

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.012



脉冲型地震动作用下大跨输煤栈桥的动力响应

常志旺^{1a}, 潘毅^{1a,1b}, 江赛雄^{1a,2}, 胡思远^{1a}, 李晰^{1a}

(1. 西南交通大学 a. 土木工程学院; b. 抗震工程技术四川省重点实验室, 成都 610031;

2. 西南电力设计院, 成都 610021)

摘要:为研究近断层脉冲效应对火力发电厂钢结构输煤栈桥地震响应的影响,以某典型输煤栈桥结构为研究对象,采用基于能量的脉冲地震动识别方法,选取 9 条不同脉冲周期的近断层脉冲型地震动,利用标准脉冲数学模型的方法,剔除所选地震动中的脉冲成分,从而获得相应的 9 条非脉冲地震动。在此基础上,采用动力时程分析方法,对比脉冲地震动与非脉冲地震动对该典型输煤栈桥结构地震响应的影响。研究表明:脉冲型地震动会对输煤栈桥的地震响应产生显著影响,特别是脉冲周期与结构自振周期接近时,三向输入时脉冲效应对输煤栈桥结构响应的放大作用最明显,其最大放大系数为 2.1;在脉冲型地震作用下,输煤栈桥的柱顶水平位移为弹塑性位移限值的 1.36 倍,将产生超出预期的严重破坏,其钢桁架跨中挠度为正常使用限值的 2.97 倍,将会严重影响结构的适用性及附属设备的安全。因此,在对近断层区域内的输煤栈桥结构进行抗震设计时,有必要考虑脉冲效应和地震动多维性对结构地震响应的影响,否则将低估结构的动力响应。

关键词:输煤栈桥;脉冲型地震动;脉冲效应;地震响应;时程分析

中图分类号:TU352.1 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2019)01-0095-09

Dynamic response analysis of long-span coal-conveyer gallery subjected to pulse-like ground motions

Chang Zhiwang^{1a}, Pan Yi^{1a,b}, Jiang Saixiong^{1a,2}, Hu Siyuan^{1a}, Li Xi^{1a}

(1a. School of Civil Engineering; 1b. Key Laboratory of Seismic Engineering of Sichuan Province, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China; 2. Southwest Electric Power Design Institute, Chengdu 610021, P. R. China)

Abstract: To study the pulse effect on the seismic response of steel coal-conveyer gallery in thermal power plant, dynamic analysis of a typical coal-conveyer gallery structure was carried out in this paper. Firstly, the energy-based pulse-like ground motion identification method was adopted to select nine ground motions with different pulse periods. Secondly, the corresponding ground motions without pluses were obtained by using standard mathematical pulse model to remove the pulses from the selected pulse-like ground motions,

收稿日期:2018-05-12

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0802205);国家自然科学基金(51508473、51708461)

作者简介:常志旺(1986-),男,博士,主要从事近断层脉冲型地震动特性研究, E-mail: zhiwangchang@swjtu.edu.cn.

李晰(通信作者),男,博士, E-mail: xi.li@swjtu.edu.cn.

Received:2018-05-12

Foundation item: National Key Research and Development Program (No. 2016YFC0802205); National Natural Science Foundation of China (No. 51508473, 51708461)

Author brief: Chang Zhiwang (1986-), PhD, main research interest: characteristics of near-fault ground motions, E-mail: zhiwangchang@swjtu.edu.cn.

Li Xi (corresponding author), PhD, E-mail: xi.li@swjtu.edu.cn.

and then, a comparative analysis was conducted considering the ground motions with and without pulses. Results show that pulse-like ground motions can significantly affect the structural responses, especially when the pulse period is close to the fundamental period of the structure. The pulse effect on the responses of coal-conveyer gallery is most obvious when the three-direction input is used, and the maximum value of amplification factor is 2.1. Under the pulse-like ground motions, the displacements of column top is 1.36 times of the elastoplastic displacement limit, which will cause serious damage beyond expectations. The mid-span deflection of steel truss is 2.97 times of the serviceability limit, which may adversely affect the serviceability of the structure and the safety of the attached equipment. Therefore, in seismic design, to avoid misleading estimates of the responses of structure, it is suggested that the pulse effect and the multi-dimensional input should be considered cautiously for the coal-conveyer gallery in the neat fault region.

Keywords: coal-conveyer gallery; pulse-like ground motion; pulse effect; seismic response; time history analysis

输煤栈桥作为火力发电厂联系燃料系统与发电系统的一种重要的特殊工业建筑,其在复杂场地内运送燃料需要足够的跨度、高度来跨越洼地、道路、设备及工业建(构)筑物,因此,输煤栈桥往往有跨度大、刚度小、重心刚心不重合及结构不规则等特点。输煤栈桥的结构形式主要分为混凝土支柱-钢桁架栈桥、钢筋混凝土结构栈桥、钢结构栈桥。其中,钢结构输煤栈桥由于具有自重轻和施工快的优点,在西部山区火力发电厂中得到普遍应用^[1-2]。随着“西电东送”建设的不断推进,部分输煤栈桥被修建于西部山区地震断裂带附近,甚至可能跨越地震断裂带,例如,攀钢1×300 MW煤矸石综合利用自备电厂、神华四川天明电厂2×1 000 MW新建工程等均处于断裂带附近,这会使输煤栈桥结构面临严重的地震威胁。

