

# 工业设备结构抗震性能分析与设计优化

郑斌杰

惠生工程（中国）有限公司，上海 201210

**[摘要]**随着工业设备在生产过程中的应用不断增加，设备的结构安全性和抗震性能愈发受到关注，工业设备不仅承受着来自外部的机械负载，还面临着地震等自然灾害可能带来的巨大风险。为了保证设备在地震中的稳定性和安全性，必须深入分析其抗震性能并进行合理的设计优化。本论文基于工业设备结构抗震性能分析，探讨了反应谱分析法和时程分析法两种主要的分析方法，分析了影响设备结构抗震性能的关键因素，如结构形式、材料强度及连接节点性能，并提出了一系列优化设计策略，包括合理选型与布局、增强结构刚度、优化连接节点及采用隔震与消能减震措施。通过案例分析，验证了优化设计在实际应用中的有效性，为工业设备抗震性能的提高提供了理论支持和实践指导。

**[关键词]**工业设备；抗震性能；反应谱分析；时程分析；结构优化

DOI: 10.33142/aem.v7i1.15262

中图分类号: TU35

文献标识码: A

## Seismic Performance Analysis and Design Optimization of Industrial Equipment Structures

ZHENG Binjie

Wison Engineering (China) Co., Ltd., Shanghai, 201210, China

**Abstract:** With the increasing application of industrial equipment in the production process, the structural safety and seismic performance of equipment have received increasing attention. Industrial equipment not only bears external mechanical loads, but also faces huge risks that may be brought by natural disasters such as earthquakes. In order to ensure the stability and safety of the equipment during earthquakes, it is necessary to conduct in-depth analysis of its seismic performance and carry out reasonable design optimization. This paper is based on the seismic performance analysis of industrial equipment structures, exploring two main analysis methods: response spectrum analysis and time history analysis. The key factors affecting the seismic performance of equipment structures, such as structural form, material strength, and connection node performance, are analyzed, and a series of optimization design strategies are proposed, including reasonable selection and layout, enhancing structural stiffness, optimizing connection nodes, and adopting seismic isolation and energy dissipation measures. Through case analysis, the effectiveness of optimized design in practical applications has been verified, providing theoretical support and practical guidance for improving the seismic performance of industrial equipment.

**Keywords:** industrial equipment; seismic performance; response spectrum analysis; time history analysis; structural optimization

### 引言

随着现代工业的快速发展，设备的使用场景和复杂程度逐步增加，工业设备不仅需要承受常规的工作负荷，还常常面临来自外部环境的极端影响，如地震等自然灾害。地震对设备结构的破坏可能导致生产线停运、设备损坏，甚至引发更为严重的安全事故。因此，如何提高工业设备结构的抗震性能，成为了设备设计和工程应用中亟待解决的一个重要课题。

当前，国内外学者对设备结构抗震性能的研究已有一定的积累，尤其在建筑结构抗震设计领域，但针对工业设备，尤其是大型设备的抗震性研究仍然存在诸多空白。工业设备具有特殊的结构和使用环境，常常需要依据不同的地震烈度、设备类型和使用需求进行不同的抗震设计，为了提高设备的抗震性能，不仅要通过结构形式和材料的优化，还需要从设备布局、连接节点、隔震和消能减震等多方面进行综合考虑。因此，本文旨在分析工业设备结构的

抗震性能，探索其影响因素，并提出有效的优化设计策略，以实现更为安全可靠的工业设备抗震设计。

### 1 工业设备结构抗震性能分析方法

在工业设备的抗震设计中，准确评估设备结构在地震作用下的响应是确保其安全性和稳定性的关键。为了实现这一目标，工程师常常采用不同的分析方法来模拟设备在地震荷载下的行为。常见的分析方法包括反应谱分析法和时程分析法，它们各有特点，在不同情况下具有不同的应用价值。

#### 1.1 反应谱分析法

反应谱分析法是一种基于地震动反应谱的简化分析方法，通常用于评估结构在地震激励下的动态响应。该方法通过对结构进行线性或近似线性分析，将地震输入转化为结构的最大响应，适用于结构相对简单且不会出现明显非线性行为的情况。在反应谱分析中，首先根据地震动的特性和结构的固有频率，建立相应的反应谱，并通过该谱计算

