

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2018.05.016

# 超声电机温度-转速特性及补偿方法研究

高炳东,张丛巨,王红茹,熊官送

(北京自动化控制设备研究所,北京 100074)

**摘要:**针对超声电机转速随温度升高而明显降低的问题,基于电机等效电路模型,分析了电机温升对 LC 谐振电路电压增益和压电陶瓷片机械谐振点的影响。通过实验数据拟合计算,提出了一种针对温度变化对控制信号频率进行补偿的方法,并通过实验验证了该温补算法的有效性。

**关键词:**超声电机;温度补偿;LC 谐振电路;压电陶瓷;共振频率

中图分类号:TM35;TB523

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2018)05-0096-05

## Research on Temperature-Compensation Method of USM

GAO Bing-dong, ZHANG Cong-ju, WANG Hong-ru, XIONG Guan-song

(Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China)

**Abstract:** To solve the problem of the speed of Ultrasonic Motor(USM)decreasing with the increasing temperature, by fitting and calculating the experimental data, a temperature-compensation method is proposed after analyzing the effect of temperature-rise on the voltage gain of LC resonance circuit and the resonant frequency of piezoelectric material based on the equivalent circuit model of the motor. The validity of the compensation algorithm is verified experimentally.

**Key words:** USM; Temperature-compensation; LC resonance circuit; Piezoelectric ceramics; Resonant frequency

### 0 引言

超声电机是一种新型的运动控制部件,因具有低噪声、快响应、自锁、无电磁干扰等优点<sup>[1]</sup>,在小型无人机、小型导弹等小功率制导武器执行机构领域,能大大改善伺服系统体积、质量、快速性、控制精度、电磁兼容性等方面的特性,对作动系统小型化、推动武器装备跨代升级具有重要意义。

然而由于包含压电能量转换、摩擦能量传递等过程,超声电机存在温升大的缺点,且由于 LC 谐振电路电压增益和压电陶瓷片机械谐振点对温度敏感,导致电机转速随温度升高而明显降低这一问题。

本实验使用电机在频率为 40.931kHz 的控制信号下,电机温度和转速随时间推移变化曲线如图

1 所示。在运行 20min 后,电机温度从 25℃ 升高到 55℃,由此导致转速由 0.85 rad/s 降至 0.30 rad/s。

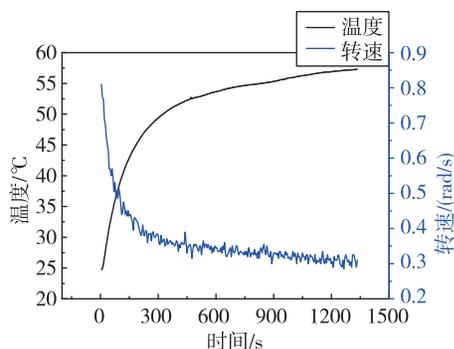


图1 在 40.931kHz 控制信号下电机运行温度和转速变化

Fig.1 The graph of the temperature and speed with 40.931kHz control signal

收稿日期:2017-08-08;修订日期:2017-10-21

作者简介:高炳东(1991-),男,硕士,主要从事伺服系统控制方面的研究。E-mail: 875625367@qq.com

因此,针对温度变化对控制信号频率进行补偿,是控制电机速度的一种有效办法<sup>[2]</sup>。文献[3]、文献[4]提出了线性温度补偿方法,即调节控制信号频率  $\Delta f$  与电机温升  $\Delta T$  成正比,以保证速度恒定。但根据实验分析,电机工作温度在  $20^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$  区间内,该线性补偿方法无法满足工程所需转速精度要求。

本文基于电机等效电路模型,分析了电机温升对 LC 谐振电路电压增益和压电陶瓷片机械谐振点的影响,结合实验数据拟合和计算,提出了一种针对温度变化对控制信号频率进行补偿的方法,并通过实验验证了该温补算法的有效性。

