doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2025.04.012

大跨连续梁桥上有轨电车嵌入式轨道适应性分析

潘　鹏[1]，孙　魁[1]，冯青松[2]
（1. 广州地铁设计研究院股份有限公司，广州 510010；
2. 华东交通大学山区土木工程安全与韧性全国重点实验室，南昌 330013）

摘　要：为研究在连续梁桥上铺设有轨电车嵌入式轨道的可行性，提出嵌入式轨道-桥梁单元模型，建立连续梁桥上无缝线路静力学模型。计算桥梁温度荷载作用下桥上无缝线路的纵向受力和变形情况，并采用梁轨相对位移作为评价指标来衡量桥上无缝线路铺设方案的合理性，详细分析桥梁年温差、高分子材料纵向阻力和钢轨伸缩调节器设置方案对无缝线路力学特性的影响。结果表明：桥梁年温差对梁轨相对位移和钢轨附加伸缩力的影响十分显著，随着桥梁年温差的增加而近似呈线性增加趋势，且在第二联连续梁桥的右侧梁缝处钢轨附加伸缩力和桥梁-钢轨相对位移达到最大值；当桥梁年温差为 30℃时，梁轨相对位移为 12.79 mm，超过了 6.20 mm 的限值，调整高分子材料纵向阻力难以将梁轨相对位移控制在限值之内，需要在桥上设置钢轨伸缩调节器；建议在第 11 跨和第 19 跨桥梁的右侧梁端处各设置 1 个槽型钢轨伸缩调节器，可使梁轨相对位移满足要求。

关键词：城市轨道交通；有轨电车；连续梁桥；嵌入式轨道；无缝线路；钢轨伸缩调节器
中图分类号：U231　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1672-6073(2025)04-0092-06

Adaptability Analysis of Embedded Rail Track for Trams on Long-Span Continuous Beam Bridges

PAN Peng[1], SUN Kui[1], FENG Qingsong[2]
(1. Guangzhou Metro Design and Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510010; 2. State Key Laboratory of Safety and Resilience of Civil Engineering in Mountain Arca, East China Jiaotong University, Nanchang 330013)

Abstract: To investigate the feasibility of installing embedded rail tracks for trams on continuous beam bridges, an embedded rail track-bridge element model is proposed, and a static model of continuous welded rail (CWR) system is established for the bridge structure. The longitudinal forces and deformations of the CWR system under bridge temperature loads are analyzed. Using beam-rail relative displacement as the evaluation criterion, this study assesses the feasibility of CWR installation schemes and examines the effects of annual bridge temperature variation, longitudinal resistance of polymer materials, and rail expansion joint configurations on the mechanical behavior of the CWR system. Results indicate that the annual bridge temperature difference significantly affects both the beam-rail relative displacement and rail additional expansion force, exhibiting an approximately linear increase with temperature variation. Maximum values of both parameters occur at the right beam joint of the second continuous beam bridge. With an annual temperature difference of 30℃, the beam-rail relative displacement reaches 12.79 mm, exceeding the allowable limit of 6.20 mm. Since adjusting the longitudinal resistance of polymer materials proves insufficient

收稿日期：2024-12-17　修回日期：2025-02-17
第一作者：潘鹏，男，硕士，工程师，主要从事轨道结构设计研究，panpeng@dtsjy.com
基金项目：中国博士后科学基金资助项目(2024M750628)；广东省基础与应用基础研究基金(2025A1515011271)
引用格式：潘鹏，孙魁，冯青松. 大跨连续梁桥上有轨电车嵌入式轨道适应性分析[J]. 都市快轨交通，2025，38(4)：92-97.
PAN Peng, SUN Kui, FENG Qingsong. Adaptability analysis of embedded rail track for trams on long-span continuous beam bridges[J]. Urban rapid rail transit, 2025, 38(4): 92-97.

to maintain displacement within limits, rail expansion joints are required. The installation of grooved rail expansion joints at the right beam ends of both the 11th and 19th spans is recommended to ensure acceptable beam-rail relative displacement.
Keywords: urban rail transit; tram; continuous beam bridges; embedded rail track; continuous welded rail (CWR); rail expansion joints

