

径向进气装置内孔板流动规律研究

肖竞雄¹,张品²

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院,江苏 南京 210016;

2. 中国人民解放军总参谋部第六十研究所,江苏 南京 210016)

摘 要:针对某涡轴发动机径向进气装置的进气畸变模拟需求,采用数值模拟的方式研究了径向进气时孔板流动的流场特征和AIP界面总压分布特点,并分析了不同几何参数对径向进气装置流场的影响情况。结果表明:板上无孔时,周向孔板越大造成的总压损失越大,流场畸变更强;孔数不变时,随着堵塞度 Pb 的减小,总压恢复系数 σ 和畸变指数会上升;堵塞度 Pb 不变时,随着孔数的增加,总压恢复系数 σ 都几乎不受影响,而畸变指数减小。

关键词:径向进气;孔板绕流;数值计算;流动损失

中图分类号:V231.3 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2020)04-0057-04

Study of Flow Law of Inner Orifice Plate in Radial Intake Device

XIAO Jingxiong, ZHANG Pin

(1. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing

210016, China; 2. The 60th Research Institute of General Staff Dept of P.L.A., Nanjing 210016, China)

Abstract: The radial intake device of a turboshaft engine is selected as research object. The flow field characteristics of orifice plate flow and the total pressure distribution characteristics of AIP interface are studied by numerical simulation, and the influence of different geometric parameters on the flow field of the radial intake device is analyzed. The results show that the flow loss mainly comes from the wake area behind the support plate without the arc plate; the flow around the orifice plate and the interaction between the orifice plate and the support plate promote the separation of the fluid on the support plate surface and increase the loss, while the orifice plate jet restrains the separation of the support plate surface and weakens the loss; smaller plugging rate and fewer holes make the distortion of the AIP interface flow field smaller.

Keywords: radial intake; orifice flow; numerical calculation; flow loss

0 引言

随着航空发动机的发展,现在已经不再一味地追求高性能,研究进气畸变对发动机造成影响的重要性也越发凸显出来^[1]。在发动机进气总压畸变容限能力评定实验中,关键措施之一是用特定形式的模拟器构造出符合飞行状态要求的AIP界面畸变指数、低压区范围以及总压畸变图谱。只有准确获取以上3个因素,才能正确建立畸变指数与稳定裕度之间的关系,定量估计发动机的剩余喘振裕度,实现对发动机稳定性的评定,所以模拟器对畸变构造的精度决定性地影响着发动机稳定性的评定结果^[2-4]。

孔板是流体机械中一种常见的结构,可安装于航空发动机试验台进气装置内,以模拟特定的畸变流场,其周围产生的绕流与流道内其他流动特征相互作用,对流动结构及流动损失形成影响^[5]。孔板绕流的特征类似于钝体绕流,MUKHOPADHYAY A等^[6]针对通道内钝体绕流,通过数值流场可视化对该现象的细节进行了模拟,发现钝体后涡脱落引起流场的周期性变化。M. R. Mankbadi等^[7]通过数值模拟分析了外流情况下钝体的分离流动,捕捉到方柱周围

湍流特征的各种复杂的流动现象,如高度不稳定的旋涡结构,近壁区回流和尾流湍流。流道的孔板绕流存在一定的流动损失。张海涛等^[8]基于大涡模型分别从不同角度对大雷诺数下的方柱绕流问题进行数值模拟研究,分析了方柱绕流过程的流场情况及重要流体动力参数(包含阻力系数情况)。YANG S Q等^[9]通过理论分析,对钝体绕流阻力与尾迹区之间的关系作出了初步的理论探讨。

为了更精确且高效地设计此类孔板,应获取在进气装置内结构件影响下孔板绕流机理,本文采用数值模拟的方法研究了涡轴发动机径向进气装置内孔板绕流的流动损失及对气动参数的影响规律。