设备结构在地震中的最大加速度、最大位移或最大内力。

反应谱分析的优点是计算相对简便,适用于大规模的结构系统,尤其是在初步设计阶段,可以快速评估结构的抗震性能。然而,该方法假定结构为线性系统,且不考虑地震作用的时间历程,因此对于一些具有较强非线性行为的复杂设备或高震级地震,其准确性可能受到一定的限制。

### 1.2 时程分析法

与反应谱分析法相比,时程分析法更为精确,能够更详细地模拟设备结构在地震过程中的响应。时程分析法通过引入地震动的时间历程,将地震波形直接施加到结构模型上,计算出结构在整个震动过程中各个时刻的响应。该方法不仅考虑了结构的非线性特性,还能够准确地模拟结构在地震波传递过程中产生的复杂动态效应。

时程分析法适用于复杂结构系统,尤其是那些在地震作用下可能出现大变形、非线性行为的设备。通过时程分析,可以评估结构在不同阶段的响应,如瞬时的加速度、位移、内力等,以及在不同地震强度下的表现。然而,时程分析法的计算量大、复杂度高,需要较为精细的建模和大量的计算资源。因此,它通常用于详细的抗震分析和设备改进设计阶段。

## 2 影响工业设备结构抗震性能的关键因素

工业设备的抗震性能不仅与其自身的结构设计密切相关,还受到多种因素的综合影响,要提升设备的抗震能力,必须全面分析和理解影响其抗震性能的关键因素,以下将从结构形式与布局、材料与强度以及连接节点性能三个方面探讨这些影响因素。

### 2.1 结构形式与布局

工业设备的抗震性能与其结构形式和布局息息相关,不同的结构形式对地震荷载的响应不同,一些设备结构可能由于设计上的缺陷或不合理的布局,使得地震力在某些部位的传递和分布不均,从而导致结构的局部失效或整体的不稳定。因此,合理选择设备的结构形式和布局,可以有效提高其抗震性能。

例如,设备的重心位置和支撑点的布置是影响抗震性能的关键因素,如果设备重心较高或支撑点不均匀,可能会导致设备在地震中产生较大的震动,从而增加设备的破坏风险。合理的布局设计可以确保设备在地震中受到的力更加均匀,减少振动的放大效应,增强设备的稳定性。

### 2.2 结构材料与强度

材料的选择和结构的强度直接影响设备的抗震性能,高强度材料能够更好地承受地震荷载,减少在地震中发生破坏的风险。常用的工业设备材料包括钢材、混凝土、铝合金等,不同材料在地震中的表现差异较大。例如,钢材具有良好的延展性和韧性,能在地震中吸收较多能量,但在强震作用下可能会发生屈服或断裂;而混凝土则在抗压性能上有优势,但可能在拉伸或弯曲作用下容易开裂。

材料的抗震性不仅与其本身的力学性能有关,还与材料的疲劳性能和老化情况密切相关。随着设备使用时间的增加,材料可能会出现老化或疲劳,导致其承载能力下降。因此,在设备设计阶段应综合考虑材料的选择与使用环境,确保其在整个生命周期内能够保持良好的抗震性能。

### 2.3 连接节点性能

连接节点是设备结构中重要的承载部位,其性能直接决定了结构的整体抗震能力,连接节点的设计应保证在地震作用下具有足够的强度和刚度,避免发生结构失稳或连接断裂。在实际应用中,连接节点可能受到多种因素的影响,如焊接质量、螺栓连接的紧固程度以及连接形式的合理性等。

不合理的连接节点设计可能导致局部失效,进而引发设备整体的失稳。例如,某些节点在受到地震荷载时可能发生滑移、开裂或变形,从而导致设备的整体稳定性下降。因此,在抗震设计中,必须对连接节点进行专门的优化,确保其能够有效地传递地震力,并在一定的变形范围内保持结构的完整性。