近年来，嵌入式轨道在有轨电车、地铁和车辆段内得到了广泛使用。与其他轨道减振措施相比，嵌入式轨道具有减振效果和绝缘性能好、日常维护量少等突出优点，同时能够在一定程度内降低车内噪声和抑制钢轨波磨[1]。当嵌入式轨道铺设在桥上时，由于梁轨相互作用，钢轨和桥梁之间会产生纵向相对位移，嵌入式轨道承轨槽内的高分子材料十分容易被拉裂破坏，从而大大限制了嵌入式轨道在大跨度连续梁桥上的应用[2]。钢轨伸缩调节器能够显著减小钢轨附加伸缩力和梁轨相对位移，但以往伸缩调节器主要应用于工字型钢轨线路，应用于槽型钢轨的经验相对较少，且大跨度连续梁桥上嵌入式轨道的铺设方案也没有相应的理论依据可以参考。

学者们针对桥上无缝线路[2-9]和钢轨伸缩调节器[10-11]已经开展了大量的研究工作。冯青松等[12]通过响应面试验构建梁轨相对位移与随机变量之间的响应面模型，并借助响应面模型对简支梁桥上嵌入式轨道无缝线路的可靠性进行评估；成伟等[13]提出一种适用于多跨简支梁桥上嵌入式轨道的伸缩力解析计算模型，探讨梁体温差、线路纵向阻力和桥墩纵向刚度对钢轨纵向位移和附加伸缩力的影响；蔡小培等[14]建立精细化的大跨斜拉桥上无缝线路三维静力学模型，研究无缝线路在温度荷载和公铁荷载作用下的力学特性，并给出相应的钢轨伸缩调节器布置方案；LOU 等[15]建立一种二维桥上无缝线路模型，借助该模型对钢轨伸缩调节器和连续梁固定支座位置进行细致分析。既有研究中关于嵌入式轨道能否在大跨度连续梁桥上铺设的研究相对较少，因此开展连续梁桥上嵌入式轨道铺设方案研究具有十分显著的工程价值。

本文基于有限单元法提出了嵌式轨道-桥梁单元模型，建立连续梁桥上嵌入式轨道无缝线路二维有限元模型。探究桥梁年温差和高分子材料纵向阻力对无缝线路纵向受力和变形的影响，并选取梁轨相对位移作为钢轨伸缩调节器布置方案的评价指标，对连续梁桥上嵌入式轨道无缝线路铺设方案进行优化设计。

1　桥上嵌入式轨道无缝线路计算模型

1.1　嵌入式轨道-桥梁单元模型

与普通扣件离散支承式轨道不同，嵌入式轨道采用高分子填充材料包裹钢轨，为钢轨提供连续支承作用，具有较好的减振降噪效果。嵌入式轨道的道床板与桥梁之间通过门型钢筋连接，可以忽略道床板与桥梁之间的相对位移，故将两者视为一个整体。根据嵌入式轨道-桥梁结构的特点，建立跨中和梁缝处嵌入式轨道-桥梁单元模型，如图 1 所示。

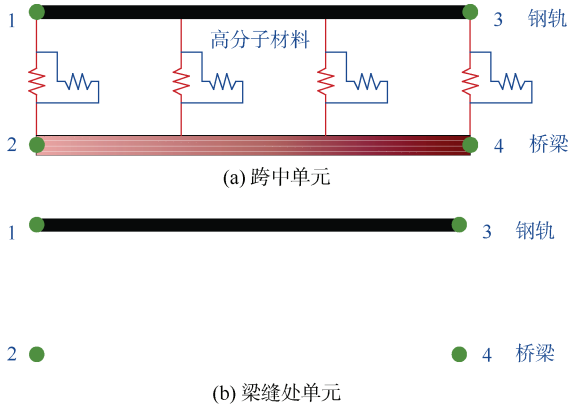


图 1　嵌入式轨道-桥梁单元模型

Figure 1　Embedded rail track-bridge element model

在如图 1 所示的嵌入式轨道-桥梁单元模型中，钢轨和桥梁均采用两节点六自由度欧拉梁单元进行模拟，高分子材料模拟为均布支承的弹簧单元。嵌入式轨道-桥梁单元模型的结点位移列向量 $\boldsymbol{a}^{\mathrm{e}}$ 可以表示为：

$$\boldsymbol{a}^{\mathrm{e}}=\left[\boldsymbol{a}_1^{\mathrm{e}},\boldsymbol{a}_2^{\mathrm{e}},\boldsymbol{a}_3^{\mathrm{e}},\boldsymbol{a}_4^{\mathrm{e}}\right]^{\mathrm{T}} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{a}_i^{\mathrm{e}}=\left[u_i,v_i,\theta_i\right]\quad(i=1\sim4) \tag{2}$$

