

# 胶轮路轨自动旅客运输系统车辆限界计算分析

王嘉鑫 李辉光 罗 唐 王 振 刘聪灵

(中车浦镇庞巴迪运输系统有限公司, 241060, 芜湖//第一作者, 工程师)

**摘 要** 目前, 国内城市轨道交通限界计算和设计主要依据是《地铁限界标准》。对于胶轮路轨自动旅客运输 (APM) 系统, 国内外尚无针对性规范, 缺少根据 APM 车辆特点而展开的系统性的限界分析和计算。以 PBTS 胶轮路轨 APM 车辆为例, 介绍其车辆的结构特点, 枚举了 APM 车辆动态包络线计算应考虑的因素, 从水平和竖向 2 个方向分析车辆运动, 给出其计算公式。通过镜像和 Autocad 包络制图, 确定 APM 车辆限界的坐标值。研究结果为站台限界的拟定提供了初步依据, 也可作为设备限界分析的基础。

**关键词** 城市轨道交通; 自动旅客运输; 胶轮路轨; 车辆限界

**中图分类号** U260.2<sup>+</sup>2; U239.8

**DOI**: 10.16037/j.1007-869x.2019.10.013

## Computational Analysis of Vehicle Gauge for Rubber Tyre APM System

WANG Jiaxin, LI Huiguang, LUO Tang, WANG Zhen, LIU Congling

**Abstract** At present, the design of urban rail transit gauges in China is mainly based on the “Standard for Metro gauges”, there is not yet a specification for rubber tired APM (automated people mover), the systematic analysis and calculation of APM vehicle are still lacking. Based on the mechanical characteristics of PBTS APM, through introducing the dynamic features of APM vehicle, factors to be taken into account in the calculation of vehicle kinematic envelope are enumerated. The calculation formulas of APM vehicle motion are presented based on horizontal and vertical analyses. The coordinate value of APM vehicle gauge is determined by mirror image and Autocad envelop mapping. The research result provides a preliminary reference and basis for the platform boundaries and the analysis of APM equipment gauge.

**Key words** urban rail transit; APM; rubber wheel; vehicle gauge

**Author's address** CRRC Puzhen Bombardier Transportation Systems Ltd., 241060, Wuhu, China

美国的坦帕机场, 其后在美国、欧洲、日本、新加坡等 50 余个城市或机场内部的轨道交通项目中有应用。截至目前, 全球 APM 系统的运营总长度约 340 km。

我国已开通运营或计划开通的 APM 项目有: 台北捷运内湖线 (1996 年)、香港机场 APM 线 (1998 年)、北京首都机场线 (2007 年)、广州地铁 APM 线 (2010 年)、上海轨道交通浦江线 (2018 年)、深圳机场 APM 线 (2020 年)、成都天府机场 APM 线 (2020 年)、澳门轻轨氹仔线 (2021 年)、香港机场三跑道 APM 扩建线 (2023 年) 等。

## 1 相关标准执行情况

国内外对于限界的计算, 主要有我国的 CJJ/T 96《地铁限界标准》(简为《限标》), 适用于钢轮钢轨地铁系统; 德国的《Bostrab 有轨电车建设和运营条例》(简为“Bostrab”), 主要适用于铰接式钢轮钢轨有轨电车; 国际铁路联盟的 UIC 505—2006《铁路车辆施工限界》, 主要适用于铁路车辆<sup>[1-3]</sup>。其中, 2003 版《限标》的适用性强、认可度高, 是过去的十余年国内城市轨道交通车辆限界计算和设计的重要指引<sup>[4]</sup>。

2019 年 4 月, 2018 版《限标》正式实施。该版《限标》主要对轨道交通车辆限界考虑一系或二系故障、随机和非随机因素分类, 以及对部分参数取值进行了修订; 对于空簧故障考虑了压差计垂向止挡前提, 不再区分侧风, 不再计算曲线地段未被平衡离心加速度影响; 此外, 《限标》还对横向振动加速度的取值作了相应的调整。

上述标准中, 2003 版的《限标》和 Bostrab 在限界体系上大致相同, 与 GB 50157—2013《地铁设计规范》的相关定义和规定匹配, 在项目执行中应用较好。而对于 APM 制式的车辆, 国内外均尚无针对车辆限界计算的规定。