## 3 工业设备结构设计优化策略

工业设备的抗震设计优化是提高其抗震性能、降低震害风险的关键,优化策略通常从结构选型、布局、材料应用以及连接节点等方面着手,确保设备在地震中能保持稳定。

### 3.1 合理选型与布局

合理的结构选型与布局是优化设计中的基础,设备的选型不仅要考虑其功能需求,还应当充分考虑地震荷载对设备稳定性的影响。在设计时,首先需要根据设备的质量、体积、工作环境等特点选择合适的结构形式。例如,针对大型重型设备,采用刚性较强的框架结构可能更有利于抵抗地震引起的水平荷载。同时,合理的布局能够减少地震波对设备传递的震动,减少设备间的相互干扰和损坏。对设备的布置方案进行细致的分析与优化,有助于降低设备发生大幅位移的风险,提高整体抗震性能。

### 3.2 增强结构刚度与强度

提高结构的刚度和强度是增强抗震性能的另一重要策略,通过优化材料选择和结构设计,可以有效增强设备的抗震能力。例如,选用高强度合金材料或复合材料,可以在保证结构轻巧的同时提高其抗震性能。结构的刚度直接影响到设备在地震作用下的变形程度,因此在设计中应合理布置支撑结构,如增加支撑柱、加固基础等,以提升设备的整体刚度。此外,通过对关键部位进行加强设计,增加材料的截面尺寸或加强连接部分,也能够有效提高设备结构的强度,使其在强震作用下依然能够保持稳定。

### 3.3 优化连接节点

设备的连接节点是地震传递的主要路径,也是设备在地震中可能发生破坏的薄弱环节,因此,优化连接节点的

设计至关重要。合理设计连接节点，可以有效分散地震荷载，避免局部应力集中导致的损坏。常见的优化方法包括：采用灵活的连接方式（如铰接或弹性连接），使得设备在震动过程中可以相对位移而不发生脆性断裂；对连接处进行加固，增设抗震支撑或采用高强度连接件来增加其承载能力。同时，还需要通过材料的选择和热处理工艺，提高连接件的抗疲劳性能，确保其在地震作用下的可靠性。

### 3.4 采用隔震与消能减震措施

隔震与消能减震技术是近年来广泛应用于设备抗震优化中的先进方法，隔震技术通过在设备与基础之间设置隔震装置（如弹性垫、滚动支座等），有效减小地震波对设备的直接影响。这样可以大幅降低设备的震动幅度和加速度，减少地震对设备的损害。消能减震则是通过在结构中设置耗能装置（如阻尼器、摩擦阻尼器等），将部分地震能量转化为热能或其他形式的能量，从而减少震动对设备的冲击。这些措施不仅可以提高设备的抗震性能，还能延长设备的使用寿命，降低维修成本。

## 4 案例分析

本章通过实际案例分析，结合前述抗震性能分析与设计优化方法，进一步探讨工业设备结构在抗震设计中的应用。我们选择了典型的工业设备及其支撑结构作为分析对象，分析其在地震工况下的表现，并提出优化设计方案。

### 4.1 案例背景

选取的案例为某石油化工厂的主要设备基础结构，设备包括大型压缩机、反应器及其支撑平台。该工厂位于地震活动较为频繁的地区，抗震设计显得尤为重要。初步的设计方案采用了传统的钢结构支撑和基础设计，但在实际运行过程中，设备的稳定性和抗震性能不能满足预期标准，尤其是在强震下，设备支撑系统的振动变形较大，导致设备可能出现损坏或运行不稳定的问题。

### 4.2 反应谱分析法与时程分析法的应用

针对该设备基础结构的抗震性能，我们分别采用了反应谱分析法和时程分析法进行深入研究，通过反应谱分析法，我们对不同震级、不同振动周期的地震波进行了模拟，分析了设备在不同的震动条件下的响应。结果显示，虽然设备基础整体刚度较大，但设备与基础之间的连接节点却未能有效传递震动能量，造成了局部振动增幅。进一步应用时程分析法，我们结合具体的历史地震记录，进行了动态时程计算。通过模拟设备在实际地震波作用下的响应，

发现设备的某些支撑点出现了较大的瞬时位移，尤其是在强烈的加速度作用下，震动能量未能及时耗散，导致设备的整体稳定性下降。

### 4.3 设计优化与改进

基于上述分析结果，我们提出了一系列优化措施以增强设备结构的抗震性能，在合理选型与布局方面，我们调整了支撑系统的设计，增加了设备与基础之间的隔震支座，并优化了设备的布局，使得震动能量能够均匀分布，从而减少了局部应力集中。在增强结构刚度与强度方面，通过使用更高强度的材料和合理加固节点，增强了设备基础的抗震能力，避免了局部变形过大带来的风险。在连接节点的优化上，原有的刚性连接设计被改为柔性连接，能够有效吸收部分地震能量，减小设备和基础之间的传力。通过采用了消能减震措施，通过安装专门的减震器和消能装置，进一步降低了设备在地震中的响应，设计优化与改进如图 1 所示。

