

文章编号:1002-2082(2013)03-0425-05

周视光电观瞄设备动密封的摩擦力矩分析

李晓航¹, 郭新胜², 朱 红², 党 力², 牛 静², 胥圆圆², 李红光²

(1. 总装驻西安地区军代室, 陕西 西安 710043; 2. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘 要:在结构设计解决周视光电观瞄设备的动态密封问题后, 动密封所带来的摩擦力矩就成为周视光电稳定的重要制约因素。通过对 3 种典型应用动密封原理的周视光电观瞄设备分析研究, 着重分析了动密封的摩擦力矩对结构、稳瞄精度的影响, 并结合实际工程应用给出 3 种动密封形式所对应的摩擦力矩分析和估算方法, 提供给稳瞄和结构设计人员, 以期对后续稳瞄系统设计有所帮助。最后在同一周视转台上, 对 3 种动密封进行了试验验证并进行分析计算, 得出磁流体是解决周视光电设备动密封较好形式的结论。

关键词:动密封; 周视; 摩擦力矩; 稳瞄

中图分类号: TN29; TB42

文献标志码: A

doi: 10.5768/JAO201334.0301008

Friction torque of dynamic sealing of panoramic electro-optical aiming device

LI Xiao-hang¹, GUO Xin-sheng², ZHU Hong², DANG Li²,
NIU Jing², XU Yuan-yuan², LI Hong-guang²

(1. PLA Presentation Office in Xi'an District, Xi'an 710043, China;

2. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to solve the dynamic sealing of the panoramic electro-optical aiming device, through analysis of three typical kinds sealing principle of the panoramic electro-optical aiming device, the influence of friction torque of dynamic sealing on structure and accuracy of stabilized platform was analyzed. Combining with application of engineering practice, three kinds of sealing corresponding to the friction torque analysis and estimation methods were given, in order to help the follow-stabilized platform system design. Experiments of three kinds of dynamic sealing were analyzed and calculated respectively. Results indicate that magnetic fluid is the better way to solve the problem of dynamic sealing of electro-optical devices.

Key words: dynamic sealing; panorama; friction torque; stabilized platform

引言

周视观瞄设备的动密封, 是指回转部分与静止部分之间的密封, 由于观瞄设备中含有白光、CCD、微光、热像、激光等关重器件, 因此要求达到气密的效果。而动密封是困扰周视光电设备的一个技术难题。目前, 国内在机载、舰载周视光电观瞄设备上分别采用挤压式 U 形密封圈和迷宫式密封技术来实现动密封, 在车载周视光电观瞄设备上尝试磁流体密封来实现动密封^[1]。

但是, 在完成动密封要求之后, 其所引起的摩

擦力矩大小, 对于光电周视观瞄设备中的稳瞄系统来讲是十分关键的, 是影响稳定精度的关键因素之一。目前对于密封所引起或带来的摩擦力矩, 在一般的书籍和资料中很少给出具体的计算方法。笔者试图总结现有的文献资料, 结合密封、结构、控制等方面的知识, 给出 3 种密封对应的摩擦力矩的计算方法。并通过将挤压式 U 形密封圈、迷宫式密封技术和磁流体密封技术这 3 种密封机构分别安装在同一种车载观瞄设备上, 进行了试验分析验证。

收稿日期: 2012-10-10; 修回日期: 2012-12-10

作者简介: 李晓航(1971—), 男, 陕西西安人, 副总代表, 工程师, 主要从事坦克装甲光电火控系统技术管理工作。

1 周视光电上应用的动密封结构形式

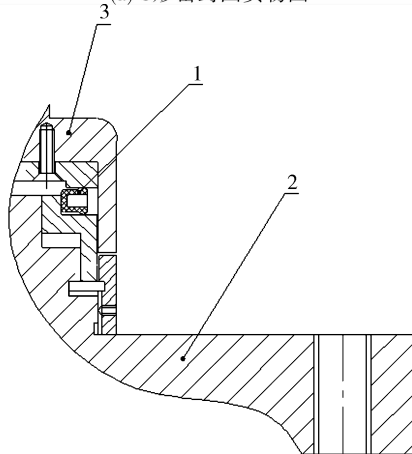
目前,在周视光电观瞄设备中所采用的密封大致有2种:动态密封和静态密封。其中静态密封较易实现,由于均为固定部件,所以较易满足设计要求。但动态密封由于要保证活动回转部件的密封,是十分困难的^[2]。目前在周视光电观瞄设备中应用的动态密封结构主要有3种:挤压式U形密封圈、迷宫密封、磁流体密封。

