



XXXXXXXX-20XX

中国钢结构协会标准

预应力钢结构索力动力测试与评价标准

Standard for dynamic testing and evaluation of cable
forces in prestressed steel structures

中国XX出版社

前 言

根据中国钢结构协会文件《关于发布中国钢结构协会2026年第一批团体标准编制计划的通知》（中钢构协〔2026〕16号），《预应力钢结构索力动力测试与评价标准》作为协会团体标准立项。标准编制组经过深入调查研究，认真总结工程实践经验，参考有关国际标准和国外先进标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本标准。

本标准共分为8章，主要技术内容包括：总则；术语；基本规定；动力测试设备、测点布置与数据采集；频率识别与模态参数提取；单索索力评价；连续索结构索力评价；检测结果评价与检测报告。

请注意本标准的某些内容可能直接或间接涉及专利，本标准的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本标准由中国钢结构协会预应力专业委员会归口管理，由中冶建筑研究总院有限公司负责具体技术内容的解释。本标准在使用中如有需要修改或补充之处，请将有关资料和建议寄送解释单位（地址：北京市海淀区西土城路33号，邮编：100088），以供修订时参考。

本标准主编单位：中冶建筑研究总院有限公司

广州市建筑集团有限公司

本标准参编单位：清华大学

中建研科技股份有限公司

中交公路长大桥建设国家工程研究中心

北京市建筑设计研究院股份有限公司

杭州市交通运输发展保障中心

柳州欧维姆机械股份有限公司

广东虎门大桥管理公司

本标准主要起草人员：

目 录

1	总则.....	1
2	术语.....	2
3	基本规定.....	4
3.1	一般规定.....	4
3.2	检测分类.....	5
3.3	现场检测条件.....	6
3.4	检测方案制定.....	6
3.5	质量控制.....	7
4	动力测试设备、测点布置与数据采集.....	9
4.1	测试设备与性能要求.....	9
4.2	激励方式.....	10
4.3	测点布置原则.....	11
4.4	采样参数设置.....	13
5	频率识别与模态参数提取.....	15
5.1	时程预处理.....	15
5.2	频谱分析方法.....	16
5.3	非平稳信号分析与增强方法.....	17
5.4	固有频率识别与模态阶次确定.....	18
5.5	异常频率剔除与复核.....	20
6	单索索力评价.....	22
6.1	一般规定.....	22
6.2	计算参数确定.....	22
6.3	索力计算.....	24
6.4	修正方法.....	26
7	连续索结构索力评价.....	28
7.1	一般规定.....	28
7.2	边界条件及计算参数确定.....	28
7.3	结构影响修正.....	29
7.4	索力计算.....	30
8	检测结果评价与检测报告.....	33
8.1	评价指标.....	33
8.2	索力偏差评价.....	34
8.3	索力离散性评价.....	35
8.4	复测与对比评价.....	36
8.5	检测报告内容与格式要求.....	37
	引用标准名录.....	39

Contents

1	General Provisions	1
2	Terms	2
3	Basic Requirements	4
3.1	General Requirements	4
3.2	Classification of Testing	5
3.3	Conditions for Field Testing	6
3.4	Preparation of Testing Plan	7
3.5	Quality Control	8
4	Dynamic Testing Equipment, Measurement Point Arrangement and Data Acquisition	9
4.1	Testing Equipment and Performance Requirements	9
4.2	Excitation Methods	10
4.3	Principles for Measurement Point Arrangement	11
4.4	Sampling Parameter Settings	13
5	Frequency Identification and Modal Parameter Extraction	15
5.1	Time-History Preprocessing	15
5.2	Spectral Analysis Methods	16
5.3	Non-stationary Signal Analysis and Enhancement Methods	17
5.4	Natural Frequency Identification and Determination of Modal Order	18
5.5	Rejection and Verification of Abnormal Frequencies	20
6	Cable Force Evaluation for Single Cables	22
6.1	General Requirements	22
6.2	Determination of Calculation Parameters	22
6.3	Cable Force Calculation	24
6.4	Correction Methods	26
7	Cable Force Evaluation for Continuous Cable Structures	28
7.1	General Requirements	28
7.2	Boundary Conditions and Determination of Calculation Parameters	28
7.3	Correction for Structural Effects	29
7.4	Cable Force Calculation	30
8	Evaluation of Test Results and Test Report	33
8.1	Evaluation Indices	33
8.2	Evaluation of Cable Force Deviation	34
8.3	Evaluation of Cable Force Dispersion	35
8.4	Repeated Testing and Comparative Evaluation	36

8.5 Contents and Format Requirements of Test Report	37
List of Referenced Standards	39

1 总则

1.0.1 为规范预应力钢结构拉索动力测试、振动特征分析及索力评价，统一技术要求，保证检测成果的科学性、准确性和可比性，制定本标准。

【条文说明】预应力钢结构索力是反映结构受力状态的重要参数，其测试结果直接影响结构性能评价和安全鉴定。为规范索力动力测试过程中的测试方法、数据处理及评价要求，提高检测结果的科学性和准确性，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于预应力钢结构（含弦支穹顶结构、张弦结构、预应力空间网格结构、斜拉桥及设置体外预应力体系的钢桥等）中拉索索力的动力测试与评价工作，指导索力动力测试从方案制定、现场检测、数据处理到结果评价的全过程质量控制。

【条文说明】预应力钢结构中的拉索索力是反映结构受力状态的重要参数，其测试结果直接影响结构性能评价和安全状态判断。由于拉索动力测试涉及测试方案制定、现场检测、数据采集、数据处理以及结果评价等多个环节，为保证检测工作的规范性和评价结果的可靠性，本条明确了标准的适用范围，并对全过程技术要求进行了规定。

1.0.3 预应力钢结构索力动力测试与评价除应符合本标准的规定外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

【条文说明】预应力钢结构拉索索力动力测试与评价涉及结构设计、施工、检测、监测、索结构技术及仪器测量等多个专业领域。本标准在编制过程中，与现行国家标准《工程结构通用规范》GB 55001、《钢结构通用规范》GB 55006、《钢结构设计标准》GB 50017、《钢结构工程施工质量验收标准》GB 50205、《建筑结构检测技术标准》GB/T 50344、《钢结构现场检测技术标准》GB/T 50621、《建筑与桥梁结构监测技术规范》GB 50982 以及现行行业标准《索结构技术规程》JGJ 257、《预应力钢结构技术标准》JGJ/T 497 等有关规定进行了协调。对于涉及公路桥梁结构动力测试的相关技术要求，可结合现行行业标准《公路桥梁荷载试验规程》JTG/T J21-01 的有关规定执行。

2 术语

2.0.1 预应力拉索 prestressed cable

通过张拉施加预应力，并在结构中承担轴向拉力的钢制受拉构件，包括钢绞线索、钢丝束索、平行钢丝索及其他具有类似受力特征的预应力钢索。

2.0.2 索力 cable force

预应力钢索在其轴线方向所承受的拉力。

2.0.3 索力动力测试 dynamic testing of cable force

通过测试预应力钢索的振动响应，识别其固有频率等动力特征，并结合索体几何参数、材料特性及边界条件反演确定索力的测试方法。

2.0.4 频率法 frequency method

以预应力钢索实测固有频率为主要动力参数，根据拉索振动理论或相应动力学模型计算索力的方法。

2.0.5 接触式频率法 contact frequency method

通过在索体上安装接触式振动传感器获取振动响应，并根据识别得到的固有频率计算索力的方法。

2.0.6 非接触式频率法 non-contact frequency method

采用激光测振、计算机视觉或其他非接触微动测量技术获取索体振动响应，并根据识别得到的固有频率计算索力的方法。

2.0.7 固有频率 natural frequency

预应力钢索在一定质量、刚度、索力及边界条件下自由振动所具有的特征频率。

2.0.8 基频 fundamental frequency

预应力钢索各阶固有频率中的最低阶频率。

2.0.9 边界条件 boundary condition

索体端部或中间支承对其位移、转动及振动传递所形成的约束条件。

2.0.10 计算长度 effective length for cable force calculation

用于索体动力分析和索力计算的有效振动索段长度，其起止点应根据索体实际振动边界确定。

2.0.11 名义长细比 nominal slenderness ratio

用于表征索体轴向张力与抗弯刚度相对关系，并辅助判断抗弯刚度及边界约束对索体振动特性影响程度的无量纲参数。

2.0.12 连续索 continuous cable

同一根预应力钢索跨越一个或多个中间支座、鞍座或转向装置，形成两个或多个连续跨段的索体系。

2.0.13 跨间动力耦合 inter-span dynamic coupling

连续索相邻跨段之间通过中间支承发生振动能量传递和动力相互作用，使一个跨段的振动响应受到其他跨段影响的现象。

2.0.14 索力实测代表值 measured representative cable force

根据有效测试结果和相应索力计算方法确定的,用于索力状态评价和结果比较的代表性索力值。

2.0.15 索力偏差 cable force deviation

索力实测代表值与相应基准索力值之间差异的相对量。

2.0.16 索力离散性 cable force dispersion

同组或具有相近受力特征的索体之间索力分布的不均匀程度。

2.0.17 复测对比评价 repeated-test comparison evaluation

将本次索力测试结果与初始状态或历史测试结果进行比较,评价索力随时间变化特征的方法。

2.0.18 索力评价 cable force evaluation

依据索力实测结果及其偏差、离散性、历史变化等信息,对拉索索力状态进行分析和判定的过程。

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 本标准规定了预应力钢结构拉索索力动力测试与评价的检测方案、测试设备、测点布置、数据采集、频率识别与模态参数提取、索力计算、结果评价及检测报告等技术要求。

【条文说明】本标准适用的动力测试方法包括频率法（含振动频率法、频谱分析法等）及其他基于结构动力响应原理的索力测试方法。

3.1.2 预应力钢结构有下列情况之一时，宜进行拉索索力测试与评价：

- 1 施工阶段需进行张拉施工质量检验或验收时；
- 2 使用阶段需掌握拉索实际受力状态或开展定期检测时；
- 3 结构健康监测中需对拉索索力状态进行评估时；
- 4 拉索、锚固节点或相关结构构件出现异常，需进一步判断拉索受力状态时；
- 5 结构经过改造、加固、荷载调整或其他可能引起索力变化的情况时；
- 6 设计文件或其他相关技术文件要求进行索力测试与评价时。

【条文说明】本条规定了预应力钢结构拉索宜进行索力测试与评价的主要情形。拉索索力是反映结构受力状态、施工质量及服役性能的重要参数，在施工张拉、使用维护和结构状态变化等不同阶段均可能存在测试与评价需求。施工阶段通过索力测试可对张拉施工质量及实际受力状态进行检验；使用阶段及结构健康监测过程中，可通过索力测试掌握拉索实际受力状态及其变化情况；当拉索、锚固节点或相关结构构件出现异常，或结构发生改造、加固及荷载调整等可能引起索力变化的情况时，进行索力测试有助于分析结构受力状态并为后续处置提供依据。此外，对设计文件或其他相关技术文件明确提出索力测试要求的工程，也应结合相应要求开展测试与评价。本条所列情形主要用于明确索力测试与评价的适用条件和实施需求。

施工阶段、使用阶段及结构健康监测阶段的索力测试需求，还应分别与现行行业标准《预应力钢结构技术标准》JGJ/T 497、现行国家标准《建筑与桥梁结构监测技术规范》GB 50982 以及现行协会标准《预应力结构诊治技术规程》T/CECS 1363 的有关要求相协调。

3.1.3 索力检测活动应由具备相应资质和能力的检测机构承担。从事索力测试的现场操作人员与数据分析人员应经过专业技术培训，并具备相应的工程实践经验。

【条文说明】索力检测工作涉及现场测试、数据采集、信号分析、索力反演及结果评价等多个技术环节，对检测机构的技术能力、人员素质、仪器设备及质量管理具有较高要求。检测机构在人员、设备、方法确认、测量溯源性、技术记录以及结果报告等方面的质量管理，可参照现行国家标准《检测和校准实验室能力的通用要求》GB/T 27025 的有关规定执行。

3.2 检测分类

3.2.1 按检测目的，索力动力测试可分为下列三类：

- 1 施工阶段索力检测：用于验证张拉施工质量，确保实测索力达到设计控制值的要求；
- 2 使用阶段索力检测：用于评估既有结构索力状态与运营安全性能；
- 3 结构健康监测：用于对关键索体多个测点开展同步实时监测，或按照设定时间间隔开展周期性、多时刻索力检测与状态评估。

