

文章编号: 1674—8247(2023)03—0043—05

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2023.03.009

# 中美桥上无砟轨道设计荷载计算方法对比研究

代丰 林红松 杨文茂 徐浩

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘要:**为顺应中国铁路“走出去”的发展需求,通过对比中美规范规定的桥上无砟轨道结构设计荷载计算方法,以国际工程项目为背景,分析了2种规范计算方法及应用效果差异,提出了混凝土梁桥上无砟轨道结构设计荷载 AASHTO/ACI 计算方法,研究表明:(1) AASHTO/ACI 混凝土梁结构设计应满足系数加乘的极限状态荷载效应组合,极限状态分强度极限状态、极端事件极限状态、使用极限状态、疲劳极限状态4种;(2) AASHTO/ACI 桥上无砟轨道结构设计荷载一般情况应考虑恒载、竖向标准车辆荷载、摇摆力、离心力、纵向力、倾覆力、风载、梁轨相互作用力、地震荷载、脱轨荷载及断轨力,根据荷载方向确定各向设计荷载组合;(3) AASHTO/ACI 混凝土梁结构设计规范较中国铁路轨道设计规范考虑的桥上无砟轨道结构设计荷载种类更细化,设计荷载计算值更小,采用中国铁路轨道设计规范确定桥上无砟轨道结构设计荷载偏保守。

**关键词:** AASHTO; 无砟轨道; 桥梁; 极限状态法; 设计荷载

中图分类号: U213.2<sup>+</sup>44 文献标识码: A

## Comparative Study on Calculation Methods for Design Loads of Ballastless Tracks on Bridges Based on Chinese and American Standards

43

DAI Feng LIN Hongsong YANG Wenmao XU Hao

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** In order to meet the needs of “Going Global” of Chinese railways, by comparing the calculation methods for design loads of ballastless track structures on bridges stipulated in Chinese and American standards, and taking the international engineering projects implemented as the background, the differences in the calculation methods and application effects of the two standards were analyzed, and the calculation method for design loads of ballastless track structures on concrete girder bridges based on AASHTO/ACI was proposed. The results of the study show that: (1) The design of the concrete girder structure based on AASHTO/ACI shall satisfy the limit state load effect combination multiplied by a coefficient, and the limit state includes 4 types, namely strength limit state, extreme event limit state, serviceability limit state and fatigue limit state. (2) Generally, the design loads of ballastless track structures on bridges based on AASHTO/ACI include dead load, vertical standard vehicle load, swaying force, centrifugal force, longitudinal force, overturning force, wind load, girder-rail interaction force, seismic load, derailment load and rail breaking force, and the design load combination in each direction shall be determined according to the load direction. (3) The design load categories for ballastless tracks on bridges specified in AASHTO/ACI are more detailed than those in the

收稿日期: 2022-03-10

作者简介: 代丰(1988-),女,高级工程师。

基金项目: 中铁二院工程集团有限责任公司科学技术研究计划(KYY2019032(19-22))

引文格式: 代丰,林红松,杨文茂,等. 中美桥上无砟轨道设计荷载计算方法对比研究[J]. 高速铁路技术,2023,14(3):43-47.

DAI Feng, LIN Hongsong, YANG Wenmao, et al. Comparative Study on Calculation Methods for Design Loads of Ballastless Tracks on Bridges Based on Chinese and American Standards [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(3):43-47.

Chinese railway track design standards, and the calculated values of the design loads are smaller. It is more conservative to use the Chinese railway track design standards to determine the design loads of ballastless tracks on bridges.

**Key words:** AASHTO; ballastless track; bridge; limit state design method; design load

近年来,中国基建技术的持续输出为区域经济社会稳定发展注入了新的活力<sup>[1]</sup>。然而,中国铁路标准在“走出去”过程中面临的困境日益显现,越来越多的国际项目要求采用美国标准设计,或是先依据中美标准对比设计再考虑使用中国标准。混凝土梁桥上的无砟轨道结构设计,在设计之初应提出桥梁设计荷载,以此作为桥梁设计参数输入进而评估轨道结构适应性,因此准确提出桥上无砟轨道设计荷载是轨道及其下部基础结构设计的前提。

本文通过对比 AASHTO/ACI 混凝土梁结构设计规范<sup>[2-3]</sup>与中国铁路轨道设计规范(极限状态法)<sup>[4]</sup>的桥上无砟结构设计荷载计算方法,以实施的国际工程项目为背景,分析了中美规范计算方法及结果差异,提出了混凝土梁桥上无砟轨道结构设计荷载 AASHTO/ACI 计算方法,以供同业者熟悉美国规范中梁结构设计荷载的设计方法及参数选取,并助力中国铁路设计标准国际工程应用。

