

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.048

SCR系统高精度隔膜计量泵设计与试验

杨凯¹ 廖义德¹ 陈绪兵¹ 贾原杰¹ 卢尧君²

(1. 武汉工程大学机电工程学院, 武汉 430205; 2. 湖北天雄科技股份有限公司, 武汉 430223)

摘要: 针对往复泵因配流单向阀运动不稳定和关闭不及时导致的计量精度不高等问题,设计了一种采用泵控式计量的轻型商用车用高精度隔膜计量泵。阐述了隔膜计量泵的结构及其工作原理,并借助 AMESim 仿真平台对隔膜计量泵进行了动态模拟,分析了进口单向阀阀芯的响应特性。对进口单向阀的结构进行了优化,在满足阀口最小开度的前提下,通过机械限位限制阀芯的最大开启量 x_{\max} ,降低了阀芯关闭时间和尿素液回流对输出流量的影响。最后,搭建了隔膜计量泵性能试验系统。在额定喷射压力 2 MPa 时,测得隔膜计量泵单次排量为 0.09 mL;经结构优化后的隔膜计量泵计量精度由 $\pm 5\%$ 提高至 $\pm 3\%$;在 150 ~ 420 r/min 时,喷射尿素液流量可在 13.5 ~ 40 mL/min 范围内调节,且最大流量为 2.26 L/h,能够满足轻型商用车 SCR 系统在不同工况下的尿素液需求。

关键词: 隔膜计量泵; SCR 系统; 配流单向阀; 计量精度; AMESim 仿真

中图分类号: TH323; TK421⁺.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)07-0390-05

Design and Experiment on High Precision Diaphragm Metering Pump for SCR System

YANG Kai¹ LIAO Yide¹ CHEN Xubing¹ JIA Yuanjie¹ LU Yaojun²(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China
2. Hubei Tsung Technology Co., Ltd., Wuhan 430223, China)

Abstract: Aiming at the problem of low measuring accuracy of the reciprocating pump due to unstable movement and untimely closure of the distribution one-way valve, a high precision diaphragm metering pump (DMP) with pump control metering, which is used for light commercial vehicle, was designed and developed. The DMP realized the integration of urea solution transportation and metering, simplified the structure of SCR system and reduced the cost. The structure and working principle of the DMP were introduced. The DMP was driven by a stepping motor. By setting the speed n of the stepper motor, the flow rate q can be adjusted accurately. Dynamic simulation of the DMP was carried out by using AMESim, and the response characteristics of the inlet one-way valve core were analyzed. The structure of the inlet one-way valve was optimized. Under the premise of meeting the minimum opening of the valve port, the maximum opening x_{\max} of the valve core was limited by mechanical limit, which reduced the closing time of the valve core and the influence of urea solution reflux on the flow rate. Finally, the test system was built to test the performance of the DMP. When the rated injection pressure was 2 MPa, the single displacement of the DMP was measured to be 0.09 mL. The measuring accuracy of 4 ~ 6 DMP without structural optimization were reduced as the speed increase. The measuring accuracy were within $\pm 5\%$. However, the measuring accuracy of 1 ~ 3 DMP were within the range of $\pm 3\%$ after structural optimization. At 150 ~ 420 r/min, the flow rate of urea solution can be adjusted in the range of 13.5 ~ 40 mL/min, and the maximum flow rate was 2.26 L/h, which can meet the requirement for urea solution of the light commercial vehicle SCR system under different working conditions.

Key words: diaphragm metering pump; SCR system; distribution one-way valve; measuring accuracy; AMESim simulation

收稿日期: 2017-12-18 修回日期: 2018-03-02

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2012AA111716)

作者简介: 杨凯(1988—),男,博士生,主要从事汽车尾气后处理技术研究,E-mail: kaiyang@wit.edu.cn

通信作者: 廖义德(1963—),男,教授,博士,主要从事汽车尾气后处理、流体传动与控制技术研究,E-mail: whgcdxl@163.com

0 引言

随着机动车尾气排放限值的日益严格^[1],汽车尾气脱硝技术现已成为全球研究的热点问题^[2-6],其中选择性催化还原(Selective catalytic reduction, SCR)系统凭借诸多优点已被全球许多国家用于汽车尾气后处理^[7]。尿素泵作为SCR系统的关键部件,其计量精度、喷射压力等性能对SCR系统有着重要的影响。研究表明,适当提高尿素液的喷射压力与计量精度,能够改善尿素液的雾化效果,提高SCR系统的工作效率^[8];同时,还能有效降低尿素沉积、结晶等副作用对系统产生的影响^[9-10]。

