

基于全数检验与定时截尾试验的地铁列车整车可靠性验收方法^{*}

叶 萌¹ 付 勇¹ 秦 勇^{1,2} 王修齐¹ 张志龙³

(1. 北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室, 100044, 北京;

2. 北京市城市交通信息智能感知与服务工程技术研究中心, 100044, 北京;

3. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 266111, 青岛//第一作者, 硕士研究生)

摘 要 提出地铁列车可靠性验收的基本条件, 分别介绍了基于定时截尾试验、序贯截尾试验和全数检验的 3 种经典的可靠性验收方法; 提出基于全数检验和定时截尾试验的地铁列车整车可靠性验收方法, 设计了可靠性验收的流程; 以某一具体项目为例, 对该可靠性验收方法进行了验证。结果证明: 基于全数检验与定时截尾试验的地铁列车整车可靠性验收方法是有效的, 可以节省试验时间。

关键词 地铁列车; 可靠性验收; 全数检验; 定时截尾试验
中图分类号 U270.6⁺7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.03.005

Reliability Acceptance Method of Whole Metro Train Based on One Hundred Percent Inspection and Fixed Time Testing

YE Meng, FU Yong, QIN Yong, WANG Xiuqi, ZHANG Zhilong

Abstract The basic conditions for reliability acceptance of metro train are put forward, three classical reliability acceptance methods based on fixed time testing, sequential truncation test and one hundred percent inspection are introduced respectively. On this basis, a reliability acceptance method of whole metro train is proposed, the process of reliability acceptance is designed. Taking a specific project as an example, the reliability acceptance method is verified. The results show that the reliability acceptance method based on one hundred percent inspection and fixed time testing is effective in terms of the test time saving.

Key words metro train; reliability acceptance; one hundred percent inspection; fixed time testing

First-author's address State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, 100044, Beijing, China

地铁列车可靠性是指“在规定运用条件下、在规定时间内地铁列车按规定要求完成旅客运输任务的能力”^[1]。可靠性验收是检验批量生产的产品是否满足产品批量生产的可靠性要求, 是大型复杂机械系统质量考核的一项重要任务。随着科技的发展, 电子科技的引入使得地铁列车的功能更加强大而复杂, 而复杂度高的系统可能导致地铁列车可靠性降低^[2]。许多地铁公司对地铁列车可靠性进行量化要求, 并要求在地铁列车交付后必须进行可靠性验收。因此, 制定科学合理的可靠性验收方法, 给出客观的地铁列车可靠性验收结论, 对地铁列车可靠性水平的提高具有重要意义。

目前, 研究者针对可靠性验收进行了大量的工作。文献[3]对我国动车组可靠性验证方法进行了叙述, 并提出了将动车组整车故障分为 10 级的建议; 文献[2]以某一项目为例, 对城市轨道交通车辆可靠性验证试验的流程、验证方式、验证指标等进行了叙述; 文献[4]对城市轨道交通车辆可靠性考核是以车队为单位考核还是以独立列车为单位考核进行了探讨; [5]分析了地铁列车的故障特征, 提出了可靠性验证方法。

文献[2-5]虽对可靠性验证方法的相关问题进行了研究, 但未能很好地解决地铁列车可靠性试验时间长的问题。本文在现有研究基础上, 基于地铁列车平均无故障时间服从指数分布, 比较了 3 种复杂机械系统可靠性验收方法, 提出了节省试验时间的地铁列车可靠性验收方法。

1 地铁列车整车可靠性验收基本问题

地铁列车可靠性验收是指在所有地铁列车试运

^{*} 国家科技支撑计划项目(2015BAG12B01-06)

行合格后或试运营上线后进行的,在验收期间,地铁列车能够载客运行。大部分列车可靠性验收试验时间不得低于9个月,需至少经过夏季、冬季、春季或秋季,排除客观因素的影响,使试验结果更具代表性。

