# 空中自动同步脱钩吊具设计与分析*

张伟[1]，李明益[1]，周明坡[1]，张有锁[1]，郭龙[1]，常留红[2]，毛聪[3]

（1.中交天航港湾建设工程有限公司，天津 300450；2.长沙理工大学 水利工程学院，湖南 长沙 410114；
3. 长沙理工大学 汽车与机械工程学院，湖南 长沙 410114）

**摘要：** 针对重物在空中脱钩难、抛投成本高、准确度低、存在安全隐患等问题，提出并制备一种脱钩吊具，实现重物的空中自动同步脱钩抛投；开展该吊具的有限元受力分析，保证吊具的强度、刚度要求；进行透水框架的抛投试验和空中抛投 75 万架透水框架的工程应用。结果表明，该吊具的危险位置未出现疲劳裂纹，疲劳强度满足施工要求；可显著减轻工人劳动强度，降低施工安全隐患；能增加每次抛投重物的数量，提高抛投效率。

**关键词：** 工程机械；空中脱钩；吊具；自动同步抛投

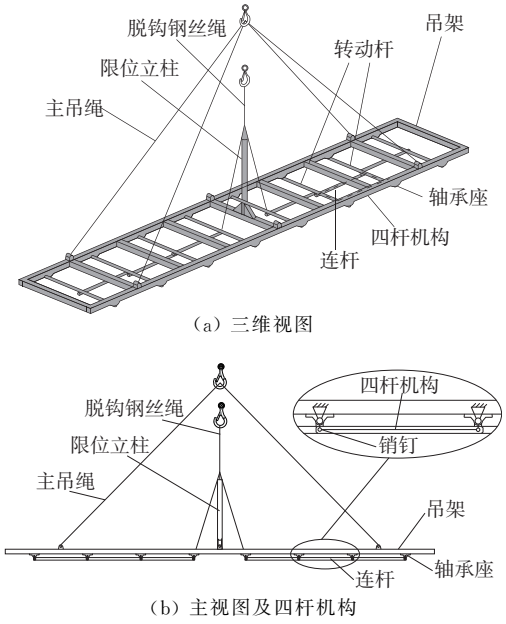
**中图分类号：** U653.92 **文献标志码：** A **文章编号：** 1671－2668(2020)02－0130－03

施工过程中，经常需将重物在空中进行抛投，特别需要将多个重物起吊到指定位置后能在空中自动同步脱钩抛投的设备。如航道整治工程中使用的四面六边体透水框架，需在水面进行抛投，而且所抛的四面六边体透水框架的数量非常巨大，一个工地就达几十万架。传统的抛投重物方法采用挖掘机抛投甚至是人工抛投，存在每次抛投数量少、抛投效率低、安全隐患大、抛投成本高、抛投位置准确度低等问题。该文根据所需抛投重物的结构特点及抛投要求，提出并制备一种空中脱钩吊具，实现重物的空中自动同步脱钩抛投，并对该吊具进行有限元受力分析、透水框架抛投试验和工程应用，分析其可行性和有效性。

## 1 空中脱钩吊具的结构设计

为提高重物的抛投效率、减轻工作人员劳动强度，设计一种基于四杆机构的空中自动同步脱钩吊具（见图 1）。该吊具由吊架、四杆机构、提升机构组成，其中：吊架由工字钢焊接而成，分为横梁和纵梁，起承载作用；四杆机构由横梁、两相邻的转动杆、连杆组成，转动杆通过轴承安装在横梁的轴承座内并构成转动副，连杆与转动杆之间由销钉连接并形成转动副，构成四杆机构；提升机构由脱钩钢丝绳、限位立柱组成，为四杆机构提供拉力并使其限位转动，提升机构拉着连杆水平移动，带动转动杆转动，起悬挂重物并脱钩的作用。

吊具的工作原理：将所需抛投的重物通过绳索悬挂在转动杆的挂钩上，起重机主吊钩将空中自动同步脱钩吊具及重物吊移到抛投位置并停在所需高度；提升副吊钩经脱钩钢丝绳拉着连杆平移，四杆机构的作用使转动杆绕着自身轴线转动，当转动杆转过一个合适角度时，悬挂有重物的绳索从转动杆的挂钩上脱落，实现重物的空中脱钩抛投（该吊具具有多组四杆机构并能悬挂多个重物，可实现多个重物在空中自动同步脱钩抛投）；放松副吊钩，在绳索及连杆的自重作用下转动杆复位。




