

城市轨道交通车辆转向架构架组焊夹具 通用化结构方案设计

王大路

(中车长春轨道客车股份有限公司工程技术中心, 130062, 长春)

摘要 [目的]传统的城市轨道交通车辆转向架构架组焊夹具不能满足降低生产成本、简化操作难度、提高工艺装备利用率、节约场地空间等使用要求,需要采用更为合理的机械机构设计理念,优化夹具结构,形成通用化的结构设计方案。[方法]罗列了既有城市轨道交通车辆转向架构架的4种主要结构形式,总结出这些结构形式夹具的通用化设计原则。在确定定位基准面和止推定位基准面选择方案、明确夹具夹紧方式的基础上,对夹具的通用化结构方案(定位结构、夹具结构等)进行了优化设计。对滑动螺旋传动方式下的螺旋副的许用应力、螺纹的自锁性能、螺母和螺杆的强度、螺纹强度等进行了验算,最终形成优化后的夹具通用化设计方案。[结果及结论]该优化方案采用了自定位、可单人操作的设计结构模式,能够保证组焊部件变形尺寸均分,且能降低因焊接变形引起的不等焊接公差。

关键词 城市轨道交通; 车辆; 转向架构架; 组焊夹具; 结构设计方案; 通用化设计

中图分类号 U270.33

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.02.021

Generalized Structural Design Scheme for Bogie Frame Assembly Welding Fixtures in Urban Rail Transit Vehicles

WANG Dalu

(Engineering Technology Center, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China)

Abstract [Objective] Conventional assembly welding fixtures for vehicle bogie frames in urban rail transit do not meet the requirements for reducing production costs, simplifying operational difficulty, improving the utilization rate of process equipment, and saving space. It is necessary to adopt more reasonable mechanical design concepts to optimize fixture structures and develop a generalized structural design scheme. [Method] Four main structural types of existing bogie frames for urban rail transit vehicles are listed, and the general design principles for fixtures associated with these structures are summarized. Based on determining the selection of reference positioning planes and thrust positioning reference planes, and clar-

ifying the clamping method of the fixtures, the generalized structural design scheme (including positioning structure and clamping structure) is optimized. The allowable stress of the screw pair in the sliding screw drive, the self-locking performance of the thread, the strength of the nut and screw, and the thread strength are verified, resulting in an optimized generalized fixture design scheme. [Result & Conclusion] The optimized scheme adopts a self-positioning design structure that allows for single-person operation, ensuring even distribution of deformation dimensions in welded components and reducing unequal welding tolerances caused by welding deformation.

Key words urban rail transit; vehicle; bogie frame; assembly welding fixture; structural design scheme; generalized design

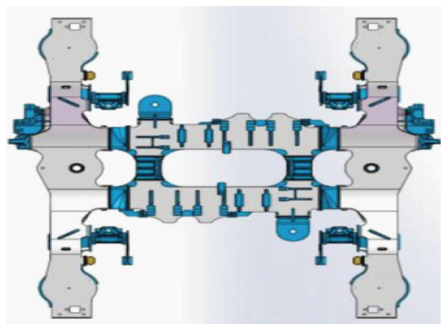
随着轨道交通车辆装备技术的快速发展,轨道交通车辆在车型、种类、数量等方面均持续增加。在保质保量生产的形势下,降低生产成本、简化操作难度、提高工艺装备利用率、节约场地空间等需求,成为轨道交通车辆设计新的创新点。本文通过对各类车型的系统分析,找出转向架构架组焊夹具结构的异同,重点关注传统夹具设计方案的优化,以给出车辆转向架构架组焊夹具的通用化结构设计方案。该优化方案为可自定位、可单人操作的设计结构模式,能够保证组焊部件变形尺寸均分,降低因焊接变形引起的不等焊接公差。

