doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2018.02.013

城市轨道交通固定资产更新改造技术条件研究

白文飞¹, 韩嵩², 张伟³, 孙全欣⁴, 安茹¹

(1. 北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室, 北京 100044; 2. 北京市基础设施投资有限公司, 北京 100101; 3. 北京市交通委员会, 北京 100073; 4. 北京交通大学交通运输学院, 北京 100044)

摘要: 为加强城市轨道交通固定资产更新改造的科学管理, 提出将实际使用寿命和以可靠性指标为判定标准的健康状态作为其更新改造技术条件, 并分别建立基于韦布尔-泊松过程的固定资产使用寿命估计模型和基于平均故障率、平均故障间隔时间和平均可用度的固定资产健康状态评定模型。最后, 利用北京地铁2号线钢轨的伤损数据对提出的更新改造技术条件及评估模型进行实例验证。结果表明, 改进的更新改造技术条件及评估模型能够对城市轨道交通固定资产的更新改造需求进行量化分析评定, 在城市轨道交通固定资产更新改造实际管理中具有实用性和更好的可操作性。

关键词: 城市轨道交通; 固定资产; 更新改造; 技术条件; 韦布尔-泊松过程; 寿命估计; 健康状态; 可靠性指标
中图分类号: U491.227 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6073(2018)02-0077-06

Technical Conditions for Renewal and Renovation of Capital Assets in Urban Rail Transit

BAI Wenfei¹, HAN Song², ZHANG Wei³, SUN Quanxin⁴, AN Ru¹

(1. State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044; 2. Beijing Infrastructure Investment Co., Ltd, Beijing 100101; 3. Beijing Municipal Commission of Transport, Beijing 100073; 4. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract: In order to strengthen the management of urban rail transit, the technical conditions of existing renewal and renovation were improved. Service life of capital assets and the health condition based on a reliability index were regarded as technical conditions for renewal and renovation. The estimation model for the service life of capital assets, which was based on the Weibull-Poisson process, and an evaluation model for the health condition of capital assets, which was based on the average failure rate, mean time between failures and average availability, were established. Finally, a case study on the technical conditions and the renewal and renovation models based on rail defects data of the up line on the Beijing Metro Line 2 was created. The results show that the technical conditions and the evaluation model of the improved renewal and renovation can be used to quantitatively analyze and evaluate the demand for renewal or renovation in urban rail transit. It solves the problems of insufficient live information due to the existing technical conditions as well as the problem of the lack of an evaluating index for health conditions. It has practicality and better maneuverability in the actual management of renewal and renovation of capital assets in urban rail transit.

Keywords: urban rail transit; capital assets; technical conditions for renewal and renovation; Weibull-Poisson process; service life estimation; health condition; reliability index

收稿日期: 2017-08-28 修回日期: 2017-10-09

第一作者: 白文飞, 男, 博士研究生, 研究方向为轨道交通基础设施管理, wfbai@bjtu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578057); 北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室自主研究项目(RCS2016ZT007)

1 研究背景

近年来城市轨道交通得到了快速发展,随着线网规模不断扩大,线路运营年限不断增加,城市轨道交通固定资产更新改造问题愈发凸显。首先,更新改造资金的快速增长给政府带来巨大的财政压力;其次,线网规模的不断扩大给固定资产状态维护增加了困难,安全运营形势越来越严峻。目前,城市轨道交通固定资产更新改造技术条件主要包括固定资产的设计寿命和健康状态两类^[1],但存在设计寿命信息不完整、对资产实际使用状态考虑不足以及健康状态指标不完善等问题^[2],难以为更新改造管理提供足够的支撑。因此,确定更加明确可行的更新改造技术条件,为更加科学合理分配使用更新改造资金提供依据,更好地满足安全运营需求,成为亟待解决的问题。

对于固定资产更新改造技术条件的研究,相关学者进行了大量的工作。Kleine等^[3]提出将固定资产健康状态作为更新改造的技术条件,并分别基于Markov-chain建立了固定资产健康状态评定和预测模型;Caetano和Teixeira^[4]建立了固定资产可用度评估模型,并利用固定资产可用度作为更新改造的判定标准;Andrews等^[5]提出依据固定资产的状态和维修成本来确定其是否需要进行更新改造,并指出当固定资产的状态使其维修成本高于更新改造成本时,应进行更新改造;Durango-Cohen和Madanat^[6]提出依据固定资产的状态和更换资金来制定更新改造策略,并基于隐性马尔科夫决策过程建立了固定资产更新改造决策模型;Guler^[7]提出依据固定资产的剩余寿命确定资产的更新周期,并基于韦布尔分布建立了资产剩余寿命评估模型。

