

# 基于六西格玛的发动机性能一致性控制

贾志超<sup>1</sup>, 王永生<sup>2</sup>

1. 玉柴联合动力股份有限公司, 安徽 芜湖 241009; 2. 奇瑞汽车股份有限公司, 安徽 芜湖 241009

**摘要:**为提高发动机性能一致性,以某4缸涡轮增压的汽油机为研究对象,研究发动机概念设计阶段的发动机性能六西格玛设计和批量生产阶段的发动机性能散差六西格玛流程改进,识别和控制影响发动机生产一致性的关键要素。在概念设计阶段,应用Boost软件建立一维仿真模型,确定控制因子及水平,对气道进行稳健性设计,对压缩比进行容差分析,确保优化方案实现发动机设计目标;在产品量产阶段,识别出曲轴正时偏差和发动机功率修正系数不匹配是导致影响发动机性能一致性较差的原因。采取将飞轮螺栓孔、龙门支架传感器孔位置度均降至 $\pm 0.15$ ,及优化发动机功率修正系数等改进措施,并对改进前的发动机进行试验对比验证。试验结果表明,改进措施可使80%的发动机样机性能散差控制在 $\pm 2\%$ 内。

**关键词:**发动机;六西格玛;一致性

**中图分类号:**TK416

**文献标志码:**A

**文章编号:**1673-6397(2023)03-0066-08

**引用格式:**贾志超,王永生.基于六西格玛的发动机性能一致性控制[J].内燃机与动力装置,2023,40(3):66-73.

JIA Zhichao, WANG Yongsheng. Consistency control of engine performance based on six sigma [J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2023,40(3):66-73.

## 0 引言

随着中国汽车工业的发展,国内很多自主品牌汽车生产企业具备自主开发发动机的能力,掌握了发动机开发的核心技术,生产的发动机性能可以达到国际一流水平。但受制于国内发动机制造工艺及管理水平,国产发动机性能的一致性与国外先进发动机相比还有一定差距,对产品性能一致性的研究还处在起步阶段<sup>[1-3]</sup>。

发动机性能一致性是产品质量的重要保障,不仅反映企业的研发能力,还体现企业的制造、加工、管理水平,是企业的核心竞争力。目前我国汽油发动机型式认证及生产一致性试验以文献[4]为依据,发动机生产一致性的功率允差为 $\pm 5\%$ ,转矩允差为 $\pm 6\%$ 。随着国六排放标准的实施,以及整车动力性、经济性对汽油性能一致性要求的提高,动力性能允差 $\pm 5\%$ 已不能满足高品质发动机的生产一致性要求。许多制造商开始以更严格的标准控制发动机生产一致性,某公司自2013年开展“发动机转矩 $2\text{ N}\cdot\text{m}$ 质量控制工程”,建立了一套完整的发动机性能开发及过程控制体系:在新产品开发阶段,均按照性能散差不超过设计指标的 $\pm 2\%$ 进行质量考核;生产阶段要求80%的样本产品性能散差在 $\pm 2\%$ 内,性能散差超过 $\pm 4\%$ 进行风险预警。

本文中有一款4缸涡轮增压汽油机为研究对象,应用六西格玛管理方法,在产品概念设计阶段对性能指标进行六西格玛设计(design for six sigma, DFSS),产品批量生产阶段应用六西格玛流程改进对性能散差进行分析,识别出影响发动机性能一致性偏差的关键要素并进行流程控制,使80%的发动机样机性能散差不大于 $\pm 2\%$ 。

**收稿日期:**2023-01-09

**第一作者简介:**贾志超(1970—),男,河南周口人,工程硕士,高级工程师,主要研究方向为乘用车、商用车、航空活塞式发动机性能开发、可靠性提升,E-mail: jiazhichao@kengine.cn。

# 1 六西格玛管理方法

六西格玛是一套系统的、集成的业务改进方法体系,旨在持续改进业务流程,实现顾客满意的管理方法。在产品阶段,通过 DFSS,合理地应用多种工具、方法,设计出满足顾客期望的产品;在生产阶段,对现有生产过程应用六西格玛过程改进(DMAIC 流程),即过程界定(define)、测量(measure)、分析(analyze)、改进(improve)、控制(control),从而提高质量和服务、降低成本,达到顾客完全满意,提高产品竞争力的目的<sup>[5]</sup>。

