引用格式：张晋勋，段先军，李传浩，等．大跨度钢结构全螺栓装配容差控制技术及重大工程应用[J]．工业建筑，2025，55(8)：76-83．ZHANG Jinxun，DUAN Xianjun，LI Chuanhao，et al. Tolerance Control Technique for Long-Span Fully Bolted Steel Structures and Its Application in Major Projects[J]. Industrial Construction，2025，55(8)：76-83 (in Chinese)．DOI：10.3724/j.gyjzG25082905

大跨度钢结构全螺栓装配容差控制技术及重大工程应用*

张晋勋[1]　段先军[1]　李传浩[1,2]　张爱林[2]　刘学春[2]　柴婷婷[1]　殷明伦[1]

（1. 北京城建集团有限责任公司，北京　100088；2. 北京工业大学建筑工程学院，北京　100124）

摘　要　大跨度全螺栓连接钢结构安装过程经过多级连接施工，若构件仅按公称尺寸制作，其制造、运输、安装及环境温度变化均会产生尺寸偏差，易导致装配应力超限或螺栓无法连接，影响结构安全与装配效率。为此，提出大跨度全螺栓连接钢结构构件、安装单元、结构单元的尺寸链公差控制技术，通过公差分配与容差配合设计，容纳制造、运输、安装及环境温度变化产生的尺寸偏差，实现结构安装连接精准、高效且无应力装配，保障装配质量。并将该技术成功应用到某航站楼大跨度H型钢桁架屋盖工程中，实现了全螺栓装配高精度容差控制。

关键词　大跨度钢结构；全螺栓装配；尺寸链；容差配合；高精度控制

Tolerance Control Technique for Long-Span Fully Bolted Steel Structures and Its Application in Major Projects

ZHANG Jinxun[1]　DUAN Xianjun[1]　LI Chuanhao[1,2]　ZHANG Ailin[2]　LIU Xuechun[2]　CHAI Tingting[1]　YIN Minglun[1]

(1. *Beijing Urban Construction Group Co.*, *Ltd.*, *Beijing* 100088, *China*; 2. *College of Architecture and Civil Engineering*, *Beijing University of Technology*, *Beijing* 100124, *China*)

Abstract: The installation of long-span fully bolted steel structures is carried out using a multi-stage connection process. If components are manufactured solely based on nominal dimensions, dimensional deviations will occur due to manufacturing, transportation, installation, and environmental temperature changes. These deviations can readily lead to excessive assembly stress or failure in bolt connection, thereby affecting structural safety and assembly efficiency. A dimensional chain tolerance control technique for components, installation units, and structural units is proposed. Through tolerance allocation and fit design, the dimensional deviations caused by manufacturing, transportation, installation, and environmental temperature changes are accommodated. This enables accurate, efficient, and stress-free structural assembly and ensures high assembly quality. This technique was successfully applied to a long-span H-shaped steel truss roof structure at an airport terminal, achieving high-precision tolerance control in fully bolted assembly.

Keywords: long-span steel structure; fully bolted assembly; dimension chain; tolerance fit; high-precision control

* 国家自然科学基金重点项目(52130809)。

第一作者：张晋勋，博士，教授级高级工程师，主要从事施工技术研究，99983618@qq.com。

通信作者：李传浩，博士后，主要从事大跨度钢结构研究，lihao050308@163.com。

收稿日期：2025-08-29

0　引　言

大跨度钢结构因空间利用率高、造型美观、自重轻而广泛应用于体育场馆、会展中心、机场航站楼等大型公共建筑[1]。其常用节点包括焊接节点和螺栓节点。焊接节点，如焊接空心球节点[2]和铸钢节点[3]，其加工便捷，抗弯刚度大，但全生命周期维护困难，且不可拆卸循环利用。螺栓节点，如焊接空心球连接 H 型钢 Z 字形螺栓节点[1]和板式节点[4]等，其通过工厂化预制生产，具备可装配、易维护及循环利用等特性，符合建筑业向工业化、信息化、智能化、绿色化转型升级的发展需求。然而大跨度全螺栓连接钢结构安装过程经过多级连接施工，若构件仅按公称尺寸制作，其制造、运输、安装过程及环境温度变化均会产生尺寸偏差，易导致装配应力超限或螺栓无法连接，影响结构安全与装配效率。

为提升大跨度全螺栓连接钢结构的装配效率与质量，可在设计阶段通过公差分配与容差配合设计，而非依赖施工阶段的被动调整，容纳制造、运输、安装及环境温度变化产生的尺寸偏差。容差配合设计通过合理定义和分配构件的公差允许范围，在保障结构安全、美学效果及功能性的同时，确保构件现场可装配[5]。该技术已在机械制造领域形成较成熟的理论体系，如郭飞燕等[6]以航天器分段式机翼对接装配优化为例，提出面向精度提升与工艺改进的容差分配多目标模型融合方法；但在建筑领域，系统化的容差配合设计理论尚未建立。刘鹏等[7]指出，既有装配式建筑公差研究不足主要是公差分配形式、取值依据不明确，缺少全过程公差控制理论分析，未考虑全过程中的公差累积与抵消效应。