1 计算方法

本文所研究的计算模型为某涡轴发动机径向进气装置,图1所示为CFD计算模型与网格。外界气流从周向环面进入,在流道内平滑过渡转向90°变为轴向,进入发动机。流道的上下壁面靠支板连接支撑固定,原始造型为5块周向均布间隔72°的支板,支板为对称翼型造型,前后缘均为圆弧型以减小流动损失,进气装置进口唇口外径 $D_1=350\text{ mm}$,出口外径 $D_2=120\text{ mm}$,内径 $D_3=48\text{ mm}$,唇口

通道高 $H = 56 \text{ mm}$ 。为保证进口气流的均匀性,在唇口向外做了一定的延伸,延伸段长 $L = 70 \text{ mm}$ 。

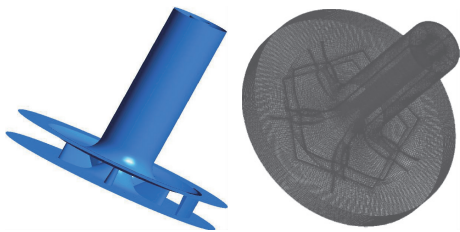


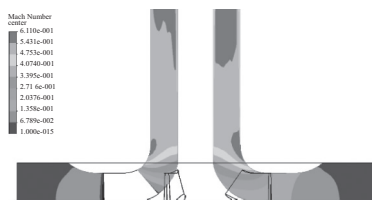
图1 计算模型与网格

采用商业软件 ANSYS ICEM 划分全局结构网格,总网格数 120 万,计算模型为 $k-\varepsilon$,对壁面网格进行加密,保证 y^+ 值满足湍流模型要求。计算采用 ANSYS CFX,以涡轴发动机地面试车的标况条件作为边界条件,给定进口总温 $T^* = 288.15 \text{ K}$ 、总压 $P^* = 101\,325 \text{ Pa}$,出口给定不同流量来调节径向进气装置使得处于正常工作状态,AIP 界面 Ma 在 $0.5 \sim 0.65$ 之间,工质为理想气体,进气装置的壁面、孔板以及支板均为绝热、无滑移壁面。

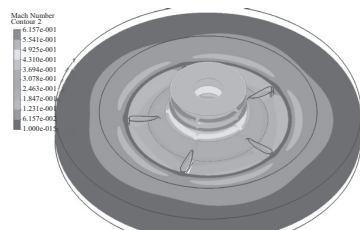
2 结果与分析

2.1 无进口弧形板进气装置内的流场分析

首先计算的为无进口弧形板进气装置。通过计算,图 2 为 AIP 界面马赫数 $Ma = 0.53$ 时的流场马赫数分布图,图 2(a) 为子午面马赫数分布,图 2(b) 为流向沿程马赫数分布。从图 2(a) 可以看出,流体在流道开始转弯后有一个内壁面指向外壁面的速度梯度。这是因为由于流道的弯曲,流线会发生弯曲,流体在向心力的作用下,内壁的压力高于外壁的压力,在压差的驱动下从内壁到外壁形成一个加速过程,而支板的存在对这个过程形成阻碍使得此加速效果受到削弱。图 2(b) 中,支板表面为曲壁,在流体通过时靠近壁面处由于黏性影响动能损失较大,可发现支板后出现一个速度亏损,在沿程分布上就可以发现在支板后有一个尾迹区,随着流动的发展,该尾迹区和主流融合消失。



(a) 子午面马赫数分布



(b) 流向沿程马赫数分布

图2 径向进气装置 $Ma = 0.53$ 流场马赫数分布

2.2 孔板周向尺寸的变化对流动影响的分析

为了研究孔板周向尺寸对于径向进气装置流场的影响规律,在计算中加入了圆弧形板,板的位置紧贴进气装置唇口,离支板前缘的径向距离为 45 mm 。计算了 3 种尺寸弧形板的方案,分别对应了板的周向角度为 60° 、 120° 、 180° ,造型如图 3 所示。

