

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2015.03.03

多分量力的测试与校准技术介绍

秦海峰

(中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘 要: 介绍了与多分量力测试和校准技术相关的基本概念以及发展现状, 分析了多种多分量力传感器和多分量测力仪的基本原理和结构特点, 同时介绍了目前多分量力测量仪器的校准工作中可参考执行的标准文件及其编写思路。文中还说明了多种多分量力校准装置的结构特点和应用情况。

关键词: 多分量力; 多分量测力仪; 多分量力传感器; 多分量力测试技术; 校准方法; 校准装置

中图分类号: TB935

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2015)03-0014-05

The Structure Design for Multi-Component Loading Calibration Device

QIN Haifeng

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: The Article introduces the conception and developmental status related to multi-component force testing technique and calibration method. It also analyzes the principle and structural characteristics of multiple multi-component force transducers and multi-component dynamometers, and introduces the executable standards and the ideas about calibration of multi-component force testing instruments. In addition, the article explains the structural characteristics and application of multiple multi-component force calibration devices.

Key words: multi-component force; multi-component dynamometer; multi-component force transducer; calibration method; calibration device

0 引言

多分量力测量仪器目前广泛应用于航空、航天及车辆等的制造和测试领域。目前常见的应用有飞行器、车辆等的整机、关键部件以及配套设备, 如发动机、轮毂以及试验用假人等的受力状况测试及分析中。由于多分量力的测试能更真实地反映和更全面地分析实际受力状态, 因此其应用也逐渐增多并愈来愈显现出了其重要性。

1 多分量力

力是一个同时具有大小和方向的物理量, 对空间任一力矢量, 在择定的三维坐标系中最多可以被分解为六个分量, 见图 1, 即三个力值分量 F_z , F_x , F_y 和三个力矩分量 M_z , M_x , M_y 。

六个力或力矩分量在特定的应用场合下, 可能有不同的定义方式。通常我们会把三个力值分量中量值

最大或最关注的力分量作为主分量。当选择垂向力 F_z 作为主分量时, 三个力矩分量也可称为一个绕 z 轴的扭矩 M_z 和两个分别绕 x 轴与 y 轴的弯矩 M_x 与 M_y 。

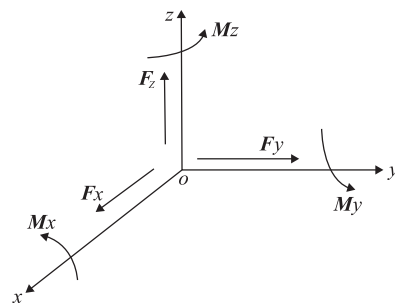


图1 力值矢量分解图

2 多分量力测试技术

多分量力测试技术是指用多分量力测量仪器对力矢量进行测试和解算的技术。在实际工程应用中, 能同时测试两个及以上力或力矩分量的场合即可称为多分量力测试。

多分量力测量仪器一般包括多分量力传感器或多

收稿日期: 2015-04-13

作者简介: 秦海峰(1975-), 女, 高级工程师, 硕士, 从事力学计量与研究工作。

分量测力仪是可用于同时感受多个分量力或力矩，并将感受到的力或力矩转变为电量信号的测量器具。由于设计思路和使用场合有所不同，多分量力测量仪器的分量情况和量程范围也会有所不同，其结构形式也是多种多样的。多分量力传感器按照结构组成特点，也可分为单体式和组合式两种多分量力传感器。多分量力传感器与测量仪表配套使用组成多分量测力仪，或多个多分量力传感器与其它辅助构件以及数据采集处理系统配套使用形成更为复杂的多分量力测试系统，如图 2 所示。

