



华夏英才基金学术文库

蒋兆远 杜亚江
程瑞琪 董海棠 编著

机车安全运行 专家系统



科学出版社

www.sciencep.com



华夏英才基金学术文库

机车安全运行专家系统

蒋兆远 杜亚江
程瑞琪 董海棠 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

机车安全运行专家系统综合了列车操纵理论、实时专家系统、人工智能、计算机技术应用等领域的理论和应用技术。全书共计 10 章, 内容包括: 绪论、机车安全运行专家系统的技术基础、机车运行安全性模糊推理评价、机车安全运行专家系统车载装置的研究、机车安全运行专家系统车载装置的设计、专家系统车载装置的数据采集与检测系统设计、专家系统车载装置的显示系统设计、专家系统车载装置的语音系统设计、专家系统车载装置的通信系统设计、专家系统车载装置的可靠性设计等。

本书比较系统地阐述了机车安全运行专家系统以及车载微机装置的研究、构造和设计, 具有内容新颖、实用性强、技术创新等特点, 适合从事该领域研究与设计的科研人员、研究生和本科高年级学生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

机车安全运行专家系统/蒋兆远等编著. —北京: 科学出版社, 2005

(华夏英才基金学术文库)

ISBN 7-03-014795-2

I. 机… II. 蒋… III. 机车-行车安全-专家系统 IV. U268.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 006185 号

责任编辑: 田士勇 / 责任校对: 钟 洋

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

双 青 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005 年 3 月第 1 版 开本: B5(720×1000)

2005 年 3 月第一次印刷 印张: 12 3/4

印数: 1—2 000 字数: 397 000

定价: 39.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈环伟〉)

前 言

列车运行的安全性是衡量铁路运输质量的重要指标。目前,我国铁路的高速运输已处于初步阶段,但与世界先进水平相比尚有相当距离,其表现之一就是列车操纵目前仍基本依赖于司机的技术水平和操纵经验,这种状况已不能适应铁路运输现代化的要求。因此,机车安全运行专家系统的应用已成为我国铁路运输安全监控领域内亟待解决的重要课题。在我国铁路实施大面积提速的今天,对于该问题的研究具有重要的理论和实际意义。

国内近年来在列车安全监控技术领域研究已有了较大的进步,缩短了与国外先进水平的差距。但严格地讲,这方面的研究在理论上和系统结构上并没有实现实质性的重大突破。目前司机操纵列车安全运行的控制方式在很大程度上仍然是经验型的,司机根据观察到的大量外界信息和自己对线路情况及机车车辆设备情况的熟悉了解,应用丰富的行车经验做出判断,制订策略来操纵列车运行。但培养优秀司机需要多年时间,且人的效率比较低,机车工作条件较差,受精神紧张、振动和噪音等因素的影响,司机容易疲劳,会出现观察错误和判断错误。

机车安全运行专家系统可以储存大量的数据、参数,并在行车过程中实时采集列车运行各种数据、行车信号,综合应用专家的知识 and 经验进行推理和判断,且专家系统高速运行,其工作不受时间、空间和环境的影响。专家系统采用启发式工作方法,利用车载微机装置的图像、文字、语音等媒介手段在列车运行过程中向司机适时提供有关列车运行安全的数据、提示、警告,起到了随车添乘指导司机的作用,但不是简单的代替司机工作。由上述特点可知,机车安全运行专家系统如能获得正确的知识,综合专家知识并制订正确的推理策略,利用先进的车载计算机专家系统辅助司机进行行车安全监控是可以实现的。新兴的智能控制技术,作为人工智能、控制及系统理论、运筹学、生理学及心理学等的交集,以其多学科的优势已成为对具有不断增长的复杂性的过程实现高品质控制的有利工具,它使得利用机器实现人类的智能行为成为可能。而作为过程划分技术、专家系统技术和模糊多目标优化控制方法的综合的智能多目标优化控制则是实现智能化列车运行控制系统的适用方法。