1 转向架构架的结构分析

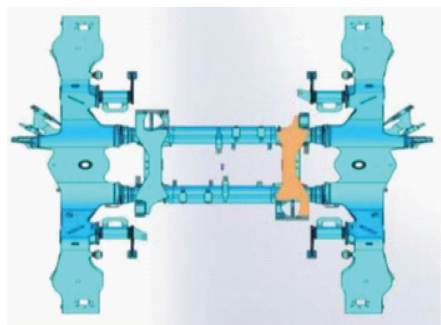
1.1 结构类型

转向架构架虽然类型较多,但主要分为4种结构形式:图1为高速轨道交通车辆转向架构架的2种结构形式,图2为中低速轨道交通车辆转向架构架的2种结构形式。

如图1、图2所示:这4种类型转向架虽然组成部件的种类和数量较多,但可以通过分步组焊的工



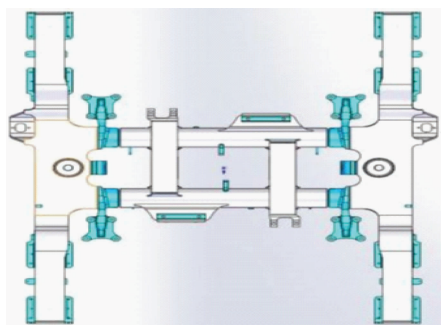
a) 箱式横梁构架



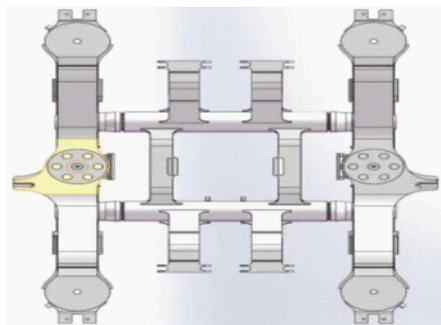
b) 管式横梁构架

图 1 高速轨道交通车辆转向架构架的 2 种结构形式

Fig. 1 Two structural forms of bogie frame for high-speed rail transit vehicles



a) 管式带吊耳横梁构架



b) 管式横梁插接构架

图 2 中低速轨道交通车辆转向架构架的 2 种结构形式

Fig. 2 Two structural forms of bogie frame for medium-low speed rail transit vehicles

艺方式来实现构架组焊;转向架构架主要由 2 个侧梁及 1 个中间横梁组成,通过插接或对接的方式组焊形成转向架构架。

1.2 通用化结构的设计原则

首先,必须使夹具满足工作性能的要求。根据性能要求确定装备的工作原理,选择机构和传动方式(如液压、气动、磁力、电力、机械等)。在此前提下,还应按照适用、经济、美观等原则来设计焊接工艺装备。

然后,在运动分析的基础上进行动力分析,确定机构各部分传递的功率、转矩和力的大小,再根据这些参数值及设备使用要求进行强度、刚度、发热、效率等方面的计算或校核。

另外,在考虑满足性能要求的同时,还应综合考虑设备的经济性,使设计出的装备成本低,动力消耗少,维修费用少。对设备的生产效率与装备经济性进行评估,计算式为:

$$A_j + W_j + F_j + J/n < A_0 + W_0 + F_0 \quad (1)$$

式中:

A_j ——采用装备后单件装配加工费用;

W_j ——采用装备后单件焊接加工费用;

F_j ——采用装备后单件机械加工费用;

A_0 ——未采用装备情况下的单件装配加工费用;

W_0 ——未采用装备情况下的单件焊接加工费用;

F_0 ——未采用装备情况下的单件机械加工费用;

J ——装备制造费用;

n ——采用装备制造的件数。

2 制定通用化结构设计方案

转向架构架组焊夹具通用化结构设计方案制定,是夹具设计过程中非常关键的一步。其定位基准、夹紧方式、机械结构的选择,将直接影响产品组焊的精度和效率。定位基准一经确定,夹具的其他组成部分也随之基本确定。由于横梁和侧梁在结构上有所不同,要满足同一夹具实现多种构架组焊的生产要求,需要考虑夹具结构的形式,夹具能在多个自由度方向上进行精确调节,满足因上道工序生产因素产生的多种公差调整要求,且在工序、人员工时、人工防错等方面尽可能提升操作的效率,降低经济成本。