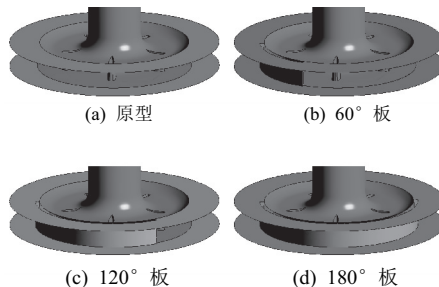


图3 周向角度不同弧形板的造型

表 1 为不同尺寸板的 AIP 界面流场参数。从表 1 中可以看出在保证流量一致的前提下,加入弧形板后对于流场的影响还是很明显的,AIP 界面马赫数 Ma 随着板弧度的增大而增大,最多比原型增加了 25%,总压恢复系数 σ 随着板弧度的增大而减小,最多比原型降低了 4%,畸变指数 DC_{60} 随着板弧度的增大而增加,最多比原型减小了 2 900%。

表1 不同尺寸板对应 AIP 界面流场参数

项目	弧形板 角度 $\alpha / (^\circ)$	AIP 界面 马赫数 Ma	总压恢复 系数 σ	畸变指数 DC_{60}
原型	0	0.534	0.996	-0.009 64
方案 1	60	0.537	0.991	-0.035 20
方案 2	120	0.579	0.980	-0.158 01
方案 3	180	0.666	0.961	-0.294 28

图 4 所示为无挡板的初始造型方案和 3 种不同周向角度弧形板方案下的流线分布与 AIP 界面总压恢复系数 σ 分布。可以看出,在无板阻挡时,流体自唇口均匀进气,来流与支板的攻角为 0° ,附面层分离小,在 AIP 界面时尾迹区已经几乎和主流完全掺混,仅在外壁面与支板相对应的近壁区还能观察到细微总压损失。采用方案 1 后,流体受到弧形板的阻挡被迫从板的两侧绕流。板的左边沿距离支板较近,在支板和弧形板之间形成了一个通道,相当于流通面积突缩。孔板后静压较低,在压力梯度的作用下大量流体被加速吸入此通道内并与周围流体剧烈掺混,同时由于板和支板的阻挡作用迫使流体转弯,此处支板右侧与来流攻角增大。支板右表面发生严重附面层分离,流动中出现了旋涡,流动阻力增大。所以能明显看出此处支板的尾迹区对 AIP 界面的总压损失影响增大,而且主要集中在支板的右侧。采用方案 2 后,支板的弧形板的左边沿与支板相对位置不变,右边沿逆时针延伸 60° 。此时由于弧形板范围扩大,板后的静压更小,与边沿处的压力梯度更大,抽吸效应更加明显,能看到弧形板左右两边沿的绕流

流体被吸入到板后,左边沿与支板形成的流道比右边沿与支板形成的流道更窄,因此,气流被加速得更快。在两支板之间,被吸入形成的二次流与主流剧烈掺混,形成大量混乱的旋涡,加剧了流动损失,同时,在两个支板的共同作用下,低压区一分为二,变成了一大一小两个,范围较小的低压区的总压恢复系数最低值更低。采用方案3后,支板弧形板的左边沿与支板相对位置仍然不变,右边沿逆时针再延伸 60° 。在弧形板范围内包含了3块支板,3块支板两两之间仍然是强掺混区,低压区的大小进一步扩大,总压恢复系数最小值进一步降低,并且低压区的周向位置向着弧形板中心区域靠拢,此时也相当于进口面积缩小了一半,流体在通道内被加速得更快,因此支板尾迹区的范围和损失也增加了,在图中AIP界面能看到剩下两块没有包容在弧形板内支板的明显的总压损失尾迹增大。

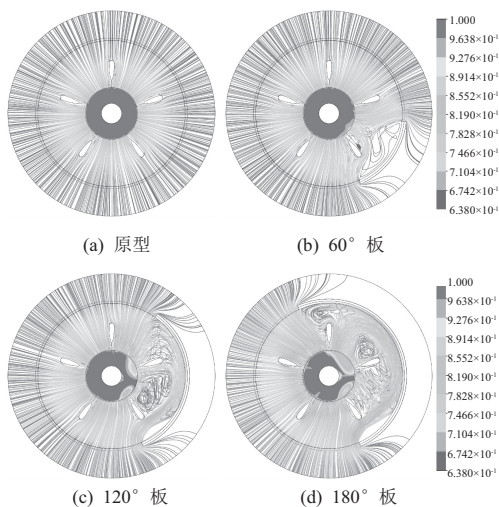


图4 周向度数不同弧形板流线与AIP界面总压恢复系数分布

2.3 弧形板堵塞率改变对流动影响的分析

本小节主要研究在弧形板上开孔的孔大小对于流场的影响,在 180° 弧形板上均匀排布5个等直径的孔,孔心之间间隔 30° ,定义堵塞率 P_b 为进口孔板面积和进口面积的比。

