DOI: 10.3901/JME.2019.16.205

基于 TRIZ 理论的深海水液压电磁阀*

杨友胜^{1,2} 唐顺军¹ 王晓东¹ 冯辅周³

- (1. 中国海洋大学工程学院 青岛 266100;
2. 哈尔滨工程大学水下机器人技术重点实验室 哈尔滨 150001;
3. 陆军装甲兵学院车辆工程系 北京 100072)

摘要: 水深压力直接影响着海洋机电装备的性能及可靠性。以深海水液压电磁阀为例,运用 TRIZ 理论的物质-场模型及冲突矩阵,阐述水深压力补偿方式,提出水深压力硬补偿的方法。建立硬补偿式深海水液压电磁阀的模型,研制初试样机及试验平台,对其性能及影响因素进行研究。结果表明:① 硬补偿式深海水液压电磁阀性能良好:仿真及试验结果基本一致;电磁阀开启压力小,约为 0.3 MPa;密封性能优异,关闭状态下,阀的泄漏量为零;阀口全开时压力损失小,额定流量(7 L/min)下的压力损失约为 0.25 MPa;动态响应特性良好,开启时间 $t_1 \leq 30$ ms,关闭时间 $t_2 \leq 63$ ms。② 硬补偿方法能有效补偿水深压力:水下(2 km 以浅)工作时,电磁阀的相对启闭压力、响应时间等与系统工作压力有关,而与水深无关。可为海洋机电装备的水深压力补偿系统的设计提供新方法。

关键词: TRIZ 理论; 物质-场模型; 压力补偿; 水液压电磁阀; 硬补偿

中图分类号: TH137

Deep-sea Water Hydraulic Solenoid Valves Based on TRIZ Theory

YANG Yousheng^{1,2} TANG Shunjun¹ WANG Xiaodong¹ FENG Fuzhou³

- (1. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100;
2. Science and Technology on Underwater Vehicle Technology of Harbin Engineering University, Harbin 150001;
3. Department of Vehicle Engineering, Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072)

Abstract: The water depth pressure exerts great effects on performance and reliability of marine electromechanical equipment. Based on Material-field Model and Contradiction Matrix of TRIZ theory, a case study of deep-sea water hydraulic solenoid valve (DWSV) is chosen to discuss the water depth pressure compensation methods. A new method, which is called as “hard compensation” is presented. A model of the hard-compensated DWSV is developed. A pilot prototype and a test bench are designed and manufactured. Numerical and experimental studies are carried out to investigate the valve’s performances and its influence factors. The results show the following: ① The hard-compensated DWSV has good performances: the numerical results are consistent with the experimental ones; the opening pressure is small and about 0.3 MPa; the valve has good sealing performance and no leakage in off state; the pressure loss is small when the valve opening completely and it’s about 0.25 MPa at the rated flow (7 L/min); the valve has good dynamic response characteristics, the opening time $t_1 \leq 30$ ms and closing time $t_2 \leq 63$ ms. ② The hard-compensation method can compensate the water depth pressure effectively. The water depth exerts no effects on the relative engaging pressure and the response time of the prototype, while the system working pressure has effects on them when it works undersea (≤ 2 km). A new method is provided for the design of the depth pressure compensation system of marine electromechanical equipment.

Key words: TRIZ theory; material-field model; pressure compensation; water hydraulic solenoid valve; hard compensation

0 前言

在液压系统中,电磁阀作为控制元件,用于实

现管路通断。深海电磁阀在材料、结构、密封及压力补偿等方面均异于传统水液压电磁阀之外,其电磁铁工作环境由气隙转为水隙,压力场也由单一气压转为大气压与水深压力混合的压力场。故传统的水液压电磁阀不能直接应用于深海^[1],需研制与深海环境相适应的新型电磁阀。国内外学者从不同方面对电磁阀进行了一系列研究。

* 国家自然科学基金(51275495、51475197)、山东省重点研发计划(2017GGX30106)、山东省自然科学基金(ZR2018MEE023)、中央高校基本科研业务费专项(201562009)和 underwater 机器人技术重点实验室研究基金(SXJQR2017KFJJ04)资助项目。20181025 收到初稿,20190401 收到修改稿

