

文章编号:1673-2049(2006)03-0021-05

钢结构失稳监测方法和失稳监控部件研究

邓长根, 吴建华, 甘东华

(同济大学 建筑工程系, 上海 200092)

摘要:为了预防钢结构发生灾难性失稳破坏,根据结构失稳与结构响应或特征参数之间的关系,将目前应用于结构健康监测和损伤诊断的方法扩展到钢结构失稳监测领域;评述并归纳了基于应变和位移变化趋势、基于振动-失稳相关性、基于薄壳体积改变率、基于失稳先兆的钢结构失稳监测方法;进一步对3种钢结构失稳监控部件进行了概念设计,包括钢套管压力监控、节点塌陷监控、坦拱和扁壳跃越失稳监控;总结了各种监测方法的特点和存在的问题。

关键词:失稳监测;振动监测;钢套管压杆;节点塌陷监控;跃越失稳监控;钢结构

中图分类号:TU391

文献标志码:A

Research on Instability Monitoring Methods and Instability Monitoring Components for Steel Structures

DENG Chang-gen, WU Jian-hua, GAN Dong-hua

(Department of Architectural Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to prevent the catastrophic instabilities damage of steel structures, the methods of structural health monitoring and damage diagnostics were extended into the field of instability monitoring of steel structures, based on the relationships between structural instabilities and structural responses or their characteristic parameters. The methods of instability monitoring of steel structures were overviewed and classified as monitoring based on the varying tendencies of strains and displacements, monitoring based on the correlations between vibration and instabilities, monitoring based on the varying rates of the enclosed volume of thin shells, and monitoring and controlling based on the portents of instabilities. Furthermore, conceptual designs of three instability monitoring components were illustrated briefly, including compression-force monitoring of steel sleeving members, joint-dent monitoring of shallow arches and reticulated shells, snap-through instability monitoring of shallow arches and shells. Finally, the characteristics and existing problems of instability monitoring methods were summarized.

Key words: instability monitoring; vibration monitoring; steel sleeving compression member; joint-dent monitoring; snap-through monitoring; steel structure

0 引言

钢结构失稳监测是指在结构或构件的施工或使用过程中,根据结构或构件的失稳与其特征参数(如

自振频率等)之间的相关性,或根据结构或构件失稳与其位移、挠度等结构响应之间的关系,通过对这些特征参数或结构响应实时、在线的监控,来判断结构或构件的稳定、可靠性。

收稿日期:2006-07-24

基金项目:国家自然科学基金项目(50478107)

作者简介:邓长根(1962-),男,江西南城人,教授,博士生导师,工学博士,E-mail:dengcg@mail.tongji.edu.cn。

20 世纪 50 年代以来,钢结构特别是高层和大跨钢结构在世界范围内得到了广泛的应用和飞速的发展,伴随着高强度材料的应用、分析模型和技术的日趋精细,使钢结构跨度更大、质量更轻、刚度更柔、体型更复杂,对钢结构稳定、可靠性的研究显得越来越重要。由于实际结构非常复杂,再加上结构初始缺陷的存在,以致根据理想模型得到的稳定理论分析结果与实际稳定承载力之间存在较大差异。为了保证结构的安全可靠,往往把稳定理论分析结果除以很大的安全系数作为稳定性设计载荷。若用试验来测定结构或构件的屈曲载荷,由于普通稳定性试验是破坏性试验,试验成本高,试验次数有限,而且试验结果往往离散性很大。这些均在一定程度上制约了钢结构的跨度和高度,也影响了其可靠性和经济性。

鉴于上述情况,笔者对钢结构或构件的各种失稳监测方法进行了研究,将目前应用于结构健康监测和损伤诊断的方法扩展到钢结构的失稳监测领域,并对各类失稳监控部件进行了初步探讨,从而为实现钢结构失稳监测和控制的一体化以及为防止钢结构失稳采取更加积极、主动的对策提供参考。

