

地震灾害场系统可靠度控制 模型研究(I)

李 杰

(郑州工学院化工部抗震防灾研究室)

摘 要: 本文研究了地震灾害场系统可靠性控制的一般模型问题, 给出了问题的提法、建模途径, 并讨论了简单系统求解的基本方法。

关键词: 地震、灾场、可靠度、控制

中图分类号: P315

人类对于地震灾害的认识, 是伴随着强烈地震对人类和社会的一次次无情冲击逐步得到深化的。为了抵御地震灾害, 人类已付出了巨大的代价和努力, 尤其是近百年来, 人们开始有意识地把受地震灾害的沉重教训努力转化为对地震灾害的理性的、科学的认识。本世纪初, 抗震工程学兴起, 五十年代中期, 地震工程学开始以一门独立的科学形态出现在现代科学的舞台上。

研究与认识地震灾害, 根本目的在于控制和减轻地震灾害。作者认为: 从一般意义上讲, 对地震灾害的控制可以划分为工程控制和系统控制两大类^[1]。对于前一类别, 人们业已进行了大量的研究与试验, 发展了以结构抗震规范为代表的结构抗震技术。近年以来, 则进一步致力于以隔震、减震为特色的结构抗震控制设计的理论、实验和实践。对于后一类别, 尽管人们已经认识到了地震灾害不可能完全采用单一的工程手段加以限制, 但对如何从系统工程的角度控制与减轻地震灾害的影响还极少深入地研究。

编制城市抗震防灾规划是将系统论思想用于减轻地震灾害的一项有益尝试。对于大、中型城市, 抗震防灾规划一般要求进行抗震设防区划、工程加固规划、避难疏散规划、生命线工程防灾对策和次生灾害防止对策等工作^[2]。从根本意义上说, 应该以系统论、控制论的方法与观点作为这些工作的理论基础。然而在实际上, 这方面的具体研究工作尚付阙如。通过分析城市防灾的基本问题, 作者发现: 地震灾害场(亦称地震灾场)的系统控制问题研究可以为城市防灾提供理论上的支持背景^[3]。本文即为作者近年来在地震灾场控制问题研究中的初步结果之一。

* 国家自然科学基金资助项目

** 收稿日期: 1992-06-10

1 问题提法

实际的地震灾场系统，可以划分为如图 1 所示的系统组合^{〔4〕}。地震灾场系统可靠度控制从一般抽象意义上考虑各类系统的共性问题：系统灾后可靠度的合理控制。这一问题的具体提法为：根据对潜在地震灾场系统灾后可靠度的估计，选择不同的控制策略，使预期灾后系统可靠度达到或接近最优分布状态。