基于此，本文提出大跨度全螺栓连接钢结构的尺寸链公差控制方法，通过公差分配与容差配合设计，容纳制造、运输、安装及环境温度变化产生的尺寸偏差，实现结构安装连接精准、高效且无应力装配，保障装配质量。

1　大跨度全螺栓连接钢结构尺寸链公差控制方法

1.1　尺寸链构建技术

大跨度全螺栓连接钢结构在工厂预制阶段虽已完成单个构件的尺寸精度检验，但未建立由制造、运输、安装及环境温度变化产生的尺寸偏差分析模型，导致现场装配时偏差超出螺栓连接的允许范围，降低施工效率与质量。其中，温度变形效应是大跨度钢结构设计与施工中必须充分考虑的关键因素[8]。对于长度为 L 的构件或单元，施工阶段因环境温度变化 ΔT 所引起的尺寸变化量 ΔL 可由钢材热膨胀公式计算确定，即：

$$\Delta L = \alpha L \Delta T \tag{1}$$

式中：α 为钢材的线膨胀系数，取 $1.2\times10^{-5}/℃$；ΔT 为构件从工厂预制基准温度至现场安装时环境温度的差值，需综合考虑本地历史气候数据、施工季节、昼夜温差及日照辐射等因素。

为提升大跨度全螺栓连接钢结构的装配效率与质量，建立构件、安装单元与结构单元的多级尺寸链公差控制体系，通过公差分配与容差配合设计，明确各级公差允许范围，实现对多源偏差的主动容纳与控制，如图 1 所示。将传统依赖现场被动调整的偏差处置方式，转变为基于预测与分配的主动式全过程精度管控模式，从而保障结构安装连接精准、高效且无应力装配，提升整体装配质量。对于端板螺栓节点连接的构件、安装单元、结构单元，其尺寸链均以 2 倍塞板厚度作为封闭环。组成环包括制造公差环（构件、安装单元、结构单元制造偏差）、运输变形公差环（构件、安装单元、结构单元运输变形偏差）、安装公差环（构件、安装单元、结构单元安装偏差）与温度变形公差环（构件、安装单元、结构单元温度变形偏差）。对于连接板螺栓节点连接的构件、安装单元、结构单元，其尺寸链均以长圆孔调节区间作为封闭环，其他组成环与端板螺栓节点的组成环一致。构件、安装单元、结构单元的制造偏差、运输变形偏差、安装偏差和温度变形偏差，均需满足规范[9]公差要求。对于规范[9]中未明确规定的公差，可由业主与承包商在充分考虑制造工艺、安装工艺及结构受力性能的基础上，经技术协商另行确定。基于极值法建立尺寸链方程：

$$T_0 = \sum_{i=1}^{n} \xi_i T_i \tag{2}$$

式中：T_0 为封闭环公差；n 为尺寸链组成环的数量；ξ_i 为组成环的传递系数，取值为 ±1；T_i 为第 i 个尺寸链组成环的公差。

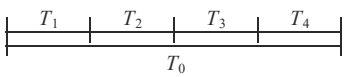


图 1　尺寸链示意

Fig. 1　Schematic diagram of the dimensional chain

在尺寸链分析中，封闭环公差 T_0 是指最终装配偏差的允许范围，是整个尺寸链控制的目标值。对

于端板螺栓节点,T_0即为2倍塞板厚度,表示通过塞板可调节的最大装配间隙;对于连接板螺栓节点,T_0即为长圆孔的可调节区间,表示螺栓在长圆孔中可移动的范围。T_0的取值需综合考虑结构安全性、装配可行性与施工经济性,通常根据设计规范、施工实践经验或有限元分析确定。

1.2 公差分配技术

在满足封闭环公差T_0的前提下,最小化尺寸链公差控制成本,建立精度可控、成本最优的大跨度全螺栓连接钢结构公差分配技术体系。该体系要求所有组成环的公差累积不得超过T_0,即应满足:$T_1+T_2+T_3+T_4\leqslant T_0$。实现这一目标主要包括以下步骤:首先,根据结构性能要求(如节点刚度与承载能力)、装配可行性(如塞板最大允许厚度或长圆孔合理滑动区间)以及经济性等因素,确定T_0的允许值。其次,识别尺寸链中的各组成环,包括制造公差T_1、运输变形公差T_2、安装公差T_3、温度变形公差T_4,其初始公差取值可依据现行设计规范、施工经验或初步分析确定。随后,对T_1~T_4进行合理分配,以实现施工全过程的成本最优化。若初步分配结果不满足T_0要求,则应调整相应环节的公差或施工工艺,直至累积公差满足容限要求。

