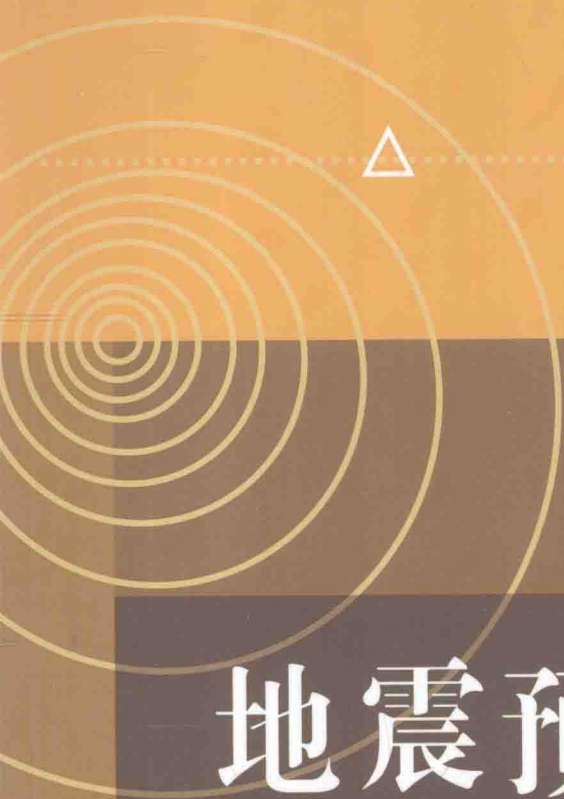




台站

地震预警系统

[意] 保罗·盖斯帕里尼

[意] 盖伊塔诺·曼弗雷迪

[德] 约亨·斯高

梁建宏 孙 丽 邹立晔

李 敏 韩雪君 徐志国

赵仲和

编著

译

审校

地震出版社

地震预警系统

[意] 保罗·盖斯帕里尼 [意] 盖伊塔诺·曼弗雷迪

[德] 约亨·斯高 编著

梁建宏 孙丽 邹立晔 李敏 韩雪君 徐志国 译

赵仲和 审校

地震出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

地震预警系统 / (意) 盖斯帕里尼 (Gasparini, P.), (意) 曼弗雷迪 (Manfredi, G.), (德) 斯高 (Zschau, J.) 编著; 梁建宏等译. — 北京: 地震出版社, 2014.5

ISBN 978-7-5028-4333-5

I. ①地… II. ①盖… ②曼… ③斯… ④梁… III. ①地震灾害—预警系统
IV. ①P315.75

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 213806 号

著作权合同登记图字: 01-2011-5287

Translation from the English language edition:

[Earthquake Early Warning Systems] by [Paolo Gasparini, Gaetano Manfredi and Jochen Zschau] (Eds.)

Copyright :emoji: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007

Springer is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved

地震版 XM2289

地震预警系统

[意] 保罗·盖斯帕里尼 [意] 盖伊塔诺·曼弗雷迪 [德] 约亨·斯高 编著

梁建宏 孙丽 邹立晔 李敏 韩雪君 徐志国 译

赵仲和 审校

责任编辑: 董青

责任校对: 庞亚萍

出版发行: 地震出版社

北京民族学院南路 9 号

邮编: 100081

发行部: 68423031 68467993

传真: 88421706

门市部: 68467991

传真: 68467991

总编室: 68462709 68423029

传真: 68455221

专业图书事业部: 68467982 68721991

<http://www.dzpress.com.cn>

经销: 全国各地新华书店

印刷: 北京地大天成印务有限公司

版 (印) 次: 2014 年 5 月第一版 2014 年 5 月第一次印刷

开本: 787×1092 1/16

字数: 337 千字

印张: 21.25

印数: 0001 ~ 1000

书号: ISBN 978-7-5028-4333-5/P (5022)

