

常导高速磁浮桥梁预拱度形式研究

陈绪黎¹, 向活跃¹, 田祥富¹, 李永乐¹, 曾敏²

(1. 西南交通大学土木工程学院桥梁工程系, 四川 成都 610031;

2. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063)

摘要: 为研究常导高速磁浮桥梁的预拱度形式, 计算了单跨轨道梁、双跨轨道梁和 40+60+40 m 连续梁在列车静活载、温度、收缩徐变作用下的变形, 并将以上变形组合为 12 种预拱度曲线; 采用车-桥耦合振动分析方法, 讨论了不同预拱度条件下车速、额定悬浮间隙、温度及收缩徐变、桥梁结构形式等因素对磁浮列车行车性能的影响; 以行车安全性和乘坐舒适性为评判指标, 分析常导高速磁浮桥梁的合理预拱度形式。结果表明, 车速越小、额定悬浮间隙越大, 列车荷载、温度荷载和收缩徐变作用下的桥梁变形与预拱度方向相反、大小接近时, 高速磁浮列车在单跨轨道梁上的舒适性和安全性指标更优; 各预拱度工况下, 磁浮列车在双跨轨道梁上的行车性能最优, 单跨轨道梁较 40+60+40 m 连续梁的舒适性更优, 行车安全性更差; 基于设置预拱度后的行车性能, 建议双跨度轨道梁可不设置预拱度, 单跨轨道梁和 40+60+40 m 连续梁桥可按 0.5 和 1 倍列车静活载设置预拱度。

关键词: 常导高速磁浮桥梁; 车-桥耦合振动; 预拱度; 收缩徐变; 温度变形

中图分类号: U443.35 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2023)03-0652-10

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2023.03.007

引言

磁悬浮轨道交通摆脱传统轮轨关系的束缚^[1], 具有噪声低、排放低、平稳性好、安全性能高、爬坡能力强、速度范围宽等优势^[2-3]。着眼于后高铁时代发展, 高速磁浮交通可填补高速铁路(350 km/h)与航空运输(800~1000 km/h)的速度空白^[4-5], 丰富中国综合立体交通网。2021 年 7 月, 具有完全自主知识产权的首套速度为 600 km/h 的高速磁浮交通系统成功下线。此外, 沪杭、济南至泰安以及昆明至大理等高速磁浮建设运营示范线的规划^[6], 标志着高速磁浮交通越来越受到重视。

常导电磁悬浮由于材料电阻大, 电流损耗较大, 所以产生的电磁吸引力较小^[7-8], 600 km/h 常导高速磁浮列车的稳态悬浮间隙为 8~13 mm^[9], 这对轨道梁的制造精度、变形和变位控制要求十分严格。混凝土梁由于导热性能较差, 长期暴露在环境中, 受气候变化、日照变化产生温度变形, 成桥后桥梁还会产生收缩徐变变形, 这两种变形都会降低磁浮线路的平顺性^[10], 从而对列车乘坐舒适性和行车安全性造成影响。

成桥预拱度可减小成桥后温度、收缩徐变以及

活载作用下桥梁变形的影响。文献[11-13]按经验曲线法(二次抛物线、余弦曲线)讨论了公路刚构桥成桥预拱度的设置; 陈恒大等^[14]推导出跨度小于 200 m 的公路连续刚构桥跨中成桥预拱度的估算公式, 并验证了公式的适用性。黎小刚^[15]基于车-桥耦合振动分析, 研究了大跨度混凝土斜拉桥列车静活载预拱度的合理设置。魏周春^[16]建立车-桥耦合振动模型, 分析不同预拱度对列车过桥安全性和舒适性的影响。以上文献对成桥预拱度的研究多针对公路和轮轨交通的大跨度桥梁, 《磁浮铁路技术标准(试行)》^[9]未对预拱度进行规定, 《高速磁浮交通设计标准》^[17]给出单跨轨道梁和双跨轨道梁的预拱度形式, 适用于设计速度为 500 km/h 及以下的常导高速磁浮交通, 现阶段对大跨度磁浮桥梁预拱度形式的研究则更为少见。

基于车-桥耦合振动分析方法, 针对规范^[17]要求的单跨轨道梁、双跨轨道梁及较大跨度的 40+60+40 m 连续梁桥共三种桥型, 以列车静活载、温度、收缩徐变等荷载作用下的变形设置预拱度曲线, 分析车速、额定悬浮间隙、温度及收缩徐变、桥梁结构形式等因素对不同预拱度曲线下行车性能的影响, 采用车辆的行车安全性、乘坐舒适性指标对三种桥型的预拱度形式进行评价。

收稿日期: 2021-09-09; **修订日期:** 2022-03-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51978589, 51778544); 中央高校基本科研业务费资助项目(2682021CG014); 中铁四院常导高速磁浮桥梁系统关键技术研究项目(2019K108)。

1 车-桥耦合模型

1.1 车辆模型

将上海磁浮列车作为车辆动力学分析模型,并简化为质量、弹簧和阻尼模型,如图 1 所示,默认右侧为车头,车辆参数见文献[18]。每节列车由 1 个车体、4 个悬浮架及悬挂其上的悬浮磁铁块和导向磁铁块等刚体构成,刚体间采用线性弹性和线性阻尼元件模拟连接。整车采用 5 节列车编组,每节车长为 24.768 m,满载时列车总重产生的均布荷载为 25.6 kN/m。根据达朗贝尔原理,车辆运动方程如下式所示:

$$M_v \ddot{X}_v + C_v \dot{X}_v + K_v X_v = F_v \quad (1)$$

式中 M_v, C_v 和 K_v 分别为车辆的总体质量、阻尼和

刚度矩阵; \ddot{X}_v, \dot{X}_v 和 X_v 分别为车辆的加速度、速度和位移向量; F_v 为车辆子系统和桥梁子系统之间的电磁力^[19],具体如下式所示:

$$F_v = \left[\begin{matrix} \sum_{w=1}^{12} f_w^z, & - \sum_{w=1}^6 l_{sw} f_w^z + \\ \sum_{w=7}^{12} l_{sw} f_w^z, & \dots, & \sum_{w=1+12k}^{12+12k} f_w^z, \\ - \sum_{w=1+12k}^{6+12k} l_{s(w-12k)} f_w^z + \sum_{w=7+12k}^{12+12k} l_{s(w-12k)} f_w^z \end{matrix} \right]^T \quad (2)$$

式中 $\sum_{w=1+12k}^{12+12k} f_w^z$ 为作用在第 $1+12k$ 个磁铁上的沉浮力; $-\sum_{w=1+12k}^{6+12k} l_{s(w-12k)} f_w^z + \sum_{w=7+12k}^{12+12k} l_{s(w-12k)} f_w^z$ 为作用在第 $1+12k$ 个磁铁上的点头力矩; f_w^z 为第 w 个磁极上的电磁力; l_{sw} 为第 w 个磁极到磁铁块中心的距离。

