

# 以可靠性为中心的城轨车辆运维管理研究及应用

陶涛<sup>1,2</sup> 周伟<sup>3,4</sup>

1. 广州地铁集团有限公司; 2. 城市轨道交通系统安全与运维保障国家工程研究中心;

3. 中南大学交通运输工程学院; 4. 中南大学轨道交通安全教育部重点实验室,  
轨道交通安全技术国际合作联合实验室, 轨道交通列车安全保障技术国家地方联合工程研究中心

**摘要:** 安全是轨道交通运营的前提和核心竞争力。作为最具可持续性的城市交通运输模式, 城市轨道交通对我国经济社会发展、民生改善和社会安全起着不可替代的全局性支撑作用。随着城市轨道交通的线网规模越来越大, 传统的车辆系统运维管理手段已经逐渐无法适应, 给车辆的安全运营带来了严峻挑战。本文在以可靠性为中心的维修(RCM)理论框架下, 提出了一套适用于城市轨道交通车辆系统以可靠性为中心的运维管理体系。在该体系中, 由城市轨道交通运营商运用FMECA理论与经典可靠性寿命分布模型, 对车辆进行部件级和系统级的可靠性分析, 有效辨识系统薄弱环节, 并预测部件及系统的可靠度, 为制定车辆运维策略提供数据支撑; 其次, 以车辆运营考核指标为决策依据, 研究车辆、系统和部件可靠性阈值, 从而形成一套客观、定量的车辆运维管理策略体系, 用以优化车辆维修规程, 降低运维成本, 提高车辆可靠性。最后, 本文以基于广州地铁某车型的真实运营数据为案例, 验证了方法的有效性和合理性。

**关键词:** 城轨车辆; 运维管理; FMECA; 经典故障统计分析法; 可靠性分析

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.12.101

## 一、引言

在进入21世纪以来, 我国的城市规模不断扩大, 经济建设持续高速发展, 城市人口数量和人均机动车保有量也在急剧上升, 这导致我国城市交通拥堵问题越来越突出。而城市轨道交通具有运量大、运输效率高、相对节能环保、运输成本低、人均占用道路面积小等特点, 因此城市轨道交通能够有效缓解城市交通拥堵压力。据中国城市轨道交通协会统计<sup>[1]</sup>, 截至2022年9月30日, 中国内地总共有52座城市开通运营城市轨道交通线路9788.64公里, 其中地铁7655.32公里。城市轨道交通系统包含有地铁交通系统、轻轨交通系统、独轨交通系统、新型交通系统等多种交通方式<sup>[2]</sup>。随着我国城市地铁运营里程不断增加, 地铁的安全可靠运营是保证我国城市轨道交通发展的关键所在。而地铁车辆是地铁运营的载体, 一旦在运营过程出现故障, 轻则导致运营晚点延误, 重则造成重大经济损失、人员伤亡以及严重的社会影响, 因此, 地铁车辆的运维管理研究, 对保障地铁安全可靠运行具有重大意义。

随着运维技术的逐渐演化, 运维理论的发展大致可以分为三个阶段: 事后维修阶段、定期预防性维修阶段、综合维修阶段。如今, 运维技术已经成为一门综合性学科, 用来指导设备的维修决策与实践, 以达到最佳