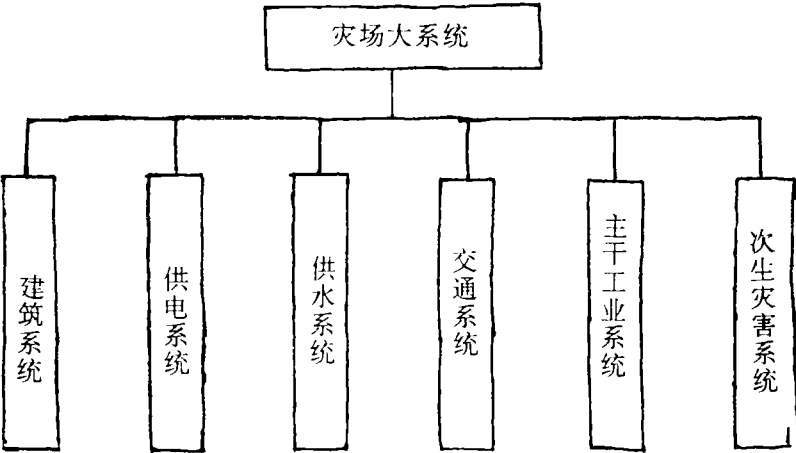


图 1 灾场大系统模型

从源流上分析，灾场控制问题最初的想法源于对地震灾害预测的研究。采用震害预测方法，可以对建筑系统灾后状态做出一系列的模糊语言评价，这些评价代表着系统在灾后的破坏状态。一个自然的想法便是：能否对这些灾后的状态加以控制呢？尽管回答可以是肯定的，但是在具体建模中我们发现，由于震害的发生具有强烈的随机性，要确切地把握系统的灾后破坏状态，至少在目前的技术水平下是不易于实现的。然而在另一方面，对于灾后系统的概率性评价却可以较为客观地反映系统的灾后功能。以系统可靠度为基础描述预期灾场的状态变化，不仅正确解决了采用确定性破坏状态评价时所不可逾越的震害不确定性影响，而且使各种灾场系统的分析有了一个统一的理论框架。对于灾前控制而言，我们所希望把握的将不是系统灾后的具体状态，而是系统灾后的可靠状态。显然，两种目标是有原则的差异的，比较而言，后一种目标更具有综合性，可实现性。在这一分析的基础上，作者提出的灾场系统可靠度控制问题的基本类型如图 2 所示

灾场系统可靠度控制

{

简单系统

{

给定C, 求 $U \in \bigcup$, $\max \Psi$

给定 Ψ , 求 $U \in \bigcup$, $\min C$

复杂系统

{

给定C, 求 $U \in \bigcup$, $\max J(\Psi)$

给定 Ψ , 求 $U \in \bigcup$, $\min J(C)$

}

}

图 2 问题的基本类型

图 2 中， Ψ 表示可靠度， C 表示系统改造代价， $J(\cdot)$ 表示关于 \cdot 的性能指标函数。

2 系统分解

2.1 简单系统与复杂系统

一般地, 系统 S 可定义为基本元件 e 的集合

$$S = (e_1, e_2, \dots, e_n) \quad (1)$$

基本元件是可以完成某种预定功能的实体, 如单幢房屋、一段管线、一个独立设备;

系统又可以按子集 S_i 划分:

$$S = (S_1, S_2, \dots, S_N) \quad (2)$$

子集合 S_i 包容一些性质相同的元件或功能上具有相互联系的一簇元件。

$$S_i = (e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{im}) \quad (3)$$

根据具体的背景情况, 不同子集合内的元素可以是互不相容的, 也可以是彼此重叠的。

系统的可靠度 Ψ 可以定义为子集合的可靠度的集合:

$$\Psi(S) = (\Psi(S_1), \Psi(S_2), \dots, \Psi(S_N)) \quad (4)$$

后面将会看到: 从系统控制的角度看, 这种定义避免了子集之间的复杂概率联系, 使问题的求解得以简化。

从震害严重程度的角度, 通常可以把基本元件的震害分为若干等级, 如基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏、毁坏的等级划分标准, 或简单的进行完好、破坏、毁坏三级划分。无论何种划分, 都给出了对子集合中元素进行分类的一种标准。一般而言, 对震害的控制可以从对这些基本类别元件集合入手。在另一方面, 对于任一子集 S_i , 为了提高其抗震可靠度, 又可以存在多种控制手段, 例如, 对于房屋, 可以考虑加固, 也可以考虑按设防标准改建, 对于供水管网, 通过设计或工程改造, 可以增加柔性接头数量, 也可以改变某些管线管材及管径等等。不同的控制手段, 我们称之为分支控制策略。

对于某一具体系统, 如果其诸子集合中元素互不相容, 且对于系统只考虑对一种破坏等级的单一控制策略下的控制, 则此系统称为简单系统。反之, 如果诸子集内元素互有重合, 或者对于系统需要针对多种破坏等级采用多种控制策略进行控制, 则称之为复杂系统。

在后面的分析中, 我们将会看到, 对简单系统控制方法的研究构成了解决复杂系统控制问题的基础。一般而言, 简单系统的控制问题只要引用一般系统控制论, 而复杂系统控制则要求采用大系统控制方法。

2.2 系统的分解

系统的分解解决如何将一般系统划分为式(2)、(3)所示子集合的问题, 本文建议在图1的基础上, 进一步采用结构化分区, 破坏等级划分与分支控制策略相结合的方式对系统进行分解。

