# 基于接触式测量的返回式卫星结构 轮廓度检测方法研究

樊晓霞 仉恒毅 张玉良 赖小明 (北京卫星制造厂,北京100094)



摘要:论述了一种基于接触式测量的返回式卫星结构的轮廓度检测方法,针对此方法开展了检测误差理论分析,提出了检测误差补偿方式,并进行了试验验证,提高了返回式卫星 结构轮廓度检测的准确性。

关键词: 球锥相贯形舱体; 轮廓度检测; 误差补偿

# A Profile Detection Method of Ball-cone Intersecting Shell

Fan Xiaoxia Zhang Hengyi Zhang Yuliang Lai Xiaoming (Beijing Spacecrafts, Beijing 100094)

**Abstract:** This paper discusses a profile detection method of the ball-cone intersecting shell. A profile detection method for error compensation is put forward, and the precision of the profile detection is improved.

Key words: ball-cone intersecting shell; profile detection; error compensation

#### 1 引言

返回式卫星金属壳体结构大多为薄壁密封舱体, 主要由球面、锥面或柱面组成,通常称其为球锥相贯 形舱体。在舱体金属结构上分布有法兰舱体,金属结 构外侧为防热结构,金属结构的外轮廓直接影响防热 结构与金属结构的间隙大小以及防热结构的精度、重 量,因此检测数据的准确性至关重要。

#### 2 轮廓度检测位置定义



图 1 某型号侧壁金属壳体结构简图

以某型号侧壁金属壳体结构为研究对象(图1), 研究其轮廓度的检测方法及误差补偿方式。图1中某 型号侧壁金属壳体结构,属于典型蒙皮加筋的薄壁密 封舱体,主要由前后端框、蒙皮、法兰、隔框、桁条 以及盒形件等组成,其球段蒙皮半径为*SR*533.8mm, 轮廓度要求较高为-3~+1mm。

某型号侧壁金属壳体结构轮廓度检测位置定义 如下:

a. 高度:以前端框上表面为基准,自上而下10mm 位置、50mm 位置、100mm 位置、……、900mm 位 置,共计19 圈;

#### 3 轮廓度测量方法简介

轮廓测量法是通过测量获得工件表面采集点的 实际坐标值,与理论坐标值对比,分析得到工件表面 面形误差的测量方法。轮廓度测量可以分为接触式测 量和非接触式测量两类。接触式测量通过测量仪器探 头与被测工件表面相接触,通过采集测量仪器探头在 工件坐标系中的实际位置,并与理论位置对比,得到 被测工件表面的轮廓形状误差。非接触式测量使用光 电、电磁等测量设备,在不接触被测工件表面的情况 下,得到工件表面采集点坐标参数信息的测量方法。

接触式测量由于仪器探头与工件表面存在直接 接触,导致测量力的存在,增加划伤工件表面的危险, 但测量数据相对较可靠,环境适应性强,常用的有机 床打表法和三坐标检测法。非接触式测量法避免了接 触式测量法由于测量力的存在而产生的问题,但工件 表面粗糙度以及检测环境对检测数据的准确度影响 较大,常用的有三维扫描法,此方法由于需对被测件 进行多角度扫描,因此存在基准复合误差。因此,本 文选用接触式测量法<sup>[1~6]</sup>。

#### 4 接触式轮廓度检测误差分析

利用接触式测量法进行轮廓度测量时,测量误差 主要由以下几方面构成:检测系统误差、测量过程误 差以及测量探头具有一定尺寸所引起的误差。

## 4.1 检测系统误差

目前返回式卫星金属壳体结构大多采用六轴五 联动镗铣加工中心采集轮廓度采集点的数据。

检测设备采用 FPT 六轴五联动/镗铣机床,精度 可达 0.006mm/m。某型号侧壁金属壳体结构最大外形 尺寸约为  $\phi$  1300mm,因此机床自身精度引起的轮廓 度测量误差约为:  $\delta_{\text{tt}} < \phi$  1.3m×0.006mm/m=0.008mm。 侧壁金属壳体结构组合加工后的前后端框同轴度、平 行度均小于 0.1mm,其同轴度、平行度对轮廓度测量 引起的误差相对于轮廓度要求-3~+1mm 极小,可以 忽略不计。

所以侧壁金属壳体结构的轮廓度测量总误差  $\delta_{n}$ <0.108mm,与设计要求的轮廓度-3~+1mm 相比,机 床的检测系统误差均可忽略不计<sup>[7]</sup>。

# 4.2 测量过程误差

在测量过程中,需将舱体的坐标系与机床坐标系 进行找正,找正的位移精度≤0.02mm,角度偏差一般 ≤20arc/s,测量过程中位移精度与角度偏差造成的误 差相对于轮廓度-3~+1mm而言,可忽略不计<sup>[7]</sup>。

# 4.3 测量探头具有一定尺寸

# 4.3.1 球段轮廓度测量

在百分表倾斜测量的过程中会导致水平与垂直

两个方向的测量误差,如图 2a 所示,误差计算过程 较复杂。而在水平测量的过程中只对水平方向测量产 生误差,如图 2b 所示,误差计算过程较简单。因此 后续只针对水平测量方式进行理论分析及试验验证。



