

苏州轨道交通 1 号线全生命周期成本分析

韩建明¹ 杨玉鸿²

(1. 苏州市轨道交通集团有限公司运管中心, 215004, 苏州;

2. 苏州市轨道交通集团有限公司运营一分公司, 215101, 苏州//第一作者, 高级工程师)

摘要 基于全生命周期成本分析理论, 以苏州轨道交通 1 号线为例, 研究城市轨道交通全生命周期各阶段成本划分及构成。通过对历年数据的归纳分析, 结合设备各阶段维修策略, 分析了 1 号线运营期间各专业的运维成本, 并预测了 1 号线全生命周期内的维修成本。有关数据可作为城市轨道交通运营企业提值、降本增效及并探究运营可持续发展策略的决策依据。

关键词 城市轨道交通; 全生命周期成本; 运行维护成本

中图分类号 F530.7

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2022.05.002

Cost Analysis of Suzhou Rail Transit Line 1 Life Cycle

HAN Jianming, YANG Yuhong

Abstract Based on full life cycle cost analysis theory, taking Suzhou Rail Transit Line 1 as an example, the cost categorization and composition at each stage of urban rail transit full life cycle is studied. By summarizing and analyzing data from past years, considering maintenance strategy of equipment at each stage, the operation and maintenance cost of each specialty of Line 1 during operation is analyzed, and the maintenance cost of Line 1 in full life cycle is predicted. Relevant data can be used as decision-making reference for urban rail transit enterprises value increase, cost decrease and efficiency improvement, and sustainable operation strategy exploration.

Key words urban rail transit; LCC (life cycle cost); equipment operation and maintenance cost

Author's address Suzhou Rail Transit Group Co., Ltd., 215004, Suzhou, China

城市轨道交通线网涉及各专业的装备和设施设备数量非常庞大, 在各线路运营的中后期, 主要装备都相继进入中、大修期, 运维成本将呈逐年上升趋势。然而, 运营期间的收入主要是票款收入, 如有亏损额则需财政补贴, 成本压力已

成为制约城市轨道交通可持续发展的重要因素。因此需研究贯穿城市轨道交通全生命周期的成本。

苏州轨道交通 1 号线全长 25.711 km, 设 24 座车站, 全部为地下站, 列车为 4 节编组 (B 型车), 设车辆段和控制中心各一处。1 号线是苏州市第一条建成运营的轨道交通线路, 于 2012 年 4 月 28 日开通试运营, 至今运营近 10 年。1 号线初期配属列车 25 列, 后期增购 22 列, 1 号线 47 列车总购置费为 12.08 亿元。本文主要研究苏州轨道交通 1 号线的全生命周期成本构成。

1 苏州轨道交通 1 号线全生命周期成本统计

根据国际标准 IEC 60300, 产品的全生命周期包括设计开发阶段、制造与安装阶段、使用和维护阶段及回收处置阶段^[4]。全生命周期成本 (LCC) 管理具有全系统、全费用、全过程的特点, 力求打破部门职能界限, 以资产总体效益为出发点实现贯穿资产全寿命的整体优化。

根据城市轨道交通特点, 可以将全生命周期划分为建设阶段、运营维护阶段和报废回收阶段, 全生命周期关键阶段成本可概括为建设成本、运营维护成本和残值^[5]。

1.1 建设成本

建设成本包括工程费 (建筑工程费、设备购置费和安装工程费等)、工程建设其他费用、预备费 (基本预备费、涨价预备费)、车辆购置费、建设期利息及铺底流动资金等。苏州轨道交通 1 号线建设成本具体包括工程建设成本、设备购置费及工程安装费, 本文对土建部分投入成本不做讨论。苏州轨道交通 1 号线建设成本 (不含土建成本) 如表 1 所示。

表 1 苏州轨道交通 1 号线建设成本(不含土建成本)

Tab.1 Construction cost of Suzhou Rail Transit Line 1 (excluding civil construction cost)

项目	设备购置费及工程安装费/万元
地铁车辆	120 841.72
工程车辆	6 004.56
检修设备	10 005.40
轨道	39 485.45
专用通信系统	78 970.89
信号系统	43 320.79
自动售检票系统	9 658.75
给排水系统	3 542.16
防灾报警系统 (含气体灭火系统)	4 919.13(其中工程安装费 2 492.43)
屏蔽门系统	6 135.64(其中工程安装费 361.79)
电梯/扶梯系统	17 143.22(其中工程安装费 2 982.66)
综合监控系统 (含门禁系统)	17 174.22(其中工程安装费 4 811.10)
高压供电系统	54 929.86
低压供电系统	17 916.19
通风空调系统	4 355.72
接触网	8 715.73
合计	443 119.42