1) 挤压式U形密封圈

它是由弹簧圈与外密封套构成的U形圈,弹簧用不锈钢材料制成,外套用摩擦系数小的聚四氟乙烯、塑料等材料制成,主要是靠克服高强度弹簧的弹力来进行密封,达到气密要求,而密封圈所带来的摩擦力矩比较大,由于是机械式接触,需要伺服提供较大的驱动力矩才能满足要求。实物图片和安装如图1所示。



(a) U形密封圈实物图



(b) U形密封圈安装位置及结构图

图1 U型密封圈的实物和安装图

Fig. 1 U-cup seal structure and installation diagram

图1(b)中1是U形密封圈在光电观瞄设备的安装位置,2是静止部分,3是回转部分。U形密封

圈放置在2个平面度、光洁度要求较高的、且与U形密封圈同心、同大小的钢垫间,钢垫分别与静止、活动部分相固联。依靠8颗螺钉将U形密封圈紧紧压在静止和活动部分之间,形成了动密封。

2) 迷宫式密封结构

车载周视观瞄设备动态密封采用典型的迷宫式密封结构,使用O形橡胶圈、黄铜圈加专制聚四氟乙烯圈、黄铜圈加专制橡胶圈、黄铜圈加毛毡油圈、沟回槽等静态的密封结构形式^[3]。由于安装位置处于活动部位,此种密封的效果仅仅能够做到防尘、防灰、防雨水,无法满足周视光电观瞄设备的气密要求。长时间使用,橡胶老化、油脂干涸、粉尘污染,致使周视观瞄设备的清洁度达不到理想的要求。尤其是野外使用时,由于环境的恶劣,使用一段时间以后视场内会落下大量灰尘,严重影响周视光电设备的透过率和视场观察。安装如图2所示。

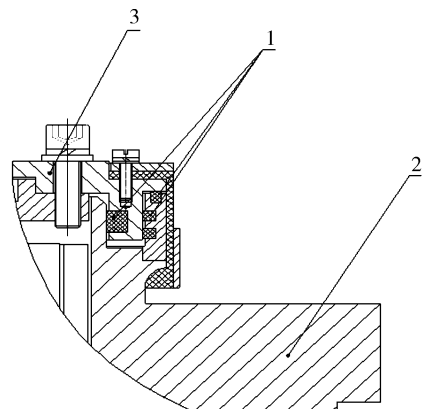


图2 迷宫式密封结构及安装图

Fig. 2 Labyrinth seal structure and installation diagram

图2中1是迷宫式密封在光电观瞄设备的安装位置,2是静止部分,3是回转部分。在迷宫的齿槽部分填充毛毡油圈。

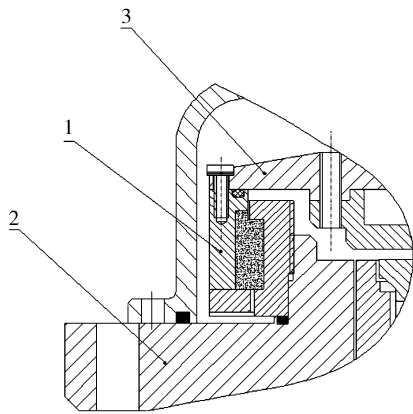
3) 磁流体密封圈

其密封的工作原理是^[4]:由环状永磁体、导磁极靴和导磁转轴构成闭合磁路,利用永磁体中的磁能,在转轴与极靴极齿顶端的齿形间隙中产生强弱相间的非均匀磁场,将磁性液体紧紧吸住,形成磁性液体“O”型密封环,把间隙堵死,从而达到密封的目的。实物和安装如图3所示。

它既有液体的流动性,又具有磁性,由磁流体制造的密封圈旋转轴动密封是一种非接触式密封,不但能达到气密的目的,而且具有寿命长、摩擦力矩小的特点,是动密封的一个较好选择^[5]。



(a) 磁流体密封机构示意图



(b) 磁流体机构安装位置及结构图

图3 磁流体密封实物和安装结构图

Fig. 3 Magnetic fluid seal structure and installation diagram

图3(b)中1为磁流体在车载光电观瞄设备的安装位置,2是静止部分,3是回转部分。先将磁流体通过“O”型密封圈与光电观瞄设备固定在一起,依靠8颗螺钉将活动部件紧紧压在磁流体上的“O”型密封圈上,形成了动密封。