本书比较系统地阐述了机车安全运行专家系统以及实用车载微机的研究、构造和设计。本书引用了作者研究、设计的列车计算机辅助操纵装置(即列车优化操纵指导装置)和机车安全运行专家系统的部分研究成果。但由于机车运行条件和环境的复杂性,以及作者技术水平、时间和条件的局限,而且设计一个完善、

合理，能适应于国内运行的各种不同类型机车，为各方面接受的机车安全运行专家系统不仅需要良好的理论基础研究和设计，更需要大量实际经验和试验的修改和补充，以及长时间的运行考验。因此这个系统仍需要进行深入的研究、完善和改进。

本书由兰州交通大学蒋兆远教授主笔，杜亚江、程瑞琪和董海棠老师参加编写。卫晓娟老师也参与了本书的绘图、文字校核等工作，在此表示感谢。

鉴于本书作者水平有限，加之时间仓促，因此书中错误在所难免，敬请各位读者批评指正。

作 者

2004年6月于兰州交通大学

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 机车安全运行专家系统研究的可行性	1
1.2 机车安全运行专家系统的结构及特点	1
1.3 机车安全运行专家系统研究的目标	2
第二章 机车安全运行专家系统的技术基础	5
2.1 影响列车运行状态的因素	5
2.2 机车运行安全的综合评价	6
2.3 机车运行安全指数确定原则	8
2.4 列车运行状态预测模型及实时算法	9
2.5 列车运行速度预测模型及实时算法	13
2.6 列车运行距离预测模型及实时算法	15
第三章 机车运行安全性模糊推理评价	18
3.1 列车运行区段划分及列车运行安全性评价标准	18
3.2 安全性推理评价的模糊数学方法	21
3.3 恒定限速区机车运行安全状态综合评价	29
3.4 制动模式限速区机车运行安全状态综合评价	36
3.5 机车运行安全二级推理评价	43
3.6 机车安全运行专家系统决策模型	50
3.7 机车安全运行专家系统信息配置要求	52
第四章 机车安全运行专家系统车载装置的研究	55
4.1 专家系统车载装置的特点和要求	55
4.2 无微机控制机车的专家系统车载装置的设计思想	56
4.3 专家系统车载装置的人机界面研究	59
4.4 专家系统车载装置需要读取和检测的数据	65
4.5 专家系统车载装置的功能及系统框图	66
4.6 专家系统车载装置的硬件结构设计	69
4.7 专家系统车载装置的软件结构设计	74
4.8 专家系统车载装置的输入参数和输出形式	76
第五章 机车安全运行专家系统车载装置的设计	83

5.1 专家系统车载装置的控制核心简介·····	83
5.2 专家系统车载装置的实用子程序设计基础·····	90
5.3 专家系统车载装置的设计基础·····	101
5.4 专家系统车载装置的设计步骤·····	105
第六章 专家系统车载装置的数据采集与检测系统设计·····	113
6.1 数据采集单元的硬件设计·····	113
6.2 数据采集单元软件设计·····	121
6.3 数据采集单元主要技术参数与标准·····	125
第七章 专家系统车载装置的显示系统设计·····	128
7.1 车载显示器简介·····	128
7.2 点阵式液晶显示器件工作原理·····	129
7.3 显示系统设置及初始化·····	132
7.4 汉字显示技术·····	134
7.5 图形显示技术·····	135
7.6 显示系统的电路设计·····	137
7.7 显示系统的软件设计·····	138
7.8 显示系统主要技术参数与标准·····	138
第八章 专家系统车载装置的语音系统设计·····	142
8.1 语音芯片 ISD4004 的结构·····	142
8.2 ISD4004 串行外设接口·····	144
8.3 车载微机语音系统设计·····	147
8.4 车载微机语音系统主要技术参数与标准·····	149
第九章 专家系统车载装置的通信系统设计·····	150
9.1 数据通信的基本概念·····	150
9.2 串行通信总线标准及接口技术·····	156
9.3 专家系统车载微机的通信设计·····	163
9.4 IC 卡数据转储·····	169
第十章 专家系统车载装置的可靠性设计·····	172
10.1 可靠性技术概述·····	172
10.2 专家系统车载装置硬件电路的可靠性设计·····	178
10.3 专家系统车载装置软件系统的可靠性设计·····	185
10.4 系统的可靠性保障问题·····	188
10.5 专家系统车载装置的可靠性工艺设计·····	189
结束语·····	195
参考文献·····	196

