

城市高架桥爆破拆除起爆网路可靠性研究

吴新霞¹, 赵根¹, 谢先启²

(1. 长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室, 武汉 430014; 2. 武汉爆破工程有限公司, 武汉 430023)

[摘要] 本文针对城市高架桥爆破拆除的长距离、长延时, 目前只能采用非电起爆网路进行起爆的现状, 研究了多发并联起爆网路的接力点雷管延期特性, 提出了并联后的接力点起爆时间期望值的简易计算公式。针对不同规模的非电起爆网路提出了相应的可靠度标准, 研发了既可保证高架桥倾倒过程不发生侧翻又能提高接力点起爆可靠度并可无限分段的复式交叉接力起爆网路, 并推导了其起爆可靠度计算公式。相关成果为高架桥拆除爆破起爆网路设计提供了科学依据。

[关键词] 高架桥; 拆除爆破; 起爆网路; 可靠性

[中图分类号] TU746.5 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2014)11-0072-06

1 前言

城市高架桥大多处于闹市区, 其工程规模大、周围环境复杂、沿线及地下保护对象多、交通影响广和施工组织难度大, 其爆破拆除起爆网路与常规拆除爆破相比, 具有以下特点。

1) 起爆线路敷设长度大。超大型高架桥的长度可达数千米, 起爆网路相应也会达到数千米, 给起爆网路的连接和保护带来极大困难。因而, 要求起爆网路具有联接方便、施工快速和便于保护等特性。

2) 起爆网路总延期时间长。高架桥拆除一般采用逐跨倾倒的爆破方案, 为降低爆破振动, 特别是桥体塌落冲击地面的振动, 逐跨倾倒的时间间隔相对较大, 因而, 起爆网路总延期时间就会加长, 这给起爆雷管的延期精度、可靠度等提出了更高的要求。

因此, 如何安全、可靠及准确地起爆全部药包, 是桥梁控制爆破拆除的关键。

2 城市超大型高架桥起爆网路的选择

根据建(构)筑物的类型、规模和安全要求等, 先后出现了电雷管、导爆管雷管等各种形式的起爆网路, 并被广泛地应用在城市拆除爆破中^[1]。

对于电雷管起爆网路, 由于雷管段别有限, 一般为20个段别, 最大延期时间一般为2 s。因此, 难以满足超大型高架桥爆破拆除起爆网路超长延期时间的要求。

电子雷管起爆网路, 具有延期精度高、分段灵活、延期时间长等特点。如2006年三峡三期碾压混凝土围堰(RCC)拆除爆破中^[2], 首次在国内引进了电子雷管起爆技术, 将 $1.86 \times 10^5 \text{ m}^3$ 的围堰一次拆除, 其爆破拆除工程量、难度之大, 为世界围堰拆除史上第一。一次起爆分段为961段, 起爆时间长达

[收稿日期] 2014-9-01

[作者简介] 吴新霞, 1963年出生, 女, 湖南株洲市人, 教授级高级工程师, 主要从事工程爆破研究; E-mail: zxx1234560@126.com

12.888 s,是目前国内外一次爆破分段数的最高纪录,截至目前电子雷管最大延时为15 s。当设计起爆延期总时间小于15 s的大型高架桥爆破拆除,可选用电子雷管起爆网路或导爆管起爆网路。当设计起爆延期总时间大于15 s的超大型高架桥爆破拆除,则只能采用导爆管接力起爆网路。

导爆管起爆网路,具有以下显著优点^[3]:a. 安全可靠。与电力起爆相比,导爆管起爆系统具有良好的安全性能。首先塑料导爆管本身具有良好的抗电性能,其次,导爆管不会受一般机械冲击作用而被引爆;遇火焰,塑料管可被熔融,但不能引爆。b. 操作简单,运输保管简便。电力起爆连线复杂,爆前有很多准备工作,而导爆管起爆网路连线操作却比较简单。c. 实现多段位接力顺序起爆。在遇到起爆网路一次需要分几十段甚至几百段起爆,而且要控制段间时差的情况下,一般只有导爆管非电起爆系统能够完成。