【条文说明】索力动力测试的目的不同，其检测内容、评价要求及技术重点也存在差异。施工阶段索力检测主要用于验证张拉施工质量，确保实际索力满足设计控制要求；使用阶段索力检测主要用于掌握既有结构索力状态，评价结构服役性能和安全状态；结构健康监测则侧重于对关键索体进行长期、连续或准连续状态跟踪。因此，本条根据检测目的对索力动力测试进行分类，以满足不同阶段结构性能评价的需求。

对采用长期、连续或周期性监测方式开展索力状态跟踪的工程，监测系统布置、数据采集和状态分析还可参照现行国家标准《建筑与桥梁结构监测技术规范》GB 50982 和现行协会标准《大跨度钢结构监测技术规程》T/CECS 1339 的有关规定。

3.2.2 按检测范围和深度，索力动力测试可分为下列三类：

- 1 全面检测：对结构系统内的全部索体进行普遍性测试；
- 2 抽样检测：按统计学原则选取具有代表性的索体进行抽样测试；
- 3 专项检测：针对结构存在特定缺陷、受力异常或特殊力学问题开展的针对性测试。

【条文说明】索力动力测试的检测范围和深度应根据工程实际需求、结构重要性以及检测目的确定。全面检测适用于需要掌握整体索力状态的情况，能够反映结构系统内全部索体的受力情况；抽样检测依据统计学原则选取具有代表性的索体，在保证评价可靠性的同时提高检测效率；专项检测主要针对存在缺陷、受力异常或特殊力学问题的结构，通过针对性测试分析异常原因。因此，本条按照检测范围和深度对索力动力测试进行分类，为检测方案制定提供依据。

3.2.3 按测试技术路线与感知方式，索力动力测试可分为下列两类：

- 1 接触式频率法：通过在索体表面安装接触式传感器获取振动信号，提取自振频率并推算索力；
- 2 非接触式感知法：利用激光多普勒测振仪或其他方法的微动测量设备获取响应信号，提取自振频率并推算索力。

【条文说明】索力动力测试方法的发展主要基于结构动力响应特征，通过获取索体振动信号并识别其动力参数实现索力间接测定。接触式频率法通过安装传感器直接获取索体振动响应，具有测试方法成熟、适用范围广等特点；非接触式感知

法利用激光多普勒测振或计算机视觉等技术获取振动信息,可避免传感器附加质量对结构动力特性的影响,适用于高空索体或对测试扰动要求较高的场景。

3.3 现场检测条件

3.3.1 实施现场检测前,应收集并查阅下列技术资料:设计图纸、计算书、施工张拉记录、历史检测及监测报告,以及索体与相关构件的产品合格证明文件。

【条文说明】索力动力测试前收集相关技术资料,是保证检测方案合理制定和测试结果准确评价的重要基础。设计图纸、计算书可为索体参数、结构受力状态及理论索力分析提供依据;施工张拉记录能够反映索体初始张拉状态;历史检测及监测资料有助于掌握结构性能变化趋势。因此,本条规定检测前应收集并查阅相关技术资料,以保证现场检测工作的针对性和有效性。对施工阶段索力检测,施工张拉记录、索体安装及张拉工艺等资料宜结合现行行业标准《预应力钢结构技术标准》JGJ/T 497和现行协会标准《建筑索结构工程施工标准》T/CECS 1341的有关要求进行核查。

3.3.2 测试现场的环境与作业条件应符合下列规定:

- 1 现场应具备确保测试人员操作安全及仪器正常运转的空间条件;
- 2 环境温湿度应处于所用仪器设备规定的正常工作范围内;
- 3 严禁在雷雨、大风等恶劣天气条件下开展室外无防护的索力测试作业;
- 4 测试环境应尽量避免强烈的受迫振动干扰源。

【条文说明】索力动力测试结果易受到现场环境条件和作业条件的影响。检测现场应具备满足人员操作安全和仪器正常运行的空间条件,环境温湿度应控制在设备正常工作范围内,以避免环境因素影响测试精度。雷雨、大风等恶劣天气可能导致人员安全风险增加,同时引入较强外部振动干扰,影响索体动力响应识别。因此,本条对现场检测环境及作业条件提出要求,以保证测试过程安全可靠和检测数据有效。

3.3.3 被测索体的表观状态应满足下列要求:

- 1 索体表面应保持清洁,传感器安装部位或非接触测量光束照射部位不得有明显的油污或严重锈蚀;
- 2 索体的外保护套管不得松动或脱落;
- 3 对于安装有阻尼器等减振装置的索体,必须详细记录减振装置的类型、安装位置及表观状态。

【条文说明】被测索体的表观状态会直接影响振动信号的获取质量。索体表面的油污、锈蚀或防护套管异常可能影响传感器安装稳定性或非接触测量信号质量;减振装置的类型和安装状态会改变索体动力响应特性。因此,本条要求检测前对索体表观状态进行检查,并记录相关附属装置信息,以保证测试结果能够真实反映索体动力特性。

3.4 检测方案制定

3.4.1 开展索力检测前，必须制定详细的检测方案。检测方案宜包含下列 10 项内容：

- 1 工程概况；
- 2 检测目的与判定依据；
- 3 检测范围及抽样原则；
- 4 技术路线与具体测试方法；
- 5 仪器设备配置及其校准状态；
- 6 测点与测站布置方案；
- 7 数据采集与信号处理参数设置；
- 8 索力计算方法及关键参数取值依据；
- 9 质量保证与数据复核措施；
- 10 安全防护与应急预案。

【条文说明】索力检测方案是开展现场检测工作的技术依据，检测方案的完整性和合理性直接影响检测过程的实施效果以及评价结果的可靠性。由于索力动力测试涉及工程信息分析、检测方法选择、仪器设备配置、数据采集处理及结果评价等多个环节，因此本条对检测方案应包含的主要内容进行了规定，以保证检测工作的系统性、规范性和可追溯性。检测方案的检测范围、抽样原则、现场检测程序及检测结果记录等内容，可结合现行国家标准《建筑结构检测技术标准》GB/T 50344 和《钢结构现场检测技术标准》GB/T 50621 的有关规定确定。

3.4.2 现场检测实施前，应根据实际工程条件对被测索体、检测范围及测点位置进行核对；现场条件与检测方案不一致时，应对检测方案进行相应调整并做好记录。

【条文说明】现场实际条件可能因索体布置、构造形式、施工状态、现场障碍及作业条件等与检测方案制定时掌握的资料存在差异，从而影响检测范围、测点位置及测试方法的实施。因此，正式检测前应对被测索体及现场条件进行核对，确认检测对象、检测范围和测点布置与检测方案相符。发现现场条件发生变化或原方案难以实施时，应结合实际情况对检测方案进行合理调整，并对调整内容及原因做好记录，以保证检测工作的可实施性和测试结果的可追溯性。

3.4.3 对于跨度较大、受力机制复杂的大型空间结构，或边界条件特殊的结构，在正式开展全面检测前，宜通过数值分析、试验验证、现场预检测或试测等方式，对检测方案进行验证，并根据验证结果优化测试方法、测点布置及数据采集参数。

【条文说明】对于跨度较大、受力机制复杂或边界条件特殊的索结构，其动力响应特征可能受到结构体系、约束条件及测试环境等因素影响，常规检测方案难以直接保证测试效果。因此，在正式开展全面检测前，通过预检测或试测对检测方法、测点布置、数据采集参数等进行验证和优化，可以提前发现测试过程中可能存在的问题，提高检测方案的适用性和检测结果的可靠性。

3.5 质量控制

3.5.1 测试所用仪器设备应性能稳定、工作正常，并应具有有效的标定或校核依据。现场测试前，应根据设备类型进行必要的功能检查和标定；接触式传感器宜进行零点核查和灵敏度校验，非接触式设备宜进行测量性能、对焦及信号响应核查。

【条文说明】索力动力测试结果的准确性与仪器设备性能状态密切相关。由于动力测试过程中所获取的振动信号通常较为微弱，仪器设备的测量误差、零点漂移及灵敏度变化均可能影响测试结果。

3.5.2 索力动力测试应采取重复测试、现场数据质量检查及结果复核等措施进行质量控制。同一索体宜进行不少于3次独立有效测试，各次测试宜在相近的测试条件下完成，并应对测试结果的稳定性和复现性进行检查。

【条文说明】索力动力测试过程中，现场环境干扰、仪器状态变化及偶然因素均可能导致测试结果产生波动。通过同一索体的多次独立测试，可利用重复性分析评价测试数据稳定性，并降低偶然误差对结果的影响。重复测试结果的统计分析可参照现行国家标准《测量方法与结果的准确度（正确度与精密度）第2部分：确定标准测量方法重复性与再现性的基本方法》GB/T 6379.2的有关原则执行。

3.5.3 测试获取的原始数据和现场记录应完整保存，不得随意删改。现场记录应包括被测索体、测点位置、测试时间、环境条件、仪器设备、采样参数和激励方式等与测试结果相关的信息，并保证测试数据可追溯。

【条文说明】原始测试数据是索力计算、结果复核及后续结构状态分析的重要依据。由于数据处理过程涉及频率识别、参数选取及索力反算等多个环节，任何数据缺失或处理过程不明确均可能影响评价结果的可信度。因此，本条要求完整保存原始数据，并对数据处理参数及关键计算过程进行记录，以保证检测结果具有可追溯性。

3.5.4 检测报告应采用统一的格式和编号规则，确保内容完整、数据准确。报告的审核、签字与批准流程应严格符合检测机构质量管理体系的相关要求。

【条文说明】检测报告是反映索力动力测试全过程及评价结果的重要技术文件，其内容完整性和规范性直接影响检测成果的应用价值。因此，本条规定检测报告应采用统一格式和编号规则，并明确审核、签字及批准流程应符合检测机构质量管理体系要求，以保证检测报告内容准确、完整，并满足工程应用和质量管理要求。

4 动力测试设备、测点布置与数据采集

4.1 测试设备与性能要求

4.1.1 索力动力测试系统宜由振动信号感知设备、信号调理器、数据采集装置和信号分析处理软件等组成。振动信号感知设备可选用接触式传感器或非接触式测量设备。

【条文说明】完整的索力动力测试是一项涉及物理量转换、模拟信号传输、模数转换及数字信号分析的系统工程。明确感知设备、信号调理、数据采集和分析软件四大模块，是为了确保振动信号在整个传输与处理链路中的保真度与可靠性。在现代工程测试中，即使采用了高度集成化的设备，这四个核心逻辑功能模块依然是不可或缺的。

4.1.2 接触式加速度传感器可采用压电式加速度传感器或微机电系统（MEMS）加速度传感器。传感器的频率响应范围、灵敏度、量程及横向灵敏度等性能指标应满足索体动力测试要求，并应与相应的供电、信号调理及数据采集装置相匹配。室外使用时，其防护性能应满足现场环境要求。

1 压电式加速度传感器宜采用 IEPE 型，并应配置相匹配的恒流源供电及信号调理装置。

2 微机电系统（MEMS）加速度传感器宜选用质量小、低频响应性能良好的产品，其供电方式、输出形式及数据采集装置应与传感器性能相匹配。

【条文说明】1 传感器类型选择：IEPE（集成电路压电式）加速度传感器内置信号放大电路，具备高信噪比、低输出阻抗及良好的抗干扰能力，传输距离长，是常规动力测试的优先选择；MEMS（微机电系统）加速度传感器具有体积微小、质量极轻的特点，附加质量效应极小，且具备响应低至 0Hz（直流响应）的特性，非常适用于轻柔短索或需要兼顾结构静态倾斜角测量的长期健康监测场景。

4.1.3 对于无法轻易到达的高空索体，或需避免传感器附加质量影响的极细拉索，宜选用激光多普勒测振仪（LDV）等非接触式激光频率测试设备。其技术性能指标应符合下列规定：

1 频率响应范围：下限不宜高于 0.5Hz，上限不宜低于最高阶分析频率的 1.5 倍；

2 测量分辨率：速度测量分辨率不应低于 10 μ m/s，或位移测量分辨率不应低于 1 μ m；

3 有效测量距离：最大有效工作距离不宜小于 30m，且在规定工作距离内应具备稳定获取微弱散射光信号的能力。测量时，激光束宜垂直于索体主要振动方向，当索体表面光学反射率不足时，应在索体表面张贴专用反光靶标以提高回波信号信噪比。

【条文说明】本条对激光非接触式振动测试设备的基本性能和功能配置提出要求。为便于远距离快速寻找并准确定位索体测点，设备宜配置摄像装置，实现测量目

标的可视化瞄准与辅助定位；宜配置电控云台，实现测量方向的远程调整和稳定控制。对于需要同步获取索体几何参数的测试场景，设备可集成测距和角度测量功能，通过测量目标点的距离、水平角和俯仰角等信息，确定测点的空间位置，并为索体长度、空间姿态、测点间距等几何信息的获取提供基础数据。上述功能宜与振动测试系统集成，实现测点定位、几何信息测量与振动响应采集的协同工作。

