

低温液氧容器容积标定方法探讨

秦永涛, 郑小萍, 李 伟, 吉展阳

(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 根据液氧/煤油发动机地面试验特点, 比较低温容器容积标定的不同方法, 基于容量比较法, 确定液氧/煤油发动机地面试验低温容器容积标定方法。通过建立液氧/煤油发动机地面试验低温容器容积标定系统, 结合温度与密度对数据进行修正, 获取准确低温容器容积, 为提高液氧流量测量精度奠定基础。标准定后对容器内表面进行清洗, 避免多余物进入试验系统, 保证试验系统可靠性。

关键词: 流量测量; 容积标定; 数据修正

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2016) 03-0086-07

Research on capacity calibration method of cryogenic liquid oxygen storage tank

QIN Yongtao, ZHENG Xiaoping, LI Wei, JI Zhanyang

(Xi'an Aerospace Propulsion Test Technology Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: Based on ground testing characteristics of liquid oxygen/kerosene engine, the common methods of capacity calibration for metal vertical storage tank were compared, and the capacity calibration method of liquid oxygen storage tank for ground testing of liquid oxygen/kerosene engine was confirmed by means of capacity comparison method. Depend on establishment of the capacity calibration system for cryogenic storage tank used for ground test of liquid oxygen/kerosene engine, the capacity of cryogenic storage tank was accurately obtained by the data amendment of liquid oxygen temperature and density, which laid a foundation of precise measurement of liquid oxygen flow. The inner surface of liquid oxygen storage tank is cleaned after the calibration for eliminating the redundancy of calibration medium to ensure the reliability of testing system for liquid oxygen/kerosene engine.

Keywords: flow measurement; volume calibration; data amendment

0 引言

我国新一代 120 t 大推力、无毒无污染高压

补燃液氧/煤油发动机主要用于新一代运载火箭。液体火箭发动机地面试验是考核发动机性能、验证设计方案合理性、验收发动机的重要手段。

收稿日期: 2015-12-02; 修回日期: 2015-12-28

作者简介: 秦永涛 (1981—), 男, 博士, 研究领域为液体火箭发动机试验技术

120 t 液氧/煤油发动机双机并联试验时液氧额定质量流量约 580 kg/s。新一代 CZ-7 火箭一级使用 2 台 120 t 液氧/煤油发动机，按照运载火箭一级发动机工作时间 170 s 计算，液氧流量不确定度由 1%降低到 0.5%，大约可减轻火箭推进剂加注量 493 kg，可以增加 (100~500) kg 的微型卫星 1 台，从而不仅优化了火箭总体结构，而且提升了箭体效益，增加了运载火箭竞争力^[1-3]。

液氧/煤油火箭发动机试验中，采用低温涡轮流量计测量液氧体积流量，由于涡轮流量计一般采用实验室水校准，与真实低温介质存在较大差异，且现场安装环境条件和计量条件不同，特别是流量计低温结构变形的影响，导致涡轮流量计体积测量值出现较大的系统误差。同时低温温度测量的误差，影响液氧密度计算的准确性，最终影响液氧质量流量测量的准确性。目前研制了分节式电容液面计安装于液氧容器内，可以准确测量液氧稳态体积流量，并用分节式电容液面计测量装置对涡轮流量计进行现场原位校准，减小了涡轮流量计测量的系统误差。为了提高液氧流量测量的准确性，必须提高分节式液面计稳态流量测量装置的精度，提高精度的前提是对 50 m³ 的低温容器进行计量标定。因此，研究低温容器的

计量标定方法非常必要的。

1 低温容器容积标定方法

1.1 容积标定方法对比

液氧容器形状为立式绝热金属罐，容积标定的方法通常有围尺法、光学垂准线法、激光仪器法、全站仪法以及容量比较法。

围尺法是立式罐容积检测的基准方法，但一般不具备检测条件（需要搭高空脚手架），很少使用；光学垂准线法（也叫光学参比线法）精度较高，易于掌握，但仍然为人工作业，速度较慢；光学三角法采用两台仪器交会的原理，需要比较大的测量空间，不太实用；全站仪的方法具有测量速度快、适用范围广等特点，代表立式罐内测自动化的发展方向，但一般要求仰角不大于 30°，精度可满足一定要求，所以适用于大型容器的标定；激光仪器法测量精度较高，同时测量速度快，比较适用工程实际；容量比较法通过标定介质水，用高精度的标准量器量入或量出的方法，与被标定量器直接比较，经温度修正求其容积，用于不规则的容器的标定，该方法测量准确度较高。目前常用立式金属罐容积标定方法，对比表如表 1 所示。

