

doi: 10. 11823/j. issn. 1674 - 5795. 2015. 06. 06

精密水槽收缩段流场模拟与收缩曲线选型评估

王星, 沈雪, 田于逵

(中国船舶科学研究中心 水动力学重点实验室, 江苏 无锡 214082)

摘 要: 通过求解 RANS 方程, 数值模拟了精密水槽收缩段的流场特性。针对两种不同出口尺寸不同收缩比的收缩段, 选取了三种不同的收缩曲线来进行选型评估。根据壁面是否分离、逆压梯度变化缓和程度、出口速度均匀度, 来判断不同收缩曲线的优劣。研究表明: 对于出口尺寸为 250 mm × 20 mm、收缩比为 30 的收缩段, 双三次收缩曲线是最优的; 对于出口尺寸为 250 mm × 10 mm、收缩比为 60 的收缩段, 维氏收缩曲线是最优的。本次数值模拟计算的工作可为精密水槽收缩段优化设计工作提供借鉴。

关键词: 收缩曲线; 数值模拟; 流动分离; 逆压梯度; 速度均匀性

中图分类号: TB943

文献标识码: A

文章编号: 1674 - 5795 (2015) 06 - 0024 - 05

Numerical Simulation on the Flow Field in Contraction Section of Precision Water Flume and Evaluation about the Contraction Curves

WANG Xing, SHEN Xue, TIAN Yukui

(National Key Laboratory of Science and Technology on Hydrodynamics, China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China)

Abstract: In this paper, the flow field in the contraction section of precision water flume was numerically simulated by solving RANS equations. Three different contraction curves were selected for two different contraction sections with different outlet sizes and different contraction ratios. The three contraction curves were judged by three criteria: the flow was separated or not; the adverse pressure gradient changed moderately or not; the flow velocity distribution uniformity. The research shows that the bicubic contraction curve is the best for the contraction section with the outlet size of 250 mm × 20 mm; for the contraction section with the export size of 250 mm × 10 mm, the Witozinsky curve is the best. This work can be used as reference for designing the contraction section with optimization.

Key words: contraction curve; numerical simulation; flow separation; adverse pressure gradient; velocity uniformity

0 引言

精密水槽主要用于各种微型传感器的标定, 因此, 对试验段的流场品质要求相当严格。随着流场水品质愈来愈受重视, 收缩段的优化设计也备受关注。收缩段的作用是均匀加速水流, 使其达到试验段需要的流速。收缩段性能的优劣主要取决于两个因素: 一是收缩比; 二是收缩曲线。在收缩比确定的情况下, 需要选择最优的收缩曲线。在设计收缩段时, 应主要考虑以下几点:

水流在沿收缩段加速时, 洞壁上不出现分离;

收缩段出口界面的水流均匀稳定;

收缩段逆压梯度不宜过强, 能够均匀加速水流。

空气动力研究基地的刘政崇等^[1]、中航工业空气

动力研究院的张连河等^[2]、上海大学的李强等^[3]以及华南理工大学的王帅等^[4]在相关研究中都详细地介绍了不同的收缩曲线对风洞收缩段内流场的影响。北京航空航天大学吴宗成等^[5]以及清华大学的周刚等^[6]则研究了不同收缩曲线对水洞收缩段流场的影响。

本文在以往研究工作的基础上, 采用 RANS 方法, 对于不同收缩曲线对收缩段流场的影响进行了数值模拟和分析, 评估不同收缩曲线的性能, 建立了一个评价收缩曲线优劣的流程, 为后续的收缩段优化选型提供技术支撑。

1 数值计算方法

1.1 控制方程与湍流模型

不可压缩流体连续性方程与 RANS 方程分别为

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

收稿日期: 2015 - 09 - 19

作者简介: 王星 (1987 -), 男, 工程师, 主要从事计算流体方面的研究。

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \rho F_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i u_j} \right) \quad (2)$$

对于收缩段流场的模拟采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型, 其湍动能 k 和耗散率 ε 方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \\ &+ C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$, $G_k = \rho \overline{u_i u_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$; 常数 $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $C_\mu = 0.09$ 。

