

DOI:10.16356/j.1005-2615.2022.S.011

## 运载火箭舱段螺栓力矩施加与管理技术

梁莹, 彭恩鸿, 王琳璇, 张波, 张柳锋, 徐爱杰

(上海航天精密机械研究所, 上海 201600)

**摘要:**以运载火箭舱段为研究对象,开发了螺纹紧固件力矩施加监控系统,制定了螺栓点位及力矩程序编号规则。通过工艺试验获得了最优的拧紧策略和工艺参数,验证了该系统能够进行人机交互编程,实现力矩施加过程的自动化,实时获得力矩大小及点位数据信息。试验结果表明,采用该系统力矩合格率可达100%,为航天型号产品大尺寸产品稠密点位螺栓力矩的可靠管理提供可靠保证。

**关键词:**力矩;人机交互;工艺验证;数据管理

**中图分类号:**TM2 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2022)S-0068-06

## Application and Management for Bolt Torques in Launch Vehicle Cabins

LIANG Ying, PENG Enhong, WANG Linxuan, ZHANG Bo, ZHANG Liufeng, XU Aijie

(Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201600, China)

**Abstract:**A monitoring system for the torque application is developed for launch vehicle cabins, and the code rules of the bolt point and the torque program are formulated. The optimal tightening strategy and process parameters are obtained by the process test. The results show that the system can carry out human-computer interactive programming, and realize the automation of torque application process with obtaining the torque size and point data information. The experiment result shows the qualified rate is 100%. The proposed approach realizes the reliable management of dense point bolt torques for large-size aerospace products.

**Key words:** torque; human-computer interaction; process verification; data management

螺纹连接是利用具有螺纹的零件构成的可拆联接<sup>[1-3]</sup>,起到固定、传动、定位、密封等作用,广泛应用于航空航天、汽车装配、金属加工业及其他机械制造业中<sup>[4-6]</sup>。在汽车装配生产线中,螺纹连接是非常重要的连接方式,使用的螺栓、螺钉及螺母等连接件也是标准化程度最高的装配零件<sup>[7]</sup>。

目前针对螺纹自动拧紧装备的研究大部分集中在汽车装配行业中,在航空、航天领域的研究及应用相对较少<sup>[8-10]</sup>。随着螺纹拧紧技术、自动控制技术、人工智能技术的发展,为航空航天领域中实现螺纹连接拧紧装备高度自动化、高可靠性提供了可能。

## 1 舱段结构特点

### 1.1 舱段结构

运载火箭舱段主要由端框、中间框、桁条、蒙皮、接头等通过螺栓、铆钉等连接成为部段(图1)。作为箭体结构的重要承力部件,桁条、接头与端框、中间框、蒙皮的连接通常采用螺纹紧固件实现,在构成气动外形的同时将轴向载荷扩散至全舱段。目前国内主流火箭的直径为 $\varnothing 3\ 350\text{ mm}$ ,据统计,平均每个舱段螺栓数量达2 000~5 000个,覆盖M4~M14等各个螺纹规格,材料包括30CrMnSiA、1Cr18Ni9Ti、45钢、Ti-6Al-4V等,常用规格螺

**基金项目:**上海航天技术研究院可靠性项目。

**收稿日期:**2022-04-28;**修订日期:**2022-06-30

**通信作者:**梁莹,男,硕士,高级工程师,E-mail:402491719@qq.com。

**引用格式:**梁莹,彭恩鸿,王琳璇,等. 运载火箭舱段螺栓力矩施加与管理技术[J]. 南京航空航天大学学报,2022,54(S):68-73. LIANG Ying, PENG Enhong, WANG Linxuan, et al. Application and management for bolt torques in launch vehicle cabins[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(S):68-73.

