

文章编号 1004-924X(2008)10-1895-06

轴系超声波悬浮支撑技术研究

彭大江^{1,2}, 杨志刚², 田丰君², 程光明³, 曾平³, 阚君武²

(1. 深圳大学 机电控制与工程学院, 广东 深圳 518060; 2. 吉林大学 链传动研究所, 吉林 长春 130025;
3. 吉林大学 机械科学与工程学院, 吉林 长春 130025)

摘要:利用设计的实验装置,对轴系超声波悬浮支撑间隙进行了测试。测试结果表明,当悬浮间隙大于两接触表面粗糙度总和时,轴被悬浮起来;对比测试了两种不同材料转轴的悬浮间隙,在压电换能器驱动信号频率为 21.34 kHz,驱动电压由 100 V 增加到 220 V 时,铝合金轴的平均悬浮间隙从 12.49 μm 增加到 52.97 μm ,铁轴的平均悬浮间隙从 10.21 μm 增加到 43.86 μm 。

关键词:飞轮储能系统;超声波悬浮轴承;悬浮技术;小卫星

中图分类号:V474.6;TH117 **文献标识码:**A

Investigation on ultrasonic levitative support to high speed axis in fly wheel

PENG Tai-jiang^{1,2}, YANG Zhi-gang², TIAN Feng-jun²,
CHENG Guang-ming³, ZENG Ping³, KAN Jun-wu²

(1. *College of Mechatronic Control and Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;*
2. *Chain Transmission Institute, Jilin University, Changchun 130025, China;*
3. *College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China*)

Abstract: Based on a designed test equipment, the interstice of ultrasonic levitative support was measured. The results show that the axis can be levitatively supported when the interstice is larger than the summation roughness of scratch surfaces. The interstices of two different material axes (aluminum and iron) were tested, the average levitative interstice of aluminum alloy axis increases from 12.49 μm to 52.97 μm and that of iron axis increases from 10.21 μm to 43.86 μm under the condition of voltage from 100 V to 220 V and frequency of 21.34 kHz.

Key words: fly wheel storage system; ultrasonic levitative bear; levitation technology; microsatellite

1 引言

近年来,随着空间技术的迅速发展,一种功能密度高、成本低、质量小、体积小、研制周期短的小卫星^[1]受到了普遍关注,并在国民经济中发挥着越来越重要的作用。飞轮储能/姿态调整系统是小卫星系统中的关键技术之一,近期已成为国内外研究的热点领域^[1-12]。飞轮储能系统一般由高速飞轮、轴、轴承、电动机/发电机、真空容器和电力电子装置组成。它采用一种以旋转动能储存能量的机械储能方式,其充放电效率可达到 85%~90%,远远高于目前采用的电池系统(只能达到 65%左右)。飞轮储能系统成功应用的关键是提高飞轮角动量/质量比,一般可以通过以下两条途径来实现:一是对飞轮结构进行优化设计,二是提高飞轮转速^[11]。目前,受轴承性能的限制飞轮转速较低^[12],传统机械轴承由于摩擦系数大且极限转速较低(不超过 26 000 r/min),不宜在高速飞轮储能系统中使用。为了提高飞轮储能系统的储能密度,减小功率损耗,提高系统的综合性能,人们对飞轮轴系的支撑技术开展了深入研究。由于磁悬浮轴承技术相对比较成熟,因而目前的研究主要集中在高性能磁悬浮轴承方面^[13-25]。在飞轮系统中,主动式磁悬浮轴承更适合高速旋转的场合。为了获得稳定的悬浮力和悬浮间隙,磁悬浮轴承需要复杂的控制系统,且结构相对复杂,体积较大,还存在较大的损耗。随着高温超导材料的出现,许多国家开展了高温超导磁悬浮轴承的研究^[15],文献^[16-17]的研究表明:(1)由于电磁力的存在导致磁悬浮轴承中存在电磁摩擦,在高速运转状态下发热严重,需要复杂的冷却系统;(2)在工作状态下,为了获得稳定的悬浮力和悬浮间隙,所产生的磁场是不均匀的,不均匀磁场的存在导致悬浮力和转子转速降低;(3)超导磁悬浮轴承的低刚度和阻尼会导致转轴振动。上述问题也限制了磁悬浮轴承在飞轮储能/姿态控制系统中的应用。近年来也有人提出采用无轴承电机技术^[14]来提高飞轮转速,目前的研究工作主要集中于试验研究、技术开发和证明各种结构的电机在无轴承电机技术中应用的可行性,国际上对无轴承电机的研究还处于探索研究阶段。