表 1 常用立式金属罐容积标定方法对比表
Tab. 1 Common calibration methods of metal vertical storage tank

方法名称	围尺法	光学垂准线法	激光仪器法	光学三角法	全站仪法	容量比较法
检定精度	高	较高	较高	高	较高	高
费用	高	低	高	高	高	高
劳动强度	高	低	低	低	低	较低
高空作业	有	有	没有	没有	没有	没有
测量作业	外测	内测或外测	内测	内测或外测	内测	内测
测量速度	慢	快	特别快	慢	特别快	慢
其他	基准方法	易于掌握	适用于大型容器	适用于大型容器	适用各种罐型	适用于大型容器

由于容量比较法不需要人员进入罐内测量,避免搭建脚手架高空作业,劳动强度低,安全度好,测量准确度高;同时由于120 t液氧煤油发动机试验过程的液氧容器容积为50 m³,属于中型容器,比较适合容量比较法。为保证测量精度,采用容量比较法对其容积进行测量。

1.2 液氧容器容积标定原理

容量比较法使用介质为水,标定原理将容积

加满水,然后进入一个标准容器。记录每次标准容器的容积及环境温度,同时记录下降液位及水温。然后由放液通道放出标准容器的水,并进行下一轮加注,直至50 m³液氧容器放液结束。通过对比参照高度(内高)平均值修正,根据水、容器、标准量器的体胀系数,获取液氧容器液位高度 x 时20℃容积值,获得整个容器的容积表,完成液氧容器容积标定,其标定原理如图1所示。

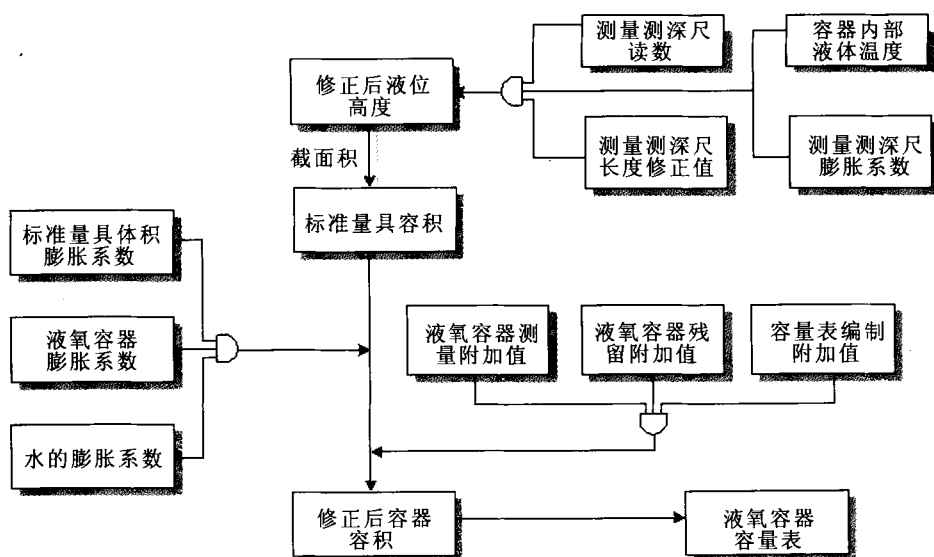


图1 液氧容器容积标定原理图

Fig. 1 Schematic diagram of capacity calibration for liquid oxygen storage tank

修正后的参照高度(内高)平均值计算:

$$H_x = (C_x + \Delta C) [1 + \alpha_c (t - 20)] [1 + \alpha_R (20 - t_R)] \quad (1)$$

式中: H_x 为修正后的参照高度(内高)平均值, mm; C_x 为参照高度(内高)测量测深尺读数, mm; ΔC 为测深尺检定长度修正值, mm; α_c 为测深尺线膨胀系数 ($12 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$); t 为罐内液体温度, $^\circ\text{C}$; α_R 为罐壁的线膨胀系数 ($16.7 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$); t_R 为罐壁温度, $^\circ\text{C}$ 。

