

自锚式悬索桥铸钢锚碇加工技术

Processing Technology of Cast Steel Anchorage for Selfanchored Suspension Bridges

供稿|张旭，曾清健，黄安明，陈远林 / ZHANG Xu, ZENG Qingjian, HUANG Anming, CHEN Yuanlin

内 容 导 读 铸钢锚碇作为自锚式悬索桥的核心部件之一，集主缆锚固、压重和限位等多种功能于一体，具有外轮廓面夹角众多，锚固孔相对位置复杂等特点。本文以国内某悬索桥铸钢锚碇为例，以加工难点作为切入点，从满足设计使用要求、提高生产效率、降低劳动强度等方面，提出了铸钢锚碇复合斜面及锚固空间孔的高效加工技术。该技术可在产品机械加工过程中显著提高生产效率，降低劳动强度，为复合斜面及空间孔加工提供借鉴。

自锚式悬索桥以其独特的结构设计和优良的受力性能，在现代桥梁建设中占有重要地位，国内自锚式悬索桥主缆锚固体通常采用铸钢锚碇^[1]（图1）。



图1 铸钢锚碇

如图2所示，铸钢锚碇的使用位置位于桥梁梁体端部^[2]。主要作用是对发散后的主缆索股进行锚固^[3]，其索股为空间线形，主缆经散索鞍或散索套后呈近似圆锥状发散成单根索股^[4]，索股穿过锚固孔后使用锚固螺母进行锚固，其使用状态如图3所示。

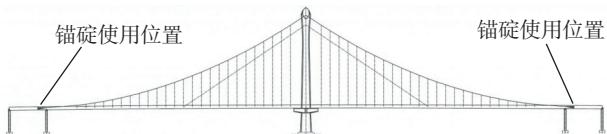


图2 锚碇使用位置

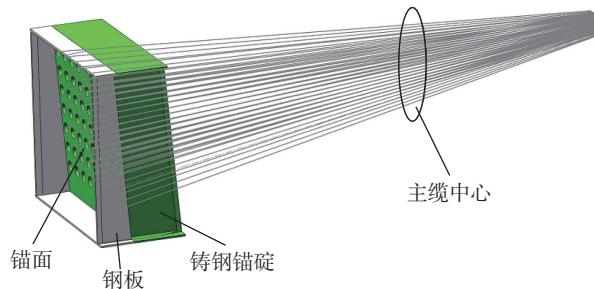


图3 钢锚碇使用状态图

作为自锚式悬索桥的关键组成部分，铸钢锚碇的制造质量直接影响到桥梁的整体性能和使用寿命。业内对铸钢锚碇制造方面的研究较少，汪广志^[5]对其铸造工艺进行了探讨，提出了能够有效保障铸

作者单位：德阳天元重工股份有限公司，四川 德阳 618000

件质量的工艺方案，但未对机械加工及焊接做进一步研究，尤其对于机械加工鲜有研究。

然而，铸钢锚碇的加工过程面临着结构尺寸大、外轮廓面夹角众多、锚固孔相对位置复杂等众多挑战。本文以国内某独塔空间缆自锚式悬索桥为例，针对其铸钢锚碇的结构特点，分析加工难点，优选加工设备，制定合理的加工工艺，采取相应的工艺措施，在保证产品质量的前提下提出铸钢锚碇的高效加工工艺，为自锚式悬索桥的建设提供有力支持。

本文中自锚式悬索桥跨径布置为 $50+350+350+50=800$ (m)，主跨桥面宽 47 m，边跨桥面宽 43.5 m，双向 6 车道，设计速度 120 km/h。采用的是钢锚碇结构，钢锚碇为钢板和铸钢锚碇的焊接件，如图 4 所示。

