

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.03.016

一种使用透气阀优化电动缸性能和功耗的方法

徐雄,徐杰,韩宇,李军,左堃罡

(上海航天电子技术研究所,上海 201109)

摘要:电动缸广泛应用于特种设备自动俯仰系统等产品上,对其性能和可靠性的优化研究成为业内新的热点。由于现有电动缸腔体密封,推杆运动或温度变化时腔内产生的压差会阻碍活塞杆进一步工作,导致电动缸性能受抑制而功耗上升。为调节电动缸腔体内气压,在腔壁加装防水透气阀。在不影响防水防尘功能的前提下,降低电动缸的运行功耗并提升其运行稳定性。通过透气阀透气量和电动缸转矩计算论证了方法的可行性;通过电流对比试验验证了透气阀对电动缸性能和功耗的优化效果。

关键词:电动缸;透气阀;气压平衡;功耗优化

中图分类号:TH47 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2026)03-0078-05

A Method for Optimizing the Performance and Power Consumption of Electric Cylinder with Vent Valve

XU Xiong, XU Jie, HAN Yu, LI Jun, ZUO Kungang

(Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: Nowadays electric cylinders are widely used in products such as the automatic pitching system for special equipment and research on optimizing the performance and reliability has become a new focus in this field. Given the cavity sealing of existing electric cylinders, the differential pressure in the cavity will obstruct the plunger cylinder from working, when the pushrod moves or the temperature changes, thus restraining the performance of electric cylinder while increasing the power consumption. We install breather valves on electric cylinders to regulate the cavity pressure of the electric cylinder. On the premise that water-proof and dust-proof capabilities are not affected, this research aims to lower its power consumption, and improve its stability. This research also tests the feasibility of verification method by the calculation of air permeability and torque of the electric cylinder. And the optimized effects of vent valve the performance and power consumption are verified by the current comparison experiments.

Keywords: electric cylinder; vent valve; barometric pressure balance; power consumption optimization

0 引言

目前,特种车辆的电动化已成为未来技术发展的趋势^[1-2],车载大型导弹发射装置电驱动快速垂直起竖、自动调平、车载雷达天线自动俯仰系统成为技术研究的热点,电动缸正逐渐取代液压系统应用于各类特种车辆^[3]。日益增长的应用需求对电动缸的性能、功耗、寿命、环境适应性和可靠性提出更高的要求^[4]。由于电动缸的工作场景大多暴露于舱外,甚至是自然环境中,其结构腔体设计为密封结构^[5],防护等级一般均在IP65以上。电动缸工作时,缸体密封腔体内的气体将随着缸体活塞杆的伸出或缩回而压缩或膨胀;电动缸部分工作场景环境温差大,可达50℃~60℃。

此两种情况下,腔体内将产生一定的气压差,其将阻碍电动缸推杆的正常运行,增加热损耗,降低电动缸工作稳定性。且推杆运动速度越快、温度变化越快时,上述影响越显著。

目前已经出现一些在防水防尘前提下运用防水透气材料调节电子零部件气压的相关研究^[6],其主要应对零部件在环境温度和气压变化较为缓慢的场景,尚未出现用于解决由内部机械运动产生的压力快速变化引发负压影响的案例。本文提出一种电动缸通过腔壁加装防水透气阀调节内部气压的方法,并通过理论分析和对比试验论证其能够有效改善电动缸运行时因腔内气压不平衡导致功耗增加和稳定性下降的问题。

第一作者简介:徐雄(1982—),男,上海人,高级工程师,学士,研究方向为雷达等特种设备系统设计与工作,183563477@qq.com。

通信作者简介:徐杰(1996—),男,上海人,工程师,硕士,研究方向为航空特种设备系统设计与工作,1149084249@qq.com。

1 电动缸机制

本文研究的电动缸结构如图1所示。其推杆有效行程 $h = 510 \pm 10$ mm, 额定运动速度不大于 10 mm/s。由于设计时考虑防水防尘要求, 其外筒与推杆之间的腔体被设计为一个相对密闭的空间, 两端由推杆封、支撑环等密封件封闭。腔体截面为环形, 如图1中D-D视图所示。

