



中国建筑工业出版社
技术著作出版基金项目

工业建筑抗震关键技术

徐建 曾滨 黄世敏 罗开海◎著

中国建筑工业出版社

工业建筑抗震关键技术

徐 建 曾 滨 黄世敏 罗开海 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

工业建筑抗震关键技术/徐建等著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2018.12

ISBN 978-7-112-22753-2

I. ①工… II. ①徐… III. ①建筑结构-防震设计
IV. ①TU352.104

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 222573 号

本书根据 2017 年度国家科学技术进步奖“工业建筑抗震关键技术研究”的科研成果编写而成。项目组经过二十多年技术攻关, 在工业建筑抗震的基础理论、设计方法、性能评价、性能提升等方面进行了系统的科学研究和工程实践, 解决了工业建筑抗震中的关键技术难题, 取得一系列突破性的创新成果, 提升了我国在该领域抗震设计的水平。

本书可作为工业建筑抗震设计的工具书和参考教材, 也可供该领域的研究人员、大专院校的师生参考使用。

责任编辑: 刘瑞霞 刘婷婷

责任校对: 姜小莲

工业建筑抗震关键技术

徐建 曾滨 黄世敏 罗开海 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京科地亚盟排版公司制版

天津翔远印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 20 $\frac{1}{4}$ 字数: 491 千字

2019 年 1 月第一版 2019 年 1 月第一次印刷

定价: 68.00 元

ISBN 978-7-112-22753-2

(32860)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

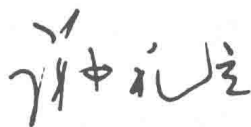
序

工业建筑由于生产工艺的要求，具有厂房空间高大，结构无论平面或立面布局千变万化，更有各类管网穿插其中，互相耦合，互相影响，加上服役环境恶劣，荷载作用从静到动乃至高频冲击无所不包，致使工业建筑的抗震技术变得尤为复杂。历次震害表明，工业建筑破坏较为严重，不仅造成人员伤亡、设备损坏，导致震后停工停产；有的还伴有严重次生灾害，导致巨大经济损失。更有甚者，工业建筑中往往含有大量的隐蔽式构件，一旦遭受地震破坏很难发现，成为工程安全的隐患。随着现代工业的发展，特别是大量高新技术的涌现，工业建筑的类型和功能发生很大的变化，对其抗震技术提出了更新更严苛的要求。

虽然我国已有国家标准《建筑抗震设计规范》做指导，也有一些设计手册和专业书可供参考，但是在许多情况下仍不能满足工程技术的要求。众所周知，国家标准或相应的规范都只是体现国家对业主或设计部门提出的最低要求，现代设计理论都要求设计工程人员在国家标准的指导下，发扬自主创新的精神，设计或建造出更安全更优秀的工程结构和工程体系；其次，凡是列入国家标准的技术和措施必须经过工程反复实践证明是有效的，因此一般来讲国家标准规定的技术相对来说总要滞后实际的科学技术水平；再加上国家标准更需要有经实践证明有效的先进的技术来不断的修订和补充。凡此等等，都说明在工程界，特别是极其复杂的工业建筑抗震界迫切需要有一套能与时俱进地向这个领域的设计施工人员介绍和提供先进的设计理论和处理不断冒出的新鲜科学技术问题的研究成果。

为了解决工业建筑抗震中的关键技术难题，由本书作者领导的《工业建筑抗震关键技术》项目组经过二十年的技术攻关，在工业建筑的抗震理论、抗震设计方法、抗震性能评价、抗震性能提升等方面，取得了一系列重要的创新成果，并将此收集在《工业建筑抗震关键技术》专著中予以出版，必将有效地推进我国工业建筑抗震学科的发展，促进我国工程设计人员自主创新设计和为推动相应的国家标准的修订奠定了基础。

《工业建筑抗震关键技术》作者长期其从事工程结构抗震研究和应用工作，是多部国家标准的主编或主要起草人，在工业建筑抗震领域有丰富的实践经验和丰硕的成果。该书在工业建筑抗震设计方面具有较强的学术性和实用性，相信一定会受到广大工程技术人员的欢迎。



中国工程院院士

中国地震局工程力学研究所名誉所长

2018年10月

前 言

工业是国民经济发展的支柱，工业建筑是安全生产的重要保障。我国历次地震震害表明，工业建筑由于结构形式复杂，荷载环境多变，地震破坏严重，人员伤亡和经济损失巨大，汶川地震东方汽轮机厂直接损失达 70 亿元，生产中断造成的间接损失更大。

