



山东交通控股集团有限公司
SHANDONG TRANSPORTATION HOLDINGS GROUP CO., LTD.

高速公路路面养护决策

东南大学交通学院-杨顺新
电话13951698633
微信 huloo_seu

1

汇报内容

01 路面养护决策系统

02 养护决策工作介绍

03 路面性能预测

04 养护方案决策

05 资金优化分配

06 下一步计划

2

路面养护管理系统事记

时间	发展阶段	国家地区	说明
1967~1987	诞生与发展	美国加拿大	90%自行开发，60%没用，30%简单使用
1987	网络级养护管理系统重点发展	世界范围	研究生专业培训从业人员培训
2010	35%使用了企业开发的专业系统		资产的规划管理工具，从路桥扩大到车辆管理、安全管理
...			

3

路面管理系统定义

- PMS是一种借助计算机，对路网养护投资进行规划，以期达到最大的投资—效益比的决策辅助工具
- 路面管理系统就是要解决“3W”问题：
 - where: 哪些路段需要养护
 - when: 什么时候养护
 - what: 采取何种措施

4

路面管理系统框架

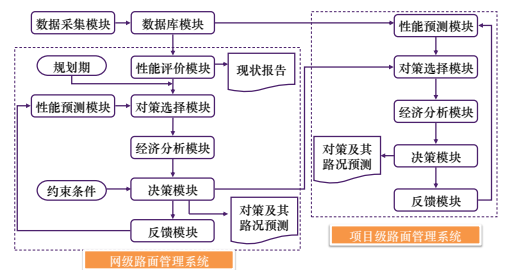
- 网级和项目级PMS的主要功能模块是类似的，但由于两个系统的需求不一致，导致各个模块的实现方式和具体功能有所差异。



5

路面管理系统框架

- 国外高速公路路面管理系统框架示例

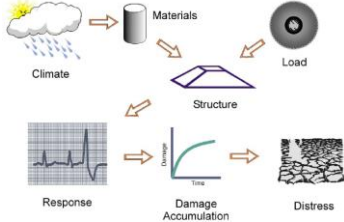


6

路面管理系统框架

数据采集模块

- **数据**：路面管理系统的核心，各种分析的前提，制定养护决策方案的依据，将系统中各个模块联系在一起的纽带。
- 数据采集模块的功能就是负责对面面管理系统所需的数据进行收集。



7

路面管理系统模块

数据管理模块

- 负责对路面管理系统所需、生成的各种数据进行管理，是路面管理系统的基础
- 以数据库的模式存储和管理所采集的各类数据及路面管理系统在分析过程中所生成的各种数据，同时保证数据的安全

路面性能评价模块

- 对存储在数据库中的路况调查数据进行综合分析，得出评价道路各方面性能的指标，并通过特定的养护标准来判断路网的养护需求

路面性能预测模块

- ❖ 路面性能预测模型是路面管理系统中一个十分重要的模块，在加载了该模块之后，系统就能对未来的养护需求进行规划；确定各种养护对策的费用、效益

8

路面管理系统模块

路面养护决策模块

- 决策是一种系统的方法或过程，它通过对系统当前所处状态的评估和未来发展因素的分析、判断、选择恰当的对策，以最大限度地满足系统的要求
- 系统中最关键的模块，其他功能都是为该功能服务的。在决策时不仅要考虑道路材料、设计、施工等工程实际因素，同时还要考虑道路等级、各种路面的性能评价、路面性能预测、交通构成、养护费用以及资金预算水平等因素的影响
- 目的是确定路面的养护策略，包括需要养护的路段、养护措施、养护时间以及养护资金分配

反馈模块

- 对养护对策实施的效果进行跟踪、监控，进而对各种模型，主要是预测模型进行修正，以提高系统的分析精度

9

汇报内容

- 01 路面养护决策系统
- 02 养护决策工作介绍
- 03 路面性能预测
- 04 养护方案决策
- 05 资金优化分配
- 06 下一步计划

10

养护投入与路况统计数据

2017年山西省高速公路的单向每公里养护支出**23.30万元/公里**（来源：交通运输部2017年收费公路统计公报），仅次于上海、北京、江西、浙江、重庆、广东等6个省市，养护投入力度在全国排第7、在中部六省排第2，比全国平均水平**17.74万元/公里**高出31.34%，比中部平均水平17.45万元/公里高出33.52%。而2018年国家公路网技术状况监测中，我省被抽检高速公路的路面使用性能指标（PQI）、路面损坏状况指数（PCI）、优路率分别为**89.52、84.97、51.17%**，远低于全国平均水平的**92.28、90.94、81.18%**，路面路况水平在全国排第28、在中部六省排第6，仅高于内蒙古与黑龙江。

