

文章编号: 2096-3424(2024)04-0459-05

DOI: 10.3969/j.issn.2096-3424.2022.068

轨道车辆乘坐舒适性评价标准对比

孙效杰¹, 莫婉荞¹, 陶强¹, 刘怡²

(1. 上海应用技术大学 轨道交通学院, 上海 201418;
2. 中国铁路武汉局集团有限公司 科学技术研究所, 武汉 430070)

摘要: 随着轨道车辆的快速发展, 乘客关注车速、准点等问题的同时, 也逐渐注重乘坐的舒适性。对国内外铁路系统常用的 Sperling 指标、UIC 513 标准和 ISO 2631 标准进行了研究, 对其从测试要求、计算方法及评价标准进行了对比, 基于 MATLAB 开发了轨道车辆乘坐舒适性程序, 将现场采集的数据代入进行分析与评价。为轨道车辆乘坐舒适性的综合评定以及中国轨道交通装备出口国外面临的标准适应性问题提供了良好支撑。

关键词: 轨道车辆; 舒适性指标; 评价标准; 乘坐舒适性

中图分类号: U482.1; U239.3

文献标志码: A

Investigation on riding comfort evaluation standard of rail vehicles

SUN Xiaojie¹, MO Wanqiao¹, TAO Qiang¹, LIU Yi²

(1. School of Railway Transportation, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China;
2. Research Institute of Science and Technology, China Railway Wuhan Bureau Group Co., Ltd., Wuhan 430070, China)

Abstract: With the rapid development of rail vehicles, passengers pay more attention to ride comfort while paying attention to speed and punctuality. Firstly, this paper studies the Sperling index, UIC 513 standard and ISO 2631 standard commonly used in railway system at home and abroad. Then it from the test requirements, calculation methods and evaluation criteria are compared. Finally, based on MATLAB, the ride comfort program of rail vehicles is developed, and the data collected on site were included for analysis and evaluation. This study provides a good support for the comprehensive evaluation of the ride comfort of rail vehicles and the standard adaptability problems faced by China's rail transit equipment export abroad.

Key words: rail vehicles; comfort index; evaluation criteria; ride comfort

收稿日期: 2022-10-07

基金项目: 上海市科技计划项目(21210750300); 上海市科委地方能力建设项目(20090503100); 上海应用技术大学协同创新基金(XTCX2020-16); 上海应用技术大学跨学科研究生团队项目(GK210006105-B20)资助

作者简介: 孙效杰(1984-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为轨道车辆检测监测、主动控制研究。E-mail: sxjlm2003@163.com

引文格式: 孙效杰, 莫婉荞, 陶强, 等. 轨道车辆乘坐舒适性评价标准对比 [J]. 应用技术学报, 2024, 24(4): 459-463+470.

Citation: SUN Xiaojie, MO Wanqiao, TAO Qiang, et al. Investigation on riding comfort evaluation standard of rail vehicles[J]. Journal of Technology, 2024, 24(4): 459-463+470.



“舒适度”表示的是乘客对乘车体验的综合性评价,例如温度、噪声、振动、湿度、照度、空气新鲜度和服务质量都是影响车辆运行舒适度的主要来源^[1]。乘客在乘坐车辆时,振动是影响乘客舒适度的重要来源,实验研究表明,当人体长期处于振动环境中,除了会感到疲倦,还会引发身体内部器官产生共振,因此振动品质是需要关注的重点^[2]。本文主要研究振动加速度对车辆乘坐舒适度的影响。

目前,铁道车辆动力学性能评价标准和规范包括中国 GB/T 5599、欧洲 EN、UIC 系列标准和 ISO 系列标准等。学者们对这些动力学性能评价标准和规范已有深入研究,例如对中国 GB/T 5599 脱轨安全性、轮轨力等评价方法及限值的弊端^[3-5]进行的研究。倪纯双等^[6]首先分别介绍了 Sperling 平稳性标准与 UIC 513 舒适度指标,再对秦沈客运专线动力学试验做出分析,得出了目前舒适度指标并不能去替代平稳性指标。高井等^[7]通过对列车的不同运行状态进行舒适度分析,通过计算 Sperling 指标以及 ISO 2631 标准等,得出舒适性的评价。张学铭等^[8]对比了不同舒适度指标的理论计算、评估流程、频率加权特性等,提出了垂向振动舒适度评定的方法。韦海菊等^[9]介绍了 ISO 2631 舒适度指标,该指标是基于全身振动而设立的指标,但该指标没有对数据的采集以及相关的一些参数进行规定。Polach^[10]较早地采用 UIC 标准系列来评价车辆临界速度,讨论了临界速度对轮轨摩擦因素、车速等的敏感度,并指出现有方法如何有效评判车辆的运动稳定性。