### 1 超声电机等效电路模型

超声电机利用压电陶瓷片的逆压电效应产生振动,继而通过摩擦传动的方式带动转子转动。电机转速与压电陶瓷片振动频率和振动幅度成正相关关系。其中振动频率等同于控制信号频率;振动幅度一方面取决于控制信号电压(驱动电路输出电压幅值与 LC 谐振电路电压增益的乘积);另一方面取决于压电陶瓷片的机械谐振增益(控制信号频率越接近于压电陶瓷片机械谐振点,机械谐振增益越大,转速越大)。

超声电机的等效电路,是利用机电转换机理把机械传动等效为电学网络,用电学变量表示内部的机械运动特性,从而实现了对超声电机特性分析的仿真。

超声电机采用压电陶瓷片作为主要驱动元件,呈现容性负载特性。图 2 为其中一种简洁有效的等效电路模型<sup>[5]</sup>。

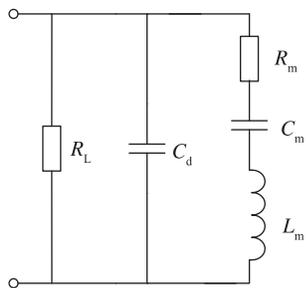


图 2 超声电机等效电路模型

Fig. 2 The equivalent circuit model of USM

其中,  $R_L$  为 LC 电路损耗的等效电阻;  $C_d$  为压电陶瓷片的静电容;  $L_m$  为质量效应的等效电感;  $C_m$  为弹性效应的等效电容;  $R_m$  为机械损耗的等效电阻。

在工程应用中,为提高有功功率传输效率和滤

除倍频信号干扰,将一电感  $L_s$  与电机串联,构成 LC 谐振匹配电路如图 3 所示。

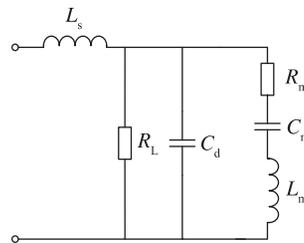


图 3 超声电机匹配电路

Fig. 3 The matching circuit of USM

图 3 中,  $L_s$  和  $C_d$  构成 LC 谐振电路,影响电压增益,进而影响压电陶瓷片的振动幅度;  $R_m$ 、 $C_m$  和  $L_m$  构成压电陶瓷片振动模型,表征压电陶瓷片内部能量转换和消耗情况,影响机械谐振增益,最终影响压电陶瓷片的振动幅度。

### 2 电机温升对电机转速影响分析

#### 2.1 电机温升对 LC 谐振电路电压增益的影响

LC 谐振电路具有电压增益作用,随着 LC 值随温度变化,一定频率的控制信号的电压增益也有所差异<sup>[6]</sup>。如图 4 所示,频率为  $43\text{kHz}$  的控制信号,在  $-50^{\circ}\text{C}$  时电压增益为 1.72,  $90^{\circ}\text{C}$  时电压增益为 3.35。为避免电压增益差异过大,在硬件电路上已对 LC 谐振电路输出电压进行限幅,即等效 LC 谐振电路电压增益上限限定为某一定值  $A_m$  (该系统取 1.75)。

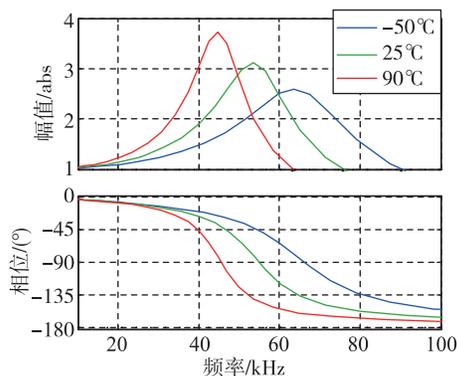


图 4 不同温度下的 LC 谐振系统伯德图

Fig. 4 The bode diagram of LC resonance system at different temperature

图 3 模型中, LC 谐振电路所对应传递函数为

$$G(s) = \frac{1}{L_s C_d s^2 + \frac{L_s}{R_L} s + 1} \quad (1)$$

对应的幅频特性函数为

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(1 - L_s C_d \omega^2)^2 + \left(\frac{L_s}{R_L} \omega\right)^2}} \quad (2)$$

