

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.05.025

多失效模式下电阻制动系统的可靠性建模与分析*

丁 号, 盛步云*, 王 琳, 罗 丹

(武汉理工大学 机电工程学院, 湖北 武汉 430070)

摘要:针对电阻制动系统在多种失效模式下的建模问题,对电阻制动系统的建模方法和可靠性模型参数估计方法进行了研究,对电阻制动系统易损件及相应的失效模式进行了统计,提出一种基于故障树的多失效模式可靠性建模方法和基于最小二乘法和遗传算法的参数估计方法,利用系统整体及各部件的可靠度模型进行了可靠度分析和寿命预测。分析结果表明,考虑失效模式建立可靠性模型可以直观地揭示失效模式对产品可靠性的影响趋势,有利于产品的维护和寿命预计,为可靠性提高制定有效措施提供了依据。

关键词:多失效模式;故障树;电阻制动系统;可靠性

中图分类号:TB114.35;U260.13⁺8;

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)05-0633-05

Modeling and analysis about reliability of rheostatic brake system in multiple failure modes

DING Hao, SHENG Bu-yun, WANG Lin, LUO Dan

(School of mechanical and electrical engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Aiming at the modeling issues of rheostatic brake system malfunction in multiple failure modes, the modeling methods of rheostatic brake system and parameter estimation methods of the model were researched. The statistics of wear parts in rheostatic brake system and corresponding failure modes were collected. The modeling method in multiple failure modes based on the fault tree and the parameter estimation method based on the least squares method and genetic algorithm were proposed. Then reliability was analyzed and lifetime was predicted by using the model of system and parts models. The results indicate that considering the multiple failure modes can visually reveal reliability trends affected by failure modes, which favors product maintenance and life expectancy and provides a basis for developing effective measures to improve reliability.

Key words: multiple failure modes; fault tree; rheostatic brake system; reliability

0 引言

电阻制动系统属于典型的机电产品,为使建立的可靠性模型准确反映失效因素,深入研究部件的不同失效模式对系统整体产生的影响,从而更有针对性地提升产品可靠性,必须在建模过程中考虑部件的多种失效模式。

电阻制动系统是机车广泛采用的制动方式,目前在系统的可靠性定量分析方面的文献较少。文献[1]

针对电阻制动中电器烧损的原因进行重点分析,通过电路计算找出过载保护电路的薄弱环节,并提出了改进建议,但未经数据统计无法得知改进措施的有效性。文献[2]根据DF4C和DF4B改D型机车部件发生故障后失去制动功能和机车存在的安全问题进行分析提出了改进意见,但故障分析仅停留在定性分析的层面,缺乏对电阻制动整体的可靠性定量分析和评估。

对于可靠性的建模方法研究,文献[3]针对工程实际中伺服刀架故障现象的退化过程,采用最小路

收稿日期:2016-01-11

基金项目:湖北省自然科学基金资助项目(2015CFA115);湖北省科技支撑计划项目(2015BAA058)

作者简介:丁 号(1988-),男,湖北仙桃人,硕士研究生,主要从事制造业信息化、可靠性技术方面研究。E-mail:dinghao3674@qq.com

通信联系人:盛步云,男,教授,博士生导师。E-mail:shengby@whut.edu.cn

集法建立了基于多态故障树的可靠性定量分析模型,对分析系统薄弱环节有指导意义,但该文献可靠性分析的基础是已知底事件的概率,没有解决底事件概率未知,服从某一分布情况下的问题。文献[4-5]利用牵引供电系统各元件 14 年的数据,通过遗传算法拟合威布尔分布进行建模,能够解决部件服从分布和概率未知的问题,但文献只考虑了单一的失效模式,没有分析部件在多失效模式下的可靠性变化规律。文献[6]采用故障树分析方法对机车空气制动系统进行可靠性分析并通过试验数据进行验证,但无现场数据支撑。

本研究针对电阻制动系统各部件存在多种失效模式的特点,提出电阻制动系统在多失效模式下的可靠性建模方法。

1 电阻制动系统失效模式分析

1.1 电阻制动组成和各部件关系

电阻制动主要是利用直流电机可逆原理,在制动工况下将直流电机电枢与制动电阻串联成闭合回路,从而使机车的动能转换成电能方式完成制动。电阻制动系统主要由 4 个部分组成:电阻柜、通风机、控制箱和检测元件。其中控制部分比较复杂,而电阻柜、通风机部件结构相对简单,其主要组成部件如图 1 所示。