2.1 定位基准面的选择

首先,应根据产品的技术要求及所需限制的自由度要求,确定好工件的定位基准面。一个被装配的零件(尤其是具有复杂结构或形状的工件)可供选择的定位基准面很多,以哪个表面作为定位基准面,不仅关系到定位质量,而且影响到整个装配和焊接的工艺流程及夹具结构方案设计。

一般情况下,应当选择零部件上窄而长的表面作为导向定位基准面,选择窄而短的表面作为止推定位基准面。当零部件表面上既有平面又有曲面时,优先选择平面作为主要定位基准面或组装基准面,尽量避免选择曲面,否则易造成夹具制造困难。如果所有面均为平面,则选择其中面积最大的平面作为主定位基准面或组装基准面。尽量利用零件上经过机械加工的表面或孔洞作为定位基准,或者沿用上一道工序的定位基准面,将其作为本道工序的定位基准面。

定义横梁管轴的轴向方向为 x 向,侧梁的长度方向为 y 向,侧梁中心销的轴线方向为 z 向。结合图1、图2的构架结构形式,选择定位基准面时,应满足六点定位基本原则,计算理论横梁与侧梁的 z 向中心高度,以侧梁组成下盖板的长大面作为 z 向的定位基准面。此外,还应考虑横梁箱式结构与管式结构的差异,以及小部件位置的不同,横梁 z 向采用长窄面支撑,以满足横梁中心结构的差异。

2.2 确定止推定位基准面和夹紧方式

选择窄而短的表面作为止推定位基准面。由图1、图2可知,横梁组成的中心区域是箱型结构。选择横梁管和纵梁,组成横梁止推基准面限制的5个自由度(即 x 向平移、 x 向转动、 y 向平移、 y 向转动及 z 向转动)。同理,对侧梁中心销进行定位,组成侧梁止推基准面限制的4个自由度(x 向平移、 x 向转动、 y 向平移及 y 向转动)。其余自由度可以通过夹具体的设计高度及夹紧方式来控制产品在夹具中的最终位置。

夹紧机构一般应满足的设计原则有:① 夹紧过程不能破坏工件在定位元件上的位置;② 夹紧力应保证工件位置在整个过程中不变,或确保工件不产生不允许的振动;③ 不能使工件产生过大的变形和表面损伤;④ 夹紧机构必须可靠;⑤ 夹紧机构各元件要具有足够的强度和刚度,手动夹紧机构必须保证自锁;⑥ 夹紧机构操作必须安全、省力,方便并符合工人操作习惯。

3 机械结构设计方案

3.1 定位机构的设计方案

侧梁区域选择下盖板进行定位,中心销利用短芯轴确定 x 向和 y 向的4个自由度。横梁区域选择横梁下盖板或横梁管进行定位,横梁的中心区域采用自定心装置,用于定位横梁 x 向和 y 向的4个自由度, z 向转动则通过顶紧装置调节侧梁与横梁在构架上的相对尺寸,利用夹紧机构限定 z 向的移动自由度,从而完成横梁区域、侧梁区域在夹具上的最终定位,并进行点焊固定。图3为定位机构的设计方案示意图。

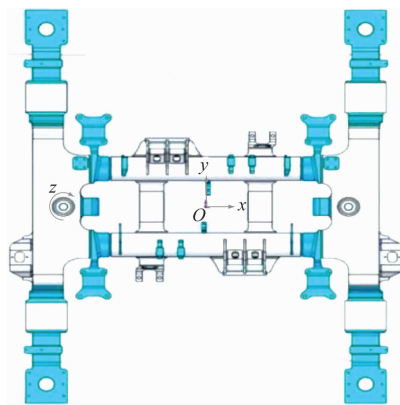


图3 定位机构设计方案示意图

Fig. 3 Diagram of positioning mechanism design scheme

传统的夹具结构不能满足降低生产成本、简化操作难度、提高工艺装备利用率、节约场地空间等需求,需要进行合理的机械机构设计,优化夹具结构。由图1、图2可知,转向架构架组焊主要由侧梁组成区域与横梁组成区域2个部分构成,优化夹具结构,主要是对这2个部分进行结构优化:

1) 侧梁组成区域:传统的夹具结构由于定位机构固定,无修磨空间,需要反复吊运侧梁,以完成横梁与侧梁对接口修磨工序。该工序耗时较长,且单人无法操作。优化时,可利用线性圆柱形滑轨精度高、承载能力大的特点,实现侧梁组成区域修磨空间的调整。

2) 横梁组成区域:定位机构不但需要满足多种尺寸的调节要求,还需要考虑上道工序焊后公差调整的要求及方便单人操作的需求。传统的夹具结构定位空间较小,定位元件经多次调节后其定位尺寸易出错。优化时,基于滑块连杆定位机构原理(见图4),利用滑块连杆机构实现 x 向、 y 向的联动

定位,以消除上道工序的偏心公差,保证本道及下道工序各部件的加工尺寸裕量。

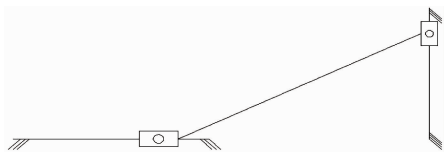


图4 滑块连杆定位机构原理图

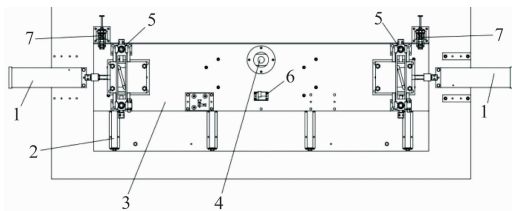
Fig.4 Diagram of positioning mechanism for slider and connecting rod

3) 实现公差自动均分,其前提是定位基准面与止推定位基准面的统一。优化时,利用横梁中心区域箱型结构的特点,在 x 向的正负方向、 y 向的正负方向上分别设计4个定位滑块,通过连杆将这4个滑块与中心滑块连接,中心滑块的上下移动带动4个滑块的上下移动,进而实现横梁组成区域的定位与顶紧。考虑到定位精度和锁紧力的要求,中心滑块采用螺旋传动机构,利用螺杆和螺母组成的螺旋副,通过连杆带动4个定位滑块联动。

3.2 夹具机构设计方案

3.2.1 侧梁定位夹紧机构设计方案

图5为侧梁定位夹紧机构设计方案。图5中:利用短芯轴限制侧梁4个方向的自由度(x 向的平移及转动、 y 向的平移及转动),侧梁定位夹紧装置限制2个方向的自由度(z 向的平移及转动),使侧梁在滑轨组成上实现精准定位夹紧。快速夹紧装置定位侧梁在构架中的 x 向最终位置。端部检测装置测量侧梁端部在构架中的扭曲公差,并微调侧梁在构架中的相对尺寸。



注:1—端部检测装置;2—滑轨组成;3—滑动面板;4—短芯轴;5—侧梁定位夹紧装置;6—侧梁限位块;7—快速夹紧装置。

图5 侧梁定位夹紧机构的设计方案示意图

Fig.5 Design scheme diagram of side beam positioning clamping mechanism

3.2.2 横梁定位夹紧机构设计方案

本设计方案以传递动力为主,要求以较小的转矩产生较大的轴向推力,用以克服工件阻力,满足工作时间短、工作速度较低、有一定自锁能力的需

求。螺旋传动按其螺旋副的摩擦性质不同,可分为滑动螺旋传动、滚动螺旋传动和静压螺旋传动3种类型,其中滑动螺旋传动的结构简单,便于制造,易于自锁,本设计方案选择滑动螺旋传动来实现动力传递。

滑动螺旋工作时,主要承受转矩及轴向拉力(或压力)的作用,其失效形式主要为螺纹磨损。考虑到滑动螺旋的自锁及耐磨特性,本设计方案使用梯形单线螺纹,螺杆和螺母均用材料40Cr钢(一种中碳低合金钢的类型)调质处理,以提高其耐磨性。

