

文章编号: 1671-6612 (2021) 05-713-06

地铁车站冷水机组劣化标准研究

江洪泽¹ 张意祥² 周明熹¹

(1. 厦门轨道交通集团有限公司 厦门 361000;

2. 北京城建设计发展集团股份有限公司 北京 100037)

【摘要】 针对地铁车站冷水机组在实际运行过程中因设备劣化, 导致运维成本增加的情况, 综合考虑设备前期采购成本, 及后期运行维护成本, 提出设备全生命周期总投资最低的劣化判定计算方法。对于缺少设备长期运维监测数据且难以判断劣化规律的设备给出了简易计算方法。最后以厦门某地铁车站制冷系统设备为例进行成本分析, 给出了该站设备的劣化评定标准。

【关键词】 地铁; 冷水机组; 劣化标准

中图分类号 TU831.4 文献标识码 A

Study on Deterioration Judgment Method of Water Chiller for Metro

Jiang Hongze¹ Zhang Yixiang² Zhou Mingxi¹

(1. Amoy Transit Rail, Xiamen Metro, Xiamen, 361000;

2. Beijing urban construction design and Development Group Co., Ltd, Beijing, 100037)

【Abstract】 This paper aims at the increase in operation and maintenance costs due to equipment deterioration of subway station chillers during actual operation. This paper comprehensively considers the equipment procurement costs in the early stage and the later operation and maintenance costs, and proposes a calculation method for the lowest total investment in the entire life cycle of the equipment. A simple calculation method is given for equipment that lacks equipment long-term operation and maintenance monitoring data and is difficult to judge the degradation law. Finally, take the refrigeration system equipment of a subway station in Xiamen as an example for cost analysis, and give the deterioration assessment standard of the station equipment.

【Keywords】 Subway; chiller; degradation standard

0 引言

劣化是指设备在长期运行过程中出现性能逐渐降低的情况, 制冷系统在实际运行过程中, 设备构件会因磨损老化导致出现能耗, 故障率增加的情况^[1]。对于冷水机组而言, 随着技术的发展, 设备种类的日益增加, 系统复杂程度愈来愈高, 且运行过程中会受外界环境侵蚀, 不可避免地会出现设备老化磨损乃至发生各种故障的情况。对于地铁而言, 其通风空调系统设备均位于地下, 风系统通过

风井与外界相连。由于风道内存在大量的灰尘, 运行环境较地上建筑更为恶劣, 其设备老化磨损情况更为严重。设备老化将增大设备的运行能耗导致运维成本大幅上升。根据相关资料显示, 地铁车站运营成本中维修费用占比 25%, 运营费占比 15%, 电费占比 41%, 详见图 1^[2], 空调系统性能退化导致的能耗增加多达 30%^[3], 而地铁空调系统能耗占建筑总能耗的比重高达 50%^[2]。因此设备劣化将导致设备总成本大幅增加。

基金项目: 国家重点研发计划资助 (编号: 2018YFC0705000)

作者简介: 江洪泽 (1975.06-), 男, 硕士, 高级工程师

通讯作者: 张意祥 (1994.08-), 男, 硕士, 助理工程师, E-mail: 447064387@qq.com

收稿日期: 2021-04-09

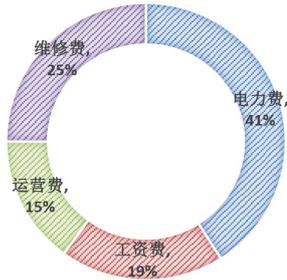


图1 北方某城市轨道交通运营成本构成^[2]

Fig.1 Composition of rail transit operation cost in a northern city

对于单个设备而言其总成本包括设备初投资和运维投资两部分。其中初投资是指设备采购、运输、安装、调试等一次性投入的成本；运维投资是指设备在投入运行时对其在运行、故障维修产生的成本。在设备运行初期，设备初投资占总投资比重较大，在运行后期运维投资占总成本比重较大，因此合理确定设备的劣化标准可降低设备的总成本，提高运营效率。而对于现有地铁空调系统设备劣化的评定，目前并没有一个统一标准。通常，设备劣化评定需要长时间、多角度地观测，仅依靠某个单一的指标无法判断设备和系统的实际状态，因此有必要对地铁空调系统设备劣化标准进行探究。