由于城市轨道交通资产健康状态指标不完善等问题,上述研究难以在中国的城市轨道交通资产更新管理工作中进行实际应用。虽然国内也有不少学者针对城市轨道交通固定资产更新改造问题进行了研究,例如李永亮和王耀^[8]分析总结了目前北京市城市轨道交通资产管理存在的主要问题,并给出了相应的对策建议;田振清^[9]分析了典型的城市轨道交通固定资产更新改造补贴模式的特征及适用性,并提出了补贴资金额的计算方法;杨亦慧^[10]和吴燕伶^[11]在分析城市轨道交通固定资产管理模式及其演变过程的基础上提出了更新改造资金核算的方法。但是相关研究大多是对管理政策的论述或研究政府如何对城市轨道交通企业进行财政补贴,缺少对城市轨道交通固定资产更新改造

技术条件的研究。

本研究针对城市轨道交通固定资产更新改造管理现状,提出以实际使用寿命和可靠性指标为判定标准的健康状态作为城市轨道交通固定资产更新改造技术条件,并分别建立相应的评估模型,解决现有技术条件存在的主要问题,使新的技术条件更加科学合理,更便于城市轨道交通固定资产更新改造管理的实际操作。

2 评估模型

2.1 固定资产使用寿命估计模型

通过计算固定资产的使用寿命可估计固定资产更新改造周期。本研究基于韦布尔-泊松过程建立固定资产使用寿命估计模型来估计固定资产的使用寿命。模型以资产使用过程中累计发生故障次数作为资产更新标准,并设定当某类资产在使用过程中累计发生 N 次故障后需要进行更新,其中不同类型资产的更新标准中的累计故障次数不一致,故障标准也不一致,应根据实际管理情况设定。

根据某个固定资产的使用和维修记录,我们可以知道该固定资产的投入使用时间和发生故障的时刻,用 T_0 表示该资产投入使用的时刻,用 $T_1, T_2, T_3, \dots$ 表示资产在使用过程中发生故障的时刻,则资产两次故障之间的时间间隔 X_i 为

$$X_i = T_i - T_{i-1}, i = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

用 $N(t)$ 表示 $(0, t]$ 时间范围内资产发生的故障次数,则 $N(0) = 0$ 。一般来说,一个固定资产在不相交的两段时间范围内发生的故障次数相互独立,因此我们假设 $N(t)$ 具有独立增量,即对任意 n 及不相交的区间 $(a_i, b_i], i = 1, 2, \dots, n$, $N(b_i) - N(a_i)$ 相互独立,此时对于任意的 $0 \leq t < s$,在 $(t, s]$ 时间范围内资产发生的故障次数 k 服从有参数 $\Lambda(t, s)$ 的泊松分布

$$P\{N(s) - N(t) = k\} = \frac{[\Lambda(t, s)]^k}{k!} \exp\{-\Lambda(t, s)\}, k = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

其中

$$\Lambda(t, s) = \int_t^s \lambda(\mu) d\mu \quad (3)$$

这里的 $\lambda(\mu)$ 是一个非负函数,表示资产在某个时刻的故障强度,用韦布尔失效率函数表示资产的故障强度函数,则

$$\lambda(t) = \lambda\beta t^{\beta-1}, t \geq 0, \lambda, \beta > 0 \quad (4)$$

则资产发生首次故障前的时间 X_1 有

$$P\{X_1 > t\} = P\{N(t) = 0\} = \exp\{-\Lambda(t)\} = \exp(-\lambda t^\beta), t \geq 0 \quad (5)$$

用 x 表示资产的寿命, $x = T_N - T_0$, 则 x 的概率分布密度可用公式 (6) 表示为

$$f(x) = \frac{[\int_0^x \lambda\beta u^{\beta-1} du]^{N-1}}{(N-1)!} \lambda\beta x^{\beta-1} \exp\{-\int_0^x \lambda\beta u^{\beta-1} du\} \quad (6)$$

