

基于复合应力加速寿命试验的高速列车电子产品可靠度计算方法研究

周永刚, 王鹏

(中车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: **目的** 解决目前加速寿命试验一般不用于估计产品可靠度, 而采用可靠性预计和应力-强度模型计算可靠度时可能存在因参数误差而影响其估计精度的问题。**方法** 提出一种基于加速寿命试验的高速列车电子产品使用可靠度计算方法, 采用温度、湿度、振动综合应力和广义 Egring 模型对高速列车电子产品开展加速寿命试验。**结果** 通过试验数据可评估出产品在任意寿命和任意温度、振动、湿度环境应力下使用时的可靠度。**结论** 拓展了加速寿命试验的应用范围, 优化了可靠度计算的方法与准确性。

关键词: 加速寿命试验; 可靠度; Weibull 分布; 加速模型; 温度-湿度-振动应力; 广义 Egring 模型

中图分类号: TB115 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2022)03-0101-05

DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2022.03.015

Reliability Calculation Method of High Speed Train Electronic Products Based on Composite Stress Accelerated Life Test

ZHOU Yong-gang, WANG Peng

(CRRC Zhuzhou Electric Locomotive Research Institute Co., Ltd., Zhuzhou 412001, China)

ABSTRACT: This paper aims to solve the problem that the current accelerated life test is generally not used to estimate the reliability of the product. However, the accuracy of the estimated reliability may be affected by the error of parameters. This paper proposes a method for calculating the reliability of high-speed train electronic products based on accelerated life tests. The product reliability calculation method is adopted. The method uses the temperature, humidity, vibration combined stress and generalized Egring model to carry out accelerated life tests on high-speed train electronic products. Through the test data, the reliability of the product can be evaluated under any life and any temperature, vibration and humidity environmental stress. The reliability under use expands the application range of the accelerated life test and optimizes the method and accuracy of reliability calculation.

收稿日期: 2021-12-03; 修订日期: 2022-02-04

Received: 2021-12-03; Revised: 2022-02-04

基金项目: 国家科技支撑计划 (2015BAG14B00)

Fund: National Science and Technology Support Plan (2015BAG14B00)

作者简介: 周永刚 (1977—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为轨道交通传动系统设计及其检测试验技术。

Biography: ZHOU Yong-gang (1977—), Male, Senior engineer, Research focus: design of rail transit transmission system and its detection and test technology.

通讯作者: 王鹏 (1983—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为轨道交通产品可靠性与环境试验技术。

Corresponding author: WANG Peng (1983—), Male, Doctor, Senior engineer, Research focus: railway applications product reliability and environmental test technology.

引文格式: 周永刚, 王鹏. 基于复合应力加速寿命试验的高速列车电子产品可靠度计算方法研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(3): 105-105.
ZHOU Yong-gang, WANG Peng. Reliability Calculation Method of High Speed Train Electronic Products Based on Composite Stress Accelerated Life Test[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(3): 101-105.

KEY WORDS: accelerated life test; reliability; Weibull distribution; acceleration model; temperature-humidity-vibration stress; generalized Eyring model

目前,轨道交通行业正朝高速、重载2个方向飞速发展,为此导致的各类长寿命、高可靠性轨道交通电子产品也层出不穷,因而对这些产品的寿命评估也显得越发困难。另外,全球化导致市场竞争日趋激烈,这也要求轨道交通产品制造商需尽快将产品推向市场,从而大大压缩了产品的研发和试验周期。由于传统可靠性试验需大量的试验样本或很长的试验时间,因此高效、快速的加速寿命试验在轨道交通产品的研制中引起了极大的关注,工程中也通常采用加速寿命试验来评估产品的可靠性^[1-5]。

