

# 无线传感器网络数据传输延时分配算法

高翔霄, 俞达, 任月慧, 高玲玲, 徐丽

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

**摘要:** 为了提高箭载无线传感网络对火箭温度、冲击、热流等物理参数的处理能力, 需对所采集的数据进行自适应延时分配, 因此设计一种基于时隙窗口间隔均衡控制的无线传感器网络数据传输延时分配算法; 构建火箭温度、振动、冲击等参数的数据采集模型, 采用分布式网格均衡配置方法对无线传感器网络中的节点进行均衡部署; 结合最短路径寻优方法使数据采集过程中的信道分配达到均衡, 构建数据采集最短路径寻优控制模型, 采用输出比特序列重组方法进行数据采集过程中的传输延迟配置; 结合码元调节技术对数据传输进行自适应扩频调节, 利用时隙窗口间隔均衡控制方法实现无线传感器网络数据传输延时分配; 实验结果表明, 采用该方法进行无线传感器网络数据传输延时分配的自适应性较好, 输出稳定性较强、分配输出错误率低, 有效性更强。

**关键词:** 箭载无线传感器网络; 数据传输; 延时分配; 均衡部署; 时隙窗口间隔控制

## Delay Allocation Algorithm for Data Transmission in Wireless Sensor Networks

Gao Xiangxiao, Yu Da, Ren Yuehui, Gao Lingling, Xu Li

(Beijing Aerospace Systems Engineering Research Institute, Beijing 100076, China)

**Abstract:** In order to improve the ability of arrow borne wireless sensor network to process physical parameters such as rocket temperature, impact and heat flow, it is necessary to carry out adaptive delay allocation of collected data. Therefore, a data transmission delay allocation algorithm of wireless sensor network based on time-gap window interval balance control is designed. The data acquisition model of rocket temperature, vibration, impact and other parameters was constructed, and the nodes in wireless sensor network were balanced and deployed by distributed grid balanced configuration method. In combination with the shortest path optimization method, the channel allocation in the data acquisition process is balanced, and the optimal control model of the shortest path for data acquisition is constructed. Data transmission is adaptive spread spectrum adjustment based on symbol adjustment technology and data transmission delay allocation in wireless sensor network is realized by using time-gap window interval balance control method. The experimental results show that this method has good adaptability, strong output stability, low error rate and better effectiveness.

**Keywords:** arrow borne wireless sensor network; data transmission; delay allocation; balanced deployment; window spacing control

## 0 引言

随着无线传感器网络的快速发展, 利用无线传感器进行物理信息测量已被广泛地应用在物理探测、数据采集以及特征检测提取等方面。如在火箭箭载发动机等应用中, 采用无线传感器网络能有效实现对火箭温度、振动、冲击、热流、噪声、压力等方面的测量<sup>[1]</sup>。而其中应用到的传感器有热感传感器、振动传感器以及压力传感器等。因此结合无线传感器组网技术可有效实现对火箭发动机相关数据的采集。在进行无线传感器网络数据的采集和传输过程中, 由于受到网络传输时延和信道分布的影响, 导致对无线传感器网络数据传输的延迟较大<sup>[2]</sup>, 因此, 需要进行无线传感器网络数据传输的延时优化分配, 构建无线传感器网络数据传输信道均衡模型, 提高无线传感器网络的稳定性和

有效性。相关的无线传感器网络数据传输和延迟分配方法研究受到人们的极大关注。

目前, 已有专家学者在无线传感器网络数据传输延时分配领域提出了一些较为成熟的研究结果, 如基于关联规则传输的延时分配方法、基于统计分析的传输延时分配方法、基于模糊特征提取的传输延时分配方法等<sup>[3]</sup>。另外, 文献 [4] 中提出了一种基于分流优化选择的无线传感网络数据传输算法。该算法通过计算簇头节点与簇内节点的自感阈值来维持簇结构的稳定性, 根据实时的传输带宽分割传输数据流并完成时延寻优过程, 对最优时延分割后的数据子流进行传输。然而该算法在进行无线传感器网络数据传输延时分配时的模糊度较大、时间开销较大, 实时性不好。文献 [5] 中提出了一种基于混合拓扑的机械无线传感器网络多信道数据传输算法, 该方法对无线传感器网络节点进行最小化信道分配, 在完成数据采集后, 采用树间通信握手机制和树间通信优先级抢占机制避免传输过程中的互盲, 再将各节点的短地址作为调度信息载入信标中, 根