此时资产的平均使用寿命 $M(x)$ 可用公式 (7) 表示为

$$M(x) = \int_0^\infty xf(x)dx \quad (7)$$

上式中的 λ 和 β 为待估参数, 可根据资产的历史故障数据利用极大似然估计得到。假设从资产投入使用到时刻 t 共发生过 n 次故障, 即 $0 \leq T_1 \leq \dots \leq T_n \leq t$, 则 $T_1, \dots, T_n$ 的联合密度为

$$f(T_1, \dots, T_n) = \exp(-\lambda T_n^\beta) \prod_{i=1}^n (\lambda\beta T_i^{\beta-1}), \quad (8)$$

$$0 \leq T_1 \leq \dots \leq T_n \leq t$$

然后由 $\frac{\partial f(T_1, \dots, T_n)}{\partial \lambda} = 0$ 和 $\frac{\partial f(T_1, \dots, T_n)}{\partial \beta} = 0$ 可得到 λ 和 β 的最大似然估计为

$$\hat{\beta} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \ln \frac{t}{T_i}} \quad (9)$$

$$\hat{\lambda} = \frac{n}{t^{\hat{\beta}}} \quad (10)$$

通过公式 (7), 可以计算得到固定资产的使用寿命, 确定该固定资产的更新改造周期。

2.2 固定资产健康状态评定模型

通过评定固定资产健康状态是否满足安全运营需要, 可判定是否对资产进行更新改造。本文基于平均故障率、平均故障间隔时间和平均可用度建立固定资产健康状态评定模型对其健康状态进行评定, 其中不同类型资产的指标阈值不一致, 应根据实际管理情况设定。

2.2.1 平均故障率

平均故障率指资产在一定时间范围内单位时间发生故障的比率, 反映了资产在一定时间范围内的故障强度^[12]。

根据固定资产的维修记录, 可以知道该资产从投入使用到当前时刻这段时间范围 T 内发生的故障次

数。用 $N(T)$ 表示, 则 $N(T)$ 的分布为

$$P_k(T) = P\{N(T) = k\}, k = 0, 1, 2, \dots \quad (11)$$

式中, k 表示故障发生次数。

此时该固定资产在时间 T 范围内故障平均发生次数为

$$M(T) = EN(T) = \sum_{k=1}^{\infty} kP_k(T) \quad (12)$$

式中, E 表示期望值, 则该固定资产在时间 T 范围内的平均故障率为

$$f(T) = \frac{M(T)}{T} = \frac{\sum_{k=1}^{\infty} kP_k(T)}{T} \times 100\% \quad (13)$$

2.2.2 平均故障间隔时间

平均故障间隔时间指资产相邻两次故障之间的平均时间, 反映了设备故障对运营的影响强度。

根据固定资产的维修记录, 可以知道该固定资产发生故障的时刻。假设该资产从投入使用到当前时刻这段时间范围 T 内共发生 $N(T)$ 次故障, 首次故障前资产使用的时间用 t_0 表示, 每次故障经过修复继续投入使用的工作时间用 $t_1, t_2, \dots, t_{N(T)}$ 表示, 则该资产在时间范围 T 内平均故障间隔时间为

$$MTBF(T) = \frac{1}{N(T)+1} \sum_{i=0}^{N(T)} t_i \quad (14)$$

2.2.3 平均可用度

平均可用度指资产使用一定时间范围内, 处于正常使用状态的时间比例, 反映了资产在规定时间内保持功能的一种能力。

根据固定资产的使用和维修记录, 可以知道每个时刻该固定资产是否正常工作, 用 $X(t)$ 表示资产从投入使用到当前时刻这段时间范围 T 内的时刻 t ($0 \leq t \leq T$) 是否正常工作, 则

$$X(t) = \begin{cases} 1, & \text{若时刻 } t \text{ 正常工作} \\ 0, & \text{若时刻 } t \text{ 无法正常工作} \end{cases} \quad (0 \leq t \leq T) \quad (15)$$

其在时刻 t 的瞬时可用度定义为

$$A(t) = P\{X(t) = \text{正常工作}\} \quad (16)$$

即在时刻 t 设备处于正常状态的概率。在瞬时可用度 $A(t)$ 的基础上, 资产在时间 T 范围内平均可用度为

$$A(T) = \frac{1}{T} \int_0^T A(t) dt \quad (17)$$

通过公式 (13)、(14) 和 (17), 可以计算得到每个固定资产在一段时间范围内的平均故障率、平均故

障间隔时间和平均可用度,根据各类固定资产修理规则中设定的资产使用的安全阈值,可以对固定资产的健康状态进行评定,只要3个指标中有1个指标的值超过了设定的安全阈值,即可认为该资产的健康状态不满足安全运营需求,需要对其进行更新改造。