六西格玛诞生于 20 世纪 80 年代中期,是对全面质量管理,特别是质量改进理论的继承和发展<sup>[6]</sup>。经过不断完善,目前六西格玛理论已经发展到第四代,不仅是一种质量改进的方法,已经成为企业持续改进,增强综合领导能力,不断提高顾客满意度和经营绩效的一整套管理理念和系统方法,并成为企业文化的一部分。国内很多汽车制造商引入六西格玛管理,提升产品的质量<sup>[7-9]</sup>。

# 2 基于 DFSS 的发动机一致性设计

在发动机正向开发的概念设计阶段,不仅需要实现客户确定的性能指标,还应保证后续生产过程中产品性能的一致性。DFSS 的流程为识别、设计、优化和验证。在识别阶段,确定客户需求,建立质量屋;在设计阶段,通过仿真手段获得各关键影响因素对性能的影响程度,然后对系统级、零部件级的设计指标进行分解;在优化阶段,进行稳健设计、公差带分析等;在验证阶段,完成敏感性分析,最后通过样机进行性能验证。

## 2.1 项目识别

通过市场调研对开发的发动机进行定义,其中额定功率和最大转矩是发动机的主要动力性指标。发动机动力性指标的偏差不超过±2%是一项重大挑战,不仅牵涉到发动机产品性能定义、可靠性设计、电控数据标定,还包括试验测试系统的精度。

在项目识别阶段需要对影响发动机动力性(以功率为例)的关键系统或因素进行识别和指标分解。影响发动机动力性的关键系统和因素包括燃烧系统、进/排气系统、摩擦等,借助鱼骨图法识别影响发动机动力性的关键系统和因素,结果如图 1 所示。发动机性能开发及一致性设计主要围绕这些关键系统和要素展开。

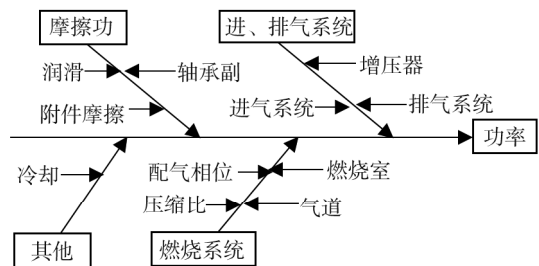


图 1 发动机动力性关键影响系统、因素鱼骨图

## 2.2 项目设计

### 2.2.1 模型

应用 Boost 一维性能仿真软件,并借助同类机型开发试验数据库,对发动机动力性、经济性指标,以及边界进行仿真分析。发动机技术参数及性能指标如表 1 所示,Boost 一维性能仿真模型如图 2 所示。

表 1 发动机技术参数及性能指标

缸径/mm	行程/mm	排量/L	压缩比
77.0	80.5	1.498	9.5
额定功率/kW		额定功率转速/(r·min <sup>-1</sup> )	
115		550	
最大扭矩/(N·m)		最大扭矩转速/(r·min <sup>-1</sup> )	
230		2 000	
低速最大扭矩/(N·m)		低速转矩转速/(r·min <sup>-1</sup> )	
210		1 500	

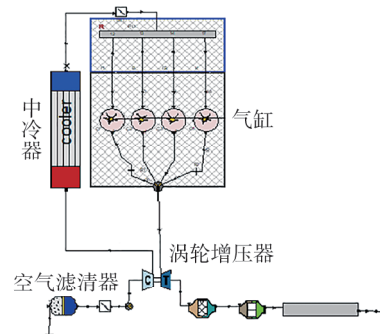


图 2 发动机 Boost 一维性能仿真模型

### 2.2.2 控制因子及水平

经过识别,发动机性能仿真的主要控制因子是气道滚流比、压缩比和增压器流量。滚流比大,燃烧速度快,可改善低速抗爆性,但是高滚流比气道的流量系数较低,高速时进气量不足,影响额定功率;压缩比是影响发动机爆震的重要参数,较低的压缩比可改善低速抗爆性,但影响高转速的燃烧热效率,造成功率下降;大流量增压器有利于提高发动机额定功率,但会造成低速喘振裕度不足。仿真计算方案中,气道有高滚流比、低滚流比2个水平,记为A1、A2;压缩比有9.2、9.5、9.83个水平,记为B1、B2、B3;增压器有大流量、小流量2个水平,记为C1、C2。

