

中国交通运输协会团体标准

铁路预应力混凝土桥梁 智能张拉与压浆施工技术规范

Technical specification for intelligent tensioning and
grouting construction of railway prestressed concrete bridge

（征求意见稿）

编制说明

2023 年 8 月

一、任务来源、主编单位、参编单位、主要起草人

根据中国交通运输协会发布的“2021 年度第二批团体标准项目立项的公告”（中交 协秘字〔2021〕34 号）要求，由中国铁路设计集团有限公司作为主编单位，主持本规程的编制工作。

参编单位：天津市地下铁道集团有限公司、蜀道投资集团有限责任公司、湖南联智科技股份有限公司

主要起草人：

二、制订标准的必要性和意义

国内目前尚无针对智能预应力施工而制定的相应技术规程和标准，缺乏相关技术依据以及明确的标准流程与关键控制指标。

本标准的制订，是为了能够统一和规范预应力混凝土桥梁智能张拉压浆施工的管理标准，提升桥梁智能张拉压浆的施工质量，明确系统设备控制和测量传感器需要具备的功能和性能指标，满足现阶段交通运输工程领域信息化、远程化、实时化、规范化建设的需要。

三、主要工作过程

本标准通过收集既有工程应用经验，收集分析相关规范、资料，借鉴已有的科研成果以及相关标准，进行归纳吸收并经过试点应用，总结实践经验后，确定标准编制方向。经中国交通运输协会立项和大纲审批通过，根据评审会专家意见，形成征求意见稿，报中国交通运输协会评审。再根据评审会专家意见进行补充、修改，经中国交通运输协会同意，挂网征求意见。针对反馈意见，提出处理办法，进行补充、修改，形成送审稿。经中国交通运输协会同意，进行专家审查。根据专家审查会形成的专家意见进行修改，形成报批稿，上报审批。

四、制订标准的原则和依据，与现行法律、法规、标准的关系

本标准制订的基本原则是以现有铁路预应力混凝土桥梁张拉、压浆施工技术为基础，参照国家或行业规范、标准，针对智能张拉压浆设备及施工技术的特点进行定义、描述和规范。

本规程编制过程中，查阅了下列规范、标准和技术规程：

- (1) GB/T 14370-2015 预应力筋用锚具、夹具和连接器
- (2) GB/T 17671-2021 水泥胶砂强度检验方法 ISO 法
- (3) GB/T 28171-2011 嵌入式软件可靠性测试方法
- (4) GB/T 35014-2018 建筑施工机械与设备 预应力用自动压浆机
- (5) GB/T 7551-2008 称重传感器
- (6) JJF 1305-2011 线位移传感器校准规范
- (7) JJG 391-2009 力传感器
- (8) JJG 621-2012 液压千斤顶
- (9) JJG 860-2015 压力传感器静态检定规程
- (10) CJJT 290-2019 城市轨道交通桥梁工程施工及验收标准
- (11) JB/T 13462-2018 建筑施工机械与设备预应力用智能张拉机
- (12) JG/T 225-2020 预应力混凝土用金属波纹管
- (13) JG/T 319-2011 预应力用电动油泵
- (14) JG/T 321-2011 预应力用液压千斤顶
- (15) JT/T 529-2016 预应力混凝土桥梁用塑料波纹管
- (16) TB 10415-2018 铁路桥涵工程施工质量验收标准
- (17) TB 10424-2018 铁路混凝土工程施工质量验收标准
- (18) TB 10752-2018 高速铁路桥涵工程施工质量验收标准
- (19) TB/T 3193-2016 铁路工程预应力筋用夹片式锚具、夹具和连接器

-
- (20) T/CECS G: J51-01-2020 公路桥梁锚下有效预应力检测技术规程
 - (21) Q/CR 409-2017 铁路后张法预应力混凝土梁管道压浆技术条件
 - (22) Q/CR 566-2017 铁路后张法预应力混凝土梁摩阻试验方法
 - (23) Q/CR 586-2017 铁路预应力混凝土桥梁自动张拉系统
 - (24) Q/CR 710-2019 铁路桥梁预应力管道自动压浆系统
 - (25) Q/CR 9207-2017 铁路混凝土工程施工技术规程
 - (26) Q/CR 9603-2015 高速铁路桥涵工程施工技术规程

五、主要条款的说明，主要技术指标、参数、实验验证的论述

4 基本规定

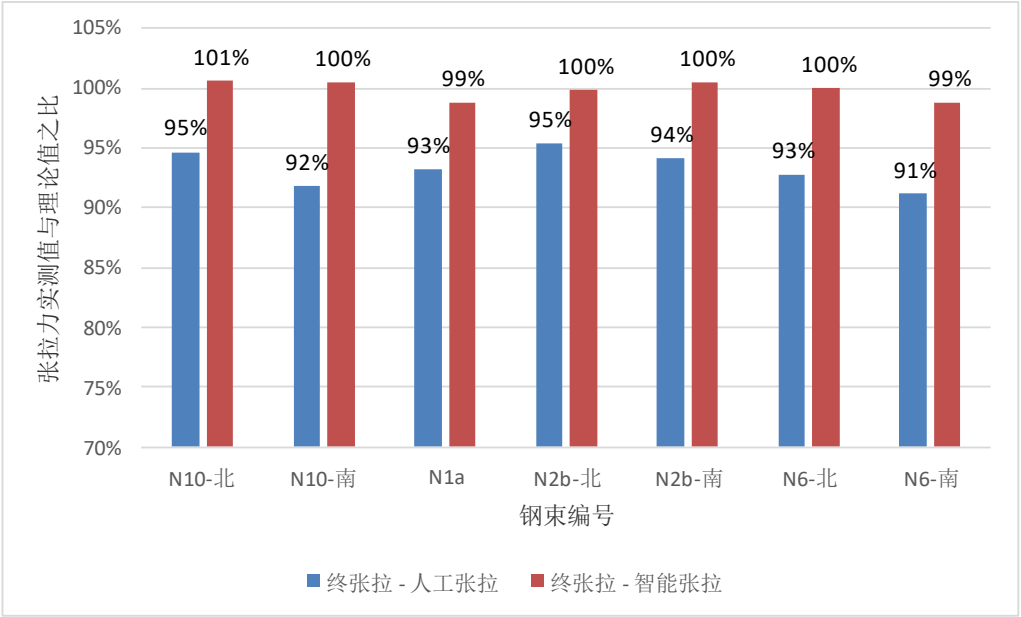
4.1 智能张拉与压浆施工应积极、稳妥地推广和应用新材料、新技术、新工艺与新设备，保证施工质量，提升作业效率与信息化、智能化水平。

条文说明：

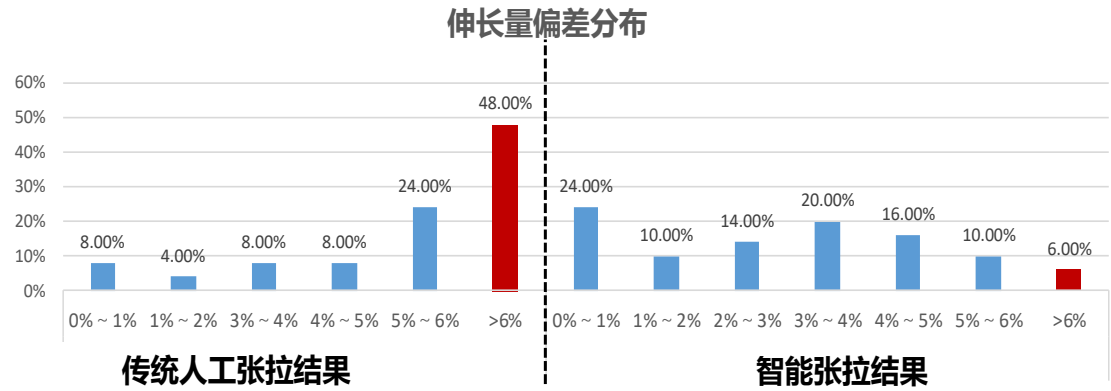
为全面提升铁路及城市轨道交通行业工程建设的技术水平与生产效率，满足智能建造的新需求，应持续进行科技创新，将成熟的、先进的、满足行业发展需求的“四新”成果，广泛地应用到工程建设当中，着力解决传统预应力工程领域的重难点问题，充分发挥科技在生产中的先导及保障作用，使其成为保证工程质量、提升作业效率及资源利用率的有效工具。

目前，基于智能设备的自动化预应力张拉压浆技术，在控制精度、自动化程度、信息化水平等方面均具备极大的优势，并在国内外桥梁预应力施工中得到广泛应用，例如，在港珠澳大桥、金沙江特大桥等国家级重点工程中都应用到预应力智能控制技术，并且该技术已经在铁路以及城市轨道交通领域的预应力施工中得到大力的推广与应用。据现场对各预应力施工工点进行调研后发现，传统的张拉压浆施工质量完全取决于作业人员的技术水平。其中传统张拉工艺存在问题为：①手动操作油泵，张拉力偏差可达±10%；②需8~10人同时工作，耗费人工；③油压及伸长值完全依靠人工判读，精度无法保证；④数据依靠人工记录，真实性、准确性不可控。而传统压浆施工存在的问题主要为：①上料、上水无法实现精确控制，水胶比无法保证；②进浆压力及持压时间均为人工控制，其压力易超过1MPa且不稳定；③压浆方式一般均为压力灌浆，无法保证压浆密实度；④压浆记录表均为事后填写，无法保证真实性。因此，传统的预应力施工工艺的施工效率、质量及安全性均无法得到保证，已不能满足当今智能建造的要求。采用先进的智能化预应力施工技术设备，人力成本可降低约50%，作业效率可提升约30%，结合物联网技术及云计算理念，将施工数据实时上传至管理系统，

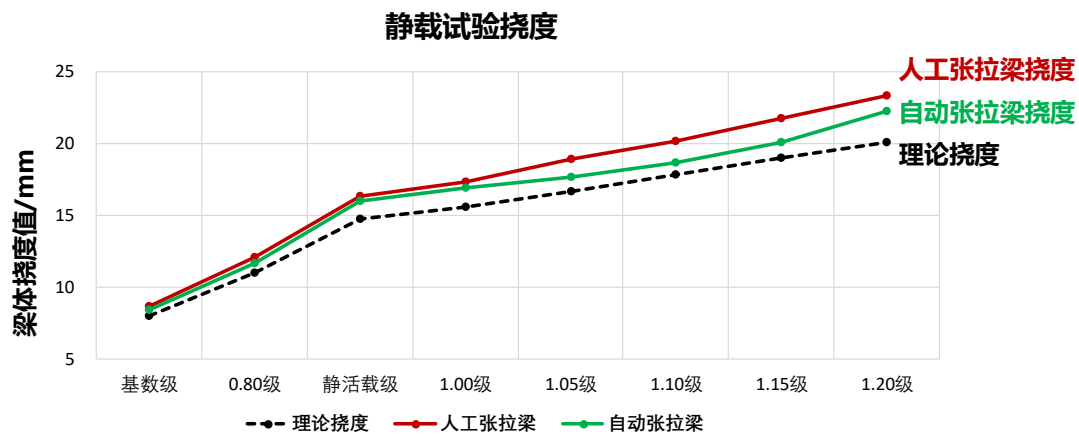
可实现预应力施工全过程质量远程控制，提升项目管理的标准化、信息化水平。通过进行现场足尺预应力张拉试验，试验过程中通过预埋索力传感器对采用传统人工张拉与采用智能张拉方式的后张法预应力混凝土预制简支箱梁的试验结果进行对比，证明采用智能张拉方式施工的预应力筋张拉力偏差可控制在 1% 以内，伸长值偏差不超过±6% 的占比在 94% 以上，且通过静载试验结果对比发现，采用智能张拉施工的梁体静载挠度较传统人工张拉更加接近理论值。