改为以频率作为自变量。

$$A(f) = \frac{1}{\sqrt{(1 - 4\pi^2 L_s C_d f^2)^2 + \left(\frac{L_s}{R_L} 2\pi f\right)^2}} \quad (3)$$

其中,机械损耗等效电阻  $R_L$  (1.8kΩ)、外加电感  $L_s$  (1.7mH)对温度不敏感<sup>[7]</sup>,而电机的静电容呈明显的正温系数特性,实测曲线和拟合结果如图5所示。

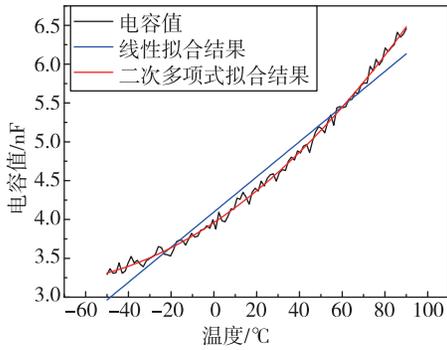


图5 静电容  $C_d$  温度变化曲线

Fig. 5 The curve of capacitance-temperature for  $C_d$

其中,用一次多项式拟合的结果拟合度  $R^2$  为 0.96731,用二次多项式拟合的结果拟合度  $R^2$  为 0.99648,选用二次多项式结果,电容值表达式为

$$C_d(T) = 1 \times 10^{-4} T^2 + 0.019T + 3.958 \quad (4)$$

将式(4)代入式(3),得到电压增益对温度  $T$  和控制信号频率  $f$  的二元函数  $A(T, f)$ ,在实际工作温度 30~70℃和控制信号频率 39~43kHz 区间下,对应曲线如图6所示。

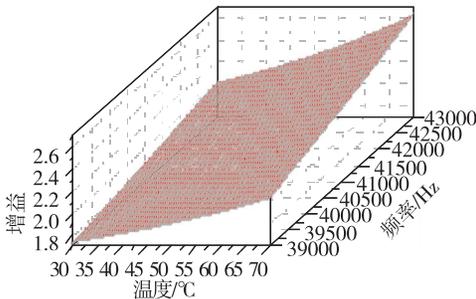


图6 电压增益对温度和控制信号频率的二元函数曲线

Fig. 6 The function curve of the voltage gain to the temperature and the frequency of control signal

电路限幅后,99.72%的增益数据点均被限幅为上限值  $A_m$ 。可以认为,LC 谐振电路在不同温度下均有着统一的增益。因而,电机温升对速度的影响基本与 LC 电压增益变化无关。

### 2.2 电机温升对压电陶瓷片机械谐振点的影响

在选定工作振型阶次的机械谐振点的邻域内,频率越偏离,机械谐振增益越低<sup>[8]</sup>,随着机械谐振点随温度漂移,一定频率的控制信号的机械谐振增益也有所差异。

由图3模型,压电陶瓷片振动的机械谐振点频率  $f_m$  为

$$f_m = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_m C_m}} \quad (5)$$

由于所用金属材料的弹性模量与温度成反比,温度越高,弹性体的弹性模量越小,即表征弹性效应的等效电容  $C_m$  越大,则机械谐振点频率下降。

对压电陶瓷片进行试验模态分析<sup>[9]</sup>,在选定振型阶次频率范围内的机械谐振点-温度数据组,如图7所示。

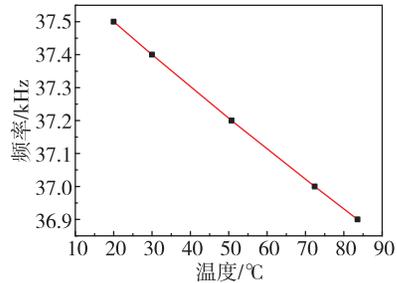


图7 压电陶瓷片机械谐振点-温度曲线

Fig. 7 The curve of the resonant frequency-temperature for piezoelectric material