1 冷水机组故障类型分析

目前地铁制冷系统多采用水冷式制冷系统，该系统由冷水机组、冷却塔、冷冻水泵、冷却水泵以及末端的空调箱组成。冷水机组由压缩机、冷凝器、蒸发器和节流阀组成。除此之外系统还需增设辅助设备和控制设备，如润滑油系统、油分离器、储液器、干燥器、压力开关、冷却设备等。这些辅助设备在保证冷水机组运行的安全性和经济性同时，也使冷水机组故障部件和类型大幅增加。

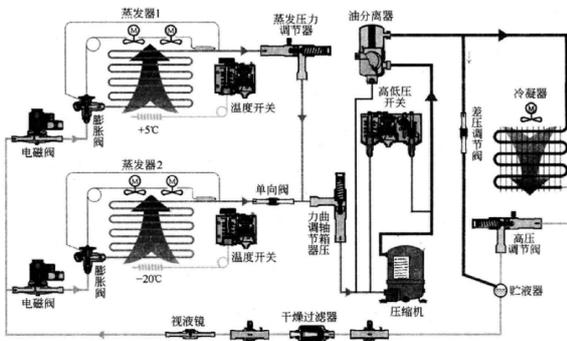


图2 冷水机组结构示意图^[4]

Fig.2 Structural diagram of water chiller

通过对制冷系统进行长期的研究，人们发现制冷系统设备在运行过程中会出现设备构件磨损和断裂、设备内部出现结垢等情况。这些问题会导致系统性能下降，能耗增加，甚至出现系统因故障停机的情况。研究人员根据故障对机组造成的影响程度，可分为硬故障和软故障。硬故障主要是指导致设备完全失效的故障，一般是突发性的，使系统不能运转或严重偏离设定的正常工况。常见的机组硬故障，如压缩机突然停机，阀门完全堵塞等。这类故障看似严重，或者正因其严重，症状往往突发、单一而显著，较易判断。如压缩机突然停机，会导致制冷剂停止流动，从压缩机进、出口温度或压力即可判断。软故障是指逐渐产生，系统能够运行但运行状况逐渐恶化、性能逐渐下降，不易被发现的故障，如蒸发器或冷凝器脏污、压缩机阀片磨损、制冷剂泄漏等。软故障对系统的影响是渐进的，直至整个系统的性能低于某个临界水平时才能被发现。制冷系统中的软故障使系统效率下降，造成不必要的能耗，设备寿命缩短，部件过早产生故障，对系统运行的经济性、安全性、室内环境的舒适性都有很大影响。设备在运行过程中产生的软故障导致的设备性能劣化量增长率，可以通过分析设备能耗随时间增加的情况得出规律。但对于硬故障而言，每台设备每次发生故障的部件及费用都不相同，因此需要对不同设备故障发生的频数以及维修费用综合分析，选出重要的因素作为劣化分析的计算指标。