收稿日期: 2019-11-06; 修回日期: 2020-01-07。

作者简介: 高翔霄(1968-), 女, 北京人, 高级工程师, 主要从事运载火箭遥测系统总体设计方向的研究。

据调度信息决定数据的传输或者休眠。然而该算法在进行无线传感器网络传输信道均衡和延时分配的自适应性不好、错误率较高。

针对现有方法中存在的自适应性不好、错误率较高的问题, 设计一种基于时隙窗口间隔均衡控制的无线传感器网络数据传输延时分配算法。思路如下: 首先采用分布式网格均衡配置方法进行无线传感器网络节点的均衡部署, 然后采用输出比特序列重组方法进行无线传感器网络数据采集过程中的传输延迟配置, 结合码元调节技术进行无线传感器网络数据传输的自适应扩频调节, 基于时隙窗口间隔均衡控制方法实现无线传感器网络数据传输延时分配。

### 1 数据采集模型及节点均衡部署

无线传感器网络数据传输延时是指数据发送时刻与数据接收时刻的时间间隔, 对数据传输时延进行分析和分配需建立在对无线传感器网络信息传输过程分析的基础上。无线传感器网络信息传输过程如图 1 所示。

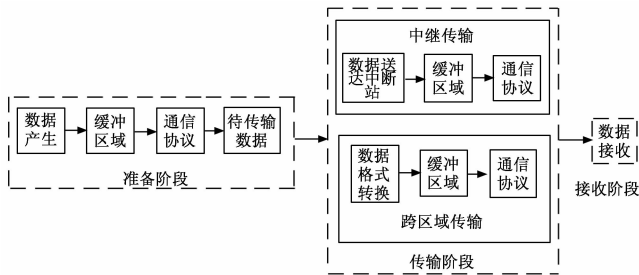


图 1 无线传感器网络信息传输过程示意图

1) 中继传输过程。在数据发送端与接收端之间无法直接完成信息互通时, 需通过中继传输的方式实现信息的传递, 即利用中间站点实现信息传输。中继传输过程包含两个阶段, 一是在发送端产生数据后将其传输至中继站, 二是由中继站将接收到的数据传输至接收终端。

2) 跨区域传输过程。由于不同区域的箭载无线传感网络是根据各自的应用需求建立的, 其中采用的通信协议、数据标准和格式均不相同, 因此, 相互之间难以实现直接的互联互通。当分属于不同无线传感网络的站点间需进行数据传输时, 需利用一个能够与这两个站点相互兼容的中间站点对数据格式进行转换, 使数据能够适用于不同的无线传感网络。

跨区域传输过程与中继传输过程的区别在于: 在中继传输过程中, 数据发送端与中间站点、中间站点与数据接收端之间共用同种通信协议, 而在跨区域传输过程中, 数据发送端与中间站点、中间站点与数据接收端之间, 因存在数据格式转换环节而使用不同的通信协议。

在分析无线传感器网络信息传输过程分析的基础上, 构建数据采集模型, 并对传感网络的节点进行均衡部署, 继而计算节点转发数据的跳距离, 以构建无线传感器网络数据传输的时隙窗口间隔均衡控制模型, 为数据传输延时

