

基于地铁车辆空压机出口压力空气含水量影响因素分析的正交试验设计方法

李建兴¹ 李怀志²

(1. 宁波城市职业技术学院信息与智能工程学院, 315100, 宁波;

2. 浙江纺织服装职业技术学院机电与轨道交通学院, 315211, 宁波)

摘要 [目的] 地铁列车空压机出口压力空气干燥度是一个非常重要的指标。如果压力空气中含水量高, 就会影响各用风设备的性能, 进而影响行车安全。上海轨道交通运维人员在汛期对某些线路列车进行检修时发现, 列车供风管路中存在液态水, 这是因压力空气中含水量过高而造成的。需要在现有条件下, 研究如何调整维修策略, 进而改善空压机在汛期的干燥能力。[方法] 通过正交试验设计方法, 设计了用于分析空压机出口压力空气含水量影响因素的试验方案, 给出了使用田口方法分析数据进而确定主要影响因素的方法。[结果及结论] 运用该试验方案进行试验, 能够分析出影响列车空压机出口压力空气含水量的主要因素, 运维人员可据此结论制定适用于汛期的列车空压机维修策略。该正交试验设计方法也可以推广应用至城市轨道交通其他设备运维策略的完善与优化工作之中。

关键词 轨道车辆; 空压机; 压力空气; 含水量; 正交试验设计; 维修策略

中图分类号 TH138.21

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.01.051

Orthogonal Experimental Design Method Based on Influencing Factor Analysis of Moisture Content in Metro Vehicle Air Compressor Outlet Pressure Air

LI Jianxing¹, LI Huaizhi²

(1. School of Information and Intelligent Engineering, Ningbo City College of Vocational Technology, 315100, Ningbo, China;

2. School of Mechatronics and Rail Transportation, Zhejiang Fashion Institute of Technology, 315211, Ningbo, China)

Abstract [Objective] The pressure air dryness at the metro vehicle air compressor outlet is a very important indicator. If the water content in the pressure air is high, it will affect the performance of various air-using equipment, and thus affect driving safety. When the Shanghai Rail Transit Operation and Maintenance personnel inspected some vehicles on the flood season, they find that there is liquid water in the vehicle air supply pipeline, which is caused by the excessively high water content in the pressure air. Under the existing conditions, it is

necessary to study how to adjust the maintenance strategy and thus improve the drying capacity of the air compressor during the flood season. [Method] Through orthogonal experimental design methods, an experimental scheme is designed to analyze the influencing factors of air moisture content at the outlet pressure of the air compressor, and a method of using the Taguchi method to analyze the data and determine the main influencing factors was given. [Result & Conclusion] By using this test plan to conduct experiments, we can analyze the main factors that affect the moisture content of the air at the outlet pressure of the train air compressor. Based on this conclusion, the operation and maintenance personnel can formulate a maintenance strategy for the train air compressor suitable for the flood season. This orthogonal test design method can also be extended to the improvement and optimization of the operation and maintenance strategies of other equipment in urban rail transit.

Key words rail vehicle; air compressor; pressure air; water content; orthogonal experimental design; maintenance strategy

空压机是地铁列车的重要设备, 在一列列车上通常设置两台。根据大多数列车的空压机控制原理, 这两台空压机在常态下互为冗余, 根据单双日交替切换主/备, 仅在特殊工况下同时工作。其功能是为列车的制动系统、受电弓、空气弹簧等用到压力空气的设备提供为实现其各自功能所需的压力空气^[1]。这就要求空压机不仅能够产生足够列车使用的压力空气, 还要保证压力空气的干燥程度。如果经空压机产生的压力空气不够干燥, 其携带的水分将会进入列车管路、阀件以及其他零部件, 流经之处的金属部件产生锈蚀的几率会大幅提升, 与此同时, 无论是锈蚀造成的卡滞、锈蚀剥落后导致其他部件卡滞或对密封的影响, 均会对相关设备的功能产生影响, 严重时将会影响列车运行甚至造成安全事故。

上海属于北亚热带季风性气候, 降水量充沛, 全年大部分的降雨量集中在6至9月的汛期^[2]。根

据维修人员反馈,每年在汛期内,天气潮湿,空气中的含水量高,相对湿度大,在维修中经常可在地铁列车的管路中发现液态水。针对这种情况,如何控制空压机的自身变量,合理调整维修方式,综合考量经济性要求,确保地铁列车空压机在汛期内仍然可以产生干燥的压力空气,这是十分重要的。

