文章编号:1005-0523(2023)05-0095-11

桥上Ⅱ型板式无砟轨道纵向力智能分析系统

张鹏飞[1],唐强强[1],吴必涛[1],涂文博[1],张可军[2],贾有权[3]

(1. 华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室,江西 南昌 330013;
2. 中铁二院工程集团有限责任公司,四川 成都 610031; 3. 中铁九局集团有限公司,辽宁 沈阳 110051)

摘要:为实现桥上Ⅱ型板式无砟轨道无缝线路纵向受力与变形分析的智能化,考虑了桥梁结构、轨道板以及钢轨之间的相互作用,利用有限元法建立了多跨简支梁和大跨度连续梁桥上CRTSⅡ型板式无砟轨道无缝线路精细化有限元模型;采用C#语言对ANSYS进行二次开发,研发了集参数输入、有限元建模、荷载施加、自动计算、数据提取及数据智能处理于一体的纵向力智能分析系统。通过与已有文献对比,验证了智能分析系统的通用性和可靠性,可为桥上Ⅱ型板式无砟轨道无缝线路的设计提供参考。

关键词:CRTSⅡ型板式无砟轨道;桥上无缝线路;有限元模型;纵向力分析系统

中图分类号:U213.9 **文献标志码**:A

本文引用格式:张鹏飞,唐强强,吴必涛,等. 桥上Ⅱ型板式无砟轨道纵向力智能分析系统[J]. 华东交通大学学报,2023,40(5):95-105.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2023.05.009

Intelligent Analysis System for Longitudinal Force of CRTSⅡ Slab Ballastless Track on Bridge

Zhang Pengfei[1], Tang Qiangqiang[1], Wu Bitao[1], Tu Wenbo[1], Zhang Kejun[2], Jia Youquan[3]

(1. State Key Laboratory of Performance Monitoring Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd, Chengdu 610031, China; 3. China Railway No.9 Group Co., Ltd., Shenyang 110051, China)

Abstract: In order to realize the intelligent analysis of longitudinal force and deformation of CRTSⅡ slab ballastless track CWR on bridge, this study considers the interaction between bridge structure, track slab and rail, and establishes a refined finite element model of CRTSⅡ slab ballastless track CWR on multi-span simply supported beam and long-span continuous beam bridge by using finite element method. The re-development of ANSYS is carried out by using C# language. An intelligent analysis system of longitudinal force is developed, which integrates parameter inputting, finite element modeling, loading application, automatic calculation, data extraction and intelligent data processing. The analysis system′s universality and reliability are confirmed through a comparison with previous research findings. The analysis system can provide reference for the design, operation and maintenance of typeⅡ slab ballastless track CWR on bridges.

Key words: CRTSⅡ slab ballastless track ; continuously welded rails on bridge ; finite element model ; longitudinal force analysis system

收稿日期:2023-09-17

基金项目:国家重点研发计划(2022YFB2602200);国家自然科学基金项目(52178425,52368063);2022年江西省科技专项(国家科技奖后备培育项目)(20223AEI91004);江西省高层次高技能领军人才培养工程项目(1600223003)

Citation format:ZHANG P F,TANG Q Q,WU B T,et al. Intelligent analysis system for longitudinal force of CRTSⅡ slab ballastless track on bridge[J]. Journal of East China Jiaotong University,2023,40(5):95-105.

近年来,桥上无砟轨道无缝线路以其高效、安全平稳、节约环保等诸多优点在高速铁路建设中得到广泛应用;我国Ⅱ型板式无砟轨道源于德国博格无砟轨道,其纵向连续结构决定了轨道的连续性优秀,所以CRTSⅡ型板式无砟轨道较早应用在京津城际、京沪高速等线路上。轨道连续性好意味着轨道平顺,但由于轨道内部温度变化或轨道承受列车荷载,桥上无砟轨道的钢轨会产生纵向力,此力通过梁、支座传递至墩台,将影响到线路稳定性以及行车的安全性。

国内外学者对桥上无缝线路受力变形问题进行了大量的研究,并取得了丰硕的成果。张鹏飞[1]对桥上CRTSⅡ板式无砟轨道无缝线路进行了研究,分析了断轨和断板条件对轨道结构受力与变形的影响规律;Rui等针对本四联络线上大桥的具体工程[2],阐述了该桥上无缝线路的设计原则和扣件阻力控制等情况;Sedarat等探讨了摩擦摆支座设置对桥梁轨相互作用的影响[3];蔡科[4]针对极寒条件下桥上CRTSⅢ型板式无砟轨道无缝线路的纵向受力特征进行了分析;王伟华[5]探究了弹性缓冲垫层刚度对无缝线路纵向受力变形的影响;张捍东[6]计算分析了不同荷载作用下大跨度桥上无砟轨道纵向力;Feng等[7]通过试验研究了利用钢轨振动频率评估有砟轨道钢轨纵向温度力的可能性。

