doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.046

气动真空发生器系统背压与抽吸性能关系分析*

郭钟华[1]　李小宁[1]　香川利春[2]

(1.南京理工大学机械工程学院,南京 210094;2.东京工业大学精密工学研究所,横滨 226-8503)

摘要:对气动系统中常用的真空发生器样机,采用有限体积法对其内部流场进行数值计算,分析了背压不同时内部压力分布和吸入流速改变情况。以此为基础,测量系统背压升高时吸入流量变化量,绘制了背压与吸入流量关系曲线,提出了通过判断系统背压防止逆流现象的方法。在真空发生器系统的设计和应用中,需要在理论计算的基础上,根据试验得出系统正常工作的背压范围,防止逆流现象,保证系统工作。

关键词:气动系统　真空发生器　背压　吸入流量

中图分类号:TH138　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2015)02-0312-04

Relationship between Back Pressure and Suction Ability of Pneumatic Ejector System

Guo Zhonghua[1]　Li Xiaoning[1]　Kagawa Toshiharu[2]

(1. *School of Mechanical Engineering*, *Nanjing University of Science and Technology*, *Nanjing* 210094, *China*

2. *Precision and Intelligence Laboratory*, *Tokyo Institute of Technology*, *Yokohama* 226-8503, *Japan*)

Abstract: Pneumatic ejector is an important vacuum source for agricultural automation. During the application of pneumatic ejector, the increasing back pressure may cause the suction ability to get worse intensely and the normal operation of the system will be greatly influenced. Regarding the ejectors used in pneumatic systems, the air flow was analyzed with finite volume method based on ejector inner mechanical structural parameters. The changes of pressure distribution and suction flow velocity were studied when the back pressure was variable. Based on the theoretical analysis, an experimental apparatus was set up and the suction mass flow rate was measured as the back pressure increased. The relationship between back pressure and suction mass flow rate was obtained. Judging from both of theoretical analysis and experimental result, the suction flow-rate characteristics remained unchanged at first and then got worse intensely as the back pressure increased. A method was proposed to prevent reverse flow by estimating back pressure, which was an effective complementary approach for ejector systematic design. When designing a pneumatic ejector system, the back pressure range where the ejector worked normally should be derived both from theoretical calculation and experimental test. Reverse flow could be prevented if the back pressure was controlled within normal range, thus the optimum performance would be achieved.

Key words: Pneumatic system　Pneumatic ejector　Back pressure　Suction flow rate

引言

真空发生设备已成为农业自动化领域中重要的真空压力源,由其构建的真空发生系统被应用于水果采摘、食品加工等多个领域[1-2]。在真空发生器系统中,排气侧易形成一定的背压,依据管路气体流

收稿日期:2014-11-07　修回日期:2014-12-08

*国家自然科学基金资助项目(51305202)和江苏省自然科学基金资助项目(BK20130764)

作者简介:郭钟华,讲师,主要从事气压传动技术研究,E-mail:gzh@njust.edu.cn

动原理[3]，排气管路几何尺寸不合理会造成较大的阻抗作用；而消音器等降低噪音的元件，其内部填充的多孔介质也可能造成系统压力的升高[4]。在生产实践中，随着背压升高，抽吸流量逐渐减小，直至发生逆向流动[5-10]。徐海涛等分析了蒸汽喷射真空泵中混合流体压力对喷射系数的影响，探讨了激波产生的位置和流体的流动状况[11]，杨燕勤等分析大气喷射器出口压力与引射流量的关系，预测了背压的轻微变化会引起喷射器性能的急剧下降[12]。结合气动系统的特点，需要在理论分析的基础上进行试验，为生产实践提供参考。笔者曾使用一维集中参数模型计算了吸入流量改变时真空发生器出口截面处的压力变化[13]，但因为无法给出气体速度分布、压力分布、能量损失等信息，且不能对超音速射流波系等真实气体效应进行分析[14]，难以揭示内在机理，存在较大局限性。为了分析出口截面处压力与吸入流量的关系，本文先从理论角度，采用有限体积法[15]对真空发生器流场进行数值模拟，再从试验角度，测试背压升高时的吸入流量。

