

第七届结构工程新进展国际论坛文集

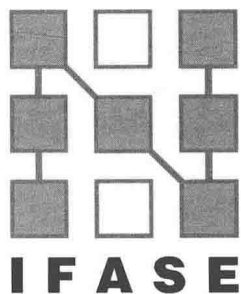
Proceedings of the 7th International Forum on Advances in
Structural Engineering (2016)

工业建筑与特种结构新进展

Advances in industrial and special construction

苏三庆 史庆轩 主编

Editors in Chief: Su Sanqing & Shi Qingxuan



第七届结构工程新进展国际论坛文集

Proceedings of the 7th International Forum on Advances in
Structural Engineering (2016)

工业建筑与特种结构新进展

Advances in industrial and special construction

苏三庆 史庆轩 主编

Editors in Chief: Su Sanqing & Shi Qingxuan

中国建筑工业出版社

China Architecture & Building Press

图书在版编目 (CIP) 数据

工业建筑与特种结构新进展/苏三庆, 史庆轩主编.
北京: 中国建筑工业出版社, 2016. 8

(第七届结构工程新进展国际论坛文集)

ISBN 978-7-112-19601-2

I. ①工… II. ①苏…②史… III. ①工业建筑-结构设计-文集 IV. ①TU27-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 157563 号

本书汇集 9 位学者专家最新研究成果的专辑。为第七届结构工程新进展国际论坛特约报告文集。本届论坛主题: 工业建筑与特种结构。9 位特邀报告主题涵盖了: 工业建筑结构诊治技术, 结构振动控制与标准体系, 门式刚架轻型房屋钢结构, 以矩法为基础的荷载抗力系数设计方法, FAST 索网结构疲劳分析, 风电结构, 电力土建特种建(构)筑物结构设计, 光热发电站结构设计, 工业建筑混凝土结构与钢结构耐久性研究进展。

责任编辑: 赵梦梅 刘婷婷

责任校对: 陈晶晶 刘 钰

第七届结构工程新进展国际论坛文集

工业建筑与特种结构新进展

苏三庆 史庆轩 主编

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 11 字数: 263 千字

2016 年 7 月第一版 2016 年 7 月第一次印刷

定价: 38.00 元

ISBN 978-7-112-19601-2
(29112)

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)

鸣 谢

本届论坛得到以下企业和社团的资助

杭萧钢构股份有限公司

中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司

浙江东南网架股份有限公司

中国建筑科学研究院 PKPM 设计软件事业部

中国电机工程学会电力土建专业委员会

前 言 Preface

伴随着中国经济的再次腾飞以及“十三五”规划的逐步实施，中国的建筑行业在持续的增长和发展。这一增长和发展刺激着中国的城镇化建设和各项事业的发展。同时，这一增长和发展对与结构工程相关的技术、学科建设、人才培养等都提出了更新、更高的要求。与此同时，伴随着“大众创业、万众创新”理念的提出，对提高结构工程创新能力提供了历史性的机遇。正是基于这种时代背景，在住房和城乡建设部的支持下，由中国建筑工业出版社、同济大学《建筑钢结构进展》编辑部、香港理工大学《结构工程进展》(Advances in Structural Engineering)编委会联合主办，西安建筑科技大学承办的第七届“结构工程新进展国际论坛(The 7th International Forum on Advances in Structural Engineering)”在西安举行。

本次论坛的主题是“工业建筑与特种结构”。工业建筑与特种结构的技术发展一定程度上代表了建筑结构的发展水平。工业建筑与特种结构在设计方法、施工工艺、抗灾性能等多方面与普通建筑结构有较大区别。工业建筑与特种结构一直是国际学术界和工程界关注的热点、研究的前沿。在本次论坛中我们荣幸的邀请了16位特邀报告人，他们的报告主题涵盖了近年来与工业建筑与特种结构相关的最新研究成果、设计方法、施工技术、规范规程以及相应新型材料及构件的应用；阐述了在这些领域内的最新发展信息；同时也向与会者提供了一个与专家互动并获取宝贵经验的机会。

感谢特邀报告人，他们不仅在大会上做了精彩的主题报告，而且还奉献了精心准备的论文，使得本书顺利出版。

感谢论坛自由投稿作者以及参加本次论坛的所有代表，正是大家的积极参与配合，才使得本次论坛能够顺利进行。

感谢住建部执业资格注册中心、中国建筑工业出版社、同济大学《建筑钢结构进展》编辑部、香港理工大学《结构工程进展》编辑部对本次论坛的指导、支持和帮助。

感谢杭萧钢构股份有限公司、中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司、浙江东南网架股份有限公司、中国建筑科学研究院PKPM设计软件事业部、中国电机工程学会电力土建专业委员会、国家自然科学基金项目(51478382、51408478、51478383)对本次论坛成功举办的资助和支持。

