

电力系统可靠性的基本理论 和 计 算 方 法

(二)

郭 永 基 编

清 华 大 学 电 力 系
发 电 教 研 组

1980.7.

目 录

第五章 输电线的可靠性估计

- § 5-1 概述
- § 5-2 单回输电线可靠性估计
- § 5-3 平行输电线路可靠性估计
- § 5-4 考虑天气影响时输电线的可靠性模型

第六章 变电所电气主接线的可靠性估计

- § 6-1 概述
- § 6-2 电气主接线可靠性的分析计算
- § 6-3 应用表格法计算电气主接线的可靠性
- § 6-4 应用布尔代数分析电气主接线的可靠性
- § 6-5 35~220 千伏典型变电所可靠性的比较

第五章 输电线的可靠性估计

§5-1 概述

把电能从电源送到负荷，一般要经过输电系统及配电系统，输电和配电并没有确切的划分标准，本书把 110KV 以上线路划分为输电系统，110KV 以下划分为配电系统。

输电线与发电设备比较，最大的特点是它处在露天野外，因此输电线的可靠性往往受环境——天气变化的影响。

本章将讨论以下问题：

- (1) 不考虑天气变化时高压架空输电线的可靠性。
- (2) 不考虑天气变化时平行线路可靠性分析
- (3) 考虑天气变化（风暴、结冰，下雪）时输电线可靠性的分析讨论。

1. 输电线的故障率与运行年限的关系

不考虑天气变化对输电线可靠性的影响时，线路故障率 λ （用 次/百公里·年表示）是一个重要的指标

图5-1 是苏联对 500 千伏线路实地统计的结果，并可近似地用韦布尔分布表示如下：

$$\lambda(t) = \alpha \lambda_0 t^{\alpha-1} \quad (5-1)$$

式中 λ_0 ——是运行起始阶段的故障率

α ——是表示变化速度的参数

t ——是从投入运行起起的运行时间，年

故障断开次数, 次/100 公里, 年

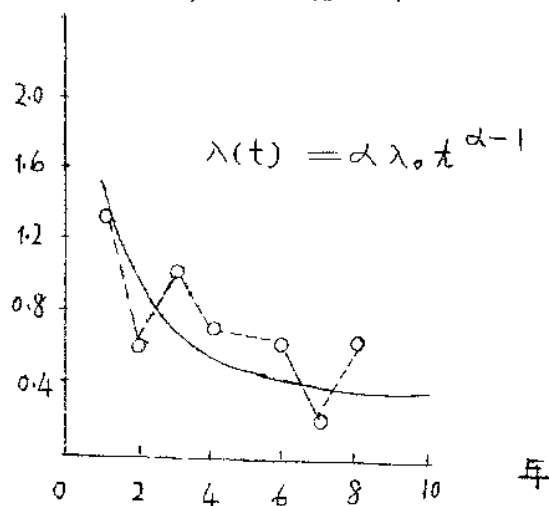


图 5-1 500 千伏线路的故障率与运行时间的关系

对不同电压等级的架空输电线, 取不同的 α , λ_0 值, 便可得到线路故障率 $\lambda(t) = f(t)$ 的关系曲线, 表 5-1 中列出所需的 α , λ_0 值。

表 5.1 估计 $\lambda(t)$ 所需数值 (架空线)

	110 千伏	220 千伏	500 千伏
α	0.95	0.77	0.34
λ_0	1.7	2.1	4.3

对 110 千伏线路

$$\lambda(t) = 0.95 \times 1.7 \times t^{0.95-1} = 1.615 t^{-0.05} \quad (5-2)$$

表 5-2 不同电压输电线 $\lambda(t) = f(t)$

t(年)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\lambda(t)/\text{年}$ (110KV)	1.615	1.560	1.529	1.507	1.490	1.476	1.465	1.456	1.447	1.439
$\lambda(t)/\text{年}$ (220KV)	1.617	1.379	1.256	1.175	1.117	1.07	1.03	1.002	0.976	0.95
$\lambda(t)/\text{年}$ (500KV)	1.462	0.926	0.708	0.586	0.505	0.448	0.405	0.371	0.343	0.319

