

基于 TRIZ 物—场分析理论的钢结构底模支撑系统设计

马一鸣¹ 马玉乾² 孟令红³

1 河北或固建筑工程有限公司天津分公司

2 邯郸科技职业学院

3 邯郸市泓泰钢结构有限公司

DOI:10.12238/etd.v5i6.10899

[摘要] 基于TRIZ的理论和可拓学理论的优越度模型评价,对钢结构底模支撑系统进行创新设计。为了设计出能够在成本经济性维度上配合绿色装配式钢结构建筑的底模支撑系统。以TRIZ作为理论基础,提出一种基于TRIZ理论的钢结构底模支撑系统的创新设计方法。在设计过程中,首先,分析现有产品的基本功能、样式及其主要的结构;其次,利用物—场分析方法,从七十六个标准解中选择一个高效的、经济的可以配合绿色装配式钢结构建筑的底模支撑系统;最后,运用可拓学理论的优越度评价方法对设计方案的优劣程度进行评价,选出最优方案并通过建立模型进行验算。通过找出解决实际问题的方案后,对创新的设计方案给予三维建模、产品细节描述,以一种钢结构底模支撑系统创新设计为例,验证该方法的可行性和有效性,为绿色装配式钢结构的底模支撑系统设计提供了参考。

[关键词] TRIZ; 钢结构; 底模支撑

中图分类号: TU391 **文献标识码:** A

Design of steel die support system based on TRIZ analysis theory

Yiming Ma¹ Yuqian Ma² Linghong Meng³

1 Hebei Huogu Construction Engineering Co., Ltd. Tianjin Branch

2 Handan Vocational College Of Science And Technology

3 Handan Hongtai Steel Structure Co., Ltd.

[Abstract] Based on the evaluation of the superiority degree model within TRIZ theory and Extenics theory, an innovative design initiative is undertaken for the steel structure bottom formwork support system. The prime objective is to devise a bottom formwork support system that can conform to the requisites of green prefabricated steel structure buildings, particularly in the dimension of cost economy. By taking TRIZ as the theoretical underpinning, an innovative design methodology for the steel structure bottom formwork support system is proposed. During the design progression, initially, a comprehensive analysis is carried out regarding the fundamental functions, styles, and principal structures of the extant products. Subsequently, via the utilization of the substance—field analysis approach, an efficient and economically viable bottom formwork support system, which is commensurate with green prefabricated steel structure buildings, is chosen from among the seventy—six standard solutions. Eventually, the superiority degree evaluation method in Extenics theory is applied to appraise the merits and demerits of the design scheme. The optimal scheme is thereby ascertained and verified through model construction. Following the identification of solutions to the practical problems, three—dimensional modeling and detailed product descriptions are furnished for the innovative design scheme. Through exemplifying an innovative design of a steel structure bottom formwork support system, the feasibility and effectiveness of this method are corroborated, thus furnishing a significant reference for the design of the bottom formwork support system in green prefabricated steel structures, which is conducive to promoting the research and application in this field.

[Key words] TRIZ; Steel Construction; Base Mould Support

引言

随着中国经济的腾飞发展,作为国民经济支柱产业的建筑业已上升到主导地位。在中国国家召开的“十三五规划”“十四五规划”会议精神中明确指出,要大力推广应用装配式建筑(武春杨, 2021)。钢结构是一种具有系统性、专业性、集成性的拼装结构,需要各个专业的集成,需要从设计阶段、物料准备阶段、施工组织阶段全面的统筹计划。装配式钢结构并且具有良好的抗震性能,较短的施工周期,以及施工低碳,这些优于传统建筑等特点,被誉为“绿色建筑”之一(徐晗、蒋金生、段坤朋、徐山山, 2019)。

