

广州地铁 1 号线列车空调系统可靠性分析

周汉邦, 梁春风, 黄小龙

(广州地铁集团有限公司, 广东 广州 510380)

摘要: 为提高广州地铁 1 号线电动列车空调部件二次大修质量, 对空调系统主要故障原因进行分析。使用 2004~2013 年空调部件故障数据, 建立 BP 神经网络仿真模型。该模型可预测 2014~2018 年的空调部件可靠性, 并根据预测结果正确给出空调部件二次大修维护建议, 提高空调部件维修质量, 降低其故障发生率。

关键词: 广州地铁 1 号线; 空调系统; BP 神经网络; 可靠性预测

中图分类号: U231; U270.38⁺3 **文献标识码:** B
doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2017.03.026

0 引言

广州地铁 1 号线是广州市第 1 条地铁, 自 1999 年开通以来已经运行多年, 列车设备均开始出现老化或寿命到限的现象。空调系统老化更为严重, 各种部件故障频发, 虽然经过一次大修, 但空调各种部件故障率仍然较高。2018 年 1 号线列车将进行二次大修, 为提高列车空调部件维修质量, 使用专业仿真软件预测空调部件可靠性, 根据仿真结果给出维护建议。

1 空调结构及故障原因分析

1.1 空调结构介绍

广州地铁 1 号线车辆的空调机组由空气处理室和压缩机 / 冷凝器室两部分构成, 并被组合在一个不锈钢箱体内, 通过 4 个安装座, 与减振垫一起被固定在车顶上。包括连接软风道在内的空调尺寸(长 × 宽 × 高)为 2 950 mm × 1 850 mm × 455 mm, 每台机组的质量为 889 kg。

空气处理室主要部件包括: 回风调节板、新风调节板、蒸发器、送风机、紧急逆变电源、制冷管路电磁阀、热力膨胀阀、空气挡板调节用电磁阀、温度传感器、新风气动风缸、回风气动风缸、新风百叶窗、新风过滤器(金属材料)、混合空气过滤器(无纺布

材料)等。

空调部件大致包括: 制冷压缩机、冷凝器和冷凝风机、蒸发器、送风机、热力膨胀阀、阀件、贮液器、干燥过滤器、流量 / 湿度指示器、压力开关和温度传感器等。

1.2 空调故障原因分析

空调系统故障主要发生在温度传感器、冷凝风机、送风机、保护单元、压缩机、压力开关等部件上, 详见表 1。

表 1 空调各部件故障现象

故障部件	故障现象	处理方式
温度传感器	温度显示异常, 空调有通风无制冷, 车厢温度比较高	清洁、更换温度传感器
压缩机	压缩机三相不平衡, 导致微动开关跳闸, 空调有通风无制冷	更换压缩机
冷凝风机	因为电机过热保护、卡死, 导致电机绕组烧损或运行产生异响	更换冷凝风机
送风机	电机运行产生异响, 送风机跳过热保护, 空调无通风、制冷	更换送风机
保护单元	保护单元过热保护失效, 压缩机不能工作, 空调有通风无制冷	更换压缩机保护单元
压力开关	压力开关内部机械卡死, 常闭触头接触不良, 接触电阻偏高, 时好时坏, 导致空调高压、低压故障保护, 空调有通风无制冷	更换压力开关

2 空调系统部件的可靠性分析

2.1 可靠性分析理论计算

设备可靠性分析是评估部件故障、老化、寿命的一种方式, 而设备失效率和可靠度是设备部件可靠性判断依据。为分析广州地铁 1 号线空调系统可靠性, 引入产品失效率、可靠度概念及计算公式, 对空调部件故障数据进行处理, 为可靠性预测模型建立提供数据输入。