所谓结构化分区, 是指按系统内元件的地域分布及类型分布将系统划分为一些子系统, 例如, 对于房屋建筑系统, 可以按地域(街区、企业、单位)分区与房屋类型分区相结合的方式划分为如图3所示的形式。对于供水系统, 可以在按地域分布划分的同时, 再

辅以不同类别的管线的划分。对于主干工业系统, 可以按企业划分小区, 再在同一小区内按房屋类型等划分小区等等。

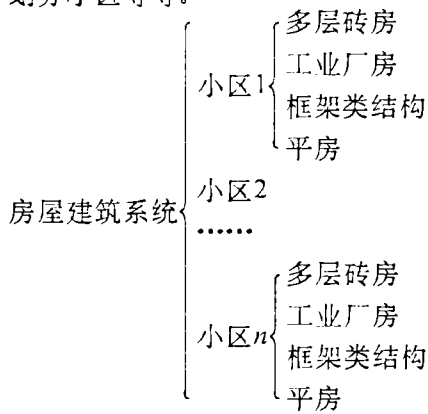


图 3 房屋系统的结构化分区

不同的实际系统按结构化分区原则划分出的子系统关于灾场大系统而言, 是相互平行的二级子系统。在每一小区内, 按震害预测的破坏等级将子系统 S_i 中元件划分为若干类别, 对各个破坏等级的控制就构成了子系统 S_i 的多输入、单输出模型 (图 4), 其输入 u 定义为关于该小区第 1 个等级的控制改造百分比, 即:

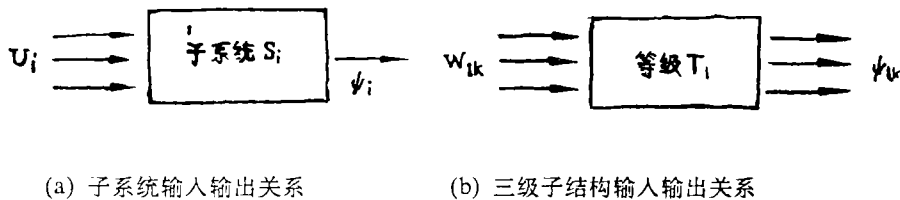


图 4 子系统模型

$$U_i = \frac{A_{ul}}{A_i} \quad (5)$$

式中: A_i 为第 1 个等级集合中的元件总数量, A_{ul} 为控制改造数量。

图 4a 中, Ψ_i 为第 i 个子系统的可靠度输出。

类别划分与结构化分区相结合, 就为实现控制到位的要求提供了条件。

在另一方面, 考虑关于同一破坏等级的元件, 又可以采用不同的分支控制策略。原则上说, 以 W_{ik} 表示按第 k 种策略关于第 1 类集合元件的控制数量百分比, 则可构成三级子结构的模型如图 4b 所示。然而, 在对同一等级采用多种控制策略时通常增加了问题的复杂性。因此, 在多数情况下, 对同一等级采用一种控制策略, 而当确需多种控制策略时, 则可以采用将二级子系统重新调整的方式, 使一种等级集合只相应于一种控制策略, 通常, 这是容易做到的。

综上所述, 在原则上, 一般的灾场系统可以分解为如图 5 所示的三级递阶系统。而在实际建模中, 可以通过对二级子系统的调整, 使只考虑前二级的递阶系统, 在此情况下, 二级子系统的形成既有结构化分区因素, 又有按控制策略相同的原则划分集合的影响。