根据修正后的参照高度(内高)平均值,通过截面积,可以获得液氧容器液位高度 x 时20℃容积值:

$$V_x = V_B [1 + \beta_1 (t_1 - 20) + \beta_2 (t_2 - 20) + \beta_w (t_2 - t_1)] + V_h + V_d + V_c \quad (2)$$

式中: V_x 为液氧容器液位高度 x 时20℃容积

值, L; V_B 为标准量器20℃时的容积值, L; β_1 为标准量器的体胀系数, $^\circ\text{C}$; β_2 为液氧容器的体胀系数, $^\circ\text{C}$; β_w 为水的体胀系数 (一般取 $0.0002/^\circ\text{C}$); V_h 为液氧容器液位测量带来的附加容积值, L; V_d 为液氧容器残留量带来的附加容积值, L; V_c 为线性内插法编制容量表带来的附加容积值, L。

为获得液氧容器液位高度 x 时20℃容积值,除了需要测量标准量器的体积,还需要测量下降液位、水温等,因此低温容器容积所需标定仪器设备见表2。

1.3 液氧容器容积标定过程

液氧容器容积标定首先将容积加满水,然后由堵盖处放出,经过流量计(水表)确定流出量,进入一个1 m³的标准容器,其精度达 $2.5 \times$

表 2 低温容器容积标定仪器设备

设备名称	测量范围	测量准确度	备注
测深钢卷尺	0~25 m	±0.5 mm	罐内液位测量
数字温度计	0~100 ℃	±0.1 ℃	罐内液体温度测量
标准金属量器	1 000 L	$2.5\times 10^{-4}(k=2)$	罐内注入或排出液体量
水准仪	0.8~30 m	3"	罐高差测量
超声波测厚仪	1~100 mm	±0.1 mm	罐壁厚度测量
辅助工具	卡尺、钢卷尺	/	附件测量

$10^{-4} (k=2)$ ，每次流出量为 1 m^3 ，通过 DN50 手动阀门进行控制；当流入标准容器透明玻璃管时，关闭 DN50 手动阀门改由旁路 DN50 手动阀门进行控制；当标准容器注满时，进行记录标注；然后由放液通道放出，并进行下一轮加注，直至 50 m^3 液氧容器放液结束，其液氧容器容积标定系统图如图 2 所示。

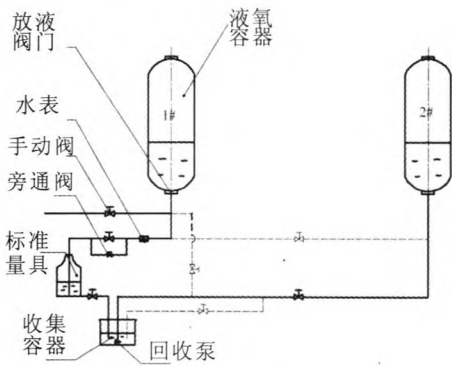


图 2 液氧容器容积标定系统图

Fig. 2 Construction diagram of capacity calibration system for liquid oxygen storage tank

液氧容器压力 p 为

$$p=\rho gh=1\,000\times 10\times 9.8=0.098\text{ MPa}$$

$$Q=A\sqrt{\frac{2p}{\rho}}=0.002\times\sqrt{\frac{2\times 98\,000}{1\,000}}=0.028\text{ m}^3/\text{s}\quad (3)$$

液氧容器放满时间为

$$s=Q_z/Q=1/0.028=35\text{ s}\quad (4)$$

根据标准容器放满时间为 1 min 。放液需要管道停滞 2 min 以及放液停滞 2 min ，一次放液

需要大约 10 min 。液氧容器容积标定需要设备见表 2。

具体过程如下：

1) 液氧容器的出口安装放液接头，将标准量器安置在液氧容器的下方平台，进行固定与调平。

2) 通过加注软管将液氧容器放液接头连接到标准量器的注液口，用排液软管从标准量器的排液口引入收集容器，连接处不得有渗漏现象。

3) 通过消防水管将槽车与液氧容器的上液口相连，并由槽车通过由上至下进行加注，直至溢出容器直管段。

4) 由液氧容器放液到标准量器计量颈上沿充分润湿其内表面，然后打开放液阀门，以最大排放量方式排放到标准量器中，在滴流状态下等待 2 min ，关闭放液阀门，移开连接软管，使标准量器处于检定前的等待状态。