借鉴机械制造领域的尺寸链公差控制成本模型[6],提出适用于大跨度全螺栓连接钢结构的尺寸链公差控制成本模型,如式(3)所示。对公差控制成本随精度提升呈指数增长的环节,如制造公差控制环节,通过放宽公差降低制造公差控制成本[10-11];对公差控制成本随精度提升呈线性增长的环节,如运输变形可通过减小支撑间距控制,安装偏差可通过微调胎架控制,温度变形可通过变形分析预留补偿量控制等,分配相对严格的公差。通过公差分级分配,在保证结构安装连接精准高效的同时,有效控制成本,为节点、构件、安装单元及结构单元的容差配合设计提供经济性优化依据。

$$C_{\mathrm{M}}(T_i)=\sum_{i=1}^{n}C_{\mathrm{M}i}(T_i) \tag{3a}$$

$$C_{\mathrm{M1}}(T_1)=a\left(\frac{1}{T_1}\right)^{k} \tag{3b}$$

$$C_{\mathrm{M2}}(T_2)=b\frac{1}{T_2} \tag{3c}$$

$$C_{\mathrm{M3}}(T_3)=c\frac{1}{T_3} \tag{3d}$$

$$C_{\mathrm{M4}}(T_4)=d\frac{1}{T_4} \tag{3e}$$

式中:$C_{\mathrm{M}}(T_i)$为尺寸链公差控制成本;$C_{\mathrm{M}i}(T_i)$为第i个尺寸链组成环的公差控制成本;$C_{\mathrm{M1}}(T_1)$为制造公差控制成本;a为制造公差控制基本成本,与材料、工艺、设备和人工等因素相关,可基于历史项目数据回归得出;T_1为制造公差;k为精度敏感系数($k\geqslant 2$),反映制造成本对公差变化的敏感程度,其取值取决于制造工艺的类型和精度水平[10-11];$C_{\mathrm{M2}}(T_2)$为运输变形公差控制成本;b为运输变形公差控制基本成本,与运输方案相关,可通过分析不同防护措施(如增加支撑点或采用专用运输支架)的成本与精度控制效果之间的经济关系确定;T_2为运输变形公差;$C_{\mathrm{M3}}(T_3)$为安装公差控制成本;c为安装公差控制基本成本,与安装工时及设备投入呈线性关系,精度提高需借助更精密仪器、更高技能人员及更长的作业时间;T_3为安装公差;$C_{\mathrm{M4}}(T_4)$为温度变形公差控制成本;d为温度变形公差控制基本成本,与所采用的温度补偿措施相关,其成本随精度提升而线性增加;T_4为温度变形公差。

2 大跨度全螺栓连接钢结构装配技术

2.1 节点容差配合装配技术

大跨度全螺栓连接钢结构中,常用的节点形式有端板螺栓节点和连接板螺栓节点。在结构受力体系中,节点类型的选择需依据构件的受力特征确定。对于同时承受轴力与弯矩组合作用的关键受力构件,宜选用端板螺栓节点。该类节点传力路径明确,能够有效传递和抵抗弯矩。对于以承受轴力为主、弯矩效应可忽略的构件,宜选用连接板螺栓节点。该类节点构造形式简单,加工成本较低,能够满足以轴力传递为主的受力需求。

对于端板螺栓节点,通过主动预留拼装缝并采用塞板调节构件与节点之间的装配间隙,以容纳尺寸偏差,如图2所示。施工中根据现场实测的装配间隙,选用相应厚度和数量的塞板组合进行填充,使端板最终紧密贴合,为高强螺栓提供有效的传力条件。预留间隙是容差设计中主动设置的装配条件,而塞板则是实现最终紧密连接的调节手段。塞板设置时,应在构件两侧对称配置相同厚度的塞板,以避免产生偏心弯矩。优先选用多层薄塞板组合方式(层数不超过3层),以避免因塞板过厚导致的刚度削弱问题。塞板最大厚度不宜超过h/20(h

为构件截面高度），避免节点区域刚度突变，保障节点整体刚度与原设计一致[12]。当塞板采用最大厚度时，应通过有限元分析验证其适用性，确保不会对节点的承载力、刚度、破坏模式及整体结构力学性能产生不利影响。塞板材质和摩擦面处理方法应与构件一致。装配完成后，采用力矩扳手检测螺栓预紧力，要求预紧力偏差不超过设计值的±10%。同时，通过超声波探伤方法检测塞板与端板的贴合程度，确保二者完全贴合。

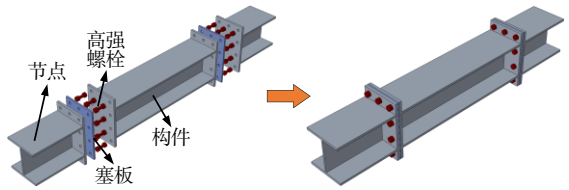


图 2　端板螺栓节点

Fig. 2　End-plate bolted joints

对于连接板螺栓节点，可在节点一侧设置标准圆孔（承压型螺栓连接），另一侧设置长圆孔（摩擦型螺栓连接），预留螺栓连接调节区间，容纳尺寸偏差，如图 3 所示。

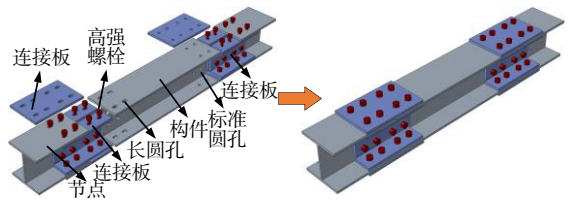
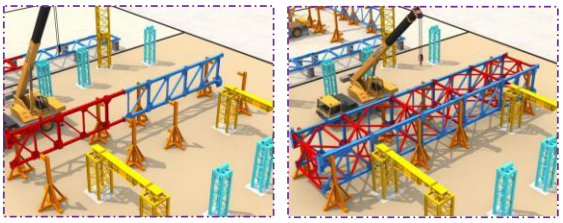


