**附件2**

**起重机械金属结构应力测试技术规范**

**编制说明**

起重机械应力测试工作是起重机械安全评估工作的重点内容，它能直接反映出结构的强度与疲劳性能。目前不同机构在实施应力测试工作时存在无标准可依的情况，导致测试内容不尽相同，产生了一定的分歧。广州特种机电设备检测研究院长期从事起重机械安全评估工作，在应力测试方面积累了丰富的经验。为统一测试过程，规范测试手段，撰写此标准。

# 1 前言

世界经济全球化促进了国际贸易的迅速发展，而其中90％以上的国际贸易量是通过水路运输来完成的。考虑运输的经济性，船舶趋向大型化和专业化，使码头起重机朝着重型、高速、专业化方向发展，目前大型集装箱桥吊的起重量达已到65t，外伸距接近70m，而金属结构的重量通常占整机重量的60%-70%。对于大型港口机械，如各类装卸桥，金属结构的比重甚至上升到80%-90%。起重机出现安全事故小则造成经济损失，大则出现人员伤亡，而设备的大型化使人们对安全性问题更为重视，但是令人遗憾的事情还是时有发生。如1987年8月上港7区(今上海煤炭装卸公司)1台大型卸煤机主臂架突然断裂造成灾难性破坏；1995年香港友联公司1台40t41m多用途起重机臂架系统突然断裂失效；1997年3月山东日照港1台16/25t门座起重机突然臂架折断。上述事故大部分都在正常作业状态下发生，造成人员伤亡及巨大的经济损失。事后调查表明绝大部分事故是由于金属结构失效引起的。原武汉交通科技大学物流技术与装备CAD/CAE研究所，根据武汉汉阳港、厦门东渡港和广州新港42台门座起重机的抽样调查，在所发生的141次故障中，折断故障占到5.67%。

随着国内大量起重机超过使用期限，部分使用甚至达到40年，对这类起重机进行安全评估势在必行。目前国内标准对安全评估有规定，其中涉及到对起重机金属结构进行应力测试，以此来判断结构的强度情况。实际应用过程中，国内安全评估机构进行应力测试时，根据力学原理分析或有限元分析确定测试点的位置和数量，操作起来自成一家，导致评估质量下降。起重机自重本身也产生较大的应力，因综合起来得出应力测试结论，由于无标准，其过程较为混乱。导致即使通过应力测试获取了精度较高的动态应力时间历程，但由于不综合考虑自重应力的影响，其结论准确性常受到质疑。DB35/T 953对土方机械，如轮胎式装载机车架、挖掘机和挖掘装载机工作装置应力测试方法进行规范。国内目前无标准对起重机应力测试方法进行技术规范。

# 2 目的和意义

起重机金属结构安全性评价的基础是结构诊断状况，即需要现场实测。以获取起重机结构的物理状况如结构的应变时间历程、整体或局部变形、板厚变化、裂纹长度、结构锈蚀情况等。其中采集结构的应变时间历程是判断结构强度主要的手段，目前而言国内各安全评估机构，在对起重机进行安全评估过程中都要求进行应力测试。应力测试主要采用的传感器有电阻应变版、光纤光栅等，技术手段较为成熟，测试精度较高。起重机结构复杂，应力分布不均，不同工况下不同位置应力差异较大，如何布置测试点能全面的反应出起重机结构的强度，目前尚未有标准进行规范。应力测试已经广泛应用到大量老旧机的评估过程，其结果对安全评估结果有较大影响。各评估机构在进行应力测试过程中，对于同样机型的设备，常出现测试工况不尽相同、测试位置不同、测试点数量不一致，甚至测试结果偏差较大的情况。原因就是测试过程中无参考标准，无技术规范。起重机自身质量较大，目前应力测试手段测量由自重产生的应变十分困难。给出测量结果时，应考虑自重对其结构的影响。

本标准的制定基于目前现状推出，主要目的是对起重机金属结构应力测试进行技术规范，确保测试结果的准确性、可重复性。

# 3 关于标准条款的解释说明

3.1 标准中3.4关于自重应力的名词解释的必要性说明，由于常规的应力测试技术无法测量到结构的静态应力，而自重应力并非一个成熟的概念，但对于本标准而言非常重要，因此进行了相关的解释。