加速寿命试验是在不改变产品失效机理的前提下,通过施加高水平应力(如温度、电压、振动、压力等)对产品进行试验,再利用加速模型对试验中所获取的信息进行转换,从而估计产品在正常应力下的可靠性指标(主要是平均故障间隔时间、使用寿命、贮存寿命)的试验方法^[6-8]。目前大量学者集中在试验前最优设计和试验后统计分析2个方面对加速寿命试验进行研究。在试验前优化设计方面,有学者进行了大量研究^[6-10];在试验统计分析方面,各国研究者以提高精度为目标,从统计分析模型^[11-17]、参数估计方法^[18-19]、分布参数约束^[20-21]等3个方面进行了系统研究,从而推动了加速寿命试验在各个行业的迅速应用与推广,并取得了明显的效果。

目前,通过加速寿命试验主要是求得产品的平均故障间隔时间、使用寿命和贮存寿命这3个可靠性指标,很少通过加速寿命试验计算产品可靠度^[2-5]。然而,可靠度是产品在规定的时间内,在规定的条件下,完成预定功能的能力,是产品的核心可靠性指标之一。目前产品在使用条件下的可靠度一般通过可靠性预计或应力-强度模型计算得到^[22-24]。其中可靠性预计是在产品研制前,通过标准或类似产品数据来预计其可靠度,因其输入条件与实际产品之间的差异性,这往往导致可靠度预计值的偏差较大;而采用应力-强度模型则需要分别求得应力和强度的概率密度函数,然而各类产品真实的应力和强度的概率密度函数常常难以获得,为此在工程中往往将其都假设成高斯分布。这对那些主要受非高斯应力激励的产品来说,通过假设高斯分布所求得的可信度与实际状况存在较大差异。

由此可见,采用可靠性预计或应力-强度模型计算可靠度时可能存在误差偏大的问题。鉴于此,本文提出了一种采用加速寿命试验数据计算高速列车电子产品可靠度的方法,从而可获得更为准确的产品可靠度计算值。

1 基于加速寿命试验的可靠度计算法

1.1 加速模型选取

加速寿命试验的基本思想是利用高应力水平下的寿命特征去外推正常应力水平下的寿命特征,其关键在于建立寿命特征与应力水平的关系,这种关系即为加速模型。常用的加速模型有 Arrhenius 模型、逆幂律模型、单应力 Enring 模型及广义 Enring 模型^[25]。由于 91% 的轨道交通电子产品故障由温度、湿度和振动综合应力所诱发,因而加速寿命试验常常采用温度、湿度及振动综合应力构建试验剖面。为此,根据广义 Enring 模型,其寿命特征可表示为:

$$\xi = A \exp\left(\frac{B}{T}\right) \exp\left(\frac{C}{RH}\right) V^{-D} \quad (1)$$

式(1)中: T 为热力学温度, K; RH 为湿度应力; V 为振动应力, g_{rms} ; A 、 B 、 C 、 D 为常数。

1.2 加速模型参数估计

常用的产品寿命分布有指数分布、正态分布、对数正态分布和 Weibull 分布等,工程中电子产品的随机失效多取 Weibull 分布^[26-27]。

假设寿命数据服从形状参数为 m 、尺度参数为 λ 的两参数 Weibull 分布:

$$t \sim \text{Weibull}(m, \lambda) \quad (2)$$

则其概率密度函数为:

$$f(t; m, \lambda) = \begin{cases} \frac{m}{\lambda} \left(\frac{t}{\lambda}\right)^{m-1} \exp(-(t/\lambda)^m) & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (3)$$

当产品的寿命服从威布尔分布时,用特征寿命 λ 作为寿命特征^[28]。令尺度参数 $\lambda = \exp\left(\alpha_0 + \frac{\alpha_1}{T} + \frac{\alpha_2}{RH} + \alpha_3 \ln V\right)$, 其中 $\alpha_0 = \ln A$, $\alpha_1 = B$, $\alpha_2 = C$, $\alpha_3 = -D$, 则有:

$$t \sim \text{Weibull}\left[m, \exp\left(\alpha_0 + \frac{\alpha_1}{T} + \frac{\alpha_2}{RH} + \alpha_3 \ln V\right)\right] \quad (4)$$

