

1006- 2106(1998) 04- 0050- 56

# 铁路车-曲线桥系统的动力响应

李文会\* 许克宾

(北方交通大学 土木学院, 北京 100044)

**提 要** 本文以列车-曲线桥系统为研究对象,建立车-桥系统的空间振动分析模型。以一箱型简支梁为例,用计算机模拟列车过桥的全过程,计算了列车荷载作用下曲线桥的动力响应、列车的脱轨系数、轮重减载率、横向力和列车运行平稳性指标,分析了列车以较高速度通过曲线桥时,车-曲线桥系统的动力响应,并与直线桥作了比较。计算结果表明本文方法是有效的。

**主题词** 曲线桥 动力响应 运行平稳性

**分类号** U441.1 文献标识码 A

## 1 前 言

随着我国铁路既有列车提速及高速铁路建设工作的进展,桥梁在高速行驶列车荷载作用下的动力响应引起桥梁工作者的关注。近几年来,有关专家学者对列车提速及高速列车通过桥梁的动力响应作了大量的研究。通过研究高速列车作用下桥梁竖向及横向动力响应,分析了车辆、线路和桥梁三个方面的参数对桥梁动力响应的影响,给出了高速列车荷载下桥梁冲击系数的计算方法,从乘坐舒适度、轴重减载率或脱轨系数着手研究了桥梁的竖向允许挠度、横向刚度及横向摇摆力等问题。此项工作为我国铁路列车提速及高速铁路桥梁建设奠定了理论基础及依据。曲线桥因荷载的偏心作用、线路曲线半径、外轨超高等特征而有别于直线桥。然而,目前的研究主要集中在直线桥,对于曲线桥的动力响应没有给出相应的分析。本文在以往研究成果的基础上,分析了列车以较高速度通过曲线桥时,车-曲线桥系统的动力响应,并与直线桥作了比较。

## 2 车桥系统动力分析模型

### 2.1 坐标系的建立

由于本文的研究对象是直梁桥和曲线轨道上的机车车辆,为使各部分的分析结果意义比

\* 本文收稿日期: 1998- 09- 21 李文会 硕士 女 1974年 7月出生;许克宾 教授 博士生导师 北方交通大学土木学院桥梁教研室主任 铁道工程学会桥梁专业委员会委员

较明确,故分别对桥和车采用不同的坐标系。梁采用直角坐标系,线路及机车车辆采用曲线坐标系,如图 1 所示。

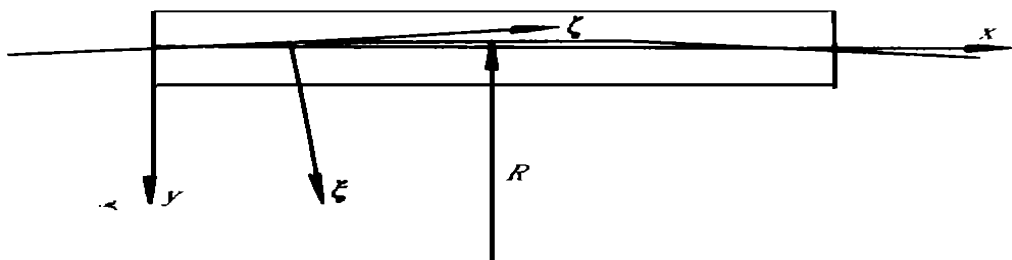


图 1 坐标系示意图

## 2.2 车辆空间振动分析模型

把具有两系弹簧装置的车辆简化为具有一系悬挂系统的多自由度振动体系,转向架的质量并入轮对。车辆空间振动分析模型的建立基于以下假定:

- (1) 车体、轮对均视为刚体,忽略振动中的弹性变形;
- (2) 相邻车辆的连接装置不影响每节车的振动;
- (3) 车辆匀速通过桥梁,轮对始终与轨面保持密贴;
- (4) 轨道曲线为圆曲线;
- (5) 外轨超高为常数

根据以上假定,每个车体考虑 5 个自由度,即横移  $a$ ,侧滚  $\theta_i$ ,摇头  $J_i$ ,沉浮  $Z$ ,点头  $h$ ;轮对考虑 4 个自由度,即横移  $a_{wij}$ ,侧滚  $\theta_{wij}$ ,摇头  $J_{wij}$ ,沉浮  $Z_{wik}$ 。因此,对于 4 轴机车或车辆,其总体自由度为 21 个。机车车辆模型如图 2 所示。