在进行轨道交通车辆限界的设计和计算时, 在

自动旅客运输 (APM) 系统最早应用于 1971 年

区间行车安全上,主要关注设备限界和建筑限界的安全间隙;在乘客上下车安全上,则主要关注车辆与站台间的水平间隙。从目前 APM 项目执行情况看,并未形成统一的、系统化的安全标准,主要是根据车辆厂家相关资料以及国外应用经验,参照美国土木工程师协会标准和国内地铁标准,开展相关的设计和建设工作。

本文在结合 APM 车辆特点的基础上,借鉴 Bostrab 和 2003 版《限标》的方法和思路,以 PBTS 胶轮路轨 APM 车辆为例,展开车辆限界的相关研究。

## 2 APM 车辆结构特点

PBTS 胶轮路轨 APM 车辆长为 12 750 mm,宽为 2 850 mm,高为 3 500 mm,车辆间采用车钩连接。每辆车设 2 个单轴转向架,轴距为 7 580 mm,如图 1 所示。

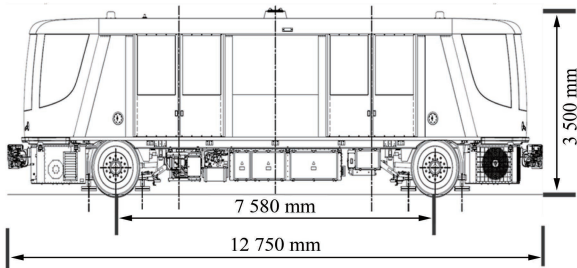


图 1 APM 车辆外尺寸示意图

如图 2 所示,APM 车辆的转向架由车桥、悬挂、驱动、走行、导向、受电等部分组成。由于 APM 车辆的走行部橡胶轮胎本身具有较大的多方向弹性,因此不再设置一系悬挂。

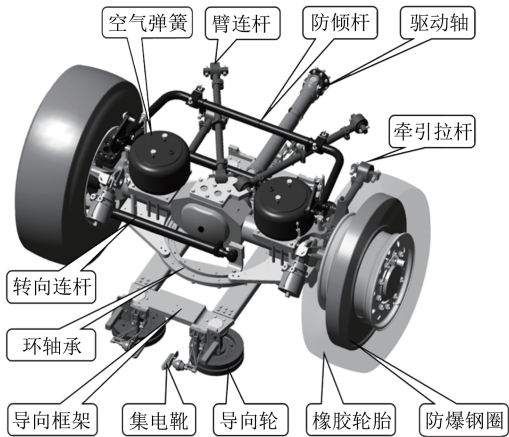


图 2 APM 车辆转向架组成

在正常运行时,APM 车辆 4 个导向轮中有 2 个

导向轮与导梁接触,决定了导向轮的形态和方向。导向轮形态和方向的变化将带动导向框架旋转,进一步拉动转向连杆,将框架的旋转力传递到橡胶轮胎的轮毂,从而实现车辆整体运动方向的调整。

APM 车辆的车体与转向架之间设置了悬挂系统,通过 2 个“V 型”臂连杆连接车桥和车体,用以传递车辆的横向和纵向动态载荷。车辆的牵引拉杆用以传递车辆纵向载荷。车桥顶部设置了 2 个空气弹簧和高度阀,主要用以传递车辆的竖向载荷。

空簧内设止挡,导向轮和走行橡胶轮胎均内置安全钢圈,以减少在发生空簧爆裂、导向轮外侧聚氨酯剥离、走行橡胶轮胎爆裂等情况时车辆的倾斜,起到安全支撑的作用。

## 3 APM 车辆轮廓线的拟定

轨道交通车辆的轮廓线是假想的用以进行车辆限界计算的基础,也是车辆各部位设计尺寸标称值的包络线<sup>[5-6]</sup>。

车辆轮廓线取车辆新造的名义值,不考虑以下因素:①车辆各部件的制造公差、安装测量误差、永久变形等;②线路及轨道条件;③车辆动态运动;④车辆维修限度;⑤载客状态等。

对于底架设备,考虑到车头或车侧设有裙板,为项目统型考虑,车辆轮廓线拟定时取通长裙板。裙板下沿取与车轴中心高度齐平。若遇到区间建筑限界紧张(如曲线外侧隧道内下部的管线空间受限),而仅车头装有裙板的情况时,可另行据实修正。对于车底中央的靴轨动态,限于篇幅和研究进展,本文不予以细化。