式中，u_i、v_i 和 θ_i 分别为第 i 个梁单元结点在纵向、垂直方向的位移以及转动角度的自由度。

跨中和梁缝处嵌入式轨道-桥梁单元的刚度矩阵可以分别表示为：

$$\boldsymbol{k}_1^{\mathrm{e}}=\boldsymbol{k}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{e}}+\boldsymbol{k}_{\mathrm{b}}^{\mathrm{e}}+\boldsymbol{k}_{\mathrm{fill}x}^{\mathrm{e}}+\boldsymbol{k}_{\mathrm{fill}y}^{\mathrm{e}} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{k}_2^{\mathrm{e}}=\boldsymbol{k}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{e}} \tag{4}$$

式中，$\boldsymbol{k}_1^{\mathrm{e}}$ 和 $\boldsymbol{k}_2^{\mathrm{e}}$ 分别为跨中和梁缝处嵌入式轨道-桥梁单元的刚度矩阵；$\boldsymbol{k}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{e}}$ 和 $\boldsymbol{k}_{\mathrm{b}}^{\mathrm{e}}$ 分别为钢轨和桥梁梁单元的刚度矩阵，6×6 刚度矩阵的具体表达式见文献[16]；$\boldsymbol{k}_{\mathrm{fill}x}^{\mathrm{e}}$ 和 $\boldsymbol{k}_{\mathrm{fill}y}^{\mathrm{e}}$ 分别为高分子材料纵向和垂向连续支承刚度矩阵。

下面详细介绍跨中单元中高分子材料纵向和垂向连续支承引起的刚度矩阵推导过程。嵌入式轨道-桥梁单元中任意一点钢轨与桥梁的纵向和垂向相对位移分别可以表示为：

$$u_{\mathrm{rb}}=u_{\mathrm{r}}-u_{\mathrm{b}}=N_1u_1+N_4u_3-N_1u_2-N_4u_4=N_{\mathrm{u}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{a}^{\mathrm{e}} \quad (5)$$

$$\begin{aligned}v_{\mathrm{rb}}&=v_{\mathrm{r}}-v_{\mathrm{b}}=N_2v_1+N_3\theta_1+N_5v_3+N_6\theta_3\\&\quad-N_2v_2-N_3\theta_2-N_5v_4-N_6\theta_4=N_{\mathrm{v}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{a}^{\mathrm{e}}\end{aligned} \quad (6)$$

式中，下标 r 和 b 分别为钢轨和桥梁；上标 T 为矩阵转置；N_1～N_6 分别为二维欧拉梁单元结点位移和转角的插值函数[16]。

则高分子材料纵向和垂向连续支承弹簧的弹性势能可以表示为：

$$\Pi=\frac{1}{2}\int_0^l\left(k_{\mathrm{fillx}}u_{\mathrm{rb}}^2+k_{\mathrm{filly}}v_{\mathrm{rb}}^2\right)\mathrm{d}x=\frac{1}{2}\boldsymbol{a}^{\mathrm{eT}}\left(\boldsymbol{k}_{\mathrm{fillx}}^{\mathrm{e}}+\boldsymbol{k}_{\mathrm{filly}}^{\mathrm{e}}\right)\boldsymbol{a}^{\mathrm{e}} \quad (7)$$

式中，k_{fillx} 和 k_{filly} 分别为高分子填充材料的纵向和垂向刚度。

借助 MATLAB 的符号表达式可以容易计算出 $\boldsymbol{k}_{\mathrm{fillx}}^{\mathrm{e}}$ 和 $\boldsymbol{k}_{\mathrm{filly}}^{\mathrm{e}}$ 的显示表达式，由于矩阵较大，此处不予给出。