近年来,学者们对输煤栈桥结构的抗震性能进行了研究。丁光荧等^[3]对长跨钢结构输煤栈桥在多点非一致激励作用下的抗震可靠度进行了分析,结果表明,在大震条件下输煤栈桥可靠度指标为负值,将产生严重的破坏。金联社等^[4]对超大跨度输煤栈桥在竖向地震作用下的抗震性能进行了研究。李正坤等^[5]对超大跨、长距离输煤栈桥在一致激励与非一致激励下的结构响应进行了计算分析,结果表明,行波效应对输煤栈桥内力造成了不利影响。刘厚营等^[6]采用ABAQUS对大跨度输煤栈桥进行了不同地震强度下的弹塑性时程分析,得出了其在特定地震波下出现的破坏模式、塑性发展特点及抗震薄弱位置。李峰等^[7]对大跨度钢结构输煤栈桥进行了模态及竖向地震响应分析,结果显示,其在竖向地震作用下的竖向位移及杆件内力平均增加量达到了50%以上。吴王平等^[8]以某钢筋混凝土输煤栈桥为研究对象,通过结构实测振动频率对数值模型进行

了修正,在此基础上,研究了其在强震作用下的抗震性能。以上为近几十年来有关输煤栈桥抗震性能的主要研究工作,可以看出,相关研究几乎都集中在中国,且主要研究了地震动空间效应以及地震强度等因素对输煤栈桥地震响应的影响,而均鲜有涉及考虑近断层地震动速度脉冲对输煤栈桥结构地震响应影响的研究。

然而,近年世界各地发生的地震中,如1999年中国台湾集集地震^[9]、2008年中国汶川地震^[10]、2016年中国台湾美浓地震等^[11]以及2018年中国台湾花莲地震^[12],获得了大量的近断层地震记录。在这些地震记录中常常会包含明显的速度脉冲,这就使速度脉冲成为近断层地震动的基本特征之一^[13]。这种近断层脉冲型地震动具有幅值大、地震动峰值速度与地震动峰值加速度的比值大、反应谱长周期区域谱值高等特点,会对输煤栈桥这类细高、大跨的长周期结构产生严重危害^[14]。从火力发电厂震害统计中可以发现,位于近断层附近的输煤栈桥均遭受到了不同程度的破坏^[15-16]。而中国的《火力发电厂土建结构设计技术规程》(DL 5022—2012)^[17]并未对输煤栈桥在近断层地震动作用下的地震响应提出设计建议。因此,为研究近断层地震动作用下输煤栈桥的地震响应规律,本文采用基于能量的脉冲识别方法^[18-19],选取9条不同脉冲周期的典型近断层脉冲型地震动,并剔除其中的主脉冲成分,得到相应的非脉冲型地震动。在此基础上,对典型钢结构输煤栈桥模型进行动力时程分析,得到结构的内力和位移,并通过对比分析,探寻脉冲效应以及不同脉冲周期对输煤栈桥结构地震响应的影响规律,从而给出相应的抗震设计修正系数,供钢结构输煤栈桥设计人员参考。

1 栈桥结构模型

1.1 模型建立

选取火电厂中典型的钢结构输煤栈桥为研究对象,工程所处地区设防烈度为 8 度,场地类别为 II 类,结构阻尼比取 0.03。输煤栈桥全长 151 m,桥面宽 6 m,由 4 跨 36 m 的钢桁架、2 组双柱钢支柱(高度分别为 23.8、31.5 m)及 1 组四柱钢支柱(高度为 39.12、40.61 m)组成,钢材为 Q235B。该输煤栈桥桥面为压型钢板作为底模的钢筋混凝土楼板,混凝土等级为 C30,材料详细参数如表 1 所示。输煤栈桥主梁钢桁架矢高 3 m,爬升顶点高度为 48.30 m。钢桁架 IV 的右侧支座为滑动支座,其余钢桁架支座及钢支柱底端支座均采用铰支座。桥面横梁、支撑、钢桁架腹杆、上下弦杆、钢支柱间横梁等两端均为铰接,立面布置见图 1,主要构件截面特性见表 2。

表 1 输煤栈桥材料参数表

Table 1 Material parameters of the steel coal-conveyer gallery

材料	弹性模量/MPa	泊松比	质量密度/ (kg · m ⁻³)
C30 混凝土	3 × 10 ⁴	0.2	2 550
Q235B 钢	21 × 10 ⁴	0.3	7 800

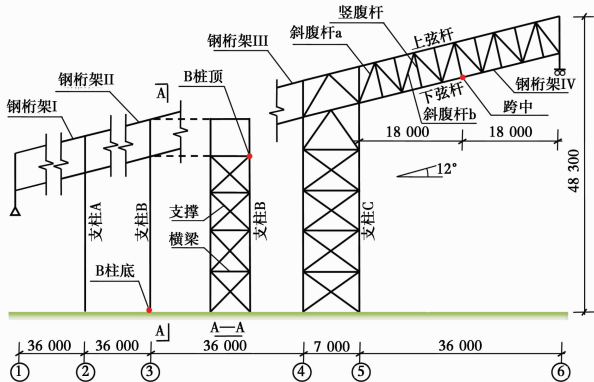


图 1 某钢结构输煤栈桥纵向立面图(单位:mm)