在智能化计算、分析方面,国内外学者根据不同的功能需求编写了各类程序或研发了相关系统。Memon等[8]开发了一种新型嵌入式的铁路轨道状态监测原型系统用以实时检测和分类铁路轨道表面故障;Xu等[9]建立了一种新颖的三维列车-轨道相互作用模型,数值计算结果表明,该模型在列车-轨道相互作用计算中具有较高的效率、稳定性和准确性;Cai等[10]建立了CRTSⅡ板式轨道的三维有限元模型,研究了板式节点的成拱机理;谷思文[11]开发了铁路轨道测量数据处理与分析系统,该系统采用近似算法或严密算法计算轨道平顺性;时佳斌等[12]设计了基于分布式光纤的轨道变形监测系统;于威龙[13]设计并实现了可适用多种轨道车辆电器件的实时硬件采集、数据通信、可靠性测试与分析的系统;郭瀚飞等[14]针对传统随机振动分析计算成本过高的问题,开发了轨道车辆随机振动分析系统(RVRAP);刘鹏[15]把Fortran语言强大的计算功能和Visual Basic语言良好的可视化界面设计功能结合起来,开发了桥梁动力响应有限元计算程序系统;高梓航等[16]为准确获取大跨度铁路桥梁钢轨伸缩调节器服役状态,提升运维管养能效,设计了大跨度铁路桥梁钢轨伸缩调节器服役状态监测系统;Zhao等[17]利用MATLAB和ANSYS平台计算得到轨道和桥梁结构的振动响应,并将仿真结果与实测数据对比,证明了方法的准确性;雷晓燕等[18]充分考虑了轮轨非线性相互作用,在ANSYS计算平台上对非线性轮轨相互作用进行了编程和实现;孟宪金[19]开发了轮轨系统动力仿真计算平台并进行了验证;曾婵娟[20]编制了车桥耦合振动的FORTRAN程序,结果证明该程序可有效地分析高速车桥系统的动力学特性;吴有松[21]基于MFC平台开发出了一个具有良好的可视化人机交互界面的车桥分析程序;李永庆[22]开发了梁格法车-桥耦合振动分析程序;余志武等[23]以常导(EMS)磁浮列车通过三跨连续型轨道梁为例,基于MATLAB平台开发了能够计算车辆子系统和轨道梁子系统的动力响应及概率密度函数的程序;张高扬[24]在Bentley平台上进行二次开发,设计了能够完成区间及站场内高速铁路轨道BIM设计的程序;甘愿[25]基于显式有限元方法自主开发了专门处理非线性接触问题的分析程序;王凯等[26]建立了评估分析模型并进行了大数据分析,从而有效地掌握道岔转换设备的状态。

目前,桥上CRTSⅡ型板式无砟轨道无缝线路的纵向受力和变形分析尚未实现建立模型、加载荷载、自动提取数据和智能数据处理的一体化和集成化。本研究的关键目标是提高CRTSⅡ型板式无砟轨道无缝线路的纵向受力和变形分析的效率和准确性。为了实现这一目标,首先建立了多跨简支梁和大跨连续梁桥上的精细化有限元模型。这些模型考虑了桥梁结构、轨道板以及钢轨之间的相互作

用,从而更准确地模拟了实际工程中的情况。为了进一步提高分析的效率,使用 C# 语言对 ANSYS 进行了二次开发，研发了桥上 CRTSⅡ 型板式无砟轨道无缝线路纵向力智能分析系统，该系统能够智能地保存计算数据和结果，以便后续的数据处理和分析。这种集成化的方法不仅提高了分析的效率,还降低了人为错误的风险,确保了分析结果的准确性。

总之,本研究为 CRTSⅡ 型板式无砟轨道无缝线路的纵向受力和变形分析提供了一种先进的解决方案。利用智能分析系统能够更准确地理解和分析线路在桥梁上的行为,从而为工程设计和安全评估提供了有力支持。这一集成化的方法也为今后类似问题的研究提供了有益的参考和借鉴。

1　桥上Ⅱ型板式无砟轨道无缝线路精细化建模

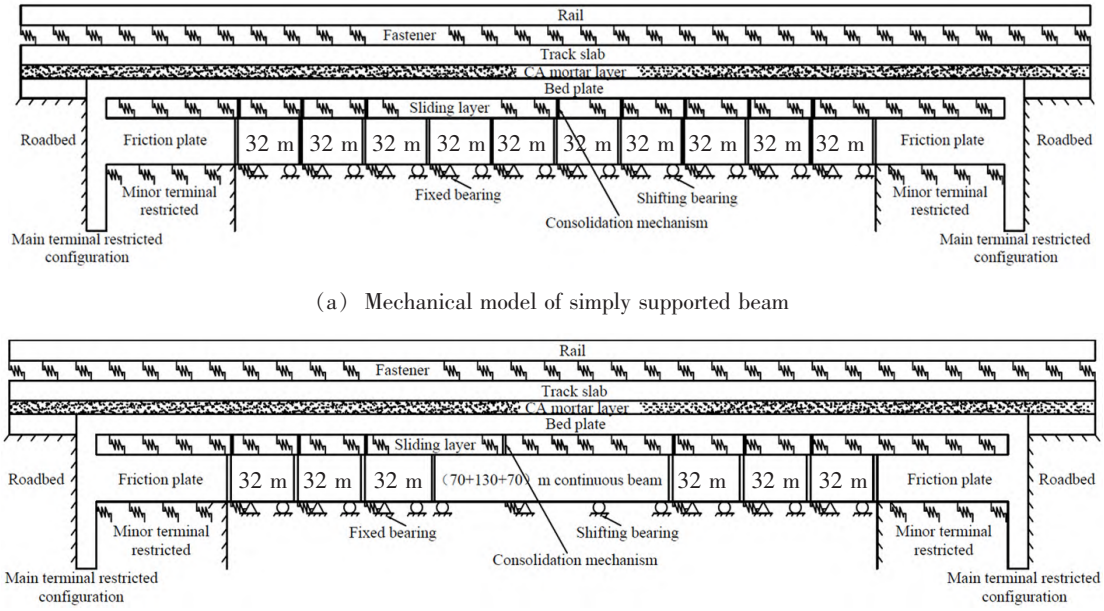
1.1　模型概述

在建模过程中,需要仔细考虑桥上Ⅱ型板式无砟轨道的每个构件,例如固结机构、台后锚固体系、混凝土底座板、“两布一膜”滑动层、CA 砂浆填充层、预制轨道板、弹性不分开式扣件、钢轨等。本文以 10 跨 32 m 标准简支梁和 3 跨 32 m 简支梁+(70+130+70)m 连续梁+3 跨 32 m 简支梁为例论述建模过程。力学模型如图 1 所示。

1.2　有限元模型

利用 ANSYS 建立精细化空间耦合模型，其中钢轨采用 BEAM188 梁单元模拟;固结机构、扣件横向和垂向刚度采用 COMBIN14 线性弹簧模拟,滑动层、扣件纵向阻力采用 COMBIN39 非线性弹簧单元模拟；轨道板和底座板采用 SOLID45 实体单元模拟;桥梁梁体采用 SOLID45 实体单元模拟。本文建立的简支梁桥和连续梁桥精细化有限元模型如图 2 所示。