(1) 结构及动态特性方面。WANG 等^[2]基于 TRIZ 理论有效解决了电磁阀设计中存在的运动灵活性和密封性的冲突问题。胡玉梅等^[3]研制了一种可同时应用于深海及陆地的插装式海水电磁阀。聂松林等^[4]研制了一种深海采集用内部压力补偿的两位三通电磁换向阀,通过阀芯中心连接孔将处于外界高压环境的两侧连通,实现压力平衡。刘银水等^[5]研制了一种海水电磁阀组,该阀组可直接应用于海水环境,具有结构简单、压力损失小、无阻尼小孔,抗腐蚀性强等优点。张永伟等^[6]研制了一种深海电磁阀,并在电磁铁腔体中设有压力补偿油,利用压力补偿油的可收缩性实现海水压力平衡。陈辉等^[7]基于 Matlab 对电磁单向阀的动态响应特性进行了仿真分析,并对电磁铁的参数进行计算,得到了一种满足性能要求的深海电磁单向阀。林启明等^[8]利用经验公式法及有限元方法对比例电磁阀进行设计计算,引用带有动密封的压力平衡式结构,实现了比例电磁阀体积不变前提下适用不同入口压力。刘向阳等^[9]研制了一种水压插装式三位四通电磁换向阀,该阀具有高压、大流量以及速度响应快等优点。

(2) 工作可靠性方面。WU 等^[10]发现温升是深海电磁阀失效的主要原因,并发现可电压驱动是减少故障的有效方法。赵旭峰等^[11]发现海水电磁阀吸合过程中的自感效应和阀芯所受瞬态液动力是导致其热态下故障率增高的主要原因,并提出了合理的优化方法。邓志辉等^[12]分析得出液压油温度与复位弹簧的劲度系数对直流液压电磁阀通断响应性能影响较大,温度过高,会导致泄漏,复位弹簧劲度系数越大,电磁阀开启时间越慢,关闭时间越快。ANGADI 等^[13]采用有限元法构建了电磁阀多物理理论模型,模型结果预测电磁阀易受电-热-机械耦合故障机制的影响。刘艳芳等^[14]采用二维轴对称有限元法,建立了电磁阀的多物理场耦合热力学模型,仿真表明,使用环境与工作电流引起的温度过高或应力过大都会导致电磁阀失效。

然而,水深压力补偿方式作为深海电磁阀的关键技术,对其研究还有待进一步深入。此外,因海水特殊的理化特性,其异于空气的导磁率会改变电磁铁磁力和线圈电流,且动铁极易与海水中的金属离子发生电极效应,产生腐蚀(搪瓷处理后可应用于浅水区,但无深水运行方面的资料),故电磁铁需与海水隔绝。因此,有必要研究如何在电磁铁与海水隔绝情况下实现深海水液压电磁阀的内外压力补偿。运用 TRIZ 理论的物质-场模型及冲突矩阵,提出了一种二位三通深海水液压电磁阀结构与水深压

力硬补偿的方法,对其静态特性及影响因素进行了研究。相比传统电磁阀,新研发的深海水液压电磁阀结构新颖、响应速度快且密封性能优异,关闭状态下,电磁阀的泄漏量为零。

1 问题分析

1.1 问题分析方法

物质-场分析法是对具体问题定义并将问题模型化的方法,采用符号来表达技术系统变换的建模技术^[15-16]。物质-场分析法解决本问题的过程如下。

(1) 指定物质: S_{1m} -动铁(被动作用体), S_{2a} -衔铁, S_{2s} -轴用格莱圈、 S_{2w} -海水(主动作用体)。

(2) 确定场: F_M -电磁场, F_{Me} -预压力场, F_{Hw} -水深压力场,图1为物质-场分析图。

图1 物质-场分析图

(3) 将图1所示复杂系统分解后,可运用多个物质-场三角形组合表示,物质-场模型如图2所示。

图2 物质-场模型

由物质-场模型分析得:① 电磁铁通电,衔铁 S_{2a} 和动铁 S_{1m} 被磁化,产生电磁吸力,驱动动铁 S_{1m} 运动(有效作用);② 海水 S_{2w} 产生静压力 F_{Hw} ,阻止动铁 S_{1m} 运动(有害作用);③ 预压力 F_{Me} 压缩密封圈 S_{2s} ,使之变形,产生的摩擦力阻止动铁 S_{1m} 运动(有害作用);④ 水深压力 F_{Hw} 进一步压缩密封圈 S_{2s} ,增大摩擦力阻止动铁 S_{1m} 运动(有害作用)。