（a）三维视图

（b）主视图及四杆机构

**图 1 基于四杆机构的空中自动同步脱钩吊具**

* **基金项目：** 国家重点研发计划（2016YFC0402108－4－1）

## 2　空中脱钩吊具的有限元受力分析

### 2.1　建立模型

为验证空中脱钩吊具工作过程的强度及刚度，对其进行有限元受力分析。采用 SolidWorks 软件建立空中脱钩吊具三维实体模型[见图 1(a)]，充分利用三维软件建模简单方便和易于发现设计错误的特点，大大简化建模的繁琐过程。为提高后续有限元分析的计算效率，建模时简化或省略一些对计算结果影响不大的特征，如简化吊耳和倒角等要素；假定零件之间焊接牢固，无虚焊、漏焊、松脱现象，焊接后残余应力较小，不足以影响分析结果。

通过 Simulation 模块进行受载仿真分析，并采用带中节点的四面体实体单元划分网格，网格尺寸为 20 mm，吊耳、拐角等复杂结构部位网格尺寸较小，而横梁、纵梁等平直位置采用小尺寸网格。共划分为 82 799 个单元、151 482 个节点。

根据空中脱钩吊具的工作状态(见图 2)，载荷包括：1) 施加在转动杆挂钩上的重物质量(为每根绳索上悬挂 2 个透水框架及绳索自重，质量为 1 820 N)，方向为竖直向下；2) 空中脱钩吊具自重。约束条件为：1) 主吊钩吊装位置固定；2) 横梁上轴承座和轴承盖接触面之间存在接触，螺栓施加预紧力；3) 连杆与转动杆之间的转动副设置为销钉连接。空中脱钩吊具采用 Q235 钢材，弹性模量 $E=2.06\times10^{11}\ \mathrm{N/m^2}$，泊松比 $\mu=0.3$，密度 $\rho=7\ 850\ \mathrm{kg/m^3}$，屈服应力 $\sigma_{\max}=235\ \mathrm{MPa}$。由于空中脱钩吊具在常温下工作，忽略热应力和热变形，即不考虑材料的比热、热膨胀系数等热物理性能。

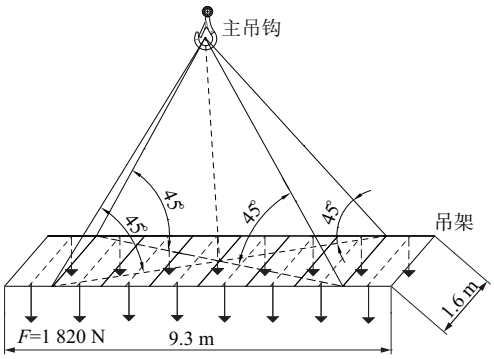



**图 2　空中脱钩吊具受力示意图**

### 2.2　分析结果

图 3 为空中脱钩吊具的 Mises 应力云图。由图 3 可知：空中脱钩吊具应力最大值为 155.4 MPa，吊耳位置应力较大，其余部位的应力通常为几十兆帕。导致这一现象的原因是主钢丝绳吊住吊耳，所吊重物及吊具自重均由吊耳承受，导致该处出现应力集中现象。Q235 材料的屈服强度为 235 MPa，起重机械的安全系数通常取 1.3，即许用应力为 181 MPa，吊具强度满足要求。

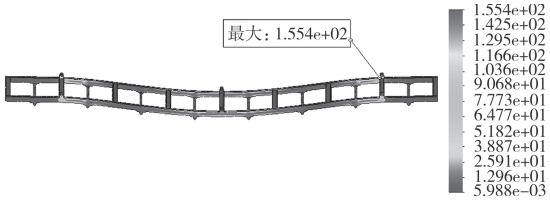



**图 3　空中脱钩吊具应力分布**(单位：MPa)

图 4 为空中脱钩吊具的挠度分布。由图 4 可知：空中脱钩吊具 Y 方向的最大位移为 15.7 mm，位于吊具的中部下方区域。船用起重机的许用挠度以悬臂梁长度的 1/500 计算，最大许用挠度为 18. 6 mm，空中脱钩吊具满足刚度要求。

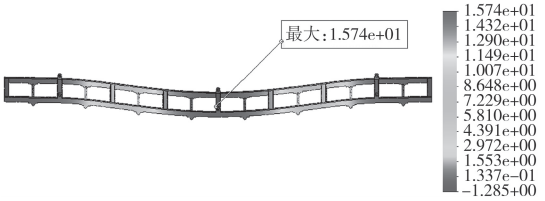



**图 4　空中脱钩吊具挠度分布**(单位：mm)

尽管吊具强度和刚度满足要求，但设计中还需考虑下列因素：1) 焊接问题。焊接强度计算是当今有限元计算领域的难题，很难准确分析其实际状况，故分析中省略焊缝。而焊缝填料层与母材结合面的性能通常比母材差，会导致实际应力和变形值比计算值大。2) 钢材“负偏差”问题。建模时钢材厚度均使用理论值，而钢材的实际尺寸通常比理论值小，存在“负偏差”，会造成实际应力和变形值比计算值大。3) 超载问题。吊具实际使用时可能超载，会造成实际应力和变形值比计算值大。4) 动态载荷问题。计算时取静止状态下载荷，而吊具在启动和制动时的实际载荷往往大于静止状态下载荷，会造成实际应力和变形比计算值大。5) 疲劳问题。计算中只进行应力、应变分析，没有进行疲劳分析，而疲劳是机械零部件破坏的一种最常见方式，设计时需考虑该因素的影响。综上，上述计算所得最大应力、最大挠度分别比许用应力、许用挠度小 16.5% 和 18.5%，比较可靠，在保证其具有足够强度和刚度的前提下，能节省材料、降低成本。

