，故状态转移概率矩阵 P 的形式如式 D.1.5-2：

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & 0 & 0 \\ 0 & p_{22} & p_{23} & 0 \\ 0 & 0 & p_{33} & p_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (D.1.5-2)$$

式中： p_{ij} ——1 年后由 i 状态转移为 j 状态的概率， $\sum_{j=1}^4 p_{ij} = 1$ 。

D.1.6 由最近一次检测的 PPI 数值确定预测起始年度 PPI 在状态空间上的分布 P_0 ， t 年后的 PPI 数值可按式 D.1.6 计算：

$$PPI_t = P_0 P^t M^T \quad (D.1.6)$$

式中： PPI_t —— t 年后的 PPI 数值；

M^T ——状态中值矩阵 M 的转置矩阵。

D.1.7 计算未来各年的 PPI 数值，绘制未来 PPI 的衰变曲线，过最近的 1 次检测数据点绘制衰变曲线的平行线，即为待预测区域 PPI 的预测曲线，如图 D.1.7 所示。

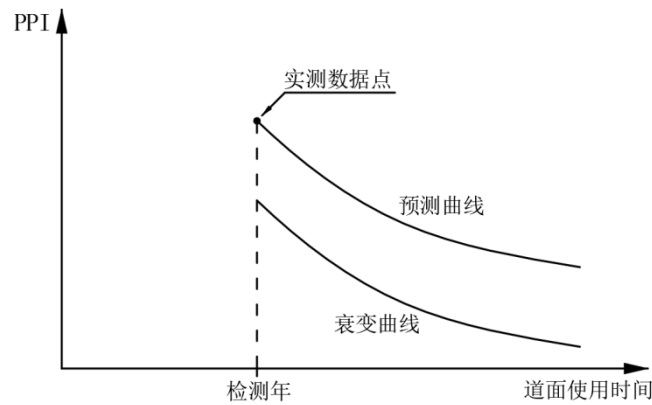


图 D.1.7 有 1 次检测数据的 PPI 的预测曲线示意图

D.1.8 有 1 次检测数据时预测模型构建过程如图 D.1.8 所示。

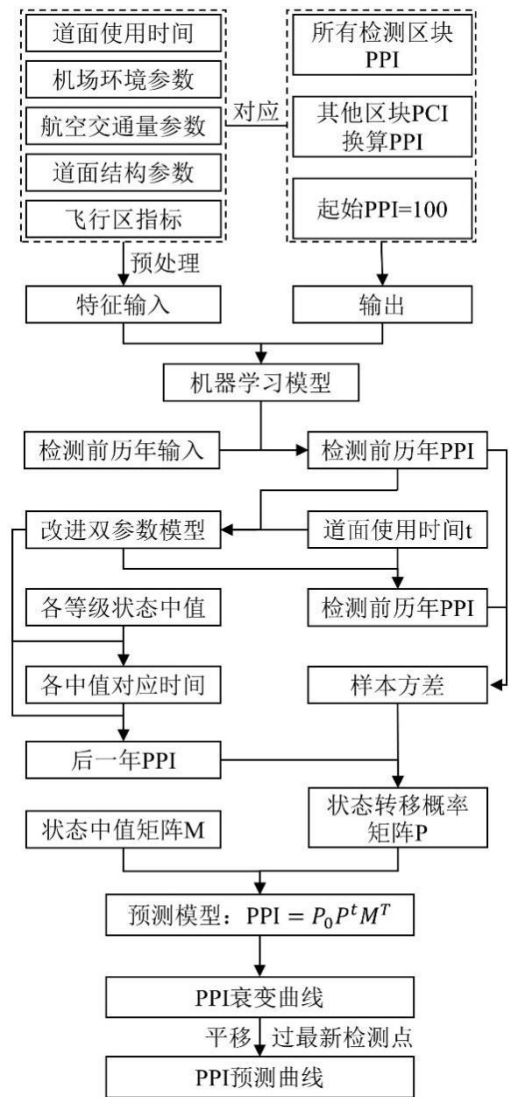


图 D.1.8 有 1 次检测数据时 PPI 预测模型构建流程

D.2 有 2 次检测数据时预测模型构建

D.2.1 按照附录 D.1，应利用所有数据重新构建模型，绘制待预测区域 PPI 的预测曲线（称其为“预测曲

线 1”）。

D.2.2 将待预测区块的 2 次检测数据代入式 D.1.4，反算道面寿命因子 α 和衰变形式因子 β ，得到改进双参数模型。

D.2.3 根据改进双参数模型绘制 PPI 预测曲线（称其为“预测曲线 2”），取“预测曲线 1”和“预测曲线 2”的平均值即为待预测区域 PPI 的预测曲线，如图 D.2.3 所示。