目前,Bosch、Tenneco等国外知名企业均推出了较为成熟的尿素泵产品,我国相关科研院所、高校及企业也积极开展了SCR系统的自主研发,取得了丰富的研究成果^[11-18]。现有的尿素泵主要为齿轮泵、电磁泵及隔膜泵^[19]。由于尿素液的润滑性较差,齿轮泵的使用寿命往往不高。电磁泵和隔膜泵属于往复泵,其配流单向阀均存在运动不稳定和关闭不及时等问题,因此计量精度不高^[20]。现有的尿素隔膜泵多采用阀控式计量,虽然可以达到较高的计量精度,但提高了SCR系统的成本,还降低了系统的可靠性。

本文通过对尿素隔膜泵进行结构优化,并针对轻型商用车SCR系统的需求,设计一种采用泵控式计量的高精度隔膜计量泵,以期实现尿素液输送与计量一体化,简化SCR系统结构,并降低成本。

1 结构与工作原理分析

隔膜计量泵结构原理如图1所示。

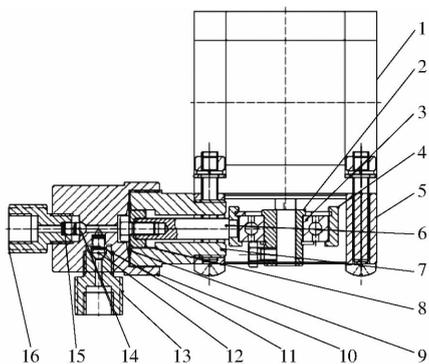


图1 隔膜计量泵结构原理图

Fig. 1 Structure schematic diagram of DMP

1. 步进电机 2. 偏心套 3. 轴承 4. 轴承套 5. 连接块 6. 推杆 7. 螺纹接头 8. 衬套 9. 膜片 10. 泵体 11、15. 单向阀弹簧 12. 进口单向阀阀芯 13、16. 接头 14. 出口单向阀阀芯

步进电机通过轴承、偏心套、连接块和推杆等将旋转运动转换为膜片沿轴向的往复直线运动,交替

改变泵腔室的容积,并借助配流单向阀持续将尿素液吸入后排出,实现尿素液的稳定供给。

从隔膜计量泵的工作特性可知,其流量 q 等于驱动电机的转速 n 与其单次排量 V 的乘积,即

$$q = nV \quad (1)$$

隔膜计量泵膜片在偏心轮连杆机构的作用下作往复运动,使泵腔室的体积周期性变化,因此在理想状态下,其单次排量 V 等于泵腔室体积的变化量,即

$$V = 2\pi(R^2 + Rr + r^2)l/3 \quad (2)$$

式中 R ——膜片半径

r ——膜片盖板半径

l ——膜片轴向位移

步进电机转速为

$$n = \frac{f\alpha}{360M} \quad (3)$$

式中 f ——脉冲频率 α ——步距角

M ——细分数

由式(3)可知,步进电机转速 n 可以通过调节脉冲频率 f 和细分数 M 进行精确控制。当排量 V 确定时,通过设置步进电机转速 n 即能对隔膜计量泵流量 q 进行精确调节。同时,增大细分数 M 还能进一步提高步进电机的转动精度。

由于轻型商用车SCR系统尿素液最大消耗量约为油耗的2%~3%,即2 L/h。而步进电机在150~420 r/min时转速与扭矩输出稳定,因此设计隔膜计量泵单次排量为0.09 mL,其最大排量为2.26 L/h,满足轻型商用车使用需求。同时,为了提高尿素液的雾化效果,减少尿素沉积、结晶等副作用,并兼顾尿素液的计量精度、高转速时步进电机的输出扭矩以及膜片寿命等因素,设计隔膜计量泵额定压力为2 MPa。

2 AMESim 仿真分析与结构优化

2.1 AMESim 仿真分析

隔膜计量泵是由机、电、液耦合的复杂系统,结构紧凑、计量精度高,采用一般检测方法很难在不影响其流量特性的前提下对其响应特性进行测试。因此,借助AMESim仿真平台对其进行仿真模拟,为其性能分析提供相关的理论依据。根据图1所示隔膜计量泵物理模型建立了其AMESim仿真模型,如图2所示。