说明图 4.1 (a) 终张拉阶段采用不同工艺的张拉力实测值与理论值之比



说明图 4.1 (b) 采用不同工艺的伸长量偏差分布



说明图 4.1 (c) 采用不同工艺张拉的梁体挠度与理论值对比

4.5 智能张拉与压浆系统的参数信息配置由专人负责，并做好相应的维护工作。

条文说明：

目前，市场上用于预应力施工的自动张拉及压浆设备不胜枚举，其配套软件程序的操作流程与参数配置方式也各不相同，且流程一般较为复杂。施工单位对设备进行购置后，一般会由厂商专业技术人员对现场技术人员及进行系统性的操作培训，在保证参与预应力施工的技术人员均完成培训并能熟练操作设备的前提下，方可投入使用。用于智能张拉及压浆施工的各项信息及参数是决定施工质量与安全的关键因素，一旦出现疏漏或错误，将会造成不可挽回的损失。

4.6 智能张拉与压浆施工队伍由专业化人员组建，管理和作业人员相对固定，施工前应进行技术和安全交底，并完成岗前培训，经考核通过后方可上岗。

条文说明：

技术交底是施工单位项目总工程师及技术主管人员依据设计文件和设计技术交底纪要，将施工方案及施工工艺、施工进度计划、过程控制及质量标准、作业标准、材料准备及工装配置、安全措施和施工注意事项等向参与施工的技术管理人员和作业人员传达的过程。

由于的铁路建设标准高、技术难度高、质量要求高，且智能张拉压浆系统不同于以往传统的设备，具有复杂的电气设备、传感系统及软件操作系统，应对参与预应力智能张拉压浆

的作业人员进行岗前培训，使其能更快、更准确的掌握标准，应用好标准，避免因对系统和标准认识的不全面导致操作上的随意性，从而影响施工质量。

5 机具与材料

5.1 智能张拉系统

5.1.1 系统组成

智能张拉系统组成见图 1，分为动力子系统、传感子系统、控制子系统和辅助子系统。

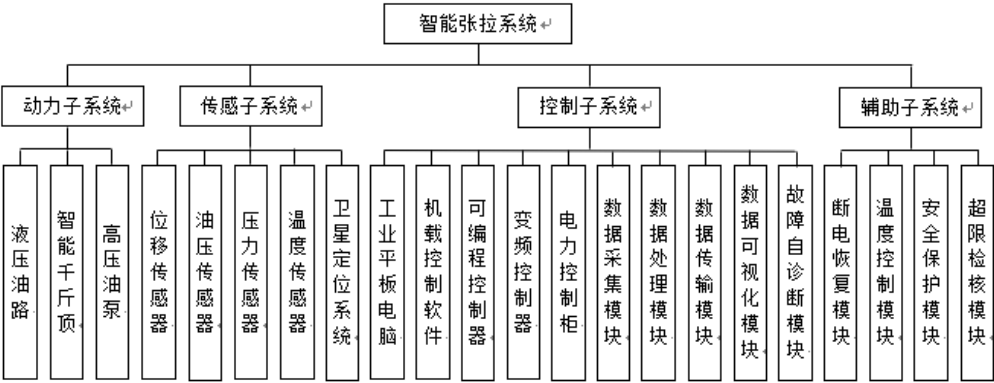
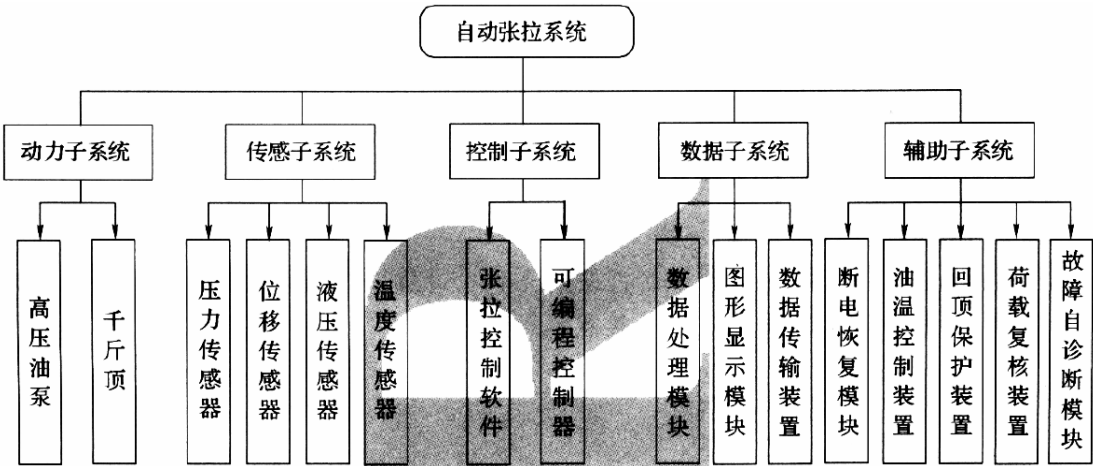


图 1 智能张拉系统组成

条文说明：

参考《铁路预应力混凝土桥梁自动张拉系统》Q/CR 586 中自动张拉系统组成图，并根据工程实践经验，对智能张拉系统的组成结构进行了整理和完善，在原有基础上新增了：控制子系统中的电力控制柜、数据采集模块、工业平板电脑及变频控制器、传感子系统中的卫星定位模块。并将部分模块名称进行了重新定义。Q/CR 586 中自动张拉系统组成图如下所示：



5.1.2 动力子系统

5.1.2.1 千斤顶公称张拉力额定量程不应小于最大张拉控制力的 1.2 倍, 且不宜大于最大张拉控制力的 1.5 倍。

5.1.2.2 千斤顶最大行程宜按预应力筋的伸长量与张拉初始阶段预留行程量之和计算。

5.1.2.4 油压超出额定压力 10%时, 应具备自动溢流保护功能。

条文说明:

5.1.2.2 预应力筋张拉前, 应先根据现场实际情况为张拉施工确定千斤顶的规格型号, 以及其最大工作行程, 可通过预应力筋的理论伸长量与预应力筋完全受力前的预估千斤顶活塞伸出量进行加和计算并最终确定, 避免因千斤顶工作行程不足而导致同一阶段内的预应力筋进行多次张拉, 保证预应力张拉在千斤顶的一个行程内完成施工, 提高工作效率。

5.1.2.4 参考《建筑施工机械与设备 预应力用智能张拉机》JB/T 13462 第 5.5.3 及 5.5.4 条, 对系统油压及力值输出安全性作出要求。系统油压为智能张拉泵站阀块内部油压, 在千斤顶达到极限行程或内部油路出现故障时系统油压可能出现超出额定压力情况, 为保障张拉泵站内液压系统的安全, 采取自动溢流保护措施。在张拉千斤顶输出力值数据反馈传输失败等情况下可能出现输出力值超过工作设定力值的情况, 为保证预应力的准确施加以及预制构件的结构安全, 需要采取溢流保护机制及自动停机的安全保障措施。

5.1.3 传感子系统

5.1.3.1 应同时具备测力传感器与液压传感器, 且液压传感器应安装于智能千斤顶端。

5.1.3.2 力值测量宜采用轮辐式测力传感器, 其高度尺寸不宜大于 150mm; 油压测量宜采用变阻式液压传感器。

5.1.3.4 压力传感器额定量程应满足所使用千斤顶公称油压级别, 且不小于 600bar。

5.1.3.6 温度传感器额定量程为 $-30^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$, 示值精度 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。

条文说明:

5.1.3.1 使用双传感器测力机制，便于智能张拉系统对力值的自校正，可实现传感器间的相互校核，保证力值测量的准确性。当使用所测得油压换算的力值与力传感器直接读取的力值出现±5%以上的偏差时，系统将自动进行预警提示。根据施工经验及现场工程试验，张拉作业时，当系统油压稳定在 45MPa 左右，通过将监测到的液压泵站端油压与千斤顶端油压进行对比（除去千斤顶内泄漏原因造成的压降影响），发现千斤顶端较泵站端油压约降低 1.5%左右，该现象在低温地区及供油管路较长的作业条件时尤为明显。为确保预应力的准确施加，保证施工质量，故规定油压传感器应安置于千斤顶端，可有效避免因管路过长产生压降而导致的控制精度损失。

5.1.3.2 目前，轮辐式测力传感器广泛应用于称重、拉压力检测及力学试验领域，较其它筒式传感器，其具有良好的自然线性、强度高、抗偏载能力强、外形高度低、性能稳定等特点，额定荷载量程为 0~5000kN，重复性 0.05%FS，经测试，其荷载准确性可保持在 0.5%以内，并可在-30℃~60℃的温度范围内正常工作，具备 IP65 以上的防护等级。根据现场调查发现，用于预应力张拉的轮辐式测力传感器，其结构高度一般不大于 150mm，此外形设计可有效减少预应力筋下料长度，提升工程经济性。

变阻式液压传感器是最为常用的一种压力传感器，广泛应用于铁路交通、水利水电、液压机械等领域的工业自控环境，其综合精度可达到 0.5%FS，温度漂移量≤±0.05%FS℃，并可根据实际使用环境确定量程范围。

5.1.3.4 根据目前张拉施工中常用的不同类型千斤顶，其技术参数如下表所示，其最大公称油压为 54MPa，考虑油压传感器的适用性，其油压量程的下限值应不小于千斤顶的最大公称油压，因此要求其额定量程不小于 60MPa。

说明表 5.1.2 千斤顶技术参数表

型号	公称张 拉力 kN	公称 油压 MPa	张拉活塞 面积 m ²	回程 油压 MPa	穿心 孔径 mm	张拉 行程 mm	质 量 kg	外形尺寸 D×L mm
YDC1500B-200	1500	51	2.937*10 ⁻²	<25	ø97	200	96	ø 270*346

YDC2000B-200	2000	53	3.779×10^{-2}	<25	ø110	200	130	ø 305*360
YDC2500B-200	2500	54	4.594×10^{-2}	<25	ø138	200	168	ø 344*361
YDC3000B-200	3000	52	5.773×10^{-2}	<25	ø145	200	196	ø 376*367
YDC3500B-200	3500	54	6.479×10^{-2}	<25	ø175	200	234	ø 432*379
YDC4000B-200	3956	52	7.607×10^{-2}	<25	ø170	200	270	ø 432*400
YDC4500B-200	4493	51	8.809×10^{-2}	<25	ø175	200	320	ø 460*390
YDC5000B-200	5025	50	10.05×10^{-2}	<25	ø196	200	395	ø 500*410
YDC5500B-200	5555	52	10.676×10^{-2}	<25	ø200	200	450	ø 540*465
YDC6000B-200	6050	50	12.097×10^{-2}	<25	ø195	200	540	ø 550*430