影响空压机出风口压力空气含水量的因素有很多,为研究清楚究竟是何种因素对含水量的影响最为显著,需要设计试验方案,并在实验室或在列车检修段场中根据所收集数据进行分析。这就需要合理设计试验方案,并且有一套分析方法对试验数据进行科学分析。在此背景下,本文设计了一种正交试验方案。本文中所提到的空压机均包含干燥设备。

1 试验方案设计

以上海轨道交通 17 号线 A01 车型为例,该线路列车空压机采用的是双塔干燥器,包含 2 个储压罐。该型干燥器同时运行干燥工序和再生工序。当一个储压罐中主气流被储压罐内部的干燥剂通过吸附的方式进行干燥时,另一储压罐中的干燥剂则通过一部分已经干燥的空气,将已经吸附了水分的干燥剂吹干,实现再生。当设定的时间到达后(标准时间为 120 s,可调),两个储压罐的功能互换,已实现再生的储压罐中的干燥剂开始吸附压缩空气的水分,另一个储压罐中的干燥剂同时开始再生,到达设定的时间后,再次进行切换。空压机产生的压力空气经过干燥器后送入供风管路,因此压力空气中的含水量主要取决于双塔干燥器的干燥能力。

为了确定哪些因素能够影响干燥器的干燥能力,以及如何有效控制这些因素,需通过试验进行分析。试验设计是数理统计的一个非常重要的分支,主要用来研究如何科学设计试验方案,以提高试验效率,节省试验成本,同时还可以减小随机误差的影响,并使试验结果能被有效地统计分析^[3]。在试验设计中,响应是指试验的输出结果,因子则是指影响试验结果的因素,因子所处的状态称为水平^[4]。

正交试验设计方法是最常用的一种试验设计方法,正交试验设计方法通过对试验方案进行科学组合,在减少试验方案数量的基础上,还能保证有科学的方法对试验数据进行分析。正交试验设计方法实施流程如图 1 所示。

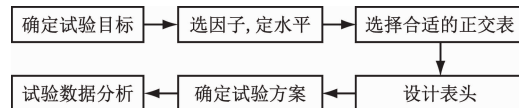


图 1 正交试验设计方法实施流程

Fig. 1 Orthogonal experimental design method implementation process

试验的目标是找到能够控制空气中含水量的主要因素。空气中的含水量通常使用相对湿度进行度量,因此本文使用干燥后空气的相对湿度做为空压机干燥能力的评价指标,即试验的响应。鉴于本研究的最终目标是指导运维人员制定适用于汛期的维修策略,无需考虑产品设计改进,因此根据双塔干燥器工作原理以及实际工况和运维条件,确定试验设计的因子包括环境温度、环境湿度、干燥剂使用年限和干燥塔切换时间。

考虑到在制定维修策略时,上述因子中的干燥器使用年限和干燥塔切换时间是可以被控制的,而环境温度和环境湿度则是无法被控制的,因此选用正交试验设计方法中的内外表设计。根据因子在干燥器实际运行过程中是否可控,将其分为可控因子和不可控因子。其中,可控因子为干燥剂使用年限和干燥塔切换时间,不可控因子为环境温度和环境湿度。

根据实际工况范围及可行的试验条件,可控因子水平数取为 3(低水平)(1 为高水平,2 为中水平)。根据检修修程,干燥剂使用年限从长至短可分为 6 年、3 年和 1 年;根据可调节范围,干燥塔切换时间可分为 180 s、120 s 和 60 s。不可控因子水平数取为 2(中水平),这样可以代表 4 种典型环境:高温高湿、高温干燥、低温高湿和低温干燥,可与上海地区典型的温度、湿度范围相对应。不可控因子各水平对应取值如表 1 所示。

根据可控因子数量及水平数,选择 4 因子 3 水平正交表 $L_9(3^4)$ 。对于正交表 $L_9(3^4)$,任意两列间的交互作用出现于另外两列。根据不可控因子数量及水平数,选择 3 因子 2 水平正交表 $L_4(2^3)$ 。对于正交表 $L_4(2^3)$,任意两列间的交互作用出现于另外一列。由此可得空压机干燥能力正交试验方案,如表 2 所示。表 2 中,左侧为可控因子的组合条件,上侧为不可控因子的组合条件,可控因子、不可控因子的条件共同构成了一次试验的试验方案。试验结果填入组合试验条件对应的空格中即可。