1.2 模型概况及求解

将跨中单元和梁缝处单元按照一定的排列顺序进行刚度矩阵的组装，即可以得到整个桥上嵌入式轨道无缝线路的总刚度矩阵。

一般在进行梁单元温度应力计算时，将梁单元的温度转换为等效温度结点荷载进行考虑。对于本文所采用的两结点二维欧拉梁单元而言，其等效温度结点荷载可以表示为：

$$\begin{bmatrix}F_{\mathrm{N}i} & F_{\mathrm{N}j}\end{bmatrix}=\frac{\left(T_i+T_j\right)EA\alpha}{2}\begin{bmatrix}-1 & 1\end{bmatrix} \quad (8)$$

式中，F_{N} 为温度荷载的等效结点轴向力；i、j 为梁单元的结点；T_i 和 T_j 分别为梁单元结点 i、j 结点的温度变化量；E、A 和 α 分别为梁单元的弹性模量、截面面积和热膨胀系数。

根据黄埔有轨电车实际工程，桥上无缝线路模型跨径为 5×18 m 连续梁+6×18 m 连续梁+3×38 m 连续梁+5×18 m 连续梁+4×18 m 连续梁，两端路基长度为 60 m，桥梁支座布置方案如图 2 所示，图中圆形表示活动支座，三角形表示固定支座。

由图 2 可知，分析工况存在多个较大的温度跨度(108、130、92 和 72 m)，其中最大的温度跨度为 130 m(第 9 跨至第 13 跨)。以广州市为例，钢轨的最高温度为 59.1℃，最低温度为 0℃，钢轨的锁定温度设定为 30℃，允许上下浮动 5℃。当温度下降时，钢轨最大温差为 35℃。桥梁整体温度荷载取为年温差 30℃。模型计算参数如表 1 所示。

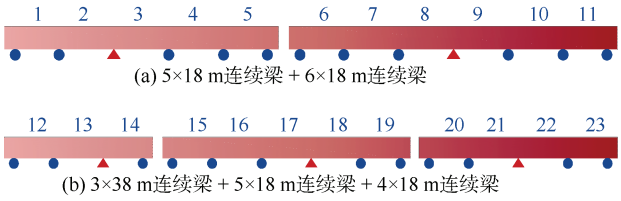


图 2 桥梁支座布置方案

Figure 2 Layout scheme of bridge bearings

表 1 无缝线路计算参数

Table 1 Calculation parameters of CWR

类别	名称	数值表正文
高分子材料	垂向刚度/(kN/mm/m)	50
	纵向阻力/(kN/mm/m)	15
连续梁	弹性模量/GPa	34.5
	截面面积/m^2	6.96
	惯性矩/m^4	5.44
	形心距上翼缘距离/m	0.79
	形心距下翼缘距离/m	1.80
	桥墩纵向刚度/(kN/cm)	1 000
桥台	纵向刚度/(kN/cm)	2 000

2 桥上无缝线路铺设方案研究

2.1 不设置钢轨伸缩调节器

本节将分析在不设置钢轨伸缩调节器的情况下，不同桥梁年温差对桥上嵌入式轨道无缝线路力学特性的影响，梁体整体温度荷载分别考虑为降温 10、20 和 30℃，梁轨相对位移和钢轨附加伸缩应力计算结果如图 3 所示，位移以向右为正，应力以拉为正。

分析图 3 可知，当桥梁降温时，每一联连续梁的两端向其固定支座处收缩，并通过高分子填充材料将力转递给槽型钢轨，从而带动槽型钢轨一起伸缩，故在梁缝处形成了较大的钢轨附加伸缩拉应力和梁轨相对位移。随着桥梁年温差的增长，梁轨相对位移和钢轨附加伸缩应力的最大极值均迅速增加，从而说明桥梁年温差对梁轨相对位移和钢轨附加伸缩应力的影响十分显著，且随着桥梁年温差的增加而近似呈线性增加趋势。在第二联连续梁桥的右侧梁缝处钢轨附加伸缩应力和梁轨相对位移达到最大值(即第 11 跨桥梁的右侧梁缝处)，当桥梁年温差为 30℃时，上述两者的

最大值分别为 201.87 MPa 和 12.79 mm。参考文献[6]通过室内模型试验结果并考虑一定的安全余量之后建议梁轨最大相对位移不应超过 6.20 mm，否则将导致高分子填充材料产生局部破坏。当桥梁年温差为 20 ℃时，梁轨相对位移的最大值为 8.52 mm，超过了 6.20 mm 的限值。

