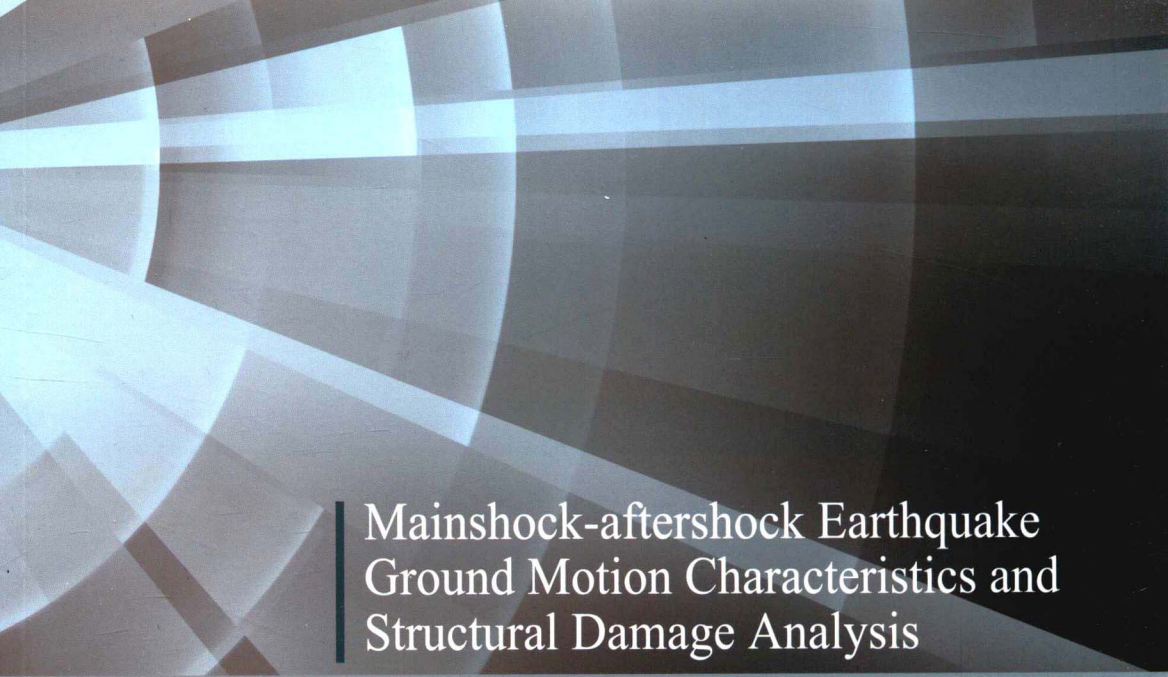




Mainshock-aftershock Earthquake
Ground Motion Characteristics and
Structural Damage Analysis

主余震地震动特征及 结构损伤分析

翟长海 谢礼立 温卫平 李爽/著

.....



科学出版社

第 1 章 余震地震动参数衰减

1.1 引言

历史地震资料表明,强主震以后往往伴随着强余震的发生。例如,1999 年 9 月 21 日中国台湾发生的集集地震,其主震的矩震级为 7.6 级,主震发生后的一个星期之内,就发生了 5 次矩震级在 5.8 级以上的强烈余震,其中,最强余震的矩震级达 6.3 级^[1]。中国 2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级大地震发生后,同样记录了大量的强余震发生,截至 2008 年 5 月 31 日,6.0 级以上的余震就多达 5 次,其中,最强余震震级达 6.4 级^[2]。2011 年 3 月 11 日日本发生的东日本大地震,其主震震级为 9.0 级,主震发生后的 40 分钟之内就有 3 次震级超过 7.0 级的强烈余震发生^[3]。结构在强烈主震作用之后一般都会有不同程度的损伤,余震的作用会使结构产生附加损伤,形成累积损伤效应。许多震后调查结果也证明余震对结构的破坏不容忽视^[4-9]。遗憾的是,中国现有的抗震设计规范乃至世界上绝大多数抗震规范主要考虑单次主震的作用,未对主余震序列对结构的不利影响作出相应的规定,人们对结构在主余震地震动作用下的破坏机理还很不清楚,急需科学的理论指导来提高工程结构的抗震性能。

强烈主震发生之后,余震对已损伤结构的附加破坏不容忽视,因此,有必要在结构抗震设计及性能评估中考虑余震的影响。众所周知,结构在地震动作用下的反应特征与地震动本身的特性(幅值、持时、频谱特性等)有着紧密的关系,要想研究清楚结构在主余震地震动作用下的破坏机理,必须先对主余震地震动的参数关系有一个清晰的了解。例如,结构在主震作用下会产生一定的损伤,结构刚度会有一定的降低,结构的自振周期也会随之增大,增大之后的周期可称为已损伤结构的自振周期(或结构的有效自振周期)。若已损伤结构的自振周期更接近于余震地震动的卓越周期,那么余震作用将会更加危险。因此,针对主震地震动参数与余震地震动参数之间的关系给出一个定量的表达,对于研究结构在主余震地震动作用下的破坏机理是非常有意义的。遗憾的是,到目前为止,主震地震动与余震地震动之间的参数关系还没有得到系统的研究。

在地震学领域,研究者们已经对主余震之间的关系进行了广泛的研究。早在

19 世纪, 日本学者 Omori 即得出了余震发生的频率随着时间逐渐衰减的规律, 即著名的 Omori 定律^[10]。此外, 还有描述余震震级与频度之间关系的 Gutenberg-Richter (古登堡-克里特) 定律^[11], 以及主余震之间震级之差的 Bath (巴特) 定律^[12]。以上即地震学领域著名的三大定律。随着地震数据的积累以及人们对于地震原理认识的加深, 有大量的研究者们对以上三大定律进行了研究及修正^[13-18]。然而, 在地震工程领域, 对于主余震地震动参数之间关系的研究起步则较晚, 而且研究结果也较少。

Das 和 Gupta^[19]采用集集地震中记录到的大量主余震地震动, 研究了余震地震动谱速度与主震地震动谱速度的比值随震级、距离和场地的变化趋势, 给出了余震地震动的条件预测公式。Ruiz-García^[20]从 13 次地震中选取了 184 条主余震地震动, 统计分析了余震地震动卓越周期与主震地震动的关系, 结果表明两者之间仅有轻微到中等程度的相关性, 且余震地震动的卓越周期更倾向于小于主震地震动的卓越周期。Moustafa 和 Takewaki^[21]通过比较余震地震动与主震地震动的傅里叶谱发现, 余震地震动的频率含量可能与主震地震动有很大的差别, 进而得出结论认为通过重复同一条地震动多次模拟主余震地震动是不合适的。温卫平^[22]采用壳内地震序列与俯冲区域板间地震序列研究了主余震地震动参数关系。

