

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.05.004

音圈电机驱动的剂量可调式连续喷射无针注射器研究^{*}

王佳斌, 陈 凯^{*}, 许孝华, 张国杰
(杭州电子科技大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要:针对音圈电机驱动的无针注射器所存在的无法实现连续喷射、注射剂量不可调问题,搭建了音圈电机驱动的剂量可调式连续喷射无针注射器(连续喷射注射器)。介绍了连续喷射注射器的工作原理,并对其进行了理论分析,得出了理论模型,并给出了喷嘴压强理论曲线。搭建了连续喷射注射器的压力测试系统,并对喷射压力进行了动态测试,得出了喷嘴压强实验曲线。研究结果表明,在相同参数情况下,喷嘴压强理论曲线与喷嘴压强实验曲线基本吻合,且理论值略大于实验值;另外,绕线电流随注射剂量增大呈上升趋势。

关键词:音圈电机;剂量可调;连续喷射;喷嘴压强;绕线电流

中图分类号:TH77;R197.39

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)05-0527-05

Volume-adjustable continuous-jet needle-free injector driven by voice coil motor

WANG Jia-bin, CHEN Kai, XU Xiao-hua, ZHANG Guo-jie
(School of Mechanical Engineering, Hangzhou Danzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at the problem of the needle-free injector could not realize the continual jet and adjust doses, a volume-adjustable continuous-jet needle-free injector driven by voice coil motor was built (continuous-jet injector). The operating principle of the continuous-jet injector was introduced. The theory of the continuous-jet injector was analyzed. The theoretical model was built and the nozzle pressure theoretical curve was obtained. The system of pressure tests was built and the jet pressure force was tested dynamically, the nozzle pressure experimental curve was obtained. The results indicate that the theoretical curve identical with the experimental curve and the experimental data is smaller than the theoretical data in the same conditions. In addition, the coil electricity is increase with the increasing of jet doses.

Key words: voice coil motor; dose-adjustable; continuous jet; nozzle pressure; coil electricity

0 引言

无针注射技术是一种用外力驱动活塞,挤压安瓿内的液体,使液体通过安瓿喷嘴喷射出去的技术^[1]。该技术的起源可追溯到1933年,Robert Hingson与Arnold Sutermeister^[2]发现高压输油管中的液体通过输油管表面的小孔喷出,能穿透人体的皮肤进入体内。依据此现象,这两位科学家发明了无针注射器。经过几

十年的发展,无针注射技术不断完善,现如今成为一种重要的医用注射手段。该技术同传统有针注射技术相比,具有操作简单、疼痛感轻、无交叉感染、注射速度快等优点^[3]。

在无针注射器的分类上,依据驱动系统的不同,分为机械动力型、气压动力型和弹药激发型。以上几种驱动方式均可让无针注射器安瓿内的药物挤压到人体内部,但是存在驱动力不可控的缺点。

收稿日期:2015-11-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(E051204)

作者简介:王佳斌(1990-),男,浙江宁波人,硕士研究生,主要从事无针注射器方面的研究. E-mail: wangzhe19901227@sina.cn

通信联系人:陈 凯,男,教授,硕士生导师. E-mail: kchen@hdu.edu.cn

为了解决这个问题,国内外学者做了一些研究。2012 年,冯利军等将音圈电机应用于无针注射器,提出音圈电机驱动无针注射器,并进行了实验研究。

传统的音圈电机驱动无针注射器是由永磁铁产生固定磁场,当绕线动子上的绕线接通电流时,绕线动子受到安培力的作用推动活塞运动。通过调节绕线电流的大小,即可调节活塞的驱动力,从而达到驱动力可控的目的。然而,音圈电机驱动无针注射器存在剂量无法调节与连续喷射无法实现的缺点。

