

工业建筑钢结构 事故分析、加固和改建

(一)

冶金工业部建筑研究总院技术情报研究室

一九八四年四月

内 容 简 介

《工业建筑钢结构的事故分析、加固和改建(一)》是一本有关苏联、东德的钢结构事故分析、加固和改建的译文集。

全书共分四个部分。第一部分为苏联钢结构的事故分析和事故实例。较全面地介绍了苏联钢结构的事故分析、典型构件的加固、评价方法及工业厂房钢结构的事例。第二部分为钢框架结构承载能力的挖潜。重点介绍了苏联对在使用条件下钢框架结构实际工作状态的研究成果及钢框架结构承载能力的挖潜措施。第三部分为钢结构的加固。介绍了苏联在工业建筑技术改造时,钢结构的有效加固方法、加固原则,重点介绍了在不停产条件下采用预应力法加固钢结构及若干结构构件加固计算实例。第四部分为钢结构的改建。介绍了苏联和东德在使用条件下钢框架结构的改建途径和方法,以及工业厂房的改建实例。

该译文集对从事建筑钢结构的研究、检验、设计、制造及改建、加固和维修的工程技术人员和有关大专院校的师生有较大的参考价值。

编辑: 冶金工业部建筑研究总院技术情报研究室
出版:

责任: 陈 智
编辑:

印刷: 冶金工业部建筑研究总院印刷厂

电话: 66.4061

地址: 北京学院路

编译者的话

现有企业的技术改造和改建是当前发展国民经济，加速四化建设的主要方针之一。也是发展冶金工业的重要途径。在现有企业中钢结构占有一定的比重。建筑钢结构由于设计、制造、施工产生的内部缺陷，加之高温、重复荷载、潮湿，侵蚀性介质的作用及生产的强化，加速了建筑物的损坏。因此，对已有厂房钢结构可靠性的分析，提高可靠性的方法及钢结构的加固和改建等问题，已是现有企业技术改造的一个重要方面。

近20年来，苏联、东德等国为适应生产的发展，对已有建筑物的维修、改造十分重视。特别是苏联，从三十年代就开始了这方面的工作，陆续发表了一些论文和专著，近年来又系统地分析、总结了钢结构在使用过程中产生事故和破坏的原因，在不停产条件下加固、改建的经验，更深入地研究了在使用条件下钢框架实际工作状态，为改进设计、施工制定更精确的计算方法，创造更完善的结构型式，为延长使用寿命制定保证结构可靠性和耐久性的措施，提供了科学依据。

为了配合现有企业的技术改造和改建，我们收集了苏联、东德等国的有关情况和经验教训。供有关领导和技术人员参考。

在本资料的译、校、编辑过程中得到我院陈世铭、俞国音及何肇弘等同志的热情帮助，在此表示谢意。

由于时间仓促，水平有限，译文中错误之处在所难免，请读者批评指正。

目 录

•事故分析与实例•

建筑金属结构的事故和加固..... (1)

工业厂房钢结构事故..... (33)

•结构承载能力挖潜•

使用条件下工业厂房钢骨架的工作状态分析..... (69)

改建工业厂房钢框架时承载能力的挖潜.....(107)

•加固•

钢结构的加固.....(111)

•改建•

钢结构的改建.....(194)

工业厂房钢框架的改建.....(197)

更换吊车时吊车梁的改建.....(226)

重型工业厂房的合理设计.....(227)

建筑金属结构的事故和加固

简 介

本综述介绍并分析了建筑金属结构的各种事故及其加固方法。

列举了最典型的事故及其产生的原因、评价和加固方法及金属结构加固维修工作的特点。对改建部门的发展提出了与国民经济发展前景相适应的最重要的课题和任务。该综述是根据近80篇参考文献，并参考中央钢结构设计科学研究院的经验而编写的。

本文向从事建筑钢结构检验、科研、设计、制造、维修、改建和加固工作的工程技术人员，介绍了钢结构方面的现状及要求现阶段进行研究和解决的最迫切的问题。

作者：工程师A. И. 科纳科夫和科学技术博士A. И. 马霍夫

序 言

对现有企业进行技术改造和改建是最近几年国民经济发展的主要方针之一。在现代生产条件下，一般经5~10年设备即遭无形损耗，而建筑结构的实际损坏约在15~70年后出现。生产的强化加速了建（构）筑物的损坏。此外，在六十年代前国家没有对固定资金的更新给以足够的重视。因此，深入研究建筑物和构筑物的可靠性的重新评价、制定和采用提高结构承载能力的有效方法，以及建筑物和构筑物的改建问题（其框架在很多情况下是由金属材料制作的）等，在现阶段就成为最重要的课题。

由于上述原因，对已有建筑结构监测工作的要求、对提高检验调查效果及金属结构可靠性评价的可信度等的要求均有所提高。为此，用现代科学技术总结积累经验、建立、编制方案最合理的建筑体系，并考虑各环节协调工作的可能性等，已成为最重要和最急迫的任务。

建筑结构在长期使用中所产生的事故表明，人们对其工作条件的估计是不足的。同实践与理论的相互依存关系一样，研究结构在使用过程中产生的事故与破坏，也可成为创造更完善的结构型式及其施工工艺的基础。正是在实践的基础上制定和完善了结构和构筑物稳定性、疲劳、冷脆性及弹塑性破坏的理论，即构筑物的可靠性理论。

