

文章编号 1004-924X(2008)11-2193-06

ICL7667 实现步进电机高频斩波控制

王永成^{1,2}, 党源源³, 徐抒岩¹, 韩诚山¹, 于涛¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 长春工业大学 计算机科学与工程学院, 吉林 长春 130012)

摘要: 为了提高小内阻步进电机驱动系统中功率 MOSFET 的开关速度, 采用 ICL7667 作为功率 MOSFET 的驱动器来实现步进电机的高频斩波控制。对驱动电路采用的功率 MOSFET 的栅极电容特性、开关时间等进行了研究, 发现栅极电容的充放电过程影响了功率 MOSFET 的开关速度, 提出了提高功率 MOSFET 开关速度的方法。最后, 采用 ICL7667 作为功率 MOSFET 的驱动器实现了步进电机的高频斩波控制。仿真和试验结果表明: 采用 ICL7667 的驱动电路, 可以保证斩波频率为 200 kHz 时, 功率 MOSFET 的漏极输出仍处于截止和深度饱和的状态, 这比采用电阻分压式驱动电路其斩波频率最大为 20 kHz 提高了 10 倍, 可保证小内阻步进电机在高速斩波信号的控制下正确运行。

关键词: ICL7667; 功率 MOSFET; 步进电机; MOSFET 驱动器; 开关特性

中图分类号: TM34 **文献标识码:** A

Realization of high-frequency chopping control for stepper motor based on ICL7667

WANG Yong-cheng^{1,2}, DANG Yuan-yuan³, XU Shu-yan¹, HAN Cheng-shan¹, YU Tao¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*; 2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*; 3. *Department of Computer Science and Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China*)

Abstract: ICL7667 was used as a power MOSFET driver in stepper motor drive system in order to increase switching speed of the power MOSFET and to realize high-frequency chopping control for stepper motor. The gate capacitance and switching time of the power MOSFET were studied. The results show that the charge and discharge processes of gate capacitance affect the switching speed of power MOSFET. So a method increasing the switching speed of the power MOSFET was introduced. Finally, ICL7667 was used as a power MOSFET driver to achieve a high-frequency chopping control for stepper motor. Simulation and test results indicate that the chopping frequency by using ICL7667 can reach up to 200 kHz when the power MOSFET is still in cut-off or deep saturation, which has increased by 10 times as compared with 20 kHz by using voltage division with resistor. In proposed system, stepper motor can run correctly under control of high-speed chopping signal.

Key words: ICL7667; power MOSFET; stepper motor; MOSFET driver; switching property

收稿日期: 2008-08-07; 修订日期: 2008-09-03.

基金项目: 国家重大国防科研项目

1 引言

功率 MOSFET 是单极性载流子晶体管,在特性上与双极型器件表现出很多不同。由于功率 MOSFET 没有积蓄载流子现象,所以具有较高的增益和极快的开关速度,解决了高电流、大电压的问题,它的出现,使 MOS 器件从小功率进入了大功率范围。功率 MOSFET 通常作为开关用在高频开关型功率电路,例如 E 类开关式功率放大器、倍频器和 DC-DC 功率变流器以及中小功率电机调速系统。根据对功率 MOSFET 特性的分析,其驱动通常要求触发脉冲要具有足够快的上升和下降速度,即在开通瞬时,驱动电路应能够提供足够大的充电电流,使 MOSFET 栅源极间电压迅速上升到所需值,并保持稳定,以保证其可靠导通,且不存在上升沿的高频振荡;在关断瞬间,驱动电路应能够提供一尽可能低阻抗的通路,供栅极电容电压快速泻放,以保证其快速关断^[1-6]。