本研究针对音圈电机驱动无针注射器所存在的无法实现连续喷射、注射剂量不可调问题,搭建音圈电机驱动的剂量可调式连续喷射无针注射器。

1 音圈电机驱动的剂量可调式连续喷射无针注射器设计

1.1 机械结构

音圈电机驱动的剂量可调式连续喷射无针注射器(连续喷射注射器)的机械结构由连续喷射模块、剂量调节模块和驱动模块组成。驱动模块用于推动活塞,剂量调节模块用于调节注射剂量的大小,连续喷射模块通过多次给药来实现连续喷射的目的。

音圈电机驱动的剂量可调式连续喷射无针注射器结构如图 1 所示。

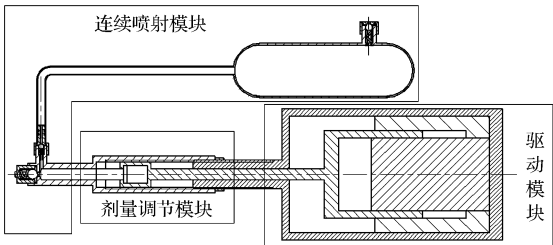


图 1 音圈电机驱动的剂量可调式连续喷射无针注射器结构示意图

1.1.1 驱动模块

该模块主要由电机外壳、绕线动子和永磁铁组成。绕线动子上饶有线圈,当线圈通电后,绕线动子由于安培力的作用产生位移。并且,通过调节线圈电流的大小和方向,就可以达到控制绕线动子运动的目的。

驱动模块如图 2 所示。

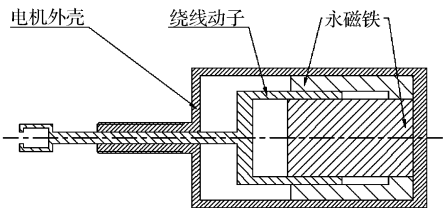


图 2 驱动模块结构示意图

1.1.2 剂量调节模块

该模块主要由安瓿、电机外壳和锁止螺母组成。安瓿与电机外壳之间通过螺纹来实现剂量的调节,锁止螺母起到轴向紧固的作用。

剂量调节模块如图 3 所示。

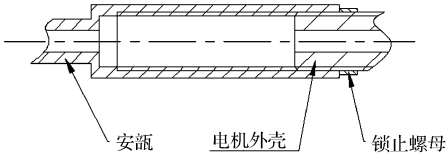


图 3 剂量调节模块结构示意图

1.1.3 连续喷射模块

该模块主要由单向阀、喷口、安瓿、活塞和储液罐组成。当活塞向左运动时,连接储液罐的单向阀关闭,连接喷口的储液罐打开,安瓿内液体从喷口喷出;当活塞向右运动时,连接喷口的单向阀关闭,连接储液罐的单向阀打开,储液罐里的液体流入到安瓿内。如此反复,只要储液罐里有足够多的液体,连续喷射注射器就能通过多次给药来实现连续喷射。

连续喷射模块如图 4 所示。

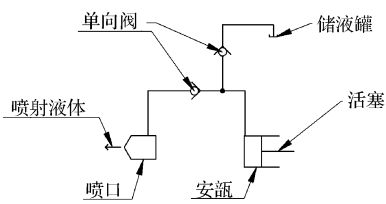


图 4 连续喷射模块液路示意图

1.2 工作过程

连续喷射注射器在一个注射周期内需要完成吸药动作与注射动作。在该注射器工作之前,本研究通过剂量调节模块设定好需要注射的剂量。在吸药动作过程中,驱动模块的绕线动子通以较小的直流电,由于安培力的作用,绕线动子以较小的速度拉动连续喷射模块中的活塞,完成吸药动作。在注射过程中,驱动模块的绕线动子通以反向大电流,在安培力的作用下,绕线动子快速推动连续喷射模块中的活塞,使安瓿内的液体从喷口处喷射出去。