1.2 运营维护成本

运营维护成本是为完成乘客运输任务所消耗的费用。通过对历年来苏州轨道交通的运营维护成本进行分析发现,占比前三的主要包括人工成本(含保洁费、保安费、劳务外包费等)、能耗成本(水费、电费)、维修成本(含备件与耗材消耗、工器具费用、劳保费用)以及折旧等。其中,人工成本、维修成本的占比逐年增加,能耗成本的占比逐年降低。

维修费用中涉及运营的专业包括电客车、检修设备、工程车、房建、探伤、轨道、通信、信号、AFC(自动售检票)、高压供电、接触网、供电综合、通风空调、给排水、低压供电、综合监控、FAS(火灾报警系统)、电扶梯和站台门等专业。历年维修费用中各专业的备件和耗材消耗费用如表 2 所示。

1.3 残值

残值指设备、建筑物或系统在全生命周期的周期末纯价值,一般为报废。

表 2 历年维修费用中各专业的备件和耗材消耗费用

Tab.2 Spare parts and consumables consumption costs of various specialties in the maintenance costs from past years

专业分类		不同年度备件和耗材消耗费用/万元								
		2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年
车辆	地铁车辆	30.17	47.42	206.16	602.29	2 081.59	1 292.04	2 696.69	1 546.79	2 126.01
	工程车辆及检修设备	1.45	12.02	33.74	47.71	67.63	73.83	140.43	177.84	155.97
	合计	31.61	59.44	239.90	650.00	2 149.22	1 365.87	2 837.12	1 724.64	2 281.98
工务通号	轨道	406.06	406.37	422.77	482.24	494.97	513.84	638.22	656.27	693.02
	专用通信系统	0.00	2.18	42.76	32.60	144.32	144.70	311.96	204.91	234.40
	信号系统	2.63	11.89	8.73	30.69	69.27	268.37	298.49	387.56	316.56
	自动售检票系统	13.31	0	21.12	273.94	108.54	218.04	156.44	225.10	130.46
	房建维保	93.35	124.46	124.46	181.08	199.95	199.95	382.88	443.86	443.86
	结构监测	37.47	37.47	37.47	41.67	41.67	41.67	41.67	41.67	41.67
	合计	552.82	582.36	657.31	1 042.22	1 058.73	1 386.56	1 829.66	1 959.37	1 859.97
供电机电	给排水系统	925.04	932.82	929.33	933.65	929.57	933.12	1 009.73	1 053.79	1 100.61
	防灾报警系统及气体灭火系统	0.00	0.05	183.82	235.47	197.86	191.87	179.22	182.82	180.42
	屏蔽门系统	0.42	0.06	1.13	1.51	2.63	28.72	49.84	38.08	29.94
	电梯/扶梯系统	0.00	0.01	374.31	372.79	372.13	474.89	474.98	475.48	512.48
	综合监控系统	0.00	11.93	101.74	52.26	37.08	66.64	41.82	117.43	140.62
	门禁系统	0.46	1.71	0.52	3.02	9.25	30.73	13.13	7.44	9.46
	高压供电系统	27.80	558.60	599.73	576.23	602.28	718.85	599.98	949.13	693.85
	低压供电系统	1.74	1.39	8.18	21.72	27.52	21.71	31.34	77.89	37.80
	通风空调系统	9.22	4.73	13.20	18.76	32.01	39.35	134.74	107.54	87.67
	接触网	5.85	3.50	13.16	3.16	2.19	33.77	17.75	15.68	11.18
	合计	970.53	1 514.80	2 225.12	2 218.59	2 212.52	2 539.65	2 552.53	3 025.29	2 804.03
	总计	1 554.96	2 156.60	3 122.33	3 910.81	5 420.47	5 292.09	7 219.31	6 709.29	6 945.99

2 苏州轨道交通 1 号线全寿命周期成本分析

全生命周期成本的数学模型^[4]为:

$$N_j = \sum_{t=1}^{T_1} F_{jt}(1+i)^{-t} + \sum_{t=T_1+1}^T O_{jt}(1+i)^{-t} - S_j(1+i)^{-n}$$

式中:

N_j ——期末全生命周期成本的现值;

