

<http://bhxb.buaa.edu.cn> jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0427

线束拓扑图纸快速签收方法

雷璐¹, 吴明宇¹, 郭智博¹, 乔晓利^{1,2,*}

(1. 长春理工大学机电工程学院, 长春 130022; 2. 长春理工大学重庆研究院, 重庆 401135)

摘要: 针对人工校验签收线束拓扑图纸效率低、失误率高且不能适应智能化生产的问题, 提出了基于图文法和谓词逻辑的线束拓扑图纸快速签收方法。该方法主要由图重构和图解析组成。图重构过程中, 为使图结构能更好反映图纸数据, 引入谓词逻辑对图资源进行提取, 将拓扑图重构为标准图。图解析包含图语法分析器和图语义分析器。图语法分析器使用图文法归约算法对图结构进行识别解析, 判断设计过程中是否出现图纸结构性错误, 实现制图逻辑检查; 图语义分析器应用归约判断重构后的图信息描述是否正确, 并参照信息唯一性准则, 将路径信息解析后与电线表比对, 完成轨迹信息匹配性检测。在此基础上开展了12组实物实验, 结果表明: 所提方法可以将线束拓扑图纸签收耗时从3 h降低为9 s, 且在此过程中未出现漏识别现象。

关键词: 线束拓扑图纸; 签收; 图文法; 谓词逻辑; 归约

中图分类号: TP391.7

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2025)09-3098-10

拓补图纸^[1]作为线束拓扑设计阶段和工艺设计阶段相互衔接的数据传递媒介, 承担了将线束电路原理设计、实际零部件选型及线束相关图纸绘制等信息输送至工艺设计人员的任务, 方便对方结合工艺规范绘制工装图版^[2]指导实际生产。设计单位下发拓补图纸到工艺设计部门, 对该图纸的审查和接收称为拓补数据签收^[3]。此过程中, 能否及时全面地发现拓补图纸中潜藏的问题, 对于保证工艺设计, 乃至生产和装配过程顺利进行至关重要。

根据文献^[4]总结的问题表征对于问题求解的重要性所述“问题表征说明了思维中问题的产生及呈现过程, 是问题解决的必要条件”, 在线束拓补图纸分析审签过程中同样如此。线束拓补图纸根据机载设备和飞机结构进行绘制, 表征的合理性毋庸置疑, 但其答案却不是显而易见的, 仅靠人眼定位线束与连接器, 并发现图纸中的全部问题^[5]十分困难。例如, 结点未连接、线束号重复等隐蔽性较强

的问题通过目视审查难以发现, 一旦流入工艺设计环节, 会严重影响产品的质量和可靠性。据调查发现, 电缆线路引发的故障占飞机空中故障的20%^[2], 且因线束对飞机各模块的重要性^[6], 易导致故障升级, 从而发生重大空难事故。

目前, 国内外对线束领域的研究主要集中在电气设计、电器件物理设计、产品数据管理、流程监控和质量控制等领域^[7-10], 对于线束拓补图纸签收技术的研究极为薄弱, 大多使用模式识别的方法, 基于深度优先^[11]或广度优先搜索^[12]对图纸路径解析, 极少开展以发现设计缺陷为目标的相关研究工作。

鉴于上述原因, 本文提出基于谓词逻辑^[13]和图文法^[14]的线束拓补图纸快速签收方法, 将拓补图纸抽象为图数据类型^[15], 采用谓词逻辑实现图重构, 结合图文法对拓补数据进行描述, 并通过图文法归约算法^[16]实现图纸规范性检查与轨迹信息匹配性

收稿日期: 2023-06-29; 录用日期: 2023-11-10; 网络出版时间: 2023-12-09 11:45

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20231208.1517.001

基金项目: 吉林省科技发展计划(20200401128GX); 重庆英才计划包干制项目(cstc2022ycjh-bgzxm0187)

*通信作者. E-mail: qiaoxiaoli@cust.edu.cn

引用格式: 雷璐, 吴明宇, 郭智博, 等. 线束拓补图纸快速签收方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51(9): 3098-3107.

LEI L, WU M Y, GUO Z B, et al. Fast sign-off method for wiring harness topology drawings[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51(9): 3098-3107 (in Chinese).

表1 谓词逻辑设计

Table 1 Predicate logic design

函数	参数	释义
Circle(V_i)	V_i 为点对象	V_i 为圆
Radius(V_i, R_0)	V_i 为点对象, R_0 为固定半径	V_i 半径为 R_0
Node(V_i)	V_i 为点对象	V_i 为结点
Line(E_i)	E_i 为边对象	边为直线
SamePoint(O_{V_i}, O_{V_j})	V_i, V_j 为点对象	两点重合
Outer(V_i)	V_i 为点对象	V_i 为外结点
Knee(V_i)	V_i 为点对象	V_i 为拐点
EquipInfoTable(g)	g 为图元	元素为设备信息表成员
PinHoleTable(g)	g 为图元	元素为针孔表成员
Text(g)	g 为图元	元素为文本
Table(g)	g 为图元	元素为表格
GreatThanNumber(m, N_0)	m 为数值, N_0 为常数	m 大于 N_0
EqualsNumber(m, N_0)	m 为数值, N_0 为常数	m 等于 N_0
NaturalNumber(t)	t 为文本对象	文本为自然数
SameChar(C_0, C_1)	C_0, C_1 为字符	两字符相同
Unique(t)	t 为文本对象	文本内容唯一存在