为了解决工业建筑抗震的关键技术难题，在科技部、住房城乡建设部等国家部委支持下，中冶建筑研究总院有限公司、中国机械工业集团有限公司、中国建筑科学研究院、宝钢工程技术集团有限公司、中国建筑西北设计研究院有限公司、中国联合工程公司等单位联合组成项目组，历时近 20 年，先后承担并完成了多项国家及部委重大科研项目，通过对国内外工业建筑历次震害的调查分析，针对工业建筑抗震的关键技术问题进行联合攻关，对工业建筑抗震理论、设计方法、性能评价及提升等技术进行了深入研究，取得一系列创新成果：

1. 首次提出了工业建筑抗震性能目标和性能水准的确定方法，建立了工业建筑面向防地震倒塌需求的冗余度设计理论和层次化抗震体系，提出了基于非结构因素的抗震性能目标评价体系，建立了基于动态多目标的性能化抗震理论，填补了工业建筑抗震技术空白。

2. 攻克了生产工艺限制的抗震不利结构、质量和刚度分布不均匀结构及钢结构性能化抗震设计等关键技术难题，首次提出了工业建筑冗余度、性能化抗震设计方法，建立了基于工业建筑功能特征的系统抗震设计技术，解决了多种类工业建筑的复杂抗震设计难题。

3. 首次建立了既有工业建筑抗震性能的多层次评价技术体系，提出了基于劣化程度和不同后续使用年限的性能评价方法；创新了工业建筑全生命周期抗震加固及恢复的关键技术，解决了既有工业建筑抗震性能提升的技术难题。

该项目成果已被《建筑抗震设计规范》《建筑抗震鉴定标准》《构筑物抗震设计规范》《构筑物抗震鉴定标准》《钢结构设计标准》等国家及行业标准所采用。成果已应用于宝钢湛江钢铁基地、中国二重镇江核电容器工程、东方电气汶川地震后异地重建工程、中国一汽工业建筑抗震性能提升工程等，显著提升了我国工业建筑抗震技术水平。

研究成果经住房城乡建设部科技发展促进中心组织鉴定，认为成果总体达到国际先进水平，其中工业建筑抗震性能目标及冗余度评价方法、钢结构工业建筑性能化抗震设计技术、全生命周期抗震鉴定与加固技术达到国际先进水平。研究成果获 2017 年度国家科技进步二等奖。

本书是对研究成果的系列总结，主要内容包括：工业建筑抗震技术概述、工业建筑场地抗震性能评价与基础设计、工业建筑抗震冗余设计理论、地震作用与结构抗震验算、钢筋混凝土工业建筑抗震空间作用分析技术、钢结构工业建筑抗震优化设计技术、工业构筑物抗震设计技术、工业建筑抗震性能评价技术、工业建筑抗震性能提升技术等。

参加本书编写工作的有：徐建、曾滨、黄世敏、罗开海、李永录、吴耀华、常好诵、幸坤涛、曹雪生、黄伟、许庆、王晓亮、李忠煜、齐娟、母剑平、姚志华。

参加本项目研究工作的还有：岳清瑞、陈炯、徐敏杰、刘大海、李惠、张帆、胡明祎、程绍革、李晓东、路志浩等。

本项目科研及本书编写过程中，得到周福霖院士、谢礼立院士、江欢成院士、张爱林教授、郁银泉设计大师、王立军设计大师、顾青史教高、张友亮教高，以及住房城乡建设部标准定额司、中国工程建设标准化协会、中国勘察设计协会、中国土木工程学会、中国机械工业联合会、中国钢结构协会、中国国际工程咨询协会、中国冶金建设协会等大力支持。编写过程中，还参考了一些专家的著作、论文和科研成果，在此一并致谢！

本书不当之处，请提出宝贵意见。

徐 建 曾 滨 黄世敏 罗开海
2018年8月

目 录

序	
前言	
第 1 章 工业建筑抗震技术概述	1
1.1 工业建筑的特点及分类	1
1.2 工业建筑震害特征分析	2
1.3 工业建筑抗震技术发展历程	3
1.4 工业建筑抗震研究现状	5
1.4.1 我国建筑抗震技术发展历程简介	5
1.4.2 工业建筑抗震技术的现状及面临的问题	5
1.5 工业建筑抗震关键技术要点	7
1.5.1 动态多目标抗震设防理论	8
1.5.2 防地震倒塌的层次化抗震设计方法	9
1.5.3 抗震冗余度评价方法	10
1.5.4 基于等能量原理的钢结构优化设计	11
1.5.5 结构与设备耦联的抗震设计	13
1.5.6 在役工业建筑抗震性能评价关键技术	14
1.5.7 在役工业建筑抗震性能提升技术	15
第 2 章 工业建筑场地抗震性能评价与基础设计	17
2.1 场地地基的典型震害	17
2.1.1 地表断裂	17
2.1.2 山体崩塌	18
2.1.3 边坡滑移	19
2.1.4 地面下陷	20
2.1.5 土壤液化	20
2.2 场地的抗震设计	21
2.2.1 场址选择	21
2.2.2 场地地震效应	26
2.2.3 局部地形的影响	29
2.3 地基基础的抗震设计	31
2.3.1 一般要求	31
2.3.2 抗震验算范围	32
2.3.3 验算的原则和方法	32
2.4 液化土和软土地基	34