### 2.2.3 仿真计算结果

不同的控制因子和水平可形成12个方案组合。由于发动机性能仿真是多目标、多参数、多边界的优化过程,计算结果受排温、爆震等边界影响较大。为简化计算,只考虑单一因素及水平,以爆震指标作为边界,评估各方案组合对额定功率和最大扭矩的影响。仿真计算各方案额定功率和最大扭矩相对于方案1(A1-B1-C1方案)的偏差,结果如表2所示。由表2可知:若以最大扭矩为优化目标,方案5,即A1-B2-C2方案的转矩较高,同时功率下降较小,可作为基准设计方案。

表2 各方案额定功率偏差和最大扭矩偏差仿真结果

方案序号	气道滚流比水平	增压器流量水平	压缩比水平	额定功率偏差/kW	最大扭矩偏差/(N·m)
1	A1	C1	B1	0	0
2			B2	1.8	-0.5
3			B3	3.0	-6.0
4		C2	B1	-3.0	3.0
5			B2	-1.0	2.5
6			B3	-0.2	-3.0
7	A2	C1	B1	1.5	-5.0
8			B2	3.3	-5.5
9			B3	4.5	-11.0
10		C2	B1	-1.5	-2.0
11			B2	0.5	-2.5
12			B3	1.3	-8.0

## 2.3 项目优化

### 2.3.1 气道稳健性设计

文献[10]研究了一款自然吸气发动机的气道、配气相位、压缩比对发动机性能一致性的影响,发现气道和压缩比控制散差对性能一致性影响较大。文献[11]研究发现发动机缸盖制造过程中的气道滚流比差异可达24.5%,主要由气道砂芯铸造过程中的偏移造成,合理优化气门座圈附近的加工工艺可大幅降低气道性能对铸造差异的敏感性。影响发动机性能散差的因素众多,包括制造偏差、加工精度偏差等,其中缸盖气道的铸造和加工偏差对性能影响最大。气道是发动机燃烧系统的核心,细微的铸造和加工偏差就会对发动机性能造成较大的影响,并进一步影响发动机可靠性,因此有必要对缸盖气道进行稳健性设计,即气道加工鲁棒性优化。

为有效提升发动机气道的生产一致性,对加工缸盖的2种刀具进行对比。用于缸盖气门座圈加工的直角刀与球形刀对比如图3所示。

采用2种刀具各加工12套缸盖,对气道的滚流

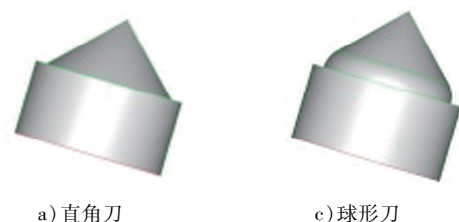


图3 缸盖加工用直角刀与球形刀对比

比、流量系数差异率进行统计,结果如图4所示。由图4可知,球形刀加工的气道的滚流比差异率在 $\pm 5\%$ 内,流量系数差异率在 $\pm 1\%$ 内,两者均小于直角刀加工的差异率。2种刀具加工气道的流量系数对比如图5所示,图中 $\beta$ 为气门升程与气门直径的比。由图5可知,直角刀加工的气道流量系数的中值高于球形刀,约3%。