在当前的工程领域中,精确的纵向力和位移计算对于设计和分析结构的性能至关重要。传统的解析法虽然在某些情况下提供了可行的结果,但在复杂的情况下,其准确性受到挑战。因此,空间耦合有限元模型已成为一种强大的工具,能够更准确地模拟和预测结构的行为。尽管有限元分析在精度上具有优势,但使用 ANSYS 的 APDL 进行二次开发时,用户会面临一些挑战。首先,模型参数的修改通常需要复杂的代码编写,这对于非专业人员来说可能会耗费大量时间和精力。其次,在复杂的工况下,参数的变化可能会导致分析的重复进行,增加了工作的复杂性。此外,ANSYS 软件的全英文界面可能对一些用户构成语言障碍，增加了学习和使用的难度。这种情况下,为了提高软件的用户友好性和效

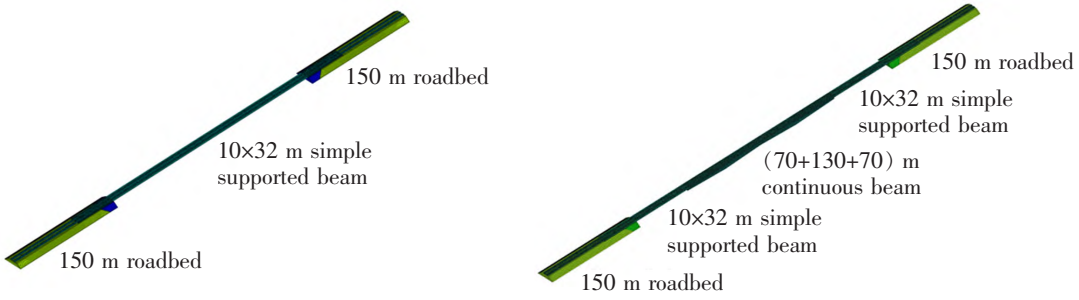


(a) Mechanical model of simply supported beam

(b) Mechanical model of continuous beam

图 1　桥上 CRTSⅡ 型无砟轨道无缝线路力学模型

Fig.1　Mechanical model of CRTSⅡ ballastless track continuous welded rail on bridge



(a) Simply-supported girder bridge (b) Continuous beam bridge

图2 桥上CRTSⅡ型无砟轨道有限元模型

Fig.2 Finite element model of CRTSⅡ ballastless track on bridge

率,有必要考虑其它解决方案。

本文建议采用智能分析系统来克服这些问题。该系统可以提供直观的用户界面,使参数的修改变得更加简单。用户只需通过参数界面输入相关参数,程序将自动转化为APDL代码,从而减少了用户的编程负担。

综上所述,尽管空间耦合有限元模型在纵向力和位移分析方面具有显著的优势,但通过智能分析程序的引入,可以进一步提高其易用性和效率,从而更好地满足工程领域的需求。这一系统有望在工程实践中得到广泛应用,为结构分析和设计提供更强大的工具。

2 桥上Ⅱ型板式无砟轨道无缝线路纵向力智能分析系统研发

2.1 分析系统设计原理

基于有限元法和精细化空间耦合模型,在VS2010开发环境下,首先通过C#数据流控制技术读写初始参数和写入命令流文件;初始参数的修改与导入在平台启动后的可视化界面内实现;接着利用C#编写的命令流文件,并通过后处理分析调用ANSYS的BATCH模式,生成.txt文件和.db文件;为了方便数据的分析和处理,系统采用C#数据流技术建立Excel接口,通过这一接口,系统能够读取后处理结果文本数据,并将.txt文件转换成.xls文件,提高数据的可视化性且数据更易于分析;最后得到各轨道结构的纵向力和位移数据,形成集参数输入、有限元建模、荷载施加、自动计算、数据提取及数据智能处理于一体的桥上Ⅱ型板式无砟轨道无缝线路纵向力智能分析系统。用户可以在一个集成的环境中完成复杂的分析任务,无需手动处理多个步骤,提高了工作效率。其设计原理主要包括以下5个方面。

2.1.1 C#数据流技术

C#数据流的强大功能使其成为程序中数据读取和写入的首选工具。数据流允许数据在程序中按照顺序传输,这对于处理各种类型的数据非常高效。开发人员可以使用数据流技术来轻松处理字节数据,同时具备操作数据队列的灵活性。这一特性在多种应用场景下都非常实用,尤其是那些需要按照特定顺序处理数据的情况,如网络通信和文件读写。值得一提的是,在与ANSYS中APDL语言的交互过程中,可以使用C#中的StreamReader类和StreamWriter类来创建数据读取器和写入器。这两个类为我们提供了用于轻松地与外部数据源进行交互的强大工具。利用StreamReader类初始化参数,包括读取轨道参数、工况条件等,这使得从外部源读取数据变得简单。使用StreamWriter类,可以轻松地将命令流文件写入外部数据源,实现数据的有效管理和传输。这种方法使得与ANSYS中APDL语言的集成变得更加容易,开发人员可以更高效地读取和写入数据,从而实现更复杂的工程仿真和数据分析任务。C#的数据流技术是实现这一目标的关键工具,它提供了一种可靠且高效的方式,帮助开发人员处理各种数据交互需求。

2.1.2 ANSYS批处理技术

在工程仿真领域,基于ANSYS的批处理技术一直是一个备受欢迎的工具,该技术用于生成各种仿真数据和结果。C#数据流技术能够高效地生成计算命令流文件,为接下来的工作奠定了坚实的基础。这里的关键步骤是将命令流文件传输到ANSYS的BATCH模式中,以便对桥上Ⅱ型板式无砟轨道

进行纵向力和位移的计算。要实现对 ANSYS 的 BATCH 模式的调用,需要在 C# 程序中嵌入相应的代码。这一操作的完成意味着系统可以高效地获取钢轨、轨道板等轨道结构的纵向受力和位移数据。本研究采用 C# 编写的程序运行界面主菜单获取 ANSYS 批处理的路径代码,将路径代码插入到 C# 编写的程序代码,以完成对 ANSYS 批处理的调用。

