

# 基于基线偏移的加速度积分速度与位移的方法

郑高铭<sup>1 2</sup> 焦新泉<sup>1 2</sup> 贾兴中<sup>1 2</sup>

(1. 中北大学 电子测试技术国家重点实验室,太原 030051;  
2. 仪器科学与动态测试教育部重点实验室,太原 030051)

**摘要:** 针对航天试验过程中,箱体动态振动位移及永久位移测量的问题,通过对比传统的频域二次积分、时域二次积分、频域—时域混合积分和 wang-zhou 法,提出了基于时域积分的数据分段法,将数据分为三段,根据每一段物体振动情况对数据进行不同的处理,最终利用时域积分得到位移曲线。通过对两组数据的处理与标准位移计实测数据对比,位移曲线最大峰值误差低于 20%,永久位移误差低于 8%。实验结果表明利用数据分段法能较好地反映箱体真实振动位移趋势。

**关键词:** 计量学; 振动位移; 永久位移; 分段法; 时域积分; 频域积分; 频时域混合积分; 基线偏移

**DOI:** 10.19753/j.issn1001-4390.2021.09.021

中图分类号: TM206

文献标识码: A

文章编号: 1001-4390(2021)09-0142-05

## Method for acceleration of integral velocity and displacement based on baseline offset

Zheng Gaoming<sup>1 2</sup>, Jiao Xinquan<sup>1 2</sup>, Jia Xingzhong<sup>1 2</sup>

(1. National Key Laboratory of Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China.

2. Key Laboratory of Instrument Science and Dynamic Testing, Ministry of Education, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** To solve the problems of dynamic vibration displacement and permanent displacement measurement at the launching nozzle during aerospace test, the data segmentation method of time domain integration was proposed by comparing traditional frequency domain quadratic integral, time domain quadratic integral, frequency domain-time domain hybrid integral and wang-zhou method. This method divides the data into three segments, and according to the vibration condition of each segment, the displacement curve was gained via time-domain integral. By comparing the two sets of processed data with the data extracted from standard displacement meter, it can be concluded that the maximum peak error of the curve is less than 20%, and the permanent displacement error is less than 8%. The experimental results indicate that the proposed method can better reflect the real vibration displacement tendency of the launching nozzle.

**Keywords:** metrology, vibration displacement, permanent displacement, segmentation method, time domain integration, frequency domain integration, frequency time domain hybrid integration, baseline offset

### 0 引 言

振动位移测量主要有接触式与非接触式两种<sup>[1-2]</sup>: 非接触式主要以激光跟踪仪<sup>[3-4]</sup>、超声波测距<sup>[5-6]</sup>、高速摄影<sup>[7-8]</sup>为代表,此外还有三维定位<sup>[9-10]</sup>;接触式有直接测量振动位移的拉线位移传感器,也有测量加速度进而积分求得振动位移的加速度传感器。试验过程中往往伴随着巨大的噪声、漫天烟尘及火光,在恶劣复杂的环境下,超声波、激光跟踪仪及高速摄影难以实现振动位移的有效测量;在接触式传感器中,拉线位移传感

器由于难以寻找安装位置,尤其是在高空的环境更难以安置,此外其频响一般为几十赫兹,高频条件下,将导致有用信号的丢失;加速度传感器体积小、质量轻、频响高、便于安装,钢壳材质、内部灌封胶的保护,电路板信号的调理使得其耐高温,抗干扰能力强,不受烟尘、火光影响,因此利用加速度传感器间接测量振动位移信号成为了航天试验的首选。

对加速度积分大致分为两类,第一类是预处理,去除直流分量、噪声干扰、趋势项,通常方式有去均值、高

通滤波、最小二乘法曲线拟合<sup>[11-12]</sup>、曲线平滑等;第二类是积分,主要分为时域积分<sup>[13-15]</sup>、频域积分<sup>[16-18]</sup>及拟合函数。但频域积分环节,信号经过正逆变换,容易引起截断误差,且频域积分精度对低频信号敏感,必须选取合适的低频截止频率,以起始段、结束段不出现明显震荡为宜<sup>[19-20]</sup>,然而在滤掉低频信号的同时,也丢失了永久位移信号;而时域积分中,利用最小二乘法进行数据拟合去除趋势项,最后积分求得位移,虽求得了振动位移但是在去除趋势项<sup>[21-22]</sup>的同时,也去除了永久位移。因此上述方法都不能满足筒口位移的测量。文献[23-25]中 wang-zhou 法对加速度基线的校正也有提及,由于试验过程环境恶劣,情况复杂并不适用,按照其方法对数据进行处理,得出的位移曲线也有很大出入。