1.3 控制系统

控制系统由单片机、绕线、继电器、位移传感器、高压直流电源和低压直流电源组成。该控制系统主要由高压直流电源驱动绕线所形成的闭环控制模块组成。当注射器处于吸药动作过程时,单片机控制继电器 KT1 与 KT2 接通 2 触点,由于电阻的存在,绕线电流较小,使得绕线动子带动活塞缓慢地远离喷口,当位移

传感器接收到绕线动子到达极限位置,单片机控制KT1与KT2接通1触点,完成吸药。当注射器处于注射动作过程时,单片机控制继电器KT1与KT2接通3触点,使得绕线动子通以反向大电流,快速地推动活塞,让活塞将安瓿内的液体喷出,当位移传感器接收到绕线动子到达极限位置,单片机控制KT1与KT2接通1触点,完成注射。

控制系统如图5所示。

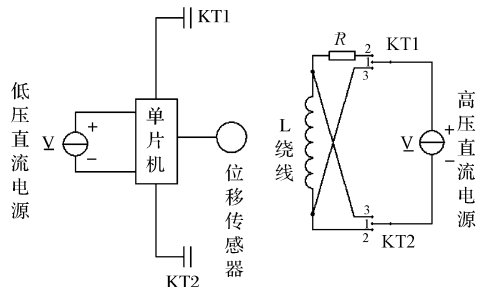


图5 连续喷射注射器控制系统示意图

KT1,KT2—继电器; R —电阻;低压直流电源 v —控制电路电源;高压直流电源—绕线 L 电源;位移传感器—用于反馈绕线动子的位置;单片机—用于控制继电器

2 音圈电机驱动的剂量可调式连续喷射无针注射器的理论分析

分离式音圈电机无针注射系统在开始注射时,线圈从初始位置到注射完成,经历了线圈加速和撞击注射两个过程。以下分别对这两个过程进行理论分析。

2.1 线圈加速过程

线圈加速过程中由于摩擦阻力远小于音圈电机驱动力,忽略不计。同时,分离式音圈电机无针注射系统是竖直放置,活塞弹射方向竖直向下,因此,线圈的驱动力就是线圈所受到的安培力和线圈自身重力。依据安培力公式和牛顿第二定律可得到下式^[4]:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = NB_l I L \sin \theta \tag{1}$$

式中: B_l —磁感应强度, I —线圈电流, L —线圈在磁场中的切割磁感线的有效长度, N —线圈匝数, θ —电流的方向与磁感应线方向的夹角, x —线圈的位移, t —时间。

音圈电机主要参数如表1所示。

表1 音圈电机主要参数

参数类别(单位)	数值
行程/mm	40
驱动电压/V	100
峰值电流/A	10
电阻值/ Ω	10
线圈匝数	376
线圈直径/mm	46
线圈质量/kg	0.154
永磁铁磁感应强度/T	1.3

经过MAXWELL电磁场仿真和Matlab数据分析,当音圈电机满足表1数据时,可得下式^[5]:

$$F = - (0.01I + 0.06)x^2 + 4x + 10I \tag{2}$$

式中: F —音圈电机安培力,N; I —线圈的峰值电流,A; x —距离,m。

2.2 撞击注射过程

依据质量守恒定律和伯努利方程,可得到下式^[6-8]:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{[E + p] \frac{dx}{dt} - \frac{EA_o}{A_p} \sqrt{\frac{2p}{(1 + \lambda \frac{L}{D})\rho_0}}}{L - x_b} \tag{3}$$

式中: p —喷口压强(该压强为相对于大气压的相对压强), D —安瓿内径, E —集中弹性模量, A_o —喷孔面积, A_p —安瓿内圆面积, λ —流动摩擦因数(取0.1), L —射腔流体的初始长度, ρ_0 —液体的初始密度, x_b —注射撞击后的线圈位移, t —时间。