在对超声振动物体表面摩擦性能研究的过程

中发现:超声振动物体表面能降低接触面间的摩擦系数,而且如果振幅足够大,能将物体悬浮起一定距离;因此,将超声波悬浮技术应用于飞轮高速轴系支撑值得尝试和探索。通过实验装置测试了超声波振动对轴的悬浮能力,为今后的研究奠定基础。

2 超声波悬浮技术

2.1 超声波悬浮与减摩

超声波悬浮技术最早是 1886 年 Kundt 发现的,20 世纪 80 年代以来,各国科学家对声悬浮技术及其应用开展了深入研究^[18-21],吉林大学压电驱动与控制技术研究所对超声波悬浮作用机理进行了深入研究^[22-25],结果表明:

(1)当超声振动振幅小于两接触面的表面粗糙度 R_a 总和时,表现为减摩作用,即两表面间的摩擦系数减小,可使摩擦系数降低为静态摩擦状态时的 10%,大大降低接触面间的摩擦磨损。

(2)当超声振动振幅超过两接触面的表面粗糙度 R_a 总和时,表现为悬浮作用,振幅越大,悬浮间隙越大。超声波振动振幅足够大时,可以对物体形成悬浮能力,悬浮效果如图 1 所示。可构造各种超声波悬浮支撑结构,用于特殊场合的悬浮输送及非接触支撑。

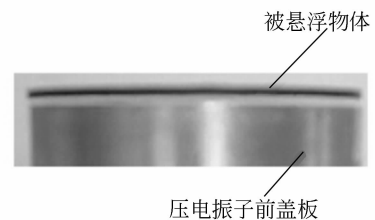


图 1 超声波悬浮效果示意图

(物重 30 g, 悬浮间隙 1.5 mm)

Fig. 1 Scheme of ultrasonic levitation effect

(Weight: 30 g, Interstice: 1.5 mm)

物体在太空环境下只有质量而没有重量,不管飞轮轴系质量多大,只要有一定的悬浮力就可以形成悬浮支撑。目前,超导磁悬浮轴承的悬浮力密度可达到 8 N/cm^2 左右^[15],研究结果表明超声波近场悬浮(悬浮间隙数十微米)所形成的悬浮力密度可达到 8.5 N/cm^2 左右^[18],这表明超声波悬浮技术在空间环境下具有较大的研究价值和前景。

2.2 超声波悬浮支撑自动调心原理

超声波悬浮支撑系统结构如图 2 所示, 压电换能器对称均匀布置 4 组压电陶瓷, 前盖板与轴之间预留装配间隙 δ (假设各方向间隙均匀), 如果他们施加同样的驱动信号, 在前盖板内表面就会产生振动, 对物体形成均匀的悬浮力 F ; 如果旋转轴突然受到外载荷作用引起偏心, 前盖板和轴之间的间隙 δ 就会发生变化, 设变化量为 Δ , 同一轴线上侧间隙变小 ($\delta - \Delta$) 而反方向一侧间隙变大 ($\delta + \Delta$); 此时, 在间隙变小的一侧, 由于超声波辐射压的作用增强, 对物体的作用力将变大为 $F + f$ (f 为间隙变化引起的辐射压变化), 而间隙变大的一侧, 超声振动对物体的作用力就变小为 $F - f$, 在同一轴线上就会产生 $2f$ 的力将轴沿中心向间隙较大的一侧推, 直到间隙恢复为 δ 为止。这就是超声波悬浮支撑系统自动调心过程, 由此可以看出, 它不需要通过位移传感器检测间隙的变化, 构成反馈控制使悬浮间隙稳定, 因此, 超声波悬浮支撑系统控制容易, 相对磁悬浮系统而言, 结构更加简单。

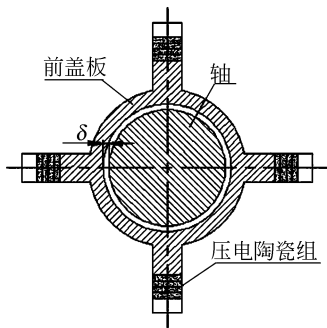


图 2 超声波悬浮支撑示意图

Fig. 2 Structure scheme of ultrasonic levitative support

从上面的分析可知, 超声波悬浮支撑系统的关键是要形成较大的悬浮间隙, 即振幅大于两接触表面粗糙度总和。本文利用实验测试装置, 对轴系超声波悬浮支撑结构进行了悬浮间隙测量。