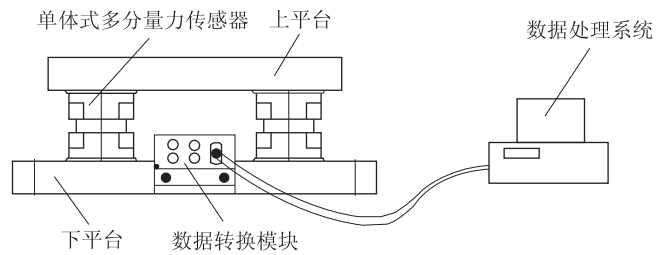


图 2 多分量力测试系统组成结构图

2.1 单体式多分量力传感器

单体式多分量力传感器是用一个或一组敏感元件同时感受并测量多个力值(力矩)分量的传感器。目前常用的敏感元件有电阻应变式和压电晶体式两种类型，电阻应变式结构的力传感器具有准确度高、结构设计适应性好等特点，压电晶体结构的力传感器具有体积小、动态响应好、工作温度范围宽等特点。

中航工业北京长城计量测试技术研究所(简称中航工业计量所)研制了单体式电阻应变式结构的多分量力传感器，传感器的弹性体为薄筒式结构，在其筒壁周围均匀布置了一圈电阻应变片用于感受弹性体的变形。如图 3 所示是该传感器的电阻应变片周向布置图。此类传感器的各分量信号之间必然存在不同程度的耦合现象。要想达到较高的测量准确度，必须要通过多种方法来进行解耦，尽量减小各分量之间的耦合影响。对于电阻应变式多分量力传感器，在弹性体设计、应变片灵敏系数的一致性、贴片位置、组桥方法等方面必须进行技术设计，尽量抵消其相互影响，在满足结构工艺设计要求的基础上，再通过建立和求解各分量输出关系的拟合方程，用软件的方法消除分量之间的耦合，从而达到较理想的解耦效果。

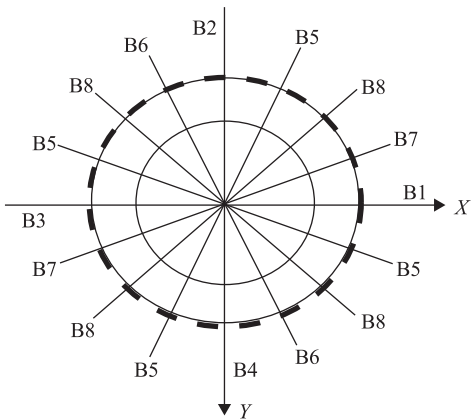


图 3 筒式弹性体的应变片周向布置图

对于敏感元件为压电晶体的单体式多分量力传感器，其基本的结构设计一般是在传感器内部布置分别对不同方向的力敏感的多层压电晶体薄片，受力之后这些晶体薄片分别产生并输出对应于各分量的电荷信号。在压电晶体式多分量力传感器的生产过程中，敏感元件的切割工艺、装配工艺以及布置方式等是保证较高的测量准确度所需要满足的技术条件。图 4 是瑞士 KISTLER 公司给出的压电晶体结构的三分量力传感器的内部结构示意图。三对压电晶体薄片分别用于感受 x 、 y 和 z 方向的力并分别输出三个力值分量 F_x 、 F_y 和 F_z 对应的电荷信号。

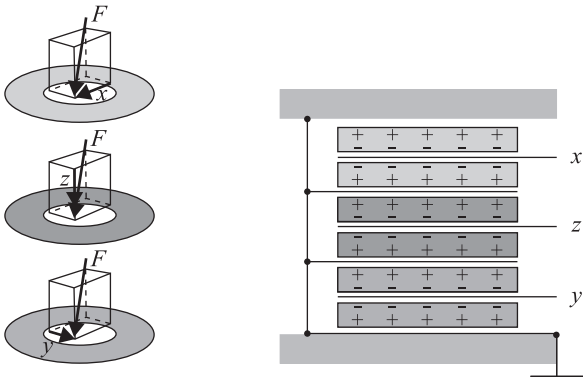


图 4 一种应变式多分量力传感器内部结构原理图

2.2 组合式多分量力传感器

组合式多分量力传感器是指由多个力传感器分别感受不同的力值或力矩分量，并经过对测量信号的组合或计算后得出力矢量的各个分量的传感器。这类传感器根据应用需要，也会被设计为不同的结构原理和特点，其通常也有由电阻应变式力传感器组合而成的组合式多分量力传感器和由压电晶体式力传感器组合而成的组合式多分量力传感器两类。