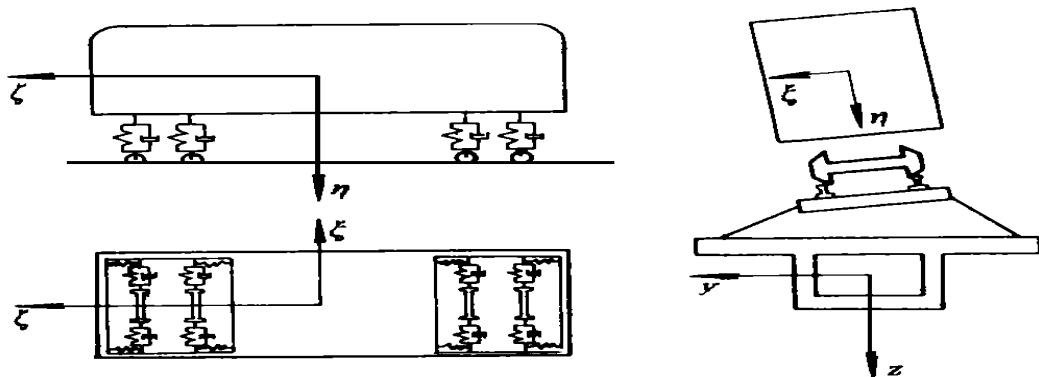


图 2 机车车辆模型

## 2.3 桥梁空间振动分析模型

当列车通过曲线桥时,列车荷载偏心地作用于梁上,使得梁体的横向扭转振动和竖向振动相互耦合,需采用空间模型进行分析。为减少计算自由度,对桥梁模型采用综合模态法。即:首

先求出桥梁的自振频率和振型,利用振型的正交性,把相互耦合的节点运动方程解耦,使其转化为相互独立的模态方程,利用若干个低阶振型就可对其整体振动进行分析。从而大大减少了计算工作量。桥梁空间振动分析模型建立的基本假定如下:

(1)假定桥梁的质量刚度和阻尼特性沿桥跨方向均匀分布;

(2)忽略支座桥台和桥墩的影响。

### 3 车 桥体系空间振动平衡方程组

#### 3.1 车辆动力平衡方程

对第  $i$  节车体列能量表达式,将各项能量表达式代入拉格朗日运动方程,得车体动力平衡方程。用矩阵形式表示如下:

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} M_i & & & \\ & J_{\theta_i} & & \\ & & J_{\dot{J}_i} & \\ & & & M_i \\ & & & & J_{\dot{Z}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{a}_i \\ \ddot{\theta}_i \\ \ddot{J}_i \\ \ddot{Z} \\ \ddot{h} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{hi} & -h_i C_{hi} & & & \\ -h_i C_{hi} & C_{\theta_i} & & & \\ & & C_{J_i} & & \\ & & & C_{vi} & \\ & & & & C_{hi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{a}_i \\ \dot{\theta}_i \\ \dot{J}_i \\ \dot{Z} \\ \dot{h} \end{Bmatrix} + \\
 & \begin{bmatrix} K_{hi} & -h_i K_{hi} & & & \\ -h_i K_{hi} & K_{\theta_i} & & & \\ & & K_Q & & \\ & & & K_{vi} & \\ & & & & K_{hi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_i \\ \theta_i \\ J_i \\ Z \\ h \end{Bmatrix} \\
 & = \sum_{j=1}^{2N_{wi}} \frac{1}{N_{wi}} \left\{ \begin{aligned} & 0.5SN_j S_{ij} (K_{Hi} a_{wij} + C_{Hi} \dot{a}_{wij}) + K_{\theta_{wi}} J_{wij} + C_{\theta_{wi}} \dot{J}_{wij} \\ & K_{vi} Z_{wij} + C_{vi} \dot{Z}_{wij} \\ & - 0.5SN_j S_{ij} (K_{vi} Z_{wij} + C_{vi} \dot{Z}_{wij}) \end{aligned} \right\} \\
 & + \begin{Bmatrix} -F_{ci} \cos U \\ 0 \\ 0 \\ F_{ci} \sin U \\ 0 \end{Bmatrix}
 \end{aligned}$$