由此可见,电机温升使压电陶瓷片机械谐振点的漂移明显,导致了速度的变化。

### 3 温度补偿方法

通过以上分析,温升使压电陶瓷片机械谐振点漂移,在一定控制信号频率下的机械谐振增益发生非线性变化,最终导致了电机转速随温度升高而明显降低的问题。

因此设电机转速  $V$  (rad/s)是以温度  $T$  (°C)和控制信号频率  $f$  (kHz)为自变量的二元函数  $V(T, f)$ 。

在温度点  $T = 72.3$ ℃条件下,扫频得到的电机转速特性  $V = V(f)$ ,如图8所示。

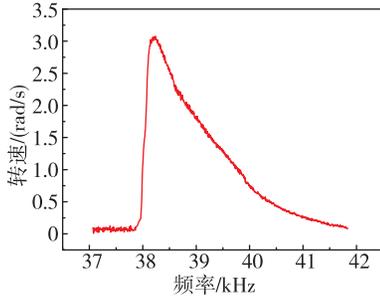


图 8 电机控制信号频率-转速特性曲线

Fig. 8 The characteristic curve of frequency-speed for motor control signal

在控制信号频率(38.5, 43)的区间内,以二次多项式拟合,拟合度  $R^2$  为 0.99782,得到  $V = V(T, f)$  的一个边界条件。

$$V = 0.229f^2 - 19.119f + 398.574 \quad (T = 72.3^\circ\text{C}) \quad (6)$$

几个控制信号频率下的转速-温度曲线  $V = V(T)$ ,如图 9 所示。

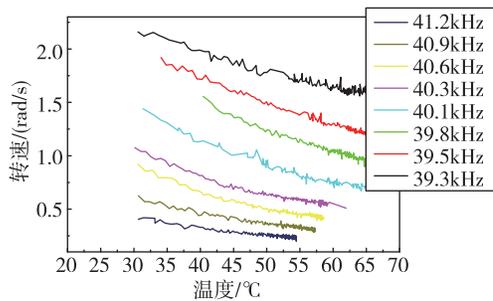


图 9 几个控制信号频率下的转速-温度曲线

Fig. 9 The speed-temperature curves with different frequency of control signals

进行线性拟合,拟合情况如表 1 所示。

表 1 转速-温度曲线拟合情况

Tab. 1 The speed-temperature curve fitting results

信号频率/kHz	线性拟合斜率	拟合度 $R^2$
41.21	-0.00683	0.89531
40.93	-0.00961	0.94484
40.65	-0.01410	0.93755
40.38	-0.01478	0.93436
40.11	-0.01946	0.94436
39.85	-0.02090	0.97244
39.59	-0.02114	0.98498
39.33	-0.01643	0.95482

与原始 1900 多个数据点比较,利用该式求得的转速  $V$  误差最大仅为 0.16rad/s,可见该拟合式有效。

以  $\sum_{i=1}^8 R^2(k_i - k) = \min$  为最优目标<sup>[10]</sup>,求得

$k = -0.019$ ,以定斜率拟合其中一条,得到  $V = V(T, f)$  的另一个边界条件。

$$V = -0.019T + 1.923 \quad (f = 40.11\text{kHz}) \quad (7)$$

最终求得  $V = V(T, f)$ 。

$$V = 0.229f^2 - 19.119f - 0.019T + 399.982 \quad (8)$$

由此,即可得温度补偿表达式。

$$f = 2.08864(\pm\sqrt{V + 0.01947T - 1.34204} + 19.96597) \quad (9)$$

在实际工作温度  $30^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$  和可控信号频率  $39 \sim 43\text{kHz}$  区间下<sup>[11]</sup>,定转速 ( $V$ ) 下的控制信号频率 ( $f$ ) 和温度 ( $T$ ) 曲线,即转速等高线图 10 所示。

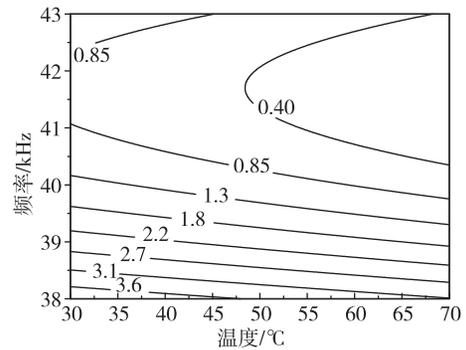


图 10 电机转速对温度和控制信号频率的等高线图

Fig. 10 The function curve of the speed to the temperature and the frequency of control signal