表2 过程函数设计

Table 2 Process function design

函数	参数	释义
ConnectedCount(V_i)	V_i 为点对象	获取点 V_i 相连边的数量
Dis(V_j, V_i)	V_j, V_i 为点对象	获取两者距离
Sub($g, 0, 1$)	g 为图元	获取首字母
Length(g)	g 为图元	获取元素长度
Min(d)	d 为两者距离	匹配距离最短元素
Identifier(g)	g 为图元	获取对应元素唯一标识码

4) 边提取规则。

$\text{Line}(E_i) \wedge \text{SamePoint}(P_{s_{E_i}}, V_{j_0}) \wedge \text{SamePoint}(P_{e_{E_i}}, V_{j_1})$
 释义: 若边 E_i 为直线, 起点 $P_{s_{E_i}}$ 与结点 V_{j_0} 重合, 终点 $P_{e_{E_i}}$ 与结点 V_{j_1} 重合, 则 E_i 为边。

2.2 属性提取

线束拓扑图中属性信息以文本的方式展现, 对其提取需要依据文本排列规则与对应长度设定, 完成设备属性、拐点属性、边属性和区号属性的解读。

1) 设备属性提取规则。

$\text{Text}(g) \wedge (\text{EquipInfoTable}(g) \vee \text{PinHoleTable}(g))$

释义: 若元素 g 为文本信息, 且为设备信息表或针孔信息表, 则 g 为设备属性。其中, “ \vee ” 为逻辑“或”运算符号。

2) 拐点属性提取规则。

$\text{Text}(g) \wedge \text{Table}(g) \wedge \text{SameChar}(\text{Sub}(g, 0, 1), C_0) \wedge \text{NaturalNumber}(\text{Sub}(g, 1, m-1)) \wedge \text{GreatThanNumber}(\text{Length}(g), 3)$

释义: 若元素 g 为文本信息, 长度为 m , 不为表格成员, 以固定首字母 C_0 开头, 其余部分为自然数, 长度大于 3, 则 g 为拐点属性。

3) 边属性提取规则。

$\text{Text}(g) \wedge \text{Table}(g) \wedge \text{NaturalNumber}(g)$

释义: 若元素 g 为文本信息, 不为表格成员, 整体为自然数, 则 g 为边属性。

4) 区号属性提取规则。

$\text{Text}(g) \wedge \text{Table}(g) \wedge \text{SameChar}(\text{Sub}(g, 0, 1), C_0) \wedge \text{NaturalNumber}(\text{Sub}(g, 1, m-1)) \wedge \text{EqualsNumber}(\text{Length}(g), 3)$

释义: 若元素 g 为文本信息, 不为表格成员, 以固定首字母 C_0 开头, 其余部分为自然数, 长度等于 3, 则 g 为区号属性。

2.3 信息匹配

信息匹配阶段通过建立图纸资源间内在逻辑关系, 完成图资源与属性一体化存储, 将线束拓朴示意图形式结构映射为标准图结构。图属一体化是指将特征图形与其对应的文本信息相互绑定。具体可分为设备属性与端头、拐点属性与拐点、边属性与边。

在该过程中, 遍历各结点、轨迹与文本信息, 依照匹配规则完成不同类型文本信息与特征图形的匹配。匹配完成后的文本信息以属性方式存储在特征图形的数据类中。

1) 设备属性匹配端头。

$\text{Outer}(V_i) \wedge \text{Min}(\text{Dis}(T_{E_{ij}}, V_i))$

释义: 若结点 V_i 为外结点, 将 V_i 与距离最近的设备属性表 $T_{E_{ij}}$ 匹配。

2) 拐点属性匹配拐点。

$\text{Knee}(V_i) \wedge \text{Min}(\text{Dis}(V_p, V_i))$

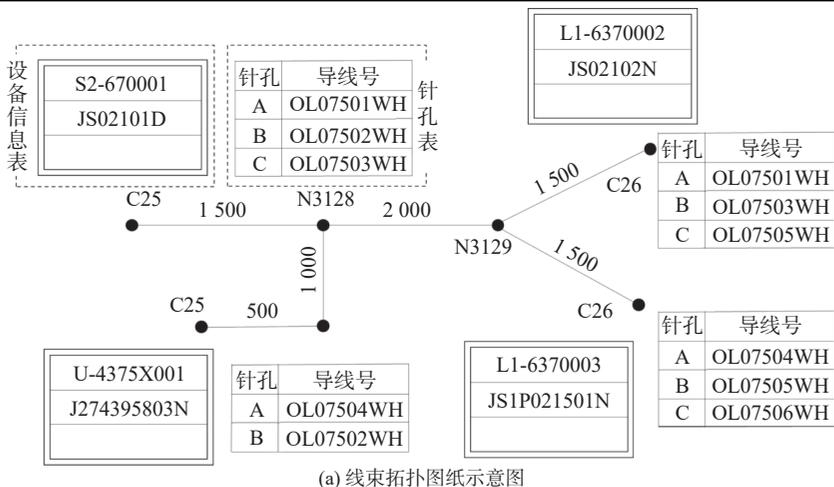
释义: 若结点 V_i 为拐点, 将 V_i 与距离最近的拐点 V_j 属性匹配。