2.1.3　二次开发接口

本系统充分考虑到了二次开发接口的选择,最终决定采用了 ANSYS 的参数化语言(APDL)作为其核心基础。APDL 在 ANSYS 二次开发领域被广泛使用,它提供了强大的脚本编程功能,使用户能够以更智能、更高效的方式进行任务自动化、定制分析以及过程模拟。通过编写脚本,用户可以轻松地实现这些目标,无需手动逐步操作,从而大大提升了工作效率。选择 APDL 作为二次开发接口赋予了用户使用 ANSYS 更加灵活和高效的互动能力。用户可以根据特定需求,自主调整软件的行为,实现个性化定制。启动 ANSYS Classic 用户界面后,只需简单地选择需要读取的 APDL 文件,再点击 Run 按钮,系统便会迅速响应并执行文件中所包含的指令,使整个过程变得轻松而高效。

总的来说,通过整合 APDL 作为二次开发接口,为用户提供了一个强大的工具,使其能够更加有效地利用 ANSYS 进行工程分析和模拟,从而在工作中取得更为显著的成果。

2.1.4　基于 C#.NET 的 ANSYS 二次开发封装与集成

使用 C#.NET 进行文件系统数据操作,并将其与 ANSYS 进行封装与集成,是一项旨在提高文件系统数据操作与 ANSYS 的交互效率和便利性的关键任务。首先,初始化 C#.NET 环境,确保系统准备好与 ANSYS 进行交互,这包括安装对应的库和依赖项,并建立与 ANSYS 所需的连接;接下来,通过 C# 代码来创建 APDL 文件,这些文件包含了需要执行的 ANSYS 命令,这些命令可以针对特定的仿真或分析任务进行定制,以确保 ANSYS 按照所需的方式执行。这一步骤可以通过编写 C# 代码来生成所需的 APDL 命令流;一旦 APDL 文件被成功创建,下一步是将其自动提交给 ANSYS 进行执行,而无需手动干预 ANSYS 界面。这可以通过后台调用 ANSYS 的方式来实现,C# 代码可以启动 ANSYS 进程,并将生成的 APDL 文件传递给 ANSYS,以便它可以按计划执行仿真任务;最后将处理 ANSYS 执行的结果数据。这包含从 ANSYS 获取的模拟结果、计算输出等。通过这些步骤,成功地将 C#.NET 与 ANSYS 结合,实现了对 ANSYS 的封装和集成,使得文件系统数据与 ANSYS 的交互更加高效和方便。

2.1.5　数据收集实现

系统进行批处理操作后通常会产生.txt 和.db 文件,这些文件包含了仿真数据。为了更好地分析和共享这些数据,需要将其转换为更常见的格式,如.xls 文件。在这个过程中可以借助 C# 编程语言中的 StreamReader 类来处理这些数据文件。首先,使用 StreamReader 类来获取数据文件的路径,并逐行读取文件内容,直到达到文件末尾。这个过程确保系统能够有效地提取出数据,以供后续处理和分析。在主代码中需要引入与 Excel 读写相关的命名空间和库。然后,可以使用这些库的功能,将.txt 文件中的数据转换为.xls 格式。

通过以上步骤可以成功地将 ANSYS 生成的仿真数据从原始的.txt 和.db 文件中提取出来,并将其转换为更易于处理和共享的.xls 文件。智能分析系统设计原理总图如图 3 所示。

2.2　智能分析系统功能

桥上 CRTSⅡ 型无砟轨道无缝线路纵向力智能分析系统 V1.0 主要功能如下。

1) 快速建模:用户可在系统操作界面选择建立简支梁或连续梁桥,填写简支梁跨数、跨长和其它参数或连续梁跨长和其它参数后可实现简支梁或连续梁桥上Ⅱ型无砟轨道无缝线路的自动化快速建模。

2) 参数调整:在初始操作界面内,用户可以修改例如简支梁桥的跨数和跨长、桥上活动层摩擦系数、轨道板厚度等桥梁基本参数;可以修改轨道结构的物理参数,例如钢轨的弹性模量、密度、泊松比、线膨胀系数等;可以修改阻力参数,例如扣件的三向阻力和桥墩阻力。该系统的参数调整涉及桥梁、轨道结构的方方面面,通过修改上述参数可以满足绝大多数工况下的Ⅱ型板式无砟轨道纵向计算需求。

3) 荷载施加:该系统支持施加多种荷载,例如温度荷载、列车竖向荷载和列车制动荷载。在施加荷载的界面,可以更改桥梁温度变化和道床板温度变化的数值实现温度荷载的施加;可选择中-活载、