车辆轮廓线的坐标值如表 1 所示。表 1 中: $x$ 、 $y$  分别代表横向和竖向坐标值;1~17 为轮廓点号,其具体位置如图 3 所示。图 3 中车辆限界见第 4 章节计算。

表 1 车辆轮廓线坐标值表

点号	1	2	3	4	5	6
$x$	0	1 000	1 120	1 260	1 330	1 330
$y$	3 500	3 400	3 400	3 310	3 160	2 900
点号	7	8	9	10	11	12
$x$	1 370	1 425	1 425	1 420	1 420	1 370
$y$	2 620	1 950	1 620	1 113	545	460
点号	13	14	15	16	17	
$x$	1 350	1 270	1 270	790	790	
$y$	260	200	0	0	70	

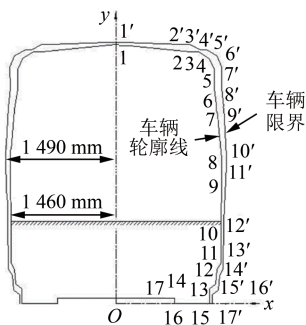


图 3 APM 车辆的轮廓线和车辆限界

4 APM 车辆限界分析计算

轨道交通车辆限界是性能完好的车辆在平直线上运行时的最大动态包络线<sup>[6]</sup>,一般需考虑车辆公差、车辆及轨道的测量公差、车辆永久变形、线路及轨道条件、车辆动态运动、各种载客及偏载情况、车辆维修限度等因素<sup>[7]</sup>。本文中车辆限界的定义参考 GB 50157—2013《地铁设计规范》,不考虑车辆的一系或二系故障。

对 APM 车辆限界进行分析计算时,先列举 APM 车辆的各种静、动态因素,分类进行随机因素、非随机因素的叠加,从水平横向和高度竖向 2 个方向分别对车辆运动进行分析,给出车辆轮廓线各点的计算公式。对计算结果进行制图,通过镜像和包络得到最终的 APM 车辆限界坐标值。

4.1 车辆限界计算的考虑因素

参照 Bostrab 和 2003 版《限标》,结合 APM 车辆的特点,列出 APM 车辆限界各项计算因素及相关参数表,如表 2 所示,各项参数值可根据车辆设计和制造图纸得到,本文不再赘述。

表 2 中,随机因素分为车辆静态、车辆动态、轨道、磨损 4 类。假设每 1 类因素中的动态因素均相对独立、符合高斯分布,对这 4 类因素进行线性叠加。表 2 中已列明了计算过程中所需要引用的其他参数。

需要说明的是,APM 车辆轮胎多方向的复杂力学特性尚有待进一步研究,本文不做展开分析。本文仅考虑轮胎竖向的压缩,认为车辆所受横向力(自振动和侧风)最后均通过导向轮的自由间隙和横向形变反应在限界中,可通过对导向轮分析等效替代。此外,《限标》中对侧风、横向自振动、偏载引起的侧滚均经分别计算后再进行线性或均方根求和。而实际上,由于力矩平衡,应统筹考虑

这 3 项因素所引起的一系或二系压缩,避免对重力力矩的重复计算。本文对二系、一系的 3 个侧滚分别统筹考虑,定义二系、一系的侧滚角分别为  $\alpha$ 、 $\beta$ (见表 2)。当不考虑侧风作用时,需重新确定其参数数值。