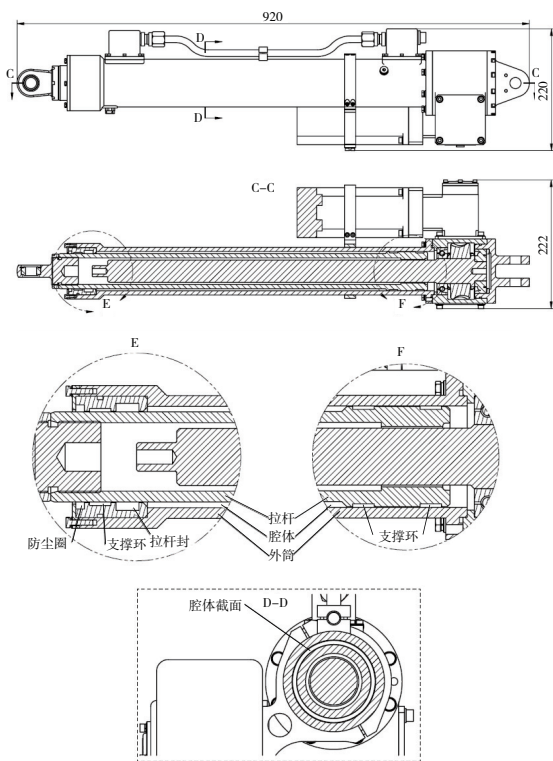


图1 电动缸结构

腔内变化的气压只能通过结构件与密封件之间很少的微小缝隙透气调节, 效率很低。只有当推杆非常缓慢地运动时, 缸内气压才能维持平衡。当电动缸以实际使用场景所需的速度伸出或收缩时, 或外界温度变化较快时, 缸筒内会产生一定的负压或正压^[7], 造成电动缸伸出或收缩运动阻力增大, 进而增加功耗。

电动缸伸出或收缩时, 气体运动的腔体空间横截面呈环形, 横截面积 $A = 3\,117\text{ mm}^2$, 该电动缸推杆最大运行速度 $v = 10\text{ mm/s}$, 由此可计算缸体运行时最大气流变化量

$$Q = A \cdot v \times 60 \times 10^{-3} = 1\,870\text{ ml/min} \quad (1)$$

腔体总长度 $S = 530\text{ mm}$, 当推杆伸出至最高位时腔体长度剩余 $S_0 = S - h \in [10, 30]$, 单位 mm。电动缸未安装透气阀时, 腔体近似封闭, 缸体内气体质量一定, 分子总数一定, 电动缸伸出或收缩

时, 体积变化, 需要外力对其做功, 因此增大了电机功耗。

2 透气阀优化原理

为提升电动缸腔体的透气能力, 同时不影响其防水防尘的功能, 在电动缸上安装透气阀。该透气阀可以快速地平平衡缸筒内外压差^[8], 减小推杆继续运行的阻力, 降低电动缸电机运行过程中的电流波动, 解决腔内压差导致的电机功耗增加和性能不稳定问题。

透气阀安装于电动缸上端腔壁(图1中E视图范围内), 如图2所示。依据电动缸结构特点, 当推杆伸出或电动缸温度快速升高时, 腔内气流通过透气阀排出电动缸; 当推杆收缩或电动缸温度快速降低时, 外界气流通过透气阀吸入电动缸。



图2 透气阀装于电动缸

研究对象采用的透气阀结构如图3所示, 其主要由透气阀基体、透气阀盖和聚四氟乙烯透气膜组成, 气流通过透气孔进出缸体, 透气膜将缸体内部与外界尘埃、水和盐雾等杂质隔离在缸体外。

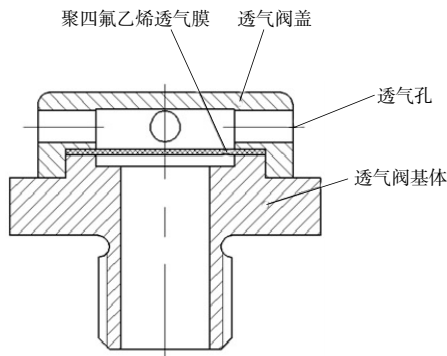


图3 透气阀结构

该透气阀透气量与透气膜两侧压差的关系曲线如图4所示。

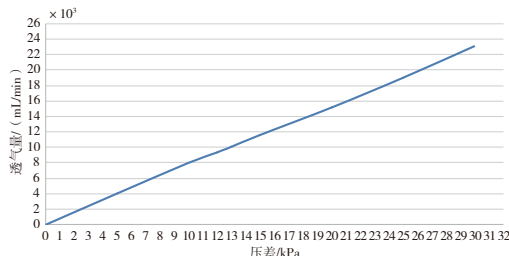


图4 透气阀透气量压差关系曲线

2.1 温度快速变化时透气阀透气量研究

为研究透气阀在电动缸温度快速变化时的透气效果,开展温差透气量计算。

根据气体状态方程

$$pV=nRT \quad (2)$$

式中: p 为气体压强; V 为电动缸腔内气体体积; T 为温度; n 为物质的量; R 为摩尔气体常数。

温度快速变化时电动缸腔内气体压强、体积和温度存在以下关系

$$\begin{cases} p_1 = \frac{T_1 \times p_0}{T_0} \\ p_v = p_1 - p_0 \\ r = \frac{p_v}{T_0} \end{cases} \quad (3)$$