图 3　连接板螺栓节点

Fig. 3　Connecting plate bolted joints

2.2　构件容差配合装配技术

大跨度全螺栓连接钢结构构件的公称尺寸由设计文件明确规定，但受制造工艺、运输条件、安装精度及环境温差等多因素影响，其实际尺寸与公称尺寸间存在偏差。对于顺装连接的构件，采取措施控制构件端部偏差为零；对于塞装连接的构件，允许存在一定偏差，如图 4 所示。基于端板螺栓节点的塞板容差消纳机制，提出塞装连接构件的容差配合设计方法。通过对塞装连接构件负公差设计，主动控制其实际尺寸小于公称尺寸，预留拼装缝，利用塞板调节构件与节点间的装配间隙，容纳构件尺寸偏差，如图 5 所示。为最小化构件尺寸链公差控制成本，基于多项重大工程的实践总结，并考虑钢材热胀冷缩特性，将构件负公差范围设定为 $\Delta_1=l_1/3000\sim l_1/1000$（$l_1$ 为构件长度），且最小负公差不小于 3 mm。



（a）主桁架桁片顺装连接　　（b）主桁架支撑塞装连接

图 4　构件顺装连接和塞装连接

Fig. 4　Sequential and plug-in assembly connections of members

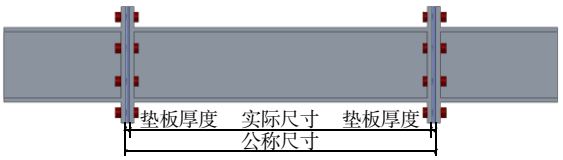


图 5　端板螺栓连接构件容差配合设计

Fig. 5　Tolerance fit design of end-plate bolted connection members

对于连接板螺栓节点连接的构件，同样进行负公差设计，负公差范围为 2~5 mm，并在构件一侧设置长圆孔，通过长圆孔调节区间容纳尺寸偏差，如图 6 所示。在塞装连接构件拼装前，确保制造偏差、运输变形、安装偏差及温度变形均处于尺寸链公差允许范围内。构件负公差标准可由业主与承包商在充分考虑节点构造、制造工艺及安装工艺的基础上，通过技术协商单独制定。

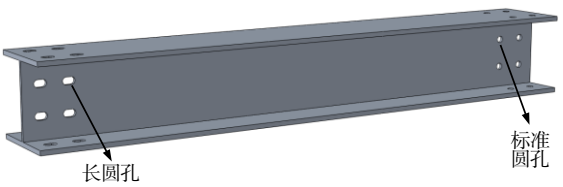


图 6　连接板螺栓连接构件容差配合设计

Fig. 6　Tolerance fit design of connecting plate bolted connection members

2.3　安装单元容差配合装配技术

大跨度全螺栓连接钢结构安装单元装配过程中，需考虑制造偏差、运输变形、安装偏差及温度变形的影响，其实际尺寸与公称尺寸间存在偏差。对于顺装连接的安装单元，采取措施控制安装单元端部偏差为零；对于塞装连接的安装单元，允许存在一定偏差，如图 7 所示。基于端板螺栓节点的塞板容差消纳机制，提出塞装连接安装单元容差配合设计方法。通过对塞装连接安装单元进行负公差设计，主动控制其实际尺寸小于公称尺寸，预留拼装缝，利用塞板调节安装单元间的装配间隙，容纳安装单元由制造、运输、安装及环境温度变化产生的尺寸偏差，提升装配效率与质量。为最小化安装单

元尺寸链公差控制成本,基于多项重大工程的实践总结,并考虑钢材热胀冷缩特性,将安装单元负公差范围设定为$\Delta_2=l_2/3000\sim l_2/1000$($l_2$为安装单元长度),且最小负公差不小于5 mm。在塞装连接安装单元拼装前,确保制造偏差、运输变形、安装偏差及温度变形均处于尺寸链公差允许范围内。

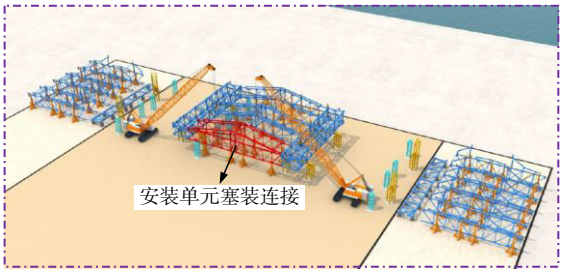


图7 安装单元塞装连接

Fig. 7 Plug-in assembly connection of installation units

2.4 结构单元容差配合装配技术

大跨度全螺栓连接钢结构结构单元在装配过程中,需考虑制造偏差、运输变形、安装偏差及温度变形的影响。基于端板螺栓节点的塞板容差消纳机制,提出结构单元容差配合设计方法。通过主动控制结构单元间嵌补杆件的实际尺寸小于公称尺寸,预留拼装缝,利用塞板调节嵌补杆件与结构单元间的装配间隙,容纳结构单元由制造、运输、安装及环境温度变化产生的尺寸偏差,提升装配效率与质量,如图8所示。为最小化结构单元尺寸链公差控制成本,基于多项重大工程的实践总结,并考虑钢材热胀冷缩特性,将嵌补杆件负公差范围设定为$\Delta_3=l_3/3000\sim l_3/1000$($l_3$为结构单元长度),且最小负公差不小于10 mm。在结构单元拼装前,确保结构单元的制造偏差、运输变形、安装偏差及温度变形均处于尺寸链公差允许范围内。