目 录 Contents

工业建筑结构诊治技术/岳清瑞 李 荣 常好诵	1
结构振动控制与标准体系/徐 建 曹雪生.....	14
门式刚架轻型房屋钢结构技术现状和研究进展/郁银泉 王 喆 蔡益燕.....	32
LOAD AND RESISTANCE FACTOR DESIGN USING METHODS OF MOMENT/Y. G. Zhao and Z. H. Lu	38
FAST 索网结构疲劳分析/	
朱忠义 刘 飞 王 哲 张 琳 刘传佳 齐五辉 徐 斌	68
风电结构亚健康状态研究及工程技术进展/马人乐 黄冬平.....	83
电力土建特种建(构)筑物结构设计关键技术/陈 峥 侯建国 王振宇 董建尧 ...	114
世界单塔容量最大的光热发电站结构设计关键技术/	
李红星 何邵华 杜吉克 吕少锋 易自砚 李强波 李国强 陈素文 孙飞飞 叶永健.....	139
工业建筑混凝土结构与钢结构耐久性研究进展/牛荻涛 徐善华	150
第七届结构工程新进展国际论坛简介.....	160
第七届论坛特邀报告论文作者简介.....	164

工业建筑结构诊治技术

岳清瑞, 李 荣, 常好诵

(中冶建筑研究总院有限公司, 北京 100088)

摘 要: 我国既有工业建筑量大面广, 形式多样, 建造于不同年代, 使用环境和作用复杂。工业建筑结构诊治技术是工业建筑在服役期内具有足够的安全性及适用性的重要保障。本文回顾并总结了我国工业建筑结构诊治技术领域的主要研究成果和标准规范体系, 同时分析了该领域尚需解决的问题和发展方向。

关键词: 工业建筑; 诊治; 可靠性; 耐久性; 疲劳

中图分类号: TU312

DIAGNOSIS AND REHABILITATION OF INDUSTRIAL BUILDINGS

Q. R. Yue, R. Li, H. S. Chang

(Central Research Institute of Building and Construction MCC, Beijing 100088, China)

Abstract: The industrial buildings in china have a large quantity and a wide range. Built in different ages, they generally take various forms and complex working conditions. The technology of diagnosis and rehabilitation of industrial buildings is significant to ensure the safety and serviceability of in-service industrial buildings. This paper reviews and summarizes the major achievements of research and application on diagnosis and rehabilitation of industrial buildings in China. The paper then discusses the problems to be solved and the future directions in this field.

Keywords: Industrial building; Diagnosis and rehabilitation; Reliability; Durability; Fatigue

1. 前言

工业建筑是保障工业生产的重要基础设施, 广泛分布于冶金、机械、煤炭、电力、石

第一作者: 岳清瑞 (1962—), 男, 教授级高工, 主要从事工业建筑结构诊治技术方面的研究和应用, E-mail: yueqr@vip.163.com.

通讯作者: 李 荣 (1971—), 女, 教授级高工, 主要从事工业建筑结构诊治技术方面的研究和应用, E-mail: li-rong88@tsinghua.org.cn.

化、纺织、核电等各个行业。工业建筑包括单层及多层工业厂房、种类繁多的构筑物（烟囱、水塔、冷却塔、料仓、通廊、转运站、栈桥、工业平台、设备基础等），以及管道、支架等附属设施。据统计，截至 2015 年底，我国工业建筑面积已经超过 70 亿 m^2 ，占我国既有建筑物总面积的 15% 左右，进入二十一世纪后发展迅速，如图 1 所示。

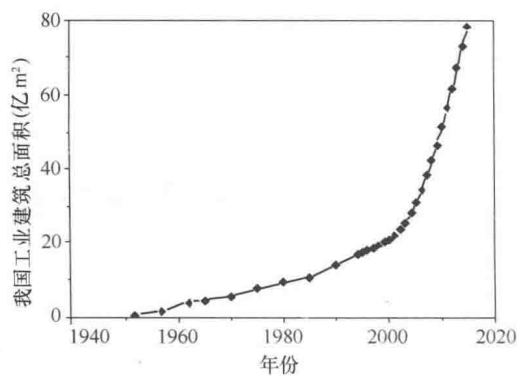


图 1 我国工业建筑规模的发展趋势

Fig. 1 Development tendency of area of industrial buildings in China

1.1 工业建筑的作用与环境

工业建筑与民用建筑相比具有不同的特点，在作用上，工业建筑具有重载、反

复动载、振动、局部超大荷载及复杂检修荷载等，在使用环境方面，常遇高温、高湿、腐蚀介质等。例如一些重工业厂房承受重载作用，如炼钢、机械铸造车间天车吊重高达 400t 以上；有些厂房长期受到各类生产设备的振动作用影响；酸洗车间、化工厂房等长期处于各类腐蚀介质的强腐蚀环境；有些厂房还会产生大量的余热、烟尘和废水，或有防爆、防尘、防菌、防辐射等要求。此外，工业建筑还必须设置与生产工艺配套的各种设施，受设备、工艺、检修等荷载作用，荷载工况多。工业建筑在复杂的环境因素和使用条件长期作用下，而且一般处于连续生产状态，致使结构构件易遭受累积损伤产生性能退化，由此带来工业建筑结构的强度失效、疲劳破坏和耐久性破坏等问题。