3 案例分析

钢轨是一类重要的轨道交通固定资产,本研究以北京地铁2号线上行钢轨的更新改造为例对提出的固定资产更新改造技术条件及评估模型进行实例验证。北京地铁2号线上行运营里程为23.029 km,上次钢轨更新改造完成的时间为2007年12月27日^[13],以此时间作为2号线钢轨寿命的开始时刻,利用2008年1月到2016年4月的钢轨伤损检测数据来分析其使用寿命和健康状态,判定其更新改造需求。

北京市地方标准《城市轨道交通设施养护维修技术规范》规定,成段更换500 m及以上的钢轨属于更新改造,因此本研究采用500 m长度将线路上的钢轨划分成多个钢轨单元,以每个钢轨单元为研究对象,

利用本研究提出的城市轨道交通固定资产更新改造技术条件评估模型对每个钢轨单元的剩余寿命和健康状态进行分析。

根据《北京地铁工务维修规则》^[14],当线路上的钢轨出现重伤时,应适当降低线路允许速度,并及时更换重伤钢轨。因此,将钢轨单元出现重伤时算作钢轨单元故障。参考《铁路线路修理规则》^[15]的规定:当钢轨累计疲劳重伤平均达到2~4根/km时,应安排更换,设定北京地铁的每个钢轨单元累计疲劳重伤达到3根时,应安排更新改造。

3.1 使用寿命估计结果

根据北京地铁的钢轨更新改造标准和2008年1月到2016年4月的钢轨疲劳伤损检测数据,选取了2号线上行全部的23个达到更新改造标准的钢轨单元,即累计发生3次及以上疲劳重伤的钢轨单元,利用上文提出的寿命估计模型计算这23个钢轨单元的使用寿命,估计其更新周期,并与实际寿命进行了对比,具体结果如表1所示。

表1 北京地铁2号线上行钢轨单元使用寿命估计结果

Tab. 1 Estimating results of service life for rail segments of the up line on Beijing Metro Line 2

钢轨单元序号	钢轨单元起始里程/km	股别	参数 λ 估计结果	参数 β 估计结果	估计寿命/d	实际寿命/d	误差绝对值/d
1	0.0	右	1.870×10^{-8}	2.355	2 925	2 525	400
2	0.5	左	3.526×10^{-16}	4.572	2 959	2 779	180
3	0.5	右	1.136×10^{-5}	1.556	2 935	2 816	119
4	3.5	左	7.938×10^{-11}	3.072	2 673	2 374	299
5	4.0	右	1.093×10^{-7}	2.135	2 923	2 813	110
6	5.0	右	1.193×10^{-12}	3.623	2 558	2 530	28
7	7.0	左	1.000×10^{-10}	3.043	2 671	2 407	264
8	7.0	右	5.228×10^{-9}	2.600	2 243	2 185	58
9	7.5	左	7.011×10^{-7}	1.903	2 924	2 770	154
10	8.5	左	7.262×10^{-10}	2.760	2 931	2 936	5
11	9.0	右	1.461×10^{-8}	2.386	2 925	2 898	27
12	9.5	左	2.927×10^{-8}	2.363	2 356	2 076	280
13	10	左	1.383×10^{-6}	1.855	2 504	2 752	248
14	10.5	左	4.189×10^{-9}	2.542	2 927	2 976	49
15	10.5	右	3.296×10^{-15}	4.294	2 955	2 939	16
16	11.5	左	7.303×10^{-10}	2.823	2 446	2 193	253
17	11.5	右	3.452×10^{-9}	2.703	1 951	1 777	174
18	12.0	左	5.574×10^{-8}	2.255	2 574	2 023	551
19	13.0	左	4.303×10^{-8}	2.251	2 924	3 037	113
20	15.5	右	6.171×10^{-8}	2.270	2 335	1 917	418
21	16.0	左	1.610×10^{-13}	3.845	2 736	2 580	156
22	16.5	左	9.010×10^{-11}	3.084	2 488	2 052	436
23	18.5	右	1.192×10^{-10}	2.985	2 934	2 674	260