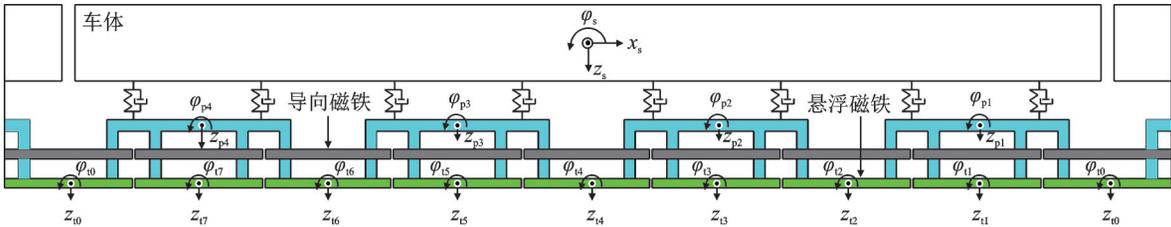


图 1 车辆动力学模型

Fig. 1 Train dynamic model

1.2 桥梁模型

桥梁采用商业有限元软件 ANSYS 建模,经动力特性分析得到自振频率、总体刚度、总体质量等信息,取阻尼比为 0.02,结合瑞利阻尼计算方法得到总体阻尼矩阵,桥梁运动方程写为以下形式:

$$M_b \ddot{X}_b + C_b \dot{X}_b + K_b X_b = F_b \quad (3)$$

式中 M_b, C_b 和 K_b 分别为桥梁的总体质量、阻尼和刚度矩阵; \ddot{X}_b, \dot{X}_b 和 X_b 分别为轨道梁的加速度、速度和位移向量; F_b 为车辆子系统和桥梁子系统之间的电磁力,与 F_v 大小相同、方向相反。

选用 10 跨 24.768 m 单跨轨道梁、5 个 2×24.768 m 双跨轨道梁和 $40+60+40$ m 梁轨分离式连续梁桥分别进行分析。连续梁桥的线间距为 5.6 m,下部箱梁采用超高性能混凝土,两侧轨道梁每段长度为 6.192 m,忽略其对桥梁刚度的贡献,仅考虑

质量效应。三种桥梁的截面特性以及一阶竖弯频率如表 1 所示,跨中截面形式如图 2 所示。

1.3 悬浮控制系统

常导高速磁浮列车与轨道梁之间通过电磁吸力实现悬浮,电磁力计算公式^[18]如下式所示:

$$f_w(i_w^t, h_w^t) = K_0 \left(\frac{i_w^t}{h_w^t} \right)^2 \quad (4)$$

式中 $f_w(i_w^t, h_w^t)$ 为车辆和轨道梁间第 w 个磁极上的电磁力,其中,上标“ t ”为电流的计算时刻,下标“ w ”为第 w 个磁极; K_0 为耦合系数; i_w^t 为控制电路中的电流; h_w^t 为磁铁块磁极和导轨之间的间隙,计算如下式所示:

$$h_w^t = h_0 + u_w(t) + u_g(x_w^t) + s_n(x_w^t) \quad (5)$$

式中 h_0 为列车静平衡状态下的悬浮间隙; $u_w(t)$ 和

表 1 三种桥梁截面特性及竖向基频

Tab. 1 Section characteristics and vertical fundamental frequencies of three kinds of bridges

桥梁类型	弹性模量/(N·m ⁻²)	竖向惯性矩/m ⁴	横向惯性矩/m ⁴	一阶竖弯频率/Hz
单跨轨道梁	3.6×10^{10}	1.814	1.629	6.629
双跨轨道梁	3.6×10^{10}	1.785	0.729	7.853
40+60+40 m 连续梁	4.4×10^{10}	21.021	29.313	3.746

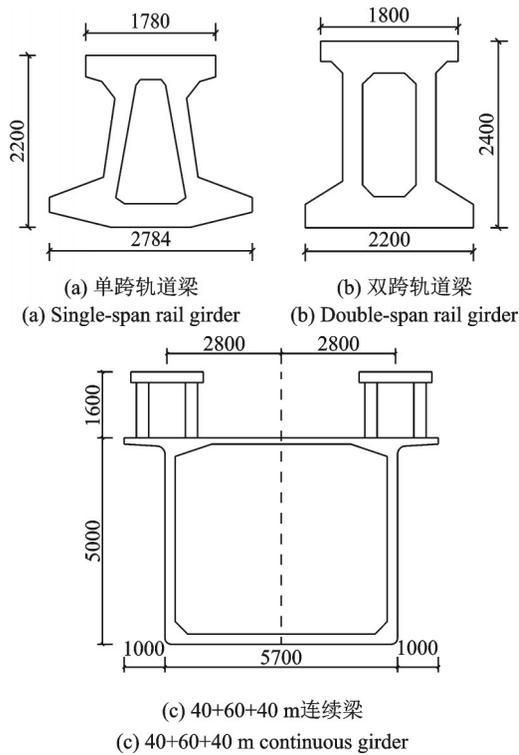


图 2 三种桥梁跨中截面示意图(单位:mm)

Fig. 2 Diagrams of midspan sections of three kinds of bridges (Unit: mm)

$u_g(x_w^t)$ 分别为第 w 个磁极处磁铁块和轨道梁的动位移; $s_\Omega(x_w^t)$ 为轨道不平顺值; x_w^t 为第 w 个磁极处的坐标。

采用PD控制系统,根据磁浮间隙动态变化实时调整磁铁块产生的电磁力,实现磁浮车辆稳定悬浮。该控制器计算间隙误差和间隙误差的导数值,并调整控制电流使间隙误差最小化,如下式所示:

$$i_w^{t+\Delta t} = \frac{h_w^{t+\Delta t} \left(V_0 + K_p e^{t+\Delta t} - K_d \dot{h}_w^{t+\Delta t} + \frac{2K_0}{h_w^{t+\Delta t} \Delta t} i_w^t \right)}{\frac{1}{\Delta t} - \frac{\dot{h}_w^{t+\Delta t}}{h_w^{t+\Delta t}} + \frac{h_w^{t+\Delta t}}{2K_0} R_0} \quad (6)$$

式中 $h_w^{t+\Delta t}$ 和 $\dot{h}_w^{t+\Delta t}$ 分别为 $t+\Delta t$ 时刻的磁浮间隙和磁浮间隙变化率; $e^{t+\Delta t} = h_0 - h_w^{t+\Delta t}$ 为间隙误差; V_0 为列车平衡状态时的控制电压; K_p 为比例参数; K_d 为微分参数; R_0 为磁极线圈电阻。

基于MATLAB软件,将前述车辆模型和桥梁模型视作两个独立的子系统,取空间步长为0.1 m,参照文献[20]的求解步骤,采用Nermark- β 法对式(1)和(3)进行求解。

2 预拱度形式

2.1 规范中的预拱度

《高速磁浮交通设计标准》^[17]对轨道梁定子面的

理论预拱度 z_i 作出以下规定:

$$\text{单跨轨道梁: } z_i = z_{\max} \times \frac{384}{120} \times \left(\frac{x_i}{L_0} - \frac{x_i^3}{L_0^3} + \frac{x_i^4}{L_0^4} \right) \quad (7)$$

$$\text{双跨轨道梁: } z_i = z_{\max} \times \frac{185}{48} \times \left(\frac{x_i}{L_0} - \frac{3x_i^3}{L_0^3} + \frac{2x_i^4}{L_0^4} \right) \quad (8)$$