分配过程奠定基础。

#### 1.1 数据采集与配置

为了实现无线传感器网络数据传输延时分配, 需要首先构建无线传感器网络对火箭的温度、振动、冲击等参数的数据采集模型, 根据剩余能量、位置和端到端延迟进行无线传感器网络传输延时分配<sup>[6]</sup>, 得到无线传感器网络数据采集的量化特征分布集定义为  $D, D = \{d_i | S, T, U\}$ , 其中,  $S$  表示无线传感器网络传感器节点的能耗总和,  $T$  表示无线传感器网络的传输延时分配的输出量因素,  $U$  表示相似度模型。对无线传感器网络的传输数据进行自动配置, 设置配置模型为:

$$M = D \times \left( \frac{m - \epsilon}{m} \right) \times t \quad (1)$$

其中:  $m$  为无线传感器网络传输延时分配的互信息量;  $\epsilon$  为网络的带宽效率;  $t$  表示对无线传感器网络传输延时的时间窗口。从中提取无线传感器网络数据传输延时的模糊相关特征量, 根据特征谱进行无线传感器网络数据传输延时的自动分配, 得到数据传输延时的关联度特征值为:

$$C = \Delta \partial \left( \frac{T \times z}{M} \right) \quad (3)$$

其中:  $\Delta \partial$  为增益系数;  $T$  表示无线传感器网络的时间延迟,  $z$  表示为无线传感器网络进行传输时延分配的时间延迟和互信息特征量。在此基础上, 建立无线传感器网络输出采集模型, 实现对数据的快速、高效采集。数据采集节点的分布情况如图 2 所示。

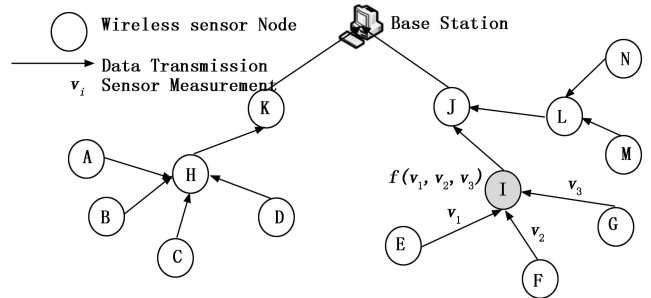


图 2 无线传感器网络的数据采集节点分布

在完成无线传感器网络数据采集之后, 需对数据进行配置管理。数据配置是指根据接收端的配置请求对数据进行必要的检查和处理的过程, 根据传输和应用的需要, 对数据进行补充、滤除、更改、存储、复制等处理, 配置后的数据一般有两份, 一份储存至后台数据库中, 另一份预留留给数据接收端。

#### 1.2 网络节点均衡部署

无线传感器网络是一种无线自组网络, 利用区域内的传感器节点组建成一个集数据采集和传递于一体的小型系统, 将数据从多个二级节点汇总到一个一级节点处。这一过程中, 距一级节点越近的二级节点需传递的数据量越多, 该二级节点处的负载量也就越大, 易造成能量空洞现象,

使无线传感网络的有效性和传输效率大大降低。因此，为避免这一现象的发生，需对无线传感器网络节点进行均衡部署。

无线传感器网络节点的均衡部署过程采用分布式网格均衡配置方法，并结合最短路径寻优方法进行无线传感器网络数据采集过程中的信道均衡分配<sup>[7]</sup>，建立无线传感器网络数据采集的特征分布模型。

在传感器的感测范围内，假设传感器的数目为  $n$ ，调整任意一个传感器的加权系数，得到无线传感网络数据传输过程的模糊聚类中心  $\mu$  为：

$$\mu = \{\mu_i \mid i = 1, 2, \dots, n\} \quad (4)$$

在关联规则引导下，得到无线传感器网络数据传输过程的模糊度函数为：

$$f = \sum_{l=0}^{\infty} (\mu + k) \quad (5)$$

其中： $k$  代表多传感节点主特征值， $l$  代表节点间距离。在此基础上，假设无线传感网络数据传输路径  $s$ ，首端节点和末端节点分别用  $q_1$  和  $q_2$  表示，传感器节点的阻抗为  $r$ ，则无线传感网络数据传输过程的能量损耗计算过程如下：

$$B = \frac{(q_2 - q_1)d}{r \times s} \quad (6)$$

其中： $d$  表示电网线路故障节点首端的距离。继而通过寻找其它邻居节点的特征分布集得到无线传感器网络传输延时分配的均衡部署模型：

$$V = \frac{f \sum_{i=1}^n (\mu_i)^m g}{L^2 B} \quad (7)$$

其中： $g$  为无线传感器网络传输延时分配的适应度函数， $L$  表示特征聚类中心与所测样本  $d_x$  的测度距离。根据上述分析，构建网络节点的均衡部署，提高网络数据传输延时分配能力<sup>[8]</sup>。