4.1.4 数据采集装置应满足以下规定：

- 1 模数转换器分辨率不宜低于 16 位；
- 2 最大采样频率不应低于最高频率分量的 5 倍。

【条文说明】本条对数据采集装置（模数转换与通道同步）的关键技术指标设定了明确下限，以保障动力学多参数识别的精度：

1 模数转换器分辨率：分辨率决定了系统能区分的最小信号变化量。16 位的分辨率可将电压量程细分为 $2^{16}=65536$ 个刻度，理论动态范围约达 96dB。这是在强背景噪声下提取索体微弱高阶模态频峰的最低数学门槛，低于此配置的低端采集卡将无法满满足索力高精度测试的需求。

2 过采样率：理论上采样频率达到分析频率的 2 倍即可恢复信号，但在实际数字信号处理中，为了在时域上真实还原瞬态冲击响应的波形（避免丢失真实的波峰幅值），工程实践中通常要求采样频率达到最高分析频率的 5 倍至 10 倍。

4.1.5 信号分析处理软件应具备：时域波形显示、频谱分析、频率峰值识别拾取、滤波和加窗预处理、数据导出和报告生成。

【条文说明】本条对数据采集装置（模数转换与通道同步）的关键技术指标设定了明确下限，以保障动力学多参数识别的精度。

4.1.6 测试所用仪器设备的性能、检定或校准应符合国家现行有关标准的规定。现场检测前，应确认测试系统工作状态和测试性能满足检测要求。

【条文说明】为保证测试数据的准确性和量值溯源性，测试所用仪器设备应根据其类型和性能要求进行检定、校准或性能核查。压电式加速度传感器的校准可按照现行国家标准《振动与冲击传感器校准方法 第 21 部分：振动比较法校准》GB/T 20485.21 及现行国家计量检定规程《压电加速度计检定规程》JJG 233 的有关规定执行；激光多普勒测振仪的校准可按照现行国家标准《振动与冲击传感器校准方法 第 41 部分：激光测振仪校准》GB/T 20485.41 及现行国家计量技术规范《激光测振仪校准规范》JJF 1219 的有关规定执行。现场检测前，还应结合测试设备类型、测试距离及现场环境条件，对测试系统进行整体功能检查和必要的现场核查。

4.2 激励方式

4.2.1 测试激励方式可分为环境激励、人工激励。

【条文说明】在动力测试中，要准确提取索体的固有频率，首要物理条件是结构必须获得足够的激振能量，以激发出信噪比满足要求的各阶模态响应。本条规定

参考现行行业标准《公路桥梁荷载试验规程》JTG/T J21-01-2015 中关于动载试验激振方式的相关规定,并结合当前索结构动力学测试技术的实际发展进行了分类扩充。

4.2.2 激励方式的选取及环境激励的有效性判识应符合下列规定:

1 当待测索体具有较好的环境振动响应,且预采集信号能够有效识别其主要自振频率时,宜采用环境激励方式,并可根据测试需要适当延长采样时长;

2 当预采集信号幅值较低、信噪比较差或无法有效识别主要自振频率时,应判定环境激励不足,宜采用人工激励方式进行测试。

【条文说明】环境激励是指利用结构在自然环境和正常使用条件下产生的振动响应进行动力测试,其激励来源可包括风荷载、地脉动、交通荷载、设备运行及人员活动等。对于大跨度、柔性较大的拉索,环境作用通常能够提供较为充分的振动能量;对于短索、刚度较大或环境较为平静的测试对象,环境激励可能不足以形成清晰的频率响应,此时宜采用人工激励方式提高测试信号质量。

4.2.3 人工激励宜按下列方式进行:

1 人工敲击法:采用橡胶锤或木锤对索体进行单次或连续多次敲击;

2 位移释放法:对索体施加特定的初始位移后突然释放;

3 激振器激振法:采用激振器对索体施加正弦扫频或随机连续激励。

【条文说明】人工敲击法规定采用橡胶锤或木锤,一方面是为了防止破坏预应力钢索表面的防腐涂层或 PE 护套;另一方面,较软的锤头材质具有较大的柔度,能够延长敲击接触(碰撞)时间,从而将激振能量集中在拉索测试所关注的低中频带内。激振器激振法是利用机电或电液设备向索体输入持续、可控动态激励力的专业测试手段,可按照预设的控制信号向拉索输出特定频率的纯正弦波(扫频)或包含连续频率成分的白噪声。

4.3 测点布置原则

4.3.1 测点位置的选取应符合下列规定:接触式传感器测量敏感方向宜垂直于索体轴线及主要振动方向;测点位置应避开索体端部的约束区域,距锚固端的距离不宜小于索长的 1/10;测点不应布置在预估振型的节点位置。当进行单测点测试时,宜布置在靠近索体中部的振幅较大区域。

【条文说明】测点位置的选取:测点布置应尽量避免避开振型节点和反节点处,以合理显示结构的振型形态。拉索在靠近锚固端区域,因受锚具自身体积、端部减振装置以及拉索抗弯刚度的影响,往往存在复杂的局部高频振动或边界效应,不能代表理论索段的整体动力行为。因此,规定测点需避开距端部 1/10 索长的区域。当仅进行单点基频测试时,将测点布置在波腹(跨中)可以获得最大的信噪比。接触式传感器的灵敏主轴方向必须与实际测量方向保持一致。若方向存在夹角,不仅会造成有效振动分量的幅值衰减,还极易混入结构其他方向的干扰信号。

4.3.2 每根索体的测点布置数量应按下列原则确定:

1 索长小于 20m 的短索,测点数量不宜少于 1 个;

2 索长在 20m 至 100m 之间的中长索，测点数量不应少于 2 个；

3 索长大于 100m 的长索，测点数量不应少于 3 个。

【条文说明】本条规定了不同长度索体及复杂索群测试时的最少测点数量，其核心理论依据在于避免结构模态的“振型节点效应”及满足复杂模态空间识别的需求。

对于长度小于 20m 的短索，其动力响应以低阶主导模态为主，高阶模态激发困难。只要将单测点布置在靠近跨中的腹点区域（避开偶数阶节点），通常即可获取足够的低阶频率用于索力反算。然而，对于 20m 以上的中长索及 100m 以上的长索，由于其长细比极大，高阶模态分布密集且必须被提取。如果仅布置单个测点，测点位置极易恰好落入某一关键高阶模态的振型节点（即位移振幅为零的点）附近，导致该阶频率在频谱中发生“漏拾”或幅值畸变。通过布置 2 个或 3 个以上且间距非等分的测点，可以从空间上确保无论何种模态，总有测点处于振幅较大的波峰区，从而通过多通道交叉比对确保各阶频率提取的完整性。在实际工程中，带有辅助交织索或共用同一柔性支撑结构的索群，极易发生跨索之间的能量传递与动力耦合。此时，频谱中会出现大量的系统整体耦合频峰。仅凭单测点的时间历程信号无法区分“单索局部模态”与“索群整体模态”。因此，必须适当增加测点数量，剔除环境或相邻索体引入的伪频率与耦合频率。

4.3.3 接触式传感器的安装应保证与索体被测表面紧密接触，且具备足够的安装刚度。安装方式宜按下列规定选用：

1 螺纹连接法：其频响特性与安装刚度最优，结构健康监测等长期在线测量场景宜优先选用；

2 磁吸座安装法：适用于表面平整且具备铁磁性材质的索体，宜用于短期的现场检测；

3 卡箍或绑带固定法：当不具备螺纹连接或磁吸条件时可采用此法。安装时应确保紧固力适度，既防止传感器发生相对滑动，亦避免对索体引入显著的附加刚度或约束；

4 粘接安装法：适用于特殊防护涂层或不规则表面，应采用高强度专用粘结剂，并确保粘结面清洁、密实。

进行正式数据采集时，严禁采用手持按压方式固定传感器。传感器电缆应沿索体妥善绑扎固定，避免因线缆自由晃动引发的摩擦静电效应或寄生噪声干扰。传感器安装完成后，应检查安装状态及信号传输情况，必要时可采用轻微激励方式验证测试通道工作状态。

【条文说明】本条规定了接触式传感器的安装工艺要求，旨在消除附加接触刚度与环境噪声的干扰。

4.3.4 非接触式激光法的测点及测站布置应符合下列规定：

1 靶标设置：当索体表面光学反射率不足时，应在测点位置平整、牢固地张贴专用反光靶标（反光贴）；

2 测站架设：激光测振仪主机应架设于稳固的基座或重型三脚架上，严禁放置在有明显环境受迫振动的平台上；

3 光路环境：测量光路必须保持通畅无遮挡，并应采取防眩光措施，避免强阳光或其他光源直射仪器接收镜头干扰信号。

【条文说明】采用激光非接触式设备时，待测点与激光发射接收设备的距离不宜大于 50m，且激光发射接收设备不宜处于待测预应力钢结构拉索的竖直平面内，以确保光路的稳定性和人员设备安全。当索体表面（如黑色护套）漫反射率极低时，回波光强不足会导致解调电路产生宽带底噪，此时张贴专用反光靶标是提升光学信噪比最有效且必须的手段。当采用激光测距、测角等方法同步确定测点空间位置、索体长度或空间姿态时，相关几何测量应符合现行国家标准《工程测量通用规范》GB 55018 的基本要求，测量精度应满足后续索力计算的需要。

4.3.5 多通道同步测试时应统一灵敏度设置，记录每个测点的索体编号、安装位置和测量方向。

【条文说明】多点激励或多通道测试时，应能较好地反映结构的动力特性并充分显示结构的模态振型。若各通道的灵敏度参数设置不统一，将导致空间振型幅值比例失真。

4.4 采样参数设置

4.4.1 数据采集的采样频率应根据索体动力特性和分析频率范围合理确定，并应符合下列规定：

- 1 采样频率应满足奈奎斯特采样定理，不应小于预估最高分析频率的 2 倍，宜取最高分析频率的 5 倍~10 倍；
- 2 常规索力动力测试的采样频率不宜低于 200 Hz；
- 3 需要进行高阶频率识别时，采样频率不宜低于 500 Hz；
- 4 采用非接触式设备进行测试时，采样频率应满足被测索体动力响应及信号处理要求。

【条文说明】采样频率是影响振动信号时域还原和频率识别准确性的关键参数。采样频率过低可能引起频率混叠，导致有效动力信息失真；适当提高采样频率有利于完整获取索体振动响应，并为后续频谱分析和信号处理提供充分的数据基础。对于需要识别高阶频率或采用非接触式设备进行测试的情况，应结合实际分析频带和信号特征合理提高采样频率。

4.4.2 数据采样时长应根据频率识别精度、激励方式及信号特征合理确定，并应符合下列规定：

- 1 采样时长应保证频率分辨率满足索力识别精度要求；
- 2 频率间隔宜小于相邻固有频率最小间隔的二分之一；
- 3 采用环境激励时，应保证采样时长能够获得稳定的振动响应，宜适当延长采样时间；
- 4 采用人工激励时，应保证完整记录索体的振动衰减过程。

【条文说明】采样时长直接影响频率分辨能力和频率识别的稳定性。采样时间过短时，频谱分辨率可能不足，难以区分相邻固有频率。环境激励下索体振动具有一定的随机性，宜通过较长时间采样提高频率识别的稳定性；人工激励下则应保证能够完整记录索体的振动衰减过程，以获得有效的动力响应数据。

4.4.3 数据处理中的滤波、窗函数及频谱平均参数应根据激励方式和信号特征合理设置，并应符合下列规定：

- 1 滤波参数应保证有效频率成分不发生明显衰减，并避免频率混叠；
- 2 处理环境激励下的随机振动信号时，宜采用汉宁窗；
- 3 处理人工瞬态激励下的衰减信号时，宜采用指数窗或矩形窗；
- 4 采用频谱平均方法时，平均次数应根据数据稳定性和信噪比合理确定。

【条文说明】滤波、窗函数及频谱平均等处理参数会直接影响频谱分析结果。合理设置滤波参数可抑制测试过程中的干扰成分，同时避免有效频率成分受到明显衰减；采用适当的窗函数可减小有限时长信号截断引起的频谱泄漏。环境激励信号具有随机振动特征，采用汉宁窗及频谱平均有利于提高频谱估计的稳定性；人工瞬态激励信号具有明显的衰减特征，可根据其信号特点选用指数窗或矩形窗。FFT 分析中窗函数的选取、窗函数特性及有限时长信号截断处理，可参照现行国家标准《机械振动与冲击 信号处理 第 2 部分：傅里叶变换分析的时域窗》GB/T 29716.2 的有关规定。