对轮廓度水平测量误差补偿量进行公式推导:

$$\delta = \sqrt{\left(SR + r\right)^2 - h^2} - R - r \tag{1}$$

其中: $\delta$ ——轮廓度测量误差补偿量;SR——球体半径;R——被测量位置处界面圆半径;r——百分表球头半径。将 $h=\sqrt{SR^2-R^2}$ 代入式(1),得出:

$$\delta = \sqrt{R^2 + 2 \times SR \times r + r^2} - R - r \tag{2}$$

因此,式(2)可以作为球形舱体的轮廓度误差 补偿量的计算公式,最终轮廓度 *b=c−δ*,其中,*c*—— 修正前轮廓度值。

#### 4.3.2 锥段轮廓度测量

百分表的测量方式对锥段舱体轮廓度测量误差 无影响,锥段舱体的轮廓度测量误差只与锥角有关, 如图 3 所示。



图 3 锥段轮廓度测量补偿计算简图

对锥段舱体的轮廓度测量误差进行计算:

 $\delta = r - r \times \cos \alpha \tag{3}$ 

因此,式(3)可以作为锥段舱体的轮廓度误差 补偿量的计算公式,最终轮廓度*b*=*c*+δ,其中 *c* ——修正前轮廓度值。

通过分析某型号侧壁金属壳体结构的接触式轮 廓度测量误差的影响因素,确定了测头半径引起的误 差为主要影响因素。因此,后续只针对测头半径引起 的误差进行分析及试验验证。

## 5 接触式轮廓度检测误差补偿试验验证

#### 5.1 轮廓度测量误差理论分析

在百分表测量的过程中,由于被测舱体为球形舱体(*SR*533.8mm),且测头具有一定的半径,造成理论测量位置与实际测量位置间存在误差。

针对水平测量方式,根据表头直径对轮廓度水平 测量过程进行理论模拟,如图4所示。图4中前端框 上表面有 3mm 的组合加工余量。图中给出了理论高 度对应的相应直径以及相应高度对应的误差补偿量。 其中,虚线小球为理论高度和直径下对应的理想测量 位置,实线小球为理论高度和直径下对应的实际测量 位置。可以看出,在理想位置测量下表头已经切入舱 体内部,实际测量位置由于表头与舱体的干涉,使表 头实际测量点并未能与舱体上理论测量点接触,导致



此处轮廓度测量显示值增大1.74mm。

图 4 百分表水平测量球段轮廓度理论模拟

根据图 4 中理论模拟过程,可知球段对应高度测量的误差补偿量,并根据式(2)计算各高度补偿量, 结果见表 1 所示。

锥段的锥角较小,为 6.6°,根据式(3)对计算 锥段的误差量为 0.01mm,可忽略不计,因此只需对 舱体球段误差补偿。

表1 球段轮廓度测量误差补偿值

高度	0	10	50	100	150	200	250	300	350	390
理论直径	283.95	299.3	351.2	401.3	440.2	470.6	494.1	511.7	524	530.2
误差补偿量	1.74	1.55	1.03	0.66	0.42	0.27	0.16	0.09	0.04	0.01

#### 5.2 轮廓度测量误差补偿验证一

为验证轮廓度测量误差理论分析,检测侧壁球段 舱体的轮廓度。检测流程为:舱体找正→测量基准校 准→前端框理论上端面处轮廓度测量→其余高度处 轮廓度测量→轮廓度数据总结。

测量步骤及具体内容如下:

a. 舱体找正:以前端框内孔找正,并使前端框四 个象限处平面度、同轴度一致。

b. 测量基准校准: 将百分表调至水平测量位置, 以前端框内孔半径 R257mm 为基准,压百分表至 5mm,校准前端框上端面 Z 值为+5mm(前端框上表 面余量 3mm,表头半径 2mm),校准过程如图 5 所示。





mm

a 测量基准直径校准 b 测量基准高度校准 图 5 校准基准过程

c. 前端框理论上端面处轮廓度测量: 前端框理论 上端面位置 Z=0mm,理论半径为 R283.95mm,对其 进行轮廓度检测,检测数据见表 2。

表 2 前端框理论上端面位置 Z=0mm,理论半径为 R283.95mm 处百分表读数

角度	0 °	15 °	30 °	45 °	60 °	75 °	90 °	105 °	120 °	135 °	150 °	165 °	平均值
读数	6.7	7.15	7.3	7.5	7.45	7.1	6.6	6.35	6.8	5.8	6.25	6.2	
角度	180 °	195 °	210 °	225 °	240 °	255 °	270 °	285 °	300 °	315 °	330 °	345 °	6.76
读数	6.85	7.25	7.35	7.4	7.4	7.25	6.9	6.4	4.2	6.6	6.8	6.7	