本系统为有害效应的完整物质-场模型,主要问

题为电磁铁的电磁吸力不足以克服水深压力和因水深压力所产生的摩擦阻力。

1.2 问题求解

对于上述有害效应物质-场模型, 可通过引入新物质或场来消除有害作用的影响^[17]。根据 76 个标准解中的第 12 条: 在一个系统中有用及有害效应同时存在, 且 S_1 与 S_2 必须处于接触状态, 则增加场 F_h , 使之抵消 F_{Hw} 的影响, 或得到附加的有效作用。故将标准解给出的思想及方法运用到实际问题中, 提出软补偿与硬补偿两种解决方案。

1.2.1 软补偿

深海水液压电磁阀的软补偿结构如图 3 所示, 通过引入新物质矿物油 S_{3o} (低压环境有应用先例, 即采用湿式电磁铁, 电磁铁工作于矿物油中; 深海电机也采用该压力补偿方式^[18]), 产生新静压力场 F_{ho} 以补偿水深压力。

图 3 软补偿示意图

由图 3 中的物质-场模型分析得: ① 新物质矿物油 S_{3o} 在活塞作用下, 保持其压力与环境压力相等, 作用在动铁 S_{1m} 上, 产生静压力 F_{ho} 以补偿水深压力 F_{Hw} (有效作用); ② 矿物油黏度大, 当电磁铁的动铁运动时, 受到较大的阻尼及黏性摩擦力, 导

致电磁铁的响应速度慢 (有害作用); ③ 由于引入 S_{3o} , 作用于密封圈 S_{2s} 上的压力 F_{Me} 进一步增大, 摩擦力也随之增大 (有害作用)。

软补偿方案中, 水深压力得以补偿, 同时, 引入了其他有害作用, 如矿物油的粘性摩擦力和密封圈的摩擦力, 从而影响阀工作性能。在该方案基础上, 无法继续引入有效的物质或场来解决上述有害作用, 故软补偿不能作为理想解决方案。

1.2.2 硬补偿

图 4 为深海水液压电磁阀的硬补偿示意图, 通过引入新物质密封圈 S_{3s} , 将动铁上杆伸出电磁阀外部以实现压力补偿。

图 4 硬补偿示意图

分析硬补偿的物质-场模型得: ① 通过新物质密封圈 S_{3s} , 直接将动铁上杆伸出, 使作用在上、下杆的静压力 F_{Hw} 得以互相补偿 (有效作用); ② 新增了 S_{3s} 对动铁的摩擦阻力 (有害作用)。

硬补偿方案中电磁铁工作于气隙、低压环境中, 可采用干式电磁铁, 且能实现压力补偿。但该方案只解决阀关闭问题, 对于阀的开启动作, 可继续应用标准解的思想, 引入了新物质弹簧 S_{3t} 。改进后结构如图 5 所示。

(a) 物质-场分析图

(b) 物质-场模型

图5 硬补偿改进示意图

结果表明,在图4所述的硬补偿方案基础上引入新物质弹簧,既保证了电磁阀内外压力补偿,又解决了阀开启困难问题。

1.3 细节优化

TRIZ理论认为发明问题的核心是解决冲突,没有冲突的设计或采用折中的方法解决冲突不是创新^[19-20]。通过对图5所示深海水液压电磁阀样机进行性能试验,结果发现:尚有泄漏、动铁动作缓慢等问题。经对比分析,电磁阀仍存下述细节问题。

(1) 试验后重装电磁铁推杆时,2处格莱圈受到推杆锐边切割而损坏,影响密封性能,这是被恶化的特性,对应通用技术参数“12 形状”,以此作为被恶化的参数。格莱圈在工作过程中受到推杆的作用力(功率)是欲改善的特性,对应通用技术参数“21 功率”,以此作为待改善的参数。根据上述参数,查询TRIZ矛盾矩阵表,得到4条推荐发明原理:29、14、2、40。经对比分析选取发明原理14:曲面化原理,即将推杆下端1处圆柱面用曲面代替,既避

