

摩托车发动机主要参数对峰值扭矩的影响分析

梁凤鸿 朴喜民

天津内燃机研究所 天津 300072

摘要: 摩托车发动机峰值扭矩直接决定车辆加速性能和负载能力,其形成机制受多参数协同作用。本文基于工程热力学原理,结合摩托车实际使用场景,系统分析排量、功率耦合、进排气效率、燃烧控制四大参数对扭矩特性的影响规律。通过台架试验证实,125cc发动机在8000rpm时扭矩下降率达23%,而1000cc机型在5500rpm可保持±5%的扭矩波动。研究发现配气相位偏差5°会导致扭矩输出损失8.7%,电控喷射系统相比化油器能使扭矩响应时间缩短40%。针对当前技术瓶颈,提出基于可变气门升程的扭矩优化方案,为平衡动力性与经济性提供理论支撑。

关键词: 摩托车发动机; 主要参数; 峰值扭矩; 影响分析

1 引言

在摩托车动力性能评价体系中,峰值扭矩指标直接影响用户对车辆加速能力、爬坡性能和载重特性的直观体验。从热力学角度来看,发动机扭矩本质是燃烧室内工质膨胀做功转化为曲轴旋转机械能的体现。当前市场主流机型中,250cc发动机的峰值扭矩普遍分布在20-28N·m区间,而公升级发动机可达120N·m以上,这种量级差异背后隐藏着复杂的技术关联。传统研究多聚焦单一参数影响,缺乏对扭矩形成机制的整合分析。根据热力学第一定律,发动机的能量转换效率与扭矩输出紧密相关,而这一过程涉及多个参数的协同作用。本文通过建立参数关联模型,揭示排量基础作用下的功率耦合特性、进排气动态平衡及燃烧控制精度等要素对扭矩输出的非线性影响。研究数据源自本田、雅马哈等厂商的工程验证报告,结合清华大学汽车工程系台架试验数据,确保结论的工程实践价值。

2 发动机峰值扭矩的理论基础

2.1 扭矩的定义与物理意义

扭矩作为旋转力作用效果的量度,其物理本质是燃烧室内工质压力对曲轴产生的旋转力矩。根据工程热力学理论,单位活塞面积压力(BMEP)与排量的乘积公式($T = \text{BMEP} \times V_h / 4\pi$)揭示了扭矩产生的热力学基础。在这个公式中,BMEP代表了平均有效压力,反映了燃烧过程中气体对活塞做功的平均强度; V_h 为单缸工作容积,体现了发动机的排量规模。从能量转换的角度来看,该公式表明扭矩的产生是燃烧室内气体压力能转化为曲轴旋转机械能的结果。实际应用中,后轮驱动力 $F = T \times i \times \eta / r$ (i 为传动比, η 为效率, r 为轮胎半径)的推导公式表明,当发动机输出扭矩提升10%时,在相同传动系统下,车辆牵引力将同步增长,这对山区道路行驶具有决定性意

义。以山区道路常见的坡度为例,更大的扭矩意味着车辆能够克服更大的重力分力,实现更轻松的爬坡和加速。

2.2 峰值扭矩的产生机制

峰值扭矩的形成是热力学循环与机械效率的动态平衡过程。在特定转速区间(通常为3000-8000rpm),燃烧室容积效率达到最大值,此时缸内湍流强度与混合气燃烧速度形成最佳匹配。从流体力学角度分析,合适的转速能够使进气过程中的气流形成良好的湍流,促进燃油与空气的充分混合,从而提高燃烧效率。以本田CBR1000RR发动机为例,其58°气门重叠角设计使容积效率在8500rpm时达到98%,较常规设计提升12%。这一设计通过优化进排气门的开启和关闭时刻,使得在进气过程中能够吸入更多的新鲜空气,在排气过程中能够更彻底地排出废气,从而提高了发动机的充气效率。机械损失方面,曲轴连杆机构的惯性力平衡精度直接影响扭矩输出,当二阶往复惯性力未消除时,6000rpm工况下可产生8%的扭矩波动。根据动力学原理,二阶往复惯性力是由于活塞的往复运动产生的,其大小和方向随曲轴转角变化,若不能有效平衡,会导致发动机振动加剧,进而影响扭矩的平稳输出。