11

路况指标提升为目标的数据驱动的精准决策规划

消除次差路段

2017性能检测等级为“次、差”的路段；2018年三季度上报的评定等级为“次、差”的路段。

加强预防养护

针对除次差路段以外的所有路段，消除优良路段中的“次差”损坏部分，力争保持优良路比例的稳定

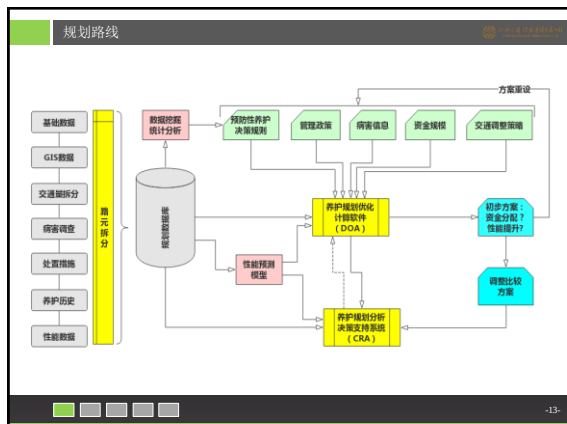
提升路面行车安全性

重点改善交通事故多发路段、交警部门出具的2018年公路危险路段隐患性

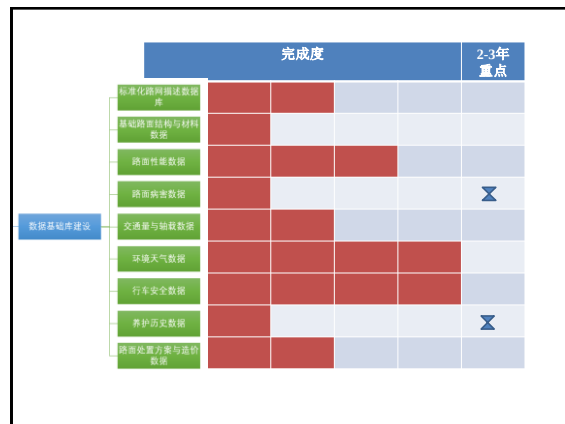
改善道路行驶舒适性

针对引起行驶舒适度降低的主要因素沉降，主要解决主线路基处、桥路连接处、互通匝道处等地的沉降问题，提高车辆行驶的舒适性。

12



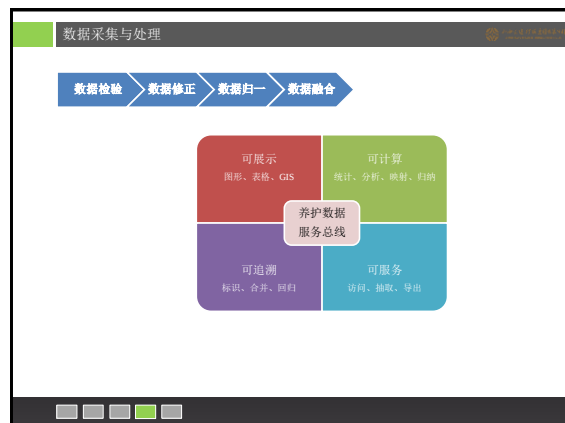
13



14



15



16

交通量处理

交通量计算

划分区间小段-交通量路元

拆分2017收费流水数据

计算区间小段交通量

计算区间小段标准轴载

区间小段	所属路段	区间小段	所属路段
巴公站-晋州北站	晋城绕城高速	北留枢纽-北留站	晋阳高速
巴公站-北义城枢纽	晋城绕城高速	北留站-北留枢纽	晋阳高速
白文站-临县枢纽	右芮高速临汾段	北留站-周村南	晋阳高速

设计交通量等级	极重	特重	重	中重	轻
设计使用年限内设计车流量 (辆/日)	≥ 50.0	50.0~19.0	19.0~8.0	8.0~4.0	< 4.0
设计使用年限内大型货车和客车日均交通量 (辆)	9132	9132~3470	3470~1460	1460~730	< 730