第一章 绪 论

1.1 机车安全运行专家系统研究的可行性

高速铁路的发展使铁路装备技术水平跃上了新台阶。目前,发达国家已从传统的地面信号显示传递行车命令,机车司机按行车规则操纵列车运行的方式发展到了根据地面发送的信息自动监控列车速度且自动调整列车运行和追踪间隔的方式。实现这一方式的关键技术是列车速度自动控制系统。根据系统的功能、人-机关系和自动化程度,把这种列车安全和运行监控系统分为三类:即 ATP、ATC 和 ATO 系统。

发达国家借凭科技实力、资金、基础元器件等的支持,以及多年来在专用微机设计方面的经验,在车载微机系统研究和设计、制造方面具有显著的优势。

近年来国内在机车安全监控技术领域的研究已有了较大的进步,缩短了与国外先进水平的差距。但严格地讲,这方面的研究在理论上和系统结构上并没有实现实质性的重大突破,主要反映在:

(1) 系统采用的信息量不够。列车安全监控系统要有效工作,必须依赖于大量的机车、车辆、行车线路距离和地形坡度、地面信号等各种信息。

(2) 尚未形成比较完整的列车安全监控的理论体系。我国铁路运营条件复杂,机车种类和性能各异,线路情况差别很大。

(3) 没有充分应用人工智能的理论和方法,采用更加科学的机车安全运行状态评价方法和更加完善的人机交流手段(如采用文字、图像、语音等多媒体技术),提示司机安全驾驶机车。

我国铁路机务部门在长期的机车运用实践中,不仅制定了比较完善的安全行车规程,研制开发了保障行车安全的技术装备,研究完善了列车牵引计算理论、数据,同时也培养了大批具有丰富实践经验的优秀司机。在我国铁路不断向高速、重载方向发展的今天,对这些理论、数据、经验进行研究总结,应用人工智能的方法建立机车安全运行专家系统,利用先进的车载计算机辅助司机对列车进行安全操纵,不仅是必要的,也是完全可行的。^[1,6,24]

1.2 机车安全运行专家系统的结构及特点

专家系统是拥有领域专家知识的计算机智能软件系统。机车安全运行专家系

统存储了专家关于列车安全运行的知识,运行在先进的车载计算机环境下,实时采集、处理有关列车运行安全的数据,利用专家的知识进行分析推理、判断决策,采用多媒体手段将决策结果输出,监督指导司机对列车进行安全操纵,其基本结构如图 1.1。^[1,6,24]

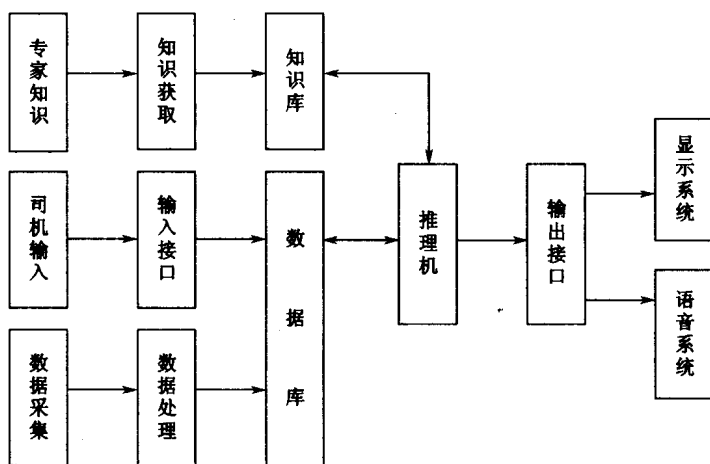


图 1.1 机车安全运行专家系统结构

机车安全运行专家系统是一个实时系统,具有以下主要特点:

(1) 机车安全运行专家系统存储了列车安全运行专家的领域知识,包括理论知识和经验知识,具有人类专家的知识水平和相当于人类专家的解决问题的能力;

(2) 机车安全运行专家系统可以储存有关机车、车辆、线路、信号机配置的大量数据和参数,并在行车过程中实时采集列车运行的各种数据,与人类专家相比,计算更准确、速度更快、精度更高;

(3) 专家系统的工作不受时间、空间和环境的影响,运行效率高;

(4) 机车安全运行专家系统可以利用车载微机装置的文字、图形、语音等先进的多媒体手段,在列车运行过程中适时向司机提供有关列车运行安全的数据、提示、警告,指导司机操纵列车安全运行。

1.3 机车安全运行专家系统研究的目标

1.3.1 机车安全运行专家系统研究的原则

机车安全运行专家系统是辅助司机操纵列车高速、高效、安全运行的指导系

统,其研究的思路是:现有装备条件下,采用较强的软件功能(符合我国铁路实际情况,适合我国目前已经安装的机车速度监控装置,以及相关的显示、语音、通讯接口及协议等子系统),指导司机科学、合理地操纵机车。

机车安全运行专家系统研究的技术原则是:

(1) 建立较完善的机车运行安全性综合评价系统。

通过研究列车运动学行为及总结优秀司机的安全操纵经验,结合人工智能的方法,建立较为完善的机车运行安全性综合评价模型,即专家系统知识库模型;研究适合于车载计算机的机车安全运行专家系统实时算法;研究设计适合机车运行条件的车载多媒体装置;建立基于数据采集、数据处理、模型运算、推理决策的机车运行安全综合评价、机车安全操纵指导系统。

(2) 安全指导作用不干扰司机的正常操作。

列车运行控制通常需要满足多个目标,如安全性、平稳性、节能性、正点性、停车准确性等。列车运行过程还受许多不确定因素的影响,因此不同的司机根据具体的情况及个人经验,可能采取不同的控制策略。机车安全运行专家系统的研究充分考虑不同司机采取的控制策略的差异,在安全的情况下,允许司机发挥主观能动性,操纵列车高速运行,其安全指导作用不干扰、不影响司机的正常操作。

1.3.2 机车安全运行专家系统研究的目标

机车安全运行涉及机车车辆设备、铁路信号、运行线路等许多因素。机车安全运行专家系统的研究将综合有关的理论、数据、经验,运用人工智能、计算机、人机工程学等理论和方法,建立基于数据采集、数据处理、模型运算、推理决策的机车安全运行计算机辅助系统。机车安全运行专家系统的主要研究内容和要达到的目标如下:

(1) 研究列车运动学行为,建立列车运行安全性预测模型,对列车运行的未来安全状况进行尽可能准确的预测。

列车运动系统是一个多输入、多目标复杂的非线性、时变的动力学系统,列车运动过程还充满了许多不确定性,建立准确的列车运行数学模型十分困难。通过研究列车运动学行为,在现有条件下建立尽可能准确的、实用可行的列车运行数学模型,是实现列车运行状态预测、评价机车操纵安全性的基础。

(2) 研究总结优秀司机的机车安全操纵知识和经验,应用人工智能方法,建立机车操纵安全性综合评价模型,为司机安全操纵机车提供决策指导。

地面列车的运行条件十分复杂,优秀的司机能根据长期积累的知识和经验,在复杂多变的运行条件下,安全地操纵列车达到预期的控制目标。研究总结优秀司机的机车安全操纵知识和经验,应用人工智能方法建立模拟优秀司机判断、推