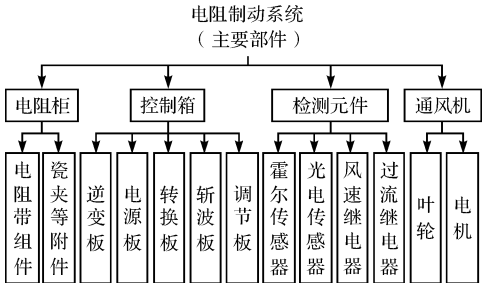


图 1 电阻制动系统主要部件

电阻制动控制关系如图 2 所示。

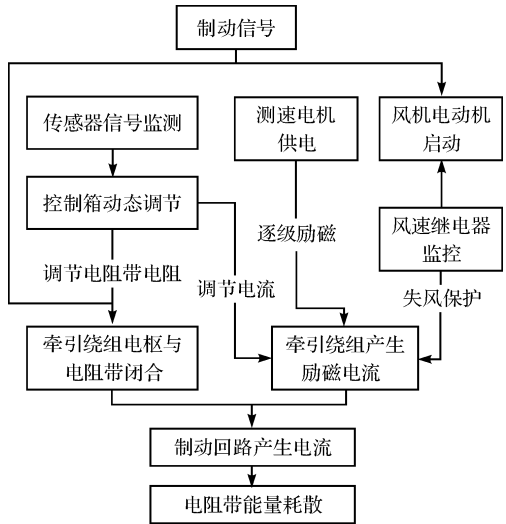


图 2 电阻制动系统控制关系图

1.2 系统部件的失效模式分析

电阻制动系统各部件的故障率存在较大差异。根据统计数据,控制箱的 5 大插件板(逆变板、电源板等)故障率较小,而电阻带等元件由于工作环境相对严酷,故障率相对较大。为简化分析,在本研究中只考虑故障率较大的元件,这里称易损件。

电阻制动系统中的易损件主要包括:电阻带组件、风机电动机、叶轮、风速继电器和霍尔传感器。其失效模式及表示符号如表 1 所示。

电阻带组件工作在高温环境下,一般失效模式只有 1 种,即电阻带直接烧损。对于叶轮,常见的失效模式是叶轮的一般性缺损并导致风机产生异音,一般的缺损并不会立即影响电阻制动系统的运行,而严重缺损可能导致风量不足而无法启动制动电阻,因此可只研究严重缺损的情况。

表 1 电阻制动系统易损件及常见失效模式

易损件	电阻带组件	风机电动机	叶轮	风速继电器	霍尔传感器			
失效模式	烧损	烧损	卡死	严重缺损	误动作	短路	断路	输出电压不稳
符号	RZi (i = 1 ~ 6)	DS	DK	Y	JD	JX	HD	HS

对于风机电动机可进一步分解,建立电动机单独的可靠性框图并计算其可靠性,但由于企业故障信息记录不详细,本研究没有进一步查找电机中的易失效的部件,而将电动机作为一个整体来分析其可靠性。

1.3 电阻制动系统的故障树模型

本研究采用故障树对各部件进行分析。电阻制动系统中主要部件之一为电阻带,一般采取混联方式。例如 TZZ5 采取两两串联形成电阻带单元,再通过并联的方式进行连接。

风速继电器作为保护元件,在短路的失效模式下失去保护作用,但电阻制动系统仍可运行,因此这种失效只是部件的失效,系统整体仍可运行,在故障树中排除。

设顶事件“制动系统损坏”为 T ,电动机和霍尔传感器故障分别用 D 、 H 表示,其他符号参见表 1,则系统故障树如图 3 所示。

由图 3 电阻制动系统的最小割集为:
 $\{DS,DK,Y,JD,HD,HS,(RZ1,RZ3,RZ5),(RZ2,RZ3,RZ5),(RZ1,RZ4,RZ5),(RZ2,RZ4,$

其遗传代数与适应度函数之间的关系如图 5 所示。

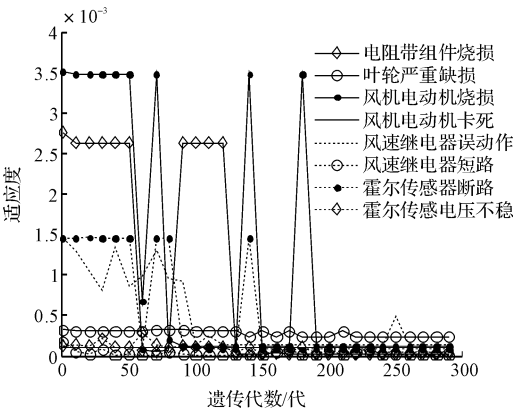


图 5 适应度与遗传代数的关系曲线

由适应度曲线可得知,在遗传代数在 190 代以上时,各部件的故障率适应度函数值已基本稳定。部分曲线在适应度达到稳定后仍然有起伏,但起伏不大且

最终仍趋于固定值,说明各遗传迭代收敛。在此,各故障模式下零部件的遗传代数 gen 可根据各曲线的收敛情况进行选取。由于 gen 选取范围相对自由,这里不再列出具体的选取值。