4.4.4 数据采集通道的量程和增益应根据预估振动响应幅值合理设置，宜充分利用采集系统的动态范围。正式数据采集前，宜进行预采样，并根据预采样结果对量程、增益等参数进行调整和确认。

【条文说明】合理设置数据采集通道的量程和增益，有利于提高振动信号的采集质量。量程或增益设置不当可能导致信号幅值过小，降低有效分辨能力，或引起信号饱和、削波等失真现象。因此，正式采集前宜通过预采样检查信号幅值及波形状态，并根据实际响应对采集参数进行调整。采集过程中如出现明显削波、异常脉冲、信号中断或其他影响数据有效性的异常情况，应查明原因并重新采集。

5 频率识别与模态参数提取

5.1 时程预处理

5.1.1 时程数据的预处理应满足以下要求：

- 1 应扣除信号的算术平均值以消除直流分量；
- 2 应消除信号趋势项，消除方法宜采用最小二乘多项式拟合等算法；
- 3 宜根据原始信号的质量状况进行平滑与去噪处理，去噪方法可选用移动平均、中值滤波或小波阈值去噪等。

【条文说明】时程信号的预处理及基本信号处理原则可参照现行国家标准《机械振动与冲击 信号处理 第1部分：引论》GB/T 29716.1的有关规定；涉及窗函数处理时，尚可参照《机械振动与冲击 信号处理 第2部分：傅里叶变换分析的时域窗》GB/T 29716.2的有关规定。

5.1.2 采用数字滤波器时，滤波频带应根据索体有效振动频率范围合理设置，并应保证待识别的主要自振频率处于滤波器有效通带范围内。

【条文说明】数字滤波器的通带与阻带之间存在一定的过渡区域，截止频率设置不合理可能导致待分析频率成分受到衰减，从而影响频率识别结果。因此，滤波频带应根据实测信号频谱、预估频率范围及分析目的合理确定，并宜在有效分析频带两侧留有适当余量。滤波处理后应检查主要频率成分是否完整保留，避免因滤波参数设置不当造成有效动力信息失真。

5.1.3 对于长时程振动信号，可根据频谱分析方法进行分段处理和频谱平均。数据分段长度及相邻数据段的重叠程度应根据采样时长、频率分辨率、窗函数类型及信号特征合理确定，各数据段宜采用适当的窗函数抑制频谱泄漏。

【条文说明】长时程振动信号分段处理并进行频谱平均，可减小随机因素对频谱估计结果的影响，提高频率识别的稳定性。采用窗函数会改变数据段两端信号的权重，因此，相邻数据段可根据窗函数特性设置适当的重叠，以充分利用原始数据。数据段长度和重叠程度不宜采用统一固定值，应综合考虑窗函数类型、信号平稳性、频率分辨率及频谱平均效果合理确定。

5.1.4 数据处理前应对原始信号质量进行检查，并应符合下列规定：

- 1 时域信号应完整，不应存在明显削波、严重零漂、信号中断或异常趋势；
- 2 信号质量应满足主要自振频率识别要求；
- 3 对存在明显异常或不能满足频率识别要求的数据，应分析原因，必要时重新进行测试。

【条文说明】本条确立了频域分析前的数据质量把控门槛。预处理完成后的数据必须进行质量检查，确保信号幅值范围合理且无削波现象、信号均值已归零，并应确认信号中无明显的非平稳特征或异常尖峰脉冲干扰。

5.2 频谱分析方法

5.2.1 频域参数识别方法可选用快速傅里叶变换（FFT）频谱分析法、功率谱密度（PSD）分析法、自回归（AR）模型谱估计法等。

【条文说明】频谱分析是索体固有频率识别的基本手段。不同激励方式和测试条件下，振动信号的统计特征存在差异，相应的频谱分析方法也有所不同。FFT 适用于确定性振动响应及人工激励后自由衰减响应的频率分析，具有计算简便、物理意义明确等特点；PSD 主要用于描述随机振动信号功率随频率的分布特征，适用于环境激励条件下获得的平稳或近似平稳随机响应；AR 模型谱估计属于参数化谱估计方法，在模型阶次选择合理的条件下，对短时程数据或相邻频率较为接近的信号具有较好的频率分辨能力。实际测试时宜根据原始信号特征选择适宜方法，并可采用不同方法进行交叉验证。FFT 频谱分析、窗函数处理及相关频域信号处理的基本原则，可参照现行国家标准《机械振动与冲击 信号处理 第 1 部分：引论》GB/T 29716.1 和《机械振动与冲击 信号处理 第 2 部分：傅里叶变换分析的时域窗》GB/T 29716.2 的有关规定。

5.2.2 采用 FFT 频谱分析法时，应根据采样频率、采样时长及待分析频率范围合理确定变换参数，当采集的信号数据长度不足时，可采用末端补零的技术以改善频谱的显示分辨率，但不应将其视为提高实际频率分辨率的手段。频谱纵坐标宜采用线性或分贝（dB）刻度表示。

【条文说明】采用末端补零可增加 FFT 计算点数，使频谱曲线显示更加平滑，并有利于谱峰位置的读取，但补零并未增加原始信号所包含的有效信息，不能提高由实际采样时长决定的频率分辨能力，因此不应将补零后的频点间隔等同于实际频率分辨率。

5.2.3 对环境激励条件下获取的平稳或近似平稳随机振动信号，宜采用功率谱密度分析方法进行频率识别。采用分段平均功率谱估计方法时，数据段长度、相邻数据段重叠比例、窗函数类型及平均次数应根据频率分辨率、数据长度和频谱稳定性合理确定。

【条文说明】环境激励通常具有随机性，索体在风荷载、交通荷载、人员活动及其他环境作用下产生的振动响应可视为一定时间范围内的随机过程。功率谱密度反映信号功率在频率域内的分布，可降低单次幅值频谱受随机波动影响而产生的不稳定性。工程中可采用分段、加窗和平均等方法获得较稳定的功率谱估计。数据段较长有利于提高频率分辨能力，但可用于平均的数据段数量相应减少；增加平均次数有利于降低谱估计的随机波动，但可能降低对局部时变特征的反映能力。因此，相关参数应结合采样时长、信号平稳性及待识别频率范围综合确定。

5.2.4 当采样时长受限或傅里叶变换的频率分辨能力不能满足频率识别要求时，可采用自回归模型谱估计方法。自回归模型阶次宜采用赤池信息量准则（AIC）、最终预测误差准则（FPE）等方法合理确定，并应避免因模型阶次选择不当产生虚假谱峰。自回归谱识别结果宜与傅里叶变换等方法进行对比验证。

【条文说明】自回归模型谱估计具有较高的频率分辨能力，适用于数据时长有限或相邻频率较为接近的情况。模型阶次是影响谱估计结果的重要参数，阶次过低可能导致有效频率成分不能充分分辨，阶次过高则可能产生虚假谱峰。模型阶次可采用 AIC、FPE 等准则，并结合数据长度、信号特征和频谱稳定性合理确定。已有研究中可采用数据点数一定比例作为模型阶次的经验性控制范围，但不宜作为统一限值。为提高频率识别结果的可靠性，自回归谱宜与傅里叶变换或其他频率识别方法进行交叉验证。

5.2.5 对环境激励条件下获取的随机振动时程，当随机成分对自振频率识别影响较大时，可采用随机减量法（RDT）进行处理。采用随机减量法时，应根据振动响应特征合理确定触发条件、数据段长度和叠加平均次数，处理所得信号应具有稳定、可辨识的振动特征，并宜对自振频率识别结果进行一致性复核。

【条文说明】随机减量法通过对振动时程中满足规定触发条件的数据段进行截取和叠加平均，削弱随机激励及随机噪声成分的影响，提取具有自由振动特征的响应，可用于提高环境激励条件下索体自振频率识别的稳定性。

5.3 非平稳信号分析与增强方法

5.3.1 当索体振动信号表现出明显的非平稳特征，或常规频谱分析不能稳定识别主要自振频率时，可根据分析目的采用时频分析、自适应信号分解或随机减量等方法进行辅助处理。采用辅助处理方法获得的频率识别结果，应结合原始信号、频谱分析结果及重复测试结果进行综合判定。

【条文说明】常规 FFT 和 PSD 分析通常以信号在分析时段内具有相对稳定的频率特征为基础。当索体受到移动荷载、施工张拉调整、间歇性冲击或其他时变作用影响时，振动响应可能具有明显的非平稳特征；远距离非接触测试或环境干扰较强时，原始信号也可能具有较低的信噪比。此时，仅采用常规频谱分析可能出现谱峰展宽、有效频率被噪声掩盖或不同频率成分难以分离等情况，可采用时频分析或信号增强方法进行辅助处理。辅助方法的作用主要是揭示频率随时间的变化特征或提高有效模态分量的可辨识性，不宜脱离原始测试数据单独作为频率有效性的判定依据。

时频分析方法的选择及分析参数设置可参照现行国家标准《机械振动与冲击信号处理 第 3 部分：时频分析方法》GB/T 29716.3 的有关规定。

5.3.2 采用短时傅里叶变换（STFT）时，分析窗长度及相邻窗重叠程度应根据待分析信号的时变特征、主要振动频率以及时间和频率分辨率要求合理确定，并应保证分析窗内包含足够数量的有效振动周期。分析结果宜采用时频谱图表示。

【条文说明】STFT 通过对时域信号进行分段加窗，并分别对各时间窗内的信号进行傅里叶分析，可反映主要频率成分随时间的变化过程。窗长度决定时间分辨率与频率分辨率之间的平衡关系：较长的分析窗有利于提高频率分辨能力，但会降低对快速时变过程的跟踪能力；较短的分析窗能够提高时间定位能力，但可能造成频率分辨不足。因此，窗长度应结合索体振动周期、频率变化速度和分析目

的确定。STFT 适用于索力或动力特征随时间缓慢变化，以及需要判断频率成分出现时刻和持续时间的情况。

5.3.3 当振动信号具有明显的瞬态、突变或多尺度特征时，可采用小波变换进行分析。采用小波变换时，应根据振动信号特征合理选择小波基函数、尺度范围及相关分析参数，并应在检测记录中注明主要参数及其选取依据。

【条文说明】小波变换能够在不同尺度下对信号进行局部分析，对瞬态冲击、局部异常及频率随时间快速变化的信号具有较好的适应性。不同小波基函数具有不同的时频局部化特征，其选择会对分析结果产生影响。因此，小波基类型、尺度范围及其他主要分析参数应根据测试信号特点确定并做好记录，以保证分析过程具有可追溯性和可复现性。对于利用小波分析获得的局部频率特征，仍宜结合 FFT、PSD 等频谱结果及结构动力特性进行综合判断。

5.3.4 针对激光非接触式测试中获取的低信噪比或非平稳微动信号，宜采用经验模态分解（EMD）及其衍生算法或变分模态分解（VMD）进行信号自适应分解。信号分解与频域转换应符合下列规定：

1 采用经验模态分解（EMD）出现模态混叠现象时，可替换为互补集合经验模态分解（CEEMD）以压制模态混叠并提高分解精度。

2 当非接触测量信号受到强环境噪声干扰，或测点距离激光设备较远且未进行信号增强时，宜优先采用变分模态分解（VMD）算法。

3 变分模态分解（VMD）算法能够有效分离频带接近的模态信号，在处理低信噪比工况时具备优异的抗噪性能与频率提取能力。

【条文说明】传统的经验模态分解（EMD）在处理此类夹杂间歇性环境噪声的信号时，由于缺乏严密的数学完备性，极易发生“模态混叠”现象——即同一个本征模态函数（IMF）中混入了物理时间尺度差异巨大的异常频率分量。采用互补集合经验模态分解（CEEMD），通过向原始数据中人为注入正负成对的辅助白噪声，强迫信号在全频带内均匀分布，不仅能有效压制模态混叠，还能通过总体平均彻底消除辅助噪声的影响，大幅提高分解的纯净度。

变分模态分解（VMD）彻底摒弃了 EMD 类的时域递归剥离框架，将信号分解转化为变分约束问题的频域迭代求解。这种算法本质上相当于一组自适应的维纳滤波器（Wiener Filter），具有极强的频带分离能力。当测点距离激光设备较远且未张贴反光靶标时，原始信号往往被强背景噪声严重污染，VMD 算法能够精准锁定并提取出潜藏在极低信噪比基底中的微弱模态特征，是保障非接触式激光动力测试在恶劣现场工况下依然具备高可靠性的关键算法屏障。

