

文章编号: 1674—8247(2020)05—0036—06

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2020.05.007

基于系统论层次分析法的高速铁路信号点灯系统研究

王耀安

(中铁第一勘察设计院集团有限责任公司, 西安 710000)

摘要:铁路信号机作为指示列车运行状态的重要联锁设备,其点灯系统的运行状态、产生故障时处理的效率对列车的运营十分重要。传统对信号机的分析停留在点灯电路的分析,无论是运营维护人员还是信号设计人员,均未在系统的角度上分析信号机,使得信号机在系统层面的不安全因素易被忽视。为在系统层面分析信号机点灯系统,本文提出一种基于系统论的层次分析法,通过建立定量与定性相结合的分析模型,对信号机点灯系统的构成性与整体性进行分析。并以高速铁路进站信号机为例,验证了所提方法。结果表明,系统层级的影响因素往往容易被忽视。文末利用层次分析法判断矩阵得到权值向量,根据权值向量分别对点灯系统运营维护与设计所应注重的因素进行了说明。

关键词:信号机;点灯系统;系统论分析;层次分析法;权值向量

中图分类号:U284.11+1 文献标志码:A

Research on High-speed Railway Signal Lighting System Through Analytic Hierarchy Process Based on the System Theory

WANG Yaoan

(China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710000, China)

Abstract: Railway signals are important interlocking devices for indicating the running status of a train. The operation status of their lighting system and the efficiency of fault handling are very important to the operation of trains. The traditional analysis of the signals focuses on the lighting circuit. Neither the operation and maintenance personnel nor the signal designer analyzes the signals from the perspective of a system, which makes the unsafe factors of the signals at the system level be ignored easily. In order to analyze the signal lighting system at the system level, this paper proposes an analytic hierarchy process based on the system theory and analyzes the composition and integrity of the signal lighting system by establishing a model combining quantitative analysis and qualitative analysis. In addition, the proposed method is verified with the home signal of the high-speed railway station as an example. The results show that the influencing factors at the system level are easily ignored. At the end of the paper, the weight vector is obtained using the judgment matrix of the analytic hierarchy process, and the factors which shall be paid attention to in the operation, maintenance and design of the lighting system are explained according to the weight vector.

Key words: signal; lighting system; system theory analysis; analytic hierarchy process; weight vector

近年来,随着铁路运输业的迅猛发展,信号系统日益复杂,对运营维护人员和设计人员的工作效率与质

量均提出了更高的要求。作为铁路信号系统最重要的基础设备之一,信号机是指挥列车运行的关键,直接影

收稿日期:2020-01-02

作者简介:王耀安(1993-),男,助理工程师。

引文格式:王耀安. 基于系统论层次分析法的高速铁路信号点灯系统研究[J]. 高速铁路技术,2020,11(5):36-41.

WANG Yaoan. Research on High-speed Railway Signal Lighting System Through Analytic Hierarchy Process Based on the System Theory[J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(5):36-41.

响运输效率与安全,如何更全面、完整地分析信号机点灯系统成为亟待解决的问题。目前,对信号机点灯系统的研究多局限于点灯电路的原理性、各种继电器的选择与升级改造、点灯单元智能化等方面,从未系统全面地审视信号机点灯系统。这使得需基于系统分析才能发现的问题难以被研究者们察觉,同时也导致现场工作效率无法提升。

本文采用一种基于系统论的层次分析法,对铁路信号机点灯系统的构成性与整体性进行分析,可为运营维护人员(下文称运维人员)与信号设计人员的工作提供指导。

1 研究内容与方法

1.1 研究现状

对于信号机点灯电路的分析,国内外已有了较多的研究。如库峰^[1]为襄渝Ⅱ线改进了使用起始指示器的出站信号照明电路;王明泉^[2]根据现场情况和特点,对ZPW-2000A轨道电路下的区间通过信号机点灯电路进行了分析研究,改进了点灯电路易发生故障的部分;付刚^[3]应用“故障-安全”原则对铁路信号系统进行了分析;陈艳华^[4]对信号机点灯系统的监测方面进行了分析和研究,提出了利用比较器升级监测系统的方法;张立东等人^[5]对进站信号机点灯电路进行了模拟,对进站信号机点灯电路开展了电子方面的研究;张建钢^[6]针对神华集团大准铁路点灯电路乱显示的现象进行了故障诊断与系统升级;李丽兰等人^[7]对信号机点灯电路故障处理进行了分析。