5) 将液氧储罐放液阀门开启至最大，将标定介质排空，在滴流状态下等待 2 min ，关闭放液阀门，使其处于待标定状态。

6) 将标定介质注入至标准量器标称容量刻线位置，若介质注入过多，应使用上部微调阀门进行调整；记录标准量器的标称容积值，测取并记录标准量器中检定介质的温度 t_1 。

7) 打开标准量器的放液阀门，将介质排入到排水沟，在滴流状态下等待 2 min 后，关闭放液阀门。

8) 用测深钢卷尺测量并记录液氧容器中标定

介质液位高度 h_i 。

9) 用温度计测量液氧容器内的标定介质温度 t_{2i} 。

10) 重复执行(5)~(9), 直至放液到液氧容器内规定液位高度, 即低于直管段。

11) 以全开启的状态将剩余容器的介质排出。

12) 两次标定换算的液位高度差不得大于 1 mm, 取其平均值编制容量表。

2 低温容器容积标定数据修正

由于液氧容器的容积还受压力、温度的影响, 为此需要对液氧容器标定进行温度与压力修正, 获取准确真实值。

2.1 温度修正

将容器常温容积 (容量表已修正至 20 °C 状态下) 修正到低温容积的修正公式如下^[8-9]:

$$V = V_{20} [1 - (2\alpha_1 + \alpha_2)(t - 20)] \quad (5)$$

式中: V 为低温状态下的容积, m^3 ; V_{20} 为容量表所示 20 °C 时常压下的容积, m^3 ; α_1 为容器材料的线性膨胀系数; α_2 为液面计材料的线膨胀系数; t 为液体平均温度, °C。

2.2 压力修正

静压力容积修正指: 由于罐内液体重量所引起的容积变化, 液体充到 h 高度时静压力容量修正值 ΔV_p 为

$$\Delta V_p = \frac{\pi g (\rho - 0.0011) d^3}{E \delta} \times 10^{-5} h^2 \quad (6)$$

式中: h 为编制容量表的高度, m; g 为重力加速度, $g = 9.80665 \text{ m/s}^2$; ρ 为罐内液体平均密度与水密度的差值, $\rho = \rho_{\text{液氧}} \text{ g/cm}^3 - 1.0 \text{ g/cm}^3$; d 为罐的平均内直径, mm; E 为圈板钢材的弹性模量, $E = 2.06 \times 10^7 \text{ N/cm}^2$; δ 为罐壁的平均板厚, mm, 且

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n h_i \delta_i}{\sum_{i=1}^n h_i}$$

其中 h_i 为第 i 圈板的内高, mm; δ_i 为第 i 圈板平均板厚, mm。

液氧容器在试验或放液工作过程中, 不仅有

液氧的静压力, 还有氮气增压产生的增压压力。增压压力也会引起容器截面积发生变化, 容器截面积增加量按下式计算:

$$\Delta S = \frac{2\pi R^3}{E \cdot \delta} p_0 + \frac{2\pi R^3}{E \cdot \delta} (\rho - 1.28) \cdot g \cdot H \times 10^{-6} \quad (7)$$

式中: ΔS 为压力和液氧静液柱压力引起的容器截面积增加量, m^2 ; R 为半径 (取内径的 1/2), m; E 为容器材料的弹性模量, 1Cr18Ni9Ti 在 -183 °C 时, $E = 210.61 \text{ GPa}$; δ 为容器圆柱段壁厚, m; p_0 为容器的增压压力, MPa; ρ 为液氧密度, kg/dm^3 , 取 1 138 kg/dm^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 , 取 9.81 m/s^2 ; H 为某一层面距液面顶部的距离, m。

容器液面高为 H 时, 容器的容积增量为

$$\begin{aligned} \Delta V &= \int_0^H \Delta S_i dH = \int_0^H \frac{2\pi R^3 P_0 + 2\pi R^3 (\rho - 1.28) g \cdot H \times 10^{-6}}{E \cdot \delta} dH \\ &= \frac{2\pi R^3}{E \cdot \delta} P_0 \cdot H + \frac{\pi R^3 (\rho - 1.28) g \cdot H^2 \times 10^{-6}}{E \cdot \delta} \end{aligned} \quad (8)$$