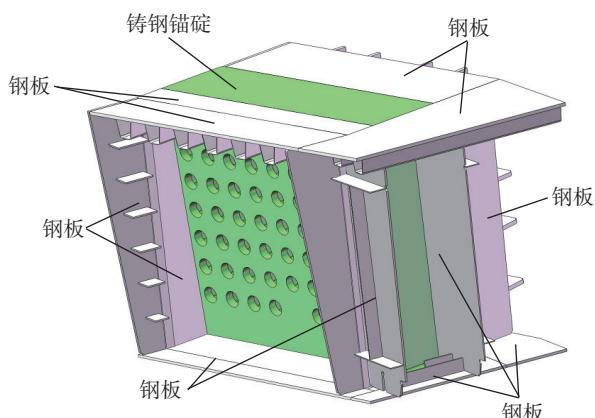


图 4 钢锚碇全貌

钢锚碇的制造流程为先将铸钢锚碇加工到位后，再焊接其余钢板。其中铸钢锚碇是整个钢锚碇

的核心部件，也是制造难点所在，如图 5 所示。本文将对铸钢锚碇的机械加工技术展开详细讨论。

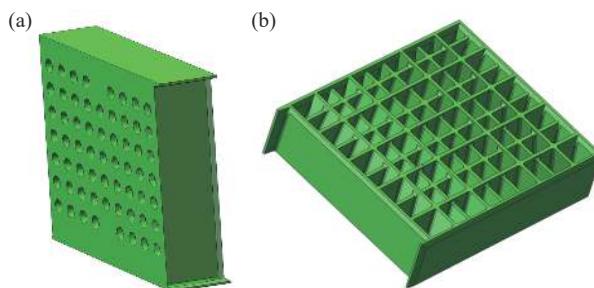


图 5 铸钢锚碇模型图: (a) 锚碇锚固孔示意; (b) 锚碇网格筋板示意

铸钢锚碇加工难点分析

外形尺寸质量大

相较于以往自锚式悬索桥中使用的铸钢锚碇，本研究的铸钢锚碇具有结构尺寸和质量大的特点。其外形尺寸为 $4425 \text{ mm} \times 3945 \text{ mm} \times 1200 \text{ mm}$ ，产品质量 54 t，毛坯质量达 60 t，如图 6(a) 所示。图 6(b) 为国内某自锚式悬索桥中使用的常规尺寸铸钢锚碇，外形尺寸为 $2690 \text{ mm} \times 2930 \text{ mm} \times 804 \text{ mm}$ ，产品质量 14.2 t，毛坯质量约 16 t。

由图 6 可见，相较于常规尺寸铸钢锚碇，本研究铸钢锚碇长度增加约 1700 mm，宽度增加约 1000 mm，厚度增加约 400 mm，毛坯质量增加约 44 t。这对制造设备的加工行程和承重能力提出了更高的要求。

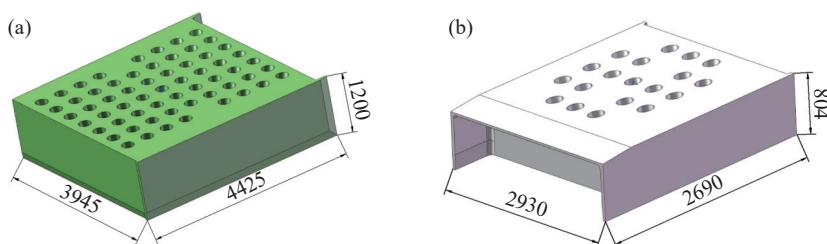


图 6 铸钢锚碇外形尺寸图 (单位: mm): (a) 本研究铸钢锚碇; (b) 常规尺寸铸钢锚碇

外形复杂，精度要求高

铸钢锚碇的加工基准面为锚面，外形复杂主要表现在顶板面和底板面与锚面均存在非 90° 夹角。其外形是一个不规则的长方体，两侧腹板垂直于锚面，且垂直于底板面，但是底板有纵向坡度 α_1 ，顶