## 1 美标计算方法

梁结构设计荷载包括作用在梁结构的特殊、偶然和标准荷载。特殊和偶然荷载考虑紧急事件、养护维修和疏散设备等情况,荷载对梁结构的作用分类如表1所示,后选取常用荷载类别详细分析。

### 1.1 永久荷载

梁结构恒载  $DC$  应包括预制和现浇结构单元的自重,如轨道结构及其附属设施等。其他不均匀沉降、土压力和外部约束力等作用产生的荷载,按实际情况在设计中考虑。

### 1.2 瞬变荷载

#### 1.2.1 活载及其派生荷载

##### (1) 竖向标准车辆荷载 $LL$

竖向活载由产生最大荷载效应的一节或多节车辆重量产生,计算时考虑影响系数  $I$ 。对于易产生扭转变形的梁结构,乘客集中在车辆一侧产生的荷载效应(即倾覆力)  $LF$  应在设计中考虑,两股钢轨的车辆轴重分配按 1.25:1 计<sup>[5]</sup>。

##### (2) 摇摆力 $HF$

摇摆力由车辆和梁结构横向相互作用产生,通过轮轨接触点作用在梁体横向,不同车辆类型相应摇摆力取值如表2所示。若离心力和摇摆力同时作用,计

表1 梁结构作用分类表

类别	作用分类	作用名称
I	永久荷载	恒载
		土压力
		外部约束力
		不均匀沉降影响
		浮力
II	瞬变荷载	活载及其派生荷载
		风载
		结冰产生的荷载
		窄急海流产生的荷载
III	体积变化引起的荷载	温度
		梁轨相互作用
		收缩
		徐变
IV	偶然荷载	地震
		脱轨
		断轨
		碰撞荷载
V	施工荷载	恒载
		活载

算时取两者较大值。

表2 摇摆力取值原则表

转向架类型	摇摆力
非自导式转向架	0.08 $L$
自导式转向架	0.06 $L$

注:  $L$  表示车辆荷载

### (3) 离心力 $CF$

曲线段梁结构应考虑车辆离心力作用在梁上的分力,计算方法如式(1)所示。

$$CF = \frac{V^2}{Rg}L \quad (1)$$

式中:  $V$ ——车辆最大运行速度;

$R$ ——曲线半径;

$L$ ——标准车辆荷载;

$g$ ——重力加速度。

### (4) 纵向力 $BR$

纵向力在加速或减速过程中与竖向标准车辆荷载同时作用在车轮上,无缝线路轨道传递给梁结构的纵向力应在设计中考虑,不同刹车模式相应纵向力取值如表3所示。

表3 纵向力取值原则表

刹车模式	摇摆力
紧急刹车 $LF_e$	0.30L
常规刹车 $LF_n$	0.15L

注:L表示车辆荷载

1.2.2 风载WL

梁结构设计荷载应考虑水平和竖向设计风压,设计风载垂直于直线段梁结构或曲线段梁结构合力最大位置,水平设计风压 $F_h$ 和竖向设计风压 $F_v$ 计算方法如式(2)所示。

$$\frac{F_h}{F_v} = qC_e C_g C_d \quad (2)$$

式中: $q$ ——参考风压;

$C_e$ ——高度系数;

$C_g$ ——阵风系数;

$C_d$ ——风阻系数。

1.3 体积变化引起的荷载

1.3.1 梁轨相互作用TU

无缝线路梁结构应考虑钢轨温度变化产生的纵向力 $F_r$ ,曲线地段还应考虑钢轨温度变化产生的径向力 $F_R$ ,无缝钢轨弯曲产生的单位长度径向力计算方法如式(3)所示。

$$F_R = \frac{A_r E_r \alpha \Delta T}{R} \quad (3)$$

式中: $A_r$ ——钢轨横截面面积;

$E_r$ ——钢轨弹性模量;

$\alpha$ ——热膨胀系数;

$\Delta T$ ——温度变化;

$R$ ——曲率半径。

1.4 偶然荷载

1.4.1 地震荷载EQ

地震区域梁结构应考虑地震荷载作用,荷载取值依据《ASSHTO 荷载和抗力系数桥梁设计规范》<sup>[2]</sup>。

1.4.2 脱轨荷载DR

铁路梁结构设计应考虑水平和竖向脱轨荷载的共同作用,轮载应考虑1.0的动态荷载余量,脱轨荷载对梁结构产生的横向作用力在计算时按沿线路纵向5m范围内标准车辆荷载的50%计。