式中: p_v 为压差值; r 为气体膨胀比例; p_0 、 p_1 分别为初始压强和最终压强; T_0 、 T_1 分别为初始温度和最终温度。

该透气阀温差透气量 L 计算公式为

$$L = \frac{V \times r}{t} \quad (4)$$

式中 t 为温度变化时间。

根据式(2)、式(3)可得

$$L = \frac{V \times \left(\frac{T_1 \times p_0}{T_0} - p_0 \right)}{T_0 \cdot t} \quad (5)$$

设温度 30 min 从 $T_0 = -40^\circ\text{C}$ 升到 $T_1 = 85^\circ\text{C}$, 则 $t = 30 \text{ min}$, $V = 114\,000 \text{ ml}$ 。 p_0 为正常大气压 100 kPa, 则根据式(3), $p_1 = 153 \text{ kPa}$, $p_v = 53 \text{ kPa}$, $r = 53\%$, $L = 2\,014 \text{ ml/min}$ 。即若要在此工况下保持电动缸腔体内外气压平衡, 透气阀的透气速度需达到 2 014 ml/min。根据图 2, 当内外压差不到 3 kPa 的情况下本透气阀即可达到 2 014 ml/min, 远远小于此工况下的 p_v , 因此本透气阀满足温差透气需求。

2.2 推杆运动时透气阀透气量计算

为研究透气阀在电动缸推杆运动时的透气效果, 进行运动透气量计算。

推杆运动时, 若透气量满足需求, 则腔内气压时刻与外界平衡。为计算某一时刻 t' 施加于透气阀的压差, 假设以运动到此时透气阀开始不工作, 腔体处于密闭状态, 计算 1 s 内由推杆运动产生的压差。在 $[t', t'+1]$ 时间内电动缸腔内气体压强、体积和温度仍满足式(2), 存在以下关系

$$\begin{cases} p_1 = \frac{V_1 \times p_0}{V_2} \\ p_v = p_1 - p_0 \end{cases} \quad (6)$$

式中 V_1 、 V_2 分别为 $[t', t'+1]$ 时间内推杆运动过程中气体的初始体积和最终体积。

为验证透气阀透气量充分满足电动缸工况, 设推杆以最大速度从最高位匀速收缩, 此时腔内气体体积可表示为

$$\begin{cases} V_1 = V_0 + A \cdot v \cdot t' \\ V_2 = V_0 + A \cdot v \cdot (t'+1) \end{cases} \quad (7)$$

式中 V_0 为推杆运动前处于收缩低位时的腔内气体体积。由第 1 节可知

$$V_0 = AS_0 \quad (8)$$

结合式(6)一式(8)可得

$$p_v = \frac{Av}{V_0 + Avt'} p_0 \quad (9)$$

将式(9)对时间 t' 求导可得

$$p_v' = -\frac{(Av)^2}{(V_0 + Avt')^2} p_0 < 0 \quad (10)$$

故 p_v 为 t' 的单调递减函数, 当推杆即将完成收缩时, 即 $t' = h/v = 51 \text{ s}$ 时, p_v 最小, 代入式(9)中可得

$$p_{v\min} = 1.88 \text{ kPa} \quad (11)$$

由式(1)可知推杆按最大速度运动时, 若要保持腔内外气压平衡, 透气阀透气量需达到 1 870 ml/min, 由图 4 可读出此时透气阀所需压差约为 2.1 kPa。将 $p_v = 2.1 \text{ kPa}$ 代入式(9)中可得: $t' = 45.6 \text{ s}$ 。