失效率的定义为: 工作到某时刻尚未失效的产品, 在该时刻后单位时间内发生失效的概率。计算公式:

$$\bar{f}(t) = \frac{\Delta n f(t)}{n} \frac{1}{\Delta t} \quad (1)$$

式中: n 为所有件数; $\Delta n f(t)$ 为故障件数; Δt 为故障统计时间段。

可靠度定义为: 设产品总数为 n , 在规定时间 T 内累积失效数为 $nf(t)$, 仍正常工作的产品为数 $ns(t)$, 则产品的可靠度表示为

$$R(t)=\frac{ns(t)}{n}=\frac{n-nf(t)}{n}$$

(2)

式中: $R(t_r)=R$ 对于负指数分布时, 有 $e^{-\lambda t_r}=R$, 则有寿命时间为 $t_r=\frac{-2.302}{\lambda}\lg R$, $R=0.5$ 的可靠寿命称为中位寿命。

2.2 空调部件故障数据

1 号线 A1 型车自 2004 年以来, 列车空调系统部分部件逐渐开始出现老化、磨损、寿命到限现象, 空调故障主要部件有: 冷凝风扇、送风机、温度传感器、压缩机、压缩机保护单元等。现对 18 列 A1 型列车空调部件从 2004~2013 年故障情况进行了统计^[5], 如表 2 所示。

表 2 2004 ~ 2013 年空调各部件故障次数次

部件	年 份									
	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
温度传感器	20	27	27	22	16	45	24	37	38	10
压缩机	3	0	4	2	2	9	2	2	6	1
冷凝风扇	7	2	9	18	6	13	11	10	3	0
送风机	0	1	1	2	2	0	0	0	2	1
保护单元	1	8	5	7	5	4	17	22	16	5
压力开关	9	20	31	9	5	3	2	2	2	0

2.3 空调部件可靠度计算

根据可靠性分析理论, 部件的可靠度为产品的总数减去规定时间内失效数量与产品总数比值。用 2004~2013 年的 18 列车空调部件故障计算出可靠度如表 3。

表 3 2004 ~ 2013 年空调各部件可靠度

故障部件	年 份									
	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
温度传感器	0.954	0.891	0.829	0.778	0.741	0.637	0.581	0.495	0.407	0.384
压缩机	0.986	0.986	0.968	0.958	0.949	0.907	0.898	0.889	0.861	0.857
冷凝风扇	0.984	0.979	0.958	0.917	0.903	0.873	0.847	0.824	0.817	0.817
送风机	1.000	0.998	0.995	0.991	0.986	0.986	0.986	0.986	0.982	0.979
保护单元	0.995	0.958	0.935	0.903	0.880	0.861	0.782	0.681	0.607	0.583
压力开关	0.979	0.933	0.861	0.840	0.829	0.822	0.817	0.813	0.808	0.808

根据表 3 可知, 1 号线列车运行至 2013 年时, 温度传感器和保护单元的可靠度较低, 分别为 0.384 和 0.583。因广州地铁 1 号线已经运行多年, 部分空调部件老化严重, 现通过 BP 神经网络根据 2004~2013 计算出的可靠度结果, 预测 2014~2018 年各部件的可靠度, 从而在 2018 年空调架修时对空调各部件维护保养做出评估依据。

