

文章编号:1671-8879(2005)04-0080-04

架桥机主梁结构瞬态动力学分析

吕彭民¹, 丁 智²

(1. 长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;

2. 北汽福田汽车股份有限公司, 北京 102206)

摘 要:以 JQ120 架桥机为研究对象, 针对架设边梁时的偏心动载荷所引起架桥机结构的弯扭耦合振动问题, 基于瞬态动力分析理论, 建立了架桥机主梁结构瞬态振动模型, 用模态叠加法对其进行了结构动力响应分析, 得到了该架桥机结构设计中应采用的动载系数($k=1.2$)。该结论也可作为其他架桥机设计时的参考。

关键词:机械工程; 架桥机; 主梁; 瞬态动力学分析; 动载系数

中图分类号:U445.36

文献标识码:A

Transient dynamic analysis of main beam structure of bridge-craft

LÜ Peng-min¹, DING Zhi²

(1. Key Laboratory for Highway Construction Technology and Equipment of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Beiqi Foton Motor Co Ltd, Beijing 102206, China)

Abstract: The JQ120 bridge-craft is taken as research object in this paper. To the bend-twist coupling vibration of the bridge-craft structure caused by eccentric dynamic load when the boundary beam is erected, the transient vibration model is established based on the transient dynamic analysis theory. The dynamic response of the structure is obtained by the model superposition. The dynamic load coefficient can be drawn from the analysis for structure design of the bridge-craft. The result can also be used as a reference for designning other bridge-crafts. 2 tabs, 8 figs, 6 refs.

Key words: mechanical engineering; bridge-craft; main beam; transient dynamic analysis; dynamic load coefficient

0 引 言

JQ120 架桥机是一种广泛用于公路桥梁预制混凝土梁片安装的施工机械^[1,2]。JQ120 架桥机适用于梁重 120 t, 梁长 35 m 以下的各种公路桥梁预制构件的起重安装工程。

在架设边梁时, 架桥机的外侧支腿横移到待安装边梁位置的中心, 然后用天车上的横移机构将梁片横向移出(此时架桥机整体结构承受一较大偏心

载荷), 进行落梁就位。在此过程中, 由于梁片需要准确对位安装, 天车起升系统难免反复制动和起动, 由此产生的惯性力相当于偏心动载作用在架桥机上, 引起架桥机总体结构的空弯扭耦合振动。

由于架桥机目前还属于非标准设计, 其结构设计主要参考起重机设计规范进行。为了对架桥机最危险工况结构动态响应进行分析, 本文以 JQ120 架桥机为例, 对其主要承载结构——主梁进行了偏心动载作用下的瞬态动力学分析, 依据分析结果得出

收稿日期: 2004-06-16

作者简介: 吕彭民(1957-), 男, 陕西渭南人, 长安大学教授, 博士研究生导师。

该架桥机结构设计中应采用的动载系数,该结论也可供其他架桥机设计时参考。

1 瞬态动力学分析的理论基础

瞬态动力学分析(亦称时间历程分析)是一种用于确定结构在任意随时间变化载荷作用下的响应技术。可以用瞬态动力学分析、确定结构在静载荷、瞬态载荷和简谐载荷的随意组合作用下的随时间变化的位移、应变、应力等。

1.1 强迫振动方程的建立

用有限元模型来理想化实际连续体,不管结构的形式如何,也不管研究的是平面振动问题还是空间振动问题,其运动方程式最终都可理想化为如下的多自由度质量——弹簧体系的运动方程式^[3]

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

式中: $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 分别为各单元的质量、阻尼和刚度矩阵; $\{\ddot{u}\}$ 、 $\{\dot{u}\}$ 、 $\{u\}$ 分别为单元节点的加速度、速度及位移列阵; $\{F(t)\}$ 为激励力列阵。

式(1)是以位移函数列矢量 $\{u\}$ 为未知量的耦合微分方程组, $\{u\}$ 既是时间的函数,又是空间坐标的函数。为了求解,可对矢量 $\{u\}$ 实行变量分离,将它分离为一系列仅与时间 t 有关的变量 $q_i(t)$ (又称为广义坐标)和仅与坐标 (x, y, z) 有关的矢量 $\{\phi\}_i$ 的乘积之和^[4],即

$$\begin{aligned} \{u\} &= q_1(t)\{\phi\}_1 + q_2(t)\{\phi\}_2 + \cdots + q_n(t)\{\phi\}_n = \\ &[\{\phi\}_1\{\phi\}_2\cdots\{\phi\}_n][\{q_1(t)\}\{q_2(t)\}\cdots \\ &\{q_n(t)\}]^T = [\phi]\{q(t)\} \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $[\phi]$ 相当于无阻尼振型矩阵, $\{q(t)\}$ 为线性组合因子列阵。从而,强迫位移矢量变成了各振型矢量与组合因子乘积的叠加。