经过拟合,得到各部件可靠性模型的参数,对于拟合结果可以用残差平方和(SSE)和拟合标准差(RMSE)两个指标进行评估。参数及拟合评估结果如表 4 所示。

为验证在可靠性分析中考虑不同失效模式的必要性,这里使用相同的拟合方法得到各零部件(电阻带组件和叶轮除外)的故障率和拟合评估结果如表 5 所示。

表 5 不考虑失效模式的拟合结果

零部件	拟合参数		SSE	RMSE
	η	β		
风机电动机	8.469 0	6.503 8	4.628×10^{-4}	7.171×10^{-3}
风速继电器	12.094 4	7.141 0	1.200×10^{-3}	1.153×10^{-2}
霍尔传感器	8.035 1	10.342	7.997×10^{-5}	2.981×10^{-3}

表 2 2006 年销售的电阻制动系统易损件总数

零部件	电阻带组件/件	风机叶轮/件	风机电动机/台	风速继电器/个	霍尔传感器/个
总数量	672	112	112	56	336

表 3 系统易损件在各失效模式下失效数据

时间(年)	电阻带组件	风机叶轮	风机电机		风速继电器		霍尔传感器	
			烧损	卡死	误动作	短路	断路	输出电压不稳
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0
4	5.953×10^{-3}	0	0	0	0	0	0	0
5	4.464×10^{-3}	0	0	0	0	0	0	0
6	7.440×10^{-3}	0	8.929×10^{-3}	0	0	0	0.01488	0
7	0.01786	0	0.01786	8.929×10^{-3}	0	0	0.01190	5.953×10^{-3}
8	0.02679	0.01786	0.01786	0	0.01786	0	0.02083	0
9	0.04018	0	0.05357	0.02679	0.03571	0.05357	0.02679	8.929×10^{-3}

表 4 各失效模式下部件拟合结果

零部件	失效模式	拟合参数		SSE	RMSE
		η	β		
电阻带组件	烧损	15.7411	4.5057	2.083×10^{-5}	1.521×10^{-3}
风机叶轮	严重缺损	28.9835	3.4979	2.325×10^{-4}	5.083×10^{-3}
风机电动机	烧损	13.3528	6.8301	1.244×10^{-4}	3.717×10^{-3}
	卡死	12.4320	14.5483	1.038×10^{-4}	3.396×10^{-3}
风速继电器	误动作	12.9521	9.1328	3.975×10^{-5}	2.102×10^{-3}
	短路	11.2756	15.7054	9.051×10^{-5}	3.171×10^{-3}
霍尔传感器	断路	18.0335	3.9758	7.801×10^{-5}	2.944×10^{-3}
	输出电压不稳	16.2564	7.9292	3.430×10^{-5}	1.952×10^{-3}

根据以上数据分析的结果,在考虑零部件失效模式的情况下,SSE 和 RMSE 值比较小,说明拟合误差较小。而在不考虑失效模式的情况下,各部件的 SSE 和 RMSE 值均有上升,特别是风机电动机和风速继电器的值上升幅度较大。一定程度上说明,不同失效模式下的故障数据会对拟合过程产生干扰,可靠性分析过

程中考虑失效模式是必要的。

至此得出了电阻制动系统多失效模式的可靠性模型。系统的故障率和可靠度函数分别如下:

$$\lambda(t) = \frac{6.752t^{5.752}}{11.35^{6.752}}$$

(7)

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{11.35} \right)^{6.752} \right]$$

(8)