定价: 90.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

译者前言

近年来,随着经济的发展和社会的进步,人们的防震减灾意识逐渐增强,在地震预报还没有过关的今天,地震预警技术得到了越来越多的关注。日本、墨西哥、希腊、土耳其等国家和美国的南加州等地区先后发展了地震预警系统。我国也已经开始大力发展地震预警技术,目前正稳步推进地震预警系统的研制和建设。地震预警技术被看作很有前途的防震减灾技术,在几个国家和地区的实践中,有成功的例子。例如 20 世纪 90 年代以来,墨西哥的地震预警系统在几次大地震中取得了实际的减灾效益。但由于地震本身的复杂性,人们对地震孕育和发展的机制知之甚少,在极短的时间由计算机软件自动判定的地震的位置、大小和可能造成的灾害还有不小误差,加之发布地震警报的社会学问题,地震预警系统发挥的作用还远没有达到人们的期望,但它仍然值得我们期待。

由保罗·盖斯帕里尼教授、盖伊塔诺·曼弗雷迪教授和约亨·斯高教授主编, Springer 科学与商务传媒公司出版的 Earthquake Early Warning Systems 一书收集了关于地震预警方面的文章 17 篇,涉及快速测定震源参数和震动图、评估地震灾害的方法以及地震预警工程应用前景等方面的内容,并介绍了四个已在运行的不同地震预警系统。在地震出版社得到 Springer 公司授权后,我们本着尽可能忠于原文的原则进行翻译。由于地震预警是近年来发展起来的,相对传统地震学是个新概念,其相关的一些词语还没有形成标准的说法,这在一定程度上增加了翻译的难度,虽然做了艰苦的努力,但由于水平有限,所译

仍恐有不妥或错误之处，敬请读者指正。

前言，第 1、2、3 和第 4 章由梁建宏译；第 5 章由徐志国译；第 6、第 7 章由韩雪君译；第 8、9、10、17 章由孙丽译；第 11、12、13 章由邹立晔译；第 14、15、16 章由李敏译。全书由梁建宏汇总，赵仲和审校。

最后感谢中国地震局监测预报司有关领导的支持，感谢中国地震台网中心和台网部的帮助，感谢地震出版社领导、编辑的支持与帮助，特别感谢郑斯华、陈会忠、杨大克和黄静对本书专业术语提出的宝贵意见和建议。原书主编之一保罗·盖斯帕里尼教授专门为该书的中译本写了前言，我们再次深表谢意。

译者于 2012 年 1 月

中文版前言

地震预警 (EEW) 方法具有减轻地震灾害的潜力，在中国尤其如此。中国的城市化在快速推进，随之而来的是，由于不断增长的人口和对生命线系统增加的压力，很多城市地区变得更加脆弱。这其中包括具有较高地震危险的重要文化中心地区。尽管预防性的行动（例如改进建筑结构和颁布合适的建筑规范）是综合地震减灾战略的要素，但这是不够的，并且也不是任何地区都适用。

地震预警提供数十秒时间的警报，一些专家认为这对于采取有效避震行动太短了。然而，来自世界上为发布地震预警而立法是唯一国家日本的经验表明，通过诸如及时停止快速奔跑的列车、对在家的人们和在学校的孩子发出警报以使他们迅速移动到安全地点这样的方式，警报确实有效减少了地震危险。

写完本书后，在共同倡议下，开展地震预警工作的主要一些欧洲工作组正在进行首次联合行动。第六框架计划 (the 6th Framework Programme, FP6) 之下的欧洲委员会一年以前已发出号召，使得欧洲地震预警 (SAFER, Seismic Early Warning for Europe) 计划得到资助 (从 2006 年开始)。在 2009 年 SAFER 计划的总结中有很多创新性成就，其中一些概述于本书中。这其中包括发展了由低成本传感器组成的自组织无线系统，称为自组织地震预警信息网络 (Self-Organizing Seismic Early Warning Information Network, SOSEWIN)。在 2008 年 7 月，在土耳其伊斯坦布尔安装了 SOSEWIN 的一个原型。SOSEWIN 发展的最终目标是在大城市和特大城市建立分散式 (“以人为本”) 地震预警系统。

另一个创新包括在意大利南部坎帕尼亚 Irpinia 断层周围安装的区域地震预警台网中，可以实时地处理和分析初至 P 波和 S 波信号，以提供用于早期告警的观测量（例如地震波到时、峰值地面位移、优势周期）。另外，发展了一个用于区域地震预警（即刻的、概率的和不断演化的预警系统）的模块化软件平台，整合了用于实时 P 震相检测和拾取、地震定位、震级估计、峰值地面运动预测和警报发布的算法，最终发展成一个高度可配置和轻便的软件包。