图3所示为冷水机组及某中央空调系统各故障发生频率及故障维修成本的部分数据^[2]。

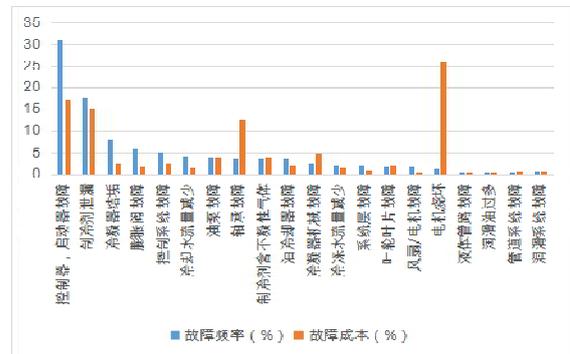


图3 冷水机组故障频率与成本对比图

Fig.3 Comparison of chiller failure frequency and cost

图3为冷水机组故障频率与维修费用份额。包括了5家冷水机组厂家，5年来的机组故障数据，共509份故障报告。从中可发现一些问题，例如：

控制器发生故障的频率最高, 达到 33%, 制冷剂泄露发生的故障是 18.5%, 冷凝器发生故障的概率是 8.5%; 发生故障的频率与维修所花费的费用是不完全成正比的, 例如: 电机烧坏的故障发生次数较少, 但维修时费用通常较高。部分故障如润滑油过多、叶轮叶片故障等其故障频数以及成本支出占总数均小于 5%, 因此冷水机组仅需考虑冷水机组控制器、启动器故障, 制冷剂泄漏故障, 冷凝器结垢故障, 轴承故障, 电机烧坏故障。

2 冷水机组劣化判定分析方法

2.1 冷水机组全寿命周期分析方法

随着使用年限的增长, 冷水机组运行过程中逐渐出现磨损导致设备性能降低, 能耗增长, 维修费增加的情况。本文从全寿命周期角度采用经济分析对冷水机组劣化标准进行研究。经济分析的主要目的是, 分析更换新设备增加的成本和继续使用原设备导致的运行成本增加间的关系, 找出合理的设备更换标准, 使得建筑全寿命周期内设备总投资最低。

设备总运行成本包括设备初投资及设备运行维护费用, 可总结如下式所示:

$$S = S_G + S_D = (S_C + S_A) + (S_Y + S_W) \quad (1)$$

式中: S_G 为设备初投资, 元; S_D 为设备运行维护投资, 元; S_C 为设备价格, 元; S_A 为设备安装、拆卸及运输费用, 元; S_Y 为设备运行费用, 元; S_W 为设备维护费用, 元; S 为总投资, 元。

对于冷水机组而言其设备运行年限内的初投资是固定的, 而运行维护投资则是会随着设备老化而逐年递增。随着设备使用年限增加初投资分摊到每年的成本是逐渐递减的, 而每年运维成本增加。设备年均成本会随着设备使用时间的增长出现先下降后增加的情况, 因此全寿命分析的目的是找出使设备年均使用成本最低的运行年限作为设备劣化年限。

由此可得出设备年均使用成本的计算模型:

$$S(t) = \frac{S_G + S_D}{t} = \frac{S_G}{t} + \sum S_s \times F_n(t) + \frac{S_f}{(1-W(t))} \quad (2)$$

式中: S_s 为设备单次故障维护成本, 元; $F_n(t)$ 为设备故障成本分布模型; n 为设备内不同部件; S_f 为冷水机组首年运行电费, 元; $W(t)$ 为设备性能

退化量模型。

设备的故障分布一般满足韦布尔分布、正态分布、对数正态分布、指数分布这四种分布函数之一, 但是对于设备全寿命周期成本研究而言, 我们考虑的往往是设备发生的机械故障, 大量研究表明, 韦布尔分布在这方面具有较好的优越性。因此, 本文在描述设备运维成本分布类型时, 采用两参数韦布尔分布^[7]。

韦布尔分布函数可由下式表达:

$$F(t) = 1 - e^{-\left[\frac{t}{\eta}\right]^\beta}, \quad t \geq 0; \quad \beta, \eta > 0 \quad (3)$$

$$f(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left[\frac{t}{\eta}\right]^\beta}, \quad t \geq 0 \quad (4)$$

其一般表达形式可通过如下的数学模型进行描述, 当非负随机变量 X 具有如式 (2) 所示的密度函数和式 (3) 所示的分布函数时, 则称 X 遵从参数为 (β, η) 的韦布尔分布, 记为 $W(\beta, \eta, t)$, 其中, β 称为形状参数, η 称为尺度参数^[6]。

