

小型化快响应阀门装配工艺研究

刘 翔,袁晓东,刘 英,马瑞利
(西安航天发动机有限公司,陕西 西安 710100)

摘 要:小型化快响应阀门的组成零件特征尺寸小、形位公差要求高,其加工和装配过程中易偏差积累过大,导致阀门性能不合格。针对此类问题,以空间装配尺寸链数学模型为基础,通过构建、分析偏差传递方程,定位零件加工和装配中对阀门性能影响大的环节,并对该环节进行工艺控制。通过建立某小型化快响应电磁阀的装配尺寸链,计算封闭环偏差传递方程,得出阀杆和阀座的加工和装配过程是影响阀门使用性能的重要环节。根据分析结果,制定出了满足要求的零件加工和装配工艺方案。

关键词:小型化快响应阀门;装配尺寸链;偏差传递方程;装配工艺

中图分类号:V463-34 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9374(2018)06-0062-06

Research on assembly technology of miniaturized quick response valve

LIU Xiang, YUAN Xiaodong, LIU Ying, MA Ruili
(Xi'an Space Engine Company Limited, Xi'an 710100, China)

Abstract: The components of miniaturized quick response valve have the characteristics of small feature size and high requirement for geometric tolerance, and the machining and assembling deviation of parts will result in valve failure. In order to solve the above problem, the deviation transfer equation was built and analyzed based on the mathematical model of three-dimensional dimension chain. It can locate the part processing and assembly that has a great influence on the valve performance as well as controlling the process. By applying the above analysis method, the assembling dimension chain of a miniaturized quick response valve was established and the closed loop deviation transfer equation was solved, which can conclude that the machining and assembling process of valve spool and valve seat have a great influence on the operational performance. Therefore, the corresponding process method is developed for machining and assembling process of the part.

Keywords: miniaturized quick response valve; assembling dimension chain; deviation transfer equation; assembling technology

收稿日期:2017-04-05;修回日期:2018-03-15

基金项目:阀座密封性型面数控加工技术研究项目(2016TM·JY5008-M)

作者简介:刘 翔(1990—),男,硕士,工程师,研究领域为航天阀门机械加工与装配

0 引言

小型化快响应阀门具有响应时间快,流量控制精确,质量和体积小等特点,但该类阀门零件特征尺寸较常规阀门大幅减小(多数零件的特征尺寸介于 $\Phi 2 \times 15 \text{ mm}$ 与 $\Phi 15 \times 30 \text{ mm}$ 之间),因此加工中尺寸及形位公差难以控制,零件加工后尺寸偏差和形位公差增大,且装配时小型零件不易装配到位,会出现定位偏差增大的情况,当机加与装配的偏差累计过大时会导致阀门性能不满足设计要求的情况。要加工、装配出满足设计要求的阀门,需在平面尺寸链的基础上结合零件形位公差,构建三维装配尺寸链^[5],然后定位偏差产生环节,并制定合理的加工和装配方案。

1 装配尺寸链模型理论分析

装配尺寸链可直观体现阀门装配结构,其建立方法是先将各零件用空间向量代替,然后将空间向量依次连接,形成的封闭矢量环即为装配尺寸链模型。现以3个空间向量构成的空间尺寸链为例进行尺寸链分析说明,如图1所示,尺寸链的组成环大于3时分析方法一致。尺寸链中单一组成环 AB ,如图2所示。

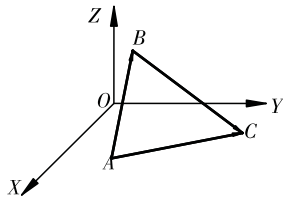


图1 三维尺寸链

Fig. 1 Three-dimensional dimension chain

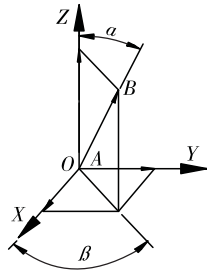


图2 单一零件空间表达

Fig. 2 Three-dimensional representation of single component

AB 的空间表达,如式(1)所示:

$$AB = (|AB| \sin \alpha \cos \beta, |AB| \sin \alpha \sin \beta, |AB| \cos \alpha) \quad (1)$$