Fig. 1 Elevation view of the steel coal-conveyer gallery

表 2 钢结构输煤栈桥主要构件截面尺寸

Table 2 Cross section details of main components of the steel coal-conveyer gallery

截面名称	截面特性
支柱 A	BH600 mm × 400 mm × 12 mm × 30 mm
支柱 B	BH600 mm × 400 mm × 12 mm × 30 mm
支柱 C	HW400 mm × 400 mm × 13 mm × 21 mm
支撑	HW200 mm × 200 mm × 8 mm × 12 mm
横梁	HW250 mm × 250 mm × 9 mm × 14 mm
上弦杆	HW350 mm × 350 mm × 12 mm × 19 mm
下弦杆	HW350 mm × 350 mm × 12 mm × 19 mm

续表 2

截面名称	截面特性
斜腹杆 a	Φ245 mm × 12 mm
斜腹杆 b	Φ180 mm × 10 mm
竖腹杆	Φ180 mm × 10 mm

基于有限元软件 SAP2000 对上述输煤栈桥结构进行建模。模型共 372 个节点,804 个框架线单元。模型的重力荷载包括桥面板自重、踏步及栏杆自重,经计算取 4.5 kN/m²,采用均布面荷载的方式输入到栈桥的桥面板上。在此基础上,分别采用特征向量法和常加速度的 Newmark 方法进行自振特性计算和动力时程分析^[20]。

对于本文的输煤栈桥结构,由于钢支柱 B 高度较高、纵向刚度小且平面内无支撑柱,在地震中更容易破坏,为结构的薄弱构件。因此,重点分析支柱 B 的相对位移和柱底轴力,关键截面位置如图 1 所示。

此外,钢桁架作为输煤栈桥结构中另一关键受力构件,其跨度大、刚度柔,若钢桁架竖向挠度过大会影响输煤栈桥的正常运行。虽然,钢桁架 I、II、III、IV 跨度均相等,但由于支撑钢桁架 IV 的支柱高度最高,在同等条件下钢桁架 IV 受到的地震作用影响可能更大,因此,选取钢桁架 IV 的下弦杆中点处竖向位移进行考察,选取位置见图 1。

1.2 动力特性

该钢结构输煤栈桥的模态信息如表 3 所示。可以看出,结构前 10 阶 X 向振型参与质量之和为 98%,Y 向为 92%,均大于 90%。此外,图 2 给出了结构前 3 阶模态的振型,可以看出,结构的第 1 阶振型为纵向振动,振动周期为 2.01 s,第 2、3 阶振型分别为横向对称(振动周期 1.83 s)和反对称振动(振动周期 1.61 s),结构偏柔且横向刚度要大于纵向刚度。

表 3 输煤栈桥结构前 10 阶模态信息

Table 3 Details of first 10 modes of the steel coal-conveyer gallery

振型	周期/s	X 向 平动系数	Y 向 平动系数	X 向参与质 量之和/%	Y 向参与质 量之和/%
1	2.01	0.88	0.00	88	0
2	1.83	0.00	0.04	88	4
3	1.61	0.00	0.25	88	29
4	1.58	0.00	0.15	88	44
5	1.40	0.00	0.20	88	64
6	1.18	0.07	0.13	95	77
7	1.04	0.00	0.03	95	80
8	0.90	0.01	0.04	96	84

续表 3

振型	周期/s	X 向	Y 向	X 向参与质	Y 向参与质
		平动系数	平动系数	量之和/%	量之和/%
9	0.88	0.01	0.02	97	86
10	0.73	0.01	0.06	98	92

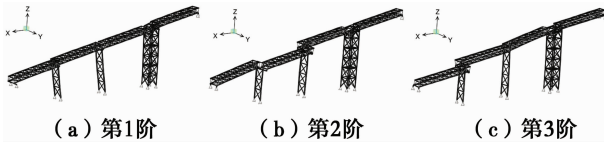


图 2 输煤栈桥结构前 3 阶自振振型

Fig. 2 First 3 modes of the coal-conveyer gallery structure

2 地震动记录的选取

由于该输煤栈桥结构模型的基本自振周期为 2.01 s, 采用基于能量的脉冲型地震动识别方法, 选取脉冲周期在 1.2~2.8 s 范围内的 9 条近断层脉冲型地震动, 所选地震动信息见表 4。同时, 为了量化分析脉冲周期对结构地震响应的影响, 利用标准脉冲数学模型^[21]的方法, 剔除其中的主脉冲成分, 得到 9 条相应的非脉冲型地震动。用于结构计算的 9 条脉冲、非脉冲地震动速度反应谱见图 3。