1.2 边界条件

设定 L 为收缩段长。

速度入口: 收缩段向前延伸 $1L$, 设定来流速度的大小与方向, $\vec{V}_{in} = \vec{V}_0$;

压力出口: 收缩段向后延伸 $2L$, 设定相对于参考压力点的流体静压值;

壁面: 收缩段内表面, 设定无滑移条件, $u = v = w = 0$ 。

2 计算结果与分析

2.1 计算模型与网格划分

为优化设计两个不同收缩比的收缩段, 因此, 整个数值模拟过程可分为两部分, 采用两个计算模型并划分网格, 分别为针对入口尺寸 $500 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 、出口尺寸 $250 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的收缩比为 30 的收缩段 (M1) 以及入口尺寸 $500 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 、出口尺寸 $250 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的收缩比为 60 的收缩段 (M2)。

本文主要对比三种不同的收缩曲线, 以期得到最适宜现有水槽需求的曲线。三种收缩曲线分别为维氏曲线、双三次曲线和五次曲线。图 1 显示了三种不同的收缩曲线线型。表 1 给出了三种不同曲线的表达式。

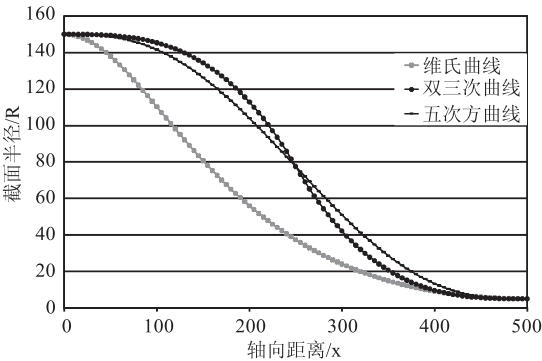


图 1 三种不同收缩曲线

表 1 三种收缩曲线的表达式

	$R = \frac{R_2}{\sqrt{1 - \left[1 - \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2 \right] \left(\frac{1 - \frac{3x^2}{a^2}}{1 + \frac{x^2}{a^2}} \right)^3}}$
维氏曲线	
双三次曲线	$\frac{R - R_2}{R_1 - R_2} = \begin{cases} 1 - \frac{1}{x_m^2} (x/L)^3, & (x/L) \leq x_m \\ \frac{1}{1 - x_m^2} [1 - (x/L)^3], & (x/L) > x_m \end{cases}$
五次方曲线	$\frac{R - R_2}{R_1 - R_2} = 1 - 10 (x/L)^3 + 15 (x/L)^4 - 6 (x/L)^5$

其中: R 为轴向距离为 x 处的截面半径; R_1 为收缩段入口截面半径; R_2 为收缩段出口截面半径; 收缩比 $C = (R_1/R_2)^2$; $a = \sqrt{3}L$, L 为收缩段长度; x_m 为两曲线前后连接点。当收缩比较大 (>4) 时, 维氏曲线需要通过移轴的方式, 来获得较好的水流品质。

划分网格时, 考虑到收缩段内流场对上下游的影响, 计算时前后各带了一段等截面段, 收缩段入口向前延伸一倍收缩段长, 出口向后延伸两倍收缩段长。计算中采用结构化网格, 壁面第一层网格间距根据 y^+ 确定 (y^+ 保持在 $30 \sim 60$)。图 2 给出了收缩段表面网格划分示意图 (以维氏曲线为例)。

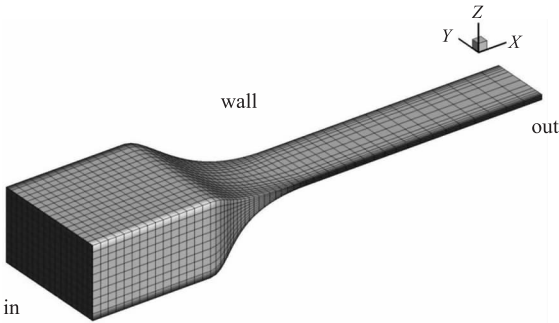


图 2 表面网格划分示意图

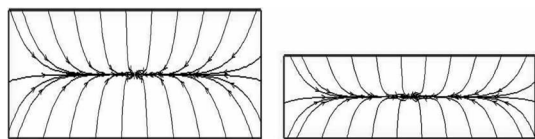
2.2 不同收缩曲线的比较分析

收缩段的作用是均匀加速水流, 使其达到试验段需要的流速。在判别收缩段的优劣时, 主要考虑以下三个方面: 水流在沿收缩段加速时, 洞壁上不出现分离; 收缩段内逆压梯度变化较为缓和; 收缩段出口界面的水流均匀、平行、稳定。以下分别从这三个方面来比较不同收缩曲线的优劣。