式中: $|AB|$ 为零件的基本尺寸; α 为零件与 Z 轴的夹角; β 为零件在 XOY 平面内投影与 X 轴的夹角。以上参数可通过蓝图获得。同理,其余向量的空间表达可通过同样方法计算得到,但需要注意建立坐标系之间的转化关系。

明确所有零件转化所得的空间向量的表达式后,能够计算封闭环 AC 的表达式,如式(2)所示。

$$AC = AB + BC \quad (2)$$

其中

$$BC = (|BC| \sin \alpha_{BC} \cos \beta_{BC}, |BC| \sin \alpha_{BC} \sin \beta_{BC}, |BC| \cos \alpha_{BC})$$

式(2)结果为封闭环的理论表达形式,因零件加工和装配中均存在误差,所以需对式(2)进行修正。将其中参数 $|AB|$, $|BC|$, α 和 β 修改为 $|AB| + \Delta|AB|$, $|BC| + \Delta|BC|$, $\alpha + \Delta\alpha$ 和 $\beta + \Delta\beta$,并带入式(2),可得实际封闭环的空间表达式 CA' ,如式(3)所示。

$$CA' = (|AB| + \Delta|AB|, |BC| + \Delta|BC|) \quad (3)$$

理论封闭环和实际封闭环矢量差 ΔCA 即为封闭环的偏差,如式(4)所示。

$$\Delta CA = CA' - CA = U \cdot V \quad (4)$$

其中

$$U = (\Delta\alpha_{AB} \Delta\beta_{AB} \Delta\alpha_{BC} \Delta\beta_{BC} \Delta|AB| \Delta|BC|)$$

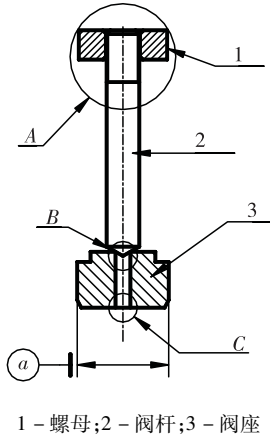
$$V = \begin{pmatrix} |AB| \cos \alpha_{AB} \cos \beta_{AB} & |AB| \sin \alpha_{AB} \cos \beta_{AB} & |AB| \sin \alpha_{AB} \\ -|AB| \sin \alpha_{AB} \sin \beta_{AB} & |AB| \sin \alpha_{AB} \cos \beta_{AB} & 0 \\ |BC| \cos \alpha_{BC} \cos \beta_{BC} & |BC| \sin \alpha_{BC} \cos \beta_{BC} & |BC| \sin \alpha_{BC} \\ -|BC| \sin \alpha_{BC} \sin \beta_{BC} & |BC| \sin \alpha_{BC} \cos \beta_{BC} & 0 \\ \sin \alpha_{AB} \cos \beta_{AB} & |AB| \sin \alpha_{BC} \sin \beta_{AB} & \cos \alpha_{AB} \\ \sin \alpha_{BC} \sin \beta_{BC} & |AB| \sin \alpha_{BC} \cos \beta_{AB} & \cos \alpha_{BC} \end{pmatrix}$$

由式(4)可知,封闭环偏差 ΔCA 由矩阵 U 和 V 构成,矩阵 U 是偏差源矩阵,其中元素是对封闭环偏差产生影响的因素;矩阵 V 是偏差敏感矩阵,其中元素表示相应偏差源的敏感程度。结合蓝图尺寸与形位公差数据可对偏差敏感矩阵 V 中各元素进行数值计算,敏感度大的偏差源对应的零件即为需在机加和装配中进行工艺控制的环节。

2 装配工艺分析

2.1 装配尺寸链建模与分析

具有代表性的小型化快响应阀门结构如图 3 所示。



1 - 螺母; 2 - 阀杆; 3 - 阀座
图 3 阀门密封结构
Fig. 3 Valve seal structure

此时阀杆(序号 2)与阀座(序号 3)接触保持关闭密封状态, 阀门开启时阀杆与阀座分离, 液体通过阀门进入下级。使用第 1 节装配尺寸链建模与分析理论对该结构进行分析, 选取 A, B 和 C 三点作为装配点, 再将阀杆、阀座使用空间矢量表示, 依次连接空间向量后, 形成空间装配尺寸链, 如图 4 所示。

