

变速器用挡位开关故障分析及改进

赵林

(陕西航空电气有限责任公司, 兴平 713107)

【摘要】为了解决变速器用挡位开关在使用中故障问题,结合挡位开关使用中的故障件,对挡位开关密封不良造成内部进油问题、作动压力下开关通断失效问题以及触点烧蚀问题进行分析,进一步提高挡位开关的性能。验证结果表明,所提出的方案可有效解决挡位开关在使用过程中存在的问题。

关键词:变速器 挡位开关 故障诊断 控制策略优化

中图分类号:U463.66

文献标志码:A

DOI: 10.20104/j.cnki.1674-6546.20220090

Fault Analysis and Improvement of Gearbox Gear Switch

Zhao Lin

(Shanxi Aero Electric Co., Ltd., Xingping 713107)

【Abstract】In order to eliminate fault of gearbox gear switch in use, this paper, by correlating with the faulty parts in the use of gear switch, analyzed oil intake problem caused by poor sealing of gear switch, switch on-and-off failure under actuating pressure as well as contact ablation, to further improve the performance of the gear switch. The verification results show than the proposed scheme can effectively solve the problems existing in the use of the gear switch.

Key words: Gearbox, Gear switch, Fault diagnosis, Control strategy optimization

【引用格式】赵林. 变速器用挡位开关故障分析及改进[J]. 汽车工程师, 2024(5): 39-44.

ZHAO L. Fault Analysis and Improvement of Gearbox Gear Switch[J]. Automotive Engineer, 2024(5): 39-44.

1 前言

根据整车控制电路的不同,挡位开关从用途上可分为空挡开关、倒挡开关和高低挡开关。其中,空挡、倒挡开关一般安装于变速器换挡操纵总成上,高低挡开关位于高低挡换挡气缸上,变速器挡位开关的工作性能直接影响用户的驾驶体验。

为分析挡位开关在使用中出现故障的原因,本文对故障件进行拆检,针对空挡开关密封不良、倒挡开关触点烧蚀、高低挡开关在作动压力环境中通断功能不稳定等问题,分别从开关内部橡胶密封垫材料耐温性和抗拉强度、银接点接触方式、作动压力下的密封结构等方面开展性能提升,并依据实际使用工况进行模拟试验,对改进前、后的挡位开关进行对比测试,验证方案的有效性。

2 变速器用挡位开关工作原理

挡位开关根据结构功能可分为触点常闭型与触点常开型。以常闭型开关为例,开关的结构如图1所示。

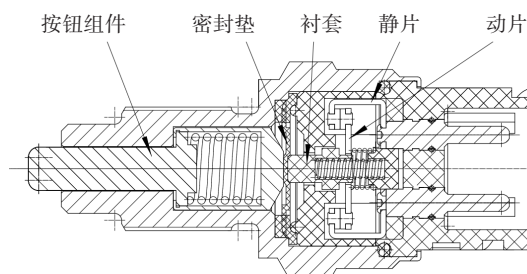


图1 挡位开关结构

在外力作用下,按钮组件在一定范围内做直线运动。塑料衬套带动动片压缩弹簧,使动片与静片

的触点断开,此时,开关由常闭状态转换为断开状态。当外力消失时,弹簧恢复到原始状态,按钮组件与动片均复位,开关由断开状态转换为闭合状态。

变速器用挡位开关可在12~24 V直流电压下工作,其工作电流为0.5~1.0 A。使用开关所需环境温度为一40~150 °C,空挡、倒挡的气压范围均低于0.2 MPa,高低挡的气压范围为0.7~0.8 MPa。空挡、倒挡开关的使用寿命可达100万次,高低挡开关的使用寿命为40万次。

3 主要故障模式

经售后市场对旧件复测及拆解后的反馈,对其故障模式进行分类统计,结果如表1所示。

表1 故障模式占比情况统计

故障模式	计数/件	占比/%
内部进油	65	34.76
漏、憋气	46	24.60
触点烧蚀	31	16.58
通断行程超差	12	6.42
塑料件损坏	10	5.35
按钮卡滞	8	4.28
插头部位进水	6	3.20
衬套偏磨	5	2.67
其他	4	2.14
合计	187	