这些研究缺少从系统角度对铁路信号机进行的分析,而系统论针对这一问题,提出了一种可行的思路和方法。系统论认为,所有系统应具有关联性、整体性、复杂性、开放性、自组织性、等级结构性以及动态的平衡、时间序列性等特性,通过分析系统的特性与特征,可更为全面地探究和把握研究对象的特点^[8]。信号机点灯系统是典型的人工工程系统,较适合采用系统论的方法进行分析研究。

系统论方法在多个维度条件下求解偏微分方程组较为困难。采用层次分析法可较为方便地对系统论建立的模型进行数据分析,通过层次分析建立模型、对已建立的模型进行分析等方法均已被广泛使用^[9-11]。因此,本文首先采用系统论的方法建立信号机点灯系统分析模型,然后应用层次分析法对已建立模型进行分析,并与传统的信号机点灯电路分析比较,发现电路分析忽略的因素,最后得出各影响因素的权值矩阵。

1.2 系统论

系统论是研究系统结构、特点、行为、动态等系统间联系,并使用数学工具进行描述的科学。一般认为,系统论最早由美籍奥地利人贝塔朗菲(L. Von. Bertalanffy)所创立,他认为系统的重要特性之一为生长性。但铁路信号机点灯系统为典型的人造工程系统,其最重要的两种特点为构成性与整体性。

构成性指在系统中每个要素都是承担系统功能的主要载体,这些要素的差异(如结合方式上的差异),使得系统中各要素在作用、结构与功能上表现出等级秩序性,即形成了分层结构的特性。如在信号机点灯系统中,点灯电路与继电器均为系统的构成部分,点灯电路能够完成一定的逻辑任务,但继电器则是这些逻辑任务的承担者,因此,两者形成了不同的层级。在信号系统中,构成性是运维人员所关注的系统特点。

整体性作为系统论的核心,指系统的功能由整个系统共同体现,但不是各个组成部分的简单相加,而是组成部分之间相互作用关系的涌现。因此,组成部分又常常被称为要素,要素之间具有较强的相互关联性,使得系统构成了一个不可分割的整体。如在信号机点灯系统中,将任何一个继电器割离出来,它将失去逻辑性,无法完成电路作用。在信号系统中,系统的整体性是设计人员较为关注的系统特点。

一般情况下,系统论需把研究对象作为一个系统,在系统中分析对象的功能、要素、环境和这三者之间的相互作用关系,以此来认知系统特点与规律,最终利用这些特点、规律去控制、管理和改造系统,使系统发展满足人们的需要。

需要注意的是,人工工程系统中难免需要人的参与,如在信号机点灯系统中,信号设计人员需参与系统的构建,信号运维人员需参与系统的维护。而在以往的研究中,往往忽略了人在系统中的作用,而系统中人为因素往往产生决定性的作用。因此,本文利用系统论来分析信号机点灯系统,基于系统本身的特点来寻找传统电路分析中难以关注的系统因素,以指导运维人员和设计人员的日常行为工作。

1.3 层次分析法

层次分析法是将系统分解成多个层次和对应的多个影响因素,在每一层级中,比较这些影响因素对上层的影响程度,得出可以反映各影响因素重要程度的权重^[12],从而判别哪些因素需要着重关注。

将系统论法得到的影响因素作为层次分析法的影响因素,对其进行层级性归纳,形成有序的准则层和指标层,在准则层与指标层之间可出现中间层,以形成更

强的归纳作用。由于系统论法的等级构成性,各要素之间的层级将非常明显,因此将系统论融入层次分析法会使研究过程更为简便。

层次分析法定量计算的核心是判断矩阵,设某准则层或指标层 X 有 n 个因素,即 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 通过比较它们对上一层因素的影响重要性,得到判断矩阵 A 为:

$$A = (a_{ij})_{m \times n} \quad (1)$$

式中: (a_{ij}) ——第 i 个因素相对于第 j 个因素的比较结果。

在两两因素重要性的比较过程中,可根据原因事件和运维专家、设计专家或现场工程师所拥有的经验、历史事故与故障数据进行决策。 a_{ij} 的取值如表 1 所示。

表 1 判断矩阵中比较结果的取值标准及含义^[13]