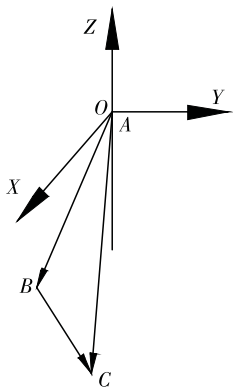


图 4 阀门装配尺寸链

Fig. 4 Assembling dimension chain of valve

其中 AB 为阀杆简化向量, BC 为阀座简化向量, 连接两处向量形成封闭空间尺寸链, 其中自然形成的向量 AC 为封闭环。

图 4 中构成偏差矢量表达 ΔCA 的 U 和 V 矩阵可由第 1 节分析的计算公式得到, 如式(5)所示。

$$U = (\Delta\alpha_1 \Delta\beta_1 \Delta\alpha_2 \Delta\beta_2 \Delta |AB| \Delta |BC|)$$

$$V = \begin{pmatrix} |AB| \cos\alpha_1 \cos\beta_1 & |AB| \sin\alpha_1 \cos\beta_1 & |AB| \sin\alpha_1 \\ -|AB| \sin\alpha_1 \sin\beta_1 & |AB| \sin\alpha_1 \cos\beta_1 & 0 \\ |BC| \cos\alpha_2 \cos\beta_2 & |BC| \sin\alpha_2 \cos\beta_2 & |BC| \sin\alpha_2 \\ -|BC| \sin\alpha_2 \sin\beta_2 & |BC| \sin\alpha_2 \cos\beta_2 & 0 \\ \sin\alpha_1 \cos\beta_1 & |AB| \sin\alpha_2 \sin\beta_1 & \cos\alpha_1 \\ \sin\alpha_2 \sin\beta_2 & |AB| \sin\alpha_2 \cos\beta_1 & \cos\alpha_2 \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中参数意义及数值如表 1 所示。

表 1 封闭环偏差矢量表达式参数意义及数值

Tab. 1 Parameter definition and value of deviation vector expression in closed loop

变量	变量意义	数值	备注
$ AB $	阀杆轴向长度	13.9 mm	
$ BC $	阀座轴向长度	2.3 mm	
α_1	阀杆与 Z 轴的夹角(阀杆圆柱度换算)	7.19×10^{-4}	由于数值较小, 采用 $\sin \alpha$ 代替
α_2	阀座与 Z 轴的夹角(阀座圆柱度换算)	4.34×10^{-3}	
β_1	XOY 平面内阀杆投影与 X 轴的夹角	$0^\circ/90^\circ$	选取极限位置, 相应的在计算中选取极限值
β_2	XOY 平面内阀座投影与 X 轴的夹角	$0^\circ/90^\circ$	

使用表 1 中各变量数值进行计算, 可得到计算结果如式(6)所示。

$$V = \begin{pmatrix} 13.9 & 0.009\ 994 & 0.009\ 994 \\ -0.009\ 994 & 0.009\ 994 & 0 \\ 2.3 & 0.060\ 4 & 0.060\ 4 \\ -0.060\ 4 & 0.060\ 4 & 0 \\ 0.000\ 719 & 0.060\ 3 & 1 \\ 0 & 0.060\ 3 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

分析偏差影响矩阵 V 的计算结果可知, 敏感度较大的两处为 13.9 和 2.3, 在偏差源矩阵中与以上两处敏感度对应的偏差源为 $\Delta\alpha_1$ 和 $\Delta\alpha_2$, 即装配后阀杆相对于公共轴线 a (图 3 所示)的同轴度及阀座上平面相对于轴线 a (图 3 所示)的垂直度, 因此需

在装配过程中对阀杆和阀座的加工和装配环节进行控制。

2.2 重要密封面有限元分析

阀杆和阀座的加工尺寸、形位公差以及装配偏差均对阀门性能产生影响。装配后阀杆和阀座位于阀体内部,其密封状态可使用有限元分析软件进行模拟,直观得到正常密封及偏差较大非密封状态下阀座的密封锐边应变情况。