式中 x_i 为计算点至轨道梁端支点中心距离, L_0 为轨道梁支承跨距, z_{\max} 为最大挠度计算值, 以上变量单位均为 mm。

z_{\max} 包含列车静活载预拱度、温度预拱度和长期收缩徐变预拱度。列车静活载预拱度, 需按桥梁在均布荷载 25.6 kN/m 作用下产生的最大竖向位移进行设置。温度预拱度需考虑温差变形的影响, 从而保证温度预拱和正负温差温度变形叠加后的效应满足磁浮控制系统的要求; 其中, 系统温度考虑整体升降温 25 °C, 顶板升温和顶板降温的计算参考《铁路桥涵混凝土结构设计规范》^[21], 竖向温差分布如图 3 所示:

$$T_y = T_{01} e^{-ay} \quad (9)$$

式中 T_y 为计算点 y 处的温差; 顶板升温时 T_{01} 取为 20 °C, a 取为 5 m⁻¹; 顶板降温时 T_{01} 取为 -10 °C, a 取为 14 m⁻¹。

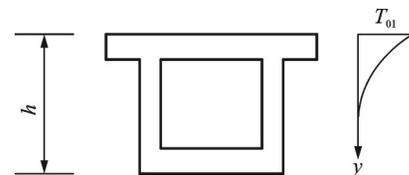
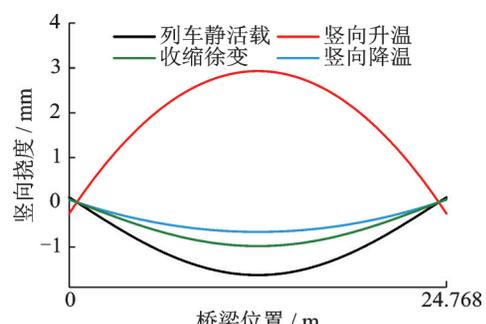


图 3 箱梁竖向温差分布图

Fig. 3 Distribution diagram of vertical temperature difference of box girder

长期收缩、徐变预拱度, 按约 50% 长期混凝土收缩、徐变变形考虑。经计算, 三种桥梁的列车静活载、竖向升温和竖向降温、收缩徐变的挠度曲线如图 4 所示。



(a) 单跨轨道梁

(a) Single-span rail girder

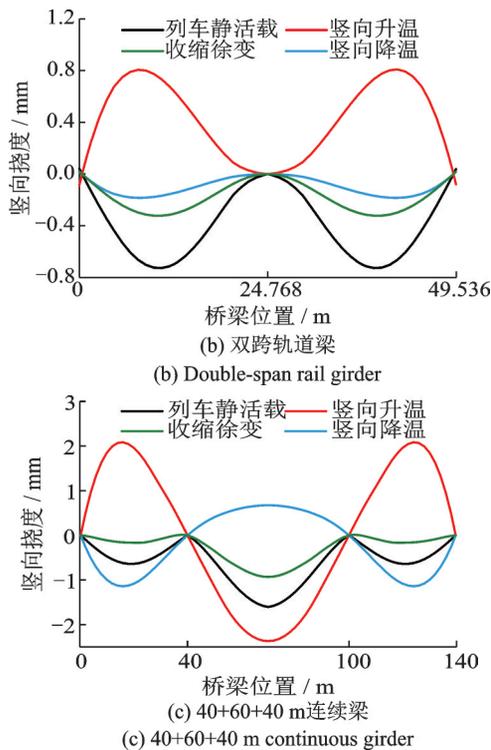


图4 三种桥梁的竖向变形曲线

Fig. 4 Vertical deformation curves of three kinds of bridges

2.2 预拱度工况设置

混凝土桥梁可考虑将列车静活载、温度及收缩徐变等作用下的变形组合设置为预拱度曲线,但生成预拱度曲线的组合方式有较大差异。

文献[11]的成桥预拱度考虑了整体升降温和非线性升降温变形影响,文献[12]按0.5倍静活载和长期收缩徐变设置预拱度。《高速磁浮交通设计标准》^[17]按列车静活载、升温、降温的期望温差效应、0.5倍长期收缩徐变设置预拱度。综合文献[11-12]和规范^[17]要求,列车静活载预拱度按0.5和1倍列车静活载竖向变形进行设置,温度预拱度按竖向升温变形、竖向降温变形、竖向升温、降温叠加变形进行设置,考虑到产生收缩徐变变形需要一定时间,长期收缩徐变预拱度按0,0.5和1倍长期收缩徐变变形进行设置。为设置参照,将预拱度为0,即不设置预拱作为预拱工况1,对上述三种变形综合考虑形成11种预拱度工况(工况7,8和9为《高速磁浮交通设计标准》^[17]要求的预拱度形式),各工况预拱度组合内容如表2所示。

单跨轨道梁、双跨轨道梁根据表2中的12种预拱度工况,结合图4(a)~(b)中轨道梁的竖向挠度最大值计算得到 z_{\max} ,再代入式(3)和(4),按电磁铁模块系统长度3.096 m对轨道梁预拱度曲线进行分段处理,得到两种轨道梁的12种预拱度曲线,如图5(a)和(b)所示。40+60+40 m连续梁桥无法按式(3)和(4)计算预拱度,但可参考 z_{\max} 包含的预拱度内

容,对图4(c)的挠度曲线反向,按表2组合为12种预拱度,如图5(c)所示。

表2 12种预拱度工况

Tab. 2 12 kinds of pre-camber conditions

工况	预拱度组合内容
1	不设预拱
2	0.5倍列车静活载
3	列车静活载
4	列车静活载+竖向升温
5	列车静活载+竖向降温
6	列车静活载+竖向升温、降温叠加
7	列车静活载+竖向升温+0.5倍收缩徐变
8	列车静活载+竖向降温+0.5倍收缩徐变
9	列车静活载+竖向升温、降温叠加+0.5倍收缩徐变
10	列车静活载+竖向升温+收缩徐变
11	列车静活载+竖向降温+收缩徐变
12	列车静活载+竖向升温、降温叠加+收缩徐变

2.3 分析步骤

轨道随机不平顺使车辆动力响应变异系数较大,与各预拱度形式叠加后,需进行大量计算才能评价不同预拱度对车-桥耦合振动响应的影响。同时,上海磁浮线实测定子面轨道不平顺显示,最大幅值^[22]为3 mm左右,图5中大部分预拱度工况幅值小于3 mm,为避免随机轨道不平顺作用淹没预拱度变形的影响,车-桥耦合振动分析时不考虑轨道随机不平顺的影响,仅将预拱度作为轨道不平顺输入进行分析。研究车速、额定悬浮间隙、温度和收缩徐变、桥梁结构形式对预拱度形式的影响,具体分析步骤如下:

①图4(a),(b)和图5(a),(b)中仅给出1个单跨轨道梁和1个双跨轨道梁的变形曲线和预拱度曲线,需根据轨道梁跨数对以上曲线进行重复设置,并按空间步长0.1 m线性插值,用作后续分析;连续梁桥无需重复设置,仅对变形曲线和预拱度曲线按0.1 m插值即可。