2 动密封的摩擦力矩分析与估算

2.1 挤压式U形密封圈

通过下式可以计算出U形密封圈带来的回转平台的摩擦力^[6]:

$$f = P \cdot D \cdot \pi \cdot \mu \cdot b \quad (1)$$

代入下式,即可得到摩擦力矩:

$$T = f \cdot R \quad (2)$$

式中: P 为总负荷(包括压力和运动负荷); D 为转轴的回转直径; μ 为密封圈与转轴的摩擦系数; b 为密封圈与转轴的接触面宽度; R 为运动的回转半径。

由于在周视光电设备中,周视光电设备均具备伺服稳定功能,所以回转部件间的摩擦力矩的

大小对于伺服稳定系统来说是至关重要的。经过测算和试验,发现若要满足动密封的要求,挤压式U形密封圈所带来的摩擦力矩非常大, $T=2.356 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。对于机载、舰载伺服系统来说,由于其体积大、惯量大,而且大多采用多框架结构,加之系统所选用的电机输出力矩足够大,能够克服密封所带来的摩擦力矩。而对于车载周视光电系统来讲,一是结构尺寸受到限制,二是大多采用单框架,要想获得足够大的输出力矩是很困难的,因此挤压式U形密封圈很难满足车载周视光电系统要求的摩擦力矩。如果摩擦力矩达不到系统的要求,将会严重影响系统的稳定精度。

2.2 迷宫式密封结构

在周视光电设备中应用的迷宫式密封结构是通过在转轴周围设若干个依次排列的环形密封齿,并填充毛毡油圈,形成密封。对于伺服稳瞄系统来说,其所带来的摩擦力矩对于伺服系统的扰动是非常严重的。

机械密封的摩擦力^[7]包括密封面微凸体接触摩擦力 f_c 和流体摩擦力 f_f ,即

$$f = f_c + f_f \quad (3)$$

摩擦系数对于机械密封用处较大,所以摩擦系数关系到最终摩擦力矩的估算。机械密封的摩擦系数常用密封界面的摩擦力与密封面载荷之比来表示^[6],即

$$\mu = f/P_g = f/W \quad (4)$$

式中: f 为摩擦力; P_g 为密封面载荷; W 为密封面承载能力。

由于所使用的材料不同,结构形式不同,其摩擦系数也会不同。摩擦系数的计算方法有分析计算法、加权平均法和经验数据法等方法^[8]。在结构设计时大都采用经验数据法来估算得出。

通过测算,可以得到迷宫式密封结构所带来的摩擦力矩为

$$T = 0.172 \text{ N} \cdot \text{m}$$

2.3 磁流体密封圈

磁流体密封机构由于是采用磁液体和磁极配合来完成密封工作,所以存在磁场力,若安装后回转轴与磁流体密封圈的回转轴重合,磁场力均匀分布在圆周。当两个轴出现偏差时,磁场力就会不均匀,出现转动死点、卡滞。转轴受到磁场偏心率变化如图4所示。

转轴受力的计算,磁场的麦克斯韦应力张

量为^[9]

$$T = \mu_0 H H - \frac{1}{2} \mu_0 H^2 I \quad (5)$$

式中: I 为单位张量; μ_0 为真空磁导率; H 为磁场强度。

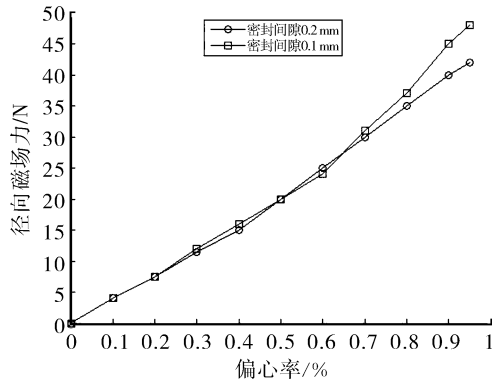


图 4 转轴受到的磁场力随偏心率的变化曲线
Fig. 4 Variation curves of magnetic force of rotary shaft with eccentricity

而处于磁场中的磁性介质受到的磁场力具有如下形式:

$$f = \int_s \cdot T dS \quad (6)$$

式中 S 为介质的表面。

从图 4 的计算结果看,偏心时转轴受到的磁场力随偏心率的增而增大,且变化趋势近似呈线性依赖关系^[10]。所以在安装时应该对偏心率提出较高的要求。

通过测算,可以得到磁流体密封结构所带来的摩擦力矩为

$$T = 0.88 \text{ N} \cdot \text{m}$$

3 实验比对分析

通过将 3 种密封机构分别安装在同一种车载观瞄设备上,并进行环境试验,对其密封性能和整体稳定性能进行比对。比对结果见表 1。

表 1 密封机构在车载光电平台应用比对

Table 1 Comparison of sealing mechanisms in application of vehicle photoelectric platform