## 2 网络数据传输延时分配算法设计

### 2.1 时隙窗口间隔均衡控制

在上述构建无线传感器网络对火箭的温度、振动、冲击等参数的数据采集模型，并采用分布式网格均衡配置方法进行无线传感器网络节点的均衡部署的基础上，进行网络数据传输延时分配算法的设计。本研究提出基于时隙窗口间隔均衡控制的无线传感器网络数据传输延时分配算法，建立无线传感器网络进行数据采集和最短路径寻优控制模型<sup>[9]</sup>。

假设无线传感器网络传输延时分配的自适应加权重为  $\omega$ ，采用输出比特序列重组方法进行无线传感器网络数据采集过程中的传输延迟配置，传感器节点的分布特征序列为：

$$B = V \left( \sum_{i=1}^{\infty} r^i \mu_{r_i} \right) \omega \quad (8)$$

其中： $q$  为无线传感器网络数据传输延时分配的统计特

征值， $q = 1, 2, \dots, r$  代表节点通信半径。在此基础上，采用离散序列调度方法<sup>[10]</sup>对靠近汇聚节点的节点集合进行自动配置，得到无线传感器网络传输延时分配的时间窗口为：

$$E = B \left( 1 - \frac{t_a}{t_b} \right) \times h \quad (9)$$

其中： $t_a$  表示无线传感器网络数据传输的总次数， $t_b$  表示执行数据传输任务的额定传输总次数。在此基础上，在满足无线传感网络感测覆盖范围发条件下，对传感器采集数据的传输过程进行主动融合跟踪，并对节点转发数据的跳距离进行优化计算，过程如下：

$$G = \left( \frac{E}{v} + \eta \times \kappa \right) \times n \quad (10)$$

其中： $v$  表示融合参数， $\eta$  表示无线传感网络感测覆盖率， $\kappa$  表示任意一个传感器节点将信息传输至某一邻居节点的概率。继而采用时隙窗口间隔均衡控制方法<sup>[11]</sup>，得到传输延时分配的统计分布概率密度特征控制模型为：

$$W = G \times (V \times t_{n+1} - \gamma t_n) \quad (11)$$

其中：在  $t_{n+1}$  时刻和  $t_n$  时刻相差一个更新周期， $\gamma$  表示第  $t$  时刻数据信息传输量<sup>[12]</sup>。至此，实现无线传感器网络数据传输的时隙窗口间隔均衡控制模型的构建。

### 2.2 传输延时分配输出

在得到无线传感器网络数据传输的时隙窗口间隔均衡控制模型的基础上，采用输出比特序列重组方法对传输延迟进行配置。

首先，结合码元调节技术进行无线传感器网络数据传输的自适应扩频调节，得到扩频信道为：

$$I = \{i_j \mid j = 1, 2, \dots\} \quad (12)$$

其中： $j$  表示码元幅度。基于时隙窗口间隔均衡控制方法实现无线传感器网络数据传输延时控制，得到传输延时分配函数  $Z$  表述为：

$$Z = V d_x \times \frac{W}{I} - \alpha \quad (13)$$

其中： $\alpha$  表示数据平均等待时间。在此基础上，选择其中最短的数据转发路径进行信道延时配置。假设所要传输的数据在某一节点处的能量谱密度为  $\rho$ ，采用主成分分析方法进行网络的编码控制协议设计，得到输出编码特征量为：

$$A = Z \times p - \frac{W}{I} \times \rho \quad (14)$$

其中： $p$  表示汇聚节点的频率。对传输半径距离为  $R$  的节点进行传输延迟配置，在第  $E$  个时间窗口中，利用时隙窗口间隔均衡控制方法实现无线传感器网络数据传输延时分配，得到时隙分布结果如下：

$$H = \frac{A \times R - (\varphi + u)}{E} \quad (15)$$

其中： $\varphi$  为无线传感网络的解码延迟， $u$  为无线传感网络分簇节点的输出延迟。根据上述分析，实现了对无线传感器网络数据传输延时的分配。利用图片表示无线传感器网络数据传输延时分配模型，如图 3 所示。

