

doi:10.3969/j.issn.1671-5152.2024.08.003

城镇燃气在役表前调压器的质量可靠性分析

严荣松^{1,3}, 高文学¹, 刘建辉², 陈浩¹, 杨明畅¹1.中国市政工程华北设计研究总院有限公司城市燃气热力研究院;
2.深圳市燃气集团股份有限公司; 3.天津大学环境科学与工程学院

摘 要: 为明确城镇燃气表前调压器的在役运行质量及其可靠性情况, 测试获取了使用14年~18年在役城镇燃气调压器的膜片应力性能、稳压精度等级、关闭压力和关闭压力等级等性能结果; 同时, 研究了在役调压器的失效率, 并利用威布尔模型合理预测了调压器可靠性。结果表明, 所采样的在役调压器样品存在超出产品标准一项或多项质量指标要求, 且在役调压器产品的关闭压力存在高于低压用户的压力上限3kPa的情况; 随着使用时长的增加, 采样调压器的失效率在总体上呈上升趋势, 采样的在役燃气调压器已经处于失效浴盆曲线的耗损区, 其性能和安全可靠度在0.27~0.72区间内, 运行16年后表前调压器的整体可靠度将下降至0.5以下。本研究结论可为城镇燃气运营企业的表前调压器维修保养或更新计划提供科学支撑, 进而降低了在役表前调压器失效导致非计划维护造成的安全隐患。

关键词: 城镇燃气调压器; 性能测试; 失效率; 可靠性分析

1 引言

燃气调压器的质量可靠性表征了其在发生故障前的持续工作时间。针对可靠性分析方法, 多以故障时间统计数据为基础, 通过分析确定相关设施的可靠性的概率分布, 并预测设施的使用寿命, 通常称其为基于失效数据的寿命预测。胡昌华等^[1]给出了基于失效数据的可靠寿命预测方法的框架, 主要包括故障数据收集整理、寿命分布模型选择、模型参数估计和可靠寿命计算等4个步骤。根据经验及历史数据, Marshall等^[2]总结了常用的可靠寿命分布函数, 包括指数分布、对数正态分布、伽马分布、威布尔分布、逆高斯分布等。常见的故障数据包括成败型数据和计数型数

据^[3], 成败型数据呈现为一次试验或记录仅有正常、故障两类的特征。若产品在时刻 t 仍能正常运行, 则令随机变量为1(表示“正常”), 反之则可令随机变量为0, 可称数据为二项式样本试验数据。国内现有的燃气调压设施的质量检验结果多以成败型数据表示, 其结果描述一般包括合格或不合格两类。在统计学方面, 针对成败型数据多采用共轭先验Beta模型进行样本的正常概率分析。Martz等^[4]基于美国63座核电站的失效型数据, 利用Beta先验分布的二项式抽样模型, 为核电站柴油平均应急柴油发电机可靠性提供了参数化经验贝叶斯点估计和可信区间估计。而计数型数据表征了设施在一段时间内发生的故障次数, 描述此类数据的基本统计模型为泊松分布。针对计数型数

基金项目: 天津市重点研发计划项目“极端气候下城市燃气阀门设施运行可靠性评估的技术开发”(22YFZCSN00120)

据，采用共轭先验Gamma模型进行样本故障率分析，Gaver等^[5]针对空调、Farley核电站用泵等计数型数据，基于Gamma先验的泊松模型，利用经验贝叶斯方法估计模型的超参数，以评估设施的安全性。

本文针对在役的中低压表前燃气调压器，基于调压器的质量测试和威布尔模型，利用线性回归方法，探索分析了调压器的失效率及其可靠性现状。

2 调压器质量测试

2.1 采样数量（见图1）

针对不同使用时长的表前调压器，在现有运行的某品牌调压器采样35只，起始运行时间其中2005年的4只、2006年5只、2007年6只、2008年10只、2009年10只。