②将上一步处理后的预拱度曲线作为轨道不平顺,可计算仅有磁浮列车作用的车-桥耦合振动响应;同理,将竖向升温、竖向降温、竖向升温+收缩徐变、竖向降温+收缩徐变等作用下的变形曲线与预拱度曲线叠加以轨道不平顺形式输入,可考虑温度和收缩徐变的影响。

③按车速分别为450,500,550和600 km/h,额定悬浮间隙分别为8,10和13 mm,考虑温度和收缩徐变影响,桥梁结构形式为单跨轨道梁、双跨轨道梁和40+60+40 m连续梁桥,在12种预拱度形式下

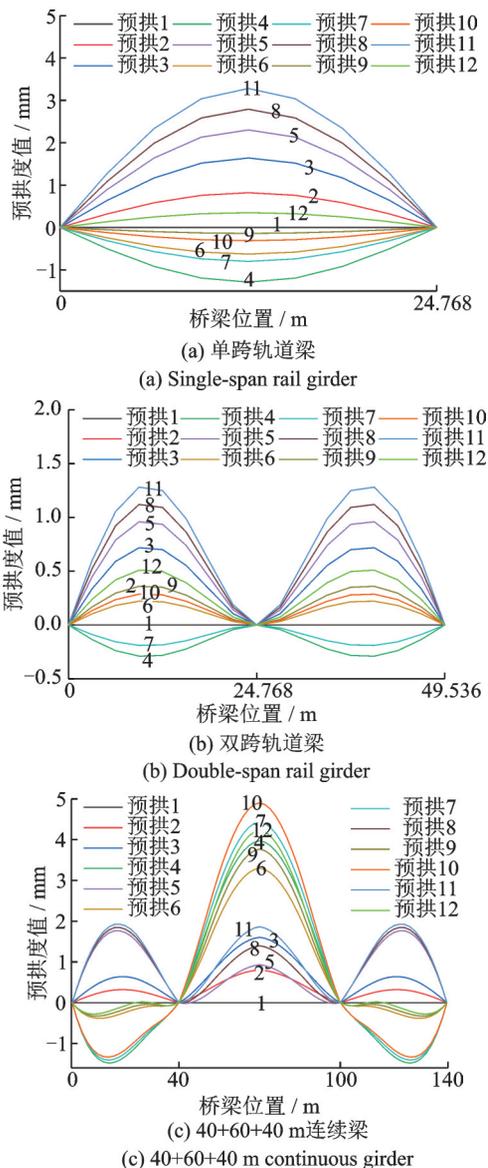


图5 三种桥梁的预拱度曲线

Fig. 5 Pre-camber curves of three kinds of bridges

进行车-桥耦合振动分析。

④以车体竖向加速度(舒适性指标)和列车悬浮间隙^[17, 19-20](安全性指标)作为评判指标对预拱度的合理形式进行分析,其中车体竖向加速度限值按《铁路桥涵设计规范》(TB 10002—2017)^[23]取为 1.3 m/s^2 ,列车悬浮间隙动态变化范围按 $\pm 4 \text{ mm}$ 计^[17],额定悬浮间隙为 8, 10 和 13 mm 时,对应的悬浮间隙范围分别为 4~12 mm, 6~14 mm 和 9~17 mm。

3 结果分析

3.1 车速的影响

为研究车速的影响,图6给出了额定悬浮间隙为 10 mm,仅考虑列车荷载作用时,单跨轨道梁的 12 种预拱度形式在不同车速下对车辆响应的影响。

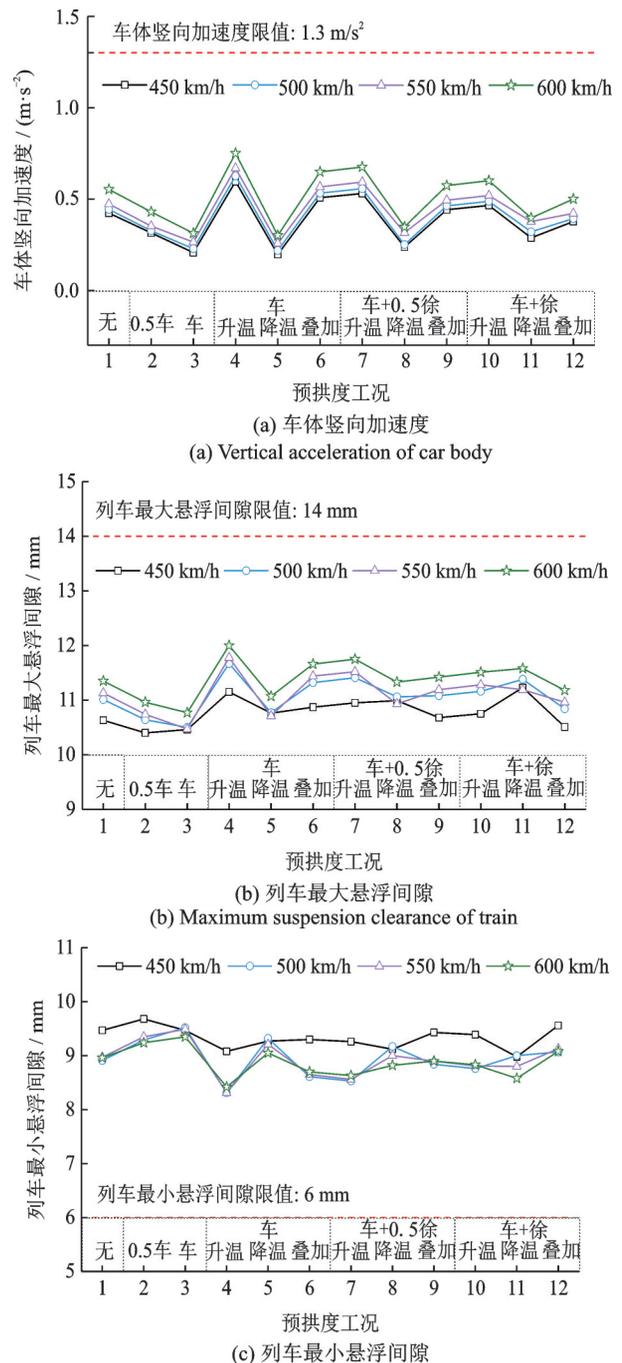


图6 车速对 12 种预拱度下车辆响应的影响

Fig. 6 Effect of train speed on train response considering 12 kinds of pre-camber

由图6(a)可见,随车速增加各预拱度工况下的车体竖向加速度均增加,其中不考虑预拱度影响时(见图6(a)工况1),车辆仍有一定的响应,这是由桥梁振动导致的,如图7所示。考虑列车静活载预拱度时(见图6(a)工况2和3),车辆响应有所减少,表明预拱度在一定程度上可降低车辆响应。图6(b), (c)显示,总体上随车速增加,列车悬浮间隙相对额定悬浮间隙的变化增加。

图6(a)的车体竖向加速度与图6(b), (c)的列车悬浮间隙受各预拱度工况影响的规律有差异,是

因为车体竖向加速度反映整车的响应规律,悬浮间隙反映一个磁极的响应规律,两者规律较难一一对应。综合图6(a)~(c),单跨轨道梁在不同车速下采用预拱度工况2,3和5相对其余工况可使车辆响应更小。