GB/T 5599-2019 中对于评价轨道车辆动力学性能的评价指标主要包括脱轨系数、轮重减载率、轮轨横向力和横向平稳性。本文梳理了国内外轨道车辆舒适性评价标准即包括 Sperling 指标、UIC 513 标准和 ISO 2631 标准,从测试需求、计算方法及评价体系进行了研究^[11],对其从测试要求和评价体系进行对比,基于 MATLAB 编写程序,导入现场测试获取的车辆加速度数据,对乘客乘坐车辆时的舒适性进行评价分析研究^[12]。

1 Sperling 指标

关于平稳性指标 W_z 的相关计算公式由德国 Helberg 和 Sperling 经过大量试验得出。为了使平稳性指标更加准确,频率修正系数也被 Sperling 在后来的研究中引入。

1.1 测试要求

标准测量的时长为 5 min,分析段以 5 s 为一段。在车辆司机室座椅下方地板上布置垂向和横向加速度测点,在车体转向架两侧 1 000 mm 处的地板上布置垂向、横向振动加速度测点,如图 1 所示。

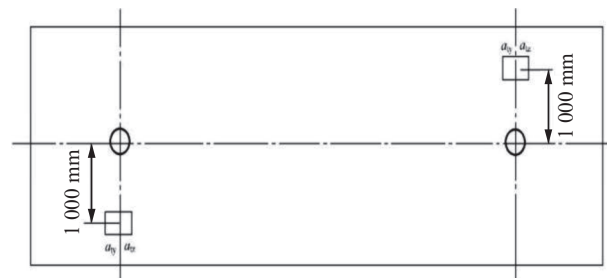


图 1 振动加速度测点分布示意图

Fig. 1 Diagram of vibration acceleration measuring points

1.2 Sperling 平稳性指标计算方法

平稳性指标 W 是机车车辆上对乘坐的旅客舒适度的完整性衡量方法。平稳性指标分垂向和横向,其适用的频率范围为 0.5~40 Hz 之间,其计算如下式所示:

$$W_i = 3.57^{10} \sqrt{\frac{A_i^3}{f_i} F(f_i)} \quad (1)$$

式中: A_i 代表振动加速度,单位 m/s^2 ; f_i 代表振动频率, Hz; $F(f_i)$ 代表频率修正系数。

如表 1 所示,该修正系数是将垂向及横向振动分开,适用于单一频率的等幅振动。而实际情况下,车辆振动为随机振动,所以首先需要按照频率的大小关系进行分组,然后分别计算出对应频率下的加速度的平稳性指标,最后再将每一个频率对应的指标利用式(2)计算:

$$X_1 = \sqrt[10]{W_1^{10} + W_2^{10} + \dots + W_n^{10}} \quad (2)$$

式中, W_i 代表频率为 f_i 时对应的平稳性指标分量。平稳性等级对应的运行平稳性指标 W 如表 2 所示。

表 1 Sperling 指标计算的频率修正系数

Tab. 1 Frequency correction coefficient of Sperling index

垂向振动		横向振动	
f/Hz	$F(f)$	f/Hz	$F(f)$
$0.5 \leq f < 5.9$	$0.325 f^2$	$0.5 \leq f < 5.4$	$0.8 f^2$
$5.9 \leq f < 20$	$400/f^2$	$5.4 \leq f < 26.0$	$650/f^2$
$f \geq 20.0$	1	$f \geq 26.0$	1

表2 运行平稳性等级
Tab. 2 Level of Riding index

平稳性等级	平稳性指标 W	评定
1 级	$W \leq 2.50$	优
2 级	$2.50 < W \leq 2.75$	良好
3 级	$2.75 < W \leq 3.00$	合格