1　理论分析

1.1　气动真空发生器内部结构

为了使分析结果具有一定的普遍性，选取 2 组共 4 种结构尺寸的真空发生器样机，其内部结构形状如图 1 所示。其中，s、n、t 分别对应 LAVAL 喷管入口、喉部以及出口截面，m、c、e 分别为混流管入口、等面积段和出口截面。空气从 $v-v$ 处吸入，从 $w-w$ 处排出。用 l_v 表示拉瓦尔喷管与混流管的距离。这 2 组真空发生器的喉部直径分别为 0.7 mm 和 1.5 mm。在同一组真空发生器中，混流管的内径亦存在差异，尺寸如表 1 所示。根据其尺寸的不同，对 4 种真空发生器样机进行了编号，分别为 A、B、C、D。

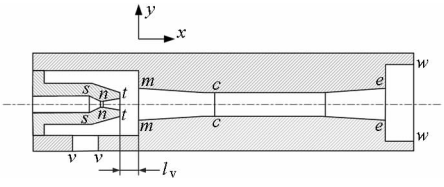

图 1　气动真空发生器内部结构示意图

Fig. 1　Inner structure of pneumatic ejector

表 1　真空发生器内部结构尺寸参数

Tab. 1　Inner structural parameters of pneumatic ejector

mm

类型	d_s	d_n	d_t	d_m	d_c	d_e	d_w	d_v	l_v
A 型	3.0	0.7	1.4	1.9	1.5	2.0	8.0	4.0	0.9
B 型	3.0	0.7	1.4	2.5	2.0	2.5	8.0	4.0	0.9
C 型	5.0	1.5	2.7	4.0	3.5	4.0	14.0	6.0	2.0
D 型	5.0	1.5	2.7	4.4	4.0	5.0	14.0	6.0	2.0

1.2　计算方法和网格划分

采用有限体积法离散控制方程建立真空发生器内部流动模型，网格划分如图 2 所示。由于吸入流速远小于供给流速，简化吸入流侧向入口为环向入口，对称轴为图 1 所示 x 轴方向。供气口和排气口均采用压力边界条件，假定壁面绝热。

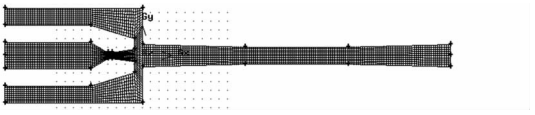

图 2　计算模型网格图

Fig. 2　Grids of computational model

1.3　背压改变时流动情况

供给流入口压力设为 0.6 MPa（本文均指绝对压力），温度 293 K；吸入流入口压力 101.3 kPa，温度 293 K；混合流出口压力由大气压开始逐点增加，并根据回流情况调整回流条件。为了考察混合流出口压力对吸入流速的影响，可以选取吸入流入口截面并观察吸入流速。针对 A ~ D 共 4 种类型真空发生器计算结果的共同规律，以 D 型真空发生器为例进行分析。图 3 反映了吸入流束入口截面各节点处沿 y 向的速度。位于内壁面处的节点速度为 0，其余节点速度如图 3 所示。

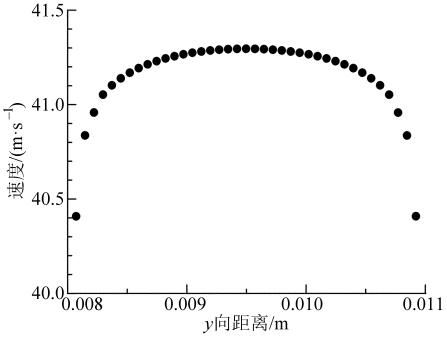

图 3　真空吸入口截面速度分布

Fig. 3　Velocity distribution at vacuum suction inlet

根据气动系统的特点，混合流束出口压力由 101.3 kPa 递增，数据点间隔 50 kPa。图 4 为混合流出口压力由 101.3 kPa 增至 300 kPa 时，混流管内压力沿 x 向分布情况。当混合流束出口压力为大气压 101.3 kPa 时，混合流膨胀充分，压力变化平缓。当混合流束出口压力为 101.3 ~ 146.3 kPa 时，吸入流束入口截面平均速度保持不变，如图 5 所示。这是由于此时激波的影响范围仅在混流管出口截面附近，对吸入流束尚不产生影响作用，吸入流量保持不变。混合流束出口压力大于 150 kPa，混合流束在混合流管出口位置出现激波。随着混合流束出口压力增大，激波影响区域扩大，并逐渐向混流管入口方向移动。