理和决策思维模型,采用计算机实时专家系统为司机安全操纵机车提供决策指导,是专家系统研究的重要内容。

(3) 研究适合车载计算机的机车安全运行专家系统实时算法。

机车安全运行专家系统工作在车载微机环境下,其数据处理、模型运算、推理决策应避免大量和复杂的数学运算,研究适合车载微机工作特点,同时满足准确性、实时性要求的算法,是机车安全运行专家系统实用化的一个重要环节。

(4) 应用人机工程学及计算机多媒体技术,研究设计适合于机车运行条件的车载显示及车载语音系统。

机车安全运行专家系统采用视觉和声音手段在列车运行过程中适时向司机提供有关列车运行安全的数据、提示和警告。本项目将研究设计先进可靠、可运行在目前机车装备条件下和新型车载微机框架内的车载显示及车载语音系统,提供专家系统结果输出的多媒体平台。

(5) 在上述研究的基础上,提出可行的专家系统实施方案。

机车安全运行专家系统是一个基于数据采集、数据处理、模型运算、推理决策的机车安全操纵指导系统,目前已有的机车安全信息综合检测数据平台尚不足以提供专家系统所需的全部列车运行信息和司机操纵信息。在上述研究的基础上,专家系统将提出适合于现有机车装备条件及新型车载微机条件下的两种实施方案。^[1,24,26,27]

第二章 机车安全运行专家系统的技术基础

机车安全运行专家系统采用模拟专家思维的方法,利用专家的知识对影响列车运行安全的各个因素进行综合分析,将基于列车运动学行为的研究、司机安全操纵经验的总结、专家分析推理思维的模拟,对影响列车运行安全的诸因素采用客观分析计算、主观综合评价的方法进行逐步融合,尽可能对机车运行安全状态作出全面和客观的评价。

本章比较全面地阐述了专家系统的基本理论与方法。2.1节描述了影响列车运行状态的因素;2.2节是关于机车运行安全的综合评价;2.3节简要介绍了机车运行安全指数确定原则;2.4节讨论了列车运行状态预测模型及实时算法;2.5节讨论了列车运行速度预测模型及实时算法;2.6节讨论了列车运行距离预测模型及实时算法。本章所阐述的内容是全书的基础理论,是构建机车安全运行专家系统的技术基础。

2.1 影响列车运行状态的因素

司机以地面信号、调度命令等行车指挥命令为依据,结合各种运行条件、因素,完成列车的启动、加速、惰行、制动调速、缓解、停车等操作,在确定控制策略时,司机通常考虑以下主要因素:

(1) 信号机类型及显示状态

司机必须按照信号机指示的行车命令操纵列车运行,不同的信号机类型及显示状态规定了列车的运行条件,如禁止通行、减速运行、准许按规定的最大速度运行等,也即规定了列车运行必须遵守的限制速度等级。为保证行车安全,在区间运行时,列车速度应低于区间限速;在信号区及站间运行时,列车速度应满足信号机处紧急制动能够停车及道岔限速。

(2) 运行线路

列车运行线路包括平直道、坡道、曲线、桥隧、慢行地段等,列车运行线路是司机确定控制策略时考虑的一个重要因素,如列车在长大上坡道运行,应采用“先闯后爬,爬闯结合”的操纵方法;列车在长大下坡道运行,应采用动力制动为主,空气制动为辅的操纵方法;列车通过曲线时,应控制列车速度低于曲线限制速度等等。

(3) 列车编组

列车编组确定了列车牵引重量和计长。对于长大列车, 由于列车重量大、惯性大, 列车牵引与制动都需要更大的作用力。同时, 车辆类型、空/重车辆数、关门车辆数等因素影响列车总体制动性能, 列车实际制动性能是司机采取制动措施时要考虑的重要因素。列车发车后, 有经验的司机常要施行一次常规制动, 观察列车制动系统的实际制动能力, 以便在采取制动措施时确定适当的制动减压量。