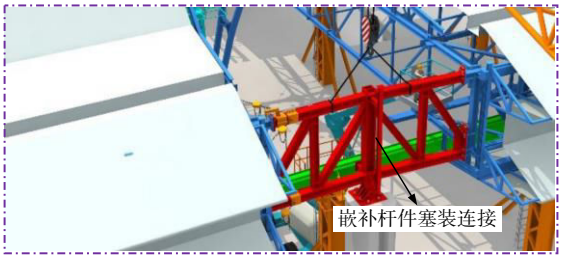


图8 结构单元塞装连接

Fig. 8 Plug-in assembly connection of structural units

3 大跨度全螺栓连接钢结构装配设计

3.1 结构体系

大跨度全螺栓连接钢结构采用工厂预制、现场全螺栓装配的建造模式,所有焊接作业均在工厂标准化车间内完成,以确保焊接质量。结构支撑于混凝土柱或树状柱上,支座设计需综合考虑温度应力、不均匀沉降等因素。基于结构的跨度、几何构型及运输条件,将其划分为多个独立结构单元。结构单元可进一步拆解为多个安装单元,并由工厂预制的标准化构件或组件在现场通过高强螺栓拼接成型。各结构单元间通过嵌补杆件实现全螺栓连接,形成完整的结构受力体系。构件优先选用热轧H型钢,利用其尺寸精度高、残余应力小、生产效率高及便于栓接的优势,其截面尺寸依据结构跨度与荷载计算确定。全螺栓连接钢结构的可拆卸性便于后期维护与改造,符合绿色建筑与可持续发展理念。

3.2 装配设计

为容纳大跨度全螺栓连接钢结构构件、安装单元及结构单元在制造、运输、安装及环境温度变化过程中产生的尺寸偏差,进行装配设计。对通过端板螺栓节点塞装连接的构件、安装单元及结构单元的嵌补杆件进行负公差设计,预留拼装缝,并利用塞板调节装配间隙,容纳尺寸偏差。对通过连接板螺栓节点连接的构件、安装单元及结构单元的嵌补杆件,同样进行负公差设计,并在其一侧设置长圆孔,通过长圆孔调节区间容纳尺寸偏差。该装配设计可实现大跨度全螺栓连接钢结构安装连接精准、高效且无应力装配,保障装配质量。杜绝现场切割、焊接等二次加工,提升施工速度,降低施工成本。

4 工程案例

4.1 工程概况与装配设计

某航站楼大跨度H型钢桁架屋盖支撑在树状柱或混凝土柱上,钢材选用S355和S460钢,如图9所示。该工程节点总数量为28900个,其中端板螺栓节点占比38%,连接板螺栓节点占比60%,工厂焊接连接的构件内部节点仅占2%。现场通过提升和滑移进行模块安装就位。各模块由次桁架单元与两侧的主桁架单元通过塞装方式螺栓连接而成。主、次桁架单元由工厂预制的桁片与支撑在现场通过高强螺栓拼接而成。模块间通过嵌补杆件进行全螺栓拼装连接。上、下弦杆采用H型钢,通过端板螺栓节点连接;斜腹杆采用方钢管,通过连接板螺栓节点连接。对于形状不规则的中心区、酒店和