对 220 千伏线路

$$\lambda(t) = 0.77 \times 2.1 \times t^{0.77-1} = 1.617 t^{-0.23} \quad (5-3)$$

对 500 千伏线路

$$\lambda(t) = 0.34 \times 4.3 \times t^{0.34-1} = 1.462 t^{-0.66} \quad (5-4)$$

根据式 (5-1)、(5-2)、(5-3) 可标出不同电压级输电线的 $\lambda(t) = f(t)$ 数值，并可作出图 5-2 的曲线

从图 5-2 可见，电压等级上升，输电线的故障率下降，并且电压越高，前期故障期比较明显。

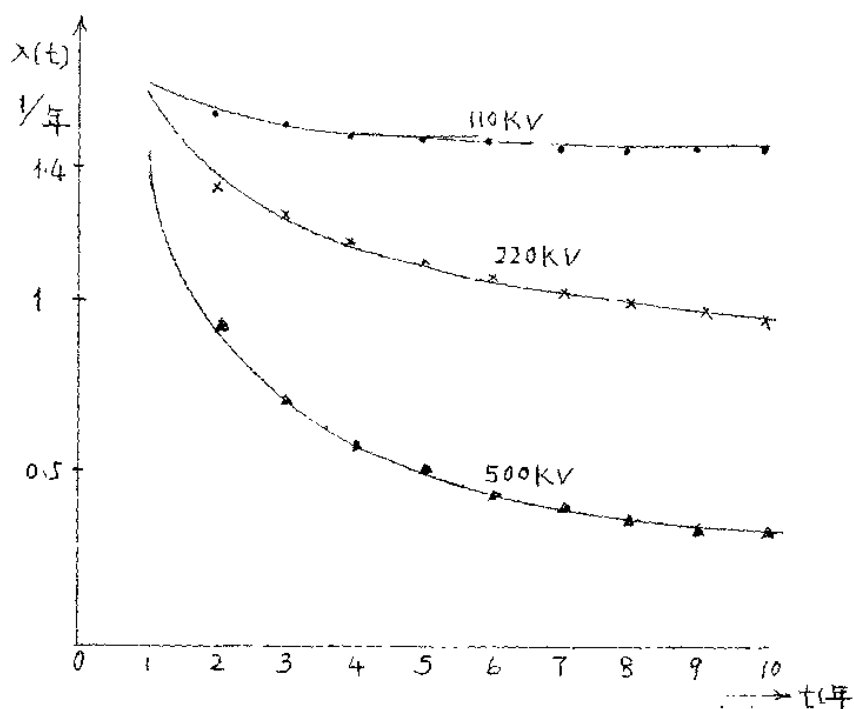


图5-2 不同电压等级输电线 $\lambda(t) = f(t)$

2. 架空输电线的故障与季节的关系

架空输电线工作在野外，因此受天气环境的影响很大。图5-3和图5-4是苏联某电力系统统计得到的线路断开次数随

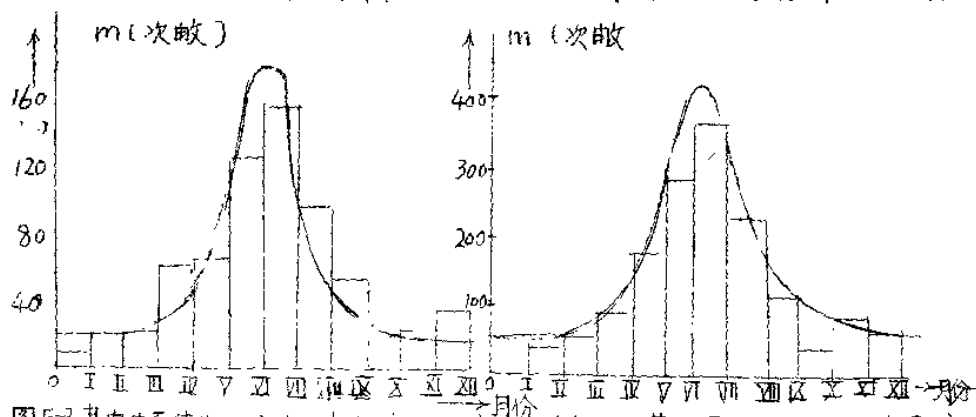


图5-3 某电力系统110-120千伏线路过电流保护动作次数随季节的变化

图5-4 某电力系统110-220千伏零序过电流保护动作次数随季节的变化

季节的变化，它基本服从正态分布，并且线路断开次数最多的是发生在 6，7 月份。

表 5-3 中列示的是强雷雨地区和强结冰地区一回线路一年中由于短路而造成线路断开的次数，这些数据是统计得到的

表 5-3 一回线路的断开次数

由于季节引起的短路 次数的变化		电压 (千伏)			
		110	220	330	500
在平年期间	平均	6.8	3.5	2.5	1.8
	最大	40	29	26	20
在雷雨期间	每月平均	12	10	0.75	0.45
	最大的月份	20	10	8	5
	最大的一天	12	9	7	3
在结冰期间	每月平均	16	12	1	0.8
	最大的月份	25	20	18	15
	最大的一天	14	10	8	14