(4) 气候条件

恶劣气候使列车运行条件变得复杂, 如雨、雪使轮轨间摩擦系数减小, 车轮容易打滑, 增大了机车操纵的难度, 因此气候条件也是司机操纵时要考虑的重要因素。

综合上述各种条件、因素, 司机操纵机车运行在不同工况下, 机车工况分为:

- (1) 牵引工况;
- (2) 惰行工况;
- (3) 电阻制动工况;
- (4) 空气制动工况。

牵引工况和制动工况有不同的控制级位, 如牵引级位、空气制动减压量等。对一定的列车编组, 不同的机车工况决定了作用在列车上的合力、列车加速度的大小和方向, 即决定了列车的运动状态。^[2~5]

2.2 机车运行安全的综合评价

2.2.1 机车运行安全性评价依据

司机的判断、决策和操作直接影响列车运行的安全状态。列车运行中, 司机通过对影响列车运行状态的诸因素进行综合分析, 得出对列车安全状态及其发展趋势的判断, 从而确定安全控制策略, 操纵列车运行。司机判断、操作是否正确, 列车运行是否安全, 可以通过以下几个依据来评判:

(1) 列车速度

根据《机车操作规程》、《铁路技术管理规程》规定, 司机操纵列车运行必须严格遵守规定的限制速度, 列车速度与限制速度之差是评价列车运行安全状态的重要依据。

(2) 列车加速度

列车加速度表征了作用于列车上的牵引力、基本阻力、制动力所形成的合力, 决定了列车速度变化的大小和方向, 是影响列车运行安全状态发展趋势的重要因素。

(3) 列车运行前方线路条件

列车运行前方线路条件, 如线路坡度、曲线半径等, 是决定列车运行未来速度和加速度的主要因素。

(4) 机车工作状态

机车的工作状态、牵引力或电阻制动力的的大小影响列车的速度、加速度, 是分析列车运行安全状态及判断司机操纵合理性的的重要依据。

(5) 列车管压力和减压量

空气制动是使列车减速的有效措施, 减压量的有无、大小、作用时间、变化情况, 反映了司机是否已意识到需要限速或减速并已采取有效的措施, 也是分析列车运行安全状态及其发展的重要依据。

(6) 列车重量, 列车制动率

列车重量影响列车加速度, 制动率是衡量列车制动能力的重要指标, 这些参数也是分析列车运行安全状态的依据。

(7) 司机操纵警惕性

司机的正确判断、决策、操作是决定列车运行安全的主要因素。当由于司机紧张、疲劳或麻痹大意, 产生误判、误操作或失去警惕时, 列车运行就已经有了潜在的不安全因素。^[2,6]

列车运行安全包含列车运行当前安全和未来安全两方面的含义, 上述各个因素都不同程度、不同方式影响列车运行当前安全状态和未来安全状态的发展。机车安全专家系统研究的主要目的, 就是研究一种能够综合运用专家的知识对上述各因素进行综合分析, 以给出机车运行安全状态合理评价的计算机系统。

2.2.2 机车运行安全的评价方法

机车安全运行专家系统采用模拟专家思维的方法, 利用专家的知识对影响列车运行安全的各个因素进行综合分析, 从而得出对列车运行安全状态及其发展趋势的综合评价, 以安全指数这一指标来表示评价的结果, 并根据安全指数进行决策、监督、指导司机操纵列车安全运行。机车安全运行专家系统工作流程见图 2.1。