本系统要求步进电机的发热量小,运行时具有较低的低频振荡。小内阻步进电机由于其绕组线圈的电阻很小,因此绕组线圈的功耗相对很低,电机本身的发热量也相对很小,这样对于对散热要求很高的系统,小内阻电机具有较大优势。本系统所采用的步进电机其每相绕组的电阻仅为 0.7Ω ,而其驱动电压高达 100 V ,此类电机的高频性能优越,当其转速为 600 r/min 时,其输出扭矩与转速为 150 r/min 时的输出扭矩基本一致,说明该类电机矩频特性保持很好。为了实现对该步进电机的控制,使其正确运行,本系统采用了基于功率 MOSFET 的斩波平滑驱动电路,斩波频率为 200 kHz ,利用高斩波频率的控制信号,使得绕组电流上升较为平缓,从而不会在电流上升的时间内产生过量的能量,使电机运行平稳得多,低频振荡现象得到有效抑制^[7-8]。本文将对系统所采取的两种驱动电路进行分析和研究,分析影响功率 MOSFET 开关速度的主要因素,通过对功率 MOSFET 驱动特性的分析,提出提高功率 MOSFET 开关速度的方法。选用 ICL7667 作为

功率 MOSFET 的驱动器,显著提高了功率 MOSFET 的开关速度,缩短了它的开关时间,实验证明该驱动电路可以保证步进电机在步进脉冲频率为 1 kHz ,斩波频率为 200 kHz 的控制下正确运行。

2 两种驱动电路的构成及其工作原理

2.1 电阻分压式驱动电路的构成

图 1 为采用的电阻分压式驱动电路原理图。当 E_1 导通时, Q_1 处于截止状态;当 E_1 截止时,此时由于电阻 R_1 和 R_2 的分压作用,使得 Q_1 的栅极电压比源极电压高 10 V , Q_1 处于导通状态,步进电机的绕组线圈有电流通过。 V_1 为续流二极管,当 Q_1 处于截止期间,电机电流经续流二极管续流导通。 E_1 的输入信号是由频率为 1 kHz 的步进脉冲与频率为 200 kHz 的斩波信号做或运算后产生的,采用这种输入信号使得电路的高频

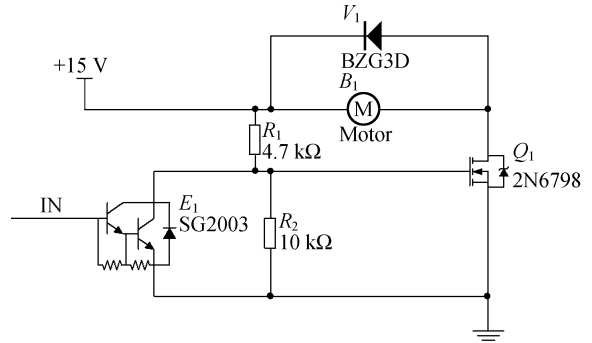


图 1 电阻分压式驱动电路原理图

Fig. 1 Schematic diagram of drive circuit by voltage division with resistor

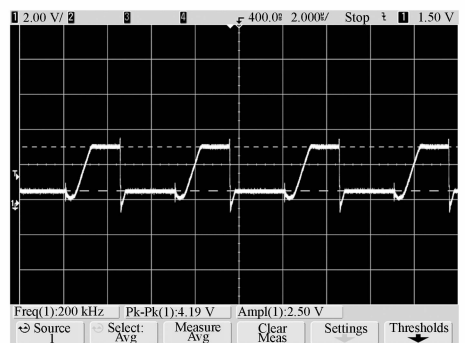


图 2 2N6798 的栅极测试波形

Fig. 2 Waveform of gate of 2N6798 from experiment

性能较好,同时又很好地抑制了低频振荡现象,由此保证了电机运行非常平稳。然而在实际的测试过程中发现 Q_1 并未完全处于截止和深度饱和的状态。图 2 为用示波器测试 2N6798 的栅极所得的波形,其幅值电压为 2.5 V,图 3 为通过 AD6 软件仿真得到的 2N6798 的栅极和漏极的波形,其中上面的曲线是 2N6798 的栅极输入波形,下

面的曲线是 2N6798 的漏极输出波形,从仿真和实测波形可以看出 2N6798 的栅极与源极之间的电压并未达到 10 V,因此 2N6798 并未完全处于截止和深度饱和和这两种状态。下面将从功率 MOSFET 的驱动特性来分析出现这种现象的原因。

