

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.05.014

IV 型储氢瓶塑料内胆滚塑旋转工艺的选择

温原¹, 唐宇航¹, 王修磊², 谢鹏程²

(1. 浙江瑞堂塑料科技有限公司, 浙江宁波 315300; 2. 北京化工大学机电工程学院, 北京 100029)

摘要: 塑料内胆尺寸精度对 IV 型储氢瓶的服役性能有重要的影响, 壁厚均匀度不佳会直接导致内胆变形、直线度变小, 进而导致缠绕工艺不良, 储氢瓶开裂、耐压能力下降。而滚塑作为一种重要的内胆成型方法, 在控制内胆壁厚均匀性方面具有挑战, 其核心原因是滚塑过程工艺对内胆尺寸精度的影响机理缺失, 业内较少研究工艺因素对壁厚的影响细节。采用 ROTOSIM 软件, 分析了 8 种常见滚塑工艺对塑料内胆的壁厚均匀性的影响。结果表明, 生产典型尺寸的储氢瓶内胆时, 壁厚均匀度随旋转速度的加快而变好, 但太快会导致粉末抛物流影响壁厚均匀度; 旋转速比应避免为整数或半整数以防止粉末轨迹重复, 摇摆机或旋转机 L 臂内胆竖放模式要优于旋转机 L 臂内胆平放模式和旋转机直臂模式; 更重要的是, 旋转中心是否与内胆轴心重合对壁厚均匀度影响较小, 为一机多模生产方式提供了理论依据。作为本研究优化方案, 当摇摆机旋转速度为 1 r/min, 摇摆速度为 6.5 次/min 时, 塑料内胆的壁厚变异系数为 9%, 为研究范围内的最小值。

关键词: 滚塑成型; 壁厚均匀度; 储氢瓶塑料内胆; 旋转工艺; 速比

中图分类号: TQ325.1, TK91 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)05-0095-06

Selection of rotational molding process for plastic inner liner of type IV hydrogen storage bottles

WEN Yuan¹, TANG Yuhang¹, WANG Xiulei², XIE Pengcheng²

(1. Zhejiang Rutoun Plastic Technology Co., Ltd, Ningbo 315300, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract : The dimensional precision of plastic liners has a significant influence on the service performance of type IV hydrogen storage tanks. Poor uniformity of wall thickness can directly lead to deformation and reduced straightness of the inner liner, resulting in poor winding process, cracking of hydrogen storage bottles, and decreased pressure resistance. Rotational molding, as an important liner molding method, has challenges in controlling the wall thickness uniformity of the liner, due to the missing mechanism of the effect of rotational molding process on the dimensional accuracy of the liner. There is relatively little research in the industry on the impact of process factors on wall thickness in detail. In this work, the effect of eight common rotational molding processes on the wall thickness uniformity type was analyzed by using ROTOSIM software. The results show that when producing typical-sized hydrogen storage tank liners, the uniformity of wall thickness improves with the increase of rotation speed, but too fast can cause powder scattering to affect the uniformity of wall thickness. The rotation speed ratio should be avoided as an integer or half integer to prevent duplicate powder trajectories. The use of the swing machine or rotary machine L-arm liner vertical placement mode is superior to the rotary machine L-arm liner horizontal placement mode and the rotary machine straight-arm mode. More importantly, whether the rotation center coincides with the inner liner axis has a relatively small impact on the uniformity of wall thickness, providing a theoretical basis for the one machine multi mode production method. As an optimization plan for this study, when the rotation speed of the rocking machine is 1 r/min and the rocking speed is 6.5 times/min, the coefficient of variation of the plastic inner liner wall thickness is 9%, which is the minimum value within the research range.

Keywords : rotational molding ; uniformity of wall thickness ; plastic inner liner of hydrogen storage bottle ; rotating technology ; speed ratio

通信作者: 温原, 高级工程师, 主要研究方向为滚塑功能粉末

收稿日期: 2024-03-03

引用格式: 温原, 唐宇航, 王修磊, 等. IV 型储氢瓶塑料内胆滚塑旋转工艺的选择[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(5):95-100.

WEN Yuan, TANG Yuhang, WANG Xiulei, et al. Selection of rotational molding process for plastic inner liner of type IV hydrogen storage bottles[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(5):95-100.