以上的研究是直接通过比较余震地震动与主震地震动的参数来研究主余震地震动参数关系的。除此之外, 主余震地震动的参数关系还可以通过地震动衰减关系得到。

到目前为止, 已经有大量的研究致力于建立和改进地震动的衰减关系^[23], 这些研究更多地将地震动参数表达为震级、断层距及剪切波速等震源参数和场地特征的函数, 因此, 在已知主余震的震源参数和场地特征时, 利用地震动衰减关系即可计算得到主余震地震动参数值, 进而可以获得两者之间的关系。然而, 在建立地震动衰减关系过程中是否选取余震地震动, 不同学者有着不同的观点。Boore 等^[24,25]、Campbell 和 Bozorgnia^[26,27]、Graizer 和 Kalkan^[28]、Chiou 和 Youngs^[29]等学者在建立地震动衰减关系时均去除了余震地震动。Douglas 和 Halldorsson^[30]讨论了余震地震动能否用于拟合地震动衰减关系, 并且建议在建立地震动衰减关系时可以不考虑主震地震动与余震地震动的区别。Graizer 等^[31]在建立地震动衰减关系时则没有区分主震地震动与余震地震动的区别。而 Abrahamson 和 Silva^[32,33]、Chiou 和 Youngs^[34]等学者在建立地震动衰减关系时同样选取了余震地震动, 但是在提出的地震动衰减关系中将余震作为一个参数, 认为相同震级的余震产生的地震动强度要小于主震。

由此可见,在使用地震动衰减关系来分析主余震地震动参数关系时,选用 Abrahamson 和 Silva^[32,33]、Chiou 和 Youngs^[34]等学者提出的公式最为合适;其次为 Graizer 等^[31]提出的地震动衰减关系;而用 Boore 等^[24,25]提出的衰减关系计算余震地震动参数值时则可能引入较大的误差。

应当注意的是,余震的震级和位置是依赖于主震的^[15,16,35,36],因此,在建立余震的衰减关系时最好与主震地震动联系起来,这样在进行主余震概率地震危险性分析时才更具有一致性,而使用现有的地震动衰减关系进行分析则无法满足这一要求。Das 和 Gupta^[19]虽然直接给出了余震地震动参数与主震地震动参数之间的关系,但仅仅选用了集集地震记录且没有考虑近场区域的饱和效应。

本章从全球范围内选取大量的主余震地震动记录,研究余震地震动参数与主震地震动参数的比值随震级、断层距、场地的变化特性,采用给出的条件衰减关系研究震级、距离、场地等对主余震参数关系的影响,通过与实际数据对比论证模型的合理性,并研究壳内地震序列与俯冲区域板间地震序列的异同,通过残差分析验证余震地震动参数与主震地震动参数的比值服从对数正态分布,并与其他衰减关系进行比较分析。

1.2 地震动数据库

本章总共选用来自 19 次主余震序列的 1353 条主余震地震动,选用时遵循以下原则:①余震的矩震级要大于 5.0;②水平地震动峰值地面加速度(peak ground acceleration, PGA)的几何平均值要大于 0.03g;③所选用的台站要有相应的剪切波速资料;④地震动均记录于场地表面或者低层结构的首层。表 1-1 给出了本章所选用的主余震序列信息及其相应的地震动台站数目。

美国的帝王谷(Imperial Valley)地震序列和北岭(Northridge)地震序列、中国台湾的集集地震序列的地震动选自美国太平洋地震研究中心(Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER)的下一代衰减(next generation attenuation, NGA)数据库(<http://peer.berkeley.edu/nga/>)。日本的两次北海道(Hokkaido)地震序列、东本州(Eastern Honshu)地震序列和东日本大地震序列的地震动选自 K-net 和 Kik-net 数据库(<http://www.k-net.bosai.go.jp/>)。

地震震级为矩震级,距离为断层距,场地条件用地下 30m 的平均剪切波速 V_{s30} 来表示。对于美国的帝王谷地震序列和北岭地震序列、中国台湾的集集地震序列,其相应的信息均可由 NGA 数据库中获得。值得注意的是,由于帝王谷地震序列和北岭地震序列中的余震没有相应的断层信息,用震源距来近似估计断层距。

表 1-1 本章所选用的主余震序列信息及其相应的台站数目

地震序列名称	主震		余震		台站数目
	时间	矩震级	时间	矩震级	
帝王谷	1979-10-15,23:16	6.53	1979-10-15,23:19	5.01	7
北岭	1994-01-17,12:31	6.69	1994-03-20,21:20	5.28	8
集集	1999-09-20	7.62	1999-09-20,17:57	5.9	46
			1999-09-20,18:03	6.2	57
			1999-09-20,21:46	6.2	58
			1999-09-22,00:14	6.2	80
			1999-09-25,23:52	6.3	91
北海道	2003-09-25,19:50	8.3	2003-09-25,21:08	7.3	64
北海道	2004-11-28,18:32	7.0	2004-12-06,14:15	6.7	53
东本州	2008-06-13,23:43	6.9	2008-07-23,15:26	6.8	18
东日本	2011-03-11,05:46	9.0	2011-03-11,06:15	7.9	188
			2011-03-11,06:25	7.6	103
			2011-03-12,13:15	6.2	35
			2011-03-15,13:31	6.0	49
			2011-03-19,09:56	5.8	66
			2011-03-24,08:21	5.9	60
			2011-03-27,22:21	6.2	63
			2011-04-07,14:32	6.9	133
			2011-04-11,08:16	6.8	174

对于日本的地震序列，其矩震级来自哈佛大学矩心矩张量目录（Harvard Centroid Moment Tensor Catalog, HCMTC）（<http://www.globalcmt.org/>）。地震断层信息来自日本地震信息中心（Earthquake Information Center, EIC）的地震学笔记（Seismological Note）（http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/）及哈佛大学矩心矩张量目录（<http://www.globalcmt.org/>）。Kik-net 台站的 V_{S30} 可由相应的剪切波速资料计算得到，但是 K-net 台站的剪切波速的测量范围均小于地下 30m，无法直接由实际测量资料计算 V_{S30} 。许多学者提出了地下某一深度范围（小于 30m）平均剪切波速与地下 30m 平均剪切波速 V_{S30} 的经验公式^[37-40]，可以采用 Cadet 和 Duval^[39]给出的经验公式来计算 K-net 台站的 V_{S30} 。

对原始记录到的地震动数据需进行基线校正和滤波处理，才能确定地震动的应用范围^[41,42]。由 PEER NGA 数据库得到的地震动已经经过了相应的处理，而 K-net 和 Kik-net 数据库得到的日本地震序列的地震动没有经过基线校正和滤波处

理, 因此, 首先对其进行基线校正, 然后采用四阶巴特沃斯 (Butterworth) 高通滤波器, 截止滤波频率为 0.1 Hz。图 1-1 (a) 给出了选用记录随断层距和震级的分布, 图 1-1 (b) 给出了选用记录随断层距之比 D_{as} / D_{ms} (余震断层距比主震断层距) 和震级之比 M_{as} / M_{ms} (余震震级比主震震级) 的分布。