1 正文

底模支撑系统是装配式钢结构的一个组成部分。企业和相关领域的学者对其研究灿如繁星,创新技术也日新月异,但还是争论不断。所以对于底模支撑系统的研究前景和价值还很广泛。中国建国以来,在工程施工的各项技术领域都是处于粗放式发展的局面,大部分是引进和借鉴国外的技术工艺,符合中国自己国情的相关施工技术及工艺有待进一步创新和改进,特别在钢结构模板支撑技术中。伴随着技术的进步,近几年来相关的创新技术和创新工艺涌现不断。模板支撑工程是我国建设工程当中是一个不可或缺的分项。模板支撑体系的施工建设施工现场的重大危险源之一,尤其是模板及其支撑体系施工的安全问题,是建设工程施工中的重大难题。模板及其支撑体系施工直接影响着后续能否正常施工的关键。

1.1 研究综述

目前学术界对钢结构底模支撑的研究大致可分两类,一类是,免拆除的支撑系统,是把底模当作受力钢筋参与楼板的受力。如采用组合楼板形式的支撑系统(焦渊, 2017)、采用钢筋预制架支撑系统(杨超群, 2017)等;二类是,免落地、可拆除的支撑系统,是支撑结构不需要地面支撑,利用结构本身进行支撑,施工完毕后还可以便捷的拆除,循环利用。如采用一种快速支模的技术(胡岩, 2019)。随着国际社会对产品绿色、低碳、环保的环境要求越来越高,研究学者把第二类支撑系统作为研究侧重点,也就是可拆除的支撑系统,是在楼板施工结束后可以拆除回收利用的支撑系统。学术界对此类可拆除的支撑系统研究方向多是运用结构的受力来改变支撑方式。综上,对于钢结构支撑系统的研究多集中于改良其结构受力来完善设计支撑功能,但针对钢结构支撑系统的成本经济性几乎鲜有人研究。现有的改良设计难以满足从成本经济性对绿色、低碳、环保的环境要求。

1.2 研究假

一般产品的设计流程可分为五步,第一步发现问题;第二步分析问题并提出初步的解决方案;第三步结构设计;再根据设计结果做筛选和评定;最后完成产品设计得到最终的设计方案(钟柏昌、龚佳欣, 2023)。此流程作为产品设计的框架,可建立一个基于TRIZ理论的钢结构底模支撑系统产品的模型。该设计流程遵循TRIZ理论不仅能解决产品设计问题,还可以解决问题

的创新原理,最终得到解决问题的创新设计产品。该流程从发现问题,分析问题及提出解决问题的方法不仅高效快捷,能够有效的避免传统产品发明创新的复杂性,同时还可以减少设计工作的工作周期(周祺、周济颜、李旭, 2020)。

1.3 研究问题

1.3.1 产品分析

首先,功能性分析。基本功能是通过正确的把支撑系统固定到主体结构的钢梁上,达到牢固的支撑作用。除此之外,产品还应该具有便捷的可调节功能,满足不同跨度钢结构的支撑需求,减少材料的浪费。其次,结构和材料分析。主要支撑材料采用型钢、镀锌压型钢板、铝合金材料。支撑系统结构包括主结构钢梁固定装置、底模支撑横梁结构、底部模板等。

1.3.2 问题描述

现存在问题:(1)整个支撑系统自重和体积较大,特别是遇到主梁跨度很大的工程,支撑系统材料运输不便。(2)底模支撑横梁结构不可调节,针对不同主梁跨度的钢结构支撑材料都需要从新加工成型,材料浪费极大。

1.3.3 基于TRIZ理论的问题模型

在TRIZ理论中,认为产品创新的标志是解决和移走设计中的矛盾,从而会产生新的具有竞争力的设计方案。发明问题的核心是发现矛盾并有效的解决矛盾,没有矛盾的设计不是一项创新设计。研究人员应该在设计过程中不断的发现问题并解决矛盾,矛盾是推动设计理想化的方向和进化动力。在确定问题矛盾后,运用TRIZ理论中的七十六种标准解来解决矛盾。由标准解中确定可用发明原理,将所确定的原理应用于发现的问题中,找到、评价并完善概念设计,也就是初步设计,再进一步确定后续设计。钢结构底模支撑系统的设计问题的结构属性、物理属性比较明显,适合运用物理矛盾和标准解来解决问题。