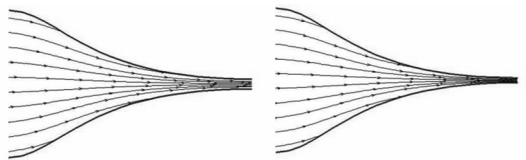
2.2.1 判据 1: 壁面是否出现流动分离

由于所用的收缩曲线均为光顺的曲线, 且来流速度较小, 所以, 在不同来流速度下, 不同收缩曲线的

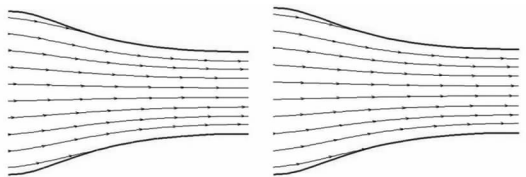
不同压缩比的收缩段均未出现分离, 且流线图基本一致。下面分别给出了来流速度为 0.08 m/s 下维氏收缩曲线的不同收缩比收缩段的流线图。



(a) 距入口处 300mm 截面流线图



(b) 收缩段内 $y=0$ 截面流线图



(c) 收缩段内 $z=0$ 截面流线图

图 3 维氏曲线不同收缩段不同截面的流线图

(左侧收缩比为 30; 右侧收缩比为 60)

2.2.2 判据 2: 逆压梯度变化缓和

不同来流速度、不同收缩比下的收缩段中心线的压力与压力梯度, 数值会有不同, 但是变化规律是一致的。受篇幅所限, 本文以收缩比为 30、来流速度为 0.02 m/s 的算例来说明。图 4 显示了不同收缩曲线收缩段 M1 的中心线上压力的变化规律。图 5 分别显示了不同收缩曲线收缩段 M2 的中心线上压力梯度的变化规律。其中, M1 表示收缩比为 30 的收缩段, M2 表示收缩比为 60 的收缩段, W 代表维氏曲线, 3 代表双三次曲线, 5 代表五次方曲线, 0.05 表示来流速度为 0.02 m/s 。

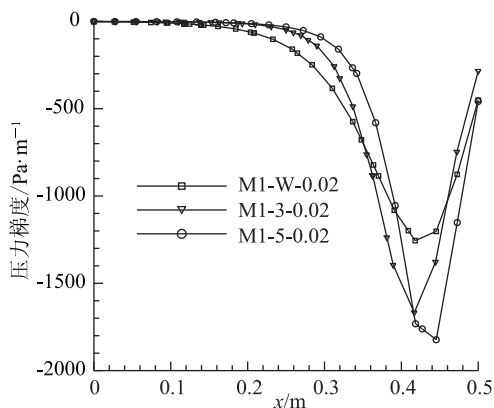
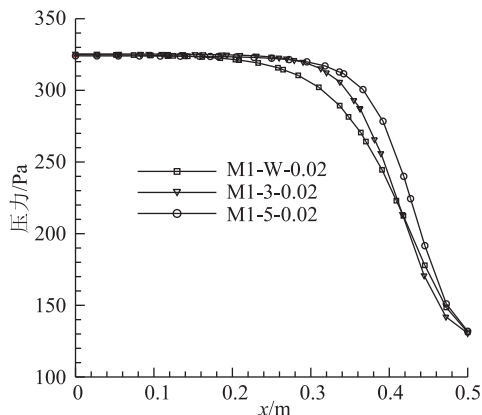