3) 边属性匹配边。

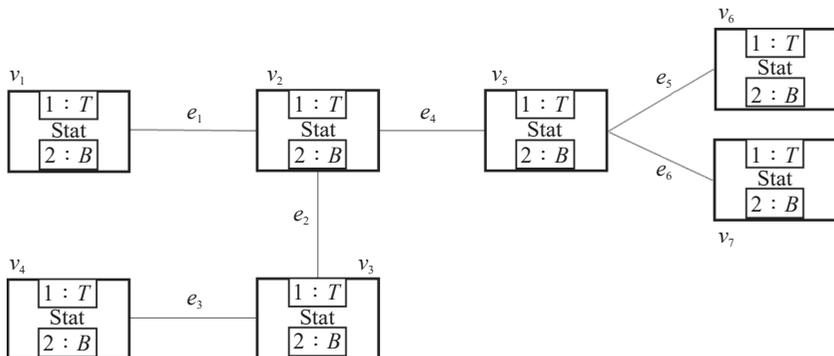
$\text{Min}(\text{Dis}(O_{E_j}, L_T))$

释义: 将 E_j 与距离轨迹中心 O_{E_j} 最近的边属性文本 L_T 匹配。

以图 2(a) 为例, 在图重构操作完成后, 线束拓朴图纸转换为如图 2(b) 所示的关系生长文法 (relation growth grammar, RGG) 框架^[22] 结构, 图内结点和边的特征标识分别用 v_1, v_2 和 e_1, e_2 等表示。下阶段图分析需依据其进行图结构和信息分析。



(a) 线束拓扑图图纸示意图



(b) 图重构后的 RGG 文法框架结果图

图 2 线束拓扑图图纸重构起始图-结果图

Fig. 2 Start diagram-result diagram of graph reconstruction of wiring harness topology drawing

3 基于图文法的图解析

线束拓扑图重构阶段主要关注特征图形分析和属性完备性分析, 未对图纸整体结构合法性与信息表述准确性进行检测。图解析负责图纸解析工作, 在图重构基础上实现线束拓扑图结构的进一步描述, 利用图文法归约算法针对图结构进行制图逻辑检查; 依据电线表中给出的设备导通数据检测图纸反映的拓扑关系, 对图结点中绑定的属性信息及电线表中提供的轨迹信息进行匹配性检测, 确定图纸设计的正确性。

3.1 图语法分析

图语法分析使用归约算法对图进行制图规范性检查, 可对结点悬空、电线悬空和电线成环 3 种结构性错误进行判断。

图 3 为一组 RGG 产生式集合, 产生式①左端 λ 为语法初始图, 右端为 2 个度为 1 的结点和 1 条连接它们的边; 产生式②左端为 2 个有边相连的结点, 右端将有边相连的右边结点又连接 1 个叶子结点, 即度为 1 的结点。

以图 2 为例, 利用图 3 的 RGG 产生式能够得到其归约过程。设该图用 G 表示, 按照式 (1) 对图 G 循环使用产生式②进行图归约, 式 (1) 中“*”表