对于冷水机组经由前文数据分析其运维部件主要考虑冷水机组控制器、启动器故障, 制冷剂泄漏故障, 冷凝器结构故障, 轴承故障, 电机烧坏故障。对于以上不同故障部件的韦布尔分布的参数求解方法如下所示:

首先需要统计分析各故障的历史故障数据, 得到 n 个故障数据, 从小到大排列, 得到其历史故障时间 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$, 并结合极大似然估计法, 对函数的两个参数 η, β 按如下过程求解。

令 $m = \eta^{-\beta}$, 对韦布尔函数概率密度函数 $f(t)$ 变形可得:

$$f(t) = m\beta t^{\beta-1} e^{-mt^\beta} \quad (5)$$

则变形后似然函数为:

$$L(\beta, m) = \prod_{i=1}^n m\beta(t_i)^{\beta-1} e^{-m(t_i)^\beta} \quad (6)$$

同时取对数可得:

$$\ln L(\beta, m) = n \ln m + n \ln \beta + (\beta-1) \sum_{i=1}^n \ln t_i - m \sum_{i=1}^n t_i^\beta \quad (7)$$

对上式分别求 β, m 的偏导, 并代入 $m = \eta^{-\beta}$, 令其得 0 可得:

$$\begin{cases} \frac{1}{\beta} + \frac{\sum_{i=1}^n \ln t_i}{n} - \frac{\sum_{i=1}^n (t_i^\beta \ln t_i)}{\sum_{i=1}^n t_i^\beta} = 0 \\ \eta = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i^\beta \right)^{\frac{1}{\beta}} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

对上式采用牛顿法求解可得系数 β, η 。

设备在长期运行过程中会因温度、湿度及振动等原因导致设备磨损老化,设备自身性能发生微小变化并逐渐积累导致性能下降。实践证明,指数函数在退化规律表征方面的良好性能,指数回归已被广泛用于退化分析中^[8,9]。本文采用以下函数来表征冷水机组性能退化量为:

$$W(t) = a \times e^{b \times t} \quad (9)$$

式中, $W(t)$ 表示冷水机组性能退化率。通常采用性能系数 (COP)^[10] 来评价冷水机组的性能状况。本文通过多台冷水机组长期运行监测数据^[11] 计算冷水机组性能退化率。

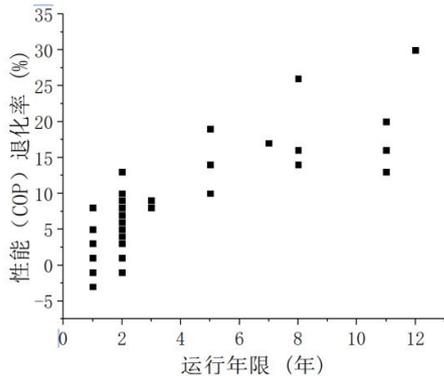


图4 冷水机组性能退化率随运行年限变化图

Fig.4 Variation of performance degradation rate of water chiller with operation years

根据某冷水机组厂家提供冷水机组对应部件的故障数据结合相关文献^[6]给出韦布尔参数求解方法可得出对应部件韦布尔参数,根据冷水机组长期运行监测数据可得出性能退化参数如表 1 所示。

表1 故障模型参数表

Table 1 Parameter table of fault model

故障类型	β	η	S_s (万元)
电机烧毁	1.898	134	40
控制器, 启动器故障	4.34	6	1
制冷剂泄漏	3.746	13.34	1.5
冷凝器结垢	3.246	16.53	0.6
轴承故障	2.146	46.24	6.7