表 1 不可控因子各水平对应取值

Tab. 1 Corresponding values for each level of uncontrollable factors

因子水平	不同水平因子对应取值	
	环境温度/℃	环境湿度/%
1(高水平)	≥28	≥80
2(低水平)	≤10	≤40

表 2 空压机干燥能力正交试验方案

Tab. 2 Orthogonal test plan for air compressor drying capacity

试验 编组	干燥剂使 用年限/年	干燥塔切 换时间/s	空压机出口压力空气含水量/%			
			环境温度 ≥28℃		环境温度 ≤10℃	
			环境 湿度 ≥ 80%	环境 湿度 ≤ 40%	环境 湿度 ≥ 80%	环境 湿度 ≤ 40%
1	6	180				
2	6	120				
3	6	60				
4	3	180				
5	3	120				
6	3	60				
7	1	180				
8	1	120				
9	1	60				

2 试验方法

空压机干燥能力正交试验可在实验室中开展,也可在段场内开展,地铁运营公司可根据自身的条件选择试验方式。如在试验室中开展,温度、湿度的各水平均能够得到较好控制,不同水平的干燥剂和切换时间也较容易调整,试验可在短期内完成。但可能需要设计研制专用的试验台架和检测系统,因而会产生较为高昂的试验费用。如在段场内开展,可以先测量环境的温度、湿度,如能满足表 2 中的温度、湿度的不同水平的组合条件,再根据空压机的检修履历,选择装有不同使用年限的干燥剂的空压机,通过调整其干燥器的切换时间,测量空压机出口的压力空气的相对湿度。此工作可结合日常的检修工作开展,但受制于环境的温度、湿度的不可控,或者当出现满足试验条件的温度、湿度的天气后,没有满足试验条件的空压机,因此试验可能会持续较长时间。

此外,在试验过程中,还应注意遵循随机和重复试验原则。所谓随机,指的是为了避免事先某些考虑不周而产生系统误差,因此试验的次序要随机化,即按照随机的顺序进行试验,而不是按照试验方案中的顺序依次进行试验。所谓重复,指的是在

可能的条件下,在同一试验点进行 2 次或更多次重复试验,将多次试验的响应均值做为最终结果,这样可以保证试验结果的稳定性,对误差进行较好的估计,提高分析精度。

3 试验分析方法

在对试验数据进行分析时,需要引入田口方法中的信噪比及质量特性概念。

3.1 计算信噪比

田口方法是由日本著名质量管理专家田口玄一博士于 20 世纪 70 年代创造的^[5]。该方法根据人们对试验输出结果的不同期望,定义了望目、望大、望小三种质量特性^[6],对应到本文的研究,用于度量压力空气含水量的指标是相对湿度,相对湿度越小则代表空气中含水越少,对下游气路、部件就越好,所以适用于本研究的质量特性是“望小特性”。

将表 2 中每行的 4 个试验响应数据(即试验测得的相对湿度)分别记为 y_{i1} 、 y_{i2} 、 y_{i3} 和 y_{i4} , i 表示对应的行数,则信噪比 η_i 为:

$$\eta_i = -10 \lg \left(\frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 y_{ij}^2 \right) \quad (1)$$

3.2 确定显著因子

利用公式(1)求得的 9 个信噪比数值计算中间变量 C_T 和总的偏差平方和 S_T :

$$C_T = \left(\sum_{i=1}^9 \eta_i \right)^2 / 9 \quad (2)$$

$$S_T = \sum_{i=1}^9 \eta_i^2 - C_T \quad (3)$$

计算干燥剂使用年限对应的偏差平方和 S_1 :

$$S_1 = \frac{1}{3} (T_{11}^2 + T_{21}^2 + T_{31}^2) - C_T \quad (4)$$

其中:

$$\begin{cases} T_{11} = \eta_1 + \eta_2 + \eta_3 \\ T_{21} = \eta_4 + \eta_5 + \eta_6 \\ T_{31} = \eta_7 + \eta_8 + \eta_9 \end{cases}$$

计算干燥塔切换时间对应的偏差平方和 S_2 :

$$S_2 = \frac{1}{3} (T_{12}^2 + T_{22}^2 + T_{32}^2) - C_T \quad (5)$$

其中:

$$\begin{cases} T_{12} = \eta_1 + \eta_4 + \eta_7 \\ T_{22} = \eta_2 + \eta_5 + \eta_8 \\ T_{32} = \eta_3 + \eta_6 + \eta_9 \end{cases}$$

计算误差的偏差平方和 S_e :

$$S_e = S_T - S_1 - S_2 \quad (6)$$

给定显著水平 α , 可通过 F 分布得出判别显著因子的临界值 F_{cr} :

$$F_{cr} = F_{1-\alpha}(2, 4) \quad (7)$$

式(7)表示 F_{cr} 自由度为 2、4 时 F 分布的 $1-\alpha$ 分位数, 该值可通过 F 分布表查得。例如当 $\alpha=5\%$ 时, 可得 $F_{cr}=6.96$ 。

