

文章编号: 1006-2343 (2010) 01-113-04

磁密封在深水作业灵巧手上的应用

汪步云^{1,2}, 许德章^{1,2}, 杨明^{1,2}, 曹会彬³

(1. 先进数控和伺服驱动技术安徽省重点实验室, 安徽 芜湖 241000;

2 安徽工程科技学院 机械工程系, 安徽 芜湖 241000;

3. 中国科学院 合肥智能机械研究所, 安徽 合肥 230031, E-mail: liukzg@hotmail.com)

摘要: 鉴于水下作业特殊环境, 深水作业灵巧手驱动装置的选择较为慎重。电机驱动是最为常用的驱动方式之一, 其控制方法和技术十分成熟, 是水下作业灵巧手优先考虑的驱动方式, 但密封问题严重制约着在水下工作应用。本文结合以往经验, 对比常规密封设计, 介绍了水下作业灵巧手关键部位动密封, 对其作了深入的探讨, 提出了磁密封在深水作业灵巧手上应用; 根据灵巧手驱动电机设计与之相匹配的磁密封件, 并计算和验证了相关设计参数, 得出较为理想的工程实用结果。

关键词: 水下作业灵巧手; 驱动器; 静密封; 动密封; 磁力联轴器

中图分类号: TB42 **文献标识码:** A

The Application of the Magnetic Seal on the Underwater Operation of Dexterous Hand

WANG Bu-yun^{1,2}, XU De-zhang^{1,2}, YANG Ming^{1,2}, CAO Hui-bin³

(1. Anhui Key Laboratory of Advanced Numerical Control & Servo Technology, Wuhu 241000, China;

2 Dept of Mach, Anhui University of Technology and Science, Wuhu 241000, China;

3 Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: The selection of driving device for the underwater dexterous hand is much more cautiously just because the special operation surrounding Motor is the one of the most common driving methods and its control methods and techniques are very mature, so its should be considered as a driving device first. However the problem of sealing restricts the application seriously if taking into account the blue water environment. Compared with the past experience and compared with the design of the traditional seals, this paper introduces the dynamic seal to the key positions of the underwater dexterous hand. The application of the magnetic seal is proposed and its relative parameters are calculated and checked. According to the driving motor, it will match the magnetic. Through the engineering practice, seal the appropriate result is obtained.

Key words: underwater manipulator; actuator; static seal; dynamic seal

21 世纪是人类开发和利用海洋资源的世纪。随着国家海洋技术发展和国防建设的需要, 使得海洋仪器设备的应用领域越来越广泛。水下作业灵巧手作为一种重要的海洋作业工具日益得到人们的重视。当前, 水下作业灵巧手是人们研究的热点问题之一。

水下作业灵巧手研制的关键问题之一是驱动器问题。它涉及到一个突出的问题——密封问题, 而且是随着下潜深度的加深, 密封性能要求更高, 这也是衡量水下装备的重要指标。下面是在 863 课题“用于水下的智能化机器人灵巧手”课题的研究下, 根据其“能用于水下 3 000 m, 抓取 5 kg 要求, 从设计的角度, 针对实际使用需求出发, 对比常规密封的技术, 提出磁密封技术在水下作业灵巧手驱动器上的

使用。

1 驱动器的选用及密封需求

1.1 驱动器的选择

指关节的驱动方式对灵巧手结构复杂程度与灵巧手体积影响很大。关节可选的驱动方式有电机、液压和特殊驱动器 (如磁致伸缩器件), 在现有较为成熟的技术条件下, 关节驱动器主要有两种动力形式: 一是电磁驱动, 二是流体驱动。为了满足水下作业压力补偿与密封的要求, 水下作业系统中的关节一般采用液压驱动形式。但液压驱动存在许多不便, 如需要配置液压泵、油箱、管路等附属设施, 在陆地与太空环境下, 很少采用液压驱动。应当指出的是, 若关节外形尺寸比较小, 液压形式驱动器选用更为困难; 而电机驱动方式能量转换率高, 对需要海上作业来说具有实际意义; 选择体积小、控制方便, 且能够与灵巧手外形尺寸相匹配的电机较为方便, 对此, 该课题采用功率为 30 W 的 Maxon 直流无刷

收稿日期: 2009-09-04

基金项目: 863 计划资助项目 (2006AA04Z244)