由表 1 可以看到,所有的钢轨单元使用寿命估计结果误差均小于 2 年,并且 82.61%的钢轨单元使用寿命估计结果误差小于 1 年。依据《北京市轨道交通固定资产更新改造项目财政专项资金管理暂行办法》^[16]的规定,北京地铁线路管理部门对需要更新改造的固定资产应提前 1 年提交更新改造申请。因此,本文提出的模型的计算精度能够满足固定资产更新改造实际管理工作的需要,准确估计固定资产的更新周期,避免了原有按照固定资产设计寿命进行更新改造管理时,对实际使用状态考虑不足的问题,为科学安排固定资产更新改造计划提供了决策支持。

3.2 健康状态指标计算

根据北京地铁 2008 年 1 月到 2016 年 4 月的钢轨疲劳伤损检测数据,2 号线上行右股总共有 33 个钢轨单元发生过疲劳重伤,论文选取上行右股发生过重伤的全部 33 个钢轨单元,计算了其 2008 年 1 月到 2016 年 4 月的平均故障率、平均故障间隔时间和平均可用度,判定其更新改造需求,具体结果如表 2 所示。

根据每个钢轨单元累计疲劳重伤达到 3 根时,应安排更新改造,每个钢轨单元在 2008 年 1 月到 2016 年 4 月这段时间范围内的平均故障率超过 0.10%或平均故障间隔时间不大于 730 d 或平均可用度不大于 99.90%时,应安排更新改造。

由表 2 中可以看到,截止到 2016 年 4 月,钢轨单元 2、8、15、16、18、19、20、21、22、23、25、28、29 的健康状态已达到更新改造条件,北京地铁线路管理部门应及时对该钢轨单元进行更新改造;剩余钢轨单元健康状态未达到更新改造条件。因此,本研究提出的基于平均故障率、平均故障间隔时间和平均可用度的固定资产健康状态评定模型能够定量判定固定资产的更新改造需求。

表 2 北京地铁 2 号线上行右股钢轨单元健康状态指标计算结果

Tab. 2 Calculation results of health conditions for rail segments of the right track of the up line on Beijing Metro Line 2

钢轨单元序号	钢轨单元起始里程/km	平均故障率/%	平均故障间隔时间/d	平均可用度/%
1	0.0	0.07	973	99.93
2	0.5	0.10	730	99.90
3	1.0	0.03	1 460	99.97
4	1.5	0.07	973	99.93

续表

钢轨单元序号	钢轨单元起始里程/km	平均故障率/%	平均故障间隔时间/d	平均可用度/%
5	2.0	0.07	973	99.93
6	2.5	0.03	1 460	99.97
7	3.0	0.03	1 460	99.97
8	3.5	0.14	584	99.86
9	4.0	0.07	973	99.93
10	4.5	0.03	1 460	99.97
11	5.0	0.03	1 460	99.97
12	5.5	0.03	1 460	99.97
13	6.0	0.07	973	99.93
14	6.5	0.07	973	99.93
15	7.0	0.14	584	99.86
16	7.5	0.10	730	99.90
17	8.0	0.03	1 460	99.97
18	8.5	0.10	730	99.90
19	9.5	0.17	487	99.83
20	10.0	0.14	584	99.86
21	10.5	0.10	730	99.90
22	11.5	0.17	487	99.83
23	12.0	0.14	584	99.86
24	12.5	0.03	1 460	99.97
25	13.0	0.10	730	99.90
26	14.5	0.07	973	99.93
27	15.0	0.07	973	99.93
28	16.0	0.14	584	99.86
29	16.5	0.17	487	99.83
30	19.5	0.03	1 460	99.97
31	20.0	0.03	1 460	99.97
32	22.0	0.07	973	99.93
33	22.5	0.03	1 460	99.97

4 结论

本文提出了将实际使用寿命和以可靠性指标为判定标准的健康状态作为城市轨道交通固定资产更新改造技术条件,并分别建立了基于韦布尔—泊松过程的固定资产使用寿命估计模型和基于平均故障率、平均故障间隔时间、平均可用度的固定资产健康状态评定模型。利用北京地铁 2 号线上行钢轨伤损数据,在将线路上的钢轨划分成多个钢轨单元的基础上,对本文提出的更新改造技术条件及评估模型进行了验证,估计了北京地铁 2 号线上行钢轨单元的使用寿命,评估了钢轨单元的健康状态,分析了钢轨单元的更新改造周期和需求。结果表明,本文提出的城市轨道交通固