捷运区，采用高空散装法进行构件的拼装。航站楼屋盖模块划分如图 10 所示。

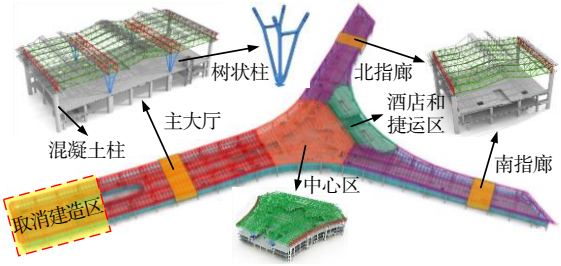


图 9　航站楼屋盖

Fig. 9　Terminal roof

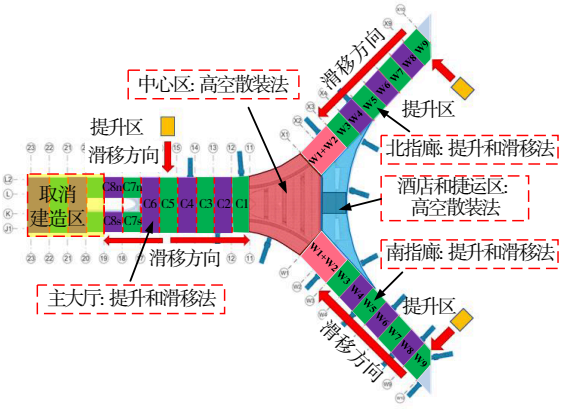


图 10　航站楼屋盖模块划分

Fig. 10　Module division of the terminal roof

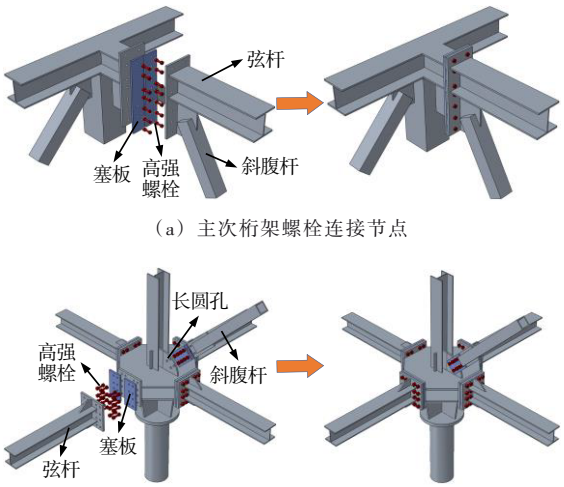
在航站楼大跨度 H 型钢桁架屋盖的装配设计中，对通过端板螺栓节点塞装连接的支撑、次桁架单元及模块间的嵌补杆件进行负公差设计，预留拼装缝，并利用塞板调节装配间隙，容纳尺寸偏差；对通过连接板螺栓节点连接的支撑与斜腹杆，同样进行负公差设计，并在构件一侧设置长圆孔，通过长圆孔调节区间容纳尺寸偏差。

4.2　节点容差配合装配

端板螺栓节点通过预留拼装缝，利用塞板调节构件与节点间的装配间隙，如图 11(a)所示；连接板螺栓节点通过在节点一侧设置长圆孔，预留螺栓连接调节区间，如图 11(b)所示。

4.3　构件容差配合装配

在航站楼大跨度 H 型钢桁架屋盖中，主桁架桁片间的斜腹杆与支撑长度分别约为 3、6 m。综合考虑当地气候条件，环境温度变化 ΔT 取±30 ℃。根据钢材热膨胀计算式(1)，得到斜腹杆与支撑因温度变化引起的最大变形量，分别为 1.1、2.2 mm。为容纳斜腹杆与支撑在制造、运输、安装及环境温度变化产生的尺寸偏差，对其进行负公差设计，分别设定为 3、5 mm。此外，对连接板螺栓节点连接的斜腹杆和支撑，在其一侧设置长圆孔，以形成尺寸偏差调节区间。



(a) 主次桁架螺栓连接节点

(b) 树杈柱-主桁架螺栓连接节点

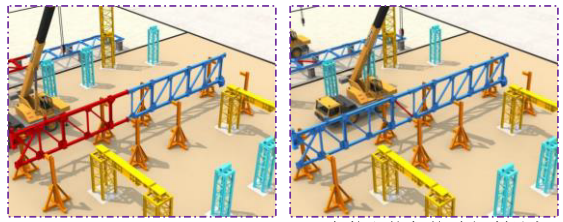
图 11　航站楼屋盖螺栓连接节点

Fig. 11　Bolted connection joints of the terminal roof

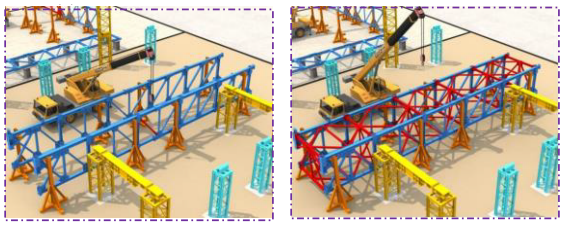
屋盖主桁架单元装配过程如图 12 所示。首先，将顺装连接的两段主桁架桁片吊装至临时胎架的预设位置，控制主桁架桁片端部偏差为零，再通过端板螺栓进行连接。然后，安装主桁架桁片间的斜腹杆，利用长圆孔调节区间容纳尺寸偏差，如图 13 所示。随后，吊装另一侧主桁架桁片，重复上述安装步骤，逐步形成主桁架单元主体框架。最后，按照“由中间向两侧”的顺序安装支撑，根据支撑与桁片间的装配间隙，在支撑两侧配置相同厚度的塞板，调节装配间隙。装配完成后，采用力矩扳手检测螺栓预紧力，预紧力偏差不超过设计值的±10%。同时，通过超声波探伤方法检测塞板与端板的贴合程度，确保二者完全贴合。主桁架单元验收合格后，采用同样方法完成次桁架单元的拼装。

4.4　桁架单元容差配合装配

在航站楼大跨度 H 型钢桁架屋盖中，塞装连接的次内部桁架单元和次侧桁架单元长度分别约为 35、25 m。综合考虑当地气候条件，环境温度变化 ΔT 取±30 ℃。根据钢材热膨胀计算式(1)，得到次内部桁架单元和次侧桁架单元因温度变化引起的最大变形量，分别为 12.6、9.0 mm。为容纳次内部桁架单元和次侧桁架单元在制造、运输、安装及环境温度变化产生的尺寸偏差，对其进行负公差设