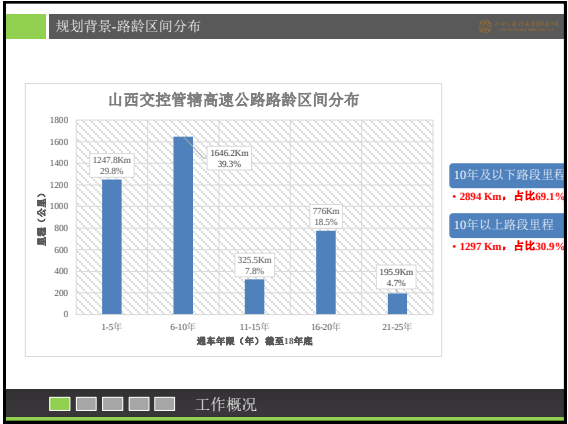
17



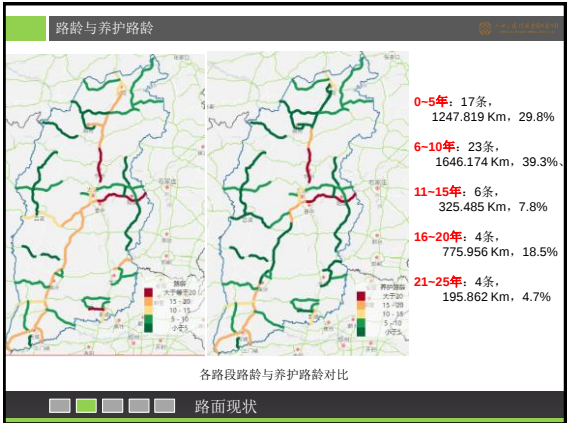
18



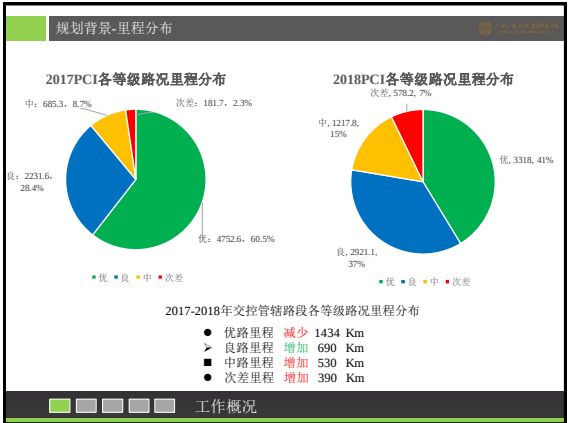
19



20



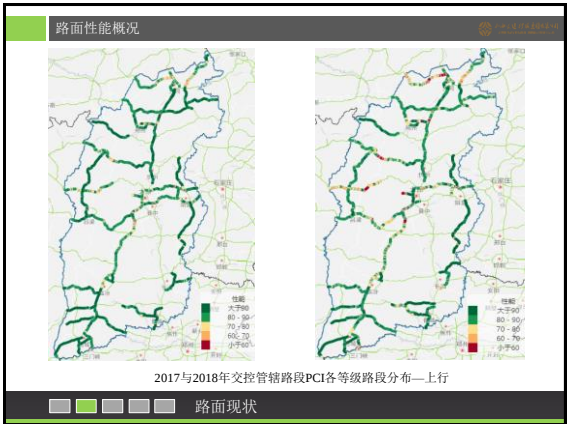
21



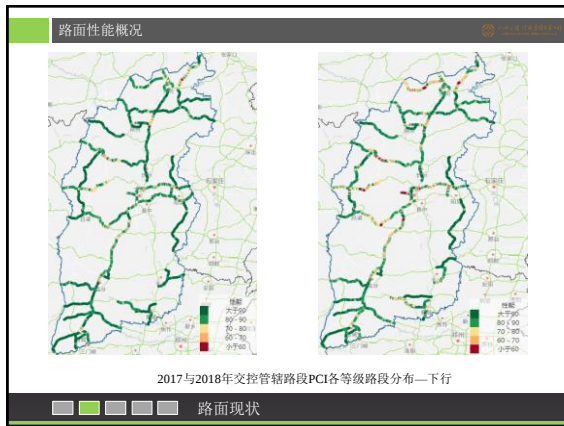
22



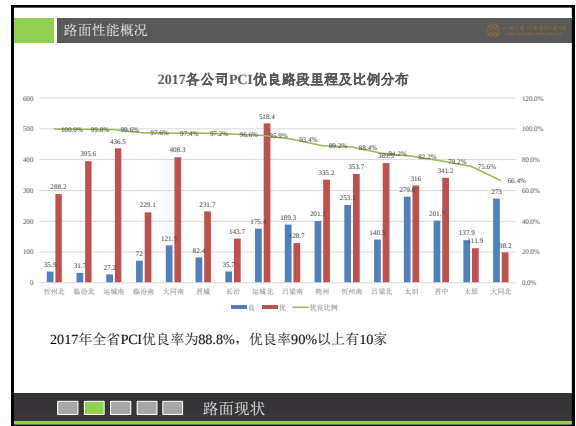
23



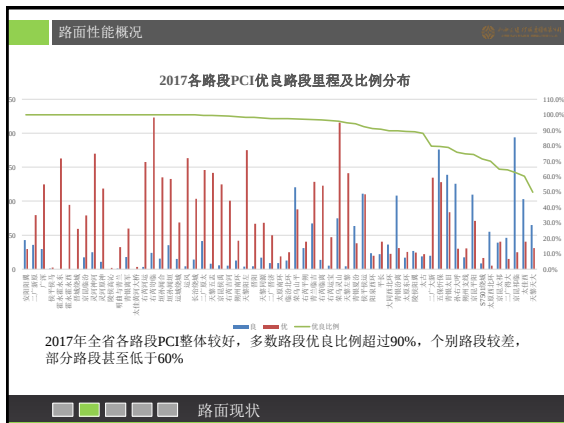
24



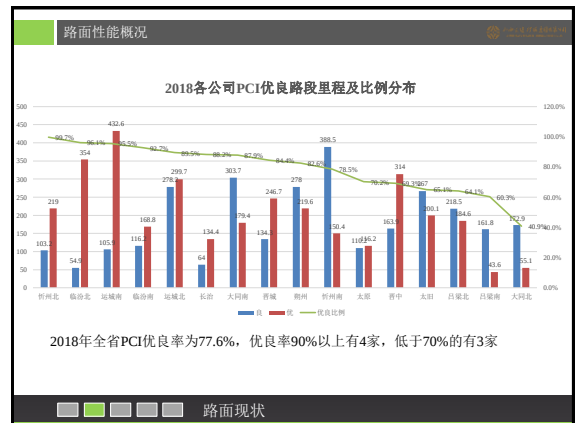
25



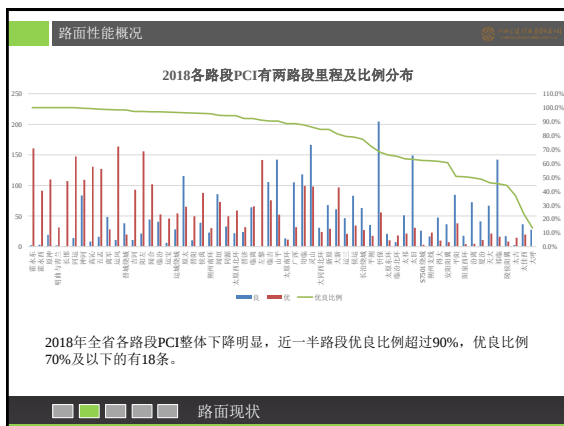
26



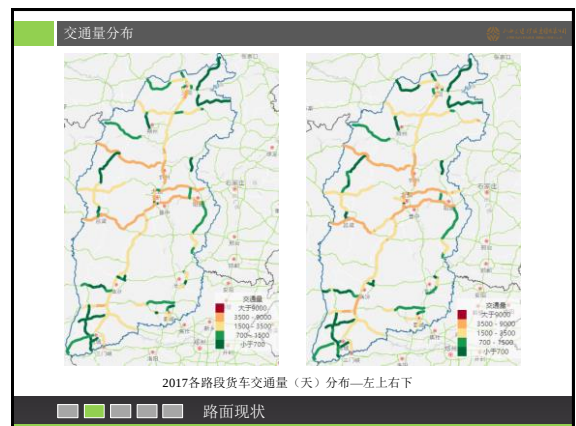
27



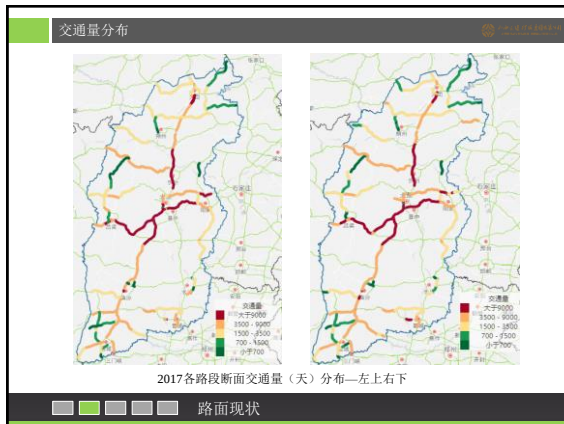
28



29