综上所述, 电动缸推杆以最快速度收缩全过程的 51 s 中透气阀在前 45.6 s 内皆可维持腔内外气压平衡, 后续 5.4 s 内透气效率渐渐下降至最低效率。由于透气阀透气量与压差关系近似于线性, 可估算透气阀最低透气效率约为

$$\lambda_{\min} = \frac{1.88}{2.1} \approx 90\% \quad (12)$$

同理, 电动缸推杆以最快速度伸出时, 全过程 51 s 中透气阀在前 5.4 s 内透气效率由最低效率 90% 渐渐升高, 后续 45.6 s 内皆可维持腔内外气压平衡。透气阀最低透气效率仍能达到 90%, 表明其透气作用良好。

2.3 电动缸转矩变化量计算

由第 2.1 节可知, 电动缸在极端温度变化速度工况下, p_v 可达 53 kPa。

由第 2.2 节可知, 电动缸在推杆最快速度运动工况下, p_v 最大值出现在推杆收缩运动刚起步

时,即 $t'=0$,由式(9)可得 p_V 可达 100 kPa。

取 $p_V = 100$ kPa 进行计算推杆受到的最大阻力

$$F = p_V' \times A = 31.17 \text{ N} \quad (13)$$

根据缸体传动链参数^[9]计算由推杆所受阻力导致的电机转矩增加量 ΔM

$$\Delta M = \frac{FP_h}{2\pi i \eta} = 40 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad (14)$$

式中: P_h 为丝杠导程; i 为齿轮传动比; η 为传动效率。

由于电机的输出转矩与电机功率正相关^[10],电动缸性能的稳定性表现为转矩输出稳定,因此可通过功率波动情况判断电动缸性能稳定性。

由于电动缸工作电压稳定,电机工作电流与功率成正比,与电机输出转矩正相关。故当电动缸推杆受到腔内气压造成的阻力时,电机电流增大,进而工作功率增大。因此透气阀的透气作用可有效地降低电机转矩,进而降低电动缸功耗。

可通过此规律开展试验验证透气阀对电动缸功耗的优化作用。当电动缸温度变化和推杆运动

两种情况存在并耦合作用时, p_V 最大值可能更大,此时透气阀降低转矩的优化效果更为显著。

3 功耗对比试验

根据第 2.3 节内容,通过测量电动缸安装透气阀前后在相同工况下的工作电流对比其功耗情况。使用 2 个同款电动缸,皆保持常温空载、电机转速 3 000 r/min 的工况,各进行 3 次伸出与收缩。电动缸工作时实时监测其工作电流和功率并进行整理与对比分析。试验中电动缸实时工作电流监测过程如图 5 所示。收集电动缸工作电流和功率数据如表 1 和表 2 所示。



图 5 试验中电动缸实时工作电流监测

表 1 1#电动缸装透气阀前、后电流和功率对比

运行次数	项目	未装透气阀常温空载测试						装透气阀后常温空载测试					
		电流波动范围/A	功率波动范围/W	最大电流/A	最大功率/W	平均电流/A	平均功率/W	电流波动范围/A	功率波动范围/W	最大电流/A	最大功率/W	平均电流/A	平均功率/W
第 1 次	伸出	-0.27~2.80	0~616	2.80	616.0	0.91	200.2	-0.51~2.30	0~506	2.30	506.0	0.78	171.6
	收缩	-2.40~0.78	0~528	2.40	528.0	0.91	200.2	-1.99~0.57	0~437.8	1.99	437.8	0.83	182.6
第 2 次	伸出	-0.25~2.99	0~657.8	2.99	657.8	0.96	211.2	-0.24~2.30	0~506	2.30	506.0	0.92	202.4
	收缩	-2.41~0.71	0~530.2	2.41	530.2	0.99	217.8	-2.09~0.44	0~459.8	2.09	459.8	0.88	193.6
第 3 次	伸出	-0.10~3.14	0~690.8	3.14	690.8	1.04	228.8	-0.45~2.30	0~506	2.30	506.0	0.77	169.4
	收缩	-2.45~0.46	0~539	2.45	539.0	1.03	226.6	-2.14~0.55	0~470.8	2.14	470.8	0.81	178.2

表 2 2#电动缸装透气阀前、后电流和功率对比

运行次数	项目	未装透气阀常温空载测试						装透气阀后常温空载测试					
		电流波动范围/A	功率波动范围/W	最大电流/A	最大功率/W	平均电流/A	平均功率/W	电流波动范围/A	功率波动范围/W	最大电流/A	最大功率/W	平均电流/A	平均功率/W
第 1 次	伸出	-2.09~0.41	0~459.8	2.09	459.8	0.92	202.4	-1.76~0.50	0~387.2	1.76	387.2	0.80	176.0
	收缩	-0.17~2.18	0~479.6	2.18	479.6	0.94	206.8	-0.35~1.98	0~431.2	1.96	431.2	0.74	162.8