3.3 滑动螺旋传动的螺旋副设计参数计算

3.3.1 螺杆、螺母许用应力计算

根据文献[1]中的表3-1-8,查得40Cr钢的屈服强度 $\sigma_s = 540$ MPa。设 σ_p 为许用拉应力, σ_{bp} 为许用弯曲应力, τ_p 为许用切应力,根据文献[1]中的表12-1-10可知:

$$1) \frac{\sigma_s}{5} \leq \sigma_p \leq \frac{\sigma_s}{3}, \text{进而计算得到 } 108 \text{ MPa} \leq \sigma_p \leq$$

180 MPa,本文取 $\sigma_p = 140$ MPa。

$$2) \sigma_p \leq \sigma_{bp} \leq 1.2 \sigma_p, \text{进而计算可得 } 140 \text{ MPa} \leq \sigma_{bp} \leq 168 \text{ MPa,本文取 } \sigma_{bp} = 154 \text{ MPa。}$$

$$3) \tau_p = 0.6 \sigma_p, \text{进而计算可得 } \tau_p = 84 \text{ MPa。}$$

3.3.2 按耐磨性计算螺纹中径

根据文献[1]中的表12-1-9,螺杆、螺母的材料均为钢,且为手动低速使用场景,因此滑动螺旋传动的许用压强 $p_p = 13$ MPa。设螺杆工作轴向载荷 $F = 20$ kN,根据文献[1]中表12-1-4的式(1),整体式螺母常数 ψ 取值范围为1.2~2.5,本文取 $\psi = 2.2$,螺杆中径 d_2 计算式为 $d_2 = 0.8 \sqrt{F/(\psi p_p)}$,进而计算可得其理论值为21.16 mm。

根据文献[1]中表5-1-8、GB/T 5796.3—2022《梯形螺纹 第3部分:基本尺寸》,梯形螺纹的参数取分别为:螺杆大径 $d = 24.0$ mm,螺距 $P = 5$ mm,螺母大径 $D_4 = 24.5$ mm,螺杆小径 $d_3 = 18.5$ mm,螺母小径 $D_1 = 19.0$ mm,螺杆中径 $d_2 = 21.5$ mm,中等精度螺旋副标记为Tr24x5-7H/7e。由于螺母高度 $H = \psi d_2$,则螺纹圈数 $n = H/P = \psi d_2/P$,计算可得 $n = 9.46$ 。

3.3.3 螺纹的自锁性能验算

由于为单头螺纹,螺纹导程 $S = P = 5$ mm。根据GB/T 5796.1-4—2005和文献[1]中的表12-1-7,钢对钢的摩擦因数 $f = 0.15 \sim 0.17$,本文取 $f = 0.16$ 。梯形螺纹牙型角 $\alpha = 30^\circ$ 。螺纹升角 $\lambda =$

$\arctan S/(\pi d_2)$, 当量摩擦角 $\rho' = \arctan (f/\cos \frac{\alpha}{2})$,

进而计算可得 $\lambda = 4.23^\circ$, $\rho' = 9.40^\circ$ 。由于 $\lambda < \rho'$, 故梯形螺纹的自锁可靠。

3.3.4 螺母、螺杆强度验算

根据文献[1]中表 12-1-3, 螺纹摩擦力矩 $M_{\text{II}} = 0.5d_2F\tan(\lambda + \rho')$, 计算可得摩擦力矩 $M_{\text{II}} = 51.13$ kNm。根据文献[1]中表 12-1-4, 当量应力 $\sigma_{\text{ca}} =$

$\sqrt{\left(\frac{4F}{\pi d_3^2}\right)^2 + 3\left(\frac{M_{\text{II}}}{0.2d_3^3}\right)^2}$, 计算可得 $\sigma_{\text{ca}} = 89$ MPa。

由上文可知, $\sigma_p = 140$ MPa, 因此 $\sigma_{\text{ca}} < \sigma_p$, 且螺母与螺杆材质相同, 可以认为螺母、螺杆的强度验算均满足使用要求。

3.3.5 螺纹强度验算

根据文献[1]中的表 12-1-4, 牙根宽度 $b = 0.65P$, 基本牙型高 $H_1 = 0.5P$, 进而计算可得 $b = 3.25$ mm, $H_1 = 2.5$ mm。根据文献[1]中的表 12-1-4, 螺杆