密封	摩擦力矩/N·m			冲击振动	动密封性能	备注
	常温	低温	高温			
磁流体	1.0	2.5	1.0	0.88	达到气密	稳定精度 满足指标 启动力矩较大
U型密封	2.356	2.4	2.35	2.356	达到水密	稳定精度变差
迷宫	0.172	0.172	0.172	0.172	不能满足	稳定精度 满足要求

通过表 1 可以看出,迷宫式密封虽然能够符合伺服稳定系统的要求,但无法达到气密或水密的要求;挤压式 U 形密封圈虽然能够达到密封,但是由于摩擦力矩较大,严重影响光电观瞄设备的稳定精度,只能通过结构增加环架来消除摩擦力矩,这样就会带来成本的增加。磁流体密封能够很好地解决密封与摩擦力矩之间的矛盾^[10],能够满足稳定精度的要求,振动时出现漏液现象是装配工艺的问题,针对性改进后达到使用要求。

4 结论

通过上述分析和试验验证,结合每种密封所对应的公式,能够分析得出 3 种密封结构所带来的摩擦力矩,进而能进一步分析密封对周视光电观瞄设备稳定精度的影响,还可为关重件电机的设

计选取提供可靠数据。

通过 3 种动密封结构的实际对比,可以看出磁流体作为一种新型的动密封结构形式,能够满足周视光电设备对于动密封的指标要求,是动态密封的一个新的发展方向。

参考文献:

[1] 郭新胜,鱼云岐,朱红. 磁流体密封技术在坦克车长周视镜上的应用[J]. 应用光学, 2009, 30(sup): 42-45.
GUO Xin-sheng, YU Yun-qi, ZHU Hong. Application of magnetic fluid sealing technology in panoramic sight of tanks[J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(sup): 42-45. (in Chinese with an English abstract)

[2] HIRABAYASHI H, MATSUSHIMA A. A study of

- friation in high-speed face seals[J]. *Lubrication Engineering*, 1984, 40(9): 533-538.
- [3] 孙见君,魏龙,顾伯勤. 机械密封的发展历程与研究动向[J]. *润滑与密封*, 2004(4): 128-134.
SUN Jian-jun, WEI Long, GU Bo-qin. Development course and research trend on the mechanical seal[J]. *Lubrication Engineering*, 2004(4): 128-134. (in Chinese with an English abstract)
- [4] 李德才. 磁性液体理论及应用[M]. 北京:科学出版社, 2003.
LI De-cai. Theory and application of magnetic fluid [M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)
- [5] 袁林生,高凌. 磁流体密封技术[J]. *电子机械工程*, 2011, 27(3): 53-55.
YUAN Lin-sheng, GAO Ling. Magnetic fluid seal technique [J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2011, 27(3): 53-55. (in Chinese with an English abstract)
- [6] 宫燃. 传动装置动密封失效分析及试验研究[D]. 杭州:浙江大学, 2008.
GONG Ran. Analysis and experimental study on the failure of seal in transmission of vehicle[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. (in Chinese)
- [7] 顾永泉. 机械密封实用技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2001.
GU Yong-quan. Practical technology of mechanical seal [M]. Beijing: Mechanical Industrial Press, 2001. (in Chinese)
- [8] 段红建,周丽华,夏元杰. 一种周视潜望镜的动密封研究[J]. *应用光学*, 2009, 30(sup): 57-60.
DUAN Hong-jian, ZHOU Li-hua, XIA Yuan-jie. Research on dynamic seal of panoramic periscope[J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, 30(sup): 57-60. (in Chinese with an English abstract)
- [9] ROSENSWEIG R E. *Ferrohydrodynamics*[M]. New York: Dover Publications INC, 2002.
- [10] 杨文明,李德才,蔡玉强. 磁流体密封中转轴偏心时磁场和轴受力的数值计算[J]. *润滑与密封*, 2009, 34(12): 48-51.
YANG Wen-ming, LI De-cai, CAI Yu-qiang. Numerical calculation of magnetic field and magnetic force exerted on the shaft with eccentricity in magnetic fluid seal[J]. *Lubrication Engineering*, 2009, 34(12): 48-51. (in Chinese with an English abstract)