进一步提高混合流出口压力，激波影响范围扩大，混流管内压力明显升高，吸入流束的运动速度受

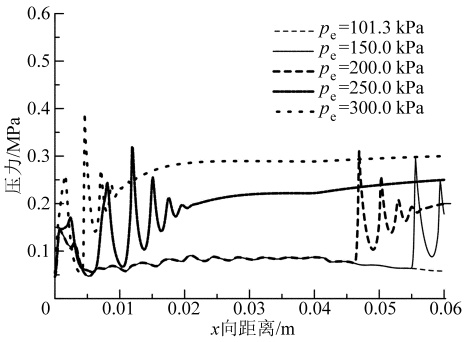

图 4 不同背压下轴向压力分布

Fig. 4 Axis pressure distribution at different back pressures

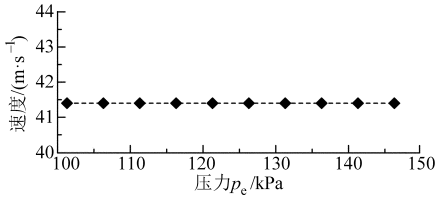

图 5 一定背压范围内真空发生器吸入口截面平均速度

Fig. 5 Average velocity at vacuum suction inlet in specific back pressures

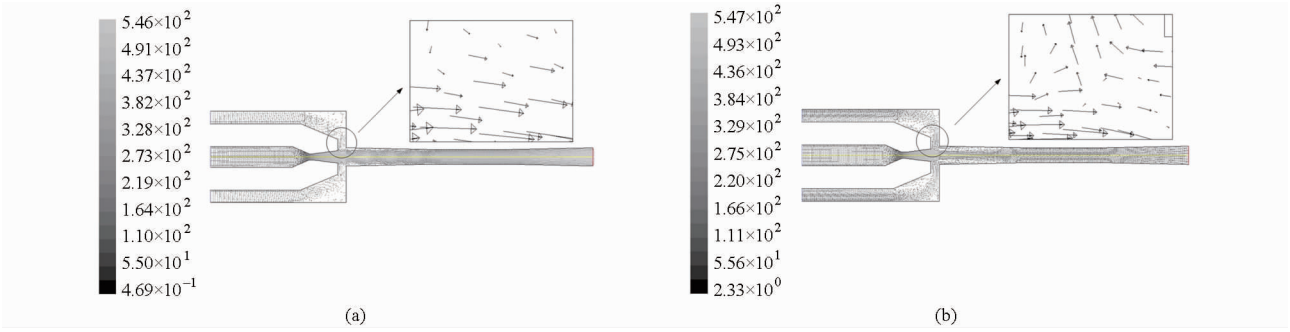

图 6 真空发生器空气流动方向示意图

Fig. 6 Air flow direction of pneumatic ejector

(a) p_s = 0.6 MPa, p_e = 101.3 kPa,正常抽吸速度矢量 (b) p_s = 0.6 MPa, p_e = 300 kPa,逆流速度矢量

当背压大于一定值时,吸入流束消失,发生逆向流动,记为 p_{eo}称作逆流背压。

在实际气动系统中,元件的工作压力和气体流动情况受回路节流条件以及气体状态参数的影响[16-18],为了验证理论分析结果并为应用提供参考,需要基于气动真空发生器回路进行测量和分析。试验装置如图 7 所示,待测真空发生器的进气口连接压缩气源,排气口连接节流回路,真空口连接流量计,环境温度 291 K,湿度 38%。流量测量采用 QFS-100型快速层流式流量计,实现低阻抗双方向的快速测量[19-20],供气压力为 0.6 MPa。通过调节排气侧节流阀的流通面积,可设定不同的背压。由于选定的流量传感器可以测定正、逆 2 个方向的流量,随着背压的升高,图 7 中流量计可知实时吸入流量的大小和方向,绘制出背压与吸入流量关系曲线。

2.2 试验结果

根据试验结果,图 8 表示真空发生器背压与吸入流量的关系。对试验的 4 种型号真空发生器样机,背压与吸入流量关系试验曲线具有共同的特征:背压小于临界值 p_e^* 时,吸入流量为一稳定值;背压大于 p_e^* 时,随着背压的升高,吸入流量逐渐减小。吸入流量为零时的背压称为逆流背压 p_{eo}。试验真空发生器的逆流背压分别介于 150 ~ 190 kPa 之间。