计算干燥剂使用年限对应的检验量 F_1 :

$$F_1 = (S_1/2)/(S_e/4) = 2S_1/S_e \quad (8)$$

如果 $F_1 > F_{cr}$, 则干燥剂使用年限即为显著因子。

计算干燥塔切换时间对应的检验量 F_2 :

$$F_2 = (S_2/2)/(S_e/4) = 2S_2/S_e \quad (9)$$

如果 $F_2 > F_{cr}$, 则干燥塔切换时间即为显著因子; 如果 F_1 、 F_2 均大于 F_{cr} , 则相比而言数值更大的显著性更高。

4 试验结果分析与应用

在获取相关试验数据后, 按本文所述的分析方法得到式(7)一式(9)的计算结果, 即可判断出 2 个可控因子(干燥剂使用年限、干燥塔切换时间)中的哪一个对压力空气的干燥程度的影响更为显著。

若检验得出干燥剂使用年限为显著因子, 则找到式(4)的 T_{i1} 中的最大值对应的 i , 即代表该因子在该水平下, 压力空气的干燥程度最好。若检验得出干燥塔切换时间为显著因子, 则找到式(5)的 T_{i2} 中的最大值对应的 i , 即代表该因子在该水平下, 压力空气的干燥程度最好。

举例说明。如果得出的结论是干燥剂的使用年限是显著因子, 而且 T_{31} 最大, 则表示在低水平(对应使用年限为 1 年)时压力空气的干燥程度最好。因此, 在进入汛期之前, 可筛选一下各列列车的空压机干燥剂的使用年限, 将使用年限高的干燥剂更换为新干燥剂即能改善压力空气中含水量高的问题。同理, 如果得出的结论是空压机干燥塔切换时间为显著因子, 而且 T_{32} 最大, 则表示在低水平(对应切换时间为最短)时压力空气的干燥程度最好, 则可在汛期前, 将全部列车空压机的干燥塔切换时间改为最短。

5 结语

正交试验设计的思想和方法已被成功验证, 能

够在有效控制试验次数的前提下, 给出合理的、科学的试验方法, 并且能够使用对应的分析方法, 通过试验数据得出分析结论。本文中论述的只是其中一个应用场景。

城市轨道交通运维工作千头万绪, 涉及人、机、料、法、环多个方面, 每一种车型、每一条线路都有其特有的工况和列车实际表现, 按需运维才是最为合理和完善的维修方法^[7]。当没有成熟的经验、结论可以参考时, 运维人员可以通过正交试验设计方法, 结合本线路的实际情况开展相关的试验, 取得优化本线路运维质量的分析结果。

参考文献

- [1] 段企平. 城市轨道交通车辆制动技术[M]. 北京: 知识产权出版社, 2011.
SHU Qiping. Braking technology of urban rail transit vehicles [M]. Beijing: Intellectual property Publishing House, 2011.
- [2] 黄盛. 降雨情景下上海市地铁通勤出行影响的时空格局研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2022.
HUANG Sheng. Study on the temporal and spatial patterns of the impact of subway commuting in Shanghai under rainfall scenarios [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2022.
- [3] 任立明. 可靠性工程师必备知识手册[M]. 2 版. 北京: 中国标准出版社, 2013.
REN Liming. Handbook of essential knowledge for reliability engineers [M]. 2nd ed. Beijing: Standards Press of China, 2013.
- [4] 茆诗松. 试验设计[M]. 北京: 中国统计出版社, 2004.
MAO Shisong. Design of experiment [M]. Beijing: China Statistics Press, 2004.
- [5] 张力. 田口方法在质量管理中的应用[J]. 企业改革与管理, 2010(7): 61.
ZHANG Li. Application of Taguchi method in quality management [J]. Enterprise Reform and Management, 2010(7): 61.
- [6] 周纪芄, 茆诗松. 质量管理统计方法[M]. 2 版. 北京: 中国统计出版社, 2008.
ZHOU Jixiang, MAO Shisong. Statistical methods of quality management [M]. 2nd ed. Beijing: China Statistics Press, 2008.
- [7] 杨建军, 刘丰. 城市轨道交通车辆引入 PHM 技术的决策分析[J]. 智慧轨道交通, 2022, 59(2): 24.
YANG Jianjun, LIU Feng. Decision analysis for the introduction of PHM technology in urban rail transit vehicles [J]. Smart Rail Transit, 2022, 59(2): 24.

· 收稿日期:2024-03-04 修回日期:2024-07-11 出版日期:2025-01-10

Received:2024-03-04 Revised:2024-07-11 Published:2025-01-10

· 第一作者:李建兴,副教授,13532190@qq.com

通信作者:李怀志,教授,344605525@qq.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license