的维修目的。我国地铁车辆设备的维修体制长期以来是以定期维修为主体<sup>[3]</sup>, 而这种对所有设备统一采用定期维修方式会不可避免地造成地铁车辆的欠维修或者过度维修<sup>[4]</sup>。欠维修会造成地铁车辆维修的不及时, 因而地铁车辆发生故障的频率会增大。而过度维修则会造成地铁车辆的维修费用增加, 同时增加地铁车辆的停机时间, 降低地铁车辆的使用率。因此, 对地铁车辆设备维修方式进行合理的优化是十分必要的。近年来, 各地铁公司也正在探索实行事后维修、定期维修与视情维修相结合的维修制度, 从而提高地铁车辆的可靠性与经济性<sup>[5]</sup>。以可靠性为中心的维修(Reliability Centered Maintenance, RCM)基本思路是通过系统功能分析和故障分析, 明确故障模式、故障原因及影响, 然后针对每一个故障原因, 有针对性的确定预防维修工作类型, 然后把所有的预防性维修工作组合在一起形成系统的预防性维修大纲。本文在RCM的框架下, 探索通过可靠性分析及可靠性阈值确定的研究, 形成一套适用于城市轨道交通车辆系统的运维管理体系, 保障车辆运营质量和安全, 降低运维管理成本。

## 二、以可靠性为中心的城轨车辆运维体系

RCM的首要前提是可靠性分析, 本文所提出的运维体系的主要步骤有: 首先运用FMECA方法, 分析车辆系统可靠性, 并利用经典故障统计分析法计算和预测车辆部件可靠度; 其次, 以城市轨道交通运营考核指标为依据, 研究建立运营考核指标与车辆可靠性关系, 从而得出车辆可靠性阈值、系统可靠性阈值和部件可靠性阈值, 获得车辆、系统和部件状态信息; 最终, 在可靠性分析与阈值确定基础上, 实现车辆系统运维策略优化。

### A. 车辆系统可靠性

车辆系统包括转向架、制动等机械系统, 以及牵引、诊断等电气系统。运用FMECA方法, 分析车辆系统中的故障模式及其影响, 从不同角度发现车辆系统中的薄弱点和关键故障, 从而为评价和改进车辆系统的可靠性提供基本信息。

#### 1) 故障模式严酷度确定

严酷度即故障等级。根据车辆故障模式影响, 将故障等级分为以下四类: I. 影响车辆运营安全; II. 导致车辆晚点; III. 导致车辆终点站退出服务; IV. 影响车辆运营服务质量。

#### 2) 危害度计算

在特定故障等级下, 部件某一故障模式的危害度为 $C_{ij}$ , 即部件*i*的第*j*个故障模式的危害度, 可由下式计算:

$$C_{ij} = \alpha_{ij} = \beta_{ij} \lambda_i t$$

式中  $\alpha_{ij}$  为部件*i*故障模式*j*出现的次数与部件*i*出现的全部故障次数之比； $\beta_{ij}$ 为故障影响概率，一般由技术人员根据经验判断得到，如表1； $\lambda_i$ 为部件*i*的故障率；*t*为工作时间<sup>[6]</sup>。

表1 故障影响概率的取值

故障影响	$\beta$
肯定失效	$\beta=1$
可能失效	$\beta=0.5$
无影响	$\beta=0$

### 3) 危害性矩阵输出

应用危害性矩阵对每一种故障模式进行危害性分析，为确定维护措施的先后顺序提供依据。危害性矩阵横坐标为故障等级，纵坐标为危害度的矩阵图。从故障模式分布点向对角线作垂线，以该垂线与对角线的交点到坐标原点的距离作为度量故障模式危害性的依据。该距离越长，表示其危害性越大，越需要尽快采取维护措施，消除潜在危害性大的故障。

### B. 车辆部件可靠性

运用经典故障统计分析法，对车辆故障数据进行建模分析，从中找出车辆部件的故障规律，得到部件运行状态随时间的变化关系，并获得相应的可靠性指标，如可靠度和平均寿命等。

#### 1) 可靠度计算

设*N*0个同一型号部件，从时刻*t*0开始使用，到时刻*t*有*r*个部件发生故障，余下*N*<sub>s</sub>个部件未发生故障。显然，*r*和*N*<sub>s</sub>是关于时间的函数，分别记作*r* (*t*) 和*N*<sub>s</sub> (*t*)。由可靠度定义可知

$$R(t) = N_s(t) / N_0 = [N_0 - r(t)] / N_0$$

#### 2) 分布函数

在实际工作中，通常将一些非线性问题转换为线性问题进行分析。所以在分布类型拟合的过程中，将分布类型转换为线性问题。最常用的四种分布类型有指数分布、威布尔分布、标准正态分布和对数正态分布。根据电压传感器故障分布特点，选用威布尔分布进行分析。