计算4种模型对应堵塞率,分别是 $P_b = 49\%$ 、 47% 、 45% 、 42% 。造型方案如图5所示。

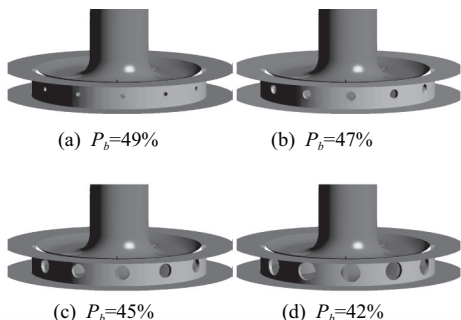


图5 不同堵塞率孔板造型

表2为不同堵塞度板的AIP界面流场参数,在弧形板上打孔以后对于AIP界面马赫数 Ma 、总压恢复系数 σ 、畸变指数 DC_{60} 都有影响,其中,堵塞率从49%下降到42%,AIP界面马赫数 Ma 随着堵塞率的降低而减小,最多减小14%;总压恢复系数随着堵塞率减小而增加,最多增加2%;畸变指数随着堵塞率减小而增加,最多增大63%。

表2 不同堵塞度板对应AIP界面流场参数

项目	堵塞率 $P_b/\%$	AIP界面 马赫数 Ma	总压恢复 系数 σ	畸变 指数 DC_{60}
方案4	49	0.639	0.962	-0.286 20
方案5	47	0.594	0.968	-0.243 62
方案6	45	0.569	0.975	-0.177 36
方案7	42	0.549	0.983	-0.106 83

图6所示为4种不同孔径方案下的流线分布与AIP界面总压恢复系数 σ 分布。可以看出,方案4时的孔径较小,通流能力有限,图上能看到只有少量流线通过5孔,对弧形板后的低速强掺混区的几乎无影响,AIP界面总压恢复系数分布也和方案3的类似。在方案5时,孔径相对于方案4扩大1倍,孔通流面积相当于放大了4倍,在弧形板内外两侧大静压差下,流体经过孔时被剧烈加速,每个孔都指向圆心,经过孔流入的高能流体与主流方向一致,相当于5股高速射流进入,直接带动弧形板右边沿所对应支板右侧的大攻角流体往主流方向偏转,减小攻角,减小了支板右侧的流动分离强度,同时冲击、带动弧形板后的杂乱无章的流体。从图6中可看出经过弧形板边沿流入被贴着板壁面流动的流体受到孔流体的冲击已减少很多,且减小了板后流体的旋涡强度。AIP界面的两个低压区融为一体,总压恢复系数最低值上升,低压区压力梯度减小。方案6、方案7孔通流面积继续增大,通流能力进一步增强,从弧形板边沿进入的绕流流体已不能贴着板壁面流动,直接被孔内大量流体吹除并汇入主流。支板上的气