通过开关故障模式的统计分析,开关内部进油、漏气、憋气及触点烧蚀故障模式累计占比为75.94%,是造成产品失效的主要故障模式,也是本文的研究重点。

4 故障分析及性能提升

4.1 开关内部进油故障

4.1.1 故障表现

挡位开关通过橡胶密封垫将由按钮触发端飞溅的油液及其他杂质隔离。经故障件拆解,开关的进油故障集中于3个方面:密封垫局部撕裂,油液从撕裂处渗入开关内部;密封垫老化变硬,丧失密封作用;内部进油开关均为空挡开关。

4.1.2 原因分析

针对密封垫局部撕裂和老化现象,进一步分析开关的设计结构及使用环境。

开关工作时,密封垫与按钮同步运动。挡位切

换时,空挡开关需同时动作,由于推动密封垫的按钮组件为金属件,每次触发均伴有一定的冲击,因此,在长期工作中,密封垫因强度不足而撕裂,最终导致开关内部进油。

现有的橡胶密封垫材料采用丁腈橡胶(Acrylonitrile-Butadiene Rubber, NBR),耐高温可达120 °C。由于工况复杂(如长上坡、长下坡的低速挡行驶致变速器倾斜、局部缺油等),重型载货汽车及工程机械车辆的变速器温度高于120 °C,进而加速了开关密封垫的老化,令其丧失密封作用。

4.1.3 改进方案

通过分析,内部进油故障原因为密封垫的抗撕裂能力不足且耐温等级较低。由此,对密封垫进行相应改进。

在密封垫上增加尼龙布贴片夹层,提高其抗撕裂性能^[1]。该夹层为单层锦丝绸织物(锦纶丝材料为尼龙,通常称为尼龙布),将氢化丁腈橡胶热硫化的同时与尼龙布牢固粘合^[2]。其中,尼龙布的厚度为0.16 mm,改进后的尼龙网布密封垫的结构如图2所示。

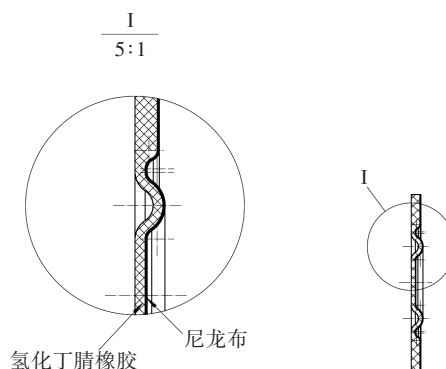


图2 尼龙布密封垫

鉴于尼龙布的织物组织为平纹,且经纬线交点多,具有坚固、耐磨、经纬向断裂强力大等显著优势,尼龙布物理机械性能如表2所示。改进后的橡胶密封垫兼具尼龙织物的高模量(橡胶的弹性模量为 8.75×10^{-3} GPa,尼龙布的弹性模量为20 GPa,尼龙布增加了密封垫的整体弹性模量)、高强度与橡胶材料的柔性、耐疲劳性能,增强了开关的抗撕裂性能。

表2 锦丝织物(尼龙布)的物理机械性能^[3]

品名	幅宽/cm	克重/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$	密度/根 $\cdot (10 \text{ cm})^{-1}$		断裂强力/N	
			经丝	纬丝	经向	纬向
锦丝平纹绸	98±1.5	≤78	340	330	≤736	≤686

通过对丁腈橡胶、氟橡胶及氢化丁腈橡胶进行

高低温、耐油性能对比测试,如表3所示,最终选用耐高温等级更高的氢化丁腈橡胶^[4]提升密封垫的抗老化性能。该材料允许在150℃高温下长期工作,同时满足低温-40℃的环境需求,可延长开关的使用寿命。

表3 不同胶料耐温、耐油测试

测试项目	丁腈橡胶 5860	氟橡胶 F209	氢化 丁腈橡胶
热空气老化 (150℃,100h)	老化变硬	无老化	无老化
低温-40℃ 脆化测试	无脆硬	脆硬	无脆硬
耐齿轮油 (SAE85W/90 150℃,100h)	老化变硬	无老化	无老化