表 4 近断层地震动参数

Table 4 Parameters of the near-fault ground motions

序号	地震事件	时间	震级 M_w	地震动分量	脉冲周期 T_p/s	脉冲部分 PGA/g	非脉冲部分 PGA/g
1	Loma Prieta	1989	6.9	GGB270	1.2	0.215	0.189 3
2	Loma Prieta	1989	6.9	G01090	1.4	0.484	0.488
3	Parkfield	1966	6.2	C02065	1.6	0.437	0.631
4	Northridge EQ	1994	6.7	WPI316	1.8	0.320	0.306
5	Loma Prieta	1989	6.9	WVC000	2.0	0.248	0.199
6	Tabas Iran	1978	7.4	TAB-LN	2.2	0.739	0.947
7	Northridge	1994	6.7	RRS318	2.4	0.399	0.506
8	Imperial Valley	1979	6.5	H-E05140	2.6	0.382	0.442
9	Northridge	1994	6.7	LDM334	2.8	0.310	0.343

注: PGA 为地震动峰值加速度。

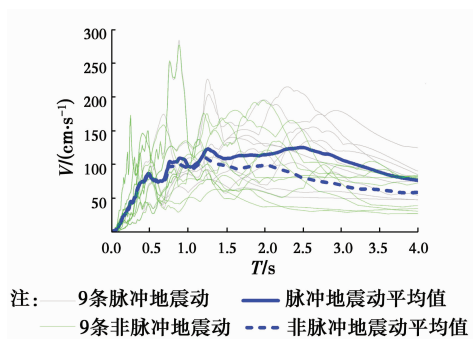


图 3 9 条近断层脉冲型及非脉冲型地震动速度反应谱

Fig. 3 Velocity response spectra of the 9 near-fault pulse-like and non-pulse-like ground motions

此外, 为了对输煤栈桥结构模型进行 8 度罕遇地震作用下动力响应的对比分析, 按《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[22]的要求, 将所选地震动峰值加速度统一调幅至 0.4g (400 cm/s²), 同时, 对 X、Y、Z 向输入的地震动峰值加速度在 0.4g 的基础上, 按 1 : 0.85 : 0.65 进行调幅。

3 结果比较与分析

为研究脉冲型与非脉冲型地震动对输煤栈桥结

构杆件内力和位移的影响, 对有限元模型进行地震动单向输入 (X 向、Y 向、Z 向)、双向输入 (XY 向、XZ 向、YZ 向) 以及三向输入 (XYZ 向) 的时程分析, 得到了 B 柱底轴力、B 柱顶位移和桁架 IV 跨中位移的响应规律。此外, 为了研究该输煤栈桥结构在近断层脉冲型及非脉冲型地震动作用下的影响规律, 并对其进行量化分析, 定义近断层脉冲型地震动放大系数 K 为脉冲型地震动计算得到的内力或位移与相应非脉冲型地震动计算得到的内力或位移之比。

3.1 内力或位移的放大系数与脉冲周期的变化规律

图 4 为不同地震激励下支柱 B 的相对位移和柱底轴力以及桁架 IV 跨中竖向位移放大系数变化规律图。从图 4 可以看出, 柱底轴力放大系数 K_N 、柱顶位移放大系数 K_Δ 及桁架 IV 跨中竖向位移放大系数 K_s 均大于 1.0, 说明脉冲型地震动对栈桥的地震响应有明显的放大作用。从图中还可以看出, 在地震动单向输入、双向输入以及三向输入下, K_N 、 K_Δ 以及 K_s 均随脉冲周期 T_p 的增加呈现先递增后

递减的规律,当 T_p 位于结构基本周期 2.0 s 附近时,达到峰值,且其最大值出现在 XYZ 三向输入时,分别为 2.1、1.8 和 1.3。从上述结果可以发现, K_N 、 K_Δ 、 K_δ 的峰值都出现在脉冲周期 T_p 为 2.0 s 附近。这是因为,所选取的脉冲型地震动中低频成分较高频成分含有的能量更高,而剔除脉冲之后的非脉冲型地震动则不具有这部分低频成分,当结构的基本周期在脉冲型地震动脉冲周期附近时,结构将产生共振现象,导致 K_N 、 K_Δ 、 K_δ 在此时出现峰值。此外,还可以发现,脉冲效应对墩底轴力的放大效应最为明显,并且,在进行数值分析时,有必要考虑地震的多维性,否则,会低估脉冲的放大效应。

非脉冲地震动,在脉冲型地震动作用下 N 的放大系数在区间(1.31, 1.83)之间变化,各方向的放大系数平均值为 1.53,放大系数的最大值出现在 XYZ 向输入时,为 1.83。从上面的结果可以看到,脉冲型地震动对输煤栈桥柱底轴力产生了较为明显的影响,有必要在抗震设计中考虑地震动的脉冲效应,否则,会错误地估计钢支柱的稳定性,使钢支柱在地震中更容易发生失稳。