5.1.3.6 参考《铁路预应力混凝土桥梁自动张拉系统》Q/CR 586 中 6.1.8 条 工作环境温度为 $-10^{\circ}\text{C} \sim 45^{\circ}\text{C}$ 的要求，考虑规范中对寒冷天气条件下预应力张拉作业温度不宜低于 -15°C 的要求，以及现场张拉设备的温度传感器记录中曾多次出现 50°C 的情况，为保证智能张拉设备在现场的适用性，故在现有技术的基础上将其工作温度范围调整规定 $-15^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ 间。另外根据现场实际工程经验，智能张拉设备存在雨天环境下作业的可能性，考虑电子元器件对湿度的敏感性，防止因湿度过大对设备电气系统造成影响，因此，做出相对工作湿度范围宜低于 85%的要求。

5.1.4 控制子系统

5.1.4.1 宜采用两泵四顶的硬件组成模式，可对各千斤顶单独控制，满足“双束双端”、“双束单端”、“单束双端”及“单束单端”工况。

5.1.4.2 主、副泵站之间应兼容无线与有线两种通讯方式，及无线信号增强功能，工作时由主泵控制副泵运行。

5.1.4.3 控制软件应稳定可靠、界面清晰、易于人机交互操作，可通过有线或无线方式访问互联网。

5.1.4.4 预设张拉信息后，可一键启动，自动完成张拉、持荷、锚固全过程，可实现自动和手动两种控制模式的转换，数据可自动记录存储且不可修改，采集频率不小于 5Hz。

5.1.4.5 输出力值超过工作设定力值 5%时，应能自动停机。

5.1.4.6 可实现伸长值偏差超限智能预警：黄色预警时，做出暂停提示；橙色预警时，

自动暂停；红色预警时，自动停止张拉。

5.1.4.7 具备油温自动调控功能，正常工作时，油温可自动控制在 $5^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ 之间。

5.1.4.8 具备如下参数化配置与全过程可视化功能：

a) 张拉参数设置方式应支持自动载入与手动设置双模式；

a) 张拉过程中应能实时显示张拉力偏差、预应力筋伸长值偏差、不同步率等张拉控制指标，并自动绘制时间-伸长值、时间-力值、力值-伸长值数据曲线；

b) 现场连续采集数据应能实时上传至指定平台并实现重播回放；

c) 可实现数据的查询和导出，并自动生成张拉报表，内容及格式见附录 A 与附录 B。

条文说明：

5.1.4.1 为保证智能张拉设备可适应施工中的不同工况，满足简支箱梁和现浇连续梁的双束双端张拉、简支 T 梁的单束双端张拉以及大跨度连续梁中可能出现的单束单端和双束单端张拉等工作模式，同时考虑智能泵站与千斤顶的最佳匹配与设备转运问题，建议采用两泵四顶的设备组成方式。较其它采用四泵四顶工作模式的智能张拉设备，此种配置模式可减少 50% 的设备体量，单台泵站可为两台千斤顶同时提供动力，有效降低了设备制造、检验、运输和安装的成本，提高了工作效率。

5.1.4.2 同时具备无线和有线的主副泵通讯方式，可使设备在不同作业环境下均能保持良好的信号传输质量，当处于可能会对信号产生严重遮挡或屏蔽的预制梁场中进行作业时，可采用有线连接的方式，保证主副泵间的正常通讯，减少因信号衰减带来的通讯延迟或中断问题。当置于现浇梁位置进行作业且距离较远时，亦可采用无线通讯方式，避免因长距离线缆连接造成的不便，提升施工作业的灵活性。为满足张拉数据实时上传的需求，则需要控制子系统工业平板具备相应的网卡，通过软件系统进行互联网访问。

5.1.4.4 实现张拉全过程的自动控制与数据存储，是智能张拉系统应具备的最基本功能，降低人力资源成本的同时避免人为因素对施工质量的影响。但同时考虑到可能出现的突发意外情况以及对设备进行检修及调整时均需要采取相应的人为控制措施，因此具备手动控

制功能也是有必要的。为保证张拉施工的过程数据真实性与准确性,应对数据文件以加密或其它形式的手段进行记录存储,避免其被人为篡改的可能。对于条文中出现的数据采集频率,这里定义为智能张拉设备上位机与下位机间的交互,既下位机向上位机传递千斤顶压力信号,并由上位机给下位机发出指令的过程,当交互频率低于 5Hz 时,系统油压控制精度将降低,无法满足 $\pm 1\%$ 的力值偏差控制要求,因此,数据采集频率应不小于 5Hz。

5.1.4.6 对智能张拉系统做出分级预警功能要求,可使其根据不同预警等级制定不同的应对措施,同时细化现场施工管理工作。对某些特殊部位且曲率半径较小的预应力筋,工程实践表明其预应力筋的实际伸长值与计算伸长值的相对偏差并不能满足 $\pm 6\%$ 的规定,需要具体问题具体分析,对超出限差要求的情况分类评判,最终秉承“以张拉力控制为主,伸长值作为校核”的技术原则,因此制定本条规定。

5.1.4.7 良好的液压油温是保证预应力体系正常运行的基础,在寒冷天气条件或高温环境下,液压油的性能会随温度变化而发生改变,低温状态下油液流动性过低将导致油液抽吸困难,严重影响系统中油泵、阀体及千斤顶工作性能;高温状态下将使油液粘稠度过低、加速密封件老化及内泄现象,降低其抗磨抗压性能,两种情况均会导致张拉力加载速度及准确性受到影响。根据液压油黏-温特性曲线,考虑预应力张拉施工一般采用 L-HM32 或 46 号液压油,其最佳工作温度一般为 $5^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ 。因此,智能张拉设备中有必要具备自动调节油温的功能,以保证液压油的工作性能维持在正常水平。

5.1.5 辅助子系统

5.1.5.2 宜配备张拉台车等配套工装,具备行走及千斤顶自动升降功能。

5.1.5.3 宜配备卫星定位模块,定位精度不大于 2.5m。

5.1.5.4 宜采用具备自动量测功能的配套工装对工具夹片外露量进行采集。

5.1.5.5 宜具备力传感器自动校准功能。

5.1.5.6 具备断电恢复、故障自诊断、回顶保护、荷载复核等辅助功能:

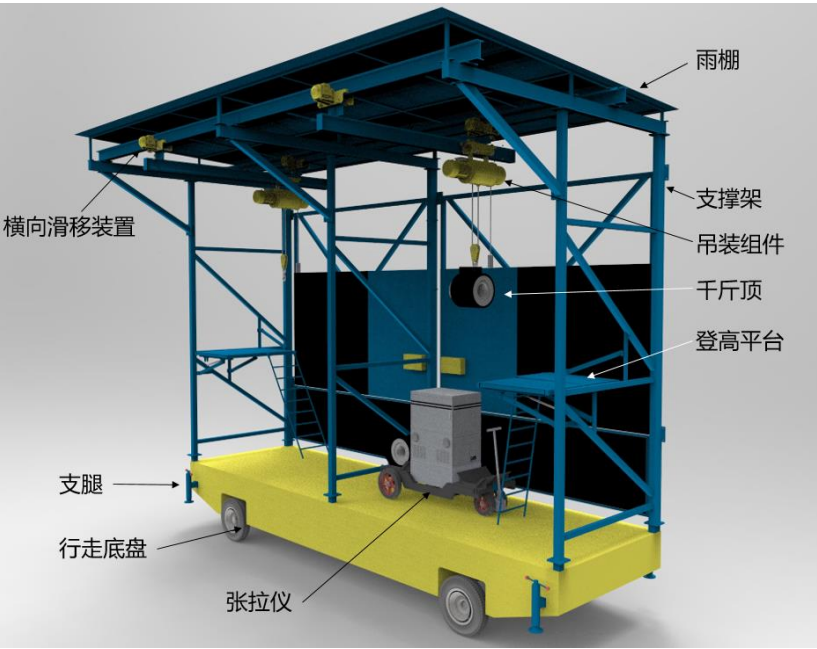
5.1.5.7 发生故障或突然断电时应能自动保存张拉数据,恢复供电后可按断电前状态

继续完成张拉；

5.1.5.8 张拉过程中，应能自动分析、判断设备是否出现故障。

条文说明：

5.1.5.2 根据现场工程实际经验,配备相应的可行走张拉台车装置可大幅提升张拉设备的转运效率及设备智能化水平,具备千斤顶自动升降功能,可降低作业人员劳动强度,方便张拉施工,减少人工操作带来的安全风险,同等人员配置条件下,其转运及千斤顶装卸作业效率可提升约 30%~40%。张拉一体化台车由行走底盘、支撑架、吊装组件、横向滑移装置、雨棚和登高平台组成。可利用遥控装置在梁场内自主行走,无需额外吊装设备、转运设备辅助,增强张拉施工模块单兵作战的灵活性。张拉台车结构示意图如下:

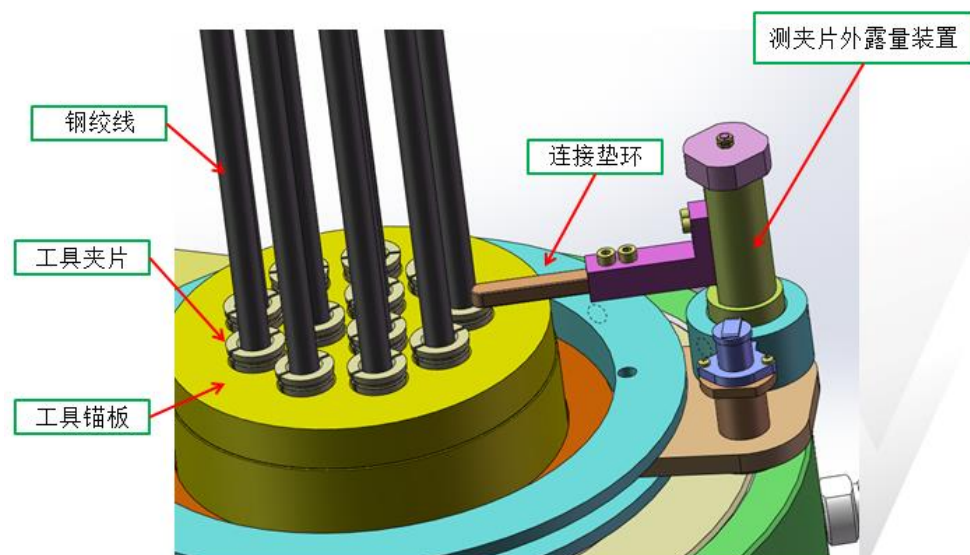


说明图 5.1.5.2 预应力张拉台车系统结构组成示意

5.1.5.3 根据现场调研情况以及在工程实际应用中发现,预应力张拉施工中,存在多个工点使用一台张拉设备的情况,且在实际使用过程中存在设备并未进行使用而张拉数据报表却已经出具的现象,为避免此种现象的发生,在智能张拉设备中嵌入卫星定位装置,配合信息化平台远程数据查看的功能,使设备的现场应用情况更加清晰透明,作业的时间、地点、工作状态均能完整的体现,将更便于配合后期张拉数据的真实性溯源工作,提升数据的真实

性，满足预应力张拉施工远程化、信息化的管理需求。

5.1.5.4 根据工程实际经验，采用具备工具夹片回缩量自动量测功能的配套工装，可提升张拉施工关键值量取的自动化水平及测量精度，通过对夹片外露量的自动采集记录，可保证数据的准确性与真实性，有效避免人为因素影响，消除安全隐患。夹片外露量测量装置固定于活塞伸出量测量装置位移传感器的连接垫环上。装置内部采用位移传感器，活塞套位置安装连接座，连接座中有可伸缩测量板能够在一定力度内 360° 旋转，便于对不同夹片测量时进行调整。在弹簧压力下，测量板有效的搭接在夹片上，实时跟进夹片的回缩值，极大程度的提高测量数值的准确性和稳定性。