取值	含义
1	第 i 个因素与第 j 个因素同样重要
3	与第 j 个因素相比,第 i 个因素稍微重要
5	与第 j 个因素相比,第 i 个因素更重要
7	与第 j 个因素相比,第 i 个因素重要得多
9	与第 j 个因素相比,第 i 个因素十分重要
2,4,6,8	上述两相邻判断的中值
倒数	第 j 个因素与第 i 个因素相比,得到判断值为

一致性检验是判断矩阵正确与否最重要的依据,判断矩阵一致性检验的过程如下。

(1) 计算一致性指标 C_1

$$C_1 = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

式中: λ_{\max} ——判断矩阵的最大特征值。

C_1 越小,说明判断矩阵的一致性越好,反之,则说明判断矩阵的一致性越差。

(2) 计算检验数 C_R

$$C_R = \frac{C_1}{R_1} \quad (3)$$

式中: R_1 ——同阶平均随机一致性指标,可按式(4)计算。

$$R_1 = \frac{C_{11} + C_{12} + \dots + C_{1n}}{n} \quad (4)$$

引入检验数 C_R 是为了避免随机原因造成的偏离,可作为判断矩阵是否满足一致性的指标。若 $C_R < 0.1$,判断矩阵通过一致性检验;否则判断矩阵无法通过检验,需要进行修正。

2 进站信号机点灯电路分析

以高速列车进站信号机点灯系统为例,应用本文所提出的方法,对其进行系统性的分析。高速列车进

站信号机点灯系统是典型的信号机点灯系统,其点灯电路较为复杂,使用继电器数目较多,且室内、外设备组成完整,适合进行系统性分析。

进站信号机点灯电路由电源部分、继电器电路、信号机构三部分组成,如图 1 所示。电源部分由 220 V 信号用交流电以及隔离变压器组成,并设置熔断器,这部分设备均设置在信号机械室;继电器电路由 LXJ、KDJ、ZXJ、TXJ、DJ、2DJ、YXJ 等继电器以及熔断器构成,是点灯逻辑的主要承担部分。

通过安全型继电器达到“故障-安全”的目的,如当进站信号机需点绿黄灯时,若室外 2U 灯丝故障,导致黄灯无法点亮,则 2DJ 继电器无法励磁吸起,从而切断绿灯点灯回路, LXJ 落下,进站信号机最终点亮红灯,避免了因为黄灯无法点亮而仅有绿灯点亮导致的信号升级。这部分继电器均设置在信号机械室的组合柜内。信号机由点灯单元、双灯定焦盘灯组以及主、副双灯组成,是最终的执行设备,通过组合灯光的显示,指示列车的运行,这部分设备均设置在室外站场上。

通过对进站信号机点灯电路的组成分析,可以看到点灯电路将室内、外设备区分开,突出了继电器电路的逻辑部分。实际上点灯系统的结构设计本身是完整的,点灯电路图只是一种接线、逻辑的表现形式。系统性分析高速铁路信号机点灯系统对分析故障、理解原理尤为重要。

3 模型计算与结果分析

3.1 构成性模型

高速列车进站信号机系统可根据设备位置(位于室内或室外)分成两部分,如图 2 所示。

从系统同级的角度上分析,室外部分由电缆、接续点、点灯单元、灯丝 4 部分组成。电缆连接室内,点灯电路与点灯单元在站场内径路的不同,导致了接续点的产生,接续点是常易被忽视的故障点之一,点灯单元、灯丝为信号机机构内主要承担点灯任务的部分。

室内部分由电源屏、联锁机、隔离变压器、继电器、防雷系统、接点 6 部分组成。电源屏为信号系统供电设备,是任何设备正常运行的基础;联锁机是驱动继电器,使点灯电路变化的根本条件;防雷系统(如法拉利笼等)是防止雷电脉冲或电磁场感应的设备^[14];接点这里指的是室内设备之间靠软线连接的点。