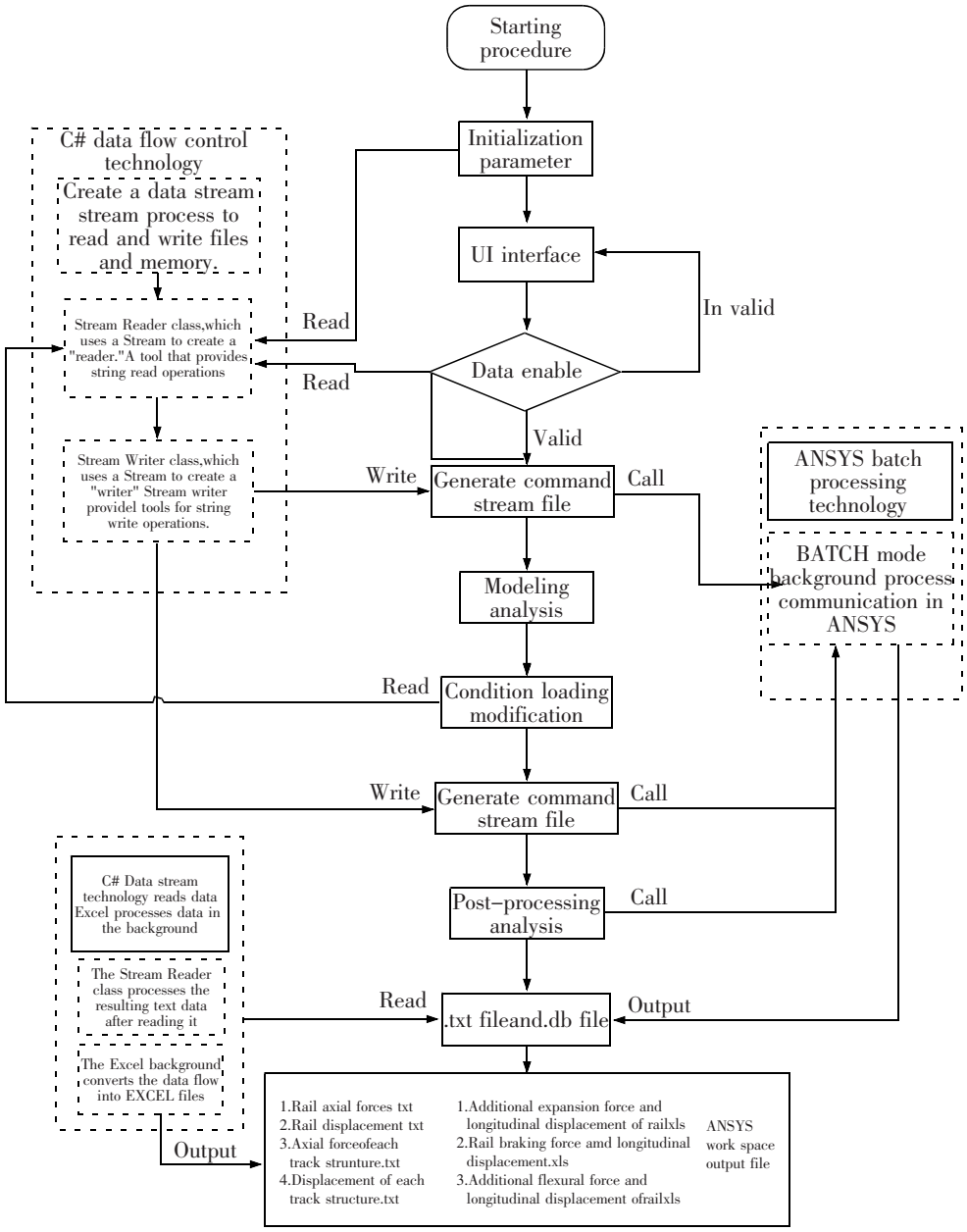


图 3 桥上 CRTSⅡ 型无砟轨道无缝线路纵向力智能分析系统设计原理总图

Fig.3 Design principle of intelligent analysis system for longitudinal force of CRTSⅡ ballastless track continuous welded rail on bridge

ZK 活载或是用户自定义活载作为列车制动荷载，还可以调整荷载大小和加载长度；对于列车竖向荷载方面可以选择单线或双线施加。

4）纵向受力与位移计算：在模型建立完成及施加需要的荷载后，选择系统界面下的“求解”选项，系统将对桥梁及各轨道结构在不同荷载条件下进行计算。计算结果包括桥梁纵向位移、固定支座墩台顶和轨道各结构的纵向力与位移等。

5）数据输出：计算结束后，系统能够将数据生成 Excel 文件，用户可以在相关目录下找到计算数据，实现数据的自动输出。

2.3 智能分析系统计算流程

上文介绍了一款强大的桥梁结构建模与分析系统，本节将详细介绍如何安装、配置和使用这个系统。

1）安装软件：在开始使用本系统之前，首先要

确保正确地安装软件。请按照以下步骤操作:从软件安装包中复制附带的“pt”文件夹。这个“pt”文件夹包含了系统所需的关键组件和配置文件。为了确保系统正常运行,将这个文件夹复制到电脑 D 盘中。这个简单的步骤是确保系统正常运行的第一步。复制完毕后,用户就可以顺利启动系统并开始使用了。

2)初始界面互动:一旦用户成功启动系统,智能分析系统将进入初始界面,如图 4 所示,这个界面是用户与系统互动的起点。用户将在这里找到一系列的图标和选项,以帮助完成各种任务。为了更好地理解系统的功能和操作方式,点击右上角的“?”图标,可以打开软件介绍,用户将得到到初步的指南和提示来了解系统的功能。

3)选择桥梁类型和参数设置:点击界面上的

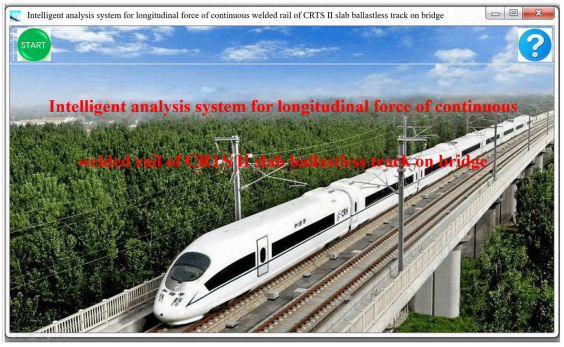
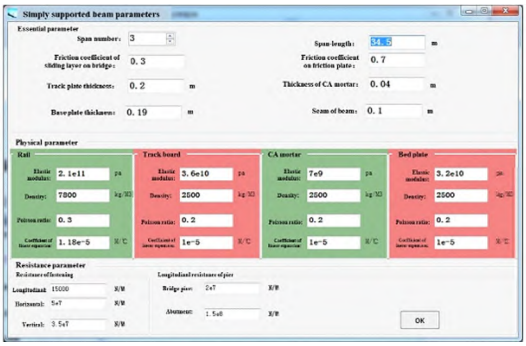


图 4　纵向力智能分析系统主界面

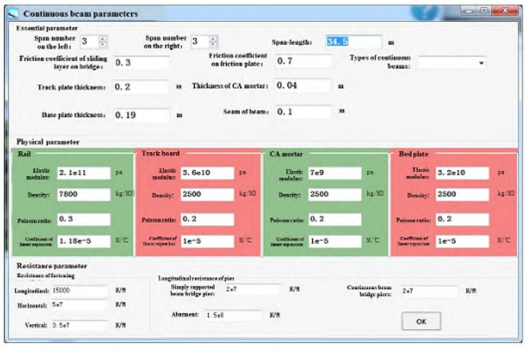
Fig.4　Main interface of longitudinal force intelligent analysis system