选用的地震序列既包括壳内地震, 如美国的帝王谷地震序列、北岭地震序列和中国台湾的集集地震序列, 也包括俯冲区域地震, 如日本的北海道地震序列、东本州地震序列和东日本大地震序列。Tichelaar 和 Ruff^[43]认为, 对于俯冲区域的地震, 大多数板间地震的震源深度小于 50 km, 而大多数板内地震的震源深度大于 50 km。按照这样的标准, 除了东本州地震序列的第二次余震外, 本章选用的俯冲区域的地震均为板间地震。

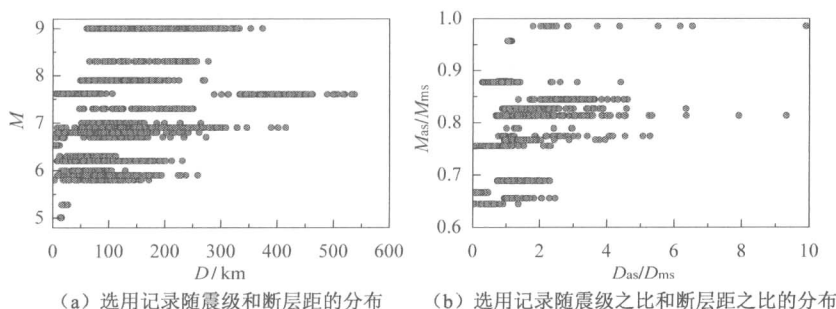


图 1-1 主震及余震记录的震级、断层距分布图

1.3 地震动参数及衰减模型

1.3.1 地震动参数

本章选取的地震动参数包括地震动强度参数 IM (intensity measure) 和地震动持时。地震动强度参数 IM 包括: 峰值地面加速度 PGA、峰值地面速度 PGV (peak ground velocity)、Arias 烈度 I_A 、累积绝对速度 CAV (cumulative absolute velocity) 和结构基本周期对应的谱加速度 S_a 。地震动持时包括 90% 的重要持时 t_{D90} 和 70% 的重要持时 t_{D70} 。

Arias 烈度 I_A ^[44] 定义为

$$I_A = \frac{\cos^{-1}(\zeta)}{g\sqrt{1-\zeta^2}} \int_0^{t_f} a^2(t) dt \quad (1-1)$$

式中, ζ ——阻尼比;

g ——重力加速度;

t_f ——地震动总持时;

$a(t)$ ——地震动加速度时程。

累积绝对速度 CAV^[45] 定义为

$$CAV = \int_0^{t_f} |a(t)| dt \quad (1-2)$$

采用 Arias 烈度, Trifunac 和 Brady^[46] 提出了重要持时 t_D 的概念, 90% 能量的重要持时 t_{D90} 可采用以下公式计算:

$$t_{D90} = t(I_{Ai} = 0.95 I_A) - t(I_{Ai} = 0.05 I_A) = t_{95} - t_5 \quad (1-3)$$

式中, t_{D90} ——拥有地震动 90% 能量的重要持时;

t ——某一时刻;

I_A ——整条地震动的 Arias 烈度;

I_{Ai} ——地震动在某一时刻的 Arias 烈度;

t_{95} —— I_{Ai} 达到 $0.95 I_A$ 的时刻;

t_5 —— I_{Ai} 达到 $0.05 I_A$ 的时刻。

同理, 70% 能量的重要持时 t_{D70} 可采用以下公式计算:

$$t_{D70} = t(I_{Ai} = 0.75 I_A) - t(I_{Ai} = 0.05 I_A) = t_{75} - t_5 \quad (1-4)$$

1.3.2 衰减模型

不同的构造环境可能会导致壳内地震和俯冲区域地震有着不同的地震动衰减特性, 因此, 许多学者在研究地震动衰减时将壳内地震和俯冲区域地震区分开^[24-34, 47-52]。Si 和 Midorikawa^[52] 的研究结果表明板内地震产生的地震动会明显强于壳内地震和板间地震, 而壳内地震和板间地震的地震动之间的区别很小。由于本章所选取的绝大多数俯冲区域地震均为板间地震, 先假定壳内地震的主余震地震动强度参数关系与板间地震相似, 将所有地震统一进行拟合分析, 然后通过实际数据与拟合曲线比较来验证假定的合理性。本章选用的地震动数据库中, 347 条主余震地震动来自壳内地震序列, 1006 条主余震地震动来自俯冲区域地震序列。

通过研究已有衰减关系和所选数据库的衰减规律, 本章提出以下的余震地震动参数衰减关系:

$$\ln(VY) = b_1 M_{ms} + b_2 \nabla M + b_3 \ln[\nabla D + (\nabla M / D_{ms})^{b_4}] + b_5 \ln(760 / V_{s30}) + \varepsilon \quad (1-5)$$

式中, $\ln$ ——自然对数;

Y ——地震动强度参数 IM 或地震动持时参数 t_D , 取两个水平分量的几何平均值;

- ∇Y ——余震地震动参数 Y_{as} 与主震地震动参数 Y_{ms} 的比值, $\nabla Y = Y_{as} / Y_{ms}$,
 ∇Y 也可称为余震地震动的相对参数;
 M_{ms} ——主震矩震级;
 ∇M ——余震矩震级 M_{as} 与主震矩震级 M_{ms} 的比值, $\nabla M = M_{as} / M_{ms}$;
 ∇D ——余震断层距 D_{as} 与主震断层距 D_{ms} 的比值, $\nabla D = D_{as} / D_{ms}$;
 V_{s30} ——地下 30m 的平均剪切波速;
 ε ——预测值与观测值之间的残差, 一般假定其服从均值为 0、标准差为 σ 的正态分布;
 $b_1 \sim b_5$ ——公式的拟合系数。

在式 (1-5) 中, 等号右边第一项和第二项用来描述 ∇Y 随主震震级和余震震级的变化情况, 第三项中的 $\ln \nabla D$ 表示 ∇Y 随断层距之比的几何衰减, 采用 $\nabla M / D_{ms}$ 来模拟近场区域的饱和效应, 采用第四项来模拟场地类别对 ∇Y 的影响。式 (1-5) 与主震参数有关, 因此该模型不仅能够方便地预测余震地震动参数值, 还能够揭示主余震地震动参数之间的关系。用加权最小二乘法对式 (1-5) 进行拟合, 采用 Campbell^[53]的方法, 将 ∇D 分为 7 个区间, 在每个区间内的不同地震具有相同的权重, 不同 ∇D 范围的台站数目见表 1-2。

