

## 轨道交通车辆三维布线占空比算法研究

都青华<sup>1,2</sup> 周勇志<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学机械工程学院, 610031, 成都;

2. 中车长春轨道客车股份有限公司国家轨道客车工程研究中心, 130062, 长春)

**摘要** [目的] 随着高速列车、城际列车等轨道交通车辆的广泛应用, 其产品功能需求不断增加, 导致车辆电缆设计复杂度逐步提升。为实现线缆布线占空比的快速计算、分析与预警, 提升线缆设计与组装后的散热性能、电磁兼容性能等安全可靠性能, 特对轨道交通车辆三维布线占空比算法进行研究, 以期提升轨道交通车辆产品性能。[方法] 通过合并简化电缆分支, 计算合并后的等效直径, 并与线槽等布线空间容量进行比对分析, 确保三维布线的电气特性与布线空间的匹配性。同时, 建立了线槽和通道的标准化或参数化模型库及布线规范, 以实现线槽和通道的快速复用, 提升设计效率。[结果及结论] 通过三维布线占空比算法的研究与验证, 实现了占空比的自动计算和预警功能, 有效减少了设计错误, 缩短了设计周期, 提高了线缆布局的合理性和安全性。在占空比监测验证过程中, 关键路径节点的线缆占空比得到了实时计算与监测, 有效避免了电缆过载风险, 延长了电缆使用寿命。

**关键词** 轨道交通车辆; 三维布线; 布线容量占空比; 线槽容量; 等效截面积; 线缆分支合并

**中图分类号** U270.38

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2025.02.026

## Duty Cycle Algorithm for 3D Cable Routing in Rail Transit Vehicles

DU Qinghua<sup>1,2</sup>, ZHOU Yongzhi<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China; 2. National Engineering Research Center of Railway Vehicles, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China)

**Abstract** [Objective] With the widespread application of rail transit vehicles such as high-speed and intercity trains, the increasing functional demands for these products have led to greater complexity in cable design. To enable rapid calculation, analysis, and warning of cable routing duty cycles, and to improve the safety and reliability for heat dissipation and electromagnetic compatibility after cable design and assembly, a duty cycle algorithm for 3D cable routing in rail transit vehicles is investigated, aiming to enhance the product performance. [Method] Through merging-simplifying cable branches and calculating the equivalent diameter of the merged cables, the

results are compared and analyzed against the routing space capacity such as cable ducts, the compatibility between the electrical characteristics of 3D cable routing and the available space is ensured. Meanwhile, a standardized or parametrized model library of cable ducts and channels is established along with routing specifications, in order to facilitate quick reuse and improve design efficiency. [Result & Conclusion] The research and validation of the 3D cable routing duty cycle algorithm realize automated duty cycle calculation and early-warning functions, effectively reducing design errors, shortening the design cycle, and enhancing the rationality and safety of cable layouts. During duty cycle monitoring and validation process, the duty cycle of critical path nodes is calculated and monitored in real time, effectively mitigating cable overload risks and extending cable service life.

**Key words** rail transit vehicle; 3D cable routing; cable routing duty cycle; cable trunk capacity; equivalent cross-sectional area; cable branch merging

## 0 引言

在轨道交通车辆的三维布线设计流程中, 鉴于车辆线缆数量庞大、种类繁多, 且承载着多种电信号与电压等级, 其敷设路径与结构颇为复杂, 因此, 精确计算并实时预警线槽或通道中线缆容量的占空比显得尤为重要, 以确保线缆敷设与安装的可靠性。这一需求主要体现在以下 3 个方面:

1) 散热性能优化: 通过占空比计算, 避免线缆敷设过度密集, 从而确保同电压等级线缆的有效散热, 减少因高温引发的火灾风险、绝缘层老化问题, 延长线缆使用寿命。

2) 电磁兼容性保障: 确保线缆敷设的容量不超过线槽及通道等布线空间的容量上限, 防止线槽及通道电磁屏蔽结构发生形变, 避免不同电压等级线缆间的相互干扰, 确保电磁兼容性能。

3) 线缆安装有效性: 保证线缆在线槽及通道内的布线安装顺利进行, 避免线槽盖因线缆过多而发生形变或无法安装。

传统的占空比计算方式依赖于人工视觉检查与电缆截面积的手工测量,或仅基于二维工程图中的线缆与线槽横截面尺寸进行估算,这一过程高度依赖工程经验,效率低下,易遗漏,且不适用于复杂产品的三维电缆设计。对于线槽容量、线缆等效截面积以及容量占比的预警计算,其准确率也相对较低。