“开始”,系统将引导用户选择桥梁类型。这是一个重要的界面,因为它决定了将要建模的桥梁类型。根据用户的需要,可以选择“简支梁”或者“连续梁”,两种类型桥梁的参数设置界面可以让用户修改桥梁基本参数、轨道结构的物理参数以及阻力参数,系统参数设置界面。这个系统允许用户在此界面修改默认参数,以满足实际需求。

4)荷载施加和自动建模:完成参数输入后,点击“确定”,系统将显示“写入成功”。然后,系统将进入荷载选择及参数修改界面,如图 5 所示,在这个界面中,用户将能够进一步定义桥梁的特定参数和荷载情况。点击“建模”,系统将引导用户找到 ANSYS 的安装目录,通常位于 C 盘下的“winx64”文件夹里,文件名称为 ANSYS.exe。双击打开这个文件,并点击“建模”。现在只需等待系统显示“建模成功”



(a) Parameter setting interface of simply supported beam



(b) Parameter setting interface of continuous beam

图 5　系统参数设置界面

Fig.5　System parameter setting interface

的消息。建模成功后,选择适当的荷载类型,输入荷载大小和加载长度,然后点击“求解”。再次耐心等待,系统会在完成计算后显示“求解成功”。

5)文件输出:在求解成功后,用户将选择是否生成 Excel 文件,这个功能可以帮助用户保存和分享计算结果。用户可以在 D 盘下的“pt”文件夹里找到这些计算数据,这样就可以随时查看和使用这些数据,从而完成实际的工程项目或研究任务。

总之,本系统提供了一个实用且通用的工具,以帮助用户进行桥梁结构的建模和分析。从安装到参数设置、建模和计算,本节提供了详细的步骤和指南。

3　系统应用实例

本小节利用开发的智能分析系统建立了与文献[27]参数相同的有限元模型,如图 6 所示。取相同工况对模型进行计算,将结果进行对比。在加载计算中,采用以下降温工况:无砟轨道整体降温 45 ℃、梁体整体降温 30 ℃。以此来验证该纵向力智能分析系统的准确性和可靠性。

图 7~图 10 分别展示了文献[27]和本文开发的纵

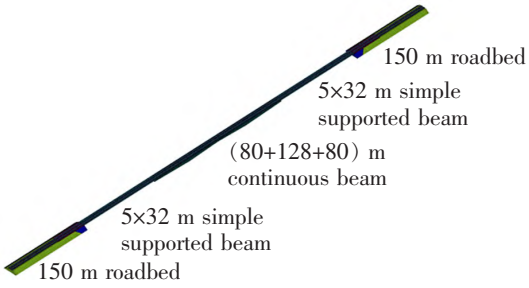


图 6 智能分析系统建立的与文献[27]相同的有限元模型

Fig.6 Finite element model established by the intelligent analysis system is the same as that in reference[27]

向力智能分析系统的钢轨纵向力和纵向位移的图像。通过对比上述图像,可以看出文献中的计算结果与纵向力智能分析系统计算结果之间的差异和相似之处。将这些计算结果的最大值总结在表 1 中。

从图 7~图 10 及表 1 的数据分析结果显示,本文所构建的模型与文献[27]中的模型在计算结果上呈现出高度的一致性。在实例分析中比较了钢轨、轨道板、底座板以及梁缝在纵向力和位移方面的计算结果,发现它们之间存在着相似的基本趋势。钢

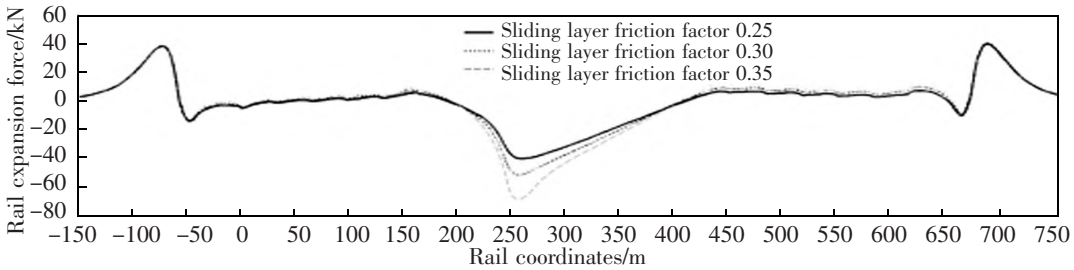


图 7 钢轨纵向力[27]

Fig.7 Longitudinal force of rail[27]

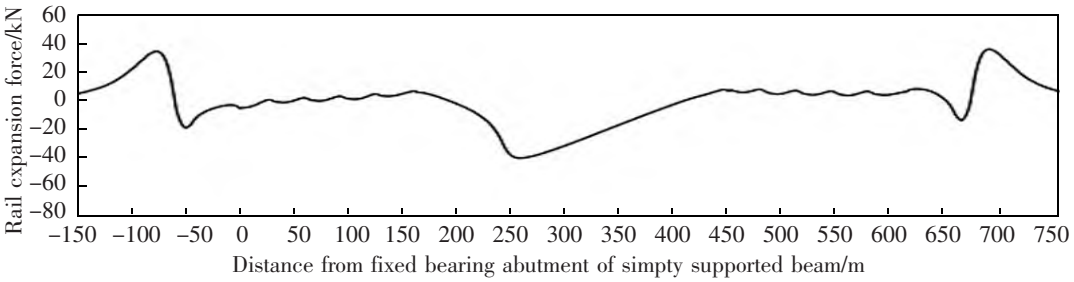


图 8 分析系统钢轨纵向力

Fig.8 Longitudinal force of rail for analytic system

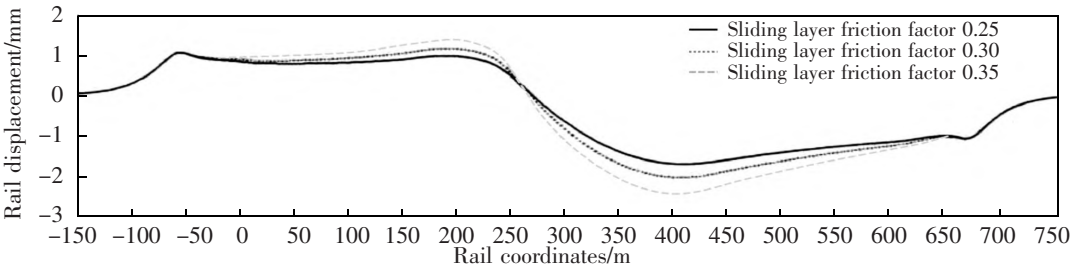


图 9 钢轨纵向位移[27]