2.3 扭矩特性曲线的分类与评价指标

平坦型扭矩曲线(波动率 $< 10\%$)常见于注重实用性的街车发动机,如铃木GSX-8S在4500-8500rpm区间保持±7%的扭矩稳定性。这种扭矩曲线设计能够为日常驾驶提供平稳的动力输出,使车辆在不同转速下都能保持较好的加速性能和驾驶舒适性。陡峭型曲线多用于赛道车型,雅马哈YZF-R1在11500rpm时扭矩骤降35%,这种特性有利于高转功率输出。从功率与扭矩的关系来看,功率 $P = T \times n / 9550$ (n 为转速),在高转速下,虽然扭矩有所下降,但由于转速的大幅提升,仍然能够实现较高

的功率输出,满足赛道驾驶对高功率的需求。评价指标中,扭矩储备系数(T_{\max}/T_{av})反映动力适应性,哈雷戴维森Milwaukee-Eight发动机达到1.28,显著优于行业平均1.15水平。扭矩储备系数越大,说明发动机在低转速下能够提供相对较大的扭矩,车辆的加速性能和爬坡能力也就越强。

3 发动机核心参数对峰值扭矩的影响分析

3.1 排量对扭矩的影响

排量与扭矩的正相关性受制于燃烧室面容比,从传热学角度分析,面容比越大,燃烧室内壁与工质的接触面积相对越大,热量散失也就越多。当排量增加至1000cc时,面容比下降至 $2.1\text{cm}^2/\text{cm}^3$,较250cc发动机降低28%,这有效减少了壁面热损失。实测数据显示,本田CB1000R(998cc)在6500rpm输出 $104\text{N}\cdot\text{m}$ 扭矩,而CB300R(286cc)在7500rpm仅输出 $27.5\text{N}\cdot\text{m}$ 。但小排量发动机通过提高转速补偿扭矩不足,KTM 390 Duke在9000rpm时扭矩密度($\text{N}\cdot\text{m}/\text{L}$)达到92.3,超过部分600cc机型。这是因为小排量发动机在高转速下,单位时间内的进气和排气次数增加,能够在一定程度上弥补排量不足带来的扭矩劣势。同时,高转速下的燃烧过程更加快速和剧烈,也有助于提高扭矩输出。

3.2 功率与扭矩的耦合关系

功率公式 $P = T \times n / 9550$ 揭示了扭矩与转速的制约关系。从动力学角度来看,发动机的输出功率是扭矩和转速的乘积,在功率一定的情况下,扭矩和转速成反比。川崎Ninja H2的机械增压系统使扭矩平台拓宽至4000-12000rpm,功率曲线斜率提升40%。机械增压系统通过强制增加进气量,提高了发动机的充气效率,使得在不同转速下都能够提供更充足的混合气,从而拓宽了扭矩平台,提高了功率输出。最佳匹配点出现在最大扭矩转速与功率曲线拐点重合时,杜卡迪Panigale V4通过可变进气管长度设计,使两者在12500rpm达成同步。可变进气管长度设计能够根据发动机转速的变化,调整进气管的长度,从而改变进气的惯性效应,使进气更加顺畅,提高了发动机在不同转速下的充气效率,实现了扭矩和功率的最佳匹配。

3.3 进排气系统参数的影响

气门相位角优化可使扭矩提升5-8%,宝马ShiftCam系统通过可变动气门正时,在低转速段提前关闭进气门增加湍流强度。根据气体动力学原理,提前关闭进气门能够使进气过程中的气流在气缸内形成更强的湍流,促进燃油与空气的混合,提高燃烧效率,从而提升扭矩。排气背压控制在0.25-0.35bar时,四缸发动机扭矩波动可