将式(2)代入式(1),可得

$$[M][\phi]\{\ddot{q}(t)\} + [C][\phi]\{\dot{q}(t)\} + [K][\phi]\{q(t)\} = \{F(t)\} \quad (3)$$

将式(3)两边乘以 $[\phi]^T$,并考虑振型的正交性,即

$$\begin{cases} \{\phi\}_i^T [M] \{\phi\}_j = 0 \\ \{\phi\}_i^T [M] \{\phi\}_i = \bar{M} \\ \{\phi\}_i^T [K] \{\phi\}_j = 0 \\ \{\phi\}_i^T [K] \{\phi\}_i = \bar{K} = \bar{M}\omega^2 \\ \{\phi\}_i^T [C] \{\phi\}_j = 0 \\ \{\phi\}_i^T [C] \{\phi\}_i = \bar{C} \end{cases} \quad (4)$$

式中: \bar{M} 、 \bar{K} 、 \bar{C} 分别为广义质量、广义刚度和广义阻尼; ω 为自振频率。

考虑它们的广义矩阵(均为对角阵)

$$\begin{aligned} [\phi]^T [M] [\phi] &= [\bar{M}] \\ [\phi]^T [K] [\phi] &= [\bar{K}] = [\bar{M}][\omega^2] \\ [\phi]^T [C] [\phi] &= [\bar{C}] \end{aligned} \quad (5)$$

则式(3)可变为

$$\{\ddot{q}(t)\} + \frac{[\bar{C}]}{[\bar{M}]} \{\dot{q}(t)\} + [\omega^2]\{q(t)\} = \frac{[\phi]^T \{F(t)\}}{[\bar{M}]} \quad (6)$$

令 $[\bar{C}]/[\bar{M}] = 2[\xi][\omega]$ (ξ 为阻尼比),定义广义载荷为 $\{\bar{F}(t)\} = [\phi]^T \{F(t)\}$,则式(6)变为

$$\{\ddot{q}(t)\} + 2[\xi][\omega]\{\dot{q}(t)\} + [\omega^2]\{q(t)\} = \frac{\{\bar{F}(t)\}}{[\bar{M}]} \quad (7)$$

1.2 结构动力响应的计算

模态叠加法是一种用于瞬态动力学分析的快速、有效的方法,它是将从模态分析中得到的若干个振型(特征值)分别乘以系数后叠加起来,以计算多自由度系统的动力学响应^[4]。采用模态叠加法求解结构强迫振动响应的计算步骤为:

(1) 计算整体结构的自振频率及振型;

(2) 按式(4)及广义载荷计算式计算各振型的广义质量 \bar{M} 或其矩阵 $[\bar{M}]$;

(3) 根据激励力列阵 $\{F(t)\}$,计算广义激励力列阵: $\{\bar{F}(t)\} = [\phi]^T \{F(t)\}$;

(4) 选定阻尼比 ξ 。因为是钢结构,可采用 $\xi = 0.02$ 进行计算;

(5) 将以上所求各值代入式(7),用逐步积分法求解广义坐标 $\{q(t)\}$;

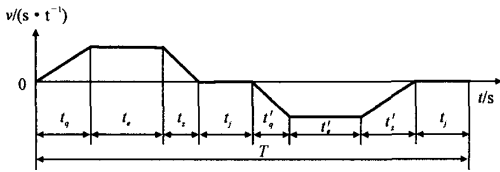
(6) 按式(2)计算强迫位移列向量 $\{u\}$;

(7) 用位移法求单元内力。

2 强迫函数的建立

天车起升机构在每个工作周期内,有两段工作时期和两段停歇时期。工作时期即起升梁片和下降梁片时期;停歇时期即起升机构不工作,而由操作人员在起动和制动之间变换的时期。每一工作时期又分为起动(加速)、稳定运动(等速)和制动(减速)3个阶段。在起动和制动阶段,机构作变速运动,因而有加速度与惯性力作用。为了简化计算,假定机构在起动、制动过程中作等加(减)速运动。图1所示为起升机构工作过程的速度-时间简图(速度的正值表示起升梁片;速度的负值表示下降梁片)。