威布尔分布函数

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m}$$

可靠度函数

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m}$$

平均寿命

$$MTTF = \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right)$$

### 3) 寿命计算

将可靠度函数两边取对数，得  $\ln R(t) = -\left(\frac{t}{\eta}\right)^m$ ，

再取对数得  $\ln[-\ln R(t)] = m \ln\left(\frac{t}{\eta}\right) = m(\ln t - \ln \eta)$ ，

以  $\ln t$  为横坐标， $\ln[-\ln R(t)]$  为纵坐标，将

$\ln[-\ln R(t)] = m \ln\left(\frac{t}{\eta}\right) = m(\ln t - \ln \eta)$  看成一次线性方

程。通过线性回归，实现寿命预计。

### C. 可靠性阈值研究

通过上述可靠性分析，可以获得相应的可靠性指标，为制定车辆运维策略提供依据。但若要以最少的运维成本保证车辆可靠性满足运营要求，则需结合车辆运营考核指标来设定可靠性阈值。

根据城市轨道交通通用标准，车辆运营考核指标包括车辆正线故障预警指标、车辆3分钟至5分钟晚点指标、车辆5分钟以上晚点指标和车辆救援指标。假设车辆可靠性阈值为*a*，则*a*为下达的车辆运营考核指标，包括上述四个维度指标。

1) 运用经典故障统计分析法可计算得出未来某年车辆各部件故障次数，假设分别为*n*<sub>1</sub>、*n*<sub>2</sub>、*n*<sub>3</sub>……*n*<sub>z</sub>，*z*为车辆部件总数。

2) 根据往年各部件故障次数和故障时导致上述四个维度影响次数，计算得出往年各部件故障导致上述四个维度影响的平均概率分别为*p*<sub>1</sub>、*p*<sub>2</sub>、*p*<sub>3</sub>……*p*<sub>z</sub>。

3) 计算得出未来某年车辆在上述四个维度影响的次数，假设为*N*，则

$$N = n_1 p_1 + n_2 p_2 + n_3 p_3 + \dots + n_z p_z$$

4) 将*N*与*a*比较。当*N*均小于或等于四个维度指标时，认定车辆状态良好；当*N*只大于上述第一个维度指标时，认定车辆状态一般，并进行预警；其他情况，认定车辆状态较差，并进行警告。

在部件可靠性阈值确定时，假设部件可靠性阈值（故障次数）分别为*c*<sub>1</sub>、*c*<sub>2</sub>、*c*<sub>3</sub>……*c*<sub>z</sub>。

1) 统计各部件往年故障总次数分别为*m*<sub>1</sub>、*m*<sub>2</sub>、*m*<sub>3</sub>……*m*<sub>z</sub>。

2) 根据FMECA方法，评定各部件故障时对上述四个维度的影响概率分别为*q*<sub>1</sub>、*q*<sub>2</sub>、*q*<sub>3</sub>……*q*<sub>z</sub>。

$$\text{所以 } c_i p_i = \frac{a m_i q_i}{m_1 q_1 + m_2 q_2 + m_3 q_3 + \dots + m_z q_z}$$

*i*=1、2、3……*z*，

$$\text{则 } c_i = \frac{a m_i q_i}{(m_1 q_1 + m_2 q_2 + m_3 q_3 + \dots + m_z q_z) p_i}$$

3) 将*n*<sub>*i*</sub>与*c*<sub>*i*</sub>比较。当*n*<sub>*i*</sub>均小于或等于四个维度的*c*<sub>*i*</sub>时，认定部件*i*状态良好；当*n*<sub>*i*</sub>只大于上述第一个维度的*c*<sub>*i*</sub>时，认定部件*i*状态一般，并进行预警；其他情况，认定部件*i*状态较差，并进行警告。