表 2 APM 车辆限界的计算因素及引用参数

项目	名称	单位	符号
车辆静态因素	车体横向制造公差	mm	$A_1$
	门槛装配误差	mm	$A_2$
	转向架对中允许误差	mm	$A_3$
	导轮制造公差	mm	$A_4$
	导轮装配误差	mm	$A_5$
	车体竖向制造公差	mm	$B_1$
	底架设备竖向安装误差	mm	$B_2$
	地板面高度误差	mm	$B_3$
	车体底架挠度变形量(下沉)	mm	$B_4$
	车体底架挠度变形量(上翘)	mm	$B_5$
车辆动态因素	空重车空簧未补偿的下降量	mm	$B_6$
	V 臂杆横向偏移量(侧风)	mm	$C_1$
	V 臂杆横向偏移量(横向振动)	mm	$C_2$
	导向轮横向变形量(侧风)	mm	$C_3$
	导向轮横向变形量(横向振动)	mm	$C_4$
	二系侧滚引起的横向加宽	mm	$C_5$
	一系侧滚引起的横向加宽	mm	$C_6$
	二系竖向动挠度	mm	$D_1$
	一系竖向动挠度	mm	$D_2$
	二系侧滚引起的竖向降低	mm	$D_3$
轨道因素	一系侧滚引起的竖向降低	mm	$D_4$
	导向轨制造公差	mm	$E_1$
	导向轨安装允许误差	mm	$E_2$
	运行道横向不平整引起的加宽	mm	$E_3$
	导轮与导梁的自由间隙	mm	$E_4$
	线路竖向位差	mm	$F_1$
磨损因素	运行道横向不平整引起的竖向降低	mm	$F_2$
	导向轮磨损限值	mm	$G_1$
	轮胎磨损限值	mm	$G_2$
	倾斜系数	无量纲	$\delta$
计算所引用的其他参数	车体计算长度	mm	$L_1$
	轴距	mm	$L_2$
	轮距	mm	$L_3$
	V 臂杆横向刚度	mm/kN	$K$
	横向振动加速度	m/s <sup>2</sup>	$a$
	风压	N/m <sup>2</sup>	$P_w$
	受风面积	m <sup>2</sup>	$A_w$
	空车质量	kg	$M_1$
	额定载客乘客质量	kg	$M_2$
	二系侧滚中心高度	mm	$H_1$
	一系侧滚中心高度	mm	$H_2$
	二系侧滚角	(°)	$\alpha$
	一系侧滚角	(°)	$\beta$
	允许的运行道横向不平整量	mm	$J$

4.2 APM 车辆限界水平方向的计算

$x$ 、 $y$  分别代表横向和纵向坐标值。车辆静态、

动态、轨道、磨耗等引起的横向加宽量分别记为  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$ ，则有：

$$x_1 = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + (A_3 \times \delta)^2 + (A_4 \times \delta)^2 + (A_5 \times \delta)^2} \quad (1)$$

$$x_2 = \sqrt{(C_1 \times \delta)^2 + (C_2 \times \delta)^2 + C_3^2 + C_4^2 + C_5^2 + C_6^2} \quad (2)$$

$$x_3 = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + E_3^2 + (E_4 \times \delta)^2} \quad (3)$$

$$x_4 = G_1 \times \delta \quad (4)$$

式中：

$$\delta = L_1/L_2 \quad (5)$$

$$C_1 = \frac{1}{2}(A_w \times P_w \times K)/1\ 000 \quad (6)$$

$$C_2 = \frac{1}{2}[(M_1 + M_2) \times a \times K]/1\ 000 \quad (7)$$

$$C_5 = \sin\left(\arctan \frac{x}{y - H_1} + \alpha\right) \times \sqrt{(y - H_1)^2 + x^2} - x \quad (8)$$

$$C_6 = \sin\left(\arctan \frac{x}{y - H_2} + \beta\right) \times \sqrt{(y - H_2)^2 + x^2} - x \quad (9)$$

$$E_3 = \sin\left(\arctan \frac{x + L_3/2}{y} + \arctan \frac{J}{L_3}\right) \times \sqrt{[x + (L_3/2)]^2 + y^2} - [x + (L_3/2)] \quad (10)$$

对 APM 车体横向偏移量  $\Delta x$  进行计算

$$\Delta x = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 \quad (11)$$

上述公式中， $C_3$  和  $C_4$  呈非线性特征，可查阅资料得到其数值；未进一步分解计算的其他各项，也可直接查阅设计资料获得数值。

此外，式(8)和式(9)适用于二系旋转中心高度以上部分的计算。对于一、二系旋转中心之间或一系旋转中心高度以下部分的计算，考虑到侧滚后加宽量为负，应减小其加宽量，但由于在各项加宽量统筹考虑时难以单独剥离出来，因而做归零处理，即当  $y - H_1 < 0$  或  $y - H_2 < 0$  时， $C_5$  或  $C_6$  为零。