通过仿真,测得在420 r/min时隔膜计量泵进口单向阀阀芯位移及其阀口瞬时流量曲线如图3、4所示。

如图3、4所示,进口单向阀阀芯关闭时,阀口流

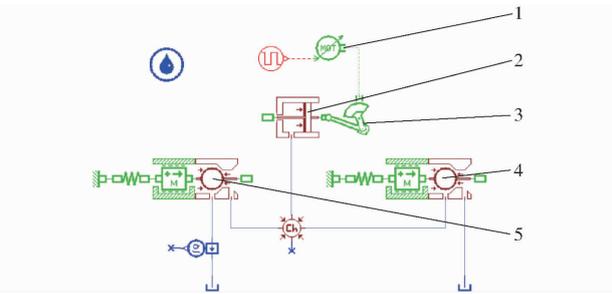


图2 隔膜计量泵 AMESim 仿真模型

Fig. 2 AMESim simulation model of DMP

1. 步进电机 2. 膜片 3. 曲柄连杆机构 4. 进口单向阀 5. 出口单向阀

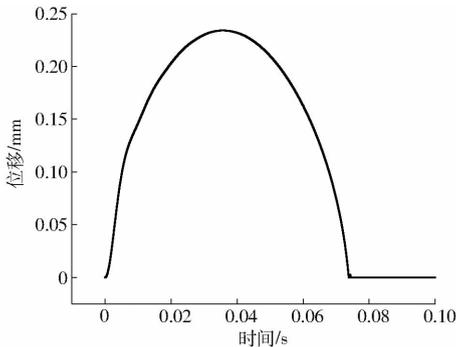


图3 进口单向阀阀芯位移曲线

Fig. 3 Displacement curve of inlet one-way valve core

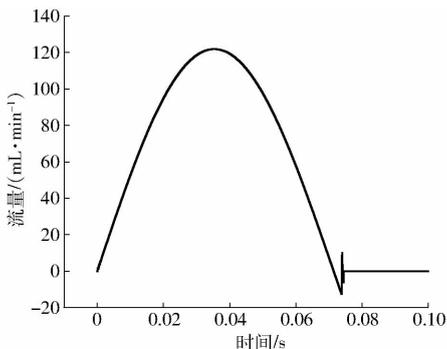


图4 进口单向阀阀口瞬时流量曲线

Fig. 4 Instantaneous flow curve of inlet one-way valve orifice

量产生波动,且出现负值。分析认为,造成这种现象的原因是由于阀芯的响应迟滞引起的。在排液时,由于阀芯关闭不及时,泵腔室内有少量尿素液从其阀口反向溢出,造成泵的实际流量不稳定,对其计量精度产生了一定的影响。

2.2 结构优化

受隔膜计量泵进口单向阀响应特性的影响,实际流过泵腔室的液体流量并不稳定。因此,对进口单向阀阀芯的响应特性进行了理论分析,并对其结构进行优化,以减少尿素液回流对隔膜泵计量精度产生的影响。

由孔口出流公式可知,流经阀口的瞬时流量 q_1 为

$$q_1 = C_d \pi d x \sqrt{2\Delta p / \rho} \quad (4)$$

同时,由偏心轮连杆机构的运动特性计算可得膜片的瞬时速度 u 为

$$u = \omega r_1 \left(\sin\theta + \frac{r_1}{2l_1} \sin(2\theta) \right) \quad (5)$$

由于 $r_1 \ll 2l_1$,隔膜泵的瞬时流量 q_2 可近似为

$$q_2 = Au = A\omega r_1 \sin\theta \quad (6)$$

式中 C_d ——阀口流量系数

d ——阀芯直径

Δp ——泵腔室压力

x ——阀芯开启量

ρ ——液体密度

ω ——步进电机的角速度

r_1 ——偏心距 l_1 ——推杆长度

θ ——偏心轮与膜片轴向夹角

A ——膜片面积

由于隔膜计量泵的瞬时流量 q_2 等于流经阀口的瞬时流量 q_1 ,因此,由式(4)~(6)可得

$$x = \frac{A\omega r_1}{C_d \pi d \sqrt{2\Delta p / \rho}} \sin\omega t \quad (7)$$