第一步:定义模型中的三个基本元素,将问题转化为三个必要的元素。其中包含俩个物质和一个场。 F =机械物理场, $S1$ =建设单位, $S2$ =钢结构底模支撑系统。

第二步:构建一个物理场模型。常规的钢结构底模支撑系统多采用型钢来作为支撑结构的主要材料。但采用型钢作为主要的支撑材料不仅重量较大,再遇到跨度较大的主梁结构时所使用的材料不仅数量需要增加,截面尺寸也需要更大,来满足足够的支撑刚度要求。这就导致支撑系统材料因为过重,不但不好运输,而且用量巨大,造成建设成本增加。若替换成相对重量较轻,刚度大的支撑材料,可以有效的降低运输和建设成本。若再将底模支撑横梁结构设计为可调节形式,这样可以适用于不同主梁跨度结构的工程,减少因为跨度问题而需要另行生产底模横向支撑结构的建设成本。钢结构底模支撑系统的经济性问题与材料密度、长度、截面尺寸的选用和结构形式有着密切的关系。那么以上问题与解决方法转化为外部合成物一场模型。

第三步:从七十六个标准解中选择一个最恰当的解,通过引入物质 $S3$ 来消除有害作用。对于这里的问题,就是增加底模横向

支撑结构的伸缩装置,这在一定程度上可以适用于各种主梁跨度的工程,减少另行加工制作、安装横向支撑系统所带来的成本增加。另外,该方法并不复杂,改进费用也不高,比较容易实现。

第四步:通过改变物质S4来消除有害作用, $S_4 = "S_2 + S_3"$,在“S2+S3”的基础上改变材料本身来消除有害影响。再构建物质物一场模型。就是通过将原本支撑系统的笨重材料,替换成密度低、重量轻、强度大、造价低廉合金材料。从而进一步减少运输、材料、安装方面的成本。

1.3.4 钢结构底模支撑系统的创新设计

应用七十六个标准解决方案的建议,可以高效、便捷的得到若干解决问题的主要方向,通过继续研究便可以找到解决创新问题的方案,国内外学者运用TRIZ理论来解决产品在创新中遇到的问题(咸红旭、乔冠、王利利、程天才、吴昊侯,2023)。

从建设单位角度出发进行设计,构建钢结构底模支撑系统设计方案的基本思路,首先设计目的是什么,设计目的是实现钢结构底模支撑系统的经济性。第二设计的最优解是什么,是产品得轻量化、材料成本低、周转率高、通用性强。第三安装便捷该如何解决和产品的通用性如何解决,那就需要产品结构简单,使横向支撑梁具有伸缩特性,适用于各种跨度。

根据解决上述问题的基本思路,利用autoCAD计算机辅助设计二维图形结构。设计详细功能说明:(1)替代原有笨重的型钢结构、组合式结构,用轻量化、价格低廉、强度大的合金材料替代;(2)结构要简单、操作便捷、拆装方便,周转率要高;(3)要适用性强,能在不同的跨度结构中应用,通用性强。钢结构底模支撑系统结构(详细资料请参考:图1)。

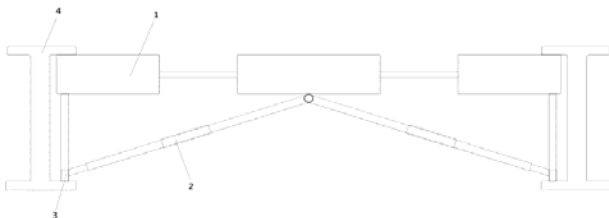


图1 物质底模支撑系统的物一场

注:具有伸缩功能的横向支撑梁(1),左侧的支撑结构和右侧的支撑机构三部分。左、右支撑系统结构对称,包括钢梁的固定装置套结构(3)和具有伸缩功能的斜向支撑系统(2),三个体系。(4)为主体结构钢梁。