### 4.3 APM 车辆限界的竖向计算

对 APM 车体竖向偏移量进行计算，主要考虑车辆公差类、磨耗极限、空重车未补偿下降、车体局部形变，以及侧风、偏载、自振动等引起的一系、二系侧滚等情况，另考虑走行面不平顺引起的坐标系旋转。

在计算竖向加高时，对因侧滚、走行面不平顺引起的车辆旋转作归零处理，竖向加高量记为  $\Delta y_u$ 。

另记竖向降低量为  $\Delta y_d$ ，可得：

$$\Delta y_u = \sqrt{B_1^2 + B_3^2 + B_5^2} + \sqrt{D_1^2 + D_2^2} + F_1 \quad (12)$$

$$\Delta y_d = \sqrt{B_2^2 + B_3^2 + B_4^2 + B_6^2} +$$

$$\sqrt{D_1^2 + D_2^2 + D_3^2 + D_4^2} + \sqrt{F_1^2 + F_2^2} + G_2 \quad (13)$$

式中：

$$F_2 = (x + L_3/2) \times J/L_3 \quad (14)$$

当  $y - H_1 > 0$  或  $y - H_2 > 0$  时：

$$D_3 = -\cos\left(\arctan \frac{x}{y - H_1} + \alpha\right) \times \sqrt{(y - H_1)^2 + x^2} + y - H_1 \quad (15)$$

$$D_4 = -\cos\left(\arctan \frac{x}{y - H_2} + \beta\right) \times \sqrt{(y - H_2)^2 + x^2} + y - H_2 \quad (16)$$

当  $y - H_1 < 0$  或  $y - H_2 < 0$  时：

$$D_3 = \sin\left(\arctan \frac{H_1 - y}{x} + \alpha\right) \times \sqrt{(y - H_1)^2 + x^2} + y - H_1 \quad (17)$$

$$D_4 = \sin\left(\arctan \frac{H_2 - y}{x} + \beta\right) \times \sqrt{(y - H_2)^2 + x^2} + y - H_2 \quad (18)$$

在车辆轮廓线基础上，考虑上述计算所得横坐标加宽，以及竖向加高量或降低量，分别绘图并进行包络，可初步得出 APM 车辆限界。

### 4.4 包络线进一步处理

上文所给出的水平加宽和竖向加高计算公式，均为车辆各偏移量与侧滚方向相同时的情况，未列出方向相反时的计算公式。在车辆各偏移量与侧滚方向相反时，加宽量变小，仅车顶部个别点因侧滚原因可能会略超出方向相同时的包络线，影响较小，基本可以忽略。

车辆各偏移量与侧滚的方向，无论是相同还是相反，均应进一步考虑车辆对侧的动态包络线。为简化计算，可对初步求得的包络线进行镜像，从而得到对称侧的图形和坐标。选取计算侧和作图所得的对称侧进行包络，将其作为最终的车辆限界。APM 车辆限界坐标值如表 3 所示，车辆轮廓线和车辆限界综合图如图 3 所示。可知，车辆限界最宽为 1 490 mm，站台高度处宽为 1 460 mm。

本文给出的坐标值均为考虑了 600 N/m<sup>2</sup> 的侧风作用。对于地下区间，应取合适参数进行计算。

表 3 车辆限界坐标值表

点号	1′	2′	3′	4′	5′	6′
x	0	114	887	1 006	1 134	1 231
y	3 530	3 530	3 503	3 503	3 430	3 430
点号	7′	8′	9′	10′	11′	12′
x	1 368	1 433	1 428	1 456	1 490	1 490
y	3 340	3 190	2 906	2 650	1 980	1 868
点号	13′	14′	15′	16′	17′	18′
x	1 460	1 450	1 400	1 380	1 300	1 300
y	1 113	463	380	181	123	0

5 结语

本文在借鉴《地铁限界标准》的基础上,结合 APM 车辆单轴转向架、橡胶轮胎、V 臂杆和防倾杆等特点,对车辆动态包络线展开了分析。分析思路 and 计算方法可为 APM 限界标准的制定提供参考。

通过本文的分析和计算,车辆限界在站台高度处为 1 460 mm,这为站台限界的拟定提供了基本依据,对于减小站台间隙有实际意义。这一数值经上海轨道交通浦江线验证后是可靠的(浦江线的站台边距线路中心线 1 460 mm,间隙 39.5 mm)。

