

文章编号:1005-0523(2020)01-0127-05

螺杆泵式点胶系统动态特性分析与试验研究

张玉宝¹, 刘淑珍², 赵志龙²

(1. 浙江纺织服装职业技术学院信息媒体学院, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波工程学院国际交流学院, 浙江 宁波 315201)

摘要:螺杆泵式点胶系统具有精度高、胶液应用范围广等优点。根据螺杆式点胶系统流速动态模型,应用 Matlab Simulink 软件分析了开机时间、胶液体积弹性模量、流体动态特性对胶液流速动态特性的影响。结果表明:随着开机时间的延长,系统趋于稳态,动态特性度流量的影响逐渐减小;胶液可压缩性越强,非牛顿系数越大,流速瞬态响应越慢。实验结果表明,面积算法可以用于预测点胶量,预测误差小于 5%。

关键词:点胶系统;动态特性;点胶量;流速

中图分类号:TH162

文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2020.01.018

胶液分配系统广泛应用于微机电系统、生物制造、电子封装、芯片级封装和集成电路封装等^[1-4]。常见的点胶分液系统有螺杆泵式点胶、时间压力式点胶、活塞式点胶^[5-8]。在这些点胶系统中,螺杆泵式点胶系统具有胶液应用范围广(胶液粘度范围可以在 100~1 500 cps)、精度高等优点,在工业界引起广泛重视。螺杆泵点胶系统工作原理如图 1 所示,在电机驱动下,螺杆旋转带动胶液向针头方向运动,胶液挤出完成点胶。系统工作过程中,可通过物料桶进行胶液补充,与时间压力式点胶系统相比,提高了生产效率。

国内外对螺杆泵式点胶系统模型和流动特性研究主要集中在点胶稳态流速和动态流速模型两个方面。在稳态流速模型方面,建立了螺杆泵式点胶系统三维几何模型,应用 Flunt 仿真分析了螺杆转速、螺槽尺寸、入口压力、针头尺寸等对流速的影响^[6,9]。Chen 建立了螺杆泵点胶系统稳态流速模型并通过实验验证,分析了不同螺杆转速下,入口压力、针头温度、胶体物理特性等对胶体流速的影响^[10]。在点胶系统动态模型研究方面,文献[11]充分考虑螺杆泵式点胶系统驱动电机的动态特性,建立了由驱动电机动态模型和胶液流速动态模型串联组成的系统综合模型,实验证明该模型可以用来预测系统动态流速。在工业生产中,精确预测点胶量是专家学者关注的重点也是难点。本文建立螺杆式点胶泵动态模型,分析开机时间、胶液可压缩性以及流体非牛顿性对流速和针头处挤出胶量的影响,提出点胶量预测的计算方法。

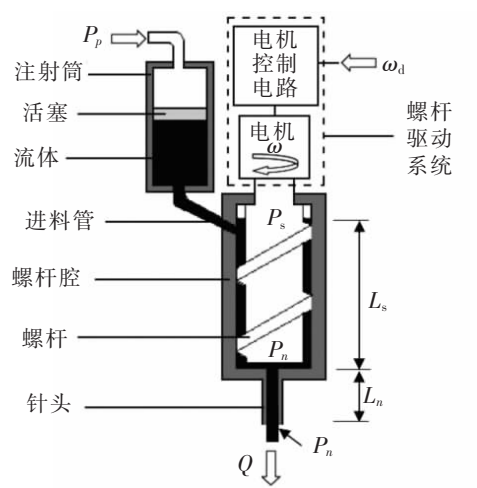


图1 螺杆泵式点胶系统工作原理
Fig.1 Performance principle of screw-driving dispensing system

收稿日期:2019-10-23

基金项目:浙江省自然科学基金资助项目(LQ13E050005)