通过对箱体整个试验过程的细致分析将实验过程分为三段,每一段对应的加速度数据进行不同的处理,尽可能保留有效数据,剔除干扰数据,使积分获取的位移曲线更接近于实际振动位移。

### 1 位移误差原因分析

试验前箱体筒内填充弹丸,筒受重力压迫且与水平方向保持固定的夹角  $\theta$ ;当试验开始后,箱体剧烈振动,随着炮弹弹出,箱体将会提高一定的高度,即产生永久位移,并且倾角也将会增大;在后续过程中,在新的平衡点振动直至稳定。试验简化模型如图 1 所示,标准位移计实测箱体振动位移曲线如图 2 所示。

在试验前,被测物体与水平面夹角为  $\theta$ ,此时轴向加速度  $a_y$ :

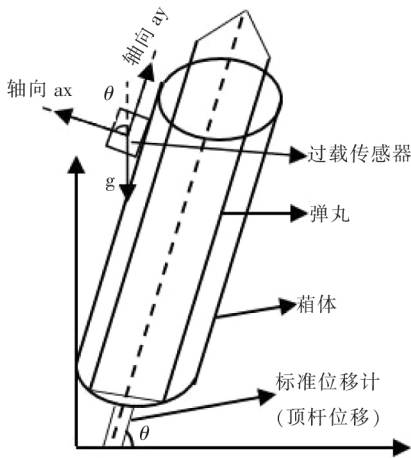


图 1 试验简化模型

Fig. 1 Simplified experimental model

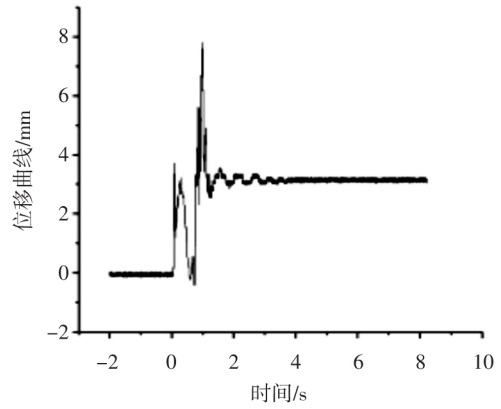


图 2 实测振动位移曲线

Fig. 2 Measured vibration displacement curve

$$a_y = g \sin \theta \quad (1)$$

试验过程中由于物体内部质量的改变或其他因素导致被测物体与水平面夹角变化  $\Delta \theta$ ,此时轴向加速度  $a_{yt}$ :

$$a_{yt} = g \sin(\theta + \Delta \theta) \quad (2)$$

加速度前后差值  $\Delta a$ :

$$\Delta a = a_{yt} - a_y = g(\sin(\theta + \Delta \theta) - \sin \theta) \quad (3)$$

该差值将会导致过载传感器输出直流偏量,使得倾角变化前后的加速度基线不一致,即加速度基线发生了偏移。采集回的加速度曲线如图 3 所示,  $\Delta a$  为  $0.03274 \text{ m/s}^2$ 。