其中, α_0 、 α_1 、 α_2 、 α_3 及 m 为未知参数。对 α_0 、 α_1 、 α_2 、 α_3 及 m 进行极大似然估计, 得到估计值 $\hat{\alpha}_0$ 、 $\hat{\alpha}_1$ 、 $\hat{\alpha}_2$ 、 $\hat{\alpha}_3$ 和 $\hat{m}$ 。根据极大似然估计法, 若 X 属于连续型随机变量, 且其概率密度函数 $f(x_i; \theta)$ 形式已知, 设 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 是来自 X 的样本, 则其联合概率密度函数为 $\prod_{i=1}^n f(x_i; \theta)$ 。设函数:

$$L(x_1, x_2, \cdots x_n; \theta) = \prod_{i=1}^n f(x_i; \theta)$$

(5)

则式（5）为样本的似然函数。根据式（5），可得寿命数据的似然函数为：

$$L(\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, m) = \prod_{i=1}^p \prod_{j=1}^q \left\{ m t_{ij}^{m-1} \left[\exp\left(\alpha_0 + \frac{\alpha_1}{T_{Si}} + \frac{\alpha_2}{RH_{Si}} + \alpha_3 \ln V_{Si}\right) \right]^{-m} \cdot \exp \left[-t_{ij}^m \left(\exp \left(\alpha_0 + \frac{\alpha_1}{T_{Si}} + \frac{\alpha_2}{RH_{Si}} + \alpha_3 \ln V_{Si} \right) \right)^{-m} \right] \right\}$$

(6)

式（6）中： t_{ij} 为在第*i*组应力下第*j*个样品的伪寿命，*h*。

由于式（6）较为复杂，故先对极大似然函数取对数，得 $\ln L(\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, m)$ ，然后对各未知参数分别求偏导，并令各偏导数分别等于 0，解式（7）所示方程组，可得各参数估计值 $\hat{\alpha}_0$ 、 $\hat{\alpha}_1$ 、 $\hat{\alpha}_2$ 、 $\hat{\alpha}_3$ 、 $\hat{m}$ 。式(7)为超越方程，可通过数值求解得到。

$$\begin{cases} \frac{\partial \ln L(\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, m)}{\partial \alpha_0} = 0 \\ \frac{\partial \ln L(\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, m)}{\partial \alpha_1} = 0 \\ \frac{\partial \ln L(\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, m)}{\partial \alpha_2} = 0 \\ \frac{\partial \ln L(\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, m)}{\partial \alpha_3} = 0 \\ \frac{\partial \ln L(\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, m)}{\partial m} = 0 \end{cases}$$

(7)

1.3 可靠度计算

由式（7）得到各参数估计值 $\hat{\alpha}_0$ 、 $\hat{\alpha}_1$ 、 $\hat{\alpha}_2$ 、 $\hat{\alpha}_3$ 、 $\hat{m}$ 后，可求得在任意振动*V*、温度*T*、湿度*RH*应力下，可靠度为*R*的对数寿命：

$$\ln t_R = \alpha_0 + \frac{\alpha_1}{T_S} + \frac{\alpha_2}{RH_S} + \alpha_3 \ln V_S + \frac{1}{m} \ln \ln(1/R)$$

(8)

由式（8）可知，产品在任意寿命和任意振动*V*、温度*T*、湿度*RH*环境下使用时的可靠度为：

$$\ln R = -\exp \left\{ m \left[\ln t_R - \left(\alpha_0 + \frac{\alpha_1}{T_S} + \frac{\alpha_2}{RH_S} + \alpha_3 \ln V_S \right) \right] \right\}$$

(9)

2 计算实例

2.1 试验条件

据现场失效数据分析可知，某高速列车电源板有 78% 的现场故障是由温度、振动和湿度综合环境所诱

发。因此，选用温度、振动和湿度作为试验应力，并进一步通过正交试验得到某高速列车电源板加速寿命试验的 4 组试验应力，见表 1。每组应力的试验样本为 10 个，其中振动应力的 PSD 如图 1 所示，振动频率为 5~150 Hz。

表 1 电源板加速寿命试验应力组合

Tab.1 Stress combination of power board accelerated life test

编号	振动/ <i>g</i> _{rms}	温度/℃	相对湿度/%	样本量
S1	0.8	75	65	10
S2	0.8	85	85	10
S3	1.6	75	80	10
S4	1.6	85	60	10