3 轴系超声波悬浮支撑间隙测试

3.1 实验装置及间隙测量方法

轴在封闭支撑条件下不便于测量间隙量, 为了便于测试超声振动环境下, 两接触表面的悬浮间隙, 设计了图 3 所示的测试装置, 采用单个压电

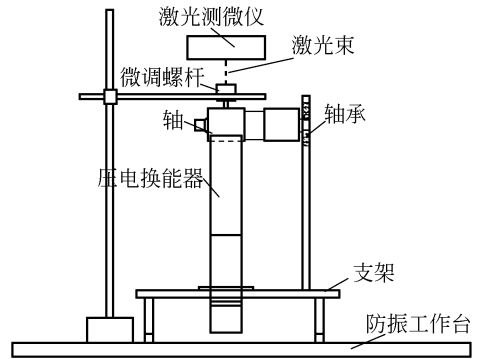


图 3 悬浮间隙测试装置

Fig. 3 Suspension interstice test system

换能器支撑转轴 (材料为铝合金、铁, 直径均为 $\varphi 45$ mm), 压电换能器前盖板加工成圆柱面, 半径与轴半径相等, 使之与轴的外表面接触。在测试过程中, 整个测试系统置于防振工作台上, 避免外界振动产生的不利影响, 减小测量误差。测试时, 轴与压电换能器圆弧面接触, 微调螺杆下端与轴上表面处于接触状态, 激光测微仪的激光束打在微调螺杆端面。压电换能器不振动时, 调整微调螺杆使之与轴接触, 记下此时激光测微仪的读数 s_1 。之后, 将微调螺杆向上调节与轴表面保留一定间隙, 给压电换能器施加高频正弦交流信号, 使其处在谐振工作状态并将轴悬浮起一定的间隙。待其稳定后, 将微调螺杆向下调整, 直至金属杆与轴的上表面刚好接触, 记录下测微仪的读数 s_2 。两次读数之差即为悬浮间隙量, 即: $s = s_2 - s_1$ 。测试时没有将激光测微仪的光束直接打在轴上, 而是使用了起中间作用的微调螺杆。这是因为, 在测试实验中所使用的激光测微仪本身具有一定的测量局限性, 可测试频率范围只有 5 000 kHz。当被测物体振动频率超出该范围时, 则无法从测微仪的显示屏上读取数据, 达不到测试目的。

近场声悬浮能力还与接触面间的表面粗糙度有关^[24], 经测试转轴和压电换能器辐射表面的表面粗糙度总和分别为:

$$Ra_{Al} = Ra_{axis} + Ra_{transmitter} = 6.1 + 3.5 = 9.6 \mu\text{m}$$

$$Ra_{Fe} = Ra_{axis} + Ra_{transmitter} = 6.3 + 3.5 = 9.8 \mu\text{m}$$

当超声振动振幅小于两表面粗糙度总和时, 万用

表连接轴和换能器会断续发出蜂鸣声,说明两表面有时接触,有时分离,即接触面积有所减小,随之摩擦力减小。增加电压,辐射压力增加,悬浮间隙随之增加将轴悬浮起来。

3.2 测试结果

根据压电换能器的工作特点,当驱动信号频率为谐振频率时,换能器端面振幅达到最大,随着驱动电压增加,振幅也随之增加。测试中,压电换能器施加信号频率为 21.34 kHz(压电换能器谐振频率),当驱动电压 <100 V 时,由于振幅较小,不足以将轴悬浮起来,很难测得悬浮间隙值,因此驱动电压从 100 V 增加到 220 V,每个驱动电压下多次测量,计算出平均值,得到两种材料轴的平均悬浮间隙与驱动电压关系如图 4 所示。

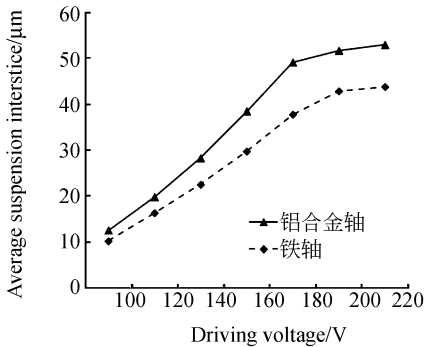


图 4 悬浮间隙与驱动电压关系

Fig. 4 Relationship between interstice and voltage

4 结 论

分析测试结果,可以得出如下结论:

(1)驱动电压在 100~180 V 时,振幅随电压增加而增加,作用于轴表面的超声波辐射压迅速增加,转换为轴的势能使悬浮间隙增加较快。

(2)当驱动电压超过 180 V 时,振幅会随之增加,但悬浮间隙增加较小,在试验过程中还发现此时换能器辐射端比较热,部分振动能量转换为热能,导致悬浮间隙增加不明显。驱动电压为 220 V 时,铝合金轴的平均悬浮间隙为 52.97 μm ,铁轴的平均悬浮间隙为 43.86 μm 。

(3)超声波悬浮能力受悬浮物质量、超声波辐射压与接触面粗糙度等因素影响,在克服物体重力作用下,将超声振动转换为热能、辐射能以及被悬浮物体的势能;但在太空环境下,物体没有质量,在辐射压的作用下能将形成对飞轮转轴的悬浮作用。

文中仅对单个换能器的悬浮能力进行了实验测试,但要使轴形成悬浮支撑,须在轴颈周围均匀对称布置多个压电换能器,前盖板连接在一起构成振动支承面,以提高对轴的支撑能力。每个压电换能器的驱动信号电压、频率均相同,就会在支承面产生均匀振幅,在转轴与支撑面之间产生均匀间隙,形成悬浮效果。

综上所述,将超声波悬浮技术应用在飞轮储能系统中,能对飞轮转轴形成悬浮能力,降低摩擦、提高转速、以增加系统储能密度和储能效率。

参考文献:

- [1] 高云国. 现代小卫星及其相关技术[J]. 光学 精密工程, 1999, 7(5): 16-21.
GAO Y G. Modern small satellites and its related technology[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 7(5): 16-21. (in Chinese)
- [2] 王晓海. 蓬勃发展的现代小卫星[J]. 中国航天, 2002(1): 9-14.
WANG X H. Rapid development of modern small satellite[J]. *Aerospace China*, 2002(1): 9-14. (in Chinese)
- [3] 程三海, 韦忠朝, 王雪帆. 飞轮储能技术及其应用[J]. 电机电器技术, 2000(6): 31-33.
CHENG S H, WEI ZH CH, WANG X F. Application of fly wheel storage technology [J]. *Electrical Appliance*, 2000(6): 31-33. (in Chinese)
- [4] 刘怀喜, 马润香, 张恒. 飞轮储能技术的发展与应用[J]. 能源技术, 2003, 24(1): 10-13.