根据测量结果计算其每毫米高度的容量, 并采用线性内插的方法, 从基准平面开始, 连续编制出每个测量平面每毫米高度所对应标准条件 (常压、20 °C) 下的容量表。根据中国科学计量院绘制的容量表, 得到液氧容器高度 7 430 mm 对应总容积为 46 589.3 L, 扩展不确定度为 0.05% ($k=2$)。

3 事后容器处理

由于液氧容器标定采用标定介质为水, 其加注过程以及放液过程很可能带入多余物进入容器, 待标定结束, 很可能附着与内壁处, 从而对试验系统造成多余物。为防止标定过程水中含有杂质与油渍, 对试验系统造成隐患, 需要对液氧容器内部进行全面处理。

液氧容器内部多余物处理过程如下:

1) 将 50 m^3 容器内部标定用水放空, 并打开上下容器法兰, 通空 1~2 h。采用增压氮气对其吹除 1~2 h, 进行内部空气置换, 进行 3 次。

2) 在下出口通风应接鼓风机情况下, 工作人员佩戴防护面具 (防毒面具), 采用 P-A-2 型

防护过滤器, 穿戴橡胶手套、防护服、脚套, 由软梯进入容器内部, 采用木板在加强筋上铺设。

3) 工作人员对其内部表面进行 T3 涂抹, 去除表面油渍; 然后进行喷雾机对其拐角与死角进行 T3 喷洒。

4) 工作人员对其内部表面进行 T3 涂抹, 去除表面油渍; 然后进行喷雾机对其拐角与死角进行 T3 喷洒, 工作人员离开容器内部。

5) 由于不锈钢长期浸泡于液氧中, 容易发生电化学反应, 引起不锈钢生锈, 锈渣容易带入发动机系统, 形成多余物, 引起试验隐患。对于容器的锈点, 采用酸洗膏与 T3 清洗液除锈, 并进行氮气吹除, 保证容器洁净, 液氧容器筋板锈渍去除对比如图 4 所示。

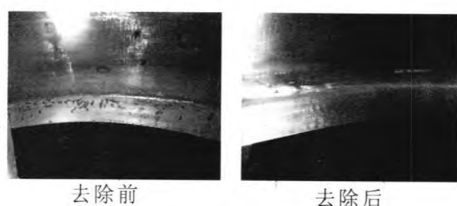


图 4 液氧容器筋板锈渍去除对比

Fig. 4 Comparison of pictures for clearing effect of rust stain on rib plate in liquid oxygen storage tank

6) 加注液氧, 并将液氧回收到液氧库房, 拆除过滤器, 观察是否有冰块。如果有冰块, 进行清除。

7) 绝热性检查: 通过查看容器外表面是否有冒汗和结霜现象或者日蒸发率突然变大的情况进行判断, 若有以上现象则需要对夹层冷态真空度进行测量。内罐及管道泄露检查, 检查管道, 阀门, 法兰是否存在泄漏; 仪器仪表检查: 检查压力表、液位计、安全阀、防爆装置是否过期、失效、破坏, 并根据检查结果采取相应措施。

8) 安装上下法兰, 进行管道恢复工作。

根据《GJB2990-97 液氧安全应用准则》用干净的白纸或者白布擦拭容器内表面, 无油渍和污迹即为合格; 清理结束后, 其白布擦拭容器内表面, 满足要求。同时参考标准《QJ3042-1998 液氧存储运输要求》和《液氧安全技术说明书》

通过对清理容器进行放液, 检查液氧中露点、碳氢化合物含量以及油脂含量等指标, 若满足试车指标要求, 则多余物清理; 经化验, 其加注液氧指标如表 3 所示。

表 3 液氧杂质控制范围

Tab. 3 Control scope of liquid oxygen impurity

项目	技术指标 (GJB2040-94)	化验结果
氧含量	≥ 99.5	99.7
露点 $^{\circ}\text{C}$ (水含量)	≤ -53.3	-64.5
二氧化碳含量 mL/L	≤ 6	3
油含量 mg/L	≤ 0.3	0.2
颗粒物含量 mg/L	≤ 1.0	0.02