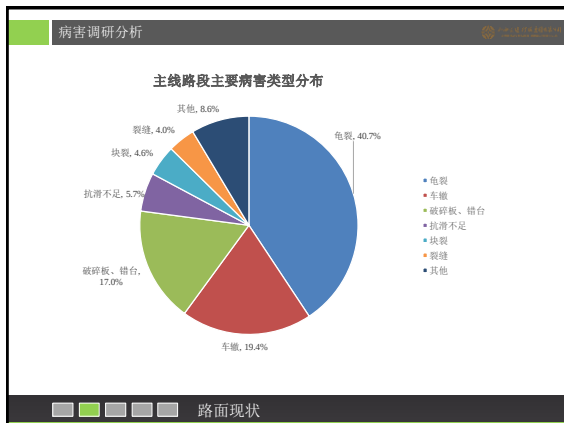
30



31



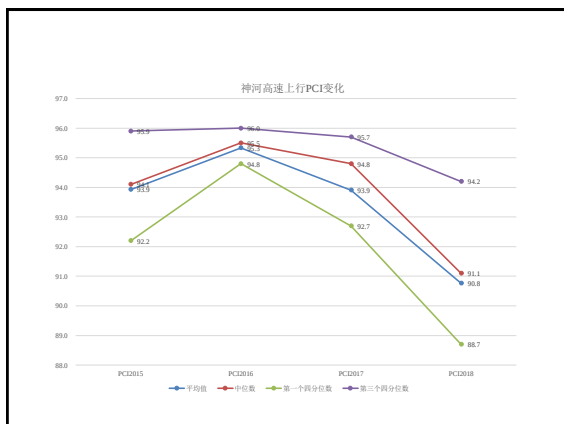
32



33



34



35



36



37



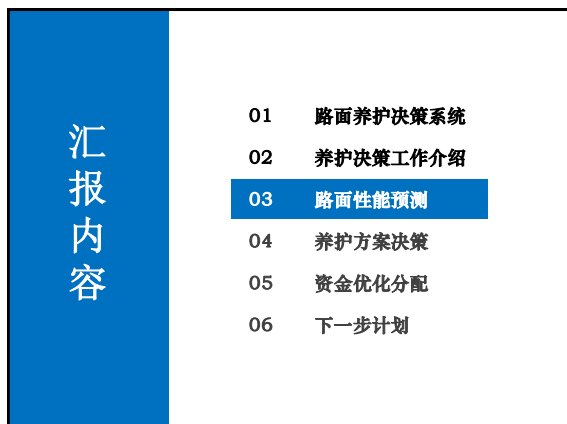
38



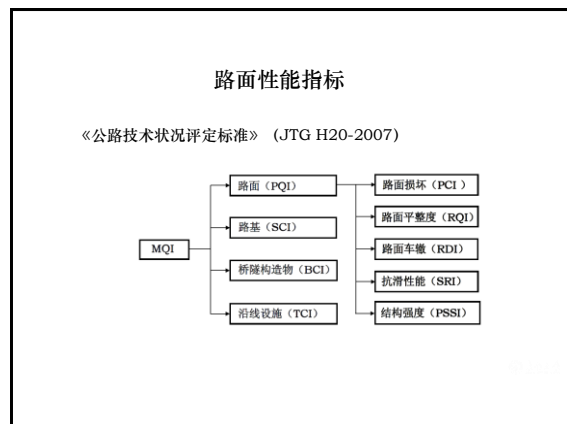
39



40



41



42

路面性能指标

《公路技术状况评定标准》(JTG H20-2007)

$$PQI = w_{PCI}PCI + w_{RQI}RQI + w_{RDI}RDI + w_{SRI}SRI \quad (6.2.1-1)$$

式中: w_{PCI} —— PCI 在 PQI 中的权重, 按表 6.2.1-1 取值;
 w_{RQI} —— RQI 在 PQI 中的权重, 按表 6.2.1-1 取值;
 w_{RDI} —— RDI 在 PQI 中的权重, 按表 6.2.1-1 取值;
 w_{SRI} —— SRI 在 PQI 中的权重, 按表 6.2.1-1 取值。

