

悬索桥索鞍索槽曲面数控加工技术研究探讨

董小亮, 唐长平, 刘令娴

武汉船用机械有限责任公司, 湖北 武汉

收稿日期: 2021年9月9日; 录用日期: 2021年10月20日; 发布日期: 2021年10月28日

摘要

索鞍是悬索桥主缆系统的重要受力构件, 索鞍具有结构复杂、体量大、尺寸精度高的特点, 其中索鞍索槽为三维空间复杂曲面, 加工精度等级非常高, 其加工工艺涉及到数控编程、曲面检测等工序, 已特大型悬索桥主索鞍、散索鞍鞍体为例, 研究索槽数控加工程序编制、机床加工配合、大型三维空间曲面检测等技术, 对其重难点进行分析, 通过采取相应的技术及工艺措施, 取得了较好的效果, 提高了加工质量及效率, 为悬索桥索鞍加工制作提供了参考。

关键词

悬索桥, 索鞍, 索槽, 曲面四轴联动加工

Research and Discussion on NC Machining Technology of Saddle Cable Groove Surface of Suspension Bridge Cable

Xiaoliang Dong, Changping Tang, Lingxian Liu

Wuhan Marine Machinery Co., Ltd., Wuhan Hubei

Received: Sep. 9th, 2021; accepted: Oct. 20th, 2021; published: Oct. 28th, 2021

Abstract

The cable saddle is an important stressed component of the main cable system of the suspension bridge. The cable saddle has the characteristics of complex structure, large volume and high dimensional accuracy. The cable groove of the cable saddle is a complex curved surface in three-dimensional space, and the machining accuracy level is very high. Its machining process involves NC programming, curved surface detection and other processes, taking the main cable saddle and splay saddle body of super large suspension bridge as an example. This paper studies the technologies of cable groove NC machining programming, machine tool machining cooperation and large-scale three-dimensional surface detection, analyzes its key and difficult points, and takes corresponding technical and technologi-

cal measures to achieve good results, improve the machining quality and efficiency, which provides a reference for the machining and manufacturing of suspension bridge cable saddle.

Keywords

Suspension Bridge, Cable Saddle, Saddle Groove, Surface Four Axis Linkage Machining

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

索鞍是悬索桥主缆系统的主要受力构件, 索鞍分为主索鞍、散索鞍两种, 其主要作用是平顺改变主缆线型并将载荷传递到桥梁主塔和支墩[1], 特大型悬索桥索鞍受尺寸大、重量重、结构复杂的影响, 加工效率低, 加工精度低, 通过对特大型悬索桥索鞍鞍体索槽空间曲面的数控加工方法、设备运行、索槽曲面尺寸检测等进行分析, 研究和探讨索槽数控编程方法、加工方式、机床运行方法、索槽曲面尺寸检测等技术, 达到提高加工效率及加工精度的效果。

2. 索鞍索槽曲面数控加工技术研究

目前悬索桥索鞍鞍体一般采用大型数控落地镗铣床加工, 索槽采用三轴联动的编程及加工方式, 加工刀具采用面铣刀, 直径 $\Phi 80$ mm、 $\Phi 100$ mm、 $\Phi 200$ mm、 $\Phi 250$ mm、 $\Phi 315$ mm [2], 运用三轴数控加工程序加工索槽时, 主要是机床主轴在 XYZ 三个方向进行运行, 而索鞍鞍体固定不动, 索鞍索槽是空间曲面, 加工时因索鞍固定, 机床主轴与鞍槽曲面角度相对固定, 索鞍索槽面是曲面, 不能与机床刀具垂直, 有一定夹角, 特别是越到鞍槽两端部, 索槽与加工刀具夹角越大, 导致刀具刀片不能进行有效切削, 加工后索槽残留较大, 需要进行人工处理, 加工精度低, 同时也延长了索鞍制造周期。悬索桥主索鞍、散索鞍鞍体结构图如下图 1、图 2 所示:

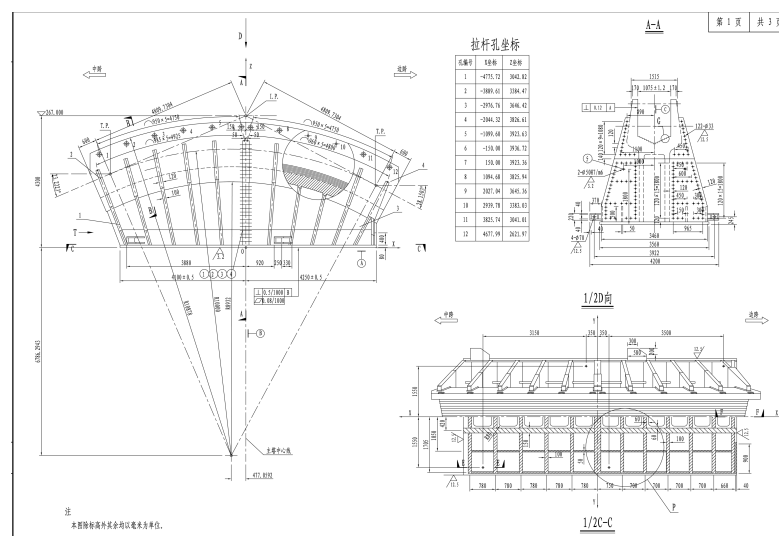


Figure 1. The main cable saddle saddle body structure diagram

图 1. 主索鞍鞍体结构图

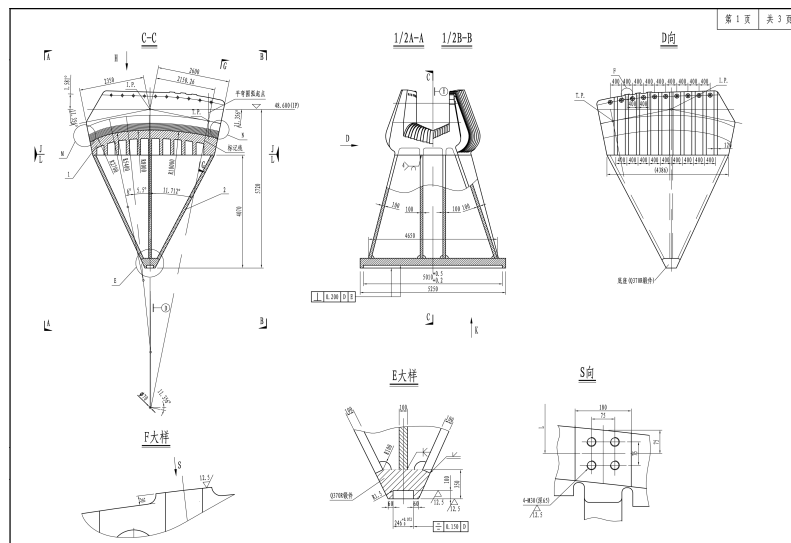


Figure 2. The structure diagram of the saddle body of the loose cable saddle
图 2. 散索鞍鞍体结构图

2.1. 索鞍索槽曲面数控加工方案分析

为提高索鞍索槽加工精度及效率，使索槽根部残留极小甚至消除，缩短索槽加工周期，经研究，可以采取如下几种方法：

- 1) 加工鞍槽时，将鞍体放置在回转工作台上，转动几次索鞍回转台，使索槽与机床主轴的夹角尽量减小，减小加工残留量。
- 2) 机床配置数控回转铣头，加工鞍槽时采用铣头回转方式，使刀盘与索槽曲面垂直。
- 3) 采用带回转工作台的数控镗铣床应用四轴联动的方式加工。加工时通过回转工作台带动零件同步参与旋转联动而不断变换零件的方位，使主轴切削时始终保持刀具底平面与索槽圆弧底面近似于贴平的状态，从而有效去除根部残留。

以上方案中，方案一需要人工操作回转工作台，对工作台功能要求不高，但是多次回转后，鞍槽与刀具仍然不是完全垂直，鞍槽仍然有一定程度残留，且操作时需要耗费时间，需要反复去测量回转角度，较为繁琐。方案二需要投资采购机床附件，成本高，且因索槽宽度尺寸小，数控回转铣头仍然不能做到全部加工，部分靠近侧边的索槽依然加工不到，特别是小型索鞍，数控回转铣头不能发挥作用。方案三对设备功能要求高，要求回转工作台有连续转动功能，但是不需要增加投资，目前可用于索鞍加工的数控机床一般均配备有该功能的回转台，该方案优点是加工效率高，加工精度高。