4.1.4 试验验证

为验证上述方案,本文设计了耐久性试验,如图3所示。

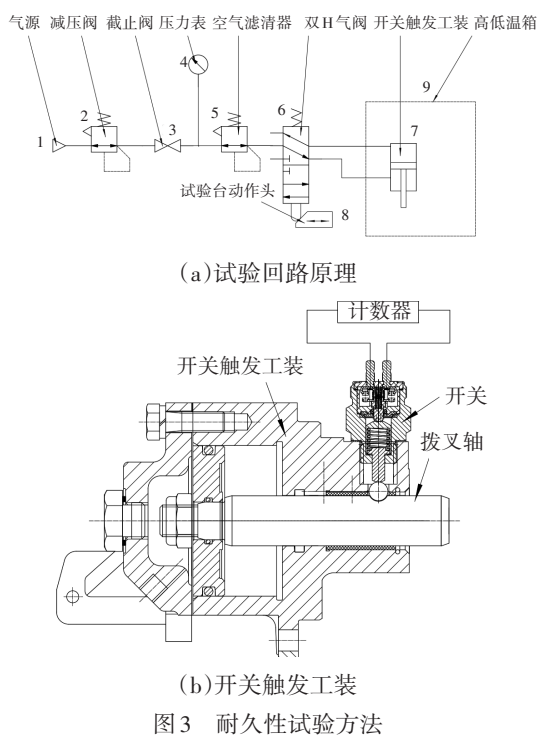
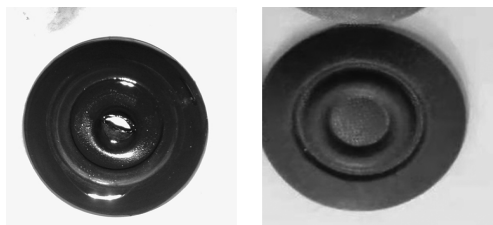


图3 耐久性试验方法

将图3b置入高低温箱内,试验台通入压缩空气,试验台动作头往复动作,从而驱动双H气阀气路切换,带动气缸拨叉轴伸缩动作,令开关触发工装推动开关,通过计数器记录试验次数。

进行100万次循环测试,其中,高温150℃循环20万次,低温-40℃循环20万次,常温循环60万次。试验后,改进前的3件试验样品中2件存在撕裂,3件全部老化变硬,改进后试验样品均无撕裂、老化现象,如图4所示。



(a)改进前 (b)改进后

图4 耐久性试验中密封垫实物对比

4.2 开关憋、漏气故障

4.2.1 故障表现

憋、漏气故障主要见于高低挡开关,换挡气缸进行气路切换时,气缸拨叉轴的伸缩顶压触发开关工作,如图5所示。其故障具体表现为:

- 达到一定气压时,开关出现插头部位漏气;
- 气压达到0.8 MPa时,出现误动作(常开式开关气压达到0.8 MPa后,非工作条件下误将开关接通);
- 通气工作一段时间后,开关完全失效,自然放置一段时间后,恢复正常工作。

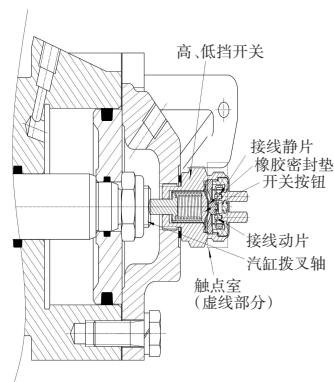


图5 高低挡开关工作示意

4.2.2 原因分析

4.2.2.1 触发方式问题

高低挡开关在换挡气缸上工作时,换挡气缸达到最大工作气压为0.8 MPa,由于换挡拨叉轴的切换速度快,作用于开关按钮的时间较短,导致开关内部的密封垫因受强大冲击力而破损,气体从外壳翻铆处泄漏。

4.2.2.2 设计问题

经核算,当气压瞬间达到0.8 MPa时,气压作用在密封垫上的力已远大于挡位开关内部动、静片间复位弹簧的弹性限度。因此,通气后密封垫胀起,推动衬套使开关动、静片接通出现误动作。高低挡开关内部结构件尺寸如图6所示,具体过程通过设计手册压力和应力单位换算表进行核算,作用