板既有纵向坡度 α_2 ，还有横向坡度 α_3 ，如图 7 所示。

铸钢锚碇的使用位置位于桥梁梁体端部，需要与钢结构梁体进行焊接，且与梁体的对接尺寸要求高，如果尺寸偏差过大，将直接导致现场对接困难，影响桥梁建设的整体进度和质量。因此，铸钢

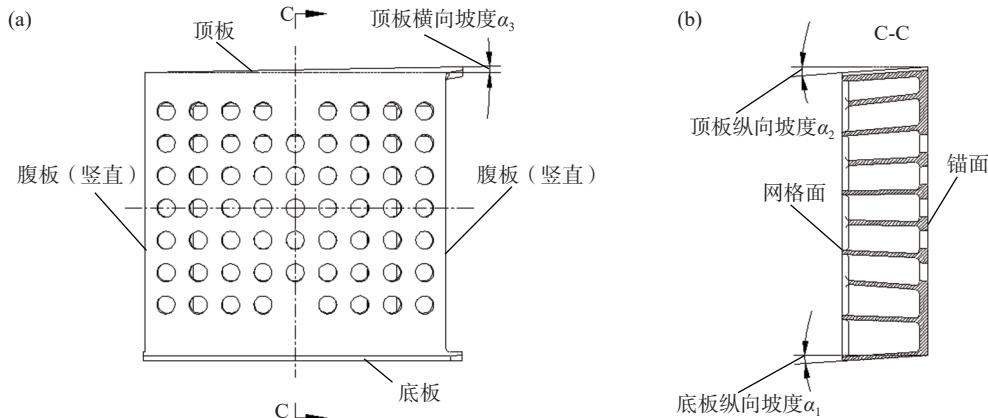


图7 锚碇各面角度关系图 (a) 本研究铸钢锚碇; (b) 常规尺寸铸钢锚碇

锚碇的外形尺寸必须严格控制。

锚固孔为空间结构

铸钢锚碇在桥梁主缆锚固后，每根索股具有特殊的角度，其锚固孔亦须适应索股的线形，否则索股锚头将与锚固孔产生干涉，无法对索股进行锚固，因此锚固孔中心线的准确性尤为重要。理论上除中心锚固孔外，其余锚固孔与锚面均不垂直，且每个孔的孔心线与锚面夹角均不相同。如图8所示，锚固孔的角度可用锚固孔中心线在锚面上的投影线与X轴夹角 α_4 ，以及锚固孔中心线在锚面上的投影线与锚固孔中心线的夹角 α_5 表示，是一个复合角度。本项目单件铸钢锚碇共61个锚固孔，每个锚固孔的孔心线 α_4 角度和 α_5 角度均不相同。

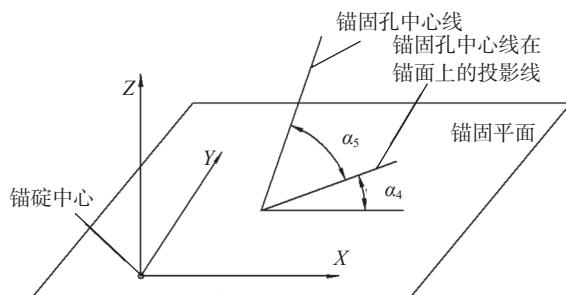


图8 索股角度投影示意

难点解决工艺方案

针对铸钢锚碇以上加工难点，结合现有设备，在保证产品质量的前提下，兼顾生产效率，制定了以下具有可行性和较好经济性的难点解决工艺方案。

尺寸质量解决方案

针对铸钢锚碇外形尺寸、质量大的特点，为了保证加工精度，提高生产效率，加工机床选择带回转工作台的数控落地铣镗床，机床X轴、Y轴行程应不小于5000 mm，Z轴行程应大于锚面厚度200 mm以上，回转工作台承重需在60 t以上，回转工作台面长宽尺寸应不小于5000 mm。