螺纹剪切强度 $\tau_{\text{lg}} = \frac{F}{\pi d_3 b n}$, 弯曲强度 $\sigma_{b, \text{lg}} = \frac{3FH_1}{\pi d_3 b^2 n}$, 计算可得 $\tau_{\text{lg}} = 11.20$ MPa, $\sigma_{b, \text{lg}} = 25.80$ MPa。螺母

螺纹剪切强度 $\tau_{\text{lm}} = \frac{F}{\pi D_4 b n}$, $\sigma_{b, \text{lm}} = \frac{3FH_1}{\pi D_4 b^2 n}$, 计算可得 $\tau_{\text{lm}} = 8.45$ MPa, $\sigma_{b, \text{lm}} = 19.50$ MPa。这些数值与上文计算得到的 $\sigma_{\text{bp}} = 154$ MPa、 $\tau_p = 84$ MPa 相比, 螺母、螺杆螺纹的强度均满足使用要求。

3.4 优化后的构架组焊夹具设计方案

本文使用了推力球轴承, 以减少工作人员操作时所需施加的作用力。操作时, 只需要克服螺旋副的摩擦力, 就能操作机构运转, 实现力的传递。螺旋自定心装置设计方案示意图如图 6 所示。

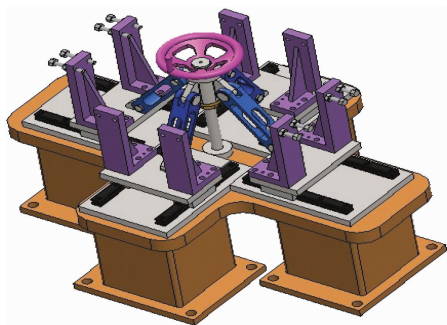


图 6 螺旋自定心装置设计方案示意图

Fig. 6 Diagram of spiral self-centering device design scheme

根据以上设计要点设计箱型夹具体, 增加中心基准及小部件定位夹紧机构, 最终完成夹具的整体设计。通用化的构架组焊夹具结构设计方案如图 7

所示。

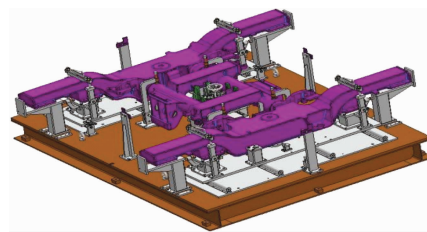


图 7 通用化的构架组焊夹具结构设计方案

Fig. 7 Generalized structure design scheme for frame assembly welding fixtures

4 结语

本文对传统的夹具结构进行了优化, 优化后的构架组焊夹具结构能够实现横梁自动定心、组焊公差均分、定位基准面与止推定位面统一等设计预期。采用本文设计的通用化的构架组焊夹具结构设计方案, 既能避免产品与夹具的干涉, 又能保证产品组焊后变形尺寸的均分, 降低因焊接变形引起的不等量焊接公差。随着科学技术水平的提高, 智能化、数字化、网络化是传统制造业的发展趋势, 城市轨道交通车辆运维对传统夹具的精度、效率、可靠性提出了更高的要求, 因此, 实现生产数据采集、工装夹具状态实时监控、元器件故障状态实时反馈等是下一阶段的研究方向。

参考文献

- [1] 成大先. 机械设计手册[M]. 6版. 北京: 化学工业出版社, 2016.
CHENG Daxian. Handbook of mechanical design[M]. 6th ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2016.
- [2] 濮良贵, 陈国定, 吴立言. 机械设计[M]. 10版. 北京: 高等教育出版社, 2019.
PU Lianggui, CHEN Guoding, WU Liyan. Machine design[M]. 10th ed. Beijing: Higher Education Press, 2019.
- [3] 刘拥军. 焊接工装设计[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2020.
LIU Yongjun. Welding fixture design[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2020.

· 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:王大路, 高级工程师, wangdalu.ck@crregc.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