2.4 BP 神经网络模型

基本 BP(Back Propagation)算法包括 2 个方面: 信号的前向传播和误差的反向传播。即计算实际输出时

按从输入到输出的方向进行, 而权值和阈值的修正从输出到输入的方向进行。如图 1 所示。

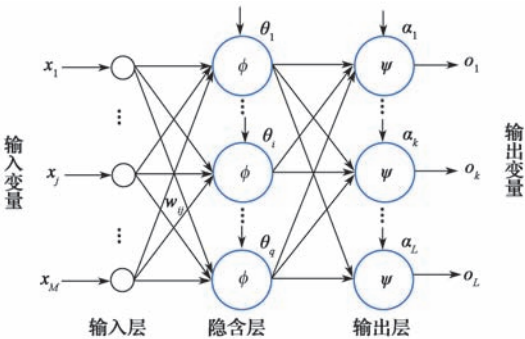


图 1 BP 网络结构

其中: x_j 表示输入层第 j 个节点的输入, $j=1, \dots, M$; w_{ij} 表示隐含层第 i 个节点到输入层第 j 个节点之间的权值; θ_i 表示隐含层第 i 个节点的阈值; $\phi(x)$ 表示隐含层的激励函数; w_{ki} 表示输出层第 k 个节点到隐含层第 i 个节点之间的权值, $i=1, \dots, q$; α_k 表示输出层第 k 个节点的阈值, $k=1, \dots, L$; $\psi(x)$ 表示输出层的激励函数; o_k 表示输出层第 k 个节点的输出。

2.5 用 BP 神经网络对各部件进行仿真预测

本次预测原理采用 BP 神经网络模型。根据 2004~2013 年空调各部件的故障次数, 得出各部件的可靠度, 根据其预测 2014~2018 年各部件可靠度。模拟预测的工具采用 MATLAB^[6] 软件, 调用内部 BP 神经网络工具箱进行模拟仿真。本次 BP 网络采用的是三层网络, 分别是输入层、隐含层和输出层。其中输入层采用的是 tansig 函数, 隐含层采用的 tansig 函数, 输出层是 purelin 函数。此次空调故障部件共有 6 个, 所以输入数据 6 个, 隐含层采用 9 个, 输出也采用的是 6 个。

模拟过程是以 6 种部件的使用年限为输入, 在不同年限下部件的可靠度为输出, 进行模拟仿真当误差小于 10^{-5} 时仿真就停止。此时 BP 神经网络内部训练好的各种参数就会固定, 这时可以对 2014~2018 年的各部件可靠度进行预测, 或者使用年限更久可靠度。仿真过程中有 6 个部件, 根据 2013 年之前数据显示温度传感器和压缩机保护开关可靠度比较低, 现利用神经网络仿真, 让实际可靠度与网络仿真可靠度进行对比, 得到对比仿真图^[7]。

空调温度传感器的 BP 神经网络仿真图如图 2 所示。从图 2 可以看到 BP 神经网络模拟的空调温度传感器可靠度与实际温度传感器可靠度非常接近, 曲线拟合精度很高, 本次仿真模型效果较好。

保护单元的 BP 神经网络仿真图如图 3 所示。从图 3 可以看到 BP 神经网络模拟的保护开关可靠度数据与实际可靠度数据都在同一条线上, 曲线拟合精度很高, 说明本次建立的仿真模型达到了要求。

