

动车组电气装配质量因素分析及改进方法

曲 双¹ 梁飞航² 任宇欣³

(1. 中车长春轨道客车股份有限公司工程技术部/高速动车组制造中心, 130062, 长春; 2. 天津大学管理与经济学部, 300072, 天津; 3. 吉林大学机械与航天航空工程学院, 130022, 长春//第一作者, 教授级高级工程师)

摘 要 对动车组电气装配工序进行系统调查, 确定低压箱接线为电气装配的关键问题。对低压箱接线环节进行过程能力分析, 判断其过程能力; 通过鱼骨图分析法寻找影响接线质量的因素; 利用灰度层次分析法对接线影响因素从 3 个方面进行重要度排序; 运用发明问题解决理论 (TRIZ) 与工业工程理论相结合的方法提出解决问题的方案。

关键词 动车组; 电气装配; 低压箱接线; 灰度层次分析

中图分类号 U270.38+1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.02.004

Analysis of EMU Electric Assembly Quality Factors and Improvement

QU Shuang, LIANG Feihang, REN Yuxin

Abstract Through investigation of EMU electric assembly, the low voltage box connection is identified as the key problem in assembly process. Then, the process capability in the box connection is judged with an analysis, factors that influence wiring quality are detected by using the fishbone diagram method, and then ranked in order of importance from 3 aspects by using the hierarchical gray analysis. Finally, based on the combination of TRIZ theory with the industrial engineering theory, solutions for the assembly problems are proposed.

Key words electric multiple unit (EMU); electric assembly; low voltage box connection; hierarchical gray analysis

First-author's address CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China

动车组设计和加工过程的误差会对整车装配产生影响^[1]。动车组的功能实现依赖于电气传动与控制, 因此, 电气装配尤为重要。本文对动车组电气装配质量进行因素分析, 确定影响装配质量的因素并提出改进建议。本文采用的技术分析路线如图 1 所示。

1 电气装配流程

动车组电气装配需要在两个车间进行, 下线车

间根据图纸要求剪线并运送至装配车间, 装配车间执行布线、设备安装、接线和绝缘耐压试验 4 大流程^[2]。实际情况调查表明, 对电气装配质量影响最大的操作难点是低压箱端子排接线问题^[3]。

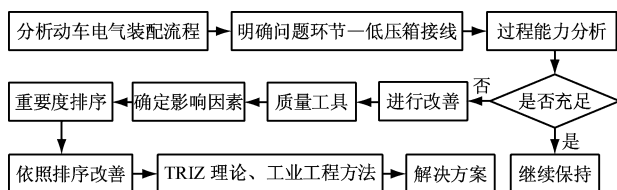


图 1 动车组电气装配质量技术分析路线

2 低压箱接线过程能力分析

现场调查动车组电气低压箱 30 个。假设: 每个低压箱的端子排接线为 465 根, 可接受容错率为 1%, 即每只低压箱可接受的接错数为 4 根。根据以上假设及现场低压箱实际接错数统计, 低压箱端子排接线过程能力指数的计算过程如下:

$$\bar{G} = \frac{1}{w} \sum_{i=1}^w G_i \approx 1.467$$

$$G_p = \frac{G_\mu - \bar{G}}{3\sqrt{\bar{G}}} \approx 0.700$$

式中:

\bar{G} ——低压箱端子排接线平均接错数;

w ——低压箱数, 取值 30;

G_i ——第 i 个低压箱的实际接错数;

G_μ ——低压箱可接受的接错数, 取值 4;