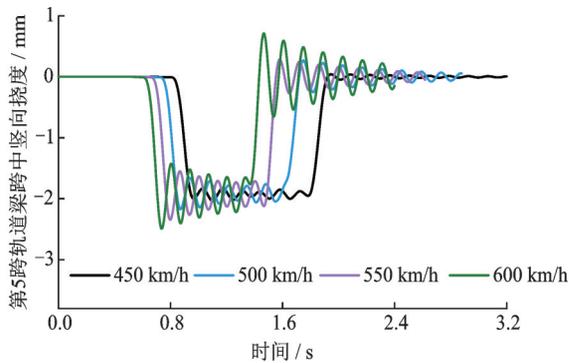


图7 不同车速下第5跨轨道梁跨中竖向位移时程曲线
Fig. 7 Time-history curve of mid-span vertical displacement of the 5th span rail girder considering different train speeds

分析可知,图7中磁浮列车以不同车速通过单跨轨道梁时,以第5跨轨道梁为例,其跨中向下的最大竖向动挠度为2~2.5 mm,车速越快,桥梁竖向挠度幅值越大。图5(a)显示预拱度工况12,2,3,5,8和11的向上变形分别为0.35,0.82,1.64,2.30,2.79和3.28 mm,其中预拱度工况8和11的向上变形大于最大竖向动挠度2.5 mm,预拱度工况12的向上变形最小,预拱度工况2,3和5的向上变形则更接近不同车速下的最大竖向动挠度,所以这3种工况下的车体竖向加速度、列车悬浮间隙相对额定悬浮间隙的变化较其余预拱度工况更小。

3.2 额定悬浮间隙的影响

3.1节结果显示,车辆响应随车速增加变大,后续均在车速600 km/h的基础上展开研究。当车速为600 km/h时,仅在列车荷载作用下,单跨轨道梁的12种预拱度形式在不同额定悬浮间隙下对车辆响应的影响如图8所示。

图8(a)~(c)显示,同一预拱度工况下,不同额定悬浮间隙对车辆响应影响较小,局部小图显示,总体上额定悬浮间隙越大,车体竖向加速度和列车悬浮间隙相对额定悬浮间隙的变化越小。同3.1节分析,单跨轨道梁在不同额定悬浮间隙下采用预拱度工况2,3和5相较其余工况的车辆响应更小。

3.3 温度与收缩徐变的影响

当车速为600 km/h,额定悬浮间隙为10 mm,单跨轨道梁的12种预拱度形式,考虑温度对车辆响

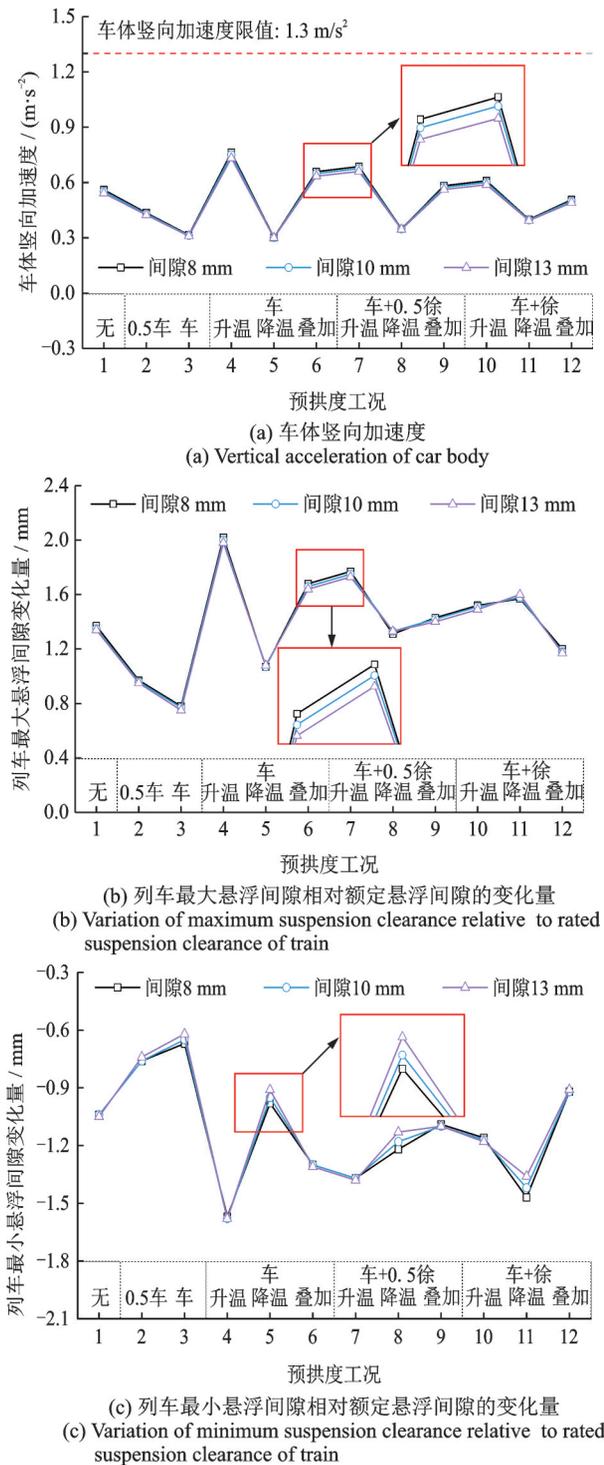
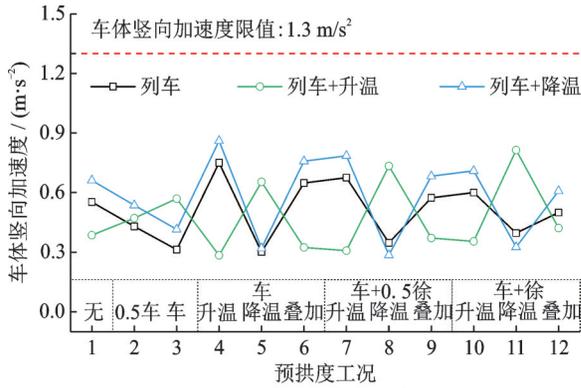


图8 额定悬浮间隙对12种预拱度下车辆响应的影响
Fig. 8 Effect of rated suspension clearance on train response considering 12 kinds of pre-camber