3.2 标准中4.1规定了标准规定的是现场的应力测试实验，强调现场的目的是因为现场环境中自重应力无法通过测试获得，而实验室则是有可能的。因此标准的相关条件不适用于在实验室内进行的应力测试实验。

3.3 标准中5.1规定了测试的原则是测试方案应能反映起重机械整体结构强度，标准中对测试工况给出参考。工况设计的原则是尽可能使所有测试点出现正常作业过程中可能产生的最大应力值。

3.4 标准中5.3提出测试结论应综合考虑结构的自重应力，对起重机械而言其自重较大，在结构上产生的应力不可忽视。仅通过动态应力来判定结构的强度是错误的。

3.5标准中5.4中说明了本标准应力测试过程不考虑结构局部应力集中、焊接残余应力，以及板件的内部残余应力，仅针对结构上的宏观应力。原因是应力测试技术手段的局限性导致的。结构的安全性受到应力集中、残余应力影响也是不可忽视的。本标准中规定应力测试结果不考虑这些因素的原因在于起重机械结构设计过程中采用安全系数法。安全系数法计算出许用应力是小于材料的强度极限的，这个过程已经考虑了残余应力和大部分应力集中对结构的影响。所以用宏观应力与许用应力比对是可以反映起重机械结构强度性能的。

3.6 标准中7.3关于采样率的规定，起重机械振动频率并不高，50Hz的标准一般测量仪器都能做到，过高则意义不大。因此规定此值。

3.7 标准中7.5提出仪器设备应具有较高的抗干扰性，保证其在起重机械现场环境中的测试性能。实践表明，现场测试过程对讲机产生较大的干扰，起重机机房内也存在一定的干扰信息。为保证测试结果的准确性，规定此条。

3.8 标准中8.1.2中给出了常见机型的主要受力构件，目的是规范应力测试的对象，以保证测试结果的具有现实意义。

对于一次应力测试，原则上应能反映出整体结构的的应力分布情况。其采集的应力数据应足够，以全面的评价结构的强度。起重结构部件较多，不同的部件在不同工况下所受到的力是不同的，标准中给出主要受力构件是要求在实际应力测试中进行测试的。

3.9 标准中8.2详细说明了测试布点的原则，给出了常见结构的受力图，以作为设计测试方案时的参考。

起重机械结构复杂，测试布点的原则是以最少的测试点来反映结构的整体应力分布情况。这要求测试人员有一定的理论基础，首先从理论上分析出结构的应力危险区域，从而减少测试点的数量，达到不影响测试结果又能节约应变片的目的。标准中给出了相关受力分析图以作为参考。

3.10 标准中8.3关于传感器的方向作为了规定，以保证测试实施过程正确，测试结果准确。由于测试人员的素质问题，如果贴片方面不正确，则会得到错误的数据。

3.11 标准中8.4中规定对于现场无法贴片的测试点，应采用理论分析手段评估强度性能。因此理论分析可以应用于应力测试，但仅针对无法贴片的部位。实际的应力测试不可避免会碰到这种情况，放弃这些测试点，会使测试结果缺失，失去代表性。

3.12 标准中第9章设计的总体原则是在不进行破坏性测试的前提下，尽可能使结构内部产生最大应力，以体现结构的强度性能。相关数据来自其它标准、专家。

附录C中关于门式起重机的动载荷测试工况设计分为6步，第6步回归到第1步的状态，其目的是为了观察传感器的归零情况，以此判断应力测试是否准确。第2步中，要求以最大加速度起升载荷离地是为了给结构产生最大的冲击力，以评判结构的强度性能。第3步中，小车以最大加速度启动运行，加速至额定速度后，以最大制动力停止于主梁跨中。这一操作过程可以检验结构在横向惯性力与重力共同作用下的强度情况。此后，小车反方向加速并制动，是从另一个方向施加最大惯性力，引起结构在不同位置上产生最大应力。第4步中，下降制动也是以最大加速度实施，目的也是在结构上产生最大应力。第5步中，大车、小车同时动作，这也是起重机实际作业经常运用的工况，均以最大加速度实施的目的也是为了在结构上产生最大应力值。