为提升轨道交通车辆布线设计的准确性与效率,需在三维布线功能应用的基础上,研究三维布线环境下的占空比计算方法,并将其集成至信息系统中,以解决传统方法在计算准确性与效率上的不足,从而确保线缆敷设在散热、电磁兼容、安装等多方面的综合性能。因此,开发一套基于三维电缆设计的高效、精确占空比计算模型与算法显得尤为重要。

## 1 计算规则制定

为构建有效的占空比计算模型与算法,需在车辆三维线缆模型构建完成后,明确占空比计算的总体规则,对线缆等效截面积、布线空间容量等关键要素进行标准化处理。

### 1.1 电缆分支的简化与合并

为快速计算各布线空间节点线缆的占空比,需对布线路径节点上的所有线缆进行简化与合并,作为等效截面积计算的前提条件。具体电缆合并原则如下:

1) 起点与终点一致:对于起点与终点均相同的电缆分支,即单一线束,直接进行合并。

2) 电气特性匹配:合并前后需确保电缆的电气特性(如电流承载能力、电压等级)满足设计要求。

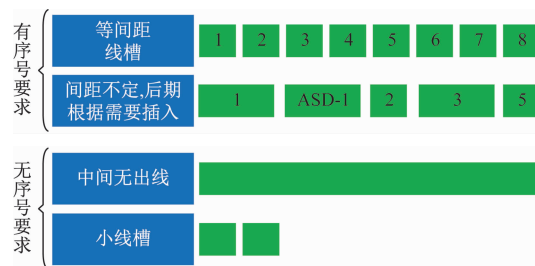
3) 物理尺寸计算:根据各电缆分支的直径,计算合并后的等效直径,以确保物理空间的布线可行性。

### 1.2 布线空间容量与类型划分

在三维电缆设计流程中,线缆需穿越多种线槽或通道等布线空间,此过程中必须遵循线槽或通道的容量规则进行布线。为实现线槽与通道容量的自动化计算,需在三维模型中明确设定线槽与通道的容量特性,涵盖其尺寸(长、宽、高)、容量阈值及关键路径点的标识代码。

此外,车辆线槽与通道主要划分为扎线杆、过线孔、底架型腔、单通道线槽及多通道线槽等类型。依据不同产品线缆的布局情况,需对线槽类型进行

细致分析与归类。结合线槽与通道的布线特征及其代号定义,可进一步细化为以下四类:等间距线槽、非等间距线槽、无出线口线槽及小型线槽(见图1)。



注:序号1~8为线槽进出线路节点序号;ASD-1为不固定间距线槽进出线路节点序号。

图1 线槽类型

Fig. 1 Cable trunk types

布线完成后,为实现路径节点信息的自动生成,基于上述不同线槽类型,需要构建一套标准化或参数化的布线通道模型库以及布线规则,可以有效提高线槽或通道的快速、高效复用。

## 2 算法与分析

### 2.1 电缆等效直径计算

#### 2.1.1 路径节点的获取

在三维环境下,可基于线槽模型等布线环境模型,来获取模型中“关键路径点”的参数模型,并根据布线设计规范确定各线槽模型中所包含的关键路径点的代号。线槽关键路径点代号识别规则如图2所示。

#### 2.1.2 关键路径点的等效电缆获取

基于关键路径点模型参数获取,进而识别关键路径点一定范围内的线束位置点,并识别通过该线束位置点所包含的线缆列表,对于已经完成合并简化的电缆,需要对合并简化前的电缆数量和直径进行信息还原,如图3所示。

#### 2.1.3 电缆等效截面积计算

由于电缆截面呈圆形,因此无法直接通过累加各电缆截面积来计算等效截面积。为解决此问题,需确定包含 $N$ 个不同直径圆的最小包围圆,并基于该最小圆的直径来计算等效截面积。

等效直径计算:采用数学模型计算多个电缆分支合并后的等效直径 $D_{eq}$ 。其计算式为:

$$D_{eq} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \pi D_i^2 / \pi}$$

式中:

$D_i$ ——第  $i$  根电缆的直径;