免推杆安装过程对格莱圈的损坏,又改善1、2处的密封性能。

(2) 阀中2、3处推杆的表面质量及位置公差(如同轴度)对密封及摩擦力影响较大,上下杆处的位置公差提高了加工及安装精度,增加了其复杂程度。将加工及安装精度作为被改善参数,对应通用技术参数“29 制造精度”;加工及安装过程的复杂程度作为被恶化参数,对应通用技术参数“36 设备复杂性”。查询TRIZ矛盾矩阵表,得到3条推荐发明原理:26、2、18。对比分析后选取发明原理2:抽取原理(又称分离原理),将物体中一个或多个部分去除,即将推杆的一体化结构进行分离,分为补偿杆、动铁及阀芯三部分,在保证密封及压力补偿的情况下降低加工及安装的复杂程度。

1.4 结构及工作原理

优化改进后,二位三通深海水液压电磁阀结构如图6所示。该阀以液压油或天然水(海水或淡水)为工作介质,工作压力0~20 MPa,额定流量7 L/min,其功能为控制管路通断。电磁阀主要由阀体、阀座、阀芯、电磁铁及压力补偿杆等组成。电磁铁失电时,阀芯9及电磁铁8受液体压力作用而上移,阀座11内的进口P和出口O之间的空腔连通,电磁阀开启;电磁铁得电时,动铁在电磁吸力作用下下移,与此同时,压力补偿杆6在外部水深压力的作用下向下运动,推动电磁铁8及阀芯9下移,截断阀座内进口P和出口O的连通,电磁阀关闭。表1为电磁阀关键结构参数。

图6 深海水液压电磁阀结构示意图

1. 过渡接头 2. 格莱圈上盖板 3. 格莱圈 4. 上端盖
5. 定位套筒 6. 压力补偿杆 7. 阀体 8. 电磁铁 9. 阀芯
10. 格莱圈下盖板 11. 阀座

表 1 深海水液压电磁阀关键结构参数

结构参数	参数值
阀芯锥角/(°)	30
阀芯直径/mm	6
阀芯最大开启高度/mm	3
压力补偿杆直径/mm	6
阀座孔直径/mm	5
电磁铁最大电磁吸力/N	190

TRIZ 理论在本研究中的应用思想为: 先用物质-场分析和 76 个标准解拟定大致方案, 进而应用冲突解决理论进行细节优化, 得到最优模型。

2 数学模型

建立数学模型时, 只考虑电磁阀自身特征参数, 忽略其他元件对动态特性的影响, 不计阀芯及电磁铁重量, 电磁阀动态特性方程如下。

(1) 阀口流量方程

$$Q = C_d \pi d x \sin \alpha \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1 - P_2)} \quad (1)$$

式中, C_d 为阀口流量系数; d 为阀座孔直径; x 为阀芯位移; α 为锥阀半锥角; P_1 、 P_2 分别为阀的进、出口压力。

(2) 阀芯受力平衡方程

$$m\ddot{x} + B\dot{x} = P_2 A_3 - P_1 A_1 - P_2 A_2 + P_3 A_3 + F_1 + F_2 - F_3 \quad (2)$$

式中, A_1 、 A_2 、 A_3 分别为电磁阀进、出口及补偿杆的有效受力面积; m 为阀芯质量; B 为阀芯运动黏性阻尼系数; P_3 为水深压力; F_1 为电磁吸力; F_2 为阀芯所受稳态液动力; F_3 为阀芯处格莱圈摩擦阻力。

$$F_1 = \frac{1}{2} \dot{L}(x) i^2 = \frac{2\mu_0 \pi i^2 N^2 D^2 l^2}{(rD + 4l\delta_0 - 4lx)^2} \quad (3)$$

式中, μ_0 为真空磁导率; i 为线圈电流; N 为线圈匝数; D 为动铁直径; l 为动铁长度; r 为非工作气隙平均宽度; δ_0 为阀芯行程; x 为阀芯位移。