IV型储氢瓶由塑料内胆由碳纤维复合材料全缠绕层和保护层组成。其中,塑料内胆是IV型储氢瓶区别于Ⅲ型储氢瓶的重要组成部分,其承担了储存氢气、防止泄漏的重要作用,并用于提高储氢瓶轻量化效果和抗疲劳性能。IV型高压储氢瓶是促进氢能发展的重要纽带之一^[1-3]。相比于其他几种类型的高压储氢瓶,IV型高压储氢瓶因使用塑料内胆而具有轻量化和抗氢脆优势;然而,塑料内胆的壁厚均匀性控制具有较大的挑战性,尤其在滚塑成型中。目前,滚塑成型作为一种重要的储氢瓶塑料内胆成型方法,已被列入团体标准T/CATSI 02007-2020和国家标准GB/T 42612-2023中;并且滚塑成型也在国内研发IV型储氢瓶的科研和应用单位中占据主体地位^[4-6]。

滚塑成型是一种可一次性制造出带嵌件无缝内胆的工艺,其工艺特点是将塑料粉末加入模具中,加热模具并使之低速连续旋转,模具内粉末在重力和热量的作用下逐渐涂布、黏附于模具内表面,形成所需要的形状,经冷却得到塑料制品。对于IV型储氢瓶内胆而言,良好的壁厚均匀度,是减缓内胆变形、避免内胆在高压下形成应力集中点、增强内胆和纤维层结合强度和维持内胆整体性能的均一性等的保证条件^[7],也是滚塑加工中首先需要解决的问题^[8]。

在滚塑运动工艺控制方面,优化内胆的壁厚均匀度主要依靠滚塑设备的臂型选择、模具在设备上的位置选择和调节旋转速比^[9]。通常情况下,设备的旋转中心和模具的形心(内胆模具的轴心)重合,有利于优化内胆成型质量;此外,对于IV型储氢瓶内胆这样的圆柱型滚塑制品,使用8:1的速比(水平放置)或1:5的速比(垂直放置)被大多数文献所推荐^[10-12](速比为臂速除以盘速和臂速的差值)。然而,在实际工艺工况下,滚塑内胆的设备选择和运动工艺设定并没有被明确指导,尤其是针对客车、货车等储氢瓶用量占比较大的中型内胆成型。因此,优化内胆滚塑成型工艺对发展储氢瓶意义重大,但通过实验反复优化的成本极大。

ROTOSIM是业内通用的一款滚塑模拟仿真软件,其可以通过改变模型的设定条件,分析滚塑过程中制品壁厚分布情况^[13-15]。笔者使用ROTOSIM软件对典型的IV型储氢瓶滚塑内胆进行了模拟分析,排除了造成内胆壁厚不均的工艺参数,确认了

达到最佳壁厚均匀度的旋转工艺条件,对指导内胆滚塑工艺优化具有重要意义。

1 模拟参数设置

1.1 内胆模型尺寸

直径430 mm,长度2 000 mm,预设平均壁厚5.89 mm。

1.2 材料参数

高密度聚乙烯来源于本公司生产的产品,密度 0.945 g/cm^3 ,熔体流动速率 4 g/10 min ,平均粒径 0.25 mm 。

1.3 旋转类型和内胆位置

设计了常见的8种滚塑方式(见表1)。在旋转机中,设定臂(主轴)转速为 4 r/min ,调节盘(副轴)转速为自变量;在摇摆机中,设定模具绕轴心转速为 4 r/min ,摇摆角度 $\pm 45^\circ$,极限位置停留时间 0 s ,摇摆速度为自变量。

1.4 表征方法

按照设定参数在ROTOSIM软件中进行滚塑模拟,模拟结束后从软件中导出壁厚分布图,以壁厚的标准偏差作为壁厚均匀度的表征。

2 结果和讨论

2.1 盘速或摇摆速度对壁厚均匀度的影响

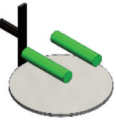
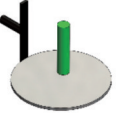
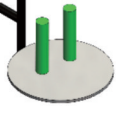
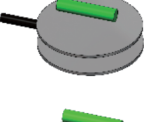
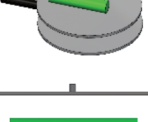
图1~图4描述了LH-C,ZH-C,YH-C和LP-C四种不同滚塑方式下转盘转速(盘速)对壁厚均匀度的影响,其中LP-C型盘速影响的是内胆绕轴心的径向速度,其他三种影响的是内胆绕轴心的轴向速度。