1.4.3 断轨力BRF

钢轨纵向伸缩对梁结构产生的最大断轨力取决于扣件系统的纵向约束力。

1.5 荷载组合和荷载系数

梁结构设计应满足系数加乘的极限状态荷载效应组合,极限状态分强度极限状态、极端事件极限状态、使用极限状态、疲劳极限状态4种,荷载组合及荷

载系数如表4所示。

表4 荷载组合和荷载系数表

荷载组合极限状态	永久荷载	瞬变荷载			体积变化引起的荷载		偶然荷载	
	DC	LL, HF, CF, BR, LF	WL	FR	TU	EQ	BRF	DR
强度极限状态I	1.25	1.75	-	1.0	0.5	-	-	-
强度极限状态II	1.25	1.4	1.5	1.0	0	-	-	-
强度极限状态III	1.25	0	-	1.0	0.5	-	-	-
强度极限状态IV	1.5	-	-	1.0	0.5	-	-	-
强度极限状态V	1.25	1.35	1.0	1.0	0.5	-	-	-
极端事件极限状态I	1.25	1.0	-	1.0	-	1.0	-	-
极端事件极限状态II	1.25	1.4	-	1.0	1.5	-	-	-
极端事件极限状态III	1.25	1.0	-	1.0	-	-	-	-
极端事件极限状态IV	1.25	0.5	1.0	1.0	-	-	-	1.4
极端事件极限状态V	1.25	1.0	1.0	-	-	-	-	-
极端事件极限状态VI	1.25	0.5	-	1.0	-	-	-	-
极端事件极限状态VII	1.25	1.0	-	1.0	-	-	1.2	-
使用极限状态I	1.0	1.0	0.3	1.0	1.0	-	-	-
使用极限状态II	1.0	1.3	-	1.0	1.0	-	-	-
使用极限状态III	1.0	0.8	-	1.0	1.0	-	-	-
使用极限状态IV	1.0	-	-	1.0	1.0	-	-	-
疲劳极限状态	0	1.0	-	-	-	-	-	-

2 国标计算方法

无砟轨道主体混凝土结构的极限状态设计包括承载能力极限状态和正常使用极限状态。无砟轨道结构设计作用包括列车荷载、温度作用、牵引或制动荷载等,并应考虑下部基础变形对轨道结构的影响。

2.1 列车荷载

列车竖向荷载标准值 $P_k$ 和横向荷载标准值 $Q_k$ 计算方法如式(4)和式(5)所示。

$$P_k = 2P_j \quad (4)$$

$$Q_k = 0.8P_j \quad (5)$$

式中: $P_j$ ——静轮重。

2.2 基础变形荷载

基础变形作用效应计算方法如式(6)所示,并进一步得到基础变形荷载 $P_{nqk}$ 。

$$M_{nqk} = EI\kappa \quad (6)$$

式中: $M_{nqk}$ ——无砟轨道基础变形作用弯矩;

$EI$ ——无砟轨道抗弯刚度;

$\kappa$ ——下部基础变形曲线的曲率,由式(7)计算可得。

$$\kappa = \frac{\pi^2}{L^2} \delta \quad (7)$$

式中: $L$ ——梁跨长度;

$\delta$ ——桥梁挠度。

### 2.3 温度梯度荷载

温度梯度作用效应计算方法如式(8)所示,并进一步得到温度梯度荷载  $P_{tdk}$ 。

$$M_{tdk} = W \frac{\Delta T \alpha_t E_c}{2(1-\nu)} \quad (8)$$

式中:  $M_{tdk}$ ——道床板温度梯度作用弯矩;

$W$ ——弯曲截面系数;

$\alpha_t$ ——混凝土线膨胀系数;

$\nu$ ——混凝土泊松比;

$\Delta T$ ——混凝土表层和底层温差;

$E_c$ ——道床板混凝土弹性模量。

$$\Delta T = T_g \beta_h \quad (9)$$

式中:  $T_g$ ——温度梯度;

$\beta_h$ ——道床板厚度修正系数。

### 2.4 线路纵向阻力

线路纵向阻力  $P_z$  按每轨计算,依据 TB 10015 - 2012《铁路无缝线路设计规范》以常阻力取值。

### 2.5 荷载系数和荷载组合

桥上无砟轨道荷载组合考虑列车荷载、基础变形荷载和温度梯度荷载,无砟轨道承载能力极限状态和正常使用极限状态荷载组合和荷载系数如表5所示。

表5 荷载组合和荷载系数表

荷载组合极限状态	$P_k$	$Q_k$	$P_{mk}$	$P_{tdk}$	$P_z$
承载能力极限状态	1.25	1.25	1	0.5	-
正常使用极限状态	0.75	0.75	1	0.5	-

