清 华 大 学

研究生毕业论文开题报告

题目：轨道电路故障诊断研究方法

系 别：自动化系

专 业：控制科学与工程

姓 名：张统帅

指导教师：叶 昊 教授

2012年9月5日

目录

[第1章 课题背景和意义 3](#_Toc334644018)

[1.1 项目背景 3](#_Toc334644019)

[1.2 研究现状 4](#_Toc334644020)

[第2章 轨道电路的故障诊断方法 4](#_Toc334644021)

[2.1 基于模型的故障诊断方法 4](#_Toc334644022)

[2.2 基于人工智能的故障诊断方法 5](#_Toc334644023)

[第3章 课题的技术难点 6](#_Toc334644024)

[第4章 课题的研究内容与研究方法 7](#_Toc334644025)

[4.1 混杂系统建模与故障诊断 7](#_Toc334644026)

[4.2 模拟电路建模与故障诊断 8](#_Toc334644027)

[4.3 故障诊断方法研究 8](#_Toc334644028)

[第5章 课题研究计划 8](#_Toc334644029)

[参考文献 9](#_Toc334644030)

# 课题背景和意义

## 项目背景

近年来，中国的铁路快速发展，据有关媒体报道[1]，截止到2008年底，中国铁路营业里程达79687.5公里，居亚洲第一位。通过技术创新，在高速梯路线路基础、通信信号、牵引供电、调度指挥等方面取得了一系列重大技术创新成果。其中以ZPW-2000A为代表的无绝缘轨道电路，是中国在对法国UM71无绝缘轨道电路技术吸收引进及国产化的基础上，结合我国铁路特点再开发的铁路通信信号主导产品，广泛应用于我国的高速铁路。

但是轨道电路利用导轨作为信号传输的载体，其电路的多数元件分布在导轨周围，容易受到外界环境因素如温度、湿度以及人为因素的干扰或破坏，导致其故障频发。轨道电路故障进而引发列车运行控制信号的失效甚至错误，轻则引起列车延误、重则发生安全事故，造成重大的人身财产损失。据我国铁路部门统计的数据显示[2]，2005年1-11月，全国铁路共发生信号故障8088起，其中多数是由轨道电路直接或间接引起的，共导致47万分钟的行车延误，平均每次故障造成59分钟的延误。

在《国家中长期科学和技术发展规划纲要2006-2020》[3]中，铁路运输基础设施的维护及安全保障技术，被列为优先研究主题与重点建设任务。总之，研究轨道电路的故障诊断，对于提高铁路安全性具有极其重要的意义。

随着工业自动化的发展，计算机控制系统在逐步取代人的体力劳动，但是系统故障也会给人们带来的巨大的生命财产安全。如何在系统运行时有效的进行检测故障已经称为重要的研究领域[4-6]。但是实际的工业系统一般都工作在闭环反馈中并且具有明显的非线性特征[7]，如何有效的实现非线性系统的闭环故障诊断称为重要的研究问题。

轨道电路的主要故障可以分为以下三类：

1. 断轨故障：钢轨材质的缺陷引起钢轨机械性能下降、强度降低，在列车反复冲击的作用以及季节交替温差作用下，钢轨应力增大，发生折断。
2. 部件故障：分析电路来看，轨道电路系统除发送器与接收器意外，可以等效为电阻、电容、电感组成的模拟电路。这些部件容易受到外界环境的影响发生各种软硬故障。
3. 连接故障。轨道电路中那个的发送器、接收器等均采用引接线或者塞钉，这些元件的松动、短路，会降低信号的传输距离和传输质量。

## 研究现状

虽然轨道电路的正常工作对于铁路运行至关重要，但是目前，各国铁路系统的故障诊断仍然停留在非常初级的阶段，多数采用定期维护与驻点寻迹排查故障等传统技术保障轨道电路的正常国内工作[2，5，8]，缺乏先进的诊断方法，常会出现错误诊断或备件准备不足等问题。在诊断仪器、系统的开发方面，目前国内只有一些简单的轨道电路故障诊断仪，自动化程度低，效率低下，无法实现实时诊断[8]。在诊断方法的研究上，目前国内还多数停留在现场经验推广与实践技术分析层面，其推广性和普适性较差。