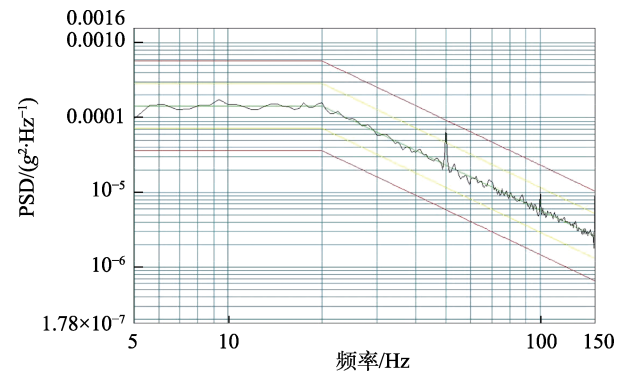


图 1 随机振动 PSD

Fig.1 Random vibration PSD

试验过程中实时监测电源板输出电压 U_n ，并按式（10）定义故障判据。

$$E_m = \left| \frac{U_1 - U_n}{U_n} \right| \times 100\% \geq 3\%$$

(10)

式（10）中： E_m 为故障阈值，当 $E_m \geq 3\%$ 时为故障； U_1 为 5 V 的实际输出电压（测量值）； U_n 为标称电压， $U_n=5$ V。

在各个加速应力水平组合下，满足以下任意一条则试验截止：1）退化数据达到阈值，失效样本达到 5 个或 5 个以上；2）累积在线试验时间达到 500 h。

2.2 试验结果

按表 1 应力组合对电源板进行加速寿命试验，其伪寿命数据见表 2。

表 2 各试验应力下的伪寿命数据

Tab.2 False life data under various test stresses

应力水平	寿命/h
S1	2966, 895, 1424, 2332, 1351, 1818, 374, 1527, 750, 1887
S2	301, 1145, 338, 189, 763, 743, 3091, 1278, 928, 1718
S3	61, 13, 10, 16, 31, 89, 18, 26, 25, 41
S4	20, 23, 37, 21, 24, 25, 19, 20, 24, 44

2.3 数据检验

由于寿命分布形式未知,因此对寿命数据分别进行指数分布、威布尔分布及正态分布拟合优度检验,其中最优分布为威布尔分布,检验结果如图2所示。由图2可知,检验结果 p 值均远大于0.05,因此可认为各应力水平下的寿命数据能较好地服从Weibull分布。

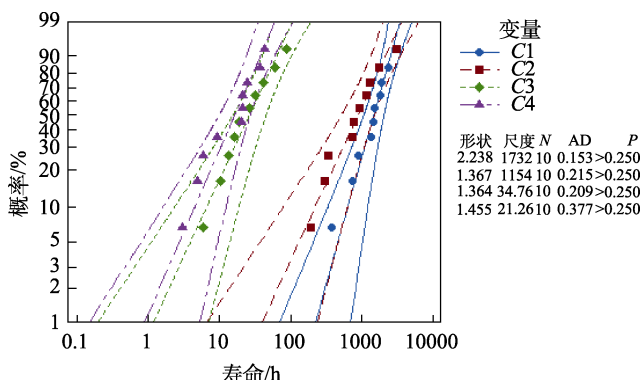


图2 分布拟合检验结果
Fig.2 Distribution fitting test results

2.4 可靠度计算

故根据式(6)可得到其极大似然函数为:

$$L(\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, m) = \prod_{i=1}^4 \prod_{j=1}^{10} \left\{ m t_{ij}^{m-1} \left[\exp \left(\alpha_0 + \frac{\alpha_1}{T_{Si}} + \frac{\alpha_2}{RH_{Si}} + \alpha_3 \ln V_{Si} \right) \right]^{-m} \cdot \exp \left[-t_{ij}^m \left(\exp \left(\alpha_0 + \frac{\alpha_1}{T_{Si}} + \frac{\alpha_2}{RH_{Si}} + \alpha_3 \ln V_{Si} \right) \right)^{-m} \right] \right\} \quad (11)$$