表2 冷水机组性能退化参数表

Table 2 Performance degradation parameters of chillers

参数	冷水机组
设备造价 (万元)	50
搬运及安装费 (万元)	3
首年运行电费 (万元)	10.83
a	0.048
b	0.138

由此可得该冷水机组年均使用成本为:

$$s(t) = \frac{530000}{t} + 400000 \times \left[1 - e^{-\left(\frac{t}{134}\right)^{1.898}} \right] + 10000 \times \left[1 - e^{-\left(\frac{t}{6}\right)^{4.34}} \right] + 15000 \times \left[1 - e^{-\left(\frac{t}{13.34}\right)^{3.746}} \right] + 6000 \times \left[1 - e^{-\left(\frac{t}{16.53}\right)^{3.246}} \right] + 67000 \times \left[1 - e^{-\left(\frac{t}{46.24}\right)^{2.146}} \right] + 108300 \times (1 - 0.048 \times e^{0.138 \times t})^{-1} \quad (10)$$

上式的目的是寻找冷水机组的最佳使用年限因此需进一步求导, 求解最佳使用年限对应的值:

$$\begin{aligned} \frac{ds(t)}{dt} = & -530000 \times t^{-2} + \frac{1.898 \times 400000}{134^{1.898}} \times t^{1.898-1} \\ & \times \left[e^{-\left(\frac{t}{134}\right)^{1.898}} \right] + \frac{4.34 \times 10000}{6^{4.34}} \times t^{4.34-1} \times \left[e^{-\left(\frac{t}{6}\right)^{4.34}} \right] \\ & + \frac{3.746 \times 15000}{13.34^{3.746}} \times t^{3.746-1} \times \left[e^{-\left(\frac{t}{13.34}\right)^{3.746}} \right] + \frac{3.246 \times 6000}{16.53^{3.246}} \\ & \times t^{3.246-1} \times \left[e^{-\left(\frac{t}{16.53}\right)^{3.246}} \right] + \frac{2.146 \times 67000}{46.24^{2.146}} \times t^{2.146-1} \\ & \times \left[e^{-\left(\frac{t}{46.24}\right)^{2.146}} \right] + 108300 \times \frac{0.048 \times 0.138 \times e^{0.138 \times t}}{(1 - 0.048 \times e^{0.138 \times t})^2} \end{aligned} \quad (11)$$

通过迭代计算可解得最佳经济年限为 9.35 年。可得冷水机组年均运行成本和运行年限关系如图 5 所示。

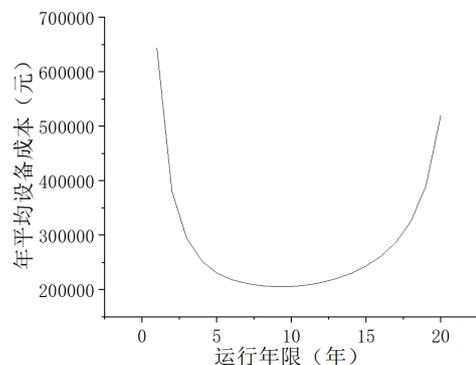


图5 年均运行成本随运行年限变化图

Fig.5 Variation of annual average operating cost with operating years

对于上述公式的计算需要大量的设备实际运行数据去拟合公式中的常数。在缺少大量实际运行数据的情况下, 公式难以运用。因此对于缺少长期监测数据的车站还需要建立一个在不需知道设备劣化规律情况下, 能够判定设备是否需要更换的计算方法。

2.2 冷水机组简化经济分析方法

考虑到目前部分车站缺少对冷水机组能耗和维修数据的长期监测, 本文提出一种可通过实地测试判定冷水机组是否需要更换的判定方法。主要思路是忽略设备在运行过程中因劣化导致故障率提高维修费用增加的情况, 从冷水机组劣化导致性能下降, 运行费用增加的角度计算一定年限的回收期内更换新设备成本与继续使用原设备成本进行比较判定, 以明确是否对设备进行劣化处理。在回收期内认定设备性能保持不变且不考虑维修费用, 由此可得设备劣化判定公式如下:

$$A + B + D_n \times a + \frac{Q}{IPLV_n} \times a \times b \leq \frac{Q}{IPLV_o} \times a \times b + C \times a + D_o \times a \quad (12)$$