注:列车荷载系数按时速200 km以下客货共线铁路取值

## 3 设计案例

某国际铁路工程项目设计轴重25 t,采用34 m混凝土箱梁桥上长枕埋入式无砟轨道结构,包括UIC60钢轨、轨枕、WJ-12扣件、道床板等结构部件,主要计算参数如表6所示。

根据AASHTO/ACI混凝土梁结构设计规范和《中国铁路轨道设计规范(极限状态法)》,由表4和表5计算得到的34 m混凝土箱型梁桥上无砟轨道结构设计荷载分别如表7和表8所示。

由表7和表8可知,基于中国规范计算方法的竖向和纵向设计荷载比美国规范计算结果大得多;而中国规范承载能力极限状态横向设计荷载比美国规范强度和极端事件极限状态计算结果最大值略大,中国规范使用极限状态横向设计荷载比美国规范正常使用极限状态计算结果最大值更大,可见采用中国规范确定桥上无砟轨道结构设计荷载更偏保守。

表6 无砟轨道主要计算参数表

部件	参数	取值
车辆	设计轴重/t	25
钢轨	弹性模量/Pa	$2.06 \times 10^{11}$
	质量/(kg/m)	60.21
	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	7850
	泊松比	0.3
扣件	垂向刚度/(N/m)	$5 \times 10^7$
	间距/m	0.610
道床板	弹性模量/MPa	$3.54 \times 10^4$
	长度/m	4.145
	宽度/m	3.0
	厚度/m	0.335
	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	2500
	泊松比	0.15
桥梁	支承刚度/(MPa/m)	1000

表7 美国规范计算结果表

荷载组合极限状态	$F_x$	$F_y$	$F_z$
强度极限状态I	22.043	386.098	9.375
强度极限状态II	46.962	342.496	7.500
强度极限状态III	0.150	9.959	0.000
强度极限状态IV	0.150	11.951	0.000
强度极限状态V	36.670	321.207	7.232
极端事件极限状态I	25.807	239.176	5.357
极端事件极限状态II	17.964	310.870	22.500
极端事件极限状态III	12.511	224.896	20.357
极端事件极限状态IV	111.287	138.511	2.679
极端事件极限状态V	32.142	245.979	5.357
极端事件极限状态VI	6.255	117.427	2.679
极端事件极限状态VII	12.511	224.896	16.157
使用极限状态I	18.699	229.229	5.357
使用极限状态II	16.563	287.385	6.964
使用极限状态III	10.308	179.916	4.286
使用极限状态IV	0.299	7.967	0.000
疲劳极限状态	12.511	214.936	5.357

注:  $F_x$  表示横向设计荷载;  $F_y$  表示竖向设计荷载;  $F_z$  表示纵向设计荷载

表8 中国规范计算结果表

荷载组合极限状态	$F_x$	$F_y$	$F_z$
承载能力极限状态	125	1238.69	36.60
正常使用极限状态	75	1113.69	36.60

注:  $F_x$  表示横向设计荷载;  $F_y$  表示竖向设计荷载;  $F_z$  表示纵向设计荷载

## 4 结论

结合国际项目的实施需求,通过对比中美规范桥上无砟轨道设计荷载计算方法,并以设计案例量化2种规范计算结果差异,得出主要结论如下:

(1) AASHTO/ACI混凝土梁结构设计规范规定了

梁结构设计应满足系数加乘的极限状态荷载效应组合,极限状态分5类强度极限状态、7类极端事件极限状态、4类使用极限状态和4类疲劳极限状态。

(2)基于AASHTO/ACI混凝土梁结构设计规范,桥上无砟轨道结构设计荷载一般情况应考虑恒载、竖向标准车辆荷载、摇摆力、离心力、纵向力、倾覆力、风载、梁轨相互作用力、地震荷载、脱轨荷载及断轨力,根据荷载方向确定各向设计荷载组合。

(3)中国无砟轨道混凝土结构极限状态设计包括承载能力极限状态和正常使用极限状态,桥上无砟轨道结构设计荷载按列车荷载、温度梯度荷载、基础变形荷载确定,考虑的荷载类型和组合状态较美国规范更粗。