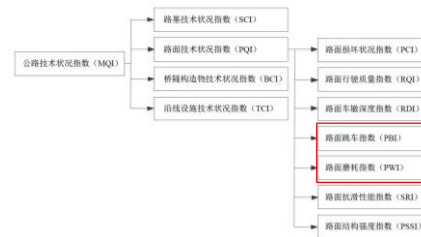
表 6.2.1-1 PQI 分项指标权重

路面类型	权重	权重	二、三、四级公路
沥青路面	w_{PCI}	0.35	0.60
	w_{RQI}	0.40	0.40
	w_{RDI}	0.15	—
	w_{SRI}	0.10	—
	w_{PCI}	0.50	0.60
水泥混凝土路面	w_{RQI}	0.30	0.40
	w_{SRI}	0.10	—

43

路面性能指标

《公路技术状况评定标准》(JTG H20-2018)



44

路面性能指标

《公路技术状况评定标准》(JTG H20-2018)

5.4.3 路面技术状况应采用路面技术状况指数 (PQI) 评定, PQI 应按式 (7.4.3) 计算。

$$PQI = w_{PCI}PCI + w_{RQI}RQI + w_{RDI}RDI + w_{SRI}SRI + w_{PBI}PBI + w_{PWT}PWT + w_{PSI}PSI \quad (7.4.3)$$

式中: w_{PCI} —— PCI 在 PQI 中的权重, 按表 7.4.3 的规定取值;
 w_{RQI} —— RQI 在 PQI 中的权重, 按表 7.4.3 的规定取值;
 w_{RDI} —— RDI 在 PQI 中的权重, 按表 7.4.3 的规定取值;
 w_{SRI} —— SRI 在 PQI 中的权重, 按表 7.4.3 的规定取值;
 w_{PBI} —— PBI 在 PQI 中的权重, 按表 7.4.3 的规定取值;
 w_{PWT} —— PWT 在 PQI 中的权重, 按表 7.4.3 的规定取值;
 w_{PSI} —— PSI 在 PQI 中的权重, 按表 7.4.3 的规定取值。

路面类型	权重	权重	二、三、四级公路
沥青路面	w_{PCI}	0.35	0.60
	w_{RQI}	0.40	0.40
	w_{RDI}	0.15	—
	w_{SRI}	0.10	—
	w_{PBI}	—	—
水泥混凝土路面	w_{RQI}	0.30	0.40
	w_{PSI}	0.10	—

注: 采用式 (7.4.3) 计算 PQI 时, 路面抗滑性能指数 SRI 和路面磨耗指数 PWT 应二者取一。

45

主要预测模型

确定型模型

- 经验型模型 (Empirical Model): 以回归模型为主
- 力学预测模型 (Mechanics Model): 不适用于二级 PMS
- 力学-经验预测模型 (Mechanics-Empirical Model)

概率型模型

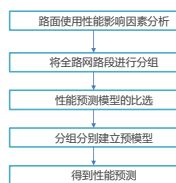
以马尔可夫模型为代表

其他模型

以人工神经网络 ANN 等人工智能算法为代表

46

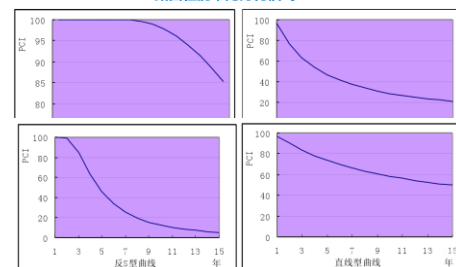
预测模型建立流程



47

回归模型

路面性能常见劣化模式



48

回归模型

线性回归

优点：简单易行
缺点：性能以恒定速率劣化

曲线型回归

早在1950年代末美国AASHO就根据其试验路数据，建立了最早的性能预测模型

$$S_i = \frac{P_0 - P_f}{P_0 - P_f} \left(\frac{N_i}{p} \right)^b$$

式中：
 S_i = 无量纲的损伤指数；
 P_0 = 开始时的服务指数； P_f = 结束时的服务指数；
 N_i = 时间时的累计当量轴载；
 p 、 b = 回归参数。

美国华盛顿州交通部回归方程模型的一般形式如下：

$$PCR = 100 - \beta_1 t^{\beta_2}$$

来源：[1]