表 1-2 不同 ∇D 范围的台站数目

∇D 范围	0~0.29	0.3~0.59	0.6~0.89	0.9~1.19	1.2~1.99	2.0~3.49	3.5~10
台站数目	87	160	159	295	304	251	97

1.4 地震动强度参数

1.4.1 回归结果

根据 1.3 节描述的公式和方法, 得到对应于不同地震动强度参数 IM 的拟合系数及其标准差, 如表 1-3 所示。

表 1-3 对应于不同地震动强度参数的拟合系数及其标准差

强度参数	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	σ
PGA	-0.426	3.085	-1.038	0.530	0.085	0.569
PGV	-0.482	3.253	-1.160	0.590	0.049	0.543
I_A	-1.062	7.781	-1.391	0.632	0.062	0.687
CAV	-1.032	8.820	-1.241	0.602	0.051	0.677
$S_a(T=0.01s)$	-0.422	3.118	-1.037	0.480	0.044	0.566

续表

强度参数	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	σ
$S_a(T=0.02s)$	-0.426	3.154	-1.039	0.510	0.041	0.573
$S_a(T=0.03s)$	-0.430	3.188	-1.058	0.520	0.046	0.591
$S_a(T=0.04s)$	-0.428	3.204	-1.033	0.480	0.044	0.600
$S_a(T=0.05s)$	-0.422	3.159	-1.024	0.500	0.036	0.596
$S_a(T=0.075s)$	-0.416	3.134	-1.033	0.520	0.064	0.623
$S_a(T=0.1s)$	-0.406	3.039	-1.054	0.530	0.086	0.637
$S_a(T=0.15s)$	-0.417	3.085	-1.100	0.560	0.103	0.675
$S_a(T=0.2s)$	-0.432	3.103	-1.112	0.580	0.133	0.683
$S_a(T=0.25s)$	-0.447	3.173	-1.136	0.590	0.143	0.668
$S_a(T=0.3s)$	-0.459	3.203	-1.154	0.610	0.148	0.682
$S_a(T=0.4s)$	-0.483	3.417	-1.207	0.620	0.110	0.711
$S_a(T=0.5s)$	-0.521	3.744	-1.254	0.620	0.085	0.724
$S_a(T=0.75s)$	-0.546	3.912	-1.276	0.630	0.059	0.724
$S_a(T=1.0s)$	-0.565	4.075	-1.324	0.650	0.053	0.717
$S_a(T=1.5s)$	-0.582	4.202	-1.336	0.620	0.039	0.724
$S_a(T=2.0s)$	-0.605	4.375	-1.424	0.540	0.013	0.750
$S_a(T=3.0s)$	-0.618	4.404	-1.370	0.520	0.001	0.750
$S_a(T=4.0s)$	-0.638	4.334	-1.450	0.580	-0.011	0.792
$S_a(T=5.0s)$	-0.665	4.484	-1.460	0.610	-0.021	0.787
$S_a(T=7.5s)$	-0.670	4.170	-1.437	0.650	-0.022	0.802
$S_a(T=10.0s)$	-0.680	4.310	-1.426	0.660	-0.045	0.835

系数 b_1 的值为负，表明 ∇IM 随着主震震级 M_{ms} 的增大而减小。图 1-2 给出了 $\nabla M=0.816$ ， $D_{ms}=30km$ ， $V_{s30}=560m/s$ 条件下，不同主震震级 M_{ms} 对应的 ∇IM 随 ∇D 的变化趋势。由图 1-2 可以看出，随着结构周期的增大，系数 b_1 的值逐渐减小，主震震级对 ∇IM 的影响也逐渐增大。还可以看出，不同主震震级之间的差别随着周期的增大而逐渐增大。以 $\nabla D=0.1$ 为例，当 $T=0.2s$ 时， $M_{ms}=6.6$ 对应的 ∇S_a 是 $M_{ms}=8.6$ 的 2.37 倍，而当 $T=3.0s$ 时， $M_{ms}=6.6$ 对应的 ∇S_a 是 $M_{ms}=8.6$ 的 3.44 倍。

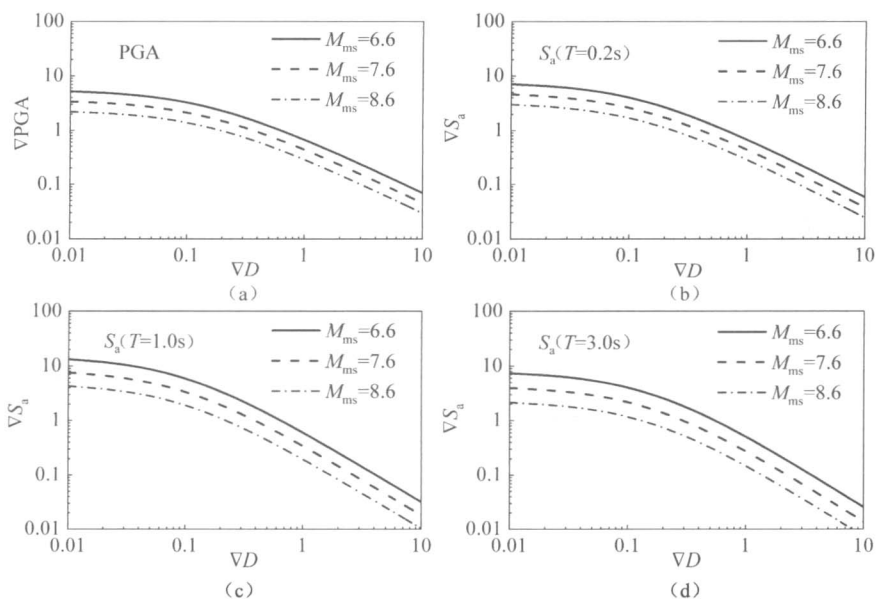


图 1-2 不同 M_{ms} 对应的 ∇IM 随 ∇D 的变化 ($\nabla M = 0.816$, $D_{ms} = 30\text{km}$, $V_{s30} = 560\text{m/s}$)

系数 b_2 的值为正, 表明 ∇IM 随着震级之比 ∇M 的增大而增大。图 1-3 给出了 $M_{ms} = 7.6$, $D_{ms} = 30\text{km}$, $V_{s30} = 560\text{m/s}$ 条件下, 不同震级之比 ∇M 对应的 ∇IM 随 ∇D 的变化趋势。总体上, 系数 b_2 的值随结构周期的增大而逐渐增大, 震级之比 ∇M