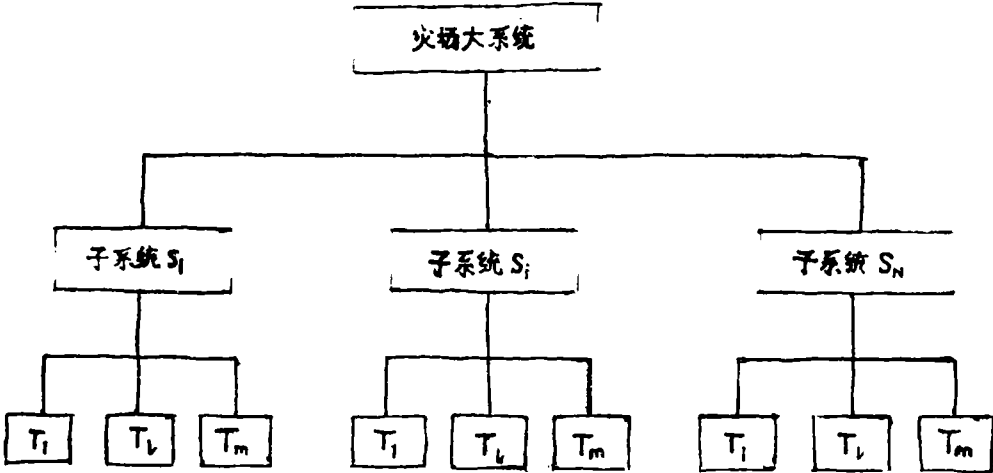


图 5 三级递阶系统

对一个具体元件集合，采用什么样的控制策略，可以通过技术经济分析的方式，按期望损失最少的原则确立，其分析方法不属本文讨论范围，有关内容可参看文献[5]。

应该注意，图 5 的划分是在图 1 的基础上进行的，即其最高级系统是完全对应的。而对图 1 中诸子系统进行结构化分区的划分之后，便形成了图 5 中的子系统 S_i ，即：不同类型控制对象可以共存于 S_i 集合之中，这种广泛的背景使本文所述的灾场控制具有广泛的适应性。当然，在考虑灾场大系统中某一个对象（如供水管网）的控制时，也可以化为图 5 所示系统，但已属具体情况，包含了各类控制对象的 S_i 集合则归纳了一般情况。

显然，图 5 表示的是复杂系统的分解方式，对于简单系统，根据本节定义，自不难获得其系统分解格式。

3 系统灾后可靠度

系统灾后可靠度是指在预期灾害背景下，系统能够保有某一阈值功能的概率，记作：

$$\Psi = P(E)$$
(6)

式中 E 代表系统在灾后“具有某一阈值功能”这一随机事件。

通过震害预测方法，一般可以建立系统关于震害指数论域上的概率密度函数，或发生某类破坏状态的概率。例如，对于房屋建筑系统，可以使用震害预测仿真系统方法^{〔2〕}获取系统震害的随机分布率 $f(ind)$ ；对于供水管线，则可以获得某一破坏状态出现的概率；对于大型生产装置，则可以利用可靠度仿真策略给出其系统及子系统失效概率等等。

对于以震害指数为变量的概率密度函数，可以通过规定与阈值功能相对应的名义震害指数 $[x]$ ，通过积分求出系统的阈值概率：

$$P[E] = \int_0^{[x]} f(x) dx$$
(7)

式中，以变量 x 表示震害指数 ind。对应于前述房屋结构不坏、不倒和可修的阈值，可分别规定为 0.2、0.7、0.4。

对于正态分布, 则有

$$P(E) = \int_0^{|x|} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (8)$$

通过具体的控制策略, 可以使系统可靠度得到提高, 与控制策略相应的控制代价一般可以用投入量 G 表示, 针对具体的控制问题, 投入量 G 与控制参数 u 之间的关系总可以通过技术经济分析方法获得。通常, 为了使问题得到简化, 可以定义控制单位数量 (单位面积、单位长度、单位元件...) 时的投入量为投入系数, 并记为 ξ , 在此基础上, 有

$$D_{i,j} = \xi_{ij} \cdot u_i \cdot A_i \quad (j = 1, 2, \dots) \quad (9)$$

这里, j 表示第 j 种资源。 A_i 表示 i 集合中总数量。

上式表达了一般的资源输入 G 与控制输入 u 之间的关系。然而, 对于灾前控制问题, 在资金允许的前提下, 可以假定资源的来源不受限制, 因此, 可以统一地用投资量 C 表示资源输入, 此时有关系式:

$$C_i = \xi_i u_i A_i \quad (10)$$

由于有了上述关系, 我们就可以把注意力直接放在系统可靠度 Ψ 与控制输入 u 之间的关系上。

不失一般性, 本文假定系统可靠度 Ψ 与控制输入 u 之间具有指数关系:

$$\Psi = e^{\alpha + \beta u} \quad (11)$$

并建议采用模拟试验、辨识方法给出其中的经验常数。

注意到 e^α 是 $u=0$ 时的系统可靠度, 即系统未改造前的可靠度 Ψ_0 , 这一可靠度可以通过震害预测方法给出, 于是, α 值也自然给出。这样, 系统辨识只要确定参数 β , 其一般步骤可以描述为:

① 对于给定系统中的给定破坏等级, 在给定数值范围内产生一组递增脉冲序列, 脉冲强度代表控制百分比 u ;

② 根据选定的控制方法类型, 应用震害预测方法, 计算每一脉冲 U_k 作用于系统后, 系统的可靠度 Ψ_k ;

③ 将 u_k 与 Ψ_k 匹配, 并结合初态 Ψ_0 值, 运用统计回归方法确定 β 值; 显然, 这一回归可以是以下式为基础的线性回归:

$$\ln \Psi = \alpha + \beta u \quad (12)$$

事实上, $e^{\beta u}$ 代表了因控制而使原系统可靠度提高的倍数。

记为 $\ln \Psi$ 为 x , 并以之作为判别系统状态的状态变量, 则可将子系统 i 在确定性破坏等级下的状态方程写为:

$$x_i = A_i + \beta_i U_i \quad (13)$$

4 简单系统的可靠度控制

根据前节定义, 简单系统诸子集互不相容, 且只对一种破坏等级采取一种控制策略进行控制。

首先考虑在给定投资约束 C 的前提下的系统可靠度最优分布问题。对应于式 (2) 的

子系统划分, 这一问题一般可由如下数学模型来描述:

求控制向量 $U \in \mathbb{R}^N$

使目标函数

$$J = \frac{1}{2}(x^T Q x + U^T R U) \rightarrow \min \quad (14)$$

且满足约束

$$x = A + B U \quad (15)$$

$$c = \sum_{i=1}^N \xi_i A_i U_i = E^T U \quad (16)$$

上式中: Q 与 R 为 $n \times n$ 阶的对角权矩阵, $x-u$ 关系式为相应于式(13)的矢量形式, $E = (\xi_1 A_1, \xi_2 A_2, \dots, \xi_N A_N)^T$ 。

选取二次性能指标 J 作为系统优化目标具有较为广泛的适用性。从逻辑的观点看, 一般的工程系统可以视为其中子系统(子集合、元件)的串联、并联或串、并联混合形式。在一般静态系统的可靠度分配中, 要求考虑系统内部元素的逻辑关系计算系统可靠度, 然而, 这种计算往往要求假定事件之间的独立性, 通常, 极难对这种独立性作出肯定的答复, 而采用相关性的算法, 又因概率运算的繁琐使模型难于投入运行。

在另一方面, 我们注意到, 控制灾后系统可靠度的根本目的是为了通过控制提高系统的可靠度, 而不是计算系统可靠度, 这样一个基本观点提示我们, 应把着眼点放在增加系统的可靠度的角度。我们同时注意到, 无论串联、并联还是混联系统, 对于非完全正相关的系统, 提高元件的可靠度总有助于提高系统的可靠度。因此, 从增加系统可靠度的角度出发总可以用形如式(14)中的二次性能指标函数作为系统评价指标。事实上, 细致的研究表明: 适当地选择权因子矩阵, 可以使二次性能指标等价于一切串、并、混联体系的总可靠度指标。

对于系统可靠度控制问题, 由于物理背景上的相关性不易处理, 使系统控制只能注目于使系统性能优化分布(而不是分配!)这个主旨上。这是本文作者的基本观点之一。事实上, 按照假定元素不相关做法进行的总系统可靠度最优分配问题解答, 本质上只是一个近似解答, 元素相关性越强, 这种解答的近似性就越大。而采用二次性能指标, 则避开了相关性问题。