如图1~图4所示,盘速或摇摆速度对壁厚均匀度的影响明显有以下规律:

(1) 曲线整体情况反映出,壁厚标准偏差随着盘速或摇摆速度的增加而变小,表明内胆壁厚更加均匀。尤其是,当速比小于1:2后(臂速 4 r/min ,盘速 12 r/min),壁厚标准偏差进入较为平缓的低值区。此时,成型原料在单位时间内相对模具的轴向总路径长度 $[(430 \times 3.14 + 2 \times 2\ 000) \times 12 \approx 64\ 200\text{ mm}]$ 与径向总路径长度 $(430 \times 3.14 \times 4 \approx 5\ 400\text{ mm})$ 之比为11.8,满足杜邦第一原则^[11],壁厚均匀性提高。对比显然的,LP-C模型相对其他3种模型,总体壁厚标准偏差分布中并没有体现出明显的趋势分布。

(2) 此外,LH-C、ZH-C模型中,盘速超过 24 r/min 后,曲线波动变得更加明显,表明转速对壁厚均匀性的影响控制变大;而YH-C模型中,摇摆速度大

表1 设备选型和模具位置
Tab. 1 Equipment selection and mold location

Test code	Equipment type	Description	Diagram
LH-C	Rotating Machine -L Arm	Inner liner is placed flat, with the center of rotation overlapping with the center of the inner liner's shape.	
LH-P	Rotating Machine -L Arm	Inner liner is placed flat, and the center of rotation does not coincide with the center of the inner liner.	
LP-C	Rotating Machine -L Arm	Inner liner is placed vertically, with the rotation center overlapping with the inner liner centroid.	
LP-P	Rotating Machine -L Arm	Inner liner is placed vertically, and the rotation center does not coincide with the inner liner centroid.	
ZH-C	Rotating machine -straight arm	Inner liner is placed flat, and the center of rotation of the disc coincides with the center of the inner liner shape.	
ZH-P	Rotating machine -straight arm	Inner liner is placed flat, and the center of rotation of the disc does not coincide with the center of the inner liner.	
YH-C	Rocking machine	Inner liner is placed flat, and the center of rotation and swing coincide with the center of the inner liner's shape.	
YH-P	Rocking machine	Inner liner is placed flat, and the rotation center does not coincide with the inner liner centroid, while the swing center coincides with the inner liner centroid.	

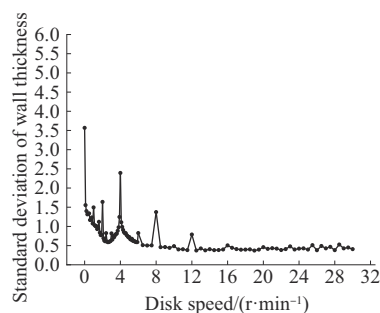


图1 LH-C 盘转速对壁厚标准偏差的影响

Fig. 1 Influence of LH-C disk speed on the standard deviation of wall thickness

于 24 r/min 后,壁厚标准偏差明显增大。这些都反映出制造内胆时壁厚均匀性会变差,其主要原因是速度过大之后,粉体物料在模具内受重力影响而运动的占比变小,离心力开始起重要作用。此时,粉体的运动也从在模具中滑动变成滑动与抛物流的