解方程组(11),求得各参数估计值:

$$\begin{cases} \alpha_0 = -9.6620 \\ \alpha_1 = 5596.5985 \\ \alpha_2 = -14.8369 \\ \alpha_3 = -5.7006 \\ m = 1.606 \end{cases} \quad (12)$$

设在温度为50℃、相对湿度为65%、振动应力为0.5g_{rms}水平下,按式(9)可得电源板投入使用1~10a的可靠度,如图3所示。其中第1年和第7年的可靠度分别为: $R(1)=0.9906$ 、 $R(7)=0.8067$ 。

3 结语

本文采用温度、湿度和振动综合应力和广义Enring模型构建了加速寿命试验剖面,提出了一种根据加速寿命试验模型和数据来计算高速列车电子产品使用可靠度的方法。由于目前加速寿命试验一般只

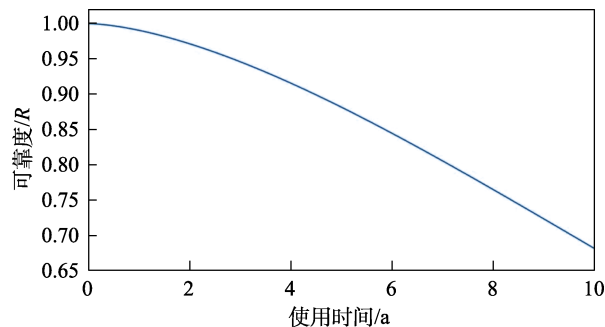


图3 电源板投入使用1~10a间的可靠度
Fig.3 Reliability of the Power Board in 1~10 a

评估产品的平均无故障间隔时间、贮存寿命和使用寿命指标,而本文的方法可利用现有加速寿命试验数据对产品投入使用后的任意时间点的可靠度进行计算,拓展了加速寿命试验的应用范围。同时,也解决了目前常常采用可靠性预计和应力-强度模型计算可靠度时可能存在偏差较大的问题。此外,对某高速列车电源板的计算实例也显示出本文所提出的计算方法的合理性。

参考文献:

- [1] FAWZY M A. Inferences under Step-Stress Partially Accelerated Life Tests for Linear Exponential Distribution Based on Progressive Type-II Censored Data[J]. Journal of the Indian Society for Probability and Statistics, 2019, 20(1): 65-79.
- [2] ABU-ZINADAH H H, SAYED-AHMED N. Competing Risks Model with Partially Step-Stress Accelerate Life Tests in Analyses Lifetime Chen Data under Type-II Censoring Scheme[J]. Open Physics, 2019, 17(1): 192-199.
- [3] ZHAO Xiu-jie, PAN Rong, DEL CASTILLO E, et al. An Adaptive Two-Stage Bayesian Model Averaging Approach to Planning and Analyzing Accelerated Life Tests under Model Uncertainty[J]. Journal of Quality Technology, 2019, 51(2): 181-197.
- [4] JEON H G, YOO J H, LEE Y Z. Design of Accelerated Life Test for Sleeve Bearing of Construction Equipment Based on Wear Prediction[J]. Tribology Transactions, 2019, 62(3): 419-427.
- [5] ABUSHAL T A, SOLIMAN A A. Estimating the Pareto Parameters under Progressive Censoring Data for Constant-Partially Accelerated Life Tests[J]. Journal of Statistical Computation and Simulation, 2015, 85(5): 917-934.
- [6] REGATTIERI A, PIANA F, GAMBERI M, et al. Reliability Assessment of a Packaging Automatic Machine by Accelerated Life Testing Approach[J]. Procedia Manufacturing, 2017, 11: 2178-2186.
- [7] CHERNOFF H. Optimal Accelerated Life Designs for Estimation[J]. Technometrics, 1962, 4(3): 381-408.