## 3 空中脱钩吊具的工程应用

开展空中脱钩吊具样机试制，每台吊具设计为2排挂钩，每排8个挂钩，总计16个挂钩。开展透水框架的空中脱钩抛投试验，结果显示：该吊具各铰链转动自如，能实现重物空中自动抛投；连杆能水平移动，抛投重物时同步性好；吊具未出现大变形和塑性变形，抛投位置准确可靠。

在长江干线武汉至安庆段6 m水深航道整治中开展工程应用（见图5），每个挂钩叠放2架透水框架，即每次抛投透水框架数量为32架，每天抛投透水框架数量达到1.2万架，大大提高了施工效率，显著减轻了工人劳动强度，也最大限度降低了施工安全隐患。经过总抛投透水框架75万架的工程应用，吊具焊缝、轴承座螺栓连接、挂钩、吊耳等危险位置均未出现疲劳裂纹，疲劳强度满足施工要求。

（a）透水框架抛投现场

（b）挂钩

（c）空中脱钩吊具

**图5 空中脱钩吊具的工程应用**

## 4 结语

该文设计并制备一种基于四杆机构的脱钩吊具，该吊具由吊架、四杆机构、提升机构组成，提升机构拉着连杆平移带动转动轴回转，实现重物的空中自动同步脱钩抛投。有限元受力分析结果表明，该吊具的强度、刚度满足要求。透水框架的抛投试验及工程应用表明，吊具的危险位置未出现疲劳裂纹，疲劳强度满足施工要求；显著减轻了工人劳动强度，降低了施工安全隐患；增加了每次抛投重物的数量，提高了抛投效率。

**参考文献：**


[1] 陈辉，吴杰，李益进.四面六边体在长江八卦洲段护岸固脚中的应用[J].人民长江，2009，40(5).

[2] 蒋波，雷国平，尹书冉，等.单个透水框架的三维数值模拟研究[J].水运工程，2014(12).

[3] 刘倩颖，王平义，喻涛，等.四面六边透水框架群的护滩效果研究[J].水运工程，2009(12).

[4] 徐国宾，张耀哲.混凝土四面六边透水框架群技术在河道整治、护岸及抢险中的应用[J].天津大学学报，2016，39(12).

[5] 丁兵，刘同宦，雷文韬，等.四面六边透水框架体防护层稳定性试验[J].浙江大学学报：工学版，2015，49(2).

[6] 罗超，田朋云，张洁.透水框架尺寸对减速效果影响的建模与仿真[J].郑州轻工业学院学报：自然科学版，2014，29(4).

[7] 南晓红，聂源宏，冯普林.渭河吊桥段四面六边体透水框架群试验研究[J].人民黄河，2003，25(11).

[8] 尹飞鸿.有限元法基本原理及应用[M].第2版.北京：高等教育出版社，2018.

[9] 成大先.机械设计手册[M].第6版.北京：化学工业出版社，2016.

[10] 交通部水运司.港口起重运输机械设计手册[M].北京：人民交通出版社，2001.


收稿日期：2019－10－12

（上接第129页）

过成功应用的先例。但实例表明，上部刚性连接施工要求高，砼收缩徐变和墩台沉降都会形成桥梁的内力，桥面板在新老桥接缝处容易出现反射裂缝，而且随着接缝长度的增加该裂缝越容易出现，采取该方案时应予以重视。

## 4 结语

以实例分析新老桥接缝处病害和处理方法。该桥前面两次维修加固虽不尽完美，但在维修加固过程中不断改进，在第二次加固改造后至今该桥整体处于稳定状态，桥台处也未发现沉降裂缝，加固效果不错。后续瑕疵的地方可通过养护来改善，如有需要，也可作局部处理。

**参考文献：**


[1] JTG/T J22－2008，公路桥梁加固设计规范[S].

[2] 荆冰寅.钢筋混凝土桥梁病害原因分析及防治[J]. 山西交通科技，2003(6).

[3] 王光辉，韦成龙.既有桥梁利用拓宽进行加固研究[J].中外公路，2015，35(5).

[4] 生墨海.关于桥梁加固施工的一点探讨[J].公路交通科技：应用技术版，2012(7).

[5] 杨吉新，陈一赫，梁亚兰，等.桥梁拓宽中新旧桥沉降差异化研究[J].公路与汽运，2018(4).


收稿日期：2019－05－25