说明图 5.1.5.4 夹片外露量测量装置-安装示意图

5.1.5.5 目前用于预应力施工的传统或大多数自动张拉设备，其校准方式均仍采用传统方法进行，既手动操作油泵控制千斤顶进油，按张拉系统满量程的 20%、40%、60%、80%及 100%逐级进行加载，加载过程中，由至少两名操作人员对设备端力值及标准测力传感器端示值分别进行读取，并手动记录下每一个阶段的油压值和标准测力传感器的值填入表格中，再将记录值进行计算从而得到千斤顶的油压-力值关系曲线，或将自动张拉系统示值与标准测力传感器的示值进行比较，按其差值手动对张拉设备端力传感器的调整模块进行重新设定。

对于传统校准方法，其手动控制千斤顶进油的精度较低，实际油压与目标值存在差异，一旦操作不当，则需要归零重新开始测试。校准过程由人工读数并记录，与标准值对比亦会产生较大偏差，最终将影响数据的准确性。若采用自动化、参数化校准程序，则可实现根据预先设置的校准参数自动完成分级加载,加载过程中自动读取并记录各加载级千斤顶端及标准力值传感器的读数，并能完成校准数据的自动回归计算，提升检测精度，避免人为因素影响。因此，本规程在对智能张拉设备的要求中，新增此条。

5.1.5.6、5.1.5.7 预应力张拉施工其自身存在特殊性，是一种单向的不可逆的过程，早期的某些自动张拉设备,均出现因施工过程中设备元器件故障或突然断电导致张拉过程中断、千斤顶无法拆卸甚至损坏以及数据丢失等问题，严重影响生产质量，造成了无法挽回的损失。因此，考虑施工作业中的人员与机具的安全，保证施工质量以及数据的连续性与完整性，做出本条要求。

5.2 智能压浆系统

5.2.1 系统组成

智能压浆系统组成见图 2，分为制浆储浆子系统、抽真空及压浆子系统、传感子系统、控制子系统、和辅助子系统，同时具备废料收集装置。

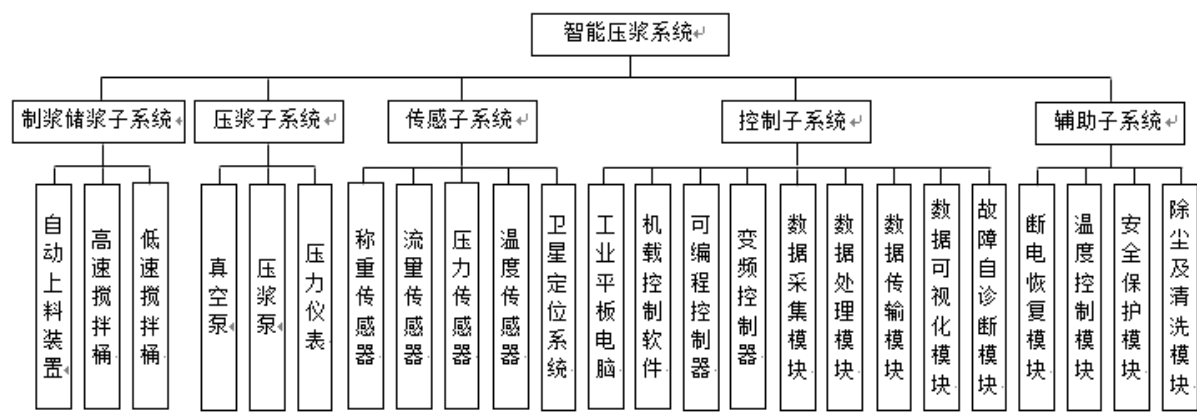
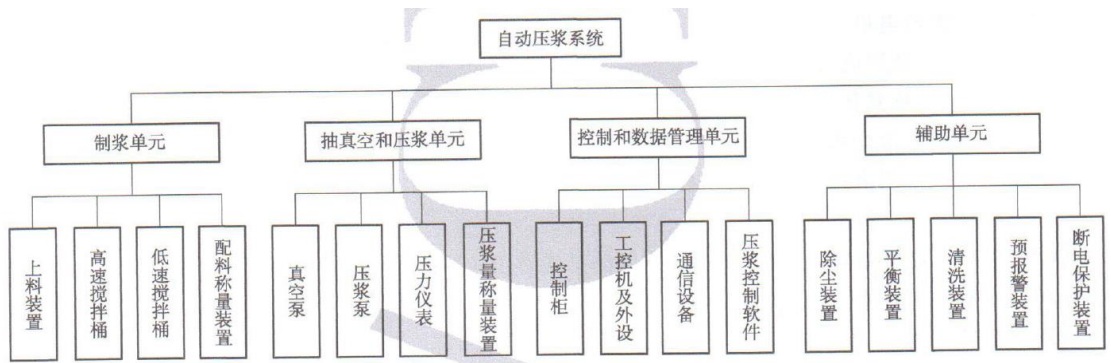


图 2 智能压浆系统组成

条文说明：

参考《铁路桥梁预应力管道自动压浆系统》Q/CR 710 中自动压浆系统组成图，并根据工程实践经验，对智能压浆系统的组成结构进行了整理和完善，将系统组成划分为：制储浆子系统、压浆子系统、传感子系统、控制子系统及辅助子系统，较 Q/CR 710 的系统组成，增加了传感子系统中的流量传感器、压力传感器、温度传感器及卫星定位装置，同时将系统控制与数据管理进行区分并对应细化了其相关组成内容。Q/CR 710 中自动压浆系统组成图如下所示：



5.2.2 制浆储浆子系统

5.2.2.1 高速制浆桶和低速储浆桶的容量应匹配，制浆速度和储浆容量可满足正常压浆作业需求，压浆施工过程中不因缺浆而中断。

5.2.2.2 高速制浆机叶轮转速不低于1000 r/min，搅拌叶片圆周切线速度不低于15m/s，低速储浆桶叶轮转速为50r/min~70r/min。

5.2.2.3 高速制浆桶与低速储浆桶之间应设置过滤网，网格尺寸不大于3mm×3mm。

条文说明：

5.2.2.2 该技术指标是进行浆液材料和搅拌机对应参数试验时得出的数据，当高速及低速搅拌桶的搅拌速度达到本条中的要求时，压浆料或水泥与压浆剂的混合物可完全溶解于水中，并达到理想的水化反应效果。

5.2.3 压浆子系统

5.2.3.1 采用真空辅助压浆工艺时，真空泵极限负压值不低于1.0 bar。

5.2.3.2 应选用具有连续作业能力的压浆泵，宜采用单螺杆泵。

条文说明：

5.2.3.1 对于采用真空辅助压浆工艺时的管道真空度，《铁路后张法预应力混凝土梁管道压浆技术条件》Q/CR 409中要求其稳定在 $-0.06\text{MPa}\sim-0.08\text{MPa}$ 之间；《城市轨道交通桥梁工程施工及验收标准》CJJ/T 290中要求管道真空度应为 $-0.06\text{MPa}\sim-0.10\text{MPa}$ ；《铁路桥梁预应力管道自动压浆系统》Q/CR 710中，在设备性能方面要求真空泵的极限真空度不应低于 -0.092MPa ；《铁路混凝土工程施工技术规程》Q/CR 9207第7.7.4款第一条中要求真空泵应能达到 0.1MPa 的负压力。因此，本条综合考虑各规范标准中对于设备性能及工艺的要求，取极限真空度不低于 -0.10MPa ，可同时满足铁路行业及轨道交通行业的管道真空压浆需求。

5.2.4 传感子系统

5.2.4.1 流量传感器精度等级不低于0.5级。

5.2.4.2 称重装置最大允许误差不大于0.3%，并满足GB/T 7551的相关要求。

条文说明：

5.2.4.2 考虑称重传感器的误差将直接影响其称量准确性，参考《铁路桥梁预应力管道自动压浆系统》Q/CR 710第6.1.3条，对称重传感器最大允许误差作出要求。

5.2.5 控制子系统

5.2.5.1 控制软件应具有参数预设、自动抽真空、自动上料、自动计量、称量控制和自动制浆、储浆功能，并能实时显示设备工作地理位置。

5.2.5.2 制浆、压浆参数信息预设完成后，应能一键启动并自动完成压浆全过程。

5.2.5.3 应能实现压浆施工过程的自动和手动控制模式切换。

5.2.5.4 具备自动压浆、压力调整、连续输出和压力保持的功能，可控制进口压力，自动检测进浆量和返浆量，可实现自动补压和持压双控。

5.2.5.5 加压过程中，系统能够及时、准确地指示出管路上的压力值。

5.2.5.6 可实现如下关键参数的设置、显示与校核功能：

a) 输入水、压浆剂、水泥(或水、压浆料)质量后应能自动计算并显示水胶比，水胶比超出规范允许值时应能进行校核提示；

a) 搅拌时间超出设定范围时应进行提示；

b) 压浆压力可根据最高压浆压力和安全压力分别设置；

c) 应具有超压报警和压浆泵空转报警功能；

d) 系统应能对稳压时间进行限值设定。

5.2.5.7 压浆过程中应能自动判断预应力管道压浆饱满度。

5.2.5.8 可实现压浆量偏差超限三级智能预警，出现红色预警时，系统自动停止压浆。

5.2.5.9 具备数据自动采集、存储、查询、报表生成及数据上传的功能，报表内容及格式见附录C。

5.2.5.10 具备自动清洗功能及流程提示。

条文说明：

5.2.5.1 因要求智能压浆设备中应配备卫星定位模块，故其定位信息应以坐标或其它形式展现于控制系统中，以用来判断设备所在的作业地点是否与实际应施工的工点位置保持一致，因此新增自动实时跟踪并显示设备工作地理位置的要求。

5.2.5.3 考虑到可能出现的突发意外情况以及对设备进行检修及调整时均需要采取相应的人为控制措施，因此具备手动控制功能也是有必要的。

5.2.5.4 根据现场实际经验，具备自动补压和持压双控功能，可根据设备自带压力传感器的测量值及设定的保压时间对压浆压力进行动态调整。通过自动检测进浆量和返浆量，可计算孔道内压注的浆液量，进而判断孔道压浆的密实程度，有利于保证孔道压浆的密实性。

5.2.5.7、5.2.5.8 压浆系统可以通过低速桶的称重传感器计量低速桶泵出浆液重量，通过废料小车对溢出浆液进行计量，低速桶泵出的浆液减去废料小车的浆液即为孔道内的浆液，由于称重系统的误差在1%以内，因此，系统可以准确的判断孔道的压浆饱满程度。故新

增设备控制软件应能根据实际压浆量进行管道压浆饱满度的判定功能,并在压浆过程中根据实际与理论压浆量的偏差值情况,做出分级预警功能要求,可使其根据不同预警等级制定不同的应对措施,同时细化现场施工管理工作。