(a) 安装主桁架桁片　(b) 安装主桁架桁片间斜腹杆



(c) 安装另一侧主桁架桁片　(d) 安装主桁架支撑

图 12　航站楼屋盖构件装配过程

Fig. 12　Assembly process of roof members of the airport terminal

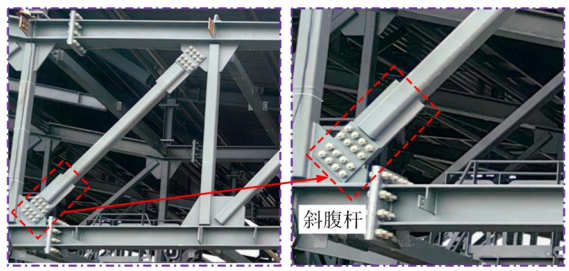
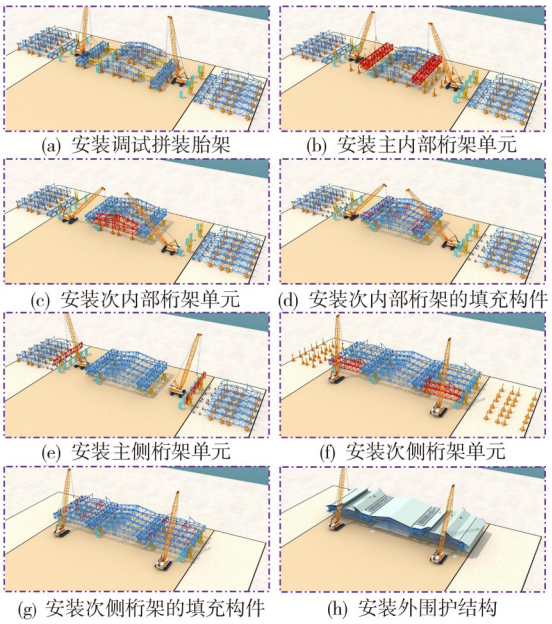


图 13　斜腹杆连接板螺栓连接

Fig. 13　Bolted connection of the connecting plate for diagonal members

计,分别设定为 15、12 mm。此外,对连接板螺栓节点连接的次内部桁架单元和次侧桁架单元的填充构件,同样进行负公差设计,设定为 3 mm,并在其一侧设置长圆孔,以形成尺寸偏差调节区间。

屋盖桁架单元装配遵循“分区对称、先主后次”的施工原则,装配过程如图 14 所示。由于次内部桁架单元和次侧桁架单元装配方法相同,以次侧桁架单元为例,介绍其装配方法。首先,利用全站仪放样主桁架节点定位轴线,将次侧桁架单元吊装至对应位置,使次侧桁架单元节点板与主桁架节点板初步对齐。然后,选取节点板上下对称孔位穿入临时螺栓,临时螺栓数量不少于节点螺栓总数的 25%,且不少于 2 颗,形成临时定位支点。在临时螺栓未完全拧紧前,次侧桁架单元保持吊装设备带载状态,防止因受力不均导致桁架单元产生过大变形。随后,测量次侧桁架单元与主桁架单元间的装配间隙,在次侧桁架单元两侧配置相同厚度的塞板,调节装配间隙,并按对角顺序拧紧临时螺栓,确保端板紧密贴合,如图 15 所示。最后,临时连接验收合格后,按设计要求逐颗拆除临时螺栓,替换为永久螺栓并按终拧扭矩一次拧紧到位,做好螺栓拧紧标记,防止漏拧。装配完成后,采用力矩扳手检测螺栓预紧力,预紧力偏差不超过设计值的±10%。同时,通过超声波探伤方法检测塞板与端板的贴合程度,确保二者完全贴合。