Fig.9 Longitudinal displacement of rail[27]

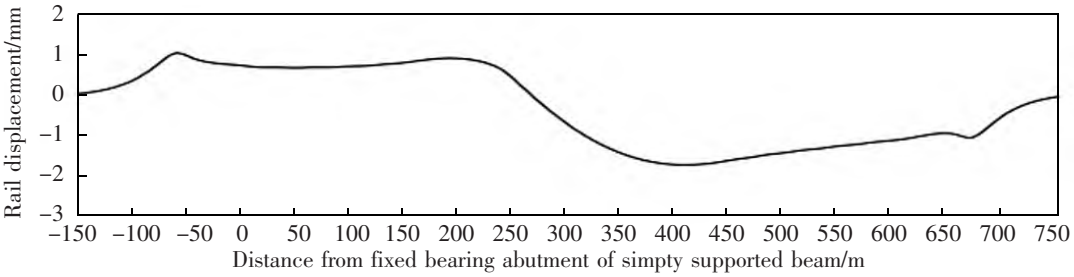


图 10 分析系统钢轨纵向位移

Fig.10 Longitudinal force of rail analytic system

表 1　同种工况下纵向力与位移计算结果最大值

Tab.1　The maximum values of longitudinal force and displacement calculation results in the same conditions

Model	Rail		Track board		Base slab		Longitudinal variation of beam joint/mm
	Longitudinal force/kN	Longitudinal displacement/mm	Longitudinal stress/MPa	Longitudinal displacement/mm	Longitudinal stress/MPa	Longitudinal displacement/mm	
Model in this paper	40.304	1.755	20.111	1.777	19.862	1.772	59.341
Document model[27]	41.066	1.760	19.753	1.790	20.424	1.789	59.983

轨的最大伸缩力与纵向位移之间的差异仅为1.86%和0.28%。这表明了本文的模型在预测钢轨的纵向行为方面非常准确。轨道板的纵向应力相差1.81%,而纵向位移相差0.73%,这意味着本文的模型能够有效地预测轨道板的受力情况，并且在描述纵向位移行为时也表现出很高的一致性。底座板的情况也类似,纵向应力相差2.75%,而纵向位移相差0.95%，这证明了本文的模型在底座板方面的准确性和可靠性。本文还研究了梁缝的最大纵向变化量,发现其相差仅为1.07%,这意味着本文的模型能够准确地预测梁缝在纵向方向上的行为。

综上所述,通过本文智能分析系统计算结果与文献[27]进行比较,验证了本文研发的智能分析系统的通用性和可靠性。本文的研究成果能够为桥上Ⅱ型板式无砟轨道无缝线路的设计提供参考。

4　结论

本文考虑了桥梁结构、轨道板以及钢轨之间的相互作用，利用有限元法建立了精细化有限元模型，研发了纵向力智能分析系统并进行了实例验证。主要结论如下。

1）利用有限元软件ANSYS建立了多跨简支梁和大跨度连续梁精细化有限元模型。

2）使用VS2010开发环境对ANSYS进行了二次开发,研发了纵向力智能分析系统,并详细介绍了该智能分析系统设计原理和计算流程,确保了系统的可理解性和可操作性。

3）对相同工况下的相同模型计算了纵向力和位移,结果显示数据的偏差均在3%以内,充分验证了该分析系统的通用性和可靠性。

参考文献:

[1] 张鹏飞. 复杂荷载条件下桥上CRTSⅡ型板式无砟轨道无缝线路纵向力研究[D]. 北京:北京交通大学,2018.
ZHANG P F. Research on longitudinal force of CRTS Ⅱ slab ballastless track CWR on bridge under complex load conditions[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2018.

[2] RUI C,RAIMUNDO D,ANTONIO C E M,et al.Track–bridge interaction on high–speed railways[M]. London:Taglor & Francis,2009.

[3] SEDARAT H,KOZAK A. Nonlinear dynamic analysis of a track bridge structure designed for a floating bridge[C]//New York:Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series 35,2013.

[4] 蔡科. 高寒多震环境下桥上CRTSⅢ型板式无砟轨道无缝线路层间相互作用机理研究[D]. 南昌:华东交通大学,2022.
CAI K. Study on the interlayer interaction mechanism of CRTSⅢ slab ballastless track CWR on bridge under high–cold and multi–earthquake environment[D]. Nanchang:East China Jiaotong University,2022.

[5] 王伟华. 高速铁路64 m简支箱梁桥上无砟轨道无缝线路纵向力分析与桥墩刚度限值研究[J]. 铁道标准设计,2021,65(6):82–88.
WANG W H. Study on longitudinal force analysis and pier stiffness limit of ballastless track CWR on 64 m simply supported box girder bridge of high–speed railway[J]. Railway Standard Design,2021,65(6):82–88.

[6] 张捍东. 大跨度混合梁斜拉桥上无砟轨道纵向力分析[J]. 铁道建筑,2020,60(3):104–107.
ZHANG H D. Longitudinal force analysis of ballastless track on Long–Span hybrid girder Cable–Stayed bridge[J]. Railway Building,2020,60(3):104–107.

[7] FENG Q,LIU Z,JIANG J,et al. Continuous assessment of longitudinal temperature force on ballasted track using rail vibration frequency[J]. Proceedings of the Institution of

Mechanical Engineers Part F Journal of Rail Rapid Transit, 2022,236(3):212-219.