为进一步研究电阻制动各部件失效模式对系统可靠度的影响,现笔者对特定失效模式下部件的可靠度以及系统整体可靠度进行研究。各失效模式下的可靠度曲线如图6所示。

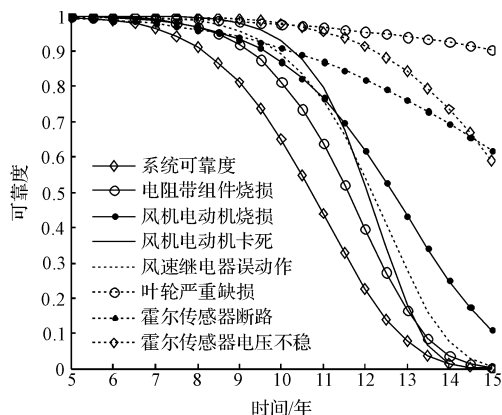


图6 电阻制动系统可靠度曲线随时间的变化

在图6各曲线所对应的数据中,第9年前为可靠度的实测值,之后为预测值。由实测值可知,影响系统失效的主要因素包括电阻带烧损、风机电动机烧损和霍尔传感器断路,需要针对这些因素进一步分析。而由预测数据,风机电动机卡死和霍尔传感器断路在未来2~3年可能造成部件的故障率陡增,因此在后期对这些失效模式应予以重视并加强维护。

在本研究中,尽管没有考虑电阻制动系统的所有部件,但通过对系统易损件的数据分析,找出了易损件中主要的失效因素及需要考虑某些失效模式的大致时间段。

可靠度与系统平均寿命紧密相关,由系统可靠度可进一步预测系统的平均寿命

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (9)$$

由式(9)计算得到电阻制动系统的平均寿命为10.60年。

4 结束语

本研究从电阻制动系统的组成及各部件之间的可靠性关系着手,通过故障树分析建立了电阻制动系统的失效模型,并以故障统计数据为依据,采用最小二乘法和遗传算法对模型参数进行了估计,最终建立了系统的可靠性模型并对其进行了分析,通过分析明确了各部件需要进一步研究的失效模式和失效大量发生的大致时间。

研究表明,考虑失效模式能直观揭示失效模式对电阻制动系统可靠性的影响趋势,有利于产品的维护和寿命预计。由于本研究未考虑所有部件且部分部件失效数据少,拟合误差较大,使得建立的模型并不十分准确,但该模型已能够一定程度地定量分析电阻制动系统的可靠性,为发掘电阻制动系统可靠性提升的方法提供了一定的参考依据。

参考文献(References):

- [1] 倪德兴,王高波.一起因使用电阻制动而引起的电器烧损原因分析[J].机车电传动,2009(4):71-73.
- [2] 赵宇星,耿继武.提高高坡度区段电阻制动可靠性的探讨[J].机车电传动,2008(2):75-77.
- [3] 刘晨曦,陈 南,杨佳宁.基于多态故障树的伺服刀架可靠性分析[J].东南大学学报:自然科学版,2014,4(4):538-543.
- [4] 谢将剑,吴俊勇,吴 燕.牵引供电系统可靠性建模方法[J].交通运输工程学报,2008,8(5):23-26.
- [5] 谢将剑,吴俊勇,吴 燕.基于遗传算法的牵引供电系统可靠性建模[J].铁道学报,2009,31(4):47-51.
- [6] 金碧筠.轨道交通制动系统可靠性研究[D].上海:同济大学机械与能源工程学院,2009.
- [7] Almalki S J, Nadarajah S. Modifications of the Weibull distribution: A review[J]. **Reliability Engineering & System Safety**, 2014, 124(2): 32-55.
- [8] Carrasco J M F, Ortega E M M, Cordeiro G M. A generalized modified Weibull distribution for lifetime modeling[J]. **Computational Statistics & Data Analysis**, 2008, 53(2): 450-462.
- [9] Arizono I, Kawamura Y, Takemoto Y. Reliability tests for Weibull distribution with variational shape parameter based on sudden death lifetime data[J]. **European Journal of Operational Research**, 2008, 189(2): 570 - 574.
- [10] 宋何维,宋保维.系统可靠性设计与分析[M].西安:西北工业大学出版社,2008.
- [11] 胡 德,郭刚正.最小二乘法、矩法和最大似然法的应用比较[J].统计与决策,2015,31(9):20-24.
- [12] 姜 波,汪秉文.基于遗传算法的非线性系统模型参数估计[J].控制理论与应用,2000,17(1):150-152.
- [13] 雷英杰,张善文. MATLAB 遗传算法工具箱及应用[M].西安:西安电子科技大学出版,2005.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

丁 号,盛步云,王 琳,等.多失效模式下电阻制动系统的可靠性建模与分析[J].机电工程,2016,33(5):633-637.

DING Hao, SHENG Bu-yun, WANG Lin, et al. Modeling and analysis about reliability of rheostatic brake system in multiple failure modes[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2016, 33(5): 633 - 637.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>