### 4.4 优化效果分析

通过上述优化设计，设备结构的抗震性能得到了显著提升，反应谱分析和时程分析结果表明，优化后的设计有效减小了设备基础的振动幅度，设备的稳定性得到了显著增强。特别是在强震下，优化后的设备支撑系统表现出了良好的减震效果，振动能量的有效分散和吸收使得设备避免了因震动过大而导致的损坏。优化后的设计还提升了设备的耐久性和长期稳定性，使得设备在未来可能出现的地震中能够保持较好的运行状态，确保了工厂的生产安全和设备的持续使用。

通过对该石油化工厂设备结构的抗震设计优化分析，本文展示了反应谱分析法和时程分析法在实际工程中的有效应用，优化后的设计方案不仅提高了设备结构的抗震性能，还增强了设备的安全性和耐用性。该案例为其他工业设备的抗震设计提供了重要的参考和借鉴，也为未来类似工程的设计优化提供了实践依据。

## 5 结语

本论文对工业设备结构的抗震性能进行了系统的分析，并提出了优化设计策略。通过反应谱分析法和时程分析法的应用，深入探讨了影响设备抗震性能的多种关键因素，结合实际案例，验证了设计优化在提高设备抗震能力中的有效性。研究表明，合理的结构选型、优化布局、增强结构刚度、优化连接节点设计，以及采取隔震与消能减震措施，都能显著提高工业设备的抗震性能。

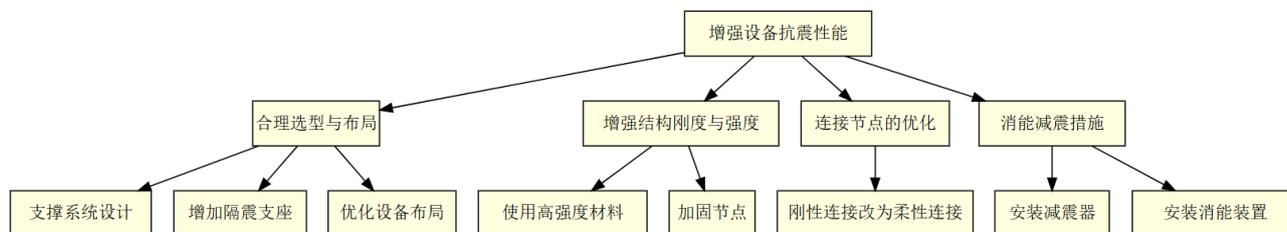


图 1 设计优化与改进

通过案例分析,本文还展示了抗震优化设计在具体应用中的可行性和实际效果,为工业设备的抗震设计提供了有价值的参考。尽管当前的研究为工业设备抗震性能的提高提供了一定的理论依据和技术支持,但在不同类型设备的抗震分析和优化中,还需要结合具体应用情况进一步探讨和深化。未来的研究可着重于探索新型隔震与减震材料的应用,以及多种优化手段的综合应用,进一步提升工业设备的抗震能力。

#### [参考文献]

- [1]段绍沛. 冶金工业建筑的结构设计与安全考量[J]. 城市建设理论研究,2024(22):81-83.
- [2]黄可为. 某工业建筑改造后加固处理分析[J]. 福建建材,2023(4):44-46.
- [3]许兆辉. 石油化工框架式塔基础的抗震分析[J]. 石油化工设计,2024,41(2):4-7.
- [4]李一明. 结构全寿命周期抗震韧性评估方法研究[D]. 广州:广州大学,2023.
- [5]王赵诚. 大型石化生产装置结构-设备耦合体系抗震性能研究[D]. 西安:西安石油大学,2023.

作者简介:郑斌杰(1981.9—),男,毕业院校:石河子大学,所学专业:土木工程,当前就职单位:惠生工程(中国)有限公司,职务:结构工程师,职称级别:工程师。