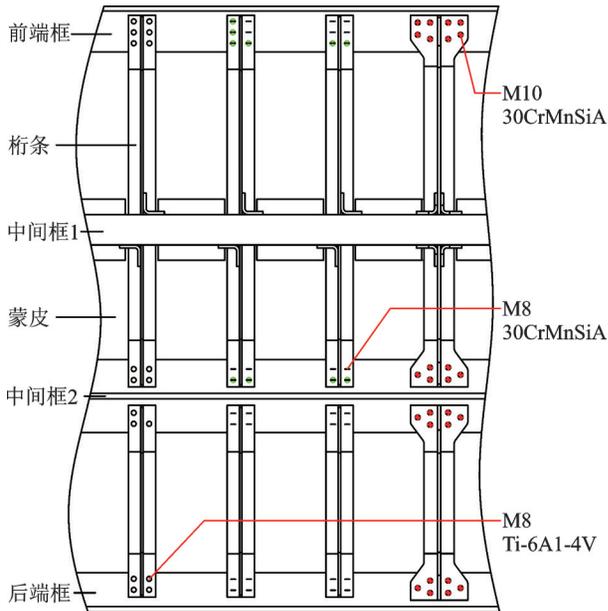


图1 运载火箭舱段典型结构

Fig.1 Typical structure of launch vehicle cabin

栓力矩值见表1。

### 1.2 力矩施加现状

螺栓连接的可靠性对产品性能有着直接影响,控制箭体螺栓力矩,是保证螺栓连接可靠性的主要手段。在航天产品装配制造过程中,普遍采用的人工拧紧方式,即由操作工利用机械式力矩扳手、数显式力矩扳手等工具进行手动装配,采用表格化人工方式进行记录,存在以下问题:

(1) 数据波动较大。整个拧紧过程完全依靠人工利用手动工具进行,对人员的操作技能要求高,如套筒与螺栓的同心度,施加过程定力扳手是否平稳转动等,导致数据一致性差,甚至超出设计要求。

(2) 时效性差。通常情况下,力矩施加过程一人操作实施,无法做到边施加力矩,边记录数据;如需实时记录,需额外配置1人专门进行记录工作,导致人员利用率低。

表1 螺栓拧紧力矩要求值

Table 1 Design value of bolt torque

N·m

规格材料	M5	M6	M8	M10	M12	M14
30CrMnSiA	3.9±0.4	6.7±0.7	20±2	30±3	30±3	30±3
ML25	3±0.2	3.7±0.4	9±0.9			
45钢	3±0.2	3.7±0.4	9±0.9			
1Cr18Ni9Ti	3±0.2	3.7±0.4	9±0.9			
Ti-6Al-4V			12.8±1.3	25.1±2.5	48.2±4.8	76.1±7.6

(3) 数据无法追溯。螺栓实际拧紧的力矩值主要通过传统的纸质表格进行记录,质量控制手段落后,且记录值即力矩扳手的预设定值,其记录值并不能反映螺栓拧紧力矩值的真实值;同时纸质记录仅有单纯的力矩值,无法反映螺栓拧紧过程,过程数据不可保存,出现质量问题追溯困难。

(4) 数据管理不规范。记录采用按螺纹规格成组记录,缺少一一对应性,无法确认单个螺栓施加点位的具体大小值;当力矩施加完毕后,不具备报警提示功能,无法确定施加是否有遗漏,不符合航天型号产品数据包建设的基本要求。

## 2 技术方案

针对运载火箭舱段螺纹紧固件数据记录不及时性、不全面性、追溯性差等问题,通过舱段螺纹紧固件的排列方法、力矩施加及过程控制研究,开发力矩数据管理系统,开展工艺试验分析验证,实现全舱段螺纹紧固件力矩的全面、有效、规范管理。

技术方案如图2所示,首先对产品所包含的螺栓依据工艺规范进行编号,然后通过控制器设定好力矩,在具有质量控制系统的终端上编制产品的力

矩施加程序,并通过质量控制系统调用对应程序对电动扳手进行实时控制,以此实现产品螺栓的自动拧紧,通过指示灯可实时监测力矩施加是否合格,并最终生成力矩施加数据记录,便于保存和追溯。