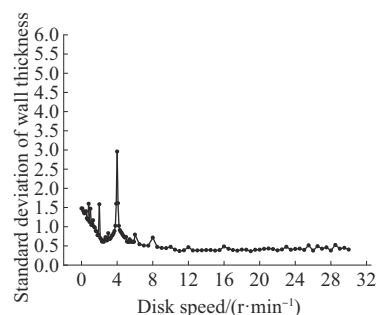


图2 ZH-C 盘转速对壁厚标准偏差的影响

Fig. 2 Influence of ZH-C disk speed on the standard deviation of wall thickness

复合运动,部分物料甚至可能会滞留在某一局部位置,导致粉体均匀着模的概率减小,生产的内胆壁厚均匀性变差。

(3) 从曲线局部情况分析,当盘速或摇摆速度为臂速的整数倍时,壁厚标准偏差明显产生极大值,

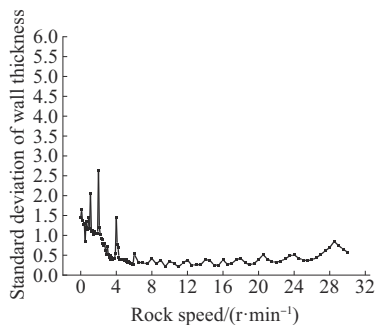


图3 YH-C摇摆速度对壁厚标准偏差的影响

Fig. 3 Influence of YH-C rock speed on the standard deviation of wall thickness

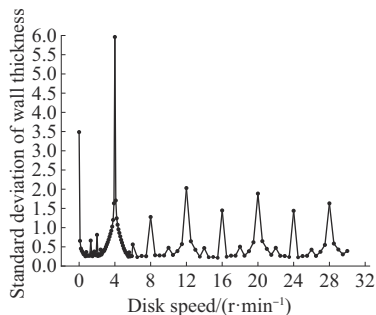


图4 LP-C盘转速对壁厚标准偏差的影响

Fig. 4 Influence of LP-C disk speed on the standard deviation of wall thickness

壁厚均匀性变差。这是因为滚塑过程为垂直双轴旋转,其内部塑料粉末运动轨迹遵循李萨如模型^[16],当盘速或摇摆速度为臂速的整数倍时,粉末运动轨迹不可避免地在每个周期开始/结束时重合,导致模具内壁面不同区域间粉末流经次数差异明显,物料堆积情况也变得两极化。当盘速或摇摆速度为臂速的非整数倍时,粉末运动轨迹的循环周期变长,即粉末运动轨迹在一定时间内的重合几率变小(物料在重力作用下的运动更加复杂和紊乱),不同区域间粉末流经次数差异减小,提高了壁厚均匀性。

综上所述,滚塑制品的加工工艺,在设计转速时,应考虑适当提高转速比,并避免转速比呈现整数倍。

2.2 模具放置位置对壁厚均匀度的影响

图5描述了4种不同滚塑方式下,模具位置对壁厚标准偏差的影响情况。如图5所示,在同一装备中,两种不同的模具放置方式产生的标准偏差影响呈现正线性相关的关系,并且四种装备中的正线性相关斜率基本一致,表明模具轴心的放置位置是否偏离旋转中心,对壁厚的分布均匀性几乎没有影响,并且不同的装备也都表明了相同的情况。为了更加准确地对比分析结果分布,通过最小二乘法对

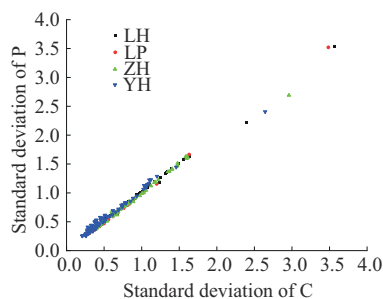


图5 模具不同位置对壁厚均匀度的影响

Fig. 5 Influence of different positions of molds on the uniformity of wall thickness

结果值进行线性拟合,建立关系式(1):

$$\delta_p = a\delta_c \quad (1)$$

式中: a 为比例系数,该系数越接近1,表示两种放置模式下的壁厚标准偏差越接近; δ_c 为模具形心和滚塑机旋转中心重合时的壁厚标准偏差; δ_p 为模具形心和滚塑机旋转中心不重合时的壁厚标准偏差;同时计算了拟合的相关系数 R^2 , R^2 越接近1,表示拟合的效果越好。计算结果见表2。

表2 不同模具位置下壁厚均匀度的统计数据

Tab. 2 Statistical data on wall thickness uniformity at different mold positions

Statistical indicators	Rolling molding method			
	LH	LP	ZH	YH
a	1.005 47	1.001 29	0.991 96	1.045 56
R^2	0.999 00	0.999 22	0.998 56	0.991 67