(4)对于桥上无砟轨道结构设计荷载,AASHTO/ACI计算方法得到的竖向和纵向计算结果均比中国极限状态法计算结果小得多,横向计算结果较小,采用中国铁路轨道设计规范确定桥上无砟轨道结构设计

荷载更偏保守。

## 参考文献

- [1] 江涛,张倩倩.“一带一路”倡议下中国标准走出去的贸易效应[J].科技管理研究,2021,41(16):177-184.  
JIANG Tao, ZHANG Qianqian. Trade Effect of Chinese Standards Export under the Belt and Road Initiative [J]. Science and Technology Management Research, 2021, 41(16): 177-184.
  - [2] AASHTO LRFD Bridge Design Specification [S], Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2017.
  - [3] ACI 358.1R-92 Analysis and Design of Reinforced Concrete Guideway Structures [S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 1992.
  - [4] Q/CR 9130-2018 铁路轨道设计规范[S].  
Q/CR 9130-2018 Code for Design of Railway Track [S].
  - [5] EN 1991-2 Eurocode 1: Actions on Structures-Part 2: Traffic Loads on Bridges [S].
- 
- [1] 徐剑峰,吴积钦,张家玮.京沪高铁接触网定位点抬升特性研究[J].电气化铁道,2017,28(S1):205-207.  
XU Jianfeng. Study on Uplift Characteristics of Catenary Anchor Points in Beijing-Shanghai High-Speed Railway [J]. Electric Railway, 2017, 28(S1): 205-207.
  - [2] 邓小桃,胡卫.电气化铁路弓网关系分析及对策[J].技术与市场,2014,21(4):88-89.  
DENG Xiaotao, HU Wei. Analysis on the Relationship between Pantograph and Catenary in Electrified Railway and Its Countermeasures [J]. Technology and Market, 2014, 21(4): 88-89.
  - [3] TB 10009-2016 铁路电力牵引供电设计规范[S].  
TB 10009-2016 Code for Design of Railway Traction Power Supply [S].
  - [4] 林志海.高原高海拔地区牵引变电系统外绝缘修正设计[J].铁道标准设计,2012,56(6):138-141.  
LIN Zhihai. Optimization Design for External Insulation of Electric Equipment of Traction Power Supply System in Plateau and High Altitude Area [J]. Railway Standard Design, 2012, 56(6): 138-141.
  - [5] 隋延民.接触网定位器坡度计算及定位安全措施[J].铁道工程学报,2011,28(4):75-78.  
SUI Yanmin. Calculation of Steady Arm Grade and Registration Safety Measures [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011, 28(4): 75-78.
  - [6] 李刚.铝合金定位器在接触网中的应用研究[J].高速铁路技术,2018,9(5):53-55.  
LI Gang. Research on Application of Aluminum-alloy Steady Arm in the OCS [J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(5): 53-55.

(上接第31页)

High-Speed Railway OCS between China and Germany [J]. Railway Engineering Technology and Economy, 2021, 36(4): 27-30.

[2] 邓小桃,胡卫.电气化铁路弓网关系分析及对策[J].技术与市场,2014,21(4):88-89.

DENG Xiaotao, HU Wei. Analysis on the Relationship between Pantograph and Catenary in Electrified Railway and Its Countermeasures [J]. Technology and Market, 2014, 21(4): 88-89.

[3] TB 10009-2016 铁路电力牵引供电设计规范[S].

TB 10009-2016 Code for Design of Railway Traction Power Supply [S].

[4] 林志海.高原高海拔地区牵引变电系统外绝缘修正设计[J].铁道标准设计,2012,56(6):138-141.

LIN Zhihai. Optimization Design for External Insulation of Electric Equipment of Traction Power Supply System in Plateau and High Altitude Area [J]. Railway Standard Design, 2012, 56(6): 138-

141.

[5] 徐剑峰,吴积钦,张家玮.京沪高铁接触网定位点抬升特性研究[J].电气化铁道,2017,28(S1):205-207.

XU Jianfeng. Study on Uplift Characteristics of Catenary Anchor Points in Beijing-Shanghai High-Speed Railway [J]. Electric Railway, 2017, 28(S1): 205-207.

[6] 隋延民.接触网定位器坡度计算及定位安全措施[J].铁道工程学报,2011,28(4):75-78.

SUI Yanmin. Calculation of Steady Arm Grade and Registration Safety Measures [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011, 28(4): 75-78.

[7] 李刚.铝合金定位器在接触网中的应用研究[J].高速铁路技术,2018,9(5):53-55.

LI Gang. Research on Application of Aluminum-alloy Steady Arm in the OCS [J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(5): 53-55.