图 5 所示为阀杆同轴度与阀座垂直度满足设计要求时密封面受应力模拟结果,其中图 5(a)为完整“阀杆—阀座”密封副显示状态,图 5(b)为仅显示阀座密封面受应力模拟结果。由图 5(b)可知,阀座上端密封锐边应变完整、均匀,选取锐边上 4 点读取应变值如表 2 所示,其应变值均匀,表明阀杆密封锥面与阀座密封锐边能够完全接触并产生均匀挤压,该状态下阀门密封性能良好。

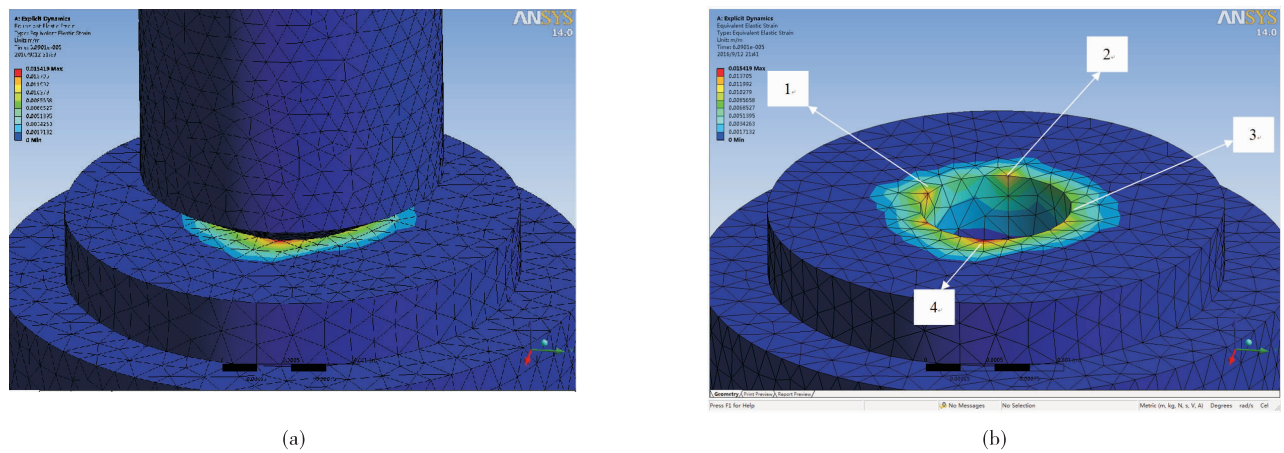


图 5 阀杆与阀座垂直度良好模拟结果
Fig. 5 Simulation results of valve spool and valve seat with good perpendicularity

图 6 所示为阀杆同轴度与阀座垂直度超差时密封面受应力模拟结果,其中图 6(a)为完整“阀杆—阀座”密封副显示状态,图 6(b)为仅显示阀座密封面受应力模拟结果。由图 6(b)可知,阀