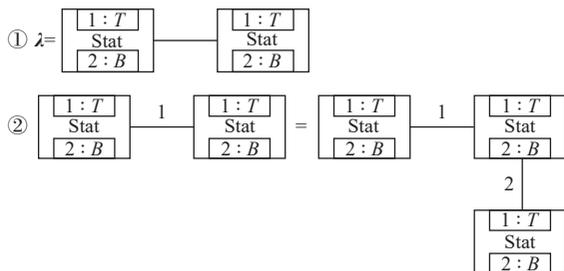


图 3 图文法 RGG 产生式集合

Fig. 3 Graph grammar RGG production set

示多次使用, 可得到产生式①右端所示图结构 G' 。最后, 执行式 (2) 将整张图归约为一个初始图 λ 。

$$G \Rightarrow *G' \tag{1}$$

$$G' \Rightarrow \lambda \tag{2}$$

该过程将图中叶子结点(即度为 1 的结点)和其连接的边全部消除, 具体如图 4 所示, 经 RGG 产生式集合作用将整张图归约完成。

图归约处理完成后, 上述 3 种错误情况分别对应如图 5 所示 3 种结果。

1) 生成初始图中有单个结点不与其他结点相连, 即图内包含悬结点。

2) 没有生成初始图 λ , 图内存在未连接结点的

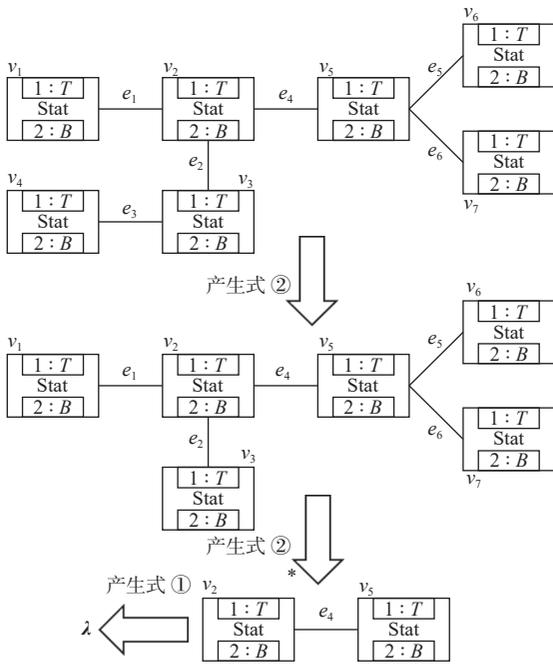


图4 图归约过程

Fig. 4 Graph reduction process

电线,即图内包含悬边。

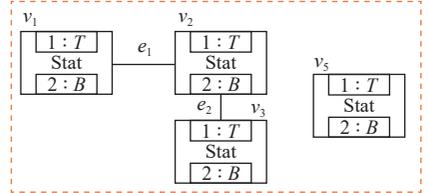
3) 没有生成初始图 λ ,而生成了由多点多线连接而成的环,说明线束拓扑图纸中存在环。

3.2 图语义分析

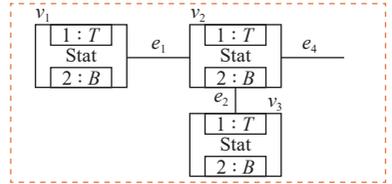
完成语法分析的结果图已经在结构上符合校验标准,但仍需通过语义分析进行轨迹信息匹配性检测,过程中须对以下3个制图准则进行校验:

- 1) 电线唯一准则:图中每根电线以线束号唯一标识身份,谓词逻辑描述为 $Unique(Identifier(wire))$ 。
- 2) 设备唯一准则:图中每台设备以设备号唯一标识身份,谓词逻辑描述为 $Unique(Identifier(device))$ 。
- 3) 针孔唯一准则:图中每个针孔以针孔号唯一标识身份,谓词逻辑描述为 $Unique(Identifier(pinhole))$ 。

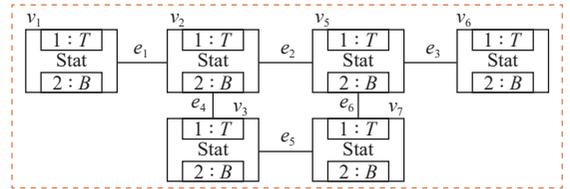
线束路径解析是对图纸绘制语义的解析。线束拓扑图纸描述了电连接器之间的连接关系,若在图的角度表示,则为两结点之间相互连通。在该阶段需要在电线表中取得每条电线两端电连接器设



(a) 结点悬空



(b) 电线悬空



(c) 电线成环

图5 归约完成的3种错误情况

Fig. 5 Three error situations for completion of reduction

备信息标识,在线束拓扑图中找出其对应的电连接器位置,判断图纸中它们之间能否获得一组线段相互连通,如图6加粗部分所示。

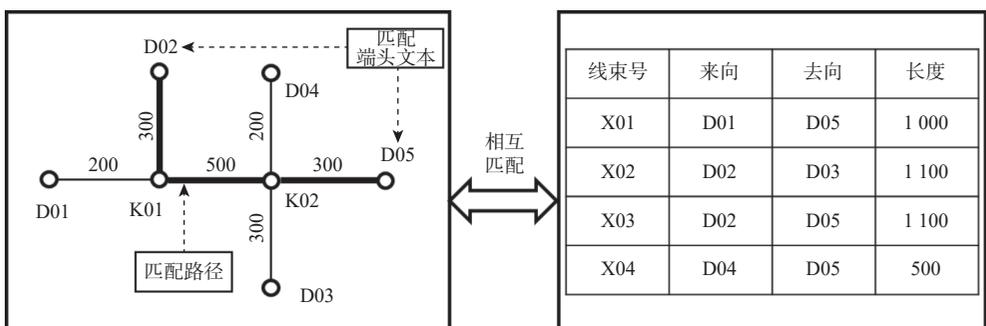
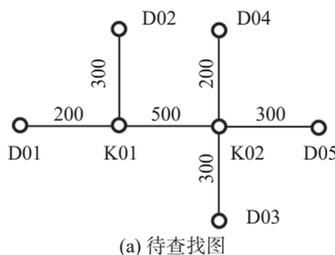