G_p ——低压箱端子排接线过程能力指数。

通过以上计算可知, 低压箱端子排接线过程能力较差, 应采取改进措施。

3 低压箱接线影响因素分析

通过以上分析可知, 低压箱端子排接线过程能力缺乏, 需要对其进行因素分析。利用质量分析方

法中的鱼骨图分析法^[4]找出影响接线质量的因素（见图2）。

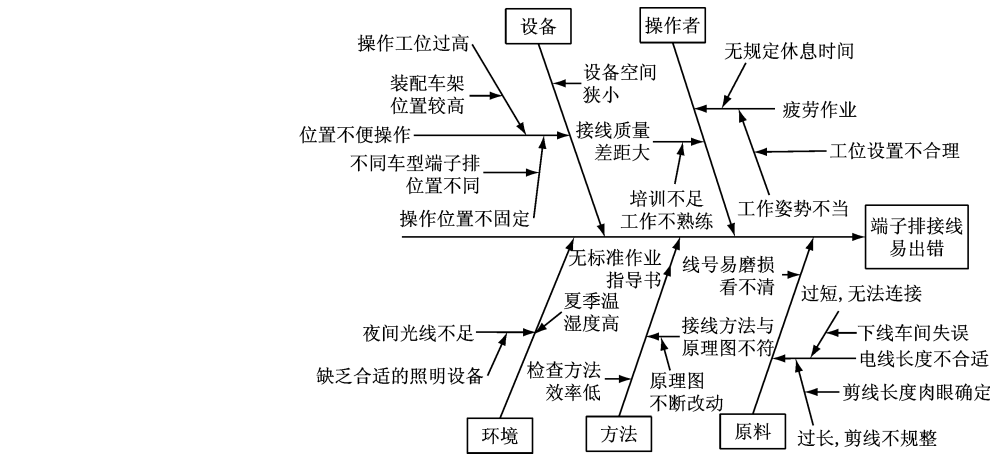


图2 接线质量鱼骨分析图

4 影响接线质量因素评价

4.1 评价方法筛选

层次分析法主观影响大,灰度分析法缺乏主观因素之间的关系判断^[5],故将层次分析法与灰度关联分析法结合,以弥补两种方法的不足。

4.2 灰度层次分析法

4.2.1 建立层次结构模型

目标层为“提高接线质量”,准则层为“解决时间”“解决成本”“解决效率”。筛选后影响因素为9项,如图3所示。

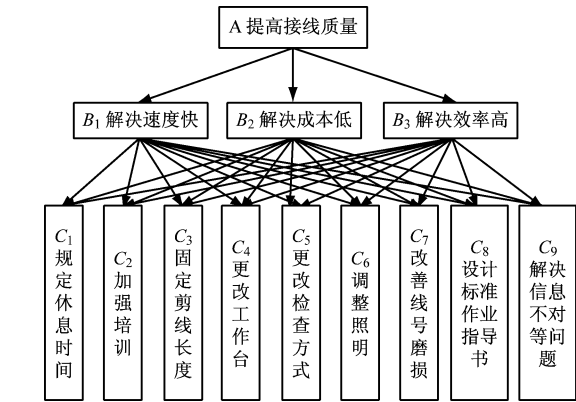


图3 接线质量层次分析结构图

4.2.2 构建判断矩阵及一致性检验

(1)构建判断矩阵。根据现场收集的数据,构建判断矩阵,逐个比较要素,按照从1到9的权重进行赋值。依照图3进行运算,得到的准则层判断矩阵如表1所示。

判断矩阵计算公式如下：

表1 接线质量准则层判断矩阵

A	B ₁	B ₂	B ₃
B ₁	1	2	1/3
B ₂	1/2	1	1/5
B ₃	3	5	1

$$W_i = (\prod_{j=1}^m a_{ij})^{\frac{1}{m}}$$

$$W_{i0} = \frac{W_i}{\sum_{i=1}^m W_i}$$

$$A_i = \sum_{j=1}^m a_{ij} W_i$$

$$\lambda_{mi} = \frac{A_i}{W_i}$$

式中：

a_{ij} ——第*i*行第*j*列的值；

m ——判断矩阵项数。

根据判断矩阵公式计算 λ_{\max} ,从而进行一致性检验,代入表1数据计算后所得结果如下：

$$W_1 = 0.873\ 6, W_2 = 0.464\ 2, W_3 = 2.466\ 2;$$

$$W_{10} = 0.299\ 7, W_{20} = 0.122\ 0, W_{30} = 0.648\ 3;$$

$$A_1 = 2.462\ 1, A_2 = 1.392\ 4, A_3 = 7.408\ 0;$$

$$\lambda_{m1} = 3.003\ 8, \lambda_{m2} = 2.999\ 6, \lambda_{m3} = 3.003\ 8;$$

$$\text{最大特征值 } \lambda_{\max} \approx \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{A_i}{W_i} =$$

$$\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{\sum_{j=1}^m a_{ij} W_j}{W_i} = 3.002\ 4$$

(2)一致性检验。一致性检验指标计算式为：

$$I_c = \frac{\lambda_{\max} - m}{m - 1}$$

计算结果为:

$I_C = 0.001\ 2\ (m = 3)$

平均随机一致性指标 $I_R = 0.52$ (查表可得)