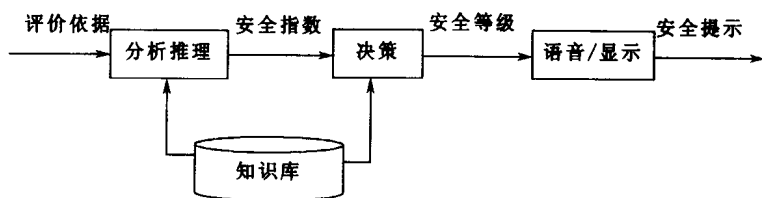


图 2.1 专家系统工作流程

专家系统判断分析是否正确、合理,关键在专家系统的知识库。专家系统知识库中存储的是经过提取、加工并用结构化方法表示的专家的领域知识。专家的领域知识包括理论知识和经验知识。正确获取专家的领域知识,并以适合问题特点的方式进行表示,建立一致、完备、便于利用的知识库,是研究一个具体的专家系统要解决的最重要的问题,这也是本项目研究的核心。

机车运行安全是一个十分复杂的问题。一方面,列车运行安全问题涉及机车车辆设备、运行线路、铁道信号系统等诸多方面,涉及面广而复杂;另一方面,影响列车运行安全的诸多因素之间相互关联、互相影响,而安全的概念本身有一定的主观性,因此,很难给出每个因素对列车运行安全的影响的客观评价。

机车安全运行专家系统将基于列车运动学行为的研究、司机安全操纵经验的总结、专家分析推理思维的模拟,对影响列车运行安全的诸因素采用客观分析计算、主观综合评价的方法进行逐步融合,尽可能对机车运行安全状态作出全面和客观的评价。

专家系统对影响列车运行安全的各个因素进行逐步融合的方法和步骤示意图如图 2.2 所示。其中预测算法、综合模型、修正规则构成专家系统安全推理评价的知识库。^[7]具体的预测算法、综合模型、修正规则在后续章节中将详细讨论。

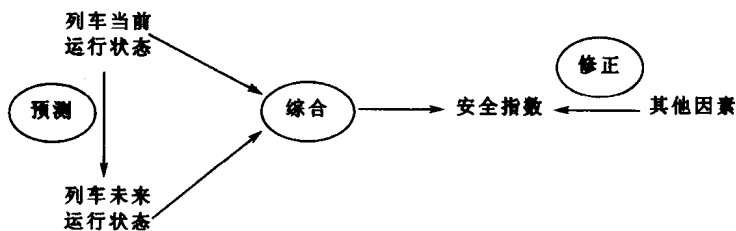


图 2.2 专家系统安全推理评价方法

2.3 机车运行安全指数确定原则

机车安全运行专家系统采用安全指数这一指标来综合评价目前机车操纵是否安全及其安全程度。安全指数是一个定义在实数域上一段连续、有限区间的数,如 $[0, 1]$ 或任意实数区间 $[a, b](a, b \in R, b > a)$ 。安全指数是描述机车运行安全性的一个综合因子,安全指数值的大小表示安全的程度。

设安全指数定义在 $[a, b](a, b \in R, b > a)$, 那么, 如果安全指数为 b , 说明列车运行处于安全状态。如果安全指数为 a , 则说明列车运行已处于极不安全状态。介于上述两种极端情况之间, 机车安全运行专家系统综合运用专家的经验

和知识,分析各因素对列车运行安全性的影响,根据模型推理得到介于 a 和 b 之间的安全指数,并根据安全指数值的大小作出决策,确定安全状态等级及相应的安全提示方式、提示内容、提示的时间间隔。当列车运行处于安全状态时,车载系统不进行安全提示;当列车运行的安全状态需要引起注意时,车载系统采用显示手段进行安全提示,提醒司机注意;如果列车运行的安全状态较差,车载系统采用语音手段进行提示。根据安全等级,车载系统给出不同时间间隔的提示、告警信息,提醒司机采取有效的制动减速措施。