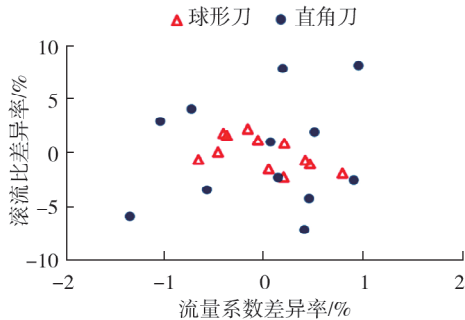


图4 2种刀具加工气道的差异率对比

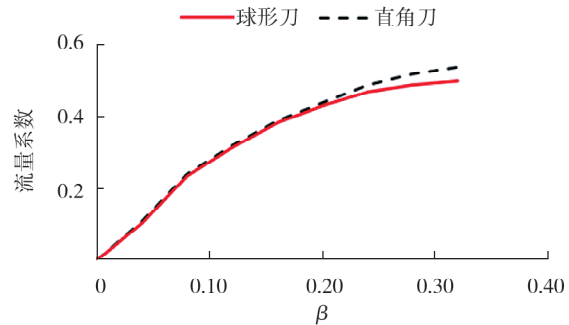


图5 2种刀具加工气道的流量系数对比

从发动机性能一致性考虑,应将发动机气道滚流比差异率、流量系数差异率分别控制在 $\pm 5\%$ 、 $\pm 1\%$ 内,因此确定采用球形刀加工方案。

### 2.3.2 容差设计

压缩比是增压发动机的一项重要设计参数,决定发动机的热效率,对动力性产生重要的影响。从发动机性能一致性控制考虑,在发动机设计阶段不仅要考虑名义压缩比,还需要考虑其散差。文献[12]采用 Boot 软件仿真分析了不同压缩比对发动机性能及其一致性的影响,发现减小压缩比散差,转矩波动平均减小了31.7%。文献[13]采用蒙特卡罗法对一款1.5 L发动机压缩比进行了公差统计分析,发现燃烧室容积对压缩比公差的影响达到35%。

开发阶段应将压缩比公差控制在 $\pm 0.2$ 内。根据压缩比的计算尺寸链,采用蒙特卡罗统计法,对影响压缩比的各关键零部件进行容差设计指标分解。常规设计中,影响压缩比的各容积及其散差占比如表3所示。由表3可知,对发动机压缩比影响较大的是缸盖燃烧室容积 $V_1$ 和活塞凸出高度容积 $V_2$ ,其散差占比分别为38%、34%。活塞凸出高度容积 $V_2$ 由缸体高度、活塞压缩高度、曲柄半径等零部件尺寸链组成,加严这些公差需要提高加工精度,导致成本大幅增加,因此对压缩比散差的控制集中在缸盖燃烧室容积上,将缸盖燃烧室容积公差由 $(39.0 \pm 0.75)$  mL减小为 $(39.0 \pm 0.50)$  mL。

表3 影响压缩比的主要容积及其散差占比

压缩比尺寸名称	公差带/ $\text{mm}^3$	散差占比/%
缸盖燃烧室容积 $V_1$	$\pm 0.750$	38
活塞凸出高度容积 $V_2$	$\pm 0.710$	34
活塞头部容积 $V_3$	$\pm 0.300$	15
缸垫孔容积 $V_4$	$\pm 0.250$	12
活塞余隙容积 $V_5$	$\pm 0.019$	1

测量88套缸盖燃烧室容积,将结果输入 Minitab,对燃烧室容积的过程能力进行评价。

过程能力也称为工序能力,是指人员、设备、材料、测量等可能影响质量的因素充分规范化时,过程的加工水平满足技术标准的能力。实际生产中,某质量特性测量数据的分布中心 $\mu$ 与公差范围中心常常不重合,即有偏移,此时过程能力指数

$$C_{pk} = \min \left\{ \frac{T_U - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - T_L}{3\sigma} \right\}, \quad (1)$$

式中: $T_U$ 、 $T_L$ 分别为质量特性公差上、下限, $\sigma$ 为质量特性的标准差。 $C_{pk} > 1.33$ ,表明质量特性过程能力充足。

由式(1)可得,原燃烧室容积的 $C_{pk} = 1.38$ ,过程能力符合要求。燃烧室容积公差加严至 $(39 \pm 0.5)$  mL后, $C_{pk} < 1.33$ ,需要控制缸盖燃烧室容积的散差,主要控制措施是提高缸盖铸造时燃烧室镶块的定位精度。