2.4.1	基于人工神经网络的液化势估计	34
2.4.2	液化危害评价与处理原则	47
2.4.3	软弱土的液化与震陷	52
2.5	桩基础的抗震设计	53
2.5.1	单桩抗震承载力	54
2.5.2	非液化土中桩基的抗震验算	54
2.5.3	液化土中桩基的抗震验算	55
2.5.4	坡岸场地桩基的抗震验算	55
第3章	工业建筑抗震冗余设计理论	57
3.1	动态多目标抗震设计理论	57
3.1.1	建筑抗震设防思想的概念及其演化进程	57
3.1.2	动态多目标抗震设计的基本流程与主要内容	59
3.1.3	工业建筑动态多目标设计的实用方法	65
3.2	层次化抗震设计理论	71
3.2.1	“9·11事件”及建筑结构冗余度理论的兴起	71
3.2.2	建筑抗震冗余度的基本概念及冗余设计的必要性	72
3.2.3	工业建筑抗震冗余设计方法	73
3.3	冗余度抗震评价方法	81
3.3.1	冗余度评价指标的研究现状	81
3.3.2	基于能力谱法的冗余度评价方法	84
3.3.3	典型单跨多层厂房抗震冗余设计方案研究	87
第4章	地震作用与结构抗震验算	94
4.1	地震作用计算	94
4.1.1	基本原则	94
4.1.2	计算模型	95
4.1.3	重力荷载及设计反应谱	97
4.1.4	计算方法	99
4.1.5	地震作用调整	106
4.2	截面抗震验算	111
4.2.1	抗震承载力计算的原则	111
4.2.2	截面抗震承载力验算表达式	111
4.3	抗震变形验算	114
4.3.1	多遇地震的弹性变形验算	114
4.3.2	罕遇地震下的弹塑性变形验算	115
4.3.3	弹塑性变形验算的简化方法	118
4.3.4	弹塑性变形验算的静力方法	120
第5章	钢筋混凝土工业建筑抗震空间作用分析技术	128
5.1	振动空间分析基本理论	128
5.1.1	力学模型	128

5.1.2	计算简图	128
5.1.3	振动方程	128
5.1.4	质点地震作用	129
5.1.5	节点侧移	129
5.1.6	地震作用	130
5.1.7	节点广义位移	130
5.1.8	截面地震内力	130
5.2	单层工业厂房空间作用分析	131
5.2.1	震害分析	131
5.2.2	屋盖水平刚度	132
5.2.3	空间作用分析	133
5.3	多层工业厂房空间作用分析	139
5.3.1	半刚性楼盖空间结构平移-扭转振动分析	139
5.3.2	多层厂房差异平移-扭转耦联振动的地震反应分析	142
5.4	框排架厂房空间作用分析	144
5.4.1	震害分析	144
5.4.2	楼盖变形对框架地震内力的影响	145
5.4.3	双向偏心的半刚性楼盖的抗震空间分析	147
5.5	大柱网厂房空间作用分析	148
5.5.1	震害分析	148
5.5.2	水平地震作用下的厂房正向分析	149
5.5.3	水平地震作用下的厂房斜向分析	150
5.5.4	柱的 $P-\Delta$ 效应	153
5.5.5	抗震强度验算	155
5.6	钢筋混凝土工业建筑构造措施	155
5.6.1	框架梁抗震构造要求	155
5.6.2	框架柱抗震构造要求	157
5.6.3	框架节点抗震构造要求	159
5.6.4	楼板、屋盖构造要求	159
5.6.5	预应力框架其他构造要求	159
5.6.6	填充墙构造要求	159
5.6.7	其他非结构构件构造要求	160
第6章	钢结构工业建筑抗震优化设计技术	161
6.1	钢结构工业建筑体系	161
6.1.1	常用钢结构的优缺点	161
6.1.2	钢框桁架结构形式和构造	163
6.1.3	地震作用下的受力特征	166
6.1.4	适用范围和屋盖布置形式	166
6.2	抗震设计思路与分析方法	166