3.2 整体性模型

整体性是工程系统最重要的性质,是系统所没有的新的性质和行为,表现为系统的功能与逻辑。对于信号机点灯系统,其整体性表现在电路逻辑、电路特

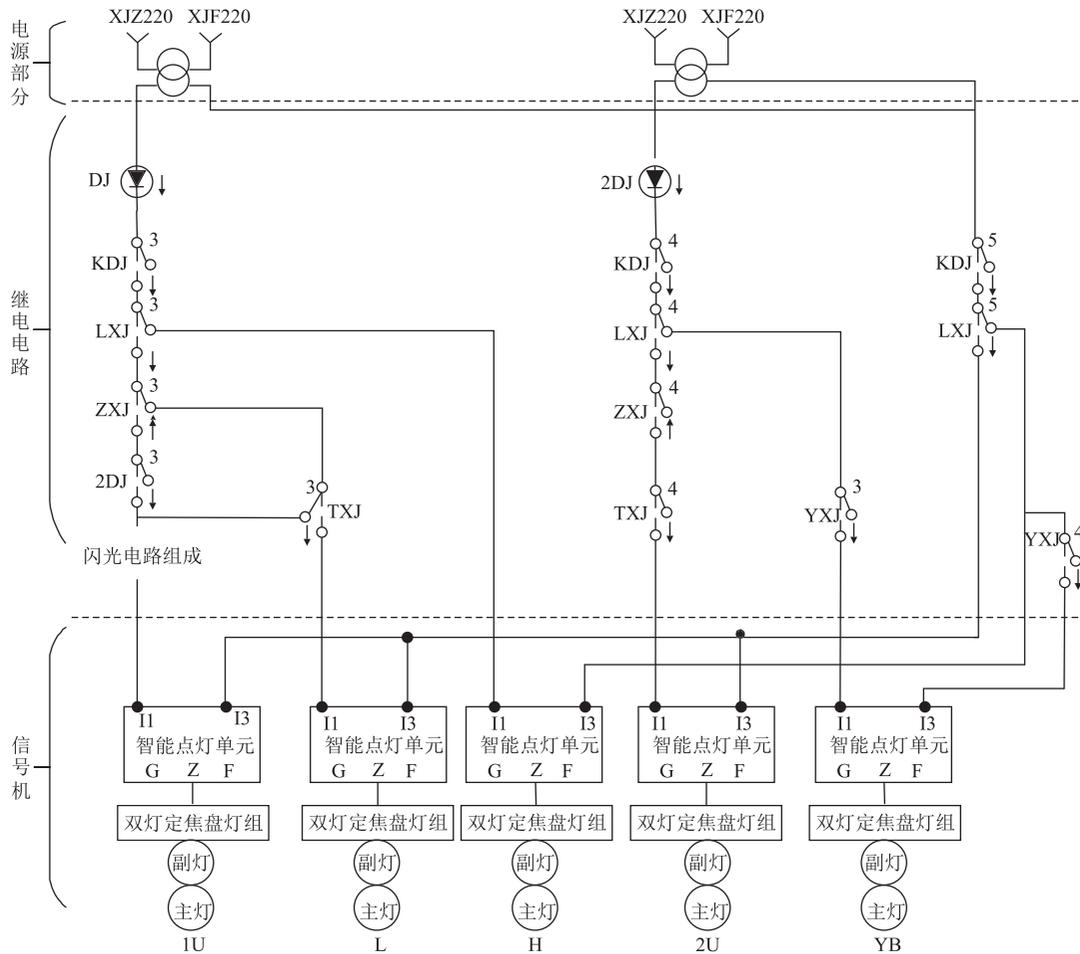


图 1 进站信号机点灯电路图(高速)