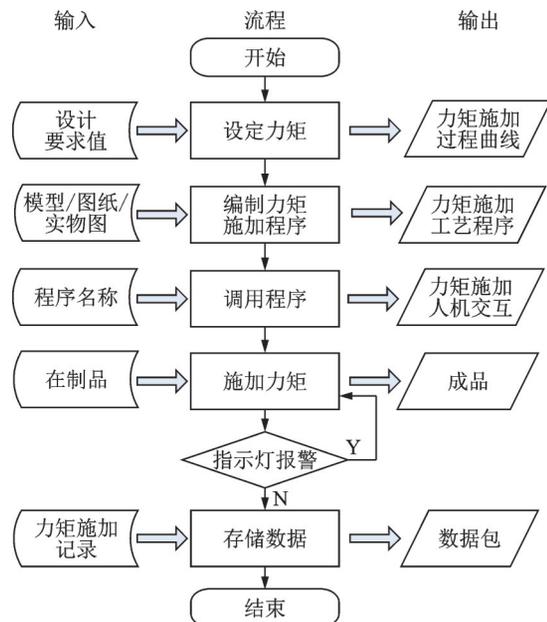


图2 技术方案流程图

Fig.2 Flow chart of technical scheme

### 2.1 螺栓编号及力矩施加规则

通过统计梳理不同铆接舱段的螺栓分布情况,对螺栓的规格大小、材料类型、施加方向、桁条的计数方式、舱段各个典型部位的螺栓计数方式进行规定,制定了适用各类铆接舱段的《运载火箭铆接舱段螺纹紧固件力矩施工工艺规则》,用于对舱段上的螺栓进行编号。图3示意了桁条与端框的连接螺栓的编号规则。

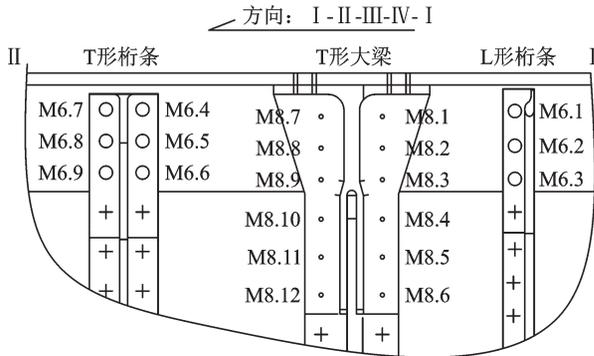


图3 桁条与端框连接螺栓编号示例  
Fig.3 Example of bolt number

### 2.2 力矩程序编号规则

力矩程序是程序调用时的识别码,共计9位数。从左到右,前两位为型号代号,第3、4位为舱段代号,第5位为程序代号(1、2、3…),第6~9为运载火箭发次代号,如图4所示。如CZ-5 Y7的火箭代号为Y007,调用箱间段的1号程序时则输入5Z030Y007,则可以调用相应的程序。生成的拧紧数据文件名称与调用程序时输入的名称一致。

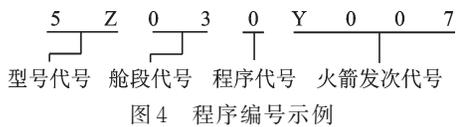


图4 程序编号示例  
Fig.4 Example of program number

### 2.3 硬件系统组成

螺纹紧固件力矩施加监控硬件系统由信息终端、控制器、力矩扳手、安灯装置、质量控制系统等部分组成(图5)。信息终端用于人机交互编程,可采用三维模型、二维图纸、实物照片等多种形式的图形化编程模式,通过预先制定的产品螺栓点位编号规则,实现程序与实物点位的一一对应。力矩程序通过介质导入至质量控制系统,在控制器的作用下实现调用和力矩施加,施加后的数据实时存贮在质量控制系统里,形成产品拧紧力矩数据包。当施加过程中发生力矩大小不合格、重复施加等现象时,安灯装置报警,提醒操作人员进行确认和处理。

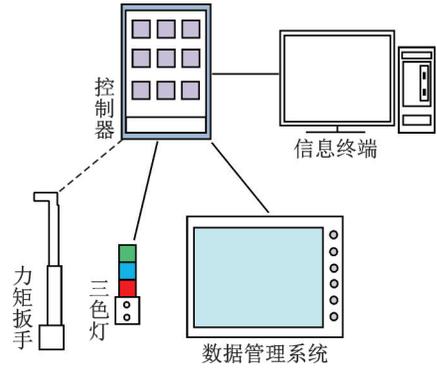


图5 力矩施加及管理系统  
Fig.5 Torque application and management system

## 3 工艺验证

### 3.1 试验设备

工艺试验所用设备如图6所示,设备主要由电动力矩扳手(三级精度)、工控机(质量控制系统)、控制器、报警器4部分组成。为方便操作人员观察指示灯及力矩施加的点位信息,整个设备放置在舱段中间,舱段正航向布置。