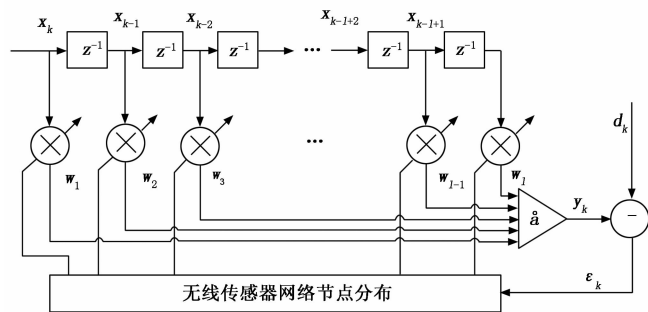


图 3 无线传感器网络数据传输延时分配模型

### 3 仿真实验与性能分析

为了测试本文设计的基于时隙窗口间隔均衡控制的无线传感器网络数据传输延时分配算法的实际应用性能, 设计如下仿真实验进行验证。

实验条件设置情况如下: 仿真实验在 Matlab 平台上进行, 无线传感器监控的覆盖节点区域为 1 000 mm × 1 000 mm, 无线传感器的载波频率为 7.48 kHz, 进行火箭温度、振动、冲击等参数的数据采集和传输的每分钟固定延时 1.6 ms。

根据上述实验环境的设定情况, 进行无线传感器网络数据传输延时分配算法的有效性检测。首先布置箭载无线传感器网络的数据传输节点, 得到传输节点分布如图 4 所示。

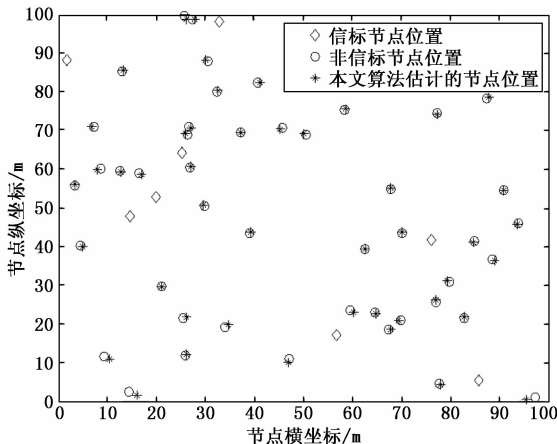


图 4 无线传感器网络的节点分布示意图

根据图 4 所示的节点分布情况进行无线传感器网络数据传输延时分配, 得到无线传感器网络数据传输时延估计值如图 5 所示。

分析图 5 可知, 基于时隙窗口间隔均衡控制的数据传输延时分配算法下的无线传感器网络数据传输时延估计值虽存在波动, 但其波动均围绕在实际值周围, 证明采用所提算法进行无线传感器网络数据传输延时的自适应性较好, 延时估计的精度较高。

为进一步测试基于时隙窗口间隔均衡控制的数据传输

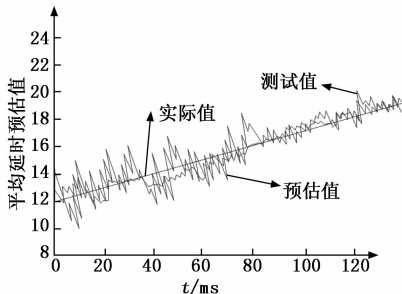


图 5 无线传感器网络数据传输延时估计

延时分配算法的有效性, 将分配输出错误率作为检测指标。为保证实验结果的说服力, 将该算法与文献 [4] 中的基于分流优化选择的无线传感网数据传输算法和文献 [5] 中的基于混合拓扑的机械无线传感器网络多信道数据传输算法进行性能对比。