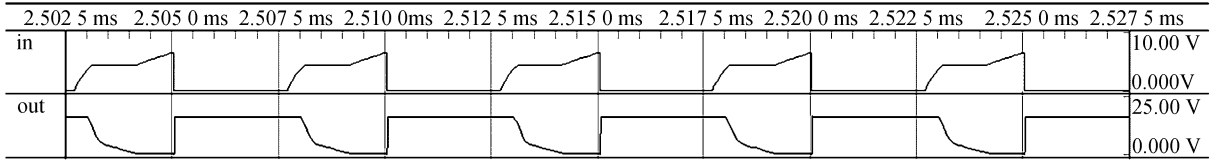


图 3 2N6798 的栅极和漏极仿真波形

Fig. 3 Waveforms of gate and drain of 2N6798 from simulation

2.2 功率 MOSFET 的驱动特性分析

功率 MOSFET 是电压型驱动器件,没有少数载流子的存贮效应,输入阻抗高,因而开关速度可以很高,然而 MOSFET 的极间电容较大,其等效电路如图 4 所示:

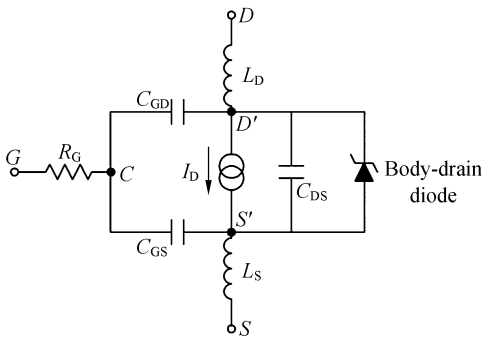


图 4 功率 MOSFET 极间电容等效电路

Fig. 4 Power MOSFET model

MOSFET 的开关性能主要由建立穿过 MOSFET 电容的电压变化所需的时间决定。 R_G 为栅上的分布电阻,与有源区面积成反比, L_S 和 L_D 为源漏端导线电感,约为几十 nH。 C_{GD} 为栅漏电容,它是栅漏电压的非线性函数。 C_{GS} 称为栅源电容,由栅极和源极的交叠区域形成,它的值由交叠区的实际几何尺寸所决定,与所处的运行环境无关。 C_{DS} 称为漏源电容,它是漏源耗尽层间电容,其值受控于 V_{DS} 。然而器件的参考手册中通常给出的是输入电容(C_{iss}),输出电容(C_{oss}),反向

传递电容(C_{rss})的典型值。上述 3 种电容的定义如下:

$$C_{iss} = C_{GS} + C_{GD}, C_{DS} \text{短接}; \tag{1}$$

$$C_{rss} = C_{GD}, \tag{2}$$

$$C_{oss} = C_{DS} + C_{GD}. \tag{3}$$

C_{GS} 、 C_{GD} 以及 C_{DS} 的大小及其变化成为影响功率 MOSFET 开关过程的关键因素,图 5 描述了功率 MOSFET 典型的栅极充电波形,从图 5 中可以看出其充电过程分为 4 个阶段:

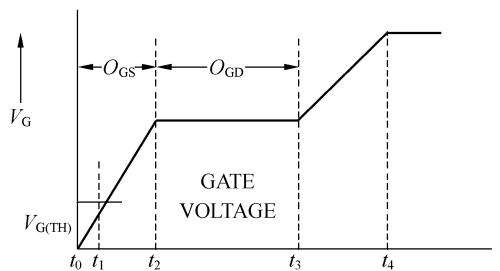


图 5 功率 MOSFET 栅极充电波形

Fig. 5 Waveform of gate charge of power MOSFET

(a) $t_0 \sim t_1$: t_0 时刻给功率 MOSFET 加上理想开通驱动信号,栅极电压从 0 上升到门限电压 $V_{G(th)}$,此时 C_{GS} 开始充电;

(b) $t_1 \sim t_2$: 此阶段 C_{GS} 继续充电,漏电流随着栅极电压的上升而线性增大,在 t_2 时刻, C_{GS} 充电完成,漏电流达到 I_D 并保持该值,而漏电压开始下降;

(c) $t_2 \sim t_3$: V_{GS} 保持不变, 驱动电流开始为密勒电容(C_{GD})充电, 这一过程持续到 t_3 时刻, 在 $t_2 \sim t_3$ 阶段由于漏极电压的迅速变化导致对密勒电容的充电时间比对栅源电容(C_{GS})充电的时间长;