中航工业计量所研制了组合式电阻应变原理的六

分量力传感器, 传感器为由六个单轴向力传感器组合而成, 其内部结构原理如图 5 所示。图中传感器 V_1 , V_2 和 V_3 用于测量轴向力和弯矩, 传感器 O_1 , O_2 和 O_3 用于测量侧向力和扭矩, 其中三个力矩分量需要用各传感器布置位置与圆心的距离(力臂长度)以及各自所感受的力的大小和方向进行解算得到。

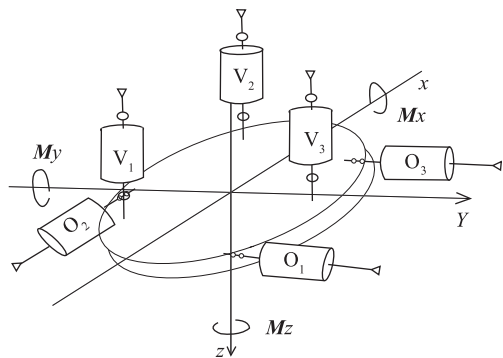


图 5 一种应变式六分量力传感器内部结构原理图

组合式压电晶体原理的多分量力传感器, 有时也称为多分量力测试平台。多分量力测试平台的基本结构一般是由多个压电晶体式单分量或三分量力传感器组合而成。以瑞士 KISTLER 公司生产的 9255C 型多分量力测试平台为例, 其组合结构示意图如图 6 所示, 可以看到平台中装配了四个三分量力传感器。按照安装情况, 对四个三分量力传感器的测试信号进行合成和解算即可得到所测的力矢量的六个分量信号。测得的三个力值信号分别为四个三分量力传感器测得的相应方向力矢量的叠加, 三个力矩信号则是相关方向力矢量与力臂乘积的叠加。在对力值信号进行叠加计算时必须考虑不同位置传感器的受力方向, 并正确应用“+”和“-”符号。

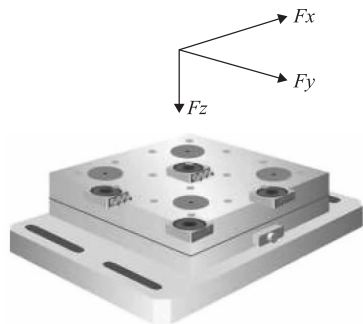


图 6 9255C 型多分量力测试平台结构原理图

3 多分量测力仪及多分量力传感器的校准方法

在国外, 多分量测力仪及多分量力传感器的生产厂家一般都有适用于其产品出厂检验的校准方法, 但

大多没有对外公布。经了解, 目前各实验室或厂家基本是参考 ISO376-2011《金属材料——单轴试验机检验用标准测力仪的标准》(一个针对拉压向测力仪进行单分量校准时依据的规范性文件)的国际标准来制定各自的校准方法。事实上, 生产厂家对相关产品进行校准时, 除各分量的独立校准以外, 还会有多分量力的组合校准, 一般都会给出各分量的技术参数指标和相互间的耦合误差指标。

国内针对多分量测力仪和多分量力传感器目前已发布的校准规范为 JJF(军工)20-2012《多分量测力仪校准规范》。该规范适用于力值分量不大于 500 kN、力矩分量不大于 10 kNm 的多分量测力仪和多分量力传感器的校准, 包含了应变式和压电晶体式结构的多分量测量仪器的校准方法。规范中规定的校准项目包含了各分量独立校准和各分量组合校准两方面的内容, 并给出了各分量的技术指标和分量之间耦合误差的校准程序和计算方法。该规范对目前常见的多分量力测试仪器的校准具有指导性意义。

为了保证该校准规范技术内容的科学性、适用性和可操作性, 在其起草的过程中, 调研分析了国家现行有效的四个相关的计量检定规程, 并参考了部分指标参数的选取和校准方法等内容。

JJG 144-2007《标准测力仪检定规程》中规定的示值误差、回零误差等技术指标对于多分量测力仪的单分量独立校准的技术指标选取具有参考意义。但由于多分量测力仪常常引用误差来进行各项指标的评价, 与标准测力仪的评价方法又有较大差异。