测试不同算法进行数据传输延时分配时的分配输出错误率, 得到的对比结果如表 1 所示。

表 1 不同算法的分配输出错误率对比

迭代次数	所提算法	文献[4]算法	文献[5]算法
50	0.145	0.210	0.154
100	0.121	0.154	0.123
150	0.098	0.134	0.084
200	0.065	0.093	0.073
250	0.075	0.086	0.080
300	0.082	0.091	0.080

分析表 1 可知, 随着实验迭代次数的不断增加, 不同数据传输延时分配算法的输出错误率也在不断发生变化, 但均呈现出下降趋势。其中, 文献 [4] 算法的平均分配输出错误率的下降幅度最大, 但其分配输出错误率值低于所提算法。所提算法和文献 [5] 算法的平均分配输出错误率下降幅度相似, 但相对来说, 所提算法的分配输出错误率值更低。由对比结果可以证明采用所提算法进行无线传感器网络数据传输延时分配的准确性较高、误差较小, 有效性更强。

### 4 结语

对箭载无线传感器网络数据传输过程中的延时进行优化分配, 构建无线传感器网络数据传输信道均衡模型, 能够有效提高箭载无线传感器网络的稳定性, 有利于火箭的平稳运行。设计基于时隙窗口间隔均衡控制的无线传感器网络数据传输延时分配算法, 构建无线传感器网络对火箭的温度、振动、冲击等参数的数据采集模型, 对靠近汇聚节点的节点集合进行自动配置, 得到无线传感器网络传输延时的时间窗口, 建立无线传感器网络进行数据采集和最短路径寻优控制模型, 采用输出比特序列重组方法进行无线传感器网络数据采集过程中的传输延迟配置, 结合码元调节技术进行无线传感器网络数据传输的自适应扩频

调节, 采用时隙窗口间隔均衡控制方法实现无线传感器网络数据传输延时分配。经实验分析得知, 利用该算法进行无线传感器网络数据传输延时分配的自适应性较好, 分配错误率较低, 证明该算法具有明显的应用优势。

**参考文献:**

[1] 高 蕾, 胡玉鹏. WSN 中基于最小延时的数据汇集树构建与传输调度算法 [J]. 计算机科学, 2017, 44 (s1): 300-304.  
 [2] 张 刚, 徐联冰, 张天骐. 基于频分复用的无信号内干扰多用户相关延迟键控通信系统 [J]. 上海交通大学学报, 2019 (5): 575-583.  
 [3] 周业茂, 李忠金, 葛季栋, 等. 移动云计算中基于延时传输的多目标 workflow 调度 [J]. 软件学报, 2018, 29 (11): 72-91.  
 [4] 胡艳华, 唐新来, 韦 灵, 等. 基于分流优化选择的无线传感网数据传输算法 [J]. 计算机工程与设计, 2017, 38 (3): 595-600.  
 [5] 曾 超, 汤宝平, 邓 蕾, 等. 基于混合拓扑的机械无线传感器网络多信道数据传输方法 [J]. 振动与冲击, 2018, 37 (4): 28-34.

[6] 马 俊, 刘晨益. 基于节点拓扑感知-数据传输能力映射机制的无线传感网稳定传输算法 [J]. 河南理工大学学报: 自然科学版, 2017, 36 (3): 119-125.  
 [7] 王小林, 刘 敏, 徐 宏, 等. 一种移动互联网序列化数据的传输优化方法 [J]. 安徽工业大学学报 (自然科学版), 2017, 34 (1): 71-75.  
 [8] 彭 颖, 王高才, 王 淦. 移动网络中基于数据到达速率的数据传输能耗优化策略 [J]. 计算机科学, 2017, 44 (1): 117-122.  
 [9] 温怀玉, 霍伟东. 无线传感器网络流量重分配拥塞控制算法 [J]. 电子科技大学学报, 2017, 46 (2): 407-411.  
 [10] 杨 娜. 大数据分析下信息异常传输路径实时校正仿真 [J]. 计算机仿真, 2018, 35 (5): 195-198.  
 [11] 刘 宣, 刘志康, 徐啸飞, 等. 基于宽带载波技术的集抄系统中传输延时预测方法 [J]. 现代电子技术, 2018, 41 (6): 79-81.  
 [12] 张怀相, 魏 璇, 李腾非. 一种动态退避的无线传感器网络 MAC 协议 [J]. 杭州电子科技大学学报 (自然科学版), 2018, 38 (2): 50-55.