依据有摩擦损耗的喷口流速 u 与喷口压强 p 之间的关系可得下式^[9]:

$$u = \sqrt{\frac{2p}{(1 + \lambda \frac{L}{D})\rho_0}} \tag{4}$$

3 音圈电机驱动的剂量可调式连续喷射无针注射器实验

以上得到的喷射压强 p 随时间的变化关系可以通过测量射流的冲击力来实现。压力测试仪如图6所示。

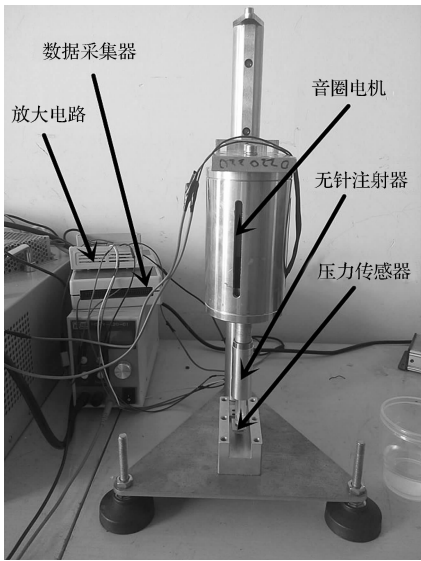


图6 压力测试仪

该压力测试仪主要由音圈电机、无针注射器、压力传感器、放大电路和数据采集器组成。压力传感器输出的电压大小与其所受到的压力大小呈线性关系。通过

压力校准,可得下式:

$$U = -5.324\,0m_w - 826.425\,3 \tag{5}$$

式中: m_w —传感器所受到的压力,g; U —压力传感器的输出电压,mV。

液体在喷射过程中,对压力传感器产生冲击。依据参考文献,可得下式:

$$v_l = \left(\frac{F_l}{\rho A}\right)^{0.5} \tag{6}$$

式中: F_l —射流对压力传感器的冲击力,N; v_l —射流的平均流速,m/s; ρ —射流的密度,kg/m³; A —射流在冲击处的截面积。

这里, ρ 取 ρ_0 , A 取 A_0 。显然, F_l 即为 m_w ,但要经过单位换算。忽略射流在空气中运动的能量损失,可知 v_l 即为喷口流速 u ,依据式(4),可通过实验所采集到的电压值 U 得出喷口压强 p 。

经过实验数据处理和理论模型计算,得到结果如图(7 ~ 12)所示。其中,虚线是理论曲线(理论模型得出的喷口压强时域曲线),实线是实验曲线(实验测出的喷口压强时域曲线), p (单位:MPa)表示喷口压强, t (单位:ms)表示时间。

注射剂量为 0.1 mL,0.2 mL,0.3 mL 时喷口压强时域曲线图如图(7 ~ 9)所示。

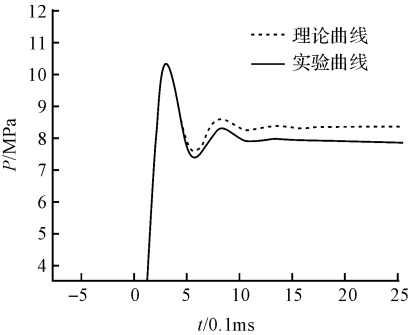


图 7 注射剂量为 0.1 mL 时喷口压强时域曲线图

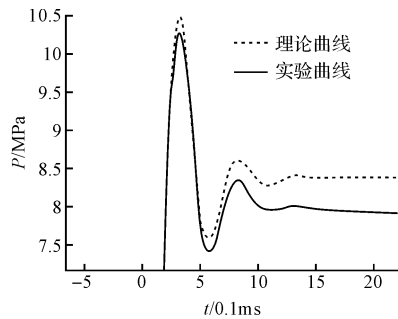


图 8 注射剂量为 0.2 mL 时喷口压强时域曲线图

图(7 ~ 9)均满足以下结论:

- (1) 理论曲线位于实验曲线的上方;
- (2) 理论曲线与实验曲线的波动一致;
- (3) 理论曲线与实验曲线同时取到最大值;