1.2 我国工业建筑的发展历程

我国工业建筑的建设与使用经历了多个历史时期，执行不同的规范标准，结构可靠度水平差异较大，呈现出的工作状态及结构安全问题也有明显的时代特征。新中国成立初期，基本建设从体制、设计标准、施工等各方面都全面学习苏联；“大跃进”及“文革”期间，由于历史原因，工业建筑在设计和施工技术上产生偏差，违背客观规律，工业建筑结构形式混乱，造成了很多隐患；改革开放后，国民经济快速发展，工业产量大幅提高，特别是在 20 世纪 80 年代，由于当时我国工业基础设施严重落后且无资金进行大规模的改扩建，各工业行业对现有设施的挖潜和改造成为发展生产、提高产能的首要选择，为随后的长期安全使用带来了隐患。2000 年后，工业建筑规模快速发展，大量采用新技术、新工艺，随之也带来新的结构安全等问题，同时随着社会经济发展和城镇化建设的推进，将会出现相当数量的工业建筑转型和升级，安全与耐久问题将会更加突出，面临新的挑战。

1.3 工业建筑诊治的作用和特点

我国既有工业建筑量大面广，形式多样，建造于不同年代，使用环境和作用复杂。历史上发生过较多的工业建筑结构破坏乃至倒塌等恶性事故，造成了重大的经济损失和人员伤亡。因此工业建筑结构诊治一直是影响我国工业安全生产的关键因素，科学的诊治可以有效保障服役期内工业建筑的安全性和适用性，避免安全事故发生。

工业建筑结构诊治包括“诊”和“治”两个方面，“诊”即结构检测、鉴定、评估，“治”即修复、加固、改造。我国工业建筑结构诊治从以冶金为代表的重工业发展而来。与发达国家相比，我国在工业建筑的设计水准、建造水平与管理水平上都存在一定的差距，且由于我国工业建筑常常出现增容扩载及超限超载使用，因此既有工业建筑的诊治需求比国外更为突出，诊治复杂性和难度远超于发达国家，可借鉴成果少，急需系统、高效的结构诊治技术。

2. 工业建筑结构诊治关键技术研究

面对大规模的工业建筑结构诊治需求，几十年来我国在工业建筑结构诊治技术的研究与应用上取得了较快的发展，形成了系列的工业建筑结构诊治关键技术，包括结构可靠性鉴定评估技术、混凝土结构耐久性评估和修复技术、纤维增强复合材料加固技术、钢吊车梁疲劳寿命评估和加固技术、火灾后结构鉴定评估技术、工业管网生命线诊治技术、核电站安全壳结构检测及安全评估技术等。下面对其中几种典型技术，特别是以中冶建筑研究总院为核心的团队所取得的主要研究成果予以简要介绍。

2.1 工业建筑结构可靠性鉴定评估技术

结构的可靠性是其在规定的时间内，在规定的条件下，完成预定功能的能力。既有工业建筑经过一段时间使用或达到设计使用年限拟继续使用、用途或使用环境改变、改造增容或扩建、存在较为严重的质量缺陷或出现较为严重的损伤、遭受灾害或事故等，需要对其进行可靠性检测鉴定。工业建筑结构可靠性鉴定的目的是全面、准确地掌握工业建筑的性能、状况和所承受的各种作用，准确评价其可靠度水平，为工业建筑的使用、管理提供技术依据。

早期的工业建筑可靠性鉴定评估一般依靠专家的个人经验，难以进行系统的量化评定。《钢铁工业建（构）筑物可靠性鉴定规程》YBJ 219—89 和《工业厂房可靠性鉴定标准》GBJ 144—90 对工业厂房的鉴定程序、分层分级评定方法和评级标准作出了较为明确的规定。之后通过对我国数百例工业建筑破坏及倒塌事故进行了专项研究，对不同时期工业建筑结构的可靠度进行校核分析，提出了基于可靠指标的分级标准，建立了以构件、结构子系统和鉴定单元为对象的三层次可靠性评定方法，实现了结构可靠性的量化评定，修订出台《工业建筑可靠性鉴定标准》GB 50144—2008，该标准是我国首部结构鉴定领域的国家标准，成为工业建筑结构诊治统一遵循的指导性文件。表 1 列出了工业建筑可靠性鉴定评级的层次、等级划分及项目内容。对工业建筑结构进行可靠性鉴定的程序如图 2 所示。

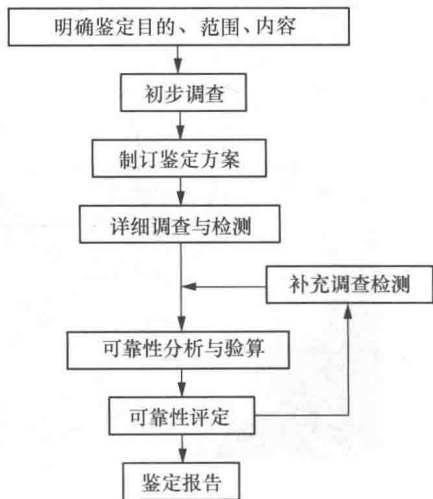


图 2 工业建筑可靠性鉴定程序
Fig. 2 Program of appraisal of reliability of industrial buildings