综合以上分析，方案三具有综合优势，因此采用了方案三的方法进行索鞍鞍槽加工。

2.2. 索鞍索槽曲面四轴联动数控加工方案制定

1) 数控程序编制

主、散索鞍的鞍槽由三维空间曲面组成(鞍槽槽底为组合圆弧曲面，鞍槽侧面为直线、圆弧、斜线组成的组合面)，槽形复杂，尺寸大，加工精度要求较高。

鞍槽加工时需采用四轴联动的方式，即通过机床的 X、Y、Z 轴及机床的回转工作台参与旋转的联动 B 轴，使机床的主轴方向始终为鞍槽底弧的径向，方能将鞍槽槽内的全部余量通过铣削的方式去除，加工设备采用 7 轴 4 联动数控镗床来进行索槽的加工。

四轴加工程序编制目前国内主要采用最先进的三维 CAM 软件 UG 编制，程序编制后为保证程序正确性，通过专用仿真软件 VERICUT 进行仿真加工[2]。

程序编制过程：

a) 定义工件坐标系

进入加工环境后，第一步建立编程坐标系。一般地，把 IP 点作为坐标原点，X 轴沿鞍槽长度方向(鞍槽宽度较宽的一端指向 X-方向)，Z 轴沿鞍槽深度方向，由底部指向外部。

b) 定义刀具

编制散索鞍的 UG 程序前，先要确定每个鞍槽所用的方肩铣刀的直径，如 $\Phi 315$ 、 $\Phi 250$ 、 $\Phi 160$ 、 $\Phi 80$ 、 $\Phi 50$ 、 $\Phi 32$ 等。

c) 加载索鞍编程模板，进入编程环境

点[创建工序]，然后在[类型]下拉列表框中点[浏览]，然后在目标路径下选择编程模板文件“QL.prt”，进入后在[工序子类型]中点击第一项，下面的[名称]输入框中会出现默认程序名“XT”，把它更改为要设定的程序名，如“QLS_CAO1_D250_XT”，再选择所用的刀具，进入编程环境。