式中: A 为冷水机组价格, 元; B 为冷水机组安装、拆卸及运输费用, 元; a 为成本回收计算年限, 年(取 3 年); b 为当地轨道交通电价, 元/kWh; Q 为设备全年总制冷量, kWh; $IPLV_o$ 为当前机组的综合部分负荷性能系数^[10]; $IPLV_n$ 为更换新机组的综合部分负荷性能系数^[10]; D_n 为更换新机组正常年维护保养费用; D_o 为当前机组年维护保养费用; C 为当前机组年维修支出。

冷水机组应按 TSG R7001-2013《压力容器定期检验规则》的规定进行定期检测, 检验合格后方可进行测试, 机组需在 GB/T 18430《蒸汽压缩循环冷水(热泵)机组》规定的工况下进行测试, 机组冷凝侧冷却水水质, 冷凝器污垢热阻还需满足 GB/T 50050-2017《工业循环冷却水处理设计规范》中第 3 条相关规定。测试方法应严格按照 GB/T10870-2014《蒸汽压缩循环冷水(热泵)机组性能试验方法》执行。

此公式仅需了解冷水机组初投资和额定参数即可计算出需要更换冷水机组时对应的机组综合部分负荷性能系数。下面以厦门地铁车站为例对冷

水机组劣化指标进行计算。本文利用上述计算方法以厦门市轨道交通 1 号线一期工程地铁乌石浦站及吕厝站冷水机组为例进行分析。

吕厝站是厦门市轨道交通 1 号线和 2 号线的换乘站, 是地下三层岛式车站。其中 1 号线部分车站总长 392.172 米, 有效站台长度 118 米, 岛式站台宽度为 14 米。站厅公共区面积 3236m², 站台公共区面积 1835m²。

乌石浦站, 为地下二层岛式站台车站。车站总长度 198.6m, 有效站台长度 118m。站厅公共区面积 1920m², 站台公共区面积 1380m²。

通过对两站进行调研得到两站冷水机组设备的价格及安装拆卸运输费用, 根据厂家样本文件得到车站用冷水机组的额定 COP 及 IPLV。

表3 乌石浦、吕厝站制冷机组劣化指标计算参数
Table 3 Calculation parameters of deterioration index of refrigeration units in wushipu and lycuo stations

设备参数\车站名称	乌石浦站	吕厝站
设备价格(元)	497600	627200
设备安装拆卸及运输费用	30000	30000
冷水机组额定能效比(COP)	5.3	5.3
冷水机组 IPLV	7.8	8.2

通过计算比较, 采用当前设备在回收年限内的总电费、更换新设备所需的设备采购费、安装费及回收年限内新设备的总电费, 以此判定设备是否需要更换, 其中回收期取 10 年。

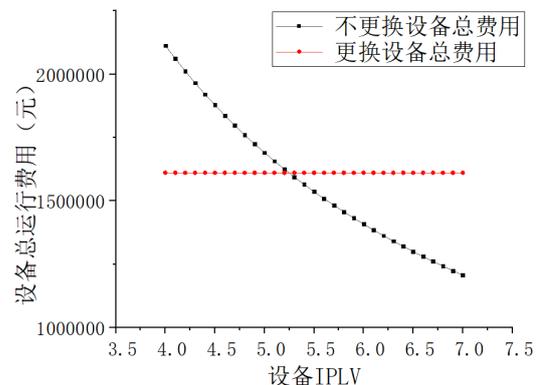


图6 乌石浦站更换冷水机组时机组能效比与设备总运行费用图

Fig.6 Energy efficiency ratio and total operation cost of water chillers in wushipu station