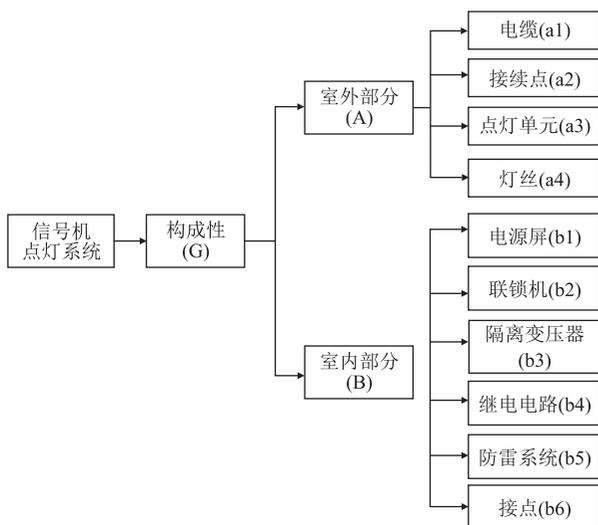


图 2 信号机点灯系统构成性模型图

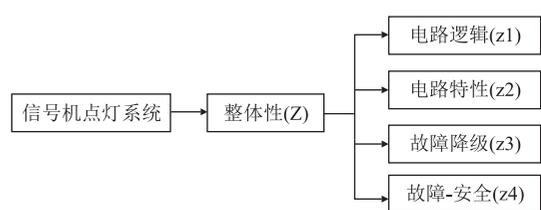


图 3 信号机点灯系统整体性模型图

性、故障降级和“故障 - 安全”等方面,如图 3 所示。

(1) 电路逻辑

通过继电器组合搭建的电路所带来的逻辑。如当 LXJ、TXJ、ZXJ 吸起时,进站信号机点亮绿灯,即代表进

站信号机列车进路开放,列车直向通过本站时,绿灯点亮。

(2) 电路特性

由于继电器的种类不同,电阻、电容、变压器等元件的使用,使各点电压、电流、频率产生不同的现象。电路特性对进站信号机点灯系统的影响在于继电器是否能够准确完全吸起、继电器吸起时序等。

(3) 故障降级

当系统出现故障后,在保证工作安全的前提下,自动改变工作模式或降低容错能力及性能。信号点灯系统出现故障后,主要有两种降级表现:①若为联锁机主

机故障,则及时切换至热备副机,此时仍具有完整的系统功能;②若为部分灯丝、继电器故障,列车的效率降低,但仍能够完成一定的作业。以需点出绿黄灯时,绿灯灯丝故障为例,1DJ 无法励磁吸起,此时仅会有 2U 灯点亮,即只显示一个黄灯。

(4)故障 - 安全

当设备发生故障时,系统做出反应,导向安全侧。目前,铁路交通中,安全侧普遍认为是停车或降低列车运行速度^[15]。但“故障 - 安全”与故障降级不同,“故障 - 安全”是设备发生故障时,保证列车运行安全的设计措施,如进站信号机需要点亮绿灯时,LXJ 故障使得 LXJ 无法吸起,那么将会导向安全侧,即点亮红灯,禁止列车进入站内,使列车停止运行。而故障降级更偏向于设备发生故障时,保证列车的运行效率。

3.3 AHP 分析

按照表 1 所示准则,对系统构成模型与系统整体性模型构建判断矩阵。首先,对图 2 与图 3 中所有的指标因素进行编号,即电缆(a1)、接续点(a2)、点灯单元(a3)、灯丝(a4),电源屏(b1)、联锁机(b2)、隔离变压器(b3)、继电电路(b4)、防雷系统(b5)、接点(b6),电路逻辑(z1)、电路特性(z2)、故障降级(z3)、故障 - 安全(z4);对准则因素进行编号,即构成性(G)、整体性(Z);为更清晰地分析构成性的影响因素,对构成性模型引入中间层,即室外部分(A)、室内部分(B)。其次,对指标因素的重要性进行两两比较,当比较*i*因素和*j*因素时,若*i*因素所对应基本原因事件的结构重要度大于*j*因素所对应基本原因事件的结构重要度,则认为其对上面准则层或总目标层的重要性更大,反之亦然。

依照上述方法,分别对室外部分、室内部分、整体性建立判断矩阵,如表 2~4 所示。

表 2 进站信号机点灯系统室外部分判断矩阵表

项目	a1	a2	a3	a4
a1	1	1/7	1/3	1/4
a2	7	1	5	3
a3	3	1/5	1	1/2
a4	4	1/3	2	1

表 3 进站信号机点灯系统室内部分判断矩阵

项目	b1	b2	b3	b4	b5	B6
b1	1	1/4	2	1/2	1/5	1/3
b2	3	1	9	3	2	5
b3	1/3	1/9	1	1/6	1/7	1/5
b4	2	1/3	6	1	1/3	1/3
b5	3	1/2	7	3	1	2
b6	1	1/5	5	1/3	1/2	1