作者简介:张玉宝(1974—),男,讲师,研究方向为机械设计及自动化。

通讯作者:刘淑珍(1975—),女,副教授,研究方向为机械设计及自动化。

1 螺杆泵点胶系统流速动态模型

考虑胶液流变特性、系统中驱动电机的动态特性,螺杆泵点胶系统流速动态特性可由驱动电机动态模型和胶液流速动态模型串联组成的综合模型来描述,模型框图如图 2 所示。图中 ω 是螺杆实际角速度,rad/s; ω_d 是设定螺杆角速度,rad/s; Q 为胶液流出针头处的流速,m³/s。

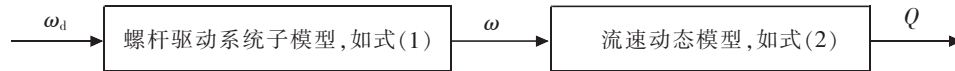


图 2 系统动态模型框图

Fig.2 Block diagram of the model

1.1 螺杆驱动系统动态模型

螺杆驱动系统动态模型描述螺杆设定转速与实际转速之间的关系。工业使用螺杆点胶系统,多采用螺杆转速闭环控制系统,是单输入单输出闭环控制系统,螺杆转速不受胶液分配过程中载荷变化的影响。研究表明,可采用现象模型来描述螺杆设定转速与实际转速之间的关系,其状态空间模型如下^[11-12]

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + B\omega_d \\ \omega = CX \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\dot{X}$ 指系统状态变量; A 为描述状态量本身对状态量变化影响的矩阵; B 为描述输入量对状态量变化影响的输入控制矩阵; C 为描述状态量对输出量变化影响的输出矩阵。

1.2 胶液流速动态模型

胶液流速动态模型描述螺杆实际流速 ω 与胶液流出针头流速 Q 之间的关系。模型假设:① 螺杆内段胶体是可压缩的;② 胶体为非牛顿流体;③ 流体压力从螺杆顶端到底端线性递减分布;④ 流体与螺杆段泵体内壁无滑动;⑤ 摩擦损失可忽略不计。假设针头内流体是不可压缩的,认为流出针头流体的体积等于流出螺杆泵的体积,针头内流体是层流流动,流体与针头内壁无滑动,胶液流速动态模型如下

$$\frac{Q(s)}{\omega(s)} = \frac{C_d}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (2)$$

式中: $a_2 = \frac{V_s \rho L_n}{2BA_n}$; $a_1 = \frac{V_s A_n + 2BC_p \rho L_n Q_u}{2BQ_u A_n}$; $a_0 = 1 + \frac{C_p}{Q_u}$ 。其中: A_n 为针头内腔横截面积,m²; B 为胶液体积模量,Pa; C_d 为牵引流动系数,m³; C_p 为压力流动系数,m³/(Pa·s); L_n 为针头长度,m; Q_u 为单位压力下稳定流动时胶液流出针头的流速,m³/s; V_s 为螺杆泵体内流体体积,m³; ρ 为胶液密度,kg/m³。

$$C_2 = \frac{(4+i)WHD_{sw}\cos\varphi}{20} \quad (3)$$

$$C_p = \frac{WH^3}{(1+2i)4\mu} \left(\frac{D_{sw}\omega\cos\varphi}{2H} \right)^{1-i} \frac{\sin\varphi}{L_s} \quad (4)$$

式中: i 为幂律指数; μ 为胶体粘度,Pa·s; W 为螺杆螺纹宽度,m; H 为螺杆螺纹深度,m; D_{sw} 为螺杆螺纹外径,m; φ 为螺杆螺旋角,(°); L_s 为螺杆入口到针头入口之间的距离,m,如图 1 所示。

2 系统动态特性分析与试验

工业生产中,关心螺杆泵式胶液分配系统的流速,关心在设定时间内胶液的流量。在点胶量较小的情况下,系统动态特性对点胶量的影响不容忽略。影响点胶量的主要因素有:设定点胶时间、针头温度、胶体特性等。模拟仿真与试验研究采用商用 Asymtek C-720 点胶机,其螺杆泵型号为:Heli-Flow DV-8000,试验系统如图 3 所示。试验采用牛顿流体硅油(密度:0.971 g/ml)在室温(25℃)下进行,采用位移传感器(SMU 9000, Kaman)测量储料桶中流体位移 y ,采用数据采集卡(PCI-DAS1602/16)以 20 kHz 的频率采集数据。试验中,使储料桶中空气压力达到设定值,然后通过控制面板设定螺杆转速,启动电机驱动螺杆旋转,将胶液挤出,系统有关几何参数如表 1 所示。