图 4 不同曲线收缩段 M1 的中心线压力与压力梯度变化规律

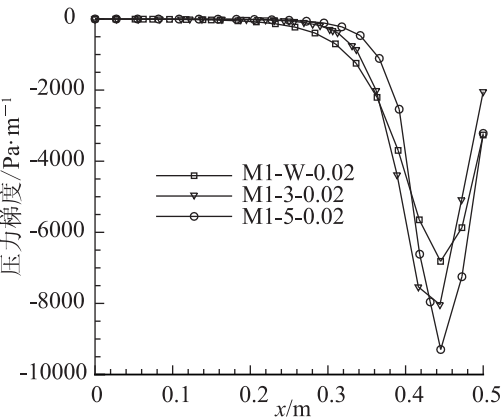
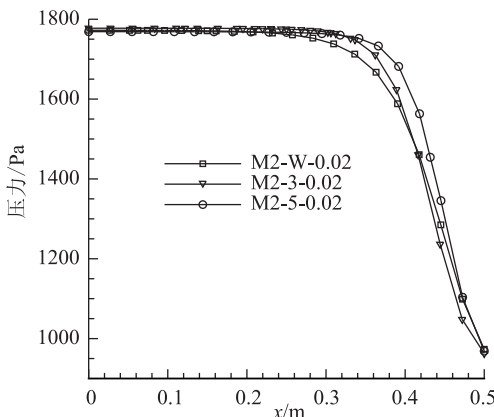


图 5 不同曲线收缩段 M2 的中心线压力与压力梯度变化规律

从图中可以看出: 收缩段前半段压力保持不变, 逆压梯度接近于 0; 后半段压力开始减小, 逆压梯度急速增大; 维氏曲线的压力与逆压梯度变化较为缓和, 五次方曲线的压力与逆压梯度变化最为剧烈, 双三次曲线处于两者之间。这也与图 1 中收缩曲线后半段 ($300 \sim 500 \text{ mm}$) 的收缩规律一致。其中, 维氏曲线收缩最为缓和, 而五次方曲线收缩较为剧烈, 双三次曲线则处于两者之间。

2.2.2 判据 3: 出口截面水流的均匀性与平行性

不同来流速度下收缩段出口截面的速度分布规律基

本一致。由于壁面的影响，会有边界层，而在中心大部分区域则为一均匀的速度场。图 6 显示了来流速度为 0.08 m/s 时不同收缩段 M1 的出口截面轴向速度分布曲线与轴向速度云图。由图可知：不同形状的收缩段出口处轴向速度分布的差异很小，变化趋势一致，所以轴向速度云图只显示维氏曲线的；只是在幅值上略有差异，在出口中间很大一部分的轴向速度是均匀的。需要进一步通过定量的手段，来判别哪根收缩曲线更优。

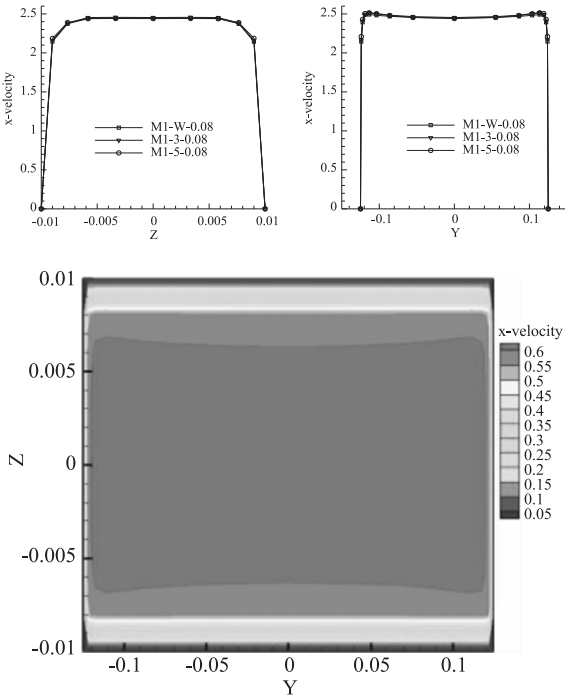


图 6 收缩段 M1 出口截面中心线轴向速度分布
(左：y=0；右：z=0)与轴向速度云图

相对标准偏差 CV 表征相对变异量的度量，是一个无量纲值，可以用来比较均值显著不同的总体离散性，也可以比较流场均匀性：

$$CV = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2 / \bar{V}} \tag{5}$$