工业建筑可靠性鉴定评级的层次、等级划分及项目内容
The grading details of appraisal of reliability of industrial buildings

表 1
Table 1

层次	I		II		III
层名	鉴定单元		结构子系统		构件
可靠性鉴定	可靠性等级	一、二、三、四	等级	A、B、C、D	a、b、c、d
	建筑物整体或某一区段		安全性评定	地基基础	地基变形、斜坡稳定性
					承载力
					整体性
				上部承重结构	承载功能
					承载能力构造和连接
			正常使用性评定	围护结构	承载功能构造连接
					—
				等级	A、B、C
				地基基础	影响上部结构正常使用的地基变形
			上部承重结构	使用状况	变形
					裂缝
					缺陷、损伤
			围护系统	水平位移	—
				功能与状况	—

2.2 工业环境下混凝土结构耐久性评估与修复技术

由于高温、潮湿、腐蚀等不利生产环境的影响，工业建、构筑物混凝土结构耐久性问题非常突出，大量在役工业建筑混凝土结构钢筋锈蚀、混凝土劣化严重，如图 3 所示。调查发现，许多混凝土结构厂房服役不久，有的 5 到 10 年即开始出现耐久性破坏，使用寿命远小于设计使用年限。已有相当多的老旧混凝土结构厂房经过多次维修、改造和加固，有的已经拆除。相比之下，民用建筑耐久性问题容易在早期暴露，而工业建筑受使用条件

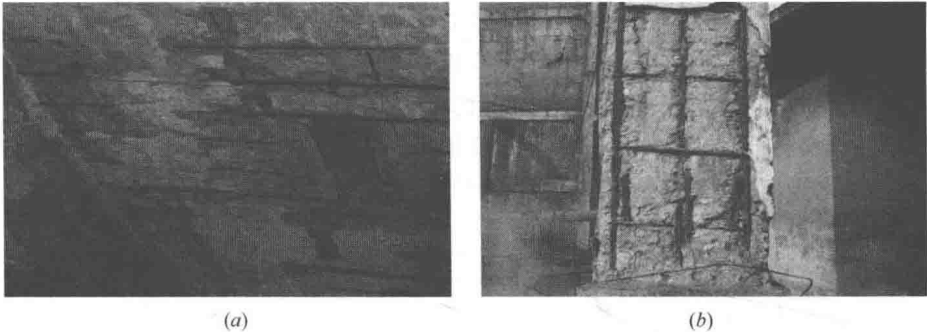


图 3 工业建筑耐久性损伤
Fig. 3 Durability failure of industrial buildings
(a) 某工业建筑楼板钢筋锈蚀；(b) 某厂房框架柱严重老化

所限,耐久性问题早期不易显露,缺陷、隐患一般存在较大的隐蔽性,一旦发现多已进入钢筋严重锈蚀阶段。与水工、桥隧结构相比,工业建筑结构构件截面相对较小,耐久性问题危害更大。因此,典型工业环境下混凝土结构耐久性更具特殊性。

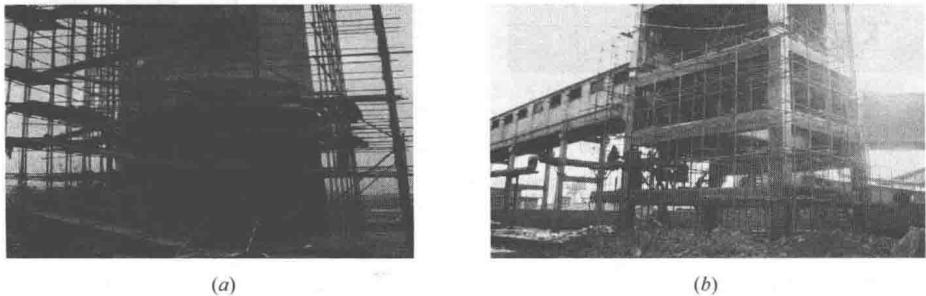
通过对冶金、机械、建材、轻工等千余项工业建筑进行了全面调研和检测,以及大量锈蚀钢筋、锈损构件的试验研究,揭示了钢筋锈蚀的破坏特征及其性能变化规律,提出了钢筋锈蚀程度判别准则及评估方法,确定了锈损钢筋的屈服强度和极限强度计算方法;明确了工业建筑混凝土结构损伤类型及影响因素,研究了钢筋锈蚀后构件的受力性能和破坏形态,建立了锈损混凝土构件承载力计算方法,从而建立了较完整的工业建筑混凝土结构耐久性评定体系,相关成果纳入《混凝土结构耐久性评定标准》CECS220:2007。

根据耐久性评定结果,选择高效的修复材料,采用合理的修复方案和严格的修复工艺,可以大大提高结构耐久性能,延长其使用寿命。耐久性修复材料主要包括钢筋阻锈防护材料、界面处理材料、混凝土劣化修补材料及表面防护材料等,形成综合配套耐久性修复技术。