JJG 391-2009《力传感器检定规程》中规定的重复性、直线性、输出灵敏度等部分技术指标及校准方法与多分量力传感器的单分量独立校准时具有相似之处。

JJG 455-2000《工作测力仪检定规程》中对于示值误差、重复性等技术指标采用了引用误差来进行评价, 更符合多分量测力仪主要技术指标的评价需求。

JJG 632-1989《动态力传感器检定规程》中对于压电晶体结构的多分量力传感器进行单分量独立校准时, 在各分量的输出电荷灵敏度的计算等方面, 具有一定参考意义。

为了满足多分量测量仪器的校准需要, 在综合以上四个检定规程的部分技术内容的基础上, 增加多分量测量仪器的耦合误差这一关键指标的相关内容, 编制了 JJF(军工)20-2012《多分量测力仪校准规范》。其中耦合误差部分主要参考了各生产厂家给出的指标参数及其计算方法。由于对多分量测力仪和多分量力传

传感器的计量特性和评价方法差异不是很大,因此该规范把二者同时包含在内,以便于规范的引用和执行。

4 多分量力校准装置

针对不同结构和测量范围的多分量力测量仪器,需要合适的校准装置和校准方法来实现其校准。

目前德国、瑞士、美国等国家的技术机构都开展了多分量力校准技术的研究,如德国 PTB、德国 GTM 公司以及瑞士 KISTLER 公司等,均针对多分量力的校准需求,建立了相应的多分量力校准装置。近二十年来,我国在多分量力校准方面也进行了持续的研究,如中航工业计量所于 1998 年左右研制的六分量力校准装置和近几年研制的两分量力校准装置、大量程多分量力校准装置等。

针对不同的校准对象,多分量力校准装置的量程和结构设计也各有不同。以下将介绍五种类型的可用于对多分量力测量仪器进行校准的校准装置。

第一种是力标准机或扭矩标准机。这类装置可对各个分量分别加载并进行静态校准。这种校准方式需要事先设计加工相应结构形式的工装夹具,在校准不同分量时,常常还需要更换工装的安装方位或更换不同的工装。如图 7 所示的是某型多分量力测试平台进行单分量独立校准时部分分量的校准工装和加载方式示意图。这种校准方法准备工作比较繁琐,且无法进行各分量输出灵敏度之间的串扰,因此有比较大的局限性。

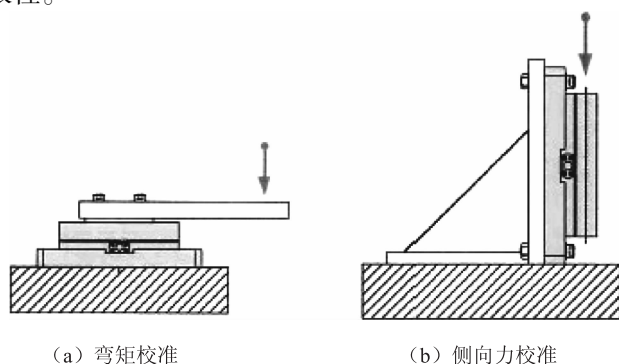


图 7 单分量独立校准校准工装及加载方式示意图

第二种是可实现两分量或三分量力独立或组合连续加载的叠加式校准装置,简称叠加式两分量或三分量力校准装置。此类装置可进行各分量的独立校准和多分量(两分量或三分量力)的同步组合校准,如图 8 所示为北京长城计量测试技术研究所研制的一套两分量力校准装置的结构示意图。此类装置通常采用与标准力传感器串接比较的方式来实现标准力值的加载和控

制,在铅垂方向(Z 向)和侧向(单 X 向或 X 向与 Y 向)分别设计合适量程的加载力源,同时串接标准力传感器,通过辅助装置将不同位置和方向的力同步协调加载到固定在工作台上的被校多分量力传感器上,从而实现对被校多分量力传感器的单分量、两分量或三分量力校准。力值加载通过电机拖动丝杠或液压缸塞系统实现,不同方位的力通过不同方向的加载系统和标准力传感器来实现。当进行力矩分量的校准时,可通过在偏离多分量力传感器中心一定距离的位置上施加力值的方式来实现。