其中  $C_{hi} = 2C_{Hi}$ ,  $K_{hi} = 2K_{Hi}$ ;  
 $C_{\theta_i} = 2C_{\theta_{wi}} + 2h_i^2 C_{Hi}$ ,  $K_{\theta_i} = 2K_{\theta_{wi}} + 2h_i^2 K_{Hi}$ ;  
 $C_{J_i} = 0.25 \frac{C_{Hi}}{N_{wi}} \sum_{j=1}^{2N_{wi}} S_{ij}^2$ ,  $C_{\theta_{wi}} = 0.25 \frac{K_{Hi}}{N_{wi}} \sum_{j=1}^{2N_{wi}} S_{ij}^2 + 2K_{\theta_{wi}}$ ;  
 $C_{vi} = 2C_{vi}$ ,  $K_{vi} = 2K_{vi}$ ;  
 $C_{hi} = 0.25 \frac{C_{vi}}{N_{wi}} \sum_{j=1}^{2N_{wi}} S_{ij}^2$ ,  $K_{hi} = 0.25 \frac{K_{vi}}{N_{wi}} \sum_{j=1}^{2N_{wi}} S_{ij}^2$

### 3.2 桥梁动力平衡方程

在桥梁空间振动分析模型假定的基础上,梁部任一横截面的竖向位移横向位移和扭转可由桥梁的前几阶振型函数的叠加表示。若取前  $N_q$  阶进行分析,则有:

$$Z_b(X) = \sum_{n=1}^{N_q} q_n H_v^n(X)$$

$$Y_b(X) = \sum_{n=1}^{N_q} q_n H_u^n(X)$$

$$\theta_b(X) = \sum_{n=1}^{N_q} q_n H_\theta^n(X)$$

式中  $H_v^n(X)$ 、 $H_u^n(X)$ 和  $H_\theta^n(X)$ 分别为第  $n$  阶振型函数的竖向横向和扭转分量的值。 $q_n$  为广义坐标。将各阶振型按广义质量等于 1 规格化,则对应于第  $n$  阶振型的模态方程为:

$$\ddot{q}_n + 2a_n \dot{q}_n + k_n^2 q_n = F_{ij}$$

式中  $a_n$  为第  $n$  阶振型阻尼比;

$k_n$  为第  $n$  阶振型的频率;

$F_{ij}$  为第  $i$  节车第  $j$  个轮对作用于桥上的广义力。

### 3.3 轮对摇头振动平衡方程

根据轮对与钢轨间的相互作用分析,轮对的横移、侧滚和沉浮可通过梁的相应位移表示(见联系方程),但其摇头振动位移是独立的,应单独考虑。轮对摇头振动平衡方程为:

$$J_{wi} \ddot{\theta}_{wij} + \frac{C_{jwi}}{N_{wi}} (\dot{\theta}_{wij} - \dot{\theta}_i) + \frac{K_{jwi}}{N_{wi}} (\theta_{wij} - \theta_i) = 0$$

式中  $J_{wi}$ ——第  $i$  车体第  $j$  个轮对摇头振动惯量;

$\theta_{wij}$ ——第  $i$  车体第  $j$  个轮对摇头振动位移;

### 3.4 联系方程

车-桥系统振动的主要激励源是轨道不平顺和车辆轮对的蛇行运动。列车在桥上运动时,轮对的位移和与其所在位置的桥梁之间满足下面的关系式:

$$a_{wij} = a_b(X_{ij}) + h_3 \theta_b(X_{ij}) + a_s(X_{ij}) = \sum_{n=1}^{N_q} q_n O_h^n(X_{ij}) + h_3 \sum_{n=1}^{N_q} q_n O_u^n(X_{ij}) + a_s(X_{ij})$$

$$Z_{wij} = Z_b(X_{ij}) + e \theta_b(X_{ij}) + Z_s(X_{ij}) = \sum_{n=1}^{N_q} q_n O_z^n(X_{ij}) + e \sum_{n=1}^{N_q} q_n O_\theta^n(X_{ij}) + Z_s(X_{ij})$$

$$\theta_{wij} = \theta_b(X_{ij}) + \theta_s(X_{ij}) = \sum_{n=1}^{N_q} q_n O_\theta^n(X_{ij}) + \theta_s(X_{ij})$$

式中  $O_z^n(X_{ij})$ 、 $O_h^n(X_{ij})$ 、 $O_\theta^n(X_{ij})$ 分别为第  $n$  阶振型函数在  $Y^a-Z$  坐标系中的竖向、横向和扭转分量的值。 $Z_s(X_{ij})$ 、 $a_s(X_{ij})$ 和  $\theta_s(X_{ij})$ 分别为由于轨道不平顺和轮对蛇行运动引起的轮轨间相对竖向、横向位移和转角。