2.3 纤维增强复合材料加固技术

由于工业生产连续性等特殊要求,迫切需要高效便捷的加固方法。纤维增强复合材料(简称复材或FRP)具有轻质高强、耐腐蚀、施工方便、适用面广等优点,近年来在土木工程中得到了广泛的应用。其中,外贴片材加固即是一种有代表性的新型加固技术,将纤维布或复材板通过配套树脂材料粘贴在混凝土表面承受拉力,可以有效改善构件的受力性能。

复材加固技术的研究始于瑞士联邦材料实验室,1984年即进行了碳纤维复材板加固钢筋混凝土梁的试验。1996年国家“九五”重点科技攻关课题“碳纤维材料加固修补混凝土结构试验研究开发与应用示范”立项,我国正式开始对该项新技术进行研究,迅速成为土木工程领域的研究热点。从材料性能、界面粘结性能、受弯加固、受剪加固、约束混凝土、抗震加固等方面,都涌现出了大批高水平的研究成果。1998年4月在北京完成首例工程应用,之后迅速在工业建筑、民用建筑、桥梁隧道等领域推广应用,成为普遍采用的加固方法之一。2003年《碳纤维片材加固混凝土结构技术规程》CECS146:2003正式出台,是该领域我国首部技术标准,之后又出台了国家标准《纤维增强复合材料建设工程应用技术规范》GB 50608—2010和《纤维片材加固修复结构用粘结树脂》JG/T 166—2004、《结构加固修复用碳纤维片材》GB/T 21490—2008、《结构加固修复用芳纶布》



(a)

(b)

图4 复材加固工业建筑

Fig. 4 FRP strengthening for industrial buildings

(a) 某钢铁企业烟囱加固; (b) 某钢铁企业通廊加固

GB/T 21491—2008、《结构加固修复用玻璃纤维片材》GB/T 26744—2011、《结构加固修复用玄武岩纤维复合材料》GB/T 26745—2011 等多部产品标准，建立了较为完善的复材加固技术标准体系。

除了用于混凝土结构的加固外，外贴片材加固也可以用于砌体结构、木结构和钢结构的加固。此外，继外贴片材加固技术推广应用后，复材网格加固、嵌入式复材加固法等新型加固技术也因更好的防火性能、抗冲击性能和耐久性等优点、近年来引起较多的关注，相应的试验研究、理论分析和工程应用相继展开。

2.4 钢吊车梁疲劳评估及加固技术

吊车梁是工业厂房的重要组成部分，吊车梁能否正常工作直接影响着生产的正常进行。吊车梁一旦出现问题，会造成整个生产线的停产，造成重大经济损失，并可能产生严重的次生灾害。由于吊车运行频繁、吊车梁受力复杂、存在焊接初始缺陷等，容易引起钢吊车梁的疲劳损伤。在近年来的冶金工业厂房使用情况调查与可靠性鉴定中发现，钢吊车梁存在着严重的疲劳损伤现象，特别是重级、特重级工作制的吊车梁，很多未达到设计使用年限就产生早期破坏，造成事故隐患。由于吊车梁位于高空，正常生产情况下很难检测到疲劳损伤，而疲劳破坏属于脆性破坏，具有突然性，因此，对钢吊车梁进行疲劳评估，科学预测在役吊车梁的剩余寿命是工程中的迫切需求，具有十分重要的意义。

在大量试验和现场动测基础上，建立了短时动测荷载谱与长期荷载特性之间的关系，确定了关键的时间效应系数，提出了基于实测应力幅及运行频率的疲劳寿命评估定量评估方法。圆弧过渡式及直角突变式是使用较多的两种特殊变截面吊车梁，端部疲劳问题突出，我国钢结构设计规范中尚无其疲劳强度及疲劳性能数据及公式。针对此两类钢吊车梁开展了专项研究，建立了该两类吊车梁最大主应力公式和 S—N 曲线，确定了关键技术参数，也实现了疲劳寿命的定量评估。相关成果纳入《工业建筑可靠性鉴定标准》GB 50144—2008。

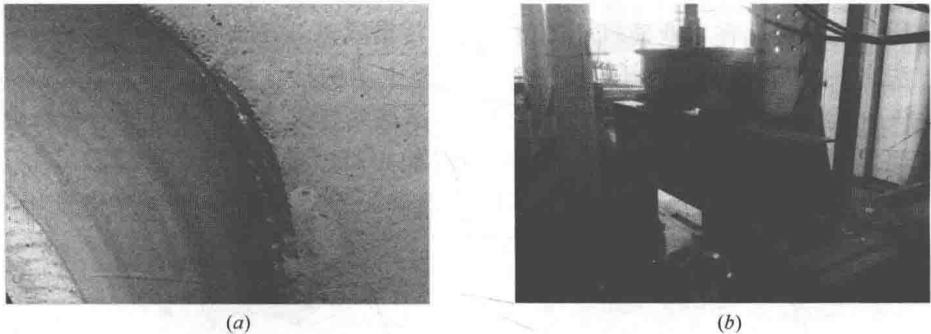


图 5 钢吊车梁疲劳试验

Fig. 5 Fatigue tests of steel crane beams

(a) 吊车梁圆弧端疲劳裂缝；(b) 吊车梁疲劳性能试验研究

传统的钢吊车梁加固方法主要有钢板焊接、螺栓连接、铆接或者粘接，这些方法存在一些缺点，如产生新的损伤、产生焊接残余应力、施工周期长等。近年来进行的一系列试验研究，包括碳纤维复材加固含裂纹钢板的疲劳试验、加固焊接小试件疲劳试验、加固工字型钢梁的疲劳试验、加固圆弧端支座钢吊车梁疲劳试验、加固直角突变式钢吊车梁的疲