于密封垫的力 F 为:

$$F=PS \quad (1)$$

其中, S 为密封垫所受气压的最大面积:

$$S=(d^2/4 \times \pi) \quad (2)$$

式中, d 为气压作用的直径; P 为压强。

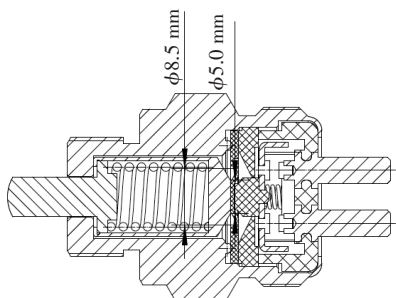


图6 高低挡开关内部衬套尺寸

0.8 MPa 气压施加在密封垫的力约为 30.258 N, 超过开关内部弹簧的弹性限度。由于开关内部的弹簧在触点工作时接通力的范围为 26~34 N, 在无触发的情况下易出现误动作。

4.2.2.3 工作环境因素

作动压力下, 当开关密封垫处于轻微泄漏状态, 气体将进入图 5 中的开关触点室, 积累至一定程度, 在接线动片与静片之间形成气压。按钮轴向顶压导致按钮弹簧压缩, 开关无法达到接通位置, 即通断失效。放置一段时间使内部气体自然泄出, 开关恢复通断功能。

4.2.3 改进措施

根据高低挡开关在作动压力下的特点, 经过反复验算, 取消开关中的密封平垫。同时, 考虑到气缸中气源的干燥性对开关的影响, 采用双 O 形密封圈的密封方式, 改进前、后密封结构如图 7 所示。

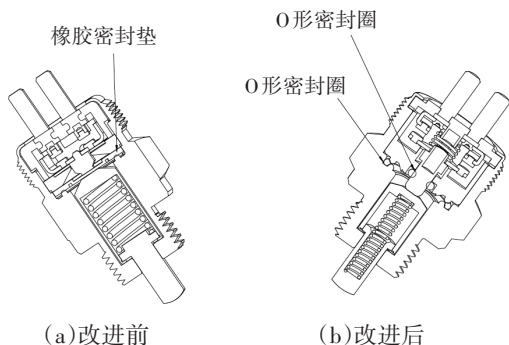


图7 开关内部结构对比

在衬套与底座之间增加一个 O 形密封圈, 形成动密封, 防止气体和杂质从开关进入插头组件。在开关与底座之间增加一个 O 形密封圈, 形成端面静密封, 防止气体、杂质等从侧向进入插头组件^[5]。

改进后可避免因密封垫破损导致的开关漏气, 防止开关通气时, 因气压的作用面积过大, 冲击力大引起的开关误动作, 并改善密封垫轻微破损导致气体渗漏引起的开关憋气现象。同时, 其内部的密封圈保持密封效果, 且工作时不受按钮触发的冲击影响, 增强了开关的耐久性。

4.2.4 试验验证

模拟实际工况, 将开关安装于变速器同型号的换挡气缸上, 搭建如图 3 所示的试验台, 该试验中气压的控制范围为 0.7~0.8 MPa。

对改进后的开关进行 3 组耐久性对比试验, 结果表明, 改进前的高低挡开关平均寿命为 15 万次, 改进后的平均寿命超过 40 万次, 可靠性大幅提升, 效果显著。

4.3 触点烧蚀

4.3.1 故障表现

触点烧蚀故障集中在倒车灯开关, 主要分为触点表面熔焊和接线片连接的衬套(工程塑料件)受热熔化。

4.3.2 原因分析

经分析确定, 触点烧蚀故障的主要原因是开关的材料和设计问题。

触点是在铜 (Cu) 基体上贴银氧化铬层 (AgCdO_{12}) 制成的, 故牌号为 $\text{AgCdO}_{12}/\text{Cu}$, 其作用是当开关触点带载时, 在电弧的作用下, 温度提高, 触点银层中 AgCdO_{12} 剧烈分散、蒸发, 而触点表面冷却时, 电弧能量降低, 从而改善灭弧性能^[6]。因此, 触点银层不断消耗, 较薄的银层将影响触头散热性能, 进而令触点过热熔焊。

电弧形成的瞬间产生较高热量, 由于金属接线片与衬套直接接触, 如图 8 所示, 而衬套由于耐热性较弱极易熔化受损, 最终导致开关失效。

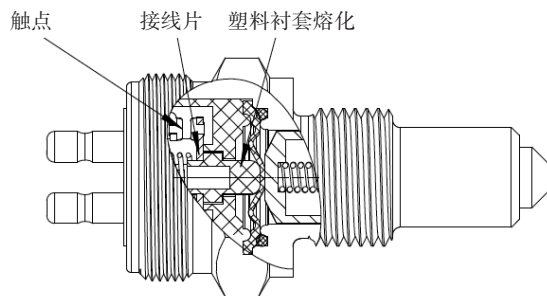
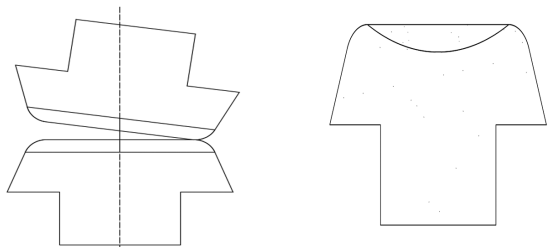