5.2.6 辅助子系统

5.2.6.1 高速搅拌桶等机械运转部位应设有安全防护装置,控制面板应配备急停旋钮。

5.2.6.2 应配备安全警示标识。

5.2.6.3 系统设备应配置接地保护端子。

5.2.6.4 制浆系统的高速制浆桶和低速储浆桶均应设置排浆口。

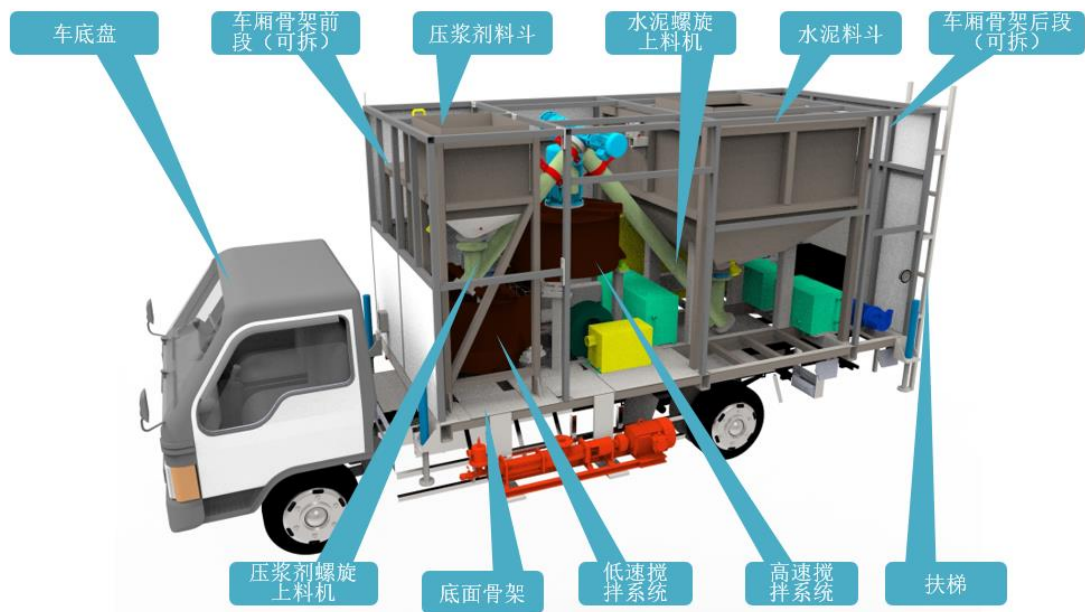
5.2.6.5 宜配备具有自行走功能的工装。

5.2.6.6 应配备高压水枪等清洗装置和除尘装置。

5.2.6.7 宜配备卫星定位模块,定位精度不大于2.5m。

条文说明:

5.2.6.5 根据现场工程实际经验,为智能压浆系统配备具有行走功能的工装(压浆一体化台车)可提高压浆施工的灵活性及智能化施工水平,减少原材料浪费,降低作业人员劳动强度及环境污染,方便压浆施工,一次转运量可满足一孔梁压浆所用材料的需求,较传统压浆工艺,作业效率可整体提升约50%以上。压浆一体化台车将车架行走系统、液压支撑系统、水泥和压浆剂储料系统、自动上料计量系统、高速搅拌系统、低速搅拌系统、压浆系统、高压清洗系统、自动控制系统、信息监控传输记录系统十大部分高度集成。该压浆台车适用于散装水泥,料仓分水泥料仓和压浆剂料仓,台车具备配料搅拌、自动压浆、压浆计量、语音提示、数据上传和远程监控功能,为车载一体移动式设备。压浆台车结构示意图如下:



说明图5.2.6.5 预应力智能压浆台车系统结构组成示意

5.2.6.7 为避免出现未真正使用设备或手动操作设备进行施工,后期编造及篡改数据的可能,在智能张拉设备中嵌入卫星定位装置,配合信息化平台远程数据查看的功能,可使管理者对设备的现场作业时间、地点及工作状态能够了如指掌,便于对后期压浆数据进行真实性溯源工作,提升数据的真实性,满足预应力张拉施工远程化、信息化的管理需求。

6 系统检验与校准

6.1 智能张拉系统

6.1.1 智能张拉系统投入使用前应满足如下要求:

a) 系统中千斤顶、测力传感器、油压传感器、位移传感器、温度传感器、工业可编程控制器(PLC)、工业平板电脑等主要部件应具备出厂质量检验合格证书,各类传感器应具备经有资质的检定机构配套检定合格后的检定证书。

b) 宜完成设备与建设单位认可的信息化管理平台间的数据接口调试。

6.1.2 测量性能检验、控制性能检验、长期运行性能检验所用组装件应由智能张拉成套产品、工装配件、夹具和预应力筋组装而成，当系统组装进行检验时，按不小于千斤顶额定力值的0.8倍确定所需安装的预应力筋根数，预应力筋受力长度不宜小于3 m。

6.1.3 智能张拉系统力传感器、压力传感器及位移传感器处于下列情况之一时，应进行校准：

- a) 首次使用前；
- b) 距上次校准时间达到6个月时；
- c) 距上次校准使用次数达到3000次时；
- d) 张拉设备异常、检修或更换配件后。

6.1.4 液压千斤顶应与智能泵站、控制子系统配套校准，校准周期不超过3个月。

条文说明：

6.1.1 对于智能张拉系统出厂前的检验项，《建筑施工机械与设备 预应力用智能张拉机》JB/T 13462 及《铁路预应力混凝土桥梁自动张拉系统》Q/CR 586 中均作出了应进行出厂检验和型式检验的要求，但有所不同，主要体现为以下几点：

(1) Q/CR 586 中第 6.1.1 条提出自动张拉系统制造应出具有资质的检测机构检测合格的产品型式检验报告、配套软件评测报告，而 JB/T 13462 中并未对此做出要求；

(2) JB/T 13462 与 Q/CR 586 虽然均做出产品出厂检验及型式检验的要求，但其检验项目的命名与数量均不相同，对于型式检验的规则设定也有所不同。JB/T 13462 中检验项分别为：噪声检验、空载性能检验、满载性能检验、超载性能检验、长期运行性能检验、测量性能检验、张拉控制性能检验、电磁兼容性检验、无线传输和断电保护信息性能检验；而 Q/CR 586 中检验项分别为：控制软件检验、张拉力值精度检验、张拉力值偏差检验、自动控制检验、断电恢复检验、荷载复核检验、故障自诊断检验、数据传输检验、连续工作稳定性检验。Q/CR 586 中对型式检验规则的设定较 JB/T 13462 更为严格，其符合条件的差异主要体现为：正常生产每 2 年时；产品停产 1 年后，恢复生产时；生产满 50 套时。

(3)JB/T 13462 中对于张拉力同步控制误差提出了不宜超过 $\pm 2\%$ 的要求,而在 Q/CR 586 中并未对此做出要求。

考虑《建筑施工机械与设备 预应力用智能张拉机》JB/T 13462做为机械行业标准,并适用于预应力施工中额定压力不大于70MPa的以液压油为介质的智能张拉机,其标准等级与适用范围均高于《铁路预应力混凝土桥梁自动张拉系统》Q/CR 586,但同时考虑铁路行业建设标准高、技术难度高、质量要求高的特点,对于设备、材料、工艺及质量的管理均较为严格,故要求智能张拉系统的出厂检验和型式检验应同时满足两部标准的要求,对于JB/T 13462中未列出或未涉及到的内容,应参照Q/CR 586执行。同时,新增了智能张拉系统应完成设备与建设单位指定平台间的数据接口调试,以满足智能张拉设备可按照规定数据接口进行数据上传的要求。

6.1.3、6.1.4 《铁路混凝土工程施工技术规程》Q/CR 9207中对千斤顶需进行校准的周期做出了相关要求,在千斤顶的校准周期方面要求预制梁张拉达到200次且不超过1个月、其他现浇构件达到300次时且不超过3个月进行校准;《建筑施工机械与设备 预应力用智能张拉机》JB/T 13462中仅做出千斤顶应与数控液压泵站及控制系统的配套校准的周期做出不应超过6个月的要求,《液压千斤顶》JJG 621中第8.2条要求检定周期一般不超过6个月,但均未明确其使用次数。本规程结合上述规范要求,根据实际工程经验,做出此项要求。对于智能张拉设备所使用的各类传感器,《力传感器》JJG 391、《压力传感器(静态)》JJG 860及《线位移传感器校准规范》JJF 1305中给出的检定或校准周期要求,力传感器一般不超过1年进行检定,压力传感器及位移传感器一般不超过1年进行校准,参考《铁路预应力混凝土桥梁自动张拉系统》Q/CR 586中第7.1.2条要求,并结合工程实际,考虑预制梁管道较多,生产过程中张拉频次较高,故做出各类传感器使用周期在达到6个月或3000次时应进行校准的要求。

另外,由于智能张拉系统中千斤顶与各传感器属于两类不同的设备,其对应的检定或校准项也不相同,因此,本条文对千斤顶与传感器的校准要求进行了分开说明。

根据国家现行标准《通用计量术语与定义》JJF1001定义，校准属于测量的范畴，其目的是确定仪器或测量系统的静态特性指标，消除系统误差。

6.2 智能压浆系统

6.2.1 智能压浆系统投入使用前应满足如下要求：

a) 系统中所用的计量器具、仪表、及真空泵、压浆泵、电机等关键部件均应具备出厂质量检验合格证书，各类仪表及传感器应具备经有资质的检定机构配套检定合格后的检定证书。

b) 宜完成设备与建设单位认可的信息化管理平台间的数据接口调试。

6.2.2 系统所使用的称重传感器、压力传感器应满足GB/T 7551及JJG 860的相关要求，压力仪表应满足JB/T 6804的相关规定。

6.2.3 管道压浆前应对系统设备进行校准，并满足GB/T 35014及Q/CR 710中相关要求。

6.2.4 高低速搅拌桶的称量装置和放浆称量装置具备以下条件之一者，应重新校准：

- a) 距上次校准时间达到6个月时；
- b) 距上次校准使用次数达到5000个管道；
- c) 设备检修或更换配件后；
- d) 设备出现异常情况时。

6.2.5 智能压浆设备的压力测量装置和流量监测装置具备以下条件之一者，应重新校准：

- a) 距上次校准时间达到12个月时；
- b) 设备检修或更换配件后；
- c) 设备出现异常情况时。

条文说明：

6.2.1 《建筑施工机械与设备 预应力用自动压浆机》GB/T 35014 及《铁路桥梁预应力管道自动压浆系统》Q/CR 710 中均对智能张拉设备的检验规则做出了明确要求，但两者在

应进行检验的条件及检验项目方面，存在差异，具体为以下几点：

(1) Q/CR 710 中第 6.1.1 条提出自动压浆系统制造应出具有资质的检测机构检测合格的产品型式检验报告、配套软件评测报告，而 GB/T 35014 中并未对此做出要求；

(2) GB/T 35014 与 Q/CR 710 虽然均做出产品出厂检验及型式检验的要求，但其检验项目的命名与数量均不相同，对于型式检验的规则设定也存在差异，不同点在于：GB/T 35014 中要求产品停产 3 年后，恢复生产时应进行检验；正常生产时，每三年进行一次检验；国家质量监督机构提出型式检验要求时进行检验。而 Q/CR 710 中则要求产品停产 1 年后，恢复生产时；生产每 2 年或每满 100 套时进行检验，其要求较 GB/T 35014 更为严格。

考虑《建筑施工机械与设备 预应力用自动压浆机》GB/T 35014 做为机械行业标准，并适用于预应力工程中的自动压浆机，其标准等级与适用范围均高于《铁路桥梁预应力管道自动压浆系统》Q/CR 710，但同时考虑铁路行业建设标准高、技术难度高、质量要求高的特点，对于设备、材料、工艺及质量的管理均较为严格，故要求智能压浆系统的出厂检验和型式检验应同时满足两部标准的要求，对于 GB/T 35014 中未列出或未涉及到的内容，应参照 Q/CR 710 执行。同时，新增了智能压浆系统应完成设备与建设单位指定平台间的数据接口调试，以满足智能压浆设备可按照规定数据接口进行数据上传的要求。