1 钢结构失稳监测方法

1.1 利用应变和位移传感器进行稳定监测

结构或构件从加载开始直到丧失稳定性而发生破坏的过程中,其刚度将发生规律性的变化,伴随着结构或构件刚度的变化,其变形也会表现出某种规律性的变化,包括变形与荷载之间的规律性变化、变形与时间之间的规律性变化、加载响应比的规律性变化等。如果在结构实际工作的过程中,能够对结构的变形进行实时、在线的监测,通过变形的变化趋势,就可判断出结构的稳定性,从而实现结构失稳的变形监测。

钢结构一旦发生失稳问题后果将不堪设想,而且其失稳破坏往往是一个缓慢的过程,短期的测试可能无法发现,必须长期监测才可以看出。通过在钢结构主要受力构件或关键部位安装应变和位移传感器,长期监测整个钢结构主要受力构件或关键部位受力后应变、位移状况,及时准确地了解钢结构主要受力构件或关键部位应变、位移值及其变化趋势,为钢结构查找失稳隐患,并为其整改加固提供依据。

1.2 基于振动特性的钢结构失稳监测

工程结构的稳定性可用结构的模态参数(主要是自振频率和振型)进行描述。结构的模态参数是

结构的一个非常重要的性态表现,它反映了结构的质量和刚度分布状况,从结构的模态参数发生的变化,可以定性或定量地判别结构稳定状态的改变。

建筑结构的整体失稳往往是由于构件的老化或在地震等灾害作用下,连接件或构件的局部失稳所引起,任何由于局部失稳而造成的质量和刚度矩阵的变化都将从频率及振型量测值的变化上表现出来。如果发现当前所测的结构频率及振型与原来的频率及振型有差别,可以认为结构的质量和刚度矩阵发生了变化,频率和振型的变化到一定程度,即结构中的部分构件、连接件的稳定性发生了变化或结构的整体稳定性发生了变化,因此可以通过对结构振动响应的测量信息,来识别结构或构件的模态参数,进而根据模态参数变化来判断结构或构件的稳定性。

利用结构或构件的振动特性进行失稳监测和预估屈曲荷载的概念可以追溯到 20 世纪 30 年代, Sommerfield 试验了一根悬臂柱,在柱的自由端附加一个变荷载,发现系统的固有频率随荷载的增加而下降,当顶端荷载达到柱的屈曲载荷时,固有频率接近于 0。20 世纪 70 年代起,以 Singer 为代表的西方学者,结合航空航天事业的发展,利用振动频率特性预估屈曲载荷方法对金属桁条加筋圆柱壳进行了深入的研究,发现在临界屈曲前,高载荷处的频率急剧下降^[1-2]。中国国防科技大学雷勇军等为了验证复合材料圆柱壳的失稳与壳体振动频率的关系,进行了复合材料圆柱壳在轴压和外压作用下失稳荷载的振动监测试验^[3]。中国建筑科学研究院钱基宏以一个简单的 24 单元六角星型球面钢网壳结构为例,对薄壳的失稳与其振动特性之间的关系进行了研究^[4]。

大量的试验和理论研究证明:①结构自振频率与其所承载荷的大小有关,随着所承载荷的增加,自振基频在单调下降,当接近于屈曲失稳时,自振基频急剧下降,失稳时,自振基频下降到 0。②根据结构或构件的振动特性与其稳定性之间的相互关系,通过一定的监测方法或手段,从实际结构或构件中提取反映其振动特性变化的参数,并根据该参数的变化趋势就可以判断结构或构件的稳定性。

1.2.1 利用 GPS 实现的失稳振动监测

GPS 作为一种新监测方法,由于其硬件和软件的发展和完善,特别是高采样率(目前有的采样率已高达 20 Hz)GPS 接收机的出现,为高层和高耸钢结构动态稳定性监测提供了一种新途径^[5]。