(上接第 240 页)

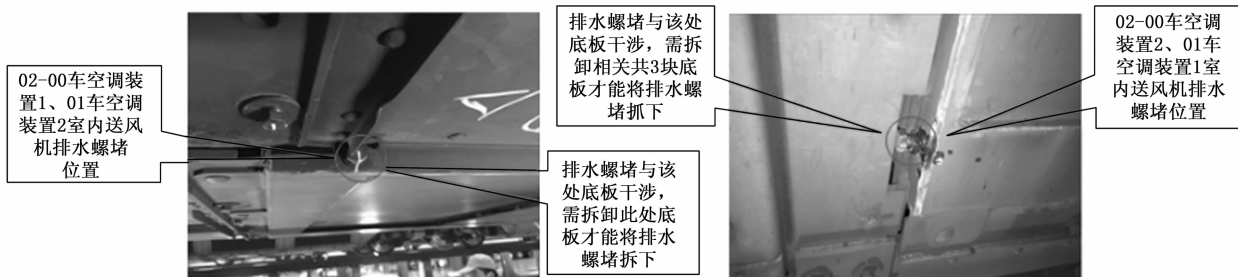


图 4 空调排水堵与结构干涉

经过设计改进, 该维修任务人工时由 2 小时降低至 0.5 小时, DMC 由 1 066.67 降低至 266.67 元/万公里, 空调系统运用过程预防性维修成本降低至 1 896.31 元/万公里, 满足分配指标要求, 通过设计优化解决了维修性差“初始设计缺陷”问题, 降低了车辆大批量投入使用后的车辆改型成本。

**4 结束语**

在轨道交通车辆设计早期, 通过构建合理的检修需求指标体系, 将直接维修成本和服务可靠性纳入车辆设计要求, 随着车辆设计深入, 通过检修需求预计与控制可发现车辆设计缺陷, 避免了车辆交付后因改型造成的成本浪费, 提高了车辆设计水平。在车辆使用阶段通过检修需求监控与反馈, 持续改进车辆设计, 提升了车辆维修性、可用性和经济性, 实现全寿命周期检修需求管理, 对提高车辆市场竞争力和用户满意度具有重要意义。

**参考文献:**

[1] 许迎杰, 管春玲. 新时速摆式动车组寿命周期成本技术和维修

性设计的应用 [J]. 铁道车辆, 2000, 38 (7): 10-13.

[2] 秦玲聪. 博客车用压缩机: 节能与环保并重—德国公交集团选择博客压缩机的理念剖析 (LCC 评估) [J]. 商用汽车, 2009 (6): 124-125.  
 [3] G. Grüber (奥), 王渤洪, 王秀丽. 奥地利联邦铁路机车车辆维修采用 LCC/RCM 方法 [J]. 国内外燃机车, 2006 (2): 41-47.  
 [4] ASD S3000L International procedure specification for Logistics Support Analysis (LSA) [S]. ASD, 2014.  
 [5] 王永生, 徐桂红. 基于 UNIFE 模型的铁路电气产品 LCC 分析的应用研究 [J]. 铁道机车车辆, 2014, 34 (4): 98-102.  
 [6] 王 莹, 王 勇, 徐志锋, 等. 民用飞机直接维修成本分析与控制技术 [J]. 航空维修与工程, 2014 (4): 103-106.  
 [7] 马小骏, 苏茂根, 王 勇, 等. 民用飞机直接维修成本分析与控制 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.  
 [8] Root cause analysis (IEC 62740) [S]. IEC, 2015.  
 [9] 任广强, 万国强, 刘 余, 等. 基于 RCM 的轨道交通车辆计划维修任务确定方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (2): 246-251.