F_{jt} ——各年度建设成本;

O_{jt} ——各年度运营维护成本;

S_j ——期末回收资产余值;

T_1 ——建设年限;

T ——寿命周期;

i ——基准收益率;

n ——计算期。

本文结合苏州轨道交通 1 号线全寿命周期设备状态,对各阶段成本构成及规律变化做出分析说明。

2.1 建设成本分析

建设成本中(不含土建成本)占比最大的为 47 列地铁列车的购置费用,占比为 27.3%。电梯/扶梯系统、屏蔽门系统、轨道系统虽然在建设成本中占比不高,但其单位设备的建设成本排名靠前;专用通信系统、信号系统虽然在建设成本中占比较高,但由于系统涵盖设备数量较多,线路上覆盖面较广,其单位设备的建设成本排名靠后。

2.2 运营期间成本分析

运营期间成本中,1 号线的运营维护费用呈逐年上升趋势,2015 年,电客车进入第一轮中修,维修费用逐年增长较多;2019 年由于部分专业开展周期性大规模更换,维修费用大幅增长;2020 年,部分专业开始大修及增购电客车架修,维修费用虽回落但仍呈较高水平。基于以上数据,结合 1 号线年度运营里程,计算得出了 1 号线历年的车公里维修成本,如表 3 所示。

表 3 1 号线历年的车公里维修成本

Tab. 3 Vehicle-kilometer maintenance cost of Line 1 from past years

项目	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年
维修成本(元/(车·km))	3.13	2.50	2.93	3.37	4.32	3.96	4.41	4.98	4.66

对运营近 10 年期间采样的人工成本、能耗成本、维修成本数据,结合用工政策、设备规律等进行综合分析。在用工成本方面,2018 年因薪酬制度调整带来人工成本的大幅增加,2019 年由于职能部门及生产中心机关人员费用按线路里程分摊带来人员费用降低。在维修费用方面,2012 至 2014 年期间,设备在质保期限内,主要成本为日常维保费用,深度维修费用主要是开展了部分专项修;2015 至 2017 年期间,部分专业特别是车辆专业逐步开始第一轮中修,维修费用逐年增长较多;2018 年开始,车辆架修逐步完成,维修费用下降;2019 年由于开展周期性全线蓄电池更换,维修费用大幅增长;2020 年开始部分专业开始大修及增购车辆架修,维修费用虽回落但仍呈较高水平。

结合以上特点,对各专业设备和系统的单位设备年度平均消耗成本进行推算,结果如表 4 所示。

在能耗成本方面,历年来能耗成本呈下降趋势,主要得益于推进节能项目落地。通过能源合同模式,完成了 1 号线空调水系统和车站照明的节能改造。节能改造后,车站照明节约电费约 240 万元/年,空调水系统节能率超过 30%。另外,新增了空

表 4 各专业设备和系统的单位设备年度平均消耗成本推算结果

Tab. 4 Unit equipment average annual consumption cost of each specialty equipment and system

序号	系统	年度平均消耗成本
1	地铁车辆/(元/(列·年))	137 278.48
2	电梯/扶梯/(元/(台·年))	13 641.52
3	轨道/(元/(套·年))	11 876.44
4	给排水系统/(元/(套·年))	7 819.49
5	综合监控系统/(元/(套·年))	7 631.79
6	高压供电系统/(元/(套·年))	4 316.76
7	门禁系统/(元/(套·年))	2 557.21
8	接触网/(元/(条公里·年))	1 577.96
9	屏蔽门系统/(元/(套·年))	956.23
10	防灾报警系统/(元/(套·年))	916.78
11	自动售检票系统/(元/(套·年))	553.60
12	低压供电系统/(元/(套·年))	422.48
13	信号系统/(元/(套·年))	338.23
14	专用通信系统/(元/套)	247.42
15	通风空调系统/(元/(套·年))	246.36

调季节大系统,采用全回风等节能策略实现有效节能。上述措施的实施,主要在动力照明用电方面实现能耗成本管控。但在牵引能耗方面,为更好地服务乘客,1 号线多次缩短行车间隔、延长运营时间,

牵引能耗逐年增加。此外电价的下降、直供电采购及疫情期电网 5% 价格优惠也带来能耗成本的降低。

2.3 全寿命周期成本预测

根据建标 104—2008《城市轨道交通工程项目建设标准》^[6], 固定资产折旧年限分别为: 房屋的为 50 年; 车辆基地维修设备的为 18 年; 通信、信号、综合监控、门禁、站台门等系统设备的为 15 年; 车辆的为 30 年。城市轨道交通运营全成本包括日常运营成本、设备大中修、设备更新、追加投资及利息。本文以苏州轨道交通 1 号线建设及运营成本的统计分析数据, 预测该线运营 30 年期间运营成本。