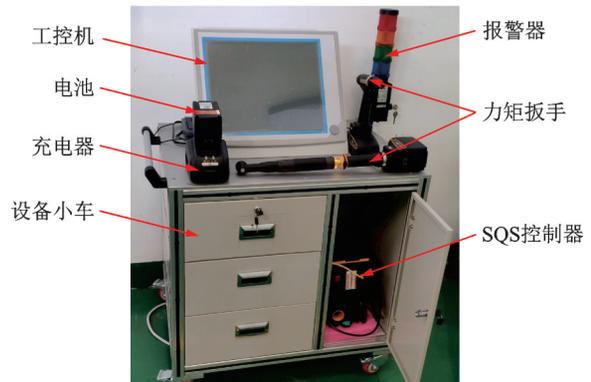


图6 试验设备  
Fig.6 Test equipment

### 3.2 交互式编程

依据螺栓编号及程序编号规则,对舱段螺栓点位及力矩进行人机交互式编程,实时显示程序编制时点位信息。在程序编制时,灰色点位代表未施加力矩点;在力矩施加时,蓝色代表当前正在施加力矩的点,绿色代表已施加力矩且合格的点位,红色代表施加力矩后不合格的点位。程序编制界面如图7所示。

### 3.3 拧紧策略

为保证力矩施加过程的准确与安全,根据力矩值的大小,对拧紧过程进行了4个阶段的划分(图8):

- (1)开始阶段,使螺纹正确旋入;
- (2)旋入阶段,空旋并使螺栓贴合连接面;
- (3)拧紧阶段,使螺栓拧紧至设定力矩大小;

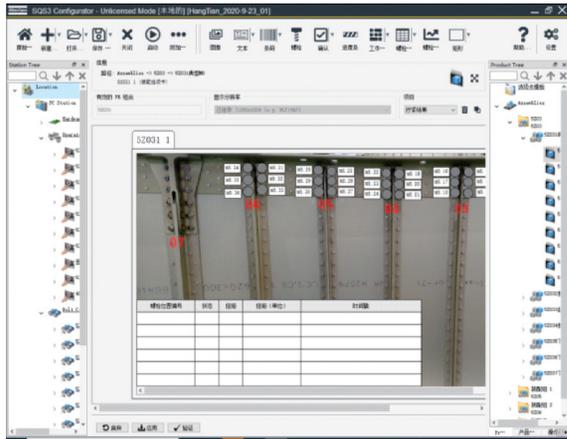


图7 力矩程序编制时运行界面

Fig.7 Operation interface of torque programming

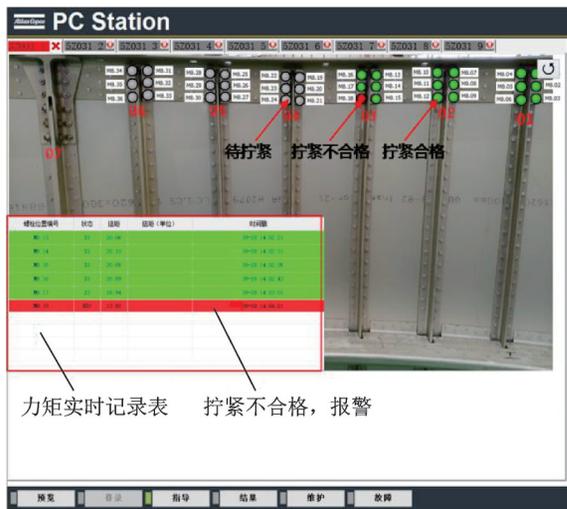


图8 力矩施加时运行界面

Fig.8 Operation interface of torque applying

(4)终拧阶段,转速和力矩都逐渐降至0,并储存拧紧数据。

拧紧策略有快步拧紧、两步拧紧和三步拧紧,一般目标力矩越大,所选用的拧紧策略对应的拧紧阶段步数越多。为了解拧紧策略对力矩施加结果的影响,自动拧紧试验之前,项目组进行了预实验,用于对所用的力矩使用不同的拧紧策略,试验结果如表2所示。

由表2可知,当力矩不大于30 N·m快步拧紧与两步、三步拧紧差别不大,当力矩值在30~42 N·m之间时,两步拧紧与三步拧紧差别不大,而两步拧紧结果优于快步拧紧。因此,当目标力矩小于30 N·m时,拧紧策略均使用快步拧紧,同时也能保证效率,当力矩在30~42 N·m之间时,采用两步拧紧结果更为精确。