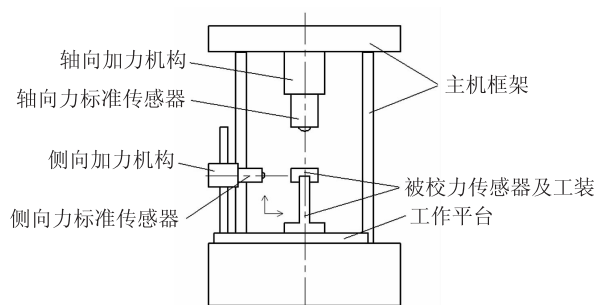


图 8 多分量力分别加载的校准装置主机结构原理示意图

第三种是静重式六分量力校准装置。此类装置能够实现六分量力分别或组合加载的静态校准,如图 9 所示为北京长城计量测试技术研究所研制的一套静重式六分量力校准装置的结构示意图,该装置主分量的测量范围为 $5 \sim 300 \text{ kN}$,侧向力分量最大为 2 kN ,扭矩分量最大为 200 Nm 。可以看出,通过采用合理可靠的耦合或解耦结构件,此类校准装置可以实现较低的测量不确定度。但是,由于加载方式的限制,相对来说,除主分量力(铅垂方向)之外,其余各分量(尤其是侧向力和扭矩分量)的量程都较窄,且各分量均不能实现连续加载,不能满足压电晶体结构的力传感器的动态校准(或力值连续加载)的需求。

第四种是多分量力组合校准装置。此类装置的结构示意如图 10 所示,装置的安装板用于固定被校多分量力传感器,各加载器中串接的标准力传感器用于测量和控制该加载器输出力值的大小,通过对各加载器的协调控制,实现力矢量的直接输出加载。通过对各加载器的加载位置、力的方向和力的大小进行合成计算可得到加载到安装板上力矢量的大小和方向。此类装置常被用于轮毂力传感器的校准场合。由于其设计、加工、装配以及控制的难度较大,影响因素相对较多,因此其输出量值测量不确定度的控制难度也很大。

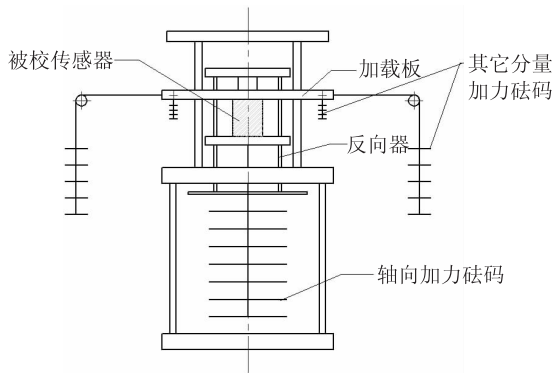


图 9 静重式六分量力校准装置

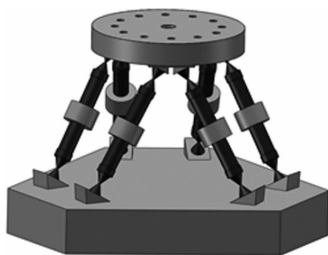


图 10 多分量力组合加载校准装置原理示意图

第五种是可实现六分量力独立或组合连续加载的校准装置，简称为叠加式六分量力校准装置。此类装置可进行各分量的独立校准和六分量力的同步组合校准。图 11 为中航工业计量所研制的叠加式六分量力校

准装置示意图，与前述第二种校准装置相比，此类装置的加载点更多，在一个加载面上的合适位置分布有多个配有标准力传感器的加载器，这样就可以同时在六个或六个以上的位置进行加载，从而实现力矢量更多分量的同步加载和校准。这类装置在进行力矩分量的校准时，同时会产生相应方向的力的加载，所以需要根据实际需要，通过结构设计进行力值的抵消，或者通过校准程式的设计来进行力值的累加计算。