这种监测方法一般将监测点设在高层建筑物顶部或高耸钢结构的最高点上,另外在被监测的建筑物附近设置两个固定点,其中一点作为固定基准点,另一点作为参考点,各点均放置 1 台 GPS 接收机,数据的采集时间一般在风很小、天气良好的夜晚,每次按动态观测模式连续观测约 30 min,数据采样率一般可设置为 0.5 s,卫星高度角限值设置为 15°。对 3 台 GPS 接收机的同步观测数据进行处理,可得到监测点和参考点相对于基准点的三维坐标数据序列,对此数据序列进行分析,得到经均值化后的时程曲线,经过采用频谱分析法或小波分析法就可实现监测点的动态特征(频率和幅值)的提取,将每次观测得到的动态特征绘制成曲线,就可得动态特征的变化曲线,从而可以判断钢结构的稳定性。

1.2.2 利用传感器系统实现的失稳振动监测

该监测系统一般由 4 个部分组成:传感系统、数据的采集和处理系统、通讯系统、监控中心和报警设备。传感系统用于将待测物理量转变为电信号;数据的采集和处理系统一般安装于待测结构中,采集传感系统的数据并对数据进行初步处理;通讯系统将采集并处理过的数据传输到监控中心;监控中心和报警设备利用具备诊断功能的软硬件对接收到的数据进行分析并对结构的稳定性作出评估,如发现异常,发出报警信息。

由于被监测建筑结构的复杂性,传感器型号的合理选择、传感器的优化布置将是保证系统能否有效工作的前提和基础,因为这直接影响到监测所获信息的质量和数量。目前使用于钢结构失稳监测的传感器主要有:加速度传感器、应变传感器、光纤传感器、压电变频器、形状记忆合金传感器和微电子力学系统传感器等,其中加速度传感器、光纤传感器主要用于结构失稳的振动监测。传感器的优化布置方案主要有 Kammer 提出的有效独立法、Guyan 模型缩减法、模态动能法等。

数据的采集和处理是将传感器采集的信号经过放大、去噪声后,得到对失稳比较敏感的特征参数。常用于特征参数提取的方法主要有:谱分析法、时域波形分析法、小波变换法、时频分布法和高阶统计量分析法等。

1.3 利用荷载-体积改变曲线实现壳体的失稳监测

Khan 等对一受均匀外压的球顶圆柱壳进行试验研究发现,对于该试验壳体,壳体内部体积的改变是比壳体表面点的位移更为敏感的一个失稳指标^[6]。体积的改变,是对结构外形改变有贡献的所

有位移和转角的函数,因此是一个放大的指标。应用荷载-体积改变曲线将能够对壳体的稳定承载力作出更为精确的判断。这说明:各种失稳指标的敏感度对于不同的结构会有所不同,对某一特定结构,应尽量找出较为敏感的指标进行稳定性分析。

1.4 利用能够传感结构失稳先兆的部件实现钢结构失稳监测

通过各种技术手段使可能发生的失稳局限在专门设置的部件中,或使专门设置的部件在结构失稳之前发生失稳,通过对这些部件的失稳监测,来传递失稳先兆并发出警报,同时提供足够的约束延缓失稳的发展,防止结构发生突然失稳破坏,从而实现结构失稳监测和控制的一体化。

针对不同的结构类型和失稳形式,需要在结构中布置不同的失稳监控部件。在网架、网壳等空间结构中,局部压杆的失稳会导致整个结构的失稳,而结构的失稳往往首先发生在受力最不利的杆件处,因此,在网架、网壳结构中的某些关键部位加入钢套管构件,可以改善结构整体性能,增加其实际临界荷载值。某些坦拱和扁网壳结构的节点往往产生跃越失稳,因此,可在其关键节点加上套管或套盘作为失稳监控部件,同时改善节点的受力性能,延缓或阻止节点的失稳破坏。类似于坦拱和扁壳结构,在荷载作用下,局部位置容易产生跃越失稳,因此,在易产生跃越失稳的位置布置一种水平方向能产生一定位移的薄板作为失稳监控部件,从而实现结构失稳的监测和控制。以下将介绍这几类失稳监控部件的概念设计。