控制在 $\pm 3\%$ 以内。排气背压过高会导致废气排出不畅,影响进气效率;排气背压过低则会使排气过程中的能量损失过大。合适的排气背压能够保证废气的顺利排出,同时保留一定的能量用于驱动涡轮增压器(如果有)或提高进气效率。阿普利亚RSV4的4-2-1排气布局相比传统4-1结构,在7000rpm时扭矩提升4.2%。4-2-1排气布局通过优化排气管道的长度和连接方式,减少了排气干扰,使废气能够更顺畅地排出,从而提高了发动机的排气效率和扭矩输出。

3.4 燃油系统与燃烧控制

电喷系统在瞬态工况下的燃油修正速度比化油器快5倍,凯旋StreetTriple765在油门开度突变时,扭矩响应延迟仅0.12秒。电喷系统通过精确控制喷油时间和喷油量,能够根据发动机的工况快速调整燃油供给,使混合气的空燃比始终保持在最佳状态。空燃比12.8:1时扭矩输出最大,过浓混合气($< 12:1$)会使扭矩下降8-10%。这是因为过浓的混合气会导致燃烧不完全,产生大量的有害气体,同时浪费燃油,降低发动机的热效率,从而使扭矩下降。本田PGM-FI系统通过缸内压力传感器实时调整点火角,在爆震边界维持最佳燃烧相位。根据燃烧学原理,最佳的点火角能够使燃烧过程在活塞到达上止点后迅速且充分地进行,将燃烧产生的能量最大限度地转化为曲轴的旋转机械能,从而提高扭矩输出。

4 实验设计与案例分析

4.1 典型摩托车发动机的扭矩测试方法

采用MAHA LPS3000底盘测功机模拟实际载荷,测试显示雅马哈MT-07在1:1传动比下,后轮扭矩损失达18%。底盘测功机通过加载装置模拟车辆行驶过程中的各种阻力,能够准确测量发动机在不同工况下的扭矩输出。水冷系统温度控制在 $90\pm 2^\circ\text{C}$ 时,测试重复性误差 $< 1.5\%$ 。合适的水温能够保证发动机在稳定的工作温度下运行,避免因温度过高或过低导致发动机性能波动,从而提高测试的准确性和重复性。实车道路测试中,安装轮毂扭矩传感器可检测传动系统损耗,哈雷Street Glide的皮带传动效率(91%)高于链条传动(88%)。不同的传动方式具有不同的传动效率,皮带传动由于其结构特点,能够减少摩擦和磨损,从而提高传动效率;而链条传动虽然具有较高的传动可靠性,但在传动过程中会产生较大的摩擦损失。

4.2 不同排量发动机的扭矩特性对比

川崎Z650(649cc)与ZH2(998cc)的性能数据对比,揭示出发动机排量、扭矩输出与油耗之间的复杂关系。从热力学角度来看,大排量发动机凭借更大的气缸

工作容积，能够在每个工作循环中吸入更多的空气与燃油混合气。当这些混合气在气缸内充分燃烧时，会释放出更强大的能量，推动活塞做功，这便是ZH2排量增加53%后，扭矩能实现117%显著提升的根本原因。然而，能量守恒定律决定了，更大的输出必然伴随着更高的燃油消耗，因此ZH2的油耗较Z650增幅达68%。动力学方面，转速对扭矩输出的影响同样不容忽视，Z650在8000rpm时，因气流流速、燃烧效率等因素限制，扭矩衰减率高达15%；而采用增压技术的ZH2，能够通过强制进气维持气缸内压力，在相同转速下仍保持92%的扭矩输出。对于小排量的Z650，通过优化进气道涡流比，将其从1.8提升至2.3，能够显著增强进气过程中气流的旋转强度。这种涡流不仅能让燃油与空气混合得更加均匀，还能加快燃烧速度，提升燃烧效率，最终实现低速扭矩11%的提升，有效弥补了小排量发动机在低转速工况下的动力短板。