在系统可靠性阈值确定时，将车辆各系统可靠性阈值分别设定为*a*<sub>1</sub>、*a*<sub>2</sub>、*a*<sub>3</sub>……*a*<sub>*x*</sub>，*x*为车辆系统总数。

$$1) a_j = \frac{a (m_1 q_1 + m_2 q_2 + \dots + m_y q_y)}{m_1 q_1 + m_2 q_2 + m_3 q_3 + \dots + m_z q_z}$$

$j=1, 2, 3, \dots, x$ ,  $y$ 为系统 $j$ 的部件总数。

2) 计算得出未来某年系统 $j$ 在上述四个维度影响的次数, 假设为 $N_j$ , 则 $N_j=n_1p_1+n_2p_2+n_3p_3+\dots+n_y p_y$ 。

3) 将 $N_j$ 与 $a_j$ 比较。当 $N_j$ 均小于或等于四个维度的 $a_j$ 时, 认定系统 $j$ 状态良好; 当 $N_j$ 只大于上述第一个维度的 $a_j$ 时, 认定系统 $j$ 状态一般, 并进行预警; 其他情况, 认定系统 $j$ 状态较差, 并进行警告。

D. 运维策略优化

在上述车辆可靠性分析及阈值确定的基础上, 结合城市轨道交通的运行现状和要求, 优化运维策略及维修周期, 从而以更低的维修成本达到最优的车辆安全运营目的。

三、方法验证: 以广州地铁为例

本文以广州地铁某车型的实际数据为案例, 开展所提出运维管理体系的验证研究。

A. 广州地铁现状分析

广州地铁在网络化运营初期, 新投入设备设施的整体性能水平较高, 且未受到太大的客流强度冲击, 因此可靠度较高。然而从行业整体表现来看, 伴随网络化运营的不断延伸, 既有线路的设备设施随着时间的推移逐步劣化, 网络运营的整体可靠性呈下降趋势, 与网络化运营管理持续增长的要求存在矛盾。

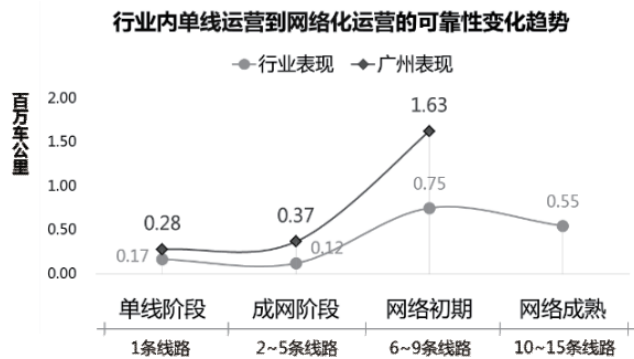


图1 行业内单线到网络化运营可靠性变化趋势

从广州地铁可靠性表现来看, 采用行业指标评价即运营服务可靠度的表现来表征广州地铁线网设备设施可靠性现状, 下图2为广州地铁2012-2016年行车服务可靠度表现。