电机。

但选用电机作为驱动器,首要解决的是电机密封问题;随着作业深度的加深,密封问题显得更加突出。

1.2 灵巧手驱动器的密封需求

水下作业灵巧手研制中一个关键、突出的问题就是密封问题,主要是关节驱动器的动密封、静密封;作业灵巧手的深海工作环境对密封性能要求尤其严格,这是因为作业手所处的深水作业环境,既要考虑水下压力,又要考虑海水电离腐蚀性强对密封器件的制约。因此,密封问题是水下作业灵巧手研制的一个制约性问题和需要突破的关键技术之一。

电机驱动的密封,不外乎静密封与动密封。静密封比较好解决,而动密封则比较困难。

密封一般是针对关节驱动器来说的。水下作业灵巧手采用电机方式驱动,其密封主要分为机壳密封、电机引出线处密封和电机旋转轴处密封。

1.3 静密封

电机机壳的密封属于静密封,这是非常容易解决的,根据计算,可以在电机外围做一密封箱体^[1],在需要密封处安装 O 型密封圈或橡胶圈对其实施静密封。

电机引出线可以采用对接的防水插头解决,技术非常成熟,有商业化的产品销售,可以选用相关产品,在此不再赘述。

2 动密封解决方案

对于电机旋转轴的动密封则显得异常困难。因为电机轴旋转,则必有空隙,而动密封则需在电机轴旋转的同时避免有空隙出现。在实际工程应用中,必须解决要运转也要密封这一突出的矛盾。

对于电机转轴的动密封,参考相关文献,以及工程上经常使用的密封方式,主要有以下两种方式:橡胶圈密封、机械密封。

2.1 橡胶圈密封

从工程技术的角度看,使用密封圈的方式最多,也是优先考虑的密封方式之一^[2]。因为这种密封方式实用、经济。如液压系统中常用的 O 型圈或者聚氨脂唇形密封圈^[3],在转速不高,外界压力不大的情况下显得比较实用,如右图 1 所示。

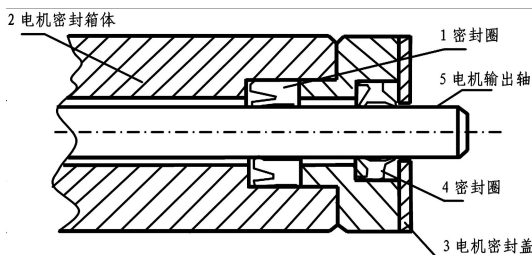


图 1 电机的密封圈密封方式

在工程实际应用中,选用聚氨酯材料密封件,仍然存在以下几个制约性因素:

(1) 运动速度

运动速度很低 ($< 0.03 \text{ m/s}$) 时,要考虑设备运行的平稳

性和是否出现了“爬行”现象。运动速度很高 ($> 0.8 \text{ m/s}$) 时,起润滑作用的油膜可能被破坏,易失效。

(2) 温度

电机工作时,密封圈必然与其接触面摩擦产生热量,长时间工作必然会对密封产生恶劣的影响。

(3) 工作压力

不同材质的密封圈具有不同的最佳工作压力范围^[4]。对于密封件中具有较好功效的聚氨酯密封件,温度、压力对密封性能的影响是互相关联的,因此对于密封件选用时需要做综合考虑,见下表:

表 1 常用密封件温度、压力综合影响

进口聚氨酯 (PU) 材质密封圈		
温度变化范围 / ()	最高运动速度 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大工作压力 / MPa
- 25 ~ + 80	0.5	28
- 25 ~ + 110	0.5	25
- 25 ~ + 80	0.15	40
- 25 ~ + 110	0.15	35

(4) 工作介质

海水中杂质较多,工作介质的清洁程度对密封圈的寿命有很大影响。海水中杂质和污染物会加快密封圈的老化和磨损,而且其中赃物可能划伤或嵌入密封圈,使密封圈失效。

尽管密封圈的工作压力能够满足水下 3 000 m 的作业环境,但不同的工作压力和温度,其最大运动速度和能够承受的压力上限值会发生动态改变,难以出现一个较为理想的工作点;并且电机运行因摩擦产生热量会导致密封圈变形,另外电机运动速度较高,已超出其要求的运动速度,这严重制约着该密封方式的使用。

2.2 机械密封

采用机械密封,其动环和静环对于旋转密封有较好的使用价值^[5],但其对工作损耗有着极为严格的限制,如果动环和静环之间失去了镜面接触,维持密封面润滑效果液体膜的破损,极易导致密封失效。因而根据下潜深度和工作时间长度,更换组合密封件的频率随之加大,由此会产生极大的耗费。这将对长时间在恶劣条件下工作产生极大的限制,影响了实际作用价值。