图6 线束路径解析

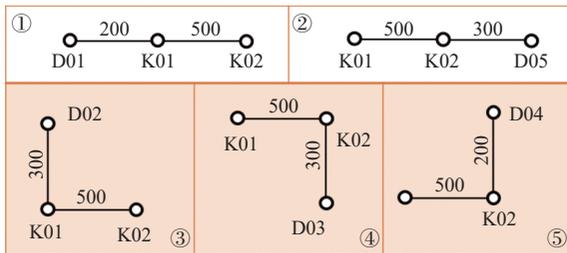
Fig. 6 Wiring harness path analysis

在进行图路线寻找中, 广度优先搜索和深度优先搜索为比较常用的方法, 但在线束路径搜索中均表现不佳, 主要是由于递归算法占用了过多的时间和空间资源, 导致线束路径识别缓慢。本文利用归约算法对线束正确性进行判定, 并在此方法基础上以结点属性信息为参考建立归约应用条件, 对正在操作的图柄进行判断, 若此图柄包含被选结点, 则不进行归约。归约完成后, 边集 E 中剩余的边即为线束两结点间的路径。

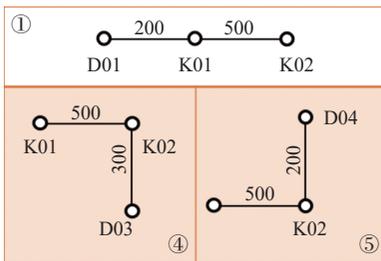
以图 6 为例, 若选中来向为 D02、去向为 D05 的路径, 其归约过程如图 7 所示。查找全部可归约图柄, 从中排除包含 D02 和 D05 的图柄, 应用式 (1) 进行归约。重复上述操作, 直至仅剩余包含所求结点的可归约图柄。进行归约操作得到所求结果图, 该图内边集 E 即为从结点 D02 到 D05 的路径。



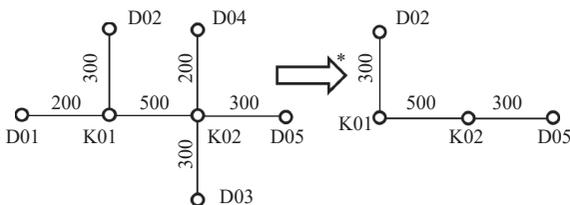
(a) 待查找图



(b) 获取全部可归约图柄



(c) 排除包含待查询结点的图柄



(d) 使用图柄进行归约

图 7 路径查找过程

Fig. 7 Path lookup process

图语法归约算法的时间复杂度和空间复杂度取决于算法的实现和问题的规模。 n 为图的节点数, e 为边数, 时间复杂度与图的大小和规则复杂

性相关, 线束拓扑图纸可通过提取与简化规则, 尽可能降低其时间复杂度, 本文方法时间复杂度为 $O(n \log_2 n)$ 。同时, 空间复杂度受算法中使用的数据结构影响, 考虑到存储图结构、规则和中间结果等信息, 空间复杂度为 $O(n+e)$ 。

4 实验

实验基于 Windows7 (64 bit) 操作系统, 利用 Teigha 控件进行 CAD 图纸图元数据提取及显示, 处理器为 i5-2430M@2.40 GHz×2, 内存为 8 GB, 固态硬盘容量为 512 GB。

采用某企业提供的线束拓扑图纸与电线表原始文件进行测试, 线束拓扑图纸内分别描述了 10~300 条不等的线束轨迹。依据图纸中边数, 划分为 4 种图纸: 小型、中型、大型和超大型, 边数 < 50 为小型; $50 \leq$ 边数 < 100 为中型; $100 \leq$ 边数 < 200 为大型; 边数 \geq 200 为超大型。

4.1 方案可行性分析

依据图重构设计内容进行实验, 记录数据如表 3 所示。

表 3 图重构过程耗时

Table 3 Time consumption of graph reconstruction process

实验编号	线束拓扑图纸边数/条	图重构时间/s
1	17	1.97
2	31	2.23
3	45	2.87
4	62	2.95
5	80	3.18
6	89	3.20
7	116	3.28
8	137	3.82
9	169	4.03
10	203	4.29
11	217	4.59
12	262	6.77

重构过程中, 对于拓扑图纸资源提取的方案可行性为 100%。提取耗时随图纸规模的增大而增加, 小型图纸平均时长为 2.36 s, 中型图纸平均时长为 3.11 s, 大型图纸平均时长为 3.71 s, 超大型图纸平均时长为 5.22 s。

依据图语法分析器设计内容, 记录数据如表 4 所示。

图语法分析过程中, 图语法分析器对于拓扑图纸制图逻辑检查的方案可行性为 100%。检查耗时随图纸规模的增大而增加, 小型图纸平均时长为 1.09 s, 中型图纸平均时长为 1.49 s, 大型图纸平均