## 2.4 样机验证

完成发动机概念设计,并对极限公差样机进行热力学开发及标定。极限公差样机的组合方式为小压缩比-低滚流缸盖(样机公差下限)和大压缩比-高滚流缸盖(样机公差上限)。为了充分验证极限样机的极限性能散差,装配标准样机、公差上限样机、公差下限样机3种状态的发动机样机,3种发动机外特性验证曲线如图6所示。由图6可知,标准样机动力性达到设计指标,并且边界合理,公差上、下限样机的最大和最小转矩分别为216、205 N·m,误差在±5%范围内。

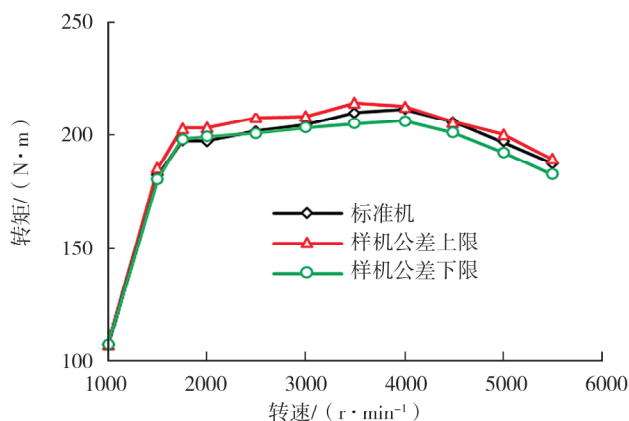


图6 3种样机外特性验证曲线

## 3 发动机性能改进

发动机开发完毕后进入量产阶段,产能可达到500台/d以上,此时若抽检测试发动机性能出现一定的散差,可能超过±2%,甚至超过±5%。为改善发动机性能一致性,应用DMAIC流程对性能一致性散差控制进行分析。

### 3.1 过程界定

2019年抽检样机41台,其性能走势如图7所示。由图7可知:部分发动机最大转矩散差超过了±2%,部分样机转矩低于设计指标的5%;最大转矩随月份呈现一定的周期变化,其中一月份性能最低,六月份性能较高。

计算样机最大转矩的过程能力,  $C_{pk} = -0.11$ ,转换为无偏过程的能力指数  $C_p = 0.33$ ,发动机转矩控制精度不合格,且准确度也出现问题,与设计目标有偏差,需要对其进行质量改进。

### 3.2 系统测试

#### 3.2.1 发动机性能关键影响因素

经过识别,影响发动机性能的关键因素有3类:1)影响进、排气系统的因素。如排气歧管、排气背压、空滤压降、气道(流量系数、滚流比);2)影响燃烧系统的因素。如压缩比、曲轴正时;3)测试试验边界条件。如燃油牌号(热值、抗爆性)、环境压力、环境湿度、进气温度、水温。

经过排查分析,试验控制边界条件都在标准要求范围内,气道滚流比和压缩比等发动机性能关键控制指标的生产过程能力也符合设计要求,但曲轴正时散差较大。曲轴正时信号(以曲轴转角表示,定义压缩上止点对应的曲轴转角为 $0^\circ$ )是发动机电控系统点火正时、喷油正时的基础,其精度直接影响发动机的燃烧正时,是影响性能一致性散差的重要因素。采用极值法计算各主要尺寸链对曲轴正时的影响,结果如表4所示。

由表4可知:飞轮螺栓孔的位置度公差换算为曲轴转角达到 $\pm 0.6^\circ$ ,其散差占比为44.61%,是曲轴正时散差控制的关键因素。

采用燃烧分析仪测量曲轴飞轮信号,结果如图8所示,对应的飞轮信号轮位置如图9所示。由图8、9可知,正确的曲轴正时为 $108.0^\circ$ ,但偏差状态下曲轴飞轮信号轮为 $109.5^\circ$ 。