综合上述分析,电雷管由于段别有限、延期时间短,难以应用于超大型高架桥爆破拆除起爆网路中。电子雷管起爆网路具有延期精度高、分段灵活、延期时间长等特点,可用于大型高架桥爆破拆除中,但对于超大型高架桥爆破拆除起爆网路,则显得操作复杂,且一般电子雷管延期时间最大为15 s,不能满足超大型高架桥拆除爆破对起爆网路延时的要求。导爆管起爆网路具有操作简单、安全可靠、实现多段位接力顺序起爆,满足超大型高架桥爆破拆除起爆网路的要求。

当导爆管起爆网路应用于超大型高架桥爆破拆除时必须解决以下难题:a.雷管延时精度、准爆率对起爆网路的影响;b.段间时差对超大型高架桥爆破拆除效果的影响;c.长距离接力传爆点延时特性;d.长距离接力起爆网路可靠度。

3 长距离非电接力传爆点延时特性

通常非电导爆管雷管的单发起爆可靠度取0.9,只能通过并联及交叉搭接等手段提高起爆网路的可靠性。雷管并联将使其较名义秒量提前起爆的概率增加,并联的数量越多,提前的概率越大;当雷管串联式,雷管延时偏差将出现非线性叠加,因此,有必要对非电起爆系统中的结点传爆特性进行研究。

3.1 串联网路各传爆点的延时^[4]

我国对毫秒延期导爆管雷管的延期时间及精度均有明确规定(分系列),如普通导爆管MS2段雷管的延时及精度为(25±10) ms,即MS2段雷管的 nominal 延时为 $t_d = 25$ ms,其延时允许偏差 $t_0 = 10$ ms。非电导爆管雷管的起爆延时服从正态分布 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$,其中 $-\infty < x < \infty, \sigma > 0$ 。对于符合质量标准的同一段别雷管单发起爆进行延时测试,统计获得的期望值 μ 应接近名义延时,即 $\mu \approx t_d$,对于置信区间95%的偏差 1.96σ 应小于等于其延时允许偏差,即 $1.96\sigma \leq t_0$ 。

在串联网路中,由于毫秒雷管的延时服从正态分布,并且每一传爆雷管的延时是独立的,当不考虑传爆结点的并联贮备时,第 n 个传爆结点的起爆延时为前 n 个传爆雷管延时的累积和。即:

$$T = \sum_{i=1}^n t_{di} \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n t_{0i}^2} \quad (1)$$

当串联网路中,所有传爆雷管均为同一段别时,式(1)可改写为

$$T = nt_d \pm \sqrt{nt_0^2} \quad (2)$$

如果采用单发MS8毫秒雷管传爆串联,由式(2)计算得到串联起爆网路各传爆结点的起爆延时时值见表1。

表1 MS8段雷管串联延时范围
Table 1 Nitiation delay time of MS8 connect in series

传爆点延时	1	2	3	10	50	95
T/ms	250±25	500±35.4	750±43.3	2 500±79.0	12 500±176.8	23 750±243.7

从表1的计算值看出:随着传爆点的增加,各传爆点延时相对偏差 ($\sum_{i=1}^n t_{di} / \sqrt{\sum_{i=1}^n t_{0i}^2}$ 或 $nt_d / \sqrt{nt_0^2}$) 降低。