座装配后阀座上端面密封锐边的所受应变不均匀,表明阀杆密封锥面与阀座密封锐边无法完全接触并产生均匀挤压,该状态下阀门密封性无法保证。

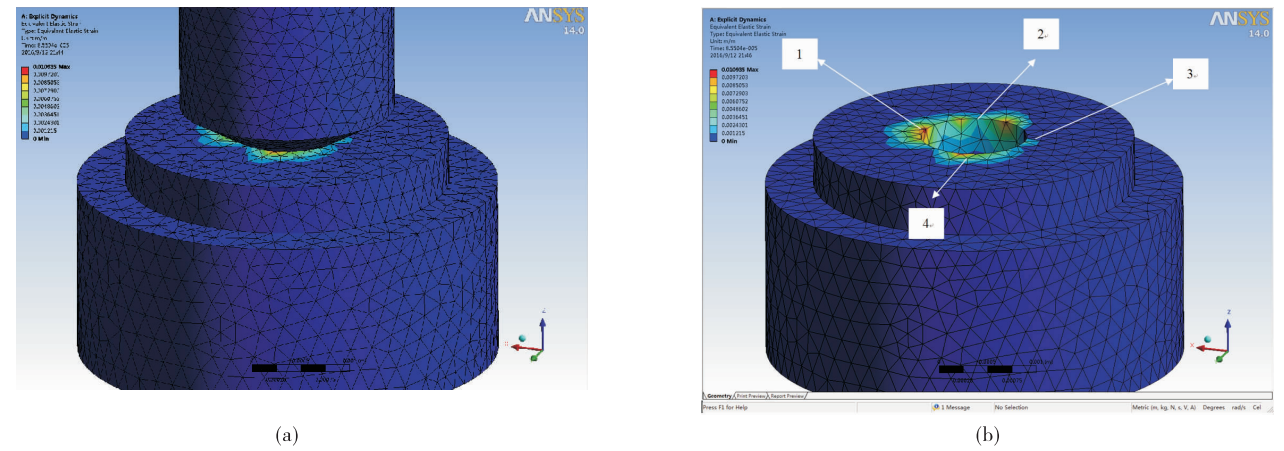


图 6 阀杆与阀座垂直度偏差较大的模拟结果
Fig. 6 Simulation results of valve spool and valve seat with poor perpendicularity

表 2 密封锐边应变模拟结果

Tab. 2 Strain simulation results of sharp edge in seal			
密封状态	选取点 编号	应变 σ/MPa	应变方差 S
图 5(b)	1	1.2×10^{-2}	0.38×10^{-3}
	2	1.02×10^{-2}	
	3	0.8×10^{-2}	
	4	1.3×10^{-2}	
图 6(b)	1	9.7×10^{-3}	7.17×10^{-2}
	2	2.43×10^{-3}	
	3	1×10^{-3}	
	4	7.3×10^{-3}	

3 零件加工及装配工艺设计

对阀座、阀杆的加工进行工艺设计, 阀座加工中, 其外形包含的外圆、内孔等特征需在一次装夹中加工完成, 加工完成后对密封锐边使用 20~40 倍显微镜进行观察, 要求密封锐边完整无缺口。阀杆属细长杆类零件, 长径比为接近 10, 加工应力对该零件圆柱度影响较大, 因此粗加工后先进行放置后再进行精加工。

阀门装配中也应对阀杆和阀芯的装配过程进行工艺设计, 保证阀杆装配后与公共轴线 a (图 3 所示) 具有良好的同轴度, 保证阀座装配后密封端面相对于公共轴线 a (图 3 所示) 具有良好的垂直度。阀门装配结构设计的装配流程如图 7 所示。

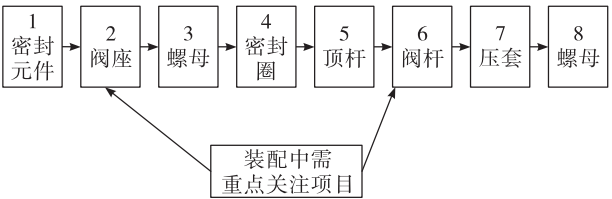


图 7 小型化快响应电磁阀装配流程图

Fig. 7 Assembly flow chart of miniaturized quick response solenoid valve

该装配流程中阀杆装配前密封元件、螺母、顶杆已完成装配, 以上三处零件对阀杆起定位作用, 后续压套、螺母起压紧、固定阀杆位作用, 因此阀杆装配后易与公共轴线 A 保持较好的同轴度。阀座

装配环节位于阀门装配流程的第 2 步, 阀座装配前, 阀体内部仅安装有两处密封元件, 其余零件均未装配, 如图 8 所示。

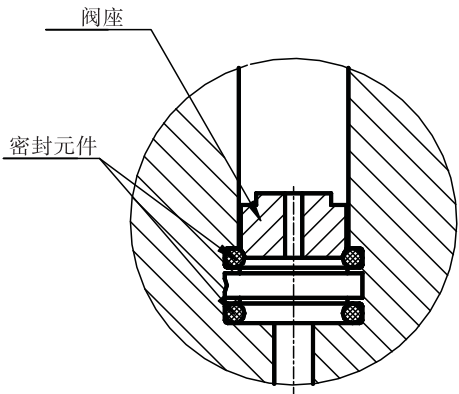


图 8 阀座装配图

Fig. 8 Assembling diagram of valve seat

阀座安装至阀体底部时需经过两处密封元件, 所受摩擦力较大, 且无可用于定位的零件, 装配过程需在阀座上端持续施加较大轴向力才可完成装配。为保证阀座的可靠装配, 设计了专用压杆对阀座进行装配, 如图 9 所示, 装配时先将阀座预装至图 8 状态后, 使用阀座压杆将阀座垂直按压至阀体底部。