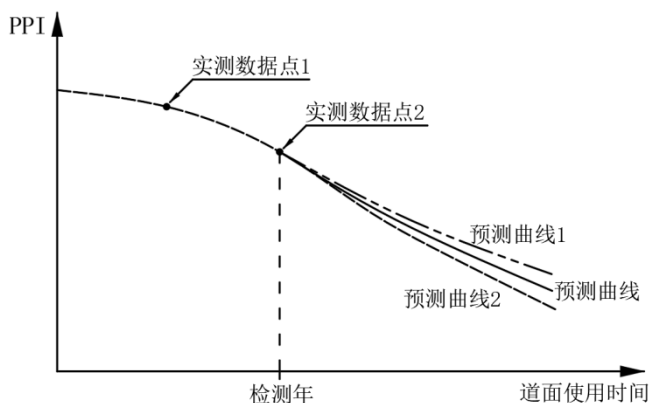


图 D.2.3 有 2 次检测数据的 PPI 的预测曲线示意图

D.2.4 有 2 次检测数据时预测模型构建过程如图 D.2.4 所示。

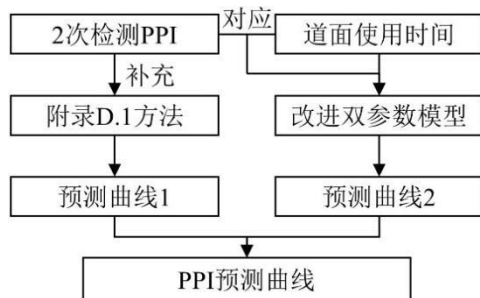


图 D.2.4 有 2 次检测数据时 PPI 预测模型构建流程

D.3 有 3 次及以上检测数据时预测模型构建

D.3.1 按照附录 D.1，应利用所有数据重新构建模型，绘制待预测区域 PPI 的预测曲线（称其为“预测曲线 1”）。

D.3.2 在待预测区块内道面建成至最近一次检测期间，机器学习模型预测值和改进双参数模型拟合值的平均误差按式 D.3.2 计算：

$$\varepsilon_s = \frac{\sum_{i=1}^n |PPI_{yi} - PPI_i|}{n} \quad (D.3.2)$$

式中： ε_s ——机器学习模型预测值和改进双参数模型拟合值的平均误差；

n ——待预测区块内道面建成至最近一次检测期间所经历的年数（取整）；

PPI_{yi} ——由改进双参数模型算得的第 i 年的 PPI；

PPI_i ——由机器学习模型算得的第 i 年的 PPI。

D.3.3 基于改进双参数模型的马尔可夫预测模型应按照以下步骤进行计算：

1) 将待预测区块已有的多次检测数据代入式 D.1.4，反算道面寿命因子 α 和衰变形式因子 β ，得到改进双参数模型。

2) 参照附录 D.1.5 计算该改进双参数模型拟合值和 PPI 实测值间的样本方差 S^2 ，并计算状态转移概率矩阵 P 。

3) 根据附录 D.1.6 和 D.1.7 计算未来各年的 PPI 数值，并绘制待预测区域 PPI 的预测曲线（称其为“预测曲线 2”）。

D.3.4 参照式 D.3.2 计算附录 D.3.3 所述改进双参数模型拟合值和 PPI 实测值间的平均误差 ε_q ，预测曲线 1 和预测曲线 2 的权重分别参照式 D.3.4-1、式 D.3.4-2 计算：

$$\omega_s = \frac{3\varepsilon_q - \varepsilon_s}{2(\varepsilon_s + \varepsilon_q)} \quad (D.3.4-1)$$

$$\omega_q = \frac{3\varepsilon_s - \varepsilon_q}{2(\varepsilon_s + \varepsilon_q)} \quad (D.3.4-2)$$