资料来源:本文研究整理

该创新设计实现了钢结构底模支撑系统的经济性,所用材料为镍基合金材料,不仅轻量化、采购成本较低。首先,设计结构具有伸缩的功能,实现了通用性,可以根据不同工程主梁跨度进行调整,且材料不易磨损,周转率高。其次,设计结构简单,安装分为具有伸缩功能的横向支撑梁、左侧的支撑结构和右侧的支撑机构三部分组成,实现了安装便捷性。我们通过Cinema4D计算机三维软件创建创新产品的三维模型(详细资料请参考:图2)。

1.4 研究方法

运用可拓学的优劣程度评价方法对其评估。优劣度的评价方法应用关联函数来确定等待评价对象关于某些衡量指标符合要求的程度。采用优劣程度分析评价的方法,对以下三种钢结构底模支撑系统方案进行评价。A和B产品是目前市场中比较常用的支撑系统。A产品名为组合式压型钢板底模支撑系统,B产品名为快速底模支撑系统,C产品是基于TRIZ理论的钢结构底模创新设计。最终根据评价结果选择最优解。

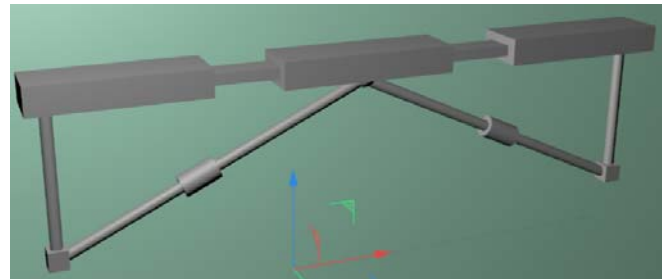


图2 创新物质底模支撑系统的3D模型

资料来源:本文研究整理

1.4.1 确定衡量指标

在钢结构底模支撑系统设计方案中。拟选择施工过程通用性 c_1 , 便携性 c_2 及经济性 c_3 三个元素作为衡量的指标,得到衡量指标集。

$$SI = \{S_1 = (C_1, V_1), S_2 = (C_2, V_2), S_3 = (C_3, V_3)\}$$

其中, V_i 为量的值域。

1.4.2 确定权重系数

采用AHP法,根据各因素在钢结构底模支撑系统经济性中重要程度的差来确定因素之间的相互比率。为了进一步分析,也可以在相邻的两个因素中插入比率2、4、6、8来反映影响程度。如若 c_i 因素比 c_{i-1} 因素重要,则标记为 i ,反之标记为 $1/i$ 。对比本研究设计的钢结构底模支撑系统的经济性明显重要于其它俩各因素,钢结构底模支撑系统的经济性略重要于通用性。因此,采用AHP法构建一个判断矩阵H,采用AHP的和积法,先对判断矩阵H进行归一化的处理,再对归一化处理后的判断矩阵按照行进行求和,最后进行向量的归一化计算,得到的为所需得结果,也就是权重大小,权重系数为 $a = (0.11, 0.26, 0.63)$ 。

1.4.3 建立关联函数,计算关联程度

本设计研究把该产品的程便携性、通用性及经济性得量级均设置为1到5个级别,则可以建立简单得离散型关联函数 τ_i :

$$\tau_i(x) = \{[5, x] | [4, x] | [3, x] | [2, x] | [1, x]\}$$

其中, $[5, x]$ 表示极经济、极便携、极通用, $[4, x]$ 表示经济、便携、通用, $[3, x]$ 表示一般, $[2, x]$ 表示不经济、不便携、不通用, $[1, x]$ 极不经济、极不便携、极不通用。产品的经济性、便携性及通用性的最优值均为5级。

