

延长地铁车辆空调压缩机更换周期的探讨

王大奎¹ 毕林² 蔺高¹

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 266109, 青岛;

2. 重庆市轨道交通(集团)有限公司, 401120, 重庆//第一作者, 高级工程师)

摘要 以地铁车辆架大修期更换空调压缩机为切入点,从压缩机的设计寿命、结构原理、检测检查、运用故障分析、故障模式及影响分析等角度,探讨了在大修期更换车辆空调压缩机的合理性。研究表明:在车辆大修期更换的空调压缩机仍能满足使用要求,其更换周期延长至15年更为合理。这样既能保证车辆的运营可靠性,也能降低车辆全寿命周期成本。

关键词 地铁车辆; 架大修; 维修优化; 全寿命周期; 空调压缩机

中图分类号 U270.38*3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.12.042

Discussion on Prolonging the Replacement Period of Metro Vehicle Air-conditioning Compressor

WANG Dakui, BI Lin, LIN Gao

Abstract Taking the replacement of air-conditioning compressor during metro vehicle frame overhaul as the cut-in point, from the perspectives including compressor design life, structure principle, test and examination, application failure analysis, failure mode and impact analysis, the rationality of replacing vehicle air-conditioning compressor in overhaul period is discussed. Research results show that the air-conditioning compressors replaced in the period of vehicle overhaul can still meet the service requirements, so the replacement period is more reasonable to be extended to 15 years, which can both ensure the reliability of vehicle operation, and reduce the vehicle full life cycle cost.

Key words metro vehicle; frame overhaul; maintenance optimization; full life cycle; air-conditioning compressor

First-author's address CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., 266109, Qingdao, China

目前,我国各大城市的地铁车辆逐渐进入架修或大修期^[1]。当前采用的维修方式大多相对保守,存在较多过度修行为。如何合理地进行维修优化、

如何在维修可靠性和经济性之间找到恰当的平衡点成为亟待解决的问题。对此,各地铁公司及专家学者从多方面开展了理论研究和实践论证:文献[2]以维修成本最小为目标,基于可靠性建立齿轮箱的维修周期优化模型,有效延长了齿轮箱的维修周期、降低了维修成本;文献[3]提出以均衡修理念进行重庆地铁车辆日常维修方式的优化,可有效减少列车扣修天数;深圳市地铁集团有限公司通过对空调机组部件的寿命研究,为修程优化提供依据,达到减少维修量、降低成本的目的^[4];南京地下铁道有限责任公司通过多年车辆运用故障的统计分析,对检修周期和内容均进行了优化,获得了良好的经济效益^[5]。国外的专家学者针对维修优化也做了大量研究:文献[6-8]从维修费用、设备可用度、部件服役时间及建立维修模型等角度提出了不同的维修优化方式。

本文以某城市地铁在大修期更换空调压缩机为切入点,从压缩机工作原理、设计寿命、检修中的测试检查、运用故障分析、故障模式及影响分析等角度,对其合理性进行探讨,为地铁车辆相关维修的优化提供参考。

1 空调压缩机简介

1.1 工作原理

空调的制冷回路由压缩机、室外热交换器、电子膨胀阀、室内热交换器及风机等主要部件构成,形成了封闭的制冷系统,如图1所示。

首先,压缩机将低温低压的气态制冷剂压缩成高温高压的过热气体,并输入室外热交换器;然后,通过室外侧风机使外界空气与室外热交换器进行强制换热后,通过电子膨胀阀节流降压进入室内热交换器;之后,通过室内侧风机使客室与外界新风组成的混合空气与室内热交换器进行强制换热;最后,室内热交换器内的液体蒸发成为低压气体,再被压缩机吸入,完成1个制冷循环。