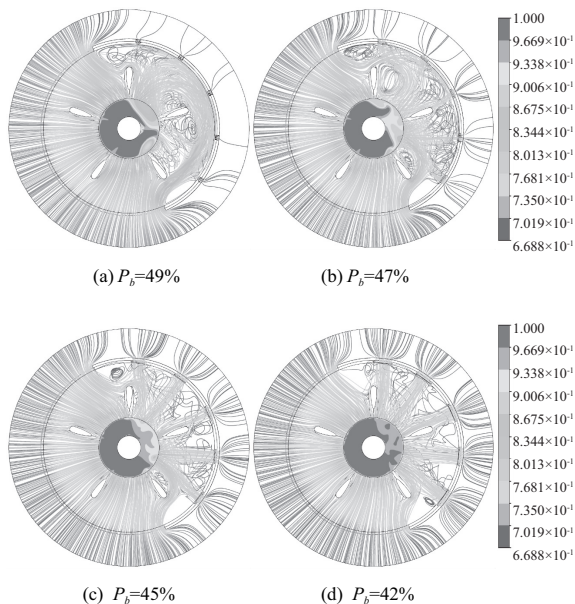


图6 不同堵塞率孔板流线与AIP界面总压恢复系数分布

流攻角继续减小,流动分离减弱,板后二次流几乎消失,板后回流、旋涡区明显减少,流动损失减少,在AIP界面的低压区内压力梯度进一步减小,流场不均匀度得到明显改善。

2.4 弧形板孔数的改变对流动影响的分析

本节主要研究了弧形板上不同孔数对于流场的影响。使用180°弧形板来开孔,分别为3孔、5孔、7孔、9孔,孔均匀分布在弧形板上,大小相等,保证所有计算堵塞率一致, $P_b=40\%$ 。因此孔数越多,相对应的孔直径越小,造型方案如图7所示。

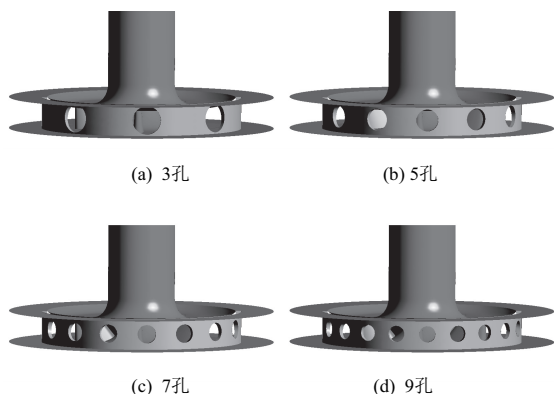


图7 不同开孔数孔板造型

表3为不同孔数板的AIP界面流场参数,能看出在堵塞率一致的前提下,孔数对于AIP界面马赫数和总压恢复系数影响都很小,都在千分之一量级,几乎可忽略不计,孔数主要影响的还是畸变指数 DC_{60} ,随着孔数的增加畸变指数 DC_{60} 增大,孔数从3增加到9,畸变指数最多降低27%。

表3 不同孔数板对应AIP界面流场参数

项目	孔数	AIP界面 马赫数	总压恢复 系数 σ	畸变 指数 DC_{60}
方案8	3	0.548	0.984	-0.099 44
方案9	5	0.549	0.983	-0.108 30
方案10	7	0.550	0.982	-0.111 48
方案11	9	0.550	0.982	-0.127 01

图8所示为4种不同孔径下的流线分布与AIP界面总压恢复系数 σ 分布。被弧形板包围的3块支板从下至上分别是支板1、支板2、支板3,可以看出,3孔时孔径最大,大量高能流体从这3孔涌入,两侧弧形板边沿进入的绕流流体受到两侧孔流体的冲击快速偏转汇入主流。由于中间孔与支板2没有完全对齐,有一定角度的偏转,中间孔流体进入被支板2分为一大一小两股,大部分流体都被分流到了支板2和支板3之间。因此在支板2和支板3之间的流体掺混比支板1和支板2之间的更加剧烈,产生了更多的流动损失,反映到AIP界面上,便能观察支板1和支板2之间的平均总压恢复系数更高。5孔时,中间孔的流体几乎都被分流到了支板2的右边,就变成了支板2

和支板3之间有3股射流混合,支板1和支板2之间有2股射流混合,3股射流掺混损失更大,因此在AIP界面上就反映出支板1和支板2之间的平均总压恢复系数更高。而到了7孔和9孔时,虽然中间孔的射流还是基本流向了支板2的右边,但是由于孔数的增加,孔不断往弧形板两边沿移动,7孔时支板3所对应的孔已经超过了支板,而且9孔时已经彻底超出支板3,所以在这时支板之间的射流掺混几乎一样多。7孔时两边各有3股射流混合,9孔时两边各有4股射流混合,所以低压区变得更加均匀,同时也能看出孔数越多,射流越多,在弧形板后也能越快完成气流的掺混。畸变指数降低的原因在于孔数增加,但AIP界面的平均总压基本不变,但60°低压区的平均总压在更多孔数时混合得更均匀,平均总压更低,因此 DC_{60} 值降低。