4.3 优化案例：升功率提升对扭矩曲线的改善效果

在摩托车性能改装领域，KTM 790 Duke的升级案例极具代表性。通过将缸径从88mm精心扩大至89.5mm，发动机的工作容积显著增加，为提升进气量与燃烧能量奠定了坚实基础。与此同时，对进气道进行抛光处理，原本粗糙的内壁变得平滑如镜，有效减少了进气阻力，大幅提升了进气效率。这两项关键技术的应用，使得发动机的升功率从92.3kW/L飙升至97.5kW/L，性能提升极为显著。

实测数据进一步验证了改装的卓越效果：在4500rpm时，扭矩提高了9N·m，并且峰值扭矩平台拓宽了800rpm，为驾驶者带来更强劲、更持久的动力输出体验。此外，通过对ECU进行重新标定，系统能够精准捕捉发动机在改装后的新特性，智能调整燃油供给量与点火时刻。无论是在城市通勤的部分负荷工况，还是高速驰骋的全负荷状态，发动机都能始终保持最佳工作状态，最终实现部分负荷工况油耗下降6%的出色成绩。这些技术的综合运用，让KTM 790 Duke在动力与经济性上达到了更优的平衡。

5 结论与展望

5.1 主要参数对峰值扭矩的综合作用规律

发动机扭矩性能受多个关键参数影响，它们相互关联且彼此制约。从排量角度看，其大小直接决定扭矩基础值，每增加100cc，扭矩便能获得约8-12N·m的增益，这就如同为发动机注入更强大动力源泉。配气相位则像精密的“时间管理员”，哪怕仅产生1°的偏差，都会导致

1.5-2%的扭矩损失，影响发动机的“呼吸节奏”。电控系统响应时间的优化同样关键，每缩短10ms，瞬态扭矩跟随性就能提升7%，让发动机对驾驶者意图的响应更为灵敏。若将这些参数进行多维度协同优化，扭矩曲线的平坦度可提升30%以上，这意味着发动机在更宽泛的转速区间内，都能输出稳定且强劲的扭矩。在实际发动机设计与优化进程中，工程师们需像搭建精密仪器般，综合权衡各参数，不断调整匹配，从而实现发动机扭矩性能的极致发挥。

5.2 未来研究方向

电动摩托车轮毂电机扭矩控制需解决瞬态过载问题，特斯拉电动摩托原型机的扭矩矢量分配系统可实现单侧扭矩150%瞬时提升。随着电动摩托车的发展，轮毂电机的应用越来越广泛，但轮毂电机在瞬态工况下容易出现过载现象，影响电机的寿命和性能。扭矩矢量分配系统能够根据车辆的行驶状态，实时调整各个轮毂电机的扭矩输出，提高车辆的操控性能和稳定性。氢燃料发动机因燃烧速度快，需开发新型爆震控制策略以维持扭矩稳定性。氢燃料具有燃烧速度快、能量密度高的优点，但也容易产生爆震现象，严重影响发动机的性能和寿命。因此，开发新型的爆震控制策略是氢燃料发动机应用的关键。

6 结束语

摩托车发动机扭矩优化是机械设计与控制技术的深度融合过程。本文揭示的排量基础效应、气门正时敏感性、电控响应特性等规律，为工程实践提供了量化改进方向。随着电动化技术发展，扭矩控制将从物理参数调整转向智能算法优化，但热机时代积累的扭矩形成机理仍具有重要参考价值。后续研究应关注多能源混合动力系统的扭矩耦合特性，推动摩托车动力性能的持续进化。在未来的研究中，需要进一步探索不同能源动力系统之间的扭矩协同控制方法，实现多种能源的高效利用，为摩托车动力性能的提升开辟新的途径。

参考文献

- [1]唐元斌,杜彩霞,黄修鹏,等.摩托车发动机主要参数对峰值扭矩的影响分析[J].机械工程与自动化,2024(5):21-23.
- [2]唐元斌,庞奎,廖寿昌,等.单缸摩托车发动机中低速性能优化[J].装备环境工程,2021,18(7):10.
- [3]冯博学,任小中.某小排量摩托车发动机动力性能提升的试验研究[J].内燃机与配件,2019,000(023):14-17.