以上得到了定转速 ( $V$ ) 下的控制信号频率 ( $f$ ) 和温度 ( $T$ ) 曲线,依据式(9)根据温度变化,在可控频率范围内沿着曲线对控制信号频率进行补偿,可较有效地抵消温度对速度的影响,即可进行准确的电机速度控制。

#### 4 实验验证

应用以上算法,在初始频率为 40.931kHz 的控制信号下,设定转速  $V = 0.5\text{rad/s}$ ,电机温度和转速随时间推移变化曲线如图 11 所示。温度同样由  $30^\circ\text{C}$  升至  $55^\circ\text{C}$  的情况下,未加温度补偿算法时的电机转速由  $0.65\text{rad/s}$  降至  $0.30\text{rad/s}$ ,转速波动范围大小为  $0.30\text{rad/s}$ 。加温度补偿算法后的电机转速能稳定跟随设定  $0.50\text{rad/s}$  的控制信号,波动范围大小为  $0.02\text{rad/s}$ 。对比可见温度补偿算法的有效性和高精度。

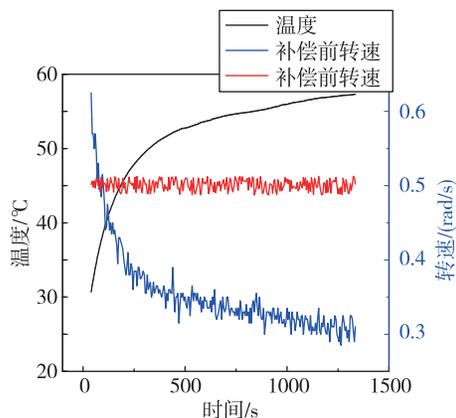


图 11 加温度补偿后 40.931kHz 控制信号下电机运行温度和转速变化

Fig. 11 The graph of the temperature and speed with 40.391kHz control signal after temperature compensation

## 5 结论

本文通过电机等效电路模型分析了电机温升对 LC 谐振电路电压增益和压电陶瓷片机械谐振点的影响,应用了数据拟合计算,提出了一种简洁有效、高精度的温度补偿算法,解决了超声电机转速随温度升高而明显降低的问题。该方法可适用于其他类型的压电作动器,具有较高的工程应用价值。

### 参考文献

[1] 史敬灼. 超声波电机运动控制理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2011.

- [2] 田秀, 曲建俊, 周宁宁. 几个影响行波型超声电机真空低温性能的因素[C]// 第十三届中国小电机技术研讨会. 上海, 2008: 356-360.
- [3] 芦小龙, 丁庆军, 李华峰, 等. 行波型旋转超声电机的低温特性[J]. 振动、测试与诊断, 2010, 30(5): 530.
- [4] 王光庆. 行波型超声电机的若干关键问题研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [5] 赵淳生. 超声波电机技术与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [6] 胡寿松. 自动控制原理(第五版)[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [7] Wang D, Fotinich Y, Carman P G. Carman influence of temperature on the electromechanical and fatigue behavior of piezoelectric ceramics[J]. Journal of Applied Physics Volume, 1998, 83(10): 5342-5350
- [8] 曾金松, 陈超, 赵淳生. 旋转型行波超声电机定子模态频率一致性调节[J]. 南京航空航天大学学报, 2006, 38(5): 605-608.
- [9] 陈如娟, 陈超, 宋小刚. 微小旋转型超声电机瞬态特性测试机机械特性估计方法[J]. 中国机械工程, 2011, 22(11): 1284-1287.
- [10] 李庆阳, 王能超, 易大义. 数值分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [11] Jang M J, Chen C L, Lee J R. Modeling and control of a piezoelectric actuator driven system with asymmetric hysteresis[J]. Journal of the Franklin Institute, 2009, 346(1): 17-32.