根据以上分析，在实际加工中选用TK6926数控落地铣镗床，机床主轴φ260 mm，X轴行程18 m，Y轴行程6 m，Z轴行程1.6 m，X、Y、Z轴定位精度0.02 mm/1000 mm。机床配备140 t数控回转工作台，工作台面5000 mm×5000 mm，承重140 t，行程3 m，B轴为回转工作台旋转轴，旋转定位精度0.003°。采用的数控系统响应速度快，联动性能优越，控制精度高。同时车间配置有起吊能力120 t的行车，可满足铸钢锚碇的加工需要。

外形加工工艺方案

铸钢锚碇外形加工面共计6个，其中锚面、网格面以及两侧腹板面均为相互垂直或平行的平面，但底板面和顶板面与加工基面——锚面均不垂直。若底板面和顶板面采用常规方法加工，就需在加工前先在合适位置铣出找正基准，再将顶板面和底板面分别按找正基准在垂直于主轴的方向进行加工。此方法在加工顶板面和底板面时需要多次装夹，并且按图纸要求的角度找正，工作量和找正难度均较大。

彭中年^[6]对复合斜面的铣削加工方法进行了探讨，分析了复合斜面的空间曲面铣削法和特殊平面

铣削法，其中特殊平面铣削法需要将加工面放置于垂直于主轴的方向加工，而空间曲面铣削法加工效率低。朱达新^[7]，陈颖^[8]，吴云云^[9]也对复合斜面的加工方法进行了探讨，均是通过专用工装或夹具调整复合斜面位置，使加工面垂直于主轴，再进行加工。以上方法除空间曲面铣削法可以在主轴和加工面不垂直的情况下进行加工外，其余方法均与常规加工方法思路大致相同，只是调整工件或主轴的方式有所区别，本质并未发生变化——加工面垂直于主轴。若运用在锚碇的加工中，同样存在装夹次数多，工作量和找正难度大的问题。而制作专用工装更适合于大批量零件的加工和经济效益体现，并不适用于锚碇的单件产品加工。空间曲面铣削法由于其加工效率低，锚碇的加工中也不是最优选择。

结合已有的加工机床，确定铸钢锚碇的外形加工采用工件放置于回转工作台，锚面垂直于机床主轴的装夹方式，充分利用回转工作台的旋转^[10]功能，总共装夹两次即可完成所有外形面的加工。第一次装夹将底板面放置于回转工作台，在底板面上设置装夹垫块，使底板面与回转工作台面呈 α_1 角度，锚面垂直于主轴，在此状态下加工锚面，如图9所示。因两侧腹板面均与锚面垂直，且在此装夹状态下两侧腹板面垂直于机床XZ平面，锚面加工完后，回转工作台顺时针旋转90°即可加工一侧腹板面，再负向旋转180°即可加工另一侧腹板面。第一次装夹实物加工如图10所示。

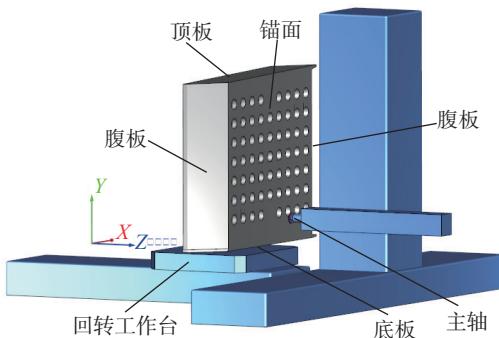


图9 第一次装夹加工示意图



图10 第一次装夹实物加工图

第二次装夹将一侧腹板放置于回转工作台，网格面垂直于主轴，在此状态下加工网格面，即铸钢锚碇厚度尺寸，如图11所示。在此装夹状态下底板面垂直于机床XZ平面，且与网格面夹角为 $90^\circ - \alpha_1$ ，故回转工作台顺时针旋转 $90^\circ + \alpha_1$ 角度，即可加工锚碇底板面。