(d) $t_3 \sim t_4$: 当密勒电容(C_{GD})和栅源电容(C_{GS})充电完成, 栅极电压又开始上升, 在 t_4 时刻达到栅极的供电电压。

功率 MOSFET 栅极电容放电过程与其充电过程正好相反, 也可以分为 4 个阶段, 本文不详述其放电过程。通过上述功率 MOSFET 栅极充放电过程的叙述可知, 采用电阻分压式驱动电路其功率 MOSFET 的开关速度慢的原因就是由于栅极电容的充放电所造成的。MOSFET 导通和截止的速度与 MOSFET 栅极电容的充电和放电速度的关系可以用公式(4)来表述:

$$dT = \frac{dV \times C}{I}, \tag{4}$$

式中:

dT 为导通/截止时间;

dV 为栅极电压;

C 为栅极电容;

I 为峰值驱动电流(对于给定电压值)。

而栅极电荷 $Q = C \times V$, 故公式(4)又可以写成如下形式:

$$dT = \frac{Q}{I}, \tag{5}$$

式中: Q 为总栅极电荷。

如果要缩短充电时间, 可以通过两种方式来解决, 一是增大栅极驱动电流, 二是减小栅极电阻阻值。如果减小栅极电阻会使得栅极电阻的功耗变大, 这对于对功耗有严格限制的系统来说是不可行的, 例如前述电阻分压式驱动电路, 如果将 4.7 k Ω 和 10 k Ω 的电阻分别换成 470 Ω 和 1 k Ω , 这样当 E_1 截止时栅源极之间的电压不变, 仍为 10 V, 然而 470 Ω 电阻的功耗却是 4.7 k Ω 电阻功耗的 10 倍。因此通过增大栅极驱动电流来提高功率 MOSFET 的开关时间是一个很好的选择。

2.3 带有功率 MOSFET 驱动器的驱动电路构成

ICL7667 是一款 MAXIM 公司生产的低功耗双路功率 MOSFET 驱动器, 由于其较低的延迟和过渡时间使其在开关电源、电机控制器以及 DC-DC 转换器领域得到了广泛的使用, 负载为 1 000 pF 时, 其上升和下降时间的典型值为

20 ns, 就是说当负载为 1 000 pF 时, 输入信号的频率可以高达 50 MHz, 当输入信号为低电平时其功耗为 6 mW, 输入信号为高电平时其功耗为 120 mW^[12]。从 2N6798 的数据手册所提供的总栅极电荷与栅源电压的曲线图可以获知, 当 2N6798 的漏源电压为 15 V, 栅极电压为 10 V 时其栅极总电荷约为 16 nC, 则其栅极电容约为 1 600 pF; 当开关频率 200 kHz 时, 根据公式(5)可得峰值驱动电流为 3.2 mA。图 6 为一路带有功率 MOSFET 驱动器的驱动电路原理图, 当 ICL7667 的输入为 TTL/CMOS 低电平时, 其输出为高电平(10 V), Q_1 导通; 反之, 当其输入为 TTL/CMOS 高电平时, 其输出为低电平(0 V), Q_1 截止。图 7 是图 6 所示电路中 2N6798 栅极的实测波形, 其幅值电压为 10.2 V, 其中 ICL7667 的输入信号是由频率为 1 kHz 的步进脉冲与频率为 200 kHz 的斩波信号做或运算后产生的, 从实测波形可以看出在斩波频率为 200 kHz 的信号控制下, 2N6798 处于截止和深度饱和状态, 说

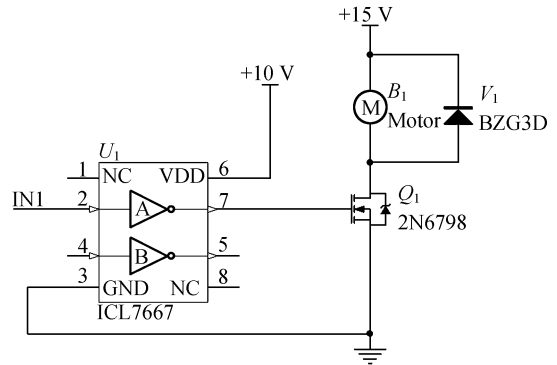


图 6 带有功率 MOSFET 驱动器的驱动电路原理图
Fig. 6 Schematic diagram of drive circuit with MOEFET driver