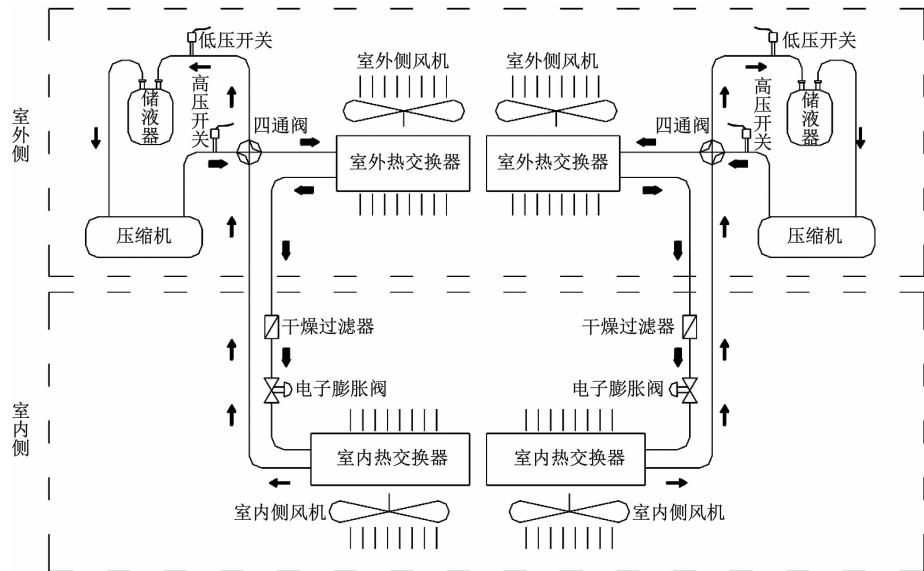


图 1 空调制冷循环系统图

Fig. 1 Diagram of air-conditioning refrigeration cycle system

1.2 设计寿命

我国地铁车辆所用空调一般为单冷式。在制冷时,压缩机工作;在制热时,压缩机不工作(采用电加热)。空调压缩机设计寿命为 50 000 h。按压缩机每年 6 月—10 月工作、每天工作 15 h 计算,1 年中压缩机运转的时间约为 2 250 h,则车辆大修期(10 年)的压缩机运转时间约为 22 500 h,远远低于压缩机的设计寿命。

因此,从设计寿命角度分析,大修期更换空调压缩机是过度修行为。按设计寿命为 50 000 h,压缩机每年运转 2 250 h 计算,压缩机的理论使用寿命约为 22 年。而压缩机在使用过程中的载荷条件较为复杂,其实际寿命可能与设计寿命存在一定偏

差;此外,车辆寿命一般为 30 年,在车辆全寿命周期内需更换 1 次空调压缩机。综上考虑,每 15 年更换 1 次空调压缩机更为合理。

2 检修中的测试检查

随机选取 12 台于大修期更换下来的空调压缩机,从性能检测和部件状态两个方面进行分析,论证其更换的合理性。

2.1 性能试验检测

按照新品出厂时的例行试验要求,对 12 台压缩机分别进行启动性能、噪声、输入功率、制冷量和绝缘耐压等 8 项测试。测试结果见表 1 所示。

各新品检测项目的要求为:以额定电压的 1.06

表 1 压缩机测试结果
Tab. 1 Compressor test results

样本序号	启动性能检测结果	噪声/ dB(A)	运行电流/ A	漏电流/ mA	输入功率/ kW	制冷量/ kW	绝缘电阻/ MΩ	耐压测试结果
1	通过	72	12.95	0.05	7.6	23.3	400	通过
2	通过	73	13.92	0.06	7.0	23.6	520	通过
3	通过	74	14.10	0.07	7.2	23.7	410	通过
4	通过	72	14.31	0.10	7.9	23.6	420	通过
5	通过	68	13.23	0.03	6.8	23.7	440	通过
6	通过	74	11.45	0.05	7.5	23.8	600	通过
7	通过	71	14.11	0.11	7.8	23.8	550	通过
8	通过	70	13.12	0.06	7.5	24.0	590	通过
9	通过	72	14.20	0.12	7.4	23.4	620	通过
10	通过	72	12.33	0.08	7.4	23.3	480	通过
11	通过	69	13.12	0.08	6.9	24.1	480	通过
12	通过	73	13.88	0.07	7.7	23.3	560	通过