地铁列车故障率随着行车公里数的增加而减少,具有如图1所示的浴盆曲线变化趋势。一般而言,在地铁列车开始运行0.5万km内,地铁列车电气和机械部件处于磨合阶段,地铁列车发生故障的频率很高,所以地铁公司通常要求在地铁列车验收前进行0.5万km的试运行;地铁列车运行里程在0.5万~5.0万km时,地铁列车故障率大幅下降;地铁列车运行里程在5.0~17.5万km时,地铁列车故障率稳步下降;地铁列车运行里程达到17.5万km以后,地铁列车故障率趋于稳定,进入偶然故障期,即地铁列车的可靠性达到一个基本稳定的阶段^[2]。综上可知,地铁列车可靠性验收试验的前期和后期,试验结果会有所不同。

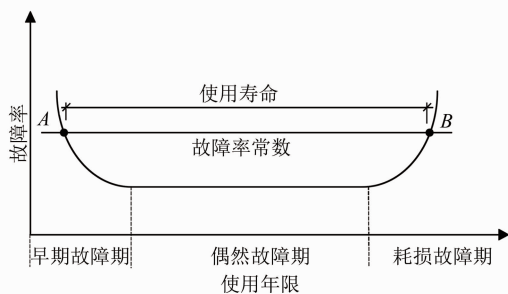


图1 地铁列车故障率的浴盆曲线变化趋势

1.1 可靠性验收要求

地铁列车可靠性验收的前提是了解地铁列车可靠性特性曲线的走势。历史数据表明,地铁列车电子设备故障占有所有列车故障的比例最高,而电子设备可靠性特性曲线呈指数分布,所以地铁列车可靠性特性曲线基本上服从指数分布。因此,地铁列车整车可靠性验收试验都是建立在地铁列车故障曲线服从指数分布的假设上^[2]。

一般而言,地铁列车的可靠性评价指标是可靠度,但需要通过计算分析的可靠度不便于检测得出,因此地铁列车招标合同中一般将平均故障间隔时间(T_{MBF})、平均故障间隔距离(D_{MBF})或故障率(λ)作为衡量可靠性的指标,并设定其具体目标值。

当可靠性指标采用 T_{MBF} 表示时:

$$T_{MBF} = \frac{1}{\lambda} = \frac{\sum T}{n} \quad (1)$$

式中:

n ——责任故障总数;

$\sum T$ ——列车总运行时间。

当可靠性指标采用 D_{MBF} 表示时:

$$D_{MBF} = \frac{1}{\lambda} = \frac{\sum D}{n} \quad (2)$$

式中:

$\sum D$ ——列车总运行公里数。

地铁列车故障按地铁列车故障定义可分为3类:

1) 清客下线故障。清客下线故障是指产品故障导致地铁列车不能继续维持商业运营或对商业运营造成较大影响的故障,包括:①救援:即故障地铁列车需要被另外一地铁列车拖回车辆段;②下线:需要立即疏散乘客或将乘客运送至终点后,地铁列车空车返回车辆段。

2) 晚点故障。晚点故障是导致地铁列车在线路上停车时间超过2 min的故障。

3) 维护故障。维护故障是指碎修、列检故障,是由司机发现的车辆故障及检修人员在检查中发现的故障。

1.2 3种经典的可靠性验收方法

3种经典的可靠性验收方法是分别基于定时截尾试验、序贯截尾试验和全数检验。

1.2.1 定时截尾试验的基本原理和方法

定时截尾试验是指可靠性试验期限已知的试验^[6]。假设在总数为 N 的产品中,取一个容量为 m 的样本,将试验期限设为 T_0 ,进行可靠性试验。由上述定义得到:

$$p(\theta_0) = \sum_{r=0}^{r_0} \frac{(T_{D0}/\theta_0)^r}{r!} \exp(-T_{D0}/\theta_0) = l(\theta_0) = 1 - \alpha = \int_{2T_{D0}/\theta_0}^{\infty} \chi^2(x, 2r) dx \quad (3)$$

$$p(\theta_1) = \sum_{r=0}^{r_0} \frac{(T_{D1}/\theta_1)^r}{r!} \exp(-T_{D0}/\theta_1) = l(\theta_1) = \beta = \int_{2T_{D1}/\theta_1}^{\infty} \chi^2(x, 2r) dx \quad (4)$$

$$T_{D0} = \frac{\theta_0}{2} \chi^2(1 - \alpha, 2r_0 + 2);$$

$$T_{D1} = \frac{\theta_1}{2} \chi^2(1 - \alpha, 2r_0 + 2) \quad (5)$$

式中:

α ——生产方风险;

β ——使用方风险;

T_{D0}, T_{D1} ——定时截尾时的总时间;

r ——定时截尾时的故障数;

θ_0, θ_1 ——分别代表 T_{MBF} 的检验上限和下限;

$p(\theta_0), p(\theta_1)$ —— T_{MBF} 分别为 θ_0 和 θ_1 时,在相应的工作时间内地铁列车发生 r 次故障的概率。

如果试验时间达到 T_0 时,还没有出现 r_0 个故障,即 $T_{D0} \geq T_0$,则做出接收或合格判决;若在 T_0 之前,试验已出现 r_0 个故障,即 $T_{D0} < T_0$,则做出拒收或不合格判决。根据不同的参数 α, β, r_0 ,查阅 GJB 899A—2009 中的 χ^2 分布表,由此可确定定时截尾试验方案^[7]。

1.2.2 序贯截尾试验的基本原理和方法

序贯截尾试验是指可靠性试验期限未知的试验。在一批 N 个产品中,取一个容量为 m 的样本,记录故障次数 $r = 1, 2, 3, \dots, m$,对应的试验时间为 $T_1, T_2, T_3, \dots, T_m$,并计算出总的试验时间 T_{XG} 。试验期间发生一次故障,就进行一次判决^[6]。则接收概率 P_r 可表示为:

$$P_r = \frac{p(\theta_1)}{p(\theta_0)} = \left(\frac{\theta_0}{\theta_1}\right)^{r_{XG}} \exp\left[-\left(\frac{1}{\theta_1} - \frac{1}{\theta_0}\right) T_{XG}\right] \quad (\theta_0 > \theta_1) \quad (6)$$

令 $A = \frac{1-\alpha}{\beta}, B = \frac{\beta}{1-\alpha}$,若 P_r 较大时, $\theta_{真} = \theta_1, P_r \geq A$,则拒收;若 P_r 较小时, $\theta_{真} = \theta_0, P_r \leq B$,则接收;若 $B < P_r < A$,则继续试验。当 $B < P_r < A$ 时,则有:

$$T_A = \frac{r_{XG} \ln(\theta_0/\theta_1) - \ln A}{\frac{1}{\theta_1} - \frac{1}{\theta_0}} < T_{XG} < T_B = \frac{r_{XG} \ln(\theta_0/\theta_1) - \ln B}{\frac{1}{\theta_1} - \frac{1}{\theta_0}} \quad (7)$$

式中:

T_{XG} ——序贯截尾时的总时间;

r_{XG} ——序贯截尾时的故障数;

T_A —— T_{MBF} 合格下限;

T_B —— T_{MBF} 不合格上限。

由上可知, T_A 与 T_B 都是 r 的函数。若 $T_{XG} \geq T_A$,做出接收判决;若 $T_{XG} \leq T_B$,做出拒收判决;但当 $T_A \leq T_{XG} \leq T_B$ 时,不能做出判决,继续进行试验。

1.2.3 全数检验的基本原理和方法

如果订购方要求对该批产品的所有产品都进行可靠性验收,则应采用全数检验方案^[6]。全数检

验是序贯截尾试验的一个推广,但此时接收线变成了临界线,根据瓦尔德序贯试验的拒收线和接收线的近似公式,通过略加调整后可计算得到拒收线和边界线。

$$R_{JSX} = 0.72 t + 2.50 \quad (8)$$

$$R_{BJX} = 0.72 t - 3.17 \quad (9)$$

式中:

t ——标准化试验总时间,以 θ_1 的倍数表示, h;

R_{JSX} ——拒收线故障数,次;

R_{BJX} ——边界线故障数,次。

全数检验结束后,将 t 和故障数画在判决图(见图2)上,连成阶梯状曲线。若曲线没有超出拒收线,则接收该批产品;若曲线超出拒收线,则拒收该批产品;若试验时多台受试产品的试验结果均未出现故障,但曲线超过接收线的下方,应使曲线随着累积试验时间的增加而沿边界移动。