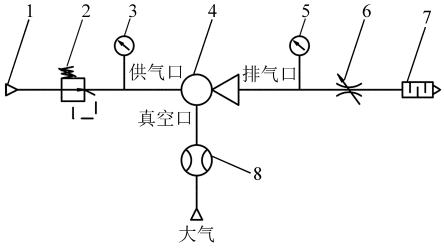

图 7 真空发生器系统背压与抽吸性能关系测试平台

Fig. 7 Experimental system on relation of back pressure and suction characteristics for ejector system

1. 气源 2. 调压阀 3. 供给侧压力传感器 4. 真空发生器 5. 排气侧压力传感器 6. 节流阀 7. 消音器 8. 快速层流式流量计

到较大的影响。当混合流束出口压力为 150 ~ 300 kPa,混流管内激波出现的位置位于入口截面 $m-m$与出口截面 $e-e$ 之间。随着激波出现位置从截面 $e-e$ 向截面 $m-m$ 移动,吸入流受影响程度逐步增强,吸入流速逐渐降低。图 6 给出混合流出口压力分别为 101.3 kPa 和 300 kPa 时,吸入流速度矢量图。图中可见,混合流出口压力为 101.3 kPa 时,速度方向由吸入截面到混流管;混合流出口压力增至 300 kPa,由于混流管内流场改变,混流管入口截面附近出现强激波,压力急剧升高,速度方向改变,空气不再进入混流管。

2 试验

2.1 试验回路

理论分析揭示出气动真空发生器系统背压与抽吸性能关系呈现以下特点:背压升高时,流量特性在较大的背压范围内保持不变,该范围内最大背压 p_e^* 称作临界背压;背压继续升高,抽吸性能急剧恶化,

由此可见，临界背压 p_e^* 和逆流背压 p_{eo} 是保证系统正常运行的重要参数，根据真空发生器内部流动状态及吸入流量大小而界定。为使真空发生器产生抽吸作用，系统背压必须小于逆流背压 p_{eo}。为得到最佳抽吸效果，系统背压必须小于临界背压 p_e^*。

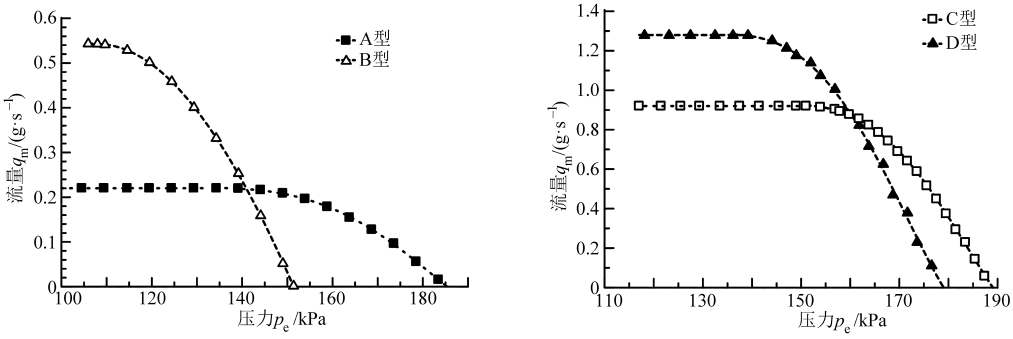

图 8　真空发生器系统排气侧压力不同时抽吸性能测试结果

Fig. 8　Measurement result on suction characteristics at different back pressures of ejector system

2.3　比较和讨论

图 9 为 D 型真空发生器有限体积法计算结果和试验结果比较。其中，吸入流量依据吸引流入口截面的平均速度计算，气体密度近似取为理想气体在标准状况下的密度，入口截面为圆形截面，几何尺寸取表 1 所示的测量值。由于背压的存在，排气流膨胀不充分，遇到排气回路节流元件速度增加。假设气体排出真空发生器后流动等熵，压力表处静压由当地速度和密度计算得出。由于实际气动系统中排气侧背压大于大气压，所以试验背压从 110 kPa 递增。比较计算和试验结果，试验吸入流量小于计算值，说明试验中摩擦损失大于理论计算中的取值。受真空发生器内部流道表面机械加工精度、流量计流阻等因素影响，以及实际系统中管道形状、节流元件构造以及环境参数等诸多因素制约，试验中临界背压 p_e^* 和逆流背压 P_{eo} 均小于计算结果，偏差量为 10% 左右。因此，在设计气动真空发生器系统时，需要在理论分析的基础上进行试验，通过判断真空发生器系统背压来防止逆流现象。