2 UIC 513 标准

关于 UIC 513 标准发展过程最先是由欧洲铁道研究协会设立了 B153 专题,然后提出了关于 UIC 513 标准的草案,最后颁布了相关铁路车辆内旅客振动舒适性评价准则。关于舒适度测量和计

算的方法可分为简化方法和完整方法。

2.1 测试要求

UIC 513 标准中以 5 s 数据为一个计算区间,采样持续时间为 5 min。测点的位置决定了车辆振动响应的程度,这是车辆固有的弹性振动特性造成的^[13]。因此 UIC 513 要求在车体中心及两端等区域进行测量。

2.2 UIC 513 标准计算方法

该标准适用的频率范围是 0.4~80 Hz,其测点的位置在车体中央以及两端临近这些位置的座椅附近,具体来说简化方法和完整站立方法在地板面,完整坐立方法在地板面、座椅椅盘和座椅靠背。表 3 展示了 3 种方式的计算公式。

表3 UIC 513 种计算方法

Tab. 3 Three calculation methods of UIC 513

测量方法	计算公式
站立或坐立的简化测量	$N_{MV} = 6\sqrt{(a_{XP95}^{w_d})^2 + (a_{YP95}^{w_d})^2 + (a_{ZP95}^{w_b})^2}$
站立的完整测量	$N_{VD} = 3\sqrt{16(a_{XP50}^{W_d})^2 + 4(a_{YP50}^{W_d})^2 + (a_{ZP50}^{W_b})^2 + 5(a_{YP95}^{W_d})^2}$
坐立的完整测量	$N_{VA} = 4(a_{ZP95}^{W_b}) + 2\sqrt{(a_{YA95}^{W_d})^2 + (a_{ZA95}^{W_b})^2} + 4(a_{XD95}^{W_c})$

N 代表的是舒适度值,其下标 MV、VD、VA 分别表示舒适度计算简化方法、站姿完整方法和坐姿完整方法。 a 代表的是有效加速度,其下标 X、Y 和 Z 分别代表横向、纵向和竖向,下标 P 代表测点在地板面,下标 A 代表测点在座椅椅盘上,下标 D 代表测点位于座椅靠背,95 和 50 分别代表加速度取 95% 和 50% 置信点的有效值; W 代表权重参数,其下标 i 代表权重曲线,b 代表垂直方向,d 代表水平方向,c 指座椅靠背。加权曲线如下图 2 所示。表 4 所示为 UIC 513 舒适度评价标准。

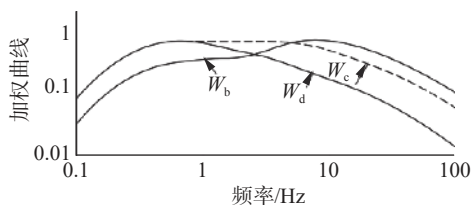


图2 为 UIC 513 加权曲线

Fig. 2 The UIC 513-weighted curve

3 ISO 2631 标准

ISO 2631 标准首先是用于人体全身振动而制定的,然后角振动以及频率加权函数的增加为标

准的准确度提升一个档次,最后是增加了与人的主观感受的相关性的总乘坐值指标^[14],而对于振动的舒适性、疲劳、健康的界限值未在标准中给出^[12,15]。

表4 UIC 513 舒适度评价标准

Tab. 4 UIC 513 comfort evaluation criteria

舒适度指标	舒适度
$N < 1$	最佳舒适性
$1 < N < 2$	良好舒适性
$2 < N < 4$	中等舒适性
$4 < N < 5$	不好舒适性
$N > 5$	极差舒适性

3.1 测试要求

ISO 2631 标准要求适用的频率范围在 80 Hz 以内,通过计算加权加速度的有效值来计算均方根加速度,从而对舒适性进行评价。其测点位置可以分布在地板、侧墙或车顶。

3.2 ISO 2631 计算方法

根据目前轨道车辆在运行时,选取加权滤波网络的单值评价方法进行计算^[16]。其中,计权均方根加速度有效值定义为:

$$A_{\omega} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (K_i a_i)^2} \quad (3)$$