5.4 固有频率识别与模态阶次确定

5.4.1 索体固有频率应根据频谱或时频分析结果，结合索体结构形式、几何参数、材料特性、边界条件及相应动力学模型进行识别。所识别的各阶固有频率应具有合理的频率分布规律，不应仅以理想弦的整数倍频关系作为频率有效性的唯一判据。

【条文说明】理想柔性拉索的各阶固有频率近似满足整数倍频关系，但实际工程索体通常具有一定抗弯刚度，并可能受到垂度、端部弹性约束、中间支承、集中质量及附属装置等因素影响，其实际频率分布可能偏离理想弦模型。因此，固有频率识别应与后续索力计算所采用的动力学模型相协调。对于细长柔索，可利用近似整数倍频关系进行初步判断；对于短索、粗索或边界条件复杂的索体，则应结合梁—弦模型、弹性边界模型或相应数值分析结果进行识别，不宜因频率偏离理想整数倍关系而直接判定为异常频率。

5.4.2 频率峰值的识别应结合谱峰显著性、信噪比及索体多阶频率分布规律综合判定，并应符合下列规定：

- 1 所识别频率峰应与背景噪声具有足够的区分度，满足稳定识别要求；
- 2 各阶实测频率应与相应计算模型的理论频率分布规律基本一致；
- 3 对明显偏离理论频率分布规律的频率峰，应结合其他测试结果进行复核。

【条文说明】索体频率识别应综合考虑谱峰显著程度、重复测试结果及多阶频率分布规律。不同索长、抗弯刚度、垂度和端部约束条件下，各阶频率与理想弦模型整数倍频关系可能存在不同程度的偏离，因此不宜采用统一的信噪比或倍频偏差限值作为频率有效性的唯一判据。

5.4.3 频率值可采用频谱峰值位置直接拾取，其识别精度应与频率分辨率相适应。当谱峰较宽、相邻频率接近或直接峰值拾取不能满足识别要求时，可采用频谱插值、频峰重心法或其他适宜方法提高频率识别精度。

【条文说明】当频谱图上的波峰尖锐、频率分辨率高时，直接读取峰值坐标即可满足的精度要求。但在实际工程测试中，受端部阻尼装置、采样时长不足或风载非平稳扰动的影响，谱峰往往会出现“展宽”现象。此时直接读取最高点容易引入量化误差，规定采用半功率带宽法或频峰重心法，可以通过频谱的能量分布特征更准确地定位真实谐振中心，提高现场恶劣工况下数据提取的准确度。

5.4.4 模态阶次的确定应结合各阶频率大小、相邻阶频率间隔、多测点空间响应特征及相应动力学模型进行，并应符合下列规定：

- 1 对于符合柔性弦模型特征的索体，可根据频率递增顺序及近似倍频关系进行模态阶次判定；
- 2 对于抗弯刚度影响不可忽略的索体，应考虑高阶频率相对理想弦模型发生规律性偏移的特征，并结合梁—弦模型或相应动力学模型确定模态阶次；
- 3 采用多测点测试时，可结合不同测点在相应频率处的幅值及相位关系辅助判断模态阶次；
- 4 频谱中出现不符合索体动力学规律的附加频率峰时，不应强行纳入索体模态序列，应分析其是否由结构耦合、附属构件、测试设备或环境干扰等因素引起。

【条文说明】模态阶次判定是利用多阶频率进行索力反演的重要基础。理想柔性弦的各阶频率近似按整数倍增长，可根据频率大小及倍频关系进行阶次排序；当索体抗弯刚度影响增大时，各阶频率相对于理想弦模型产生不同程度的偏移，相

邻阶频率间隔也可能随阶次发生规律性变化,因此不宜仍采用严格整数倍关系进行编号。

对于多测点测试,不同模态在索体不同位置具有不同的振幅和相位分布,可利用多测点空间响应特征辅助判别模态阶次,并降低单一测点位于振型节点附近造成的漏阶或错阶风险。对于频谱中出现的孤立频率峰、非规律性插入频率峰或多个独立索体中共同出现的固定频率,应结合第 5.5 节关于异常频率的规定进一步分析,不应在缺乏物理依据的情况下直接认定为索体固有模态。

5.5 异常频率剔除与复核

5.5.1 出现下列情况之一的频率峰,应结合测试条件判定其是否为异常频率:

- 1 频率峰的带宽、峰形或能量分布与相邻有效模态存在明显异常;
- 2 频率位于供电工频(我国为 50 Hz)及其整数倍频附近,并具有明显的电气干扰特征;
- 3 在不同传感器、不同激励方式或不同测试时段的数据中不能稳定重复出现;
- 4 与邻近结构构件已知固有频率一致,且在多个独立索体频谱中普遍存在。

【条文说明】本条明确了异常频率的物理排查与量化甄别标准。在实际工程测试中,频谱图上的波峰并非全部来源于拉索自振。真实的结构固有频率具有物理稳定性,若频峰在不同传感器或不同测试时段无法稳定重复再现,即可判定为偶然的环境瞬态干扰。

5.5.2 异常数据的剔除程序应符合下列规定:

- 1 判定的伪频率峰必须在记录中明确标记并详注剔除理由;
- 2 对于缺失的频率阶次,严禁采用数学插值或理论推测值进行人工填补;
- 3 若剔除的缺失频率中包含一阶基频,则该次测试数据应判定为无效,必须重新进行现场采集。

【条文说明】由于预应力钢索受抗弯刚度影响,其高阶频率不呈现严格的线性等间距分布,严禁使用数学插值或理论推算来填补缺失的阶次,以防止引入脱离物理实际的虚假数据。一阶基频是界定高阶模态阶次(n)的物理参照基准,也是绝大多数索力简化反算公式的核心参数。若缺失基频,将导致后续整个模态序列编号失去绝对参照,进而引发索力计算的系统性错位,因此规定缺失基频的单次测试数据整体无效,必须重新采集。

5.5.3 针对激光非接触感知获取的时程信号,当常规单一频域算法无法有效提取模态频率或信噪比较低时,必须采用综合自验分析方法进行频率提取与交叉复核。综合自验分析应包含下列判别准则:

- 1 应分别采用快速傅里叶变换(FFT)、互补集合经验模态分解(CEEMD)或变分模态分解(VMD)对同一信号进行独立分析,提取各阶本征模态函数的主导频率。

2 提取的各阶固有频率必须满足索体多阶频率比例关系，对不符合理论倍频规律的异常突变峰值应予以剔除。

3 对比不同算法识别出的同名阶次频率值，当多种算法得出的频率相对误差极小且一致性良好时，方可确认为有效结构自振频率。

【条文说明】当非接触测量面临长距离、无反光靶标或强环境风噪时，常规单一频域算法（如直接 FFT）往往难以有效提取微弱的高阶模态。此时，必须引入互补集合经验模态分解（CEEMD）或变分模态分解（VMD）等现代自适应信号处理算法进行交叉特征提取。通过结合索体理论倍频规律，对不同算法提取的频峰进行相互印证与多源横向比对，能够有效识别并剔除因光学链路干扰、散斑噪声或测站微动引发的虚假成分，从而保障激光非接触测试技术在复杂现场工况下的数据可靠性与高容错率。

5.5.4 频率提取的原始记录应详尽完整，内容应包含：各阶频率值、频谱图标识、各阶信噪比、异常频率的判别与剔除情况说明、多次测量结果的统计学参数，以及所采用的信号识别方法和具体算法参数设置等。

【条文说明】本条强调了异常数据处理过程的法定可追溯性。伪频率的判别、剔除及多算法复核过程直接决定了输入索力方程的原始数据质量，必须将具体的判别依据、算法参数配置及统计对比结果详尽记入原始记录中，以满足工程检验检测机构质量管理体系中对数据审查与溯源的强制性要求。

6 单索索力评价

6.1 一般规定

6.1.1 本章适用于两端具有明确锚固点、中间无附加刚性约束或支撑的单跨预应力钢索的索力计算与评价。

【条文说明】索体形式包括钢绞线索、钢丝束索和平行钢丝索等。在结构动力学中,只有两端存在明确的锚固节点且中间没有任何刚性支撑或横向位移约束的拉索,才能直接套用本章提供的单索索力反演公式。如果在拉索中部存在马鞍形支座、减振阻尼器或受到交叉索网的横向约束,其空间振动模态和频率等间距规律将发生根本性改变,此时必须将其视为连续索或耦合索系进行专门评价。

6.1.2 索力计算应以识别获取的各阶自振频率为基础,结合索体的几何参数、材料特性及边界条件进行反演反算。

【条文说明】索力动力测试的本质是一个经典的力学“反问题”求解过程:利用现场准确提取的各阶自振频率,结合索体自身的物理属性反推其内部张力水平。

6.1.3 在对短索或处于低应力水平的索体进行计算时,不应忽略抗弯刚度的影响。

【条文说明】经典的理想弦振动理论建立在拉索绝对柔顺的数学假设之上。但在实际工程应用中,对于长细比较小的短索,或张拉控制力较低导致处于低应力状态的拉索,其真实的力学行为更接近于受拉的“梁”而非纯粹的“弦”。在这种状态下,索体自身的抗弯刚度会显著参与抵抗横向变形,导致实测的固有频率明显偏大。

6.1.4 预应力钢索所采用钢丝、钢绞线等材料的力学性能应符合现行国家标准《预应力混凝土用钢丝》GB/T 5223、《预应力混凝土用钢绞线》GB/T 5224、《建筑结构用高强度钢绞线》GB/T 33026 及其他相关产品标准的有关规定。索力计算所需的材料参数应优先采用产品合格证明文件、材料试验报告或其他可靠资料中的实测值。

【条文说明】预应力钢材在出厂制造过程中,由于拉拔工艺、镀锌防腐层厚度以及外包高密度聚乙烯(PE)护套的工艺波动,其真实的弹性模量和单位长度质量往往与设计图纸或规范给定的理论公称值存在不可忽视的离散性。若直接采用名义公称值进行计算,会将制造公差直接转化为索力的评估误差。

6.2 计算参数确定

6.2.1 索体计算长度应根据锚固形式及端部约束条件确定,并应符合下列规定:

- 1 一般情况下,索体计算长度宜取两端锚具承压面之间的直线距离;
- 2 当端部设置刚性护筒等对索体横向振动形成明显约束的装置时,计算长度起算点宜取约束装置出口位置;

3 当端部设置橡胶减振圈等弱约束装置时, 计算长度起算点宜取锚具承压面;

4 索体计算长度的测量方法及测量精度应满足索力计算和结果评价要求; 对于短索或对计算长度较为敏感的索体, 宜提高长度测量精度。

【条文说明】当拉索端部实际约束条件与计算模型采用的理想边界条件存在明显差异时, 应考虑端部约束对索力计算结果的影响。采用有效长度方法进行简化修正时, 有效长度系数宜根据端部构造、约束程度, 通过理论分析、数值分析、试验标定或工程经验合理确定。

索体端部有效约束点的位置应结合实际锚固构造确定, 锚具、夹具及连接器的构造形式可参照现行国家标准《预应力筋用锚具、夹具和连接器》GB/T 14370 以及现行协会标准《建筑索结构节点设计标准》T/CECS 1010 的有关规定进行识别。采用工程测量方法确定索体计算长度时, 其测量精度还应符合现行国家标准《工程测量通用规范》GB 55018 的有关要求。

6.2.2 单位长度质量宜按产品合格证明文件中的公称值取用。当无法获取公称值时, 可依据索体截面面积和钢材密度估算, 并应计入防腐涂层和外护套的附加质量。

【条文说明】拉索除了承载核心(钢绞线、钢丝等)外, 表面通常还附有镀锌层、防腐油脂以及高密度聚乙烯(PE)外护套等构造。这些防腐及防护构造虽不提供结构抗拉刚度, 但其自身重量会随索体同步振动, 产生显著的附加惯性质量。因此, 在无法获取产品准确公称值而采用理论密度进行估算时, 必须将这部分附加材料的质量如实叠加, 否则将导致反算的索力值发生系统性偏小。

6.2.3 索体弹性模量应优先采用产品合格证明文件、材料试验报告或其他可靠资料中的实测值; 无法获得实测值时, 宜按相应产品标准或国家现行有关标准的规定取值, 并应在检测报告中注明参数来源。

【条文说明】由于各制造厂家的拉拔和捻制工艺存在差异, 建议优先采用实际批次产品的实测数据, 以减小理论取值带来的模型误差。

6.2.4 索体等效抗弯刚度的取值应符合下列规定:

- 1 索体的等效抗弯刚度的取值应符合实际受力状态。
- 2 索体处于全粘结状态时, 应取全截面惯性矩;
- 3 索体处于完全滑移状态时, 宜取各单根钢丝惯性矩之和;