### 3.4 数据管理

在试验前,对所用电动扳手精度进行了检测,精度满足工艺要求(表3)。基于CZ-5助推模块箱

表2 不同拧紧策略拧紧力矩试验结果  
Table 2 Tightening torque of different strategies

规格	材料	目标值	快步拧紧	两步拧紧	三步拧紧	N·m
M5	30CrMn-SiA	3.9	3.93	3.91	3.92	3.92
			3.92	3.93	3.92	3.91
			3.93	3.94	3.93	3.92
			3.94	3.93	3.93	3.92
			6.77	6.75	6.76	6.76
M6	30CrMn-SiA	6.7	6.74	6.73	6.73	6.73
			6.73	6.73	6.72	6.72
			6.75	6.76	6.75	6.75
			6.71	6.72	6.71	6.71
			12.97	12.94	12.94	12.94
M8	TC4/Ti-6Al-4V	12.8	12.86	12.88	12.89	12.89
			12.90	12.91	12.90	12.90
			12.94	12.90	12.91	12.91
			12.88	12.89	12.88	12.88
			20.12	20.10	20.09	20.09
M8	30CrMn-SiA	20	20.10	20.12	20.11	20.11
			20.17	20.13	20.16	20.16
			20.14	20.15	20.13	20.13
			20.13	20.10	20.13	20.13
			30.26	30.21	30.22	30.22
M10	30CrMn-SiA	30	30.27	30.26	30.23	30.23
			30.21	30.23	30.20	30.20
			30.18	30.11	30.10	30.10
			30.21	30.18	30.17	30.17
			43.49	42.34	42.29	42.29
M12	30CrMn-SiA	42	43.46	42.24	42.21	42.21
			43.56	42.43	42.18	42.18
			43.32	42.39	42.17	42.17
			43.47	42.21	42.20	42.20

表3 拧紧工艺参数

Table 3 Tightening process parameters

拧紧阶段	拧紧参数	M6螺栓	M8螺栓	备注
Stage 1 开始阶段	旋转方向	顺时针	顺时针	
	软启动	开启	开启	有预紧力时开启
	旋转速度/(r·min <sup>-1</sup> )	80	80	软启动开启时设置
	最小力矩/(N·m)	0	0	软启动开启时设置
Stage 2 旋入阶段	最大力矩/(N·m)	12	50	软启动开启时设置
	旋入速度/(r·min <sup>-1</sup> )	300	160	
Stage 3 拧紧阶段	旋入完成力矩/(N·m)	2	5	
	拧紧策略	快步	快步	
	第一力矩/(N·m)	3.5	10	
	第一速度/(r·min <sup>-1</sup> )	80	50	
	目标速度/(r·min <sup>-1</sup> )	10	20	
Stage 4 终拧阶段	目标力矩/(N·m)	6.7	20	
	最小力矩/(N·m)	6	18	
	最大力矩/(N·m)	7.4	22	
反松阶段	软停止	开启	开启	减少惯性冲击
反松阶段	旋出力矩	自动	自动	根据实际情况变化
	旋出速度/(r·min <sup>-1</sup> )	100	100	

间段舱段试验,共拧紧了710个M8螺栓,390个M6螺栓,耗时70 min左右,产生8份结果记录文件,记录了每一个螺栓的拧紧力矩,记录结果如表4所示(仅列出部分)。可见,采用该系统,实现了力矩大小、螺栓点位的一一对应,数据完整,具有较好的可追溯性。

### 3.5 质量与效率分析

表5列举了人工拧紧与自动拧紧的工艺对比。在质量方面,自动拧紧系统有质量控制功能,力矩施加合格率可达100%;在效率方面,自动拧紧比人工作业提升33.3%,仅需一人便可完成力矩施加和数据管理工作。

表4 力矩施加数据报表

Table 4 Data report of torque application

螺栓组名称	螺栓名称	状态	时间戳	类型	目标力矩/(N·m)	最小力矩/(N·m)	最大力矩/(N·m)	实际施加力矩/(N·m)	控制器名称
M8	M8.01	OK	2021-09-28T13:55:27.718	BoltData	20	18	22	20.12	BigETV
M8	M8.02	OK	2021-09-28T13:55:33.730	BoltData	20	18	22	20.10	BigETV
M8	M8.03	OK	2021-09-28T13:55:40.792	BoltData	20	18	22	20.17	BigETV
M8	M8.04	OK	2021-09-28T14:01:38.018	BoltData	20	18	22	20.05	BigETV
M8	M8.05	OK	2021-09-28T14:01:43.020	BoltData	20	18	22	20.14	BigETV
M8	M8.06	OK	2021-09-28T14:01:48.516	BoltData	20	18	22	20.05	BigETV
M8	M8.07	OK	2021-09-28T14:01:54.271	BoltData	20	18	22	20.10	BigETV
M8	M8.08	OK	2021-09-28T14:01:59.811	BoltData	20	18	22	20.11	BigETV
M8	M8.09	OK	2021-09-28T14:02:05.133	BoltData	20	18	22	20.13	BigETV
M8	M8.10	OK	2021-09-28T14:02:09.106	BoltData	20	18	22	20.10	BigETV
M8	M8.11	OK	2021-09-28T14:02:13.994	BoltData	20	18	22	20.21	BigETV
M8	M8.12	OK	2021-09-28T14:02:17.879	BoltData	20	18	22	20.11	BigETV
M8	M8.13	OK	2021-09-28T14:02:23.371	BoltData	20	18	22	20.06	BigETV
M8	M8.14	OK	2021-09-28T14:02:32.954	BoltData	20	18	22	20.10	BigETV
M8	M8.15	OK	2021-09-28T14:02:37.384	BoltData	20	18	22	20.08	BigETV
M8	M8.16	OK	2021-09-28T14:02:45.254	BoltData	20	18	22	20.09	BigETV
M8	M8.17	OK	2021-09-28T14:03:03.191	BoltData	20	18	22	20.04	BigETV