式中: a_i 代表其中一个频率组的振动加速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$; K_i 代表的是频率加权函数。表 5 所示为部分频率与加权系数的关系, 该加权系数将垂向振动与横向振动分开, 其中频率主要是与频谱带宽相关。若振动发生在多个方向上时, 其计权均方根加速度振动总量公式如下所示:

$$a_v = \sqrt{K_x^2 a_{wx}^2 + K_y^2 a_{wy}^2 + K_z^2 a_{wz}^2} \quad (4)$$

式中, a_{wx} 、 a_{wy} 、 a_{wz} 分别代表的是坐标轴 x 、 y 、 z 上的计权均方根加速度; K_x 、 K_y 、 K_z 代表的是对应的方向因数。若传感器是放置在地板上, 那么对应的方向因数则为车辆的坐标系; 若传感器放置在座椅上, 那么对应的方向因数则代表座椅靠背的 y 向、椅盘的 x 向和 z 向。表 6 给出了车辆在不同加速度振动总量下的 ISO 2631 舒适度评价标准。

表 5 ISO 2631 频率加权函数值

Tab. 5 Frequency weighting values of ISO 2631

频率/Hz	加权系数	
	垂向振动	横向振动
1.0	0.5	1.0
1.25	0.56	1.0
1.6	0.63	1.0
2.0	0.71	1.0
2.5	0.80	0.80
3.15	0.9	0.63
4.0	1.0	0.5
5.0	1.0	0.4
6.3	1.0	0.315
8.0	1.0	0.25
10.0	0.8	0.2
12.5	0.83	0.18
16.0	0.50	0.125
20.0	0.40	0.1
25.0	0.315	0.08
31.5	0.25	0.063
40.0	0.20	0.05
50.0	0.16	0.04
63.0	0.125	0.013
80.0	0.10	0.025

表 6 ISO 2631 舒适度评价标准

Tab. 6 ISO 2631 comfort evaluation criteria

加速度振动总量	舒适程度
<0.315	没有不舒适
0.315~0.63	稍有不舒适
0.5~1.0	比较不舒适
0.8~1.6	不舒适
1.25~2.5	非常不舒适
>2	极不舒适

4 3 种标准对比

Sperling 平稳性指标所适用的范围为 0.5~40 Hz, 而 UIC 513 和 ISO 2631 适用的范围为 80 Hz 以内, 因此 Sperling 指标对 40 Hz 以上的中高频振动考虑不足。随着列车大面积提速及各种高频设备的加入, 使得 Sperling 平稳性指标在高频振动时无法使用的矛盾日益突出^[17]。

Sperling 指标的划分等级过于单一, 不能精确地根据平稳性指标得出其振动对舒适度的影响; 而 UIC 513 标准划分等级明了, 能够与乘客的主观感受能够相对地匹配起来; 而如果振动比较强烈的话, ISO 2631 的评价等级与乘客的主观感受不相符。

舒适度的评价是多维度的考虑, 在上述各个指标中, UIC 513 标准将站姿与坐姿进行分开计算, 展示了对舒适度的细致评价。由于人体的乘坐姿态不同, 会导致乘坐舒适度的主观评价有所不同, 对此 UIC 513 标准的分级更精细, 评价也会更全面。由于 UIC 513 舒适度指标计算中采用了统计学的计算方式, 且包含了列车 3 个方向即横向、竖向、纵向的振动特性, 使得 UIC 513 相对于其余 2 个更能够精确地反映乘客乘坐时的真实感受^[18]。

5 现场测试验证

5.1 数据来源

根据各个标准的测量方式, 如 Sperling 指标需要测试车辆地板横向和垂向的加速度值, UIC 513 标准需要垂向、纵向、横向三向加速度值, ISO 2631 亦需要三向加速度值, 所以选择三轴加速度传感器, 并将其放置在上海某地铁上, 来采集其运行时的加速度数据。由于此加速度传感器采集的是时域数据, 所以此 3 个指标都源于测试获得的加速度时域信号。

5.2 数据分析

根据 Sperling 的计算公式分别导入垂向以及横向加速度样本,结果如图3所示。横向与垂向的结果二者相差不大,评价都为“优”,但其50 s内的舒适度平均值横向大于垂向,说明在 Sperling 指标下横向的舒适度比垂向的舒适度要低。从数据的趋势来看,刚开始的平稳性指标明显最高,之后逐步下降且最终趋于平稳。