表4 图语法分析结果

Table 4 Graph grammar analysis results

实验编号	线束拓扑图纸边数/条	制图逻辑检查时间/s
1	17	0.85
2	31	1.09
3	45	1.32
4	62	1.39
5	80	1.53
6	89	1.54
7	116	1.76
8	137	2.17
9	169	2.61
10	203	3.25
11	217	3.37
12	262	4.28

表6 签收效率

Table 6 Sign-off efficiency

实验编号	线束拓扑图纸边数/条	计算机判图总时长/s	人工判图总时长/h
1	17	3.01	1
2	31	5.53	1.2
3	45	6.95	1.5
4	62	7.28	2.1
5	80	7.88	2.7
6	89	8.00	2.8
7	116	8.38	3.1
8	137	9.75	3.9
9	169	10.53	4.5
10	203	11.82	6.1
11	217	12.87	6.2
12	262	17.60	6.7

时长为 2.18 s, 超大型图纸平均时长为 3.63 s。

依据图语义分析器设计内容, 记录数据如表 5 所示。

表5 图语义分析结果

Table 5 Graph semantic analysis results

实验编号	线束拓扑图纸边数/条	轨迹信息匹配性检查时间/s
1	17	0.19
2	31	2.21
3	45	2.76
4	62	2.94
5	80	3.17
6	89	3.26
7	116	3.34
8	137	3.76
9	169	3.89
10	203	4.28
11	217	4.91
12	262	6.55

图语义分析过程中, 图语义分析器对于拓扑图纸轨迹信息匹配性检查的方案可行性为 100%。检查耗时随图纸规模的增大而增加, 小型图纸平均时长为 1.72 s, 中型图纸平均时长为 3.12 s, 大型图纸平均时长为 3.66 s, 超大型图纸平均时长为 5.25 s。

4.2 签收优势对比

对于不同规模图纸, 记录计算机判图总时长与人工判图总时长, 如表 6 所示。根据表 6 数据绘制效率对比图, 如图 8 所示。

图纸签收效率平均提升率计算公式为

$$\begin{cases} \eta = t/e \\ P = (\eta_r - \eta_c)/\eta_c \end{cases} \quad (3)$$

式中: t 为所用时间; e 为图纸边数; η 为签收效率;

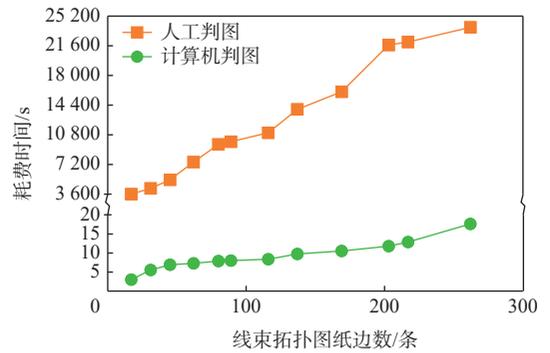


图8 签收效率对比

Fig. 8 Comparison of sign-off efficiency

η_r 、 η_c 分别为人工与计算机签收效率; P 为判图效率提升率。代入数据可得各种规模图纸判图效率提升率。小型图纸判图效率提升率 $P_s=91\ 706.17\%$, 中型图纸判图效率提升率 $P_m=117\ 632.14\%$, 大型图纸判图效率提升率 $P_l=143\ 573.46\%$, 超大型图纸判图效率提升率 $P_{xl}=165\ 319.61\%$, 总体平均判图效率提升率 $P=129\ 557.8\%$ 。应用此方案, 成功将签收时长量级从小时降到秒。

依据实验, 记录签收准确性数据, 如表 7 所示。根据表 7 数据绘制对比图, 如图 9 所示。比较计算机与人工判图失效次数, 小型图纸平均人工失效次数为 0.33 次, 中型图纸平均人工失效次数为 2 次, 大型图纸平均人工失效次数为 4 次, 超大型图纸平均人工失效次数为 8.33 次, 总体平均人工失效次数为 3.67 次。计算机判图签收准确率为 100%, 未出现漏判、错判现象。

4.3 数据分析

整体分析数据可知, 随着线束拓扑图纸规模增大, 轨迹逐渐增多, 签收方案中图重构、图语法分析与图语义分析耗时随之增加, 人工判图时间亦是如

表 7 签收准确性
Table 7 Sign-off accuracy

实验编号	线束拓扑 图纸边数/条	人工判图 失效次数	计算机判图 失效次数
1	17	0	0
2	31	1	0
3	45	0	0
4	62	2	0
5	80	0	0
6	89	4	0
7	116	3	0
8	137	5	0
9	169	4	0
10	203	7	0
11	217	6	0
12	262	12	0

设计了图语法分析器, 利用归约算法对图纸设计结构性错误进行判断, 完成制图逻辑检查; 最后, 根据线束拓扑图纸设计准则构造语义分析器, 进行线束路径解析, 与电线表中数据进行匹配性校验, 从而准确、快速判断图纸设计的正确性, 完成图版签收任务。

2) 通过实验数据验证说明了设计方案的可行性与可靠性, 展现出本文方法在应用中的高效率与高准确度。

目前, 方法设计实现主要基于线束设计规则, 对其他基础设计逻辑不同的拓扑图纸或新型的、未录入对应图纸设计准则的设计错误, 尚不能直接使用, 需消耗一定的时间成本将对应的设计逻辑和校验标准进行补充和完善, 未来将重点研究方法的通用性设计, 以提高其普适性。

参考文献 (References)

[1] 李伟, 闫静. 基于 CATIA 二次开发的线束设计数据提取和结构识别[J]. 电子元器件与信息技术, 2020, 4(1): 71-72.
LI W, YAN J. Data extraction and structure identification of wire harness design based on CATIA secondary development[J]. Electronic Component and Information Technology, 2020, 4(1): 71-72 (in Chinese).