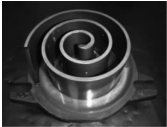
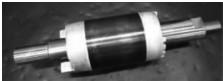
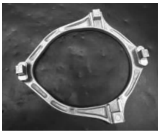
倍和 0.85 倍分别连续通电 3 次,如均能正常启动,则启动性能项检测结果为“通过”;声压级噪声值应不大于 79 dB(A);运行电流应不超过额定值(14.2 A)的 105%;施加 1.06 倍额定电压时的测试漏电流不应超过 3.5 mA;输入功率不应超过 8.1 kW;制冷量不小于名义值(23.6 kW)的 95%;在 DC 500 V、持续 1 min 工况下,绝缘电阻应大于 2 MΩ;而在 AC 2 000 V、持续 1 min 工况下,如无击穿和闪络,则耐压测试结果为“通过”。

试验结果表明:12 台压缩机的测试结果均在新品检测要求范围内,能满足继续使用的要求。

2.2 部件状态检查

对随机选取的 12 台压缩机进行分解,检查关键零部件外观状态及使用情况。检查结果见表 2 所示。

表 2 所选 12 台压缩机的关键零部件状态检查记录表
Tab.2 State inspection log for key components of the selected 12 compressors

关键零部件名称	典型照片	状态描述
静涡盘		外观状态均良好,稍微脏污,无异常
动涡盘		外观状态均良好,稍微脏污,无异常
曲轴		外观状态良好,有轻微磨损
十字滑环		外观状态良好,无明显异常

由关键零部件的状态检查结果可见,12 台压缩机的零部件状态均良好,能满足继续使用的需求。

2.3 检查检测结果

对 12 台压缩机的检查检测情况表明:大修期更换下的压缩机性能良好,满足继续运用需求;零部件状态良好,与新品对比无明显差异。因此,结合设计寿命,从测试检查角度分析,大修期更换空调压缩机为过度修行为,延长至 15 年更换较为合理。

3 运用故障分析

经统计,从开始运营至今(约 10 年),共发生 22

起压缩机相关故障,其中通信故障 10 起、电机故障 6 起、泄露故障 3 起、过热故障 3 起。该项目共有 29 列列车,且每列车有 20 台空调压缩机,折合每台压缩机平均每年发生故障仅约 0.003 起。可见,压缩机故障率极低,说明其运用情况稳定,非空调系统主要故障点。

按列车运营里程节点统计压缩机故障分布情况,如表 3 所示。

表 3 空调压缩机故障里程分布
Tab.3 Distribution of air-conditioning compressor failure mileage

列车运营里程/万 km	压缩机故障数/起
0 ~ 30	8
30 ~ 60	6
60 ~ 90	6
90 ~ 120	2

从表 3 可以看出:① 压缩机故障率未随车辆运营里程增加而呈上升趋势,且在运营里程为 90 万 ~ 120 万 km 内未出现故障率明显上升,说明运营里程为 120 万 km 时的压缩机并未到达寿命极限;② 在 0 ~ 120 万 km 的运营里程区间内,压缩机的故障率总体呈递减趋势,符合“浴盆曲线”^[9]规律,说明在大修期的压缩机处于浴盆曲线底端,即性能稳定期,仍然可以继续使用。

4 故障模式及影响分析

4.1 故障模式

根据故障情况及压缩机自身属性,压缩机故障共有 4 种典型故障模式,其影响如表 4 所示。

4.2 影响分析

由表 3 可知,单台压缩机故障对行车安全和运营秩序无影响。此外,每列车有 2 台空调机组,每台空调机组有 2 台压缩机。在实际运营过程中,司机通常会开启“自动”模式。根据送风与回风温度差,空调系统自动在“全冷”与“半冷”模式间切换:“全冷”为单个空调机组的 2 台压缩机同时工作,“半冷”为单个空调机组的 1 台压缩机工作。可见,单台压缩机不工作会导致单辆车丧失 1/3 的制冷量,且“半冷”工况时无影响,“全冷”工况时可能导致乘坐舒适度略降低。