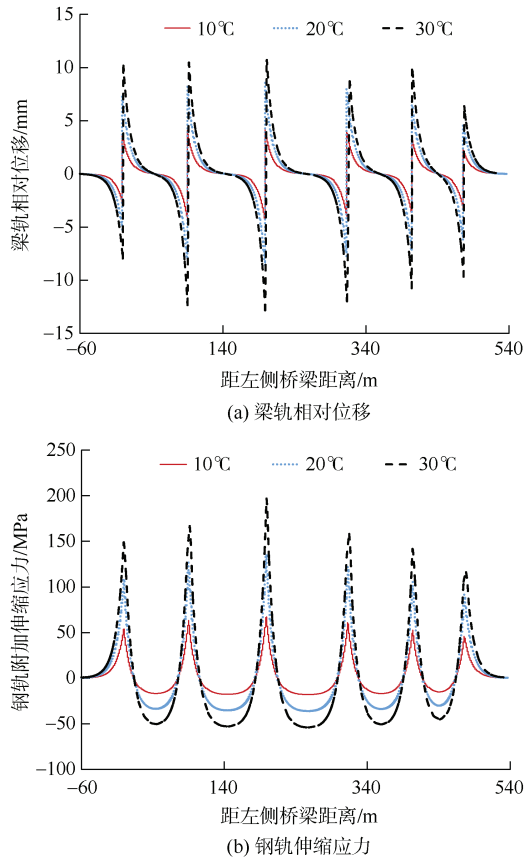


图 3　桥梁年温差的影响

Figure 3　Effect of annual bridge temperature variation

图 4 给出了高分子材料纵向阻力分别为每 m 5、10、15、20 和 25 kN/mm 时无缝线路在桥梁整体降温 30℃下的力学特性。

通过分析图 4 可知，桥梁与嵌入式轨道之间的纵向相互作用随着高分子材料纵向阻力的增加而逐渐加剧，从而使得梁轨相对位移逐渐减小，而钢轨附加伸缩应力逐渐增加。当高分子材料纵向阻力为 25 kN/mm/m 时，梁轨相对位移最大值为 12.07 mm，大于梁轨相对位移限值 6.20 mm，从而说明通过调整高分子材料纵向阻力难以将梁轨相对位移控制在限值之内。

为了节约成本、缩短工期，降低有轨电车建设对交通的影响，本文所依托工程直接利用既有的公路桥梁进行建造，桥梁固定支座位置难以改变，即桥梁温度跨度不能够进一步减小。故当不设置钢轨伸缩调节器时，嵌入式轨道将不能在含有较大温度跨度的连续梁桥上进行铺设。因此，对于本文工况，应该在梁端处设置钢轨伸缩调节器，从而使梁缝处的梁轨相对位移满足相应的要求。

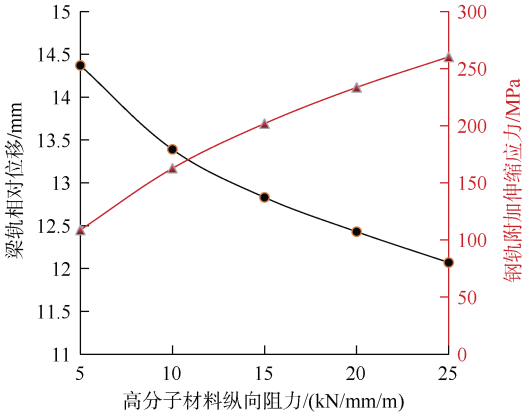


图 4　高分子材料纵向阻力的影响

Figure 4　Influence of longitudinal resistance of polymer materials

2.2　设置钢轨伸缩调节器

通过上述分析可知，由于桥梁温度跨度较大，当不设置钢轨伸缩调节器时，梁轨相对位移将会超过相应的限值。因此，本节将探讨设置钢轨伸缩调节器对桥上嵌入式轨道纵向受力和变形的影响。在普通线路中，普遍采用工字型钢轨，故传统的钢轨伸缩调节器也仅适用于工字型钢轨，将工字型钢轨加工成相互匹配的基本轨和尖轨，从而在调节钢轨伸缩的同时保证行车的安全性。而嵌入式轨道采用 60R2 槽型钢轨，且钢轨通过四周包裹的高分子填充材料进行支承，传统的钢轨伸缩调节器将不再适用于桥上嵌入式轨道无缝线路。