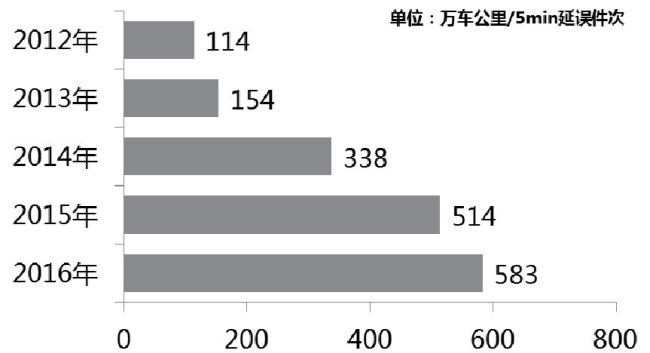


图2 2012-2016年广州地铁行车服务可靠度表现

从世界地铁协会 (CoMET) 2016年公布的数据可以看出, 2016年广州地铁服务可靠度指标达到583万车公里/5分钟晚点件次, 该指标在CoMET行业协会排名第一。可靠的设备设施保障和运行, 为广州地铁的运营服务取得政府、市民的信赖, 奠定了坚实的基础。但为了更好地应对未来超大线网管理的挑战, 广州地铁管理团队有必要立足现状, 依托行业设备设施健康管理实践经验, 查找目前广州地铁设备设施健康管理存在的问题, 为后续可靠性管理进一步优化提供支撑。

B. 车辆可靠性分析: FMECA分析

以广州地铁某车型诊断系统为例, 根据其历史故障数据, 计算得出其FMECA表如表2。从表2中可以看出, 诊断系统第II类故障等级的故障危害度为151.5, 第III类故障等级的故障危害度为90, 说明诊断系统故障对车辆运营影响主要是导致车辆晚点, 其次是导致车辆终点站退出服务。

应用危害性矩阵对每一种故障模式进行危害性分析, 为确定维护措施的先后顺序提供依据, 如图3所

表2 诊断系统FMECA表

编号	部件	故障模式	故障等级	$\alpha$	$\beta$	$t$ (万小时)	$\lambda$	$C$
1	网关板	通讯异常	II	1	1	5.913	2.88	17
2	VCU-A板	通讯异常	II	1	1	5.913	10.65	63
3	VCU-T板	通讯异常	II	1	0.5	5.913	13.87	41
4	AX模块	通讯超时	II	1	0.5	5.913	0.68	2
5	DX模块	通讯超时	II	1	0.5	5.913	1.86	5.5
6	BCT	通讯异常	II	1	1	5.913	2.71	16
7	VCU电源板	不工作	II	1	1	5.913	1.18	7
8	车辆屏	显示异常或不能显示	III	1	1	5.913	15.22	90

示。从图3可以看出，诊断系统故障模式的危害性从高到低依次为：2（VCU-A板通讯异常）、8（车辆屏显示异常或不能显示）、3（VCU-T板通讯异常）、1（网关板通讯异常）、6（BCT通讯异常）、7（VCU电源板不工作）、5（DX模块通讯超时）、4（AX模块通讯超时）。因此，需优先对危害性较高的故障采取措施，如定期对VCU-A板、VCU-T板和网关板进行清洁检查和更新软件，以及对车辆屏换型。

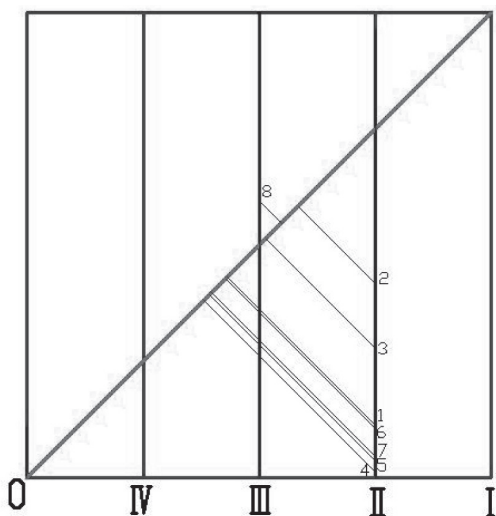


图3 诊断系统危害性矩阵图

C. 车辆部件可靠性：威布尔模型

以广州地铁某车型牵引系统电压传感器为例，根据其故障数据，可求得其可靠度，见表3。

表3 电压传感器可靠度

使用时间t（月）	1	2	3	4	5	6	7	8
可靠度	0.9667	0.9417	0.925	0.875	0.8667	0.8583	0.8583	0.8583
使用时间t（月）	9	10	11	12	13	14	15	16
可靠度	0.8583	0.85	0.85	0.8417	0.8333	0.8167	0.8	0.8
使用时间t（月）	17	18	19	20	21	22	23	24
可靠度	0.7833	0.7833	0.775	0.7667	0.7333	0.7333	0.7333	0.7333