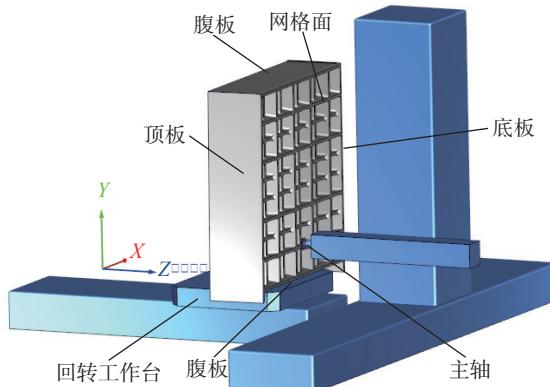


图11 网格面加工示意图

根据图7所示角度可知，在图11装夹状态下，回转工作台顺时针旋转 $270^\circ + \alpha_2$ 角度即是顶板面加工方向。但顶板面存在横向坡度 α_3 ，故还需要主轴在YZ平面采用斜线走刀的方式，才能加工锚碇顶板面，走刀方向由上至下，走刀路径如图12所示。由于YZ平面采用斜线走刀方式，加工面实际轮廓为微小的波浪形面，为了保证加工面的平面度和表面粗糙度，需要通过调整走刀步距的方式，控制加工面波浪形的波峰与波谷最大差值，使加工面表面质量满足技术要求。刘朝阳^[11]对复合斜面表面粗糙度铣削加工的精确控制进行了研究，并给出了具体的计算公式，通过计算数据的运用可以很好的兼顾复合

斜面加工的表面质量和加工效率。第二次装夹实物加工如图 13 所示。

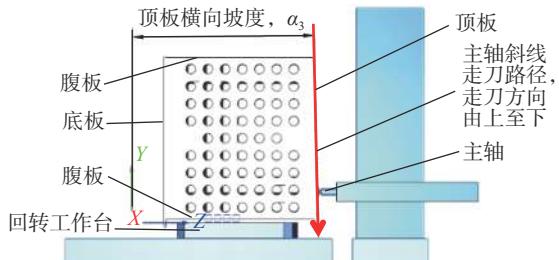


图 12 顶板面加工走刀路径示意图

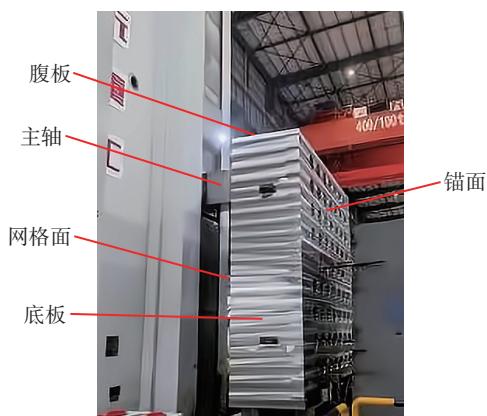


图 13 第二次装夹实物加工图

采用此方法加工铸钢锚碇外形，相比常规加工方法，减少了工件的装夹次数 4 次，减少装夹时间约 16 h，如表 1 所示。且不需要找正基准，避免了多次装夹产生的累积误差，节省了多次装夹的找正时间，降低了找正难度。具有更易保证外形尺寸精度、提高生产效率和降低劳动强度的优势。

表 1 锚碇外形加工装夹时间对比表

方法	装夹次数	单次装夹时间/h	装夹总时间/h
常规加工方法 (不带回转工作台)	6	4	24
本文所述加工方法 (带回转工作台)	2	4	8

锚固孔加工工艺方案

本项目单件铸钢锚碇共 61 个锚固孔，每个锚固孔的孔心线 α_4 角度和 α_5 角度均不相同（图 8）。机械加工孔的常规加工方法需刀具旋转平面垂直于孔中心线，而锚固孔每个孔中心线与锚面角度都不一致。若锚固孔采用常规方法加工，有以下 2 种方式：