综上所述,延长压缩机更换周期至 15 年较为合理。

表 4 空调压缩机典型故障模式及其影响

Tab.4 Typical failure modes and effects of air-conditioning compressors

故障模式	故障原因	故障影响	是否影响行车安全	应急处置措施
电机烧损	过电流	单台压缩机不工作,空调机组无法全冷模式下运行	否	维持运行,回库后更换压缩机
冷媒泄露	接口处密封不良	系统报“低压”故障	否	维持运行,回库后处置
通信故障	连接器插接不良	单台压缩机不工作,空调机组无法全冷模式下运行	否	维持运行,回库后处置
压缩机过热	非压缩机本身故障,一般由系统散热不良引起	系统自动启动“压缩机过热保护”,单台压缩机不工作,空调机组无法全冷模式下运行	否	维持运行,回库后处置

5 结语

根据本文研究结果,大修期更换的车辆空调压缩机未达设计使用寿命,状态良好,性能良好,故障率低,能满足继续使用的要求。因此大修期更换车辆空调压缩机属于过度维修。为提升运营可靠性、降低全寿命周期成本,经进一步分析,运营期为 15 年时更换空调压缩机更为合理。本文研究思路可为城市轨道交通车辆修程修制优化提供参考。

车辆运营环境较为复杂,本文仅论证了压缩机可延长至 15 年更换的合理性,优化后仍需结合运营环境、运营表现、地面试验、寿命研究等工作验证修程优化的合理性,形成修程制定及优化的闭环管理。

参考文献

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 地铁设计规范:GB 50157—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013:240-241.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for design of metro: GB 50157—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013:240-241.

[2] 李雨晗,李永华,宫琦. 基于可靠性的地铁车辆齿轮箱维修周期优化[J]. 大连交通大学学报, 2018(4):37.
LI Yuhan, LI Yonghua, GONG Qi. Subway gearbox maintenance cycle optimization based on reliability[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2018(4):37.

[3] 刘炬. 重庆地铁车辆日常维修方式的优化[J]. 铁道机车车辆, 2018(1):108.
LIU Ju. Optimization of daily maintenance mode for Chongqing rail transit vehicles[J]. Railway Locomotive & Car, 2018(1):108.

[4] 詹文元. 部件全寿命研究在深圳地铁车辆空调系统维修中的运用[J]. 城市轨道交通研究, 2018(4):201.
ZHAN Wenyuan. Application of component life-cycle research in air conditioning system maintenance of Shenzhen Metro vehicles[J]. Urban Mass Transit, 2018(4):201.

[5] 李启俊. 南京地铁车辆维修修程分析和优化[D]. 南京:南京理工大学,2011.
LI Qijun. Maintenance analysis and optimization of Nanjing Metro vehicles[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2011.

[6] DOOSTPARAST M, KOLAHAN F, DOOSTPARAST M. A reliability-based approach to optimize preventive maintenance scheduling for coherent systems[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2014,126:98.

[7] KHATAB A, AIT-KADI D, REZG N. Availability optimization for stochastic degrading systems under imperfect preventive maintenance[J]. International Journal of Production Research, 2014, 52(14):4132.

[8] PHAM H, WANG H. Optimal (τ, T) opportunistic maintenance of a k -out-of- n : G system with imperfect PM and partial failure[J]. Naval Research Logistics, 2020, 47:223.

[9] KUMAR D, KLEFSJÖ B. Proportional hazards model: a review[J]. Reliability Engineering and System Safety, 1994, 44(2):177.

(收稿日期:2020-08-18)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》
服务热线 021—56830728 转 821