目前，国内部分厂家在双尖式钢轨伸缩调节器的基础上研发了适用于槽型钢轨的伸缩调节器[17]，如图 5 所示。该类槽型钢轨伸缩调节器主要由槽型尖轨 1、槽型尖轨 2、夹板 1 和夹板 2 等组成，通过槽型尖轨 1 和槽型尖轨 2 之间的间隙来实现钢轨的伸缩，该间隙取值根据实际工程中钢轨的伸缩量而定，一般情况下不大于 50 mm。槽型钢轨伸缩调节器具有结构空

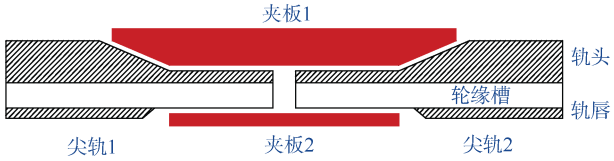


图 5　槽型钢轨伸缩调节器

Figure 5　Grooved rail expansion joint

间小、设计简单和少维护等优点，且车轮经过槽型钢轨伸缩调节器时，车轮踏面将与夹板 1 接触，从而保证了轨道线路的连续性。

通过 2.1 节分析可知，钢轨附加最大伸缩应力出现在连续梁的梁缝附近，为了最大程度发挥钢轨伸缩调节器平衡线路和桥梁之间伸缩差的作用，钢轨伸缩调节器优先设置在钢轨附加伸缩应力和梁轨相对位移的极值处，工况 1 设置 1 个槽型钢轨伸缩调节器，设置在第 11 跨桥梁的右侧梁端处；工况 2 设置 2 个槽型钢轨伸缩调节器，设置在第 11 跨和第 19 跨桥梁的右侧梁端处。

在进行分析时，钢轨和桥梁分别降温 35℃和 30℃，计算结果如图 6 所示。

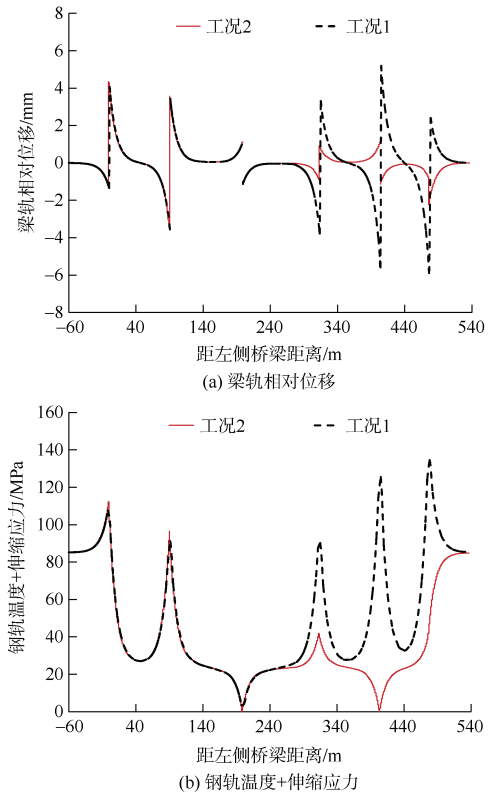


图 6　钢轨伸缩调节器的影响

Figure 6　Influence of rail expansion joint

分析图 6 可知，当在第 11 跨桥梁的右侧梁端处设置 1 个槽型钢轨伸缩调节器时，梁轨相对位移的极值为 5.84 mm，已经小于 6.20 mm 的限值，但安全余量相对较小，梁轨相对位移的极值出现在第 19 跨桥梁的右侧梁缝处。当在第 11 跨和第 19 跨桥梁的右侧梁端处各设置 1 个槽型钢轨伸缩调节器时，梁轨相对位移的极值进一步减小至 4.32 mm。当分别设置 1 个和 2 个槽型钢轨伸缩调节器时，钢轨温度+伸缩应力的极值分别为 143.58 MPa 和 112.24 MPa(钢轨温度应力为 85.23 MPa)。从而可知，当设置槽型钢轨伸缩调节器后，桥梁与嵌入式轨道之间的纵向相互作用力和相对位移将得到显著减小。