同时,由式(7)可得阀芯开启量与时间的关系为

$$t = \omega^{-1} \arcsin \frac{C_d \pi d x \sqrt{2\Delta p / \rho}}{A\omega r_1} \quad (8)$$

由式(8)可以看出,阀芯的关闭时间 t 与其开启量 x 成正比,开启量 x 越小,阀芯的关闭时间 t 越小,从阀口溢出的尿素液也就越少,隔膜计量泵的流量就越稳定。因此,对阀芯的开启量进行机械限位,使其最大开启量 x_{\max} 满足阀口最小开度,阀口最小开度为进口管道的通流面积与阀口通流面积相等时阀芯的开启量,即

$$\frac{\pi}{4} D^2 = \pi D x_{\max} \quad (9)$$

式中 D ——进口管道直径

$$\text{即} \quad x_{\max} = \frac{D}{4} \quad (10)$$

通过对隔膜计量泵进口单向阀阀芯的开启量进行机械限位,降低了阀芯的关闭时间,减少了尿素液溢出对流量产生的影响。同时还保证了在每一个运动周期内阀芯开启量均保持一致,使计量精度更加精确。

对隔膜计量泵结构优化后,通过 AMESim 仿真测得在 420 r/min 时进、出口单向阀阀芯的动态响应特性及 150~420 r/min 时隔膜计量泵的排量特性如图 5、6 所示。

如图 5 所示,隔膜泵进、出口单向阀阀芯依次周期性开启和关闭,进口单向阀阀芯最大开启量稳定

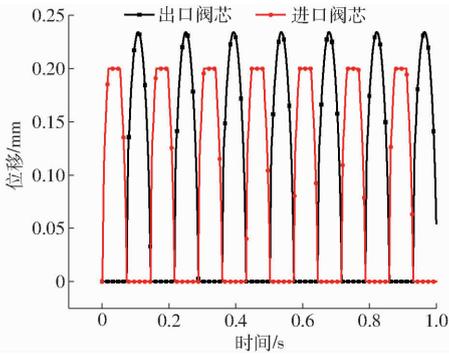


图 5 420 r/min 时进、出口阀芯的动态响应曲线
Fig. 5 Dynamic response curves of inlet and outlet one-way valve core at 420 r/min

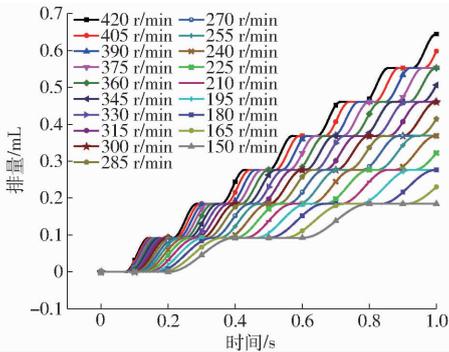


图 6 150 ~ 420 r/min 时排量曲线
Fig. 6 Displacement curves at 150 ~ 420 r/min

在 0.2 mm,且关闭平稳。由图 6 可看出,隔膜计量泵排量周期性呈阶梯状上升,转速越快,排量越大,且在不同转速下其单次排量均为 0.09 mL,与式(2)计算结果一致。

3 试验

为了验证隔膜计量泵的性能,设计了隔膜计量泵原理样机并搭建了试验系统,试验系统主要由 PLC、触摸屏、驱动器、高精度电子压力表、高精度电子秤、针型节流阀等组成,如图 7 所示。

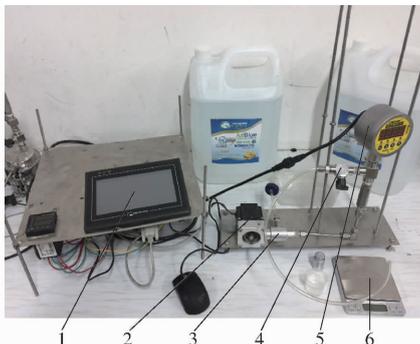


图 7 隔膜计量泵试验系统
Fig. 7 Test system of DMP

1. 触摸屏 2. 步进电机 3. 隔膜计量泵泵体 4. 针型节流阀
5. 高精度电子压力表 6. 高精度电子秤

试验时,调节针型节流阀的开度使喷射压力稳定在 2 MPa,测得隔膜计量泵单次排量为 0.09 mL。

同时,通过 PLC 和触摸屏调节步进电机的转速在 150 ~ 420 r/min,测得 1 ~ 6 号隔膜计量泵的流量散点如图 8 所示。其中 1 ~ 3 号泵经结构优化处理,4 ~ 6 号泵未经结构优化处理。