[2] 王萍, 张晓茜, 罗苑琪. 面向工艺的飞机线束精准设计技术探索[J]. 航空计算技术, 2022, 52(6): 16-20.
WANG P, ZHANG X X, LUO Y Q. Process oriented precision design technology for aircraft harness[J]. Aeronautical Computing Technique, 2022, 52(6): 16-20(in Chinese).

[3] 王春阳. 航空线束产品三维全信息模型定义与应用研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2017: 73-82.
WANG C Y. Research on the definition and application of three-dimensional full information model of aviation wire harness products[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2017: 73-82 (in Chinese).

[4] LARKIN J H, SIMON H A. Why a diagram is (sometimes) worth ten thousand words[J]. Cognitive Science, 1987, 11(1): 65-100.

[5] 武鹏, 张一哲, 闻敬谦, 等. 面向航空线束的数字化制造关键问题探讨[J]. 航空制造技术, 2017, 60(14): 97-100.
WU P, ZHANG Y Z, WEN J Q, et al. Discussion on key issues of digital manufacturing for aircraft wire harness[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(14): 97-100(in Chinese).

[6] 王小辉, 朱丽, 车程, 等. 电气线路互联系统安全性设计与分析方法研究[J]. 西北工业大学学报, 2022, 40(3): 690-698.
WANG X H, ZHU L, CHE C, et al. Research on safety design and analysis method of electrical line interconnection system[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2022, 40(3): 690-698(in Chinese).

[7] 胡波, 赵猛, 卢山, 等. EWIS 数字化设计技术分析[J]. 飞机设计, 2019, 39(2): 56-59.
HU B, ZHAO M, LU S, et al. Analysis of EWIS digital design technology[J]. Aircraft Design, 2019, 39(2): 56-59(in Chinese).

[8] YANG S, TONG W, TIAN W. Liliun joins forces with GKN

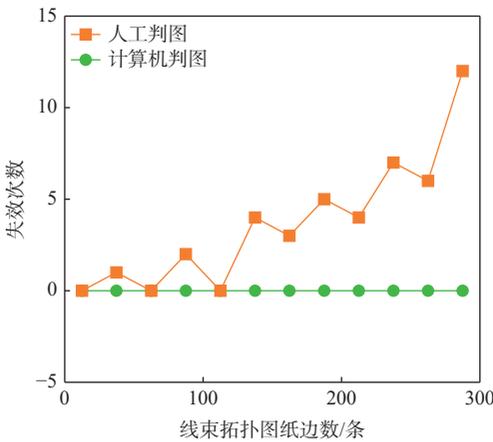


图 9 签收准确性对比

Fig. 9 Comparison of sign-off accuracy

此。且随着线束复杂程度不断上升, 人工判图漏判、误判等现象较为严重, 而计算机可以有效减小失误率, 提升签收数据准确性。进一步与现有的图纸自动识别和校验方法对比, 其较多关注拓扑图纸在传输过程中的改变, 通过提取原版图纸拉普拉斯矩阵特征值序列与现版对比得出结论, 其理论较为复杂, 工程背景不完全匹配, 致使复杂度较高; 本文签收方法基于校验规则, 流程相对简单, 易于实现, 对已知的线束设计错误识别准确且高效, 在时间复杂度和空间复杂度上也有独特的优势。

5 结论

1) 设计了基于谓词逻辑和 RGG 图文法的线束拓扑图纸快速签收方案。首先, 依据线束拓扑图纸资源表征规则, 使用谓词逻辑设计图重构, 以图元为基本单位进行图形、信息的提取与匹配; 然后, 基于图文法能够对二维图结构进行有效分析的特性,