一致性比例 $R_C = I_C/I_R = 0.002\ 3 < 0.1$

$R_C < 0.1$ 表示满足一致性检验。

4.2.3 确定准则层权重及一致性检验

(1)速度权重。由图3可知, B_1 为“解决速度因素”, C_i 为第*i*种影响因素的替代符号。从准则层3个因素得出的9个影响因素的重要度排序如表2所示。

表2 影响因素在速度方面权重

B_1	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9
C_1	1	4	1/2	2	3	5	7	2	6
C_2	1/4	1	1/5	1/3	1/2	2	3	1/2	2
C_3	2	5	1	2	4	5	7	3	6
C_4	1/2	3	1/2	1	2	4	6	2	5
C_5	1/3	2	1/4	1/2	1	2	3	1/2	2
C_6	1/5	1/2	1/5	1/4	1/2	1	2	1/3	2
C_7	1/7	1/3	1/7	1/6	1/3	1/2	1	3	1/2
C_8	1/2	2	1/3	1/2	2	3	1/3	1	4
C_9	1/6	1/2	1/6	1/5	1/2	1/2	2	1/4	1

由表2 计算得出的速度方面权重为:0.217 6; 0.060 5; 0.281 1; 0.162 3; 0.078 1; 0.044 7; 0.034 3; 0.087 1; 0.034 3。一致性检验结果如下:

$\lambda_{\max} = 9.999\ 3\ (m = 9)$

$I_R = 1.46$ (查表可得), $I_C = 0.124\ 9$

$R_C = I_C/I_R = 0.085\ 5 < 0.1$

(2)成本权重。同理计算得出的成本权重为: 0.208 1; 0.082 1; 0.154; 0.058 8; 0.114 5; 0.042 7; 0.031 9; 0.283 8; 0.024 1。一致性检验结果如下:

$\lambda_{\max} = 9.224\ 9\ (m = 9)$

$I_R = 1.46$ (查表可得), $I_C = 0.028\ 1$

$R_C = I_C/I_R = 0.019\ 2 < 0.1$

(3)效率权重。同理计算得出的效率权重为: 0.207 7; 0.116 7; 0.025 5; 0.278 3; 0.044 4; 0.034 5; 0.083 6; 0.153 8; 0.06。一致性检验结果如下:

$\lambda_{\max} = 9.268\ 7\ (m = 9)$

$I_R = 1.46$ (查表可得), $I_C = 0.033\ 6$

$R_C = I_C/I_R = 0.023 < 0.1$

4.2.4 建立因素矩阵

建立综合评价模型,评价准则有3个($m = 3$), 评价因素有9个($n = 9$),接线效率特征矩阵为:

$$T_k = \begin{bmatrix} T_{k1} \\ T_{k2} \\ T_{k3} \end{bmatrix}$$

$X = \{e_1\ e_2\ e_3\} = \{0.229\ 7\ 0.122\ 0\ 0.648\ 3\}$

4.2.5 计算关联系数和关联度

关联系数 $\varepsilon_0(j) = \frac{\Delta_{\max} - \rho\Delta_{\max}}{\Delta_{0_i}(j) + \rho\Delta_{\max}}$