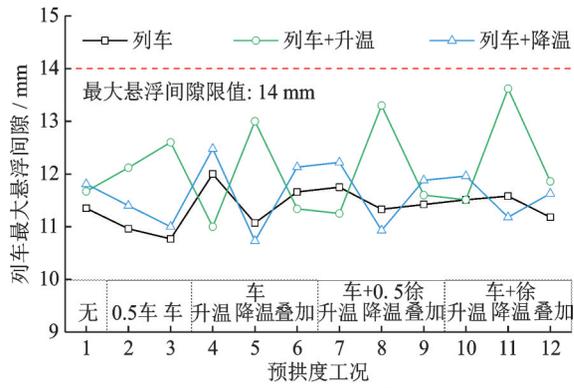
应的影响如图9所示,考虑温度和收缩徐变对车辆响应的影响如图10所示。

3.3.1 温度的影响

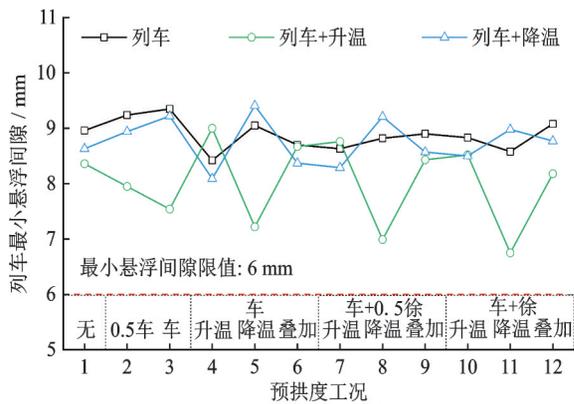
图9(a)显示,不设预拱度(见图9(a)工况1),列车+升温荷载作用下的车体竖向加速度相对列车荷载,列车+降温荷载更小。从图4(a)中可以看出,单跨轨道梁升温向上变形2.9 mm、降温向下变形0.6 mm。图7显示,列车荷载变形向下2.5 mm,升温



(a) Vertical acceleration of car body



(b) Maximum suspension clearance of train



(c) Minimum suspension clearance of train

图9 温度对12种预拱度下车辆响应的影响

Fig. 9 Effect of temperature on train response considering 12 kinds of pre-camber

变形抵消了列车荷载变形,而降温荷载则加剧了向下的变形,所以不设预拱度时,列车+升温荷载、列车荷载、列车+降温荷载的车体竖向加速度依次变大。不设预拱度时,图9(b),(c)中三种荷载作用下的列车悬浮间隙与图9(a)中车体竖向加速度的大小规律有差异,与悬浮间隙只反映一个磁极的规律有关。

图9(a)中,列车+升温荷载作用下,预拱度工况4,6,7,9和10相对工况1的车体竖向加速度更小,图5(a)显示这5种预拱度均向下,可抵消部分升温荷载向上变形的影响,而单跨轨道梁受列车荷载、

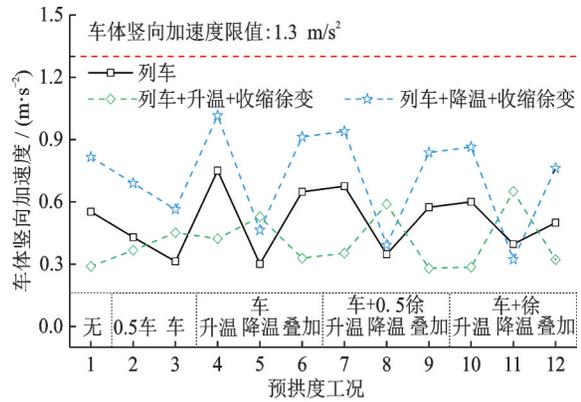
列车和降温荷载作用的变形向下,这5种预拱会加剧向下的变形,所以相对工况1的车体竖向加速度更大。相反地,预拱度工况2,3,5,8,11和12的变形均向上,则更有利于减小列车荷载、列车+降温荷载作用下的车体竖向加速度。图9(b),(c)中,各预拱度对升温荷载作用、降温荷载作用的削减或加剧的影响规律大致与图9(a)一致。

综合图9(a)~(c),预拱度工况4,6,7,9和11对列车荷载、列车和降温荷载的车辆响应较不利,且预拱度均向下,与设置向上预拱度要求不符,故不考虑;预拱度工况5,8和11对列车+升温荷载作用下的车辆响应更不利;所以单跨轨道梁采用预拱度工况2,3和12,考虑温度荷载后的车辆响应较小。

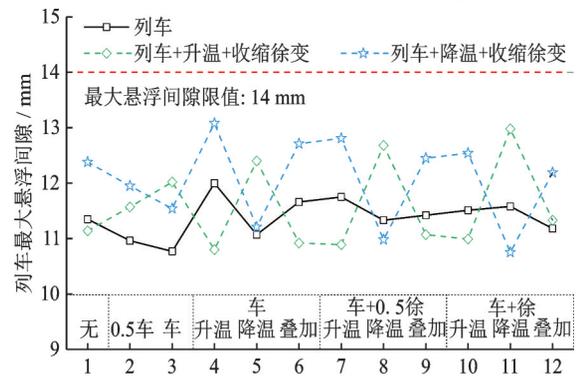
3.3.2 温度和收缩徐变的影响

图10(a)显示,无预拱度时(见图10(a)工况1),在列车+升温+收缩徐变共同作用下的车体竖向加速度响应较列车荷载、列车+降温+收缩徐变更小。从图4(a)中可以看出,收缩徐变向下变形约为1 mm、升温荷载向上变形2.9 mm,可将列车荷载向下变形2.5 mm大致抵消。

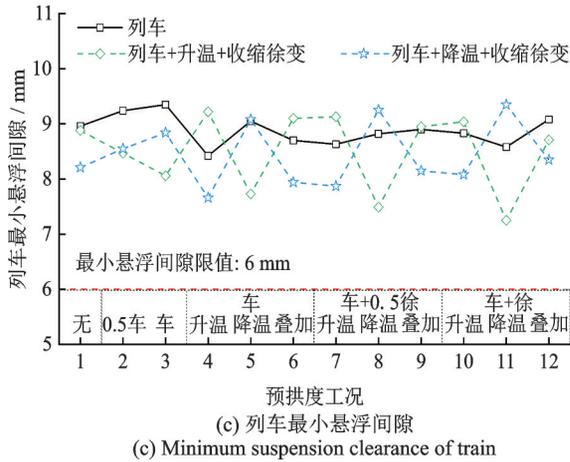
图10(a)中,在列车+升温+收缩徐变作用下,由于升温变形和收缩徐变变形已经削弱了大部分列车荷载的影响,所以后续预拱度设置对减小车体竖向加速度的效果不明显,在有利于降温变形的预拱



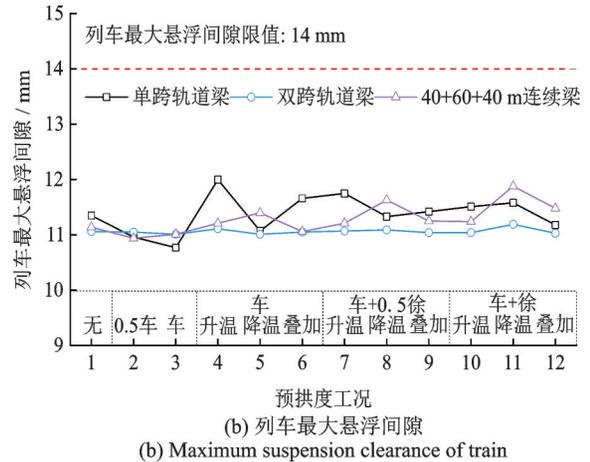
(a) Vertical acceleration of car body



(b) Maximum suspension clearance of train



(c) Minimum suspension clearance of train



(b) Maximum suspension clearance of train

图 10 温度和收缩徐变对 12 种预拱度下车辆响应的影响
Fig. 10 Effect of temperature and shrinkage creep on train response considering 12 kinds of pre-camber