当如工况 2 设置 2 个钢轨伸缩调节器，桥梁降温 30℃，钢轨分别降温 5、15、25 和 35℃时，梁轨相对位移和钢轨附加伸缩应力计算结果如表 2 所示。

表 2　钢轨温差的影响

Table 2　Effect of rail temperature variation

钢轨温差/℃	梁轨相对位移/mm	钢轨附加伸缩应力/MPa
5	5.98	60.88
15	5.43	49.59
25	4.88	38.30
35	4.32	27.01

分析表 2 可知，随着钢轨温差的增加，从 5℃增至 35℃，梁轨的相对位移降低了 27.76%，且钢轨附加伸缩应力减少了 55.63%。其主要原因是当钢轨和桥梁的温度荷载取值相差较大时，钢轨和桥梁的纵向位移存在较大差异，即存在较大的梁轨相对位移，也进一步导致了钢轨附加伸缩应力的增加。当钢轨和桥梁分别降温 5℃和 30℃时(极端工况)，梁轨相对位移为 5.98 mm，小于 6.20 mm 的限值，从而说明对于本文所分析工况而言，分别在第 11 跨和第 19 跨桥梁的右侧梁端处各设置 1 个槽型钢轨伸缩调节器即可使得桥上嵌入式轨道无缝线路的梁轨相对位移满足要求。

3　结论

本文基于有限单元法提出嵌入式轨道-桥梁单元模型，并建立连续梁桥上无缝线路静力学模型，详细分析梁体温差、高分子材料纵向阻力和钢轨伸缩调节器设置方案对无缝线路纵向力学特性的影响，主要结论如下。

1) 桥梁年温差对梁轨相对位移及钢轨附加伸缩力有着极为显著的影响，二者随着桥梁年温差的增大近乎呈线性增长态势，且钢轨附加伸缩力和梁轨相对位移在第二联连续梁桥右侧梁缝处达到最大值。

2) 当桥梁年温差达到 30℃时，梁轨相对位移为 12.79 mm，已超出 6.20 mm 的限值。通过调整高分子材料纵向阻力，很难将梁轨相对位移控制在限值范围内，因此需要在桥上设置钢轨伸缩调节器。

3) 建议在第 11 跨与第 19 跨桥梁的右侧梁端分别设置 1 个槽型钢轨伸缩调节器，如此可使桥上嵌入式轨道无缝线路的梁轨相对位移符合要求。

参考文献

[1] 胡怡东，杨刚，马润涛，等. 城市轨道交通嵌入式连续支承轨道系统性能分析[J]. 城市轨道交通研究，2020，23(7): 102-107.
HU Yidong, YANG Gang, MA Runtao, et al. Performance analysis of continuously supported embedded rail track system in urban rail transit[J]. Urban mass transit, 2020, 23(7): 102-107.

[2] 黄志斌，曾志平，叶梦旋，等. 基于机器视觉的大跨长联桥上无缝线路小阻力扣件纵向服役状态监测研究[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2024，55(1): 409-418.
HUANG Zhibin, ZENG Zhiping, YE Mengxuan, et al. Research on longitudinal service condition monitoring of small resistance fasteners on long-span connecting bridge continuously welded rail based on machine vision[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2024, 55(1): 409- 418.

[3] 蔡小培，高梓航，张乾，等. 温度历程对斜拉桥上无缝线路纵向力的影响[J]. 铁道工程学报，2023，40(7): 20-26.
CAI Xiaopei, GAO Zihang, ZHANG Qian, et al. Influence of temperature loading process on longitudinal force of CWR on cable-stayed bridges[J]. Journal of railway engineering society, 2023, 40(7): 20-26.

[4] 刘文武，罗信伟，冯青松，等. 高架小半径曲线无缝线路挠曲受力及变形研究[J]. 铁道标准设计，2022，65(12): 38-43.
LIU Wenwu, LUO Xinwei, FENG Qingsong, et al. Deflection force and deformation of CWR in small radius curve section of viaduct[J]. Railway standard design, 2022, 65(12): 38-43.