关联度 $r_{0_i} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \varepsilon_0(j)\ (j = 1, 2, \cdots, m)$

式中:

ρ ——关联指数。

(1)对指标进行标准化处理

$X_1 = \{0.354\ 3\ 0.531\ 1\ 1.000\ 0\}$

$T_{k1} = \{0.217\ 6\ 0.208\ 1\ 0.207\ 7\}$

\vdots

$T_{k9} = \{0.034\ 3\ 0.024\ 1\ 0.060\ 0\}$

(2)求差序列

$\Delta T_{k1} = \{0.136\ 7\ 0.323\ 0\ 0.792\ 3\}$

\vdots

$\Delta T_{k9} = \{0.320\ 0\ 0.507\ 0\ 0.940\ 0\}$

(3)两级最大差和最小差

$k_{1\max} = |X_I(k) - T_{k1}(k)| = 0.792\ 3$

\vdots

$k_{9\max} = |X_I(k) - T_{k9}(k)| = 0.320\ 0;$

$k_{1\min} = |X_I(k) - T_{k1}(k)| = 0.792\ 3;$

\vdots

$k_{9\min} = |X_I(k) - T_{k9}(k)| = 0.320\ 0$

所以, $\Delta_{\max} = 0.974\ 5, \Delta_{\min} = 0.073\ 2。$

(4)灰色关联系数计算。 ρ 应该在(0,1)内部, ρ 越小则越强,通常取0.5。

(5)灰色关联度。灰色关联度结果如表3所示。由表3可知: $C_4 > C_3 > C_1 > C_8 > C_5 > C_2 > C_6 > C_7 > C_9。$

表3 灰色关联度结果

C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9
0.575 5	0.562 3	0.575 7	0.576 3	0.563 1	0.559 6	0.559 5	0.571 1	0.559 1

5 改进方法

以发明问题解决理论 (TRIZ)^[6] 为指导,结合工业工程知识,提出低压箱接线过程改善的解决方法。

5.1 接线工作台改善

5.1.1 功能分析

接线工作台功能分析模型如图 4 所示。功能分析结果表明:座椅靠背对人作用不足;螺纹底座对螺纹杆作用不足;操作柜对图纸作用不足。

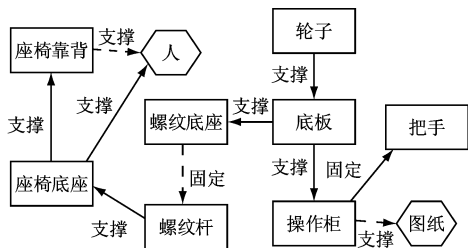


图 4 接线工作台功能分析模型图

5.1.2 座椅改进

(1)座椅高度:根据人体测量数据,座椅距底面的高度不应低于 40 cm,故应增加脚踏板。

(2)座椅深度宽度:取第 5 百分数的 3/4,按照人体测量尺寸应为 350 ~ 400 mm,宽度不应小于 400 mm。

(3)靠背:当前车间座椅采用中靠背,对腰椎没有起到良好的支撑作用,应采用全靠背设计;摇摆角度应是 95° ~ 110°;人体测量上半身(包含头部)平均为 690 ~ 700 mm,为保证头部支撑,靠背部分与头部总长设计为 750 mm,脖子处适当凸起,宽度方面取 410 mm。

(4)座椅面倾斜角:一般工作状态时倾斜角设计为 3°,休息为 5°以上,因此,倾斜角设置在工作和休息之间的 4°。

5.1.3 螺纹底座改进

螺纹伸长存在物理矛盾。当前采用的是嵌套方式^[7],采用液压与气压原理也可以解决高度问题。座椅与底部接触不牢产生晃动,适当增大螺纹接触面积能够有效的降低晃动。加长螺纹旋进长度,减小晃动。气压缸会受到温度与操作频率的影响,从安全角度考虑,应选择螺纹连接。