近年来，国外学者对轨道电路故障诊断的方法做了一定的研究，主要包括基于人工神经网络的方法[6]、基于证据理论的方法[11]和多变量统计分析方法等[12]，并取得了一定的成果。但是，总体来看，轨道电路的故障诊断还存在值得研究的地方。

# 轨道电路的故障诊断方法

## 基于模型的故障诊断方法

自从20世纪80年代提出离散事件动态系统的概念以来，近年来混杂系统成为控制理论研究的热点。所谓混杂系统是指，包含有连续变量动态系统和离散事件动态系统相互混杂、相互作用的动态系统[13,14]。混杂系统研究的主要内容包括建模、稳定性分析、优化控制、鲁棒控制等。

对于混杂系统而言，认为故障时系统中一类特殊的离散事件，因而可以采用离散动态对其建模，而根据系统中连续量的变化趋势，可以分析描述离散状态的类型，从而研究其故障的检测与定位[21]。

对于轨道电路而言，电路中各类继电器的吸起、落下的一种组合，就是一个离散事件；在这个事件发生的过程中各个电路变量在物理规律的支配下，受到状态方程的约束而连续变化，从而形成了一个连续变量，因此轨道电路实际上是一个典型的混杂系统。因而可以从混杂系统的角度来分析轨道电路的变化规律、控制策略以及故障诊断等。

近年来，混杂系统故障诊断提出了多种方法。基于混杂自动机模型的故障诊断方法[21]，针对混杂系统的元件故障，利用混杂自动机描述故障参数，结合基于模型和统计的诊断方法完成故障诊断，其不足在于混杂自动机模型规则简单，不适用于复杂系统。Koutsoukos等人提出了基于粒子滤波器的混杂系统状态检测和故障诊断方法[22]，其不足在于计算复杂度高，不适用于复杂系统。Bempoard等人提出了混杂逻辑动态模型[23]，将混杂系统的故障问题转化为混合证书二次规划问题，利用已知的输入输出，估计不可观测的离散逻辑变量，从而实现故障诊断。Basseville等人利用Petri网对混杂系统建模，提出了基于Petri网的混杂系统故障诊断方法，将系统的离散控制视为确定性的离散事件，而将系统的故障当作随机性的离散事件，利用系统的观测变量，估计系统的离散状态，从而实现故障诊断。Petri网的优点在于能够很好地描述并发事件和复杂情形，缺点是需要对系统的故障机理，以及故障在系统各个组成部分间的传播关系又深入的理解，此外，需要人为设定故障的发生概率。

此外，混杂系统的故障诊断还有基于马尔可夫链[24]、基于交互式多模型估计[25]，基于混杂动态贝叶斯网络[26]、基于连续动态离散抽象[27]等多种方法。总体而言，这些方法各有优缺点，混杂系统的故障诊断还有许多有价值的问题有待进一步的深入研究。

对轨道电路这一混杂系统建模，得到其数学模型，通过对表征系统故障的状态或者参数进行分析，从而实现故障的诊断和预测。基于模型的故障诊断，能够深入对象系统本质的性质，实现实时的故障诊断，并且由于对象系统的故障特征通常与模型的参数紧密联系，随着对系统故障演化激励理解的逐步深入，可以逐渐修正模型，从而提高模型的精度。这一部分的工作可以采用基于参数辨识的故障诊断理论深入研究。但是，实际工程应用通常要求对象系统的数学模型具有较高的精度，而轨道电路作为复杂的模拟电子电路，其元件多具有非线性且含有容差、待估计状态变量多且含有不确定性，难以建立非常精确的数学模型。

## 基于人工智能的故障诊断方法

由于在实际工程应用中，常常难以获得对象精确的数学模型，这就大大限制了基于模型的故障诊断方法，而人工智能的方法不需要对象的精确模型，具有较强的适应性和生命力。人工智能的故障诊断方法包括人工神经网络、专家系统以及模糊逻辑等方法。