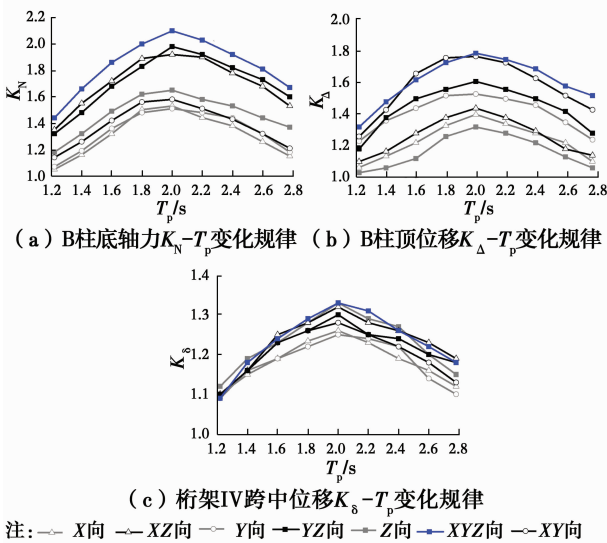


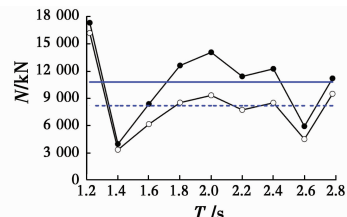
图 4 内力、位移与脉冲周期的变化规律

Fig. 4 Relations of internal force, displacement and pulse period

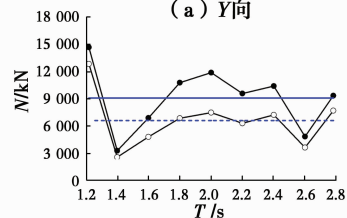
3.2 B 柱底部轴力的变化规律

输煤栈桥结构 X、Y 向刚度差异较大,但由于 Y 向刚度弱且钢支柱数量少,当地震动 Y 向输入时,钢支柱 Y 向更容易破坏。限于篇幅,钢支柱 B 的柱底轴力计算结果仅列出与 Y 向地震动输入有关的结果,如图 5 所示。

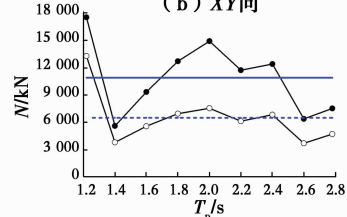
从图 5 可以看出,在脉冲型地震动作用下,钢支柱 B 的柱底轴力 N 随脉冲周期 T_p 的增大,整体呈现先增大后减小的趋势,在个别脉冲周期处出现一定的波动,这是由于输煤栈桥高阶振型对柱底轴力产生了影响。当脉冲周期 T_p 位于 2.0 s 附近时,脉冲型地震动与相应非脉冲型地震动作用下 N 的差值达到最大。为了考察脉冲型地震动对柱底轴力 N 的放大作用,表 5 列出了不同 T_p 脉冲型地震动作用对钢支柱 B 的柱底轴力放大系数,可以看出,相对于



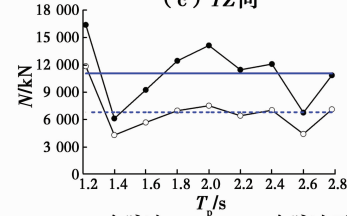
(a) Y向



(b) XY向



(c) YZ向



(d) XYZ向

图 5 钢支柱 B 的柱底轴力计算结果

Fig. 5 Axial force of the steel pillar B

表 5 钢支柱 B 的柱底轴力放大系数

Table 5 Axial force amplification factor of the steel pillar B

响应类型	柱底轴力 N 的放大系数	响应类型	柱底轴力 N 的放大系数
X 向	1.31	Y 向	1.34
Z 向	1.46	XY 向	1.38
XZ 向	1.70	YZ 向	1.71
XYZ 向	1.83	平均值	1.53

3.3 B 柱顶水平位移的变化规律

由于输煤栈桥结构模型左端为铰支座,右端为 X 向释放的滑动支座,因此,在地震动 X 向输入时,钢支柱 B 的柱顶水平位移最大。限于篇幅,钢支柱 B 的柱顶水平位移计算结果仅列出与 X 向地震动输入有关动力响应。钢支柱 B 柱顶水平位移计算结果见图 6。

从图 6 中可以看出,在脉冲型地震动作用下,钢支柱 B 柱顶水平位移 Δ 随脉冲周期 T_p 的增大,出现一定波动,但整体上呈现先增大后减小的趋势。而在非脉冲型地震动作用下, Δ 随脉冲周期 T_p 的增大呈现一定波动,但整体上保持相对稳定的规律。脉冲型地震动作用下的 Δ 与相应非脉冲型地震动作用下的 Δ 的差值随脉 T_p 的增大,表现出先增大后减小的规律,当 T_p 位于 2.0 s 附近时,其差值达到最大。相对于非脉冲型地震动,脉冲型地震动对钢支柱 B 柱顶水平位移 Δ 在各方向的放大系数如表 6 所示,可以看出,在 9 条脉冲型及相应的非脉冲型地震动作用下, Δ 在各方向的放大系数在区间(1.16, 1.61)之间变化,各方向的放大系数平均值为 1.38,放大系数的最大值出现在 XYZ 向输入时,为 1.61。虽然,相对于柱底轴力 N 的放大系数变化区间, Δ