将上述车辆动力方程、轮对摇头振动平衡方程和桥梁动力方程组合在一起,并把联系方程代入,即得车-曲线桥体系振动平衡方程组。

本文采用计算机模拟方法 ,模拟列车过曲线桥的全过程 用 Newmark<sup>U</sup>法求解振动平衡方程组。

4 车 曲线桥桥系统计算结果及对结果的初步分析

采用德国 ICE机车 假设列车在上桥前处于静止状态 ,即列车运行的初始位置是从桥梁的起始点开始。 并且认为列车上桥前桥梁结构处于静止状态。

机车以不同速度通过不同半径的曲线 ,计算各种工况下梁跨中动位移、车体向振动加速度、车体竖向振动加速度、脱轨系数及轮重减载率的最大值 并对车辆运行平稳性进行评价。 现将计算结果列表于下。(表 1~ 表 4)

表 1 梁跨中动力系数

轨道线形 车速 ( km / h )	曲线半径 $R$ (m)						直线
	1000	1200	1500	1800	2000	$R=9.5e10$	
100	1. 011	1. 012	1. 013	1. 014	1. 014	1. 015	1. 015
110	1. 011	1. 013	1. 015	1. 016	1. 017	1. 019	1. 018
120	1. 008	1. 011	1. 013	1. 015	1. 015	1. 017	1. 015
130	1. 005	1. 008	1. 010	1. 011	1. 012	1. 014	1. 014
140	1. 013	1. 015	1. 017	1. 017	1. 018	1. 020	1. 021
150	1. 012	1. 015	1. 018	1. 019	1. 020	1. 022	1. 021
160	1. 019	1. 015	1. 011	1. 009	1. 008	1. 007	1. 006

表 2 车辆运行平稳性指标

轨道线形 车速 ( km / h )		曲线半径 $R$ (m)										直线	
		1000		1200		1500		1800		2000			
		$W_1$	$W_2$	$W_1$	$W_2$	$W_1$	$W_2$	$W_1$	$W_2$	$W_1$	$W_2$	$W_1$	$W_2$
100		1. 660	3. 036	1. 644	2. 900	1. 639	2. 750	1. 639	2. 641	1. 639	2. 583	1. 647	2. 076
110		1. 821	3. 250	1. 774	3. 101	1. 744	2. 935	1. 733	2. 813	1. 729	2. 747	1. 722	2. 113
120		1. 977	3. 445	1. 896	3. 285	1. 836	3. 104	1. 809	2. 970	1. 799	2. 898	1. 769	2. 147
130		2. 127	3. 621	2. 012	3. 450	1. 919	3. 257	1. 872	3. 112	1. 853	3. 034	1. 797	2. 178
140		2. 274	3. 779	2. 128	3. 599	1. 999	3. 395	1. 929	3. 241	1. 900	3. 158	1. 809	2. 208
150		2. 425	3. 923	2. 249	3. 736	2. 084	3. 522	1. 988	3. 360	1. 947	3. 272	1. 813	2. 236
160		2. 258	4. 054	2. 381	3. 861	2. 180	3. 639	2. 058	3. 470	2. 003	3. 378	1. 812	2. 262

注:  $W_1$  为竖向舒适度指标 , $W_2$  为横向舒适度指标

表 3 脱轨系数  $t_g$ 、轮重减载率  $z_j$  计算结果

轨道线形 车速 ( km / h )		曲线半径 $R$ (m)										直线	
		1000		1200		1500		1800		2000			
		$t_g$	$z_j$	$t_g$	$z_j$	$t_g$	$z_j$	$t_g$	$z_j$	$t_g$	$z_j$	$t_g$	$z_j$
100		0. 068	0. 135	0. 057	0. 114	0. 045	0. 094	0. 038	0. 080	0. 034	0. 073	0. 009	0. 016
110		0. 082	0. 163	0. 069	0. 138	0. 055	0. 113	0. 046	0. 097	0. 041	0. 088	0. 009	0. 015
120		0. 098	0. 191	0. 082	0. 162	0. 065	0. 113	0. 054	0. 112	0. 049	0. 102	0. 008	0. 013
130		0. 115	0. 220	0. 096	0. 186	0. 077	0. 152	0. 064	0. 129	0. 057	0. 117	0. 007	0. 011
140		0. 134	0. 248	0. 111	0. 210	0. 089	0. 171	0. 074	0. 145	0. 067	0. 132	0. 007	0. 009
150		0. 154	0. 278	0. 128	0. 235	0. 102	0. 191	0. 085	0. 162	0. 077	0. 146	0. 006	0. 009
160		0. 176	0. 312	0. 146	0. 264	0. 117	0. 215	0. 097	0. 181	0. 087	0. 164	0. 006	0. 008