3.2 传爆结点采用并联贮备时的延时分析

在一个由 m 个传爆雷管组成的并联贮备传爆结点中,由于只要有一发雷管超前 t_d 起爆,那么这个传爆分系统就以这个超前起爆雷管的延时为准,

因此,传爆点采用多发雷管并联起爆时,其起爆延期时间的期望值是小于单发雷管的延时期望值。同时,由于这些雷管都服从相同的正态分布,因此,它们出现各种偏差的概率是一致的。所以该传爆分系统的某一时刻 t_1 以前起爆的概率

$$P(t \leq t_1) = 1 - (1 - P_1)^m \quad (3)$$

式(3)中, P_1 为该传爆分系统中,单个雷管在 t_1 时刻以前起爆的概率。

当分系统在某一时刻以前起爆的概率为 0.5 时,该时刻为并联后的期望值,对应的单发雷管的起爆概率可按下式计算

$$P(t \leq t_{md}) = 1 - (1 - P_1)^m = 0.5$$

$$P_1 = 1 - \sqrt[m]{0.5}$$

由于单发雷管的延期时间是服从正态分布的,即:

$$P_1(t \leq t_{md}) = \Phi\left(\frac{t_{md} - t_d}{t_0/1.96}\right)$$

多发并联时的延期时间期望值可按下式计算

$$t_{md} = t_d - \phi_1 t_0 / 1.96 \quad (4)$$

式(4)中, ϕ_1 可根据 P_1 查表获得。

对于常用的结点雷管并联后的延期时间期望值,可按下式计算

$$\text{双发雷管并联: } t_{md} = t_d - 0.278t_0 \quad (5)$$

$$\text{3 发雷管并联: } t_{md} = t_d - 0.418t_0 \quad (6)$$

$$\text{4 发雷管并联: } t_{md} = t_d - 0.510t_0 \quad (7)$$

从式(5)~(7)可以看出,并联雷管数量越多,超前起爆的时间也越多,对于 MS8 段雷管,3 发并联后其延期时间的期望值从单发的 250 ms 降低为 239.5 ms。如武汉沌阳高架桥接力起爆结点数最大达 95 个^[5],名义起爆时间设计值为 23 750 ms,从实测爆破振动波形来看,总起爆延时为 22 500 ms,与考虑雷管并联延时效应后的计算值 22 752.5 ms 接近。

从实测资料和计算结果来看,武汉沌阳桥延时误差接近 1 000 ms,如果左右两侧不同步,则可能导致侧翻而破坏道路两侧的地下管网,因此有必要采用交叉网路来降低同排柱起爆时差,避免桥梁倾倒过程中发生侧翻。

4 长距离非电接力起爆网路可靠度

要进行起爆网路的可靠度分析,首先必须明确可靠度多少为合理,一味通过多发并联及交叉搭接,从理论上起爆网路的可靠度计算到 99.9 % 甚至 99.99 % ,然而在实际应用中,由于网路繁琐导致网路连接时间过长,甚至导致误接,因此,需合理的确定不同部位的可靠度。

对于城市拆除爆破,炮孔数量较多,单孔装药量较少,一般一个孔内只装一发雷管,从大量工程实践来看,装入炮孔内的雷管起爆概率达 99 % 以上。主传爆网路的起爆概率决定整个工程的成败,合理的起爆概率为:接力结点小于等于 10 时,起爆概率应大于 99 % ;接力结点数为 10 ~ 99 时,起爆概率应大于 99.9 % ;接力结点数为 100 ~ 999 时,起爆概率应大于 99.95 % ;接力结点数大于 1 000 时,起爆概率应大于 99.99 % 。

如武汉沌阳高架桥接力起爆结点数最大达 95 个,当单发雷管起爆可靠度为 0.9 时,即使采用 4 发并联接力,最远传爆点的起爆概率也仅为 99.0 % 。由此可见采用常规并联搭接是难以满足起爆可靠度要求的。

在长距离传爆网路的传爆过程中,为避免单一线路遭受破坏而使整个起爆网路中断传爆,可将每个接力点的雷管分成两组,逐点搭接,以提高传爆可靠性,具体见图 1。此外对于高精度雷管采用专用卡子连接,每一雷管最多只能传爆 6 发雷管,即接力点上同时传爆 6 发雷管,如果支线需要 3 发雷管去引爆孔内雷管,则主线只有 3 发接力雷管(即 3 发并联),即使单发雷管的起爆概率为 $p_0 = 0.95$,到第 100 个接力点时的起爆概率只有 0.987 6,因此,需考虑采用交叉搭接来提高各接力点的传爆概率。