2 失稳监控部件概念设计

2.1 钢套管压力监控部件

钢套管失稳监控部件是内外层有间隙的抑制屈曲支撑在功能和构造方面的推广^[7]。当构件承受的轴压力达到一定值时,内钢管将失稳并发生弯曲,与外钢管内壁接触后横向变形受到抑制,从而抑制内钢管失稳的进一步发展。在外钢管内壁适当位置布置接触传感器,当内钢管发生弯曲并与外钢管内壁接触时,触发失稳预警装置,如图 1、2 所示。利用该原理,可实现结构失稳监测和控制集成化。

钢套管构件压力都只由内钢管承担,内钢管与外套管之间不填充混凝土而是保留一定间隙,外套管在端部收缩,使两者在端部间隙很小,同时设置一定厚度的挡板并与内钢管焊接,用来限制外套管的滑移;同时在内钢管端部进行构造加强,防止局部破坏,具体的端部加强做法见图 3。

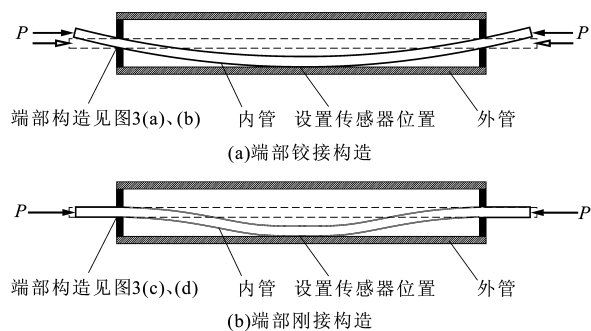


图 1 钢套管压杆变形(一个半波)

Fig. 1 Deformation of Steel Sleeve Compression Member (One Half-Wave)

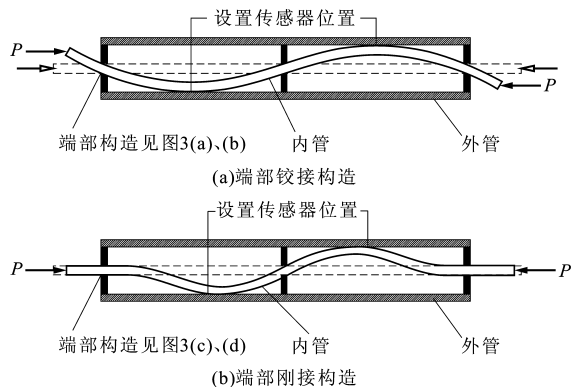


图 2 钢套管压杆变形(两个半波)

Fig. 2 Deformation of Steel Sleeve Compression Member (Two Half-Waves)

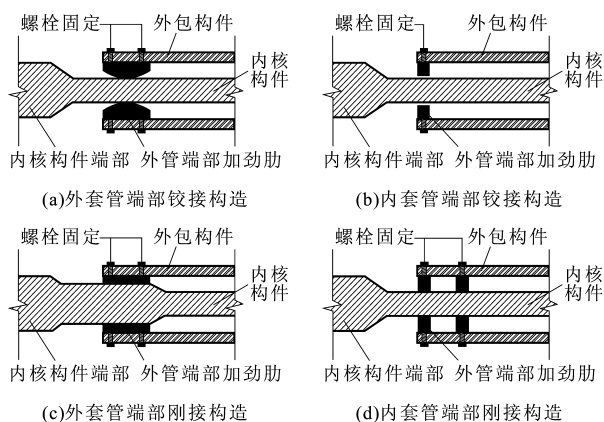


图 3 套管端部构造

Fig. 3 Construction of Sleeve End Connections

2.2 节点塌陷失稳监控部件

某些坦拱和扁网壳结构在竖向荷载作用下,将发生跃越失稳。虽然在发生跳跃后承载力可以大于临界值,但在实际工程中不允许出现这样大的变形,因此应当避免跃越失稳。

如图 4、5 所示,设计一种方案,在坦拱或扁网壳铰接点的外面加上套管或套盘,集中力 P 直接施加

在铰接点上而非套管或套盘上,两杆节点塌陷监控部件与杆件之间的连接构造做法,可参见图 3 中钢套管失稳监控部件内外管连接构造,而多杆节点塌陷监控部件套盘与杆件之间的连接构造如图 5(d)所示,无论何种连接构造均不限制杆件轴向位移。以拱发生对称失稳模态为例,坦拱跃越失稳后,变形将迅速增大,铰接点与套管或套盘底部接触(触发监控信号),此时套管或套盘和坦拱作为整体受力,荷载发生重分布,从而抑制跳跃之后的失稳迅速发展。