在维修成本方面, 收集 1 号线历年来相关系统的故障数数据, 整理得到变量数列, 经过因子分析、聚类分析等方法发现: 随着 1 号线设备进入架大修周期, 维修成本不断增加, 故障数随着维修费用的投入不断降低。根据设备运行浴盆理论及三阶段管理理论, 1 号线设备已进入偶发故障期, 稳定性有所提高, 故障率有持续下降的趋势。因此要结合设备重要性和故障率特点有效地实行预防性维修, 准确找到拐点, 选择合适的维修方式, 科学制定维修计划。故障数与预测维修成本如图 1 所示。

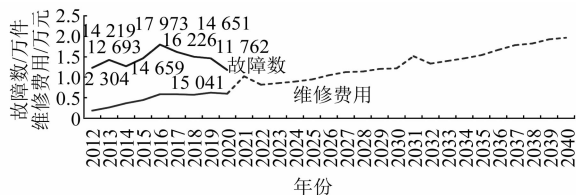


图 1 故障数与预测维修成本

Fig. 1 Number of failures and maintenance cost of Line 1 from past years

依据上述分析, 预测得到 1 号线 30 年间维修成本约为 30.9 亿元。人工成本按照每年 5% 的增长率计算, 预测得到 30 年人工成本为 133.6 亿元, 总日常运营成本达 199.2 亿, 约为建设成本的 4.5 倍。其中, 人力成本约占 67.1%, 维修费(全寿命周期)约占 15.5%。

3 结语

本文基于全生命周期理论分析城市轨道交通线路的建设及运营维护成本, 并对历年来各阶段成本构成规律进行研究; 对线路全生命周期运营成本进行预测, 给出前期设备购置、安装与后期设备运

营维护期间成本费用的数值比例。其中基于苏州市轨道交通 1 号线所预测得到的全生命周期(30 年)中后期 20 年运营维护成本数据, 可作为一系列管理创新举措对实际成本费用所产生影响的参照。

城市轨道交通全生命周期成本分析是一项涵盖多专业的系统工程。从成本构成方面看, 人工成本在总成本支出中占较大的比重, 但在整个全生命周期内, 随着大数据、人工智能等数字智能的应用以及对原有装备的智能化改造, 人工成本将在未来获得大幅下降, 因此该部分费用的预估有偏差。

基于本文的统计数据可进一步明确研究方向, 城市轨道交通运营企业可对影响运营期间成本的关键因素加以提炼、归类, 并从投资与收益的角度, 探究职工人数、设备的运行年限、设备维修策略、列车运行里程等因素对运营成本的影响, 在此基础上研究构建成本管控的指标体系, 指导形成成本管控策略。同时, 需从设备全生命周期角度考虑, 兼顾成本与安全绩效, 在对设备运营期间成本进行有效管控时, 结合目标管理应用, 将总维修成本细化至车间及班组层面。一方面, 通过设置“车公里服务成本、车公里维修成本、设备单位维修成本”等 KPI (关键绩效指标) 指标对日常维修成本进行归集, 挂钩安全指标、行车指标后, 将成本消耗融合设备状态做出设备维护策略分析; 另一方面, 可根据单位设备维修的标准工时、岗位人员标准配置等对用工成本加以核定, 以明确成本管控中管理活动的改善面及生产技术的可提升点, 结合新技术应用, 探索出运营成本控制的合理性, 指导运营维护, 实现效益最优。

参考文献

- [1] 张晓莉, 林茂德. 论城市轨道交通建设对经济发展的拉动作用[J]. 城市轨道交通研究, 2009(1): 1.
ZHANG Xiaoli, LIN Maode. The role of urban rail transit in boosting economic development[J]. Urban Mass Transit, 2009(1): 1.
- [2] HU Yu. Research of a subway corporation's operating performance indicators evaluation system[D]. Beijing: Beihang University, 2014.
- [3] 于福利, 李志强. 基于项目生命周期的轨道交通运营成本控制[J]. 综合运输, 2009(4): 21.
YU Fuli, LI Zhiqiang. Rail transit operation cost control based on project life cycle[J]. China Transportation Review, 2009(4): 21.