表5 人工拧紧与自动拧紧工艺对比

Table 5 Comparison of manual and automatic tightening

序号	项目	人工拧紧	自动拧紧	备注
1	单个舱段用时	100 min	70 min	提升33.3%
2	合格率	85%(随机抽样)	100%	提升15%
3	力矩施加精度	受操作水平影响	≤±3%	精度更高,更稳定
4	检验数量	7(随机抽检)	全部检验并记录	100%全检
5	记录方式	事后记录	实时记录	无遗漏
6	可追溯性	不可追溯	可追溯	
7	监控方式	到达目标值后自动卸力或亮灯提醒	指示灯+报警器+记录	全过程监控

## 4 结 论

针对运载火箭舱段稠密点位力矩施加存在的工程问题,本文开展了人机交互式编程的自动拧紧工艺研究,搭建了力矩施加系统平台,以典型的舱段开展了工艺试验验证,获得了不同规格螺栓的拧紧策略、拧紧工艺参数,实现了部套级产品螺栓力矩的全面监控和管理;力矩施加合格率达到100%,极大地提升了连接的可靠性。

### 参考文献:

- [1] 张伟方,马兴海.螺栓自动拧紧技术在运载火箭箭体制造中的应用与研究[J].电动工具,2018(4):8-13.  
ZHANG Weifang, MA Xinghai. Research on the application of bolts automatic tightening technology of launch vehicle structure[J]. Electric Tool, 2018(4):8-13.
- [2] 张晓斌,于建政.某飞行器用紧固件拧紧力矩与预紧力关系研究[J].航空制造技术,2018(8):81-84.

- ZHANG Xiaobin, YU Jianzheng. Research on the relationship between the install moment and bolt stress in the aircraft part jointment[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018(8): 81-84.
- [3] 傅莹. 简谈零部件装配扭矩质量过程控制方法[J]. 中国质量, 2011(1): 40-43.
- FU Ying. Talk about auto parts assembly torque quality process control methods[J]. China Quality, 2011(1): 40-43.
- [4] 李英亮. 紧固件概论[M]. 北京:国防工业出版社, 2014: 280-285.
- LI Yingliang. Fasteners basics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014: 280-285.
- [5] 皮之送. 螺纹联接可靠性设计及其拧紧工艺研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- PI Zhisong. Reliability design of thread connection and its tightening process research[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.
- [6] 张雷. 力矩拧紧机的应用及拧紧方式、参数的选择[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- ZHANG Lei. Application, tightening mode and parameter selection of torque tightening machine[D]. Changchun: Jilin University, 2011.
- [7] 姜立华. 发动机螺栓连接及拧紧工艺应用技术[D]. 长春: 吉林大学, 2004.
- JIANG Lihua. Bolt joint for engine & apply technology for screw tool[D]. Changchun: Jilin University, 2004.
- [8] 陆健亮. 螺纹拧紧力矩控制技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- LU Jianliang. Research on screw thread tightening torque control technology[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [9] 曹增强, 林永福. 螺栓拧紧力矩系数的影响因素研究[J]. 航空工艺技术, 1994(4): 19-20.
- CAO Zengqiang, LIN Yongfu. Influence factors on the bolt tightening torque coefficient[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 1994(4): 19-20.
- [10] 李张银. 新型螺栓紧固件试验系统的设计研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
- LI Zhangyin. The study on a new test system[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2010.

(编辑:夏道家)