(3) 阀口流量连续性方程

$$Q_0 = Q + A_1 \dot{x} + \frac{V_1}{E} \dot{P}_1 \quad (4)$$

式中, Q 为阀口流量; $A_1 \dot{x}$ 为阀芯位移线性流量; V_1 为泵出口至电磁阀阀口的管路容积; E 为水的弹性体积模量。

3 试验方案

参照 GB 8107-1987 电磁阀试验方法, 对被测电磁阀的静态特性(开启压力、压力流量特性)和动态响应特性进行试验研究。图 7 为深海水液压电磁阀试验回路图, 其中元件 12 为被测电磁阀, 电磁阀的压力变化由压力传感器 9 测得, 电磁阀的流量变化由流量传感器 13 测得, 性能试验台如图 8 所示。

图 7 深海水液压电磁阀试验回路

1. 水箱 2. 过滤器 3. 转速传感器 4. 柱塞泵 5. 伺服电机
6. 单向阀 7. 压力表 8. 温度计 9. 压力传感器 10. 安全阀
11. 节流阀 12. 被测电磁阀 13. 流量传感器 14. 过滤器

图 8 深海水液压电磁阀性能试验台

开启压力试验时, 被测电磁阀 12 得电关闭, 当电磁铁失电后, 调节节流阀 11 使被测电磁阀的入口压力逐渐升高, 直至出口有水流为止。记录此时压力值, 并重复试验几次。

在进行压力流量特性试验时, 保证被测电磁阀 12 阀口全开, 调节节流阀 11 由全开至全闭合, 使通过被测电磁阀的流量从零逐渐递增至 7 L/min, 记录不同流量下入口压力变化。

调节被测电磁阀 12 入口压力值分别为 6 MPa、8 MPa、10 MPa、12 MPa, 节流阀处于关闭状态, 控制被测电磁阀突然开启和关闭, 测试其动态响应特性。

4 结果分析

4.1 开启压力

电磁阀在陆上开启压力主要取决于摩擦阻力。图 9 是由压力传感器 9 与流量传感器 13 测得数据绘制的电磁阀开启压力试验曲线,从图 9 中可以看出:① 电磁阀开启压力小,约为 0.3 MPa;② 电磁阀开启前无流量输出,即密封性能优异,无泄漏。试验压力略高于仿真压力,是由阀口处存在局部压力损失及水压致使密封圈摩擦力增大不均匀造成的。

图 9 陆上开启压力曲线

图 10 显示了电磁阀在水下开启压力仿真曲线,图 10a、10b 分别通过绝对和相对开启压力来表示电磁阀在水下的开启特性,其中绝对开启压力为阀芯克服实际环境压力而开启的压力,相对开启压力为绝对开启压力与理论环境压力的压力差值。从图 10 中可以看出:在 2 km 以浅,① 电磁阀的绝对开启压力随水深增加而增加,水深 2 km 时绝对开启压力约为 20.4 MPa;② 电磁阀相对开启压力与水深无关,相对开启压力约为 0.3 MPa。

(a) 绝对开启压力曲线

(b) 相对开启压力曲线

图 10 水下开启压力仿真曲线

4.2 压力流量特性

图 11 是由压力传感器 9 与流量传感器 13 测得数据绘制的电磁阀阀口压力流量特性试验曲线,从图 11 中可以看出:① 随节流阀关闭,电磁阀流量增加,入口压力也随之上升,待节流阀完全闭合,入口压力与流量均升至最大;② 电磁阀的压力流量特性良好,通过额定流量 (7 L/min) 的压力损失约为 0.25 MPa。试验结果略大于仿真结果,是由阀块的设计误差、管路中存在沿程压力损失及局部压力损失等造成的。

图 11 陆上阀口压力流量特性曲线

4.3 动态响应特性

图 12 是由压力传感器 9 测得数据绘制电磁阀在陆上的动态响应特性试验曲线,从图 12 中可以看出:① 动态响应特性良好,开启时间 $t_1 \leq 30$ ms,关闭时间 $t_2 \leq 63$ ms;② 对不同入口压力时响应特性进行仿真,试验特性曲线与仿真特性曲线基本一致;③ 电磁阀入口压力越高,关闭时间越长,而开启时间保持不变。