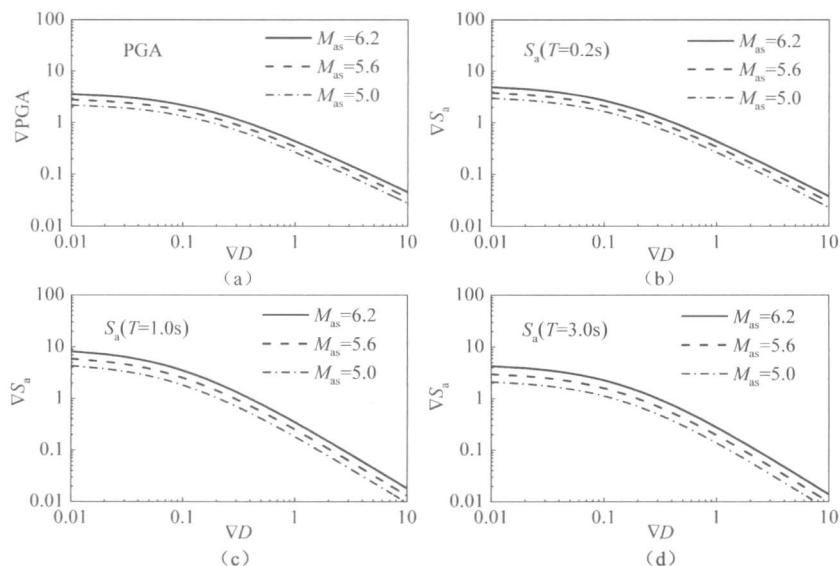


图 1-3 不同 ∇M 对应的 ∇IM 随 ∇D 的变化 ($M_{ms} = 7.6$, $D_{ms} = 30\text{km}$, $V_{s30} = 560\text{m/s}$)

对 ∇IM 的影响也逐渐增大。从图 1-3 中也可以看出, 随着周期的增大, 不同余震震级 M_{as} 之间的差别以微小的幅度逐渐增大。以 $\nabla D=0.1$ 为例, 当 $T=0.2s$ 时, $M_{as}=6.2$ 对应的 ∇S_a 是 $M_{as}=5.0$ 的 1.64 倍, 而当 $T=3.0s$ 时, $M_{as}=6.2$ 对应的 ∇S_a 是 $M_{as}=5.0$ 的 2.01 倍。

系数 b_3 的值为负, 说明 ∇IM 随着断层距之比 ∇D 的增大而减小, 且随主震断层距 D_{ms} 的增大而增大。图 1-4 给出了 $M_{ms}=7.6$, $M_{as}=6.2$, $V_{s30}=560m/s$ 条件下, 不同主震断层距 D_{ms} 对应的 ∇IM 随 ∇D 的变化趋势。从图 1-4 中可以看出, 当 $\nabla D < 0.2$ 时, ∇IM 随主震断层距 D_{ms} 的增大而增大, 当 $\nabla D > 0.2$ 时, 主震断层距 D_{ms} 对 ∇IM 的影响不再明显。系数 b_4 的值为正, 说明在近场区域内, 主震断层距 D_{ms} 越小, ∇IM 随 ∇D 的变化将会有更长的饱和段。从图 1-4 中还可以看出, 相比于 $D_{ms}=10km$, $D_{ms}=120km$ 对应的 ∇IM 以更快的速率随着 ∇D 的增大而减小。

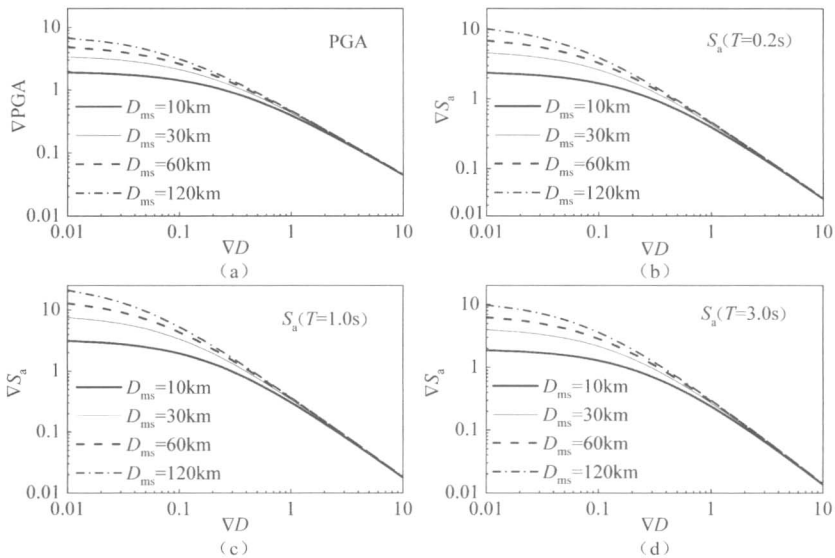


图 1-4 不同 D_{ms} 对应的 ∇IM 随 ∇D 的变化 ($M_{ms}=7.6$, $M_{as}=6.2$, $V_{s30}=560m/s$)

当周期小于 $4s$ 时, 系数 b_5 的值大于 0 , 说明 ∇IM 随 V_{s30} 的增大而减小, 当周期大于 $4s$ 时, 系数 b_5 的值小于 0 , 说明 ∇IM 随 V_{s30} 的增大而增大。图 1-5 给出了 $M_{ms}=7.6$, $M_{as}=6.2$, $D_{ms}=30km$ 条件下, 不同剪切波速 V_{s30} 对应的 ∇IM 随 ∇D 的变化趋势。结合系数 b_5 的值及图 1-5 的结果可知, 剪切波速 V_{s30} 对周期范围为 $0.1 \sim 0.5s$ 的 ∇IM 有中等程度的影响, 而对于其他周期的 ∇Y , 剪切波速 V_{s30} 的影响很小。以 $\nabla D=0.1$ 为例, 当剪切波速 V_{s30} 从 $1100m/s$ 减小至 $150m/s$ 时, 对于 $T=0.2s$, ∇S_a 的增加幅度为 30% , 而对于 $T=3.0s$, ∇S_a 几乎没有变化。

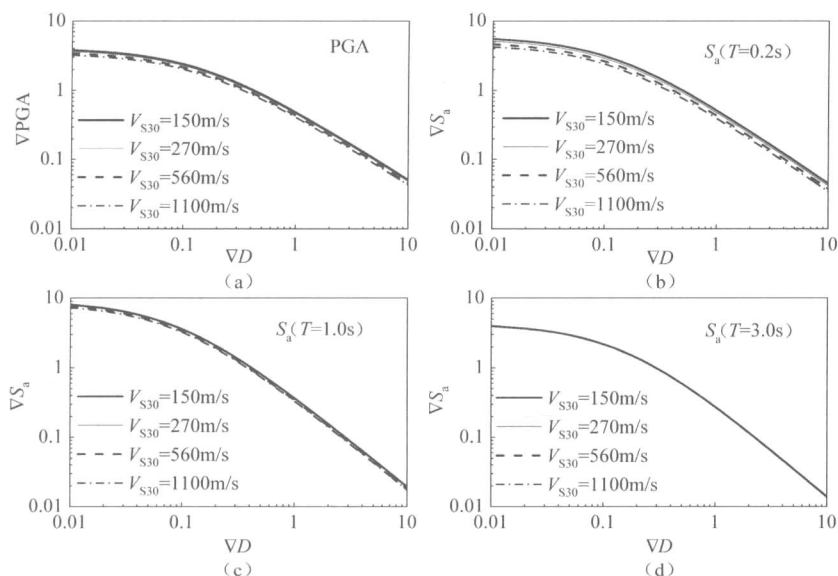


图 1-5 不同剪切波速 V_{s30} 对应的 ∇IM 随 ∇D 的变化 ($M_{ms}=7.6$, $M_{as}=6.2$, $D_{ms}=30km$)