比较三种不同的产品设计方案,从产品使用的便携性来说A类产品是目前市场较为普遍的一种施工方式,物料采购方便,运

输方便, 安装简单, 所以较为便携, 但是遇到主梁跨度大的结构运料较多, 重量较重, 运输性就降低。B、C类产品都需要提前在工厂加工后现场组装成型, 因此没有A类产品具有较好的便携性, 但结构都较为简单易于拼装, 且重量较轻运输方便。综合评价三种产品在不同的工程中适用不同, 综合评定三类产品都较为便携。故作出评级 $K_{C_1}(O_1)=3$, $K_{C_1}(O_2)=3$, $K_{C_1}(O_3)=3$ 。从产品的通用性上来说, A类产品虽然目前市场使用较为广泛, 但多用于主梁跨度较小的结构, 有一定的局限性。B类产品相比较于A类产品在解决了主梁跨度问题, 但是在面对不同主梁跨度的结构上需要另行制作生产, 量身定做, 在一定程度上也具有一定的局限性。C类产品因为横梁具有伸缩功能, 所以可以完美的解决了主梁跨度问题。故作出评级 $K_{C_2}(O_1)=2$, $K_{C_2}(O_2)=3$, $K_{C_2}(O_3)=4$ 。从产品生产的经济性来看, C产品结构材料替换成价格较低的材料, 强度又能满足要求的合金材料, 而且结构设计也相对简易, 相对于A、B两类产品来说经济性优秀。B产品相对于A产品来说结构简单, 材料用量还少, 较A产品来说也具有较大的经济性。A类产品因为本身支撑系统需要再结构中当受力底部钢筋使用, 所以用量较大, 并且对于主梁跨度大的钢结构来说用量巨大, 所以性价比最低。故作出评级 $K_{C_3}(O_1)=2$, $K_{C_3}(O_2)=3$, $K_{C_3}(O_3)=4$ 。

根据上述分析得出, 三种产品有关衡量指标: 通用性 c_1 , 便携性 c_2 及经济性 c_3 关联度分别为: $K_{C_1}(O_1)=3$, $K_{C_1}(O_2)=3$, $K_{C_1}(O_3)=3$, $K_{C_2}(O_1)=2$, $K_{C_2}(O_2)=3$, $K_{C_2}(O_3)=4$ $K_{C_3}(O_1)=2$, $K_{C_3}(O_2)=3$, $K_{C_3}(O_3)=4$

根据规范关联公式:

$$\text{即: } K_i(O_j) = \begin{cases} \frac{K_i(O_j)}{\max_{x \in X_0} K_i(x)}, & K_i(O_j) > 0 \\ \frac{K_i(O_j)}{\max_{x \in X_0} K_i(x)}, & K_i(O_j) < 0 \end{cases}$$

则其三个因素的规范关联度分别是: $K_{C_1} = (111)$,

$$K_{C_2} = (0.50.751), \quad K_{C_3} = (0.50.751)。$$

2 结果

计算三种产品的优度, 关于衡量指标SI的规范关联度分别为: $K(O_1) = (111)^T$, $K(O_2) = (0.50.751)^T$, $K(O_3) = (0.50.751)^T$, 因此三种产品优度分别是 $C(O_1) = aK(O_1) = 0.11$, $C(O_2) = aK(O_2) = 0.26$, $C(O_3) = aK(O_3) = 0.63$ 。