4 索体的实际状态介于两者之间时, 宜根据同类型索体的试验数据或工程经验合理确定。

【条文说明】多束(根)钢丝组合而成的粗索, 其抗弯刚度并非简单的几何叠加。当索体内部灌注环氧树脂或水泥浆, 使得各根钢丝之间发生完全粘结且截面符合平截面假定时, 其抗弯刚度达到极大值(即按照全截面惯性矩计算); 相反, 若内部为无粘结油脂状态, 钢丝在弯曲时可自由产生相对滑移, 此时截面抗弯刚度退化为各单根钢丝抗弯刚度的简单代数和。在实际服役中, 大部分缆索由于护套挤压、干摩擦和拉伸自锁效应, 其截面状态处于“全粘结”与“完全滑移”两种理论

极限之间的过渡状态。因此,要求根据同类型索体试验数据或工程经验合理折减确定,以真实反映索体的抵抗弯曲能力。

6.3 索力计算

6.3.1 索力计算模型应根据索体的名义长细比、应力水平以及端部的实际边界约束条件合理选择。

【条文说明】本条规定了索力计算模型选择的总原则。预应力钢索并非单一形态的受拉构件,简单地对所有拉索套用同一种计算公式,极易在短索、低应力索或复杂边界条件下产生较大的反算偏差。因此,要求检测人员在计算前根据拉索的物理特性与边界物理约束,合理匹配计算模型。索体计算模型及边界条件的确定,还应与现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017、现行行业标准《索结构技术规程》JGJ 257 及《预应力钢结构技术标准》JGJ/T 497 的有关结构分析原则相协调。

6.3.2 评判拉索抗弯刚度与端部约束效应时,可引入名义长细比 ξ 作为无量纲判别指标,其计算应符合公式(6.3.2):

$$\xi = L \sqrt{\frac{T}{EI}}$$

式中:

ξ ——拉索名义长细比;

T ——拉索张力,可取理论计算值或初测值(N);

L ——索体计算长度(m);

EI ——索体等效抗弯刚度(N·m²)。

【条文说明】名义长细比反映拉索轴向张力与抗弯刚度的相对关系,可用于判断抗弯刚度及端部约束对拉索振动特性的影响程度。不同索体类型、截面规格、材料特性及端部约束条件下,抗弯刚度和边界约束对振动频率的影响程度存在差异,因此,名义长细比的分界值不宜统一取固定数值,宜结合索体实际参数,通过理论分析、数值参数分析或试验验证等方法确定。

对于公称直径 15.2 mm 的钢绞线,根据论文《考虑端部约束效应的短索索力动力识别方法与影响参数分析》中的研究结果,当名义长细比 ξ 不小于 40 时,端部约束变化对其低阶振动频率的影响相对较小,可采用简化模型进行索力计算;当 ξ 小于 40 时,应考虑索体抗弯刚度及端部约束条件对振动特性的影响,并根据实际边界条件选择相应的计算模型。

6.3.3 当拉索两端边界条件接近理想铰接时,可采用简化弦振动公式计算索力时,应按公式(6.3.3)进行计算:

$$F = 4mL^2 \left(\frac{f_n}{n} \right)^2 \quad (6.3.3)$$

式中：

F ——索体计算拉力（N）；

m ——索体单位长度质量（kg/m）；

L ——索体计算长度（m）；

f_n ——索体第 n 阶固有频率实测值（Hz）；

n ——模态阶次（正整数）。

【条文说明】采用简化弦振动公式时，应确认索体抗弯刚度、垂度及端部约束等因素对所采用模态频率的影响较小。宜采用多阶频率进行索力反算和一致性校核；当不同模态反算结果离散明显，或简化模型不能合理反映实测频率特征时，应采用考虑抗弯刚度及实际边界条件的计算模型。

6.3.4 当考虑索体抗弯刚度影响，且索体两端边界条件可近似视为两端铰接时，应采用梁—弦公式按公式 (6.3.4) 进行计算：

$$F = 4mL^2 \left(\frac{f_n}{n} \right)^2 - \frac{EI n^2 \pi^2}{L^2} \quad (6.3.4)$$

式中：

E ——索体材料的弹性模量（Pa）；

I ——索体截面等效惯性矩（ m^4 ）；

EI ——索体等效抗弯刚度（ $N \cdot m^2$ ）。

【条文说明】采用该公式计算时，为减小抗弯刚度理论取值带来的不确定性影响，可采用两阶或多阶实测频率的联立解法，通过构建方程组同时识别索力 F 和等效抗弯刚度 EI 。

6.3.4 当索体端部近似为理想固接约束，且计算选用的模态阶次不大于 5 阶时，可采用两端固接条件下的近似解析公式进行计算。

【条文说明】端部转动约束（固接）会在索端局部产生极大的弯曲应力梯度（即边界层效应），对小于 5 阶模态的频率抬升作用尤为强烈。采用考虑两端固接的近似解析公式能够精准修正这一端部约束能量；当阶次继续升高后，固接边界的效应逐渐向“等效缩短索长”转化，此时宜采用更通用的梁-弦模型或数值算法。

6.3.5 当索体端部呈现介于理论铰接与固接之间的弹性嵌固状态时，不应采用基于理想弦或理想梁假设的传统解析公式，应基于弹性嵌固动力学理论，综合考虑端部转动刚度与索体抗弯刚度的共同作用，建立索体动力学方程并采用数值求解方法进行索力反演。

【条文说明】本条明确了短索在复杂边界条件下的索力计算原则。由于名义长细比较小，端部转动刚度与抗弯刚度对索体动力特性的影响极为显著，依赖简化边界假设的传统解析公式已无法真实反映其内部的力学映射关系。

在具体建立数值模型与实施求解时，宜采用有限差分法对构建的一维波动方程进行空间离散与时域积分；在获取时域动力响应后，结合快速傅里叶变换(FFT)提取拉索的一阶主频；最后，采用二分法等稳健的数值根轨迹搜索算法，不断迭

代更新索力计算区间，直至求解出满足容差要求的目标索力。这种数值建模策略能够精确包容复杂的非线性边界约束，从而保障索力反演的工程精度。

在具备多个有效测点或可识别多个阶次模态的条件下，可采用多点联合反演方法，将不同测点获得的有效振动信息以及多个阶次的实测频率共同纳入反演过程，构建实测动力特征与数值模型计算结果之间的综合误差目标函数，通过最小化综合误差确定索力

6.3.6 计算代表值的确定应符合下列规定：应取各阶频率反算索力值的算术平均值作为单根索体的索力计算代表值。当各阶频率反算得到的索力值离散明显或一致性较差时，应重新检查频率识别结果、计算参数取值及边界条件假设。宜利用频率与阶次比值的平方值随模态阶次变化的趋势图，辅助判断计算模型的适用性。

【条文说明】本条确立了索力代表值的确定规则及计算模型的物理诊断方法。取多阶频率反算索力的算术平均值，能够有效削弱单阶频率测量误差引入的随机噪声。

6.4 修正方法

6.4.1 拉索垂度效应显著时，应考虑垂度对振动频率及索力计算结果的影响。垂度效应可采用无量纲参数、理论分析或数值分析等方法进行判别；当其影响不可忽略时，宜采用考虑垂度效应的计算模型，或选取受垂度影响较小的有效模态进行索力计算。

【条文说明】对于跨度较大、水平或倾角较小的拉索，自重产生的初始垂度可能引起面内振动与轴向变形耦合，使部分低阶固有频率偏离理想弦模型的计算结果。可采用 Irvine 无量纲参数等方法评价垂度效应。垂度影响明显时，宜优先采用考虑垂度效应的理论或数值模型；采用简化方法时，可根据模态特征选取受垂度影响相对较小的频率进行反算，并宜采用多阶频率进行校核。

6.4.2 当测试结果需要与设计基准状态或不同温度条件下的历史测试结果进行比较时，应考虑温度变化对索力的影响。温度效应修正宜根据结构约束条件、索体材料特性及温度与索力的关系确定，具备条件时宜采用实测温度—索力关系进行修正。

【条文说明】温度变化会引起拉索及其支承结构的热变形，并可能导致拉索实际张力发生变化。因此，温度影响并非测试误差，而是拉索真实受力状态随环境条件产生的变化。当不同时间的测试结果进行纵向比较，或与设计基准状态进行比较时，应将温度差异纳入分析。修正方法可根据理论分析、数值计算、设计资料或长期监测获得的温度—索力关系确定。钢材线膨胀系数可根据材料性能或现行有关标准取值。

6.4.3 当拉索设置阻尼器、减振器或其他对索体振动产生附加约束的装置时，应考虑其对拉索动力特性及索力计算结果的影响。宜根据装置类型、安装位置及约束特性，合理确定计算长度、边界条件及参与索力计算的模态；必要时应采用考虑附加约束的计算模型。

【条文说明】阻尼器、减振器等附属装置除产生耗能作用外，还可能对索体局部横向运动形成附加约束，从而改变拉索的振动边界及部分模态频率。其影响程度与装置类型、安装位置、连接刚度及模态振型有关。因此，不宜统一规定采用某一阶以上的频率进行索力计算。工程中可通过理论分析、数值模拟、试验对比或多阶频率一致性分析判断附属装置的影响，并据此选择适宜的计算模型和有效模态。

7 连续索结构索力评价

7.1 一般规定

7.1.1 本章适用于预应力钢索跨越一个或多个中间支座（或鞍座）从而形成多跨连续体系的索力计算与评价。

【条文说明】连续索结构主要包括连续索桁架、连续预应力张弦体系及体外预应力索等。与第 6 章所述的两端绝对锚固的单跨拉索不同，连续索通常由一根完整的长索穿越一个或多个中间支承构成，在复杂空间结构中应用极为广泛。此类结构的动力学边界特征存在高度的交互性，其整体受力与动力响应属于多自由度耦合体系，在评价时不能简单割裂为若干独立的单跨拉索。

7.1.2 连续索体系的索力评价应充分考虑其与单索体系的受力差异。在评价模型中，必须计入索体在中间支座处的力学耦合效应、支座摩擦引起的跨段索力不连续性，以及各跨段振动时可能存在的跨间动力耦合特性。

【条文说明】本条阐明了连续索与单索在振动响应上的本质物理差异，即“跨间动力耦合效应”。

7.1.3 连续索结构的索力评价除应符合本标准的规定外，尚应符合现行国家标准的有关规定。

【条文说明】本标准主要规定连续索结构索力动力测试、频率识别、计算参数确定及索力反演等技术要求。索力测试结果用于结构受力状态评价时，还应结合结构体系、节点构造及设计要求进行综合判断。《索结构技术规程》JGJ 257 对索结构设计、施工及相关技术要求作出了规定，是连续索结构索力评价的重要依据。对于连续索中涉及索夹节点、可滑动节点等特殊连接形式的情况，还可结合现行协会标准《建筑索结构节点设计标准》T/CECS 1010 的有关规定分析其实际边界条件。

7.2 边界条件及计算参数确定

7.2.1 连续索端部锚固点的边界条件与计算参数确定原则，应与本标准第 6.2.1 条单索端部锚固点的规定保持一致，在无精细化模型时可按铰接条件进行偏安全简化。

【条文说明】连续索的端部（即整根拉索的首尾锚固端）在物理构造、受力机理与约束形式上，与单跨拉索的端部锚固完全一致。因此，关于端部有效约束点位置的判定及端部转动刚度的处理，直接等效适用本标准第 6.2 节关于单索的规定。

7.2.2 连续索中间支座（或转向器、鞍座）应根据其对索体的实际约束特性分为下列三类，并据此建立分析模型：

- 1 滑动型支座：索体在支座处可自由滑动，支座两侧索力相等；
- 2 固定型支座：索体在支座处的轴向位移被完全约束，支座两侧跨段在动力学上相互独立；
- 3 部分滑动型支座：索体在支座处存在滑移摩阻力，支座两侧索力存在差值。

【条文说明】中间支座的物理阻力特性直接决定了整根连续索的张力分布规律与振动能量传递机制。标准将其系统归纳为三种力学极限状态：

1 滑动型支座：通常见于设置了聚四氟乙烯滑板、滚珠等减摩措施的节点。其摩擦阻力极小，索体不仅在静力张拉时能实现全索张力迅速均衡，在振动时也会产生强烈的跨间动力耦合。

2 固定型支座：通常见于防滑移夹紧节点或通过销轴刚性固定的节点。这类支座在纵向彻底切断了位移与能量的传递。在该假设下，物理上的连续索在动力学分析中已被截断，完全退化为若干根相互独立的单跨索，可直接套用第 6 章的方法独立计算。

3 部分滑动型支座：这是工程中最常见的常规摩擦鞍座状态。由于静摩擦阻力的存在，支座两侧往往存在真实的静态索力差；同时在结构振动测试中，节点处往往处于“黏滞”与“微滑移”的临界非线性状态。