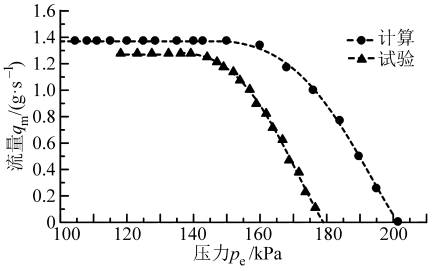

图 9　计算与试验结果的比较

Fig. 9　Comparison between computational and experimental results

3　结论

（1）临界背压 p_e^* 和逆流背压 p_{eo} 是保证系统正常运行的重要参数，根据真空发生器内部流动状态及吸入流量大小而确定。

（2）为使真空发生器产生抽吸作用，系统背压必须小于逆流背压 p_{eo}。为得到最佳抽吸效果，系统背压必须小于临界背压 p_e^*。因此，判定某型真空发生器在一定供给压力条件下 p_e^* 和 p_{eo} 对系统设计至关重要。

（3）设计真空发生器系统时，先通过理论模型预估临界背压和逆流背压并进行试验验证，才能有效防止逆流现象发生。

参　考　文　献

1　刘继展，李萍萍，倪齐. 番茄采摘机器人真空吸盘装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2010，41(10)：170－173.
Liu Jizhan，Li Pingping，Ni Qi. Design and test of the vacuum suction device for tomato harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2010，41(10)：170－173.（in Chinese）

2　王海鸥，胡志超，屠康，等. 真空冷却预处理在微波冻干胡萝卜片中的应用[J]. 农业工程学报，2011，27(7)：358－363.
Wang Haiou，Hu Zhichao，Tu Kang，et al. Application of vacuum-cooling pretreatment to microwave freeze drying of carrot slices [J]. Transactions of the CSAE，2011，27(7)：358－363.（in Chinese）

3　Chartonb S，Bletb V，Corrioua J P. A simplified model for real gas expansion between two reservoirs connected by a thin tube[J]. Chemical Engineering Science，1996，51(2)：295－308.

4　Belforte G，Raparelli T，Viktorov V，et al. Permeability and inertial coefficients of porous media for air bearing feeding systems [J]. ASME Journal of Tribology，2007，129(4)：705－711.

5　Zhu Yinhai，Cai Wenjian，Wen Changyun，et al. Shock circle model for ejector performance evaluation[J]. Energy Conversion and Management，2007，48(9)：2533－2541.

（下转第 350 页）

Cheng Qingfeng. Applied research on giant magnetostrictive actuator for jet-servo valve[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
10 卢全国, 陈定方, 钟毓宁, 等. 超磁致伸缩致动器热变形影响及温控研究[J]. 中国机械工程, 2007, 18(1): 16 - 19.
Lu Quanguo, Chen Dingfang, Zhong Yuning, et al. Research on thermal deformation and temperature control of giant magnetostrictive actuator[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(1): 16 - 19. (in Chinese)
11 Jin K, Kou Y, Zheng X J. A nonlinear magneto-thermo-elastic coupled hysteretic constitutive model for magnetostrictive alloys [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2012, 324(12): 1954 - 1961.
12 Xu H, Pei Y M, Fang D N, et al. An energy-based dynamic loss hysteresis model for giant magnetostrictive materials[J]. International Journal of Solids and Structures, 2013, 50(5): 672 - 679.
13 乌义杰, 徐杰. 超磁致伸缩执行器热误差补偿及抑制方法研究[J]. 工程设计学报, 2005, 12(4): 213 - 218.
Wu Yijie, Xu Jie. Research on methods of thermal error compensating and restraining in giant magnetostrictive actuator[J]. Journal of Engineering Design, 2005, 12(4): 213 - 218. (in Chinese)
14 夏春林, 丁凡, 陶国良. 超磁致伸缩电 - 机转换器热变形补偿试验研究[J]. 中国机械工程, 1999, 10(5): 563 - 566.
Xia Chunlin, Ding Fan, Tao Guoliang. Experimental research on thermal deformation control of giant magnetostrictive actuator [J]. China Mechanical Engineering, 1999, 10(5): 563 - 566. (in Chinese)
15 王传礼. 基于 GMM 转换器喷嘴挡板伺服阀的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
Wang Chuanli. Research on the nozzle flapper servovalve driven by giant magnetostrictive actuator[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. (in Chinese)
16 王博文, 曹淑瑛, 黄文美. 磁致伸缩材料与器件[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008.
17 Zhang C L, Mei D Q, Chen Z C. Active vibration isolation of a micro-manufacturing platform based on a neural network[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129(1 - 3): 634 - 639.
18 王经. 传热学与流体力学基础[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2007.
19 The MathWorks Inc. Partial differential equation toolbox for use with MATLAB[EB/OL]. [2014 - 02 - 27]. http://www.mathworks.cn/products/pde.
20 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.