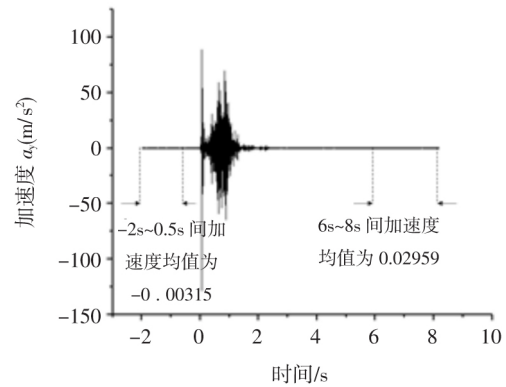


图 3 加速度曲线

Fig. 3 Acceleration curve

#### 1.1 若不对基线偏移进行校正

以 0 s 为试验开始的时间,假设 0.2 s 加速度基线发生偏移,直至 8.2 s 试验结束,误差位移  $S$  根据如下:

$$S = \int_{0.20.2}^{8.28.2} \Delta a t dt \quad (4)$$

可知,由加速度基线偏移导致的误差将达到 1 m

以上,而实际的振动位移在 mm 的量级,有用信息完全被淹没,使得信号失真。按照原始数据经过简单的去直流后直接积分,得出的位移曲线如图 4 所示,在 8.18 s 时位移为 1.01 m,与理论值符合。

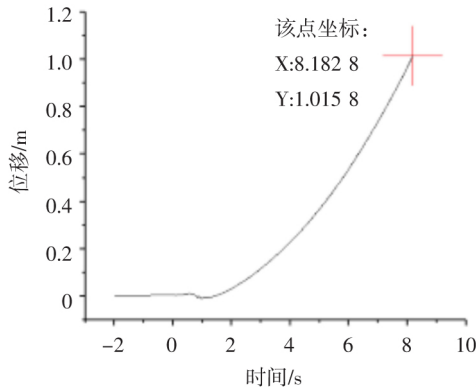
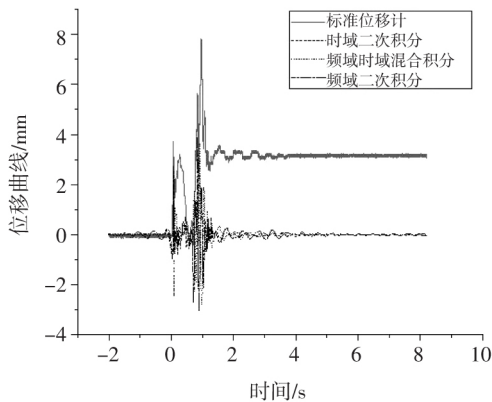


图 4 未校正加速度基线积分得出的位移曲线  
Fig. 4 Displacement curve obtained from baseline integral of uncorrected acceleration

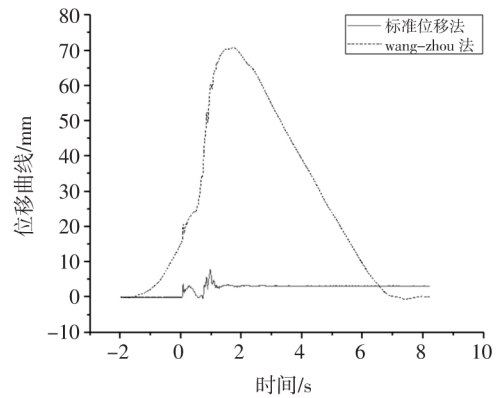
### 1.2 若按照传统的方式处理

传统的对加速度数据积分的方法有时域二次积分、频域二次积分<sup>[16]</sup>、频域—时域混合积分,以及 wang-zhou 法。因频域积分对低频信号敏感,若不对低频信号处理,将会引起信号的震荡,通过对不同截止频率的尝试,在高通截止频率为 2 Hz 以上的情况下不会引起信号的震荡,利用 Matlab 求得频域积分位移曲线;而在时域积分中采用线性拟合去除趋势项,全程可在 origin 软件中完成。分别使用这四种方法积分求得的位移与标准位移计实测位移作对比,如图 5 所示。

通过对图 5 的分析可以看出时域积分、频域积分、频域—时域混合积分与实测位移计相比,动态振动位



(a) 时域、频域、频域—时域混合积分求得的位移曲线与标准位移计的对比



(b) wang-zhou 法求得的位移曲线与标准位移计的对比

图 5 传统处理方式与标准位移计的对比

Fig. 5 Comparison between traditional treatment method and standard displacement meter