机械密封的选用,与电机的尺寸有较大关系。采用动环加静环配合的机械密封形式对电机旋转轴进行密封,这对于外形尺寸较大的电机,水深小于 450 m 时较为管用^[6];对于本课题,由于灵巧手尺寸小,选用的是小尺寸、小功率电机,必然要求选择与之相匹配的机械密封,而小尺寸机械密封加工极为复杂,工作可靠性差,不宜采用该密封方式。

2.3 磁密封方式

磁力传动密封技术是磁力传动技术和密封技术的结合,它利用磁力线穿越非磁性密封隔套及磁力线扭斜产生力矩特性,将原动机能量传递给负载,完成磁力传动和密封的双重功能。磁密封传动是近年来,随着磁学快速发展的新型实用工程技术。

磁密封传动是一种非接触式密封(即动件和静件没有直

接接触),它以旋转动密封为主,即使用旋转密封装置把旋转运动传递到被密封的容器内。该装置通常由轴承、磁极、永久磁铁、导磁密封轴等组成;其工作原理是:由环状永磁体、磁极和导磁转轴构成闭合磁回路,利用永磁体中的磁能,在密封轴与磁极齿端的间隙内产生强磁场,从而实现

密封。

本课题在确定电机转矩等相关参数后,根据密封要求设计合适的磁密封联轴器进行传动。磁密封传动在此非常合适,巧妙的将动密封转化为静密封,在水下驱动器密封传动方面有着十分广阔的应用前景。其本体结构设计如图 2:

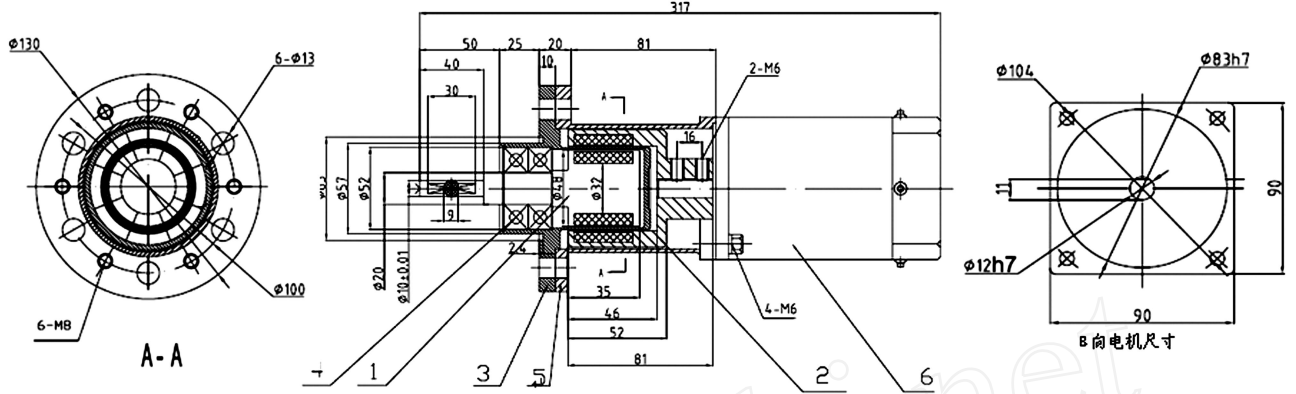


图 2 磁力联轴器与电机装配图

表 2 磁力联轴器密封装配表

序号	名称	材料	数量
1	内转子体	202	1
2	外转子体	Q235	1
3	隔离套	Ti	1
4	轴承		2
5	连接法兰	LY12	1
6	驱动电机		1

结合图 2及表 2,磁力联轴器分为四个部分:磁力联轴器内转子体,外转子体,隔离套,滚动轴承。其中外转子装在电机输出轴端,并用密封隔离套封闭在其内部,形成静密封。内磁转子装在外转子内侧,套入密封套内侧,与被驱动器件连接;使内外转子处于完全耦合状态。内外转子间的磁场力透过密封套而相互作用,进行力矩的传递。因此,磁密封对于旋转