6.2.1	抗震设计思路	166
6.2.2	抗震设计分析方法	168
6.3	基于板件宽厚比等级的抗震设计	171
6.3.1	板件宽厚比等级划分及其对应的性能	171
6.3.2	板件宽厚比等级对应的地震作用	174
6.4	支撑的抗震设计	176
6.4.1	中心支撑	176
6.4.2	柱间支撑	181
6.5	节点的抗震设计	187
6.5.1	框架节点域	187
6.5.2	梁端塑铰区截面优化	191
第7章	工业构筑物抗震设计技术	197
7.1	工业构筑物抗震特征	197
7.1.1	设防分类和设防标准	197
7.1.2	地震影响	198
7.1.3	场地和地基基础	199
7.1.4	结构体系和设计要求	200
7.1.5	结构分析	201
7.1.6	非结构构件	201
7.2	工业构筑物抗震分析	201
7.2.1	场地、地基和基础	201
7.2.2	地震作用和结构抗震验算	203
7.3	钢筋混凝土框排架结构的抗震设计	211
7.3.1	侧向框架与排架结构	211
7.3.2	底部框架与顶部排架结构	212
7.4	构筑物基础的抗震设计	213
7.4.1	石油化工塔式设备基础	213
7.4.2	焦炉基础	213
7.4.3	常压立式圆筒型储罐基础	215
7.4.4	卧式设备基础	215
7.5	井架、塔架、筒仓、双曲线冷却塔的抗震设计	215
7.5.1	井架	215
7.5.2	塔架	217
7.5.3	筒仓	218
7.5.4	双曲线冷却塔	220
7.6	高炉系统结构与运输机通廊的抗震设计	222
7.6.1	高炉系统结构	222
7.6.2	运输机通廊	224
7.7	管道支架与索道支架的抗震设计	225

7.7.1 管道支架	225
7.7.2 索道支架	227
7.8 尾矿坝与挡土墙的抗震设计	227
7.8.1 尾矿坝	227
7.8.2 挡土墙	228
第8章 工业建筑抗震性能评价技术	231
8.1 既有工业建筑合理后续使用年限的确定	231
8.2 不同后续使用年限的地震作用计算	231
8.3 工业建筑综合抗震能力评定技术	234
8.3.1 综合抗震能力计算	234
8.3.2 屈服强度系数 ξ_y 与结构破坏程度试验研究	235
8.4 工业建筑抗震鉴定技术	239
8.4.1 工业建筑抗震鉴定基本要求与方法	239
8.4.2 地震灾后建筑鉴定的基本要求与原则	246
8.4.3 单层钢筋混凝土厂房抗震鉴定及应用	250
8.4.4 单层砖柱厂房抗震鉴定及应用	266
第9章 工业建筑抗震性能提升技术	273
9.1 抗震加固设计基本要求	273
9.1.1 加固设计原则	273
9.1.2 加固方案选择	274
9.1.3 抗震加固计算要求	275
9.2 工业建筑震损建筑恢复加固基本原则	276
9.2.1 工业建筑震后修复加固的基本原则	276
9.2.2 震后工业建筑抗震加固有关要求	276
9.3 工业建筑抗震加固技术	277
9.3.1 单层钢筋混凝土厂房抗震加固及应用	277
9.3.2 单层砖柱厂房抗震加固及应用	288
9.4 工业建筑抗震消能减振技术及其应用	294
9.4.1 液体黏滞消能减振技术	295
9.4.2 防屈曲支撑消能减振技术	299
9.4.3 质量可调 TMD 减震技术	306
参考文献	311

第 1 章 工业建筑抗震技术概述

1.1 工业建筑的特点及分类

工业建筑是指供人民从事各类生产活动的建筑物和构筑物，18 世纪后期首先出现于英国，随着工业生产的发展和工业革命的兴起，逐渐向欧洲大陆、美国、亚洲等地区蔓延。我国在 20 世纪 50 年代开始，随着国民经济的恢复和工业生产的发展，开始大量建造各种类型的工业建筑。从 20 世纪 80 年代开始，随着改革开放和经济建设的不断深入发展，工业建筑的发展亦进入了空前的繁荣期。工业建筑涉及的行业众多，是我国国民经济的支柱产业之一，对于国家的经济发展和社会的繁荣稳定具有十分重要的意义。

工业建筑是工业生产活动的场所，其高度、层数、跨度、结构类型等属性基本上由生产工艺要求决定，因此，工业建筑的类型众多，从不同的角度大致可以有以下分类方法：

1. 按层数分类

工业建筑可以分为：（1）单层厂房，这类厂房的层数只有一层，但高度可能会很大，多用于冶金、重型及中型机械工业；（2）多层厂房，这类厂房的层数一般在二层或二层以上，层高一般不会很大，多用于食品、电子、精密仪器、加工工业等轻工业生产厂房；（3）单多层混合厂房，这类厂房一般是由单层生产区域和多层生产区域混合组成，多用于化工、热电站的主厂房等生产工艺复杂的行业。