使用另一个不同的方式，发展和测试了虚拟地震学家（Virtual Seismologist, VS）方法，使其作为一种贝叶斯方法应用于区域台网的地震预警。虚拟地震学家方法使用观测的地面震动、先验信息及合适的地面运动预测方程估计震级、位置和峰值地面运动分布。虚拟地震学家方法和在伯克利加利福尼亚大学实现的 ElarmS 算法以及在加州理工学院实现的现地算法一起形成了加州综合地震台网（California Integrated Seismic Network, CISEN）的震动警报系统，这是有望为加州提供全州范围地震预警的原型系统。

“震动图”（源于地震台网所提供信息的地面震动峰值图）和“警报图”（基于破坏性 S 波到达前的初至 P 波到达所预测的地面震动峰值图）是地震预警和快速响应链条上的重要组成部分，它们可以在地震开始后的数秒到数分钟内激活减灾行动。SAFER 计划开始前，欧洲没有由地震数据实时产出“警报图”和“震动图”的能力。与欧盟计划（EU-project）欧洲地震学基础研究网络（Network of Research Infrastructures for European Seismology, NERIES）密切合作，SAFER 在伊斯坦布尔、布加勒斯特、那不

勒斯和开罗的测试中实现了这个技术，有助于改善这些主要大都市地区的地震预警能力。

地震预警系统需要以误报代价最小的方式进行设计，对于每个应用与地点都需要科学的设计。例如，在不同的国家停止列车的经济后果是不同的，这和关闭燃气管道产生的经济后果无疑也是不同的。在有地震预警的背景下，当决定采取行动时，大众对误报的接受程度是考虑的首要因素。本书中介绍了这些概念。对于基于成本效益分析的 EEW 的应用，实现了完全概率性的框架。发展的规程应用到一个与意大利坎帕尼亚地区的预警台网相连接的原型地震预警终端。SAFER 的结果和世界其他地区最近的发展，总结在三种国际期刊^[1,2,3]的特刊中。

EEW 通过了 2011 年 3 月 11 日日本 9.0 级大地震这一激动人心的测试。全面地看，尽管发生了灾难性损失，但对于 EEW 系统怎样设法减少人类灾害这一点，报告却是积极的。例如，日本的高速列车网没有遭受主要灾害，20 多列高速运行的列车在检测到初始 P 波后的数秒钟内停下来了^[4]。

在欧洲，欧洲委员会现正支持用于实时减轻地震危险的战略和工具 (Strategies and tools for Real Time Earthquake Risk Reduction, REAKT) 计划，这项计划开始于 2011 年，将执行 3 年。实时减轻地震危险的战略和工具是在 SAFER 进行的工作基础上建设，致力于建立将地震预警与来自地震预报和实时脆弱性评估的其他类型信息有效结合起来的最优方法。事实上，实时减轻地震危险的战略和工具联盟包括很多原来的、建立在早期成功合作的基础上的 SAFER 伙伴。

我们真诚地希望本书对我们的中国同行在对未来基于预警概

念发展和实现减灾方法的努力方面提供有用的贡献，我们希望他们都取得成功。

保罗·盖斯帕里尼

盖伊塔诺·曼弗雷迪

约亨·斯高

参考文献

- [1] Allen R.M., Gapparini P., Kamigaichi O. (Eds). (2009) New methods and applications of Earthquake Early Warning. Geophysical Research Letters, 36.
- [2] Special session on Earthquake Early Warning. Seismological Research Letters, 80: 5
- [3] Iervolino I., Zollo A. (Eds) 2011 Prospects and applications of EEW for real time earthquake engineering, risk management and loss mitigation. Soil Dynamics and earthquake Engineering, 31: 2
- [4] T.Lay, H.Kanamori, 2011 Insights from the great 2011 Japan earthquake, Physics Today, December 2011