5.1.4 操作柜改进

(1)矛盾矩阵。希望支撑图纸的操作柜能够适应图纸不同的位置变化,但加大了操作柜结构的复杂性,产生技术矛盾。查找矛盾矩阵其中气压与液

压原理和机械系统替代原理,可以改进现有结构,实现高度转换。

(2)物质—场模型^[8]。由图 5 可见,场的作用力不足导致操作平台对图纸的支撑作用不足。通过采用一个容易控制的场代替一个不易控制的场^[9],即在当前的图纸和操作平台间引入另一个更易于操作的物质加强对图纸的控制。

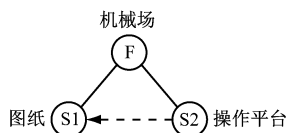


图 5 物质—场模型图

利用特性转移方法,考虑与当前系统有同样要求的学生书桌及置书架,可将其结构转移至操作柜上。操作柜结构采用铝合金或不锈钢材质,用螺纹连接,结构简单容易实现。连杆机构控制操作平面升高时,当低压箱位置在侧面且较低时,平台会与低压箱碰撞。由于操作平面的高度和角度的调节不灵活,因此采用夹具改善使之更便捷有效。

5.2 剪线长度

电线从扎线杆接入端子口时,接线箱空间狭小电线数量多,排列整齐有助于防止电线缠绕,便于后期检查。剪线长度不固定。

5.2.1 技术矛盾

接线过程中电线的预留长度相似,这有助于改善接线箱复杂性,但是会让操作过程变复杂。通过查找矛盾矩阵加以解决^[8]。

5.2.2 解决方案

将多余的电线剪至恰当长度,以此为衡量标准,可减少操作者考虑时间,且没有增加额外成本。

5.3 规定休息时间

5.3.1 计算能耗量

假设:人体身高为 1.7 m,体重 70 kg,基础代谢平均值为 157.5 kJ/(m² · h),能量代谢率为 3.5,最多连续工作 4 h。计算得出,仰视情况下平均能耗为 21.96 kJ/min,平视情况下平均能耗为 19.63 kJ/min。

5.3.2 计算休息时间

假设同前,计算得出:仰视情况下工作 19.3 min 后应休息 6 min,平视情况下工作 35 min 后应休息 6 min,并可适当调整。

(下转第 21 页)

参考文献

- [1] 关永久. 高速列车在隧道内会车过程的气动特性研究[D]. 成都:西南交通大学机械工程学院,2010.
- [2] 王秀珍,刘堂红. 时速350 km动车组过隧道气动效应分析[J]. 铁道科学与工程学报,2013,10(1):92.
- [3] 刘峰,姚松,张洁,等. 动车组横风环境下的交会气动效应[J]. 中南大学学报(自然科学版),2016,47(1):307.
- [4] 梅元贵,孙建成,许建林,等. 高速列车隧道交会压力波特性[J]. 交通运输工程学报,2015,15(5):34.
- [5] 章磊. 高速列车隧道通过气动性能研究[D]. 成都:西南交通

大学,2012:15.

- [6] 许建林,孙建成,梅元贵,等. 高速列车隧道内交会压力波基本特性数值模拟研究[J]. 振动与冲击,2016,35(3):184.
- [7] 张川宝,黄少东,范乐天,等. 高速列车设备舱压力特性分析[J]. 铁道车辆,2015,53(2):5.
- [8] 许良中,梁习锋,刘堂红,等. 单车明线工况下高速列车室内压力波动研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2014,45(8):2878.
- [9] 牛纪强,梁习锋,周丹,等. 动车组过隧道时设备舱气动效应动模型试验[J]. 浙江大学学报(工学版),2016,50(7):1258.