图8 触点烧蚀引起的绝缘件烧损

现有开关的动片与静片的触点均为平面型, 理论上, 只有动片和静片上对应的两个触点面完全平

行,才能进行面接触。实际上,如图9所示,由于开关结构存在误差,两个触点面无法完全平行,且接触时同心的概率极低。触点极易发生边缘接触,图9a中触点的边缘银层最薄,图9b所示的触点银合金层分布情况将影响触点散热性能,出现触点烧蚀故障,从而降低开关寿命。



(a)面触点实际接触 (b)触点银合金层分布情况

图9 面触点实际接触位置及触点银层分布情况

4.3.3 改进措施

开关工作时,电压和电流达到一定值,接线片的触点由接通到分离。此过程中,触点间不可避免地产生强烈的电弧。因此,如何提高开关的电磨损性能,降低电弧对开关的损害是改进的关键,为解决触点烧蚀故障,从以下方面进行改进提升:

a. 降低接触电阻、增加触点银合金层厚度,增强触点抗电磨损性能。将 AgCdO_2/Cu 银触点的 AgCdO_2 层由 0.15 mm 增加到 0.30 mm。实际使用中,触点的银层不断消耗,接触电阻随着银层厚度减小而增大,进而加速触点烧蚀。

b. 更改触点接触方式,增强接触可靠性。将触点的接触方式从面-面接触更改为点-面接触,如图10所示。由于静片的触点为平面、动片的触点为弧面,静片与动片相切且为点接触,避免因装配不同心而产生虚接现象,从而提高开关内部接触的可靠性^[2]。

c. 提升与触点接触的绝缘材料的耐温等级,延长开关的工作寿命。由于与静片接触的衬套(工程塑料件)极易受高温熔化,导致开关通断功能丧失。经过测试验证,单纯的动静片的触点烧熔,除接触电阻增加外,并未影响开关正常工作。因此,保证与开关接线片接触的衬套(绝缘件)不被烧损或提高衬套的耐温等级是延长开关工作寿命的有效方案。

经过综合考虑,衬套材料使用耐高温性能更好的陶瓷件理论上耐高温 1 400 °C,陶瓷(Al_2O_3)的摩擦因数与工程塑料聚砜(Polysulfone, PSU)相

近,但陶瓷的相对密度和强度均优于工程塑料。陶瓷件作为绝缘材料,其耐高温性能突出,满足开关材料所有需求,工程塑料与陶瓷性能对比如表4所示。

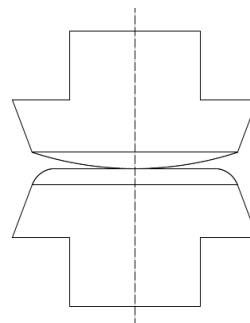


图10 触点的点-面接触示意

表4 衬套材料性能对比

主要性能参数	聚砜(PSU)	陶瓷(Al_2O_3)
耐温性/°C	-100~175	1 400
相对密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	1.24	3.5~4.0
拉伸强度/MPa	70.3	
悬臂梁冲击强度/ $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$	64	
抗压强度/MPa		≥ 850
抗弯强度/MPa		≥ 290
摩擦因数	静摩擦因数	0.6
	动摩擦因数	0.53
吸水率(24 h, 22 °C)/%	0.3	1.5

4.3.4 试验验证

通过 24 V、30 A 直流电负荷试验测试开关的工作寿命,电路如图11所示。陶瓷衬套开关带载的工作寿命显著提高,改进前开关的电负载试验寿命最高为4万次,改进后电负载试验寿命最高可达10万次,试验结果如表5所示。