表 1 螺杆泵点胶系统参数
Tab.1 Parameters of a typical screw-driving system

参数	螺杆外 径/mm	螺纹宽 度/mm	螺纹深 度/mm	设定转速(w_d) /(rad/s)	螺杆螺旋 角/(°)	针头内径(D_n) /mm	针头长度(L_n) /mm	从螺杆泵出口到针 头入口的距离 L_d /mm
值	3.4	3.26	0.57	26.48	17	1.55	12.7	16

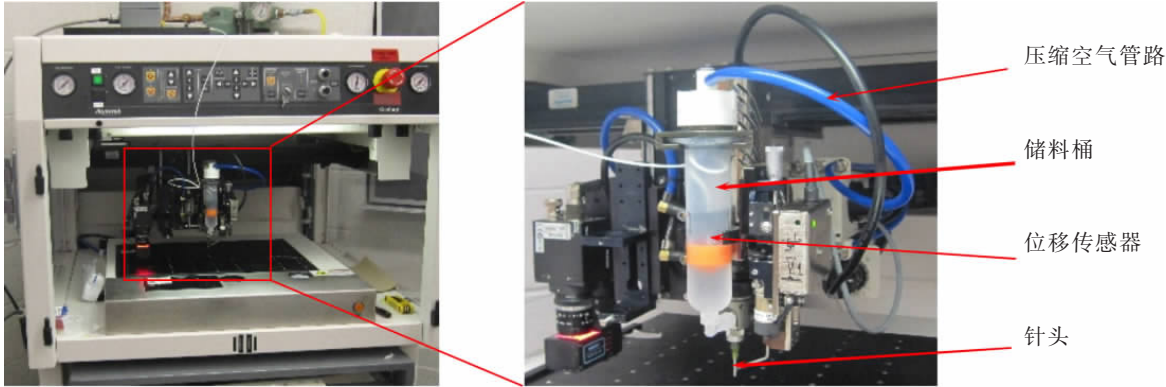


图 3 试验系统
Fig.3 Experiment system

2.1 开机时间对流量的影响

设系统仿真时间为 8 s,设定开机时间分别为 $T_s=0.5,1.5,2.5,3.5,4$ s,系统流速曲线如图 4(a)所示。仿真结果表明,当开机时间较小时,胶液分配流速尚未达到稳态值。这时系统瞬态响应对流量的影响较大,系统流量等于流速动态响应曲线下的面积。随着开机时间的延长,系统趋于稳态,动态特性对流量的影响逐渐减小。

2.2 胶液可压缩性对动态特性的影响

设系统仿真时间为 8 s,设定开机时间为 3 s,保持其它参数不变,改变体积模量值进行仿真。图 4(b)为 $B=1.003\times10^9,1.203\ 6\times10^9,1.404\ 2\times10^9,1.604\ 8\times10^9$ Pa时系统流速动态拟合响应曲线,可以看出胶液可压缩性越强,流速瞬态响应越慢。反之,胶液可压缩性越小,流速瞬态响应越快。