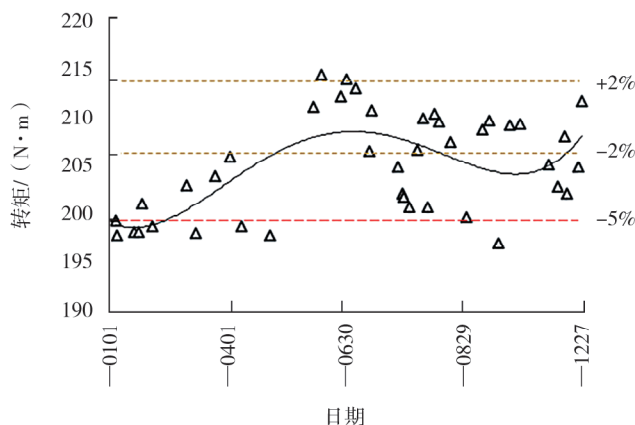


图7 发动机最大转矩变化曲线



表4 曲轴正时主要要素及其公差带和散差占比

正时尺寸名称	公差带/(°)	散差占比/%
飞轮螺栓孔位置度	±0.600	44.61
龙门支架传感器孔位置度	±0.300	22.30
信号齿缺口位置度	±0.170	12.64
框架正时销螺纹孔位置度	±0.130	9.67
曲轴正时销孔位置度	±0.075	5.58
龙门支架定位销孔位置度	±0.050	3.72
离壳定位销孔位置度	±0.020	1.49

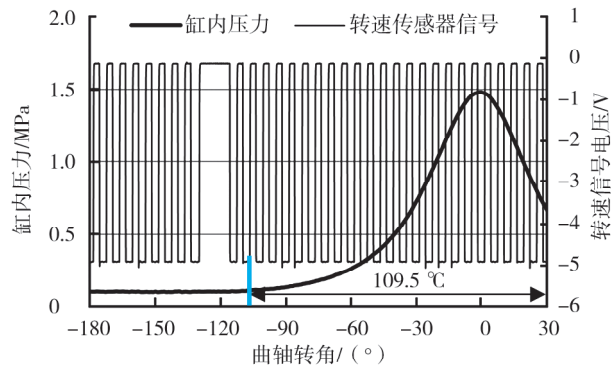


图8 曲轴飞轮信号测试结果



a) 正确位置



b) 极限位置

图9 飞轮信号轮位置

### 3.2.2 台架测试系统分析

环境条件影响发动机的进气状态,进而影响发动机功率输出,因此发动机性能测试时需要进行环境条件功率修正,提升发动机测量系统分析(measurement system analysis,MSA)能力。有研究指出,随着发动机技术升级,环境条件对发动机的性能影响更复杂,文献[4]定义的发动机功率修正系数已不适合发动机性能散差不大于±2%要求<sup>[14]</sup>。

文献[4]定义的发动机功率修正因数

$$f = \left( \frac{99}{p - p_w} \right)^{1.2} \left( \frac{T}{298} \right)^{0.6}, \quad (2)$$

式中: $p$ 为以kPa为单位的大气压力的数值; $p_w$ 为以kPa为单位的水蒸气分压的数值; $T$ 为以K为单位的进气热力学温度的数值。由式(2)可知,发动机功率修正系数受大气压力、大气湿度、进气温度的影响。

2019年芜湖市大气压力和大气湿度参数变化趋势如图10a)、b)所示,根据环境参数计算的发动机功率修正系数如图10c)所示。由图10c)可知:发动机功率修正系数冬天最低、夏天较高,与图7发动机最大扭矩变化趋势有一定关联,应对其进行优化。