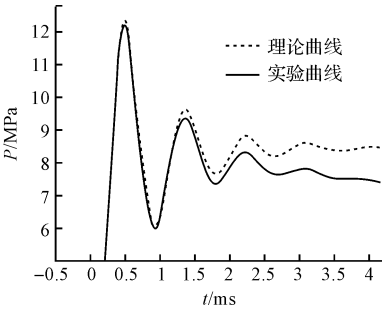


图 9 注射剂量为 0.3 mL 时喷口压强时域曲线图

(4) 当时间小于一定值时,理论值与实验值的差值较小;

(5) 随着时间增加,理论值与实验值的差呈增大趋势。

依据结论(2)、(3)和(4),可以得出,当时间小于一定值时,以上 3 张图的理论结果与实验结果基本吻合。依据结论(1)和(5)可以得出,实验值小于理论值。依据结论(5)可以得出,当时间大于一定值时,实验值衰减地比理论值更快。

造成结论(1)出现的原因是,射流冲击压力传感器时,部分射流的能量没有完全转换成压力传感器的应变能,而仍是以动能的形式向环境扩散。造成结论(5)的原因是,压力传感器作为一个线性系统,在获得冲击脉冲之后,产生振荡,而振荡的能量以固体传播的方式扩散,导致实验曲线在一定时间以后,衰减快于理论曲线。

设 $\sigma(\%)$ 为实验误差,可得下式:

$$\sigma = \frac{\text{实验值} - \text{理论值}}{\text{理论值}} \times 100\% \tag{7}$$

实验误差与时间的关系曲线如图 10 所示。

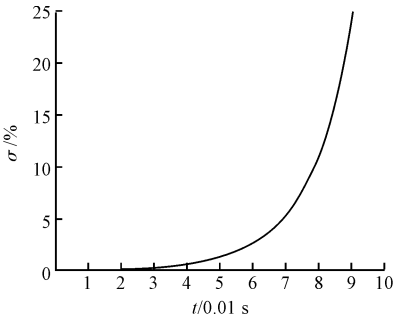


图 10 实验误差与时间的关系曲线

依据图 10 可得以下结论:

- (1) 随着时间的增大,误差呈现增大趋势;
- (2) t 在 0 ~ 0.04 s 区间内时,误差较小,超过 0.04 s 之后,误差迅速增大;
- (3) 在 0 ~ 0.07 s 区间内,误差在 5% 以内。

依据结论(3),当时间小于 0.07 s 时,实验曲线与理论曲线在 5% 的误差范围内吻合。

喷口压强最大值与注射剂量的关系曲线如图 11 所示。

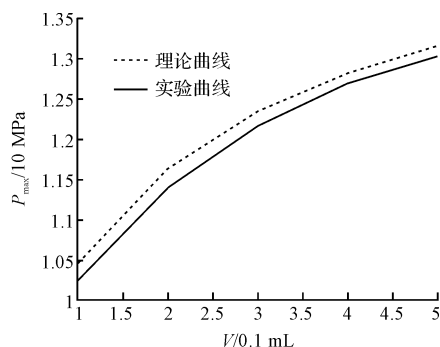


图 11 喷口压强最大值与注射剂量的关系曲线

$p_{\max}$ —喷口压强最大值

图 11 中, V —注射剂量, 依据曲线可得到以下结论:

- (1) 喷口压强最大值理论值大于实验值;
- (2) 喷口压强最大值随着注射剂量增加呈上升趋势。

绕线电流 I 与注射剂量 V 的关系如图 12 所示。

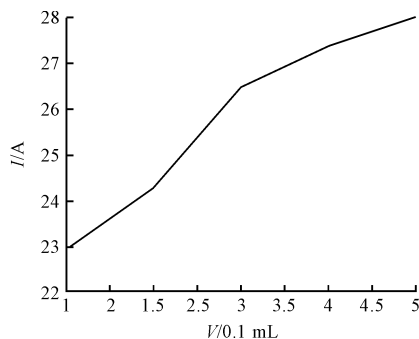


图 12 绕线电流 I 与注射剂量 V 的关系

I —绕线电流, V —注射剂量

图 12 中, 依据图形可得以下结论:

- (1) 随着注射剂量的增大, 绕线电流呈上升趋势;
- (2) 绕线电流增速随着注射剂量的增大呈下降趋势。

造成结论(1)的原因是随着注射剂量的增大, 需要音圈电机做的功变大, 在音圈电机行程不变的情况下, 动力绕线电流增大。造成结论(2)的原因是, 当注射剂量增大时, 音圈电机所能做的功逐渐逼近最大值, 在音圈电机行程不变的情况下, 动力绕线电流增速呈下降趋势。

4 结束语

(1) 本研究在音圈电机驱动的无针注射器的基础上, 增加了连续喷射模块和剂量调节模块, 搭建了音圈

电机驱动的剂量可调式连续喷射无针注射器。

(2) 本研究对音圈电机驱动的剂量可调式连续喷射无针注射器进行理论分析, 得出喷口压强的理论模型。

(3) 本研究对音圈电机驱动的剂量可调式连续喷射无针注射器进行实验, 并将实验结果与理论结果进行对比, 观察得到理论曲线在实验曲线上方, 考虑到实验结果的能量损失, 得出当时间小于一定值时理论结果与实验结果基本吻合, 当时间大于一定值时实验结果比理论结果更快衰减。

(4) 本研究观察喷口压强最大值与注射剂量的关系, 得出在相同注射剂量情况下, 喷口压强最大值的实验值略小于理论值且均随着注射剂量的增加呈现上升趋势。

(5) 本研究观察绕线电流与注射剂量的关系, 绕线电流随着注射剂量的增加呈上升趋势但增长率呈下降趋势。

参考文献 (References):

- [1] 赵丽娜. 无针注射器技术研究[D]. 杭州: 浙江大学机械工程学院, 2012.
- [2] 周旭, 金城, 王伽伯. 无针注射给药系统研究进展. 第二届中药现代化新剂型新技术国际学术会议[C]. 天津: 天津出版社, 2006: 311-317.
- [3] 冯利军, 熊良才. 音圈电机驱动无针注射系统[J]. 机械与电子, 2012, 233(2): 36-38.
- [4] 邹继斌, 王骞. 音圈电机的电磁场计算与分析[J]. 微特电机, 2008, 236(2): 4-6.
- [5] 缪来武. 微喷射透皮给药系统的力学分析和实验研究[D]. 杭州电子科技大学机械工程学院, 2015.
- [6] 陈凯, 杨峰雷. 基于音圈直线驱动无针注射技术[J]. 机械工程学报, 2011, 47(9): 151-156.
- [7] WILLIAMS, R M J, HOGAN, N C NIELSEN PMF, et al. A Computational Model of a Controllable Needle-Free Jet Injector[C]// Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc. et al. Hors kors; IEEE EMBS, 2012: 2052-2055.
- [8] BAKER A B, SANDERS J E. Fluid mechanics analysis of a spring-loaded jet injector[J]. IEEE Transactions on Bio-medical Engineering, 1999, 46(2): 235-242.
- [9] 陈凯, 周华. 弹簧式液体喷射注射系统的喷射模型及实验研究[J]. 中国生物医学工程学报, 2010, 29(1): 140-144.

[编辑: 李辉]

本文引用格式:

王佳斌, 陈凯, 许孝华, 等. 音圈电机驱动的剂量可调式连续喷射无针注射器研究[J]. 机电工程, 2016, 33(5): 527-531.

WANG Jia-bin, CHEN Kai, XU Xiao-hua, et al. volume-adjustable continuous-jet needle-free injector driven by voice coil Motor[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016, 33(5): 527-531.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>