3. 输电线路可靠性参考指标

表 5-4 是苏联的输电线路可靠性参考指标，可供参考

表 5-4 输电线路可靠性参考指标

线路形式	电压 (千伏)	故障		平均修理 时间	计划检修 时间
		稳定性故障 λ_1 / 100 公里·年	非稳定性故障 λ_2 / 100 公里·年	T_D (时)	T_{Sch} (时)
电	10 以下	0.5	0.05	12	—
架 空	35	1 ~ 2.5	8 ~ 9	8	40
	110 ~ 154	0.5 ~ 1.7	5 ~ 7	10	50
	220	0.25 ~ 1.5	1 ~ 2	14	60
	330	0.15 ~ 1.6	0.5 ~ 1.5	15	70
	500	0.2 ~ 1.1	0.15 ~ 2.5	16	80

§5-2 单回输电线可靠性的估计

单回输电线的运行一般或与断路器或与变压器联接，其中任一元件停运引起整条输电线停运，这些元件的联接方式在逻辑上是串联的，称为串联系统。

若每个元件的可靠函数为 $R_i(t)$ ，则整个系统的可靠度为：

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (5-5)$$

式中 $R_i(t)$ 为第 i 个元件的可靠度。

n 为输电元件数目

$R_s(t)$ 为整个系统的可靠度

若用故障率 λ 表示，则

$$\begin{aligned} R_s(t) &= e^{-\int_0^t \lambda(x) dx} \\ &= e^{-\sum_{i=1}^n \int_0^t \lambda_i dx} \end{aligned} \quad (5-6)$$

故可得

$$\lambda_s(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t) \quad (5-7)$$

式中 $\lambda_s(t)$ 为 系统的故障率

$\lambda_i(t)$ 为 元件 i 的故障率

$$\text{若 } \lambda_i(t) = \lambda_i = \text{const} \quad (5-8)$$

可得

$$R_s(t) = e^{-\sum_{i=1}^n \lambda_i t}$$

$$\text{即 } \lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (5-9)$$

式中 λ_s 为系统的故障率

在时间 t_1 中, 整个输电系统事故断开次数 a 的数学期望值由下式决定:

$$a = \int_0^{t_1} \lambda_s(t) dt \quad (5-10)$$

$$= \lambda_s t_1, \quad \text{当 } \lambda_s(t) = \lambda_s = \text{常数}$$

在给定时间里输电系统的平均事故停电时间, 就是它的平均修理时间 (或平均休止时间)

$$T_D = \frac{1}{a} \sum_{i=1}^n \lambda_i T_{Di}$$

式中 T_{Di} 为第 i 次事故切除的休止时间

T_D 为整个系统一年中因事故切除的休止时间

一年中因事故切除的时间 $T_{F.0}$ 为

$$T_{F.0} = a T_D = \sum_{i=1}^n \lambda_i T_{Di} \quad (5-11)$$

输电线一年中因计划检修所需的时间可通过计划检修频率和每次计划检修所需最大时间 T_{sch} 决定

对 110 千伏线路，因线路一般包括变压器，故线路一年中的计划检修停电时间由下式决定：

$$T_{sch} = f_{Tp} T_{sch.Tp} + (f_L - f_{Tp}) T_{sch.L} \quad (5-12)$$

式中 T_{sch} 、 $T_{sch.Tp}$ 、 $T_{sch.L}$ 分别为输电系统变压器、线路一年中因计划检修的停电时间，

f_{Tp} 、 f_L 分别为变压器、线路的检修频率，次/年

对 110 千伏以上线路，因线路一般包括断路器，故线路一年中的计划检修停电时间由下式决定：

$$T_{sch} = f_{c.B} T_{sch.c.B} + (f_L - f_{c.B}) T_{sch.L} \quad (5-13)$$

式中 $T_{sch.c.B}$ 、 $T_{sch.L}$ 分别为断路器及线路的计划检修停电时间

$f_{c.B}$ 为油开关的计划检修频率 次/年

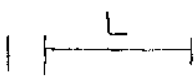
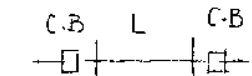
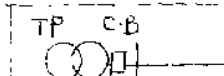
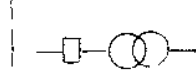
输电线的停电系数 ($K_{\text{отключения по времени}}$) 可用以下公式求得：