前 言

在过去的几十年，全球自然灾害造成的经济损失以指数方式增长，然而我们看到的降低死亡率的进展却很少。地震灾害也是这样的情况，这归因于在危险性较高和容易遭受灾害的地区不断增长的人口和工业密度。尽管地震预测还不实用，但是目前的技术可以迅速鉴别任何危险地震事件的开始。因此面对重大自然灾害事件的不利影响，早期预警和快速灾害信息系统正成为强化预防和社会恢复的重要手段，也将会成为减轻灾害的关键。具有多种含义的“早期预警”这个词目前广泛用于科学、经济和社会领域。即使在学术界，尽管将早期预警定义为在灾难性事件的前导时间内所能采取的一切行动这一共识在逐渐增加，但人们对这个词的使用还是略微不同。前导时间定义为合理地肯定给定地点要发生一个灾害性事件的时刻和它真正发生的时刻之间的时间。典型地，地震的前导时间是数秒到数十秒，海啸的前导时间为数分钟到数小时，滑坡、洪水和火山喷发的前导时间为数小时到数天。

更一般地说，早期预警就是通过认可的机构提供及时有效的信息，以使暴露于危险地区的人们采取行动，避免或减少他们的危险并作出有效的反应。

尽管对于非地震灾害，前导时间的定义可能是含糊不清的（“合理地肯定”这个词可能需要更精确的概率性定义），但对于地震，这个定义是明确的。当震源释放了第一个波，前导时间就开始了。地震预警的物理基础的确很简单：强地面震动是剪切波和其后的大约以初至波一半的速度传播的面波引起的，其速度要比以无线或电缆传播的

电磁信号慢很多。因此，取决于强震震中到遭受危险的城市地区的不同距离，在强地面震动来临之前，信息的传输和对较快的初至波的实时分析可以提供数秒到数十秒的预警时间。这可以用于将城市地区的财产和生命损失减少到最低限度，并有助于紧急响应。当有一个适当的地震台网时，快速的处理方法能用于定位地震和确定震级，并且估计地震震动分布（区域方法）。在装备地震传感器的场点和结构体处，使用最初到达的小振幅信号（P波）推断即将来临的大振幅剪切波和面波引起的震动，则可能实现特定场点的预警。

应用地震预警系统（EEWS）可以实时减轻地震危险，通过装备自动安全功能减少设施暴露，增加特定的关键工程系统（例如核电站、生命线或者交通设施）的安全。地震预警系统能用于触发有序关闭生命线和燃气管道以避免火灾，或关闭工厂运行以减少潜在的装备损失和工业事故。如果人们获得警报，个人的安全状况也可以得到改善。另外，如果可以得到早期地震警报，并且对应该采取的恰当行动进行了演练，那么现代社会的功能便不太可能变得混乱。最后但并非最不重要的是，如果预警系统能够在几分钟内提供强地面震动图，应急响应团队可以被派遣到最被需要的地方。

再有，地震预警系统在减少由地震触发的次生事件引起的灾害和损失方面有很大的价值。这些次生事件包括滑坡、海啸、火灾和工业事故。1906年旧金山（San Francisco）地震之后的火灾对城市的破坏与2004年12月印度尼西亚海啸是两个典型的例子，但是对于大多数大地震，次生灾害增加了经济损失和人员伤亡。

尽管有以上的考虑，但是目前地震预警方法的潜力还没有完全地利用。这不仅在发展中国家是事实，而且在高度工业化国家包括欧洲

国家也是事实。

大多数现有的地震学处理方法还没有发展或优化,以实现预警需要的实时或准实时应用。发展实时分析、建模和仿真方法,与数据处理、可视化和快速信息系统的适当设备集成在一起,将这些方法应用于预警和灾害管理相结合,是当今地震学面临的主要挑战之一。

所有这些论题都是在 2004 年 9 月 23 日至 25 日在意大利那不勒斯(Naples)举行的专题讨论会上提出并讨论的,焦点是“欧洲城市的地震预警:致力于相互协作增加基础知识”。研讨会是在 EC FP 6 SSA 计划“自然危险评估(NaRAs)”框架下组织的。来自 8 个欧洲国家(法国、德国、希腊、冰岛、意大利、葡萄牙、瑞士、土耳其)、美国、日本和台湾地区的与会研究人员一致同意一项提交给欧洲委员会的建议,建议强调了地震预警完全应用于社会需求仍然没有解决的基础问题,并请求将来继续召集与地震预警方法有关的研讨会。