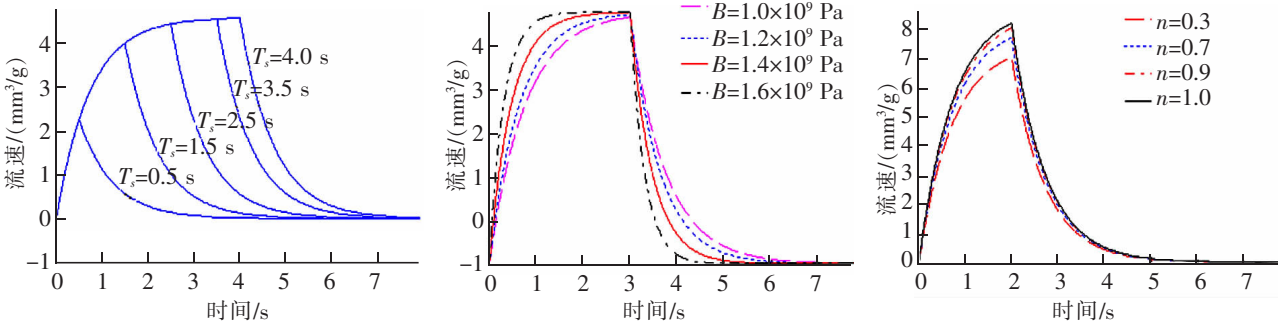
2.3 流体行为对动态特性的影响

在电子封装中多采用非牛顿流体,用幂律方程描述非牛顿流体的流变性,如

$$\tau=K\gamma^n \tag{5}$$

式中: τ 为流体剪应力; γ 为剪切速率; n 为非牛顿系数,表示流体剪切变稀的能力; K 为流体粘度系数,流体粘度越大, K 值越高。

系统仿真时间为 8 s,设定开机时间为 3 s,保持其它参数不变,改变非牛顿系数 n 值进行流速仿真。图 4(c)为, $n=0.3,0.7,0.9,1.0$,时系统流速动态响应曲线,可以看出非牛顿系数越小,流速瞬态响应越慢。



(a) 设定开机时间对流速动态特性的影响 (b) 胶液可压缩性对流速动态特性的影响 (c) 非牛顿性对流速动态特性的影响

图 4 流速动态特性

Fig.4 Dynamic characteristics of flow rate

3 点胶量计算与实验

考虑系统动态特性,在设定时间内,胶体实际流量为系统流速动态曲线与时间轴围成的面积,如图 4(a),图 4(b),图 4(c)所示曲线以下图形的面积,即 $Volume = \rho \int Q(t) dt$,根据系统动态响应曲线,应用 Matlab 函数计算点胶量,如式

$$Volume = \text{trapz}(T, Q) \quad (6)$$

式中: $Volume$ 为点胶量; T 为系统仿真时间; Q 为胶体流速(如图 4 所示流速曲线)。

仿真试验设定开机时间为 2 s,仿真时间为 8 s,利用系统流速动态模型,获得了设定压力和螺杆转速为: $P_p=300$ kPa, $w_d=26.48$ rad; $P_p=300$ kPa, $w_d=19.57$ rad; $P_p=300$ kPa, $w_d=9.049$ rad 条件下的流速动态响应曲线,应用积分的方法计算点胶量。

在以上 3 种条件下,测量了开机时间为 2 s,测定时间为开机后 8 s 时的点胶量。点胶量等于实验测得的位移 y 与储料桶横截面积的乘积。为减小随机误差,每种条件下测得 5 组数据,取平均值,仿真与实验结果如表 2 所示。

表 2 一定时间内不同压强、转速时的点胶量

Tab.2 Volume of fluid for a typical screw-driving system under different pressure and screw desired speed

试验条件	仿真计算	实验测量	误差
$P_p=300$ kPa, $w_d=26.48$ rad	7.55	7.661 5	1.48%
$P_p=300$ kPa, $w_d=19.57$ rad	5.99	6.119 5	2.16%
$P_p=300$ kPa, $w_d=9.049$ rad	3.72	3.57	3.99%

4 结论

综合考虑胶液流变特性、驱动电机的动态特性,应用驱动电机动态模型和胶液流速动态模型串联组成的综合模型,能够较准确地描述螺杆泵点胶系统流速特性。应用 Matlab Simulink 软件分析了设定开机时间、胶液体积弹性模量、流体动态特性对胶液流速动态特性的影响;对比分析应用理论和实验获得的不同设定压强、螺杆转速条件下,一定开机时间内的点胶量,结果表明:

- 1) 随着开机时间的延长,系统趋于稳态,动态特性对流量的影响逐渐减小;
- 2) 胶液可压缩性越强,流速瞬态响应越慢;
- 3) 胶液非牛顿系数越大,流速瞬态响应越慢;