方法一：按锚固孔的角度逐一调整工件角度，使锚固孔中心线垂直于刀具旋转平面。但铸钢锚碇外形尺寸大，重量重，虽理论上可行，但实际操作中的工件调整次数多，找正难度大，工作量特别大，会导致加工效率极其低下；

方法二：采用万向铣头^[12]按锚固孔的角度逐一调整刀具角度，使刀具旋转平面垂直于锚固孔中心线。而采用万向铣头的方式，虽然可以对孔位进行精准加工，但每个孔都需进行角铣头的复合角度调整，此方式角铣头调整次数多，工作量大，效率低下。

以上 2 种方法都存在效率低，工作量大，劳动强度大，时间长的缺点。周江辉^[13]对空间孔的加工进行了探讨，制作专用夹具将空间孔中心线位置调整到垂直于刀具旋转平面的方向，再进行空间孔的加工，与上述两种锚固孔加工方法本质上并未改变——孔中心线垂直于刀具旋转平面。其方法用于大批量件的加工才能体现经济效益，而锚碇的锚固孔数量众多，锚固孔角度各不相同，且为单件大型铸钢件，并不适用此方法。分析锚固孔与锚面的位置和角度关系，确定采用如下工艺方案。

将锚固孔中心线的复合角度分解为 XZ 平面和 YZ 平面两个方向上的投影角，铸钢锚碇的锚面垂直于主轴装夹，采用 X、Y、Z 三轴联动斜线走刀镗孔的方式加工，虽然实际孔的形状为椭圆，但圆度能满足图纸要求，且此种加工方式工件的装夹状态和加工锚面的装夹状态完全相同，装夹状态如图 9 所示，加工完锚面后无需再次装夹即可进行锚固孔的加工，且能在此装夹状态下加工完所有锚固孔，能大幅提高生产效率及降低劳动强度。

如图 14 所示，以 1# 锚固孔为例，举例说明锚固孔加工的走刀路径。锚固孔实物加工如图 15 所示。

采用此方法加工铸钢锚碇的锚固孔，相比常规加工方法，在保证产品质量的前提下，减少了工件的装夹次数或调整万向铣头的次数 60 次，相比常规加工方法一减少装夹时间约 300 h，相比常规加工方法二减少调整万向铣头时间约 120 h，如表 2 所示。此方法降低了找正难度及劳动强度，极大的提高了锚固孔加工的生产效率，且避免了多次装夹产生的累积误差，使锚固孔位置度更易保证。