且能保证其正常的工作。

因此机械本体结构设计的合理行需要从理论角度进行必要的验算。如内外转子尺寸是否合理,工作间隙是否合理,

隔离套尺寸与强度校核等关键性设计,以及整套设计能否满足许用转矩要求等。

本课题选用永磁联轴器,它是以磁体为主要材质(如铁氧体、钕铁硼)的非机械挠性联轴器,具有一定的补偿能力,并具有缓冲、减振、过载保护功能。该联轴器不用润滑,适用于中、小功率工况。磁力联轴器可以根据计算扭矩、轴的直径、工作转矩和工况条件来进行选取。

(1) 确定设计的磁力联轴器满足传递转矩需求

磁力联轴器传递扭矩为校核可按下面公式计算^[7]:

$$T_{max} = 2F \cdot m \cdot R$$

其中:

$$F = \left[\frac{B}{5000} \right]^2 \cdot S \cdot \frac{1}{1 + a l}$$

$$S = \frac{b}{m} (R_1 + R_2)$$

$$l = \sqrt{\left(R_2 \cos \frac{180}{m} \right)^2 + \left(R_2 \sin \frac{180}{m} \right)^2} R = (R_1 + R_2) / 2$$

式中: F 为内转子和外转子体对应的磁钢推拉力; S 为内外转子对应的磁块平均面积; l 为是工作气隙磁力线长度; R 为是工作气隙平均半径; R_1 为内转子外径; R_2 为外转子内径; m 为磁极数。将设计尺寸带入得,即 $R_1 = 16$, $R_2 = 24$, $m = 20$ 带入得 $T_{max} = 3.22$ 。

上述计算表明,磁力联轴器能够完全满足水下灵巧手抓最大取力矩 3 Nm 的要求。由于传递的是小功率、小转矩、低转速情况,则对许用转速、键的校核忽略。

(2) 联轴器密封所能承受的压力

按照课题所要求的海下 3 000 m 计算,

$$P = gh = 1.01 \times 10^3 \text{ kg/m}^3 \times 10 \times 3000 \text{ m} = 30.1 \text{ MPa}$$

因此,磁力联轴器需要承受超过 30 Mpa 压力,而隔套是

动密封能够保证绝对密封,滴水不漏,实物如图 3 所示。



图 3 磁密封装配图

根据磁密封传动的功能分析,其机械设计需要满足如下要求:

- (1) 与所选电机尺寸相匹配;
- (2) 根据磁密封原理计算,满足需用转矩;
- (3) 针对磁密封特点,保证内外转子合理的气隙磁密,

磁力联轴器承受压力并在水下保证工作的核心部件,且要求其刚度大,变形小,厚度尽可能小;隔套的强度校核是关键,有必要对隔套设计长度和直径进行计算和校核。

其中 L 是隔套长度, L_{k1} 、 L_{k2} 是计算临界值,若隔套的计算长度 $L > L_{k1}$,按长圆筒计算,若 $L_{k1} < L \leq L_{k1}$,按照短圆筒计算,若 $L \leq L_{k2}$,则按刚性筒公式计算^[8]。

其中:

$$L_{k1} = 1.17D \sqrt{D/S}$$

$$L_{k2} = \frac{1.3ES}{s \sqrt{D/S}}$$

代入数值计算得:

$$L_{k1} = 1.17D \sqrt{D/S} = 1.17 \times \sqrt{85/2.5} = 579.9 \text{ mm}$$

$$L_{k2} = \frac{1.3ES}{s \sqrt{D/S}} = \frac{1.3 \times 106.4 \times 10^9 \times 2.5}{600 \times 10^6 \times \sqrt{85/2.5}} = 98.8 \text{ mm}$$

本课题设计的隔套长度 $L = 35 \text{ mm} < L_{k2}$,其临界压力值按照刚性圆筒计算。而刚性筒的最大外压力计算是以薄膜应力理论为基础,利用第一强度理论和第四强度理论推导出起计算公式:

$$P_{\max} = 2S_s/D = 2 \times 2.5 \times 600 \times 10^6 / 85 = 35.29 \text{ MPa}$$

其中: E 为隔离套材料的弹性模量 MPa; s 为隔离套材料的屈服极限, MPa; S 为隔离套的壁厚, mm; D 为隔离套直径, mm; L 为隔离套的长度, mm

需要指出的是,隔离套的壁厚 2.5 mm 的设计,可以满足减小内外转子相隔距离和磁涡流、增大传递扭矩的要求。

上述计算表明,此处采用 Ti 金属隔离套的联轴器,完全可以满足海下 3 000 m 承受 30 MPa 压力的要求。Ti 金属具有低泊松比,高韧性,容易制造薄壁圆筒,另外,采用 Ti 金属