表2结果支持上述观点,表明模具的放置位置是否偏离旋转中心,对壁厚均匀度几乎无影响,这一结论和常规认识相左。结合李萨如模型可知,旋转中心的位置改变,仅仅改变了粉末运动轨迹在模具内表面的相对位置,没有改变粉末运动轨迹的形貌本身,在滚塑着模周期内,模具内壁各个位置的粉末流经次数保持不变,因此壁厚均匀度不会发生变化。结果表明,在设计模具安装位置时,可以考虑多个模具同时安装生产以提高效率。

2.3 滚塑方式对壁厚均匀度的影响

图6描述了不同滚塑方式(滚塑设备)对内胆壁厚最小偏差的影响情况。如图6所示,LH-C和ZH-C方式下,壁厚的最小标准偏差均出现在盘速为19 r/min时,标准偏差值基本接近。LP-C和YH-C方式下,壁厚的最小标准偏差均优于LH-C和ZH-C方式,其中YH-C方式在摇摆速度为11次/min时具有最小的标准偏差0.207。次优选为LP-C方式,其在盘速为15.5 r/min时有次优的最小标准偏差0.214。

从结果可知,LH-C和LP-C方式下的最优盘速对应的速比约为1:3.8和1:2.9,这和目前文献的推荐值不符^[9-10]。同时,从图4中可知,当选择与LP-C模型相同/类似的模具摆放关系时,内胆的壁厚均匀性对盘速的敏感性很高,稳定生产的盘速区间较为狭窄。因此,建议在生产内胆产品时,选择摇摆机生产更为合适。

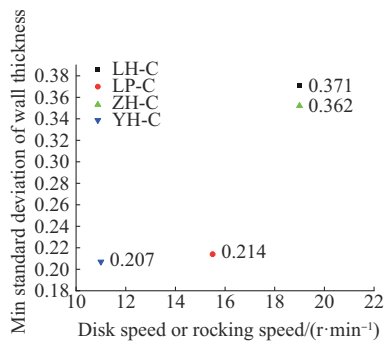


图6 不同滚塑方式对壁厚最小偏差的影响

Fig. 6 Influence of different rolling molding methods on the minimum deviation of wall thickness

2.4 YH-C方式下臂速对壁厚均匀度的影响

在YH-C模型条件下,分析了旋转速度对壁厚标准偏差的影响。模拟参数为旋转速度范围(0.5~10) r/min按0.5 r/min步进,摇摆速度范围(0~30)次/min按0.1次/min步进,选择相同旋转速度下最小壁厚标准偏差为结果,如图7所示。在模具绕轴心旋转速度为1 r/min,摇摆速度为6.5次/min时,壁厚标准偏差有最小值0.178,根据正态分布 3σ 原则^[17],此时储氢瓶的壁厚公差可控制在 $5.89\text{ mm}\pm 0.53\text{ mm}$ (公差为平均值正负三倍标准偏差),壁厚的变异系数9%(变异系数为标准偏差除以平均值),壁厚均匀性较好。

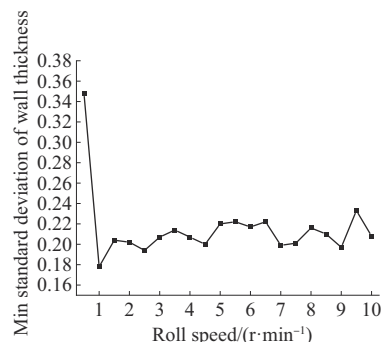


图7 不同旋转速度下的壁厚最小标准偏差

Fig. 7 Min standard deviation of wall thickness at different rotational speed

3 结论

应用ROTOSIM软件,分析了典型尺寸的储氢瓶内胆滚塑过程中的设备状态、模具安装方式、转速等对壁厚均匀性的影响关系。结果显示,使用摇摆式滚塑机生产内胆,有利于提高内胆壁厚均匀性;并且,安装模具时,模具轴心是否与设备旋转中心重合对内胆壁厚均匀性控制不会造成影响;而在设置转速时,应当考虑适当增大盘转速或摇摆转速,并且避免盘转速或摇摆转速与主轴转速的比值呈现整数倍。作为一种优化方案,使用摇摆机,并且旋转速度设置为1 r/min,摇摆速度设置为6.5次/min,可以使内胆壁厚更加均匀,此时储氢瓶内胆的壁厚公差可控制在 $5.89\text{ mm}\pm 0.53\text{ mm}$,壁厚的变异系数不大于9%。