由于 $C(O_1) < C(O_2) < C(O_3)$, 所以认为C产品为最优选的方案。

3 建立有限元分析

3.1 模型建立

为了验证创新设计支撑系统的安全性、可靠性, 采用Simdroid软件进行建模, 如图21所示。底部不锈钢管支撑采用 $\Phi 32 \times 3\text{mm}$, 中部伸缩装置当作不锈钢管支撑的整体构件整体接受力计算, 不做另行计算。上方不锈钢梁尺寸为: $240 \times 50 \times 4\text{mm}$, 中间的伸缩结构不在本次研究中待以后进行单独计算研究, 本研究把伸缩装置结构当作整体梁结构计算, 不再做另行计算。钢结构主梁值之间跨度顶板底模采用厚的多层板, 架设在工字梁下翼缘上, 顶板厚度为150mm, 纯工字钢梁跨度分为3400mm、3600mm、3900mm、4200mm。本验算取板厚150mm, 最大跨度4200mm计算进

行计算。

3.2 荷载计算

按均布线荷载及集中荷载两种作用效应考虑, 并按两种计算结果取其最大值。考虑到荷载组合分俩类情况。除了考虑构件自重以外, 还需要考虑其作用上部的永久荷载(现浇板)和可变荷载(活动荷载)。

(1)安全设计系数: 1.20永久荷载+1.40可变荷载; (2)安全设计系数: 1.35永久荷载+1.40 $\times$ 0.70可变荷载。按要求下层支撑系统的设计永久荷载的安全值为0.4, 可变荷载的设计安全值为0.3。根据实际得出荷载计算有四种来源: 一是多层模板自重标准值: 100N/m^2 。二是现浇混凝土自重标准值: $2400 \times 0.15 = 360\text{N/m}^2$ 。三是钢筋自重标准值: $1100 \times 0.15 = 165\text{N/m}^2$ 。四是施工人员及设备荷载标准值: 2500N/m^2 , 及跨中荷载 2500N 两种情况考虑。计算均布荷载的设计值大小: $Q_1 = [1.2 \times (a+b+c) + 1.4 \times d]$ 。

$$*0.4 = 1700\text{N/m}, \quad Q_2 = [1.35 \times (a+b+c) + 1.4 \times 0.7 \times d] \times 0.3 = 1317.5\text{N/m} \text{ 计算}$$

$Q_{\text{MAX}} = \{Q_1, Q_2\}$, 根据以上两种情况比较应取其大值, 即 $Q_1 = 1700\text{N/m}$ 作为设计依据。计算跨中集中荷载设计值: $P = 1.4 \times d = 3500\text{N}$ 。

3.3 强度验算

计算施工的均布荷载和集中荷载根据公式, 施工荷载为均布线荷载: $M_1 = 0.125 \times Q_{\text{MAX}} \times L^2 = 3748.5\text{N} \cdot \text{m}$ 。再根据计算施工荷载为集中荷载: $M_2 = 0.213 \times P \times L(13) = 3131.1\text{N} \cdot \text{m}$ 。得出: $M_{\text{MAX}} = \{M_1, M_2\}$ 。由于 $M_1 > M_2$, 故采用 M_1 进行最大验算强度。然后通过软件Simdroid对建模好的结构进行网格划分, 以便更好的分析受力情况。

计算支撑系统梁的各项属性。根据公式计算, 这个公式是针对矩形截面的, B是宽度, H是高度, 是截面惯性矩I除以截面中心到截面外缘的距离H/2。支撑不锈钢梁的截面模量为: $W = BH^2/6$ 既: $M = 4.8 \times 10^5$ 。再根据公式计算, 支撑不锈钢梁的惯性矩为: $= BH^3/12$ 既: $I = 5.76 \times 10^7$ 。通过软件Simdroid对所建立的模型赋予材料属性, 所有构件均采用强塑不锈钢材料。

计算支撑系统梁的应力, 根据应力公式, 计算不锈钢梁的最大应力。 $\sigma = M_1/M = 7.8\text{N/mm}^2 < f = 13\text{N/mm}^2$ (其中 13N/mm^2 为施工手册规范要求值) 故强度能满足要求。