d) 指定部件几何体：点选待加工的槽的槽壁曲面。

e) 驱动方法设置：点击[曲面]——驱动方法的编辑按钮，进入[曲面区域驱动]对话框，再在[指定驱动几何体]中选择待加工槽的槽底曲面。

f) 刀轴设置：在[刀轴]选项里指定刀轴矢量方向，应该是由鞍槽侧壁里指向外。

g) 在[非切削移动]里设置进刀和退刀矢量：在[进刀]选项卡里的[开放区域]的进刀类型选择“线性 - 沿矢量”，并指定矢量方向为有鞍槽外指向鞍槽开口的水平矢量。

h) 输出程序

在[操作]选项卡里点击“生成”，就得到了相应的刀具轨迹，如下图 3 所示。然后，右击程序名，点“后处理”，选择合适的后处理，就输出待加工索槽的加工数控程序。

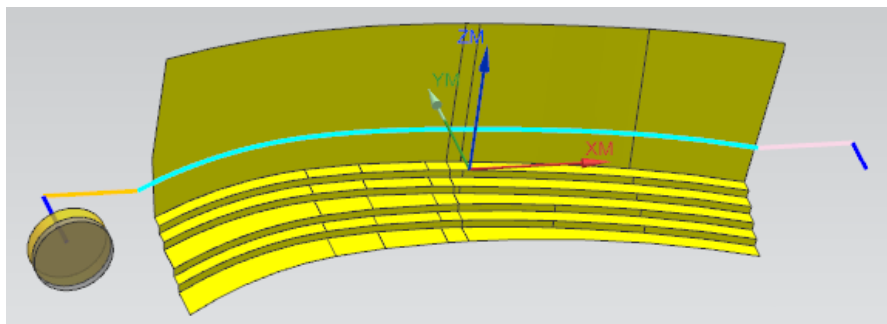


Figure 3. Tool path

图 3. 刀具轨迹

2) 加工方案及设备选择

为了保证索槽与鞍体的位置度要求及便于加工、装夹及校正，采用先加工基准平面，再以基准平面为基准精加工鞍槽的方案[3]。

具体加工方案如下：

a) 加工零件：主索鞍、散索鞍各 1 种，其中主索鞍选主索鞍中跨鞍体。

b) 机床：带大型回转数控联动回转工作台的数控镗铣床 TK6920。

3) 四轴联动加工过程：

① 装夹：将索鞍卧式装夹在机床回转工作台上，对称面呈水平状态并使索槽靠近工作台边缘。

② 检测零件与回转工作台中心的相对位置。

对于主索鞍，确定零件到底面及中分面与工作台中心的距离 L_1 、 L_2 ；对散索鞍，则确定零件 IP 点与工作台中心在两个垂直方向的距离 L_1 、 L_2 。

4) 根据上一步确定的零件与工作台回转中心的相对位置尺寸，以工作台中心的实际位置为编程坐标系原点编制工作台参与同步运动的四轴联动加工程序。

为提高加工效率，每个索槽的程序按往复切削的思路编制两条刀轨，其中控制每刀切削量为第 1 条刀轨与第 2 条刀轨的 Z 向偏移相差一个切削深度 ap 。另外，主轴加工的切削走刀可规划为从一端连续切削至另一端，然后再从另一端进刀切削至这一端的往复切削，从而省去了回程运动，有效提高切削效率。

5) 索槽正式四轴联动切削加工

a) 对刀，将加工坐标系原点设置到旋转工作台的中心处。

b) 调用四轴联动加工程序对各索槽进行切削加工。其中，索槽带白后，对索槽型值进行中间检测，确认无误后再逐步加工到位。主索鞍、散索鞍加工实物情况如下图 4、图 5 所示。



Figure 4. The actual situation of the main cable saddle cable groove processing
图 4. 主索鞍鞍索槽加工实物情况



Figure 5. The actual situation of the processing of the saddle cable groove of the loose cable
图 5. 散索鞍索槽加工实物情况

3. 索槽曲面轮廓精度检测

因索鞍尺寸重量大,无法在三坐标仪器设备进行检测,目前鞍体索槽的方法是采用在数控机床按坐标在线进行检测的方式对索槽轮廓形状进行检查,通过机床打表检测索槽圆弧轮廓度[4]。

具体方法是在索槽曲面加工后使用百分表打表来进行检测,在机床主轴上架百分表,然后以百分表的表针前端为“刀位点”进行“对刀”设置检测坐标系(坐标系原点与加工坐标系原点重合,“对刀”及后续检测采用同一表针压缩量),再在各条索槽曲面上以一定的间距(长度方向,平行于X轴)打表,当表针达到相同压缩量时记录各检测的X坐标位置的实际Z坐标,然后将各Z值与理论值进行比较来判断各点的误差大小[5]。

3.1. 主索鞍检测

主索鞍鞍体按索鞍索槽四轴联动数控加工方案、索鞍索槽四轴联动数控加工程序及检测方案进行了加工和检验。加工及检测验证过程如下:

对鞍体进行装夹校正,加工底面、中分面和索槽基准,随后检测零件与回转工作台中心的相对位置、对刀、设定坐标系,做好联动加工准备,调用数控程序,程序模拟无误后进行试切,带白后打表检查索槽型值点并与理论型值点比对,验证数控程序的正确性。

1) 程序经模拟未发现异常。

2) 运行主索鞍中跨鞍体数控程序粗加工索槽,在索槽仅带白留有大部分余量的情况下,打表检查索槽型值点,并与理论型值对比,差值基本一致。

3) 索槽精加工完成后,采用在线测量检测方案检测索槽到位型值点,如表1所示,检测型值点和理论型值点基本吻合。

Table 1. Theoretical and online measured values of the saddle body cable groove in the middle span of the main cable saddle
表 1. 主索鞍中跨鞍体索槽理论值和在线测量值