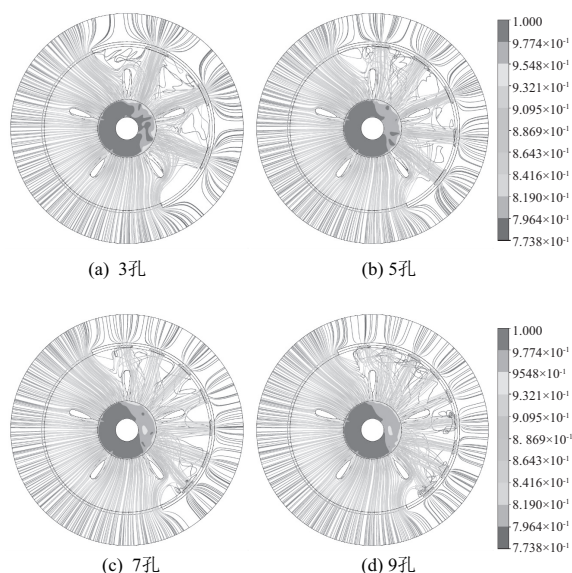


图8 不同开孔数孔板流线与AIP界面总压恢复系数分布

3 结语

本文采用数值计算方法研究了径向进气装置内孔板流动规律,分析了孔板不同开孔数、不同堵塞率的流动规律,通过研究发现:

1) 在不带孔板时径向进气装置的主要流动损失来源为对称翼型支板后的尾迹区与主流的掺混以及流道弯曲产生的旋涡。

2) 在加入弧形孔板以后,在板上无孔时,弧形板的周向角度大小对于流场的影响非常明显,周向畸变指数 DC_{60} 随着弧形板角度的增大而减小,总压恢复系数 σ 减小;在孔板上孔数不变时,随着堵塞率 P_b 的减小,总压恢复系数 σ 和畸变指数 DC_{60} 会上升,AIP界面马赫数会下降。

3) 在孔板上堵塞率 P_b 不变而孔数改变时,随着孔数的增加,AIP界面马赫数 Ma 和总压恢复系数 σ 都几乎不受影响,而畸变指数 DC_{60} 减小,可见影响总压恢复系数 σ 的主要参数是流道的堵塞率 P_b 。

(下转第77页)

可记为 L_{234} , $L_{234} = 26.153$; L_5 为硬车变形量, 即 $L_5 = 0.017$; $T_5 = 0.077$; T_0 、 T_1 不变, 如图 14 所示。尺寸链可表示为:

$$L_0 = L_{234} + L_5 - L_1$$

$$T_{0L} = \sum_{i=1}^m |\xi_i| T_i = T_1 + T_{234} + T_5 = 0.06 + T_{234} + 0.077 =$$

$$T_0 = 0.25$$

$$T_{234} = 0.113$$

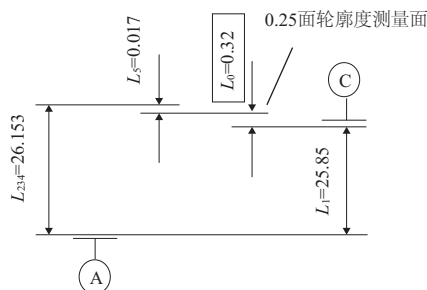


图 14 尺寸链 2

两种结果对比,后一种公差宽裕了很多,但从几次试验得出 T_{234} 为 0.19 来说仍然不够。

如果采用统计公差公式计算,大批量生产条件下,在稳定工艺过程中,工件尺寸趋近正态分布,相对分布系数 $k=1$,而平行、垂直误差趋近偏态分布,取 $k=1.17^{[4]}$ 。对于本例,有 $k_0=1$,压焊高度和硬车变形与形状误差有关,可取 $k_{234}=k_5=1.17$, $T_0=0.25$, $T_1=0.06$;硬车变形量由于变动量较大,可取 $T_5=0.08$, $T_{234}=0.19$,则有:

$$T_{0s} = \frac{1}{k_0} \sqrt{\sum_{i=1}^m \xi_i^2 k_i^2 T_i^2} = \sqrt{k_1^2 T_1^2 + k_{234}^2 T_{234}^2 + k_5^2 T_5^2} =$$

$$\sqrt{0.06^2 + 1.17^2 \times 0.19^2 + 1.17^2 \times 0.08^2} = 0.249$$

极值法公差公式计算,得到各组成环公差最小,可保证产品 100% 互换。用统计公差公式计算,各组成环按正态分布,同样封闭环也符合正态分布。由概率论理论可

知,合格产品实际尺寸处于 $[\text{USL}, \text{LSL}]$ 的尺寸区间内,且在正态分布中,实际尺寸落在 $[\mu-3\sigma, \mu+3\sigma]$ 区间的概率为 99.73%^[6]。按以上结果,仍会有大约 0.27% 的产品超出要求。

综上所述,面轮廓度 0.25 公差分配到焊接、硬车变形量等不确定变量上,大批量生产时很难达到 100% 合格,需要在各个环节严格控制,实现精细化生产,目前合格率在 99.8% 左右;另一方面,从装配使用方面分析,面轮廓度设计要求可适当放宽至 0.35 左右,这样可有效降低成本,利于大批量生产。

4 结语

本文通过尺寸链分析工艺尺寸,大胆改造进口设备的工装结构,使之达到制造工艺要求,给出了某型 9 速自动变速器太阳轮总成面轮廓度有效的工艺方案,有效提升了产品质量,顺利实现国产化,并对同类产品有一定借鉴意义。

参考文献:

- [1] 国家标准化管理委员会. GB/T 1182-2018 产品几何技术规范 几何公差形状、方向、位置和跳动公差标注[S].
- [2] 王廷强. GD&T 基础及应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2013.
- [3] 郝雪玲,张林. 背吃刀量对中小型轴承零件硬车变形的影响[J]. 轴承, 2016(11): 34-36.
- [4] 国家标准化管理委员会. GB/T 5847-2004 尺寸链计算方法[S].
- [5] 刘绍力. 基于直线尺寸链几何公差工艺尺寸链的求解[J]. 设备管理与维修, 2017(17): 66-68.
- [6] 霍春景,单红波,赵一民,等. 基于统计过程控制的变速箱尺寸链优化设计方法研究[J]. 机械传动, 2018(7): 66-76.

收稿日期: 2019-03-26

(上接第 60 页)

参考文献:

- [1] 刘大响,叶培梁. 俄罗斯的发动机进口流场畸变评定指南[J]. 燃气涡轮试验与研究, 1994(3): 1-10.
- [2] 汪涛,姜健,史建邦. 进气道/发动机相容性试飞中总压畸变数据的采集与处理[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2012, 25(2): 54-58.
- [3] 孔迪. 某型航空发动机进气压力畸变试验研究[J]. 航空发动机, 2014, 40(3): 60-65.
- [4] 余安远,王琴芳. 一种进气道流场畸变模拟装置的研究[J]. 航空动力学报, 2001(2): 123-127.
- [5] 叶巍,陆德雨,李丹. 畸变模拟板的设计与试验研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2001(2): 1-20.
- [6] MUKHOPADHYAY A, BISWAS G, SUNDARARAJAN T. Nu-

merical investigation of confined wakes behind a square cylinder in a channel[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2010, 14(12): 1473-1484.

- [7] M R Mankbadi, N J Georgiadis. Examination of parameters affecting large-eddy simulations of flow past a square cylinder[C]. Aiaa Fluid Dynamics Conference, 2014.
- [8] 张海涛,曹曙阳. 基于动态亚格子模型的方柱绕流大涡模拟[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2013, 29: 434-439.
- [9] YANG S Q, BALACHANDAR R. Determination of velocity distribution and flow resistance in vegetated channel flows. River Flow 2016: Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics[C]. Leiden: CRC Press, 2016: 2211-2218.

收稿日期: 2019-03-25