建筑物和构筑物框架的建造和正常使用，可假定分为以下阶段：

I——设计、制造及安装；

II——正常使用；

III——与第一或第二极限状态不一致。

事故是各阶段缺陷、误差及其他因素综合积累的结果。因此，对于研究结构有效工作来说，揭示事故发生的规律和影响，比之把事故作为仅由于计算偏差或者综合偶然的

情况产生的损害和坍塌来分析更为重要。上述情况即作为本综述资料的基础。

本资料没有分析由于地震、风振动等特殊原因引起的事故，但研究了事故分析的若干问题，如提高金属结构使用可靠性的措施、计算方法，以及与改建部门发展有关的其它问题。

该综述参考了已有技术文献、中央钢结构设计科学研究所西伯利亚分院完成的金属结构加固专题——情报研究报告，以及该院尚未公开发表，但在实际工程设计中已有反映和广泛采用的其它金属结构加固和研究资料。

一、金属结构事故的典型形式

建筑结构的损坏或事故是件大事。事故发生后如果不进行相应的修理或恢复工作，结构就难于或者不可能继续正常使用〔1〕。Ф.Д.德米特里耶夫〔2〕、И.А.米齐姆斯基〔3〕、X.托马斯·马克、克叶卡〔4〕、Я.阿乌古斯季恩和Е.什列德泽符斯基〔5〕、М.И.萨赫诺夫斯基和А.М.季托夫〔6、7〕、Е.П.米赫诺〔8〕、М.Д.鲍伊科〔9〕和Г.А.波雷瓦伊〔10〕等，对金属结构事故及其产生原因的分类都熟悉。М.Н.拉谢恩科〔11〕进行了更深入细致的事故分类。

文献〔2、6〕中的分类没有反应金属结构事故的整体和局部特征，而文献〔2、5、6〕没有考虑由于自然灾害和不容许的疏忽所引起的事故。文献〔4〕的分类缺乏科学基础，在连接件与结构构件及结构与构筑物间的联系上，缺少对事故规律的逻辑分析。上述著作没有反映事故编号的可能性及加固分类的相互关系。文献〔12〕中介绍了在外观调查中出现事故编号问题。本综述提供的建筑金属结构事故分类（图1）在一定程度上考虑了逻辑上的连续性和渐进性，并与所建议的加固方案相呼应。

综述中的分类是按以下原则建立的：框图中每个上面成分是以下面成分为基础的。连接件的破坏会导致结构构件的事故，继之引起建筑物和构筑物的破坏。框图中各个成分反应了事故（由××原因而形成的××缺陷的存在而产生的××事故）和加固（消除事故、缺陷的影响及其产生的原因）的规律性。

金属结构的事故是由缺陷的形成和发展而产生的。建筑金属结构产生缺陷和出现事故的原因大体上是相同的，因为缺陷往往是事故的前兆。

图2介绍了建筑金属结构产生事故及出现缺陷的施工方面的系统性原因。所建议的分类考虑了结构施工阶段和使用阶段逻辑上的连续性。除了施工本身的原因外，还有由于施工引起的其它技术原因（整体或局部失稳、构件破坏）〔3〕。对后者不单独予以考虑。

结构在使用过程中经受具有各种不同特征和不同程度的重复荷载的作用。

表1示出在时间T的某一区间内荷载变化的某一循环次数及不对称系数ρ的系统资料。这些资料表明，实际上所有结构均是在使用荷载变化循环数十分分散（30至 2×10^6 以上）的各种不对称的重复静荷载作用下工作的。

使用荷载的重复—静力特征对建筑金属结构的事故有一定的影响，因此，应该分析

建筑金属结构整体和局部事故的特征形式。

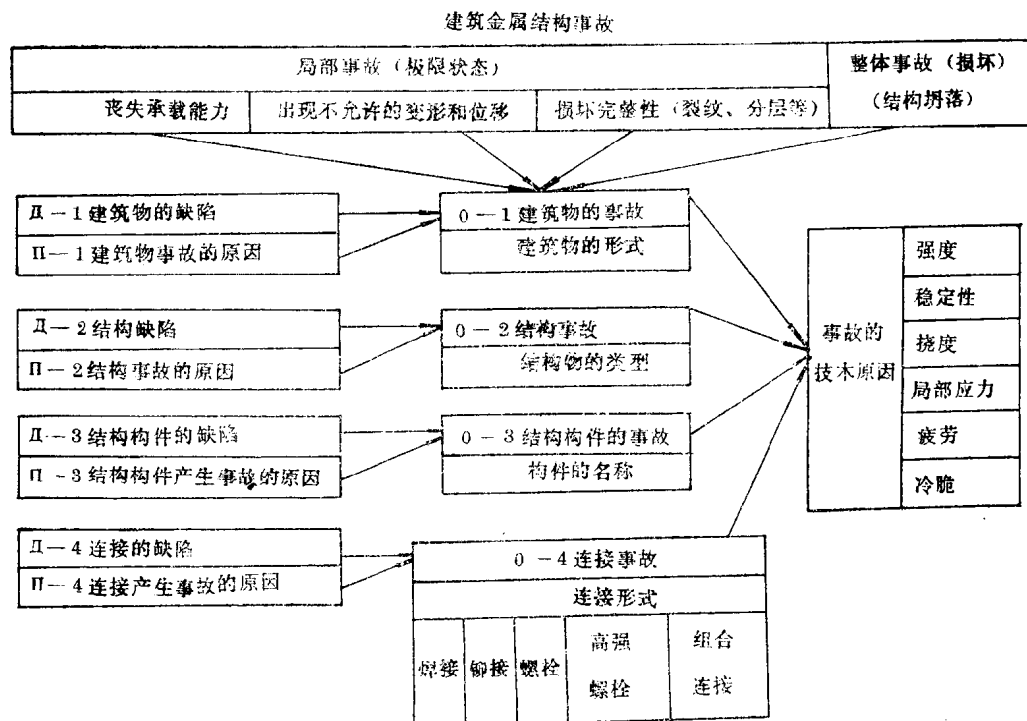


图 1 建筑金属结构事故的推荐分类表

荷载作用的周期性引起应力集中区域出现弹性或弹塑性变形。当弹塑性变形循环数 $N \leq 10^5$ 时出现低周疲劳。当 $N > 10^5$ 时出现高周疲劳。两者之间的界限是有条件的，并取决于许多因素。