表 4 进站信号机点灯系统整体性判断矩阵

项目	z1	z2	z3	z4
z1	1	7	5	2
z2	1/7	1	1/3	1/7
z3	1/5	3	1	1/5
z4	1/2	7	5	1

分别对其判断矩阵进行一致性检验,得到如下结果:

- (1) 室外部分一致性指标 C_{AI} 为 0.018 8, C_{AR} 为 0.020 9 < 0.1;
- (2) 室内部分一致性指标 C_{BI} 为 0.051 1, C_{BR} 为 0.041 2 < 0.1;
- (3) 整体性一致性指标 C_{ZI} 为 0.040 0, C_{ZR} 为 0.044 5 < 0.1。

综上,判断矩阵的一致性指标达到要求。

由于二阶矩阵的 $R_1 = 0$,因此由室外部分(A)与室内部分(B)组成的二阶判断矩阵、由构成性(G)与整体性(Z)组成的二阶判断矩阵一致性指标均达到要求。因此,本文所建立的层次分析法模型是成立的。

进站信号机点灯系统模型与进站信号机点灯电路相比,有如下优点:(1)进站信号机点灯系统模型所挖掘到的因素多于进站信号机点灯电路,如室外电缆的接续点、室内部分的防雷系统均无法在进站信号机点灯电路中体现;(2)进站信号机点灯系统模型具有各因素层次分明的特点,而进站信号机点灯电路仅将电路中继电器的连接关系简单呈现,层次混杂;(3)进站信号机点灯系统模型可结合层次分析法进行多元定量与定性结合分析,而进站信号机点灯电路仅能定性分析电路逻辑。

按照文献[16]的方法计算各个指标因素的权重向量,可得权重如表 5、表 6 所示。

表 5 进站信号机点灯系统构成性 AHP 模型各层因素的权重向量表

准则因素	中间层因素	指标因素	权重向量(对中间层)
构成性(G)	室外部分(A)	电缆(a1)	0.060
		接续点(a2)	0.577
		点灯单元(a3)	0.133
		灯丝(a4)	0.230
	室内部分(B)	电源屏(b1)	0.087
		联锁机(b2)	0.393
		隔离变压器(b3)	0.030
		继电电路(b4)	0.155
		防雷系统(b5)	0.245
		接点(b6)	0.090

表6 进站信号机点灯系统整体性 AHP 模型各层因素的权重向量表

准则因素	指标因素	权重向量(对准则层)
整体性(Z)	电路逻辑(z1)	0.498
	电路特性(z2)	0.049
	故障降级(z3)	0.101
	故障-安全(z4)	0.352

由表5、表6的权值向量可以看出:

(1)室外部分中,电路分析中常被忽视的接续点的重要程度最高,远远大于其他指标因素;信号机灯丝的重要程度次之;点灯单元具有良好的可靠性,因此,受重视程度不必很高;电缆是最不容易产生故障的点,受重视程度可以为最低。

(2)室内部分中,各指标因素的重要程度依次为:联锁机、防雷系统、继电电路、室内接点、电源屏与隔离变压器。联锁机与继电电路为承担信号机点灯电路的主要构成部分,应获得最高的重视程度;防雷系统作为室内电磁防护的重要组成部分,受重视程度也较高;由于室内环境更为稳定,因此接点的受重视程度较低;隔离变压器对工作环境的要求低、可靠性高,因此受重视程度最低。

由此可见,针对室外设备,信号运维人员应注重电缆接续点;针对室内设备,信号运维人员应注重联锁机、防雷系统和继电电路。

(3)整体性中,电路逻辑与“故障-安全”应受到较高程度的重视。电路逻辑的目的是实现系统功能,因此为首要重视的部分,而“故障-安全”为实现安全性的技术,其重要程度次之。这里值得注意的是,系统层面的“故障-安全”不应仅仅停留在继电电路的设计层面,还应放大至整个信号点灯系统。