[8] MEMON T R,MEMON T D,HUSSAIN I,et al. Embedded system development for detection of railway track surface deformation using contour feature algorithm[J]. Computers Materials & Continua,2023,75(2):2461-2477.

[9] XU L,ZHAI W. A three-dimensional dynamic model for train-track interactions[J]. Applied Mathematical Modelling, 2019,76(12):443-465.

[10] CAI X P,LUO B C,ZHONG Y L,et al. Arching mechanism of the slab joints in CRTSⅡ slab track under high temperature conditions[J]. Engineering Failure Analysis, 2019,98:95-108.

[11] 谷思文. 铁路轨道测量数据处理与分析系统研制[D]. 成都:西南交通大学,2022.
GU S W. Development of railway track measurement data processing and analysis system[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2022.

[12] 时佳斌,柴雪松,王智超,等. 轨道变形监测系统设计与应用[J]. 铁道建筑,2022,62(4):14-17.
SHI J B,CHAI X S,WANG Z C,et al. Design and application of track deformation monitoring system[J]. Railway Building,2022,62(4):14-17.

[13] 于威龙. 轨道车辆电器件可靠性柔性测试与分析系统设计[D]. 长春:吉林大学,2021.
YU W L. Design of reliability flexible test and analysis system for rail vehicle electrical components[D]. Changchun: Jilin University,2021.

[14] 郭翰飞,佟维,谢素明,等. 轨道车辆随机振动分析系统RVRAP的开发及验证[J]. 大连交通大学学报,2022,43(4):44-49.
GUO H F,TONG W,XIE S M,et al. Development and verification of random vibration analysis system RVRAP for rail vehicles[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2022,43(4):44-49.

[15] 刘鹏. 桥梁动力响应有限元计算程序系统开发及疑难问题分析[J]. 计算机系统应用,2016(1):224-228.
LIU P. Development of finite element calculation program system for bridge dynamic response and analysis of difficult problems[J]. Computer system application,2016(1): 224-228.

[16] 高梓航,王伟华,王铁霖. 基于图像识别的大跨度铁路桥梁钢轨伸缩调节器监测系统与方法研究[J]. 铁道建筑, 2023,63(8):93.
GAO Z H,WANG W H,WANG T L. Research on monitoring system and method of rail expansion joint of long-span railway bridge based on image recognition[J]. Railway construction,2023,63(8):93.

[17] ZHAO W C,HUI F. An alternative solution of train-track dynamic interaction[J]. Shock and Vibration,2019: 1859261.

[18] 雷晓燕,王鹏生,翁凌霄等. 时速300 km/h高速列车诱发高架箱梁结构振动特性分析[J]. 华东交通大学学报, 2021,38(4):18-26.
LEI X Y,WANG P S,WENG L X,et al. Analysis of vibration characteristics of elevated box girderb structure induced by High-Speed train at 300 km/h[J]. Journal of East China Jiaotong University,2021,38(4):18-26.

[19] 孟宪金. 基于ANSYS二次开发的轮轨耦合系统动力仿真平台研究[D]. 南昌:华东交通大学,2021.
MENG X J. Research on dynamic simulation platform of wheel-rail coupling system based on ANSYS secondary development[D]. Nanchang:East China Jiaotong University, 2021.

[20] 曾婵娟. 大跨度桥梁车桥竖向耦合振动的研究以及程序实现[D]. 武汉:武汉理工大学,2007.
ZENG C J. Research and program implementation of vertical coupling vibration of long-span bridge[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology,2007.

[21] 吴有松. 高速铁路车辆—桥梁系统耦合振动及程序设计[D]. 成都:西南交通大学,2007.
WU Y S. Coupling vibration and program design of high-speed railway vehicle-bridge system[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2007.

[22] 李永庆. 基于模型修正的梁格法车桥耦合振动程序开发和验证[D]. 西安:长安大学,2010.
LI Y Q. Development and verification of vehicle-bridge coupling vibration program based on model-modified grillage method[D]. Xi′an:Chang′an University,2010.

[23] 余志武,张鹏,丁叁叁,等. 基于概率密度演化理论的磁浮列车-轨道梁耦合系统随机动力分析[J]. 中南大学学报(自然科学版),2022,53(7):2544-2554.
YU Z W,ZHANG P,DING S,et al. Stochastic dynamic analysis of maglev train-track beam coupling system based on probability density evolution theory[J]. Journal of Central South University(Natural Science Edition),2022,53(7): 2544-2554.

[24] 张高扬. 高速铁路轨道BIM设计系统研发[J]. 铁道勘察, 2022,48(3):118-122.
ZHANG G Y. Research and development of BIM design system for high-speed railway track[J]. Railway survey, 2022,48(3):118-122.

[25] 甘愿. 基于显式有限元的桥上无砟轨道动力分析系统开发和应用研究[D]. 成都：西南交通大学，2022.
GAN Y. Development and application of dynamic analysis system for ballastless track on bridge based on explicit finite element[D]. Chengdu：Southwest Jiaotong University，2022.

[26] 王凯，董勇，齐小民. 基于主副销结构的道岔转换设备健康状态分析系统研究与应用[J]. 铁道通信信号，2023，59(4)：42-46.
WANG K，DONG Y，QI X M. Research and application of health status analysis system for turnout switching equipment based on main and auxiliary pin structure[J]. Railway communication signal，2023，59(4)：42-46.

[27] 曲村. 高速铁路长大桥梁无砟轨道无缝线路设计理论及方法研究[D]. 北京：北京交通大学，2013.
QU C. Research on design theory and method of ballastless track continuous welded rail for long-span bridges of high-speed railway[D]. Beijing：Beijing Jiaotong University，2013.



第一作者：张鹏飞(1975—)，男，教授，博士，博士生导师，研究方向为桥上无缝线路设计理论与关键技术。E-mail：zhangpf4236@163.com。



通信作者：唐强强(1998—)，男，硕士研究生，研究方向为桥上无缝线路。E-mail：2915215581@qq.com。

(责任编辑：吴海燕)