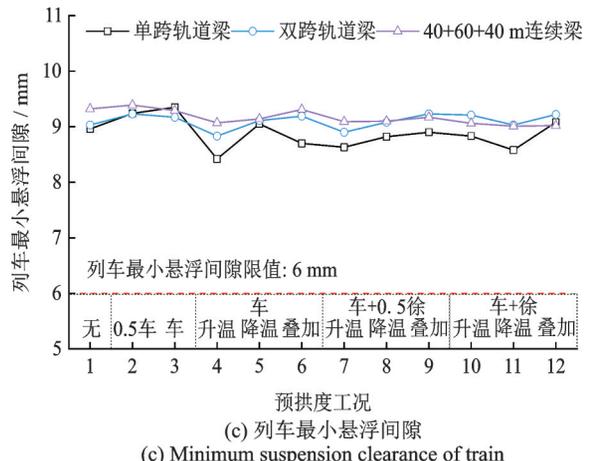
度工况 5, 8 和 11 处, 车辆竖向加速度明显增大。列车荷载、列车+降温+收缩徐变作用下的车体竖向加速度, 仍是在向上预拱度工况 2, 3, 5, 8 和 11 处响应较小。图 10(b), (c) 中, 各预拱度对升温 and 收缩徐变作用、降温 and 收缩徐变作用的削减或加剧的影响规律大致与图 10(a) 一致。

相比于图 9, 收缩徐变作用削弱了升温荷载对车辆响应的影响, 加剧了降温荷载的影响, 但温度荷载和温度荷载+收缩徐变在各预拱度下的规律仍较为一致; 综合图 10(a)~(c), 考虑温度和收缩徐变作用影响后, 单跨轨道梁采用预拱度工况 2, 3 和 12 后的车辆响应较小。

3.4 桥梁结构形式的影响

当车速为 600 km/h, 额定悬浮间隙为 10 mm, 列车荷载作用下, 12 种预拱度工况在不同桥梁结构形式下对车辆响应的影响如图 11 所示。

图 11(a)~(c) 显示, 双跨轨道梁相较于单跨轨道梁和 40+60+40 m 连续梁, 设置预拱度后 (其余工况与预拱度工况 1 比较), 车体竖向加速度和列车悬浮



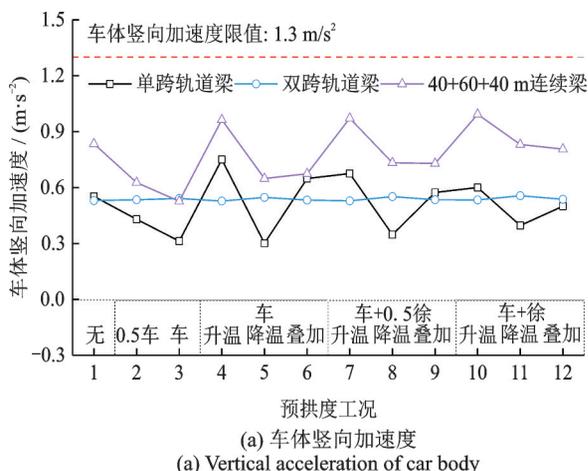
(c) Minimum suspension clearance of train

图 11 桥梁结构形式对 12 种预拱度下车辆响应的影响
Fig. 11 Effect of bridge structure form on train response considering 12 kinds of pre-camber

间隙范围的变化较小, 乘坐舒适性和行车安全性未得到有效改善, 可考虑不设置预拱度。单跨轨道梁和 40+60+40 m 连续梁在各预拱度工况下的车体竖向加速度变化规律大致相同, 单跨轨道梁的车体竖向加速度更小, 但多数预拱度工况下列车悬浮间隙波动更大。

图 5(c) 显示, 预拱度工况 4, 6, 7, 9, 10 和 12 在边跨的方向向下, 与设置向上预拱度要求不符。图 11(a) 显示, 40+60+40 m 连续梁桥的以上 6 种预拱度工况与预拱度工况 1 (不考虑预拱度) 作用下, 车辆竖向加速度均较大。图 11(b) 显示, 预拱度工况 5, 8 和 11 作用下, 列车最大悬浮间隙较大。综上分析, 40+60+40 m 连续梁在预拱度工况 2 和 3 作用下的车辆响应相对较小。由 3.1~3.3 节分析及图 11 显示, 单跨轨道梁在预拱度工况 2 和 3 作用下的车辆响应相对较小。

综上分析, 由于双跨轨道梁在设置预拱度工况后乘坐舒适性和行车安全性未被有效改善, 所以可考虑不设置预拱度; 单跨轨道梁和 40+60+40 m 连续梁, 在预拱度工况 2 和 3 作用下舒适性指标和安全性指标均较好, 可考虑分别按 0.5 和 1 倍列车静活载设置预拱度。



(a) Vertical acceleration of car body

4 结 论

按列车静活载、温度荷载和收缩徐变对桥梁产生的变形设置 12 组预拱度工况,考虑车速、额定悬浮间隙、温度和收缩徐变、桥梁结构形式的影响,进行磁浮列车-桥梁耦合振动分析,对各预拱度工况下的车体竖向加速度、列车最大悬浮间隙和列车最小悬浮间隙进行比较,结论如下:

(1)对于单跨轨道梁,总体上车速越小、额定悬浮间隙越大,每种预拱度工况对应的乘坐舒适性和行车安全性指标更好;当列车荷载、温度荷载和收缩徐变作用下的桥梁变形与预拱度变形方向相反、大小接近时,磁浮列车的舒适性和安全性指标更优。

(2)各预拱度工况下,双跨轨道梁的舒适性和安全性指标均优于单跨轨道梁和 40+60+40 m 连续梁;单跨轨道梁的舒适性指标优于 40+60+40 m 连续梁,但安全性指标更差。

(3)双跨度轨道梁在设置预拱度后的舒适性和安全性指标改善不明显,可考虑不设置预拱度。单跨轨道梁和 40+60+40 m 连续梁桥在预拱度工况 2 和 3 情况下的行车性能更优,可考虑按 0.5 和 1 倍列车静活载设置预拱度。

参考文献:

[1] 赵春发,翟婉明.磁悬浮车辆系统动力学研究[J].中国铁道科学,2003,24(4):139-141.
Zhao Chunfa, Zhai Wanming. Maglev vehicle system dynamics[J]. China Railway Science, 2003,24(4): 139-141.

[2] 翟婉明,赵春发.现代轨道交通工程科技前沿与挑战[J].西南交通大学学报,2016,51(2):209-226.
Zhai Wanming, Zhao Chunfa. Frontiers and challenges of sciences and technologies in modern railway engineering[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(2): 209-226.

[3] 邓亚士,魏庆朝,时瑾.高速磁浮桥上轨道梁振动特性初步研究[J].振动工程学报,2008,21(3):248-254.
Deng Yashi, Wei Qingchao, Shi Jin. Vibration characteristics of guideway specific for bridge of maglev under irregularities[J]. Journal of Vibration Engineering, 2008,21(3): 248-254.

[4] 陈志贤,徐浩,李忠继,等.高速磁浮列车二系悬挂参数及轨道不平顺幅值研究[J].铁道标准设计,2021,65(7):65-69.
Chen Zhixian, Xu Hao, Li Zhongji, et al. Research on secondary suspension parameters and track irregularity amplitude of high-speed maglev train[J]. Railway Standard Design, 2021, 65(7): 65-69.