上述问题的求解可以分为控制变量受约束与不受约束两种类型。对于后者, R 取 $[0, 1]$ 区间, 即存在约束

$$U \leq \{1\} \quad (17)$$

这里 $\{1\}$ 为单位列向量。

控制变量是否受约束, 往往由实际背景确立。在子系统个数较少时, 通常 u_i 不受约束, 而在子系统个数较多时, 则可能因某些子系统控制效果优良而出现投入向此系统偏移, 从而导致计算控制量大于实际可控量的危险。

对于同时受(15)、(16)的等式约束和(17)式的不等式约束的二次规划问题(14), 可以引用起作用集方法[7]或一般的约束极值求解方法(如可行方向法、罚函数方法或牛顿型方法)求取满足 Kuhn-Tucker 条件的极值点。而对于不考虑不等式约束(17)式时的问题, 则有如下简单解答。

构造拉格朗日函数:

$$L = \frac{1}{2}(x^T Q x + U^T R U) + \lambda^T [x - (A + B U)] + \rho(C - E^T U) \quad (18)$$

利用极值条件有:

$$\frac{\partial L}{\partial x} = Q x + \lambda = 0 \quad (19)$$

$$\frac{\partial L}{\partial U} = R U - B^T \lambda - E P = 0 \quad (20)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = x - (A + B U) = 0 \quad (21)$$

$$\frac{\partial L}{\partial P} = C - E^T U = 0 \quad (22)$$

由 (20) 式给出

$$U = R^{-1}(B^T \lambda + E P) \quad (23)$$

又由式 (19) 与式 (21) 有:

$$\lambda = -Q(A + B U) \quad (24)$$

以式 (23) 代入 (22) 有:

$$C = E^T R^{-1}(B^T \lambda + E P) \quad (25)$$

由之解出 P 为

$$P = (E^T R^{-1} E)^{-1}(C - E^T R^{-1} B^T \lambda) \quad (26)$$

以 (23) 代入 (24) 可解出

$$\lambda = -[I + Q B R^{-1} B^T - Q B R^{-1} E (E^T R^{-1} E)^{-1} E^T R^{-1} B^T]^{-1} \cdot [Q A + Q B R^{-1} E (E^T R^{-1} E)^{-1} C] \quad (27)$$

以式 (27) 代入式 (26) 即得 P 显式解, ρ 、 λ 代入 (23) 式即得总体控制律。

5 结束语

本文研究了地震灾场系统可靠度控制的一般建模问题。文中给出了问题的提法, 讨论了建模途径, 基于二次性能指标, 构造了地震灾场系统可靠度控制的一般模型。分析表明, 采用二次性能指标函数作为系统可靠度控制原则可以避免系统内部的复杂逻辑关系, 具有明显的优势。本文还给出了简单系统控制算法的基本思路。事实上, 这种方法仅是处理复杂系统的基础。有关复杂系统的系统可靠度控制问题, 待刊出。

参 考 文 献

- 1 李杰, 李国强编著. 地震工程学导论. 地震出版社. 1992 年
- 2 李杰著. 地震灾害预测与防灾规划. 河南科技出版社. 1992 年

- 3 李杰. 论地震灾害场的系统化控制方法. 灾害学. 1991 年第 1 期
- 4 Li Jie. A Research on the Simulating Control Model of Earthquake Disaster field, Proc. of 10th WCEE. Madrid, 1992 年 7 月
- 5 刘锡荃等. 地震损失估计和经济决策模型. 地震工程与工程振动. 1985 年第 4 期

A Research on the Reliability Control Model of Earthquake Disaster Field System (I)

Li Jie

(Institute of Earthquake Engineering & Disaster Control of
Chemical Industry Ministry)

Abstract: This paper deals with the reliability control modeling of earthquake disaster field system. The category of the problems and the modeling method are presented. The resolution method for Simple system is discussed as well.

Keywords: Earthquake, Disaster Field, Reliability, Control