式中： ω_s 、 ω_q ——预测曲线 1 和预测曲线 2 的权重；

ε_s ——机器学习模型预测值和对应改进双参数模型拟合值的平均误差；

ε_q ——PPI 实测值和对应改进双参数模型拟合值的平均误差。

【条文说明】式 C.3.4-1 和式 C.3.4-2 由 Shapley 值分配组合预测模型权重方法推算得到。

D.3.5 将“预测曲线 1”和“预测曲线 2”在相同时间处的数值分别按权重 ω_s 、 ω_q 加权求和作为 PPI 预测值，并绘制预测曲线，如图 D.3.5 所示。

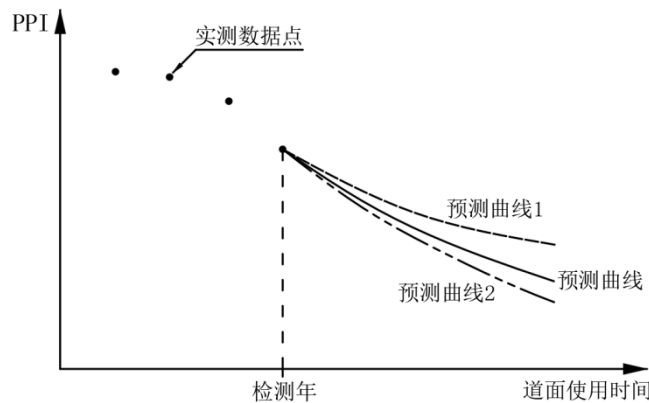


图 D.3.5 有 3 次及以上检测数据的 PPI 的预测曲线示意图

D.3.6 有 3 次及以上检测数据时预测模型构建过程如图 D.3.6 所示。

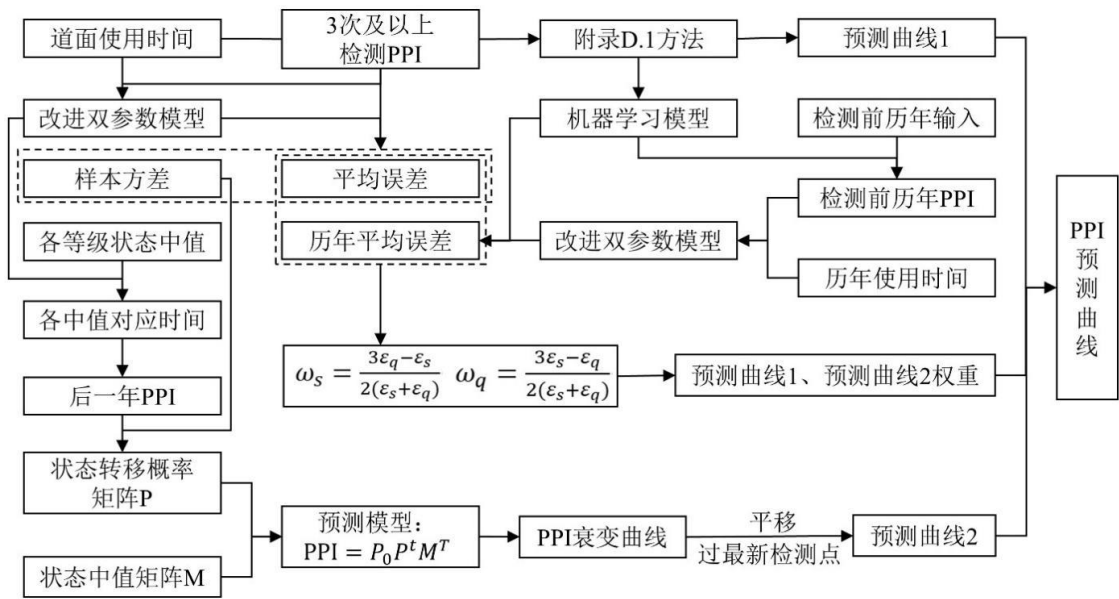


图 D.3.6 有 3 次及以上检测数据时 PPI 预测模型构建流程