(a) 安装调试拼装胎架　(b) 安装主内部桁架单元

(c) 安装次内部桁架单元　(d) 安装次内部桁架的填充构件

(e) 安装主侧桁架单元　(f) 安装次侧桁架单元

(g) 安装次侧桁架的填充构件　(h) 安装外围护结构

图 14　航站楼屋盖桁架单元装配过程

Fig. 14　Assembly process of roof truss elements of the airport terminal

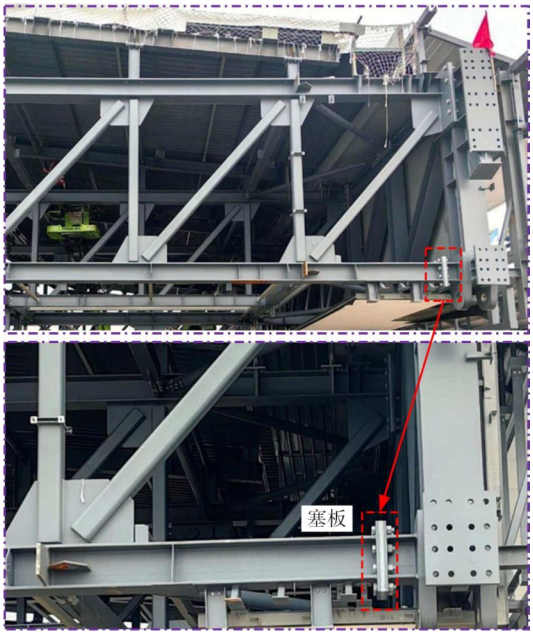


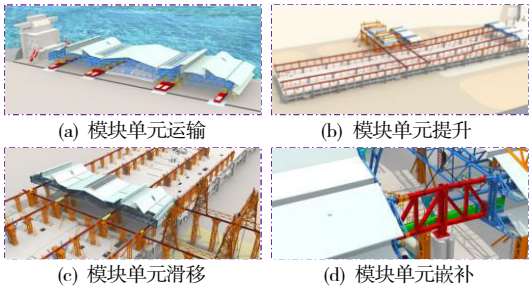
图 15　次侧桁架单元端板螺栓连接

Fig. 15　Bolted connection of the end plate for secondary side truss units

4.5　模块单元容差配合装配

在航站楼大跨度 H 型钢桁架屋盖中，模块单元宽度约为 35 m。综合考虑当地气候条件，环境温度变化 ΔT 取±30 ℃。根据钢材热膨胀计算式(1)，得到模块单元因温度变化引起的最大变形量(为 12.6 mm)。为容纳模块单元在制造、运输、安装及环境温度变化产生的尺寸偏差，对其进行负公差设计，设定为 30 mm。

屋盖模块单元装配过程如图 16 所示。首先，将预制拼装完成的模块单元通过海运运至施工现场。然后，通过液压同步提升系统将模块单元提升至设计标高。随后，通过滑靴将模块单元滑移至预设位置。最后，模块单元就位后，根据嵌补杆件与模块单元间的装配间隙，在嵌补杆件两侧配置相同厚度的塞板，调节装配间隙。装配完成后，采用力矩扳手检测螺栓预紧力，预紧力偏差不超过设计值的±10%。同时，通过超声波探伤方法检测塞板与端板的贴合程度，确保二者完全贴合。



(a) 模块单元运输　(b) 模块单元提升

(c) 模块单元滑移　(d) 模块单元嵌补

图 16　航站楼屋盖模块单元装配过程

Fig. 16　Assembly process of roof module units of the airport terminal

工程实践表明，该公差控制方法的应用实现了 115 万套高强螺栓一次穿孔合格率达 100%，且屋盖安装精度控制在 10 mm 以内，满足安装公差要求，各项指标均通过验收[9]。

5　结束语

本研究提出大跨度全螺栓连接钢结构的尺寸链公差控制技术，通过公差分配与容差配合设计，容纳由制造、运输、安装及环境温度变化产生的尺寸偏差，实现结构安装连接精准、高效且无应力装配，保障装配质量。

以某航站楼大跨度 H 型钢桁架屋盖为工程案例，对通过端板螺栓节点塞装连接的支撑、次桁架单元及模块间的嵌补杆件进行负公差设计，预留拼装缝，利用塞板调节装配间隙，容纳尺寸偏差；对通过连接板螺栓节点连接的支撑与斜腹杆，同样进行负公差设计，并在其一侧设置长圆孔，通过长圆孔调节区间容纳尺寸偏差。工程实践表明，该技术的应用实现了 115 万套高强螺栓一次穿孔合格率达 100%，且屋盖安装精度控制在 10 mm 以内，满足安装公差要求，各项指标均通过验收。

参　考　文　献

[1] 张爱林，李传浩，刘学春，等. 焊接空心球连接 H 型钢 Z 字形螺栓节点静力性能研究[J]. 建筑结构，2024，54(19)：74-79.

[2] 田黎敏，白冲，钟炜辉，等. 新型内套管加强焊接空心球节点抗倒塌性能研究[J/OL]. 工程力学，2023，41[2023-12-21]. https://doi. org/10. 6052/j. issn. 1000-4750. 2023. 09. 0669.

[3] 韩乐雨，杜文风，夏壮，等. 四分叉铸钢节点的衍生式智能设计研究[J]. 建筑结构学报，2023，44(5)：325-334.

[4] 刘健，周家伟，汪儒灏，等. 考虑板式节点刚度的大跨度铝合金单层网壳稳定承载力[J]. 建筑结构学报，2022，43(增刊 1)：10-19.

[5] RAUSCH C，TALEBI S，POSHDAR M，et al. Tolerance management domain model for semantic enrichment of BIMs [J]. Automation in Construction，2022，141，104394.

[6] 郭飞燕，宋长杰，张硕，等. 面向精度提升与工艺改进的容差分配多目标模型融合方法[J]. 计算机集成制造系统，2024，30(3)：926-941.

[7] 刘鹏，罗小勇，陈颖，等. 装配式建筑混凝土构件公差控制研究[J]. 建筑结构，2018，48(增刊 2)：699-706.

[8] American Institute of Steel Construction. Code of standard practice for steel buildings and bridges：ANSI/AISC 303—22 [S]. Chicago：American Institute of Steel Construction，2022.

[9] European Committee for Standardization. Execution of steel structures and aluminium structures - part 2：technical requirements for steel structures：EN 1090-2[S]. Brussels：European Committee for Standardization，2018.

[10] HALLMANN M，SCHLEICH B，WARTZACK S. From tolerance allocation to tolerance-cost optimization：a comprehensive literature review [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2020，107(1)：1-54.

[11] WALTER M S J，SPRUEGEL T C，WARTZACK S. Least cost tolerance allocation for systems with time-variant deviations[J]. Procedia Cirp，2015，27：1-9.

[12] 田欣，张素梅，陈振明，等. 带填板的端板连接梁拼接节点抗弯性能有限元分析[J]. 工业建筑，2023，53(9)：78-87.