低周疲劳对建筑结构有特殊意义，因为在建筑结构中几乎经常有应力集中区，容易产生局部弹塑性变形。这些弹塑性变形甚至在缓慢的和经常改变荷载的条件下都可能逐渐形成，而在高计算应力条件下则能导致结构开裂和破坏[22]。

目前，把周期破坏过程分成裂缝形成、裂缝缓慢发展和积聚破坏三个阶段[21、22]。这些阶段的持续时间取决于应力集中程度、标准应力值以及材料抗裂缝和发展的特性[23]。建筑金属结构所特有的高加荷级、应力高度集中及焊接区的各种缺陷均可导致结构的早期破坏。

对建筑金属结构事故原因的分析[25]指出，大约有65%的事故起因于焊接区缺陷裂缝的扩展。由周期产生的初始裂缝引起的事故占10%，由于结构型式选择不当造成的应力高度集中所引起的事故大约占25%。

从限制事故的观点来看，焊接钢结构最薄弱的环节是焊缝。不仅在母材内，而且在焊缝金属及热影响区内均可形成裂纹并发展扩大。此时，实腹式和格构式结构将在重复静荷载和振动荷载作用下沿焊缝和热影响区破坏，而高压贮槽和容器则大体在热影响区破坏[24]。

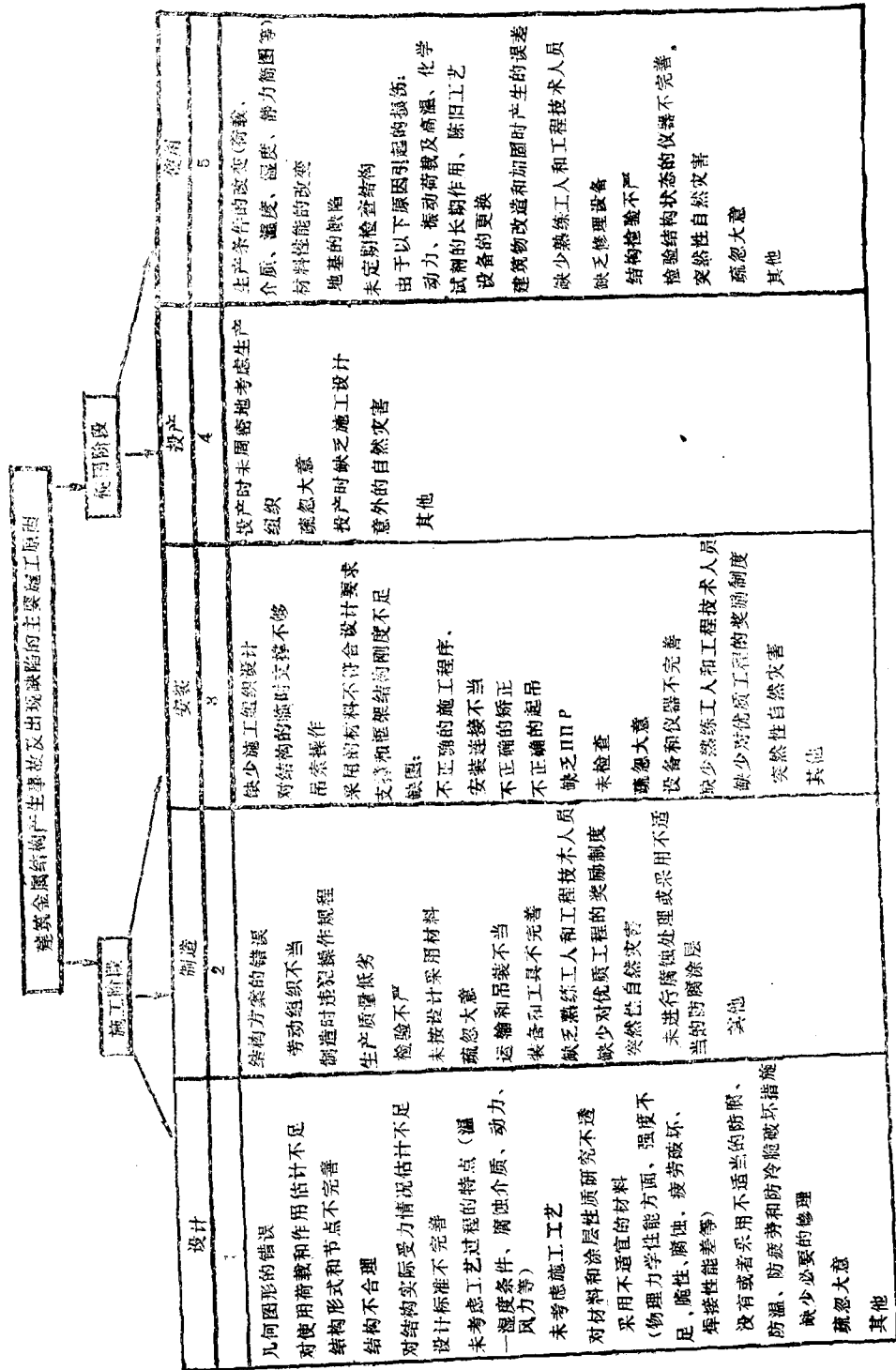


图 2 按建筑金属结构产生事故及出现缺陷的施工原因的分类推荐表

建筑金属结构的实际工作条件

表 1

结 构 型 式	T (年)	荷载变化的循环次数	荷载不对称循环系数 ρ	来 源
1	2	3	4	5
屋架	30	30~50	0.57~0.87	作者的资料
柱 (仅承受吊车作用)				
中级工作制吊车	50	$(6.2 \sim 1.25) \times 10^5$	0.2~0.27	作者的资料
重级工作制吊车	50	$(1.25 \sim 2.5) \times 10^6$	0.32~0.51	作者的资料
吊车梁 (简支的)				
中级工作制	20	$(6 \sim 5) \times 10^5$	≈ 0	作者的资料
重级工作制	20	$(1.2 \sim 1.7) \times 10^6$	≈ 0	作者的资料
贮槽	20	$2 \times 10^2 \sim 1.5 \times 10^4$	0~0.6	[16]
贮气罐	20	$8 \times 10^2 \sim 1.1 \times 10^4$	0~0.6	[15]
谷仓	20	$10^2 \sim 10^3$	0~0.6	[17]
管线	20	$(1.5 \sim 6) \times 10^4$	0	[17]
高炉外壳	10	2×10^4	0.6~0.9	[18]
热风炉	20	4×10^4	0.2~0.5	[19, 20]
高丛构筑物 (支架、塔、 输电线路)	30	2×10^6	0.51~1.0	作者的资料
湿法灭焦塔	10	7.3×10^5	温度变化(200℃)	[32, 33]