换型工作。

D. 可靠性阈值确定

以广州地铁为例，根据本文所提出的可靠性阈值确定方法，研究广州地铁车辆运营考核指标与车辆可靠性关系，得出车辆可靠性阈值、系统可靠性阈值和部件可靠性阈值，并获得车辆、系统和部件状态信息。

(1) 车辆可靠性阈值

将N与a比较。当N均小于或等于四个维度指标时，认定车辆状态良好，并显示绿色；当N只大于上述第一个维度指标时，认定车辆状态一般，并显示黄色进行预警；其他情况，认定车辆状态较差，并显示红色进行警告。

选用威布尔分布模型，进行参数估计，根据表3，可计算得出对应的横坐标和纵坐标。用最小二乘法将坐标点拟合成一次线性方程，该方程为 $y=0.6327x-3.1988$ ，可求得 $m=0.6327$ ， $\eta=156.9289$ 。MATLAB拟合直线如下图所示。

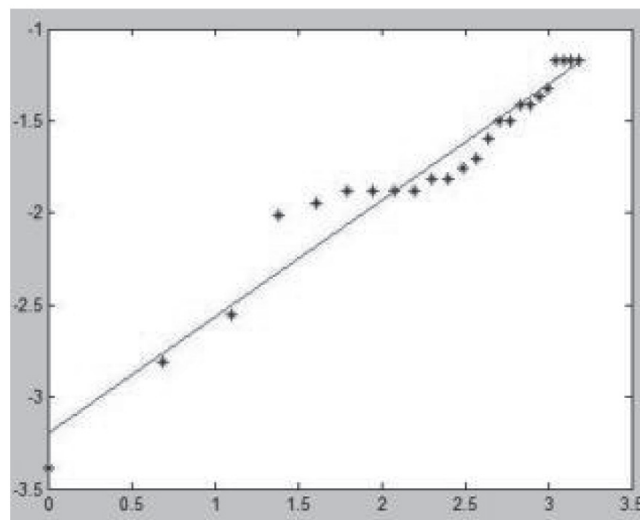


图4 电压传感器拟合图

$$\text{所以MTTF} = \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) = \eta \left(\frac{1}{m}\right)! = 221,$$

即电压传感器的平均寿命为221个月，即约18.4年。该型号电压传感器使用2年时可靠度约为0.73，故障率高，寿命较短，目前已在车辆大修时更新，并开展



图5 广州地铁某一线路车辆状态

(2) 部件可靠性阈值

将 $n_i$ 与 $c_i$ 比较。当 $n_i$ 均小于或等于四个维度的 $c_i$ 时,认定部件*i*状态良好,并显示绿色;当 $n_i$ 只大于上述第一个维度的 $c_i$ 时,认定部件*i*状态一般,并显示黄色进行预警;其他情况,认定部件*i*状态较差,并显示红色进行警告。

物资型号节点名称	维度系数阈值	2019
电子门控单元	0	

图6 广州地铁某一线路车辆电子门控单元状态

物资型号节点名称	维度系数阈值	2019
电子门控单元	0.171	1.878

图7 广州地铁某一线路车辆电子门控单元导致车辆3分钟至5分钟晚点情况

(3) 系统可靠性阈值

将 $N_j$ 与 $a_j$ 比较。当 $N_j$ 均小于或等于四个维度的 $a_j$ 时,认定系统*j*状态良好,并显示绿色;当 $N_j$ 只大于上述第一个维度的 $a_j$ 时,认定系统*j*状态一般,并显示黄色