$$f_{F.O} = \frac{T_{F.O}}{8760} \quad (5-14)$$

$$f_{sch} = \frac{T_{sch}}{8760} \quad (5-15)$$

其中 $f_{F.O}$ 和 f_{sch} 分别为事故停电系数和检修停电系数，不同的类型单回输电线的 $f_{F.O}$ 和 f_{sch} 列于表 5-5

表 5-5

迴路接线	电压 (千伏)	$\lambda_{F.0}$	λ_{Sch}
	110 以下	0.0005 ~ 0.001	0.01 ~ 0.015
	220 ~ 750	0.0015 ~ 0.008	0.01 ~ 0.025
	110 以下	0.0010 ~ 0.0013	0.01 ~ 0.018
	220 ~ 750	0.003 ~ 0.017	0.02 ~ 0.05
	110 以下	0.0013 ~ 0.0015	0.012 ~ 0.020
	220 ~ 750	0.004 ~ 0.02	0.02 ~ 0.04
	110 以下	0.0005 ~ 0.001	0.002 ~ 0.010
	220 ~ 750	0.003 ~ 0.015	0.005 ~ 0.03

§5-3 平行输电线路可靠性估计

当有几回平行线路时，其中一回线路停运不会引起整个输电系统停运，这时只降低输电系统的输送容量，改变输电系统的运行情况，从电力系统的观点来看，一回重要的输电线突然断开是事故，因为这时可能在局部电力系统中发生功率不足，引起按负荷自动减装置动作而切除部分负荷，甚至引起稳定破坏和系统瓦解，讨论平行线路可靠性的意义不限于输电系统本身，它对于厂用电系统和配电网络组成的备用系统也有重要意义，它能告诉人们，哪一种备用方案是可取的。

1. 隐蔽备用 (пассивный Резерв) 和 显性备用 (Активный Резерв)

两回或多回平行线路，同时投入运行，如果根据连续性作为可靠性判据，那么其中一回或一回以上线路停电不会引起整个系

统行电，这种备用称为显耀备用。如果双回平行线路，平时只有一回投入运行，只有当运行着的线路事故断开时，自动装置才把第二回线路投入运行，那么这种备用称为显耀备用。

当双回平行线路，每回线路有可靠工作与停运两种状态，那么：

$$\{R_1(t) + Q_1(t)\} \{R_2(t) + Q_2(t)\} = 1 \quad (5-16)$$

式中

$R_1(t)$ 、 $R_2(t)$ 为每回线路可靠工作概率

$Q_1(t)$ 、 $Q_2(t)$ 为每回线路停运的概率

将上式展开，可得

$$R_1(t)R_2(t) + R_2(t)Q_1(t) + Q_2(t)R_1(t) + Q_1(t)Q_2(t) = 1 \quad (5-17)$$

式中

$R_1(t)R_2(t)$ 为在时间 t 内两回线路可靠工作的概率。

$\left. \begin{matrix} R_2(t)Q_1(t) \\ R_1(t)Q_2(t) \end{matrix} \right\}$ 为在时间 t 内一回线路工作，另一回停运的概率。

$Q_1(t)Q_2(t)$ 为在时间 t 内两回线路停运的概率。

如果采用供电连续性作为可靠性的判据，即只要有一回以上线路可靠工作，便能保证系统的供电连续性，那么双回线路系统的可靠度为

$$\begin{aligned} R_s(t) &= 1 - Q_1(t)Q_2(t) \\ &= 1 - [1 - R_1(t)][1 - R_2(t)] \\ &= R_1(t) + R_2(t) - R_1(t)R_2(t) \end{aligned} \quad (5-18)$$

当每回线路的可靠函数按指数规律分布时

$$R_S(t) = e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t} - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t} \quad (5-19)$$