对于车辆底部集电靴的动态情况,以及橡胶轮

(上接第 48 页)

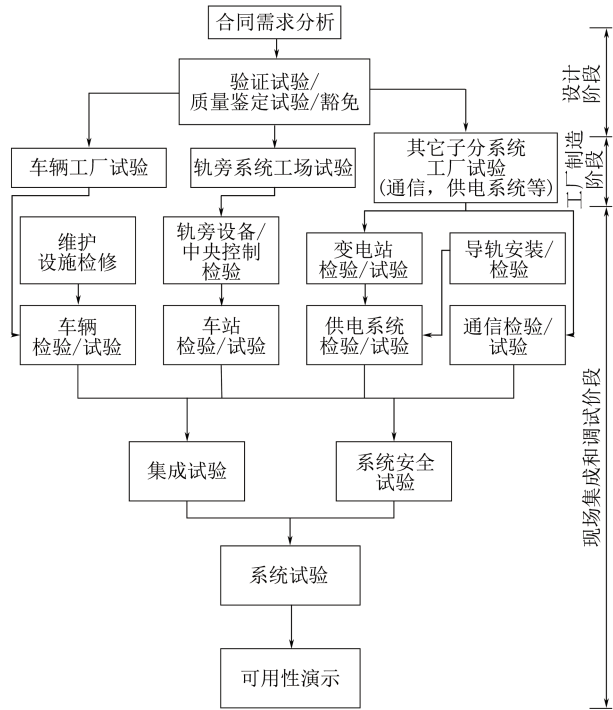


图 3 APM 系统测试流程

中,系统将根据业主首选的系统运行计划和日常服务

胎多方向复杂形变等方面,应在本文研究成果的基础上进一步补充完善。此外,建议在项目执行中,对集电靴和车辆底架设备进行统筹设计。

参考文献

[ 1 ] 倪昌.我国与德国限界标准的异同和特点[J].都市快轨交通, 2005(2): 15.

[ 2 ] Vorläufige Richtlinien für die Bemessung des lichten Raumes von Bahnen nach der Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen: Bostrab-Lichtraum-Richtlinien [ S ]. Berlin: BEAK,1996: 1.

[ 3 ] UIC. International Union of Railways. Railway transport stock Rolling stock construction gauge: UIC 505-1—2006[ S ].Paris: Internation Union of Railways,2006: 1.

[ 4 ] 杨娜,袁艳萍,王虎高.GB 50157—2013 与 CJJ 96—2003 标准限界对比浅析[J].技术与市场,2017(8): 53.

[ 5 ] 中华人民共和国住房和城乡建设部.地铁限界标准: CJJ 96—2018[ S ].北京:中国建筑工业出版社,2018: 12.

[ 6 ] 中华人民共和国住房和城乡建设部.地铁设计规范:GB 50157 — 2013 [ S ].北京:中国建筑工业出版社,2014: 4.

[ 7 ] 王嘉鑫.浮动车车型有轨电车车辆限界(横向部分)计算方法分析[J].地下工程与隧道,2015(1): 44.

(收稿日期:2019-05-05)

时间表按照满载状态实施运行计划,遵守所有操作、维护策略和程序,唯一不同是没有载运乘客,只有指定的授权人员。完整的系统演示将根据系统验收程序中规定的测试程序来运行,直到系统服务可用性在连续 3 个月演示期限内达到了规定的水平。

3 结语

APM 系统的集成,应始终遵循高可靠性、高可用性和高可维护性的设计理念,在此基础上进行各子系统的深度整合,用以提高设备复用率,增强各子系统自检和自诊断功能,减少设备数量,减少运营和维护人员。在 APM 项目的建设过程中,要利用系统集成管理的思路开展工作,控制和管理各子系统的功能、系统和接口需求。

参考文献

[ 1 ] 朱翔.城市轨道交通无人驾驶技术的若干应用问题[J].城市轨道交通研究,2006(12): 36.

[ 2 ] 郑伟.全自动无人驾驶模式下系统功能与场景分析[J].城市轨道交通研究,2017(11): 107.

[ 3 ] 罗利平.城市轨道交通综合监控系统集成方案[J].城市轨道交通研究,2008(11): 7.

(收稿日期:2019-05-06)