[5] 余浩伟,寇峻瑜,李艳.600 km/h 高速磁浮在国内的适应性及工程化发展[J].铁道工程学报,2020,37(12):16-20.
Yu Haowei, Kou Junyu, Li Yan. Adaptability and engineering development of 600 km/h high-speed maglev in China[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(12): 16-20.

[6] 龚俊虎,谢海林,鄢巨平.高速磁浮梁轨分离式桥梁与轨道设计和创新[J].铁道科学与工程学报,2021,18(3):564-571.
Gong Junhu, Xie Hailin, Yan Juping. Design and innovation of beam-track separated bridge and track in high-speed maglev[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(3): 564-571.

[7] 王莉,陈国辉.高温超导混合悬浮系统与常导悬浮系统的功耗分析[J].中国铁道科学,2008,29(1):89-92.
Wang Li, Chen Guohui. Comparison of the power consumption between the HTS hybrid suspension system and the normal electromagnetic suspension system[J]. China Railway Science, 2008,29(1): 89-92.

[8] 熊嘉阳,邓自刚.高速磁悬浮轨道交通研究进展[J].交通运输工程学报,2021,21(1):177-198.
Xiong Jiayang, Deng Zigang. Research progress of high-speed maglev rail transit[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(1): 177-198.

[9] 国家铁路局.磁浮铁路技术标准(试行):TB 10630—2019[S].北京:中国铁道出版社,2019.
National Railway Administration of People's Republic of China. Standard for technology of maglev railway (Trial): TB 10630—2019[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2019.

[10] 李闻秋.大跨连续刚构桥收缩徐变及温度效应对车桥系统耦合振动的影响[D].成都:西南交通大学,2014.
Li Wenqiu. The influence of creep-shrinkage and temperature effect on coupled vibration of vehicle-bridge system for long-span continuous rigid frame bridge[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.

[11] 张桃,肖盛燮,陶韬.预应力混凝土连续刚构桥预拱度的设置与控制[J].交通科技与经济,2012,14(4):7-10.
Zhang Tao, Xiao Shengxie, TAO Tao. The settings and control of pre-camber of prestressed concrete continuous rigid frame bridges[J]. Technology & Economy in Areas of Communications, 2012, 14(4): 7-10.

[12] 陈映贞,樊锋,李杰.悬臂施工预应力混凝土梁桥成桥预拱度设置方法研究[J].广东公路交通,2014,47(6):32-35.
Chen Yingzhen, Fan Feng, Li Jie. Research on pre-camber setting method for the pre-stressed concrete bridge by cantilevering construction[J]. Guangdong Gonglu Jiaotong, 2014, 47(6): 32-35.

[13] 唐杨.大跨径连续刚构桥预拱度设置研究[J].工程建设,2019,51(12):18-22.
Tang Yang. Study on pre-camber setting of large-span

- continuous rigid frame bridge[J]. Engineering Construction, 2019, 51(12): 18-22.
- [14] 陈恒, 邬晓光, 姚丝思, 等. 连续刚构桥梁跨中成桥预拱度估算公式[J]. 武汉大学学报(工学版), 2017, 50(1): 114-119.
- Chen Hengda, Wu Xiaoguang, Yao Sisi, et al. Estimation formula of pre-camber in completed bridge stage at mid-span of continuous rigid frame bridge[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2017, 50(1): 114-119.
- [15] 黎小刚. 大跨度轨道混凝土斜拉桥线形演化与控制方法研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
- Li Xiaogang. Research on alignment evolution and control method of long-span track concrete cable stayed bridge [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019.
- [16] 魏周春. 大跨度连续刚构拱桥无砟轨道动力特性分析[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(6): 45-50.
- Wei Zhouchun. Dynamic characteristic analysis of ballastless track on long-span continuous rigid frame arch bridge[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(6): 45-50.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 高速磁浮交通设计标准: CJJ/T 310—2021[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for design of high-speed maglev transit: CJJ/T 310—2021[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021.
- [18] Wang Z L, Xu Y L, Li G Q, et al. Modelling and validation of coupled high-speed maglev train-and-viaduct systems considering support flexibility[J]. Vehicle System Dynamics, 2019, 57(2): 161-191.
- [19] Xiang Huoyue, Tian Xiangfu, Li Yongle, et al. Dynamic interaction analysis of high-speed maglev train and guideway with a control loop failure[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2022, 22(10): 2241012.
- [20] Wang Dangxiong, Li Xiaozhen, Liang Lin, et al. Influence of the track structure on the vertical dynamic interaction analysis of the low-to-medium-speed maglev train-bridge system [J]. Advances in Structural Engineering, 2019, 22(14): 2937-2950.
- [21] 国家铁路局. 铁路桥涵混凝土结构设计规范: TB 10092—2017[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
- National Railway Administration of People's Republic of China. Code for design of concrete structures of railway bridge and culvert: TB 10092—2017[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017.
- [22] Shi J, Fang W S, Wang Y J, et al. Measurements and analysis of track irregularities on high speed maglev lines [J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, 2014, 15(6): 385-394.
- [23] 国家铁路局. 铁路桥涵设计规范: TB 10002—2017[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
- National Railway Administration of People's Republic of China. Code for design on railway bridge and culvert: TB 10002—2017[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017.

Analysis on pre-camber forms of high-speed EMS maglev bridge

CHEN Xu-li¹, XIANG Huo-yue¹, TIAN Xiang-fu¹, LI Yong-le¹, ZENG Min²

(1. Department of Bridge Engineering, School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China)

Abstract: To investigate the appropriate pre-camber of high-speed electromagnetic suspension (EMS) maglev bridges, the deformations of single-span guideway, double-span guideway and 40+60+40 m continuous girder under the action of train static load, temperature, shrinkage and creep are calculated, which are combined into 12 kinds of pre-camber curves. The influence of train speed, rated suspension clearance, temperature, shrinkage and creep, bridge structure on the performance of maglev train is discussed by means of train-bridge coupling vibration analysis method. With the driving safety and ride comfort index, the proper pre-camber form of the high-speed maglev bridge is analyzed. The results show that, the comfort and safety indexes of the high-speed maglev train on the single-span guideway are better, when the train speed is smaller, the rated suspension gap is larger, and the bridge deformation under train static load, temperature load, shrinkage and creep is opposite and close to the pre-camber. In each pre-arch condition, the train has the best driving performance on the double-span guideway, and the comfort of the train on the single-span guideway is better than that on the 40+60+40 m continuous girder, while the driving safety is worse. Based on the results of running performance, it is suggested that the pre-camber is not necessary for the double-span guideway, and the pre-camber for the single-span guideway and 40+60+40 m continuous beam can be set to 0.5 times and 1 time of train static load.

Key words: high-speed EMS maglev bridge; train-bridge coupling vibration; pre-camber; shrinkage creep; temperature deformation

作者简介: 陈绪黎(1997—),女,硕士研究生。电话: 18482216365; E-mail: 1185461579@qq.com。

通讯作者: 向活跃(1986—),男,博士,副教授。电话: 15928624030; E-mail: hy@swjtu.edu.cn。