此外,在不同的准则因素中,各个指标因素的权值相差较大,这为运维人员、设计人员的工作提供了便利。运维、设计人员可有目的地加强应受重视的部分,较为迅速的提升工作效率。

4 结论

本文通过分析铁路信号机点灯系统的构成性与整体性,选择专家打分的方法获得判断矩阵的参数,得出了以下主要结论:

(1)利用 AHP 方法建立信号机点灯系统的分析模型,并基于此模型获得各因素权重,可确定各因素对系统产生的影响力。

(2)系统论方法能够更加全面、清晰地分析系统的构成性与整体性。

(3)通过 AHP 方法进行定量分析,将符合一致性检验条件的判断矩阵中的特征向量作为该层对应因素的权重向量,并获得构成性权重向量与整体性权重向量,可分别对运维人员和设计人员的工作重点进行指导。

(4)应用基于系统性的层次分析法可定量与定性相结合地分析铁路信号机点灯系统的构成性、整体性,并可推广至其他铁路系统(如转辙机系统、信号联锁系统、自动售票系统等),解决单一分析电路所带来的不足。

参考文献:

- [1] 库峰. 带发车表示器出站信号机点灯电路的改进[J]. 西铁科技, 2011(2): 50-51.
KU Feng. Improvement of the Lighting Circuit of the Outbound Signal with the Departure Indicator [J]. Xi'an Railway Technology, 2011(2): 50-51.
- [2] 王明泉. ZPW-2000A 区间信号机点灯电路分析及改进[J]. 科技情报开发与经济, 2009, 19(12): 208-209.
WANG Mingquan. The Analysis and Improvement of ZPW-2000A Interval Signaler's Lighting Circuit [J]. Sci-Tech Information Development & Economy, 2009, 19(12): 208-209.
- [3] 付刚. 简议铁路信号故障-安全原则[J]. 铁路通信信号工程技术, 2013, 10(5): 16-19.
FU Gang. Discussion on Fail-Safe Principle of Railway Signalling [J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2013, 10(5): 16-19.
- [4] 陈艳华. 关于信号机点灯系统监测电路的研究[J]. 甘肃科学学报, 2011, 23(3): 117-119.
CHEN Yanhua. Research on Monitoring Circuit of Signal Lighting System [J]. Journal of Gansu Sciences, 2011, 23(3): 117-119.
- [5] 张立东, 吕坤鹏. 进站信号机点灯电路模拟系统[J]. 山东交通学院学报, 2018, 26(1): 59-65.
ZHANG Lidong, LYU Kunpeng. Simulation System of Lighting Circuit of Home Signal [J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2018, 26(1): 59-65.
- [6] 张宝钢. 信号机点灯电路的修改[J]. 铁道通信信号, 2010, 46(4): 43-44.
ZHANG Jianguang. Improvement of Signal Lighting Circuit [J]. Railway Signalling & Communication, 2010, 46(4): 43-44.
- [7] 李丽兰, 孙英. 信号机点灯电路故障处理浅析[J]. 电脑知识与技术, 2014, 10(31): 7483-7484.
LI Lilan, SUN Ying. Analysis of troubleshooting of signal lighting circuit [J]. Computer Knowledge and Technology, 2014, 10(31): 7483-7484.
- [8] 伊塔马·埃文-佐哈尔, 张南峰. 多元系统论[J]. 中国翻译, 2002, 23(4): 19-25.
Itamar Even-Zohar, ZHANG Nanfeng. Polysystem Theory [J]. Chinese Translators Journal, 2002, 23(4): 19-25.