定资产更新改造技术条件及评估模型,与原有技术条件只能定性分析判定固定资产更新改造需求相比更加科学合理,能够明确定量的分析判定,解决了原有技术条件存在的寿命信息不完整、对实际使用状态考虑不足以及健康状态难以量化评定的问题。在城市轨道交通固定资产更新改造实际管理中具有实用性和更好的可操作性,能够为管理部门科学安排固定资产更新改造计划提供决策支持。

参考文献

- [1] 城市轨道交通设施养护维修技术规范: DB11/T 718-2016[S]. 北京: 北京市质量技术监督局, 2016: 22-23.
Code for maintenance of urban rail transit facility: DB11/T 718-2016[S]. Beijing: Beijing Bureau of Quality and Technical Supervision, 2016: 22-23.
- [2] LIU Zhili, BAI Yun, WU Yanling. Decision-making method on rail transit infrastructure renovation project[C]// 2nd international conference on management science and engineering. Advances in artificial intelligence, Chengdu, 2011: 1-6.
- [3] KLEINER Y. Scheduling inspection and renewal of large infrastructure assets[J]. Journal of infrastructure systems, 2001, 4(7): 136-143.
- [4] CAETANO L F, TEIXEIRA P F. Availability approach to optimizing railway track renewal operations[J]. Journal of transportation engineering, 2013, 139(9): 941-948.
- [5] ANDREWS J, PRESCOTT D, DE ROZIÈRES F. A stochastic model for railway track asset management[J]. Reliability engineering and system safety, 2014, 130: 76-84.
- [6] DURANGO-COHEN P L, MADANAT S M. Optimization of inspection and maintenance decisions for infrastructure facilities under performance model uncertainty: A quasi-bayes approach[J]. Transportation research part A: policy and practice, 2008, 42(8): 1074-1085.
- [7] GULER H. Decision support system for railway track maintenance and renewal management[J]. Journal of computing in civil engineering, 2013, 27(3): 292-306.
- [8] 李永亮, 王耀. 北京市城市轨道交通资产管理问题及对策研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2012, 12(2): 194-197.
LI Yongliang, WANG Yao. Problems and recommendations of Beijing metro asset management[J]. Journal of transportation systems engineering and information technology, 2012, 12(2): 194-197.
- [9] 田振清. 典型城市轨道交通固定资产更新改造补贴模式分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2011, 11(3): 169-175.
TIAN Zhenqing. Analysis on subsidies modes of capital asset replacement in urban rail system[J]. Journal of transportation systems engineering and information technology, 2011, 11(3): 169-175.
- [10] 杨亦慧. 城市轨道交通更新改造资金核算模式研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
YANG Yihui. The study on capital accounting model of innovation and reformation of urban railway[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [11] 吴燕伶. 城市轨道交通固定资产更新改造补贴激励机制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
WU Yanling. Incentive contract on renewal and reconstruction subsidy of fixed-asset in urban railway system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [12] 曹晋华, 程侃. 可靠性数学引论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 2-6.
CAO Jinhua, CHENG Kan. Introduction to reliability mathematics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 2-6.
- [13] 张树人. 北京地铁既有线路更新改造工程管理实践[J]. 现代城市轨道交通, 2008(6): 10-13.
ZHANG Shuren. Management practice of existing lines renewal project in Beijing metro[J]. Modern urban transit, 2008(6): 10-13.
- [14] 北京地铁工务维修规则: QB(J)BDY(A)XL003-2015[A]. 北京: 北京市地铁运营有限公司, 2015.
Beijing metro track maintenance rules: QB(J)BDY(A)XL003-2015[A]. Beijing: Beijing Metro Operation Co. LTD, 2015.
- [15] 铁路线路修理规则: 铁运[2006] 146号[A]. 北京: 中国铁道出版社, 2006.
Rules of railway track maintenance: [2006] No.146[A]. Beijing: China Railway Publishing House, 2006.
- [16] 北京市轨道交通固定资产更新改造项目财政专项资金管理暂行办法: 京财经 [2010] 1881号[A]. 北京: 北京市财政局, 2010.
Financial special funds management interim procedures for renewal and renovation of capital assets in urban rail transit of Beijing: [2010] No.1881[A]. Beijing: Beijing Municipal Bureau of Finance, 2010.

(编辑: 郝京红)