Z 型值	槽号	槽 1	槽 2	槽 3	槽 4	槽 5	槽 6	槽 7	槽 8
	X400	理论值	340.68	305.91	271.13	236.34	201.55	166.76	131.95
	测量值	340.6	305.88	271.11	236.29	201.51	166.72	131.9	97.09
X2000	理论值	545.63	511.60	477.57	443.53	409.5	375.47	341.43	307.4
	测量值	545.6	511.56	477.54	443.5	409.45	375.43	341.4	307.38
X3600	理论值	482.94	448.68	414.42	380.16	345.9	311.64	277.37	243.1
	测量值	482.92	448.66	414.39	380.15	345.87	311.62	277.32	243.06
X4400	理论值	350.45	315.71	280.96	246.22	211.46	176.7	141.94	107.16
	测量值	350.41	315.7	280.96	246.25	211.4	176.66	141.9	107.12

3.2. 散索鞍检测

散索鞍程序经模拟未发现异常,加工及检测方法与主索鞍基本相同。索槽精加工完成后,采用在线测量检测方案检测索槽到位型值点,检测型值点和理论型值点基本吻合,如表2所示。

3.3. 检测结果

主索鞍中跨鞍体、散索鞍鞍体索槽采用数控四轴联动加工程序加工后,采用在线测量系统进行测量,

实际测量结果均在合格范围内, 误差均远小于 0.3 mm/1000 要求, 精度较以往提高 30%以上, 理论与在线测量值对比见表 1, 散索鞍索槽理论值与在线测量值对比见表 2。

Table 2. Theoretical and online measured values of the saddle groove of the loose cable saddle body
表 2. 散索鞍鞍体鞍槽理论值和在线测量值

Z 型值	槽号	槽 1	槽 2	槽 3	槽 4	槽 5	槽 6	槽 7	槽 8
X-2000	理论值	-859.02	-895.95	-932.95	-970.04	-1007.22	-1044.48	-1081.84	-1119.29
	测量值	-859.08	-895.96	-932.97	-970.06	-1007.2	-1044.46	-1081.83	-1119.32
X-1200	理论值	-641.58	-676.04	-710.51	-744.98	-779.46	-813.95	-848.44	-882.94
	测量值	-641.6	-676.09	-710.48	-744.96	-779.5	-813.92	-848.43	-882.96
X0	理论值	-550.37	-584.37	-618.37	-652.37	-686.37	-720.37	-754.37	-788.37
	测量值	-550.3	-584.32	-618.39	-652.42	-686.36	-720.34	-754.31	-788.36
X1200	理论值	-616.89	-651.11	-685.34	-719.56	-753.79	-788.02	-822.25	-856.48
	测量值	-616.83	-651.15	-685.36	-719.59	-753.82	-788.08	-822.24	-856.47
X2000	理论值	-740.79	-775.43	-810.08	-844.74	-879.40	-914.07	-948.73	-983.41
	测量值	-740.75	-775.46	-810.05	-844.78	-879.45	-914.05	-948.78	-983.49

4. 结论

通过主索鞍鞍体、散索鞍鞍体索槽的加工、检测数据分析可知, 索鞍索槽四轴联动数控加工技术在特大型索鞍中可以进行实际应用, 通过采用该新技术索鞍加工效率提高了 38%, 缩短了加工时间 27%, 加工精度提高 30%, 该加工技术可应用于其它桥梁索鞍鞍体加工, 并可推广应用于其它大型曲面零件的加工及检测。

参考文献

- [1] 钱冬生, 陈仁福. 大跨度悬索桥的设计与施工[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2015.
- [2] 王德跃. 基于 UG 和 VERICUT 的整体叶轮数控编程及仿真加工[J]. 航天制造技术, 2011(1): 70-71.
- [3] 董小亮, 叶觉明, 李汉梅. 悬索桥索鞍设计制作主要问题及对策[J]. 钢结构, 2015, 30(1): 59-64.
- [4] 张金晶. 数控机床在线测量技术与误差分析[J]. 装备制造技术, 2009(9): 82-83.
- [5] 刘智. 数控机床在线测量技术研究[J]. 湖北农机化, 2020(3): 165.