- aerospace for lithium jet's electrical wiring interconnection system (EWIS)[EB/OL]. (2023-01-31)[2023-06-20]. <https://www.proquest.com/magazines/lilium-joins-forces-with-gkn-aerospace-jets/docview/2771207620/se-2>.
- [9] 石旭东, 张和茂, 赵宏旭, 等. 复杂线束在双BCI耦合下的终端响应机理[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(9): 1739-1747.
SHI X D, ZHANG H M, ZHAO H X, et al. Terminal response mechanism of complex wiring harness under double BCI coupling[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(9): 1739-1747(in Chinese).
- [10] SOHAIL M, PFEIFFER H, WEVERS M. Addressing safety concerns in hybrid electric aircrafts: in-flight icing detection, moisture detection in fuselage and electrical wiring and interconnect system (EWIS)[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2022, 1226(1): 012060.
- [11] NIKOLAEV S, ROMANOV O, NYSHCHUK A. Method of modified depth-first search in a graph for constructing all possible gray codes of a specified length[J]. Cybernetics and Systems Analysis, 2023, 59(3): 359-364.
- [12] PANAFIEU É. Analytic combinatorics of connected graphs[J]. Random Structures & Algorithms, 2019, 55(2): 427-495.
- [13] 乔晓利, 李林, 刘贡平, 等. 基于谓词逻辑的飞机线束工装图版设计[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(9): 1756-1764.
QIAO X L, LI L, LIU G P, et al. Predicate logic based tooling drawing design of aircraft harness[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(9): 1756-1764(in Chinese).
- [14] LIU Y F, YANG F. EGG+: a graph grammar formalism with uncertain structure processing mechanism[J]. Journal of Logic and Computation, 2021, 31(7): 1800-1819.
- [15] 郝国舜, 刘静华, 李士才. 基于对象的P&ID设计软件无向图模型[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(2): 122-126.
HAO G S, LIU J H, LI S C. Object-oriented undirected graph model in P & ID design system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(2): 122-126(in Chinese).
- [16] 邹阳, 吕建, 曹春, 等. 上下文相关图文法的表达能力分析[J]. 软件学报, 2012, 23(7): 1635-1655.
ZOU Y, LV J, CAO C, et al. Analysis of expressive ability of context-correlated grammar[J]. Journal of Software, 2012, 23(7): 1635-1655(in Chinese).
- [17] YE H C, SMITH R E, DHOLLANDER T, et al. Connectomes from streamlines tractography: assigning streamlines to brain parcellations is not trivial but highly consequential[J]. NeuroImage, 2019, 199: 160-171.
- [18] CLARK G J, THOMAZ F, STEPHEN A T. Comparing the principal eigenvector of a hypergraph and its shadows[J]. Linear Algebra and Its Applications, 2023, 673: 46-68.
- [19] REKERS J, SCHÜRR A. Defining and parsing visual languages with layered graph grammars[J]. Journal of Visual Languages & Computing, 1997, 8(1): 27-55.
- [20] KONG J, ZHANG K, DONG J, et al. Specifying behavioral semantics of UML diagrams through graph transformations[J]. Journal of Systems and Software, 2009, 82(2): 292-306.
- [21] 陈晋音, 黄国瀚, 张敦杰, 等. 一种面向图神经网络的图重构防御方法[J]. 计算机研究与发展, 2021, 58(5): 1075-1091.
CHEN J Y, HUANG G H, ZHANG D J, et al. A graph reconfiguration defense method for graph neural networks[J]. Computer Research and Development, 2021, 58(5): 1075-1091(in Chinese).
- [22] SHI Z Y, SUN Y Q, GU Y W, et al. The study about parsing of RGG grammar[J]. Advanced Materials Research, 2011, 204-210: 255-258.

Fast sign-off method for wiring harness topology drawings

LEI Lu¹, WU Mingyu¹, GUO Zhibo¹, QIAO Xiaoli^{1, 2, *}

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. Chongqing Research Institute of Changchun University of Science and Technology, Chongqing 401135, China)

Abstract: To address the low efficiency, the high error rate, and inability to adapt to intelligent production when wiring harness drawings are manually verified and signed off, this paper proposed a fast sign-off method for wiring harness topology drawings based on graph grammar and predicate logic. The method mainly consisted of two parts: graph reconstruction and graph parsing. In the process of graph reconstruction, to make the graph structure better reflect drawing data, predicate logic was introduced to extract graph resources, and the topology drawing was reconstructed into a standard graph. Graph parsing involved a graph grammar analyzer and a graph semantic analyzer. In the graph grammar analyzer, a graph grammar reduction algorithm was used to identify and analyze the graph structure, so as to judge whether there were structural errors in the drawing during the design process and to realize the logic check of the drawing. The graph semantic analyzer applied the reduction judgment to reconstructed graph information description and refers to the information uniqueness criterion for comparing the path information with the wire table after parsing to complete the matching detection of the trajectory information. On this basis, 12 groups of physical experiments were carried out. The experimental results show that this method can reduce the time required for signing off the wiring harness drawings from 3 hours to 9 seconds, and there is no missing recognition phenomenon in the process.

Keywords: wiring harness topology drawings; sign-off; graph grammar; predicate logic; reduction

Received: 2023-06-29; **Accepted:** 2023-11-10; **Published Online:** 2023-12-09 11:45

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20231208.1517.001

Foundation items: Science and Technology Development Plan of Jilin Province (20200401128GX); Chongqing Talent Plan Contract System Project (cstc2022ycjh-bgzxm0187)

* **Corresponding author.** E-mail: qiaoxiaoli@cust.edu.cn