(收稿日期:2018-07-12)

(上接第12页)

消除噪声干扰的目的,由此提高轨道客车测速系统的可靠性和稳定性。

4 结语

本文采用基于卡尔曼滤波算法的数据融合技术,充分利用多种不同工作性质的速度检测数据,在线调整算法中各参数的权重,实现对轨道客车速度信息的最优估计。仿真验证结果表明,该技术能够得到真实可靠的轨道客车速度信息。

参考文献

- [1] 张陆军,梁双庆,周友佳. 车辆国产化轴端速度传感器的研发与应用[J]. 现代城市轨道交通,2016,29(3):6.

- [2] 杨蓉. 多普勒雷达测速系统设计及信号处理方法研究[D]. 武汉:华中科技大学 2012.
- [3] 杨翼,刘江,胡永兴. 基于北斗/INS 迭代卡尔曼滤波的列车完整性检测方法研究[J]. 铁道通信信号,2016,52(4):60.
- [4] 马军. 高速列车运行信息融合方法研究[D]. 兰州,兰州交通大学 2014.
- [5] 亓立敏. 基于多源信息融合的地铁列车速度位置检测系统研究与设计[D]. 兰州,兰州交通大学 2014.
- [6] 乔方博. 基于冗余技术的列车组定位方法研究[D]. 北京,北京交通大学,2018.
- [7] ZHAO H B, OUYANG R. Study on catenary current harmonic and traction characteristics of new type electric multiple unit [C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Electrical and Information Technologies for Rail Transportation. Changsha: China Electrotechnical Society,2017.

(收稿日期:2018-10-11)

(上接第16页)

6 结论

本文通过分析电气装配流程,确定了低压箱接线过程是薄弱环节;通过分析接线环节的过程能力,进行了过程能力判断;通过鱼骨图找到了影响接线质量的因素。利用层次与灰度分析相结合的方法对影响接线质量因素进行了重要度排序,运用 TRIZ 理论与工业工程相结合方法解决了问题。

本文得出了可以解决过程质量问题的通用方法:第一步,明确具体操作流程,根据实际情况找到问题环节;第二步,找出问题环节中对质量影响最大的操作过程,对其进行过程能力分析,判断是否需要改进,如需改进则执行第三步;第三步,搜集质量数据,使用质量分析工具得出影响质量的因素;第四步,根据需求使用评价方法对质量因素进行排列,得出解决问题的优先顺序;第五步,运用 TRIZ 理论与工业工程方法提出解决问题的措施。

参考文献

- [1] 贺经宇. 探讨轨道客车的装配工艺选装及改善措施[J]. 智能城市,2017,3(2):114.
- [2] 马明. 高压电气设备绝缘耐压技术探讨及试验[J]. 通讯世界,2015,11(22):65.
- [3] 田秀珍,朱德林,郭保良. 接线端子排在电控设备中的选用[J]. 电气传动,1997,10(2):58.
- [4] 朱勇杰,张为民. 基于鱼骨图和层次分析法的生产线高能耗原因分析[J]. 机械制造,2017,5(10):117.
- [5] 金书滨,潘海. 三种系统评价方法在交通项目综合评价中的对比研究[J]. 重庆交通学院学报,1998,8(2):66.
- [6] PHILIPP T, CHRISTINE G, RALF W. Integration of triz into quality function deployment[J]. Management and Production Engineering Review, 2015, 6(2):3.
- [7] 张付英,徐燕申,刘卉. 基于 TRIZ 物场变换法的液压活塞杆密封技术研究[J]. 润滑与密封,2005,4(5):57.
- [8] 米粮川,刘尚. TRIZ 创新理论的40个发明原理简析[J]. 科技创新与应用,2012(29):24.
- [9] 王晴,张明勤,全锦,等. 物质-场分析在产品创新设计中的应用[J]. 山东建筑大学学报,2014,29(6):590.

(收稿日期:2018-10-11)