$N$ ——电缆数量。

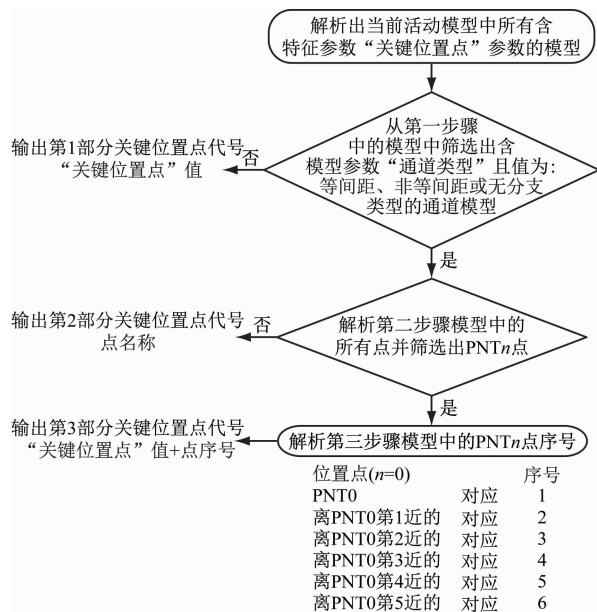


图2 线槽关键路径点代号识别规则

Fig. 2 Identification rules of key path point codes of cable trunks

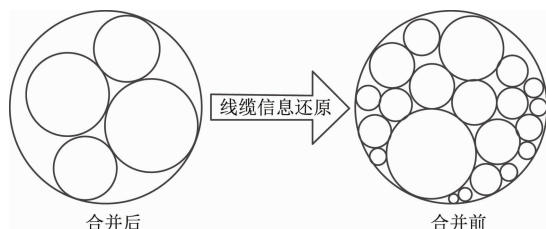


图3 电缆数量及信息还原

Fig. 3 Cable quantity and information restoration

#### 2.1.4 求解算法

最小包围圆问题在计算几何中是一个经典问题,其目标是找到一个最小直径的圆,使得该圆能够包含给定的一组对象。

可采用 Welzl 算法(一种高效的随机化算法)求解点集的最小包围圆。该算法的时间复杂度为  $O(N_1)$  ( $N_1$  表示所有求解点集的数量),适用于大规模数据集。基本思想是通过随机选取点并构建包含这些点的最小圆,逐步扩展到包含所有点。

Welzl 算法的核心步骤如下:

1) 初始化:从点集中随机选取一个点作为初始圆心,并设定其半径为 0。

2) 迭代:随机选择剩余的点,并检查它们是否已被当前的最小包围圆所覆盖。若未覆盖,则调整最小包围圆以包含新点。

3) 更新:若新点位于当前圆外,则更新圆心和半径,以确保新点被包含在内。

4) 终止:当所有点均被检查且无需添加新点时,算法终止;此时得到的圆即为所求的最小包围圆。

为将 Welzl 算法应用于包含不同直径圆的问题,需对算法进行适当扩展。具体而言,需将每个圆转换为其边界上的多个点,然后应用 Welzl 算法求解这些点的最小包围圆。

#### 2.1.5 算法描述

##### 2.1.5.1 圆的转换

为了将每个圆  $C_i$  转换为其边界上的若干点,通常选择在圆周上均匀分布的点进行表示。假设每个圆  $C_i$  被转换为  $k$  个点,则每个圆  $C_i$  将生成  $k$  个点  $P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{ik}$ 。

##### 2.1.5.2 应用 Welzl 算法

1) 初始化:将所有生成的点放入一个 points 列表中。

2) 随机化:对 points 列表进行随机打乱。

3) 递归调用:执行 Welzl 算法的递归函数 welzl (points, boundary\_points,  $n$ ),其中 boundary\_points 表示当前边界点的列表, $n$  是当前点的数量。

4) 终止条件:若  $n$  为 0 或 boundary\_points 的长度为 3,则返回当前的最小包围圆。

5) 迭代过程:随机选取一个点  $p$ ,将其从 points 中移除,并递归调用 welzl (points, boundary\_points,  $n-1$ )。

6) 检查与更新:若点  $p$  在当前的最小包围圆内部,则继续迭代;否则,将  $p$  添加到 boundary\_points 中,并重新递归调用 welzl (points, boundary\_points,  $n-1$ )。

##### 2.1.5.3 验证与分析

为验证算法的有效性,通过生成不同数量和直径的圆进行测试,具体验证设置如下:

1) 数据集构建:生成包含 100、500、1 000、5 000 和 10 000 个圆的数据集,圆的直径在 1 到 10 之间随机生成。

2) 验证指标确定:计算并比较最小包围圆的半径及算法的计算时间。试验结果如表 1 所示。

#### 2.2 占空比计算与监控

##### 2.2.1 占空比计算

占空比为电缆在某一位置点的等效截面积与该位置点所对应线槽容量的比值,其数学表达式为

表 1 试验结果列表

Tab.1 Experiment result list

圆的数量/个	最小包围圆半径/mm	计算时间/s
100	15.23	0.015
500	28.15	0.123
1 000	35.47	0.245
5 000	58.32	1.234
10 000	72.19	2.456

$K = (S/V) \times 100\%$ 。其中: $S$  为通过电缆位置点的

电缆等效截面积; $V$  为电缆位置点所在线槽的容量。

2.2.2 计算结果与状态监控

为了验证该方法的有效性,选取实际项目数据进行测试。在车辆三维电缆设计完成后,以布线关键路径节点作为参考,可以计算出通过该路径节点的占空比数值。同时,若计算得到的占空比  $K$  大于该路径节点所对应的容量阈值,系统将自动触发占空比阈值预警机制。车辆线槽占空比检测软件截图如图 4 所示。

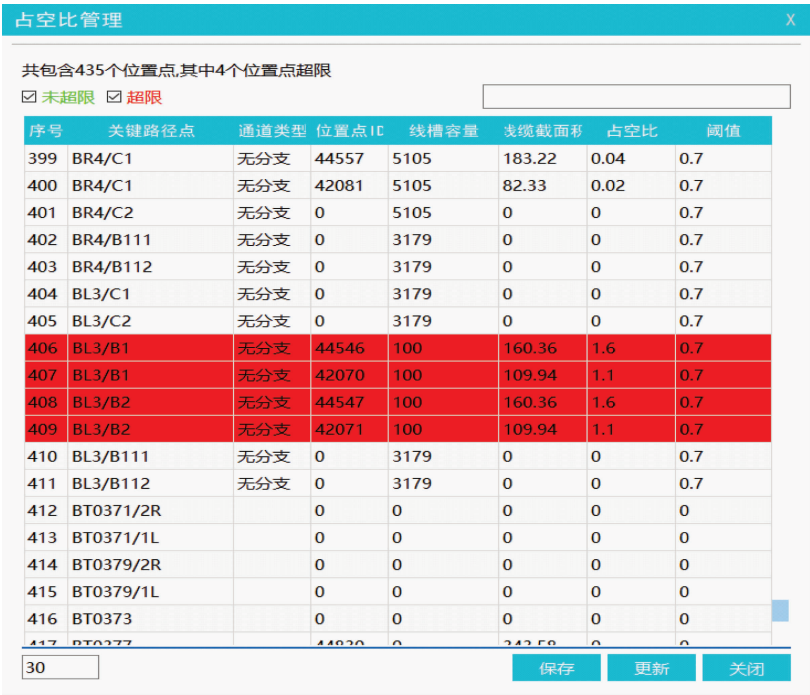


图 4 车辆线槽占空比检测软件截图

Fig.4 Screenshot of vehicle cable trunk duty cycle detection software

3 结语

通过深入研究,本文建立了占空比计算中的一系列关键计算规则与算法模型,涵盖了线缆分支合并的处理方法、线缆等效直径的计算、线槽容量与类型的评估等方面。这些规则与模型能够精确且高效地计算出任意布线路径节点处的线缆占空比数值。该研究成果对于优化线缆的散热性能、提升电磁兼容性能、确保安装可靠性等三维布线设计领域具有积极的推动作用和指导意义,有助于实现更高效、更可靠的线缆布局设计。

参考文献

[1] 陈伟,李明. 三维电缆设计与优化技术研究[J]. 机械工程学

报, 2020,56(1), 123.

CHEN Wei, LI Ming. Research on three-dimensional cable design and optimization technology [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2020,56 (1), 123.

[2] 张华, 王强. 基于 Welzl 算法的电缆等效直径计算[J]. 电子科技大学学报, 2019,48(3), 456.

ZHANG Hua, WANG Qiang. Calculation of cable equivalent diameter based on Welzl algorithm[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2019,48(3), 456.

• 收稿日期:2024-08-05 修回日期:2024-09-05 出版日期:2025-02-10  
Received:2024-08-05 Revised:2024-09-05 Published:2025-02-10  
• 通信作者:都青华,正高级工程师,duqinghua.ck@crrege.cc  
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license