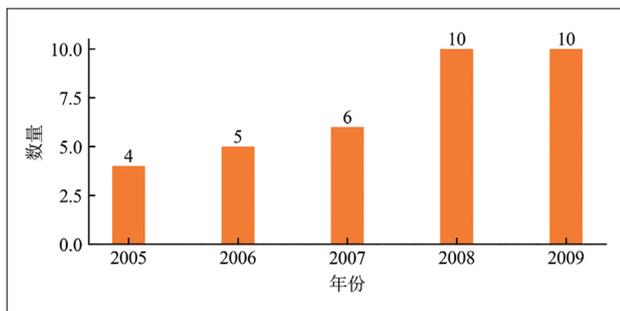


图1 在役表前调压器采样数量统计

2.2 性能质量情况

(1) 膜片应力

将所采样调压器样品的膜片进行哑铃取样，并按GB/T 528-2009《硫化橡胶或热塑性橡胶 拉伸应力应变性能的测定》要求，进行拉伸测试，膜片应力情况

（拉伸强度）结果见图2。

由图2可知，不同使用时长年度内，调压器膜片的断裂强度的离散程度不同，以使用时长14年、15年为例，两个使用年度内的调压器膜片断裂强度存在高于10MPa的情况；在使用时长维度上，膜片的断裂强度总体呈下降趋势，当离散点用平均值表示时，使用时长14年的膜片断裂强度均值为9.38MPa，约为使用时长18年断裂强度值的1.12倍，所采样调压器膜片的断裂强度均值低于标准10MPa的要求。总体上看，所采样调压器膜片的断裂强度符合标准10MPa要求的占7.1%。

(2) 稳压精度等级

图3显示了不同使用时长下的在役调压器稳压精度情况。在采样调压器的使用长时期内，样品的稳压精度呈波动趋势；受堵塞、结构以及部件性能等多种因素影响，采样调压器在不同使用时长后的性能离散程度存在较大差异，无明显的规律；稳压精度等级分布在AC15的区间外。总体上看，调压器膜片的稳压精度符合标准AC15要求的占17.1%。

(3) 关闭压力

图4显示了不同使用时长下的在役调压器关闭压力情况。在采样调压器的使用长时期内，样品的关闭压力呈波动趋势；以样品关闭压力均值计算，在使用时长17年时，关闭压力均值最大，为3.32kPa。由于末端用气设备均为户内低压设备，而图4中48.6%的采样调压器的关闭压力高于3kPa，从工程安全性方面考虑，此时继续使用相关产品存在安全风险。总体上看，调压器膜片的关闭压力符合低于2.7kPa要求的占28.6%。