4 结论

从研究结果可以看出, 基于TRIZ理论的问题模型研究创新出来的设计产品的优度评定最高, 是本文研究的最优解, 其经济性最佳, 可行性最高。针对钢结构底模支撑系统的研究, 应该更多的关注产品的经济性方面的研究, 关注产品设计的经济性之间的关系。良好经济性的产品不仅可以实现企业的利润最大化, 还可以减少对环境的污染破坏, 实现低碳排放、可持续发展的绿色环保的经营理念。

根据本文研究结果的启发, 还有以下几点: (1)随着世界各国对低碳环保, 可持续发展的理念提出, 装配式建筑是绿色建筑的杰出代表, 而钢结构建筑是天然的装配式建筑, 相关学者和

企业相关研究人员应把研究则重点放到钢结构的相关研究中。(2)在钢结构建筑的相关研究学者对于主要支撑结构梁、柱的研究方向没有太多的争议,但是对于装配式的楼板、外墙等相关研究结果争议不断。在今后的研究中应加大对其研究力度,争取研究出来更多创新的设计出来,来满足世界各国对低碳、环保、可持续发展的战略要求。

[参考文献]

[1]杨超群(2017).钢筋桁架楼承板设计、施工与效益分析(硕士,厦门大学).<https://kns.cnki.net/kns/detail/detail.aspx?FileName=1018041705.nh&DbName=CMFD2019>.

[2]周祺,周济颜,李旭.基于TRIZ物——场分析理论的儿童雾化吸入器设计[J].包装工程,2020,41(22):114-120.

[3]胡岩.钢结构建筑楼板可调节嵌固式C型钢支撑体系施工工法的研究[J].中国建材科技,2019,28(04):110-111.

[4]武春杨.装配式住宅建筑绿色效应测度研究(硕士,内蒙古科技大学).<https://kns.cnki.net/kns/detail/detail.aspx?FileName=1021714750.nh&DbName=CMFD2022>.

[5]徐晗,蒋金生,段坤朋.中天装配式钢结构住宅系统及施工技术.<https://kns.cnki.net/kns/detail/detail.aspx?FileName=ZGJG201905001027&DbName=CPFD2019>.

[6]咸红旭,乔冠,王利利,等.基于TRIZ理论的高压输电线智能除冰机器人结构设计与仿真分析[J/OL].机械设计,1-8[2024-12-23].

[7]钟柏昌,龚佳欣.基于TRIZ的跨学科创新能力评价:试题编制与证实[J].现代远程教育研究,2023,35(4):75-82,112.

[8]孙付春,李晓晓,杨涛.TRIZ理论在创新创业教育中的应用与实践[J].科技创业月刊,2022,35(11):110-112.

[9]焦渊(2017).闭口式压型钢板—钢筋桁架组合楼承板体系研究[硕士,安徽理工大学].<https://kns.cnki.net/kns/detail/detail.aspx?FileName=1017187092.nh&DbName=CMFD2017>.

[10]黄亮,刘文亮,王金志,等.现浇楼板模板支撑体系在钢结构建筑中的应用及研究[C]//清华大学,东南大学,中国建设科技集团股份有限公司,中国建筑集团有限公司,中国中建设计集团有限公司.第八届全国钢结构工程技术交流会论文集.中建科工集团有限公司,2020:4.

[11]Lin,Y.,& Chen,M.(2021).Implementing TRIZ with Supply Chain Management in New Product Development for Small and Medium Enterprises.Processes,9(4),614.

[12]Mandal,P.,& Jain,T.(2021).Partial outsourcing from a rival:Quality decision under product differentiation and information asymmetry.European Journal of Operational Research,292(3),886-908.

作者简介:

马一鸣(1986--),男,汉族,天津人,研究生,工程管理方向,高级工程师,河北或固建筑工程有限公司天津分公司。

马玉乾(1986--),男,汉族,天津人,本科,讲师,施工方向,邯郸科技职业学院。

孟令红(1976--),男,汉族,河北人,本科,学士,建筑模块化方向,邯郸市泓泰钢结构有限公司。