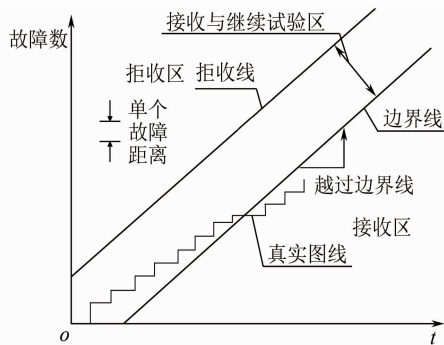


图2 接收-拒收边界线的判决标准示意图

2 基于全数检验和定时截尾试验的地铁列车整车可靠性验收方法

在地铁列车招标文件中可靠性验收试验都有确定的试验开始时间和试验周期,为了确保地铁列车运行安全,需要对全部地铁列车进行可靠性验收。本文在此基础上,研究了基于定时截尾试验和全数检验的地铁列车整车可靠性验收方法。该方法利用全数检验方案的接收-拒收判决图,不需计算 T_{MBF} ,即可提前作出拒收判决;若不能提前拒收,则需计算 T_{MBF} 的值,然后利用定时截尾试验方案的判决标准对该批地铁列车进行接收-拒收判决;最后计算可靠性验证区间。可靠性验收流程如图3所示。

地铁列车整车可靠性验收方法可分以下7步:

第1步:确定地铁列车可靠性试验时间。试验开始时间为所有地铁列车同时上线运营的时间,试验周期至少9个月。

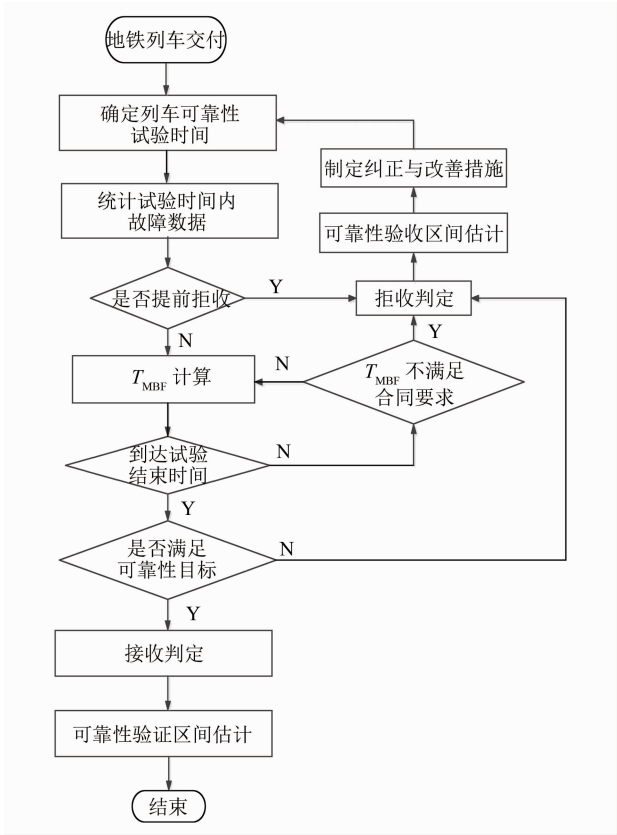


图3 地铁列车整车可靠性验收流程

第2步:统计该试验周期内的故障数据。依据文件中计算公式的需求进行统计,统计表的表头格式如表1所示。

表1 地铁列车故障统计表的表头格式							
序号	车号	故障系统	故障时间	故障描述	影响后果	故障原因及整改措施	故障分析人员
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)

第3步:根据统计的故障数据,画出接收-拒收边界线的判决标准图。如果曲线超出拒收线,则提前拒收该批地铁列车;如果试验时多数地铁列车的试验结果均未出现故障,但曲线超过接收线的下方,应使曲线随着累积试验时间的增加而沿边界移动;如果曲线未超过接收线,进入下一步即可靠性计算。

第4步:可靠性试验统计的故障可按前述3类地铁列车故障来分类,也可由地铁公司根据自身需要进行分类。但是,并不是统计的所有故障都可参与可靠性计算,只有责任故障才能参与可靠性计算,所以记录的故障是否归类为责任故障,还需作进一步分析和判断。所有故障按 GJB 451A—2005 进行界定^[8],可靠性计算采用以下公式:

$$T_{MBF,i} = \frac{1}{\lambda_i} \quad (i = 1,2,3) \tag{10}$$

式中:
 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ——分别为指定时期内清客下线故障率、晚点 2 min 故障率和维护故障率。