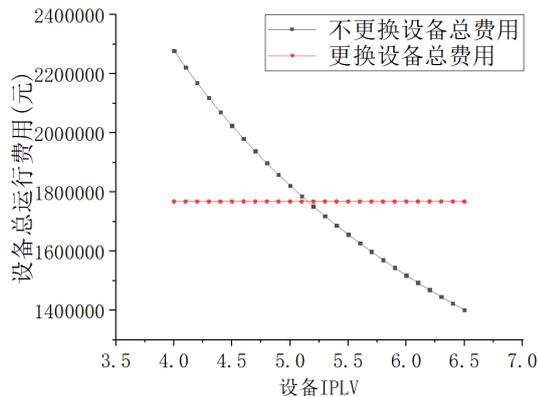


图7 吕厝站更换冷水机组时机组能效比与设备总运行费用图

Fig.7 Energy efficiency ratio and total operating cost of water chillers in lvcuo station

从图中可知当设备实际运行能效比越低时, 对应回收期内运行费用越高。对于乌石浦站当冷水机组 IPLV 在 5.3 以下时回收期内更换新设备成本低于仍使用原设备成本, 对于吕厝站当冷水机组 IPLV 在 5.2 以下时更换新设备成本低于仍使用原设备成本。

以下为不同气候区各城市地铁车站冷水机组通过设备经济性分析得出的最佳更换时的设备 IPLV。

表 4 各气候区城市地铁站用冷水机组劣化标准

Table 4 Deterioration standards of water chillers for urban subway stations in different climatic regions

	杭州 地铁 4 号线	北京 地铁 14 号线	石家庄 轨道交通 1 号线
设备价格 (元)	571988	925646	669361
设备安装拆卸及运输费用	33500	41000	23000
劣化回收年限 (年)	10	10	10
冷水机组额定能效比 (COP)	5.3	5.5	6.1
冷水机组 (IPLV)	7.5	7.5	7.5
更换标准 (IPLV)	4.72	4.74	4.96

根据各城市冷水机组数据计算结果可知冷水机组更换标准基本在 4.7~5.3 左右, 在此取最小值 4.7。

3 结论

对于地铁制冷系统而言, 合理的设备劣化策略可以有效降低运营成本。本文利用全寿命周期分析方法, 提出了设备经济使用寿命的计算方法并基于厂家及相关文献数据进行了计算。考虑到地铁车站在实际运行中, 可能存在未收集设备历史运行数据, 维修支出等数据的情况, 本文提出仅需通过对当前制冷系统设备进行测试, 判定是否劣化的计算方法, 并利用该方法对厦门某地铁车站制冷系统设备进行了分析并给出了劣化判定标准。

参考文献:

- [1] Jayabalan V, Chaudhuri D. Sequential imperfect preventive maintenance policies: A case study[J]. Microelectronics and reliability, 1992,32(9):1223-1229.
- [2] 杨乐.地铁站用能特征与节能策略研究[D].清华:清华大学,2017.
- [3] 韩华.基于顺序集成方法的制冷系统故障检测与诊断研究[D].上海:上海交通大学,2012.
- [4] 彦启森,申江,石文星.制冷技术及其应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2006.
- [5] 李大伟,方勇,孙兴,等.维护条件下产品寿命分布规律分析[J].火力与指挥控制,2017,42(11):71-79.
- [6] 曹晋华,程侃.可靠性数学引论[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [7] 谢红胜,吴春诚,吴相林,等.基于威布尔分布的水电设备费用模型研究[J].华中科技大学学报,2006,34(9):54-56.
- [8] Gebraeel N Z, Lawley M A. Residual-life distributions from component degradation signals: a Bayesian approach[J]. IIE Transactions, 2005,37(6):543-557.
- [9] GEBRAEEL Nagi Z, LAWLEY, Mark A. A neural network degradation model for computing and updating residual life distributions[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2008,5(1):154-163.
- [10] GB50189-2015,公共建筑节能设计标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2015.
- [11] 王宝龙,张朋磊.润滑油对冷水机组性能的影响(3)——润滑油对满液式冷水机组性能的定量影响[J].暖通空调,2016,(46):4-7.