- LIU H X, MA R X, ZHANG H. Achievement and application of flywheel energy storage technique[J]. *Energy Technology*, 2003,24(1):10-13. (in Chinese)
- [5] 刘春和,张俊,潘龙飞. 飞轮—新的储能方式[J]. 微特电机,2003(5):38-40.
LIU CH H, ZHANG J, PAN L F. Flywheel—a new storage of energy [J]. *Small & Special Electrical Machines*, 2003(5):38-40. (in Chinese)
- [6] RENUGANTH V,STEFANOS F. Methodology for the development of combined energy and attitude control systems for satellites[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2002(6):303-311.
- [7] RENUGANTH V. A combined energy and attitude control system for small satellites[J]. *Acta Astronautica*, 2004(54):701-712.
- [8] RENUGANTH V, STEFANOS F. The combined energy and attitude control system for small satellites—earth observation missions[J]. *Acta Astronautica*, 2005(56):251-259.
- [9] DE ANDRADE R Jr, FERREIRA A C,SOTELO G G,*et al.*. A superconducting high-speed flywheel energy storage system[J]. *Physica C*,2004,408-410:930-931.
- [10] HIDEO N,AKINORI M,MASAYUKI S. Development and testing of the suspension system for a flywheel battery[J]. *Control Engineering Practice*, 2001(9): 1039-1046.
- [11] 韩邦成. 单轴飞轮储能/姿态控制系统的仿真及其实验研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2004.
HAN B CH. *Simulation and experiment of singleaxis attitude control and energy storage system with two fly wheels*[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academic of Sciences, 2004. (in Chinese)
- [12] 白越. 集成飞轮储能与姿态控制系统高速转子及轴系研究[D]. 长春:中科院长春光学精密机械与物理研究所, 2005.
BAI Y. *Investigation on high speed rotor and shaft of integrated flywheel energy storage and attitude control system*[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academic of Sciences,2005. (in Chinese)
- [13] KOSHIZUKA N,ISHIKAWA F,NASU H,*et al.*. Present status of R&D on superconducting magnetic bearing technologies for flywheel energy storage system[J]. *Physica C*,2002,378-381: 11-17.
- [14] KOSHIZUKA N,ISHIKAWA F,NASU H,*et al.*. Progress of superconducting bearing technologies for flywheel energy storage systems[J]. *Physica C*,2003,386: 444-450.
- [15] RYOSUKE S,KAZUYUKI D,MITSURU U. Numerical simulateion of coupled problem of electromagnetic field and heat conduction in superconducting magnetic bearing[J]. *Physica C*,2003,392-396:734-738.
- [16] NAGAYA S,KOMURA K,KASHIMA N,*et al.*. Development of the composite superconducting magnetic bearing for superconducting flywheel[J]. *Physica C*,2003,392-396: 719-722.
- [17] CANSIZ A,CAMPBELL A M,COOMBS T A. An evershed type superconducting flywheel bearing[J]. *Physica C*,2003,390: 305-310.
- [18] MATSUO E,KOIKE Y,NAKAMURA K,*et al.*. Holding characteristics of planar objects suspended by near-field acoustic levitation[J].*Ultrasonics*,2000, 38:60-63.
- [19] SADAYUKI U,YOSHIKI H,KOIKE,*et al.*. Non-contact transportation using near-field acoustic levitation[J].*Ultrasonics*,2000,38:26-32.
- [20] CHANG K T. A novel ultrasonic clutch using near-field acoustic levitation[J]. *Ultrasonics*,2004,43:49-55.
- [21] VINCENT V,PIERRE L,ALAIN D. Non-contact handling in micro-assembly: Acoustical levitation[J]. *Precision Engineering*,2005,29:491-505.
- [22] 吴博达,常颖,杨志刚,等. 超声振动减摩性能的实验研究及理论分析[J]. 中国机械工程,2004,15(9):813-815.
WU B D, CHANG Y, YANG ZH G,*et al.*. Experimental study and theoretical analysis on anti-friction capability

of ultrasonic vibration[J]. *China Mechanical Engineering*, 2004,15(9):813-815. (in Chinese)

- [23] 常颖,彭太江,阚君武,等. 超声振动对摩擦系数影响的试验研究[J]. 压电与声光,2003,25(6):511-513.
CHANG Y, PENG T J, KAN J W, *et al.*. Experiment study on the influence on friction-factor by ultrasonic vibration[J]. *Piezoelectrics & Acoustoopt*, 2003,25(6):511-513. (in chinese)
- [24] 彭太江. 超声波悬浮与减摩能力的研究[D]. 长春:吉林大学,2003.
PENG T J. *Investigation on ultrasonic levitation and antifriction ability* [D]. Changchun: Jilin University, 2003. (in Chinese)
- [25] 常颖,吴博达,杨志刚,等. 超声波悬浮推力轴承承载能力及减摩性能[J]. 吉林大学学报,2004,34(2):222-225.
CHANG Y, WU B D, YANG ZH G, *et al.*. Bearing capacity and anti-friction behavior of ultrasonic vibration bearing[J]. *Journal of Jilin University of Technology(Natural Science Edition)*, 2004,34(2):222-225. (in Chinese)

作者简介:彭太江(1977—),男,讲师,博士,研究领域为压电驱动与控制技术和微小机械等。E-mail: pengtj@jlu.edu.cn

● 下期预告

三次位相传播中的波像差及 在 CGH 中衍射级次的分离

许英朝^{1,2},周平³,张新¹

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 光学技术研究中心,吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院,北京 100039;3. 美国亚利桑那大学 光学中心,图森 Az85721)

设计了利用计算全息图(CGH)作为零位补偿器来检测三次位相板的光学系统,最重要的两个理论问题是三次位相在空间传播过程中产生的波像差的具体形式和经过 CGH 衍射后衍射级次的分离。本文阐述了三次位相在传播过程中会产生高阶像差,详细推导了三次位相在传播过程中产生的波像差的理论公式。由公式得到高阶项随着传播距离 l 的增大而增大。讨论了检测光波经过 CGH 衍射后衍射级次的分离的理论过程。设计了一个用 CGH 检测三次位相板的系统作为例证,通过在 CGH 位相方程中引入了高阶项 4 次项和 5 次项,使得残余波像差从原来的 0.75λ 降至 0.007λ 。无论是传播过程中的波像差还是衍射级次的分离,都得到了与理论推导相吻合的结果。