沥青焦炭放热器的塔式结构	10	5.1×10^4	温度变化(200℃)	[30]
散热源附近铸造场工作平台	10	4.7×10^4	温度变化(200~600℃)	[34, 35]

* 原文不清

对建筑金属结构脆性破坏形式的事故分析[7、26~29、37]指出,设计与施工引起的应力集中是事故的主要原因(焊接缺陷、初始裂纹、断面的突然变化等等)。金属结构一般是在各种不同原因的综合作用下破坏的,其中最主要因素是低温。

新西伯利亚建工学院对东、西西伯利亚地区223个工程项目中350多个钢结构冷脆破坏实例进行研究后[27、28]指出,34%的破坏实例是发生在板结构上;48%为格构受弯结构(桁架);18%为实腹梁结构。其中,23%的事故产生在安装;9%产生在试验期间;5%产生在结构修理期间;63%产生在使用期间[37]。

正如对37个工业建筑物和构筑物的调查分析所指出的那样,对于格构式钢结构而言,最常见的缺陷为杆件的整体扭曲,总扭曲量均超过标准容许值[39]。扭曲常集中在刚度最小的构件上,即在格构件和支撑上,扭曲值随时间和方向而异,但构件的最大扭曲区域保持不变。构件总扭曲的相当部分(约30%)出现在桁架的杆件上[13、14]。图3示出其沿屋架及皮带通廊支架各区域的分布情况。从图中可明显的看出,其绝对值和相对值均由支座处向中心递增,桁架式屋架杆件的平面外扭曲比平面内扭曲大3~5倍。

图3的对比资料证实,由于支座区的裂缝和格构式构件平面外及接近跨中扭曲的不利作用,桁架可能产生破坏事故。根据对100多个实际工程项目的观测得到的黑色冶金企业建筑物和构筑物的分类[30]说明,由于这些企业的金属结构大部分都是在受强烈的

和中等浸蚀性作用的条件下使用的，其多数事故是因腐蚀损坏而产生的。图3还表明，金属结构在强烈浸蚀性介质中，使用7~9年后由于腐蚀而产生事故的情况（承重构件的截面削弱20~30%，围护结构出现穿透性损坏等）。

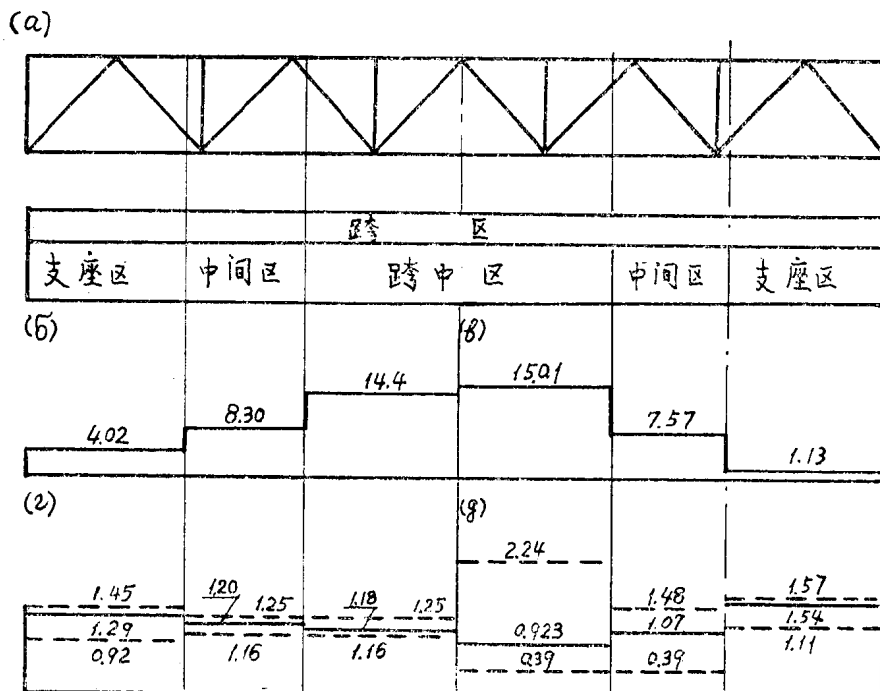


图3 桁架式屋架及皮带通廊状况和几何特征分析的统计资料

a—桁架的基本图形及其分区；b—扭曲值超出标准值的格构式杆件的相对数（占该区域构件总数的百分数）；c—同一桁架中的受压杆件；d—由成对角钢组成的T形截面格构构件平面内长细比（ $\lambda_{\text{内}}$ ）及平面外长细比（ $\lambda_{\text{外}}$ ）之比（ $\lambda_{\text{内}}/\lambda_{\text{外}}$ ）（按现行标准[31]确定）；实线—平均值；虚线—分散值；e—桁架平面外连接节点处腹板线刚度（ ΣI_p ）与节点间距为40毫米时节点板线刚度（ I_{ϕ} ）之比（ $\Sigma I_p/I_{\phi}$ ）；实线—平均值；虚线—分散值