2. 按用途分类

工业建筑可以分为：（1）生产厂房，主要用作产品的备料、加工、装配等，为主要生产车间；（2）生产辅助厂房，系为生产厂房服务的厂房，如：修理车间、工具车间等；（3）动力厂房，为全厂提供能源的厂房，如发电站、变电所、锅炉房等；（4）仓储建筑，原材料、半成品、成品存储的房屋；（5）其他建筑，如水泵房、污水处理、水塔、烟囱、厂区内栈桥、筒仓等建（构）筑物。

3. 按跨度的数量和方向分类

工业建筑可以分为：（1）单跨厂房，即横向只有一个跨的厂房；（2）多跨厂房，横向跨度不少于 2 个，车间内彼此相通；（3）纵横相交厂房，由两方向的多跨组合而成，车间内彼此相通。

4. 按生产状况分类

工业建筑可以分为：（1）冷加工车间，常温状态下加工非燃烧物质和材料的生产车间，如机械、修理等；（2）热加工车间，如铸造、锻压、热处理车间等；（3）恒温恒湿车间，如精密仪器、纺织车间等；（4）洁净车间，如药品、集成电路车间等；（5）特种状况

车间，如放射性车间、防电磁波干扰车间等。

5. 按结构材料分类

工业建筑又可以分为砖混结构厂房、钢筋混凝土结构厂房、钢结构厂房及组合结构厂房等。

1.2 工业建筑震害特征分析

由于生产工艺的特殊性要求，工业建筑普遍具有结构形式多样、设备建筑耦联、荷载作用复杂、使用环境恶劣的显著特点，使得工业建筑的抗震防灾面临巨大挑战。与民用建筑相比，工业建筑的抗震性能要差得多，历次震害也表明，工业建筑的破坏更为严重。根据汶川地震建筑震害情况的统计分析，工业建筑和学校建筑的震害最为严重，按调查组评估的 110 栋工业建筑样本统计，其中，可以使用、加固后使用、停止使用、立即拆除的数量和比率分别为 19 (17%)、51 (46%)、5 (5%)、35 (32%)，震害程度明显高于普通民用建筑 (图 1.2.1)。

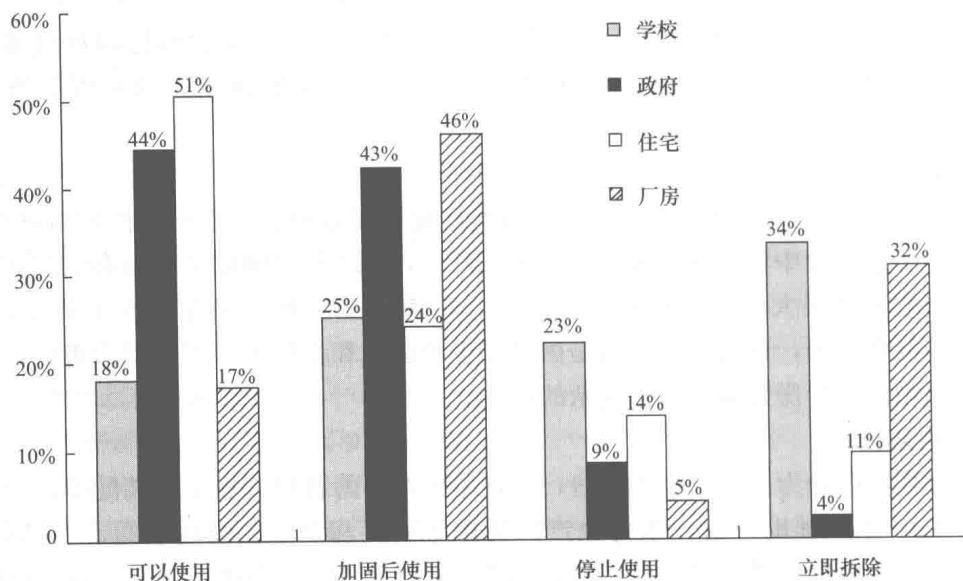


图 1.2.1 汶川地震不同使用功能的建筑震害情况对比

自 1966 年邢台地震以来，经过几代科研和工程技术人员共同努力，我国的建筑抗震技术不断得到发展和完善，现已形成基本完备的抗震防灾技术标准体系。随着民用建筑抗震技术的发展，我国工业建筑的抗震技术水平也有了一定程度的提高。近期的强烈地震，尤其是 2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级大地震中，工业建筑发生了严重的破坏，进一步凸显了工业建筑的特殊性和抗震防灾任务的艰巨性。