本书主要基于在这次研讨会上提交的文章。考虑到收集所有这些文章需要花费较长时间,这些文章已经得到更新。这些文章最终完成是在 2006 年末。

Hiroo Kanamori 的简短评述指出了地震预警自动地应用于实时减灾的主要问题。

地震预警的一个基本问题是发展实时算法,用于快速确定地震震源参数和估计它们的可靠性。所包括的问题有实时事件检测和定位、实时断层成像以及基于强震数据、现代地震台阵技术和能量震级的概念快速测定震级/地震矩的新方法。能量震级的概念对于估计巨大地震的大小极其有用。科学的和技术的挑战是在 P 波到达后仅几秒时间内获取这种信息。经典的地震处理工具仍需要较长一段地震图,因此

不适用于此目的。

一组五篇文章论述上述问题。特别地，Stefan Nielsen 的文章从理论上讨论了能否从破裂起始阶段激发的地震波得到关于地震大小的可靠信息。Richard Allen 的文章讨论了基于对初始 P 波处理预测不同场点地面运动的 ElarmS 系统。Aldo Zollo 和 Maria Lancieri 使用地震数据库模拟在意大利坎帕尼亚（Campania）Apennines 实现的地震预警系统实时确定震级。他们认定测定的参数与矩震级稳健相关。Maren Bose 等人介绍了他们发展并应用于伊斯坦布尔（Istanbul）的 PreSEIS（震前震动）方法。此方法基于人工神经网络，和现地型预警方法一样快，这是因为此方法结合了来自大约 100km 孔径的小地震子网内几个传感器的信息，从最初几秒的地震记录中估计震源参数。Satriano 等提出了基于等时差公式和概率方法进行实时定位的逐渐演化法。

除了发展适当的实时算法，至关重要的发展一个策略，用于不仅给灾害管理部门，而且给公民保护、政治、媒体、科学和公众等各个感兴趣的方面传递所获得的地震信息。然而，此任务中涉及的预警时间可能达到数分钟、数十分钟或者更长。虚拟地震学家的构想对于紧急计划者具有特别重要性，虚拟地震学家用先前存在的信息估计并可能减少震源参数确定中的不确定性，特别是从震源参数信息推断出对灾害管理的具体决策支持，如 Georgia Cua 和 Thomas Heaton 论文中讨论的那样。

逐渐演化法和虚拟地震学家概念对于在地震之后数秒和数分钟之内提供连续更新的实时警报图和预测震动图以及几分钟内提供实测的地面震动是非常有用的。如 Vincenzo Convertito 等人讨论的那样，

发展适当的衰减算法对于在这些图件中还考虑场点校正是关键。对于多个情景，灾难性地震发生前预期的地面运动图对于设计结构体减震措施以及对于一旦地震发生之后快速进行图件校正是有用信息。在 Jean Virieux 等人的文章中讨论了地面响应的三维模拟以及优化概率方法所需的关键参数。

地震预警系统是相当一部分建筑物结构有缺陷的城市地区的有效工具。在震源区清晰已知且足够远的情况下，人们可以通过电台、电视等接收警报，可停止关键设施和进程的运行。在只有几秒的很短预警时间的情况下，使火车慢下来、将交通信号灯变为红灯、关掉燃气和油管的阀门、使核电站紧急停堆等仍然是可能的。预警系统也能够用于给需要快速响应的人们发出警报。一个典型的例子是发送所谓的水警，也就是给那些生活在大坝下游的人们发出警报。预警系统对于一些设施和进程，例如核电站、高速列车、煤气总管和高速公路是有用的，对于这些设施和进程，快速响应可以帮助减少地震危险。

除了这些直接的用途，预警系统的进一步发展可能包括实现与基础设施的半主动接口，它可以将预警信息用于实时减灾。例如，日本的建筑公司正在发展具有半主动控制系统的建筑物。建筑物可以在几秒钟内改变它们的机械性质，以更好地承受地面运动。正如 Grasso 和 Iervolino 等人在文章中讨论的那样，实现这种“几秒工程”需要谨慎评估误报或谎报以及漏报的概率，Iervolino 等人的第二篇文章就减少地震危险的基于性能的地震工程讨论了几个实时的工程应用。