中间支座、索夹节点及可滑动节点的构造形式和受力特征，可结合现行协会标准《建筑索结构节点设计标准》T/CECS 1010 以及现行国家标准《预应力筋用锚具、夹具和连接器》GB/T 14370 的相关构造要求进行判定。

7.2.3 各跨段计算长度的起算点宜取各跨两端支座的有效约束点。对于典型的鞍座型中间支座，其跨段长度起算点宜取鞍座孔口的出口处。

【条文说明】连续索在穿过中间支座时，并非交汇于一个理想的数学质点，而是贴合于具有一定弧长和曲率半径的实体鞍槽内，处于鞍座内部的索体受到强烈的径向挤压与横向限位，根本无法发生横向自由振动。在实际工程计算中，不应简单套用图纸上标注的“支座中心线间距”作为计算长度。

7.3 结构影响修正

7.3.1 连续索跨间动力耦合程度应结合相邻跨段自振频率的接近程度、频谱中耦合频率成分的显著程度、多测点同步响应特征及模态振型等因素综合判定。当跨间耦合可能影响频率识别或索力计算结果时，应采取相应的分析和修正措施。

【条文说明】连续索各跨段通过中间支座、鞍座或转向装置相互连接，其振动响应可能发生跨间能量传递和模态耦合。跨间耦合程度受各跨段长度、张力水平、支座约束刚度、摩阻特性以及相邻模态频率接近程度等多种因素共同影响，难以采用单一频率比值或频峰幅值作为统一判据。

工程测试中，宜结合相邻跨段主要自振频率的接近程度、频谱中附加频率成分的稳定性、多测点同步响应特征以及模态振型等信息进行综合判断。当跨间耦合导致局部模态归属不清、主要频率识别受到干扰或单跨计算结果稳定性降低时，

应认为耦合效应已对索力识别产生不可忽略的影响,并采取相应的分析或修正措施。

7.3.2 针对不同程度的跨间动力耦合,可按下列原则进行处理:

1 当跨间耦合较弱且不影响各跨主要自振频率识别时,可对各跨分别进行频谱分析;

2 当跨间耦合较为明显,但各跨模态仍可区分时,宜采用多通道同步测试、互功率谱分析或其他方法判别模态的空间归属;

3 当跨间耦合较强,局部跨段的独立模态难以可靠识别时,应将连续索作为整体体系进行模态参数识别和索力反演。

【条文说明】跨间动力耦合的处理方法应根据其对各跨局部模态独立性和频率识别可靠性的影响程度确定。耦合较弱时,各跨仍保持较明显的局部振动特征,主要自振频率能够稳定识别,可按独立跨段进行分析;耦合较为明显时,频谱中可能出现相邻跨频率成分叠加、双峰或多峰等现象,但各跨模态仍具有一定可辨识性,此时宜通过多测点同步测试、互功率谱、相位关系或其他空间信息辅助判别模态归属;当耦合较强、各跨局部模态难以独立识别时,应将连续索作为整体动力体系进行模态参数识别和索力反演。跨间耦合程度不宜仅依据频峰幅值比例进行固定分级,而应结合频谱特征、空间响应特征及最终索力计算结果的稳定性综合判定。

7.3.3 进行部分滑动型支座摩阻力修正时,其计算得出的摩阻力必须满足静力学物理限值条件,即相邻跨段的索力差绝对值 $|F_i - F_{i+1}|$ 不得大于该支座的极限静摩擦力。

【条文说明】在利用动力学多阶频率反演跨间索力时,若计算得出的索力差突破了经典摩擦学定律的静力极限条件,则反证了动力学计算模型(如等效刚度取值或边界约束假设)存在严重失真,该次反算结果无效,必须重新调整模型参数。

7.3.4 当连续索各跨段处于温差较大的不同环境时,应分别测量各跨段的索体表面温度,并按本标准第 6.4.2 条规定分别进行温度修正后,方可进行跨段间的索力比对计算。

【条文说明】空间结构或跨江桥梁中,同一根连续索往往会穿透不同的微环境(如室内温控区与室外暴晒区交界,或单侧受强太阳辐射)。预应力钢索对温度变化高度敏感,局部跨段的巨大温差会引发显著的热应变,需要独立实测各跨段索体表面的真实温度,逐跨折算至统一的设计基准温度状态后,所得数据才具备跨间横向比对和安全评价的力学意义。

7.4 索力计算

7.4.1 各跨段独立算法:当中间支座被判定为固定型,或跨间动力耦合被判定为弱耦合状态时,可将各跨段视为独立受力单元,分别按本标准第 6 章单索公式计算索力。

【条文说明】当中间支座通过机械构造实现了物理上的绝对固定，或者跨间动力耦合效应经评估属于“弱耦合状态”时，复杂的全局模态在数学上即退化为各个跨段的“局部模态”。此时，将其割裂为独立单元并套用第6章的单索公式，不仅在力学上是自洽的，更能大幅提高工程现场的计算效率。

7.4.2 等值加权平均法：当中间支座被判定为滑动型（极低摩阻状态）时，可由第6章公式分别算出各跨索力，并取各跨段索力值的按长度加权平均值，作为整根连续拉索的代表索力。

【条文说明】当连续索穿过具有极低摩阻特性（如设置聚四氟乙烯滑板、滚轴等）的支座时，其静力学张拉特性决定了整根拉索的张力能在瞬间达到全线均衡，理论上各跨索力应当绝对相等。然而，在实际现场动力测试中，受跨度差异、局部环境风噪或数据采集截断误差的随机干扰，按单跨公式独立计算出的各跨索力往往会存在微小波动。此时，以各跨段的物理长度作为权重系数进行加权平均，能够最大程度地平滑这种空间上的随机测量噪声，从而得出最逼近真实受力状态的代表索力。

7.4.3 多跨中间带支撑连续拉索统一反演法：对于存在显著跨间耦合或支座局部刚度不可忽略的部分滑动型多跨体系，严禁将其割裂为独立单索处理。应将多跨拉索视为整体系统，建立包含中间支承刚度及各跨索力的整体动力学方程组，并通过系统级数值优化算法统一反演求解各跨段真实索力分布。

【条文说明】具体建立整体模型并实施求解时，推荐采用以下算法策略：

1 建模方法：宜借助传递矩阵法（Transfer Matrix Method, TMM）、动力刚度法（Dynamic Stiffness Method, DSM）等力学解析算法，或者建立精细化有限元数值模型，将全线的几何特征、摩擦参数与张力分布整合进同一个特征方程组中。

2 反演算法：宜根据实测整体模态频率与理论计算频率之间的差异构造残差目标函数，并采用适宜的数值优化方法对各跨段索力及相关边界参数进行统一求解，使理论计算结果与实测动力特征达到合理匹配，从而获得各跨段索力及相关参数。

7.4.4 连续索各跨段索力计算完成后，应结合体系静力平衡、支座摩阻特性及张拉工艺对计算结果进行合理性校核，并应符合下列规定：

- 1 各跨段索力差值应与中间支座或转向装置的摩阻特性相协调；
- 2 索力沿索体的变化趋势应与张拉方向、支座摩阻及设计受力特征相符；
- 3 当跨段索力分布出现明显异常或与理论受力规律不符时，应重新检查频率识别结果、计算参数、边界条件及分析模型。

【条文说明】连续索各跨段通过中间支座、鞍座或转向装置相互联系，其索力分布除受各跨段自身动力特性影响外，还与支座摩阻、张拉方向、张拉顺序及边界约束等因素有关。因此，各跨段索力计算结果除应满足动力测试和计算模型要求外，尚应从整体受力机制上进行合理性校核。对于存在摩阻的中间支座或转向装置，支座两侧允许存在一定索力差，但其大小及变化方向应与实际摩阻特性

和张拉过程相协调。若计算所得索力沿索体的分布规律与设计受力特征、张拉工艺或静力平衡关系明显不符,可能表明频率识别、计算参数取值、边界条件判断或分析模型存在偏差,应对相关环节进行复核,必要时重新测试或调整计算模型。连续索的张拉顺序、施工控制及节点安装等施工信息,可结合现行协会标准《建筑索结构工程施工标准》T/CECS 1341 的有关规定进行核查。

8 检测结果评价与检测报告

8.1 评价指标

8.1.1 评价体系由索力偏差评价、索力离散性评价和复测对比评价三个维度构成。

【条文说明】索力动力测试结果评价涉及测试数据分析、结构状态判断及工程应用需求等多个方面，单一评价指标难以全面反映索力状态。因此，本条结合索力偏差、索力离散性以及复测对比结果，从不同角度对测试结果进行综合评价，以提高评价结果的全面性和可靠性。

8.1.2 索力评价前应对测试结果的合理性进行校核。索力实测代表值应处于索体材料及结构设计允许的合理范围内；对同组或受力特征相近的索体，宜结合相邻索体索力水平进行对比分析。

【条文说明】索力结果合理性校核主要用于发现因计算参数取值、边界条件判断、频率识别或现场测试异常等因素造成的明显异常结果。相邻或同组索体的索力对比可作为辅助判断手段，但不宜单独作为索力状态评价依据。索力实测值与结构设计受力状态之间的合理性判断，应以设计文件为主要依据，并与现行国家标准《工程结构通用规范》GB 55001、《钢结构通用规范》GB 55006、《钢结构设计标准》GB 50017 以及现行行业标准《预应力钢结构技术标准》JGJ/T 497 的有关要求相协调。

8.1.3 索力测试结果宜进行不确定度评估。不确定度分析应考虑频率识别、索体计算长度、单位长度质量、抗弯刚度及其他主要参数的不确定性影响。

【条文说明】动力法索力测试属于基于振动参数和索体物理参数进行反算的间接测试方法，其结果受频率识别、计算长度、单位长度质量、抗弯刚度、边界条件及测试环境等多种因素影响。对于重要结构、复杂边界拉索或对测试精度要求较高的工程，宜识别主要不确定度来源，并分析各输入参数的不确定性对索力计算结果的影响。测量不确定度的评定、合成及表示可参照现行国家计量技术规范《测量不确定度评定与表示》JJF 1059.1 的有关规定执行，并应在检测报告中说明评估方法及结果。

8.1.4 检测结果的评价应与现行国家标准《钢结构工程施工质量验收标准》GB 50205 及《建筑结构检测技术标准》GB/T 50344 的有关规定相协调，并结合设计文件、现行行业标准《预应力钢结构技术标准》JGJ/T 497 及其他相关技术标准进行综合判定。

【条文说明】索力检测结果应与现行结构工程质量验收和检测评价标准相协调。考虑到索力偏差是反映预应力结构受力状态的重要指标，同时检测结果需满足工程验收及安全评价要求，因此，本条规定评价等级划分应依据现行相关标准执行，以保证评价结果具有统一性和可比性。

8.2 索力偏差评价

8.2.1 索力偏差应按公式（8.2.1）进行计算：

$$\Delta F = \frac{F_m - F_0}{F_0} \times 100\% \quad (8.2.1)$$

式中：

ΔF —— 索力相对偏差（%）；

F_m —— 索力实测代表值（N 或 kN）；

F_0 —— 基准索力值（N 或 kN）。施工阶段取设计张拉控制值；使用阶段取设计索力值或上次检测索力值，并注明基准来源。

【条文说明】索力偏差是评价预应力钢结构索力状态的重要指标，能够直观反映实测索力与设计值或控制值之间的差异。施工阶段和使用阶段结构所处状态不同，其索力控制目标和评价依据也存在差异，因此本条分别规定了不同阶段索力偏差的计算方法及基准取值原则，以保证评价结果符合工程实际情况。

8.2.2 施工阶段索力偏差评价应以设计文件规定的张拉控制值及允许偏差为主要依据；设计文件无明确规定时，应按国家现行有关施工质量验收标准执行。对索力偏差超过规定要求的拉索，应对测试结果进行复核，并结合张拉记录、施工过程及结构受力状态分析原因。

【条文说明】施工阶段索力检测主要用于检验拉索张拉施工质量，实测索力应首先与设计文件规定的张拉控制值及允许偏差进行比较。不同结构形式、索体类型和张拉工艺的控制要求可能存在差异，因此本标准不另行统一规定固定的索力偏差分级限值。当设计文件未明确规定允许偏差时，可依据国家现行有关施工质量验收标准进行评价。对于超过允许偏差的拉索，应结合张拉记录、张拉顺序、锚固状态、施工过程以及测试结果的可靠性进行分析，必要时重新测试或进行索力调整。拉索张拉施工过程、张拉控制及施工记录的核查，可结合现行协会标准《建筑索结构工程施工标准》T/CECS 1341 及现行行业标准《预应力钢结构技术标准》JGJ/T 497 的有关规定进行。