[5] 韩志刚，刘增杰，张泽. 市域铁路连续梁桥墩合理纵向线刚度限值研究[J]. 铁道标准设计，2022，66(7): 83-87.
HAN Zhigang, LIU Zengjie, ZHANG Ze. Research on longitudinal stiffness limit of continuous beam piers for suburban railway[J]. Railway standard design, 2022, 66(7): 83-87.

[6] 冯青松，孙魁，罗信伟，等. 简支梁桥上有轨电车嵌入式轨道纵向力分析[J]. 铁道工程学报，2017，34(11): 27-32.
FENG Qingsong, SUN Kui, LUO Xinwei, et al. Longitudinal force analysis of tram embedded track on simply supported bridge[J]. Journal of railway engineering society, 2017, 34(11): 27-32.

[7] ENSHAEIAN A, RIZZO P. Stability of continuous welded rails: a state-of-the-art review of structural modeling and nondestructive evaluation[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2021, 235(10): 1291-1311.

[8] GAO Yuan, WANG Ping, WANG Kai, et al. Damage tolerance of fractured rails on continuous welded rail track for high-speed railways[J]. Railway engineering science, 2021, 29(1): 59-73.

[9] CUI Rixin, GAO Liang, YE Jun, et al. Long-term diagnostic technology for the monitoring of continuous welded rail on curves in a cold area[J]. AIP advances, 2021, 11(7): 075026.

[10] 谢浩然，徐凌雁，许婧，等. 桥跨布置对连续梁桥上轨道地震响应影响规律研究[J]. 铁道科学与工程学报，2023，20(10): 3873-3883.
XIE Haoran, XU Lingyan, XU Jing, et al. Seismic response of track system on continuous bridge under complex bridge structure arrangements[J]. Journal of railway science and engineering, 2023, 20(10): 3873-3883.

[11] 谭社会，林超，梅琴. 高速铁路有砟轨道钢轨伸缩调节器运营状态研究[J]. 铁道科学与工程学报，2021，18(4): 837-843.
TAN Shehui, LIN Chao, MEI Qin. Study on the operation status of ballasted track in the rail expansion joint of high-speed railway[J]. Journal of railway science and engineering, 2021, 18(4): 837-843.

[12] 冯青松，孙魁，雷晓燕，等. 简支梁桥上嵌入式轨道无缝线路可靠性分析[J]. 交通运输工程学报，2020，20(4): 70-79.
FENG Qingsong, SUN Kui, LEI Xiaoyan, et al. Reliability analysis of embedded track continuous welded rail on simply supported beam bridge[J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2020, 20(4): 70-79.

[13] 成伟，雷晓燕，刘庆杰，等. 简支梁桥上嵌入式轨道钢轨伸缩变形和受力算法研究[J]. 铁道建筑，2019，59(9): 106-110.
CHENG Wei, LEI Xiaoyan, LIU Qingjie, et al. Algorithm research of rail expansion deformation and stress of embedded track on simply-supported girder bridge[J]. Railway engineering, 2019, 59(9): 106-110.

[14] 蔡小培，高梓航，苗倩，等. 千米级主跨斜拉桥无缝线路受力与变形特性研究[J]. 北京交通大学学报，2019，43(6): 1-8.
CAI Xiaopei, GAO Zihang, MIAO Qian, et al. Study on stress and deformation characteristics of continuous welded rail on cable-stayed bridges with thousand-meter-scale main span[J]. Journal of Beijing Jiaotong university, 2019, 43(6): 1-8.

[15] LOU Ping, LI Te, HUANG Xinde, et al. Appropriate matching locations of rail expansion regulator and fixed bearing of continuous beam considering the temperature change of bridge[J]. Applied sciences, 2020, 10(17): 6046.

[16] 雷晓燕. 高速铁路轨道动力学：模型、算法与应用[M]. 2 版. 北京：科学出版社，2021.
LEI Xiaoyan. High speed railway track dynamics[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2021.

[17] 成都市新筑路桥机械股份有限公司，中铁山桥集团有限公司. 槽型钢轨伸缩调节器：CN201420860974.2[P]. 2015-06-24.
Chengdu Xinzhu Road & Bridge Machinery Co., Ltd, China Railway Shanqiao Group Co., Ltd. Grooved Rail Expansion Joint[P]. 2015-06-24.

（编辑：傅依萱）