人工神经网络[6,21]，是以连接结构为基础，在微观结构上模拟人的大脑思维方式，依据经验而非规则进行决策。人工神经网络用于故障诊断作为一个新兴的研究领域，具有并行分布是处理、联想记忆、自组织及自学习能力和极强的非线性映射等特性，能对复杂信息进行识别和判断，因而可以用于对系统由于故障而仪器的状态变化进行识别和判断。文献[15-17]采用BP神经网络对电机设备进行故障诊断，其基本思想是采用传感器获取表征电机设备故障的特征信号,如转子电流或者电机噪声，根据这些信号的变化，诊断电机设备是否有故障发生。基于人工神经网络的故障诊断方法的不足是，算法的效果依赖于人工神经网络结构的训责，此外人工神经网络容易出现过度训练或者训练不足的问题，其较慢的收敛速度，不适用于在线的故障诊断。

所谓模糊故障诊断方法，是基于模糊集理论的智能诊断方法，它利用模糊隶属度、模糊运算、模糊规则及推理能较好的解决故障特征界限不清晰、特征信号描述存在的不确定性等问题。例如，文献[18]给出一种多级模糊系统实现了线控制动器电路的诊断。该系统利用模糊规则描述模糊故障特征集与故障集之间的对应关系，通过模糊推理实现故障检测和各级硬故障的定位。文献[19]中给出了一种容差模拟电路的模糊软故障字典法。首先建立基于屏蔽原理的故障字典，构造故障阀值函数，从而实现故障检测；然后应用网络分析与模糊集，建立一种故障隶属函数，据此进行容差电路的故障定位。该法有效降低了故障与容差间的模糊性，提高了软故障定位的准确率。

# 课题的技术难点

除了一般故障诊断系统所要求的可靠性、易操作性和实时性等要求外，针对轨道电路自身结构、工作原理及运行环境的特殊性，结合先期研究结果，可以归纳出轨道电路故障诊断中的一些关键问题。

●混杂系统建模的复杂性

作为一个混杂系统，轨道电路缺乏统一的模型描述，尤其是系统包含了连续动态、离散动态、建模不确定性以及故障时，如何在统一的模型框架下用数学语言描述这些动态是一个重要课题。

现有的故障诊断方法回避了连续动态与离散动态的相互影响，此外也没有明确提出如何处理建模不确定性带来的影响，这都是在故障诊断方法中需要研究的问题。

相比一般混杂系统，轨道电路还具有变结构的特点，即由于列车时轨道电路信号的主题，列车经过轨道时，整个电路的结构发生变化，系统呈现出时变特点，导致其建模难度进一步增大。如何准确描述列车对轨道电路的影响是一个值得研究的问题。

●故障模型的多样性与潜在性。

由于环境条件影响及人为因素干扰、加之组成部分的非线性及容差特性，使得轨道电路的硬、软故障都可能存在，而且并发故障时有发生[1，2]][。此外，由于其电路结构与失效机理的复杂性和认知局限性，我们事先无法确定所有的故障模式，不能给出完备的故障集（称为故障辨识框架），这就使得单纯采用故障字典法来实现系统的故障诊断存在很大的缺陷。随着视情维修进程的推进，诊断系统需要辨识的故障框架甚至具有动态特性，亦即已修复故障在某阶段不会再次出现，潜在（新）故障可能不断涌现。因此，急需研究潜在故障和已知故障的统一描述与辨识框架的构造等问题。

●故障特征的不确定性

轨道电路故障诊断系统要以状态监测作为基础。实际中可以采用的监测信息种类繁多，如设备可测点电压、电流等电量信号及温度与环境湿度等非电量数据，还有可靠性与维修性设计数据和专家知识等[1,2]。从中提取的各种故障特征，常带有模糊、不完整和随机等不确定性，但它们却能从不同侧面、不同程度和层次上反映出设备运行的状况。诊断算法要能够合理描述出上述各种特征所具有的不确定性，并加以充分地利用，从而有效提高预测与诊断的精度和可靠性。