49

回归模型

曲线型回归

德州PMS使用的性能预测模型

路段分组方法

气候分区：按气候将德州分为了四个区域

路面类型：连续配筋预应力水泥CRCP、（有接缝的）水泥路面JCP、沥青路面。其中沥青路面又根据厚度分为A、B、C类。

养护类型：预防性、小修、中修、大修

交通荷载：轻、中、重（根据20年累计当量轴载进行划分）

50

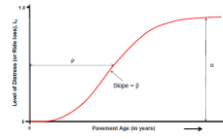
回归模型

曲线型回归

德州PMS使用的性能预测模型

$$L_i = \alpha e^{-\left(\frac{p}{t}\right)^\beta}$$

式中：
 L_i = 病害密度；
 t = 养护路龄；
 α 、 β 、 b = 回归参数。



来源：[1]

51

概率型模型

马尔可夫模型

预测结果是路面性能的概率分布，即 **状态向量**。

《公路技术状况评定标准》将路面使用性能分为优、良、中、次、差五个等级。状态向量表示在任何给定路龄时某路段处于每个等级的概率分布。例如，路龄为 t 时某路段的状态向量 $P(t)$ 为 $(P_1, P_2, P_3, P_4, P_5)$ ， $\sum_{i=1}^5 P_i = 1$ ，其中 P_1 为该路段在路龄为 t 时处于优的概率， P_2 为该路段在路龄为 t 时处于良的概率，以此类推。

路龄为 t 时的状态向量乘以 **马尔可夫转移矩阵 P** 即可得到路龄为 $t+1$ 时的状态向量。

$$P(t) = P(t-1) \cdot P$$

$$P(t) = P(t-1) \cdot P = P(t-2) \cdot P^2$$

$$\dots\dots\dots$$

$$P(t) = P(t-1) \cdot P = P(t-1) \cdot P^n$$

52

概率型模型

马尔可夫模型

转移矩阵的形式

假设在不经养护的条件下，路面性能不会提升只能劣化，则转移矩阵形式如下：

$$\begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} & p_{15} \\ 0 & p_{22} & p_{23} & p_{24} & p_{25} \\ 0 & 0 & p_{33} & p_{34} & p_{35} \\ 0 & 0 & 0 & p_{44} & p_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

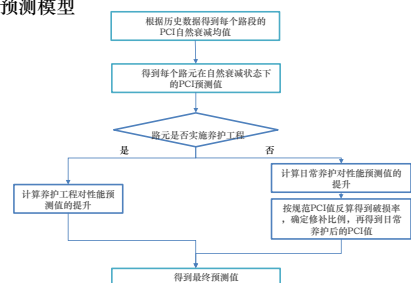
如果相邻检测周期间隔较短，则假设路面性能最多降低一个等级，则转移矩阵形式如下：

$$\begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_{22} & p_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{33} & p_{34} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{44} & p_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

来源：[1]

53

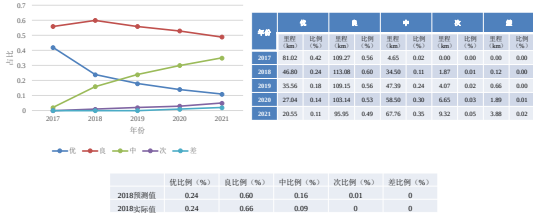
短期预测模型



54

马尔可夫预测模型结果示例

荣乌高速公路平段2018-2021年PCI性能分布预测



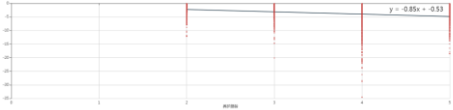
回归模型

差量回归模型

$$PCI_t - PCI_{t-1} = a \cdot t + b$$

式中：
t= 养护路龄；
 PCI_t = t年时的PCI值；
 PCI_{t-1} = t-1年时的PCI值；

交通等级为轻、养护路龄为0-5年的模型如图所示



养护措施效用

微表处

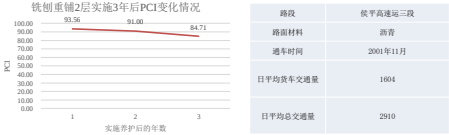
孙右高速大呼段下行于2015年8月实施了约34公里的微表处，这些路段在后面3年（2016、2017、2018）的PCI均值变化情况如下。



养护措施效用

铣刨重铺

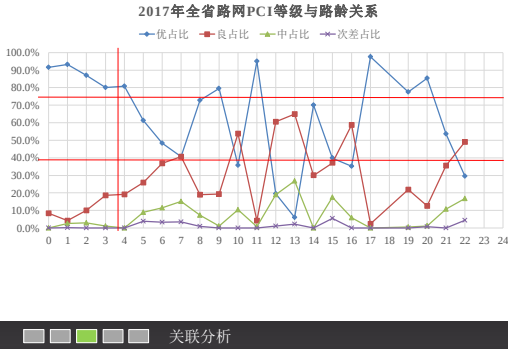
侯平高速运三段于2015年9月实施了约33公里的铣刨重铺2层，这些路段在后面3年（2016、2017、2018）的PCI均值变化情况如下。