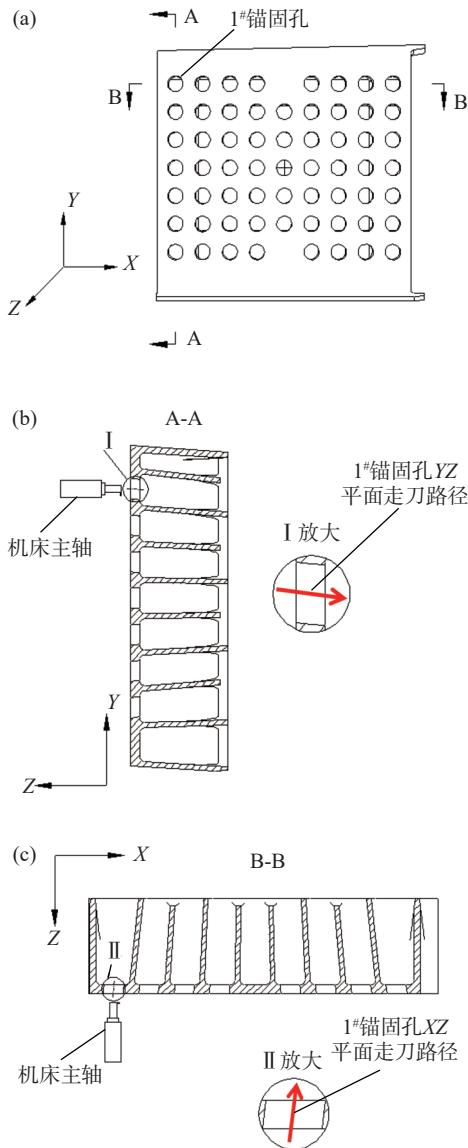


图 14 锚固孔加工示意图:(a) 主视图;(b)A-A 剖视图及 I 放大图;(c)B-B 剖视图及 II 放大图

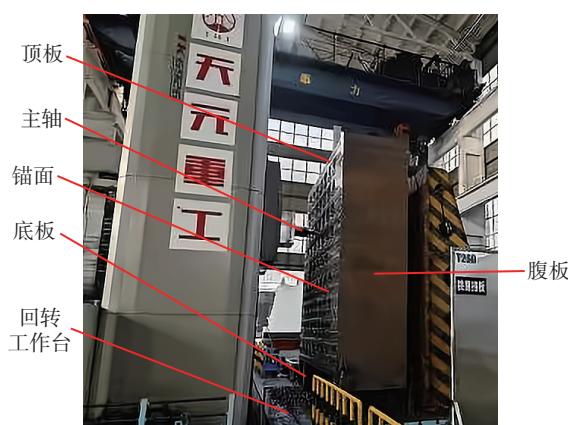


图 15 锚固孔实物加工图

表 2 锚固孔加工装夹时间对比表

方法	装夹次数	单次装夹/h	装夹总时间/h
方法一	60	5	300
方法二	60	2	120
本文所述方法 与锚面同序加工, 锚固孔加工不增加单独装夹时间			

结论

通过分析铸钢锚碇的结构特点, 选用 TK6926 数控落地铣镗床 (回转工作台承重 140 t) 作为加工设备, 通过制定合理的加工工艺, 在保证产品质量的前提下大幅提高生产效率。为将来大体量、复杂结构锚碇的高效率加工提供参考依据, 也为具有复合斜面结构特点或多空间孔结构特点的工件加工提供借鉴。

参考文献

- [1] 郑明珠, 周世忠, 彭宝华, 等. 公路桥涵设计手册: 悬索桥. 北京: 人民交通出版社, 2011
- [2] 许骏. 自锚式悬索桥锚固段合理总体布置研究. 城市道桥与防洪, 2023(5): 73
- [3] 杜涛. 自锚式悬索桥锚碇的设计与研究. 山西建筑, 2011, 37(12): 167
- [4] 中交公路规划设计院有限公司. JTGT D65-05—2015 公路悬索桥设计规范. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015
- [5] 汪广志, 曹庆国. 大型铸钢件锚碇制作过程探讨. 金属加工(热加工), 2019(12): 67
- [6] 彭中年. 基于复合斜面数控铣削加工方法的探讨. 机械工程师, 2012(8): 40
- [7] 朱达新. 复合斜面铣削方法及加工实例探讨. 金属加工(冷加工), 2016(19): 52
- [8] 陈颖. 汽车反作用杆支架复合斜面的加工. 内燃机与配件, 2021(18): 134
- [9] 吴云云. 轧机高硬度复合斜面滑板的加工. 机械工程师, 2016(5): 253
- [10] 杨叔子. 数控加工. 北京: 机械工业出版社, 2012
- [11] 刘朝阳. 精确控制复合斜面表面粗糙度的铣加工. 金属加工(冷加工), 2017(11): 48
- [12] 石晓东. 数控机床万能铣头组合角度计算方法创新. 中国重型装备, 2019(4): 53
- [13] 周江辉, 刘翠, 赵鑫. 铸铝合金发动机缸盖空间孔加工机床设计. 制造技术与机床, 2017(2): 29

作者简介: 张旭 (1989—), 男, 四川省德阳市人, 工程师。2012 年毕业于重庆大学机械设计制造及其自动化专业, 主要研究方向: 悬索桥核心受力件索鞍, 索夹及钢锚碇技术研究。通信地址: 四川德阳市旌阳区庐山路 3 段 20 号; E-mail: 519537891@qq.com。