4) 在工程实际应用中,当点胶量精度要求较高时,根据系统流速动态模型,同时考虑开机、停机对系统流速动态特性的影响,可以采用对流速积分的方法预测点胶量。

参考文献:

- [1] CHAN K Y, KWONG C K. Modeling of epoxy dispensing process using a hybrid fuzzy regression approach[J]. International Journal Advanced Manufacturing Technology, 2013, 65(1/4): 589-600.
- [2] CHEN C P, DING H. Run by run control of time-pressure dispensing for electronics encapsulation[J]. International Journal of Automation and Computing, 2008, 5(4): 419-424.
- [3] CHIMATE C, KOC B. Pressure assisted multi-syringe single nozzled deposition system for manufacturing of heterogeneous tissue scaffolds[J]. International Journal Advanced Manufacturing Technology, 2014, 75(1/4): 317-330.

- [4] LEWISA, ADAMSON S, NIELSEN L M, et al. Fluid dispensing capabilities for assembly of MEMS[C]//Proceedings of Workshop on MEMS Sensor Packaging, Lyngby, Denmark, 2003: 22–26.
- [5] 陈从平. 芯片封装中时间—压力点胶过程建模、控制与应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [6] 李章平, 邓圭玲. 精密点胶螺杆泵胶液流动分析与数值仿真[J]. 中国机械工程, 2007, 17(18): 2102–2107.
- [7] CHEN X B. Modeling and off-line control of fluid dispensing for electronics packaging [D]. University of Saskatchewan, Saskatoon, 2002.
- [8] 孙道恒, 高俊川, 杜江, 等. 微电子封装点胶技术的研究进展[J]. 中国机械工程, 2011, 22(20): 2513–2519.
- [9] JIANG P, DENG G L. Numerical simulations of 3D flow in the Archimedes pump and analysis of its influence on dispensing quality[C]//Proceedings of 2007 High density packaging and micro-system integration IEEE, 2007: 1–5.
- [10] CHEN X B. Modeling of rotary screw fluid dispensing process[J]. Journal of Electronic Packaging, 2007, 129(2): 172–178.
- [11] LIU S Z, PENG J Y, ZHANG Y B, et al. Modeling rotary-screw-driven dispensing systems for electronics packaging[J]. IEEE Transactions on components, packaging and manufacturing technology, 2014, 14(8): 1359–1365.
- [12] LIU S Z, PENG J Y, ZHANG Y B, et al. Experiment and dynamic model of motor for rotary-screw-driven dispensing system[J]. Applied Mechanics Material, 2012, 220: 1071–1076.
- [13] RAUWENDAAL C. Polymer Extrusion[M]. Cincinnati, OH, USA: Gardner Publication Inc., 2004.
- [14] CHEN X B, KAI J. Modeling of positive-displacement fluid dispensing processes[J]. IEEE Transactions Electronics Packaging, Manufacturing, 2004, 27(3): 157–163.
- [15] 张德丰. MATLAB/Simulink 建模与仿真实例精讲[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.

Dynamics Analysis of Screw-Driving Dispensing System

Zhang Yubao¹, Liu Shuzhen², Zhao Zhilong²

(1. School of Information Media, Zhejiang Textile & Fashion College, Ningbo 315016, China;
2. International Exchange College, Ningbo University of Technology, Ningbo 315201, China)

Abstract: Screw-driving dispensing system is widely applied with the advantages of high precision and extensive use of fluid. Based on the flow rate dynamics model of screw-driving dispensing system, the influences of operating setting time, bulk elastic modulus of fluid and index of non-newtonian fluid on the dynamics of flow rate were analyzed. It is proved that the longer the system operating time is, the more stable the system is; the stronger bulk elastic modulus and index of non-newtonian, the slower the velocity transient response. Comparing simulation results with experiment results, it is revealed that integration of the flow rate can be used to predict the volume of fluid dispensed with the error less than 5%.

Key words: dispensing system; dynamics; amount of dispensing; flow rate