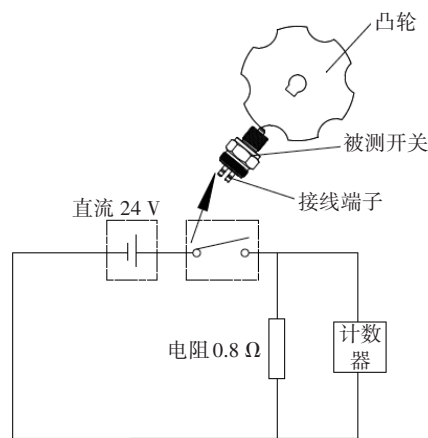


图11 电负荷试验电路

表5 改进前、后电负荷寿命试验结果

试验次数/万次	试验件试验结果描述	典型图片
3.12	改前件1通断失效	
4.20	改前件2通断失效	
2.16	改前件3通断失效	
8.40	改后件1通断失效	
9.12	改后件2通断失效	
10.2	改后件3通断失效	

4.3.5 改进效果

对改进后的故障件进行分析,如表6所示,试验结果表明,开关漏油故障、触点烧蚀故障现象明显减少,未发生开关憋、漏气故障,产品的开关密封性能、带负载工作能力、作动压力下的耐久性能均大幅提升,占比较高的故障通过提升工艺后明显改善,所提出改进方案切实有效。开关的其他故障,如按钮卡滞、插头部位进水、通断行程超差、衬套偏磨等故障模式相对占比提高,需持续改进。

表6 改进后开关故障占比

故障模式	计数/件	占比/%
按钮卡滞	28	23.73
通断行程超差	26	22.03
插头部位进水	25	21.19
衬套偏磨	16	13.56
塑料件损坏	9	7.63
触点烧蚀	7	5.93
内部进油	4	3.39
其它	3	2.54
漏、憋气	0	0
合计	118	

5 结束语

本文通过分析挡位开关故障件的故障模式,制定优化方案并在实际工况下进行模拟试验,验证结果表明,方案切实有效。试验中优化了密封垫设计、胶料的耐温等级,未发现由上述原因导致的开关进油故障,先后解决了空挡开关因密封垫撕裂、老化导致的进油问题;根据工作的气动环境特点,

将密封平垫调整为O形密封圈,彻底解决了高低档开关憋、漏气问题;通过更改触点接触方式、增大触点银合金层厚度等,使触点烧蚀故障明显改善,但该问题未彻底解决,仍需进一步改进。本文方案延长了开关的使用寿命,但在实际应用中仍需结合具体工况,不断提升开关质量,保障整车电气系统的稳定性。

参考文献

- [1] 吴欣欣. 提高橡胶抗撕裂性能的方法和机理[J]. 轮胎工业, 2018, 38(7): 392-395.
WU X X. Methods and Mechanisms to Improve Tear Resistance of Rubber[J]. Tire Industry, 2018, 38(7): 392-395.
- [2] 宋月贤, 郑元锁, 王有道, 等. 涤纶织物与橡胶的粘合研究[J]. 西安交通大学学报, 1998(1): 106-108.
SONG Y X, ZHENG Y S, WANG Y D, et al. Study on the Adhesion of Polyester Textile to Rubber[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1998(1): 106-108.
- [3] 中国纺织总会. 特种工业用丝绸: FZ 66201—1995[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
China Textile Association. Silk for Special Industrial Purposes: FZ 66201—1995[S]. Beijing: Standards Press of China, 1995.
- [4] 赵建勇, 岳红, 陈兵勇, 等. 氢化丁腈橡胶耐热老化性能的研究[J]. 粘接, 2013, 34(10): 48-51.
ZHAO J Y, YUE H, CHEN B Y, et al. Study of Heat Aging Properties of Hydrogenated Nitrile Rubber[J]. Adhesion 2013, 34(10): 48-51.
- [5] 中国机械工业联合会. 液压气动用O形橡胶密封圈沟槽尺寸: GB/T 3452.3—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
China Machinery Industry Federation. Housing Dimensions for O-Ring Elastomer Seals in Hydraulic and Pneumatic applications: GB/T 3452.3—2005[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.
- [6] 王永根, 曹小青, 倪玉萍, 等. 电触头材料在低压电器中的应用[J]. 低压电器, 2011(10): 58-61.
WANG Y G, CAO X Q, NI Y P, et al. Application of Contact Materials in Low Voltage Apparatus[J]. Low-Voltage Apparatus, 2011(10): 58-61.

(责任编辑 瑞秋)

修改稿收到日期为2023年10月20日。