6.2.4、6.2.5 智能压浆设备中所涉及各类型传感器指标及性能的校准均应符合国家制定的相应标准及规程，其校准周期是在结合大量工程实践经验的前提下，参考现行企业标准《铁路桥梁预应力管道自动压浆系统》Q/CR 710 对智能压浆设备校准周期做出的要求。

7 预应力筋智能张拉

7.1 一般规定

7.1.3 当环境温度低于 -15°C 时，不宜进行预应力张拉作业。

条文说明：

低温状态张拉预应力筋，容易出现预应力筋脆断情况，故规定“当环境温度低于 -15°C 时，不宜进行预应力张拉作业”。

7.1.4 混凝土梁张拉宜按如下顺序进行：

- a) 集中预制的简支箱梁宜按预张拉、初张拉和终张拉三个阶段进行；
- b) 集中预制的简支 T 梁宜按初张拉和终张拉两个阶段进行；
- c) 悬臂浇筑连续梁、连续刚构宜按先纵向再竖向后横向顺序进行，纵向预应力筋按先腹板再顶板后底板、由外向内左右对称的顺序进行；
- d) 悬臂拼装连续梁、连续刚构宜按先长后短、先边后中、先上后下交错进行。

条文说明：

在预应力混凝土桥梁张拉施工中，不同的桥型其张拉方式及顺序均有所不同，一般情况下，设计单位会在设计图纸或说明中对其进行明确，在设计无要求的情况下，国内大部分规范或标准中在预应力施工部分仅做出可采取分批、分阶段方式进行对称张拉的要求。目前，在《高速铁路桥涵工程施工技术规程》Q/CR 9603 及《铁路混凝土工程施工技术规程》Q/CR 9207 两部技术规程中，对设计无要求条件下的张拉顺序进行了明确，本条对两部规程中涉及不同梁型预应力筋（不包含斜拉索及吊杆）张拉顺序的内容进行了摘录总结并进行明确，对于集中预制的简支 T 梁，根据其结构特点和多年的施工经验，预应力张拉按初张拉和终张拉两个阶段进行即可，不一定必须采用预张拉工艺，如设计有规定则按设计执行。

7.2 施工准备

7.2.2 预应力筋张拉前，应根据实测摩阻损失、预应力筋实测弹性模量精确计算所需初拉力、张拉控制力和张拉理论伸长值。

条文说明：

摩阻损失应按设计文件要求以及《铁路后张法预应力混凝土梁摩阻测试方法》Q/CR 566 中相关规定进行测试，测试内容一般包括管道摩阻、锚口摩阻及钢绞线回缩量，预应力筋（钢

绞线)弹性模量根据国家现行标准《预应力混凝土用钢绞线》GB/T 5224 第 7.2.5 条规定,其弹性模量为 (195 ± 10) GPa,对于同一厂家、同一规格、同一品种、同一型号的不同检验批,预应力筋的实测弹性模量会存在较大差异,摩阻损失的测试结果及预应力筋的弹性模量取值将直接影响预应力施加及理论伸长值计算的准确性。根据工程实际经验,预应力筋每 1GPa 的弹性模量变化,将对其理论伸长量计算值影响约 1mm,因此需要分批次进行实测确定。

7.2.3 宜进行梳编穿束,保证预应力筋在管道中平行顺直。

条文说明:

预应力筋逐根穿入管道可能造成扭曲,增大松弛量及伸长值,减小整束的平均弹性模量,不宜提倡。编束时梳理顺直,可防止预应力筋在穿束、张拉时由于互相缠绕紊乱而导致的受力不均匀现象。当受力不均匀时,预应力筋可能达不到张拉控制应力,也有可能被拉断。

7.3 智能张拉

7.3.3 采用夹片式锚具的预应力筋智能张拉工作程序宜按图 1 所示流程进行:

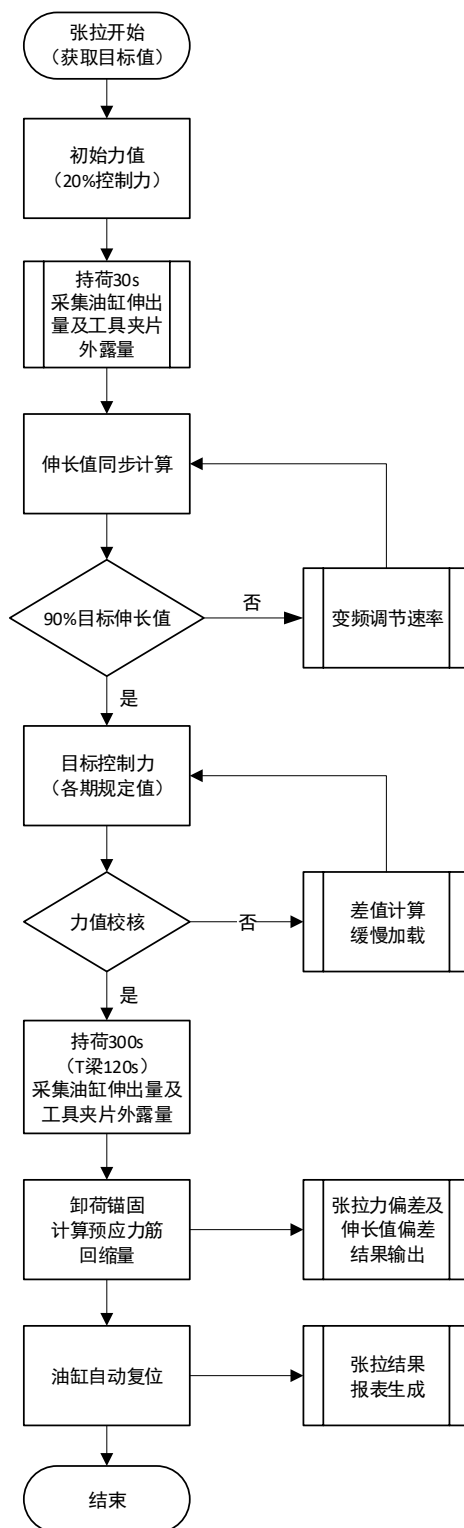


图 1 智能张拉实施程序

条文说明：

预应力筋在达到初始应力前，其松紧、弯曲程度不一致，因此，需达到初始应力后开始正式分级张拉，并量测千斤顶活塞伸出量及夹片回缩量，而到达初始应力之前的预应力筋伸

长值无法通过量测得到，需进行推算，并将推算结果与实际量测值求和计算实际总伸长值，以便与理论伸长值进行比较。对于初始应力的确定，《公路桥涵施工技术规范》JTG/T 3650 第 7.6.3 条规定为 10%~25%，根据多年来实际工程经验，一般情况下，在预制梁及连续梁节段张拉中，当达到控制应力的 20%时，预应力筋进入受力状态，因此在设计无要求时，本规程建议取张拉控制应力的 20%，但在实际张拉施工中，当预应力筋过长时，20%的上限也可能无法达到初始应力的目的，还需根据现场实际情况确定。在到达张拉控制应力后，为了释放松弛和压缩效应，保证力在预应力筋间的充分传递，减少预应力损失，需进行规定时间的持荷，《高速铁路桥涵工程施工技术规程》Q/CR 9603 中要求预制 T 梁持荷时间为 2min，其它预制箱梁及现浇连续梁、连续刚构持荷时间为 5min。

7.3.4 智能张拉过程控制宜满足如下要求：

- a) 控制阶段前 90%时，程序采用力值与伸长值双控机制，并实时计算分析，到达理论伸长值的 90%时自动转换为张拉力控制，实测伸长量修正及理论伸长量精确计算宜按附录 D 执行；

条文说明：

预应力筋在拉力的作用下产生弹性形变，因此伸长值是张拉力的效应，一般情况下，当伸长值同步时认为力值同步，但预应力筋在管道中由于种种原因并不能达到理想的对称顺直效果，当伸长值达到 90%之后，为保证力值施加正确并对称，需转换为张拉力控制。

- b) 控制程序通过力传感器反馈实测值判断张拉进程，并以压力传感器换算力值进行实时校核，当实测值与换算值偏差大于 5%时进行报警，同时暂定张拉，校核控制流程见错误!未找到引用源。；

条文说明：

因力传感器一般位于千斤顶前端，测力形式为直接输出量，精度高，可认为是千斤顶输出的力值，而油压传感器的采集量需进行转换后才可输出为力值，其误差较力传感器较大，但其测量油压的线性度较好，故将其作为张拉校核装置使用，根据以往实际工程经验，当两

者示值之差大于 5%时，则认为其中一传感器出现异常，应作出报警提示。

- c) 程序通过预设参数对各千斤顶反馈数据进行分析判断，智能同步调节，加载速度不大于 20kN/s，力值偏差控制在±1%以内，各项间力值同步误差不大于 2%，采用双端同步张拉时，伸长值不同步率控制在 5%内；

条文说明：

考虑张拉力在预应力筋中的传递存在滞后现象，若加载速度过快，会引起梁端附近及千斤顶内的预应力筋伸长量过快增长，而跨中截面附近预应力筋由于传力迟滞将继续伸长，导致张拉力与伸长值线性关系不稳定，持荷阶段预应力筋实际伸长值易超限，因此应对张拉加载速度加以控制。同时参考《铁路预应力混凝土桥梁自动张拉系统》Q/CR 586 中 6.2.3、6.3.2 条及《城市轨道交通桥梁工程施工及验收标准》CJJT 290 中 8.3.2 条第 2 款，对智能张拉力及伸长量的同步控制进行汇总并作出要求。现场工程实践结果证明，本要求的提出，将有效提升智能张拉施工质量，如下图所示。





说明图 6.4.8 预应力智能张拉施工过程数据回放

d) 由程序对预应力筋伸长值实时测算，并在伸长值偏差超出±6%时进行分级预警判断，预警规则见表 1。

表 1 伸长值偏差预警规则

伸长值偏差范围	预警级别	预警机制
+ 6% ~ + 10%	黄色预警	系统做出暂停提示
-6% ~ -8%；+10% ~ +12%	橙色预警	系统自动暂停并提示是否继续
超出-8%及+12%时	红色预警	系统自动停止张拉

条文说明：

伸长值误差作为一项重要的校核指标，铁路、公路、城市轨道交通行业相关规范均要求实测值与理论值的偏差不超过±6%。但实际施工过程中导致其偏差超限的因素较为复杂，包括：

- 1) 千斤顶力传感的标定准确与否，是否在标定期内；
- 2) 理论计算时所采用预应力的筋弹性模量与实际值差别较大；
- 3) 管道或孔道的定位与设计定位偏差较大；
- 4) 现场实施的条件与理论计算考虑的因素是否一致。

经过现场统计分析，伸长值误差在±6%以内的数据约占 95%以上，偏差在-8%到 12%之间

可以通过现场检查，施工整改进行调整，从而满足后续施工张拉伸长值误差在 $\pm 6\%$ 以内的要求。《铁路预应力混凝土桥梁自动张拉系统》Q/CR 586 中第 6.2.7 条提出了当伸长值偏差超出 $\pm 6\%$ 时，系统应进行提示并报警，超出 -8% 和 $+12\%$ 时应自动停止张拉的要求，但未做出明确的分级和处置办法，因此，本规程在其基础上进行细化，并要求智能张拉过程中对预应力筋伸长值超限情况做出如下处理：