1.4.2 模型及假定合理性论证

本小节首先通过预测数据与实际数据对比来讨论衰减关系的合理性。影响地震动参数的震源参数有很多，最常用的震源参数包括震级、断层距和剪切波速等。式 (1-5) 中震源参数涉及了主震震级、余震震级、主震断层距、余震断层距和剪切波速。将地震动按照以上的震源参数划分为不同的范围来分别与预测结果进行比较是许多学者常用的一种比较方法。但是，由于主余震地震动的记录较少，按以上方法进行比较会使得用于比较的实际记录过少而失去比较的意义。因此，本节参考其他文献^[38,54]的方法，先将实际观测值进行标准化，然后与预测值进行比较分析。实际观测值按下式进行标准化：

$$\ln(obs_{nor}) = \ln(obs) - \ln(pre) + \ln(pre_{nor}) \quad (1-6)$$

式中， $\ln(obs_{nor})$ 是标准化的实际观测值； $\ln(obs)$ 是实际观测值； $\ln(pre)$ 是实际条件下的预测值； $\ln(pre_{nor})$ 是标准条件下的预测值。通过式 (1-6) 可将所有的地震动观测值标准化至同一条件下，然后再与预测结果进行比较。

图 1-6 给出了在标准条件 ($M_{ms}=7.6$, $M_{as}=6.2$, $D_{ms}=30km$, $V_{s30}=560m/s$) 下预测值与标准化观测值的比较图。

图 1-6 中实线表示预测的中位置，虚线分别对应于第 16 分位值和第 84 分位值（假定地震动参数服从对数正态分布）。从图 1-6 可以看出，绝大部分的标准化数据均落在虚线范围之内，表明模型能够较好地模拟实际情况。

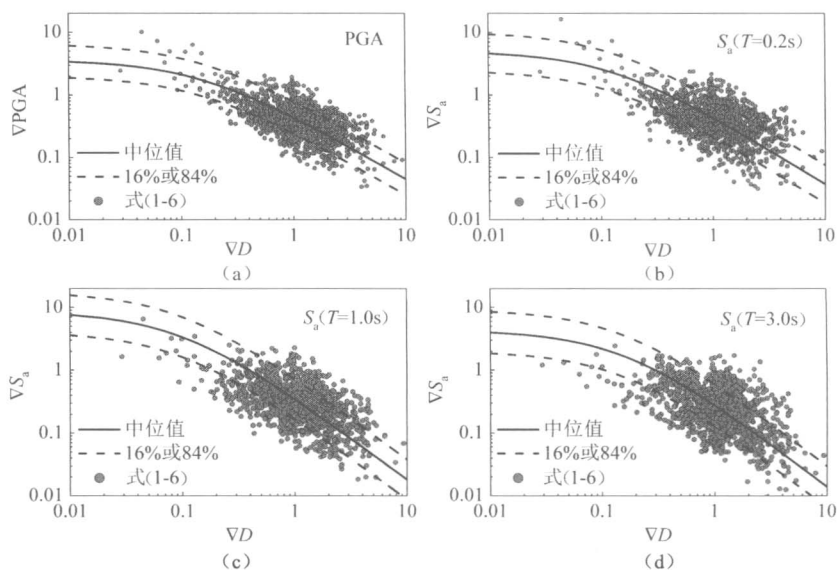


图 1-6 预测值与标准化观测值的比较 ($M_{ms}=7.6$, $M_{as}=6.2$, $D_{ms}=30\text{km}$, $V_{s30}=560\text{m/s}$)

此外, 为了验证本章假定的合理性, 采用两组标准条件分别研究壳内地震与俯冲区域地震的拟合效果。第一组标准条件与图 1-6 中相同, 第二组标准条件为 $M_{ms}=9.0$, $M_{as}=7.6$, $D_{ms}=120\text{km}$, $V_{s30}=560\text{m/s}$ 。图 1-7 与图 1-8 分别为在第一、二组标准条件下本章预测值与标准化观测值的比较图。