空气湿度、结构在潮湿条件下的使用时间、空气中存在的硫化物、灰尘、煤尘的污染等均对建筑金属结构的腐蚀速度有影响。

由腐蚀导致的金属结构事故[31]可能出现在围护结构与承重结构连接的部位、灰尘和积雪区域、与空气直接接触的区段、处于直接排水环境中的构件以及工艺管线附近的柱表面等处。

转炉车间的屋架使用10~30年期间的平均腐蚀损坏速度为每年0.10~0.16毫米[31]。构件水平弦杆的腐蚀速度大于垂直弦杆，下表面低于上表面。因为水平弦杆的上表面汇集有促进腐蚀发展的吸湿材料和灰尘。金属防护层首先从桁架弦杆开始破坏，而后是斜撑。弦杆的两个角钢之间因腐蚀严重所形成的层状腐蚀生成物将对角钢产生膨胀作用。结果增加了角钢间的距离，并破坏了双角钢在构件中的共同工作[31]。能引起应力集中的局部腐蚀损坏可使低碳钢的冷脆极限温度提高10~20℃，这将在负温条件下加

剧金属结构的事故程度。

按结构型状分析事故的目的，在于揭示结构的典型事故、事故原因及结构缺陷。

板式结构

综观1951~1977年期间（39种情况）板式结构发生重大事故的原因时，可知多数事故是金属结构技术设计图和施工详图有错误所致。其中板厚选择不当者占8%；采用冷脆性低于标准钢材者占31%；制造质量低劣者占8%；安装质量不合要求并违反试验工艺者占31%；违反使用条例（未定期检查金属结构的现状及防腐措施）者占22%。

由于周期性变化的动力和热作用，热风炉和高炉的热风管、煤气喷咀、人孔与环梁和肋板连接处，使用3~5年后就出现了裂纹[18~20]。

黑色冶金企业的板式结构也是在灰尘和水份集聚的地方最易腐蚀损坏。疲劳和腐蚀的共同作用加速了炉壳的机械磨损。

杆式结构

这是建筑领域最常用的结构型式。应该指出，这类结构毁坏最多的是屋架和托架，而在安装前即发现损坏的约占45%，这就提出了在金属结构制造和运输阶段加强质量检验工作的必要性。

曾对1951~1957年期间使用的并发生了重大事故的26榀屋架进行了分析。这类结构产生事故的基本原因是，金属结构的技术设计图和施工详图中有错误，其中计算简图和节点构造选用不当的占17%；采用钢材易冷脆破坏的占22%；制造和安装质量不满足要求的分别占17%和22%；使用条件与计算简图和荷载有出入的占22%。

工业建筑的柱子

这种柱子的承载能力有很大的储备，因为它是按最不利的荷载组合设计的。但大量荷载同时作用的可能性极少，因此，在正常使用条件下柱子的应力远小于计算应力。这就表明，实际不存在柱子出现重大事故的情况。

黑色冶金企业车间的柱子有时会因高温作用产生局部挠曲。在腐蚀介质中使用的金属结构的柱会由于积灰、潮湿、与土壤接触或没有采取防大气作用的措施等而腐蚀损坏。最严重的腐蚀损坏常发生在格构柱的水平构件上、以及加劲肋和柱脚节点等处。在使用过程中受损柱子的数量会不断增加[14]，因重物抛下和迭落、冲击、不适当地利用柱子提升重物、在柱子上悬吊管线、凿孔等也会使柱子受损。

吊车梁

吊车梁是工业建筑中最常用的金属结构之一。由于吊车的周期性和多次重复作用，往往使吊车梁很快就出现裂纹状的破坏。重级和特重级工作制车间的吊车梁使用3~5年后，就不得不报废[14]。

根据对17个冶金厂重级工作制车间的调查结果可知，使用6~10年后吊车梁最典型

的破坏为[41]:

- 吊车轨道固定件破坏者占80%;
- 吊车轨道有几何偏差者占70%;
- 吊车梁及制动梁与柱子连接件破坏占50%;
- 吊车梁有裂纹的占30%;
- 制动结构有裂纹的占25%;
- 吊车轨道出现不容许偏心的占20%。

图4示出1978年中央钢结构设计研究院西伯利亚分院调查的冶金企业车间吊车梁裂纹的主要类型。裂缝破坏主要发生在支座区域、加劲肋附近及上翼缘和腹板连接处。不连续的吊车梁比连续的吊车梁破坏得严重。梁支座区比跨中破坏得更严重。参考文献中所列举的大量研究资料都证实了这些论点[14]。