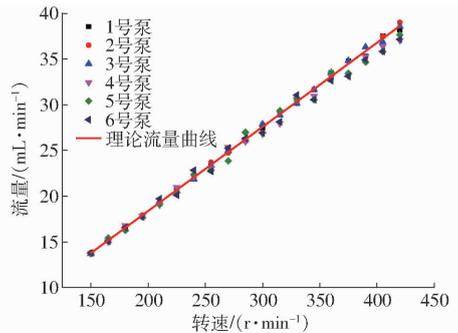


图 8 1 ~ 6 号隔膜计量泵流量散点图
Fig. 8 Flow scatter plot of 1 ~ 6 DMP

隔膜计量泵计量精度为

$$\delta = \frac{V_1 - V_2}{V_2} \times 100\% \quad (11)$$

式中 V_1 ——测试排量 V_2 ——理论排量

由式(11)得到 1 ~ 6 号泵在 150 ~ 420 r/min 时的计量精度散点如图 9 所示。

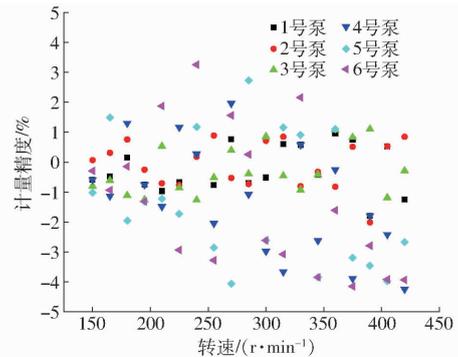


图 9 1 ~ 6 号隔膜计量泵计量精度散点图
Fig. 9 Scatter plot of measuring accuracy of 1 ~ 6 DMP

由图 8、9 可以看出,在 150 ~ 420 r/min 时,1 ~ 6 号泵的流量散点分布在理论流量曲线两侧。其中 4 ~ 6 号泵随着转速提高,计量精度降低,计量精度散点多分布在 $\pm 5\%$ 范围内。这是由于转速越高,进口单向阀阀芯关闭越不及时,泵腔室内尿素液反向溢出问题越严重,导致转速越高计量精度越低。而经结构优化后的 1 ~ 3 号泵计量精度散点均布在 $\pm 3\%$ 范围内,在 150 ~ 420 r/min 时,尿素液喷射量在 13.5 ~ 40 mL/min 范围内调节,且最大流量为 2.26 L/h,可满足轻型商用车在不同工况下的尿素液需求。

4 结论

(1)隔膜计量泵选用步进电机作为驱动源,既满足了高压力下的驱动力要求,又能通过精确控制其转动精度、转速及转动圈数使隔膜计量泵计量精

度可控,简化了SCR系统结构,降低系统成本。

(2)通过对隔膜计量泵进口单向阀阀芯的开启量进行机械限位,使其最大开启量 x_{\max} 满足阀口最小开度,降低了阀芯的关闭时间和尿素液溢出对流量产生的影响,使其计量精度显著提升至 $\pm 3\%$ 。

(3)隔膜计量泵具有较高的喷射压力与计量精度,其喷射压力为2 MPa,单次排量为0.09 mL,计量精度 $\pm 3\%$;在转速150~420 r/min时,尿素液的喷射量可在13.5~40 mL/min范围内调节,最大流量为2.26 L/h。