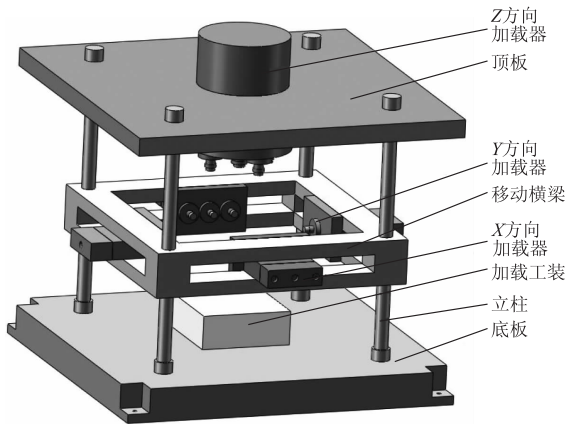


图 11 叠加式六分量力校准装置主机结构示意图

综上所述，这五种校准装置的加载方式 and 应用情况各有不同，其校准能力和特点如表 1 所示。

表 1 多分量力校准装置

序号	校准装置类型	校准能力	特 点
1	力标准机/扭矩标准机	各分量分别校准	测量范围宽，无法校准灵敏度耦合误差
2	叠加式两分量或三分量力校准装置	可实现 2-3 个方向力的同步校准	实现相对方便，尚不够全面
3	静重式六分量力校准装置	可实现 6 个分量力的同步校准	准确度较高、测量范围窄、无法实现连续加载
4	多分量力组合校准装置	在一定范围内可实现任意方向力/力矩的加载	技术难度高，结构和控制模式较为复杂，主要适用于轮毂力传感器
5	叠加式六分量力校准装置	在一定范围内可实现三个力值和三个力矩分量的任意组合加载	结构复杂，技术难度大，量程范围宽，应用面广，可实现六分量力的连续组合加载

5 结束语

由于多分量力测量仪器的应用越来越广泛，目前开展这方面研究的单位也在逐渐增多，对其应用和校准方面的研究工作也已经越来越深入，并取得了一定的成果。通过开展多分量力测量仪器和校准装置持续不断的应用研究，也将积累更多的实践经验和技术数据，并不断发现问题，解决问题，从而实现多分量力测试和校准技术水平的进一步提升。

参 考 文 献

[1] D. Girard. Development of multi-component force transducer standards by ONERA for French BNM [C]. Proc. 11th IMEKO TC-3 Conf. 1986.

[2] S. Lietz . Calibration of a force vector sensor with multicomponent calibration system [C]. IMEKO TC3 Conf. 2010.

[3] 秦海峰, 刘永录. 多分量测力仪及其校准装置的研究 [C]. 第三届中国航空学会青年科技论坛文集, 2008, 3, 399-404.

在上个脉冲末态的基础上(初始原子分布如图 5(b)中的 b1), 再经 π 脉冲作用, 1, 2 态跃迁概率各自偏移中心速度(动量) $-0.24k\hbar$, 如图 5(b)中 b2, 最终原子分部如图 5(b)中 b3。易见, 1, 2 两态的有效原子数量个下降约 1/2, 且中心速度偏离虚线所示的定频模式。