根据图1,可确定其强迫函数^[5,6](即激励函数)应是非对称阶跃型函数 $F(t)$ (自变量时间 t 由起升



t_q, t'_q 为上升、下降起动时间; t_e, t'_e 为平稳上升、下降时间;
 t_x, t'_x 为上升、下降制动时间; t_j 为间歇时间; T 为周期

图1 起升机构工作过程的速度-时间简图

机构的电机特性以及实际操作情况确定),如图2所示(图2中, F 为不同阶段钢丝绳上所受的拉力值; t 为各个阶段所经历的时间)。

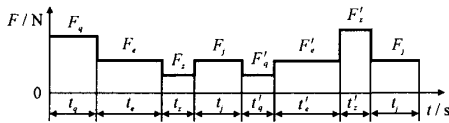


图2 架边梁时的激励函数

图3所示的天车受力模型,结合计算出的不同阶段钢丝绳所受的拉力值 F ,可得天车车轮对主梁左、右两边的作用力; $R_{左} = R_A/2$; $R_{右} = R_B/2$,然后再分别施加到主梁有限元模型中相应的位置。

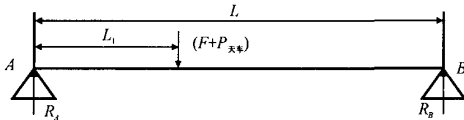


图3 天车受力模型

3 有限元模型的建立

该架桥机的主梁为空间桁架结构,这里采用空间梁单元进行模拟,有限元计算模型如图4所示。



图4 主梁结构有限元模型

4 支腿支反力响应分析

对主梁结构进行瞬态动力学分析之前,首先对其进行静力分析,可得出各支腿的支反力,如表1所示(其中, N_1, N_2, N_3 分别为架桥机前、中、后支腿左侧的支反力, N_4, N_5, N_6 分别为架桥机前、中、后支腿右侧的支反力)。

从表1看出,各支腿全部约束时,重载一侧后支腿处支反力 N_3 为负值(即为拉力,表明已与地面脱离接触),与实际情况不符,故应在有限元模型中去

除此约束重新计算。由静力分析结果知,后支腿的支反力与前、中支腿的支反力相比有较大差异,对整体结构影响较小,故在瞬态动力学分析中,只分析前、中支腿的响应历程。为了更好地观察各个变量的响应历程变化,取2个周期进行加载计算。前、中支腿支反力的响应历程见图5~图8。(下面提到的左和右是指面向架桥机前进方向时的左和右,其中左侧假定为载荷大的一侧,即重载的一侧;右侧假定为载荷小的一侧)

表1 各支腿支反力计算结果 /N

状态	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6
约束去除前	606 780	742 470	-522.05	274 330	385 470	29 863
约束去除后	606 850	742 160		274 320	385 570	29 502

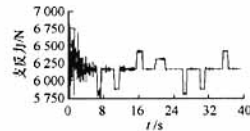


图5 前支腿(左边)支反力的响应历程

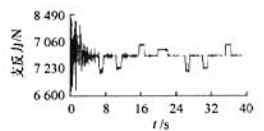


图6 中支腿(左边)支反力的响应历程

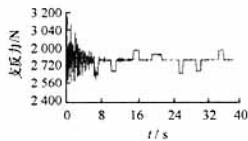


图7 前支腿(右边)支反力的响应历程

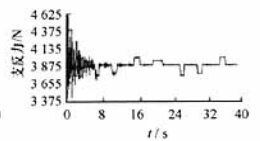


图8 中支腿(右边)支反力的响应历程

架桥机支腿的受压偏载是架桥机的设计中较为不利的控制因素,过大的偏载容易造成桥头路基的沉陷,并会影响架桥机总体结构的横向稳定性,故需谨慎考虑与处理。表2所示为动、静载作用下支腿的最大支反力。

表2 动(静)载作用下各支腿的最大支反力

载荷类型	发生时 间/s	前支腿最大支反力/N		中支腿最大支反力/N	
		左	右	左	右
动载	0.24	69.24	31.66	86.45	46.01
静载		60.685	27.432	74.216	38.557

分析表2的数据可知,前、中支腿的最大动载系数分别为

$$k_{前左} = \frac{R_{前左动}}{R_{前左静}} = \frac{69.24}{60.685} \approx 1.14$$

$$k_{前右} = \frac{R_{前右动}}{R_{前右静}} = \frac{31.66}{27.432} \approx 1.15$$

$$k_{中左} = \frac{R_{中左动}}{R_{中左静}} = \frac{86.45}{74.216} \approx 1.16$$

$$k_{\text{中右}} = \frac{R_{\text{中右动}}}{R_{\text{中右静}}} = \frac{46.01}{38.557} \approx 1.19。$$