2.4 列车运行状态预测模型及实时算法

列车加速度、机车工况、运行线路、牵引重量等是影响列车运行状态的重要因素,每个单因素对列车运行状态的影响及其程度,客观上很难给出一个合理的评价;同时,由于列车运行过程的非线性、时变性、不确定性,建立准确的列车运行数学模型也十分困难。^[5]本节在研究列车动力学方程的基础上,提出了基于计算与实测相结合的列车运行状态预测模型。列车运行状态的预测实现了上述各个影响因素的综合,是机车运行安全性评价的基础。

2.4.1 作用于列车上力的计算

作用于列车上的力可分为三类:机车牵引力 F , 列车运行基本阻力 w_0 和附加阻力 w_j , 列车制动力 B 。列车运行中,作用在列车上的总合力 C 是这些力的代数和

$$C = F - w_0 - w_j - B(\text{kN}) \quad (2-1)$$

作用在列车上的合力 C 与列车所受重力之比称为单位合力 c 为

$$c = \frac{C \cdot 10^3}{(P + G)g} (\text{N/kN}) \quad (2-2)$$

式中, P 为机车整备重量 (t); G 为牵引重量 (t)。

作用在列车上的合力决定了列车运行的状态。

1. 机车牵引力计算

列车运行中,根据实时采集的牵引电动机端电压、牵引电动机电枢电流,可计算出机车牵引力为

$$F = 3.6 \sum \frac{U_d \cdot I_a}{v} \eta (\text{N/kN}) \quad (2-3)$$

式中, U_d 为各牵引电动机端电压 (V); I_a 为各牵引电动机电枢电流 (A); η 为牵引电动机和齿轮传动的效率; v 为列车运行速度 (km/h)。

此外,机车牵引力还可以根据机车牵引级位通过牵引力特性曲线求得。

2. 列车运行基本阻力计算

机车、车辆的基本阻力由以下五个因素组成：

- (1) 轴颈与轴承间的摩擦；
- (2) 轮轨间的滚动摩擦；
- (3) 轮轨间的滑动摩擦；
- (4) 冲击和振动损失的能量；
- (5) 空气阻力。

TB/T 1407-1998《列车牵引计算规程》中详细规定了计算各型机车、车辆运行单位基本阻力的经验公式。

对于 SS₃ 机车：

$$w_0 = 2.25 + 0.019v + 0.000320v^2 (\text{N/kN}) \quad (2-4)$$

对于滚动轴承货车（重车）：

$$w_0 = 0.092 + 0.0048v + 0.000125v^2 (\text{N/kN}) \quad (2-5)$$

3. 列车运行附加阻力计算

列车运行附加阻力主要由以下三个因素组成：

- (1) 坡道附加阻力；
- (2) 曲线附加阻力；
- (3) 隧道附加阻力。

坡道阻力是列车在坡道上运行时，重力沿轨道坡道方向的分力，坡道阻力有正负之分。理论分析表明，单位坡道附加阻力 w_i 在数值上等于坡道的千分数。列车在曲线上运行时，阻力大于同样条件下直线上的运行阻力，其增大部分称为曲线附加阻力。曲线附加阻力的影响因素复杂，难以用理论推导出计算公式，《列车牵引计算规程》中给出了计算单位曲线附加阻力 w_r 的试验公式。列车在隧道运行时，空气阻力比空旷地带大，空气阻力增大的部分称为隧道附加阻力，隧道附加阻力由试验确定，目前尚无正式的计算公式。

为计算方便，用单位加算附加阻力 w_j 表示因线路条件产生的单位附加阻力之和，即

$$w_j = w_i + w_r + w_s (\text{N/kN}) \quad (2-6)$$

式中， w_i 为单位坡道附加阻力； w_r 为单位曲线附加阻力； w_s 为单位隧道附加阻力。

单位加算附加阻力 w_j 数值上等于加算坡道坡度千分数 i_j ，即

$$w_j = i_j \quad (2-7)$$

4. 列车制动力计算

产生制动力的方法主要有：