本书的最后一部分描述了四个已在运行的不同地震预警系统。

世界上第一个运行的地震预警系统是 UrEDAS（紧急地震探测和警报系统），它是为保护日本各段快速铁路系统而建设的。地震预警

源于 J.F. Cooper 在 1868 年的想法，在 Nakamura 和 Saita 的文章中介绍了地震预警系统的历史、UrEDAS 的发展及其表现。Nakamura 和 Saita 还介绍了用于现地型预警的便携式设备。

Wu 的文章中描述的台湾地区实现的预警系统是区域系统，能在地震发生后 22s 发布警报，对于距离震中 100km 以上的地区可以有 10s 以上的前导时间，应用新的处理方法预计可以将处理时间减少到大约 10s，“盲区”减少到大约 25km。

罗马尼亚实现的地震预警系统主要用来保护布加勒斯特 (Bucharest) 和一些工业结构免受源自 Vrancea 地区中等深度地震的破坏。一些地震活动特性 (例如固定的震中、稳定的辐射花样) 以及震中地区和首都之间的视距连接允许设计一个简单的、稳健的系统，目前正在测试用来保护核电站，正如 Marmureanu 等人的文章中介绍的那样。

Weber 等人的文章描述了第四个地震预警系统，它是在意大利南部坎帕尼亚区 Apennines 实现的，沿着曾是 20 世纪很多强烈地壳地震 (最近的一次发生在 1980 年) 发源地的断层系布设。它是一个当地的网络，向那不勒斯市广播预警信号，是和坎帕尼亚地方当局的公民保护系统一起开发的。

本书中描述的地震预警系统并没有包括所有存在并运行的系统。为了完整，至少两个预警系统在 Iunio Iervolino、Gaetano Manfredi 和 Edoardo Cosenza 的工程应用评述文章中予以介绍，这两个系统是用于保护墨西哥城 (Mexico City) 的区域系统和为保护立陶宛 Ignalina 的核电站设计的当地系统。

墨西哥城的地震警报系统 (SAS) 是一个用于大地震的 EEWS，

这些大地震很有可能在墨西哥城引起灾害，其震源在距墨西哥城约 320km 的太平洋沿岸消减带。预警时间在 58~74s 间变化。从台站接收到的信息被自动处理以确定震级，并用于决定是否发布一个公共警报。用于用户的电台警报系统通过商业电台和声音警报装置传播地震早期声音警报给墨西哥城的居民、公共学校、政府紧急响应机构、关键的公共事业、公共运输机构和一些工厂。在交通高峰时间，警报系统可以覆盖大约 440 万人口。

用于立陶宛 Ignalina 核电站的地震警报系统设计用来检测潜在的破坏性地震并在剪切波到达反应堆之前提供警报。在距离核电站 30km 的地方安装了 6 个 SAS 台站，形成一个台阵，就像是拦截地震的“栅栏”。发生在栅栏之外的地震，在反应堆“感觉”到之前约 4s 被检测到。插入控制棒需要的时间是 2s。可能的是，在地震到达之前反应堆可以停下来。目前，SAS 只能发出警报信号。

在 Kanamori 的评述中简要讨论了地震预警信息实际应用的几个最近的实例。

我们希望本书的内容能令人信服地说明，实现一个有效的地震预警系统在科学上和技术上是可行的。然而，为了真正有效，任何预警系统必须包括三部分：

- 科学—技术部分，它提供关于即将到来的极端事件的信息；
- 决策部分，它发布警报；
- 响应部分，它保证对警报有充分的响应。

目前，预警链条上主要问题的发生是这些不同部分之间交互作用不充分的结果，地震预警尤其如此。即使当预警必需的技术手段，例如地震仪器、计算机化的系统和通讯都已到位，它们服务于灾害管理

和决策者需要的能力还只不过是刚刚得到初步开发。

我们和科学界的大多数人有一个共同的感受，就是“最终用户”，例如公民保护组织、工厂和公共管理者，由于他们预见到激活地震预警链条上的第二和第三部分的复杂性，故对科学界发出的挑战反应非常谨慎。事实上，为了有效增强恢复力，向生活在“受保护”地区的公众和官员提供正确的信息和教育是必需的。

再者，科学家、管理者和公众密切的交互作用是充分利用科技的发展，从而让人们以可接受的危险程度继续生活在易受自然灾害地区的途径。

保罗·盖斯帕里尼

盖伊塔诺·曼弗雷迪

约亨·斯高