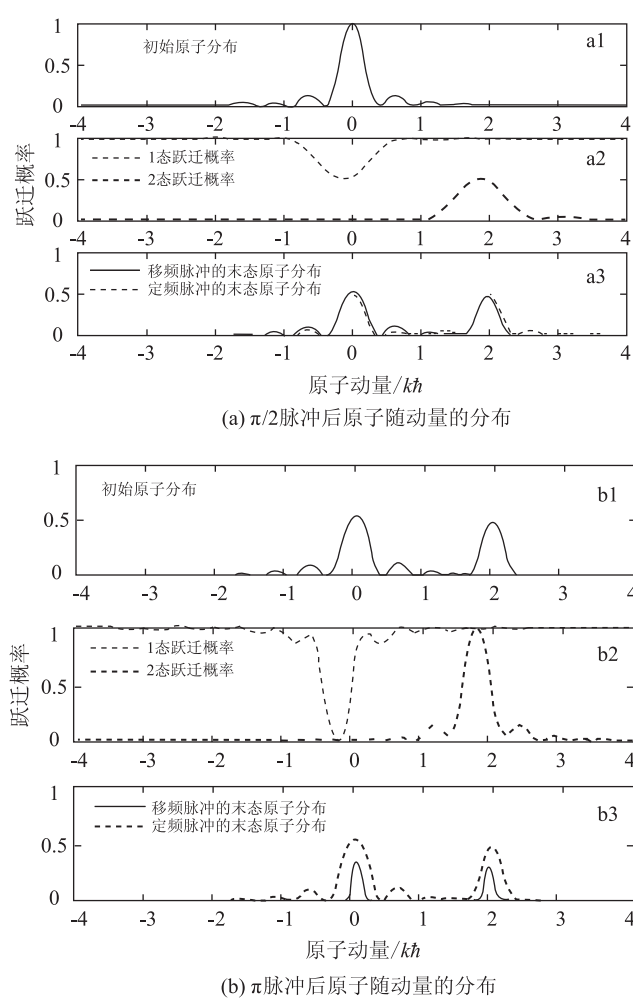


图5 有效原子在动量上的分布率

由上述分析可见, 经过拉曼光分束、翻转后的有效原子, 在中心速度附近的总数量下降了 50% 左右。另外, 两条路径最终干涉时的原子数量也存在明显的数量差, 占中心速度处总原子数约 $34\% - 30\% = 4\%$,

因此, 两条路径分束干涉仍将再次损失 8% 左右对比度。

3 结论

由于脉冲持续时间内(10 μs 量级)的多普勒频移, 原子团中心速度改变, 大量原子偏离拉曼光作用范围, 造成有效原子损失; 另外, 干涉两路的原子数量也产生了差别, 两者共同导致干涉条纹对比度理论下降约 60%。本文仅就有效原子数量这一个角度, 估算了原子干涉条纹对比度在拉曼光不能补偿脉冲持续时间内多普勒频移的情况, 最终的条纹对比度、测量灵敏度以及系统误差还应考虑频率啁啾造成的相移等因素。可以推测, 实际综合测量能力的降低, 有可能远超 60%。因此, 拉曼光作用时间内的多普勒频效应不能忽略; 如果采用定频拉曼激光, 应通过本文给出的数值方法, 对激光的中心频率点位置, 及多普勒频移进行精确计算补偿。

参 考 文 献

- [1] Dickerson S M, Hogan J M, Sugarbaker A, et al. Multiaxis Inertial Sensing with Long-Time Point Source Atom Interferometry [J]. Physics Review Letters, 2013, 111(8): 083001.
- [2] Torsten Petelski. Atom Interferometers for precision gravity measurements [D]. Paris: Université Paris 6, 2005.
- [3] 周敏康. 原子干涉重力测量原理性实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [4] 徐周翔. 冷原子干涉实验的激光频率以及过程的自动控制[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [5] Kasevich Mark, Chu Steven. Atomic interferometry using stimulated Raman transitions [J]. Physics Review Letters, 1991, 67(2): 181-184.
- [6] 王义遒. 原子的激光冷却与陷俘[M]. 北京: 北京大学出版社, 2007.
- [7] Peters A, Chung K Y, Chu S. High-precision gravity measurements using atom interferometry [J]. Metrologia, 2001, 38(1): 25-61.
- [8] Kathryn Moler, David S. Weiss, Mark Kaservich, et al. Theoretical analysis of velocity-selective Raman transitions [J]. Physics Review Letters, 1992, 45(1): 342-348.

(上接第 18 页)

- [4] 国家国防科技工业局. JJF(军工)20-2012 多分量测力仪校准规范[S]. 2012.
- [5] 国家质量监督检验检疫总局. JJG144-2007 标准测力仪国家计量检定规程[S]. 北京: 中国计量出版社, 2007.
- [6] 国家质量监督检验检疫总局. JJG391-2009 力传感器国家计

- 量检定规程[S]. 北京: 中国计量出版社, 2009.
- [7] 国家质量监督检验检疫总局. JJG455-2000 工作测力仪国家计量检定规程[S]. 北京: 中国计量出版社, 2000.
- [8] 国家质量监督检验检疫总局. JJG632-1989 动态力传感器国家计量检定规程[S]. 北京: 中国计量出版社, 1989.