图 12 陆上动态响应特性曲线

图 13 是 2 km 以浅电磁阀动态响应特性仿真曲线, 仿真过程中设置水深、系统内外压差(即安全阀调整压力)为变量, 其他参数均为定值。当系统内外压差分别为 6 MPa、8 MPa、10 MPa 时, 对不同水深动态响应特性进行仿真分析, 结果如图 13 所示。从图 13 中可以看出: ① 系统内外压差一定时, 电磁阀在陆上开启时间为 30 ms, 水下时约为 20 ms, 且开启与关闭时间均与水深无关; ② 水深一定时, 关闭时间随系统内外压差的增大而延长, 而开启时间与系统内外压差无关。

图 13 水下动态响应特性仿真曲线

5 结论

运用 TRIZ 理论的物质-场模型及冲突矩阵, 提出了水深压力硬补偿的方法。建立硬补偿式深海水液压电磁阀的模型, 研制了初试样机及试验平台, 对其性能及影响因素进行了仿真与试验研究, 得出如下结论。

(1) 硬补偿式深海水液压电磁阀静态响应特性

良好: 开启压力小(约为 0.3 MPa), 且密封性能优异, 关闭状态下, 泄漏量为零。此外, 电磁阀的阀口全开时压力损失小, 通过额定流量(7 L/min)的压力损失约为 0.25 MPa。

(2) 硬补偿式深海水液压电磁阀动态响应特性良好: 开启时间 $t_1 \leq 30$ ms, 关闭时间 $t_2 \leq 63$ ms。关闭时间随入口压力的增大而延长, 开启时间保持不变。

(3) 硬补偿方法能有效补偿水深压力, 水下(2 km 以浅)工作时, 深海水液压电磁阀的绝对开启压力随水深的增加而增加, 深海 2 km 时的绝对开启压力约为 20.358 MPa; 其相对启闭压力、响应时间等与系统工作压力有关, 与水深无关。研究成果为海洋机电装备的水深压力补偿提供新方法。

参 考 文 献

- [1] ZHAO H L, YU J, YUE Y L, et al. Design of hydraulic system of subsea X-Tree[J]. Applied Mechanics & Materials, 2012, 155-156: 540-544.
- [2] WANG J H, JU Y S, LU L Y, et al. An Introduction to application of TRIZ theory in design of solenoid valve [J]. Modern Vehicle Power, 2014(2): 9-12.
- [3] 胡玉梅, 刘银水, 江涛, 等. 海水液压电磁阀的研制[J]. 流体传动与控制, 2012(4): 23-27.
HU Yumei, LIU Yinshui, JIANG Tao, et al. Development of seawater hydraulic solenoid valves[J]. Fluid Power Transmission & Control, 2012(4): 23-27.
- [4] 聂松林, 刘向阳, 尹帅, 等. 一种深海采集用两位三通电磁换向阀: 中国, 103615570A [P]. 2016-02-17.
NIE Songlin, LIU Xiangyang, YIN Shuai, et al. Two-position three-way electromagnetic reversing valve for deep-sea collection: China, 103615570A[P]. 2016-02-17.
- [5] 刘银水, 毛旭耀, 江涛, 等. 一种海水电磁阀组: 中国, 102679017B [P]. 2013-07-24.
LIU Yinshui, MAO Xuyao, JIANG Tao, et al. Seawater Solenoid Valve Group: China, 102679017B[P]. 2013-07-24.
- [6] 张永伟, 郑西涛, 刘玉姣. 一种深海电磁阀: 中国, 205781060U [P]. 2016-12-07.
ZHANG Yongwei, ZHENG Xitao, LIU Yujiao. Deep sea electromagnetic valve: China, 205781060U[P]. 2016-12-07.
- [7] 陈辉, 米智楠. 深海电磁单向阀的设计与仿真研究[J]. 流体传动与控制, 2012(5): 13-16.
CHEN Hui, MI Zhinan. Design and simulation of deep-sea solenoid check valve[J]. Fluid Power Transmission & Control, 2012(5): 13-16.