参考文献

- [1] 郑津洋,马凯,叶盛,等.我国氢能高压储运设备发展现状与挑战[J].压力容器,2022,39(3):1-8.
ZHENG Jinyang, MA Kai, YE Sheng, et al. Development status and challenges of equipment for storage and transportation of high-pressure gaseous hydrogen in China[J]. Pressure Vessel Technology, 2022, 39(3):1-8.
- [2] ABE J O, POPOOLA A P I, AJENIFUJA E, et al. Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(29): 15 072-15 086.
- [3] 仲蕊.车载IV型储氢瓶替代进程加快[N].中国能源报,2023-03-13(13).
ZHONG Rui. The replacement process of IV type hydrogen storage cylinders in vehicles is accelerating[N]. China Energy News, March 13, 2023(13).
- [4] 王修磊,杨卫民,谢鹏程.高压大容量IV型储氢瓶内胆滚塑成型工艺及装备[J].压力容器,2022,39(12):1-9.
WANG Xiulei, YANG Weimin, XIE Pengcheng. Rolling forming process and equipment for high-pressure and large capacity type IV hydrogen storage bottle inner liner[J]. Pressure Vessel, 2022, 39(12):1-9.
- [5] 柯华,查志伟,郑斌.IV型储氢瓶用复合材料及制备工艺[J].纤维复合材料,2022,39(1):15-21.
KE Hua, CHA Zhiwei, ZHENG Yu. Composite materials and preparation process for type IV hydrogen storage bottles[J]. Fiber Composite Materials, 2022, 39(1):15-21.
- [6] 温岭旭日滚塑科技有限公司. DT新能源现场直击[EB/OL]. (2023-3-31). http://www.wlxuri.com/Industry_News/20230331.html.
Wenling Rising Sun Rotomolding Co., Ltd. DT new energy onsite direct attack[EB/OL]. (2023-3-31). http://www.wlxuri.com/Industry_News/20230331.html.

- try_News/20230331.html.
- [7] JULIE P A, ERIC L A, JEAN-CLAUDE G A, et al. Determination of key parameters responsible for polymeric liner collapse in hyperbaric type IV hydrogen storage vessels -Science direct[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(33):16 386–16 399.
- [8] 王政, 杨荆泉, 陈世谦. 塑料旋转模塑制造技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003:110–112.
- WANG Zheng, YANG Jingquan, CHEN Shiqian. Manufacturing technology of plastic rotational molding[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003:110–112.
- [9] JACHOWICZ T. Effect of mold rotation speed on the cast wall thickness during rotomoulding[J]. Przemysl Chemiczny, 2013, 92(7):1 296–1 299.
- [10] 马东卫. 塑料浇铸成型与旋转成型[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005:96.
- MA Dongwei. Plastic casting and rotary forming[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005:96.
- [11] NUGENT P. Rotational moulding practical guide[M]. Glen Ellyn, Illinois USA: Association of Rotational Molders, 2001:487–488.
- [12] KEARNS M P, CRAWFORD R J. Practical Guide to Rotational Moulding[M]. United Kingdom: Smithers Rapra, 2022:73–73.
- [13] BREGAR B. Speed is key to wall thickness[OL]. (2010-05-17). [https://www. plasticsnews. com/article/20100517/NEWS/305179960/speed-is-key-to-wall-thickness](https://www.plasticsnews.com/article/20100517/NEWS/305179960/speed-is-key-to-wall-thickness)Plastics News.
- [14] VINK B D. Poland hosts rotational moulding industry summit[J]. European Plastics News, 2011, 38(1):27–28.
- [15] CRAWFORD R J, NUGENT P, XIN W. Prediction of optimum process conditions for rotomolded products[J]. International Polymer Processing Journal of the Polymer Processing Society, 2013, 6(1):56–60.
- [16] 赵淳. 李萨如图形与它的电子示波器显示图形[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2009:1–4.
- ZHAO Bo. Lissajous graphics and its electronic oscilloscope display graphics[M]. Xi'an: Shanxi Science and Technology Press, 2009:1–4.
- [17] 盛骤. 概率论与数理统计[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2006: 98–103.
- SHENG Zhou. Probability Theory and Mathematical Statistics [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2006:98–103.