如图 1 所示,假定每个点有 $m+n$ 个雷管并联,其中 n 为搭接雷管的数量,分 A、B 两条线起爆, $A_0, A_1, A_2, \dots, A_k, A_{k+1}$, 和 $B_0, B_1, B_2, \dots, B_k, B_{k+1}$ 分别为 A、B 两条传爆线的起爆结点。

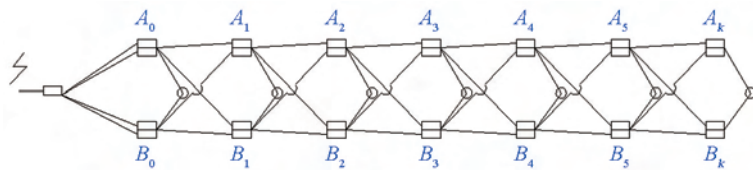


图 1 交叉搭接起爆网路示意图

Fig. 1 Cross lap detonating network

A_{km} 、 A_{kn} 和 B_{km} 、 B_{kn} 分别代表 k 结点的起爆雷管, 假定单发雷管的起爆概率为 p_0 , 则:

$$P[A_{km}/起爆] = 1 - (1 - p_0)^m = P[B_{km}/起爆] \quad (8)$$

$$P[A_{kn}/起爆] = 1 - (1 - p_0)^n = P[B_{kn}/起爆] \quad (9)$$

从式(8)、式(9)可以看出, 每一结点的雷管本身起爆概率只与该点的雷管数量有关, 设主传爆雷管的起爆概率 $P_m = P(A_{km}) = P(B_{km}) = 1 - (1 - p_0)^m$ 、传爆雷管的起爆概率 $P_n = P(A_{kn}) = P(B_{kn}) = 1 - (1 - p_0)^n$,

$$\begin{aligned} P(A_k B_k) &= P(A_{k-1} A_{km} \cup B_{k-1} A_{kn}) (B_{k-1} B_{km} \cup A_{k-1} B_{kn}) \\ &= P(A_{k-1} A_{km} \cup B_{k-1} A_{kn}) + P(B_{k-1} B_{km} \cup A_{k-1} B_{kn}) - P[(A_{k-1} A_{km} \cup B_{k-1} A_{kn}) \cup (B_{k-1} B_{km} \cup A_{k-1} B_{kn})] \\ &= P(A_{k-1} A_{km}) + P(B_{k-1} A_{kn}) - P(A_{k-1} A_{km} B_{k-1} A_{kn}) + P(B_{k-1} B_{km}) + P(A_{k-1} B_{kn}) - P(B_{k-1} B_{km} A_{k-1} B_{kn}) - \\ &\quad P[(A_{k-1} (A_{km} \cup B_{kn})) \cup (B_{k-1} (A_{kn} \cup B_{km}))] \\ &= (P_m + P_n)(P(A_{k-1}) + P(B_{k-1})) - 2P_m P_n P(A_{k-1} B_{k-1}) - \\ &\quad (P(A_{k-1} (A_{km} \cup B_{kn})) + P(B_{k-1} (A_{kn} \cup B_{km})) - P(A_{k-1} (A_{km} \cup B_{kn}) (B_{k-1} (A_{kn} \cup B_{km})))) \\ &= (P_m + P_n)(P(A_{k-1}) + P(B_{k-1})) - 2P_m P_n P(A_{k-1} B_{k-1}) - \\ &\quad ((P_m + P_n - P_m P_n)(P(A_{k-1}) + P(B_{k-1})) - (P_m + P_n - P_m P_n)^2 P(A_{k-1} B_{k-1})) \\ &= P_m P_n (P(A_{k-1}) + P(B_{k-1})) + ((P_m + P_n - P_m P_n) 2 - 2P_m P_n) P(A_{k-1} B_{k-1}) \end{aligned} \quad (11)$$