移时程变化基本一致,但发生永久位移的过程是一个缓变的过程,属于低频信号,而频域积分中使用了高通滤波器,时域积分中使用了线性拟合,这都去除了低频成分,导致永久位移信息丢失。利用 wang-zhou 法通过对加速度后段偏移的基线消除,确实在一定范围内能校正加速度基线误差,但是由于试验场所环境复杂,箱体架形变等因素,单纯的对后段加速度校正,仍然存在较大的误差。

### 2 数据分段处理—分段法

将去除均值的加速度一次积分,得到速度曲线图。由公式(3)可知,当被测物体倾斜角度  $\Delta\theta$  发生了变化,且  $\Delta\theta$  固定不变,那么  $\Delta a$  也将是一个固定值,其在速度曲线趋势上则体现为一条倾斜的直线。因此在速度后段进行一次项拟合:

$$v_t = v_0 + at \tag{5}$$

由式(5)便可求得该拟合直线与时间轴的交点  $t$ ,虽然箱体发生倾斜是一个复杂缓慢的过程,但由于此过程时间很短,且倾斜后的加速度基线处于稳定状态,因此可认为  $t$  时间点便是加速度基线开始偏移的时间点。速度分析曲线如图 6 所示。

基于上述分析,将整个试验过程分为三个阶段:

(1) 试验准备阶段(-2 s ~ 0 s): 此阶段加速度应该处于零位且不会有波动,但由于电路噪声、零位漂移等因素,导致加速度不仅不在零位基线上,并伴有纹波。因此简单对试验前段数据去零位,仍可能导致初始加速度不为零,在后续两次积分,误差将越来越大。因此第一步,将采集回来的数据整体去除均值(均值由试验前段数据取平均得到),第二步,对试验准备阶

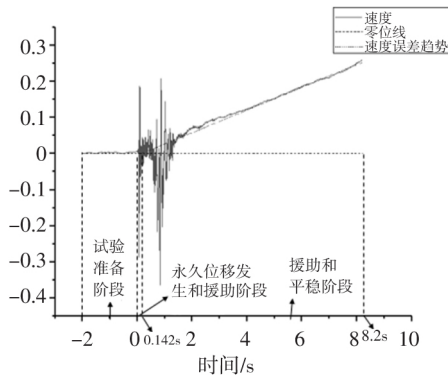


图 6 速度分析曲线图

Fig. 6 Velocity analysis curve

段的数据( -2 s ~ 0 s )采用 origin 四阶平滑,然后在原始数据中去除平滑项,尽可能使得准备阶段的数据对试验后续不造成影响;

(2) 永久位移发生和振动阶段( 0 s ~ 0.142 s ): 当试验开始,由于弹丸弹出,箱体所受压力减小,导致物体与水平面倾角增大,有缓慢抬高的趋势,属于低频信号,并伴有剧烈的振动。若是对信号整体去趋势亦或是高频滤波虽能求得剧烈振动的位移趋势,但是丢失了低频信号,基于此只需要去均值零位即可;

(3) 振动和平稳恢复阶段( 0.142 s ~ 8.2 s ): 被测物体在发生永久位移后,在新的平衡点振动直至平衡,不会有缓变、低频信号产生,因此可以利用高频滤波或者去除趋势项等方式处理。在速度基础上,利用 origin 一阶平滑去除平滑项,尽可能保留有用信息,去除噪声和低频干扰,最后再次积分得到位移曲线。

### 3 试验验证与结果分析

通过上述实验过程的分析,分段法将数据处理分为以下步骤,如图 7 所示,避免了在永久位移发生阶段对数据进行高通滤波或平滑去趋势项处理,尽可能还原了数据的真实性。

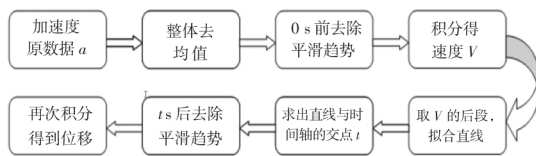
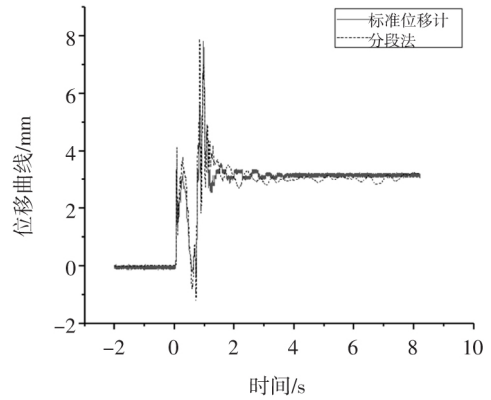