参 考 文 献

- 1 GB18352.6—2016 轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)[S]. 2016.
- 2 JOHNSON T V. Diesel emissions in review[J]. SAE International Journal of Engines, 2011, 4(1): 143–157.
- 3 WEEKS C L, IBELING D R, HAN S, et al. Analytical investigation of urea deposits in SCR system[J]. SAE International Journal of Engines, 2015, 8(3): 1219–1239.
- 4 PFAHL U, SCHATZ A, KONIECZNY R. Advanced exhaust gas thermal management for lowest tailpipe emissions-combining low emission engine and electrically heated catalyst[C]. SAE Technical Paper 2012-01-1090, 2012.
- 5 LACIN F, KOTRBA A, HAYWORTH G, et al. SOLID SCR: Demonstrating an improved approach to NO_x reduction via a solid reductant[C]. SAE Technical Paper 2011-01-2207, 2011.
- 6 FULKS G, FISHER G B, RAHMOELLER K, et al. A review of solid materials as alternative ammonia sources for lean NO_x reduction with SCR[C]. SAE Technical Paper 2009-01-0907, 2009.
- 7 MILLER W R, KLEIN J T, MUELLER R, et al. The development of Urea-SCR technology for US heavy duty trucks[C]. SAE Technical Paper 2000-01-0190, 2000.
- 8 SPITERI A. Experimental fluid dynamic investigation of Urea-water sprays for diesel selective catalytic reduction-DeNO_x applications[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2014, 53(8): 3047–3055.
- 9 STROTS V O, SANTHANAM S, ADELMAN B J, et al. Deposit formation in Urea-SCR systems[J]. SAE International Journal of Fuels and Lubricants, 2009, 2(1): 283–289.
- 10 SMITH H, LAUER T, MAYER M, et al. Optical and numerical investigations on the mechanisms of deposit formation in SCR systems[J]. SAE International Journal of Fuels & Lubricants, 2014, 7(2): 525–542.
- 11 王静, 王谦, 徐航, 等. 车用柴油机SCR系统NO_x转化效率影响因素[J]. 内燃机学报, 2015, 33(5): 453–460.
WANG Jing, WANG Qian, XU Hang, et al. Influential factors on NO_x conversion efficiency of vehicle SCR system[J]. Transactions of CSICE, 2015, 33(5): 453–460. (in Chinese)
- 12 FENG X, GE Y, MA C, et al. Experimental study on the nitrogen dioxide and particulate matter emissions from diesel engine retrofitted with particulate oxidation catalyst[J]. Science of the Total Environment, 2014, 472: 56–62.
- 13 ZHAO Y, HU J, HUA L, et al. Ammonia storage and slip in a urea selective catalytic reduction catalyst under steady and transient conditions[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2011, 50(21): 11863–11871.
- 14 王军, 王兴华, 季亮, 等. SCR系统尿素水溶液喷雾分解影响因素数值模拟[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(10): 372–375, 371. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161048&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.048.
WANG Jun, WANG Xinghua, JI Liang, et al. Numerical simulation of influence factors on urea solution spray and decomposition of SCR system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 372–375, 371. (in Chinese)
- 15 CHEN Z, YANG W, ZHOU J, et al. H₂CO hydrolysis performance in urea-water solution thermohydrolysis process with and without catalysts[J]. Journal of Zhejiang University-Science A, 2010, 11(11): 849–856.
- 16 胡杰, 王立辉, 王天田. 柴油机Urea-SCR控制系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 349–356. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160246&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.046.
HU Jie, WANG Lihui, WANG Tiantian. Design and test of Urea-SCR control system for diesel engine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2): 349–356. (in Chinese)
- 17 郭秀丽, 亓占丰. 几种典型发动机SCR尿素水解实验研究[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(增刊2): 339–344.
GUO Xiuli, QI Zhanfeng. SCR urea hydrolysis experimental study of several typical engine[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 38(Supp.2): 339–344. (in Chinese)
- 18 马军彦, 李君, 曲大为, 等. 柴油机SCR系统尿素分解效率研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(6): 282–286, 309. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150641&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.06.041.
MA Junyan, LI Jun, QU Dawei, et al. Urea decomposition efficiency of diesel engine SCR system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6): 282–286, 309. (in Chinese)
- 19 潘希伟, 杨曙东, 史有程, 等. SCR尿素泵研究进展及关键技术分析[J]. 江苏大学学报:自然科学版, 2017, 38(3): 280–288.
PAN Xiwei, YANG Shudong, SHI Youcheng, et al. Research progress and key technologies analysis of SCR urea pump[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2017, 38(3): 280–288. (in Chinese)
- 20 廖昱, 苏义鑫, 卢尧君. SCR计量电磁泵控制系统研制[J]. 武汉理工大学学报, 2015, 37(6): 100–103, 108.
LIAO Yu, SU Yixin, LU Yaojun. Design and research of SCR electromagnetic metering pump control system[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2015, 37(6): 100–103, 108. (in Chinese)