前端框理论上端面位置 Z=0mm、理论半径为 R283.95mm 处轮廓度平均值为 6.76-5=1.76mm。由于

前端框理论上端面位置 Z=0mm 为机械加工位置且距离基准校准点最近,因此此处的轮廓度平均值理论应

mm

# 2015年8月第4期

mm

为 0mm。对 Z=0mm 处轮廓度进行误差补偿,补偿后轮廓度平均值为 1.76-1.74=0.02mm,与理论值 0mm 接近,可以确定轮廓度测量误差补偿过程的正确性。

d. 其余高度处轮廓度测量

根据表1中轮廓度测量误差补偿值修正球段各高 度轮廓度,如表3所示。

衣 ) 侧壁环段扼仰轮廓反修正石裂据	:数据表	正后	修	郭度	轮	舱体	求段	壁球	侧	. 3	表
--------------------	------	----	---	----	---	----	----	----	---	-----	---

							/= x ( ) = / (			
高度	0	10	50	100	150	200	250	300	350	390
理论半径	283.95	299.3	351.2	401.3	440.2	470.6	494.1	511.7	524	530.2
0 °	-0.04	0.05	-1.03	/	/	/	/	-0.24	-0.94	-1.01
15 °	0.41	0.7	-0.73	-1.06	-0.42	-0.37	-1.76	-2.34	-1.14	-1.01
30 °	0.56	1.05	0.67	0.44	0.03	-0.82	-2.06	-1.79	-1.44	-1.01
45 °	0.76	1.15	0.57	0.74	0.58	0.48	0.34	0.11	-0.39	-0.61
60 °	0.71	1.25	1.07	-2.46	-1.87	-0.77	0.04	-0.39	-0.64	-0.66
75 °	0.36	0.95	1.42	/	-2.32		-2.06	-1.39	-1.14	-0.76
90 °	-0.14	0.35	-0.43	-1.36	0.63	-2.27	-2.16	-2.09	-0.94	-0.61
105 °	-0.39	-0.1	-0.03	0.74	/	-0.57	/	-0.34	-0.74	0.19
120 °	0.06	-0.8	/	/	/	/	/	/	0.46	0.49
135 °	-0.94	-1.55	/	/	/	/	/	/	/	0.59
150 °	-0.49	-1.25	/	/	/	/	/	/	/	0.64
165 °	-0.54	-0.45	/	/	/	/	/	/	0.76	0.49
180 °	0.11	0.6	0.62	0.14	0.58	1.23	1.74	1.71	0.96	0.29
195 °	0.51	0.8	0.47	1.04	0.18	/	/	1.16	0.56	0.19
210 °	0.61	1.05	0.27	0.59	0.68	0.63	0.64	0.41	0.16	-0.01
225 °	0.66	1.15	0.17	0.34	0.38	0.38	0.34	0.21	-0.04	-0.11
240 °	0.66	0.85	0.02	0.34	0.33	0.23	0.19	0.06	-0.19	-0.26
255 °	0.51	1.2	0.42	0.59	0.33	0.23	0.14	-0.04	-0.34	-0.41
270 °	0.16	0.5	0.72	-1.41	-1.62	-0.92	0.39	-0.29	-0.64	-0.61
285 °	-0.34	-0.35	-2.23	/	/	/	-1.51	-1.64	-1.34	-0.91
300 °	-2.54	-0.45	-1.58	-2.56	-2.92	-2.67	-2.16	-1.19	-0.84	-0.91
315 °	-0.14	0.15	-0.23	-0.36	-1.82	-1.37	-1.16	-1.19	-0.34	-0.21
330 °	0.06	0.35	0.07	-0.16	-0.27	-0.47	-0.56	-0.64	-0.89	-1.01
345 °	-0.04	0.15	-0.53	-1.86	-0.92	-0.77	-0.96	-0.79	-0.64	-0.91
平均值	0.02	0.31	-0.02	-0.37	-0.50	-0.49	-0.62	-0.54	-0.44	-0.34

通过理论计算与实际测量,验证了轮廓度测量误 差补偿方式的正确性。

## 6 结束语

针对返回式卫星结构的接触式轮廓度测量方法, 经过轮廓度测量误差理论分析及试验验证,证实了轮 廓度测量误差补偿的正确性,同时提高了轮廓度检测 数据的准确性。

## 参考文献

 1 倪颖,余景池,郭培基,等.小型非球面轮廓测量仪的原理及应用[J]. 光学精密工程,2003,11(6):612~616

- 2 徐丽丽,白万民.接触式测头测量中测头半径补偿的研究[J].机械工程 与自动化,2006(6):61~66
- 3 高健,陈岳坪,邓海洋,等.复杂曲面零件加工精度的原位检测误差补 偿方法[J]. 机械工程学报,2013,49(19):133~143
- 4 李春,刘书桂.三坐标测量机的测头半径补偿与曲面匹配[J]. 仪器仪表 学报,2003,24(4)期增刊:145~147
- 5 隋天中,王忠本.基于半球形测头的自由曲面截形测量方法[J]. 计量学报,2003,24(3): 174~253
- 6 王立成,黄信达,丁汉.原位检测系统中触发式测头的误差分析与补偿[J].中国机械工程,2012,23(15):1774~1778
- 7 赵长喜,卫月娥.大型薄壁密封舱的轮廓度检测方法[J]. 航天工艺, 2001(5): 35~36