1. 场地选址的特殊性

由于生产规模和工艺流程的限制，工业建筑的选址一般难以避开地震断裂带、滑坡区、液化区等不利地段甚至危险地段。我国工业企业、特别是冶金企业 80% 以上位于地震

区，全国 20 多个重点骨干钢铁企业 100% 位于地震区，有的还位于可能发生中强以上地震的重点监视区。

2. 设计使用年限的特殊性

由于使用功能差异显著，工业建筑的设计使用年限难以完全统一，不能简单地按常规取为 50 年。很多工业建筑，属于工业设备或工艺流程线的附属配套设施，其使用寿命往往取决于设备或工艺寿命，当设备或工艺的使用寿命远低于或远高于 50 年时，配套建筑设施的使用年限仍然按常规的 50 年采用，显然是不合适的。

3. 工业建筑使用环境的特殊性

大多数工业建筑长期遭受高温、高湿、粉尘、腐蚀、疲劳、振动和地震、风、雪等各种不利作用组合，作用效应评估的难度巨大。

4. 工业建筑结构类型的特殊性

工业建筑从本质上讲，属于工业生产流水线的配套附属设施，其结构的类型和形式要服从和服务于生产工艺，所以工业建筑的结构类型多样，而且抗震不利的特种结构较多，如锅炉支架的悬吊结构，高支腿筒仓的倒摆式结构，多层厂房的框排架结构等。

5. 工业建筑形体与布局的特殊性

因生产工艺的需要，工业建筑的外形特征、平面和立面布局均与常规的民用建筑存在巨大差别，普遍存在不规则的楼面开洞、错层、超长、超宽、层高巨大等情况，建筑结构分层、分段情况复杂，地震作用响应复杂，结构抗震计算分析难度大。

6. 工业建筑性能提升的特殊性

工业建筑由于工业生产的连续性要求，性能提升多为在役施工，其抗震性能提升要求考虑快速、高效。另一方面，随着现代工业革命的发展、生产工艺的换代升级以及工业生产的地域转移等，出现了一批工业遗产建筑，需要进行民用化改造，这其中的建筑功能的变更、不同历史时期不同结构材料的共同工作机理等因素，进一步加大了性能提升和改造升级的难度。

由于上述的种种特殊性，导致了工业建筑在场地选址、建筑形体与布局、结构形式与类型、荷载作用、使用环境等多方面存在抗震不利因素，根据近几十年的震害经验，工业建筑的基本震害特征可总结为“小震易损，大震易倒”。

1.3 工业建筑抗震技术发展历程

随着我国工业的发展，工业建筑的材料和结构形式也发生了较大的变化。工业建筑的抗震性能与其他类型建筑相比有其特殊性，如结构跨度大、空间高度高、结构自重大、存在机械设备的振动荷载等，工业建筑的抗震设计方法也经历了不断完善的过程。

我国较早的厂房抗震设计是参照苏联地震区建筑设计规范，对厂房作近似的计算和采取一些构造措施。

20 世纪 60 年代，我国邢台、河间、阳江、通海、东川地震，为单层厂房的抗震设计提供了依据，特别是积累了单层砖柱厂房的震害经验。在此基础上，1974 年正式颁布了我国第一部《工业与民用建筑抗震设计规范（试行）》TJ 11—74。

20世纪70年代,我国相继发生海城地震和唐山地震,大量建筑物遭到破坏,一些20世纪50年代建造的钢筋混凝土柱厂房损坏,使人们更加认识到单层厂房抗震问题的重要性。根据海城地震和唐山地震的震害经验和科研成果,修订颁布了《工业与民用建筑抗震设计规范》TJ 11—78。在单层厂房抗震设计方面,该规范对提高厂房抗震薄弱部位的抗震能力作了明确的规定。

20世纪80年代,我国从事工程抗震的科技工作者围绕单层厂房的抗震,开展了一系列理论和科学试验的专题研究,如单层厂房的横向和纵向空间分析、突出屋面天窗架的水平地震作用、不等高厂房中柱地震作用效应的高振型影响、屋架与柱顶连接节点及柱头的抗震性能、单层厂房整体和钢筋混凝土柱的抗震性能、柱间支撑的抗震性能、不等高厂房支承低跨屋盖柱牛腿的抗震性能等,这些成果为《建筑抗震设计规范》GBJ 11—89(简称“89规范”)单层厂房抗震设计部分的修订奠定了基础。