- 1) 偏差在 $+6\%$ 和 10% 之间时进行黄色预警，并暂停提示需要现场人员检查并确认；
- 2) 偏差在 -8% 和 -6% 之间、及 10% 和 12% 之间时进行橙色预警，需要现场人员检查确认后继续张拉；
- 3) 偏差超过 -8% 和 $+12\%$ 时，张拉系统应进行红色预警并自动停止张拉。

7.3.6 锚固结束后夹具顶面应平齐，其相互间的错位宜不大于 2mm，且露出锚具外的高度应不大于 4mm。经检验确认合格后可切割端头多余的预应力筋，切割时应采用砂轮锯，不应采用电弧进行切割，同时不得损伤锚具。

条文说明：

为保证工作锚夹片的受力均衡，防止夹片开裂破碎等现象，做出夹片顶面错位限值的要求。如采用电弧切断预应力筋，在高温下将使预应力筋的抗拉强度降低，故予以禁止。

7.3.7 预应力筋切割后的外露长度不小于 30mm，且不小于 1.5 倍预应力筋直径。锚具采用封端混凝土保护，当需长期外露时，应采取防止锈蚀的措施。

条文说明：

考虑锚具正常工作性能及可能的热影响，对预应力筋外露长度提出此要求，切割位置不宜距离锚具太近，同时也不应影响构件安装。

7.3.8 张拉完成后，系统自动生成并存储报表且不可更改，宜按相关要求上传数据，并根据电子报表内容及现场要求进行纸质报表的整理，打印后进行审核签认，作为质量管理资料存档。

条文说明：

纸质资料的整理归档是现场施工管理的一个环节，通过限制对报表的编辑，可保证智能张拉系统所采集各项数据的准确性与可靠性，根据设备自动生成的报表进行施工数据整理，可避免人为因素干扰，有利于对施工质量进行有效控制。上传至信息化管理平台，可实现施工质量远程管理，提升项目管理的标准化、信息化水平。

8 管道智能压浆

8.1 一般规定

8.1.4 应在终张拉完成后48h内进行，浆体温度控制在5℃~30℃之间，压浆后72小时内梁体温度不低于5℃，环境温度高于35℃时，应选择低温时段施工。

条文说明：

预应力管道压浆的目的，主要为防止预应力筋锈蚀，并通过凝结后的浆体将预应力传递至混凝土结构中。对于防锈而言，管道的压浆越早越好，同时也可以防止预应力筋的松弛。

温度对压浆施工的影响主要存在于以下方面：

1) 对浆液流动度的影响。一般情况下，温度对初始流动度无明显影响，但在浆液制拌30min后的流动度会产生明显影响，不同温度条件下影响效果不同。常温状态下（10℃左右时），水泥的水化速度较慢，随着时间的延长，浆液中自由水增多，而高性能减水剂仍在发挥作用，流动性变化幅度较小；而在高温时（如50℃左右），随时间推移，水泥的水化速度会较常温状态增加，由于水化作用会消耗浆液中的水，导致自由水减少，而浆液的流动性将大幅降低。

2) 对浆体强度的影响。浆液的硬化在于水泥的水化作用，环境温度对水泥的水化作用影响显著，当温度降至0℃及以下时，浆体中的水已开始结冰，水泥颗粒不能够继续水化，强度停止增长，且孔隙内的水分结冰会引起膨胀而作用在孔隙中毛细管内壁，导致内部结构遭到破坏，若在反复冰融的情况下，浆体内部的微裂将逐步扩大，强度逐渐受损而降低。

8.1.5 宜采用先下层后上层的压浆顺序，浆液搅拌完成至压入梁体的时间不超过40min，且在压注前和压注过程中连续搅拌。

条文说明：

本条文明确了管道压浆施工的顺序，以及浆体的拌制到压入管道的时间和此过程中的搅拌工艺要求。如从高点压入，空气易窜入浆液内形成气塞，阻碍压浆浆液的流动，并在其凝结后产生气孔。先压注下层管道的好处是下层预应力筋抗弯力矩较大，先压浆，会使预应力筋的松弛损失降低，对结构较为有利，故宜采用先下层后上层的施工顺序。压浆材料加水拌制成浆液后，需要尽快使用，如延续时间过久，其流动度将会降低，增加压注时的压力，且不易密实。规定浆液在压注前和压注过程中要连续搅拌，是为防止其流动度降低。

8.1.7 现浇梁工点管道压浆时，设备应布设于梁面，不应放置在低于梁体结构位置进行施工。

条文说明：

根据施工经验，在某些现浇连续梁段管道压浆施工中，将设备置于地面位置向高处进行压浆施工将造成较大的压力损失并极易损坏设备，为保证压浆质量及设备正常运行，明确在现浇梁压浆施工时，压浆设备应布设于梁面。

8.2 施工准备

8.2.1 穿束前宜先穿入直径略小于波纹管内径的硬质塑料内撑管。

条文说明：

根据现场实际经验，混凝土浇筑过程中，振捣棒可能造成波纹管变形、破损，导致预应力管道进浆堵塞，故在波纹管内穿入硬质塑料内撑管，可有助于预应力孔道成形。

8.2.2 对于具有上弯波纹管结构的预应力管道，宜在管道最高点设置溢浆孔，排气孔一般采用直径25mm带阀门的镀锌钢管。

条文说明：

完整良好的成孔质量是保证孔道压浆质量的前提条件之一。压浆时，从一端注入的浆液向前流动，并同时孔道内的空气从另一侧排出，但由于孔道呈起伏状，浆液不可能像竖向孔道一样自下而上充满，难免出现浆体流过而空气却未被挤压向前滞留于孔道内的情况。当空气滞留于孔道内部时，将出现灌浆缺陷，形成所谓的月牙缺陷，还可能被泌出的水充满，导致预应力筋锈蚀的隐患出现。因空气和水的密度较压浆浆液小，压浆时由最低的压浆孔压入，空气与水会在浆液的挤压作用下向上汇集，逐步在最高点的排气孔处排出。

8.3 智能压浆

8.3.2 浆液制备

制浆量根据现场需求确定，应能满足单孔或多孔压浆所需用量，制备过程宜按如下要求进行：

- a) 程序根据预设参数及制浆流程，自主判断并完成上料与配比，材料称量误差控制在 $\pm 1\%$ 内，水胶比不大于0.33，流量计与称重传感器测得水量差值大于5%时自动报警。
- b) 智能制浆工艺宜采用“静态称重、动态添加”方案进行，即经材料各成分含量计算后，完成90%材料添加，定时搅拌2min，继续添加剩余10%，再次定时搅拌2min后，完成制浆。
- c) 高速制浆桶中的浆液，每10盘进行一次出机流动度检验。

-
- d) 浆液制备完成，系统进行蜂鸣提示并打开卸料阀，过滤后转移至储浆桶，转移计量误差 $\leq 1\%$ 。

条文说明：

水胶比意为单位体积的浆体（或混凝土）中水与凝胶材料的质量之比，一般情况下，按照规范配比、经过准确称量并拌制的用于管道压浆的浆液，其水胶比约保持在 0.26~0.28 之间，当处于此范围时，浆体在固化后将体现出良好的强度和耐久性。当水胶比过低时，浆体的流动性随之降低，造成施工和易性变差；当水胶比过高时，则会导致浆体固化后强度无法满足要求，出现龟裂现象且密实度降低、容易引起渗水。因此在制浆过程中，通过设定正确的水胶比，控制称重系统在上料、上水过程中的称量误差，采用科学合理的工艺流程，在配料过程中通过传感器不断进行校核，若配比出现问题应及时进行报警，可保证制备的浆液满足施工要求。

8.3.3 抽真空

采用真空辅助压浆工艺时，浆液转移完成后，真空泵自动开启，当系统检测管道内负压值稳定在 0.6 bar~0.8bar 之间时，进行压浆提示，同时压浆端阀门打开。

条文说明：

真空压浆的原理是：压浆前在出浆口采用真空泵形成 0.6 bar~0.8bar 之间的负压力，来抽吸预应力管道中的空气，并在管道中形成一定的真空度，此时打开另一端压浆口阀门后，可利用压浆泵及管道内产生的负压将浆液压入管道中，由于此时管道内仅残留极少量的气体，难以形成气泡，同时因管道内与压浆泵间存在正负压力差，使得管道内浆液的饱满度与密实度得到了提升。

8.3.4.5 智能压浆过程控制宜满足如下要求：

- a) 程序根据设定流程对各管道进行连续、缓慢、均匀地压浆，压浆速率为 20L/min~30L/min，并一次完成。
- b) 程序根据预设参数对过程中浆液压力进行监测、判断与控制，纵向或横向管道不宜高于 6bar，对于超长管道，不宜高于 10bar；竖向管道宜为 3bar~4bar。
- c) 当程序检测到实际压浆量达到理论压浆量的 90% 以上时，自动进入保压阶段，以 5bar~6bar 的压力稳压不少于 3 min，理论压浆量计算方法宜按附录 E 执行。
- d) 持压补浆过程中，程序根据监测进浆流量进行判断，当压力不低于 5bar 且流量小于 2L/min 时自动停止压浆。

e) 程序对压浆过程信息进行实时采集、计算、分析，当实测压浆量到达理论值95%到110%之间判定为合格，超出此范围后进行分级预警判断，预警规则见表2。

表 2 压浆量分级预警规则

实际压浆量范围	预警级别	预警机制
理论值的90% ~95%或110%~120%	黄色预警	系统做出暂停提示 低于下限值则开始自动补浆
理论值的85% ~ 90%或120% ~ 125%	橙色预警	系统自动暂停并提示是否继续 低于下限值则自动开始自动补浆
超出理论值125%时	红色预警	系统自动停止压浆

条文说明：

b) 根据工程实际经验，不超过 40m 的常规预应力管道进行压浆时，若压浆压力超过 6bar，因管道内可能存在毛细孔较多、较为薄弱的区域，会导致管道出现窜浆现象，或因压力过大致使锚头封堵部位被冲开，导致漏浆。当较长管道（大于 60m）进行压浆时，由于高压浆液可在长行程中得到缓冲，且为提升压浆施工效率，其最大压浆压力可考虑提升至 10bar。

e) 在梁体成孔时，无论时采用波纹管或抽拔棒都会存在尺寸偏差及变形等问题，导致孔道体积计算并不准确。因此当实际压浆量达到理论压浆量的 95%到 110%之间时，判定为合格。但有时存在堵孔或者孔道漏浆的情况，导致压浆量不足或者超出上限值，及时发现将导致孔道压浆不饱满或者压浆串孔的情况。因此，考虑到目前铁路及城市轨道交通行业现行相关规范中均未对压浆量偏差及预警机制做出说明，本规程参考《桥梁预应力孔道循环压浆施工技术规范》DB42/T 1762 第 7.8.2 条对压浆量进行判断和预警的机制要求，与本规程张拉施工中伸长值偏差分级预警管理呼应，从人员和机具两方面对压浆施工过程进行控制的角度出发，根据现场工程实践经验，对实际压浆量与理论压浆量间的偏差限值及预警处理机制做出要求：