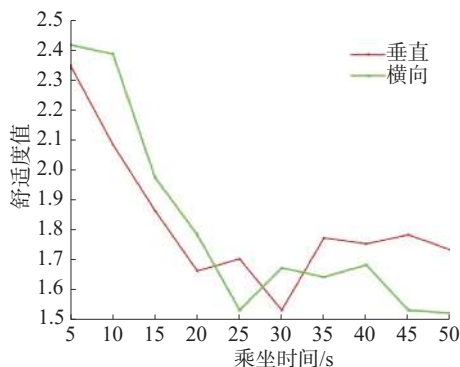


图3 Sperling 垂向横向舒适度值

Fig. 3 Vertical comfort index of Sperling

根据 UIC 513 标准得出的评价结果如图4所示。

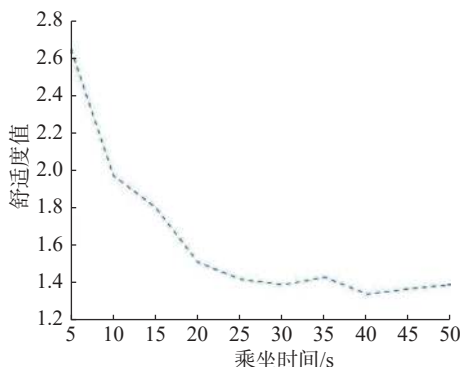


图4 UIC 513 舒适度值

Fig. 4 UIC 513 Comfort value

根据 UIC 513 标准的计算结果可知,在5 s时的舒适度评价为“中等舒适性”,随着时间的延长,舒适度评价为“良好舒适性”,最终趋于平稳。由于 UIC 513 标准采用的简化计算方式是依照站姿和坐姿共同计算的,且将垂向与水平方向分开加权,避免了人体由于振动的敏感程度不一样而导致的误差。

根据 ISO 2631 得出结果如表7所示,舒适度评价为“没有不舒适”,评价等级为第一级。ISO 2631 的计算原理是将不同方向的加速度进行耦合

计算,不同的采样点对应的舒适性指标有稍微的差别,对于本次实验结果来看背部的舒适性次于其余2个测点位置。

表7 不同位置对舒适性指标结果的影响

Tab. 7 Influence of different measurement positions on the calculation results of comfort

采样位置	舒适性指标	
	最大值	平均值
背部	0.374 2	0.137 6
骨盆	0.368 7	0.122 4
座椅	0.324 5	0.119 7

综上所述,对于同一测试列车的同一时段振动响应, Sperling 平稳性指标以及 ISO 2631 舒适度指标计算的结果均为该指标对应下的一级评价, UIC 513 舒适度指标计算的结果为该标准的二级、三级评价,说明 UIC 513 标准的舒适度评价等级划分更细致,标准更加严格。

6 结 语

当乘坐列车的乘客受到振动影响时, Sperling 的评价不能精确描述振动的剧烈程度,只能进行大体的评估; UIC 513 评价结果与乘客感受较为符合; ISO 2631 评价指标过于疏松,不能真实反映车体的振动情况。

根据计算结果得出各个舒适度的评价标准相差不多,但总体来说舒适度都达到了对应的舒适度要求。因此与平稳性指标相比,舒适度指标对目前的研究学者和技术人员来说是一个难关,在今后的研究中应重点关注并解决相关难题,为轨道车辆的迅速发展作出贡献。

参考文献:

- [1] 卢津, 赵洪全, 许广东. 铁路客车舒适度的检测与评价[J]. 中国铁路, 2004, 43(6): 26-29.
- [2] 丁鹏芳. 基于 DSP 的列车舒适度、平稳性指标测试仪设计[C]. 成都: 西南交通大学, 2006.
- [3] 翟婉明. 货物列车动力学性能评定标准的研究与建议方案: 防脱轨安全性评定标准[J]. 铁道车辆, 2002, 40(1): 13-18.
- [4] 翟婉明. 货物列车动力学性能评定标准的研究与建议方案: 轮轨横向力评定标准[J]. 铁道车辆, 2002, 40(2): 9-10.