第5步:根据定时截尾试验方案判决方法,判断试验时间是否达到规定的试验期限。如果未达到试验期限且故障数不符合合同要求,则提前拒收。在制造商和业主同意的条件下,可靠性试验暂停或延长验收期,然后继续进行可靠性试验,直至下一个验收期。如果达到规定试验截止时间,则进行下一步。现以某一项目可靠性验收接收和拒收标准为例:①接收标准:清客下线故障 $T_{MBF,1} \geq T_1$, 晚点 2 min 故障 $T_{MBF,2} \geq T_2$, 维护故障 $T_{MBF,3} \geq T_3$;②拒收标准:清客下线故障 $T_{MBF} < T_1$, 晚点 2 min 故障 $T_{MBF,2} < T_2$, 维护故障 $T_{MBF,3} < T_3$ 。其中, T_1, T_2, T_3 分别为清客下线故障、晚点 2 min 故障、维护故障的可靠性目标值。

第6步:判断 T_{MBF} 是否符合合同要求的可靠性目标。若符合,则认为该阶段产品合格,则对这批产品作出接收判决;若不符合,作出拒收判决。

第7步:订购方不仅需要检验地铁列车是否符合可靠性要求,而且还要根据现场数据计算 T_{MBF} 的估计区间。在基本可靠性指标 T_{MBF} 计算的基础上,设置 T_{MBF} 的置信区间,置信度为 C (双边保守置信区间), $C_1 = (1+C)/2$, 根据计算法则,得到:

$$T_{MBF,L,i} = \theta_{L,i}(C_1,r) \times \overline{T_{MBF,i}}, \quad i = 1,2,3 \tag{11}$$

$$T_{MBF,H,i} = \theta_{H,i}(C_1,r) \times \overline{T_{MBF,i}}, \quad i = 1,2,3 \tag{12}$$

式中:
 $\overline{T_{MBF,i}}$ ——表示 T_{MBF} 验收期间的平均值;
 $\theta_{H,i}(C_1,r)$ ——置信上限系数;
 $\theta_{L,i}(C_1,r)$ ——置信下限系数。
($T_{MBF,L,i}, T_{MBF,H,i}$) 为可靠性指标的估计区间。置信上限、下限系数和 θ 可通过查阅 GJB 899A—2009 进行计算^[7]。

3 案例分析

现以清客下线故障为例,计算地铁列车可靠性。某型号地铁列车在可靠性验收前于 2013 年 1 月至 6 月进行了 6 个月的试运行,可靠性验收时间是从 2016 年 7 月到 2014 年 6 月,验收周期为 12 个月。项目要求可靠性验收需计算前 6 个月的平均故障间隔时间和后 6 个月每个月的平均故障间隔时

间, $T_{MBF,1}$ 合同值为 10 000 h。对于此次可靠性估计, β 为 10%, C 为 80%。表 2 为按上述可靠性验收

流程中的统计方法统计的地铁列车清客下线责任故障数据。

表 2 清客下线责任故障数据(2013 年 1 月至 2014 年 6 月)

年月	2013 年												2014 年					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6
故障数/次	4.50	1.31	4.51	3.57	1.08	1.31	2.21	1.22	0.77	0.81	1.88	1.00	0.40	0.40	0.37	0.30	0.50	0.40

根据地铁列车整车可靠性验收流程中第 3 步计算画出全数检验接收-拒收边界线的判决标准图,如图 4 所示。

由图 4 可知,由故障累积时间和故障累积数构成的阶梯状曲线一直没有超过拒收线,还需进行可靠性计算。验收期间每个月的平均故障间隔时间见图 5。验收期前 6 个月的平均故障间隔时间为 7 685 h<10 000 h,后 6 个月的月最小平均故障间隔时间为 17 280 h>10 000 h,虽然 6 个月中每个月的平均故障间隔时间满足合同要求,但是前 6 个月的平均故障间隔时间不满足合同要求,故在 2013 年 12 月份试验结束后即可作出拒收判决,提前结束试验。