根据其液氧杂质控制范围, 满足其试验要求, 其多余物得到有效控制。完成处理后进行了 120 吨液氧/煤油发动机双机并联试车, 无多余物产生, 满足试验要求。

4 结论

根据液氧煤油发动机地面试验特点, 通过低温容器容积标定方法比较分析, 基于容量比较法提出了低温容器容积标定方法, 构建了容积标定系统, 并在此基础上进行温度与密度数据修正, 获取准确低温容器容积。标定后对容器内表面进行清洗, 避免多余物进入试验系统。通过对液氧容器容积的准确标定, 提高了液氧流量的测量准确性, 为准确评估液氧煤油发动机性能奠定了基础。

参考文献:

- [1] 郭霄峰. 发动机试验[M]. 北京: 宇航出版社, 1990.
- [2] 宋文绪. 自动检测技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [3] 刘常满. 温度测量与仪表维修问答[M]. 北京: 中国计量出版社, 2004.
- [4] 秦永涛, 曹文庆, 王朝, 郑晓萍. 基于脆性理论的火箭发

- 动机试验过程低温气动阀可靠性研究[C]. 中国航天可靠性学术交流会议论文集, 北京, 2013.
- [5] LIU Kun, ZHANG Yulin. A study on versatile simulation of liquid propellant rocket engine systems transients: AIAA 2000-3771[R]. Reston CA: AIAA, 2000.
- [6] 刘国球. 液体火箭发动机原理[M]. 北京: 宇航出版社, 1993.
- [7] 秦永涛, 曹文庆, 李党科, 等. 低温气动阀的人机环境可靠性评估方法[J]. 火箭推进, 2014, 40(2): 82-89.
- QIN Yongtao, CAO Wenqing, LI Dangke, et al. The man-machine-environment reliability evaluation method of cryogenic pneumatic valve[J]. Journal of rocket propulsion, 2014, 40(2): 82-89.
- [8] 赵万明. 液氧密度测量技术研究[J]. 火箭推进, 2007, 33(4): 56-62.
- ZHAO Wanming. Research on liquid oxygen density measurement[J]. Journal of rocket propulsion, 2007, 33(4): 56-62.
- [9] 李建军. 涡轮流量计在火箭发动机试验中的应用[J]. 火箭推进, 2007, 33(3): 52-55.
- LI Jianjun. The application of turbo-flowmeter in the test of rocket engine[J]. Journal of rocket propulsion, 2007, 33(3): 52-55.

(编辑: 陈红霞)

(上接第 85 页)

5 结论

超声波椭圆振动切削中刀具以椭圆形的振动轨迹对工件进行切削加工, 理论分析、计算机仿真得到的极限切削宽度和切削稳定极限图以及弱刚度零件加工试验结果均表明超声波椭圆振动切削有更高的加工稳定性, 可以用于弱刚度零件精密加工。

参考文献:

- [1] SHAMOTO E, MORIEAKI T. Study on elliptical vibration cutting[J]. Annuals of CIPR, 1994, 43(1): 35-38.
- [2] MORIEAKI T. SHAMOTO E. Ultrasonic elliptical vibration cutting[J]. Annuals of CIPR, 1995 (44): 31-34.
- [3] 马春翔, 胡德金. 超声波椭圆振动切削技术[J]. 机械工程学报, 2003, 39(12): 67-70.
- [4] SHAMOTO E, MAC X, MORIWAKI T. Elliptical vibration cutting[J]. Journal of the japanese society for precision engineering, 1999, 65(4): 586-591.
- [5] MA C X, SHAMOTO E, MORIWAKI T. Study of machine accuracy in ultrasonic elliptical vibration cutting[J]. International journal of machine tool and manufacture, 2004, (44): 1305-1310.
- [6] 于劲, 王立江. 分离型超声波振动切削动力学模型及其稳定性分析[J]. 振动工程学报, 1991, 4(2): 27-33.
- [7] 王晓军. 车削加工系统稳定性极限预测的研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2005.
- [8] 杨叔子, 杨克冲, 吴波. 机械工程控制基础 [M]. 4 版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001.
- [9] 张军, 唐文彦, 强锡富. 再生型切削颤振稳定性极限的图解法[J]. 中国机械工程, 2000, 11(5): 496-498.

(编辑: 陈红霞)