20世纪90年代以来,我国在工程抗震的科学研究和工程实践中取得了较大的进展,国内发生的澜沧、武定、丽江、伽师、包头、台湾地震,以及国外发生的美国旧金山和洛杉矶地震、日本阪神地震,造成了大量建筑物和工程设施的破坏,取得了新的震害经验。2001年,《建筑抗震设计规范》GB 50011—2001颁布实施。规范在单层厂房抗震设计方面比“89规范”主要有下列改进:(1)结构布置上增加了厂房过渡跨、平台、上起重机扶梯布置和结构形式的要求;(2)补充了屋架和排架结构选型的要求;(3)完善了钢筋混凝土柱厂房的抗震分析方法,修改了大柱网厂房双向水平地震作用时的组合方法;(4)补充了屋盖支撑布置的规定;(5)补充了排架柱箍筋设置要求和大柱网厂房轴压比控制的要求;(6)增加了砖柱厂房纵向简化计算方法;(7)补充了钢结构厂房结构体系的规定;(8)提出了钢结构厂房按平面结构简化计算的条件;(9)修改了钢构件长细比和宽厚比的规定;(10)增补了钢柱脚的抗震设计方法。

2010年,我国现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011—2010颁布实施,该标准在工业建筑方面根据材料和结构形式的变化,作了较大的改进,主要改进内容有:

(1) 单层钢筋混凝土柱厂房:补充了高低跨厂房的结构布置和对抽柱厂房的要求;改进了屋面梁的屋盖支撑布置要求;增加了柱顶受侧向约束部位的构造要求;调整了厂房可不验算抗震承载力的范围,并增加了设置柱间支撑柱脚的抗震承载力验算要求。

(2) 单层砖柱厂房:限制了砖柱厂房在9度区的使用,增补了新型砖砌体材料(页岩砖、混凝土砖)、改善了厂房结构布置的规定,修改了防震缝设置的要求;明确8度时木屋盖不允许设置天窗。

(3) 单层钢结构厂房:增加了压型钢板围护的单层钢结构厂房的内容。进一步细化了结构布置的要求;补充了防震缝宽度的规定;明确了屋盖横梁的屋盖支撑布置和纵横向水平支撑布置;调整了柱和柱间支撑的长细比限值、提出了根据框架承载力的高低按性能目标确定梁柱板件宽厚比的方法;增加了阻尼比取值和构件连接的承载力验算要求,修改了柱间支撑的抗震验算要求。

(4) 多层钢结构厂房:对厂房结构布置、楼盖布置、支撑布置及其长细比限值、支撑承载力计算、框架板件宽厚比、阻尼比取值等方面作出规定。

(5) 新增钢筋混凝土竖向框排架厂房的抗震设计要求,根据设计经验和厂房的结构特征,提出了结构布置、抗震验算和构造措施的要求。

1.4 工业建筑抗震研究现状

1.4.1 我国建筑抗震技术发展历程简介

纵观新中国成立后我国抗震防灾技术的发展历程，可以看出，我国现代建筑抗震理论和技术是起源于工业建筑，发展、成熟于民用建筑的。

在 1953 年开始的第一个“五年计划”期间，我国的 156 项重点工程是按苏联的抗震设防标准和规范设计的，一般工业建筑是不考虑抗震设防的，当然不会有我国自己的抗震技术标准。以后，在 1959 年和 1964 年，我国曾两次编制过包括多种建设工程的《地震区建筑抗震设计规范（草案）》，但未正式颁发，只起指导和参考作用。

1966 年邢台地震、1967 年河间地震后，随着人们对震害认识的提高和地震经验的积累，1969 年 3 月原国家建委抗震办公室组织中国科学研究院工程力学研究所和北京市建筑设计院编制了《京津地区工业与民用建筑抗震设计暂行规定（草案）》，在京津地区试行，在此基础上 1974 年正式颁发了面向全国的《工业与民用建筑抗震设计规范（试行）》。

1976 年唐山地震造成了近代世界地震史上少有的灾难，也全面推动了抗震防灾技术的发展，形势的发展要求我国的许多抗震技术标准进一步修订或制订，使抗震技术标准提高到了一个新的水平。随着人们对地震震害经验的不断积累和结构地震反应机理的不断深入研究，先后制修订了《建筑抗震设计规范》、《建筑抗震鉴定标准》等以抗震防灾为主要内容的一系列标准，基本形成了相对完善、特点鲜明的抗震防灾技术标准体系。

1.4.2 工业建筑抗震技术的现状及面临的问题

1. 工业建筑抗震技术的发展进程滞后于民用建筑

在我国建筑抗震防灾工作的早期阶段，即 20 世纪 80 年代以前，在“地震工作要为保卫大城市和大工业发挥作用”的指示下，工业建筑抗震始终引领着我国建筑抗震技术的发展。当时，工业建筑抗震研究，无论是在人才队伍配备、财政经济投入还是在物资供应上，都要明显超过民用建筑，当然，其研究成果也要领先一步。在 20 世纪 80 年代，工业建筑领域就基于震害调查与分析、理论研究和实际测试分析，提出了结构振动三维空间分析技术，这比民用建筑领域要领先 10 年以上。