劳试验等，均显示出碳纤维复材对钢结构疲劳加固具有很好的加固效果，可以有效地改善钢吊车梁的疲劳性能，延缓疲劳裂纹的扩展，提高其疲劳寿命，从而提高其安全性和耐久性。2002 年某大型钢铁企业 440 吨钢吊车梁出现疲劳损伤，采用粘贴碳纤维布对其进行疲劳加固，该项目是国际上首例使用碳纤维复材对钢吊车梁疲劳加固的工程实例。至今历经十余年的使用，加固后的钢吊车梁使用状况良好，经受了考验。

3. 标准规范

3.1 国外发展现状

从结构工程标准体系看，国际上主要分为欧洲、美国、日本、俄罗斯等体系，但都没有针对工业建筑结构诊治的专门体系，国际上最主要的指导性文件是国际标准《结构可靠性总原则》ISO 2394 和《结构设计基础—既有结构的评定》ISO 13822，对既有结构的可靠性评定进行统一规定，但没有专门针对既有工业建筑诊治的技术标准或规范。表 2 列出了国外从事工业建筑结构诊治技术相关研究的主要机构。

国外从事工业建筑诊治技术相关研究的主要机构
Foreign institutes engaged in researching diagnosis and rehabilitation of industrial buildings

表 2
Table 2

机构名称	相关研究内容	相关研究成果及应用情况
国际材料与结构试验研究联合会 (RILEM)	混凝土结构寿命计算	《混凝土结构寿命设计计算方法》，得到广泛应用
美国 Bottelle 研究院	等效结构应力，主 S-N 曲线，焊接结构疲劳强度	Verity 理论，2007 年引入 ASME 标准
德国隔而固公司 (GERB Schwingungsisolierungen GmbH & Co.)	振动控制技术研究及减隔震设备开发	弹簧、TMD、橡胶支座、隔震支座，世界范围内广泛使用
英国遗产局 (England Heritage)	工业建筑遗产	工业建构物的认定导则，在英国工业遗产保护与再利用领域广泛应用

3.2 我国工业建筑诊治相关标准规范

经过多年的努力和成果积累，目前，我国已基本建立了工业建筑结构诊治标准体系，覆盖了工业建筑结构诊治的主要技术领域，表 3 列出了其中有代表性的标准规范，包括检测标准、鉴定评估标准、加固修复标准几个方面。

我国工业建筑结构诊治相关标准
Technical standards for diagnosis and rehabilitation of industrial buildings

表 3
Table 3

标准分类	标准编号	标准名称
检测标准	GB/T 50344—2004 GB/T 50784—2013	建筑结构检测技术标准 混凝土结构现场检测技术标准

续表

标准分类	标准编号	标准名称
检测标准	JGJ/T 23—2011	回弹法检测混凝土抗压强度技术规程
	CECS 02 : 2005	超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程
	CECS 03 : 2007	钻芯法检测混凝土强度技术规程
	GB/T 11345—2013	焊缝无损检测超声检测技术、检测等级和评定
	GB 50661—2011	钢结构焊接规范
	JG/T 203—2007	钢结构超声波探伤及质量分级法
	GB/T 50315—2011	砌体结构现场检测技术标准
	NB/T 20017—2010	压水堆核电厂安全壳结构整体性试验
	NB/T 20018—2010	核电厂安全壳密封性试验
鉴定评估标准	GB 50144—2008	工业建筑可靠性鉴定标准
	GB 51056—2014	烟囱可靠性鉴定标准
	CECS252 : 2009	火灾后建筑结构鉴定标准
	CECS220 : 2007	混凝土结构耐久性评定标准
	GB 50023—2009	建筑抗震鉴定标准
	GB 50117—2014	构筑物抗震鉴定标准
	YB/T 9260—1998	冶金工业设备抗震鉴定标准
	YSJ 009—1990	机器动荷载作用下建筑物承重结构的振动计算和隔振设计规程
加固修复标准	GB 50608—2010	纤维增强复合材料建设工程应用技术规范
	GB 50367—2013	混凝土结构加固设计规范
	JGJ 116—2009	建筑抗震加固技术规程
	JGJ/T 259—2012	混凝土结构耐久性修复与防护技术规程
	CECS 146 : 2007	碳纤维片材加固混凝土技术规程
	CECS 161 : 2004	喷射混凝土加固技术规程
	CECS 269 : 2010	灾损建（构）筑物处理技术规范
	CECS 225 : 2007	建筑物移位纠倾增层改造技术规范
	YB 9257—1996	钢结构检测评定及加固技术规程

工业建筑诊治技术已广泛应用于冶金、机械、石化、有色、电力、煤炭、核电等各个工业行业的各类工业建构筑物中，保障了安全生产，避免了重大事故的发生，提升了结构性能，延长使用寿命，创造了巨大的经济效益与社会效益。