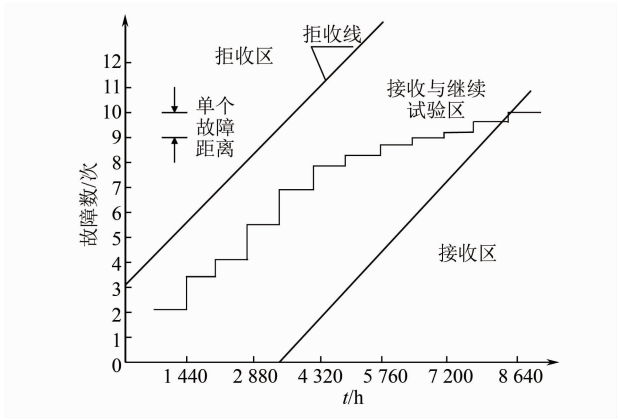


图 4 某型号地铁列车接收-拒收边界线的判决标准图

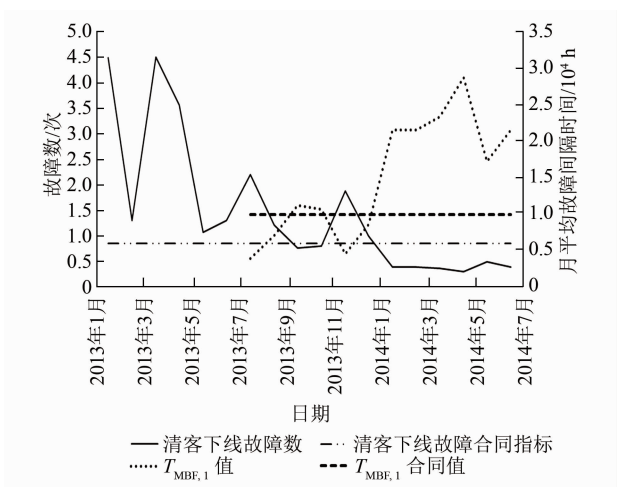


图 5 列车故障数据图

根据 GJB 899A—2009 查其附录 A,得到提前拒收情况下的 $\theta_L=1.032$ 和 $\theta_H=2.668$ 。根据式(11)和式(12)计算得到 $T_{MBF,L,1}=15\,458\text{ h}$, $T_{MBF,H,1}=40\,144\text{ h}$ 。因此 $T_{MBF,1}$ 的验收区间为(15 458 h, 40 144 h)(C 为 80%)。这说明该型号地铁列车清客下线故障的 $T_{MBF,1}$ 真值有 80% 的概率落在这个区间,或者 $T_{MBF,1}$ 的真值不小于 15 458 h 的概率为 80%,且 $T_{MBF,1}$ 的真值不大于 40 144 h 的概率为 80%。

4 结语

本文根据可靠性试验的经典统计方法初步建立了基于定时截尾试验和全数检验的地铁列车整车可靠性验收方法,不仅可以提前结束试验,节省试验时间,而且在一定的置信度水平下,可以计算可靠性指标范围,大体估计可靠性水平。然而,如何对地铁列车整车可靠性进行更加精确的判定估计还需要作进一步研究。

参考文献

[1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.轨道交通可靠性、可用性、可维修性和安全性规范及案例:GB/T 21562—2008[S].北京:中国标准出版社,2008:1-5.

[2] 王新田,刘金安,崔世明.城市轨道交通车辆的可靠性验证试验[J].城市轨道交通研究,2015(6):113.

[3] 王华胜.动车组整车可靠性的验证方法[J].中国铁道科学,2010(3):82.

[4] 张勇,田兴丽.城市轨道交通车辆可靠性考核方法探讨[J].电力机车与城轨车辆,2010(6):49.

[5] 何玉琴.地铁车辆的可靠性验证测试[J].城市轨道交通研究,2003(3):42.

[6] 刘美玉,张永庆,路靖.定时截尾与序贯截尾可靠性试验方案分析比较[J].装甲兵工程学院学报,2008(3):17.

[7] 中国人民解放军总装备部.可靠性鉴定和验收试验:GJB 899A—2009[S].北京:总装备部军标出版社.

[8] 中国人民解放军总装备部.可靠性维修性保障性术语:GJB 451A—2005[S].北京:总装备部军标出版社,2005.

(收稿日期:2018-04-03)