的变化区间较小,波动范围较小,但脉冲型地震动也对输煤栈桥的柱顶位移产生了不可忽略的影响,在抗震设计中应同样引起重视。

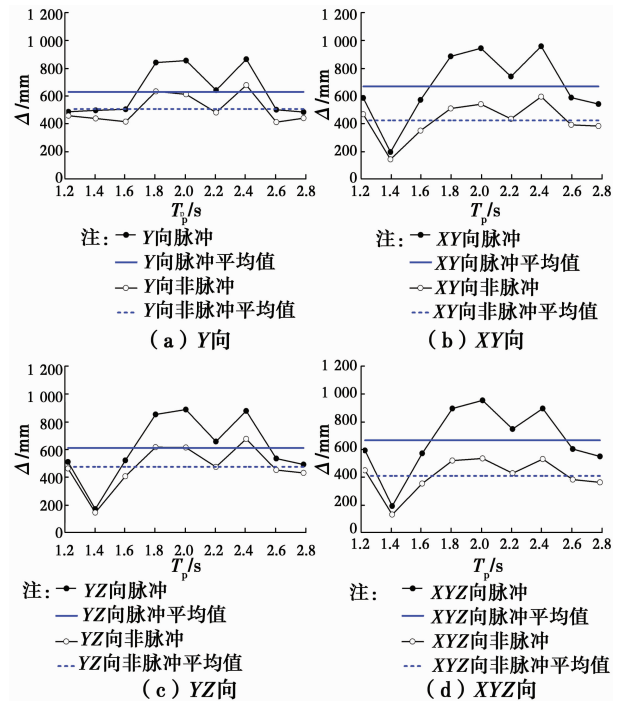


图 6 B 柱顶水平位移计算结果
Fig. 6 Horizontal displacement of the pillar B

表 6 B 柱顶水平位移放大系数

Table 6 Horizontal displacement amplification factor of the pillar B

比值对象	X 向	Y 向	Z 向	XY 向	XZ 向	YZ 向	XYZ 向	平均值
脉冲型地震动计算值与弹塑性位移限值	1.15	0.60	0.49	1.21	1.32	0.87	1.36	1.00
非脉冲型地震动计算值与弹塑性位移限值	0.92	0.43	0.31	0.75	0.69	0.36	0.54	0.57
脉冲与非脉冲型地震动计算值	1.23	1.40	1.16	1.58	1.26	1.44	1.61	1.38

由于《火力发电厂土建结构设计技术规程》(DL 5022—2012)等行业技术标准对输煤栈桥结构柱顶位移并无明确规定,故参考《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)5.5.5 条,大震下多层钢结构钢支柱柱顶位移按 $1/50H$ 控制,即弹塑性位移限值为 546 mm。表 6 给出了各方向近断层地震动作用下柱顶水平位移计算值相对于规范允许值的放大系数。从表 6 可以看出,在 9 条脉冲型地震动作用下,除 Y 向、Z 向、YZ 向外,其余方向输入的地震动所产生的柱顶水平位移均超过了弹塑性位移限值,最大为脉冲型地震动 XYZ 向输入时,为弹塑性位移限值的 1.36 倍。而在非脉冲型地震动作用下,柱顶的水

平位移均未超过弹塑性位移限值。这说明在脉冲型地震作用下输煤栈桥的钢支柱将会产生超出设计预期的严重破坏甚至倒塌,会对灾后重建造成很大影响。

3.4 桁架 IV 跨中竖向位移的变化规律

计算结果显示,地震动 Z 向输入时,对桁架 IV 跨中竖向位移影响最大。因此,桁架 IV 的竖向位移计算结果仅列出与 Z 向地震动输入有关动力响应,见图 7。

从图 7 可以看出,在脉冲型及非脉冲型地震动作用下,桁架 IV 跨中竖向位移 δ 随脉冲周期 T_p 的增大,在平均值附近波动,且脉冲型地震动作用下的

δ 与相应非脉冲型地震动作用下的 δ 的差值随 T_p 的变化基本保持稳定。相对于非脉冲型地震动,脉冲型地震动对桁架 IV 跨中竖向位移 δ 在各方向的放大系数如表 7 所示,可以看出,9 条脉冲型及相应的非脉冲型地震动作用下, δ 在各方向的放大系数在区间(1.18,1.23)之间变化,各方向的放大系数平均值为 1.21,放大系数的最大值出现在 XYZ 向、XZ 向和 Z 向输入时,为 1.23。相比于 N 、 Δ 的放大系数变化区间, δ 的变化区间最小,波动范围最小,表明脉冲型及相应的非脉冲型地震动作用下 δ 的计算值比较接近。

为了避免钢桁架发生过大变形,保证其在地震中具有足够刚度,满足输煤皮带的正常运行及附属设备的安全,根据常规电厂输煤皮带设备厂家的要求,桁架跨中竖向挠度不应大于 $L/400$,即正常使用限值为 90 mm。表 7 给出了各方向近断层地震动作用下桁架 IV 跨中竖向位移 δ 计算值相对于允许值的放大系数。从表中可以看出,在 9 条脉冲型及非脉冲型地震动作用下,除 X 向、Y 向外,其余方向输入的地震动所产生的桁架 IV 跨中竖向位移 δ 均超过了正常使用限值,但在脉冲型地震作用下桁架 IV 跨中竖向位移与正常使用限值相差更大,最大为脉冲型地震动 Z 向输入时,为正常使用限值的 2.97 倍。从以上结果可以看出,在脉冲型地震作用下钢