可以做到重量轻、对海水具有很好的抗腐蚀作用。

因此,上述计算结果表明,所设计的磁力耦合联轴器结构达到设计要求,参数合理。

3 结论

以上介绍磁密封技术融入水下机器人的应用,其结构简单,重量轻,非常适用于传递小功率的场合。它巧妙的解决了电机转动与动密封之间的矛盾,能够胜任深海作业环境,使用方便,性能可靠,对设备维护的要求低,为相关设备的研制提供了技术参考。

参考文献

- [1] 钟先友,谭跃刚. 水下机器人动密封技术 [J]. 机械工程师, 2006, (1): 40~43.
- [2] 成大先. 机械设计手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [3] Richard F. Salant. Modelling rotary lip seals [J]. Wear, 1997, 207 (1~2): 92~99.
- [4] Green I C. Stresses and deformation of compressed elastometric O-ring sealing [C] // 14th International Conference on Fluid sealing Firenze, Italy 1994: 108~110.
- [5] Hai Sui, Heiko Pohl, Uwe Schombura, et al. Wear and friction of PTFE seals [J]. Wear 1999, 224~227.
- [6] 刘子俊, 崔皆凡. 海洋机器人水下电机的深水密封研究 [J]. 机器人, 1997, 19(1): 23~26.
- [7] 文立辉, 王庆春. 磁力传动密封潜水电机 [J]. 船电技术, 2002, (4): 14~19.
- [8] 陈永华, 李思忍, 龚德俊, 等. 一种小型水密封耐压舱体的设计与制作 [J]. 设计计算, 2007, (9): 25~28.

作者简介: 汪步云 (1984 -), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 水下机器人、机电一体化技术与应用。

(上接第 112 页)

$$0.15 \leq x_1 \leq 0.45$$

$$0.1 \leq x_2 \leq 0.3$$

$$0.005 \leq x_3 \leq 0.015$$

4.4 优化结果

通过有限元软件的计算, 优化结果如表 2

表 2 优化前后计算结果对比表

	优化前数据	优化后数据
横梁截面的高度 /m	0.25	0.41
横梁截面的宽度 /m	0.15	0.28
横梁截面的厚度 /m	0.01	0.015
横梁一阶固有频率 /Hz	14.3	17.3

通过优化计算, 横梁的一阶固有频率提高了 21%, 使得共振更不易发生, 可以进一步提高机械的使用能力。

5 结论

(1) 利用 Ansys 软件对电脑刺绣机横梁进行有限元模态分析, 在保证计算精度的前提下, 采用合适的有限元单元和约束形式, 使得计算结果与实际情况相吻合。

(2) 通过电脑刺绣机的振动实验, 获得了真实情况下的模态数值, 为计算机模拟计算提供参考基础。

(3) 通过计算机模拟的方法, 对横梁的结构进行优化设

计, 提高了一阶固有频率, 使得电脑刺绣机更不易发生共振。

参考文献

- [1] 叶友东, 周哲波. 基于 ANSYS 直齿圆柱齿轮有限元模态分析 [J]. 机械传动, 2006, 30(5): 63~65.
- [2] 廖林清, 徐科峰. 轿车白车身模态试验与有限元模态分析的对比 [J]. 重庆工业学院学报 (自然科学), 2009, 30(5): 11~14.
- [3] 王宝元, 刘朋科. 自行火炮工作模态分析试验技术 [J]. 兵工学报, 2009, 30(7): 853~857.
- [4] 赵成, 陈人跃. 潜艇浮筏隔振系统的控制研究 [J]. 中国机械工程, 2008, 19(3): 253~258.
- [5] 计三有, 苏运波. 龙门起重机结构模态分析 [J]. 船海工程, 2007, 36(3): 132~134.
- [6] 陈明, 周思柱. 基于 ANSYS 的转盘静力及模态分析优化设计 [J]. 湖北工业大学学报, 2009, 24(2): 71~73.
- [7] 徐小波, 谢建雄. 汽车直拉杆的力学性能动态测试及其模态分析 [J]. 2007, 29(5): 108~110.
- [8] 李兵. ANSYS Workbench 设计仿真与优化 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [9] 龚曙光. ANSYS 工程应用实例解析精通 ANSYS [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.

作者简介: 白晶 (1975 -), 男, 实验师, 主要从事机械设计及实验研究, 出版著作 10 部, 发表论文 3 篇。