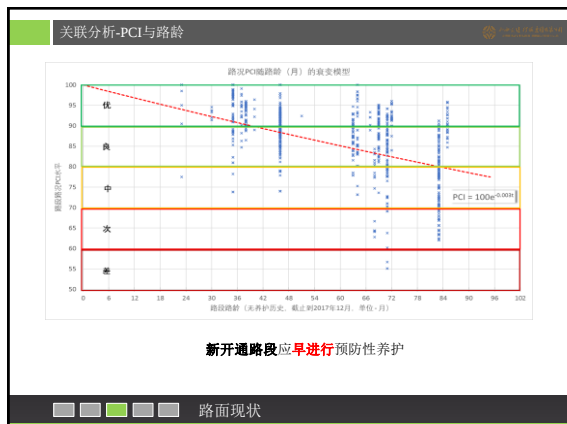


汇报内容

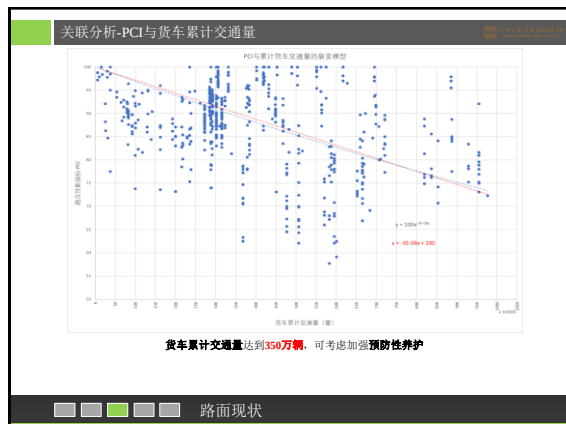
- 01 路面养护决策系统
- 02 养护决策工作介绍
- 03 路面性能预测
- 04 养护方案决策
- 05 资金优化分配
- 06 下一步计划

关联分析-PCI与路龄

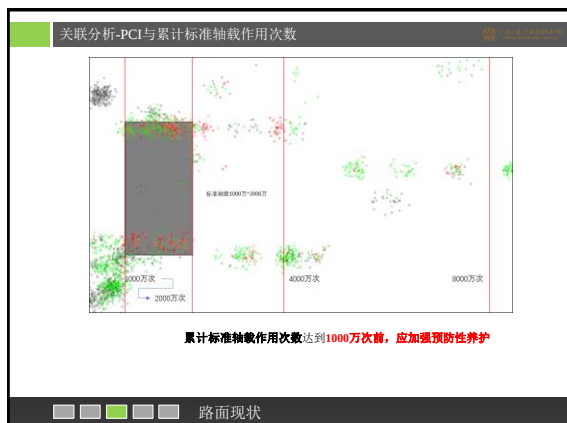




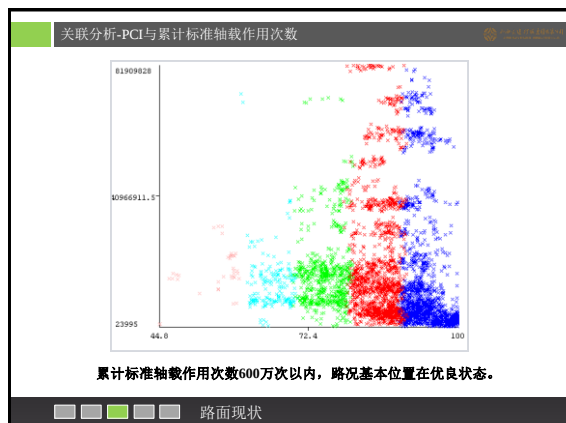
61



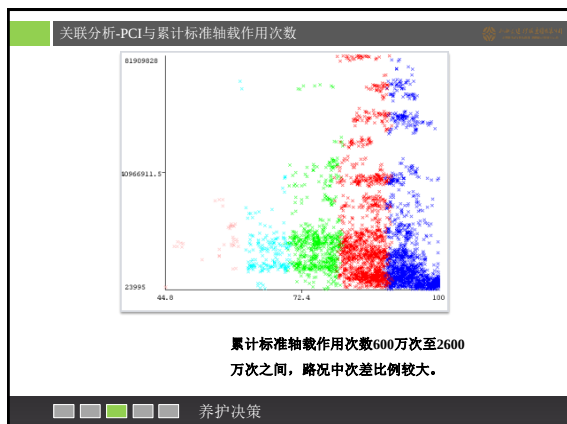
62



63



64



65



66

养护时机										
病害部位	交通等级	货车AADT	累计货车交通量	累计标准轴载当量	设施类型	路段	中间路段长度/公里	性能	危害性质	结论
路面车辙	严重				基层	10.51		AB	严重车辙	预防养护
路面车辙	中等				基层	10.10		AB	严重车辙	预防养护
路面车辙	严重	12800-53000			基层	10.41		AB	严重车辙	预防养护
路面车辙	严重	20000-53000			基层	12.55		AB	严重车辙	预防养护
路面车辙	严重		1012000000		基层	12.55	5	AB	预防性养护	V1-V2
路面车辙	严重				基层	11.1	112.131	AB	预防性养护	V1-V2
路面车辙	严重				基层	11.3.141	15	AB	预防性养护	V1-V2
路面车辙	严重	12800-53000			基层	10.61	16.71	AB	预防性养护	V1-V2
路面车辙	严重	20000-53000			基层	13	14	AB	预防性养护	V1-V2
路面车辙	严重				基层	13	14	AB	预防性养护	V1-V2
路面车辙	严重		17000000.10000000	1700万.456.324	基层	12.7	7	AB	预防性养护	V1-V2
路面车辙	严重				基层	12.6	6	C	预防性养护	A2-A3
路面车辙	严重				基层	12.5	5	C	预防性养护	A2-A3
路面车辙	严重				基层	12.7	7	C	预防性养护	A2-A3
路面车辙	严重				基层	12.3	13	C	预防性养护	A2-A3
路面车辙	严重	12800-53000			基层	12.55	15	C	预防性养护	A2-A3
路面车辙	严重	20000-53000			基层	12.7	14	C	预防性养护	A2-A3
路面车辙	严重				基层	12.4	14	C	预防性养护	A2-A3
路面车辙	严重		2200000.40000000	850万.200000	基层	12.6	6	C	预防性养护	A2-A3
路面车辙	严重				基层	12.5	5	C	预防性养护	A2-A3
路面车辙	严重				基层	12.7	7	C	预防性养护	A2-A3
路面车辙	严重				基层	12.3	13.131	C	预防性养护	A2-A3
路面车辙	严重	12800-53000			基层	12.55	15	C	预防性养护	A2-A3
路面车辙	严重	20000-53000			基层	12.7	14	C	预防性养护	A2-A3
路面车辙	严重		3000000.40000000	850万.200000	基层	12.4	14	C	预防性养护	A2-A3
路面车辙	严重				基层	12.5	5	C	预防性养护	A2-A3