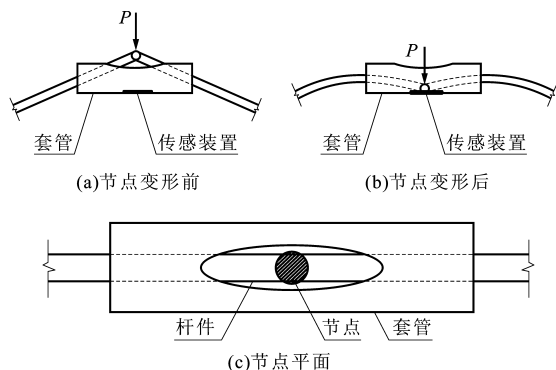


图 4 坦拱平面节点塌陷监控部件

Fig. 4 Plane Joint-Dent Monitoring Component on Shallow Arches

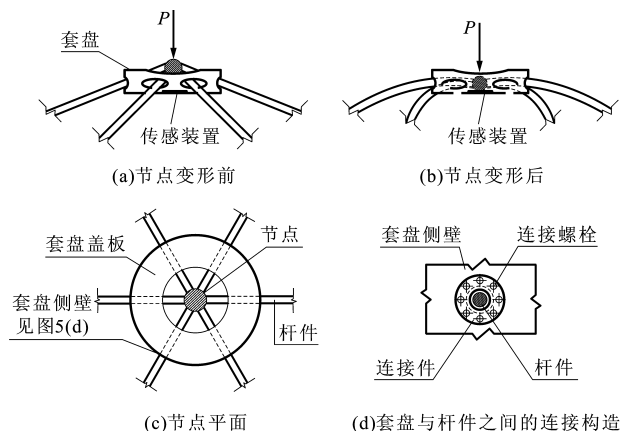


图 5 扁网壳空间节点塌陷监控部件

Fig. 5 Spatial Joint-Dent Monitoring Component on Shallow Reticulated Shells

2.3 坦拱和扁壳跃越失稳监控部件

扁壳、坦拱有可能发生跃越失稳。跃越失稳的荷载-位移曲线是一条有极值点的非线性的平衡路径,荷载开始施加时,平衡路径就开始弯曲,在达到临界荷载之前,结构的刚度随荷载的增加而降低,当荷载达到临界荷载时,结构会突然跳跃到另一具有较大位移的稳定平衡状态。初始截面几何尺寸缺陷对这类结构的临界荷载的影响不大。

如图 6 所示,设计这样一种方案,在扁壳、坦拱

的适当位置布置这样一种薄板构件,薄板周边与拱或壳之间通过连接件进行连接,连接件与扁壳或坦拱之间通过焊接连接在一起,薄板与扁壳或坦拱之间水平方向可以相对移动。当扁壳或坦拱正常工作时,薄板不受力,但是如果扁壳或坦拱在荷载作用下产生较大水平位移,超出薄板与扁壳或坦拱之间所能容许的最大位移时,薄板将会约束扁壳或坦拱水平方向的位移,从而提高扁壳或坦拱的稳定承载力;当扁壳或坦拱在荷载作用下跃越失稳,产生反向挠曲时,将会触动薄板上的传感装置发出失稳警报。