根据建立的 BP 神经网络仿真模型, 输出 2014~2018 年空调各部件的可靠度如表 4 所示。

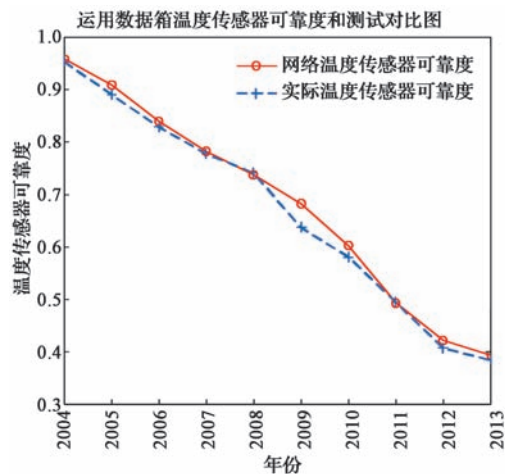


图2 空调温度传感器仿真图

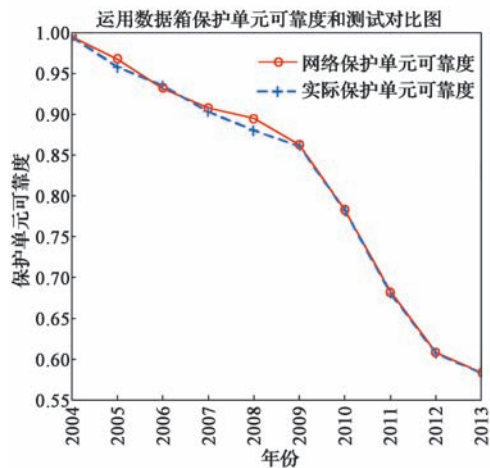


图3 空调保护单元仿真图

表4 对2014~2018年空调各部件的可靠度预测

故障部件	年 份				
	2014	2015	2016	2017	2018
温度传感器	0.380 4	0.370 5	0.360 4	0.349 2	0.336 9
压缩机	0.867 5	0.864 4	0.860 9	0.857 0	0.852 6
冷凝风扇	0.805 5	0.800 5	0.795 0	0.789 1	0.782 9
送风机	0.987 4	0.987 3	0.987 2	0.976 3	0.965 4
保护单元	0.587 0	0.584 5	0.582 1	0.579 1	0.575 3
压力开关	0.775 1	0.762 5	0.749 7	0.736 5	0.723 3

根据表4可知，温度传感器和压缩机保护单元可靠度较低，2018年可靠度分别为0.336 9和0.575 3，送风机的可靠度较高，2018年仍然保持在0.965 4，压缩机、冷凝风机、压力开关可靠度为中等。

3 维护建议

根据BP神经网络预测的空调各部件可靠度，建议2018年进行二次大修空调维护如下：

①温度传感器运行至2018年可靠度较低，特别是管道温度传感器工作环境较差，容易损坏，寿命期较短，建议二次大修全部更新。

②数据显示2018年压缩机可靠度较高，2008年大修时未更新，建议压缩机在第2018二次架修时全部更换压缩机油，并更新制冷剂。

③数据显示2018年冷凝风扇可靠度下降不明显，因空调冷凝风机在一次大修时已基本更新，鉴于大修车冷凝风机已完成更新，且工作性能稳定，二次大修建议更新电机轴承。

④送风机工作性能稳定，至2018年预测可靠度较高，故障率低，不建议更换，有故障时才更换。

⑤保护单元故障率较高，预测可靠度较低，虽然保护单元在2008年一次大修已全部更新，但国产备件故障率相对较高，建议在2018年二次架修统一更新进口保护单元。

⑥压力开关故障率一般，数据预测可靠度中等，实际低压压力开关故障率较高，高压压力开关故障率较低，2008年一次大修已全部更换低压压力开关新件，建议在2018年二次架修时统一更新低压压力开关。

4 结语

对广州地铁1号线空调系统部件结构及空调系统主要故障原因进行分析，并对故障处理给出结论。根据2004~2013年空调部件故障数据计算可靠度，利用MATLAB软件使用故障数据建立可靠性预测仿真模型。仿真结果表明模型输出可靠度与计算可靠度结果一致，该仿真可准确预测2014~2018年空调各部件可靠度，给出空调部件二次大修维护建议，提高维修质量，降低故障发生可能性。

参考文献：

[1] 何霖. 广州地铁一号线车辆系统培训教材 [Z]. 广州：广州地铁集团有限公司，2013：134-147.

[2] 刘菊美. 2013年运营一中心设备故障案例汇编 [G]. 广州：广州地铁集团有限公司，2013.

[3] 余江. 地铁车辆关键系统可靠性分析及应用研究 [D]. 北京：北京交通大学，2012.

[4] 李国文. 营运车辆使用可靠性评价研究 [D]. 西安：长安大学，2011.

[5] 广州地铁集团有限公司. 一号线A1A2A3故障跟踪记录表 [R]. 广州：广州地铁集团有限公司，2013.

[6] 卓金武. MATLAB在数学建模中的应用 [M]. 北京：北京航空航天大学出版社，2011：99-124.

[7] 刘保柱. MATLAB7.0从入门到精通 [M]. 北京：人民邮电出版社，2010：60-90.

作者简介：周汉邦（1989-），男，主要从事城轨车辆的运用和维护工作。