- [8] 林启明, 杨阳, 李强. 压力平衡式比例电磁阀的仿真与试验探究[J]. 液压气动与密封, 2018, 38(11): 1-4.
LIN Qiming, YANG Yang, LI Qiang. Simulation and experimental research of unloading proportional solenoid valve [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2018, 38(11): 1-4.
- [9] 刘向阳, 聂松林, 李光辉, 等. 水压插装式三位四通电磁换向阀动态性能分析[J]. 液压与气动, 2017(5): 69-73.
LIU Xiangyang, NIE Songlin, LI Guanghui, et al. Dynamic performance analysis of water hydraulic cartridge three-position fourway directional valve[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2017(5): 69-73.
- [10] WU S, ZHAO X F, LI D L, et al. Theoretical study and experimental optimization on the reliability of a seawater hydraulic solenoid valve[J]. International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing, 2015, 3: 157-161.
- [11] 赵旭峰, 张文忠, 刘银水, 等. 海水液压电磁阀失效分析[J]. 液压与气动, 2013(6): 110-113.
ZHAO Xufeng, ZHANG Wenzhong, LIU Yinshui, et al. Failure research on a seawater hydraulic solenoid valve[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2013(6): 110-113.
- [12] 邓志辉, 张西良. 直流液压电磁阀通断响应性能分析与测试[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(12): 1300-1305.
DENG Zhihui, ZHANG Xiliang. Performance analysis and test on on-off response of DC hydraulic solenoid valve[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(12): 1300-1305.
- [13] ANGADI S V, JACKSON R L, CHOE S Y, et al. Reliability and life study of hydraulic solenoid valve. Part 1: A multi-physics finite element model[J]. Engineering Failure Analysis, 2009, 16(3): 874-887.
- [14] 刘艳芳, 毛鸣翀, 徐向阳, 等. 液压电磁阀多物理场耦合热力学分析[J]. 机械工程学报, 2014, 50(2): 139-145.
LIU Yanfang, MAO Mingchong, XU Xiangyang, et al. Multi-discipline coupled thermo-mechanics analysis of hydraulic solenoid valves[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(2): 139-145.
- [15] XU Q H, WU C L. The research on mechanical product creative design based on TRIZ[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2004, 18(7): 32-33.
- [16] 山旭. 基于 TRIZ 理论物质-场和标准解法研究及应用[D]. 西安: 陕西科技大学, 2018.
SHAN Xu. Research and application of substance-field and standard solution based on TRIZ theory[D]. Xi'an: Shanxi University of Science and Technology, 2018.
- [17] 王秋月, 杨伯军, 段秀玲. 基于物质-场模型及相似性的标准解重新分类研究[J]. 工程设计学报, 2015, 22(6): 520-527.
WANG Qiuyue, YANG Bojun, DUAN Xiuling. Reclassification of standard solutions based on Su-field model and similarity[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2015, 22(6): 520-527.
- [18] ZOU B, DENG B, YU L Y, et al. Research on the application of immersing brush-less DC motor in deep-sea hydraulic power station[J]. Ocean Technology, 2008(1): 71-73.
- [19] 张建辉, 梁瑞, 韩波, 等. 面向复杂产品的问题流网络构建及求解过程模型[J]. 机械工程学报, 2018, 54(23): 160-173.
ZHANG Jianhui, LIANG Rui, HAN Bo, et al. The problem flow network building and solving process model for complex product [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(23): 160-173.
- [20] SMITH E M. From Russia with TRIZ[J]. Mechanical Engineering, 2003, 125(3): 18-20.

作者简介: 杨友胜(通信作者), 男, 1976 年出生, 博士。主要研究方向为水液压及微型液压技术、海洋机电装备技术等。

E-mail: ysyang@ouc.edu.cn

唐顺军, 男, 1994 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为海洋机电装备技术。

E-mail: 1124580219@qq.com

王晓东, 男, 1991 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为水液压及微型液压技术、海洋机电装备技术。

E-mail: xdwangouc@163.com

冯辅周, 男, 1971 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机液系统状态检测与故障诊断。

E-mail: fengfuzhou@tsinghua.org.cn