(上接第 315 页)

6 Huang B J, Chang J M, Wang C P, et al. A 1-D analysis of ejector performance[J]. International Journal of Refrigeration, 1999, 22(5): 354 - 364.
7 Bouhanguel A, Desevaux P, Bailly Y, et al. Flow velocity investigation by particle image velocimetry in supersonic air ejector[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 232: 256 - 260.
8 Zou Jianjun, Zhou Jin, Lu Huiqiang, et al. Experimental investigation on starting process of supersonic single-stage air ejector [J]. Journal of Thermal Science, 2012, 21(4): 348 - 353.
9 Dvorak V, Kotek M. PIV measurement of constant area mixing in subsonic air ejector[C]// Proceedings of EFM11-Experimental Fluid Mechanics-2011, EPJ Web of Conference, 2012, 25:01011.
10 Chong Daotong, Hu Mengqi, Chen Weixiong. Experimental and numerical analysis of supersonic air ejector[J]. Applied Energy, 2014, 130: 679 - 684.
11 徐海涛,桑芝富,顾斌, 等. 蒸汽喷射真空泵性能的 CFD 模拟研究[J]. 高校化学工程学报,2005, 19(1): 22 - 29.
Xu Haitao, Sang Zhifu, Gu Bin, et al. Numerical simulation of the performance of steam-jet vacuum pump[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2005, 19(1): 22 - 29. (in Chinese)
12 杨燕勤,安志强,经树栋. 喷射器流场的数值模拟研究[J]. 西南民族大学学报:自然科学版,2006, 32(2): 316 - 323.
Yang Yanqin, An Zhiqiang, Jing Shudong. Study on numerical simulation of ejector flow field[J]. Journal of Southwest University for Nationalities:Natural Science Edition, 2006, 32(2): 316 - 323. (in Chinese)
13 Guo Zhonghua, Li Xiaoning, Li Xin, et al. Calculation on the critical back pressure of pneumatic ejector circuit[C]// Proceedings of 6th FPNI - PHD Symposium, 2010.
14 滕燕. 新型流量自调式节能真空发生器的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
15 朱荣生,龙云,林鹏,等. 螺旋轴流泵内部流场及压力脉动研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 103 - 109.
Zhu Rongsheng, Long Yun, Lin Peng, et al. Internal flow and pressure pulsation characteristics of screw axial-flow pumps[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 103 - 109. (in Chinese)
16 郭钟华,李小宁,黎鑫,等. 真空元件流阻对射流式真空发生器流量特性的影响研究[J]. 液压与气动, 2012, 36(3): 33 - 36.
Guo Zhonghua, Li Xiaoning, Li Xin, et al. Research on the influence of vacuum component resistance on the jet vacuum generator flow-rate characteristics[J]. Chinese Hydraulics and Pneumatics,2012, 36(3): 33 - 36. (in Chinese)
17 Han B, Fujita T, Kawashima K, et al. Influence of pressure condition change on the flow rate characteristics of pneumatic valve [J]. Journal of the Japan Hydraulics and Pneumatics Society, 2001, 32(6): 143 - 149.
18 Ishii Y, Kagawa T. Determination of flow rate characteristics of pneumatic solenoid valves using an isothermal chamber[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2004, 126(3): 273 - 279.
19 舩木, 川嶋, 香川. 高速応答性を有する気体用層流型流量計の特性解析[J]. 日本計測自動制御学会論文集, 2004, 40(10): 1008 - 1013.
20 Funaki T, Sengoku K, Kawashima K, et al. Dynamic calibration of laminar flow sensor for gases[C]// Proceedings of SICE Annual Conference, 2004.