(4) 关闭压力等级

图5显示了不同使用时长下的在役调压器关闭压

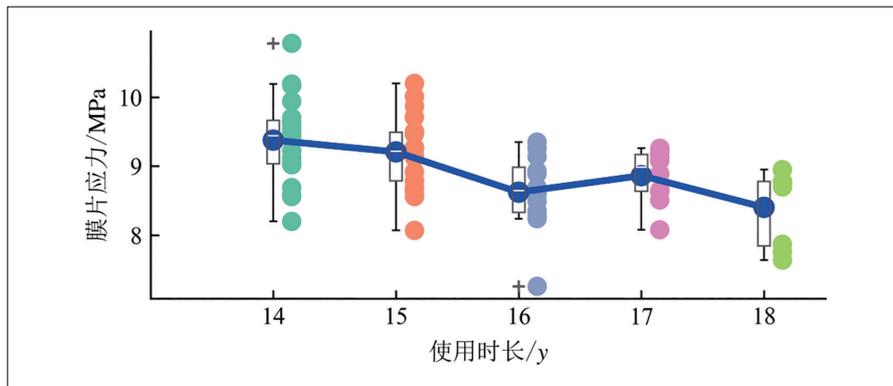


图2 在役调压器膜片应力情况

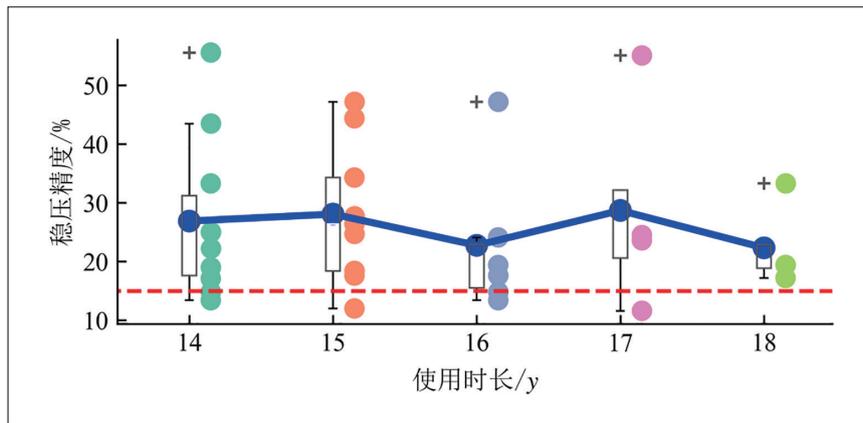


图3 在役调压器稳压精度情况

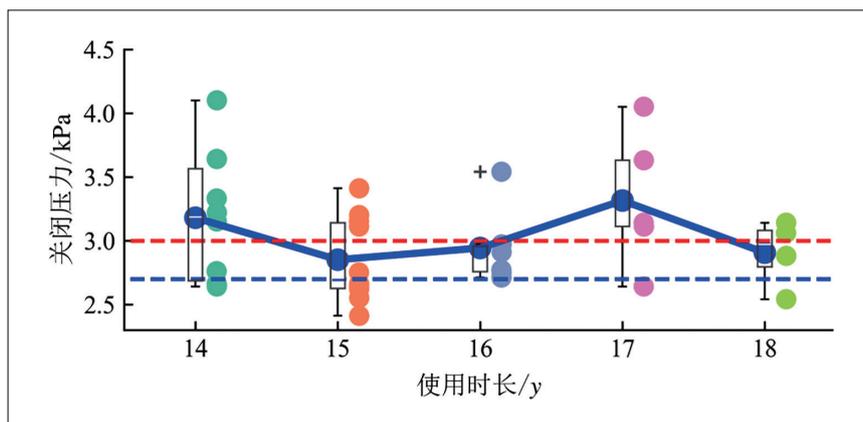


图4 在役调压器关闭压力情况

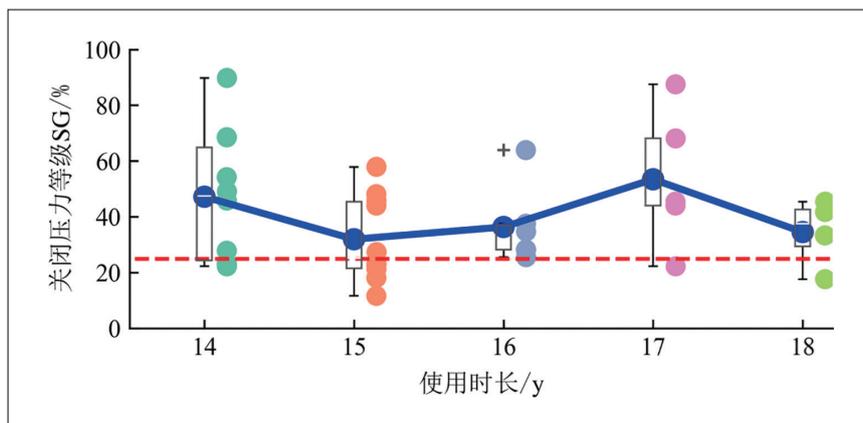


图5 在役调压器关闭压力等级情况

力等级情况。与关闭压力趋势相似，在采样调压器的使用时长内，样品的关闭压力等级呈波动趋势；以样品均值计算，在使用时长17年时，关闭压力等级均值最大，为53%。

按均值分析，总体上测试样品的关闭压力高于25%的要求；根据关闭压力离散点分布情况，采样调压器存在关闭压力等级低于25%要求的样品。总体上看，调压器膜片的关闭压力等级符合SG25要求的占28.6%。

3 调压器可靠性分析

3.1 失效率分析

(1) 统计方法

统计失效率时，按公式(1)执行。

$$h_i = \frac{N(\Delta t_i)}{N_f(t_{i-1})\Delta t_i} \quad (1)$$

式中 $N(\Delta t_i)$ ——为时间间隔 Δt_i 内失效样本的数量；

$N_f(t_{i-1})$ ——为在时间间隔 Δt_i 前仍未失效的数量；

Δt_i ——为时间区间 (t_{i-1}, t_i) 的时间间隔，单位为年；当 t_1 为采样中最小工作年限时，则 (t_0, t_1) 的时间间隔为 $\Delta t_1 = t_1$ 。