# 课题的研究内容与研究方法

针对轨道电路故障诊断方法的应用背景和研究的难点问题，课题主要围绕以下内容展开研究：

## 混杂系统建模与故障诊断

轨道电路作为一个典型混杂系统，需要对系统的连续变量和离散动态事件建立统一的数学描述。利用离散动态将故障描述为一类特殊的离散事件，而利用现有的动态系统和离散事件系统的故障诊断方法，相互借鉴，产生创造性的研究成果。

此外，还需研究如何处理建模中不确定性的影响，模型应当能够引入不确定的数学描述，模型中引入对潜在故障模式的描述方式。

混杂系统故障诊断的方法可以借鉴在前面提到的当前的一些方法，如基于Petri网、基于混杂逻辑动态模型的故障诊断方法等，结合轨道电路系统的特点，可以考虑研究切换控制器等理论在其中的应用。

## 模拟电路建模与故障诊断

以ZPW-2000A为代表的轨道电路，存在着一系列非线性的设备与元件，它们的电特性参数等会随着输入信号的幅度和频率的变化而变化，但是当电路正常工作时，由移频自动闭塞系统原理可知，正常工作时，电路应当稳定在特定工作点附近，因而可以建立起在工作点附近的线性模型，即基于电路二端口理论，建立轨道电路在特定工作点的数学模型。

由于轨道电路中存在许多非线性元件，而且由于环境因素会引入非线性特性，为了能够准确描述故障等引起的动态特性的改变，应当建立轨道电路的非线性模型。

此外，轨道电路系统中，针对轨道电路变结构的特征，研究列车行驶时，轨道电路变结构特性下的模型。

## 故障诊断方法研究

利用已建立的混杂系统模型，采用利用基于参数的故障诊断方法来研究轨道电路的故障诊断。由于轨道电路处在复杂的外界环境中，存在许多强烈、多变的扰动，如何提高建模中参数估计的方法，以及相应故障诊断方法对干扰的鲁棒性是个难点问题。可以借鉴现有鲁棒辨识的方法。鲁棒辨识方法在给出参数估计值额同时，也给出了参数估计值的波动范围和干扰的上界。而这可以用来描述轨道电路中的各类元件的容差特性，从而提高故障诊断对元件的鲁棒性。

此外，为了弥补由于模型准确度不够高带来的影响，还可以采用基于数据驱动的故障诊断方法，采用人工智能的方法如人工神经网络、专家系统、模糊集理论等研究轨道电路的故障诊断。

# 课题研究计划

1、2012.6-2012.9：前期调研和文献综述；

2、2012.9-2013.1：轨道电路混杂系统建模 ；

3、2013.2-2013.4：基于模型的故障诊断方法研究与算法应用；

4、2013.5-2013.7：基于数据的故障诊断方法研究与算法应用；

5、2013.8-2013.12：利用实验平台和实际数据检验模型和算法；

6、2014.1-2014.5：毕业论文写作与答辩。

参考文献

[1] 中华人民共和国铁道部网站, http://www.china-mor.gov.cn/zwzc/tdgk/

[2] 程荫杭. 铁路信号可靠性与安全性[M]. 北京：中国铁道出版社, 2010: 1-2

[3] 中华人民共和国国务院. 《国家中长期科学和技术发展规划纲要2006-2020》. http://www.gov.cn/jrzg /2006-02/09/ content\_183787.htm

[4] C J Baker, L Chapman, A Quinn, et al. Climate change and the railway industry: a review[J]. Journal of Mechanical Engineering Science,2009,223:1-10

[5] Fausto Pedro Garcia Marquez, Richard W. Lewis, et al. Life cycle costs for railway condition monitoring[J]. Transportation Research Part E, 2008, (44): 1175-1187

[6] J.Chen, C.Roberts, P.Weston. Fault detection and diagnosis for railway track circuits using neuro-fuzzy systems[J]. Control Engineering Practice, 2008,(16): 585-596

[7] ZPW-2000A移频自动闭塞系统原理、维护和故障处理[M]. 北京：中国铁道出版社, 2010: 1-30

[8] 北京全路通信信号研究设计院. 2009年度京津高速铁路全线通信基础设施维修报告[R]. 2010.1

[9] C. Edwards, S. K. Spurgeon, R. J. Patton, "Sliding Mode Observers for Fault Detection and Isolation," *Automatica*, vol. 36, pp. 541-553, 2000.