(下转第 470 页)

凝器周围热环境的温度云图、速度矢量云图等进行对比分析,得到以下结论:加隔声罩前冷凝器内部最高点的温度为 50.30 ℃,加装隔声罩后冷凝器内部最高点的温度为 53.56 ℃,加装后温度升高 3.26 ℃;且加装隔声罩后轴流风机进出口的温度分别上升了 2.90 和 2.99 ℃,温度有所升高但对冷凝器的整体热环境影响不大,不会影响冷凝器的正常运行。

参考文献:

- [1] 林明庆. 商用空调冷凝器隔声罩设计和研究 [D]. 上海: 上海应用技术大学, 2022.
- [2] 刘权熠. 基于 CFD 的高层建筑空调外机热环境优化研究 [J]. 建筑热能通风空调, 2020, 39 (2): 87-89.
- [3] 杨云铠, 程予川, 刘彬, 等. 某商业建筑凹槽空调室外机热环境 CFD 分析与优化 [J]. 暖通空调, 2016, 46 (4): 33-35.
- [4] XUE H, CHOU S K, ZHONG X Q. Thermal environment in a confined space of high-rise building with split air conditioning system[J]. *Building and Environment*, 2004, 39 (7): 817-823.
- [5] CHOI S H, LEE K S, KIM B S. Effects of stacked condensers in a high-rise apartment building[J]. *Energy*, 2005, 30 (7): 968-981.
- [6] 方开翔, 李豪杰, 高慧. 基于 Fluent6.0 的风机流场模拟与噪声预估 [J]. 江苏科技大学学报 (自然科学版), 2008 (4): 42-47.
- [7] 胡勇军. 基于气动性能和噪声的双转子小型轴流风扇结构优化研究 [D]. 杭州: 浙江理工大学, 2015.
- [8] POCHKIN Y, KHALETSKIY Y. Aircraft fan noise reduction technology using leaned stator blades[J]. *Procedia Engineering*, 2015 (106): 368-376.
- [9] 周刚毅. MR Elastomer 的力学性能研究以及平面旋转场下 MRF 的结构分析 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2002.

(编辑 陈 红)

(上接第 463 页)

- [5] 翟婉明. 货物列车动力学性能评定标准的研究与建议方案: 轮轨横向力及车钩力的评定标准 [J]. 铁道车辆, 2002, 40 (3): 10-13.
- [6] 倪纯双, 王悦明. 浅析平稳性指标和舒适度指标 [J]. 铁道机车车辆, 2003, 23 (6): 1-3.
- [7] 高井秀之, 高枫. 铁道车辆乘坐舒适度评定方法 [J]. 国外铁道车辆, 1996, 33 (6): 6-12.
- [8] 张学铭, 谢晓波, 杨少彬. 铁道车辆平稳性指标对比分析 [J]. 佳木斯大学学报 (自然科学版), 2011, 29 (5): 661-666.
- [9] 韦海菊, 解建坤. 城市轨道交通车辆运行舒适性指标计算与试验分析 [J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24 (9): 178-181.
- [10] POLACH O. On non-linear methods of bogie stability assessment using computer simulations[J]. *Journal of Rail and Rapid Transit*, 2006 (220): 13-27.
- [11] 徐峰. 旅客列车舒适度研究进展 [J]. 疾病监测与控制, 2015, 9 (10): 715-717.
- [12] 张向东, 高捷, 闫维明. 环境振动对人体健康的影响 [J]. 环境与健康杂志, 2008, 25 (1): 74-76.
- [13] 陈忱. 基于 UIC 513 标准的城市轨道交通运行舒适度测量与研究 [C]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [14] 王海涌, 王晓明, 党建武, 等. 基于多维粗糙集的高速列车舒适度评价方法研究 [J]. 兰州交通大学学报, 2013, 32 (3): 40-43.
- [15] 余梦雯. 地铁运行引起的环境振动评估影响因素研究 [D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2023.
- [16] 朱剑月, 朱良光, 周劲松, 等. 地铁车辆运行舒适度与平稳性评价 [J]. 城市轨道交通研究, 2007, 10 (6): 28-31.
- [17] 王东. 改善地铁列车运行舒适度方案探讨 [J]. 铁道通信信号, 2020, 56 (1): 86-88.
- [18] 闫东. 高速铁路车辆运行舒适性评价系统研究与应用 [D]. 北京: 北京工业大学, 2014.

(编辑 张永博)