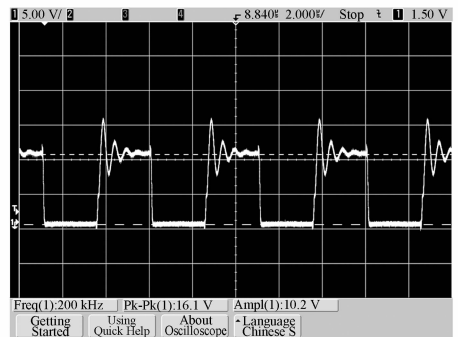


图 7 图 6 所示电路中 MOSFET 的栅极测试波形
Fig. 7 Waveform of gate of MOSFET from experiment

明采用 ICL7667 后加大了 2N6798 栅极电容的驱动电流,进而提高了 2N6798 的开关速度,从而解决了利用电阻分压式驱动电路所带来的问题,电机在这种驱动信号的控制下可以正确运行。采用前述的电阻分压式驱动电路,由于增大了栅极电阻使得栅极电容的充放电时间变长,进而降低了功率 MOSFET 的开关速度,因此影响了驱动电路斩波频率的提高。经仿真只有当斩波频率不大于 20 kHz 时,2N6798 才能很好地处于截止和深

度饱和状态,图 8 为当斩波频率为 20 kHz 时,电阻分压式驱动电路中 2N6798 的栅极和漏极的仿真波形。采用 ICL7667 实现步进电机的高频斩波控制后,与电阻分压式电路相比在输出扭矩相等的情况下,输入功率仅是电阻分压式电路的 0.67 倍,即效率比原电路提高了 50%。在电机运行时间相等的情况下,用热像仪观测 2N6798 的壳温,采用电阻分压式电路其最高壳温为 80 °C,而采用 ICL7667 后其最高壳温为 40 °C。

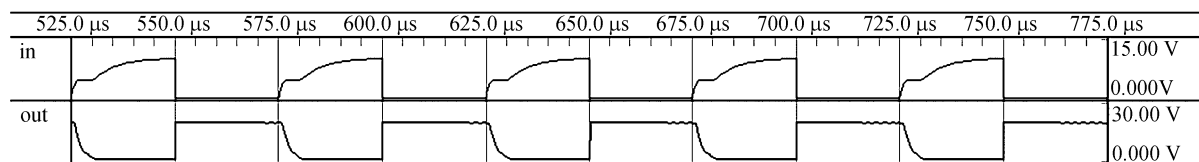


图 8 斩波频率为 20 kHz 时 2N6798 的栅极和漏极仿真波形

Fig.8 Waveforms of gate and drain of 2N6798 in 20 kHz chopping frequency from simulation

3 结 论

功率 MOSFET 的开关速度与其极间电容的充放电时间密切相关,通过缩短极间电容的充放电时间可以很好地提高功率 MOSFET 的开关速度,本文通过对小内阻步进电机驱动系统两种驱动电路的比较和试验,详细分析了功率 MOSFET 的栅极电容充放电的过程,以及其对功率 MOS-

FET 的开关速度的影响,并提出了提高功率 MOSFET 开关速度的方法。采用基于 ICL7667 的步进电机高频斩波控制电路,实现了对小内阻步进电机的高频斩波控制。通过采用一种新的器件 ICL7667 构成一种新的驱动电路使得系统的斩波频率比采用电阻分压式驱动电路的斩波频率提高了 10 倍,从而使其在 200 kHz 的开关信号控制下,保证了小内阻步进电机正确运行,且效率比原电路提高了 50%。

参考文献:

- [1] 衡草飞,向军利,李肇基,等. Power MOSFET 栅电荷分析及结构改进[J]. IC 工程,2004,9:59-61.
HENG C F,ZHANG J L,LI ZH J, et al.. Gate charge analysis and structure improvement of Power MOSFET[J]. *IC Engineering*, 2004, 9: 59-61. (in Chinese)
- [2] 钟静宏,张承宁. 基于脉冲电源的 MOSFET 驱动电路研究及应用[J]. 航空精密制造技术,2006,42(3):57-62.
ZHONG J H,ZHANG CH N. Analysis and application of MOSFET drive circuit for pulse power[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2006,42(3):57-62. (in Chinese)
- [3] 王志强,王莉. 一种新颖的 MOSFET 驱动电路[J]. 电力电子技术,2005,39(1):92-94.
WANG ZH Q,WANG L. A novel MOSFET drive circuit[J]. *Power Electronics*, 2005,39(1):92-94. (in Chinese)
- [4] 鲁莉容,李晓帆,蒋平. 功率 MOSFET 高速驱动电路的研究[J]. 电力电子技术,2001,35(6):45-47.
LU L R,LI X F,JIANG P. Research on quickly driving circuit of Power MOSFET[J]. *Power Electronics*, 2001,35(6):45-47. (in Chinese)
- [5] 段德山,徐申,孙伟锋. 一种用于无刷直流电机控制系统的 MOSFET 栅极驱动电路[J]. 电子器件,2008,31(2):533-536.
DUAN D SH,XU SH,SUN W F. Drive circuit design of Power MOSFET for control system of BLDC[J]. *Chinese Journal of Electron Devices Instrument*,2008,31(2):533-536. (in Chinese)

- [6] WILLIAM H D. The design of a family of high-current switchers with over-current and over-temperature protection [J]. *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 1998, 47(6): 1492-1502.
- [7] 刘建芳, 杨树臣, 杨志刚, 等. 新型压电精密步进旋转驱动器研究[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(4): 594-601.
LIU J F, YANG SH CH, YANG ZH G, *et al.*. Study on precision PZT rotary step actuator with inner anchor/looser[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 594-601. (in Chinese)
- [8] 杨树臣, 刘建芳, 杨志刚, 等. 外驱动双向推力型压电步进精密驱动器研究[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(4): 652-657.
YANG SH CH, LIU J F, YANG ZH G, *et al.*. Study on outer driving precision PZT linear step actuator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 652-657. (in Chinese)
- [9] JESS B, GUY M. *Power MOSFET Basics; Understanding MOSFET Characteristics Associated With The Figure of Merit*[R]. Vishay Siliconix, 2005.
- [10] K. S. Oh. *MOSFET Basics* [R]. Fairchild Semiconductor, 2000.
- [11] RALPH L. *Introduction to Power MOSFETs and Their Applications*[R]. National Semiconductor, 1988.
- [12] ICL7667 Data Sheets[Z]. MAXIM, 1989.

作者简介: 王永成(1980—), 男, 甘肃嘉峪关人, 博士研究生, 主要研究方向为自动控制。E-mail: wyc_dyy@sina.com
徐抒岩(1963—), 男, 吉林人, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为空间光学传感器计算机控制、图像处理等。

● 下期预告

积层式铌酸锂单元在超声波驱动器上的应用研究

Jens Twiefel¹, Takeshi Morita²

(1. Heinz Nixdorf Institute, Mechatronics and Dynamics,

University of Paderborn. Fürstenallee 11, 33102 Paderborn, Germany.

2. Graduate School of Frontier Sciences, The Univ. of Tokyo Kashiwanoha 5-1-5,

Kashiwa, 277-8563, Japan.)

超声波驱动器具有广泛的应用领域, 如超声焊接、超声车削、超声铣削等, 这些都需要超声振动或超声马达提供技术支撑。典型的压电超声波驱动器采用 PZT 压电陶瓷驱动。由于不断提出对产品中含铅量的限制, 近来可用于超声波驱动器的可替换材料的研究愈发引人关注。本文研究了一种新型替代材料 LiNbO_3 (Lithium Niobate), 该材料是一种无铅材料, 其居里点温度高达 $1\ 210\ ^\circ\text{C}$ 。论文工作分为两部分: 首先提出一种制备 LiNbO_3 积层式驱动器的方法, 在此基础上研究了制备的这种换能器的结构和性能特点。实验结果表明, 在谐振频率为 $23.5\ \text{kHz}$ 时, 该换能器可获得的最高振动幅度达 $3.5\ \mu\text{m}$ 。