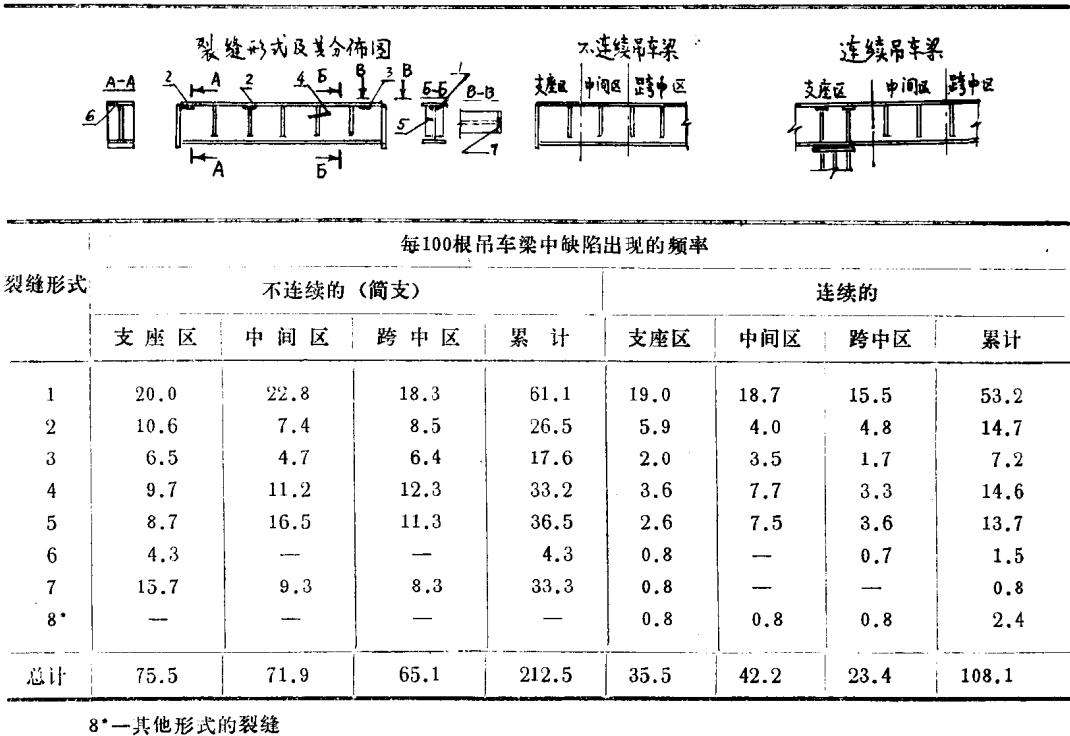


图 4 吊车梁裂纹分布的统计资料

制动结构及吊车梁与柱子连接的支撑节点处于繁重使用条件，其主要破坏具有疲劳特征[13]。

应当指出，铆接吊车梁不同于焊接吊车梁。由于铆接吊车梁中无残余焊接应力、铆连接较大的韧性，而且翼缘角钢上部都加厚了，其工作条件较为有利。同时，铆接吊车梁比焊接吊车梁破坏得较迟，累积破坏出现较缓慢[14]。

工作平台钢结构

冶金工厂平炉、电炉、转炉车间及其他类似车间工作平台钢结构在装料机械、铁路车辆的动力、机动荷载作用和高温作用下损坏很快[14]。典型损坏常为上翼缘焊缝、腹板及上翼缘附近的裂缝，腹板的局部弯曲，腹板被切割处、辅助梁与主梁间固定螺栓的松动等[13]。

无线电发射塔、电杆

这类结构的事故原因和比例为：

- 设计错误，占29%；
- 结构材料质量低劣（钢材抗冷脆及抗疲劳破坏的性能差），占43%；
- 制造和安装质量不合要求，占14%。

二、建筑金属结构的事故原因分析

工业建筑和工程构筑物的损坏是最严重的。据文献[38]的分析，建筑结构重大事故的比例如下：工业建筑占47%；工程构筑物占17%；文化生活建筑占16%；住宅建筑占14%；农村建筑占6%。其中，单个结构事故占66%，而整个构筑物的事故占34%。根据建筑结构型式分类的事故比例为：梁和大梁占29%；楼板占24%，柱子和支柱占21%；隔墙占12%；屋架占8%；内、外墙占6%。砖石结构的事故占全部事故的32.1%，装配式钢筋混凝土结构占19.9%，现浇钢筋混凝土结构占17.5%，金属结构占12.5%，大板和砌块结构占6%，其他占2%。这些资料指出，同钢筋混凝土和木结构相比，金属结构的可靠性较高[38]。

1951年到1977年间发生的59起金属结构的重大事故分析表明，工业建筑屋盖的事故占37%；贮槽和贮气罐占20%；高炉和热风炉壳占22%；无线电塔和输电线杆占14%；栈桥和通廊占7%。这些资料基本上符合文献[1]的结论，也反映了金属结构的良好可靠性。大部分事故是在使用阶段因各种损坏逐渐发展而引起的。例如，根据分析的结果，安装阶段出现的事故约占27%；试验阶段出现的约占10%；使用阶段出现的约占63%。经对39起事故的分析得知[1]：安装和试验阶段出现的约占事故总数的59%；使用阶段的约占41%。

按施工阶段和使用阶段对上述建筑金属结构事故所进行的分析表明：格构式金属结构（桁架、栈桥、通廊等）事故中约有50%出现在施工阶段；约有25%出现在五年以内的使用期；板式结构（贮槽、贮气罐、高炉、热风炉等）事故在试验阶段出现的约占25%~30%；而在五年以内使用期出现的约占40%。这些结论与文献[38]中的数据并不矛盾，它能定性地说明金属结构在各个阶段的可靠程度。

表2的资料指出，实际上在各个建造阶段（设计、制造和安装）和直接使用时，均能产生导致结构发生大量事故的各种缺陷。

建造和使用阶段事故的百分比

表 2

阶段	期间	百分比 (%)				
		来 源				
		作者的资料	(7)	(1)	(8)居住建筑	(36)建筑物和构筑物 (国外经验)
施工	设计	18	33	28	9	51
	制造	38	23	31		26
	安装	22	30	31	26	14
使用	使用	22	14	10	65	9

表 3 举出事故的技术原因及其百分比。这些资料指出了当前进一步深入开展冷脆及疲劳强度、结构失稳、实际受力情况以及焊接连接破坏研究工作的必要性。

事故技术原因的百分比

表 3

原 因	百分比 (%)		
	来 源		
	(作者)1951~1977年 对59起事故的分析	(1)1951~1969年 对39起事故的分析	(7)1960~1975年
整体或局部失稳	22	44	41
母材的破坏 塑性破坏	6	—	8
冷脆破坏	27	17	14
钢材的疲劳破坏	16	5	3 (考虑焊缝)
焊接连接的破坏	15	26	24
螺栓连接的破坏	4	—	3
其 他	10	8	7