通过比较不同工况下的 CV 值来评判界面上流场的均匀度，CV 值越小，流场均匀度越高。

表 2、3 分别显示了不同来流速度下不同收缩段 M1、M2 的相对标准偏差 CV 值。

收缩比为 30	CV		
	$v = 0.02\text{m/s}$	$v = 0.05\text{m/s}$	$v = 0.08\text{m/s}$
维氏曲线	0.6321	0.6252	0.6271
双三次曲线	0.6239	0.6250	0.6266
五次方曲线	0.6235	0.6243	0.6256

收缩比为 60	CV		
	$v = 0.02 \text{ m/s}$	$v = 0.05 \text{ m/s}$	$v = 0.08 \text{ m/s}$
维氏曲线	0.6252	0.6263	0.6291
双三次曲线	0.6255	0.6268	0.6292
五次方曲线	0.6247	0.6258	0.6281

由表可得：对于收缩比为 30 的收缩段，五次方曲线的 CV 值最小，其速度均匀性最好；维氏曲线的 CV 值最大，均匀性最差；剩下的曲线处于中间，其值相差很小；对于收缩比为 60 的收缩段，五次方曲线的 CV 值最小，其速度均匀性最好；双三次曲线的 CV 值最大，均匀性最差；剩下的曲线处于中间。

2.3 选型结果

表 4 显示了不同收缩曲线的选择判据结果。由表可知：对于出口尺寸为 250 mm × 20 mm 的收缩段 M1，双三次曲线是相对较优的选择；对于出口尺寸为 250 mm × 10 mm 的收缩段 M2，维氏曲线是较优的选择。

表 4 不同收缩曲线选择判据与结果		
	M1	M2
判据 1	四条曲线均未分离	四条曲线均未分离
判据 2	维氏曲线 > 双三次曲线 > 五次方曲线	维氏曲线 > 双三次曲线 > 五次方曲线
判据 3	五次曲线 > 双三次曲线 > 维氏曲线	五次曲线 > 维氏曲线 > 双三次曲线
选择结果	双三次曲线较优	维氏曲线较优

3 结论

本文通过求解 RANS 方程，数值模拟了精密水槽收缩段的流场特性，分析了不同收缩曲线不同收缩比下的收缩段流场的差别。针对两种不同出口尺寸不同收缩比的收缩段，选取了三种不同的收缩曲线进行选型，分别为维氏收缩曲线、双三次收缩曲线以及五次方收缩曲线。在数值模拟结果的基础上，根据三个判据：壁面是否分离、逆压梯度变化缓和、出口速度均匀度，来判断不同收缩曲线的优劣。研究结果表明，对于出口尺寸为 250 mm × 20 mm 的收缩段 M1，双三次收缩曲线是最优的；对于出口尺寸为 250 mm × 10 mm 的收缩段 M2，维氏收缩曲线是较优的选择。

参 考 文 献

- [1] 刘政崇. 高低速风洞气动与结构设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [2] 张连河, 范洁川. 三元收缩段优化设计研究[J]. 空气动力学学报, 2003, 21(4): 417~423.
- [3] 李强, 丁珏, 翁培奋. 上海大学低湍流度低速风洞及气动设计[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2007, 13(2): 203~207.

- [4] 王帅, 刘小康, 陆龙生. 直流式低速风洞收缩段收缩曲线的仿真分析[J]. 机床与液压, 2012, 40(11): 100~104.
- [5] 吴宗成, 陈晏清, 万曦. 水洞收缩段流场的数值模拟及优选[J]. 北京航空航天大学学报, 1998, 24(3): 315~318.
- [6] 周刚, 汪家道, 陈皓生, 陈大融. 小型高速水洞收缩段的优化设计[J]. 船舶力学, 2009, 13(4): 513~521.
- [7] 李坦, 勒世平, 黄素逸, 刘伟. 流场速度分布均匀性评价指标比较与应用研究[J]. 热力发电, 2013, 42(11): 17~20.