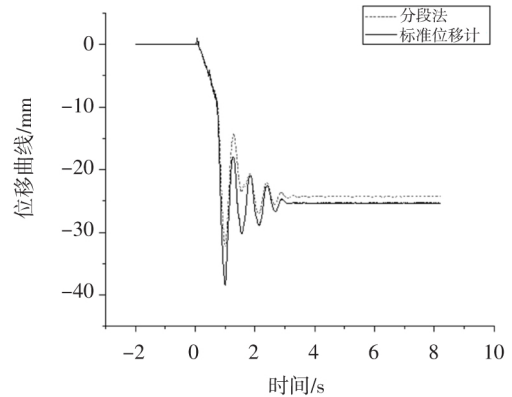
图 7 分段法处理步骤

Fig. 7 Steps of segmental method

运用分段法对两次加速度实验数据进行处理,得到的位移曲线与标准位移计作对比,如图 8 所示。



(a) 第一组数据积分得到的位移曲线



(b) 第二组数据积分得到的位移曲线

图 8 分段法求位移曲线

Fig. 8 Segmental method for displacement curve

图 8( a ) 中,分段法求出的位移曲线末端均值为 3.06 mm,而标准位移计均值为 3.16 mm,试验过程中永久位移误差为 3.16%,最大峰值差为 1.48 mm,最大峰值误差为 18.9%;图 8( b ) 中,分段法求出的位移曲线末端均值为 -24.3 mm,标准位移计均值为 -26.2 mm,永久位移误差为 7.25%,最大峰值差为 6.59 mm,峰值误差为 17.13%;与传统积分方式相比,不仅保留了振动物体永久位移的趋势,还具有更高的准确度。此外动态振动位移趋势、幅值与标准位移计基本一致,表明分段法积分求得的位移曲线能较好地反应试验过程中被测物体的振动趋势。

### 4 结束语

在处理加速度基线偏移且伴随永久位移发生的情况下,传统的时域二次积分、频域二次积分、频域-时域混合积分只能测出物体动态振动位移,永久位移信息由于高频滤波或曲线拟合去除趋势项的方式丢失。在时域积分的基础上,求出发生永久位移后的临界时间点,采用分段法,在速度后段利用数据平滑的方式校正因倾角的变化、被测物体的形变等因素引起的加速



度基线偏移。从数据可知,该方法能准确测出振动动态位移信号,且能保留试验后发生的永久位移,具有一定的实用价值。

### 参 考 文 献

[1] 常浩. 基于机器视觉的柔性体振动测量系统研究[D]. 中国矿业大学, 2016.

[2] 谭卿杰. 差动式霍尔位移传感器设计及其静态特性分析[D]. 南昌: 南昌大学, 2016.

[3] 范百兴. 激光跟踪仪高精度坐标测量技术研究及实现[D]. 解放军信息工程大学, 2013.

[4] 李方. 基于 AT960 激光跟踪仪的工业测量关键技术与系统开发研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.

[5] M Nasucha, Yohandri J T S Sumantyo, K Hattori, H Kuze. Computation calibration on distance measurement in an ultrasonic remote sensing device[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1185(1).

[6] 徐盛良. 基于信号强度与超声波测距结合的室内定位系统[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.

[7] 雷斌, 李强红, 刘宏达, 等. 高速摄影动态位移计算方法研究[J]. 汽车科技, 2017, (1): 35-38.  
Lei Bin, Li Qianghong, Liu Hongda, et al. Study on Dynamic Displacement Calculation Method of High Speed Photography[J]. Automobile Science & Technology, 2017, (1): 35-38.

[8] 畅里华, 王旭, 温伟峰, 等. 高速摄影激光照明技术取得新进展[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30(4): 1-3.