表 4 轮对横向力 (单位: KM)计算结果

轨道线形 车速 ( km / h )	曲线半径 $R$ ( m )				
	1000	1200	1500	1800	2000
100	10. 85	9. 04	7. 24	6. 04	5. 43
110	13. 13	10. 95	8. 76	7. 30	6. 57
120	15. 62	13. 02	10. 42	8. 69	7. 82
130	18. 32	15. 28	12. 22	10. 20	9. 18
140	21. 24	17. 71	14. 18	11. 82	10. 64
150	24. 37	20. 33	16. 27	13. 57	12. 22
160	27. 71	23. 11	18. 52	15. 44	13. 89

从以上计算结果列表中可看出:

(1)车速在 100 km/h~ 160 km/h 范围内时,曲线桥的跨中挠度最大响应与直线桥无大的差别,但其冲击系数大体上是小于相同跨度的直线桥的。因此,曲线桥的冲击系数按直线桥取值是偏于保守。

(2)目前已有曲线线路研究文献指出,列车通过曲线线路时,行车速度一般受到安全性、轨道强度和舒适度三方面的制约。其中旅客列车的乘客舒适度往往是主要矛盾。上述列表中的计算结果也表明了这一点。脱轨系数、轮重减载率、横向力和舒适度指标随车速的提高而增大。脱轨系数、轮重减载率均满足限值 ( $t_g < 1. 0, z_j < 0. 6$ )。但列车的横向舒适度问题比较突出。在轨道曲线半径  $R= 1\ 000\text{ m}$  情况下,车速为 100 km/h 时,车的横向舒适度指标已超过一般容许的最大值  $[W] = 3. 0$ 。然而,随着曲线半径的增大,这一临界速度也将增大。

(3)从乘客舒适度角度看,列车提速对线路特征要求较高。为了满足旅客舒适度的要求,线

## 中国铁路工程总公司十大青年科技标兵简介

### 于 增

于增,铁道部电气化工程局电气化设计院副总工程师,高级工程师,1963年 4月出生,中共党员,1985年西南交通大学本科毕业,从事铁道电气化设计专业。现为中国铁道学会电气化委员会变电分委员会副主任。

参加设计的我国首次采用“十字交叉”主变压器的延庆牵引变电所,是大秦铁路一期电气化工程设计获国家优秀奖的主要成果之一。作为变电专线负责人主持大秦铁路二期工程设计,采用新技术、共十三项,其中“V型天窗与反向行车供电方案”、“接触网V停分段开关远动装置”等,均属首次在我国电气化铁道上采用,大秦铁路二期铁道电气化工程获铁道部优秀设计一等奖。主持了大秦线一亿吨配套电气化工程技术设计。参与组织完成了上海地铁3号线初步设计。1998年开始担任北京至上海高速铁路电气化工程总体负责人,目前正积极开展设计。其论文“AT供电方式馈线继电保护的探讨”获天津市铁道学会优秀论文二等奖。

曾获北京市“首都青年建设奖章”。1995年被中国铁路工程总公司评为青年科技拔尖人才,1996年被铁道部评为青年科技拔尖人才。

---

路的曲线半径及外轨超高的限值需进一步研究。

(4)上述计算结果有一定规律,其趋势基本符合实际情况。因此,根据本文建立的车-曲线桥系统的空间动力分析模型,采用计算机模拟方法,研究车-曲线桥系统的振动问题是可行的。为进一步研究小曲线半径桥梁,及高速铁路曲线桥打下了基础。

### 参考文献

- 1 夏禾,陈英俊.车-梁-墩体系动力相互作用分析[J].土木工程学报,1992,25(2)
- 2 曹雪琴,桂志华.列车过桥箱型钢梁空间振动分析[J].上海铁道学院学报,1982,3(3)
- 3 付茂海,严隽耄.高速客车通过曲线时的动态响应及安全性研究[J].西南交通大学学报,1991,(1)

## DYNAMIC RESPONSE OF RAILWAY VEHICLE-CURVED BRIDGE

LI Wenhui XU Kebin

Northern Jiaotong University

**Abstract** In this paper, the vehicle-curved bridge system is studied. The spaced analytical model of a train passing on a curved bridge with a span of 32m, as example, is simulated by computer. The dynamic response of the bridge derailment quotient, the reduction rate of the wheel load and the train stability are calculated. The results are compared with the straight bridge. All of the results show that the proposed method is effective in use.

**Keywords** curved bridge; dynamic response; running stability