续表 2

运行 次数	项目	未装透气阀常温空载测试						装透气阀后常温空载测试					
		电流 波动 范围/A	功率 波动 范围/W	最大 电流/A	最大 功率/W	平均 电流/A	平均 功率/W	电流 波动 范围/A	功率 波动 范围/W	最大 电流/A	最大 功率/W	平均 电流/A	平均 功率/W
第 2 次	伸出	-2.12~ 0.26	0~466.4	2.12	466.4	0.89	195.8	-1.71~ 0.63	0~376.2	1.71	376.2	0.78	171.6
	收缩	-0.34~ 2.15	0~473.0	2.15	473.0	0.88	193.6	-0.27~ 1.79	0~393.8	1.79	393.8	0.75	165
第 3 次	伸出	-1.99~ 0.31	0~437.8	1.99	437.8	0.89	195.8	-1.66~ 0.48	0~365.2	1.66	365.2	0.76	167.2
	收缩	-0.30~ 1.93	0~424.6	1.93	424.6	0.87	191.4	-0.38~ 1.76	0~387.2	1.76	387.2	0.73	160.6

观察表 1 和表 2 中数据可知,每个电动缸每次工作过程中电流会在一定范围内浮动,2 个电动缸在相同工况下也会有一定区别。其中未装透气阀的实验组中较大电流值和功率值出现在伸出过程的后期和收缩过程的前期;而装透气阀的实验组中较大电流值和功率值在运动过程中分布较为均匀,这验证了第 2.3 节中的分析。

对比每个运行工况下电动缸加装透气阀前后的各项电流和功率数据,结合第 2.3 节可知腔内气压经过透气阀调节平衡后:1)装透气阀后的电动缸各次运行中平均电流值和平均功率值皆小于对应未装透气阀时,这表明满足相同工况下电动缸的功耗得到了降低;2)装透气阀后的电动缸各次运行中电流和功率的波动范围和最大值皆小于对应未装透气阀时,这表明电动缸功率消耗和转矩输出状态更加稳定。

综上所述:加装透气阀有效地降低了电动缸的功耗,并且提升了其性能的稳定性的。

4 结语

针对当前电动缸工作中腔内存在的压差影响功耗和性能的问题,本文提出一种使用透气阀进行优化的方法。在不改变原来防水防尘功能的前提下,以小范围的改动,这有效地达到了调节腔内外气压平衡、降低电动缸功耗并提升其性能稳定性的目的。通过温度变化和推杆运动两种情况下透气阀的透气量计算,结合电动缸转矩变化量阐述了透气阀的优化原理。通过功耗对比试验验证

了透气阀的优化效果,证实了其可行性与实用性。该方法可为各种具有密封要求机器的设计、改进和完善提供参考。

参考文献:

[1] 陈超,赵升吨,崔敏超,等. 电动缸的研究现状与发展趋势[J]. 机械传动,2015,39(3):181-186.

[2] 张延芝. 一种三自由度车载无人机升降调平装置研究[J]. 机械制造与自动化,2021,50(5):219-221.

[3] 严亮,张波,梁维刚,等. 伺服电动缸在石油钻台机械手上的应用研究[J]. 机械工程师,2021(7):20-22.

[4] 胡鑫,赵昕,李伟,等. 采用电动缸的火炮随动系统位置控制研究[J]. 兵器装备工程学报,2021,42(1):245-248,258.

[5] 潘平. 适用于深海的电动缸设计[J]. 舰船科学技术,2021,43(13):109-113.

[6] 徐志梁,胡群义. 膨体聚四氟乙烯防水透气材料提高电子零部件的可靠性[J]. 浙江化工,2023,54(9):1-6.

[7] 侯腾宇,刘来运,陈然,等. 一种大载荷电动缸结构设计与仿真分析[J]. 机电技术,2022(1):17-20.

[8] 陈洪月,邹先峰,刘先阳,等. 线性压缩机排气阀片动态特性研究及优化分析[J]. 机械设计,2023,40(10):57-65.

[9] 郑少华. 伺服电缸系统开发与控制策略优化研究[D]. 太原:太原科技大学,2023.

[10] 黄聿琛,阮江军,邱志斌,等. 隔离开关操动机构电机输出轴扭矩和电流关系的研究[J]. 高压电器,2015,51(6):139-144.

收稿日期:2024-07-30