6 结束语

本文针对套轨铁路的不同形式(三轨、四轨),对套轨铁路道岔纳入联锁控制、列车轮对的轨道占用检查技术、车地信息传输等问题开展了专项研究,得出以下主要结论:

(1)套轨铁路可采用与标准轨铁路一致的联锁控制设备。

(2)道岔应根据其布置形式研制相应的转辙设备。

(3)选用轨道电路时,应重点研究钢轨参数变化对轨道电路特性的影响。

(4)对于不能采用轨道电路的线路,还需研究如何向车载设备传递地面信息的方式。

参考文献:

- [1] TB 10007-2017 铁路信号设计规范[S].
TB 10007-2017 Code for Design of Railway Signal [S].
- [2] TB/T 3508-2018 铁路道岔转换设备安装技术条件[S].
TB/T 3508-2018 Railway Turnout Switching Equipment Installing Technical Specification[S].
- [3] 陈焕祥,孙少军.用于套轨道岔转换的自动控制系统:中国,201210421376.0[P].2016-10-29.
CHEN Huanxiang, SUN Shaojun. Automatic Control System for Track Switch Conversion; China, 201210421376.0 [P]. 2016-10-29.
- [4] TB 10071-2000 铁路信号站内联锁设计规范[S].
TB 10071-2000 Code for Design of Railway Signal Interlocking within Stations [S].
- [5] TB/T 2852-2015 轨道电路通用技术条件[S].
TB/T 2852-2015 Track Circuit General Technical Specification [S].
- [6] TB/T 2853-2018 轨道电路系统 25 Hz 相敏轨道电路[S].
TB/T 2853-2018 the Track Circuit System-25 Hz Phase Detecting Track Circuit[S].
- [7] TB/T 2296-2019 铁路信号计轴设备[S].
TB/T 2296-2019 Railway Signal Axle Counter [S].
- [8] TB/T 2465-2010 铁路车站电码化技术条件[S].
TB/T 2465-2010 Technical Specification on Coding for Railway Station[S].
- [9] 郭金玉,张忠彬,孙庆云.层次分析法的研究与应用[J].中国安全科学学报,2008,18(5):148-153.
GUO Jinyu, ZHANG Zhongbin, SUN Qingyun. Study and Applications of Analytic Hierarchy Process[J]. China Safety Science Journal, 2008, 18(5): 148-153.
- [10] 温亮,游珍,林裕梅,等.基于层次分析法的土地资源承载力评价:以宁国市为例[J].中国农业资源与区划,2017,38(3):1-6.
WEN Liang, YOU Zhen, LIN Yumei, et al. Evaluation on Land Carrying Capacity: a Case of Ningguo City[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2017, 38(3): 1-6.
- [11] 杨文昕,余磊,周钹,等.基于AHP-模糊综合评价法的兴泉铁路宁化至泉州段线路方案对比研究[J].铁道标准设计,2019,63(2):49-54.
YANG Wenxin, YU Lei, ZHOU Tan, et al. Study on Route Alignment of Ninghua-Quanzhou Section of Xingquo-Quanzhou Railway Based on AHP-fuzzy Comprehensive Evaluation Method[J]. Railway Standard Design, 2019, 63(2): 49-54.
- [12] SAATY T L. Decision Making: The Analytic Hierarchy and Network Processes (AHP/ANP)[J]. Journal of Systems Science and Systems Engineering, 2004, 13(1): 1-35.
- [13] KRMAC E, DJORDJEVIĆ B. An Evaluation of Train Control Information Systems for Sustainable Railway Using the Analytic Hierarchy Process (AHP) Model[J]. European Transport Research Review, 2017, 9(3): 1-17.
- [14] 董超,周嘉明.铁路信号楼综合防雷系统方案设计[J].铁道通信信号,2005,41(7):3-5.
DONG Chao, ZHOU Jiaming. Design of Integrated Lightning Protection System of Railroad Signaling Room[J]. Railway Signalling & Communication, 2005, 41(7): 3-5.
- [15] 负春欣.轨道交通信号故障安全的安全态[J].城市轨道交通研究,2013,16(7):130-132.
YUAN Chunxin. Rail Transit Signal Fault-safe Status [J]. Study on Urban Rail Transit, 2013,16(7):130-132.
- [16] 喻方元.线性代数及其应用[M].上海:同济大学出版社,2014.
YU Fangyuan. Linear algebra and its applications [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2014.
- [17] 谢宝军.《铁路信号设计规范》(TB 10007-2017)信号机类型应用场景分析[J].铁道标准设计,2018,62(9):167-173.
XIE Baojun. Analysis of Signal Types Application in Code for Design of Railway Signaling (TB 10007-2017) [J]. Railway Standard Design, 2018, 62(9): 167-173.