故在设计中,可由静力分析结果乘以1个不小于1.2的动载系数作为结构设计的动载荷。

5 结 语

(1)在架桥机受偏心动载的情况下,对主梁结构进行了瞬态动力学分析,研究了偏心动载对架桥机各支腿支反力的影响,得到了有一定意义的结论。

(2)在该架桥机的设计过程中,应取1个不小于1.2的值作为动载系数进行结构的设计。

参考文献:

References:

- [1] 李自光. 桥梁施工成套机械设备[M]. 北京:人民交通出版社,2003.
LI Zi-guang. Machinery equipments for bridge construction [M]. Beijing: People's Communications Press, 2003.
- [2] 展朝永,陈新轩. 桥梁施工机械结构与使用[M]. 西安:西北大学出版社,1994.

ZHAN Chao-yong, CHEN Xin-xuan. The structures and using of bridge construction machinery [M]. Xi'an: Northwest University Press, 1994.

- [3] 高得平. 机械工程中的有限元法基础[M]. 西安:西北工业大学出版社,1993.
GAO De-ping. The basis of finite element method for mechanical engineering[M]. Xi'an: Northwest Industry University Press, 1993.
- [4] 胡宗武. 工程振动分析基础[M]. 上海:上海交通大学出版社,1999.
HU Zhong-wu. Analysis basis on engineering vibration[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1999.
- [5] 吕彭民,汪红兵,张大庆. 混凝土泵车结构模态分析与试验[J]. 长安大学学报(自然科学版),2004,24(6):74-76.
LÜ Peng-min, WANG Hong-bing, ZHANG De-qing. Structural model analysis and experiment test of concrete pump truck[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2004, 24(6): 74-76.
- [6] 陈道南. 起重运输机械[M]. 北京:冶金工业出版社,1988.
CHEN Dao-nan. Cranes and conveyances[M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1988.

(上接79页)

(2)ZDDP/RO 润滑体系的抗磨和极压作用机理为植物油三甘油酯在金属表面发生摩擦聚合反应形成聚酯膜,ZDDP 热分解产生的降解产物,在摩擦表面形成沉积膜;另外分解的产物在摩擦过程中发生摩擦化学反应,形成了由 Zn、磷酸盐、硫酸盐、摩擦聚合物和 Fe 的氧化物等摩擦反应产物组成的聚合膜;并且 ZDDP 会对摩擦副表面的改性,形成 Fe、Zn 固溶体,增强摩擦表面的抗磨能力。

参考文献:

References:

- [1] 武雅丽,全秋红,刘晶郁. 发动机用环境友好润滑剂低温性能[J]. 长安大学学报(自然科学版),2003,23(3):75-78.
WU Ya-li, TONG Qiu-hong, LIU Jing-yu. Low temperature property of engine lube with compatible environment[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2003, 23(3): 75-78.
- [2] 刘晶郁,张永. 磷酸三丁酯和磷酸三苯酯作为菜籽油添加剂的摩擦学特性[J]. 石油学报(石油加工),2004,20(3):85-89.
LIU Jing-yu, ZHANG Yong. Tribological behaviors

of tributyl phosphate and triphenyl phosphate additives on the rapeseed oil[J]. Acta Petrolei Sinia (Petroleum Processing Section), 2004, 20(3): 85-89.

- [3] Barnes A M, Bartle K D, Thibon V R A. A review of zinc dialkyl dithiophosphates (ZDDP): characterization of and role in lubricating oil[J]. Tribology International, 2001, 34: 389-395.
- [4] 李久盛,饶文琦. 含硫和磷的苯并三氮唑衍生物作为菜籽油添加剂的摩擦学性能研究[J]. 摩擦学报, 2002, 22(3): 121-125.
LI Jiu-sheng, RAO Wen-qi. Tribological behaviors of an S-P containing benzotriazole derivative as an additive in rapeseed oil[J]. Tribology, 2002, 22(2): 121-125.
- [5] 曹月平. 磷酸三甲酚脂和亚磷酸二正丁脂添加剂对菜籽油摩擦学性能的影响[J]. 摩擦学报, 2000, 20(2): 119-122.
CAO Yue-ping. The effect of tribenyl phosphate and dibutyl phosphite as additives on the tribological behaviors of rapeseed oil[J]. Tribology, 2000, 20(2): 119-122.
- [6] 王汝霖. 润滑剂摩擦化学[M]. 北京:中国石化出版社,1994.
WANG Ru-lin. Tribochemistry of lubrication[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 1994.