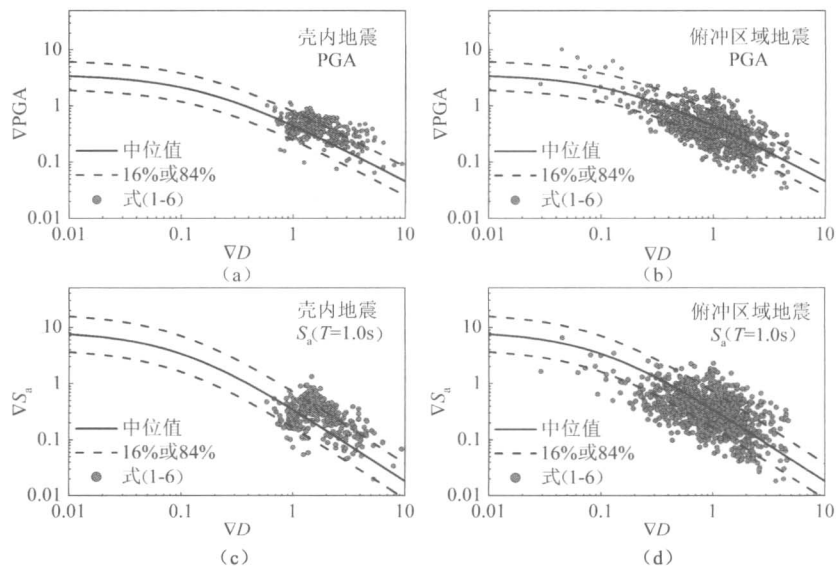


图 1-7 在第一组标准条件下本章预测值与标准化观测值的比较

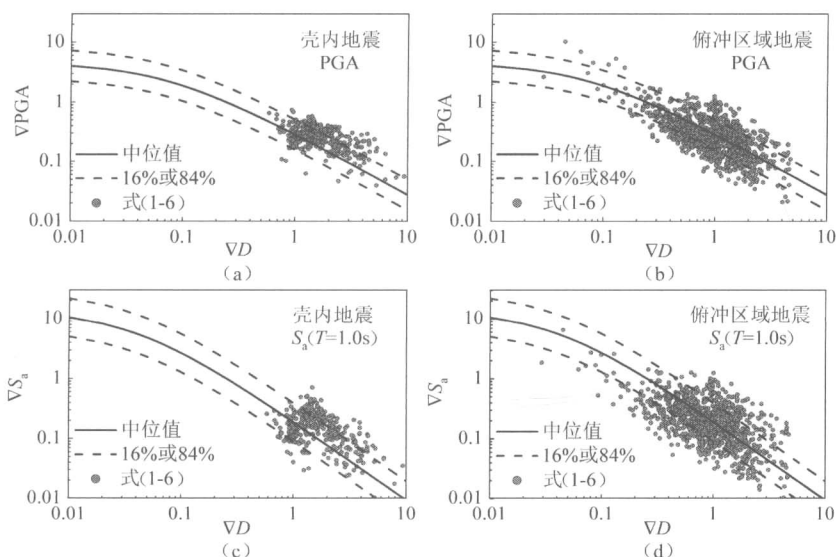


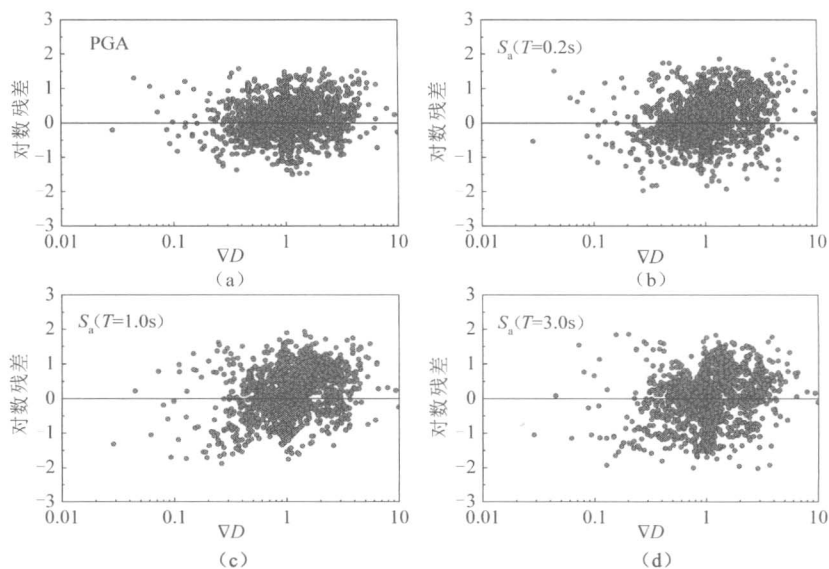
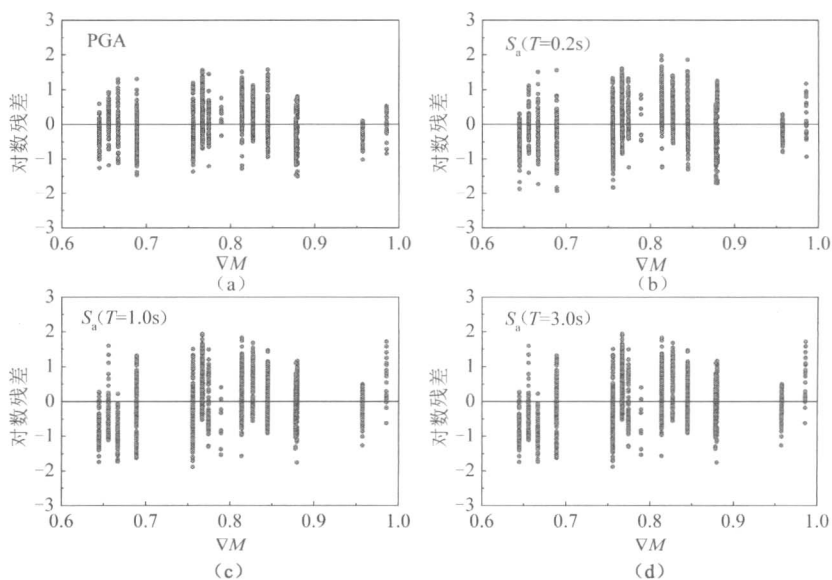
图 1-8 在第二组标准条件下本章预测值与标准化观测值的比较

从图 1-7 和图 1-8 中可以看出，无论是壳内地震还是对于俯冲区域地震，其大部分观测值均落在虚线之间，表明模型能够较好地模拟壳内地震序列和俯冲区域地震序列的主余震地震动强度参数关系，进而证明假定是合理的。需要说明的是，选取的俯冲区域地震大多为板间地震，对于俯冲区域板内地震序列的主余震地震动参数关系还需专门的研究。

同时也需注意，当地震动的 ∇D 较大时，壳内地震的 ∇Y 有逐渐大于俯冲区域板间地震的趋势，这说明虽然该假定对于大多数情形均比较合理，但是仍然可以发现板间余震地震动的衰减要稍微快于壳内地震。

1.4.3 残差分析

采用对数残差来研究模型的合理性。对数残差等于观测值的对数减去预测值的对数。图 1-9 给出了对数残差 $\ln(\text{观测值}/\text{预测值})$ 与断层距之比 ∇D 的关系图。从图 1-9 中可以看出，随着断层距之比 ∇D 的变化，对数残差较为均匀地分布在 0 周围，对数残差不依赖于 ∇D 。图 1-10 给出了对数残差 $\ln(\text{观测值}/\text{预测值})$ 与震级之比 ∇M 的关系图。从图 1-10 中可以看出，随着震级之比 ∇M 的变化，对数残差较为均匀地分布在 0 周围，对数残差不依赖于 ∇M 。图 1-11 给出了对数残差 $\ln(\text{观测值}/\text{预测值})$ 与剪切波速 V_{s30} 的关系图。从图 1-11 中可以看出，随着剪切波速 V_{s30} 的变化，对数残差较为均匀地分布在 0 周围，对数残差不依赖于 V_{s30} 。

图 1-9 对数残差 $\ln$ (观测值/预测值) 与断层距之比 ∇D 的关系图图 1-10 对数残差 $\ln$ (观测值/预测值) 与震级之比 ∇M 的关系图