金属结构现状的评价问题

建筑金属结构在使用过程中受到严重的有形损耗，其表现形式为机械磨损、腐蚀损坏、残余焊接变形、裂缝的形成和发展、弯曲、挠曲、螺栓连接破坏等。有形的损耗是由于力学、化学及电化学等作用引起的。各种作用都不同程度地影响各种构筑物，而其作用程度就决定了结构先局部而后整体破坏的累积损耗的量和速度。因而，对金属结构在使用阶段现状的评价问题是建筑物损坏评定的重要内容之一。建筑物损坏评定是决定建筑物破坏程度、修复时间及修理周期的一门科学。当前拟采用基于数理统计学和经济学概念的可靠性理论的方法解决这些问题。

基于下述原因很难选择出评价金属结构现状的实际方法：

——理想的单一计算简图同结构原来的几何形状、变形和刚度等均与实际情况存在差异；

——现有结构构件的实际特征（由于各种可能缺陷的存在和累积而随时在变化）同计算特征存在偏差；

—— 现行设计标准同以前执行的设计标准在结构承载能力方面的数据存在矛盾；
 —— 对缺陷的评价估计不足，对受压构件（尤其是受拉构件）的局部和整体弯曲、局部腐蚀破坏、柔性和节点连接的影响、有缺陷的焊接连接的强度等按假定的条件评价不足。

—— 尚缺乏能以概率观点定量评定金属结构的冷脆性及其有裂缝（有时结构在带有裂缝的条件下尚能使用）时的耐久性的现行标准。

因此，对有缺陷的金属结构的计算可以是各种各样的，可以利用半理论半实验的方法进行，甚至有时不能按现有标准进行计算。

三、提高金属结构可靠性的措施

提高建筑金属结构可靠性的方法同建筑物和构筑物框架的事故与其原来和以后的具体使用条件两者间存在因果关系。在对提高可靠性方法进行分类时，综合考虑了这些情况及其他作者的观点。这一因果关系示于图 5。图中每一项可根据它的研究程度、重要性、

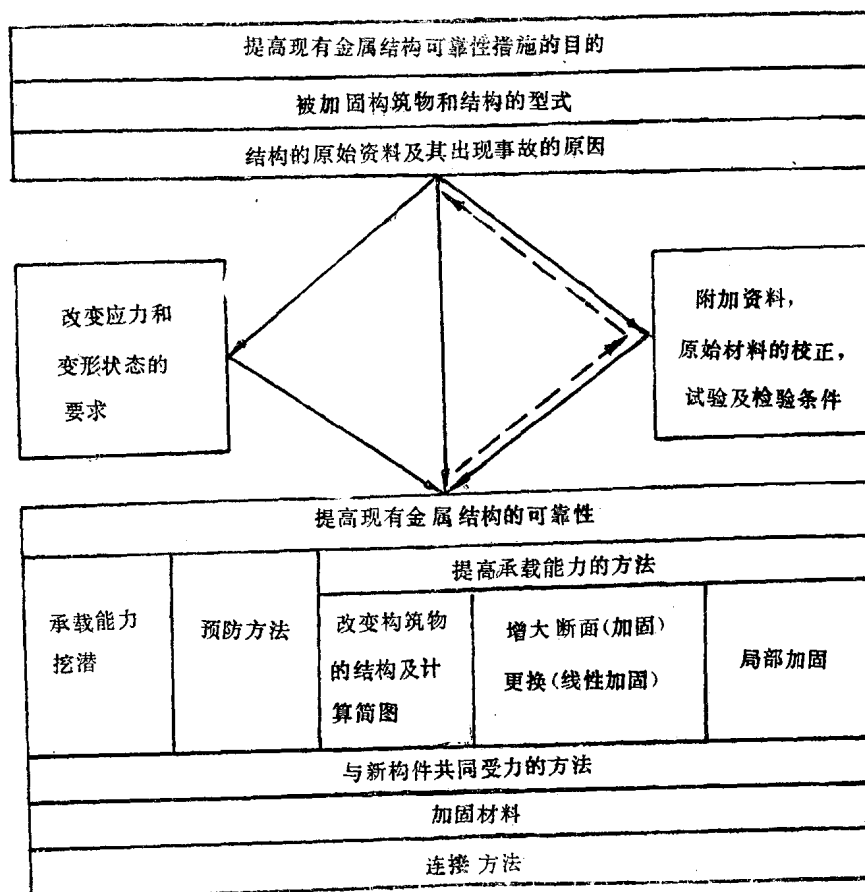


图 5 金属结构的原始资料与提高其可靠性方法的关系图

技术水平和具体任务分成能更换和更加准确的子系统。利用该法的实例是中央钢结构设计研究院西伯利亚分院研究编制的ЭВМ Минск—222电子计算机ПОЛИ程序。该程序是根据专题一情报研究（包括270个以上的情报源），为探索类似的方案而编制的。

在选择保证金属结构继续正常使用方针时，对建（构）筑物承载能力的挖潜和工程分析是一项重要因素。这要以已有资料的实际分析和最大限度地利用有关金属结构实际工作的现代化知识为基础。

根据已有若干文献和实际资料得出的关于评价和挖掘金属结构承载能力的具体方法见图6〔7、8、10、14、25、27、31、41～45〕。应该指出，在很多情况下，实际承载能力远远超过了理论值。这是因为承载体系有很大的适应性缘故。金属结构在增加荷载和强化使用的条件下，不用进行太多的加固仍能继续使用，即证实了其存在潜力。对桥梁、工业建筑框架〔7、14、42、43〕、吊车梁〔14、41、42〕、屋架等的实际受力情况的研究及使用经验，也充分证实了它有潜力。