如果网路对称布置, 则 $P(A_k) = P(B_k)$, 式(11)可简写为

$$P(A_{k+1}) = (P_m + P_n) P(A_k) - P_m P_n P(A_k B_k) \quad (12)$$

$$P(A_k B_k) = 2P_m P_n P(A_{k-1}) + ((P_m + P_n - P_m P_n)^2 - 2P_m P_n) P(A_{k-1} B_{k-1}) \quad (13)$$

由于第0个结点直接接起爆雷管, $k=0$ 带入上式, 可得到

$$P(A_1) = (P_m + P_n) P(A_0) - P_m P_n P(A_0 B_0) \quad (14)$$

对于 $k+1$ 点的传爆概率:

$$\begin{aligned} P(A_{k+1}) &= P(A_k A_{k+1m} \cup B_k A_{k+1n}) \\ &= P(A_{k+1m} A_k) + P(B_{k+1n} B_k) - P(A_{k+1m} A_{k+1n} A_k B_k) \\ &= P(A_{k+1m}) P(A_k) + P(B_{k+1n}) P(B_k) - \\ &\quad P(A_{k+1m} A_{k+1n}) P(A_k B_k) \\ &= P_m P(A_k) + P_n P(B_k) - P_m P_n P(A_k B_k) \end{aligned} \quad (10)$$

从式(10)可以看出, 只要知道了 $P(A_k)$ 、 $P(B_k)$ 、 $P(A_k B_k)$ 就可求出 $P(A_{k+1})$

式(14)中, $P(A_0) = P(B_0) = P_m + P_n - P_m P_n$ 、 $P(A_0 B_0) = P(A_0) P(B_0)$ (事件 A_0 、 B_0 相互独立)。

采用EXCL编写计算方法, 非常容易计算不同接力和搭接数量、不同单发雷管起爆概率条件下的各接力结点的起爆概率, 部分计算结果见表2。复式交叉(2+1)搭接起爆网路见图2; 3发雷管并串联起爆网路见图3。

表2 不同网路形式下的结点起爆概率计算表

Table 2 The detonating probability of nodes under different network form

连接形式	交叉(1+1)	交叉(2+1)	交叉(2+2)	2并串联	3并串联	4并串联
$P_0=0.9$	$K=9$	0.984 8	0.998 8	0.999 9	0.904 4	0.990 0
	$K=49$	0.971 8	0.998 7	0.999 9	0.605 0	0.995 0
	$K=99$	0.955 7	0.998 6	0.999 9	0.366 0	0.990 0
	$K=199$	0.924 4	0.998 2	0.999 9	0.134 0	0.818 6
$P_0=0.95$	$K=9$	0.996 6	0.999 9	0.999 9	0.975 2	0.999 9
	$K=49$	0.995 8	0.999 9	0.999 9	0.882 3	0.993 7
	$K=99$	0.994 8	0.999 9	0.999 9	0.778 6	0.987 6
	$K=199$	0.992 8	0.999 8	0.999 9	0.606 2	0.975 3