8.2.3 使用阶段的索力评价等级划分应符合下列规定：

1 用阶段索力状态宜结合与设计基准值、初始检测值或历史检测值的偏差，以及索力变化趋势和同组索体受力协调性进行综合评价；

2 当索力出现明显异常偏差、持续下降或与同组索体受力状态明显不协调时，应进行复核，必要时开展专项检测或结构安全评估。

【条文说明】使用阶段索力检测主要用于评价既有结构服役状态，与施工阶段相比，长期运营过程中受材料性能变化、环境作用以及结构变形等因素影响，索力可能发生一定程度变化。因此，本条结合既有结构检测评价特点，对使用阶段索力偏差等级进行划分，以便根据偏差程度判断结构索力状态并采取相应措施。

8.2.4 当单根拉索索力较设计基准值、初始检测值或历史正常状态出现明显降低，或其变化程度超出设计允许范围及正常波动范围时，应对测试结果进行复核并分析异常原因。经复核确认存在明显预应力损失、锚固异常或其他受力异常时，应根据其影响程度开展专项检测或结构安全评估。

【条文说明】工程中应结合设计允许范围、初始检测结果、历史变化趋势、同组索体受力状态以及测试不确定度进行综合判断。对于承担重要受力功能的关键拉索，即使异常索体数量较少，也可能对结构整体受力状态产生显著影响，因此应根据异常程度及时进行复核、专项检测或结构安全评估。对经复核确认存在明显预应力损失、锚固异常或其他受力异常的情况，可结合现行协会标准《预应力结构诊治技术规程》T/CECS 1363 的有关要求进一步开展专项检测、原因分析或结构性能评价。

8.3 索力离散性评价

8.3.1 索力离散性评价应在同组索体的索力偏差评价等级达到合格（施工阶段）或正常（使用阶段）的前提下进行。索力离散性宜采用同组索体索力偏差的平均值、标准差及变异系数作为统计表征指标，变异系数应按公式（8.3.1）计算：

$$C_v = \frac{\sigma}{|\mu|} \quad (8.3.1)$$

式中：

C_v ——同组索体索力偏差的变异系数；

σ ——同组索体索力偏差值的标准差（%）；

μ ——同组索体索力偏差值的算术平均值（%）。

【条文说明】索力离散性反映同一结构体系内各索体索力分布的均匀程度，是评价索群整体受力状态、张拉施工质量以及服役性能稳定性的重要指标。由于索力检测结果受频率识别误差、计算参数取值、边界条件差异、施工控制偏差以及长期环境作用等多种因素影响，同组索体之间的索力不可避免地存在一定差异。仅采用单根索体的索力偏差进行评价，难以全面反映整体索系的受力协调性，因此，本条采用平均值、标准差及变异系数等统计参数对索力离散程度进行综合表征。

对于索体数量较少或受力特征较为一致的索系结构，索力偏差通常可近似采用单峰统计分布描述，平均值、标准差及变异系数能够较好反映索力分布的集中程度和离散水平。但对于大型空间索结构、预应力钢结构屋盖等复杂索系，由于不同区域索体的几何条件、约束形式、荷载传递路径以及施工张拉过程存在差异，索力偏差数据可能表现出明显的分区特征，甚至呈现多个集中分布区域。此时，单一统计指标难以充分揭示不同索群之间的差异特征，也难以有效识别局部区域的异常索力状态。

对于具有较多检测样本的复杂索系结构，可采用概率统计方法对索力偏差分布特征进行进一步分析。其中，高斯混合分布能够将复杂索力偏差数据表示为多

个高斯概率分量的组合，通过不同分量的均值、标准差及权重参数描述不同索群或不同受力状态下索力分布特征。基于高斯混合分布的概率分析，可辅助识别索力分布中的潜在分组特征，判断不同区域索体受力差异，并为异常索体筛查、索力状态评价及后续结构维护提供参考依据。

高斯混合分布分析属于索力离散性评价的辅助分析方法，其应用应结合结构类型、检测样本数量、索体空间分布特征以及工程实际需求综合确定，不应替代基于统计指标的常规索力离散性评价方法。

8.3.2 施工阶段索力离散性宜采用变异系数等统计指标进行评价，其合理范围应结合结构体系、设计张拉控制要求及同类索体受力特征确定。

【条文说明】施工阶段索力离散性评价主要用于判断张拉施工过程中各索体受力是否均匀。由于施工误差、张拉顺序以及施工控制水平等因素可能导致索力分布存在差异。

8.3.3 使用阶段宜通过本次检测与基准状态的离散性指标变化评价索力分布的稳定程度。当离散程度较基准状态明显增大时，应结合结构变形、外观检查及其他检测结果分析原因。

【条文说明】使用阶段索力离散性变化能够反映结构长期服役过程中索力状态的演化趋势。受材料性能变化、环境作用以及结构变形影响，索力分布可能随时间发生变化。

8.3.4 对于索体数量较多，且不同区域索体受力特征存在明显差异的大型索系结构，宜根据空间位置、结构分区或对称特征分别进行索力离散性评价。

【条文说明】对于大型索系结构，由于索体数量较多，整体受力状态可能存在明显的空间分布差异。采用直接空间位置分区进行离散性评价，有助于识别局部区域索力异常及受力不均问题。

8.4 复测与对比评价

8.4.1 预应力索结构在使用阶段应进行周期性索力复测，并据此开展索力状态的时变演化分析与结构健康状况评估。

【条文说明】周期性复测是掌握使用阶段结构索力变化规律、评价结构健康状态的重要手段。由于预应力钢结构在长期服役过程中会受到材料性能退化、环境作用以及荷载变化等因素影响，索力状态可能随时间发生变化。因此，本条规定应通过周期性复测获取索力变化信息，为结构状态评价和后续维护提供依据。

8.4.2 索力复测周期应根据结构重要性、使用环境、设计与维护要求、历次检测结果及索力变化趋势合理确定。发现索体损伤、索力异常或结构受力状态发生明显变化时，应适当缩短复测周期。复测时宜保持测试环境、激励方式、测点布置及数据处理方法的一致性；当测试设备或识别方法发生变化时，宜进行新旧方法的对比验证。

【条文说明】复测结果的准确性不仅取决于测试方法和仪器性能，还受到环境条件、激励方式以及测试布置方案等因素影响。为保证不同阶段检测结果具有可比性，复测时宜保持与历史检测一致的测试条件；当测试设备或数据处理方法发生变化时，应通过对比试验和交叉验证分析方法差异对结果的影响。

8.4.3 复测对比宜采用索力相对变化率、年化变化速率或其他能够反映索力时变特征的指标。评价时应结合历史正常波动范围、测试不确定度、设计控制要求及结构实际状态综合判断。当索力变化明显超出正常波动范围时，应分析其变化原因，并根据需要缩短复测周期或开展专项检测。

【条文说明】索力复测对比评价主要用于分析结构索力随时间的变化趋势。单次索力偏差只能反映当前状态，而相对变化率和年化退化速率能够反映结构长期性能演化特征。当指标出现明显变化时，应结合结构变形监测和外观检查结果进行综合分析，以判断异常原因。

8.5 检测报告内容与格式要求

8.5.1 报索力动力测试报告应经过编制、校核和批准的三级审核流程，并应以纸质文件和电子文件两种介质同步归档。

【条文说明】检测报告是反映索力动力测试全过程、检测结果及评价结论的重要技术文件，其编制、校核和批准流程直接影响检测成果的规范性和可靠性。因此，本条规定检测报告应建立三级审核制度，并采用纸质文件和电子文件同步归档，以保证检测过程和结果具有完整的质量控制和追溯依据。检测报告的编制、审核、批准、技术记录及结果可追溯管理，可参照现行国家标准《检测和校准实验室能力的通用要求》GB/T 27025 的有关规定执行。

8.5.2 检测报告正文应至少包含下列内容：

- 1 工程概况；
- 2 检测目的与依据；
- 3 检测对象及抽样范围；
- 4 检测技术路线与仪器设备（含非接触式感知设备的架设说明）；
- 5 测点布置方案与数据采集参数；
- 6 频率识别与模态提取结果；
- 7 索力计算分析结果（含参数取值及边界条件说明）；
- 8 索力评价（含偏差、离散性及对比评价）；
- 9 综合检测结论与处理建议；
- 10 现场测试记录表、相关图谱及检测机构资质等附件。

【条文说明】索力动力测试涉及工程概况、检测方案、数据采集、信号分析、索力计算及综合评价等多个技术环节，检测报告应完整记录上述过程和关键结果。由于检测数据和分析过程是评价结构状态的重要依据，因此，本条结合索力动力测试特点，对报告应包含的主要内容进行了规定，以保证检测结果表达完整、评价依据明确。

8.5.3 检测结论部分除给出综合定级外，尚应包含对超限或异常索体的处理建议，以及针对下一次检测的建议时间与关注重点。

【条文说明】检测结论不仅应反映当前索力状态，还应为后续结构维护和复测工作提供指导。对于存在超限或异常状态的索体，仅给出评价等级不足以满足工程应用需求，因此，本条要求检测结论中应包含异常索体处理建议以及后续检测重点，为结构安全管理和维护决策提供依据。

8.5.4 报告格式应符合下列规定：

1 报告封面应包含报告名称、工程名称、委托单位、检测单位及其资质编号、报告编号及出具日期；

2 报告中的术语和符号应与本标准第 2 章的规定一致；物理量必须采用国际单位制（SI）；

3 所有图表应统一编号，频谱图必须清晰地标注坐标轴名称、物理单位、标尺刻度以及关键固有频率的峰值。

【条文说明】检测报告中的格式、术语、符号及计量单位统一，是保证不同检测项目之间数据交流和结果比较的重要基础。由于索力动力测试涉及频率、振型、索力计算参数等多类技术数据，因此，本条规定报告格式应符合相关标准要求，确保检测信息表达规范、清晰。检测报告中频率、索力、索力偏差及其他数值的修约和极限数值判定，应符合现行国家标准《数值修约规则与极限数值的表示和判定》GB/T 8170 的有关规定。

8.5.5 电子数据归档应符合下列规定：

1 原始振动时程信号及测站空间坐标等数据应以通用开放格式（如 ASCII、CSV 等）保存，不得仅保存为设备厂商的专有封闭格式；

2 数据处理的中间过程文件及算法参数配置说明应一并打包归档；

3 检测报告的电子版宜采用可长期保存的 PDF/A 格式存档。

【条文说明】电子数据归档是保证索力动力测试数据长期保存和后续分析的重要措施。原始振动时程信号、测点空间坐标等数据是开展复核分析、趋势评价和损伤识别的重要依据。因此，本条要求测试数据采用通用格式保存，并与检测报告同步归档，以保证数据具有长期可读取性和可追溯性。

引用标准名录

GB 50017 钢结构设计标准
GB 50205 钢结构工程施工质量验收标准
GB/T 50344 建筑结构检测技术标准
GB/T 50621 钢结构现场检测技术标准
GB 50982 建筑与桥梁结构监测技术规范
GB 55001 工程结构通用规范
GB 55006 钢结构通用规范
GB 55018 工程测量通用规范
GB/T 5223 预应力混凝土用钢丝
GB/T 5224 预应力混凝土用钢绞线
GB/T 14370 预应力筋用锚具、夹具和连接器
GB/T 33026 建筑结构用高强度钢绞线
GB/T 1.1 标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则
GB/T 6379.2 测量方法与结果的准确度（正确度与精密度） 第2部分：确定标准测量方法重复性与再现性的基本方法
GB/T 8170 数值修约规则与极限数值的表示和判定
GB/T 20485.21 振动与冲击传感器校准方法 第21部分：振动比较法校准
GB/T 20485.41 振动与冲击传感器校准方法 第41部分：激光测振仪校准
GB/T 27025 检测和校准实验室能力的通用要求
GB/T 29716.1 机械振动与冲击 信号处理 第1部分：引论
GB/T 29716.2 机械振动与冲击 信号处理 第2部分：傅里叶变换分析的时域窗
GB/T 29716.3 机械振动与冲击 信号处理 第3部分：时频分析方法
JJG 233 压电加速度计检定规程
JJF 1059.1 测量不确定度评定与表示
JJF 1219 激光测振仪校准规范
JGJ 257 索结构技术规程
JGJ/T 497 预应力钢结构技术标准
JTG/T J21-01 公路桥梁荷载试验规程
T/CECS 1010 建筑索结构节点设计标准
T/CECS 1339 大跨度钢结构监测技术规程
T/CECS 1341 建筑索结构工程施工标准
T/CECS 1363 预应力结构诊治技术规程