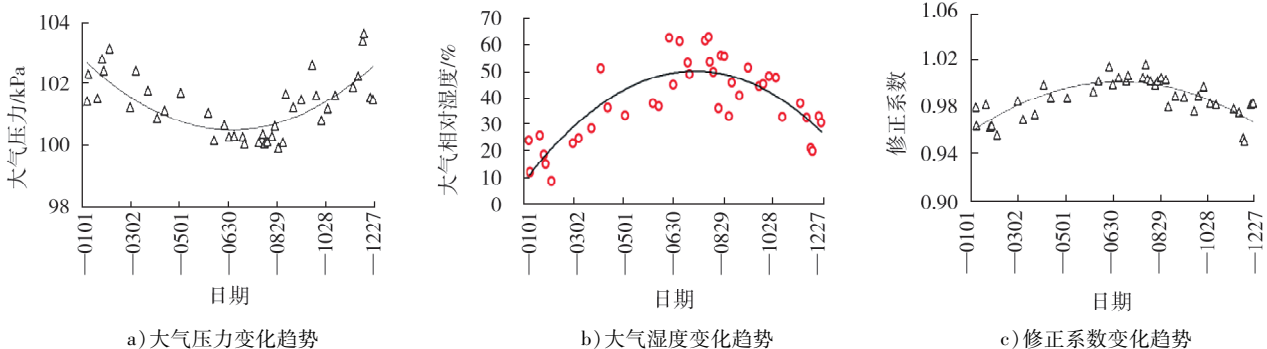


图10 环境参数与发动机功率修正系数的变化趋势

### 3.3 分析阶段

发动机曲轴正时影响发动机实际点火提前角,对发动机性能产生重要影响。通过台架试验验证,4种不同曲轴正时对发动机转矩的影响如图11所示。发动机转矩与曲轴正时的拟合曲线为 $y = 5.7039x - 410.44$ ,发动机转矩随曲轴正时(曲轴转角为 $108.0^\circ \sim 109.5^\circ$ )线性增长,每曲轴转角转矩增加达到 $5.7 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,占发动机转矩散差的27%。

### 3.4 改进阶段

由表4可知,7个曲轴正时主要因素的累计公差带达到 $\pm 1.345^\circ$ ,总公差带为 $\pm 1.500^\circ$ 左右,因此应进一步优化曲轴正时的公差设计。通过对曲轴正时的公差链分析,结合产品加工工艺,减小飞轮螺栓孔和龙门支架转速传感器的位置度,可在不大幅提高加工成本的情况下缩小公差范围。飞轮螺栓孔位置度由 $\pm 0.6$ 降低为 $\pm 0.15$ ;龙门支架传感器孔位置度由 $\pm 0.3$ 降低为 $\pm 0.15$ 。

目前,增压发动机电控系统通常具有环境压力补偿功能,在一定的环境压力变化范围内,通过调节增压器废气阀的开度补偿由环境压力降低造成的转矩下降;同样,环境压力高于发动机标定参考压力时,自动降低目标增压压力,保证发动机输出的转矩不变。因此原来的发动机功率修正系数不适用于有环境压力补偿的电控系统,需要对发动机功率修正因数进行优化。优化后的发动机功率修正因数

$$f' = \left( \frac{99}{p_s - p_w} \right)^X \times \left( \frac{T}{298} \right)^{0.6},$$

式中: $p_s$ 为以kPa为单位的发动机标定时环境压力, $p_w$ 为定值, $X$ 为湿度对发动机燃烧的影响因数,考虑到增压发动机受环境湿度的影响较大,推荐 $X = 1.2 \sim 1.5$ ,经过对标准样机的试验验证,本文中 $X = 1.5$ 。

### 3.5 控制阶段

对改进前、后发动机最大转矩进行试验测试,结果如图12所示。由图12可知:改进后,80%的发动机样机最大转矩的散差控制在 $\pm 2\%$ 内。

设计阶段,加强对压缩比、气道滚流比散差的控制;量产阶段,减小发动机曲轴正时的公差带,提升试验性能检测重复性体系能力,优化发动机功率修正因数,可有效提高发动机性能一致性。