- 1) 当设备统计的压浆量不足孔道理论压浆量的 85%时，视为压浆不饱满或存在漏浆可能，系统不能停止压浆；
- 2) 实际压浆量在理论压浆量的 90%到 95%之间、110%到 120%之间时，进行黄色预警；
- 3) 实际压浆量在理论压浆量的 85%到 90%之间、120%到 125%之间时，应进行橙色预警；
- 4) 时间压浆量大于理论压浆量 125%时，进行红色预警并自动停止压浆，提示现场进行原因排查。

通过以往现场实体梁压浆模拟试验证明，采用智能压浆设备进行管道压浆，在实际压浆量达到理论值 95%以上时的条件下，压浆完毕后对试验梁及管道不同断面位置进行切片断面检查，发现管道内浆体充盈饱满，证明以此种方式判断管道内压浆饱满度较为真实可靠。



说明图8.3.4.5 现场工程实体压浆试验切片对比照片

8.3.5 压浆完成后，系统自动生成并存储报表且不可更改，宜按相关要求上传数据，智能压浆记录表格式及内容见附录C。宜根据电子报表内容及现场要求进行纸质报表的整理，打印后进行审核签认，作为质量管理资料存档。

条文说明：

压浆过程中及完成后的数据结果是作为施工质量评判的重要依据，其中重要的控制性指标更是需要及时地上传至信息化管理平台，使建设单位能够及时掌握现场真实的施工状态，对工程质量进行严格把控并指导施工，保证数据成果的准确性、真实性、完整性和有效性。

9 检测与验收

9.1 张拉质量检测与验收

9.1.3 锚圈口及喇叭口摩阻（含回缩值）、管道摩阻检测结果应符合表3的要求。

表3 锚圈口及喇叭口摩阻含回缩值和管道摩阻检测指标要求

检测指标	允许偏差 (%)
锚圈口及喇叭口摩阻	不大于6%
预应力筋回缩值	0mm~6mm
管道摩阻 μ 、 k	$\pm 10\%$

条文说明：

锚圈口及喇叭口摩阻（含回缩值）和管道摩阻是现阶段铁路行业预制梁生产过程中进行的常规检测，主要关系到锚下张拉控制应力和实际伸长值的计算。

9.1.8 通过系统数据回看功能，应能对已完成张拉的过程数据、曲线图等进行重播回放。

条文说明：

当对智能张拉施工过程及结果数据进行真实性溯源时，此方法是唯一且有效的检验方式，通过对记录在系统内的过程数据进行回放查看，可以清晰的了解张拉施工中各阶段结果，便于和生成的报表内容进行对照检查，同时，在出现问题时也可根据回放内容进行分析判断。

9.1.11 张拉过程及结果数据均已按要求上传，上传内容与系统中储存的内容及归档的纸质资料内容一致。

条文说明：

根据以往施工经验，一般情况下，建设单位会要求张拉数据进行上传，为满足预应力施工管理的时效性，便于对施工单位生产流程及质量的把控，其上传的时间一般要求在 48 小时内。

9.1.12 张拉完成后的6h~36h内宜进行锚下有效预应力检测。

条文说明：

预应力孔道压浆施工一般会在预应力张拉施工完成后 6~36 小时进行，需在管道压浆前完成检测工作，且建立的锚下有效预应力是否满足设计要求无法通过观察进行判定，为真实反映出现场实际施工质量，故建议“在张拉完成 6 小时以后 36 小时以内进行锚下有效预应力检测”。

9.1.13 预制箱梁、T梁第一片梁宜进行锚下有效预应力检测，抽样数量应达到总预应力束的 50%，后续抽检比例宜不少于梁片总数的3%；支架现浇或悬浇连续梁前5束预应力筋或者0#块宜进行锚下有效预应力检测，且应全检，后续抽检比例宜不少于管道数或者阶段的10%，检测指标见表4。

表4 锚下有效预应力检测指标要求

检测指标	允许偏差（%）
锚下有效预应力偏差	±5
锚下有效预应力同束不均匀度	5
锚下有效预应力同断面不均匀度	2

9.1.14 锚下有效预应力检测结果评定为不合格时，应对不合格管道进行重新张拉，并重新进行检测，如继续评定为不合格，则应通过对管道摩阻重新测定、对机具设备进行校准、对施工质量进行全面检查等有效措施予以处治。

条文说明：

张拉后锚下预应力筋实际的有效预应力值尚不明确，《公路桥涵施工技术规范》JTG/T 3650 第7.6.3条第8款要求建立在锚下的实际有效预应力与设计张拉控制应力的相对偏差不超过±5%，且同一断面中预应力束的有效预应力不均匀度应不超过±2%，并规定进行锚下有效预应力检测。目前铁路系统对此项检测尚未进行要求，故有必要对其进行检测，可进一步验证工艺、材料和设备的匹配性。

预制梁场所生产的前3片梁或者现浇梁工点的前5个孔道孔必须进行锚下有效预应力检测，如果检测不合格则需要进行处理：

1、张拉力值偏小，先分析原因，后进行补张拉，补张拉后检测合格则可进行下一步工序操作，检测不合格继续查找原因并整改；

2、张拉力偏大，分析原因，然后进行退索，重新穿束进行张拉，再进行检测，检测合格后进行下一步工序操作，检测不合格继续查找原因并整改。

3 智能张拉数据的检验，可分为过程中的检验与完成后的检验，通过查看张拉结果记录表的方式进行，并进行张拉曲线回放查看过程是否异常，如有异常，采取针对方案进行整改。

9.2 压浆质量检测与验收

9.2.7 每一管道压浆完成后，系统中结果信息（包括：浆液温度、初始流动度、水胶比、各项上料误差、实际压浆量、保压压力等关键指标）完全，可通过数据回放检查过程的完整性及数据的真实性，系统实测结果值应与生成报表中的记录值保持一致。

条文说明：

以往管道压浆的事后数据质量检验，仅能通过形成的纸质压浆结果报表体现，由于其在真实性

上存在缺陷，且无法满足对压浆施工全过程信息的掌握，因此，通过对记录在系统内的过程数据进行回放查看，可全方位直观的展现过程及结果信息，同时便于后期对数据真实性的溯源对照工作，也有利于在进行压浆质量进行检测时同步进行分析判断。

9.2.11 预制箱梁、T梁第一片梁宜进行管道压浆质量检测，抽样管道数量需达到50%，后续抽检比例宜不少于总数的3%；支架现浇或悬臂浇筑梁前5个管道或者0#块宜进行管道压浆质量检测，所选管道全部检测，后续抽检比例宜不少于管道数或各节段的10%，检查项目及指标见表5。

表 3 预应力管道压浆控制要求

项 目	规定值
浆液材料水胶比	不大于 0.33
压浆压力	竖向管道不大于 4bar；纵、横向管道不大于 6bar，持压压力 5bar~6bar，最大压力不超过 10bar。
实际压浆量	理论压浆量的 95%~110%
持压时间	50m 以内的压浆管道为 5min；50m~80m 的压浆管道为 5min~8min；80m 以上的压浆管道持压时间至少为 10min。

注：此项为全检，通过打印记录表和原始数据查看。

条文说明：

《铁路后张法预应力混凝土梁管道压浆技术条件》Q/CR 409 和《铁路桥梁预应力管道自动压浆系统》Q/CR 710 两部标准主要从压浆施工材料与设备的角度进行要求，对于施工质量的检验并未明确。本条内容参考《桥梁预应力孔道循环压浆施工技术规范》DB42/T 1762 第 8.2 条压浆现场检测的要求，根据施工经验加以改进，为压浆施工的过程管理提供技术保障。智能压浆过程检验主要通过记录在智能压浆系统中的过程信息进行评判，监理单位根据压浆量、水胶比、压浆压力、持压时间等参数，以及回放压浆过程，可以判断压浆施工是否存在异常，如存在可以进行及时整改。

9.2.12 预应力管道压浆完成后，宜委托具有相应资质及检测能力的第三方检测机构对预应力管道压浆质量进行检测。预应力管道压浆质量宜采用无损方法检测。管道压浆施工结束3天后进行管道压浆质量检测，所抽取梁体结构或管道不得提前进行封端，检测完成后再进行封端或者移梁安装。

条文说明：

预应力管道压浆属于隐蔽工程，仅依靠压浆施工时同期制作的试件强度结果，是无法对管道完成质量进行直接判断的，还需由专业的检测机构依靠先进的技术手段配合现代化的检测仪器，科学合理的对管道内浆体填充质量进行检测评判。本条明确了预应力管道压浆质量检测方式、时限及检

测前提。

9.2.13 压浆施工饱满度判定标准见表6。

表4 压浆施工质量饱满度判定标准

梁体长度/m	优良	合格	不合格
≤10	90%	85%~90%	≤85%
(10, 20]	90%	82.5%~90%	≤82.5%
(20, 30]	92%	85%~92%	≤85%
(30, 40]	94%	88%~94%	≤88%
≥40	95%	90%~95%	≤90%

条文说明：

目前，公路行业已建立相关的技术规程，对预应力管道压浆的质量做出判定标准，但铁路及城市轨道交通行业目前还未对此项内容做出明确要求，考虑管道压浆施工质量将直接影响预应力筋耐久性及梁体结构安全性，并参照《桥梁预应力孔道循环压浆施工技术规程》DB42/T 1762 第 8.3.1 条内容要求，明确了压浆施工质量饱满度判定标准。

六、重大意见分歧的处理依据及结果

本标准制订过程中尚未发生过重大意见分歧。

七、采用国际标准和国外先进标准的，说明采标程度，以及与国内外同类标准水平的对比情况

本标准未采用国际标准和国外先进标准。

八、作为推荐性标准建议及其理由

随着时代的发展以及社会经济的进步，智能建造技术的全面推进，目前，智能张拉和压浆技术已在铁路、公路、城市轨道交通等基础设施建设领域得到大力的推广与应用，

但技术标准的不统一，导致预应力混凝土桥梁的张拉压浆施工质量良莠不齐。

为全面提升交通运输行业中铁路与城市轨道交通工程建设的技术水平与生产效率，满足智能建造的新需求，将成熟的、先进的、满足行业发展需求的“四新”成果，广泛地应用到工程建设当中，着力解决传统预应力工程领域的重难点问题，充分发挥科技在生产中的先导及保障作用，制定一套行业内的标准化技术规程显得尤为重要。通过制定本规程，结合自动控制、云技术理念，可规范和指导交通运输行业铁路及城市轨道交通领域的后张法桥梁智能化预应力张拉与压浆施工，有效提高张拉压浆施工控制精度、提高生产效率及施工过程的自动化、远程化、信息化水平，节约人力成本，减少人为操作带来的不稳定因素并降低施工安全风险。

九、贯彻标准的措施建议

（1）精心组织安排，开展宣贯培训。建议由行业主管部门统一安排，召开标准宣贯会，对涉及的交通建设、监理、设计、施工等单位开展标准实施培训和宣贯普及。明确智能张拉压浆施工过程中的各项技术指标、材料性能要求、施工工艺、产品检测、质量验收等方面的具体要求，指导预应力混凝土梁智能预应力工程的实施，有效推动贯标工作的开展及落实。

（2）组织相关人员到施工现场进行观摩，直观展示智能化预应力施工效果及具体施工工艺；

（3）定期组织科研、生产、应用、检验各环节人员进行技术交流，不断对智能张拉压浆施工工艺进行改进，保持技术领先、工艺合理。

（4）尝试预应力智能施工设备认证准入工作，以淘汰陈旧落后的施工技术手段，推动智能建造技术快速健康发展。

十、其他应说明的事项

暂无。