进行预警;其他情况,认定系统*j*状态较差,并显示红色进行警告。

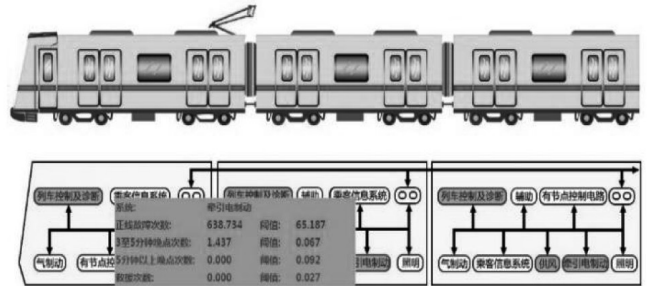


图8 广州地铁某一线路车辆牵引电制动系统状态

E. 运维策略优化

广州地铁自1997年开通运营以来,一直致力于维修模式的研究优化工作,2004年将维修手册中的车辆维修模式优化为日检、月检、半年检、年检。但随着广州市对城市轨道交通运营要求的不断提高,此种维修模式仍须改进。基于车辆可靠性分析,目前车辆日检已优化为四日检,并形成“系统修+四日检”的新型维修模式,在保证车辆可靠性的前提下,明显降低了运维成本。

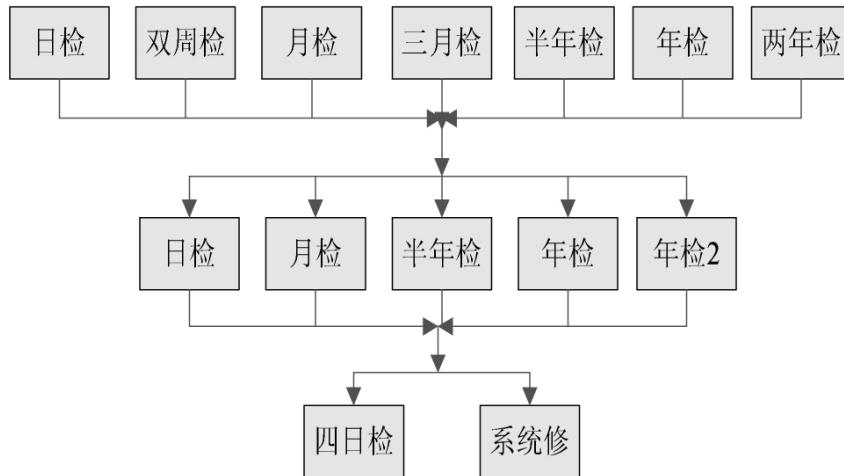


图9 维修模式优化

四、结论

随着城市轨道交通系统的逐渐壮大,如何为城轨车辆设备制定合理的维修策略,对于降低运行维修费用、减少运营成本、提高车辆可靠性、保障城轨安全运行都有重要的意义。本文以RCM理论为框架,立足城轨运营特点,首次完全由城市轨道交通运营商基于现场真实运营数据,通过可靠性分析,建立以可靠性为中心的车辆设备全寿命周期健康管理模式,制定科学、合理的运维管理策略,解决网络化运营中的痛点和难点,保障设备质量,降低运维成本。

参考文献

[1] 中国城市轨道交通协会 <https://www.camet.org.cn/xxfb/10944>.

[2] 柳拥军, 佟关林. 城市轨道交通车辆[M]. 北京: 科学出版社, 2016.

[3] 何宗华, 汪松滋, 何其光. 城市轨道交通车辆运营与维修[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.

[4] 王灵芝. 以可靠性为中心的高速列车设备维修决策支持系统研究[D]. 北京交通大学, 2011.

[5] 陆万忠, 柳拥军. 关于城市轨道交通车辆检修制度的改革设想[J]. 城市轨道交通研究, 2008, 05: 11-14.

[6] 钟璇. 可靠性分析在广州地铁车辆维保中的应用研究[J], 2017, 06: 112-114