桁架的变形除 X 向、Y 向外均超过了正常使用的限值,并且比非脉冲地震作用下的结构响应更为明显,因此,为了避免低估结构的刚度需求,保证结构的适用性及附属设备的安全,有必要在抗震设计中考虑地震动的脉冲效应。

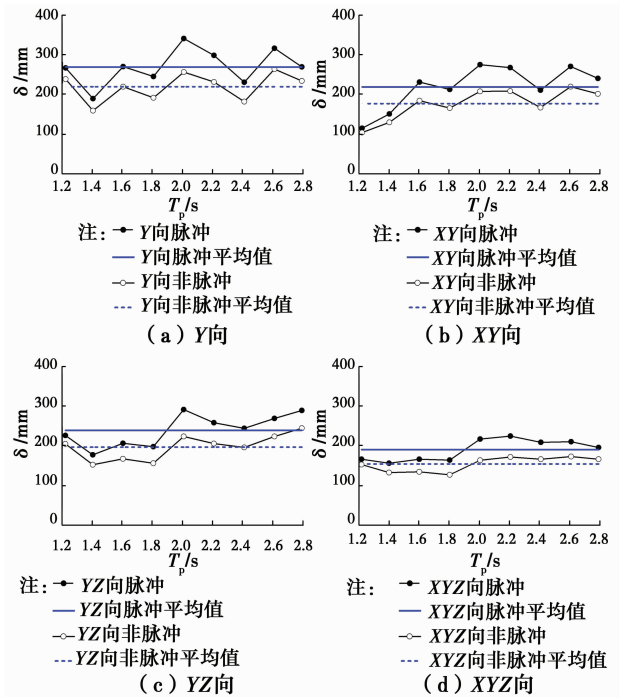


图 7 桁架 IV 跨中竖向位移计算结果

Fig. 7 Vertical displacement of the truss IV

表 7 桁架 IV 跨中竖向位移放大系数

Table 7 Vertical displacement amplification factor of the truss IV

比值对象	X 向	Y 向	Z 向	XY 向	XZ 向	YZ 向	XYZ 向	平均值
脉冲型地震动计算值与正常使用限值	0.35	0.5	2.97	2.69	2.65	2.85	2.38	2.06
非脉冲型地震动计算值与正常使用限值	0.30	0.42	2.23	2.22	1.69	2.02	1.48	1.48
脉冲与非脉冲型地震动计算值	1.18	1.18	1.23	1.20	1.23	1.21	1.23	1.21

4 结论

为考察近断层脉冲型地震动对输煤栈桥结构的影响,对某典型输煤栈桥结构进了脉冲型地震动与非脉冲型地震动作用下的动力时程分析,并对其钢支柱柱底轴力、柱顶位移以及桁架跨中竖向位移进行了比较,得到如下结论:

1) 脉冲型地震动会对输煤栈桥的结构响应产生明显的放大作用,并随脉冲周期的增加呈现先增后减的规律,且当脉冲周期与结构周期接近时最为明

显。在实际工程设计中,应特别注意脉冲周期与结构自振周期接近的情况。

2) 与单向和双向输入相比,三向输入时脉冲效应对输煤栈桥结构的放大作用最为明显,其最大值为 2.1。在抗震设计时需考虑地震动多维性对脉冲效应放大作用的影响,否则,会低估结构的响应。

3) 在脉冲型地震作用下,输煤栈桥的柱顶水平位移为弹性位移限制的 1.36 倍,将产生超出预期的严重破坏,会对灾后重建造成重大影响。其钢桁架跨中挠度为正常使用限值的 2.97 倍,将会严重影

响结构的适用性及附属设备的安全。有必要在设计中考虑脉冲效应对结构动力响应的放大作用。

参考文献:

- [1] 江赛雄,唐丽娜,潘毅,等. 弹簧隔振技术在火力发电厂中的应用现状[J]. 土木建筑与环境工程, 2015, 37(Sup1): 84-88.
JIANG S X, TANG L N, PAN Y, et al. Application status of spring vibration isolation technology in thermal power plant [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2015, 37(Sup1): 84-88. (in Chinese)
- [2] 高剑,王忠凯,潘毅,等. 罕遇地震下石化钢结构减震的关键影响因素[J]. 土木建筑与环境工程, 2016, 38(1): 92-99.
GAO J, WANG Z K, PAN Y, et al. Influence factors of vibration reduction in petrochemical steel structure under rare earthquake [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2016, 38(1): 92-99. (in Chinese)
- [3] 丁光莹,李杰. 多点非一致激励长跨结构抗震可靠度分析[J]. 世界地震工程, 2000, 16(3): 84-89.
DING G Y, LI J. Aseismic reliability analysis of the long-span multiply supported structures subjected to non-uniform seismic excitation [J]. World Earthquake Engineering, 2000, 16(3): 84-89. (in Chinese)
- [4] 金联社,张欲晓,秦素娟. 超大跨度输煤栈桥的竖向地震及温度计算[J]. 武汉大学学报(工学版), 2010, 43: 128-131.
JIN L S, ZHANG Y X, QIN S J. Vertical seism and temperature calculation of super-large span coal handling trestle [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2010, 43: 128-131. (in Chinese)
- [5] 李正坤,李晓文,孙晓岭,等. 超大跨长距离输煤栈桥考虑地震动行波效应影响分析研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2011, 9(2): 126-132.
LI Z K, LI X W, SUN X L, et al. Analysis and study for impact on long-span coal transport belt-conveyor gallery across long-distance when considering wave-traveling effect of seismic motion [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2011, 9(2): 126-132. (in Chinese)
- [6] 刘厚营,李晓文,李正坤,等. 连续大跨输煤栈桥在不同地震强度下的时程分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2012, 10(4): 78-82.
LIU H Y, LI X W, LI Z K, et al. Seismic time-history analysis for consecutive large-span coal transport trestle under different earthquake intensity [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2012, 10(4): 78-82. (in Chinese)
- [7] 李峰,闫芳芳,白韬,等. 大跨度输煤钢结构栈桥模态及竖向地震响应[J]. 西安科技大学学报, 2013, 33(5): 549-553.
LI F, YAN F F, BAI T, et al. Modal and vertical seismic response analysis of long-span steel structure for coal-conveyer gallery [J]. Journal of Xi' an University of Science and Technology, 2013, 33(5): 549-553. (in Chinese)
- [8] 吴王平,刘书贤,刘书会,等. 强震作用下大跨度钢筋混凝土输煤栈桥抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(4): 74-81.
WU W P, LIU S X, LIU S H, et al. Seismic performance of large span RC coal trestle under strong earthquakes [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(4): 74-81. (in Chinese)
- [9] WANG G Q, ZHOU X Y, ZHANG P Z, et al. Characteristics of amplitude and duration for near fault strong ground motion from the 1999 Chi-Chi, Taiwan Earthquake [J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2002, 22(1): 73-96.
- [10] LI X, ZHOU Z, HUANG M, et al. Preliminary analysis of strong-motion recordings from the magnitude 8. 0 Wenchuan, China, Earthquake of 12 May 2008 [J]. Seismological Research Letters, 2008, 79(6): 844-854.
- [11] 潘毅,张弛,高宪,等. 台湾美浓 6. 7 级地震框架结构震害调查与分析[J]. 土木工程学报, 2016, 49(Sup1): 13-18.
PAN Y, ZHANG C, GAO X, et al. Earthquake damage investigation and analysis of the RC frame structures in Taiwan Meinung MS 6. 7 earthquake [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(Sup1): 13-18. (in Chinese)
- [12] 潘毅,胡思远,郭瑞,等. 台湾花莲 6. 5 级地震工程结构震害调查与分析[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2018: 57-63.
PAN Y, HU S Y, GUO R, et al. Seismic damage investigation and analysis of engineering structures in Taiwan Hualien MS 6. 5 earthquake [M]. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2018: 57-63. (in Chinese)
- [13] KALKAN E, KUNNATH S K. Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings [J]. Earthquake Spectra, 2012, 22(2): 367-390.
- [14] 潘毅,江赛雄,唐丽娜. 西部山区输电塔震害调查及抗震设计研究[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2014: 225-229.
PAN Y, JIANG S X, TANG L N. Seismic damage investigation and design analysis of transmission tower

- in western China mountain areas [M]. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2014: 225-229. (in Chinese)
- [15] 张治勇,刘殿魁,孙柏涛,等. 火力发电厂抗震研究概况[J]. 世界地震工程,1999,15(1): 34-40.
ZHANG Z Y, LIU D K, SUN B T, et al. Summary of seismic research of thermal power plant [J]. World Earthquake Engineering, 1999, 15 (1): 34-40. (in Chinese)
- [16] 杨文忠. 唐山大地震与建筑抗震[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2003.
YANG W Z. Tangshan earthquake and the seismic design of building [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2003. (in Chinese)
- [17] 火力发电厂土建结构设计技术规程: DL 5022—2012 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
Technical code for the design of civil structure of fossil-fired power plant: DL 5022-2012 [S]. Beijing: China Planning Press, 2012. (in Chinese)
- [18] CHANG Z W, SUN X D, ZHAI C H. An improved energy-based approach for selecting pulse-like ground motions [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2016, 45(14): 2405-2411.
- [19] ZHAI C H, CHANG Z W, LI S, et al. Quantitative identification of near-fault pulse-like ground motions based on energy [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2013, 103(5): 2591-2603.
- [20] 田晴,赵崇锦,王忠凯,等. 新疆某超高层住宅楼动力弹塑性分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2016, 38(Sup2): 30-34.
TIAN Q, ZHAO C J, WANG Z K, et al. Elastic and plastic dynamic analysis of a super high-rise residential building in Xinjiang [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2016, 38(Sup2): 30-34. (in Chinese)
- [21] DICKINSON B W, GAVIN H P. Parametric statistical generalization of uniform-hazard earthquake ground motions [J]. Journal of Structural Engineering, 2011, 137(3): 410-422.
- [22] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
Code for seismic design of building: GB 50011-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)