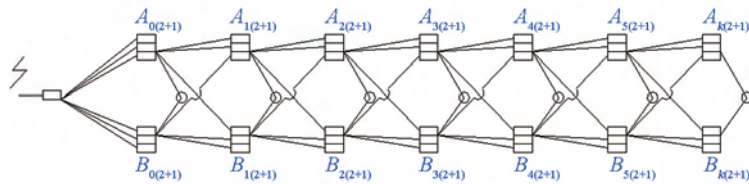


图2 复式交叉(2+1)搭接起爆网路

Fig. 2 Double cross(2+1) connect detonating network

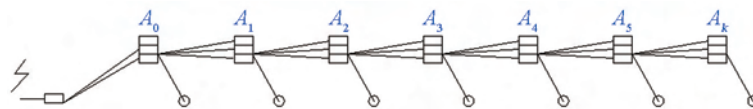


图3 3并串联起爆网路

Fig. 3 Three parallel-series detonating network

从表2可以看出:a.采用同样的接力雷管数量,如采用交叉(2+1)接力起爆网路的准爆率大于3发并联接力起爆网路的准爆率,且随接力点的增加其差值越大;b.交叉接力起爆网路接力点的准爆率受接力点数量及单发雷管的准爆率影响较小,受交叉雷管的数量影响相对较大,如采用交叉(2+2)起爆网路,即使单发雷管的准爆率为0.9,到第1000个接力点,其准爆率仍可达0.9999;c.虽然单发雷管的准爆率对接力点的准爆率影响较小,但当单发雷管的准爆率为0.9时,如采用交叉(2+1)网路,当接力点数大于100时,其最后一个结点的准爆率不满足最低要求(99.95%),因此,有必要采取选用优质雷管、提高施工工艺、加强安全防护等来提高单发雷管的准爆率。

5 结语

1)针对城市高架桥拆除特点,提出了确保同排柱同步倒塌又可无限分段且可提高接力点准爆率

的复式交叉网路。

2)研究了多发并联起爆的接力点雷管延期特性,并提出了并联后的接力点起爆时间期望值的简易计算公式。

3)针对不同规模的非电起爆网路提出了相应的可靠度标准,并针对高架桥长距离、多结点起爆特点,推导了交叉复式起爆网路的可靠度计算公式。

参考文献

- [1] 赵根,贾永胜. 互动有序起爆网路在城市拆除爆破中的应用[J]. 爆破, 2003, 20(增刊): 22-26.
- [2] 赵根,吴新霞,刘美山,等. 水工围堰拆除爆破[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [3] 张正宇,张文焯,吴新霞,等. 现代水利水电工程爆破[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [4] 张正宇,赵根,张文焯,等. 塑料导爆管起爆系统理论与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [5] 武汉爆破有限公司. 武汉沌阳高架桥爆破拆除技术设计与施工组织设计[R]. 2013.

Research on reliability of initiation explosive network for viaduct demolition blasting

Wu Xinxia¹, Zhao Gen¹, Xie Xianqi²

(1. The Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of the Ministry of Water Resources, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430014, China; 2. Wuhan Blasting Engineering Co. Ltd., Wuhan 430023, China)

[Abstract] Non-electric initiation system was the only initiation system for viaduct blasting demolition. Aimed at the application actuality, the relay point characteristic of multiple parallel detonator initiation system was studied in the paper, and the simple formula for mean value of the relay point initiation time was put forward. Reliability standard for non-electric initiation system of different scale was established. Duplex-cross non-electric initiation system was invented, which not only can avoid side roll in the viaduct collapse process, but also can elevate the reliability of the relay point. Research achievements can provide theoretical basis for viaduct

blasting demolition initiation system design.

[Key words] viaduct; demolition blasting; initiation system; reliability

(上接71页)

Key technologies of precision demolition blasting of ultra-long urban viaduct in complicated surroundings

Xie Xianqi^{1,2}, Jia Yongsheng¹, Yao Yingkang²,
Sun Jinshan², Wu Xinxia³, Liu Changbang²

(1. Wuhan Municipal Construction Group Co. Ltd., Wuhan 430023, China; 2. Wuhan Blasting Engineering Co. Ltd., Wuhan 430023, China; 3. Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430014, China)

[Abstract] Key technologies of precision blasting were put forward based on characteristics of urban viaduct blasting demolition in complicated surroundings. Initial bending instability mechanics model of reinforcing steel bar frame of blasting fragmented pier and sequenced collapsed dynamics model were established for quantitative blasting design. Technologies of water pressure blasting were applied in multi-cell box girder fragmentation. The initiation network of non-electric duplication crossover was adopted for safety and reliability of ultra-long delay. The rationality of blasting scheme and parameters were validated by physical model test. Adverse effects were forecasted and controlled by integrated protective technologies. Specialization co-operation, precision, execution (SCPE) project management method was put forward for precision management. Key technologies of precision demolition blasting can provide reference for similar projects.

[Key words] viaduct; blasting demolition; precision blasting; instability model; initiation network; adverse effects control