整个系统的无故障运行时间 MTTF 为

$$MTTF_S = \int_0^{\infty} R(t) dt = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2} \quad (5-20)$$

当 $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$ 时,

$$R_S(t) = 2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t}$$

$$MTTF_S = \frac{3}{2\lambda}$$

例5-1 双回平行线路, 如果每回线路 $\lambda = 0.1$ /年 试讨论采用 暗备用与 明备用时输电系统的可靠性与 MTTF

解: 1) 暗备用

双回线路并列运行, 那么连续供电概率为:

$$\begin{aligned} R_S &= 2e^{-0.1 \times 1} - e^{-2 \times 0.1 \times 1} \\ &= 1.8096 - 0.8187 \\ &= 0.9909 \end{aligned}$$

$$M.T.T.F_S = \frac{3}{2 \times 0.1} = 15 \text{ 年}$$

2) 明备用

一回线路运行, 当第一回运行, 第二回才投入, 那么一年中连续供电概率为:

$$R_1 = e^{-0.1 \times 1} = 0.9048$$

$$MTTF_1 = \frac{1}{0.1} = 10 \text{ 年}$$

可见，从可靠性观点来看，采用暗备用为佳

应该指出，备用系统可靠工作的概率不仅取决于元件本身，而且^{取决于}自动操作的断路口的可靠性。在暗备用的情况下，断路口供断开运行元件之用，在明备用的情况下，断路口供投入备用元件之用。

如果自动操作的断路口在切断故障元件的过程中行运，那将引起全系统停电，因此在暗备用系统中，整个系统可靠工作的概率与断路口的可靠性有关。

$$R_s = R R_{c.B} \quad (5-2)$$

式中：R 为不考虑开关可靠性时系统可靠工作概率

R_s 为考虑开关可靠性时系统可靠工作概率

$R_{c.B}$ 为断开故障元件时开关元件行运的概率

对于明备用，系统的行运概率将由全概率公式确定：

$$Q_s = Q(S|A_1 A_2) R(A_1) R(A_2) + Q(S|\bar{A}_1 A_2) Q(A_1) R(A_2) \\ + Q(S|A_1 \bar{A}_2) R(A_1) Q(A_2) + Q(S|\bar{A}_1 \bar{A}_2) Q(A_1) Q(A_2) \quad (5-22)$$

式中：Q(S|A₁A₂)——断路口元行运时系统行运的条件概率

Q(S| $\bar{A}_1$ A₂)——断开故障元件时断路口行运条件下系统行运的条件概率。

Q(S|A₁ $\bar{A}_2$)——投入备用时，断路的行运条件下系统行运的条件概率。

Q(S| $\bar{A}_1 \bar{A}_2$)——当断开和投入时，断路口都行运条件下

系统运行的条件概率，

$R(A_1), Q(A_1)$ —— 在断开过程中，断路器无运行和运行的概率。

$R(A_2), Q(A_2)$ —— 在投入过程中，断路器无运行和运行的概率。

例 5-2 图 5-5 是两种厂用电的供电方案。图 5-5(A) 是不分段的供电方案，厂用电负荷由两回独立线路供电，每回线路在一年中可靠工作的概率等点 0.9。一回线路常时运行，另一回线由首用电流自动投入 ABP 动作而投入， A_1 在断开过程中运行概率为 0.05，可靠性参数如下：

$$\begin{aligned} R(A_1) &= 0.95; & Q(S|A_1\bar{A}_2) &= 1 \\ Q(A_1) &= 0.05; & R(A_2) &= 0.99 \\ Q(S|\bar{A}_1A_2) &= 1; & Q(A_2) &= 0.01 \\ Q(S|\bar{A}_1\bar{A}_2) &= 1; \end{aligned}$$

图 5-5(B) 是第二种供电方案。采用分段的厂用电供电接线，仍由两回独立线路供电线路与断路器的运行概率与图 5-5(A) 相同。接线图的差别在于开关的工作：分段断路器装有 ABP，当邻段失去电源时，由另一段马上投入，保证连续供电。