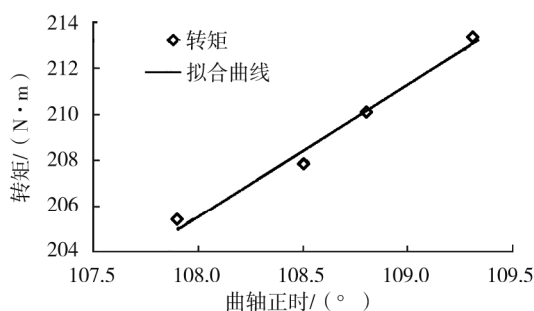


图11 不同曲轴正时对发动机转矩的影响

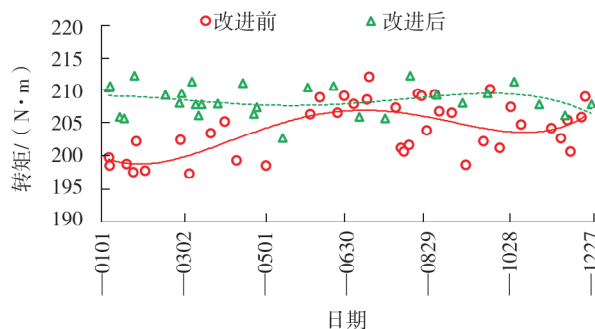


图12 改进前、后发动机最大转矩对比

## 4 结束语

六西格玛法在发动机一致性控制中,在发动机性能概念设计阶段,应用DFSS对发动机气道进行稳健性设计,对压缩比进行容差分析,确保优化方案满足发动机设计目标;在批量生产阶段,采用DMAIC方法识别影响发动机性能一致性的关键因素,通过减小曲轴正时公差带,提升发动机MSA系统的能力,优化发动机功率修正系数,实现项目预定的80%的发动机样机功率散差小于 $\pm 2\%$ 的目标。DMAIC方法是企业改进业务流程的一种有效方法,可帮助企业取得良好的产品质量效益。

### 参考文献:

- [1] 钟明明,许敏,李冕,等.发动机制造精度与性能关系研究[J].机械制造与自动化,2012,41(6):31-35.
- [2] 姜为为.以性能为目标的公差反推设计在发动机精密制造中的应用[J].中国标准化,2017(2):199-201.
- [3] 马杰,方茂东,高继东.国II阶段轻型汽车排放的生产一致性调查分析[J].汽车技术,2007(2):23-25.

- [4] 国家机械工业局. 汽车发动机性能试验方法:GB/T 18297—2001[S]. 北京:中国标准出版社,2001.
- [5] 何桢. 六西格玛管理[M]. 3版. 北京:中国人民大学出版社,2014.
- [6] 马林,何桢. 六西格玛管理[M]. 2版. 北京:中国人民大学出版社,2007.
- [7] 李红. 六西格玛应用于供应商质量改进的实践[J]. 供应商管理, 2006(4):12-16.
- [8] 佚名. 创新孵化器:江淮汽车发动机公司的六西格玛管理实践[J]. 中国质量,2017(6):10-17.
- [9] 采峰,马召. 面向装备研制的先进质量工程方法论:六西格玛设计(DFSS)研究[J]. 标准科学,2015(2):72-77.
- [10] 王哲,李红洲,翁中华,等. 自然吸气发动机性能一致性影响因素分析[J]. 小型内燃机与车辆技术,2020,49(3):23-27.
- [11] 杨俊伟,刘国庆,刘华龙,等. 进气道生产一致性对汽油机性能影响及设计优化[J]. 小型内燃机与摩托车,2014,43(1):40-45.
- [12] 龚华,许敏,李冕,等. 提高发动机性能一致性的公差优化[J]. 内燃机工程,2015,36(6):98-104.
- [13] 朱航,刘国庆,杨俊伟. 基于蒙特卡罗法的汽油机压缩比公差统计分析[J]. 小型内燃机与车辆技术,2014,43(4):58-63.
- [14] 贾志超,王志,王孟轲,等. 进气湿度对增压汽油机性能影响的试验[J]. 内燃机学报,2019,37(3):222-227.

## Consistency control of engine performance based on six sigma

JIA Zhichao<sup>1</sup>, WANG Yongsheng<sup>2</sup>

1. Y&C Engine Co., Ltd., Wuhu 241009, China; 2. Chery Automobile Co., Ltd., Wuhu 241009, China

**Abstract:** In order to improve the engine performance consistency, this paper takes the power development and performance consistency control of a turbocharged engine as the research object, and studies the application of design for six sigma in engine conceptual design and six sigma process improvement in production consistency control. In the conceptual design phase, Boost software is used to establish a one-dimensional simulation model, determine control factors and levels, perform robustness design on the airway, and perform tolerance analysis on the compression ratio to ensure that the optimization scheme meets the engine design goals; During the mass production stage of the product, it is identified that the crankshaft timing deviation and the inapplicability of the engine power correction coefficient is the reason that affected the poor consistency of engine performance. Improvement measures such as reducing the positional accuracy of flywheel bolt holes and gantry bracket sensor holes to  $\pm 0.15$ , and optimizing the engine power correction coefficient have been taken. Experimental verification shows that the improvement measures can control the performance deviation of 80% of engine prototypes within  $\pm 2\%$ .

**Keywords:** engine; six sigma; consistency

(责任编辑:郎伟锋)