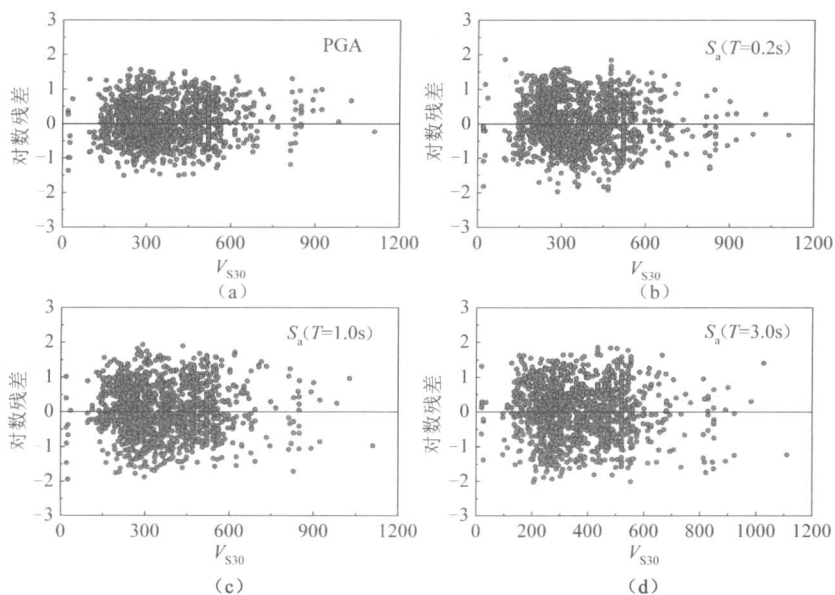


图 1-11 对数残差 $\ln(\text{观测值/预测值})$ 与剪切波速 V_{S30} 的关系图

在地震危险性分析中，一般假定地震动参数服从于对数正态分布，有学者^[55,56]验证了这种假定的合理性。标准残差定义为残差与其标准差的比值，采用标准化的对数残差来验证 $\forall Y$ 服从对数正态分布。图 1-12 给出了标准化对数残差的正态

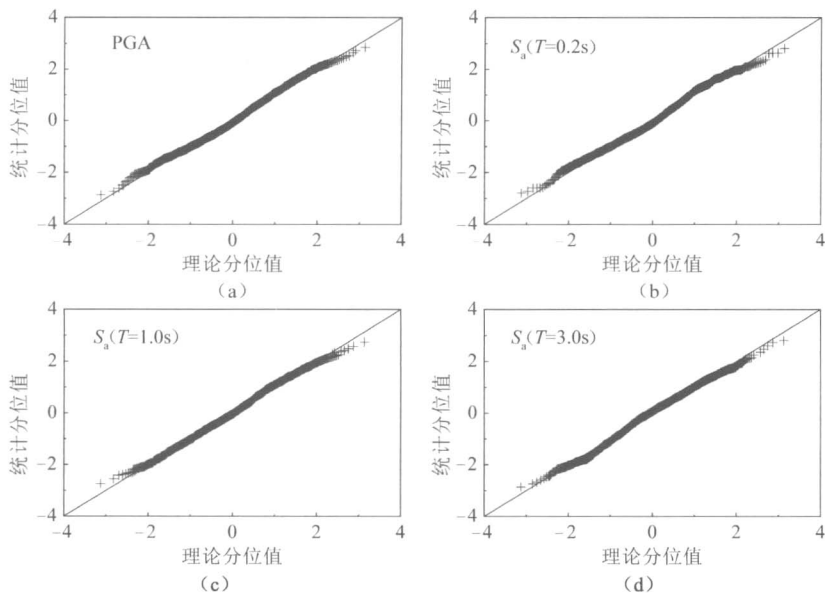


图 1-12 标准化对数残差 $\ln(\text{观测值/预测值})$ 的正态 Q-Q 散点图

Q-Q 散点图, 纵坐标为处于不同分位数的标准化对数残差, 横坐标为计算自标准正态分布的具有与纵坐标相同分位数的值。按照 Q-Q 散点图的定义, 当离散数据近似为一条与横轴呈 45° 角的直线时, 可认为其服从于标准正态分布。从图 1-12 中可以看出, 所有的离散数据均可近似用一条与横轴呈 45° 角的直线代替, 说明标准化对数残差服从标准正态分布, 进而可以证明 ∇Y 服从对数正态分布。

1.4.4 与其他模型的比较

在已有的地震动衰减关系中, Abrahamson 和 Silva^[32]、Chiou 和 Youngs^[34]、Das 和 Gupta^[19]均选取了余震地震动, 本节将讨论本章模型与他们的模型(AS2008 模型、CY2008 模型、DG2010 模型)的异同。由于 Das 和 Gupta 仅采用集集地震序列来研究主余震地震动的参数关系, 本章在比较时主震震级 M_{ms} 限定为 7.6, 其余参数为 $M_{as}=6.2$, $D_{ms}=30\text{km}$, $V_{s30}=560\text{m/s}$, 对于 DG2010 模型, 场地类别为硬土场地(stiff soil)。图 1-13 给出了在 $M_{ms}=7.6$, $M_{as}=6.2$, $D_{ms}=30\text{km}$, $V_{s30}=560\text{m/s}$ 条件下, 不同模型计算出的 ∇Y 随 ∇D 的变化情况。

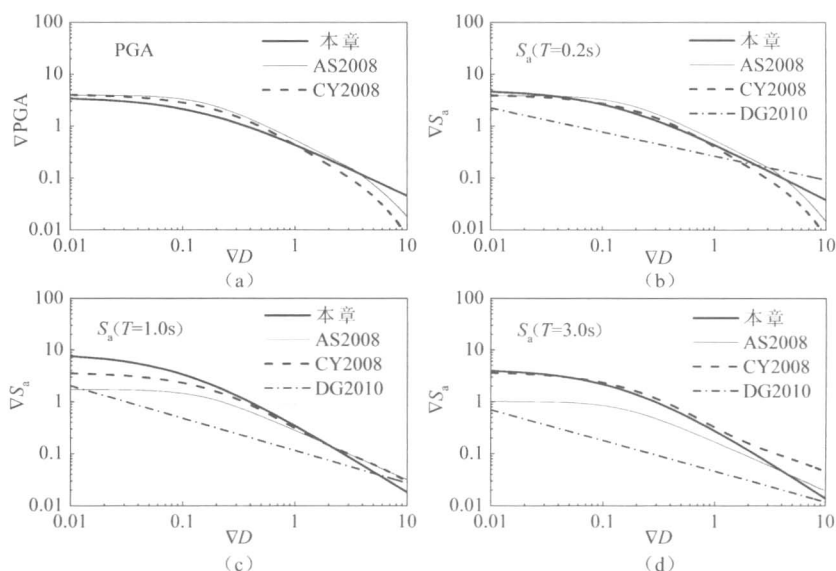


图 1-13 不同预测模型的比较图 ($M_{ms}=7.6$, $M_{as}=6.2$, $D_{ms}=30\text{km}$, $V_{s30}=560\text{m/s}$)

从图 1-13 中可以看出, 对于 PGA, 当 $\nabla D < 2$ 时, 本章模型的预测结果略小于 AS2008 模型、CY2008 模型的预测结果; 当 $\nabla D > 4$ 时, 本章模型的预测结果大于 AS2008 模型、CY2008 模型的预测结果。对于 S_a ($T=0.2\text{s}$), 当 $\nabla D < 2$ 时, 本章模型的预测结果与 AS2008 模型、CY2008 模型相似, DG2010 模型的预测值要