[10] W. Chen, M. Saif, "An Iterative Learning Observer for Fault Detection and Accommodation in Nonlinear Time-Delay Systems," *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 16, pp. 1-19, 2006.

[11] Latifa Oukhello, Alexandra Debioless, Thierry Denoeux. Fault Diagnosis in Railway Track Circuits Using Dempster-Shafer Classifier [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2009. (accepted), Online: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0952197609001109

[12] Etienne Come, Latifa Oukhellou, Thierry Denoeux, et al. Noiseless Independent Factor Analysis with Mixing Constraints in a Semi-supervised Framework. Application to Railway Device Fault Diagnosis [J], LNCS,2009, 5769:416-425

[13] Kennartson B., Tittus M.,Egardt B. et al. Hybrid systems in process control[C]. IEEE Control System, Oct, 1996, 45-56.

[14] 赵洪山，米增强，牛晓东，等. 利用混杂系统理论进行电力系统建模的研究 [J]. 中国典籍工程学报，2003，23（1）:20-25.

[15] 徐晓滨,文成林,王迎昌. 基于模糊故障特征信息的随机集度量信息融合诊断方法,电子与信息学报, 31 (7):1635-1640,2008

[16] 徐晓滨,文成林,刘荣利. 基于随机集理论的多源信息统一表示与建模方法[J],电子学报,2008, 26(6):1-7

[17] Xu xiaobin,Wen Chenglin. Random sets: a unified framework for multisource information fusion, Journal of Electronics(China),2009,26(6):723-730

[18] M A Masrur, H J Wu, C Mi,et al.Fault diagnostics in power electronics‐based brake‐by‐wire systems [J], Journal of Automobile Engineering,2008,222(1):1-11

[19] 彭敏放,何怡刚.容差模拟电路的模糊软故障字典法诊断[J],湖南大学学报,2005,32(1):25-28

[20] Andrew K.S. Jardine, Daming Lin, Dragan Banjevic. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance [J] Mechanical Systems and Signal Processing 20(2006) 1483-1510.

[21] Feng Zhao, Xenofon Koutsoukos, Horst Haussecke, Jim Reich, Patrick Cheung. Monitoring and Fault Diagnosis of Hybrid Systems [J] IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-Part B: Cybernetics, Vol 5, No. 6, December 2005.

[22] Koutsoukos X, Kurien J, Zhao F. Estimation of distributed hybrid systems using particle filtering methods[C] Maler O A, Pnuelia, (eds): Hybrid Systems: Computation and Control (HSCC 03), Lecture Notes in Computer Science Vol. 2623. New York, USA： Springer Verlag, 2000: 298-313.

[23] Bemporad A, Mignone D, Morari. Moving horizon estimation for hybrid systems and fault detection[C] Proc. Of ACC 99, San Diego, CA, USA: 2471-2475.

[24] Hibey J.L. Charalambous C. D. Conditional densities for continuous-time nonlinear hybridsystems with application to fault detection[C] Proc. of the 37th IEEE Conference on Decision and Control, 1998: 1123-1130.

[25] Zhang Y. M.,Li X. R. Detection and diagnosis of sensor and actuator failures using IMM estimator[J]. IEEE Trans. on A ero. And Elect. Syst. , 1998, 34(4): 1293-1313.

[26] Lerner U, Parr R., Koller D., et al. Baysesian fault detection and diagnosis in dynamic systems[C] Proc. of the 17th National Conference on Artifical Intelligence(AAAI), Austin, Texas, 2000: 531-537.

[27] Yang Z. Y. A hybrid system approach towards redundant fault-tolerant control systems[C] Proc. of the 39th IEEE Conference on Decision and Control, 2000: 987-992.