然而，要想得出关于潜力存在及可能实际应用的结论，需要对结构现状进行仔细的分析，并确切找出其特有的规律。这些结论的可靠性可以用更完善的计算方法和结构的现场试验来说明。对于结构实际刚度、应力和变形的了解正是提出上述假定的基础。可惜的是，根据目前的知识水平，还不能对金属结构实际工作特点及技术操作与安全技术等特殊要求的现场非破损检验方法进行充分的总结。

通常，从工程技术观点来考虑，金属结构承载能力的挖潜及其论证比提出加固或改建方案更为复杂，更为重要。但实验和挖潜的费用却比加固或更换这些结构的费用要低。

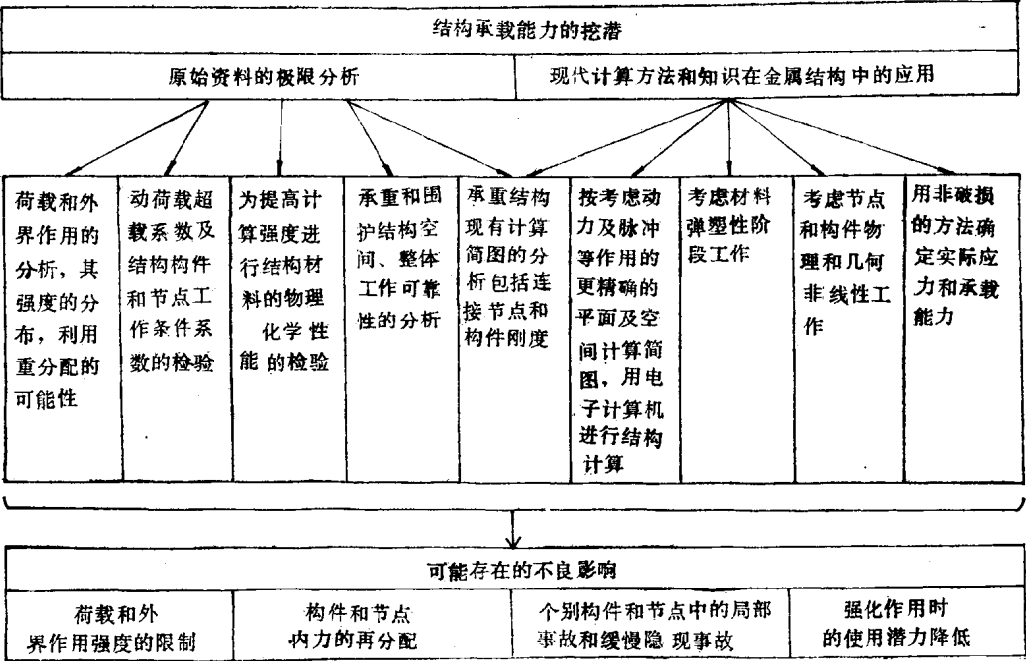


图 6 结构承载能力的挖潜和评价简图

预防措施

预防措施包括检查、维修、防腐、量测检查等〔7、9、10、13、45〕。但是，完全按标准实际应用这些方法却碰到了大量的来自组织、技术的及其他方面的矛盾。当然，如能考虑现代化的知识水平及先进的经验和建议，这些矛盾也可能得到解决。例如，考虑构筑物的特点可以对检查和维修周期加以调整，并可根据事故出现和发展的实际过程（裂缝的形式和发展〔21、23〕、防腐破坏等）对其进行选择。根据使用经验的积累和事故的统计资料以及验算结果，有可能分析出事故出现可能性最大的构件的部位。这些部位最好用颜色加以标明，并记载于技术文件中。

预防措施可能是暂时性的，或者是加固金属结构时所伴生的，其中包括：

——消除和限制临时荷载、清扫积雪和灰尘，增加相邻桥式吊车之间的距离、限制其负荷量。

——消除局部加热、温差或急冷等不良作用的影响，降低介质的侵蚀性作用，等等〔7、9、10、13、14、27等〕。

不改变计算简图的金属结构的加固

在不改变计算简图的前提下加固金属结构，是大家最熟悉的，也是最简单、最常用的方法。它包括增加构件截面、仿制已有结构，以类似的新结构更换原有结构等。

这些结构的受力情况已研究得十分清楚〔7、13、14、42、45〕。

根据现代极限状态的概念按中央钢结构设计研究院〔46〕和莫斯科建工学院〔13〕的方法所进行的金属结构的加固计算，是以保证已有和附加断面共同工作为基础的。包括按允许应力进行加固计算的计算方法在М.И.拉谢恩科〔43〕和М.М.萨赫诺夫斯基〔7〕的著作中有所说明。

金属结构能否在受荷或卸荷情况下加固，取决于其应力—应变状态。例如，在采用焊接的条件下，如果现有结构的应力超过 $\sigma \leq 0.8R$ 〔7、13、14、42、43、46、47〕（对于受压构件还要考虑纵向弯曲系数），就不能在受荷条件下加固。这与不允许加固构件中塑性变形有所发展的要求相关。

由И.С.列勃罗夫〔47〕研制的考虑了一系列因素的更精确的方法，不仅适于受压而且也适用于结构的其他应力状态，其中考虑了以下各点：

——基本断面的初始偏心率相当于初始的扭曲值。众所周知，这种扭曲与结构验算中常用的在荷载作用下量测的扭曲值是不同的。在加固中心受压杆件时，建议考虑偶然出现的初始偏心率。

——加固件以类似于扭曲构件的形式与被加固杆件相连接后的杆件弯曲值。此时，建议考虑有利于被加固构件的作用力。

——由于焊接产生的残余变形。当考虑不利影响时取其全值，考虑有利影响取50%。

曾经建议在计算公式列入（为验算增加截面的加固构件的承载能力）特殊工作条件系数 $m = 0.9$ 〔13、14、47〕。这是因为必须考虑不利因素。