4. 需解决的问题及发展方向

4.1 存在的问题

我国既有工业建筑存量巨大，但建造年代跨度较大，结构形式和功能多样，使用环境和作用复杂，受我国以前建设管理体系条块分割的影响，各行业相对独立、封闭，缺乏统一的设计标准。工业建筑诊治有其特殊性与复杂性，工业建筑诊治基础理论与应用技术研究严重不足，虽然已经形成了基本的评定体系和专有技术，但仍十分依赖相关的设计规范和相关设计技术发展水平，从专业技术水平上还有很大提升的空间，技术范畴还有很大扩展的余地。主要体现在：

(1) 诊治技术覆盖面需要进一步扩展,逐步建立并完善根据工业建筑分类和功能、结构特性为代表的分类清晰、体系完整的诊治技术体系。

(2) 工业建筑诊治基础理论研究有待加强。新型工业建筑形式层出不穷,朝着大跨、超高、超重载、超振动、模块化、多因素耦合等方面发展,需要解决工业建筑发展中不断出现的理论问题。

(3) 需要更加智能、实时、非接触、远程传输的检测监测手段,实现高效、快速、准确的诊治,建立灾害实时预测报警系统,对重要工业建筑实现实时监测。

(4) 工业建筑诊治应用技术还需要进一步完善,如基于动态可靠度的钢结构疲劳评估、工业建筑锈蚀钢结构检测与评定等。

(5) 需要实现绿色化、工业化、一体化的加固改造技术。

4.2 解决途径

针对上述问题,建议从以下几个方面入手加以解决:

(1) 提高对工业建筑研究的关注度

工业建筑的技术进步已远远落后于民用建筑,在现有高校、研究机构中应大力推进工业建筑相关研究,在国家相关研究项目中给予工业建筑充分的重视,加大科技投入,培养科技人才。

(2) 建立沟通、共享、协同平台

工业设计中往往由工艺主导,建筑及结构设计属于辅助专业,得不到应有的重视,行业单位之间缺少协作,造成了技术进步的迟缓。应加强工业领域各研究、设计单位之间的协作攻关。

(3) 充分利用互联网、信息化技术发展,推动技术进步

建立工业建筑大数据平台,加强远程监控、智能诊断技术研究,完善诊治技术,提高诊治水平和效率。

(4) 结合重点需求,形成有针对性的技术体系

着重解决新出现的新结构形式、新体系所带来的新问题,开发结构诊治、节能改造新应用材料及技术,如绿色高效维护结构体系及节能评价技术、既有工业建筑非工业化改造再利用技术等。

4.3 主要研究方向

针对我国工业建筑结构诊治技术发展现状,建议深入开展以下几个方面的研究工作,从而建立完善的工业建筑诊治技术体系,保障工业安全生产,有效地延长既有工业建筑的使用寿命,提升其性能并高效利用。

4.3.1 典型工业环境下结构服役性能评价指标体系及体系可靠度

工业建筑承受各种复杂环境作用,例如吊车荷载、积灰荷载、楼面活荷载等作用,同时结构的性能也随着服役期的延长逐步退化,结构服役过程中的可靠度水平变化也是随着结构所受的作用及抗力性能衰退变化的,需要对工业建筑结构体系可靠度准确评价。因此,进行既有工业建筑结构可靠度评定基础理论研究,对于工业建筑结构的安全性、经济性、耐久性以及科学管理都有非常重要的现实意义。

(1) 复杂环境下工业建筑作用的概率模型

针对工业建筑承受的各种复杂环境作用,建立系统描述作用随机变化规律的概率模型,建立适用于工业建筑复杂环境作用的模型参数小样本推断方法,分别建立吊车荷载、积灰荷载、楼面活荷载等典型工业建筑荷载的概率模型,并确定相应的统计参数,全面解决工业建筑复杂环境作用的建模问题。

(2) 工业建筑结构时变可靠度

对工业建筑荷载作用和构件抗力随时间变化的机理进行研究,考虑抗力性能和荷载作用随时间变化的规律,建立基于随机过程理论的时变可靠度模型。在既有工业建筑混凝土结构和钢结构耐久性研究的基础上,提出工业建筑复杂环境下基于时变可靠度的结构构件耐久性评估方法。

(3) 工业建筑结构疲劳可靠度

建立复杂环境作用下工业建筑结构疲劳性能衰退的分析模型,发展结构及其关键构件疲劳性能衰退的仿真分析方法;揭示环境参数变化和随机性因素对结构疲劳性能指标的影响,确保在复杂环境参数下能够准确识别结构疲劳状态;获得工业建筑结构疲劳损伤累积规律,发展工业建筑疲劳状态评估和寿命可靠性预测理论与分析方法。

(4) 复杂环境下工业建筑结构体系可靠度评定

分析工业建筑结构从构件到结构体系的可靠度,研究复杂环境下基于性能的既有工业建筑体系可靠度鉴定评估方法;分析工业建筑结构不同失效模式的可靠度,研究工业建筑结构动态可靠度变化规律,构建既有工业建筑服役性能评价指标体系,提出工业建筑结构体系可靠度评定方法。