养护决策

67

养护对策										
预防性：										
如果在路段通车时间不久，基本无病害时，可采取雾封层或还原再生的封层方式；										
如需为了提高路面抗滑，可选取路段试验含砂雾封层的处治措施；										
如需防止路表进水或提高路面的抗滑能力，可尝试使用降噪型微表处，各种精表处（3-6mm）；										
如果病害只是发生在表层，可通过各种封层或薄层罩面技术予以处治。										
恢复性：										
如果病害发生在基层，只能采取铣刨重铺或非开挖注浆的方式予以修复；										
如果病害只发生在上层，可尝试使用铣刨摊铺及就地热再生；										
针对结构性补强、裂缝处治、车辙病害、路面抗滑等病害应针对性的进行方案设计；										
水泥混凝土路面白改黑应注意粘结层的选用，应选择高粘乳化沥青或高粘沥青。										

养护决策

68

汇报内容	01	路面养护决策系统
	02	养护决策工作介绍
	03	路面性能预测
	04	养护方案决策
	05	资金优化分配
	06	下一步计划

69

路面养护优化决策方法	
• 最坏优先（Worst-First） • 最好优先（Best-First） • 基于阈值的决策（Threshold-Based） • 基于优化的决策（Optimization-Based）	

70

最坏优先决策	
• 各路段依据其状态进行排序，状况差的路段优先于状况好的路段进行维护直到预算用尽 • 被使用得最频繁的一种养护决策方法	

71

最好优先决策	
• 各路段依据其状态进行排序，状况好的路段优先于状况差的路段进行维护直到预算用尽 • 路面管理者可以在路面状况由好向坏变化过程中及时将路面使用性能维持在较好的状态	

72

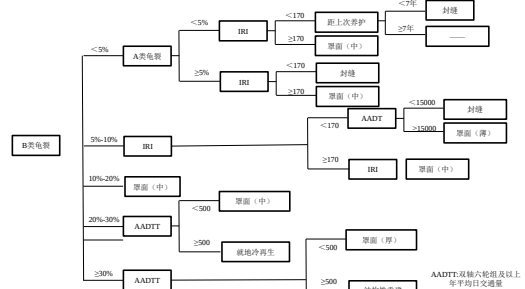
基于阈值的决策

- 在路面其自身状态达到某一阈值时进行维护
- 常用形式为养护决策树，决策表等

(美国德克萨斯州所用养护决策树)



养护措施的选择—加州决策树



73

74

基于优化的决策

- 路面养护方案通过优化模型求解得到
- 路面养护的资金往往可以被充分利用

$$\begin{aligned} \text{Max(Min)} \quad & Z \\ \text{s.t.} \quad & \forall t = 1, 2, \dots, T: \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N x_{mnt} C_m L_n H \leq B_t \\ & \forall t = 1, 2, \dots, T, n = 1, 2, \dots, N: \sum_{m=1}^M x_{mnt} = 1 \end{aligned}$$

式中，
 Z : 目标函数，根据不同需求设定；
 x_{mnt} : 0-1变量，路段 n 在第 t 年是否选择养护方案 m ，若选择，则为1，否则为0；
 C_m : 第 m 种养护方案的单价 (元/m²)；
 L_n : 路段 n 的长度 (m)；
 H : 路段宽度；
 B_t : 第 t 年的养护总预算。

(优化模型示例)

图 10-1-10

75

养护必要性权重计算

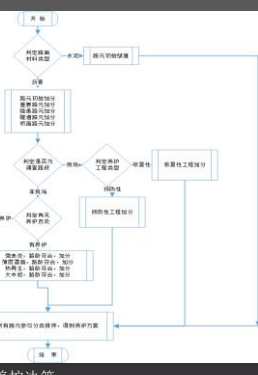
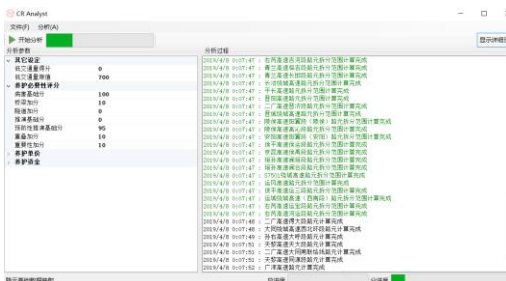


图 10-1-11

76

多目标加权排序进行方案决策与资金分配



77



78