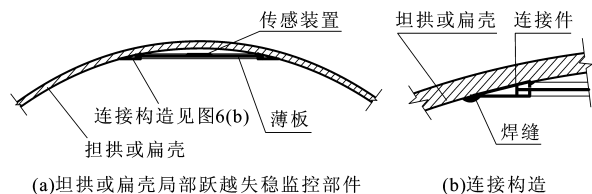


图6 坦拱和扁壳跃越失稳监控部件

Fig. 6 Snap-Through Monitoring Component on Shallow Arches and Shells

3 结 语

失稳监测具有非常重要的理论意义和实际应用价值:

(1)根据失稳的监测结果实现失稳的早期识别和预报。

(2)根据失稳监测中得到的各项指标和参数,来预测结构和构件的失稳临界载荷,理论分析和计算由于受到各种条件的限制,特别是实际结构存在初挠曲、载荷的初偏心、截面几何尺寸和形状的偏差以及残余应力等初始缺陷,通过对失稳的监测可以对理论分析和计算结果进行检验并且弥补其不足。

本文中综述了4种钢结构失稳监测方法,其特点和尚需解决的问题总结如下:

(1)利用应变和位移传感器进行失稳监测的技术已日趋成熟,但该方法主要用于结构的局部失稳监测,所以用此种方法进行失稳监测,需清楚局部失稳与整体稳定性的关系,预知对某一特定结构整体稳定性影响较大的构件或关键部位位置,这样才能根据监测结果,正确分析结构的稳定性。

(2)利用GPS实现高层和高耸钢结构的整体失稳监测技术和利用传感器系统实现钢结构失稳的振动监测技术,是将应用于其他领域的技术或失稳监测方法引入钢结构失稳监测领域,因此具有较为广阔的应用前景,但这种方法所测得的模态参数往往要受到随机信号和噪声的影响,且建筑钢结构的施

工和使用有其特点,使得该方法的应用还存在很多技术上的问题亟待进一步研究。

(3)利用荷载-体积改变曲线进行壳体的失稳监测,该方法仅对壳体结构有效,而壳体体积的测量在技术上还存在相当大的难度。

(4)利用能够传感结构失稳先兆的装置或部件,对结构失稳进行监测也主要是通过结构关键部位布置失稳监控装置或部件来传递失稳先兆,它可以实现失稳监测和控制一体化。

参考文献:

References:

- [1] SINGER J. Recent Studies on the Correlation Between Vibration and Buckling of Stiffened Cylindrical Shells [J]. Flight Science and Space Research, 1979, 3(6): 333-343.
- [2] SINGER J, PRUCZ J. Influence of Initial Geometrical Imperfections on Vibrations of Axially Compressed Stiffened Cylindrical Shell [J]. Journal of Sound and Vibration, 1982, 80(1): 117-143.
- [3] 雷勇军,唐国金,卓曙君,等. 复合材料圆柱壳失稳载荷的振动监测[J]. 实验力学, 2003, 18(3): 383-388.
LEI Yong-jun, TANG Guo-jin, ZHUO Shu-jun, et al. Determination of the Buckling Loads of Composite Cylindrical Shells by Vibration Inspecting [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2003, 18(3): 383-388.
- [4] 钱基宏. 薄壳失稳机理浅析 [J]. 计算力学学报, 2003, 20(3): 366-371.
QIAN Ji-hong. A Buckling Research of Thin Shells [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2003, 20(3): 366-371.
- [5] 黄声享,刘经南,柳响林. 小波分析在高层建筑动态监测中的应用 [J]. 测绘学报, 2003, 32(2): 153-157.
HUANG Sheng-xiang, LIU Jing-nan, LIU Xiang-lin. Deformation Analysis Based on Wavelet and Its Application in Dynamic Monitoring for High-Rise Buildings [J]. Journal of Surveying and Mapping, 2003, 32(2): 153-157.
- [6] KHAN M R, AKANDA M A, UDDIN M W. A New Approach to Instability Testing of Shells [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1998, 75(1): 75-80.
- [7] 罗树青. 新型抑制屈曲支撑在结构失稳监测中的应用 [D]. 上海: 同济大学, 2005.
LUO Shu-qing. The Application of New-Style Buckling Restrained Braces in Structure Instability Monitoring [D]. Shanghai: Tongji University, 2005.