试估计两种供电方案的可靠供电概率

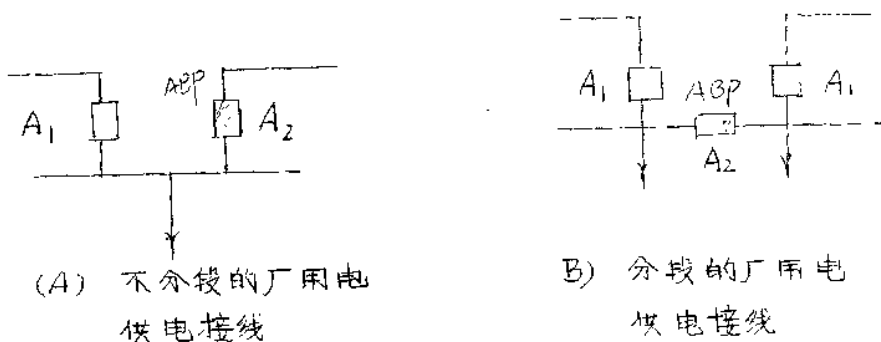


图 5-5 两种不同供电方案

解：在图 5-5 (A) 的供电方案中

当断路器无行运时，系统可靠工作的概率由运行着的那回线路的可靠性决定，即

$$Q(S|A_1A_2) = 1 - 0.9 = 0.1$$

系统的行运概率为

$$\begin{aligned} Q_S &= Q(S|A_1A_2)R(A_1)R(A_2) + Q(S|\bar{A}_1A_2)Q(A_1)R(A_2) + \\ &\quad Q(S|A_1\bar{A}_2)R(A_1)Q(A_2) + Q(S|\bar{A}_1\bar{A}_2)Q(A_1)Q(A_2) \\ &= 0.1 \times 0.99 \times 0.95 + 1 \times 0.05 \times 0.99 + \\ &\quad 1 \times 0.95 \times 0.01 + 1 \times 0.05 \times 0.01 \\ &= 0.15355 \end{aligned}$$

系统可靠工作概率为：

$$R_S = 1 - 0.15355 = 0.84645$$

在图 5-5 (B) 的供电方案中

$$R(A_1) = 1 - 2 \times 0.05 = 0.9 \quad (\text{因有两开关})$$

$$Q(A_1) = 1 - 0.9 = 0.1$$

$$R(A_2) = 0.99$$

$$Q(A_2) = 0.01$$

$$Q(S|\bar{A}_1A_2) = 0.5 \quad (\text{因为一半负荷仍供电})$$

$$Q(S|\bar{A}_1\bar{A}_2) = 0.5 \quad (\text{因为一半负荷仍供电})$$

如果断路器无行运，那么双回线路保证至少有一回供电的概率为

$$\begin{aligned}
 R_{S1} &= 1 - Q_1 Q_2 \\
 &= 1 - (1 - R_1)(1 - R_2) \\
 &= R_1 + R_2 - R_1 R_2
 \end{aligned}$$

当 $R_1 = R_2 = R$ 时,

$$R_{S1} = 2R - R^2 = 2 \times 0.9 - 0.81 = 0.99$$

$$Q(S|A_1 A_2) = 1 - R_{S1} = 0.01$$

系统停运的概率为

$$\begin{aligned}
 Q_S &= Q(S|A_1 A_2) R(A_1) R(A_2) + Q(S|\bar{A}_1 A_2) Q(A_1) R(A_2) + \\
 &\quad Q(S|A_1 \bar{A}_2) R(A_1) Q(A_2) + Q(S|\bar{A}_1 \bar{A}_2) Q(A_1) Q(A_2) \\
 &= 0.01 \times 0.9 \times 0.99 + 0.5 \times 0.1 \times 0.99 + \\
 &\quad 0.5 \times 0.9 \times 0.01 + 0.5 \times 0.1 \times 0.01 \\
 &= 0.06341
 \end{aligned}$$

系统可靠工作概率等於

$$R_S = 1 - 0.06341 = 0.93659$$

可见, 采用图 5-5(B) 的供电方案比采用图 5-5(A) 的方案可靠工作的概率要高。

2. 备用倍数对可靠工作概率的影响

在 n 回并联线路的系统中, 往往提出这样一个问题, n 为何值时, 系统的可靠度最高, 要回答这个问题, 首先要确定系统可靠工作的定义。

假定系统中有 n 回并联线路, m 是保证系统连续供电所需的回路数, 定义备用倍数为

$$k = \frac{n - m}{m} \quad (5-23)$$

两回线路的系统我们已作过分析, 当至少有一回线路可靠工

— 16 —