[9] 刘溟, 张锡洋, 邹建明, 等. 三维定位方法在变电站局部放电检测中的应用[J]. 电测与仪表, 2019, 56(5): 111-118.  
Liu Ming, Zhang Xiyang, Zou Jianming, et al. Application of 3D Positioning Method in Partial Discharge Detection of Substation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(5): 111-118.

[10] 张润轩. 基于 WiFi 的室内三维定位技术研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2018.

[11] 王辉, 刘炜, 李群湛, 等. 基于复数域偏最小二乘法与等值法的多谐波源责任划分[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(4): 78-85, 119.

[12] 钟诚, 张毅, 王健. 基于递推最小二乘法独立微电网自适应类二次频率控制[J]. 电测与仪表, 2019, 56(15): 77-83.

[13] 王海涛. 加速度传感器在桥梁动态位移测量中的应用研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.  
Wang Haitao. Application of Acceleration Sensors in Dynamic Displacement Measurement of Bridges[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013.

[14] 王万金, 徐洪洲, 张志国. 基于加速度振动信号的速度和位移积分误差分析[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(7): 127-130.  
Wang Wanjin, Xu Hongzhou, Zhang Zhiguo. Analysis of velocity and displacement integral error based on acceleration vibration signal[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016, 37(7): 127-130.

[15] 李小龙, 杨万安. 路面冲击响应加速度信号分析处理方法及应用[J]. 上海汽车, 2018, (3): 15-18.  
Li Xiaolong, Yang Wanan. Analysis and processing method of pavement impact response acceleration signal and its application[J]. Shanghai Auto, 2018, (3): 15-18.

[16] 郑淑孟. 基于 MEMS 惯性传感器的人体姿态和位移检测[D]. 广州: 暨南大学, 2015.

[17] 李炳炳. 基于 MEMS 惯性传感器的人体姿态检测系统的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.  
Li Bingbing. Research on human body attitude detection system based on MEMS inertial sensor[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017.

[18] 蒋良滩, 姚令侃, 吴伟. 边坡振动台模型实验动位移的加速度时程积分探讨[J]. 防灾减灾工程学报, 2009, 29(3): 261-266.  
Jiang Liangzhen, Yao Lingxi, Wu Wei. Discussion on acceleration time-history integral of dynamic displacement of rock slope model test[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2009, 29(3): 261-266.

[19] 王建锋, 马建, 马荣贵, 等. 动位移的加速度精确测量技术研究[J]. 计算机科学, 2010, 37(12): 201-202, 237.  
Wang Jianfeng, Ma Jian, Ma Ronggui, et al. Research on Accurate Measurement Technology of Dynamic Displacement Acceleration[J]. Computer Science, 2010, 37(12): 201-202, 237.

[20] 王海涛, 马锷, 吴加权. 基于加速度积分的桥梁振动位移的研究[J]. 中国市场, 2013, (18): 43-44.

[21] 王国权, 周锡元. 921 台湾集地震近断层强震记录的基线校正[J]. 地震地质, 2004, (1): 1-14.  
Wang Guoquan, Zhou Xiyuan. Baseline Correction of Strong Earthquake Records of the Near-Fault of the 921 Taiwan Jiji Earthquake[J]. Seismology and Geology, 2004, (1): 1-14.

[22] 王德才, 叶献国. 近断层强震记录基线校正及不确定性分析[J]. 世界地震工程, 2011, 27(2): 63-69.

[23] 周英杰. 加速度测试积分位移算法及其应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.

[24] 孙勇军. 抽油机加速度信号积分位移算法研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2018.

[25] 牟玉喆, 潘鑫, 高金吉, 等. 基于 LabVIEW 的振动加速度信号积分方法研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2016, 43(2): 70-74.

作者简介:



郑高铭(1995—)男, 硕士研究生, 主要研究方向为测试计量技术及仪器、电路与系统。  
Email: 943406542@qq.com

焦新泉(1978—)男, 副教授, 博士, 主要研究方向为微纳器件及测试技术。Email: jiaoxinquan@nuc.edu.cn

贾兴中(1984—)男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为电路与系统。

收稿日期: 2019-09-07; 修回日期: 2020-03-08

(田春雨 编发)