4.3.2 典型工业环境结构性能退化机理、灾害损伤机理及评估

(1) 工业建筑混凝土结构耐久性退化模型及寿命评估

从工业建筑环境特征分析入手,研究工业建筑混凝土结构耐久性环境指标体系与分类;研究混凝土在高温、高湿与强腐蚀气体工业环境多因素耦合作用下的性能退化机理与规律;根据工业环境中混凝土结构的重要性、类型及环境条件,通过专家调查,对工业环境下混凝土结构的耐久性失效状态进行界定;考虑耐久性损伤引起的结构性能退化,采用概率方法提出基于性能的工业建筑混凝土结构耐久性评估方法。

(2) 锈损钢结构性能退化机理及安全评定

研发基于图像识别的涂层老化检测技术,提出工业建筑钢结构涂层服役寿命预测方法;研发工业建筑钢结构锈蚀测试技术,提出工业建筑钢结构锈损程度评价指标和预测模型;研究典型工业环境钢材性能劣化规律;研究焊接连接节点焊缝、热影响区、母材在工业环境中的锈蚀规律,揭示工业建筑锈损焊接节点承载性能退化机理,提出典型工业环境锈损焊接节点承载性能评定方法;研究典型工业环境锈损钢结构疲劳性能和疲劳寿命评估方法。

(3) 工业建筑火灾后灾损评估技术

研究基于工业建筑特点的火灾蔓延规律,实现火灾时空趋势预测和预警控制;研究既有工业建筑耦合火灾影响的人员智能疏散和动态诱导控制技术,提高疏散效率以保障人员和设备安全;研究火灾后既有工业建筑现场检测技术,为相关鉴定标准提供可操作性强的检测手段;研究火灾后既有工业建筑典型受力构件的截面温度场分布特点和力学性能变化

规律,建立基于数值模拟的火灾后精细化评估方法。

(4) 工业建筑结构振动评估技术和标准

研究工业厂房中复杂振源识别方法及其传播特性和衰减规律;研究既有工业建筑结构与设备耦合振动下既有工业建筑有限元精细模拟方法;提出设备振动对工业建筑动力基础、设备平台、楼板等结构构件的功能性分析评估方法,从而建立设备振动对既有工业建筑结构性能影响的评估方法和标准。

4.3.3 既有工业建筑结构性能提升关键技术

(1) 典型工业环境混凝土结构耐久性修复技术

研发针对典型工业环境的混凝土结构耐久性修复技术,对工业环境混凝土结构修复后的力学性能和耐久性能进行评价。对修复区域材料强度和构件修复后承载能力等力学性能进行评估,并对工业环境混凝土结构修复后的抗渗透性能和抗侵蚀性能等修复效果进行评价。

(2) 钢吊车梁疲劳成套加固技术

根据钢吊车梁的不同分类及不同疲劳敏感区域研究相关加固技术的适用性,如焊接加固、高强螺栓加固、铆接或者粘结加固、碳纤维加固、预应力加固等,给出实用的加固方法选择原则及操作工艺。

(3) 既有工业建筑振动控制技术

对比研究既有工业建筑主动、被动减隔振措施,对隔振后既有工业建筑及设备的振动响应进行评估,并确定措施性能优化配置方案,根据振源情况和振动允许标准,合理且有效地选用各种振动环境控制处理技术。

(4) 既有工业建筑绿色高效围护结构体系

分析总结工业建筑围护系统的绿色性能特性,研究不同围护系统构造的传热机理,提出不同类型和气候区工业建筑绿色节能围护系统保温、隔热和通风的优化设计方法;提出工业建筑围护系统节能和绿色综合评价方法,围护系统绿色改造的关键技术。

4.3.4 既有工业建筑非工业化改造再利用关键技术

随着经济发展和城镇化建设的推进,城市范围不断扩大,大量工业企业搬迁退出新城市的核心区,对于既有工业建筑,不提倡“大拆大建,推倒重来”的模式,将会出现相当数量的工业建筑转型与改造,实现合理的重新再利用。特别是针对工业遗产价值突出的既有工业建筑资源,更需要找到保护和合理开发再利用的平衡点。

(1) 建立我国既有工业建筑资源全寿命周期的综合评价体系

针对老工业基地搬迁后遗留下来的既有工业建筑,建立完善的调查流程和方法,为既有工业建筑功能提升和改造利用提供科学决策的依据。对于有历史文化、艺术审美、科学技术、社会情感和经济利用价值的工业建筑,建立价值评价体系,遗产价值突出的工业建筑应纳入文物或优秀历史建筑进行保护、展示或适宜性再利用。空间利用价值突出的既有工业建筑,应根据城市和周边环境的需求,策划新的使用功能,对既有工业建筑的非工业化改造的适应性、合理性进行综合分析。

(2) 既有工业建筑非工业化改造功能转换、性能提升模式及改造技术

按照既有工业建筑的结构形式、服役年限等分类,提出既有工业建筑非工业化改造结构诊治方法和技术措施。研究既有工业建筑非工业化改造功能转换与性能提升的模式类