唐山地震后，我国抗震防灾工作在全国范围内开展，对象也不再仅仅局限于大城市和大工业，而是逐步扩大到 6 度及以上地区的所有工业与民用建筑，民用建筑抗震技术迎来了快速发展期。另一方面，随着改革开放的不断深入，国民经济得到快速发展，民用建筑的发展日新月异，新世纪以来，高层、超高层、大跨度、空间异形等民用建筑不断涌现，这又进一步推动了民用建筑抗震理论和技术的飞速发展。目前，已形成性能化设防理论与设计方法、鲁棒性和冗余度理论、防连续倒塌分析与控制对策、基于倒塌风险的抗震设计方法、减隔震理论与技术、建筑抗震韧性的评价技术和控制对策等新理论和新技术。

2. 现有的抗震技术难以满足工业发展的需求

我国建筑抗震规范自“89 规范”以来，一直采用“三水准两阶段”的抗震防灾对策，

工业建筑也是如此。这一对策的目的，是为了防止建筑在预期的大震下倒塌破坏，保证其中的人员生命安全，然而，随着社会不断发展，人们对房屋建筑的要求不仅仅局限在保障生命安全的需求上，进而提出了多层次的建筑性能要求。

对于工业建筑来说，由于现代工业生产的分工特点决定了其在整个工业生产线中的地位越发突出，仍然采用人员安全的设防目标已经难以完全满足工业生产的需要。近十几年来大震震害显示，按现行抗震规范设计和建造的建筑物，在地震中没有倒塌、保障了生命安全，但是其破坏却造成了严重的直接和间接的经济损失，甚至影响到了社会的发展，而且这种破坏和损失往往超出了设计者、建造者和业主原先的估计。1989年美国加州地震，震级为7.1级，其能量释放仅为1906年旧金山地震（8.3级）的1/63，伤亡人数3000（其中死亡65人），然而造成的直接经济损失（建筑物破坏重建）80亿美元，间接经济损失超过150亿美元；1994年1月17日Northridge地震，震级仅为6.7级，死亡57人，而由于建筑物损坏造成1.5万人无家可归，经济损失达170亿美元，这是一个震级不大，伤亡人数不多，但经济损失却非常大的地震；1995年日本阪神（Kobe）地震，震级7.2级，直接经济损失高达1000亿美元，死亡5438人，震后的重建工作花费了两年多时间，耗资近1000亿美元；1999年9月21日中国台湾集集地震，震级7.3级，电力系统的破坏直接导致众多电脑芯片生产厂家停产，间接经济损失极其惨重。

3. 工业建筑抗震的一些基本理论面临工程实践的挑战，需要进一步发展创新

（1）按三水准设防的“小震不坏”原则，要求所有结构在统一的小震作用时基本保持弹性，采用的设计对策是按小震下结构弹性分析所得的地震作用效应基本组合值进行截面强度验算，但验算过程中并未充分考虑结构或构件延性性能差异的响应，这对于中低延性的结构或构件是合适的，对于延性性能较好的结构和构件可能并不经济。比如，对于围护轻型化的现代工业建筑钢结构来说，按照现行抗震规范进行设计，往往会出现构造偏严、用钢量偏大，但整体建筑的抗震安全度并未显著提高，甚至存在抗震安全度不足的情况。

（2）目前，国内外关于构件抗震设计的基本原则，仍然是20世纪70年代新西兰人Park教授提出的以“强柱弱梁”为标志的“四强四弱”原则，尽管历次规范修订时，相关参数的取值会有所变化，但本质上仍是基于强度准则的构件设计。事实上，近几十年大地震表明，即使完全实现了上述的“强柱弱梁”设计，也很难避免柱铰破坏模式的发生，因为实际地震中节点的屈服机制并不直接决定于梁柱的相对强度，而是与梁柱端部的变形能力息息相关。因此，应全面审视和探讨现行的构件设计准则。

4. 工业建筑抗震技术支撑团队残缺不全，理论与工程应用脱节

在2000年以前，国内从事工程抗震研究的科研团队主要有三个部分，即主要从事基本理论研究的高等院校、主要从事应用技术研究的科研院所和主要从事工程实践的勘察设计单位。目前，国内从事工程抗震研究的多集中于一些高等院校，且进行基础理论研究的人员已经很少了，相关的研究成果过于理想化，工程应用尚有距离。而各勘察、设计单位又忙于工程，无暇顾及实践经验的总结与研究，这样，来自于实践经验的工程技术也基本裹足不前。另一方面，自科研院所“改企”之后，从事工程抗震应用技术研究的机构和人员也逐渐减少，这样，作为理论研究成果和工程实践应用之间联系桥梁的应用技术也就逐渐缺失了，进而造成理论与工程应用脱节。