(2) 失效情况统计

筛选调压器膜片应力、稳压精度等级、关闭压力等性能超标失效的数量，计算每个使用年度的失效率，结果见图6。

由图6可知，随着使用时长的增加，采样期内调压器的失效率出现显著上升；燃气调压器性能失效率的变化率从高到低依次为膜片应力失效率、稳压精度等级失效率和关闭压力失效率。当使用时长达到18年时，城镇燃气调压器膜片应力失效率达到61.54%，调压器稳压精度等级失效率达到33.33%，调压器关闭压力失效率达到23.08%。对比常见的失效浴盆曲线，采样调压器基本处于浴盆曲线的耗损区，失效的发生与产品的使用时间显著相关；根据在役调压器的失效率数据趋势可知，失效函数符合威布尔模型。

3.2 可靠寿命分析

(1) 可靠性分析模型

GB/T 5080.1-2012/IEC 60300-3-5: 2001《可靠性试验第1部分：试验条件和统计检验原理》9.1统计工

具和分析方法条款中指出，已知不修理产品的失效前时间可用威布尔模型进行可靠性检验。威布尔模型是一种非线性的模型，常用于失效率函数不随时间呈线性变化的情况。失效率函数 $h(t)$ 和可靠度函数 $R(t)$ 如公式(2)和公式(3)所示。

$$h(t) = \frac{r}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{r-1} \quad (2)$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^r} \quad (3)$$

(2) 调压器可靠性分析

针对不同使用时长时膜片应力、稳压精度等级和关闭压力的失效率，并根据失效率模型，进行调压器使用时长可靠性分析。

图7显示了采样的在役燃气调压器的分项性能质量可靠性情况。在役运行14年后，所采样的燃气调压器可靠性下降梯度增大；稳压精度等级和关闭压力可靠度曲线基本重合，而膜片应力可靠度曲线与前两者存在一定的差异。从性能方面考虑，使用时长[14, 18]的在役燃气调压器，膜片应力可靠度为[0.72, 0.18]、稳压精度等级可靠度为[0.30, 0.70]、关闭压力可靠度为[0.70, 0.34]。

由图8可知，综合考虑各项性能失效情况，使用时长[14, 18]的在役燃气调压器，其整体质量可靠度为[0.72, 0.27]；当燃气调压器运行16年以上，燃气调压器的整体可靠度将下降至0.5以下。