- [8] MEEKER W Q, NELSON W. Optimum Accelerated Life-Tests for the Weibull and Extreme Value Distributions[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1975, R-24(5): 321-332.
- [9] YANG Guang-bin. Optimum Constant-Stress Accelerated Life-Test Plans[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1994, 43(4): 575-581.
- [10] KHAMIS I H, HIGGINS J J. Optimum 3-Step Step-Stress Tests[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1996, 45(2): 341-345.
- [11] YEO K P, TANG L C. Planning Step-Stress Life-Test with a Target Acceleration-Factor[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1999, 48(1): 61-67.
- [12] İSMAIL A A. Likelihood and Bayesian Estimations for Step-Stress Life Test Model under Type-I Censoring[J]. Hacettepe Journal of Mathematics and Statistics, 2014, 44(33): 1.
- [13] KOHL C, KATERI M. Bayesian Analysis for Step-Stress Accelerated Life Testing under Progressive Interval Censoring[J]. Applied Stochastic Models in Business and Industry, 2019, 35(2): 234-246.
- [14] KIM C M, BAI D S. Analyses of Accelerated Life Test Data under Two Failure Modes[J]. International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering, 2002, 9(2): 111-125.
- [15] HIROSE H. Estimation of Threshold Stress in Accelerated Life-Testing[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1993, 42(4): 650-657.
- [16] NELSON W. Accelerated Life Testing-Step-Stress Models and Data Analyses[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1980, R-29(2): 103-108.
- [17] BHATTACHARYYA G K, SOEJOETI Z. A Tampered Failure Rate Model for Step-Stress Accelerated Life Test[J]. Communications in Statistics-Theory and Methods, 1989, 18(5): 1627-1643.
- [18] TANG L C, SUN Y S, GOH T N, et al. Analysis of Step-Stress Accelerated-Life-Test Data: A New Approach[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1996, 45(1): 69-74.
- [19] WATKINS A J. Review: Likelihood Method for Fitting Weibull Log-Linear Models to Accelerated Life-Test Data[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1994, 43(3): 361-365.
- [20] BUGAIGHIS M M. Exchange of Censorship Types and Its Impact on the Estimation of Parameters of a Weibull Regression Model[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1995, 44(3): 496-499.
- [21] MCLINN J A. New Analysis Methods of Multilevel Accelerated Life Tests[C]//Annual Reliability and Maintainability Symposium 1999 Proceedings. Washington, DC: IEEE, 1999.
- [22] WANG W, KECECIOGLU D B. Fitting the Weibull Log-Linear Model to Accelerated Life-Test Data[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2000, 49(2): 217-223.
- [23] BAI Xu-chao, SHI Yi-min, LIU Yi-ming, et al. Reliability Inference of Stress-Strength Model for the Truncated Proportional Hazard Rate Distribution under Progressively Type-II Censored Samples[J]. Applied Mathematical Modelling, 2019, 65: 377-389.
- [24] OTSUKA Y, FAHMI A, MIYASHITA Y, et al. Probabilistic Assessment of Bending Strengths of Plasma-Sprayed Hydroxyapatite Coating by Stress-Strength Model[J]. Materials Letters, 2017, 196: 202-204.
- [25] SIJU K C, KUMAR M. Reliability Analysis of Time Dependent Stress-Strength Model with Random Cycle Times[J]. Perspectives in Science, 2016, 8: 654-657.
- [26] 茆诗松. 加速寿命试验的加速模型[J]. 质量与可靠性, 2003(2): 15-17.
- MAO Shi-song. Accelerated Model of Accelerated Life Test[J]. Quality and Reliability, 2003(2): 15-17.
- [27] HANSEN C K. Reliability Prediction and Simulation for a Communications-Satellite Fleet[C]//Annual Reliability and Maintainability Symposium 1995 Proceedings. Washington, DC: IEEE, 1995.
- [28] 张放, 梁志国, 朱晓琳, 等. 基于现场数据统计的计算机联锁设备寿命分析[J]. 铁道学报, 2018, 40(6): 97-105.
- ZHANG Fang, LIANG Zhi-guo, ZHU Xiao-lin, et al. Analysis on Service Life of Computer Interlocking Equipment Based on Field Data Statistics[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(6): 97-105.