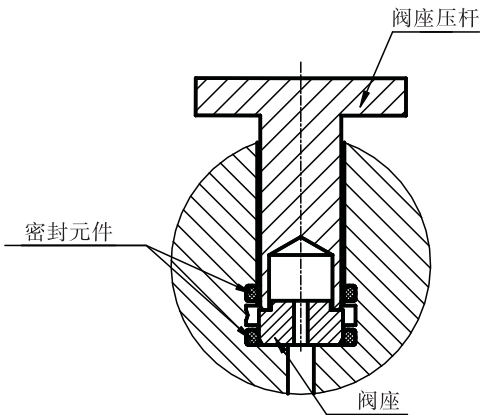


图 9 阀座压杆使用示意图

Fig. 9 Schematic diagram of valve seat with pressing bar

该装配过程阀座受到轴向定位, 易通过密封元件安装至阀体底面, 安装后可保证上端面与公共轴线垂直度在技术要求范围内, 且密封锐边不受损坏。

4 零件加工及装配结果评价

对新制的阀座、阀杆的形位公差进行检测, 结

果如表 3 所示。

表 3 零件形位公差表
Tab. 3 Geometric tolerance table of parts

mm			
零件名称	形位公差名称	工艺设计前形位公差数值	工艺设计后形位公差数值
阀座 阀芯	垂直度 (密封面)	0.05 - 0.06	0.02
	圆柱度 (外圆)	Φ0.015 - Φ0.020	Φ0.005
	同轴度 (外圆)	Φ0.04 - Φ0.05	Φ0.02

使用新制的阀杆、阀座按照图 7 所示的装配流程进行阀门装配,其中阀座装配后采用 20~40 倍显微镜进行观察密封棱边,密封棱边清晰、完整、无缺口,未进行装配工艺设计时阀座装配后密封棱边存在损伤、缺口。

阀门装配后阀杆与阀座处的密封性如表 4 所示。

表 4 阀座与阀杆密封性
Tab. 4 Seal property between valve spool and valve seat

设计要求	泡/3 min	
	装配工艺设计前漏量	装配工艺设计后漏量
3 (皂泡法)	20 - 30	≤2

由上述测量、试验结果可知,通过理论分析及根据理论分析专门进行的工艺设计能够对阀门零件生产、阀门装配进行指导,并且能够提高阀门装配后性能。

5 结论

小型化快响应阀门的内部结构紧凑,零件特征尺寸较小,加工偏差和装配偏差累计过大时会导致阀门出现不满足设计要求的情况。对于以上情况,首先将阀门装配结构转化为装配尺寸链模型,然后分析得到封闭环偏差源及其影响矩阵,使用蓝图尺寸计算封闭环偏差敏感度,针对敏感度较大的偏差源,需对相应零件的加工和装配过程进行工艺规划。使用该方法对某典型小型化快响应电磁阀的加工和装配过程制定了合理的工艺规划,满足了精微阀门的性能要求。

参考文献:

[1] 蔡延波,曹增强,李志成. 复杂装配尺寸链的分析计算[J]. 现代制造工程,2008(4):81-84.

[2] GAO J,CHASE K W,MAGLEBY S P. Generalized 3 - D tolerance analysis of mechanical assemblies with small kinematics adjustments [J]. IIE tansactions, 1998, 30 (4) : 367 - 377.

[3] 王恒,宁汝新,唐承统. 三维装配尺寸链的自动生成[J]. 机械工程学报,2005(6):181-187.

[4] 彭和平,刘晓军. 计算机辅助三维公差分析技术的研究进展[J]. 制造技术与机床,2012(9):43-47.

[5] 程彬彬,王志越,黄美发,等. 装配体三维公差建模及分析研究[J]. 机械设计与制造,2016,42(4):76-79.

[6] 邓英剑,杨冬生. 公差配合与测量技术[M]. 北京:国防工业出版社,2007.

[7] 杨文龙. 面向装配的公差设计系统研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.

[8] 刘博,许建. ANSYS 二次开发在火箭发动机法兰结构设计中的应用[J]. 火箭推进,2016,42(5):39-45.

LIU B,XU J. Application of ANSYS secondary development in design of flange structure for rocket engine [J]. Journal of rocket propulsion,2016,42(5):39-45.

(编辑:陈红霞)