(上接第 9 页)

展方向之一, 但是, 有关的计量校准, 其本意包括如何确定和复现该环境条件下的标准量值及其溯源性, 以及如何确定该环境下的被计量量值的溯源性。并不是简单地将仪器设备和标准放到该环境下直接进行计量校准, 那样将导致计量难度、成本、复杂性过大而无法实现。这需要的是理论、方法、理念、流程的全面更新和系统研究。其中, 首先也包括各种单一环境条件变化情况下的仪器特性研究, 以及复合环境变化的仿真研究。

关于数据域计量校准的理论、方法和技术研究将是计量测试理论与技术的另外一个重要发展方向。一定需要寻找到定量评价和定量溯源的物理量与物理参数, 而不仅仅是通过与否地计量评价数据域仪器设备。仅仅用通过与否来表征数据域仪器设备的计量结果不足以展现其溯源性和量值传递结果, 也无法评定其不确定度。

本文所述内容, 仅为一家之言, 不一定完全合适, 仅希望对同行具有参考和借鉴作用。

参 考 文 献

- [1] 李希明, 李文军, 顾喆涵, 等. 在中低温条件下环境辐射对光谱发射率测量的影响[J]. 计量学报, 2014, 35(1): 10~12.
- [2] 陈少龙, 屠征音. 关于 CFM56-5B 发动机高压转子振动监控的若干思考[J]. 航空维修与工程, 2014(3): 49~51.
- [3] 葛炼伟, 郭韵, 丁有元, 等. 核电厂高压加热器传热管涡流检测及缺陷产生机理分析[J]. 无损检测, 2014, 36(1): 74~76.
- [4] 严兵, 李建斌, 孙红胜, 等. 动态高温温场测量研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(4): 1312~1315.
- [5] 梁雅军, 孙曾玉, 高越, 等. 高温环境下物体外形轮廓动态测量与评价方法探索[J]. 宇航计测技术, 2014, 34(2):

1~5.

- [6] 李亚晋, 赵俭, 王建军. 几种典型燃烧室高温气流温度传感器的设计[J]. 计测技术, 2014, 34(3): 36~39.
- [7] 刘砚涛, 王莉敏, 吴兵, 等. 低温静力试验热应变/热应力修正方法研究[J]. 强度与环境, 2014, 41(2): 34~38.
- [8] 刘向阳, 苏超, 贺凯, 等. 高温高压水比定压热容的实验测量[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(5): 844~847.
- [9] 蔡廷栋, 高光珍, 王敏锐, 等. 高温高压下基于 TDLAS 的二氧化碳浓度测量方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(7): 1769~1773.
- [10] 史汝超, 张亚军, 徐胜利. 水下爆炸气泡膨胀过程的 RG-FM 和高精度格式数据模拟[J]. 爆炸与冲击, 2014, 34(4): 439~443.
- [11] 李园, 郝晓剑, 周汉昌. 蓝宝石光纤高温传感器抗冲击性能的测试研究[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(2): 330~332.
- [12] 曾育伟, 李旭, 刘胜, 等. 真空高低温环境滤波减速器性能测试试验台设计[J]. 航空精密制造技术, 2013, 49(5): 13~16.
- [13] 张建斌, 赵琦. 低温压力传感器自动检定/校准装置设计[J]. 计量技术, 2013(5): 55~58.
- [14] 黄利君. 高低温交变湿热试验箱温场均匀度超差的原因[J]. 计量与测试技术, 2013, 40(9): 13~14.
- [15] 周亮, 邓联文, 肖鹏, 等. 材料微波反射率高温测量系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(6): 1431~1433.
- [16] 王振涛, 沈毅雄, 安继刚, 等. 一种测量高压气体中离子漂移速度的方法[J]. 原子能科学技术, 2013, 47(3): 476~480.
- [17] 蒋山平, 杨林华, 许杰, 等. 真空低温环境下卫星天线变形摄影测量技术[J]. 光学技术, 2013, 39(4): 313~317.
- [18] 胡立荣, 王东方, 兰玉岐. 低温压力传感器校准系统研制与应用[J]. 低温工程, 2013(4): 60~64.
- [19] 孙丰, 吴彬, 王喆, 等. 舰船水下爆炸冲击环境实用建模方法[J]. 舰船科学技术, 2014, 36(4): 22~26.