附录C中关于门座式起重机的动载荷测试工况设计分为7步，第7步回归到第1步的状态，目的是为了观察传感器的归零情况，以此判断应力测试是否准备，传感器工作是否正常。各步骤中所有机构的动作均在最大加速度下进行。第5步中，在额定载荷对应的最大幅度上以最大加速度在2个相反的方向上各完成2周回转动作。执行过程中在臂架系统与大车轨道成45°、135°、225°和315°夹角位置至少进行一次最大加速度制动停止。此过程可以全面测试门座式起重机整体结构。第6步中，臂架成45°夹角运行大车的目的是使结构在这一过程中产生最大的应力。

附录C关于桥式起重机的动载荷测试工况设计类似门式起重机。设计的原则也是尽可能全面的测试到结构的所有测试点。

附录C中建议所有工况在最大工作风压的气候条件下进行，目的也是为了进一步保证结构上出现实际作业过程中可能出现的最大应力。但此条件比较难以实现，因此不作硬性要求。

3.13 标准中第10章详细了说明了自重应力的获取方式，规定了进行自重应力计算工具及人员应具备的条件，强调的是自重应力应作为应力测试的数据进行结构的强度评定。一般认为进行应力测试应以仪器测量作为手段，以保证测试结果的客观性。理论计算结果因模型简化、人员技术水平影响较大，将理论计算结果引入应力测试过程确实带来了新的误差。但考虑实际情况，起重机械存在大量的危险区域处于人类不可到达处，实际操作过程中贴片非常困难，因此而放弃这些区域的评估是错误的。为此折中的选择理论计算来补充应力测试的不足是唯一可行的方法。目前来讲，大型有限元分析软件的分析结果具有较高的准确度。同时综合分析、对比理论分析结果与实际测试结果，也能验证实际测试结果的准确性，起到互相促进的作用。

3.14 标准中11.4.1 标准中优先采用Miner线性累积损伤理论进行疲劳性能评估，这一理论在汽车行业得到广泛应用，较为成熟。Miner线性累积损伤理论认为材料的疲劳破坏是由于循环载荷的不断作用而产生损伤并不断积累造成的。疲劳损伤累积达到破坏时吸收的净功W与疲劳载荷的历史无关，并且材料的疲劳损伤程度与应力循环次数成正比。应力测试的数据也便于实施这一计算方法。

# 4 关于引用和参考标准的说明

GB/T6974.1—2008起重机 术语 第1部分:通用术语：标准中涉及的专有名词可参考此标准中的术语定义。

GB/T 3811-2008 起重机设计规范：标准中关于自重应力的理论计算方法参考了此标准的第5章。疲劳分析方法参考了此标准的5.8节。

TSG Q7002-2007 桥式起重机型式试验细则：标准中工况的设计参考了此标准。

起重机械应力测试涉及多方面的内容，编写标准草案的过程中引用的标准如下。

DB44/T 830-2010 桥式起重机安全性能评估

GB/T 3811-2008 起重机设计规范

GB 6067.5-2014 起重机械安全规程 第5部分：桥式和门式起重机

GB/T 14405-2011 通用桥式起重机

GB/T 14406-2011 通用门式起重机

GB/T 29560-2013 门座起重机

GB/T 30024-2013 起重机 金属结构能力验证

GB/T6974.1—2008起重机 术语 第1部分:通用术语

JB/T 7688.1-2008 冶金起重机技术条件—通用要求

TSG Q0002-2008 起重机械安全技术监察规程—桥式起重机

TSG Q7002-2007 桥式起重机型式试验细则

TSG Q7015-2016 起重机械定期检验规则

TSG Q7016-2016 起重机械安装改造重大维修监督检验规则

# 5 起重机械金属结构应力测试应遵循的原则

可重复性原则

起重机械金属结构应力测试结果应具有重复性，做到不同的人进行应力测试工作得到的结果和结论应是一致的。不同的人进行理论分析，得到结果应该是一致的。

节约原则

进行起重机应力测试应尽可能减少测试布点，但又能全面反映结构的整体性能。这要求测试人员能准确找出结构上的危险点，要求测试人员具有扎实的理论知识。起重设备造价高昂，应力测试过程应尽可能减少设备动作，减少测试过程占用的时间，尽可能不影响实际生产活动，但又要求能全面体现结构各处的最大应力值。标准中相关条款的设计正在基于此原则，体现了节约原则。

技术成熟原则

应力测试全部采集成熟且广泛应用的技术方法，以提高测试结果的准确性，使测试过程便于实施。