4 结论

针对采样表前燃气调压器产品，进行理论分析和试验测试，形成如下结论：

(1) 从性能质量方面考虑，所有采样的在役调

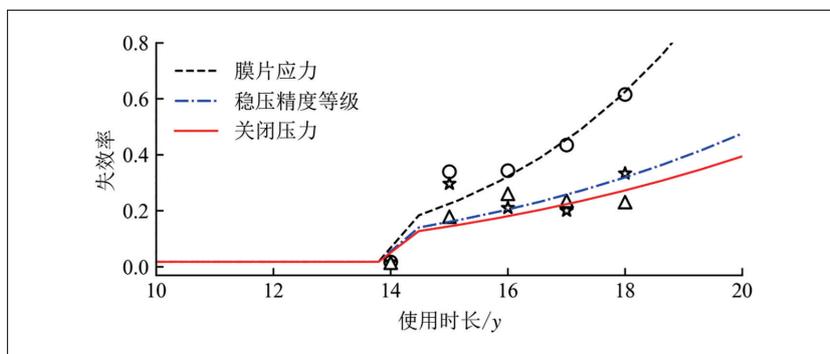


图6 调压器失效情况

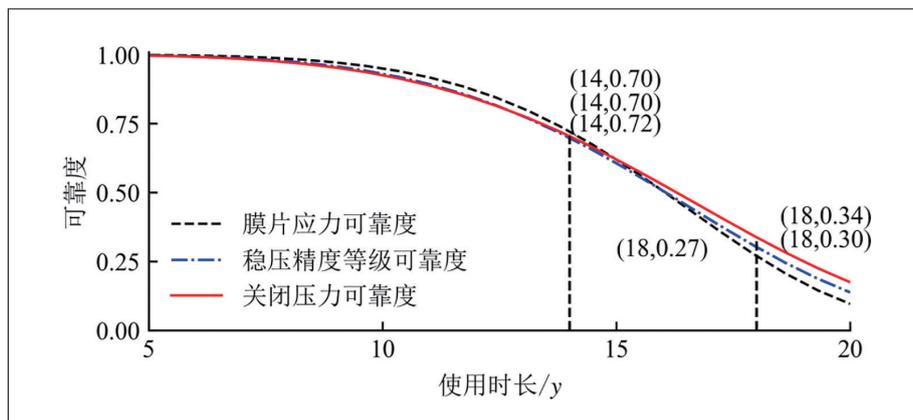


图7 调压器分项性能可靠性分析

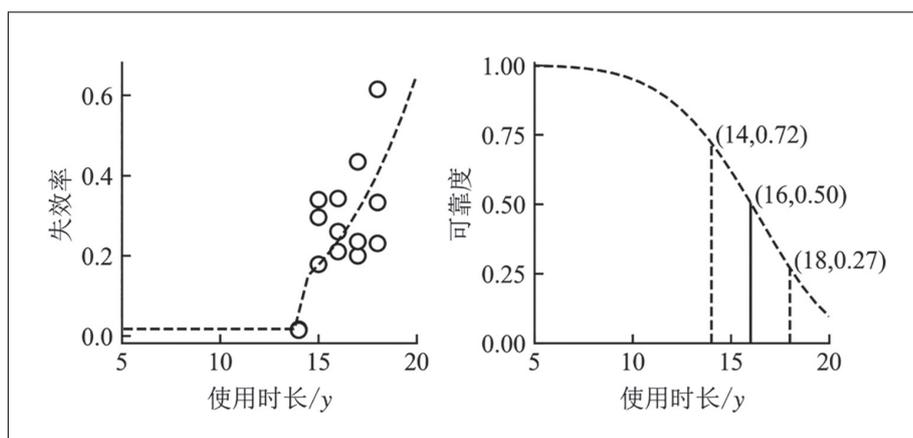


图8 调压器整体性能可靠性分析

压器样品存在超出产品标准一项或多项质量指标要求的情况；且在役调压器产品的关闭压力存在高于低压用户的压力上限3kPa的情况。

(2) 随着使用时长的增加，调压器的失效率在总体上呈上升趋势，两者相关性较为显著；调压器的稳压精度等级和关闭压力可靠度曲线基本重合，而膜片应力可靠度曲线与前两者存在一定的差异，但使用14年后，可靠性下降梯度均增大。

(3) 考虑各项性能失效情况，调压器的性能和安全可靠度在0.27~0.72区间内，所采样燃气调压器运行16年以上，燃气调压器的整体可靠度将下降至0.5以下。

综合检测与分析结果，采样的在役表前燃气调压器已经处于失效浴盆曲线的耗损区，在使用时存在一定安全风险；为了减少大量失效所造成的影响，应该进行阶段性的维修保养或考虑更换产品。

参考文献

- [1] 胡昌华, 施权, 司小胜, 等. 数据驱动的使用寿命预测和健康管理: 最先进的技术[J]. 信息与控制, 2017, 46(1): 72-82.
- [2] MARSHALL A W, OLKIN I. Life distributions: structure of nonparametric, semiparametric, and parametric families[M]. New York: Springer, 2007.
- [3] HAMADA M S, WILSON A G, REESE C S, MARTZ H F. Bayesian Reliability[M]. New York: Springer New York, 2008.
- [4] MARTZ H F, KVAM P H, ABRAMSON L R. Empirical Bayes Estimation of the Reliability of Nuclear-Power-Plant Emergency Diesel Generators[J]. Technometrics, 1996, 38(1): 11-24.
- [5] GAVER P. Robust Empirical Bayes Analyses of Event Rates[J]. 1987, 29(1): 1-15.